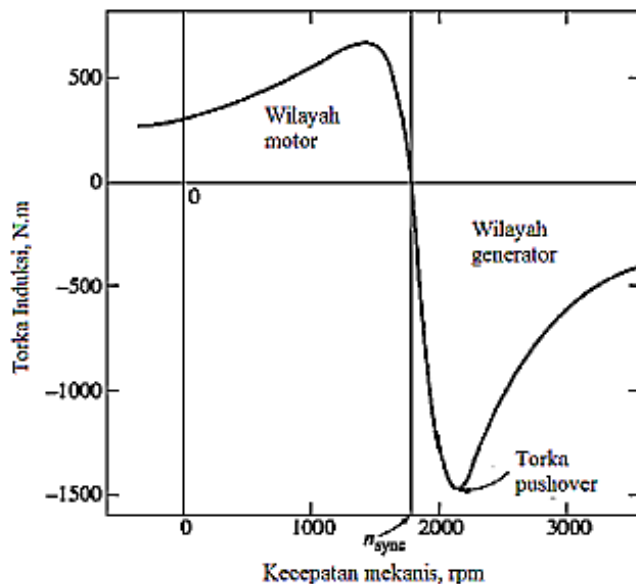


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Induksi

Mesin induksi merupakan suatu mesin yang arus rotornya diperoleh melalui proses induksi. Mesin Induksi disebut mesin asinkron sebab beroperasi pada kecepatan yang tidak sama dengan kecepatan sinkron. Pada mode motor, mesin induksi beroperasi pada kecepatan sedikit lebih rendah daripada kecepatan sinkron, sedangkan pada mode generator mesin induksi beroperasi pada kecepatan sedikit lebih tinggi dibanding kecepatan sinkron seperti terlihat pada gambar 2.1 dibawah.



Gambar 2. 1 Karakteristik torka-kecepatan pada motor induksi, memperlihatkan wilayah operasi generator.

Sumber : Chapman (2005,p.461)

Mesin induksi dapat dioperasikan sebagai motor maupun sebagai generator. Sebagai motor, mesin induksi mempunyai beberapa keuntungan, yaitu mempunyai kekokohan yang tinggi, relatif murah dan tidak memerlukan banyak perawatan (Mc Pherson, 1990,p.239).

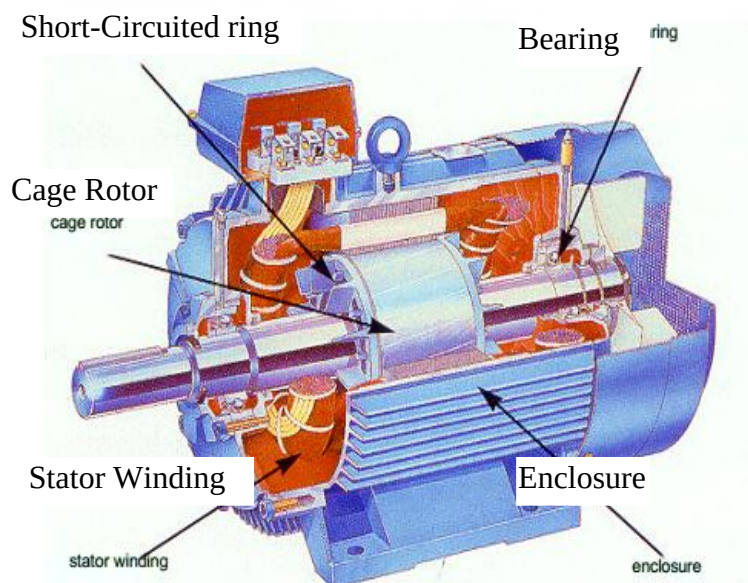
Ada beberapa keterbatasan ketika mesin induksi beroperasi sebagai generator. Karena tidak adanya rangkaian medan yang terpisah, generator induksi tidak dapat menghasilkan daya reaktif. Dalam pengoperasiannya, generator induksi justru mengonsumsi daya reaktif sehingga sumber daya reaktif eksternal harus terhubung kepada generator sepanjang waktu untuk menjaga medan magnet statornya. Sumber daya reaktif eksternal ini juga harus mengontrol tegangan terminal generator. Tanpa arus medan, generator induksi tidak dapat

mengontrol tegangan keluarannya sendiri. Normalnya, tegangan generator dijaga oleh sistem tenaga dimana generator tersebut dihubungkan.

Keuntungan besar dari generator induksi adalah kesederhanaannya. Sebuah generator induksi tidak memerlukan rangkaian medan terpisah dan tidak harus diputar secara terus-menerus pada kecepatan tetap. Selama putaran mesin masih lebih tinggi daripada putaran sinkron yang terhubung padanya, mesin akan tetap berfungsi sebagai generator. Semakin besar torsi yang diberikan kepada porosnya (sampai nilai tertentu), maka akan semakin besar daya output yang dihasilkan.

2.1.1 Konstruksi mesin induksi

Mesin induksi terdiri dari dua bagian utama. Bagian yang berputar disebut rotor dan bagian yang diam disebut stator. Rotor dan stator mesin induksi dipisahkan oleh celah udara yang seragam (Sen, 1989,p.220). Bagian-bagian mesin induksi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Bagian – bagian mesin induksi rotor sangkar tupai
Sumber : Henneberger (2002,p.124)

Stator mesin induksi merupakan struktur berbentuk silinder yang terbuat dari lapis-lapis pelat baja beralur yang diletakkan dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau pelat baja yang dipabrikan (Lister, 1993, p.210). Belitan - belitan stator diletakkan dalam alur stator (Kadir, 1981, p.37). Rangka mesin induksi dapat dilihat pada gambar 2.3 a dan statornya pada gambar 2.3 b.



A



B

Gambar 2. 3 (a) Rangka dan poros (b) Stator

Sumber : Henneberger (2002,p.125)

Rotor mesin induksi terdiri atas dua jenis, yaitu rotor belitan dan rotor sangkar tupai. Suatu rotor belitan mempunyai belitan fasa banyak yang serupa dengan stator, dan dililitkan pada jumlah kutub-kutub yang sama seperti stator (Fitzgerald, 1997, p.439) Konstruksi rotor belitan seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Konstruksi rotor belitan

Sumber : Henneberger (2002,p.125)

Pada rotor sangkar tupai, konduktor rotor berupa batang aluminium atau tembaga yang dicor pada alur rotor dan kemudian dihubungkan bersama-sama oleh cincin ujung yang terbuat dari aluminium atau tembaga cor pada setiap ujung penghantar (Fitzgerald, 1997,p.134). Konduktor rotor dan cincin ujung serupa dengan sangkar tupai yang berputar sehingga dinamakan rotor sangkar tupai. Batang rotor sangkar tupai tidak selalu ditempatkan sejajar terhadap poros mesin tetapi seringkali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi deraudengung magnetik sewaktu mesin sedang berjalan (Lister, 1993,p.211). Jenis konstruksi ini menghasilkan mesin induksi yang relatif tidak mahal dan keandalannya tinggi (Fitzgerald, 1997,p.134). Konstruksi rotor sangkar tupai ditunjukkan oleh gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Konstruksi rotor sangkar tupai
Sumber : Henneberger (2002,p.125)

2.1.2 Medan magnet putar pada mesin induksi

Bekerjanya mesin induksi bergantung pada medan magnet putar yang ditimbulkan di dalam celah udara. Medan magnet putar terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak, umumnya tiga fasa. Hubungan kumparan stator dapat berupa bintang atau delta. Adanya jarak dari setiap belitan dan beda fasa dari arus dalam belitan, maka fluksi yang dihasilkan oleh setiap fasa bergabung membentuk fluksi yang bergerak mengelilingi permukaan stator yang disebut medan magnet putar (Lister,1993,p.212).

Pada mesin induksi tiga fasa belitan dari masing-masing fasa terpisah 120 derajat listrik dalam ruang di sekitar keliling celah udara (Fitzgerald, 1997,p.153). Gaya gerak magnet (ggm) dari ketiga fasa juga berbeda 120 derajat listrik (sen, 1989,p.226), sehingga besarnya ggm total adalah :

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} N I_{mak} \cos(\omega t - \theta) \dots \dots \dots (2-1)$$

Dengan $F(\theta, t)$: ggm total sebagai fungsi ruang dan waktu (ampere-belitan)

N : jumlah belitan per fasa

I_{mak} : arus maksimum yang mengalir pada tiap fasa (A)

ω : kecepatan sudut (rad/s)

t : waktu (s)

θ : sudut listrik yang diukur terhadap magnet belitan (derajat)

Kecepatan sinkron mesin induksi adalah putaran permenit (rpm) medan magnet putar pada mesin kutub p untuk frekuensi f (putaran per detik) (Sen, 1996,p.212).

