

# ANALISIS DAN SIMULASI PENGATURAN TEGANGAN GENERATOR INDUKSI BERPENGUATAN SENDIRI MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (STATCOM)

Suhendri<sup>(1)</sup>, Raja Harahap<sup>(2)</sup>

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)  
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA  
e-mail: suhendri2901@gmail.com

## Abstrak

Generator induksi adalah generator yang memiliki prinsip dan konstruksinya sama dengan motor induksi yang sudah umum digunakan, hanya saja dibutuhkan prime mover sehingga putaran rotor lebih besar daripada putaran stator ( $n_r > n_s$ ) untuk membangkitkan tegangannya. Generator induksi lebih banyak digunakan pada daerah terpencil yang belum terjangkau listrik. Umumnya generator induksi digunakan untuk membangkitkan energi listrik berdaya kecil seperti pada pembangkit listrik tenaga angin dan mikrohidro. Dalam pengoperasian generator induksi memiliki masalah pada tegangan keluaran generator yang tidak konstan. Oleh sebab itu diperlukan adanya sebuah sistem kontrol untuk mengatur tegangan keluaran generator induksi. Pada penelitian ini dilakukan simulasi generator induksi berpenguatan sendiri yang menggunakan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) untuk mengatur tegangannya. Simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Simulasi dilakukan untuk melihat seberapa besar pengaruh penggunaan STATCOM untuk mengatur tegangan pada generator induksi berpenguatan sendiri. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa dengan menggunakan STATCOM tegangan yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguatan sendiri menjadi lebih halus tanpa adanya *ripple* dan lebih stabil.

**Kata Kunci:** *Generator Induksi, Static Synchronous Compensator (STATCOM), Pengaturan Tegangan*

## 1. Pendahuluan

Energi listrik sekarang sudah menjadi kebutuhan utama setiap orang. Tetapi belum semua orang bisa menikmati listrik. Beberapa daerah terpencil bahkan belum tersentuh oleh listrik. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibangun pembangkit-pembangkit listrik berdaya kecil yang dapat memenuhi kebutuhan listrik tersebut. Pembangkit listrik ini menggunakan potensi alam yang ada di daerah tersebut. Biasanya dibangun pembangkit energi listrik terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga angin dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Pembangkit-pembangkit tersebut menggunakan generator induksi untuk membangkitkan energi listrik.

Generator induksi digunakan karena memiliki beberapa kelebihan yaitu biaya yang murah, perawatannya yang mudah dan mudah untuk mendapatkannya. Selain itu generator induksi dapat digunakan pada kecepatan yang rendah dan perubahan kecepatan yang tidak tentu. Pada keadaan dimana generator induksi harus melayani beban pada daerah yang

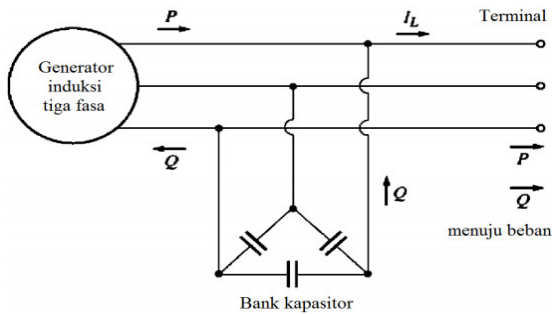
terisolir, maka generator induksi harus dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif yang diperlukannya. Oleh karena itu jenis generator induksi yang digunakan ialah generator induksi berpenguatan sendiri (*self excited induction generator* (SEIG)).

