

STUDI MODEL DINAMIKA SISTEM TENAGA LISTRIK

Setiadi Cahyono Putro*

Abstrak: Ekspresi persamaan matematis terhadap dinamika sistem tenaga listrik sangat diperlukan. Pemilihan model sistem harus dengan pertimbangan permasalahan yang ada, ketersediaan fasilitas komputasi, dan teknik kontrol yang dipilih. Perkembangan komputer memungkinkan model per-samaan elektrik dan mekanik pada orde yang lebih tinggi dapat dilakukan. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemodelan sistem matematis harus memperhatikan masalah-masalah dinamika sistem, yaitu: (1) dinamika fluktuasi frekuensi, (2) berat ringannya gangguan sistem, dan (3) kapasitas tenaga listrik itu sendiri. Secara umum pemodelan diawali dengan mempelajari sistem, agar hasil representasi matematis sesuai dengan idealisasi sistem fisis untuk mempermudah analisis dan desain sistem, dilanjutkan dengan representasi sistem dengan tujuan: (1) I/O untuk kajian watak eksternal/terminal, dan (2) *State Space* sebagai kajian watak internal. Dalam pemodelan beberapa parameter/relasi antar komponen yang kurang/tidak relevan dengan tujuan kajian biasanya diabaikan.

Kata kunci: model dinamik, tenaga listrik

Pada studi dinamika sistem tenaga listrik, model matematika sangat diperlukan untuk mengekspresikan model sistem. Namun, dalam pemilihan model sistem harus mempertimbangkan permasalahan yang muncul, ketersediaan fasilitas komputasi, dan teknik kontrolnya. Akan sangat sulit menghasilkannya perencanaan dengan “model universal” yang memadai sekaligus praktis untuk masalah-masalah dinamika sistem tenaga secara keseluruhan.

Saat permasalahan stabilitas sistem tenaga diteliti beberapa tahun yang lalu komputer digital belum digunakan, model-model persamaan elektrik dan mekanik baru sampai orde ke dua; dengan demikian, rancangan sistem relatif sangat terbatas pada saat itu belum tersedia fasilitas komputasional. Dengan perkembangan kinerja komputer modern, secara tidak langsung menguntungkan perkembangan analisis sistem tenaga listrik.

Beberapa permasalahan didalam dinamika Sistem tenaga listrik adalah: osilasi frekuensi tinggi atau rendah, gangguan ringan atau berat dari sistem, dan permasalahan tenaga listrik kecil atau besar (Padiyar, 1996). Sedangkan komponen-komponen sistem dari studi dinamik yang dibahas, adalah: (1) turbin uap dan hidro, (2) gene-

rator sinkron, (3) governor, dan (4) sistem *excitation*. Dari hal tersebut, beberapa model dasar telah direkomendasikan oleh kalangan profesional, dan dapat diadopsi untuk studi sesuai permasalahan yang relevan. Persamaan dasar mesin sinkron, model generator sinkron, model regulator tegangan dan *exciter*, model governor dan turbin sangat penting untuk distudi.

MODEL-MODEL MATEMATIS SISTEM

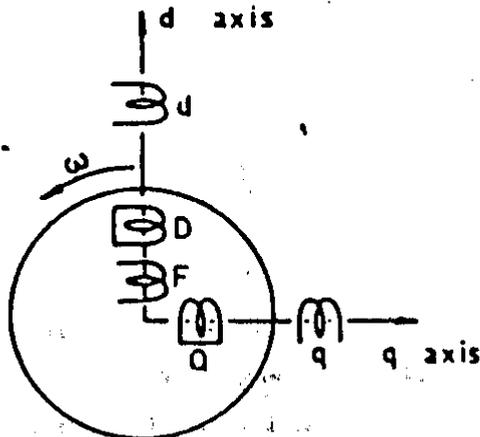
Persamaan-persamaan Dasar

Mesin Sinkron

Persamaan mendasar mesin sinkron telah diturunkan oleh “Park” (Yu, 1983 & Padiyar, 1996). Persamaan tegangan dideskripsikan sebagai sistem koordinat terdiri dari sebuah sumbu d atau sumbu *direct* (langsung) terdapat pada sumbu belitan medan atau sumbu kutub, dan sebuah sumbu q atau sumbu *quadrature* (reaktif) yang *lagging* dari sumbu d . Persamaan Park diturunkan dari konsep ekuivalen dua fasa dan koordinat komutator. Skema mesin sinkron Park dapat dilihat pada Gambar 1.