Besarnya kecepatan sinkron tersebut adalah:

$$n = \frac{2}{p} f 60 = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana : n : putaran (rpm)

f : frekuensi (Hz)

p : Jumlah kutub

2.1.3 Tegangan terinduksi pada mesin induksi

Ketika arus tiga fasa seimbang melalui belitan tiga fasa medan magnet putar berputar dalam celah udara mesin. Medan magnet putar akan menginduksikan tegangan antara kedua ujung belitan tiap fasa (Sen, 1996,p.215). Besarnya tegangan terinduksi adalah :

$$E_{rms} = 4,44 f K_w N \Phi \dots\dots\dots (2-3)$$

Dimana : E_{rms} : tegangan terinduksi efektif (V)

K_w : faktor belitan

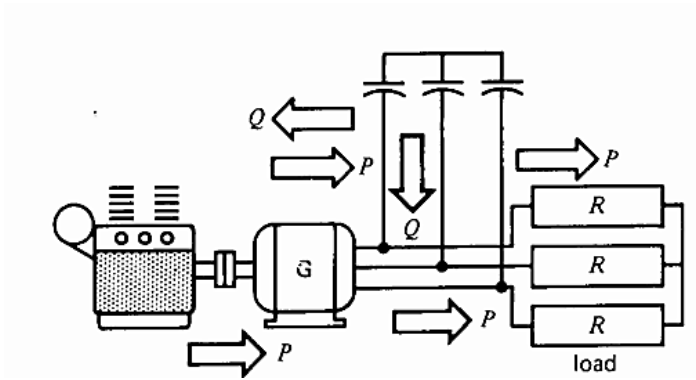
Φ : fluks celah udara (weber)

2.1.4 Generator induksi beroperasi sendiri

Generator induksi sering dimanfaatkan untuk mensuplai daya tambahan guna melayani beban di daerah terpencil. Jika daerah tersebut tidak dihubungkan dengan jala-jala, generator induksi memerlukan sumber daya reaktif dari kapasitor sehingga disebut beroperasi sendiri. Dalam hal ini penggunaan generator induksi lebih menguntungkan daripada generator sinkron. Selain konstruksi sederhana dan murah, generator induksi tidak perlu dioperasikan pada kecepatan sinkron (Mc Pherson,1990,p.302)

2.1.5 Eksitasi pada generator induksi beroperasi sendiri

Jika mesin induksi dikopel dengan penggerak mula dan diputar melebihi kecepatan sinkronnya, maka mesin induksi akan beroperasi sebagai generator dan menghasilkan energi listrik. Generator mengirim daya aktif P ke beban dan membutuhkan daya reaktif Q untuk menghasilkan medan magnet putar. Pada generator induksi yang beroperasi sendiri daya reaktif Q disuplai oleh kapasitor yang dihubungkan dengan terminal generator (Wildi, 2002,p.299) seperti ditunjukkan oleh gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Diagram hubungan generator induksi beroperasi sendiri
Sumber : Wildi (2002,p.313)

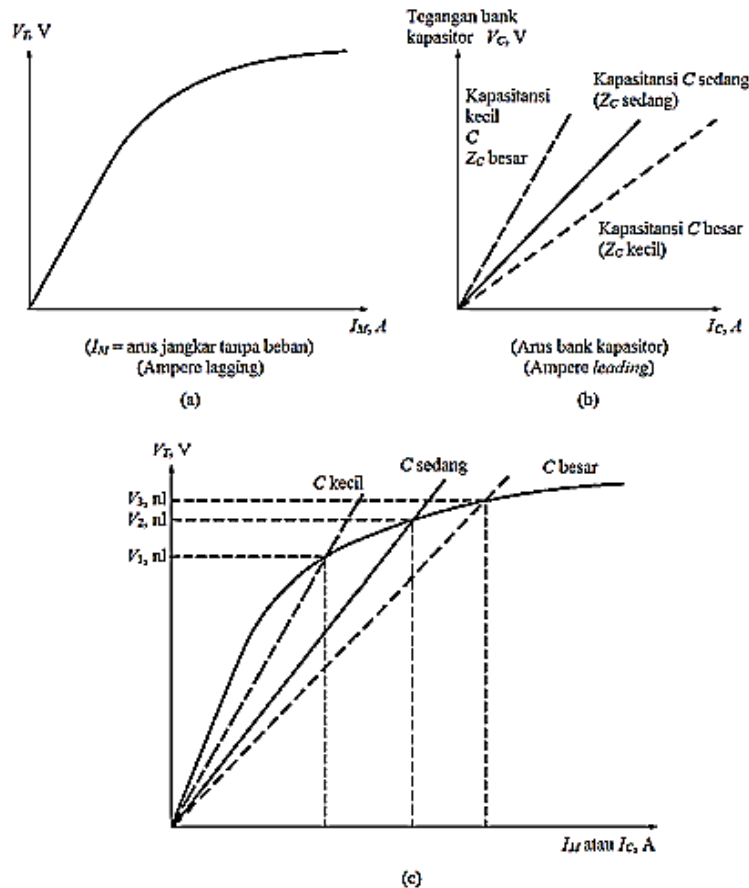
Tegangan terminal generator akan meningkat sebanding dengan kapasitansi kapasitor, tetapi nilainya dibatasi oleh kejenuhan inti besi. Kapasitor harus mampu mensuplai sedikitnya daya reaktif mesin yang diserap secara normal ketika beroperasi sebagai motor (Wildi, 2002,p.299). Kapasitansi kapasitor yang digunakan harus lebih besar dari kapasitansi kritis. Apabila kapasitansi kapasitor yang dipasang lebih kecil daripada kapasitansi kritis, maka tegangan tidak dapat dibangkitkan. Pada saat kecepatan rotor menjadi berkurang. Kapasitansi kapasitor harus lebih besar dari kapasitansi yang telah dipasang agar tegangan dapat dibangkitkan (Mc Pherson, 1990,p.305)

Arus magnetisasi I_m yang dibutuhkan mesin induksi sebagai fungsi tegangan terminal dapat dicari dengan menjalankan mesin sebagai motor pada keadaan tanpa beban dan mengukur tegangan jangkarnya sebagai fungsi tegangan terminal. Kurva magnetisasi seperti ini diperlihatkan pada gambar 2.7a. Untuk mencapai level tegangan yang diberikan pada generator induksi, kapasitor eksternal harus mensuplay arus magnetisasi yang sesuai dengan level tersebut.

Karena arus reaktif yang dapat dihasilkan sebuah kapasitor berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan padanya, lokus dari semua kemungkinan kombinasi tegangan dan arus yang melalui kapasitor berupa garis lurus. Plot tegangan fungsi arus pada frekuensi tertentu diperlihatkan gambar 2.7b. Jika sekelompok kapasitor tiga fasa dihubungkan kepada terminal generator induksi, tegangan tanpa beban generator induksi adalah perpotongan kurva magnetisasi generator dengan garis beban kapasitor. Tegangan terminal tanpa beban generator induksi untuk tiga kelompok kapasitor berbeda diperlihatkan gambar 2.7c.

Tegangan dapat dibangkitkan ketika generator induksi pertama kali mulai berputar, magnet sisa pada rangkaian medannya menghasilkan tegangan yang kecil. Tegangan yang kecil itu menghasilkan aliran arus kapasitif, yang menyebabkan tegangan naik, kemudian

lagi menaikkan arus kapasitif dan seterusnya sampai tegangan terbangkit penuh. Jika tidak ada fluks sisa yang terdapat pada rotor generator induksi, maka tegangan tidak akan bisa dibangkitkan, sehingga generator harus dimagnetisasi terlebih dahulu dengan menjalankannya sebagai motor untuk beberapa saat.



Gambar 2. 7 (a) Kurva magnetisasi generator induksi. (b) Plot karakteristik tegangan-arus bank kapasitor. (c) Tegangan terminal tanpa beban
Sumber : Chapman (2005,p.463)

Daya reaktif yang dibutuhkan generator untuk eksitasi biasanya lebih besar daripada daya reaktif beban, sehingga total daya reaktif yang dihasilkan akan bersifat kapasitif. Untuk dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif tersebut maka dapat dipasang kapasitor pada terminal generator. Kapasitor yang dipasang pada terminal generator ini harus memiliki nilai kapasitansi untuk dapat membangkitkan tegangan pada terminal generator. Jika nilai kapasitansi berada pada nilai di bawah nilai kapasitansi yang dibutuhkan maka tegangan pada terminal generator tidak dapat dibangkitkan.

