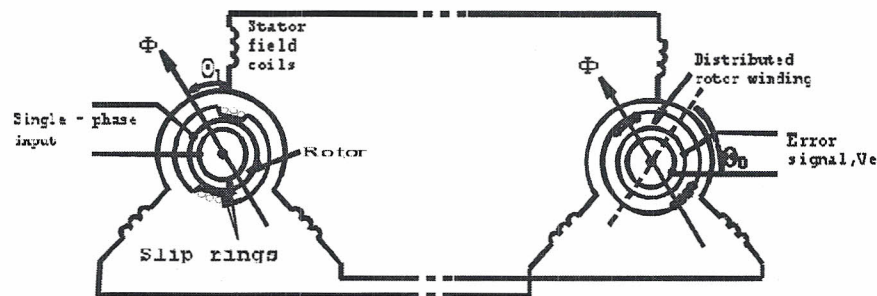


BAB VI PENGENDALI POSISI SISTEM SERVO

1. Sinkro Sebagai Detektor Kesalahan Posisi Poros

Tegangan kesalahan (error) yang dihasilkan oleh sinkro, amplitudonya sebanding dengan letak kesalahan posisi porosnya dan sudut pasenya tergantung pada sensor kesalahannya. Prinsip kerja dari penggunaan sinkro sebagai detektor kesalahan posisi poros ini tampak seperti Gambar VI. 1 dibawah ini :



Gambar VI. 1 Sinkro pendeteksi kesalahan posisi poros

Ketiga kumparan stator yang ditempatkan dalam rumah stator satu dengan yang lainnya berbeda fase 120° . Sedang rotornya kebanyakan tipe “ salient-pole “ (banyak pasang kutub) atau tipe wound rotor (rotor sangkar). Rotor unit pengirim (transmitter) dicatu dari sumber AC, sedang poros rotornya tetap terpasang pada sudut posisi yang dikehendaki (disetel). Arus rotor akan menginduksi fluks magnet pada statornya lewat celah udara dari unit penerimanya. Fluks magnet yang terdapat pada unit penerima ini mempunyai arah yang relative sama dengan yang dikirimkan oleh kumparan stator dari unit transmiternya.

Apabila posisi rotor unit penerima tegak lurus (90°) terhadap fluks maka emf yang diinduksikan pada kumparan stator adalah nol. Untuk setiap penyimpangan sudut sebesar θ dari posisi 90° tadi, emf AC yang diinduksikan ke rotor unit penerima adalah :

$$V_e = V_{sin}\theta = V_{sin}(\theta_i - \theta_0)$$

Disini V adalah tegangan efektif yang diinduksikan pada rotor input penerima Untuk simpangan yang kecil (dalam satu kuadran) antara fluks unit penerima dan posisi rotor adalah $\sin (\theta_i - \theta_o) \approx \theta_i - \theta_o$, maka :

$$V_e \approx V (\theta_i - \theta_o)$$

Sebagai misal tegangan kesalahan mempunyai hubungan yang cukup linear terhadap perbedaan posisi poros input dan output sesudah terjadi perpindahan 90° dari posisi semula. Sudut fase tegangan kesalahan akan berbeda 180° , jika $\theta_i < \theta_o$, kemudian tiba-tiba $\theta_i > \theta_o$, maka akan terjadi perbedaan posisi dari sudut tersebut lewat sensor kesalahan. Pendeteksi kesalahan kedudukan poros ini hanya merupakan salah satu cara dari beberapa aplikasi piranti sensor tersebut (sinkro). Sebagai detektor kesalahan ia mempunyai keuntungan seperti kelebihan tegangan pada pembagi tegangan dapat diabaikan, ketepatan cukup tinggi, pendeteksi kesalahan dapat lebih dari 360° .

2. Motor Servo Berukuran Kecil dan Motor Penggerak Lainnya

Motor-motor servo listrik pada dasarnya dapat dioperasikan dengan melibatkan beberapa komponen pendukung :

- ❖ Operasi dengan sumber DC, pembagi tegangan, penguat DC dan motor DC sebagai penggerak.
- ❖ Operasi dengan sumber AC dengan menerapkan motor sinkro, penguat AC dan motor AC 2 phase sebagai penggerak.
- ❖ Operasi dengan sumber AC/DC dilengkapi detektor kesalahan penyearah peka geseran phase (psr), dan motor DC sebagai penggerak.

