

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai pembahasan teori dari referensi yang mendukung dalam penulisan skripsi ini.

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro adalah pembangkit listrik berukuran kecil yang memanfaatkan air sebagai tenaga penggerak turbin atau kincir air. Sumber tenaga berupa air dengan tinggi jatuh yang tidak terlalu tinggi. PLTMH merupakan bagian dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dimana energi air (potensial kinetik) sebagai sumber energi/daya dengan kapasitas daya terbangkitkan sampai dengan 500 kW. Sedangkan untuk pembangkitan listrik yang dapat menghasilkan energi listrik sampai sebesar 2 MW didefinisikan sebagai pembangkit listrik minihidro (Wibawa, 2001:43).

Air yang digunakan pada PLTMH dapat diperoleh dengan cara membendung ataupun dengan memindahkan aliran air yang telah ada untuk mendapatkan tinggi jatuh air yang cukup untuk membangkitkan daya listrik. Pada skripsi ini digunakan PLTMH dengan dua generator sinkron 3 fasa yang berkapasitas daya 40 kVA dan 16 kVA.

2.1.1 Prinsip Kerja

PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan perbedaan ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin/kincir air sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan listrik.

PLTMH memiliki bendungan untuk mengatur aliran air yang akan dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak PLTMH. Di dekat bendungan terdapat bangunan pengambilan air (*intake*). Kemudian terdapat pula saluran konduktor yang berfungsi mengalirkan air dari *intake*. Saluran ini dilengkapi dengan saluran pelimpah pada setiap jarak tertentu untuk mengeluarkan air yang berlebih.

Selain itu, PLTMH memiliki kolam penenang (*forebay*) untuk menenangkan air yang akan masuk ke turbin dan mengarahkannya masuk ke pipa pesat (*penstock*). Pipa pesat berfungsi mengalirkan air sebelum masuk ke turbin. Dalam pipa ini, energi potensial air di kolam penenang diubah menjadi energi kinetik yang akan memutar poros turbin / kincir air. Energi yang timbul akibat putaran poros tersebut kemudian disalurkan ke generator agar dapat diubah menjadi energi listrik.

Sistem transmisi daya poros pada generator dapat berupa sistem transmisi langsung (daya poros langsung dihubungkan dengan poros generator dengan bantuan kopling), atau sistem transmisi daya tidak langsung, yaitu menggunakan sabuk atau belt untuk memindahkan daya antara dua poros sejajar. Keuntungan sistem transmisi langsung adalah lebih kompak, mudah dirawat, dan efisiensinya lebih tinggi. *Gear box* dapat digunakan untuk mengoreksi rasio kecepatan putaran. Sistem transmisi tidak langsung memungkinkan adanya variasi dalam penggunaan generator secara lebih luas karena kecepatan putar poros generator tidak perlu sama dengan kecepatan putar poros turbin. Jenis sabuk yang biasa digunakan untuk PLTMH skala besar adalah jenis *flat belt*, sedang *V-belt* digunakan untuk skala di bawah 20 kW. Listrik yang dihasilkan oleh generator dapat langsung disalurkan lewat kabel pada tiang-tiang listrik menuju rumah konsumen (Reza, 2010:77).

2.1.2 Konversi Energi Listrik Tenaga air

Besarnya daya hidrolis (P_h) yang merupakan potensi sumber daya energi air pada suatu wilayah, ditentukan melalui persamaan : (Patty, 1995:97)

$$P_h = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h \text{ Watt} = 9,8 \cdot Q \cdot h \text{ (kW)} \quad (2.1)$$

dengan :

- P_h : daya hidrolis (kW)
- Q : debit air (m^3/s)
- ρ : massa jenis air ($= 1000 \text{ kg/m}^3$)
- g : gravitasi bumi ($= 9,8 \text{ m/s}^2$)
- h : tinggi jatuh air (m)

Ada beberapa hal yang sangat mempengaruhi daya keluaran dari sistem PLTMH, Selain besarnya debit air dan tinggi jatuh air, daya keluaran tergantung dari efisiensi peralatan yang dipakai, diantaranya pipa pesat, turbin, transmisi mekanik, dan generator yang dipakai. Jika efisiensi pipa pesat (η_{pp}) dan efisiensi turbin (η_{tb}) diketahui, maka besarnya daya mekanik turbin dapat ditentukan dari persamaan (Wibawa, 2001:57) :

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot \eta_{pp} \cdot P_h \text{ (kW)} \quad (2.2)$$

Apabila antara turbin dengan generator terdapat perangkat sistem transmisi mekanik (η_{tm}), dan efisiensi generator (η_g) diketahui, dapatlah ditentukan besarnya daya keluaran elektrik dari generator, melalui persamaan (Wibawa, 2001:33) :

$$P_{out} = \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_{tb} \text{ (kW)} \quad (2.3)$$

atau :

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot P_h \text{ (kW)} \quad (2.4)$$

sehingga :

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot Q \cdot g \cdot h \text{ (kW)} \quad (2.5)$$

Dalam hal ini, η_{total} adalah efisiensi total sistem mulai dari turbin sampai dengan generator ($\eta_{total} = \eta_{pp} \cdot \eta_{tb} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_g$). Sedangkan $\eta_{pp} \cdot \eta_{tb}$ dikenal pula dengan istilah efisiensi mekanik (η_{mek}).