Untuk dapat menentukan nilai kapasitansi minimum yang dibutuhkan oleh generator dapat dilakukan dengan beberapa metode. Salah satu metode yang dianggap paling efektif adalah dengan menggunakan karakteristik motor induksi dalam menentukan nilai

kapasitansi minimum. Karakteristik yang digunakan dalam metode ini adalah karakteristik magnetisasi dan motor induksi. Karakteristik ini diperoleh dengan menjalankan motor induksi dengan kondisi beban nol. Shekar [1], dalam jurnalnya mengatakan bahwa dalam kondisi beban nol, arus yang mengalir pada kapasitor I_c akan sama dengan arus magnetisasi I_m . Tegangan yang dihasilkan V akan meningkat secara linier hingga titik saturasi dari magnet inti tercapai. Sehingga dalam kondisi stabil.

$$\begin{aligned} I_m &= I_c \\ \frac{V}{X_m} &= \frac{V}{X_c} \dots\dots\dots(2-4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_c &= X_m \\ X_m &= \frac{V_{fasa}}{I_m} \dots\dots\dots(2-5) \end{aligned}$$

$$X_m = X_c = \frac{1}{2\pi fC} \dots\dots\dots(2-6)$$

Dari persamaan diatas kita dapat memperoleh besar kapasitansi minimum yang dibutuhkan oleh generator. Namun yang perlu diperhatikan disini adalah besar arus magnetisasi I_m merupakan arus beban nol atau arus ketika motor bekerja dalam kondisi beban nol. Oleh karena itu nilai ini masih dipengaruhi oleh besar tahanan stator dan reaktansi magnetis stator. Sehingga untuk memperoleh nilai magnetisasi yang sebenarnya harus dilakukan perhitungan lain untuk dapat memisahkan nilai reaktansi magnetis stator dan tahanan stator.

Nilai kapasitansi yang diperoleh dan perhitungan melalui metode di atas kemudian diterapkan pada kapasitor bank yang terpasang pada terminal generator. Karena nilai pengaturan tegangan pada mesin induksi sangat buruk, maka pada kondisi perubahan beban, pengaturan tegangan harus dibantu dengan pengaturan daya reaktif. Dengan mengambil nilai tegangan keluaran generator sebagai masukan yang kemudian akan dibandingkan dengan suatu nilai referensi maka akan dapat dirancang pengendali yang akan mengendalikan besar daya reaktif yang disuplai ke sistem sehingga nilai pengaturan tegangan akan tetap terjaga baik.

2.1.6 Prinsip kerja

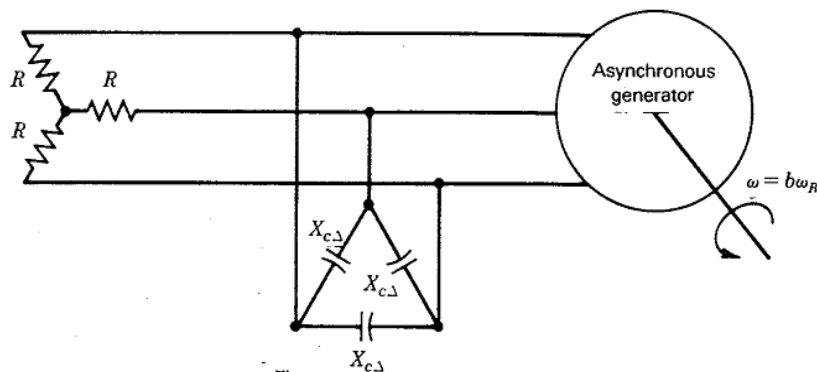
Ketika stator dieksitasi timbul medan magnet putar dan menginduksi rotor sehingga rotor berputar. Pada saat mesin penggerak memutar rotor searah medan magnet putar dengan kecepatan melebihi kecepatan sinkron maka slip bernilai negatif sehingga energi listrik mengalir ke beban (Nasar, 1995,p.182)

Frekuensi operasi dan tegangan yang dibangkitkan generator induksi berubah-ubah. Hal ini dipengaruhi oleh kecepatan, beban dan rating kapasitor (Say, 1982,p.334). Selain itu rotor harus mempunyai fluks remanensi yang cukup agar tegangan dapat dibangkitkan (Nasar, 1995,p.182)

Generator induksi dapat beroperasi sendiri meskipun tidak dihubungkan dengan jala-jala, tetapi harus dihubungkan dengan kapasitor untuk memenuhi daya reaktifnya.

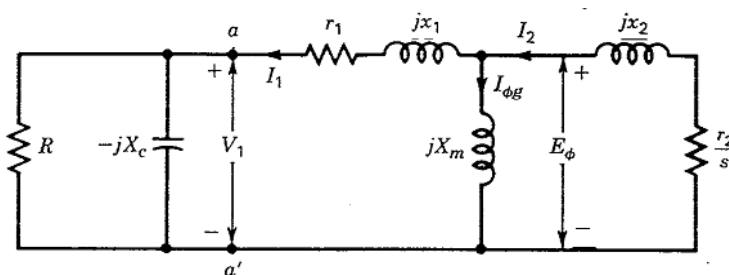
2.1.7 Rangkaian ekivalen

Generator induksi dapat beroperasi sendiri meskipun tidak dihubungkan dengan jala-jala, tetapi harus dihubungkan dengan kapasitor untuk memenuhi daya reaktifnya. (Mc. Pherson, 1990,p.302). Diagram koneksi generator induksi tiga fasa yang dioperasikan sendiri dengan menggunakan kapasitor hubungan delta seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram koneksi generator induksi tiga fasa yang dioperasikan sendiri
Sumber : Pherson (1990,p. 305)

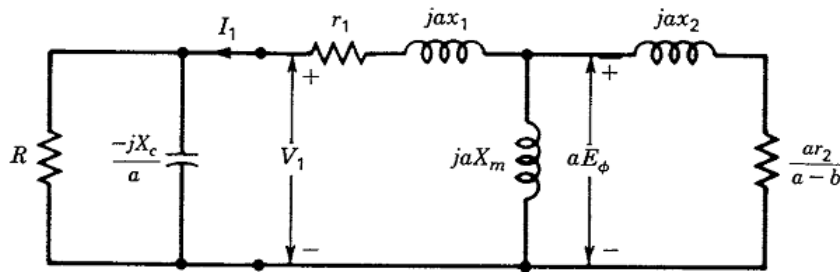
Rangkaian ekuivalen satu fasa generator induksi beroperasi sendiri dengan beban resistif seperti pada gambar 2.9



Gambar 2. 9 Model rangkaian satu fasa generator induksi beroperasi sendiri dengan beban resistif pada frekuensi teraan
Sumber : Pherson (1990,p.305)

Jika α adalah rasio antara frekuensi yang dibangkitkan generator f dengan frekuensi rating f_R dan α' adalah rasio antara kecepatan penggerak generator ω dengan kecepatan

sinkron ω_B (Mc. Pherson, 1990,p.305), maka model rangkaian satu fasa generator induksi beroperasi sendiri yang dipengaruhi frekuensi ditunjukkan seperti pada gambar 2.10



Gambar 2. 10 Rangkaian ekivalen satu fasa generator induksi beroperasi sendiri dengan beban resistif yang dipengaruhi frekuensi dan kecepatan

Sumber : Pherson (1990,p.306)

$$a = \frac{f}{f_0} \dots\dots\dots (2-7)$$

f : Frekuensi yang dibangkitkan generator

f_0 : Frekuensi dasar generator

V_m : Tegangan terinduksi celah udara

V_{m0} : Tegangan terinduksi celah udara pada frekuensi dasar

Tegangan pada terminal keluaran generator ditunjukkan oleh persamaan:

$$V_1 = \frac{aV_{m0}}{1-a^2(x_1/x_c)} \dots\dots\dots (2-8)$$

2.1.8 Parameter generator induksi

Parameter-parameter generator induksi ditentukan saat dioperasikan sebagai motor induksi. Parameter ini terdiri atas tahanan belitan stator R_1 , tahanan rotor R_2 , reaktansi bocor stator X_1 , Reaktansi rotor R_2 dan reaktansi magnetisasi X_m . Parameter-parameter tersebut ditentukan melalui pengukuran resistansi dc, pengukuran saat tanpa beban dan pengukuran saat rotor ditahan (Chapman, 2002: 338)

2.1.8.1 Pengukuran resistansi dc

Pada pengukuran resistansi dc, tegangan dc diberikan ke belitan stator motor induksi. Reaktansi motor sama dengan nol dan tidak ada tegangan terinduksi pada rangkaian rotor sehingga tidak dihasilkan aliran arus pada rotor. Arus dc mengalir melalui dua belitan stator (Chapman, 2005: 455), sehingga resistansi total yang dilalui arus ditentukan melalui persamaan :

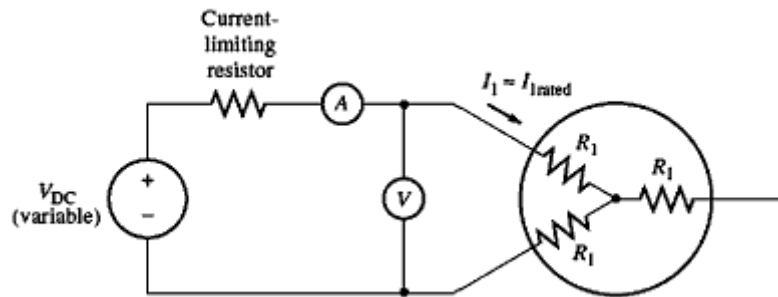
$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \dots\dots\dots(2-9)$$

Dengan : R_1 : resistansi belitan stator (Ω)

V_{dc} : tegangan sumber dc (V)

I_{dc} : arus listrik searah (A)

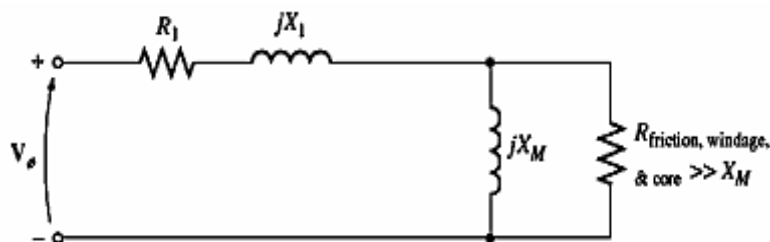
Rangkaian pengukuran resistansi dc ditunjukkan pada gambar 2.11 dengan menggunakan Amp meter dan volt meter.