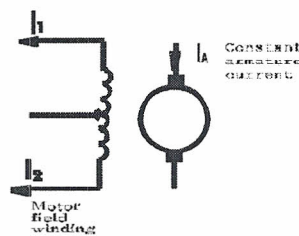
a. Motor DC Penguat Terpisah

Motor servo listrik tipe penguat terpisah (lihat Gambar VI.2) banyak dipakai sebagai piranti kendali posisi. Torsi keluaran berbanding langsung dengan arus medannya dan akan berputar mundur bila arus medannya dibalik. Arus medan ini biasanya diperoleh dari keluaran sebuah penguat push pull. Apabila kumparan armatur tidak disuplai dengan sumber arus yang konstan, maka emf

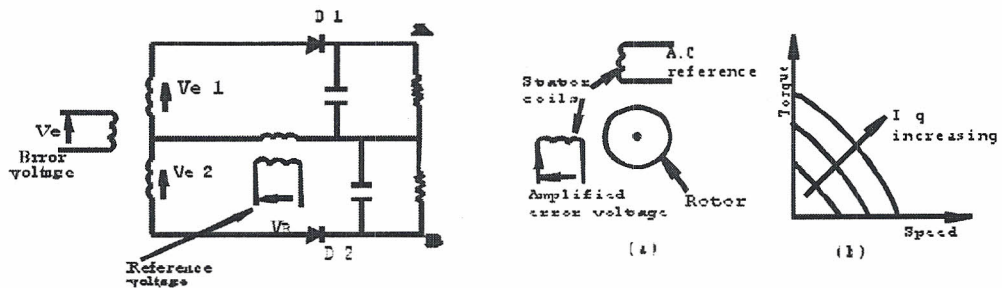
armatur dengan putaran yang terjadi dapat menyebabkan jatuhnya karakteristik $T = f(N)$; yang berarti sama saja dengan terjadinya peredaman akibat gesekan pada servo . Untuk menghindari hal itu bisa diatasi dengan mensuplai arus armatur yang konstan melalui tahanan depan yang tinggi dari sumber DC bertegangan relatif tinggi.

b. Penyearah Peka Phase (Phase Sensitive Rectifier)

Tegangan kesalahan AC yang terjadi dapat dilihat tegangan DC-nya dengan menggunakan “ phase sensitive rectifier “ (psr) yang berfungsi sebagai penyearah peka pase. Dasar kerja psr ini seperti ditunjukkan pada Gambar VI. 3 . Apabila tidak terjadi kesalahan tegangan , masing-masing diode konduksi selama setengah periode (simpul positif) dari tegangan referensinya.



Gambar VI. 2 Motor Servo DC



Gambar VI. 3 Penyearah peka pase Gambar VI. 4 (a) Motor servo dua phase, dan (b) kurva torsi fungsi kecepatan

Tegangan kesalahan sinyal maksimum (V_e) dibuat sedemikian lebih kecil dari tegangan referensinya. Tegangan yang lewat D_1 selama setengah periode simpul hi positif, dipenuhi $D_1 (V_R + V_{e1})$ lebih besar dari tegangan yang lewat $D_2 (V_R + V_{e2})$; dan oleh karenanya A lebih besar (positif) dibanding B. Saat setengah periode berikutnya (simpul negatif) kedua diode tidak hidup ($V_R > V_e$). Apabila

tegangan kesalahan berganti fase 180° , D_2 akan dilalui tegangan yang lebih besar (saat simpul positif) dibanding D_1 dan B sekarang lebih positif dibanding A. Dengan demikian tegangan antara A dan B merupakan hasil pensensoran tegangan referensi yang selanjutnya bisa dipakai untuk memicu basis dari push-pull amplifier yang digunakan sebagai filter tegangan keluaran agar ripplesnya cukup kecil.

c. Servo Motor 2 Phase

Didalam motor servo AC, tegangan kesalahan dari sinkro diumpankan ke terminal masukan AC amplifier, sedang keluarannya diumpankan ke salah satu fase dari motor 2 fase tersebut. Tegangan fase yang dipakai oleh kumparan motor tadi disusun sedemikian rupa (satu kuadran) dengan tegangan referensi yang mencatu kumparan kedua, yaitu kumparan referensi (Gambar VI. 4a).

Apabila tidak terjadi kesalahan tegangan, hanya kumparan referensi saja yang dicatu tegangan, maka motor akan terkunci (diam) pada satu posisi. Untuk memperoleh torsi maksimum motor dipasang pada batang penyangga baja (Torsi Meter). Besarnya torsi keluaran tergantung pada tegangan kesalahan, sedang arah torsi tergantung pada sudut geser fase yang terjadi (tertinggal 90° atau mendahului 90°) dari tegangan referensinya. Oleh karena itu kenaikan tegangan kesalahan stator akan sebanding dengan kenaikan $T = f(N)$ (lihat Gambar VI. 4b).

Untuk daya besar motor servo AC tidak diperlukan karena keluaran dari penguat daya push-pull terbatas. Guna mengatasi hal ini banyak digunakan "DC rotating amplifier", biasanya tipe Amplidyne atau Metadyne, atau bisa juga digunakan Magnetic Amplifier dengan motor DC sebagai penggerakannya. Perlu diingat bahwa, baik pada motor servo DC maupun AC kumparan armaturnya dibuat dari penghantar yang panjang dan diameternya kecil. Hal ini dimaksudkan untuk menghasilkan torsi atau harga momen inersia yang tinggi.