2.2 Generator Sinkron

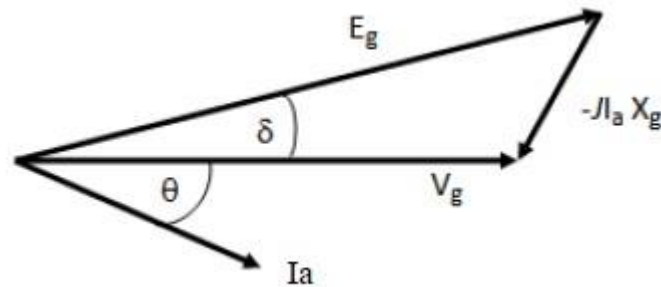
Generator sinkron diklasifikasikan sebagai generator berkecepatan tinggi dan digerakkan oleh uap atau turbin gas, atau generator berkecepatan rendah yang digerakkan oleh turbin air. Biasanya generator berkecepatan tinggi terdiri dari dua atau empat kutub sehingga di sistem 50 Hz generator akan digerakkan pada kecepatan 3000 atau 1500 rpm. Sebaliknya, generator kecepatan rendah biasanya beroperasi pada 500 rpm dan di bawahnya, memiliki jumlah kutub yang cukup besar (Jan Machowski, 2008 : 10).

Kedua bagian utama sebuah mesin serempak adalah susunan ferromagnetik. bagian yang diam, yang pada dasarnya adalah sebuah silinder kosong dinamakan stator atau jangkar (*armature*) dan mempunyai parit-parit (*slots*) yang didalamnya terdapat lilitan kumparan stator. Lilitan ini membawa arus yang diberikan pada suatu beban listrik atau sistem oleh sebuah generator. Rotor adalah bagian yang dari mesin yang dipasang poros dan berputar di dalam stator yang kosong. Lilitan pada rotor dinamakan lilitan medan (*field winding*) dan dicatu dengan arus DC (Stevenson, 1996 : 122).

Belitan eksitasi diberikan arus DC untuk menghasilkan fluks magnetik dengan daya yang sebanding dengan arus eksitasi. Fluks magnet berputar kemudian menginduksi pada setiap kumparan fasa stator yang menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan tiga fasa yang mengakibatkan arus AC mengalir menuju ke sistem daya yang dalam keadaan berbeban. (Jan Machowski, 2008 : 10).

Pengubahan penguatan atau eksitasi mesin serempak adalah faktor yang penting dalam pengaturan aliran daya. Apabila sebuah generator yang terminalnya dihubungkan ke suatu sistem daya yang besar sehingga tegangan V_g pada terminal generator tersebut tidak akan berubah karena adanya perubahan eksitasi generator. Apabila masukan daya generator dipertahankan, maka suatu nilai E_g (ggl) generator dapat diubah-ubah dengan

merubah besar eksitasi medan DC. Maka untuk suatu nilai E_g , diagram fasor generator diperlihatkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram fasor generator yang terlalu diperkuat (*overexcited*)

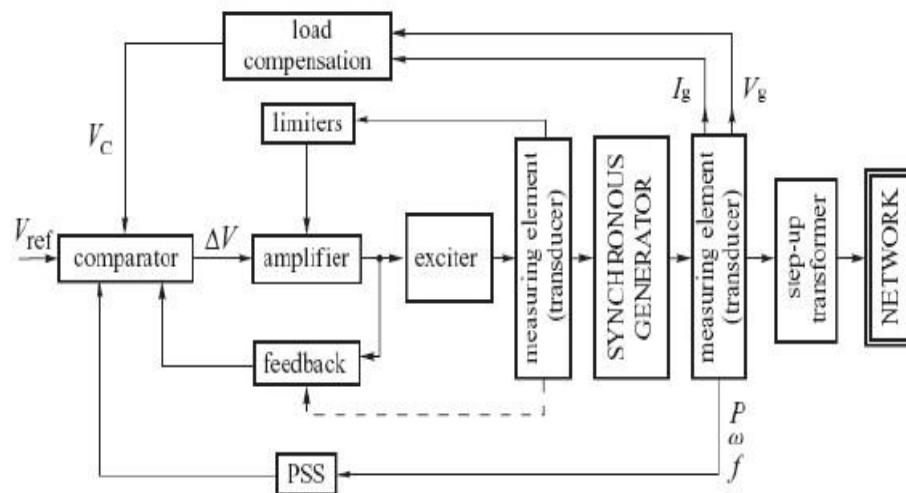
Sumber: Stevenson, 1996 : 130

Sudut δ dinamakan dengan sudut momen (*torque angle*) atau sudut daya (*power angle*) dari mesin itu. Generator yang terlalu diperkuat (*overexcited*) mencatu arus tertinggal ke sistem.

2.2.1 AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

AVR (*Automatic Voltage Regulator*) berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator.

Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output Generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output Generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis.



Gambar 2.2 Diagram blok AVR

Sumber : Jan Machowski, 2008 : 13

2.2.2 Interkoneksi Generator

Operasi interkoneksi pusat-pusat tenaga listrik pada dasarnya merupakan perluasan interkoneksi satu generator dengan generator lain dengan tambahan resistansi dan reaktansi saluran-saluran interkoneksi yang biasa disebut sinkronisasi. Adapun tujuan dari operasi interkoneksi generator antara lain :

1. Mendapatkan daya yang lebih besar.
2. Berfungsi sebagai daya cadangan tambahan untuk permintaan beban yang suatu ketika bertambah.
3. Untuk pemadaman satu mesin dan penyalaan mesin standby tanpa adanya pemutusan aliran daya.
4. Untuk menjamin kontinuitas ketersediaan daya listrik.

Dalam melakukan sinkronisasi dua buah generator atau lebih Syarat-syarat yang harus dipenuhi ialah :

- Tegangan dari kedua Generator yang diparalelkan harus sama.
- Frekuensi dari kedua generator harus sama.
- Sudut fasa dari kedua generator harus sama.
- Urutan fasa dari kedua generator harus sama.

Jika syarat-syarat diatas tidak dipenuhi maka akan berakibat :

1. Pada generator yang diinterkoneksi dengan generator lain pada saat sama-sama belum berbeban, maka apabila tegangan lebih tinggi power factor akan rendah (induktif) namun sebaliknya *power factor* generator yang lain akan juga rendah

namun bersifat kapasitif, sehingga generator yang lain mempunyai kecenderungan *reverse power*.