Gambar 2.11 Bagan rangkaian pengukuran resistansi dc
Sumber : Chapman (2005,p. 455)

2.1.8.2 Pengukuran tanpa beban

Pengukuran tanpa beban, slip motor sangat kecil bisa mencapai 0,001 atau kurang sehingga $R_2(1-s)/s$ sangat besar daripada resistansi yang menyebabkan rugi tembaga rotor R_2 dan lebih besar daripada reaktansi bocor rotor X_2 . Rangkaian ekuivalen motor induksi saat tanpa beban seperti pada gambar 2.12 beban motor induksi hanya berupa rugi gesekan dan angin serta rugi inti yang merupakan rugi mekanik ($R_{f\&w} + R_c$). Oleh sebab itu, daya listrik yang diubah ke daya mekanik hanya digunakan oleh rugi mekanik.



Gambar 2.12 Bagan rangkaian pengganti pengukuran motor induksi tanpa beban
Sumber : Chapman (2005,p. 453)

Besarnya rugi gesekan dan angin serta rugi inti adalah:

$$P_{f\&w} + P_c = P_{tb} - 3I_{tb}^2 R_1 \dots\dots\dots(2-10)$$

dengan : $P_{f\&w}$: rugi gesekan dan angin (W)

P_c : rugi inti (W)

P_{tb} : daya generator pada keadaan tanpa beban (W)

I_{tb} : arus yang melalui generator pada keadaan tanpa beban (A)

Pada keadaan tanpa beban, faktor daya sangat rendah mencapai 0,2 atau kurang sehingga rangkaian bersifat reaktif. R_1 lebih kecil daripada X_m dan resistansi yang menyebabkan rugi mekanik sangat besar daripada X_m sehingga impedansi masukan pada keadaan tanpa beban hanya terdiri dari X_1 dan X_m (Mc. Pherson, 1990,p.278)

Besarnya reaktansi magnetisasi

$$X_M = \frac{V_{tb}}{\sqrt{3}I_{tb}} - X_1 \dots\dots\dots (2-11)$$

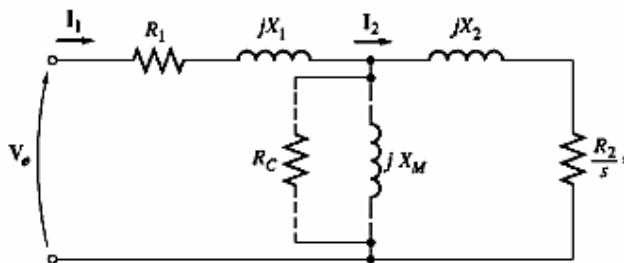
Dengan: X_m : reaktansi magnetisasi (Ω)

V_{tb} : tegangan generator pada keadaan tanpa beban

X_1 : reaktansi bocor stator (Ω)

2.1.8.3 Pengukuran Rotor Ditahan

Pengukuran ini rotor dipaksa tidak berputar, sehingga slip $s=1$. Resistansi rotor R_2/s sama dengan R_2 . Ketika R_2 dan X_2 sangat kecil, hampir seluruh arus masukan akan mengalir melaluinya, maka arus tidak melalui reaktansi magnetisasi X_m yang jauh lebih besar. Rangkaian setara pengukuran rotor ditahan ditunjukkan oleh gambar 2.13.



Gambar 2.13 Bagan rangkaian pengukuran rotor ditahan

Sumber : Chapman (2005,p.456)

Besar resistansi rotor R_2 adalah

$$R_2 = \frac{P_{br}}{3I_{br}^2} - R_1 \dots\dots\dots (2-12)$$

dengan : R_2 : resistansi rotor (Ω)

P_{br} : daya pada keadaan rotor ditahan (W)

I_{br} : arus pada keadaan rotor ditahan (A)

Reaktansi rotor ditahan X_{br}

$$X_{br} = \sqrt{\left(\frac{V_{br}}{\sqrt{3}I_{br}}\right)^2 - \left(\frac{P_{br}}{3I_{br}^2}\right)^2} \dots\dots\dots (2-13)$$

dengan : X_{br} : reaktansi rotor ditahan (Ω)

V_{br} : tegangan pada keadaan rotor ditahan (Ω)

X_2 : reaktansi bocor rotor (Ω)

Besarnya X_1 dan X_2 tergantung dari jenis motor induksi seperti ditunjukkan dalam tabel 2.1

Tabel 2. 1

Aturan pembagian reaktansi rotor dan stator motor induksi

Jenis Rotor	X_1 dan X_2 sebagai fungsi X_{br}	
	X_1	X_2
Rotor Belitan	$0,5 X_{br}$	$0,5 X_{br}$
Rotor sangkar desain kelas A	$0,5 X_{br}$	$0,5 X_{br}$
Rotor sangkar desain kelas B	$0,4 X_{br}$	$0,6 X_{br}$
Rotor sangkar desain kelas C	$0,3 X_{br}$	$0,7 X_{br}$
Rotor sangkar desain kelas D	$0,5 X_{br}$	$0,5 X_{br}$

2.2 Metode Pengaturan Tegangan

Generator induksi berpenguatan sendiri memiliki kelemahan berupa tegangan keluarannya yang tidak stabil. Pada generator induksi berpenguatan sendiri tegangan keluarannya dipengaruhi oleh kecepatan penggerak mula memutar generator, beban dan kapasitansi dari kapasitor yang dipasang pada terminalnya. Pada kondisi generator induksi beroperasi pada kecepatan putar dari penggerak mula yang tidak tetap, menyebabkan tegangan keluaran yang dibangkitkan juga tidak tetap. Begitu juga dengan perubahan beban yang bervariasi menyebabkan naik turunnya tegangan, apalagi jika dihubungkan dengan beban induktif, akan mengalami penurunan tegangan yang drastis. Hal itu akan mengurangi kualitas daya yang dihasilkan generator induksi. Untuk itu generator induksi harus dibantu dengan pengaturan daya reaktif untuk mengatur tegangan keluarannya.

Penggunaan kapasitor bank saja tidak cukup untuk dapat mengatur tegangan keluarannya. Karena besar kapasitansi yang tetap maka penyaluran daya reaktif dari kapasitor bank juga tetap. Kapasitansi dari kapasitor bank hanya menyalurkan daya reaktif untuk dapat membangkitkan tegangan generator pada saat keadaan tanpa beban. Apabila terjadi perubahan kecepatan putar atau perubahan beban, maka tegangan keluarannya juga ikut berubah.

Metode pengaturan tegangan yang dapat mengatur besarnya daya reaktif secara dinamis salah satunya adalah dengan menggunakan *Static VAR Compensator* (SVC).

2.2.1 *Static VAR Compensator* (SVC)

Static VAR Compensator (SVC) adalah komponen FACTS dengan hubungan paralel yang fungsi utamanya untuk mengatur tegangan dengan cara mengontrol besaran reaktansi ekuivalen. SVC bekerja seperti reaktansi variabel *shunt*, yang bisa menghasilkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besarnya tegangan. SVC bekerja menyediakan kompensasi daya reaktif dengan cepat pada jaringan transmisi tenaga listrik. Istilah “*static*” pada SVC berdasarkan kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi pada jaringan, tidak ada bagian SVC yang bergerak, karena proses kompensasinya sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya.