3. Sistem Servo Torsi Terkendali Sederhana

Dalam sistem pengendali posisi tertutup seperti pada Gambar VI. 6, motor servo akan memutar beban (inersia motor dan motor) katakanlah J_{kg-m^2} ,

sehingga terjadi redaman akibat gesekan mekanik yang sebanding dengan kecepatan sudut putaran poros. Torsi putar yang dihasilkan oleh motor ini besarnya berbanding langsung dengan tegangan kesalahan yang terjadi (V_e), dan diformulasikan sebagai:

$$T_D = K_A K_m V_e N - m \dots \dots \dots \quad (\text{VI-1})$$

Tegangan kesalahan yang terjadi ada hubungannya dengan kesalahan posisi poros motor, yaitu :

$$V_e = K_s (\theta_i - \theta_0) \dots \dots \dots \quad (\text{VI-2})$$

Catatan :

K_A : Transkonduktansi penguat dalam Ampere / Volt

K_m : Konstanta torsi motor dalam N_m / Ampere medan

K_s : Konstanta pembagi tegangan masukan dalam V/radian kesalahan

Seandainya torsi beban diabaikan, maka torsi putar motor harus cukup mampu mengatasi torsi inersianya, yaitu : $J (d^2 \theta_0 / dt^2)$ dan torsi akibat gesekan, yaitu $K_F (d\theta_0 / dt)$. K_F adalah torsi gesek persatuan kecepatan sudut putar.

Dengan demikian torsi yang harus diatasi oleh motor itu sendiri sebesar :

$$\begin{aligned} \frac{Jd^2\theta_0}{dt^2} + K_F \frac{d\theta_0}{dt} &= K_A K_m V_e N m \\ &= K_A K_m K_s (\theta_i - \theta_0) = K (\theta_i - \theta_0) \dots \dots \dots \quad (\text{VI-3}) \end{aligned}$$

Dimana $K = K_A K_m K_s \text{ N-m/rad}$

Apabila persamaan diatas disederhanakan dan disusun kembali akan didapat :

$$\frac{d^2\theta_0}{dt^2} + \frac{K_F}{J} \frac{d\theta_0}{dt} + \frac{K}{J} \theta_0 = \frac{K}{J} \theta_i \dots \dots \dots \quad (\text{VI-4})$$

Apabila pada batang penyangga baja (torsi meter) ternyata $d^2 \theta_0/dt^2 = d \theta_0/dt = 0$ dan $\theta_0 = \theta_i$, ini berarti tidak terjadi kesalahan. Respon terhadap langkah perubahan input (θ_i) dari sistem tersebut dikenal sebagai "second-order sistem" dan dapat dihitung secara eksak dalam bentuk yang terstandar sebagaimana dipakai pada "analisis transient" yakni :

$$\frac{d^2\theta_0}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\theta_0}{dt} + \omega_n^2\theta_0 = \omega_n^2\theta_i \dots \dots \dots \quad (\text{VI-5})$$

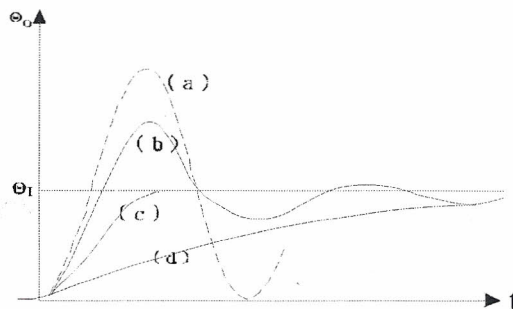
Catatan :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}} \dots\dots\dots (VI-6)$$

ω_n = frekuensi sudut putar sebenarnya tanpa diredam (asli) dan ζ (Zetta) adalah rasio redaman yang dirumuskan sebagai :

$$\zeta \text{ (Zetta)} = \frac{\text{Konst.redaman.sebenarnya(alami)}}{\text{Konst.redaman.dr.red.kritik}} = \frac{K_F}{2\sqrt{(JK)}} \dots\dots\dots (VI-7)$$

Sebagaimana dilukiskan pada gambar (VI – 5), ada 4 cara penyelesaian yang berhubungan dengan sistem orde dua atau “second order“ seperti persamaan (VI – 5), yakni :



Gambar VI.5. Respon sistem orde kedua pada motor servo dengan masukan sinyal “step“

a. Redaman Nihil (Zero Damping) : $\zeta = 0$; $K_F = 0$

Respon terhadap langkah perubahan input, dirumuskan sebagai :

$$\theta_0 = \theta_i (1 - \cos \omega_n t) \dots\dots\dots (VI-8)$$

Respon keluarannya berosilasi secara kontinyu dan amplitudo osilasinya sesuai dengan perubahan masukan. Kondisi ini lama kelamaan akan hilang dengan sendirinya (berhenti)

b. Rendaman Kurang (Under Damping) : $\zeta < 1$; $K_F < 2 \sqrt{(JK)}$

Respon keluaran berosilasi sebentar, tapi tidak lama kemudian mengecil dan mencapai harga tetap $\theta_0 = \theta_i$. Respon ini ditandai oleh terjadinya kenaikan amplitudo (overshoot) yang cepat sekitar harga θ_i . Persamaan dari respon tersebut adalah :

$$\theta_0 = \theta_i \left\{ 1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cos \omega t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega t \right) \right\} \dots \dots \dots (VI-9)$$