Dari hal tersebut, belitan fasa armatur a , b dan c pada stator mesin dianggap ekuivalen dengan belitan fasa armatur. Sebuah belitan d pada sumbu d dan

belitan q pada sumbu q . terdapat pula belitan-belitan dam per pada rotor, D pada subu d dan Q pada sumbu q , yang secara permanen di hubung singkat. Sedangkan sebuah belitan medan F pada sumbu D merupakan eksitasi-dc. Secara singkat persamaan tegangan Park dari mesin sinkron dapat dilihat pada per-samaan 1:



Gambar 1. Mesin Sinkron Park (Sumber: Yu, 1983)

$$\begin{aligned}
 V_d &= R_a (-I_d) + P\lambda_d - \lambda_q PQ \\
 V_q &= R_a (-I_q) + P\lambda_q + \lambda_q PQ \\
 V_f &= R_f I_f + P\lambda_f \\
 0 &= R_D I_D + P\lambda_D \\
 0 &= R_Q I_Q + P\lambda_Q
 \end{aligned} \tag{1}$$

Keterangan (1) :
 V = tegangan (Volt); I = arus (ampere);
 R = resistans (Ω); λ = gandingan-flux (Wb); PQ = kecepatan sudut (rad/s)

Adapun subscript d , q , F, D, dan Q merupakan belitan-belitan. Kedua belitan d dan q memiliki resistans yang sama, yang ditunjukkan dengan R_a . Tanda negatif pada I_d dan I_q sejak belitan armatur dari sebuah generator berada pada jaringan "aktif" saat energi mekanis berubah ke energi elektris. Persamaan (1) jika ditulis dalam bentuk pu adalah sbb:

$$\begin{aligned}
 v_d &= r_a (-i_d) + y_d / w_d - w y_d \\
 v_q &= r_a (-i_q) + y_q / w_b - w y_d \\
 v_f &= r_f .i_f + y_f / w_b
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$0 = r_D .i_D + y_D / w_b$$

$$0 = r_Q .i_Q + y_Q / w_b$$

keterangan (2) :

v = tegangan; I = arus; r = resistans;

ψ = gandingan-flux.

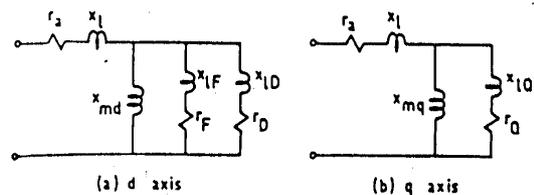
Semua dalam satuan pu . Turunan waktu dari ψ ke Ψ dan $2\pi f$ rad/s dipili dengan basis kecepatan sudut ω_b . Gandingan-flux dari sumbu d dan q dari Gambar 1 diasumsikan bahwa suatu reaktan bersama menyatu pada belitan sumbu, gandingan-flux ditunjukkan sbb:

$$\begin{bmatrix} y_d \\ y_f \\ y_D \end{bmatrix} = \frac{1}{W_o} \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & x_{md} \\ x_{md} & x_f & x_{md} \\ x_{md} & x_{md} & x_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_f \\ i_D \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} y_q \\ y_Q \end{bmatrix} = \frac{1}{W_o} \begin{bmatrix} x_q & x_{mq} \\ x_{mq} & x_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{4}$$

Persamaan (3) dan (4) merupakan reaktan total berkaitan dengan belitan yang ditunjukkan oleh χ_d , χ_f , χ_D , χ_q , dan χ_Q dan reaktans bersama pada sumbu yang bersesuaian adalah χ_{md} dan χ_{mq} . Seluruh gandingan-flux, kecepatan, reaktans, dan arus dinyatakan dalam pu .

Rangkaian ekuivalen sumbu d dan q dari mesin sinkron untuk menurunkan persamaan (3) dan (4) dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekuifalen sumbu d dan q (Sumber: Yu, 1983)

Dari hal tersebut dapat diturunkan beberapa definisi (Grainer & Stevenson, 1994; Yu 1983) sebabagai berikut:

\Rightarrow Reaktans sinkron :

$$x_d \triangleq x_l + x_{md}$$

$$x_q \triangleq x_l + x_{mq}$$

\Rightarrow Reaktans total damper dan medan :

$$\begin{aligned}x_F &\triangleq x_{lF} + x_{md} , \\x_D &\triangleq x_{lD} + x_{mD} , \\x_Q &\triangleq x_{lQ} + x_{mq} \quad (6)\end{aligned}$$