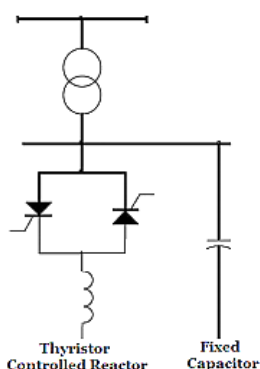
Static VAR compensator (SVC) terdiri dari *thyristor*, reaktor, dan kapasitor. Kapasitor nilainya tetap dan dapat digunakan sebagai daya reaktif untuk membangkitkan tegangan pada kondisi tanpa beban. Pada saat terjadi perubahan tegangan, maka reaktor yang akan menyalurkan daya reaktif yang besarnya diatur dengan *thyristor*. *Thyristor* diatur sudut pemicuannya sedemikian rupa sehingga dapat menyalurkan daya reaktif yang sesuai besarnya sehingga dapat mengatur tegangan yang diinginkan.

2.2.2 Jenis – Jenis SVC

Jenis SVC berdasarkan kontrol yang digunakan dapat dibedakan menjadi :

1. SVC menggunakan *thyristor controlled reactor* dan *fixed capacitor* (FC)

Skema rangkaian SVC dengan TCR dan FC ditunjukkan pada gambar 2.14



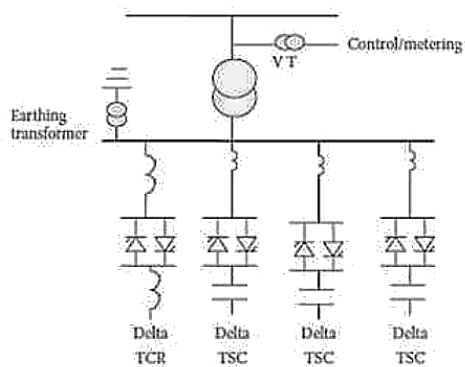
Gambar 2. 14 SVC yang menggunakan TCR dan FC
Sumber : Rathor (2014)

TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) adalah jenis dari *compensator* yang dibuat dari sebuah suplai induktansi melalui AC -AC konverter menggunakan dua buah *thyristor* anti paralel berlawanan kutub berfungsi sebagai sebuah saklar yang akan menutup

apabila tegangan anoda lebih besar dari tegangan katoda dan diberikan *trigger* (pemicu) yang biasa disebut sudut pemicuan. Dengan mengubah sudut pemicuan (*firing angle*) dari *thyristor* akan mengontrol reaktor maka sifat kompensasi akan berubah dari *lagging* ke *leading*.

2. SVC menggunakan TCR dan *Thyristor Switched Capacitor* (TSC)

Skema rangkaian SVC dengan TCR dan TSC ditunjukkan pada gambar 2.15



Gambar 2.15 SVC yang menggunakan TCR dan TSC

Sumber : www.industrial-electronics.com

TSC (*thyristor switched capacitor*) adalah rangkaian yang digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada sistem elektronika daya. TSC terdiri atas kapasitor daya yang disambung seri dengan *bidirectional thyristor*, dan bisa digunakan membatasi induktor (reaktor). Konfigurasi gabungan ini digunakan untuk memenuhi keperluan sistem yang berbeda-beda. Kebutuhan kecepatan tegangan atau respon, ukuran (*range*), fleksibilitas, rugi-rugi, dan biaya adalah di antara pertimbangan utama dalam pemilihan konfigurasi. Kinerja *static VAr compensator* (SVC) terutama ditentukan oleh unsur pokok pengontrolan dari TCR dan TSC.

Prinsip kerja dari SVC adalah menyuplai *leading* atau *lagging* VAr pada sistem. Aliran arus reaktor dapat diatur menggunakan sudut pemicuan *thyristor* (Yarlagadda, 2011). Reaktansi SVC ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$X_{SVC} = \frac{X_C X_{TCR}}{X_C + X_{TCR}}$$

Dimana

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{\sigma - \sin \sigma}$$

$$X_{SVC} = \frac{X_C X_L}{(X_C(\sigma - \sin \sigma) - \pi X_L)} \quad \sigma = 2(\pi - \alpha)$$

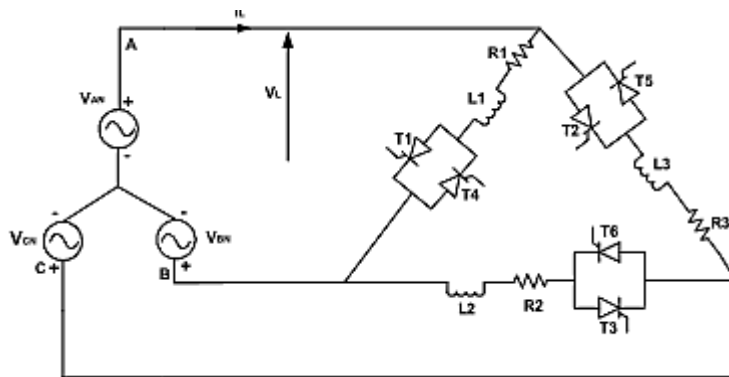
$$X_{SVC} = \frac{\pi X_C X_L}{X_C[2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] - \pi X_L} \dots \dots \dots (2-14)$$

$$X_{SVC} = \frac{V_{Bus}^2}{Q_{SVC}}$$

$$Q_{SVC} = \frac{V_{Bus}^2 (X_c [2\pi - \alpha + \sin 2\alpha] - \pi X_L)}{\pi X_c X_L} \dots \dots \dots (2-15)$$

2.2.3 Thyristor Controlled Reactor hubungan delta

TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) adalah jenis dari *compensator* yang dibuat dari sebuah suplai induktansi melalui AC - AC konverter. Pada sistem tiga fasa *thyristor controlled reactor* dapat dihubungkan delta atau bintang. Diagram rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa terhubung delta dengan beban resistif induktif ditunjukkan pada gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Pengontrol tegangan tiga fasa beban RL terhubung delta
Sumber : Rashid (2007,p.489)

Tegangan keluaran rms untuk beban RL terhubung delta dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_O &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_S^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} [2] \\ &= \sqrt{3} V_S \left[\frac{1}{\pi} (\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2}) \right]^{1/2} \dots \dots \dots (2-16) \end{aligned}$$

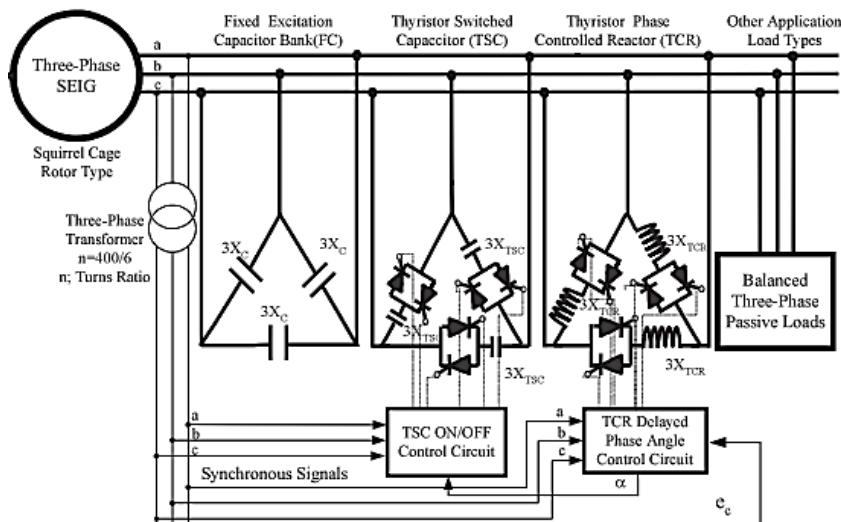
Sudut β dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \dots \dots \dots (2-17)$$

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L} \right) (\alpha - \beta) \omega} \dots \dots \dots (2-18)$$

2.2.4 Konfigurasi *Thyristor Switch Capacitor* dan *Thyristor Controlled Reactor* tiga fasa

Pada penelitian ini dipilih konfigurasi *thyristor switched capacitor* dan *thyristor controlled reactor* (TSC-TCR) karena mempunyai kemampuan dalam mengkompensasi daya reaktif secara baik



Gambar 2.17 Konfigurasi *Thyristor Switch Capacitor* dan *Thyristor Controlled Reactor*
Sumber : Ahmed (2004,p.571)

Pada gambar 2.17 terlihat ada satu *thyristor controlled reactor* dan *thyristor switch capacitor* hubungan delta . Nantinya pemicuan *thyristor switch capacitor* hanya sebatas on-off saja sesuai kebutuhan. Sedangkan penggunaan *thyristor controlled reactor* dengan mengatur sudut pemicuan TRIAC mulai dari $90^0 < \alpha < 180^0$ karena termasuk beban induktif.

2.2.5 Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen listrik yang dapat menyimpan muatan listrik, dengan demikian dapat menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Bentuk fisik kapasitor bermacam-macam, tetapi pada dasarnya kapasitor terbuat dari 2 plat konduktor yang dipisahkan oleh suatu dielektrik. Kapasitor dapat mengalirkan arus bolak-balik tetapi mencegah aliran arus searah.