Catatan :

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \dots \dots \dots (VI-10)$$

Sedang tetapan waktu osilasi ini adalah :

$$\tau = \frac{1}{\zeta \omega_n}$$

Rasio dari “second – order” tersebut umumnya berkisar 0,60 terutama untuk pemakaian servo motor kecepatan tinggi.

c. Redaman Kritis (Critical Damping) : $\zeta = 1$; $K_F = 2 \sqrt{JK}$

Kondisi seperti ini menandakan suatu transisi antara kondisi osilasi dengan redaman lebih. Adapun respon terhadap perubahan langkah inputnya adalah :

$$\theta_0 = \theta_i \{ 1 - \zeta \omega_n t e^{-\zeta \omega_n t} - e^{-\zeta \omega_n t} \} \dots \dots \dots (VI-11)$$

d. Redaman Lebih (Over Damping) : $\zeta > 1$; $K_F > 2 \sqrt{JK}$

Kondisi respons seperti ini menyatakan respons yang lambat/pelan. Didalam praktek kejadian seperti ini biasanya dihindari. Gambaran secara matematis untuk respons ini adalah :

$$\theta_0 = \theta_i \left\{ 1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cosh \beta t + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}} \sinh \beta t \right) \right\} \dots \dots \dots (VI-12)$$

Catatan :

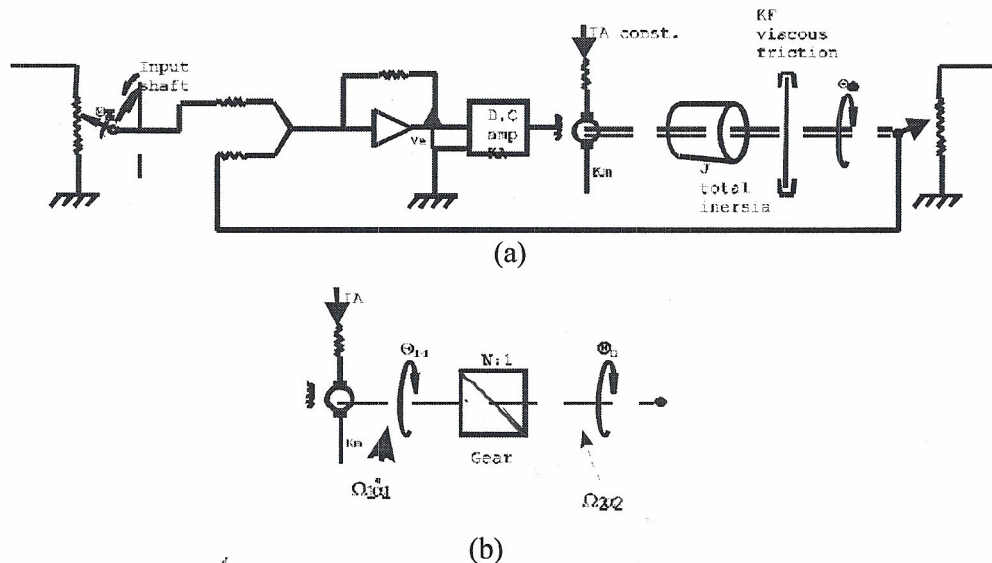
$$\beta = \omega_n \sqrt{(\zeta^2 - 1)} \dots \dots \dots (VI-13)$$

4. Roda gerigi pemindah mekanik (Gearing)

Motor servo berkecepatan tinggi dan melebihi kecepatan yang dikehendaki perlu disesuaikan (direduksi) melalui pemindah mekanik berupa roda gerigi atau “gearing” (lihat Gambar VI-6)

Jika perbandingan roda gerigi primer : sekunder = n : 1, maka kecepatan sudut putar poros keluaran adalah :

$$\frac{1}{n} \times \text{kecepatan sudut putar poros masukannya}$$



Gambar VI. Motor servo torsi terkendali (a) dan roda gigi (gearing) pemindah mekanik (b)

Juga seandainya tidak terdapat rugi daya pada roda gerigi, maka daya masukan sama dengan daya keluaran. Dalam hal ini adalah :

$$T_1\omega_1 = T_2\omega_2 \text{ atau } T_2 = n T_1 \dots\dots\dots (VI-14)$$

Catatan : T = torsi (N-m); 1 = input; 2 = output

N = putaran (rpm)

ω = kecepatan sudut putar (rad/sec)

Torsi yang dikehendaki pada poros motor untuk mengatasi/mengimbangi inersia motor (J_m) adalah $J_m \alpha_1$ (α_1 = percepatan sudut putar) pada motor. Torsi pada poros motor θ_0 (keluaran) dengan putaran sebesar n , adalah $n J_m \alpha_1$. Oleh karena itu besarnya torsi poros ($nJ_m\alpha_1$) ini akan dirasakan pada blok roda gerigi (gear box).