## 2. Tinjauan Pustaka

Mesin induksi ialah mesin listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Mesin induksi bekerja berdasarkan perbedaan kecepatan putar antara stator dan rotor. Apabila kecepatan putar stator sama dengan kecepatan putar rotor ( $n_s = n_r$ ), maka tidak ada tegangan yang terinduksi baik ke stator maupun ke rotor. Apabila kecepatan putar stator lebih besar daripada kecepatan rotor ( $n_s > n_r$ ), maka tegangan akan terinduksi ke rotor sehingga mesin induksi beroperasi sebagai motor listrik. Apabila kecepatan putar rotor lebih besar daripada kecepatan putar stator ( $n_r > n_s$ ), maka tegangan akan terinduksi ke stator sehingga mesin induksi akan beroperasi sebagai generator listrik.

**2.1.Prinsip Kerja Generator Induksi Berpenguatan Sendiri**

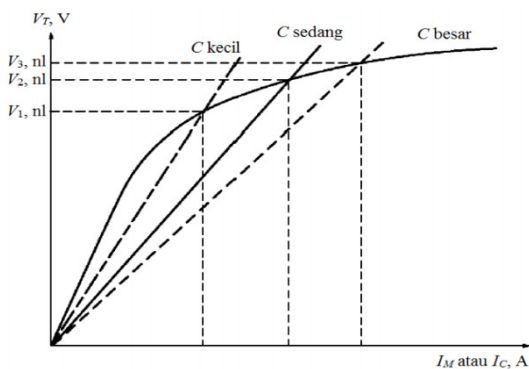
Pada generator induksi berpenguatan sendiri, proses eksitasinya didapatkan dari kapasitor bank yang dihubungkan paralel pada terminal keluarannya. Skema dari generator induksi berpenguatan sendiri dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Generator induksi berpenguatan sendiri

Dari Gambar 1 diperlihatkan bahwa kapasitor tiga fasa yang terhubung delta dihubungkan pada terminal keluaran dari generator induksi. Kapasitor ini akan menyalurkan daya reaktif pada generator untuk proses eksitasi. Proses eksitasi yang terhubung pada terminalnya, mesin induksi rotor sangkar dan mesin induksi rotor belitan dapat digunakan untuk generator induksi berpenguatan sendiri.

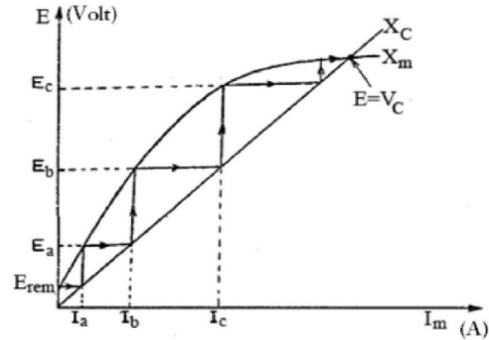
Generator induksi berpenguatan sendiri menggunakan kapasitor bank sebagai penyuplai daya reaktif yang dibutuhkan generator untuk membangkitkan tegangan. Generator induksi berpenguatan sendiri mempunyai cara kerja yang hampir sama seperti cara kerja mesin induksi yang beroperasi pada daerah saturasi hanya saja terdapat kapasitor pada terminal.



Gambar 2 Kurva tegangan terminal generator induksi berpenguatan sendiri

Jika sekelompok kapasitor tiga fasa dihubungkan kepada terminal generator induksi, tegangan tanpa beban generator

induksi adalah perpotongan kurva magnetisasi generator dengan garis beban kapasitor. Jadi, tegangan keluaran dari generator induksi dengan penguatan sendiri berupa kapasitor bank tiga fasa untuk tiga kelompok kapasitor dengan besar yang berbeda-beda diperlihatkan pada Gambar 2 [1].