2. Jika frekuensi tidak sama diparalelkan maka akan terjadi beberapa kemungkinan yaitu dari yang paling ringan sampai yang paling berat. Sebagai contoh generator 1 mempunyai frekuensi 49 Hz sedangkan generator 2 mempunyai frekuensi 50 Hz. Dengan melihat *synchronoscope* maka jarum akan berputar dengan kecepatan sudut 2π / detik atau 1 putaran/ detik. Jika pada saat masuk pas pada sudut nol maka generator yang memiliki frekuensi lebih rendah akan mengalami *reverse power* dimana pada saat terhubung sinkron frekuensi ada pada 49,5 Hz . Dan proteksi *reverse power* akan bekerja mengamankan, namun jika pada saat masuk sinkron pas posisi *synchronoscope* di sudut 180^0 itu berarti terjadi selisih tegangan yang sangat besar disamping kemungkinan *reverse* juga terjadi kerusakan yang fatal terhadap generator, di *breaker* akan muncul arus yang besar sehingga menimbulkan percikan api yang besar dan diengine akan terjadi hunting sesaat, hal itu bisa mengakibatkan kerusakan mekanis sampai patah pada cransaft. Karena tekanan beban besar yang tiba tiba.
3. Jika sudut fase tidak sama namun kecenderungan frekuensi sama hanya akan menyebabkan *hunting* sesaat tanpa ada kemungkinan *reverse power*, namun juga sangat berbahaya jika berbeda sudutnya terlalu besar, *engine* akan mengalami tekanan sesaat hingga hunting.
4. Jika urutan phase tidak sama system ABC di parallel dengan system CBA, maka akan terjadi selisih tegangan sebesar 2 kali tegangan nominal, hal itu bisa dideteksi dengan diukur secara manual menggunakan voltmeter, pada saat *synchronoscope* menunjuk 0^0 , terdapat selisih sebesar 2×400 V.

Mengacu pada syarat-syarat diatas, Metoda sederhana yang dipergunakan untuk mensinkronkan dua generator atau lebih adalah dengan mempergunakan sinkronoskop lampu. Yang harus diperhatikan dalam metoda sederhana ini adalah lampu-lampu indikator harus sanggup menahan dua kali tegangan antar fasa. Untuk hubungan sinkronoskop lampu sendiri ada beberapa hubungan, yaitu hubungan lampu terang, hubungan lampu gelap, hubungan lampu terang-gelap.

2.3 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan hal penting dalam desain dan perencanaan pengembangan sistem daya guna menentukan operasi terbaik pada sistem. Keterangan

utama yang diperoleh dari sebuah studi aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan, daya reaktif, daya aktif yang dibangkitkan generator dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran/cabang. Studi ini juga digunakan untuk mengevaluasi sistem tenaga listrik terhadap pengaruh kondisi pembebanan yang berbeda. Studi-studi seperti hubung singkat, stabilitas, pembebanan ekonomis juga memerlukan studi aliran daya terlebih dahulu.

Setiap titik/bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P , daya reaktif Q , tegangan E , dan sudut fasa tegangan δ . Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , E dan δ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut di atas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun (*slack bus*). (Grainger dan Stevenson, 1994 : 332)

- Bus beban (*P-Q bus*)

Pada bus ini, selisih daya antara daya yang dibangkitkan oleh generator dan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya.

- Bus generator (*P-V bus*)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif P , sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q .

- Bus berayun (*Slack bus*)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa, sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif P dan daya reaktif Q . Umumnya dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

2.4 Sistem Per Unit

Saluran transmisi tenaga dioperasikan pada tingkat tegangan dimana kilovolt merupakan unit yang sangat memudahkan untuk menyatakan tegangan. Karena besarnya daya yang harus disalurkan dengan satuan kilowatt atau megawatt dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere adalah istilah-istilah yang sudah biasa dipakai. Misalnya, jika sebagai tegangan dasar dipilih 120 kV, maka tegangan-tegangan sebesar 108, 120 dan 126 kV berturut-turut menjadi 0,90, 1,00 dan 1,05. Definisi nilai per unit untuk suatu kuantitas ialah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal (Stevenson, 1996: 31).

Apabila pada tegangan dan daya yang digunakan adalah tegangan dan daya 3 fasa, maka perhitungan nilai dasar menggunakan rumus-rumus berikut (Stevenson, 1996: 31):

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar}, \frac{kV_{LL}}{\sqrt{3}})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} / 3 \text{ dasar}} \quad (2.6)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar}, kV_{LL})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.7)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar}, kV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.8)$$

2.5 Stabilitas Sistem Daya

Stabilitas sistem daya didefinisikan sebagai sifat sistem yang memungkinkan generator bergerak sinkron dalam sistem dan bereaksi terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta kembali ke kondisi kerja semula (keseimbangan) bila keadaan menjadi normal kembali (Prabha Kundur, 1994 : 17).

Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen. Biasanya masalah kestabilan yang sering terjadi adalah masalah beban lebih, berkurangnya pasokan daya reaktif sehingga akan mengakibatkan sistem berada pada kondisi *voltage collapse* dan akan terjadi kemungkinan terburuk yaitu terjadi *blackouts*.

Masalah kestabilan biasanya diklasifikasikan menjadi tiga tipe bergantung pada sifat dan besar gangguan, yaitu (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:213) :

1. Stabilitas *steady state*
2. Stabilitas *transient*
3. Stabilitas dinamis

2.5.1 Stabilitas *Steady State*

Kestabilan *Steady-State* merupakan keadaan dimana sistem tenaga mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan *steady-state* menggunakan pendekatan model linier. Kestabilan *steady state* pada sistem tenaga dapat disebut kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*). Stabilitas *steady-state* bergantung kepada kapasitas pembangkitan dan efektifitas perangkat kontrol otomatis, terutama untuk regulasi tegangan otomatis (AVR) pada generator (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:214).