Dengan demikian torsi poros (keluarannya) menjadi :

$$nJ_m\alpha_1 = n^2J_m\alpha_2 \dots\dots\dots (VI-15)$$

Catatan : α_2 = percepatan sudut putar poros keluaran.

Sebagai misal inersia motor sama (ekivalen) terhadap inersia pada porosnya , yaitu $J_m = n^2 J_m$,bila $\alpha_1 = \alpha_2$. Jika inersia beban = J_L , percepatan beban = α_2 , maka torsi motor (T_m) yang semestinya terjadi adalah :

$$\alpha_2 = \frac{nT_m}{J_L + n^2 J_m}$$

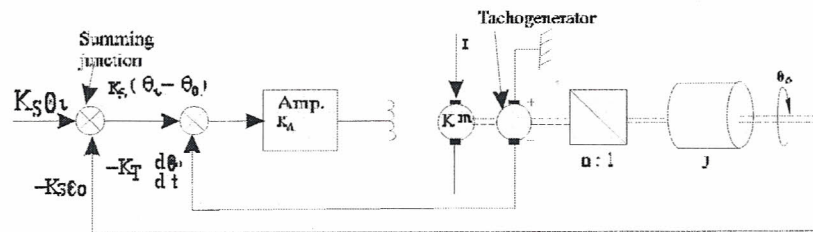
dan total inersia yang terjadi pada poros sebesar :

$$J = J_L + n^2 J_m \dots\dots\dots (VI-16)$$

Percepatan α_2 akan dicapai maksimum sesuai perubahan kecepatan yang terjadi yaitu $n = \sqrt{(J_L/J_m)}$ dengan demikian perbandingan roda gigi ini dikatakan cocok (match) dengan inersianya.

5. Redaman Umpan Balik Kecepatan

Gesekan mekanik yang terjadi umumnya tidak cukup untuk menghasilkan redaman dalam berbagai operasi dari sistem servo. Pada setiap kenaikan gesekan mekanik berarti akan memperbesar kerugian daya. Masalah redaman sebagaimana dirumuskan pada persamaan (VI-5) dapat ditingkatkan, yakni dengan menerapkan umpan balik kecepatan. Dalam hal ini dengan dipenuhinya loop umpan balik kedua, maka sinyal negatif yang diterima masukan amplifier akan berbanding langsung dengan kecepatan putaran poros. Sinyal ini bisa diperoleh dari tachogenerator DC yang dipasang seporos dengan motor sebelum diperlambat dengan roda gerigi, seperti ditunjukkan pada Gambar (VI-7). Apabila motor yang digunakan motor AC, maka tachogenerator yang dipakai juga harus tachogenerator AC.



Gambar VI.7. Servo dc dengan redaman umpan balik kecepatan

6. Mendeteksi Kesalahan Dengan Sinkro

Persamaan sistem dinamik seperti telah dibahas dimuka yaitu dengan jalan menyamakan torsi motor penggerak terhadap torsi-torsi pelawannya. Pengabaian

faktor gesek mekanik dan torsi beban, dengan mengandaikan inersia total pada keluaran poros motor (J), maka :

$$nK_A K_m \left\{ K_s (\theta_i - \theta_0) - K_T n \frac{d\theta_0}{dt} \right\} = J \frac{d^2\theta_0}{dt^2} \dots \dots \dots \quad (\text{VI-17})$$

Catatan :

K_s = Konstanta pembagi tegangan dalam volt/rad. kesalahan

K_T = Konstanta tachogenerator dalam volt/rad/detik pada poros motor

Hal ini dapat pula diartikan bahwa jumlah titik cabang pre-amplifier akan memperbesar tegangan masukan secara aljabar langsung.

Oleh karena itu persamaan (VI – 17) di muka dapat disusun kembali menjadi :

$$\frac{d^2\theta_0}{dt^2} + \frac{n^2 K_A K_m K_T}{J} \frac{d\theta_0}{dt} + \frac{n K_A K_m K_s}{J} \theta_0 = \frac{n K_A K_m K_s}{J} \theta_i \dots \dots \dots \quad (\text{VI-18})$$

Persamaan tersebut diatas sama persis dengan persamaan (VI – 4) dan oleh karenanya akan didapat hasil penyelesaian yang sama. Redaman akan segera dapat diatur termasuk pula pembagi tegangan pada bagian feed back tachogenerator.

Contoh soal :

Pada pengendalian posisi sistem servo menggunakan pembagi tegangan dengan geseran sebesar 300° , mendapat catu tegangan sebesar 30 volt. Sistem tersebut dilengkapi sebuah tachogenerator DC, yang keluarannya dijumlahkan bersama dengan kesalahan dari posisi poros dalam sebuah penguat operasi penjumlah. Penguat ini mempunyai transkonduktansi sebesar 250 mA/volt, sedang konstanta torsi motornya 4×10^{-4} N – m/mA dengan momen inersia sebesar 50×10^{-6} kg.m². Poros motor dikenai beban dengan momen inersia J_L sebesar 40×10^{-2} kg.m², melalui sebuah gear reduksi 100 : 1. Pada sistem tersebut faktor gesek yang terjadi diabaikan.