Ukuran kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan pada dua plat konduktor disebut kapasitansi. Beda potensial di antara dua plat konduktor adalah V volt, maka muatan positif sebesar Q coulomb terdapat di plat konduktor satu dan muatan negatif dalam jumlah yang sama di plat konduktor lainnya, kapasitansi kapasitor C sebesar :

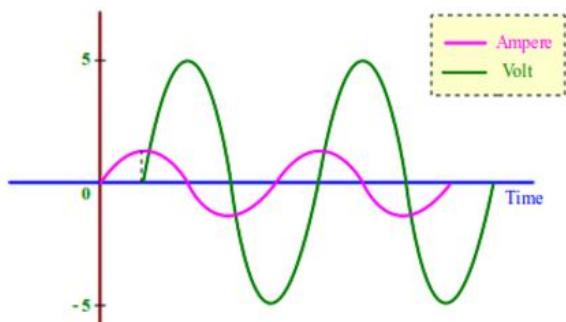
$$C = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots(2-19)$$

Dengan C : Kapasitansi (Farad)

Q : Muatan (Coulomb)

V : Tegangan (Volt)

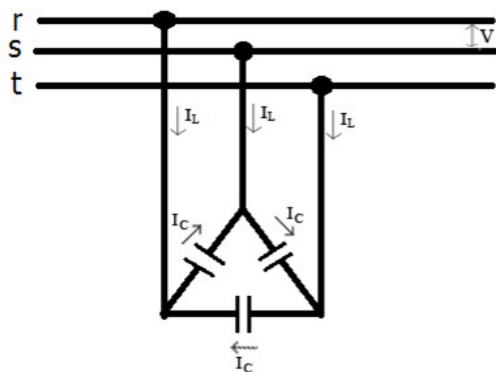
Selama kapasitor masih terhubung dengan sumber tegangan bolak-balik, kapasitor akan dialiri arus. Arus selalu mengalir secara berubah-ubah saat kapasitor dimuati, dikosongkan, dimuati lagi serta dikosongkan kembali (Lister, 1993,p.136). Arus yang melalui kapasitor, sudut fasanya mendahului sudut fasa tegangan kapasitor sebesar 90 derajat. Hubungan fasa antara arus dan tegangan sesaat kapasitor ditunjukkan oleh gambar 2.18.



Gambar 2.18 Hubungan fasa antara arus dan tegangan kapasitor

Sumber: Myright.com

Kapasitor dalam sistem kelistrikan sering digunakan untuk kompensasi daya reaktif. Kapasitor pada sistem tiga fasa dapat dihubungkan delta dan *star*. Hubungan delta memberikan daya reaktif lebih besar dari hubungan *star* dengan kapasitansi yang sama. Ini diakibatkan oleh tegangan antar fasa yang lebih besar pada kapasitor bank dengan hubungan delta. hubungan kapasitor delta terlihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Kapasitor hubungan delta

Sumber: empukaki.blogspot.co.id

Dalam kapasitor hubungan delta, daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor adalah sebagai berikut (Dugan RC. Mark F, 1996) :

$$Q_c = \sqrt{3}VI \sin\phi$$

$$Q_c = \sqrt{3}VI \quad (\sin\phi = 1)$$

Arus yang mengalir pada kapasitor :

$$I_L = \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_{LL}}$$

$$I_c = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

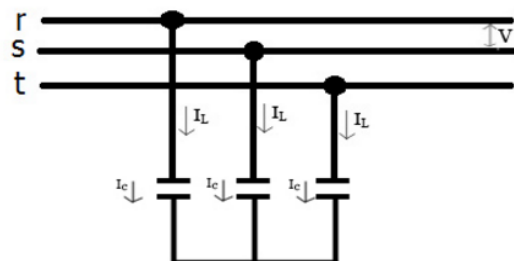
$$X_c = \frac{V_{LL}}{I_c}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

$$I_c = \frac{V}{X_c} = \omega CV$$

$$Q_c = \sqrt{3}V^2 \omega C \dots\dots\dots(2-20)$$

Kapasitor yang hubungan *star* terlihat pada gambar 2.20, daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor adalah berikut:



Gambar 2.20 Kapasitor hubungan *star*

Sumber : <http://empukaki.blogspot.co.id>

Tegangan pada kapasitor hubungan *star* adalah :

$$V_c = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

$$I_c = I_L$$

$$X_c = \frac{V_{L-N}}{I_c}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

Daya reaktif yang dibangkitkan :

$$Q_c = \frac{V^2}{\sqrt{3}} \omega C \dots\dots\dots(2-21)$$

2.2.6 Mikrokontroler

Microcontroller adalah sebuah sistem komputer fungsional dalam sebuah *chip*. Di dalamnya terkandung sebuah inti prosesor, memori (sejumlah kecil RAM, memori program, atau keduanya), dan perlengkapan input output. Dengan kata lain, *Microcontroller* adalah suatu alat elektronika digital yang mempunyai masukan dan keluaran serta kendali dengan program yang bisa ditulis dan dihapus dengan cara khusus, cara kerja *microcontroller* sebenarnya membaca dan menulis data.

Microcontroller merupakan komputer didalam chip yang digunakan untuk mengontrol peralatan elektronik, yang menekankan efisiensi dan efektifitas biaya. Secara harfiahnya bisa disebut “pengendali kecil” dimana sebuah sistem elektronik yang sebelumnya banyak memerlukan komponen-komponen pendukung seperti IC TTL dan CMOS dapat direduksi/diperkecil dan akhirnya terpusat serta dikendalikan oleh *microcontroller* ini.



Gambar 2.21 Arduino mega 2560

Sumber : www.arduino.cc

Arduino Mega 2560 adalah papan *microcontroller* berbasis ATmega 2560. Arduino Mega 2560 seperti gambar 2.21 memiliki 54 pin digital *input / output*, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai *output PWM*, 16 pin sebagai *input* analog, dan 4 pin sebagai *UART (port serial hardware)*, 16 MHz kristal osilator, koneksi USB, *jack power*, *header ICSP*, dan tombol *reset*. Ini semua yang diperlukan untuk mendukung *microcontroller*. Adapun spesifikasi singkat mengenai Arduino Mega 2560 adalah sebagai berikut:

Mikrokontroler	: ATmega2560
Tegangan Operasional	: 5V
Tegangan Masukan (direkomendasi)	: 7-12V
Tegangan Masukan (batas)	: 6-20V
Pin Digital I/O	: 54 (14 pin untuk keluaran PWM)
Analog Input Pins	: 16
Arus DC per I/O Pin	: 40 mA

Arus DC for 3.3V Pin	: 50 mA
Memori Flash	: 256 KB
SRAM	: 8 KB
EEPROM	: 4 KB
Clock Speed	: 16 MHz

2.2.6.1 ADC Arduino Mega 2560

ADC adalah operasi pengubah data analog ke data digital. Pada mikrokontroler Atmega2560 memiliki 16 *channel* ADC (PF0 – PF7, PK0 – PK7 dengan resolusi 8/10 bit. Penggunaan fitur ADC membutuhkan catu daya tambahan pada pin AVCC dan AGND. Namun catu daya AVCC tidak boleh berbeda $\pm 0,3$ V dari VCC. Operasi ADC membutuhkan tegangan referensi eksternal pada pin AREF. Tegangan referensi AREF tidak boleh melebihi tegangan AVCC. ADC mengkonversi tegangan input analog menjadi digital dengan lebar data 10 bit. GND (0 Volt) adalah nilai minimum yang mewakili ADC dan nilai maksimum ADC diwakili oleh tegangan pada pin AREF dengan minus 1 LSB. Hasil konversinya di simpan pada register ADCH:ADCL. Untuk menghitung hasil konversi ADC dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$Kode\ digital = \frac{V_{input}}{V_{ref}} \times resolusi\ 8\ atau\ 10\ bit \dots\dots\dots (2-22)$$

Dimana: Resolusi 8 bit = 256 Resolusi 10 bit = 1024

2.2.6.2 Interupsi Eksternal

Interupsi adalah sistem yang menghentikan aliran program akibat terjadinya *triger* tertentu dan memaksa eksekusi rutin / fungsi layanan interupsi. Setelah selesai maka aliran program akan kembali ke program sebelum terjadinya interupsi. Pada mikrokontroler ada banyak picu yang salah satunya adalah picu eksternal. Picu eksternal dalam hal ini adalah berasal dari pin luar mikrokontroler seperti perubahan logika tinggi ke rendah (*Falling Edge*), rendah ke tinggi (*Rising Edge*), setiap perubahan logika (*Any Change*) dan level rendah (*low level*). Pada Arduino mega 2560 terdapat 6 buah interupsi eksternal yaitu pin 21 (untuk interrupt 0), pin 20 (interrupt 1), pin 19 (interrupt 2), pin 18 (interrupt 3), pin 2 (interrupt 4), dan pin 3 (interrupt 5). Sebenarnya atmega 2560 terdapat 8 buah pin *external Interrupt* tetapi 2 pin tidak difungsikan pada board arduino mega 2560.