⇒ Reaktans transien :

$$x'_d \triangleq x_l + \frac{x_{lF} x_{md}}{x_{lF} + x_{md}} ,$$

$$x'_Q \triangleq x_l + x_{mq}$$

⇒ Reaktans subtransien :

$$x''_d \triangleq x_l + \frac{x_{lF} x_{lD} x_{md}}{x_{lF} x_{lD} + x_{lF} x_{md} + x_{lD} x_{md}} ,$$

$$x''_q \triangleq x_l + \frac{x_{lQ} x_{mq}}{x_{lQ} + x_{mq}} \quad (8)$$

⇒ Runtun waktu transien :

$$T'_{do} \triangleq \frac{1}{\omega_b r_F} (x_{lF} + x_{md})$$

$$T'_d \triangleq \frac{1}{\omega_b r_F} \left(x_{lF} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_l} \right) + \left(\frac{1}{x_{md}} \right)} \right) \quad (9)$$

⇒ Runtun waktu subtransien :

$$T''_{do} \triangleq \frac{1}{\omega_b r_D} \left(x_{lD} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_{lF}} \right) + \left(\frac{1}{x_{md}} \right)} \right)$$

$$T''_d \triangleq \frac{1}{\omega_b r_D} \left(x_{lD} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_l} \right) + \left(\frac{1}{x_{lF}} \right) + \left(\frac{1}{x_{md}} \right)} \right)$$

$$T''_{qo} \triangleq \frac{1}{\omega_b r_Q} (x_{lQ} + x_{mq})$$

$$T''_q \triangleq \frac{1}{\omega_b r_Q} \left(x_{lQ} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_l} \right) + \left(\frac{1}{x_{mq}} \right)} \right)$$

Diantara persamaan-persamaan (5) sampai dengan (10) terlihat bahwa reaktans transien dan runtun waktu dibutuhkan untuk analisis *state transien*. Dapat menjadi cata-

tan bahwa Subtransien, transien, dan *Steady-state* tidak merupakan fenomena diskret, dan secara nyata merupakan proses kontinu. Adapun persamaan gandenga-flux dua sumbu jika ditulis dalam satuan SI adalah

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} I_d \\ I_F \\ I_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_d & L_{aF} & L_{aD} & -I_d \\ 3/2 L_{Fa} & L_F & L_{FD} & I_F \\ 3/2 L_{Da} & L_{DF} & L_D & I_D \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\omega_e} \begin{bmatrix} x_q & x_{aF} & x_{aD} \\ 3/2 x_{Fa} & x_F & x_{FD} \\ 3/2 x_{Da} & x_{DF} & x_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_d \\ I_F \\ I_D \end{bmatrix} \quad (11)\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_q \\ I_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_q & L_{aQ} \\ 3/2 L_{Qa} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_q \\ I_Q \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_e} \begin{bmatrix} x_q & x_{aQ} \\ 3/2 x_{Qa} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_q \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

gandengan-flux λ dalam ω_b , arus I dalam ampere, induktans L dalam Henry, reaktans X dalam Ω , kecepatan sudut $\omega_e = 2\pi f$ rad/s dan

$$L_{Fa} = L_{aF}$$

$$L_{Da} = L_{aD}$$

$$L_{DF} = L_{FD}$$

$$L_{Qa} = L_{aQ}$$

$$X_{Fa} = X_{aF}$$

$$X_{Da} = X_{aD}$$

$$X_{DF} = X_{FD}$$

$$X_{Qa} = X_{aQ} \quad (13)$$

Model Generator Sinkron

Model generator sinkron orde-kedua

Untuk model generator sinkron orde ke-dua, satu-satunya hubungan torsi didiskripsikan oleh persamaan diferensial (Grainger & Stevenson, 1994). Model dalam *pu* adalah sbb:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (T_m - T_e - T_D) \text{ pu/s} \quad (14)$$

$$\dot{d} = \omega_b (\omega - 1) \text{ rad/strik/s}$$

di mana:

$$T_e \cong P_e \cong \frac{e' v_t}{x'_d} \sin d \text{ pu}$$

$$e' \cong v_t + jx'_d i \text{ pu} \quad (15)$$

Persamaan (14) merupakan hubungan-hubungan untuk versi nonlinear asli, tetapi ditulis dalam bentuk *state variable* dalam persamaan diferensial orde-kesatu, hal tersebut diperlukan untuk analisis modern dan integrasi digital. Dari persamaan (14), $M\omega'$ adalah *accelerating forque*, T_m adalah torsi input mekanik, T_e adalah torsi output elektrik, dan T_D adalah torsi damping mekanik. $(\omega-1)$ adalah kecepatan sudut relatif *pu* dari koordinat-koordinat dengan ikutan oleh kecepatan sinkron sitem ($2\pi f$), yaitu dengan pilihan w_b . Persamaan (15) merupakan persamaan pembantu. T_e sama dengan P_e dibagi oleh kecepatan sudut w , dan w dalam satuan *pu*. sedangkan e' merupakan tegangan ikutan pada reaktans transien. P_e adalah:

$$P_e = V_t i \cos \theta = \frac{e' v_t}{x'_d} \sin d \quad (16)$$

Model generator sinkron orde-ketiga

Persamaan state mode-ketiga adalah:

$$\begin{aligned} \dot{w} &= \frac{1}{M} (T_m - T_e - T_D) \\ \dot{d} &= w_b (w - 1) \\ \dot{e}'_q &= \frac{1}{T_{do}} [E_{FD} - e'_q - (x_d - x'_d) \dot{i}_d] \quad (17) \end{aligned}$$

dan dengan persamaan pembantu:

$$T_e \cong P_e \cong \frac{e'_q v_t \sin d + v_t^2 (x'_d - x_q)}{x'_d \sin 2d + 2x'_d x_q}$$

$$e'_q = v_t + jx'_d i_d + jx_q (j i_q) \quad (18)$$

tegangan-tegangan yang terdapat pada persamaan (17) dan (18) didefinisikan sebagai:

$$e'_q \triangleq \frac{x_{md}}{x_F} w_0 Y_F, E \triangleq x_{md} i_F,$$

$$E_{FD} \triangleq \frac{x_{md} x_F}{r_F}$$

di mana e'_q , E , dan E_{FD} adalah tegangan in tenal dari armatur, v_F adalah tegangan yang

diaplikasikan pada belitan medan, i_F adalah arus medan, X_{MD} adalah reaktans bersama dalam *pu* untuk sumbu d, dan r_F adalah re-aktans dari arus medan seluruhnya. E_{FD} juga diinterpretasikan sebagai tegangan medan ditinjau dari armatur. E_{FD} sama dengan E dalam keadaan *Steady State*.

Model generator sinkron orde-tinggi

Model Y dasar dari generator sinkron adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{w} &= \frac{1}{M} (T_m - T_e - T_D) \\ \dot{d} &= w_b (w - 1) \\ \frac{\dot{w}_d}{w_b} &= v + r_d i_d + w Y_q \\ \frac{\dot{w}_q}{w_b} &= v_q + r_o i_q + w Y_d \\ \frac{\dot{w}_F}{w_b} &= v_F - r_F i_F \\ \frac{\dot{w}_D}{w_b} &= -r_d i_d \\ \frac{\dot{w}_q}{w_b} &= -r_q i_q \end{aligned} \quad (20)$$

di mana

$$T_e = i_q Y_d - i_d Y_q$$

Model Y dasar mesin sinkron tersebut dapat dilinearisasi ketika diterapkan untuk penyelesaian permasalahan dinamik dari sebuah sistem tenaga dengan gangguan ringan. Untuk penurunan persamaan lebih lanjut, disajikan beberapa definisi tegangan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} e_{q1} &\triangleq e''_q \triangleq \frac{x_{md}}{x_D} w_0 Y_D \\ e_{q2} &\triangleq x_{md} i_D \\ e''_d &\triangleq \frac{x_{mq}}{x_Q} w_0 Y_Q \\ e_{d2} &\triangleq x_{mq} i_Q \end{aligned} \quad (19)$$

$$e'_d \triangleq \frac{x_{mq}}{x_s} w_0 Y_s$$

$$e_{d1} \triangleq x_{mq} i_s \quad (22)$$

Dua definisi terakhir dibutuhkan ketika belitan damper kedua S pada sumbu q. sebagai catatan, e merupakan tegangan, Y = gandengan-flux, i adalah arus. Dan kecepatan sudut w_0 , merupakan unit untuk kecepatan sudut dasar yang dipilih.