Hitunglah :

- Frekuensi alami (tanpa redaman) dari sistem tersebut
- Konstanta tachogenerator agar “ damping rasionya ” sebesar 0,80.

Penyelesaian :

Sebagaimana persamaan (VI-16), total inersia pada poros beban :

$$J = J_L + n^2 J_m$$

$$J = (40 \times 10^{-2}) + (100^2 \times 50 \times 10^{-6}) \text{kgm}^2$$

$$J = 90 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2$$

$$\text{Konstanta pembagi tegangan } K_s = \frac{30V}{300^\circ} \times \frac{360^\circ}{2\pi} = 5,73V / \text{rad}$$

Mengikuti persamaan (VI – 18) didapat :

$$\begin{aligned} & \frac{d^2\theta_0}{dt^2} + \frac{10^4 \times 250\text{mA/V} \times 4 \times 10^{-4} \text{Nm/mA}}{90 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2} K_T \frac{d\theta_0}{dt} + \\ & \frac{10^2 \times 250\text{mA/V} \times 4 \times 10^{-4} \text{Nm/mA} \times 5,73\text{V/rad}}{90 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2} \times \theta_0 \\ & = \frac{10^{-2} \times 250\text{mA/V} \times 4 \times 10^{-4} \text{Nm/mA} \times 5,73\text{V/rad}}{90 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2} \times \theta_i \\ & \frac{d^2\theta_0}{dt^2} + \frac{10^4 \text{Nm/V}}{9} K_T \frac{d\theta_0}{dt} + \frac{573\text{Nm/rad}}{9} \theta_0 = \frac{573\text{Nm/rad}}{9} \theta_i \\ & \frac{d^2\theta_0}{dt^2} + 1110 K_T \frac{d\theta_0}{dt} + 63,73\theta_0 = 63,73\theta_i \end{aligned}$$

Dari persamaan (VI-6)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}} = \sqrt{63,73} \approx 8$$

$$\omega_n = 2\pi f_n, \text{ maka } f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{8}{6,28} = 1,26\text{Hz}$$

(f_n = frekuensi alami tanpa redaman)

Bila dibanding dengan persamaan (VI-5) didapat :

$$2\zeta\omega_n \frac{d\theta_0}{dt} = \omega_n^2\theta_i - \frac{d^2\theta_0}{dt^2} - \omega_n^2\theta_0 = 1110K_T$$

Jadi konstanta tachogenerator

$$K_T = \frac{2\zeta\omega_n}{1110} = \frac{2 \times 0,8 \times 8}{1110} = 0,0124\text{V/rad/sec}$$

atau

$$\frac{2\pi}{360} \times 60 \times 0,01152\text{V/rpm} = 1,24\text{V/100rpm}$$

7. Penundaan Kecepatan (Velocity Lag)

Kecepatan putar poros keluaran orde kedua dari sistem servo dengan redaman gesek pada kecepatan yang tetap adalah :

$$\omega_i = \frac{d\theta_i}{dt}$$

Percepatan poros keluaran akan kontinu melaju hingga mencapai kecepatan sudut putar yang sama dengan masukannya.

Karena $d^2\theta_0/dt^2$ pada kondisi tersebut = 0, maka persamaan (VI-3) tentang kecepatan putar poros tetapnya adalah :

$$K_F \frac{d\theta_0}{dt} = K_A K_m K_s (\theta_i - \theta_0) = K_A K_m K_s \varepsilon \dots \dots \dots (VI-19)$$

Catatan :

ε = selisih sudut antara kedudukan poros masukan dan keluarannya dengan demikian, berarti :

$$\varepsilon = \frac{K_F \omega_i}{K_A K_m K_s} \dots \dots \dots (VI-20)$$

Perbedaan atau selisih tersebut digunakan untuk menggerakkan poros motor (keluaran) sehingga torsi motor yang dihasilkan dapat melawan gesekan beban, yang disebut “ velocity lag ”.

Dalam pengendalian sistem servo yang distabilkan oleh untai umpan balik kecepatan negatif akan menyebabkan bertambahnya redaman gesek, dengan demikian persamaan dinamika dari sistem tersebut dapat ditulis :

$$J \frac{d^2\theta_0}{dt^2} + K_F \frac{d\theta_0}{dt} = n K_A K_m \left\{ K_s (\theta_i - \theta_0) - K_T n \frac{d\theta_0}{dt} \right\}$$

Sebagaimana persamaan (VI-17), dimana J = total inersia pada poros keluaran pada saat kecepatan poros mencapai kondisi ajeg (Steady state), $d^2\theta_0/dt^2=0$; dan $d\theta_0/dt = \omega_i$; penundaan kecepatannya adalah :

$$\varepsilon = \theta_i - \theta_0 = \frac{(K_F + n^2 K_T K_A K_m) \omega_i}{n K_A K_m K_s} \approx \frac{n K_T \omega_i}{K_s} \dots \dots \dots (VI-21)$$

Catatan : Umumnya $K_F \ll n^2 K_T K_A K_M$

Untuk memperkecil penundaan kecepatan pada pengendalian posisi sistem servo yang melibatkan umpan balik kecepatan negatif, yakni dengan cara menambah komponen baru saat kondisi “ steady state ” dicapai. Dalam hal ini untai umpan balik kecepatan dilepas dahulu lalu dipasang sebuah kapasitor yang memiliki kapasitansi dan tegangan kerja yang tinggi secara seri pada loop umpan baliknya.