2.5.2 Stabilitas *Transient*

Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi. Stabilitas transien adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol governor) yang mengikuti gangguan pada sistem (Robert H. Miller & James H. Malinowski, 1994:215).

Sebagaimana pada stabilitas *steady-state*, kecepatan respon pada sistem eksitasi generator merupakan faktor yang penting dalam mempertahankan stabilitas *transient*. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal merupakan hal yang penting dalam mempertahankan kestabilan.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa stabilitas *transient* adalah kemampuan untuk tetap pada kondisi sinkron selama periode terjadinya gangguan dan sebelum adanya reaksi dari governor. Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan. Setelah periode ini, governor akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4 hingga 5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif.

2.5.3 Stabilitas Dinamis

Beberapa waktu setelah gangguan, governor pada prime mover akan bereaksi untuk menaikkan atau menurunkan energi input, sesuai kondisi yang terjadi, untuk mengembalikan keseimbangan antara energi input dan beban listrik yang ada. Hal ini biasanya terjadi sekitar satu hingga satu setengah detik setelah terjadi gangguan. Periode ketika governor mulai bereaksi dan waktu ketika kestabilan mencapai kondisi *steady-state* adalah periode ketika karakteristik kestabilan dinamik mulai efektif. Stabilitas dinamis adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*) hingga sistem mencapai kondisi *steady-state* yang baru (Robert H. Miller & James H. Malinowski, 1994:216).

Selama periode ini, governor akan membuka atau menutup katup sesuai dengan yang diperlukan untuk meningkatkan atau menurunkan energi input pada prime mover dan operasi kontroler saluran untuk mengembalikan aliran daya pada saluran ke kondisi normal. Biasanya bila generator peka terhadap *drop* kecepatan, generator akan bereaksi untuk membuka katup dan memberikan uap lebih pada turbin uap atau air pada turbin

air serta memberikan cukup energi untuk menahan penurunan kecepatan (frekuensi) dan mempercepat sistem hingga kembali ke keadaan normal.

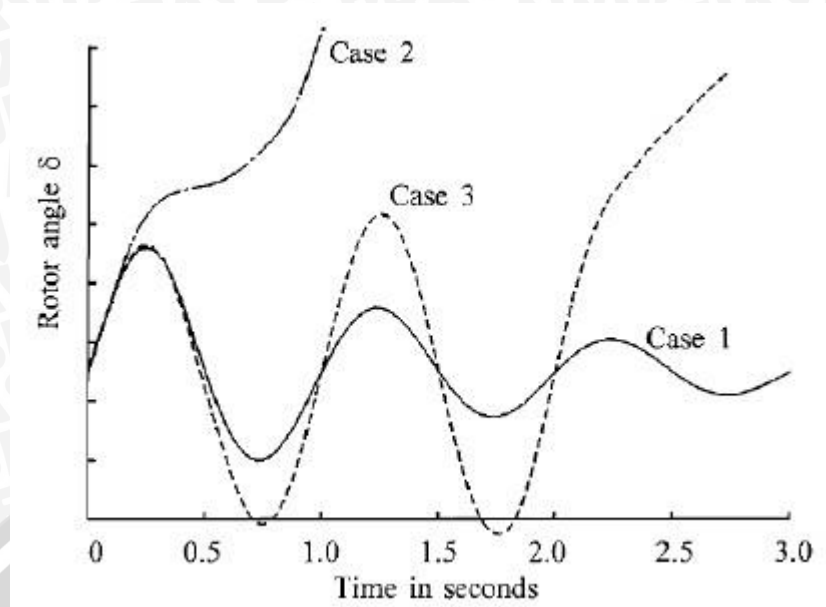
2.6 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

2.6.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada sistem untuk tetap sinkron pada operasi normal dan setelah mengalami gangguan (Grigsby,2007). Mekanisme mesin sinkron yang saling terinterkoneksi antara satu mesin dengan mesin yang lain adalah melalui kekuatan memulihkan torsi yang bertindak setiap kali ada torsi yang cenderung mempercepat atau mengurangi kecepatan. Ketika dalam kondisi mantab, ada keseimbangan antara torsi input mekanis dan torsi keluaran listrik dari setiap mesin dan kecepatan konstan. Jika sistem ini terganggu, maka keseimbanganpun juga akan terganggu. Ketika mesin sinkron kehilangan sinkronisme dengan seluruh sistem, rotor akan berjalan pada kecepatan yang lebih tinggi atau lebih rendah dari yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan pada frekuensi sistem sehingga sistem proteksi akan mengisolasi mesin dari dari sistem.

Untuk kemudahan dalam analisis dan untuk mendapatkan manfaat tentang sifat masalah stabilitas, biasanya fenomena stabilitas sudut rotor dikarakteristikkan menjadi dua kategori berikut : (Prabha Kundur, 1994: 23)

- a. Stabilitas sinyal kecil (atau gangguan kecil) adalah kemampuan dari sistem daya untuk menjaga sinkronisasi dalam gangguan kecil. Gangguan tersebut terjadi terus menerus pada sistem karena variasi kecil dalam beban.
- b. Stabilitas peralihan merupakan kemampuan dari sistem daya untuk menjaga sinkronisasi ketika terjadi gangguan peralihan. Stabilitas tergantung pada keadaan operasi awal dari sistem dan tingkat gangguan. Gambar 2.3 memperlihatkan perilaku mesin sinkron dalam keadaan stabil dan tidak stabil.



Gambar 2.3 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan

Sumber : Prabha Kundur ,1994: 26

Gambar tersebut menunjukkan respon dari sudut rotor yang stabil dan untuk dua kasus tidak stabil. Dalam kasus yang stabil (*case 1*), sudut rotor meningkat hingga mencapai maksimum kemudian menurun dan berosilasi hingga mencapai kondisi mantab kembali. Dalam kasus 2 (*case 2*), sudut rotor terus meningkat hingga kehilangan sinkronisasi. Bentuk ketidakstabilan ini disebut sebagai ketidakstabilan ayunan pertama. Dalam kasus 3 (*case 3*), sistem stabil dalam ayunan pertama, tetapi menjadi tidak stabil akibat osilasi yang terus berkembang sehingga menyebabkan mesin kehilangan sinkronisasi. Bentuk ketidakstabilan ini biasanya adalah ketidakstabilan sinyal kecil dan tidak harus sebagai akibat dari gangguan peralihan.