Gambar 3 Proses pembangkitan tegangan

Proses pembangkitan tegangan dapat dilihat pada Gambar 3. Ketika generator induksi pertama kali diputar, magnet sisa pada kumparan medan yang ada pada rotor akan membentuk ggl induksi awal ( $E_{rem}$ ) pada belitan stator. Timbulnya  $E_{rem}$  ini memicu kapasitor untuk mengalirkan arus reaktif kapasitif sebesar  $I_a$ . Arus  $I_a$  ini merupakan arus magnetisasi yang menghasilkan fluksi celah udara. Fluksi ini kemudian menambah jumlah fluksi yang sudah ada, sehingga kemudian menghasilkan ggl induksi di stator yang lebih besar lagi yaitu sebesar  $E_a$ . Tegangan induksi  $E_a$  ini akan memicu kembali kapasitor mengalirkan arus kapasitif yang semakin besar pula yaitu sebesar  $I_b$ , yang kemudian akan menambah jumlah fluksi celah udara, sehingga dihasilkan ggl induksi yang lebih besar lagi yaitu  $E_b$ .  $E_b$  ini kemudian menghasilkan arus  $I_c$ , dan kemudian membentuk ggl induksi  $E_c$ . Demikian proses ini berjalan terus sampai akhirnya mencapai titik kesetimbangan  $E = V_C$ .

Namun proses itu dapat terjadi jika pada kumparan medan generator induksi terdapat magnet sisa. Jika tidak terdapat magnet sisa maka generator induksi harus dioperasikan sebagai motor terlebih dahulu. Ketika mesin induksi dioperasikan sebagai motor, maka mesin induksi akan menginduksikan gaya gerak listrik pada rotor. Gaya gerak listrik yang terinduksi pada rotor akan mengalirkan arus pada kumparan medan sehingga terbentuk medan magnet dan akhirnya motor berputar.

Prinsip kerja motor induksi tidak dijelaskan secara detail disini.

Ketika motor telah beroperasi, maka kecepatan putar rotor akan lebih kecil dari kecepatan sinkronnya. Pada saat kecepatan motor sudah tinggi maka penggerak mula dinyalakan. Ketika penggerak mula dinyalakan, kecepatan penggerak mula harus lebih besar dari kecepatan sinkronnya. Pada saat itu pula suplai daya yang diberikan untuk mengoperasikan motor dimatikan, dan pada terminal langsung dihubungkan pada beban. Putaran penggerak mula harus searah dengan arah putaran motor induksi. Ketika suplai daya dimatikan, maka kapasitor akan bekerja untuk menyalurkan daya reaktif dan menjaga kecepatan sinkronnya. Suplai daya reaktif yang disalurkan harus tepat untuk dapat membangkitkan tegangan yang ditentukan.

**2.2.Kapasitansi Minimum Kapasitor Eksitasi**

Besarnya kapasitansi dari kapasitor eksitasi sangat berpengaruh pada proses pembangkitan tegangan pada generator induksi. Untuk dapat membangkitkan tegangan, nilai dari kapasitor harus lebih besar dari nilai kapasitansi minimum dari generator induksi untuk proses eksitasinya. Apabila kapasitor yang dipasang lebih kecil dari kapasitansi minimumnya maka tegangan tidak dapat dibangkitkan.

Cara menentukan kapasitansi minimum dari generator induksi ialah dengan menggunakan karakteristik magnetisasi dari mesin induksi saat beroperasi sebagai motor induksi. Karakteristik magnetisasi ini didapat dengan mengoperasikan motor induksi pada kondisi beban nol. Pada kondisi beban nol, arus yang mengalir pada kapasitor ( $I_c$ ) akan sama dengan arus magnetisasi ( $I_m$ ). Tegangan (V) yang dihasilkan akan meningkat secara linier hingga titik saturasi dari magnet inti tercapai. Sehingga dalam kondisi stabil [2].