Kapasitor tersebut berguna untuk melakukan perubahan tegangan AC yang timbul dan memblokir tegangan searahnya. Oleh karena itu umpan balik kecepatan hanya efektif bila putaran poros keluarannya selalu berubah-ubah. Hal ini lebih lazim disebut “velocity feedback transient”.

Contoh soal :

Pengendali posisi sistem servo yang menggunakan sinkro sebagai detektor kesalahan menerapkan untai peredam umpan balik kecepatan. Keluaran dari penyearah peka phase (psr) sebesar 1,5 V/derajat kesalahan diumpamakan pada penguat operasi penjumlah melalui sebuah hambatan 1 M Ohm dan tahanan umpan baliknya juga 1 M Ohm. Transduktansi penguatnya = 400 mA/volt, sedang torsi motor pada stand still dicapai sebesar 5×10^{-2} Nm saat arus medan mencapai maksimum (1/2 periode positif) sebesar 81 mA dan nol pada 1/2 periode lainnya. Keluaran techogenerator yang terpasang seporos dengan motor = 0,3 volt/rev/sec ini diumpamakan pada penguat operasi penjumlah melalui hambatan 2 M ohm. Poros keluaran dikopel dengan motor melalui roda gigi pemerlambat dengan perbandingan 80 : 1. Total inersia pada poros ini sebesar 50×10^{-2} kg.m².

Tentukanlah “damping ratio” dalam sistem tersebut dan besarnya overshoot yang pertama, bila poros input tiba-tiba dipindah kedudukannya 10^0 . Tentukan pula penundaan kecepatannya bila poros masukan diputar sebesar 5 rpm.

Penyelesaian :

Konstanta torsi motor (K_m)

$$K_m = \frac{T_m}{I_a} = \frac{5 \times 10^{-2}}{81} = 6,24 \times 10^{-4} \text{ Nm/mA}$$

Konstata techogenerator (K_T)

$$K_T = \frac{0,30}{2\pi} V / rad / sec$$

Konstanta pembagi tegangan untuk mengatasi putaran poros (K_s)

$$K_s = 1,5 \times \frac{360}{2\pi} V / rad$$

Persamaan dinamika linear dari sistem tersebut dapat ditulis

$$J \frac{d^2\theta_0}{dt^2} = nK_A K_m \left\{ K_s (\theta_i - \theta_0) - \frac{1}{2} nK_T \frac{d\theta_0}{dt} \right\}$$

Faktor $\frac{1}{2}$ periode awal dimunculkan, karena tegangan keluaran techogenerator diumpankan ke masukan penguat operasi penjumlah melalui $R = 2 \text{ M Ohm}$, sehingga diperoleh :

$$\frac{d^2\theta_0}{dt^2} + 76,2 \frac{d\theta_0}{dt} + 3392\theta_0 = 3392\theta_i$$

3433

Bila dibandingkan dengan persamaan (VI - 6) didapat :

$$\omega_n = \sqrt{K/J} = \sqrt{3392} = 58,24 \text{ dan } 2\zeta\omega_n = 76,2$$

Jadi rasio redaman :

$$\zeta = \frac{76,2}{2\omega_n} = \frac{76,2}{2 \times 58,24} = 0,654$$

Sistem tersebut berarti mendapat redaman kurang dan respon terhadap perubahan masukan (digeser 10^0), diselesaikan dengan persamaan (VI - 9) sebagai berikut.

$$\theta_0 = 10 \left\{ 1 - e^{-38,1t} (\cos \omega_n t + 0,86 \sin \omega_n t) \right\}$$

$$\theta_0 = 10 \left\{ 1 - \frac{e^{-38,1t}}{\sqrt{(1+0,86^2)}} \cos(\omega_n t - \tan^{-1} 0,86) \right\}$$

Catatan :

$$\omega = \omega_n \sqrt{(1-\zeta^2)} = 58,24 - 0,76 = 44,5$$

Jadi θ_0 akan maksimum (positif) bila $\cos(\omega t - 40,69^0) = -0,758^0 \approx 1^0$

Misal :

$$\omega_t = \frac{40,68 \times 2\pi}{300} = \pi \text{ atau } t = \frac{3,85}{44,5} = 0,087 \text{ detik}$$

$$\theta_0 \text{ maksimum} = 10 \left\{ 1 + e^{-3,3} \times 1,257 \right\} = 10,46^0$$

Jadi besarannya lewatan puncak (overshoot) awal $10,46^0 - 10^0 = 0,46^0$ sedang besarnya perlambatan kecepatan (velocity lag)

$$\varepsilon = \frac{nK_T \omega_t}{K_S} \text{ rad} = \frac{80 \times 0,3 \times 5}{1,5 \times 60} = 1,33^0$$