2.6.2 Persamaan Ayunan

Dalam sebuah mesin sinkron, penggerak utama memberikan sebuah torsi mekanis T_m pada poros mesin dan mesin menghasilkan suatu torsi elektromagnetik T_e . Jika, sebagai akibat dari gangguan, torsi mekanis lebih besar daripada torsi elektromagnetik, sebuah torsi percepatan T_a adalah (Grigsby, 2007 : 8.2):

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.9)$$

dengan :

T_a : torsi percepatan

T_m : torsi mekanis

T_e : torsi elektromagnetik

Dalam hal ini torsi lain yang disebabkan oleh gesekan, rugi-rugi inti, dan angin dalam mesin diabaikan. T_a memiliki efek mempercepat mesin, dengan inersia J (kg.m^2) yang terdiri dari inersia dari generator dan penggerak utama dan oleh karena itu Persamaan (2-36) dinyatakan sebagai : (Grigsby, 2007 : 8.2)

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (2.10)$$

dengan :

J : inersia mesin (kg.m^2)

t : waktu dalam detik

ω_m : kecepatan sudut mekanik rotor mesin dalam rad/s

Hal ini secara umum dapat menunjukkan persamaan inersia mesin yang konstan. Jika ω_{0m} adalah rentang kecepatan sudut mekanik dalam rad/s, J dapat ditulis sebagai berikut : (Grigsby, 2007:8.2)

$$J \frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{\text{dasar}} \quad (2.11)$$

dengan :

H : konstanta inersia mesin (MJ/MVA)

VA_{dasar} : daya dasar (MVA)

Sehingga,

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{\text{dasar}} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (2.12)$$

Dan sekarang, jika ω_r menunjukkan kecepatan sudut rotor (rad/s) dan nilai ω_0 pada rentangnya, persamaan dapat ditulis sebagai : (Grigsby, 2007 : 8.2)

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (2.13)$$

Akhirnya dapat ditunjukkan bahwa :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d^2\delta}{\omega_0 dt^2} \quad (2.14)$$

di mana δ adalah posisi sudut dari rotor sehubungan dengan suatu putaran sinkron terhadap acuan.

Berdasarkan Persamaan (2.13) dan (2.14) akan diperoleh:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.15)$$

Dengan mengingat bahwa daya adalah hasil kali momen putar dengan kecepatan sudutnya, sehingga diperoleh:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (2.16)$$

dan dapat diperoleh pula suatu persamaan dengan pertimbangan kecepatan sinkron ω_s :

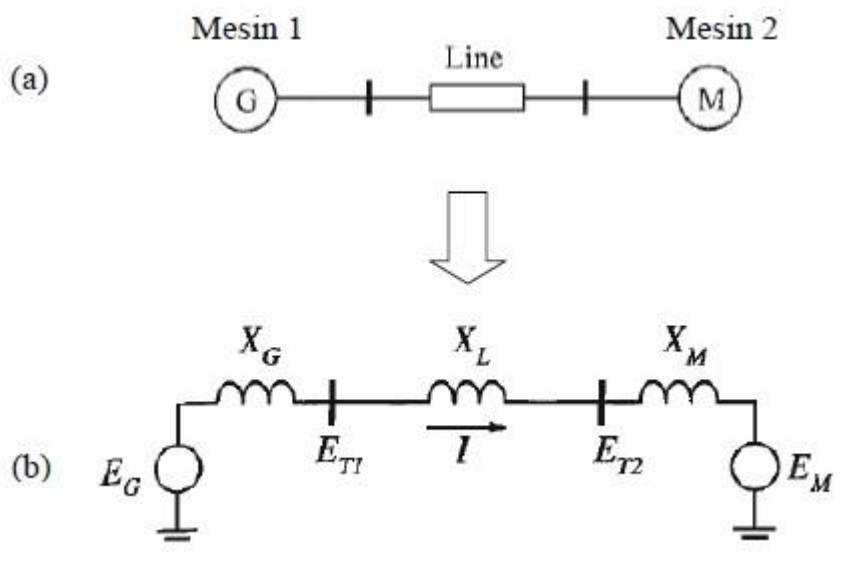
$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \quad (2.17)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.18)$$

Pada sistem yang stabil selama gangguan, sudut rotor (dijelaskan oleh persamaan ayunan) akan berosilasi di sekitar titik kesetimbangan. Ketika terjadi gangguan atau penambahan beban secara tiba-tiba dalam jumlah besar, maka daya keluar elektrik generator akan jauh melampaui daya masuk mekanis. Kekurangan ini akan disuplai dengan berkurangnya energi kinetik generator. Jadi generator akan berputar lebih lambat sehingga sudut daya generator bertambah besar dan daya masuk generator juga bertambah. Jika sudut rotor meningkat tanpa batas, mesin dikatakan tidak stabil selama mesin terus mempercepat dan tidak mencapai keadaan keseimbangan baru. Dalam sistem multimesin, mesin akan melepas sinkronisasi dengan mesin lainnya.

2.6.3 Hubungan Sudut Daya

Karakteristik penting yang memiliki pengaruh pada stabilitas sistem daya adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi sudut dari rotor mesin sinkron. Hubungan ini merupakan hubungan nonlinier. Gambar 2.4(a) menunjukkan sebuah sistem sederhana, dimana dalam sistem ini terdapat 2 mesin sinkron yang terhubung melalui saluran transmisi. Diasumsikan jika mesin 1 direpresentasikan sebagai generator yang menyuplai daya ke sebuah motor yang direpresentasikan sebagai mesin 2. (Prabha Kundur, 1994: 20).