2.2.6.3 Timer

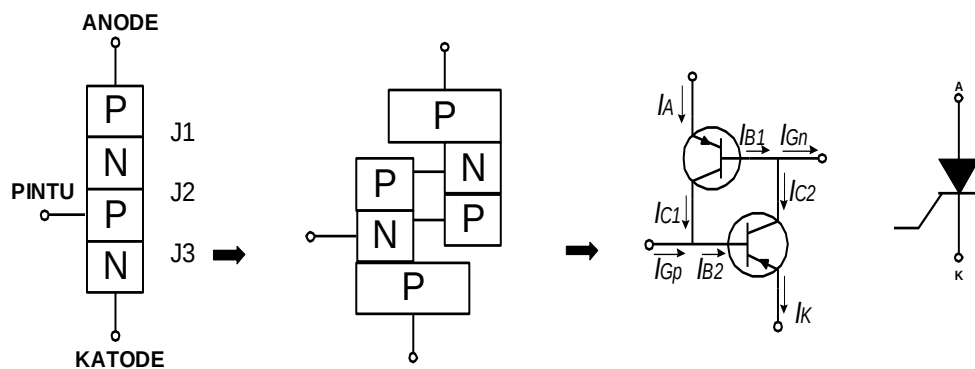
Aduino mega 2560 terdapat 6 buah *timer/counter* yang terdiri dari 2 buah *timer/counter* 8 bit (Timer0,2) dan 4 buah *timer/counter* 16 bit (Timer1,3,4,5).

2.2.7 Thyristor

Thyristor adalah sebuah bahan semikonduktor 4 lapis yang menggunakan umpan balik dalam (*internal*) untuk mendapatkan perilaku penahan (*latching*). *Thyristor* berakar kata dari bahasa Yunani yang berarti ‘pintu’. Dinamakan demikian barangkali karena sifat dari komponen ini yang mirip dengan pintu yang dapat dibuka dan ditutup untuk melewati arus listrik. *Thyristor* biasanya digunakan sebagai saklar/*bistabil*, beroperasi antara keadaan non konduksi ke konduksi. Pada banyak aplikasi, *thyristor* dapat diasumsikan sebagai saklar ideal akan tetapi dalam prakteknya *thyristor* memiliki batasan karakteristik tertentu.

2.2.7.1 Karakteristik Thyristor

Thyristor adalah suatu bahan semikonduktor yang tersusun atas 4 lapisan (*layer*) yang berupa susunan P-N-P-N *junction*, sehingga *thyristor* ini disebut juga sebagai PNPN diode.



Gambar 2.22 Struktur fisik dari *thyristor* dan simbolnya
Sumber: Onsemi.com

Seperti tampak pada gambar 2.22. ketika tegangan anode dibuat lebih positif dibandingkan dengan tegangan katode, sambungan J_1 dan J_3 berada pada kondisi *forward bias*, dan sambungan J_2 berada pada kondisi reverse bias sehingga akan mengalir arus bocor yang kecil antara anode dan katode. Pada kondisi ini *thyristor* dikatakan *forward blocking* atau kondisi *off-state*, dan arus bocor dikenal sebagai arus *off-state* I_D . Jika tegangan anode ke katode V_{AK} ditingkatkan hingga suatu tegangan tertentu, sambungan J_2 akan bocor. Hal ini dikenal dengan *avalanche breakdown* dan tegangan V_{AK} tersebut dikenal sebagai *forward breakdown voltage*, V_{BO} . Dan karena J_1 dan J_3 sudah berada pada kondisi forward bias, maka akan terdapat lintasan pembawa muatan bebas melewati ketiga sambungan, yang akan menghasilkan arus anode yang besar. *Thyristor* pada kondisi tersebut berada pada kondisi konduksi atau keadaan hidup. Tegangan jatuh yang terjadi

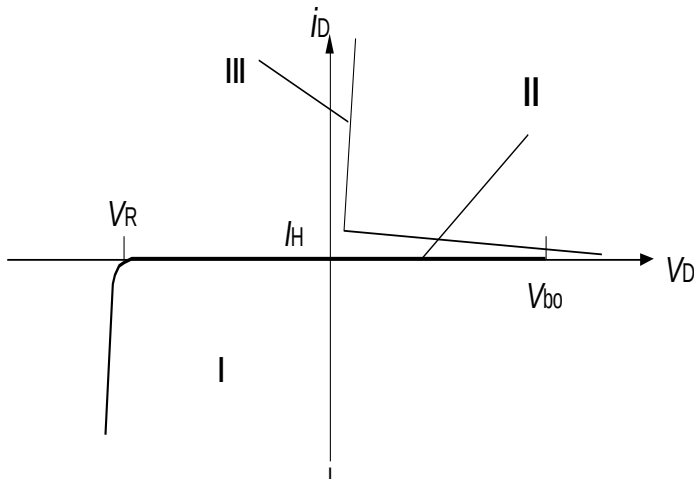
dikarenakan oleh tegangan ohmic antara empat layer dan biasanya cukup kecil yaitu sekitar 1 V. Pada keadaan on, arus dari suatu nilai yang disebut dengan *latching current* I_L , agar diperoleh cukup banyak aliran pembawa muatan bebas yang melewati sambungan-sambungan, jika tidak maka akan kembali ke kondisi *blocking* ketika tegangan anode ke katode berkurang. *Latching current* (I_L) adalah arus anode minimum yang diperlukan agar membuat *thyristor* tetap kondisi hidup, begitu *thyristor* dihidupkan dan sinyal gerbang dihilangkan. Ketika berada pada kondisi on, *thyristor* bertindak sebagai diode yang tidak terkontrol. Devais ini terus berada pada kondisi on karena tidak adanya lapisan deplesi pada sambungan J_2 karena pembawa – pembawa muatan yang bergerak bebas. Akan tetapi, jika arus maju anode berada dibawah suatu tingkatan yang disebut *holding current* I_H , daerah deplesi akan terbentuk disekitar J_2 karena adanya pengurangan banyak pembawa muatan bebas dan *thyristor* akan berada pada keadaan *blocking*. *Holding current* terjadi pada orde miliampere dan lebih kecil dari *latching current* I_L , $I_H > I_L$. *Holding current* I_H adalah arus anode minimum untuk mempertahankan *thyristor* pada kondisi on. Ketika tegangan katode lebih positif dibanding dengan anode, sambungan J_2 bias maju, akan tetapi sambungan J_1 dan J_3 akan *ter-reverse bias*. Hal ini seperti diode – diode yang terhubung secara seri dengan tegangan balik bagi keduanya. *Thyristor* akan berada pada kondisi *reverse blocking* dan arus bocor reverse dikenal sebagai *reverse current* I_R . *thyristor* akan dapat dihidupkan dengan meningkatkan tegangan maju V_{AK} diatas V_{BO} , tetapi kondisi ini bersifat merusak. dalam prakteknya, tegangan maju harus dipertahankan dibawah V_{BO} dan *thyristor* dihidupkan dengan memberikan tegangan positif antara gerbang katode. Begitu *thyristor* dihidupkan dengan sinyal penggerbangan itu dan arus anodenya lebih besar dari arus holding, *thyristor* akan berada pada kondisi tersambung secara positif balikan, bahkan bila sinyal penggerbangan dihilangkan. *Thyristor* dapat dikategorikan sebagai *latching devais*.

Thyristor dapat bertingkah seperti dua transistor dengan penurunan rumus sebagai berikut :

$$I_{B1} = I_{C2} + I_{Gn}$$

$$I_{B2} = I_{C1} + I_{Gp}$$

Adapun karakteristik tegangan versus arus dapat dilihat pada gambar 2.23 sebagai berikut:



Gambar 2.23 Karakteristik SCR
Sumber: andihasad.com

Dapat dilihat pada gambar 2.23 Karakteristik tegangan fungsi arus ini diperlihatkan bahwa *thyristor* mempunyai 3 keadaan atau daerah, yaitu :

- Keadaan pada saat tegangan balik (daerah I)
- Keadaan pada saat tegangan maju (daerah II)
- Keadaan pada saat *thyristor* konduksi (daerah III)

Pada daerah I, *thyristor* sama seperti dioda, dimana pada keadaan ini tidak ada arus yang mengalir sampai dicapainya batas tegangan tembus (V_r). Pada daerah II terlihat bahwa arus tetap tidak akan mengalir sampai dicapainya batas tegangan pemicuan (V_{bo}). Apabila tegangan mencapai tegangan pemicuan, maka tiba – tiba tegangan akan jatuh menjadi kecil dan ada arus mengalir. Pada saat ini *thyristor* mulai konduksi dan ini adalah merupakan daerah III. Arus yang terjadi pada saat *thyristor* konduksi, dapat disebut sebagai arus genggam (I_h = Holding Current). Arus I_h ini cukup kecil yaitu dalam orde miliampere.