Turunan model mesin sinkron orde-tinggi Olive dengan satu belitan dampe pada sumbu q, adalah dengan identitas sebagai berikut:

$$x_d - x'_d = x_{md}^2 / x_F$$

$$x_q - x''_q = x_{mq}^2 / x_Q$$

$$x_d - x''_d = \frac{x_{md}^2 (x_F + x_D - 2x_{md})}{(x_F x_D - x_{md}^2)} \quad (23)$$

$$x'_d - x''_d = \frac{x_{md}^2 (x_F - x_{md})^2}{x_F (x_F x_D - x_{md}^2)}$$

$$\frac{x_d - x''_d}{x'_d - x''_d} = \frac{(x_F + x_D - 2x_{md}) x_F}{(x_F - x_{md})^2}$$

Identitas pertama merupakan resiko dari persamaan (5) dan (6), yang kedua serupa dengan identitas pertama merupakan satu-satunya belitan rotor pada sumbu q, dan yang ketiga merupakan turunan dari definisi reaktans asli persamaan (5) dan (8). Identitas keempat adalah hasil pengurangan/selisih pertama dan ketiga, dan yang terakhir adalah rasio antara ketiga dan keempat. Runtun waktu *open-loop* armatur mesin adalah:

$$T'_{do} \triangleq \frac{x_F}{w_b r_F} = \frac{1}{w_b r_F} = \frac{x_{md}^2}{x_d - x'_d}$$

$$T''_{do} \triangleq \frac{1}{w_b r_D} \left(x_D + \frac{x_F x_{md}}{x_F} \right) = \frac{1}{w_b r_D} \frac{x_F x_D - x_{md}^2}{x_F} \quad (24)$$

$$T'''_{do} \triangleq \frac{x_Q}{w_b r_Q} = \frac{1}{w_b r_Q} = \frac{x_{mq}}{x_q - x''_q}$$

Model mesin sinkron orde-ketujuh Olive dapat dituliskan:

$$\dot{w} = \frac{1}{M} (T_m - T_e - T_D)$$

$$\dot{d} = w_b (w - 1)$$

$$\dot{y}_d / w_b = v_d + r_a i_d - (x_q i_q - e_{d2})$$

$$\dot{y}_q / w_b = v_q + r_a i_q + (x_d i_d - e_{q1} - e_{q2}) \quad (25)$$

$$\dot{e}'_q = (E_{FD} - e_{q1}) / T'_{do}$$

$$\dot{e}''_d = -l_{d2} / T''_{do}$$

$$\dot{e}''_q = - \frac{(x'_d - x''_d) l_{q2}}{(x_d - x''_d) T''_{do}}$$

Model Regulator Tegangan dan Exciter

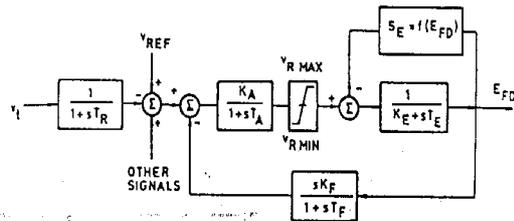
Fungsi asli dari *exciter* dan regulator tegangan adalah diberikan dari eksitasi yang cukup pada belitan medan mesin sinkron, jika tegangan drop maka eksitasi meningkat, dan sebaliknya (Grainger & Stevenson, 1994; Yu 1983); error tegangan didefinisikan:

$$\Delta v_t \triangleq v_{REF} - v_t$$

dalam teknik tenaga, hal tersebut ekuivalen dengan

$$\Delta v_t = -(v_t - v_{REF})$$

Gambar 3 menunjukkan blok diagram sistem eksitasi:



Gambar 3 Sistem eksitasi Tipe 1 (Sumber: Yu, 1983; Dorf, 1987)

Dari Gambar 3 tersebut:

$$S_E = f(E_{FD}) \quad (28)$$

sedangkan:

$$E_{FD} = \frac{1}{s T_E} [v_R - (S_E + K_E) E_{FD}]$$

$$= \frac{1}{s T_E} (v_R - a E_{FD})$$

dimana

$$\frac{E_{FD}}{v_R} = \frac{1}{a + sT_E} = \frac{1/a}{1 + sT_E/a}$$

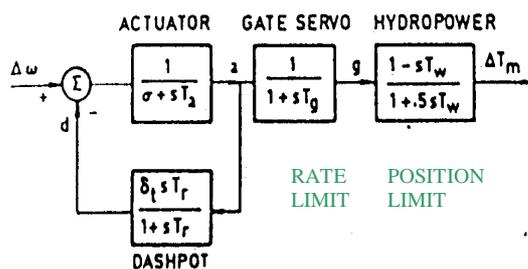
Model Governor dan Turbin

Fungsi alih dari governor adalah memelihara kecepatan tetap dari *prime over* dengan mengendalikan energi input menggunakan *deviasi* kecepatan pada control *feedback* (Grainer & Stevenson, 1994; Yu 1983). Deviasi kecepatan yang didapat dengan membandingkan actual speed w dan reference speed w_{REF} .