Gambar 2.4 Model sistem sederhana (a) diagram segaris sistem, dan (b) rangkaian ekivalen sistem
 Sumber: Prabha Kundur ,1994: 21

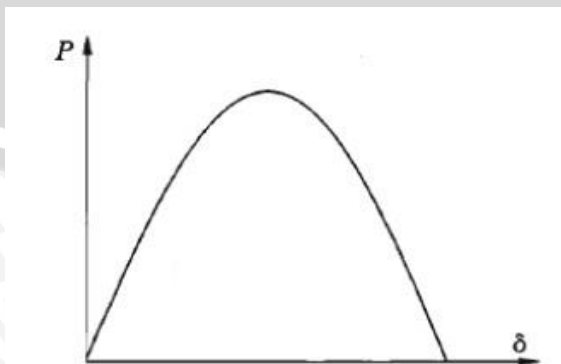
Gambar 2.4(b) menunjukkan rangkaian ekivalen sistem yang dapat digunakan dalam studi hubungan sudut daya. Besar daya yang disalurkan dari generator sesuai dengan persamaan (2.19).

$$P_e = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \tag{2.19}$$

dimana :

$$X_T = X_G + X_L + X_M \tag{2.20}$$

Gambar 2.5 menunjukkan hubungan sudut daya. Dalam kurva tersebut terlihat jika peningkatan daya pada nilai awal δ meningkat hingga mencapai 90° ketika P_e mencapai maksimum. Di atas $\delta = 90^\circ$, daya menurun sampai pada $\delta = 180^\circ$, $P_e = 0$. Ini adalah hubungan daya-sudut yang disebutkan di atas dan menggambarkan energi listrik ditransmisikan sebagai fungsi dari sudut rotor.



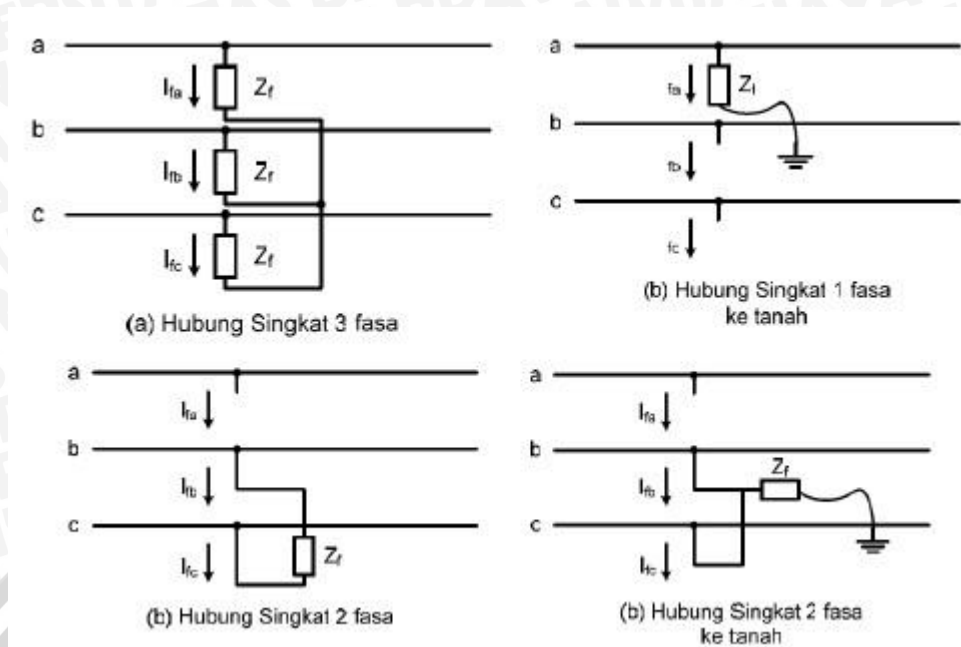
Gambar 2.5 Hubungan sudut daya antara dua mesin sistem
 Sumber: Prabha Kundur ,1994: 26

2.7 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan merupakan kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga tegangan tetap stabil di semua bus dalam suatu sistem pada saat kondisi operasi normal dan setelah terjadi suatu gangguan (Prabha Kundur, 1994: 27). Suatu sistem memasuki daerah ketidakstabilan tegangan ketika suatu gangguan menyebabkan kondisi sistem tersebut mengalami *drop* tegangan yang tidak dapat dikendalikan. Faktor utama yang menjadi penyebab ketidakstabilan ialah ketidakmampuan sistem tenaga dalam menyediakan daya reaktif. Sebuah kriteria untuk stabilitas tegangan adalah bahwa pada kondisi operasi yang diberikan untuk setiap bus dalam sistem dimana tegangan bus akan meningkat sesuai dengan injeksi daya reaktif pada bus yang sama juga meningkat. Fenomena ketidakstabilan tegangan dapat berlangsung cepat (jangka pendek) atau lambat (jangka panjang) (IEEE-CIGRE,2004). Tegangan dalam sistem dikatakan stabil apabila *drop* tegangan yang terjadi dalam sistem tidak melebihi dari 500 milidetik dan tegangan sistem kembali ke keadaan *steady state* (IEEE-Std,1995). Masalah stabilitas tegangan jangka pendek biasanya terkait dengan kecepatan tanggapan dari pengatur tegangan (misalnya, AVR) dan konverter daya elektronik. Dalam kasus pengatur tegangan, ketidakstabilan tegangan biasanya terkait dengan ketidaksesuaian teraan pada sistem pengaturan. Masalah - masalah stabilitas tegangan yang berlangsung cepat telah dipelajari dengan menggunakan berbagai analisis teknik dan peralatan yang sesuai dengan model dan mensimulasikan tanggapan dinamik dari pengontrol tegangan dan konverter yang diteliti, seperti program stabilitas.