$$I_m = I_c \tag{1}$$

$$\frac{V}{X_m} = \frac{V}{X_c} \tag{2}$$

$$X_m = X_c \tag{3}$$

Dalam kondisi beban nol motor induksi, dapat dihitung besar nilai reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) dengan memberikan catu tegangan (V) kemudian mengukur besar arus magnetisasinya

$$X_m = \frac{V}{I_m} \tag{4}$$

$$X_m = X_c = \frac{1}{2\pi f C} \tag{5}$$

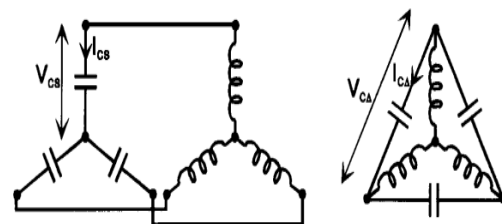
Substitusikan persamaan 4 ke dalam persamaan 5, maka didapatkan

$$C = \frac{I}{2\pi f V} \tag{6}$$

Pada persamaan 6, besarnya kapasitansi(C) merupakan besarnya kapasitansi pada tiap fasa kapasitor eksitasi yang dihubungkan secara bintang atau *star*. Sehingga persamaan kapasitor eksitasi yang dihubungkan bintang ialah sebagai berikut

$$C_s = \frac{I}{2\pi f V} \tag{7}$$

Pada sistem tiga fasa, kapasitor eksitasi dapat dihubungkan secara bintang atau secara delta, yg dapat dilihat pada Gambar 4. Hubungan bintang tidak dianjurkan untuk dihubungkan dengan generator karena hubungan bintang memiliki titik netral yang akan meningkatkan rugi-rugi [3].



Gambar 4 Hubungan bintang dan delta kapasitor eksitasi

Hubungan antara hubungan bintang dan delta dapat dilihat pada persamaan-persamaan di bawah ini:

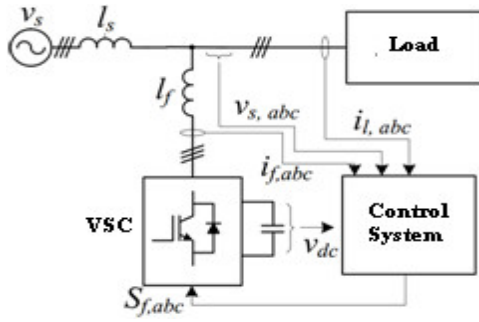
$$V_c = \sqrt{3}V_{c_s} \text{ dan } I_c = I_{c_s}/\sqrt{3} \tag{8}$$

$$X_c = \frac{V_c}{I_c} = \frac{\sqrt{3} V_{c_s}}{I_{c_s}/\sqrt{3}} = \frac{3V_{c_s}}{I_{c_s}} = 3X_{c_s} \tag{9}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c}, C = \frac{C_s}{3} \tag{10}$$

**2.3.Prinsip Kerja STATCOM**

Prinsip kerja dari STATCOM dapat dilihat pada Gambar 5.



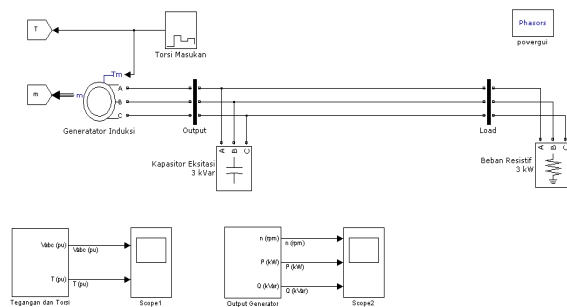
Gambar 5 Struktur sistem STATCOM [4]

Pengontrolan STATCOM diatur oleh sistem kontrol, dimana pada sistem kontrol menerima masukan dari tegangan dan arus sistem, dan tegangan dan arus STATCOM. pada sistem kontrol diatur besar tegangan normal dari sistem dan akan mengatur tegangan keluarannya sefasa dengan tegangan sistem dan. Pada kondisi normal, tegangan pada VSC dan sistem sama. Apabila terjadi perubahan tegangan yang terjadi pada sistem, maka sistem kontrol akan mengirimkan sinyal pada VSC untuk mengatur besarnya daya reaktif yang akan disuplai atau diserap. Pada saat tegangan sistem lebih besar dari tegangan VSC maka STATCOM akan menyerap daya reaktif dari sistem. Pada saat tegangan sistem lebih kecil dari tegangan VSC maka STATCOM akan menyuplai daya reaktif ke sistem [5].