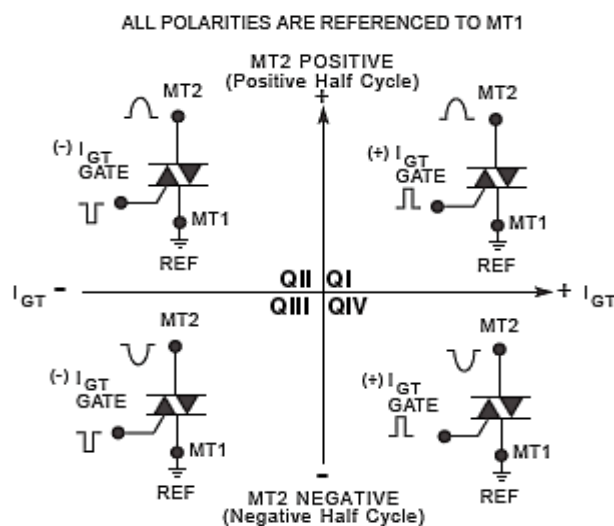
Untuk membuat *thyristor* kembali off, dapat dilakukan dengan menurunkan arus *thyristor* tersebut dibawah arus genggamnya (I_h) dan selanjutnya diberikan tegangan pemicuan.

2.2.7.2 TRIAC

TRIAC boleh juga dikatakan SCR yaitu *thyristor* yang *uni-directional*, karena ketika ON hanya bisa melewatkan arus satu arah saja yaitu dari anoda menuju katoda. Struktur TRIAC sebenarnya adalah sama dengan dua buah SCR yang arahnya bolak-balik dan kedua *gate*-nya disatukan. Simbol TRIAC ditunjukkan pada gambar 2.24. TRIAC biasa

juga disebut *thyristor bi-directional* TRIAC dapat bersifat konduktif dalam dua arah dan biasa digunakan untuk pengendali fasa AC.

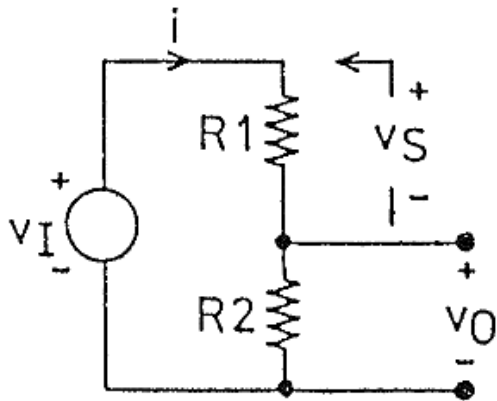
Karena TRIAC merupakan komponen *bidirectional*, terminalnya tidak dapat ditentukan sebagai anoda/katoda. Jika terminal MT2 positif terhadap MT1, TRIAC dapat dimatikan dengan memberikan sinyal gerbang positif antara gerbang G dan MT. Jika terminal MT2 negatif terhadap MT1, maka TRIAC dapat dihidupkan dengan memberikan sinyal pulsa negatif antara gerbang dan terminal MT1. Tidak perlu untuk memiliki kedua sinyal gerbang positif dan negatif dan TRIAC dapat dihidupkan baik oleh sinyal gerbang positif maupun negatif. Dalam prakteknya sensitivitas bervariasi antara satu kuadran dengan kuadran lain, dan TRIAC biasanya beroperasi dikuadran I atau kuadran III. Karakteristik TRIAC dapat dilihat pada gambar 2.24.



Gambar 2.24 Simbol dan karakteristik TRIAC
Sumber: DataSheet

2.2.8 Sensor Tegangan

Sensor tegangan adalah sensor yang digunakan untuk membaca nilai tegangan pada tiap-tiap fasa R S T keluaran generator induksi. nilai tegangan dari masing-masing fasa digunakan sebagai referensi pemicuan TRIAC pada SVC. Metode yang digunakan adalah dengan pembagian tegangan.



Gambar 2.25 Rangkaian Pembagi tegangan
Sumber: elektronika-dasar.web.id

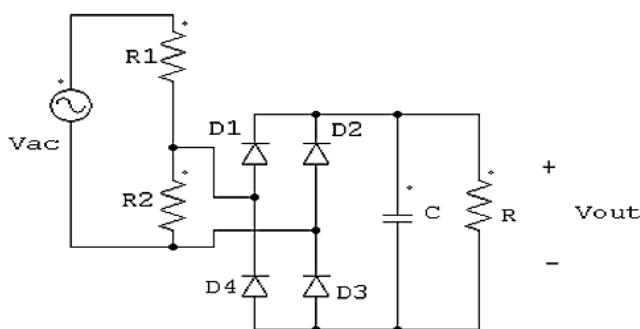
Rangkaian pembagi tegangan pada gambar 2.25 dapat dirumuskan tegangan output V_O . Arus (I) mengalir pada $R1$ dan $R2$ sehingga nilai tegangan sumber V_I adalah penjumlahan V_S dan V_O sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$V_I = V_S + V_O = i \cdot R1 + i \cdot R2$$

Nampak bahwa tegangan masukan terbagi menjadi dua bagian, masing-masing sebanding dengan harga resistor yang dikenai tegangan tersebut. Sehingga besarnya V_O dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$V_O = V_I \cdot \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) \dots \dots \dots (2-23)$$

Setelah tegangan diturunkan dengan rangkaian pembagi tegangan, maka digunakan penyearah jembatan untuk mendapatkan tegangan DC. Rangkaian sensor tegangan dapat dilihat pada gambar 2.26.

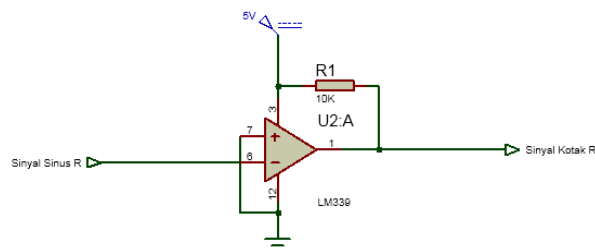


Gambar 2.26 Rangkaian sensor tegangan
Sumber: elektronika-dasar.web.id

Keluaran dari jembatan penyearah masih terdapat *ripple* tegangan. Untuk mengatasinya diperlukan kapasitor untuk mengurangi *ripple* tegangan. Keluaran sensor berupa sinyal analog yang akan dibaca oleh mikrokontroler.

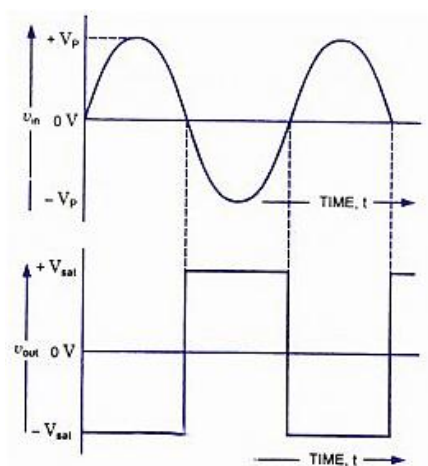
2.2.9 Rangkaian Zero Crossing Detector

Agar bisa menentukan waktu tunda dengan tepat untuk mendapatkan hasil pengaturan daya yang akurat, mikrokontroler harus mengetahui saat titik nol (*zero crossing*) dari tegangan keluaran generator induksi. *Zero Crossing* adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi perpotongan gelombang sinus AC saat melewati titik tegangan nol. Seberangan titik nol yang dideteksi adalah peralihan dari positif menuju negatif dan peralihan dari negatif menuju positif. Dengan menggunakan rangkaian *zero crossing detector* pada gambar 2.27 kita dapat mendeteksi zero point sekaligus mengubah suatu sinyal sinusoida menjadi sinyal kotak terlihat pada gambar 2.28.



Gambar 2.27 Rangkaian *zero crossing detector*

Sumber: Dokumentasi Sendiri



Gambar 2.28 Sinyal Output Rangkaian *Zero Crossing Detektor* Dengan Op Amp

Sumber: Circuitstoday.com

Rangkaian *zero crossing detektor* sering diaplikasikan pada peralatan yang digunakan untuk mengendalikan beban pada jaringan listrik AC dan menggunakan eksekutor berupa TRIAC atau SCR. Titik persilangan dengan nol tegangan sumber untuk beban yang

dikendalikan dengan komponen saklar berupa TRIAC atau SCR diperlukan untuk menentukan waktu mulai pemberian *trigger* atau sinyal kontrol pada SCR atau TRIAC tersebut. Pemberian sinyal input pada SCR atau TRIAC yang tepat pada titik persilangan nol akan meningkatkan efektifitas dan efisiensi daya output dari pengendalian beban listrik AC.