Untuk tujuan analisis, klasifikasi gangguan dalam studi stabilitas tegangan terdapat dua jenis gangguan,yaitu : (Prabha Kundur, 1994:32)

- a. Gangguan besar pada stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan saat terjadi gangguan, misalnya saat terjadi gangguan sistem, hilangnya pembangkit atau sirkuit. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik beban dan sistem serta interaksi antara sistem proteksi dan kontrol. Adapun gangguan-gangguan hubung singkat pada sistem tiga fasa dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6 :



Gambar 2.6 Jenis-jenis gangguan hubung singkat

Sumber : Grainger & Stevenson, 1994 : 478

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetris). Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Periode studi mungkin membutuhkan waktu dari beberapa detik sampai beberapa menit. Oleh sebab itu simulasi dinamis jangka panjang diperlukan dalam proses analisis ini. Sebuah kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan besar adalah dengan memberikan gangguan dan mengikuti aksi dari sistem kontrol sehingga tegangan pada semua bus dalam sistem dapat mencapai tingkat *steady state* yang dapat diterima.

- b. Gangguan kecil pada stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem dalam mengendalikan besar tegangan mengikuti perubahan gangguan kecil misalnya perubahan pada sistem beban. Ketidakstabilan tegangan gangguan kecil pada dasarnya alami terjadi pada keadaan *steady state*. Oleh karena itu, analisis statis dapat secara efektif digunakan untuk menentukan margin stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas dan memeriksa berbagai kondisi sistem.

2.8 Persamaan Dalam Studi Stabilitas

2.8.1 Persamaan Keadaan Mantab (*Steady State*)

Gambar 2.7 menunjukkan diagram fasor fluksi dan tegangan untuk mesin sinkron rotor silindris dimana efek kejenuhan diabaikan. Fluksi F_f sebanding dengan arus medan I_f dan ditunjukkan pada sumbu *direct* pada mesin. Tegangan terminal stator untuk rangkaian hubung-buka E_i sebanding dengan F_f yang berada pada sumbu *quadrature*. Tegangan E_i juga sebanding dengan tegangan medan E_f .

Ketika mesin sikron dibebani, fluksi F sebanding dan sefasa dengan arus stator yang dihasilkan yang mana penjumlahan secara vektor fluksi F_f memberikan sebuah nilai fluksi efektif F_e . Tegangan efektif stator E_l memiliki hubungan dengan F_e dan tertinggal sebesar 90° . Tegangan terminal V diperoleh dari tegangan E_l melalui pertimbangan jatuh tegangan karena adanya reaktansi X_l dan resistansi jangkar R_a . Perbedaan antara E_f dan E_l adalah pada fasa dengan jatuh tegangan pada $|X|$ dan sebanding dengan I . oleh karena itu, perbedaan tegangan dapat dikatakan sebagai jatuh tegangan pada reaktansi jangkar X_a . Jumlah antara X_l dan X_a disebut reaktansi sinkron (Arrilaga, 1990 : 159-160):

$$X_d = X_l + X_{ad} \quad (2.21)$$

$$X_q = X_l + X_{aq} \quad (2.22)$$

$$E_i - V_q = R_a I_q - X_d I_d \quad (2.23)$$

$$E_i - V_d = R_a I_d + X_d I_d \quad (2.24)$$

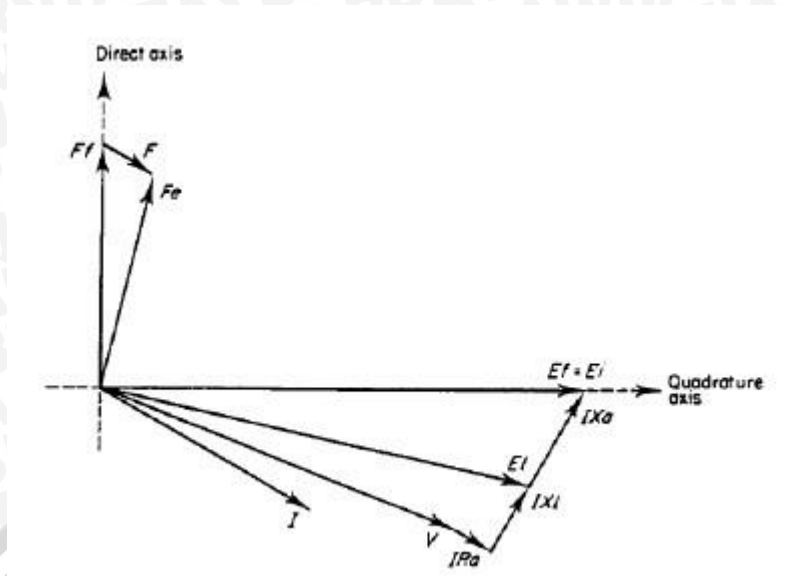
dengan :

X_d : reaktansi sumbu *direct*

X_q : reaktansi sumbu *quadrature*

I_d : arus jangkar sumbu *direct*

I_q : arus jangkar sumbu *quadrature*



Gambar 2.7 Diagram fasor mesin sinkron rotor silindris pada keadaan mantap

Sumber: Arrillaga, 1990 : 159

2.8.2 Persamaan Peralihan (*Transient*)

Untuk perubahan yang lebih cepat pada kondisi eksternal mesin sinkron, model di atas tidak lagi sesuai. Karena perubahan inersia gandingan fluks tidak tercermin di dalam model tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu tegangan peralihan yang baru yaitu E'_d dan E'_q yang mewakili gandingan fluks pada kumparan rotor. Tegangan peralihan ini dapat ditunjukkan melalui adanya reaktansi peralihan generator sinkron yaitu E'_d dan E'_q (Arrilaga, 1990 : 160):

$$E'_q - Vq = Ra Iq - X'd Id \quad (2.25)$$

$$E'_d - Vd = Ra Id + X'q Iq \quad (2.26)$$

dengan :