**3. Metodologi Penelitian**

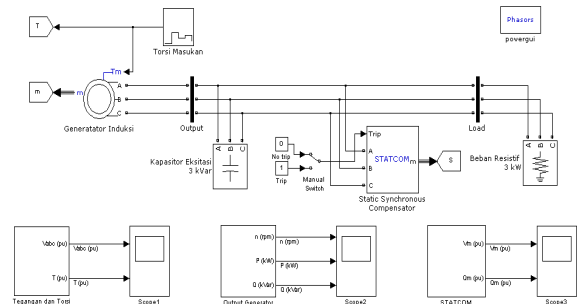
Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis dan simulasi pengaturan tegangan generator induksi berpenguatan sendiri menggunakan *static synchronous compensator* (statcom) ialah sebagai berikut

1. Membuat rangkaian simulasi yang akan dilakukan. Berikut ini rangkaian simulasi yang akan dilakukan:
  - a. Generator induksi berpenguatan sendiri, terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Rangkaian simulasi generator induksi berpenguatan sendiri

- b. Generator induksi berpenguatan sendiri menggunakan STATCOM, terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Rangkaian simulasi generator induksi berpenguatan sendiri menggunakan pengatur tegangan STATCOM

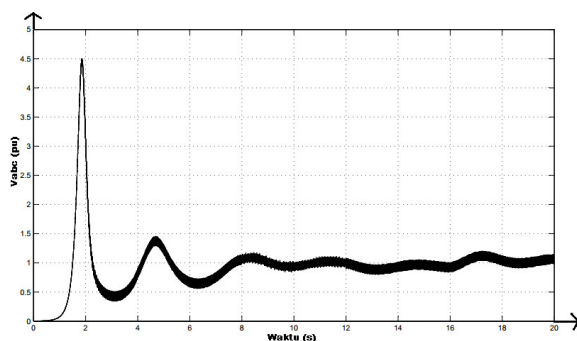
2. Memasukkan parameter mesin induksi dan STATCOM dari data yang telah diperoleh
3. Melakukan perhitungan nilai kapasitansi minimum dari kapasitor eksitasi. Lalu memasukkan nilai yang didapatkan pada model kapasitor eksitasi
4. Memasukkan besarnya beban listrik yang digunakan. Pada penelitian ini, beban yang digunakan ialah beban resistif yang besarnya tetap yaitu 3 kW
5. Menentukan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi. Pada penelitian ini, simulasi akan dilakukan selama 20 detik
6. Menentukan besarnya torsi masukan. Pada penelitian ini, torsi masukan berubah-ubah setiap waktu. Pada rentang waktu 0 sampai 4 detik diberikan torsi masukan sebesar 1,2 pu. Pada rentang waktu 4 sampai 8 detik diberikan torsi masukan sebesar 0.8 pu. Pada rentang waktu 8 sampai 12 detik diberikan torsi masukan sebesar 1 pu. Pada rentang waktu 12 sampai 16 detik diberikan torsi masukan sebesar 0.9 pu. Pada rentang waktu 16 sampai 20 detik diberikan torsi masukan sebesar 1,1 pu.
7. Menjalankan simulasi

**4. Hasil dan Pembahasan**

Setelah dilakukan simulasi, maka dapat dilihat perbandingan tegangan keluaran yang dihasilkan antara generator induksi berpenguatan sendiri tanpa pengatur tegangan dan generator induksi berpenguatan sendiri menggunakan pengatur tegangan *static synchronous compensator* (STATCOM).