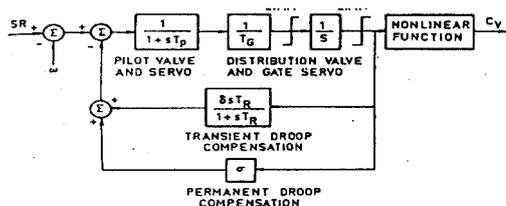
$$\Delta w = w_{REF} - w$$

$$w = -(w - E_{REF}) \tag{31}$$

Hovey telah menurunkan keterkaitan antara governor mekanik-hidrolik untuk sebuah pusat pembangkit hidroelektrik, dengan blok diagram fungsi alih seperti Gambar 4. Dari Gambar 4, blok (1) adalah fungsi alih dari *aktuator* dengan sinyal output a . Blok (2) adalah *gate servo* dengan sinyal output g , dan blok (3) adalah tenaga hidro dari turbin dan *penstock* dengan output ΔT_m . Blok tambahan (4) adalah *feedback dash-pot* dengan output d (Yu, 1983). Gambar 5 menunjukkan model matematik non linear dari governor mekanik-hidrolik untuk turbin uap.



Gambar 4 Hidro Hovie dan fungsi alih governor (Sumber: Yu, 1983; Dorf, 1987)



Gambar 5 Governor mekanik-hidrolik untuk turbin uap (Sumber: Yu, 1983; Dorf, 1987)

Speed Reference (SR) pada model diset otomatis sesuai dengan syarat kendali frekuensi. Posisi katub C_v berhubungan dengan input tenaga uap dalam turbin. K_G merupakan penguata (Gain), berhubungan dengan nilai yang berbanding terbalik dengan δ , yang merupakan drap permanen dari governor hidro turbin. T_{SR} adalah run-tun waktu dari *speed relay*, T_{SM} adalah Servo motor, dan C_v merupakan kecepatan Servo.

PENUTUP

Telaah perilaku dinamis elektromekani sistem tenaga listrik tidak bisa lepas dari telaah kestabilan peralihan (*transfer stability*). Jika pada saat-saat awal studi terbatasi pada masalah dinamika dengan melibatkan tidak lebih dari dua mesin, saat ini telah melibatkan multimesin yang secara dinamis saling mempengaruhi. Dari hal tersebut memiliki konsekuensi yang lebih rumit dalam pembuatan model, oleh karenanya dengan alasan tertentu keterlibatan suatu parameter menjadikan pertimbangan; dengan catatan gambaran respon dinamika dari sistem terhadap gangguan diekspresikan dengan benar.

Dalam sistem kestabilan dinamik (*dynamic stability*), sistem penguatan dan sistem pengatur kendali turbin dilukiskan beresama-sama dengan model mesin sinkron yang memberikan perubahan gandingan-flux pada celah udara mesin. Dalam permodelan tersebut, persamaan diferensial yang nonlinear dapat digantikan dengan persamaan linear yang dilanjutkan dengan analisis linear. Adapun jika berkaitan dengan gangguan berat pada studi kestabilan dinamis yang tidak lagi memungkinkan penggunaan proses kelinieran, maka diselesaikan dengan metode langsung atau iterasi.

Secara umum pemodelan matematik dalam studi dinamik STL tidak bisa lepas dengan permodelan sistem kendalinya. Biasanya permodelan diawali dengan mempelajari sistem sehingga hasil dari representasi matematis sesuai dengan idealisasi

sistem fisis untuk mempermudah analisis dan desain sistem, dilanjutkan dengan representasi sistem dengan tujuan: (1) I/O untuk kajian watak eksternal/terminal, dan (2) *State Space* sebagai kajian watak internal. Dalam permodelan beberapa parameter/relasi antar komponen yang kurang/tidak relevan dengan tujuan kajian biasanya diabaikan.

DAFTAR RUJUKAN

Dorf, R.C. 1987. *Modern Control Sistem*, (5th ed.), Canada: Addison-Wesley Pub.co, Inc.

Grainer, J.J. & Stevenson, W.D., Jr. 1994. *Power System Analysis*, New York: Mc Graw-Hill, Inc.

Padiyar, K.R. 1996. *Power System Dynamic-Stability & Control*, Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Ptc.Ltd.

Yu, Yaonan. 1983. *Electric Power System Dynamics*, Ne York : Academic Press, Inc