E'_d : tegangan peralihan sumbu *direct*

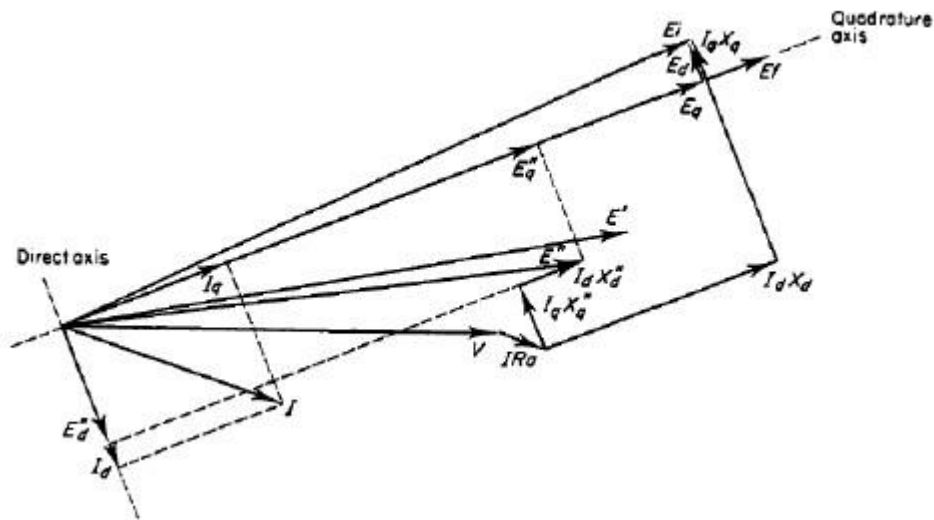
E'_q : tegangan peralihan sumbu *quadrature*

$X'd$: reaktansi peralihan sumbu *direct*

$X'q$: reaktansi peralihan sumbu *quadrature*

Sekarang tegangan E_i harus dianggap sebagai jumlah dari dua tegangan E_d dan E_q merupakan tegangan di belakang reaktansi sinkron. Pada bagian sebelumnya, dimana untuk keadaan mantap, arus mengalir hanya dalam kumparan medan sehingga dalam kasus tersebut $E_d = 0$ dan $E_q = E_i$.

Diagram fasor untuk operasi mesin pada kondisi peralihan ditunjukkan pada gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan peralihan

Sumber: Arrillaga ,1990 : 161

2.8.3 Persamaan Sub-peralihan (*Subtransient*)

Dalam kondisi sub-peralihan generator, kasus kumparan peredam (*damper windings*) ataupun rangkaian lain yang terdapat dalam rotor, diperlukan jika pemodelan yang lebih tepat diperlukan. Reaktansi dan konstanta waktu yang dilibatkan kecil dan sering kali diabaikan. Dalam hal ini, diperlukan suatu tegangan sub-peralihan yang baru yaitu E''_d dan E''_q . Tegangan peralihan ini dapat ditunjukkan melalui adanya reaktansi sub-peralihan generator sinkron yaitu X''_d dan X''_q . Jika diperlukan, pengembangan dari persamaan ini identik dengan suatu kondisi sub-peralihan generator sinkron dan menghasilkan (Arrilaga, 1990 : 161):

$$E''_q - Vq = Ra Iq - X''_d Id \tag{2.27}$$

$$E''_d - Vd = Ra Id + X''_q Iq \tag{2.28}$$

dengan :

E''_d : tegangan sub-peralihan sumbu *direct*

E''_q : tegangan sub-peralihan sumbu *quadrature*

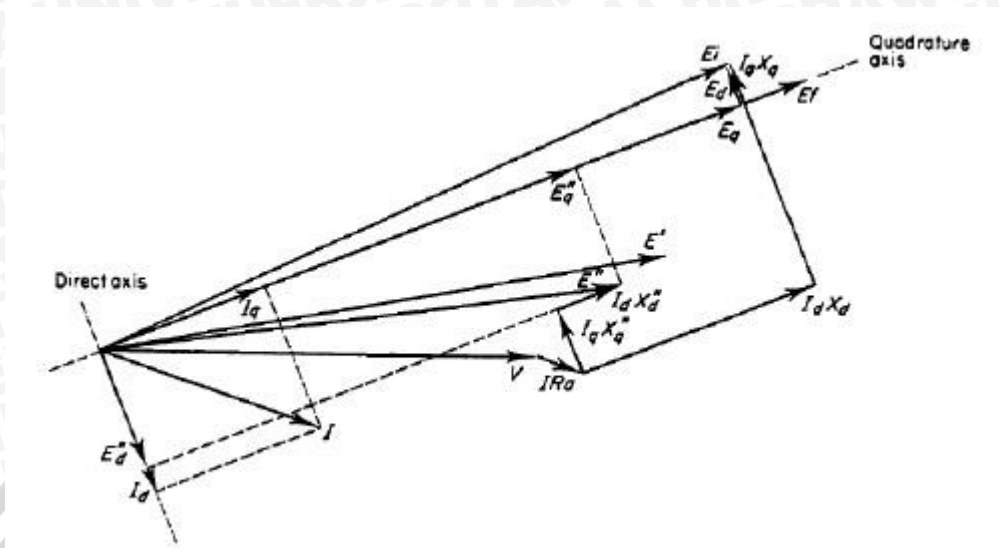
X''_d : reaktansi sub-peralihan sumbu *direct*

X''_q : reaktansi sub-peralihan sumbu *quadrature*

Persamaan tersebut dikembangkan dengan sebuah asumsi bahwa konstanta waktu peralihan lebih besar jika dibandingkan dengan konstanta waktu sub-peralihan. Diagram fasor dari mesin sinkron pada kondisi sub-peralihan ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Perlu dicatat bahwa Persamaan (2.27) dan (2.28) benar hanya pada kondisi operasi keadaan mantap.



Gambar 2.9 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan sub-peralihan

Sumber: Arrillaga, 1990 : 162