#### 4.1. Hasil Simulasi Generator Induksi Berpenguatan sendiri

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa pada  $t=0$  detik sampai  $t = 0,6$  detik, besar tegangan masih bernilai 0. Hal tersebut menandakan terjadinya proses pembangkitan tegangan. Arus sisa pada generator induksi menimbulkan medan magnet yang sangat kecil medan magnet akan menimbulkan gaya gerak listrik yang kecil pula. Gaya gerak listrik ini akan menimbulkan tegangan yang akan memicu kapasitor eksitasi menyalurkan daya reaktif. Pada proses ini, nilai tegangan kapasitor akan meningkat secara bertahap hingga seluruh tegangan dibangkitkan. Meningkatnya tegangan kapasitor ini akan meningkatkan besar tegangan yang diinduksikan pada rotor, akibatnya ada induksi ke rotor maka arus di rotor juga meningkat karena nilai tahanan pada rotor tetap. Arus rotor yang meningkat menyebabkan meningkatnya pula medan magnet pada rotor. Meningkatnya besar medan magnet rotor akan membuat gaya gerak listrik yang terjadi pada stator semakin besar akibat semakin membesarnya nilai fluks magnet. Gaya gerak listrik di stator yang membesar akan meningkatkan nilai arus stator generator atau arus yang mengalir ke kapasitor. Proses pembangkitan ini akan terus terjadi hingga seluruh tegangan dapat dibangkitkan.



Gambar 8 Grafik tegangan keluaran V (pu) vs waktu (s)

Pada grafik tegangan keluaran V (pu) bangkitnya seluruh tegangan dapat terlihat pada saat tegangan mencapai nilai puncaknya. Setelah tegangan mencapai nilai puncak, nilai ini kemudian turun dan berosilasi selama keadaan transienya dan mencapai sebuah nilai tegangan, pada grafik sekitar 1 pu, pada saat generator telah mencapai keadaan tunak.

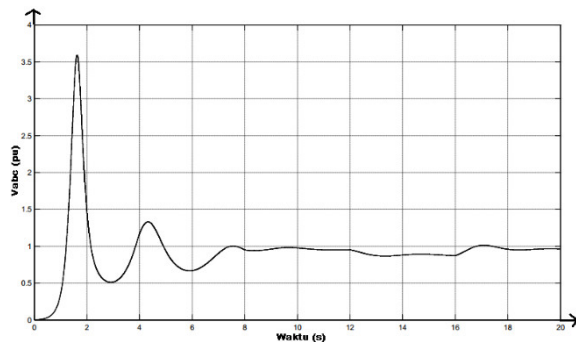
Lamanya waktu transien dari generator induksi berpenguatan sendiri tergantung dari besar kecilnya torsi masukan yang diberikan

pada generator. Semakin besar torsi yang diberikan, proses pembangkitan tegangan akan semakin cepat sehingga generator juga akan lebih cepat mencapai keadaan tunak. Hal ini dapat terjadi karena ketika torsi masukan yang diberikan semakin besar maka kecepatan putar generator juga semakin besar. Semakin besar kecepatan putar maka nilai GGL yang dihasilkan pada terminal generator juga semakin besar. Semakin besar arus generator ini akan membuat torsi elektromagnetik generator semakin besar juga. Torsi elektromagnetik ini akan melawan arah torsi input generator sehingga akan menurunkan kecepatan putar generator. Torsi mekanik yang diberikan pada generator selanjutnya akan menyesuaikan besarnya dengan torsi elektromagnetik sehingga membuat grafik kecepatan berosilasi. Penyesuaian ini akan terjadi hingga generator mencapai kondisi tunak. Ketika telah mencapai keadaan tunak, nilai resultan antara torsi mekanik dan torsi elektromagnetik akan tetap. Hal ini terbukti dengan besar kecepatan putar generator yang sudah konstan. Dengan semakin besarnya torsi masukan yang diberikan, maka nilai torsi elektromagnetik yang terjadi ketika awal timbulnya arus akan semakin besar. Hal ini membuat penyesuaian besar resultan torsi akan semakin cepat sehingga keadaan tunak dapat tercapai dengan lebih cepat.

#### 4.2. Hasil Simulasi Generator Induksi Berpenguatan Sendiri Menggunakan STATCOM

Pada Gambar 9 terlihat bahwa secara umum tegangan keluaran generator pada simulasi ini berbeda dengan tegangan keluaran pada simulasi generator induksi berpenguatan sendiri tanpa pengendali tegangan. Perbedaan terjadi antara simulasi generator induksi berpenguatan sendiri tanpa pengendali tegangan dengan simulasi generator induksi berpenguatan sendiri dengan menggunakan STATCOM adalah pada tegangan yang dihasilkan pada ketiga fasa. Tegangan yang dihasilkan pada simulasi generator induksi berpenguatan sendiri dengan menggunakan STATCOM besarnya lebih konstan dan lebih halus tanpa adanya ripple. Tidak seperti tegangan yang dihasilkan pada simulasi generator induksi tanpa pengendali tegangan dimana besarnya berubah dan tidak stabil. Hal ini karena STATCOM memberikan daya reaktif pada sistem sehingga bisa menjaga

tegangan pada sisi beban maupun bagian stator generator induksi agar tetap konstan.



Gambar 9 Grafik tegangan keluaran V (pu) vs waktu (s)

Pada simulasi ini, STATCOM menghasilkan daya reaktif. Daya reaktif yang dihasilkan oleh STATCOM terhubung dengan bagian stator pada generator induksi berpenguatan sendiri. Hal ini menyebabkan arus pada bagian stator generator induksi berpenguatan sendiri mengalami perubahan akibat daya reaktif yang dihasilkan oleh STATCOM. Apabila daya reaktif yang dihasilkan STATCOM semakin tinggi maka arus pada bagian stator generator juga semakin tinggi. Demikian pula sebaliknya apabila daya reaktif yang dihasilkan STATCOM berkurang maka pada bagian stator generator induksi berpenguatan sendiri juga berkurang. Perubahan arus tersebut juga mempengaruhi besar torsi elektromagnetik pada generator induksi berpenguatan sendiri. Apabila besar arus bertambah maka torsi elektromagnetis yang dihasilkan juga bertambah, demikian juga sebaliknya.

Penggunaan STATCOM sebagai pengatur tegangan pada generator induksi berpenguatan sendiri mampu menghasilkan besar tegangan yang stabil. Namun STATCOM tidak murah harganya seperti kapasitor serta bentuk fisiknya yang lumayan besar. Karakteristik STATCOM mampu mengatur tegangan untuk beban induktif maupun kapasitif, efektif digunakan pada tegangan tinggi.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Pada proses awal pembangkitan tegangan, tegangan yang dibangkitkan sangat besar.
2. Setiap terjadi perubahan torsi masukan, tegangan naik/ turun beberapa saat,

kemudian kembali normal sesuai dengan torsi masukannya

3. Setelah dipasang STATCOM, tegangan yang dihasilkan lebih halus tanpa adanya ripple
4. Perubahan nilai parameter  $K_p$  dan  $K_i$  pada Vac regulator, Vdc Regulator dan Current Regulator sangat mempengaruhi terhadap pengaturan tegangan
5. STATCOM menyuplai daya reaktif sesuai dengan yang dibutuhkan

## 6. Daftar Pustaka

- [1] Chapman, Stephan J., "*Electric Machinery Fundamentals*", Edisi ke-4, McGraw-Hill, New York, 2005
- [2] Shekar, T. Chandra dan Bishnu P. Muni, "*Voltage Regulator for Self Excited Induction Generator*", IEEE Power Engineering Journal, 2004
- [3] Smith, Nigel, "*Motor As Generator for Micro-hydro Power*", ITDG Publishing, London, 1994
- [4] Cimbals, Raimonds., Oskars Krievs, dan Leonids Ribickis, "*A Static Synchronous Compensator for Reactive Power Compensation under Distorted Mains Voltage Conditions*", 10th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Pärnu, 2011
- [5] Padiyar, K.R., "*FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*", New Age International Publishers, New Delhi, 2007