8. Efek Torsi Beban Pada Sistem Servo Sederhana

Sebegitu jauh , sistem pengendali posisi dimana masalah torsi beban ini sering diabaikan. Jika terdapat konstanta torsi beban, motor harus mampu mengimbangi keadaan ini pada “ Stand Still “ (torsi meter) dan harus diperhitungkan dengan besaran masukan yang disetel. Hal ini didasarkan dari asumsi bahwa terdapat kesalahan antara posisi poros masukan dan poros keluaran. Persamaan dinamika seperti Gambar (VI - 7) di muka, dapat ditulis kembali sebagai :

$$J \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + T_L = nK_A K_m K_S (\theta_i - \theta_0) - nK_T \frac{d\theta_0}{dt} \dots\dots\dots (VI-22)$$

Catatan : T_L = Torsi beban

Pada kondisi dimana masukan diset tetap pada harga setelan (θ_i = konstan) dan keluarannya steady state

$$\frac{d^2 \theta_0}{dt^2} = \frac{d\theta_0}{dt} = 0,$$

maka besar kesalahan yang terjadi diformulasikan :

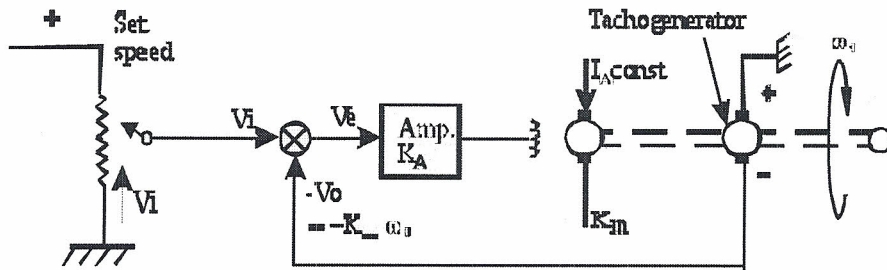
$$\varepsilon = \theta_i - \theta_0 = \frac{T_L}{nK_A K_m K_S} \text{ radian} \dots\dots\dots (VI-23)$$

Kesalahan tersebut di atas lazim disebut "offset" (kerugian pengganti). Offset ini dapat dihindari dengan jalan mengirimkan sinyal masukan ke penguat servo sehingga terjadi kesesuaian, tidak hanya terhadap kesalahan saja, tapi juga terhadap kesalahan ditambah integral waktu kesalahan itu sendiri.

9. Pengendali Kecepatan Sederhana Model “ Velodyne “

Kecepatan putar poros keluaran sebuah motor servo berdaya kecil dapat dikendalikan secara tertutup yang identik dengan pengendalian posisi. Yang

dimaksud dalam hal ini ialah pengendali model “ Velodyne “ seperi ditunjukkan pada Gambar VI. 8.



Gambar VI. 8. Pengandali kecepatan model Velodyne

Poros keluaran memutar tachogenerator DC dan tegangan yang dihasilkan selalu dibandingkan dengan tegangan masukan yang diset (reference voltage divider) yang dapat dikalibrasikan dengan kecepatan putar poros keluarannya. Dengan memperhatikan polaritas yang terjadi, tegangan kesalahan (V_e) adalah :

$$V_e = V_i - K_T \omega_o \dots \dots \dots (VI-24)$$

Catatan : K_T = Konstanta tachogenerator dalam volt/rad/sec, dan

$\omega_o = (d\theta_o/dt)$ kecepatan sudut putar dari poros keluaran.

Torsi motor yang terjadi (katakanlah konstanta arus armatur = I_A , transkonduktansi = K_A dan torsi motor = K_m) adalah : $K_A K_m V_e$, maka dengan mengabaikan faktor gesekan dan pembebanan, persamaan dinamikanya menjadi :

$$J \frac{d\omega_o}{dt} = K_A K_m V_e = K_A K_m (V_i - K_T \omega_o) \dots \dots \dots (VI-25)$$

Pada saat poros keluaran tunak ($d\omega_o / dt = 0$) ; kondisi seperti ini dicapai penuh bila $V_i = K_T \omega_o$. Oleh karenanya kecepatan putar poros keluaran adalah

$$\omega_o = \frac{V_i}{K_T} \rightarrow V_i = K_T \omega_o \dots \dots \dots (VI-26)$$

Apabila konstanta torsi beban sebesar T_L dikopel dengan roda gerigi dengan perbandingan $n : 1$, dan tachogenerator terpasang seporos dengan motor, maka keluaran tachogenerator sebesar $nK_T\omega_o$ (ω_o = kecepatan sudut putar poros keluaran). Jika inersia total pada poros keluaran sebesar "J", persamaan dinamikanya :

$$J \frac{d\omega_0}{dt} + T_L = K_A K_m (V_i - nK_T \omega_0) \dots \dots \dots \quad (\text{VI-27})$$

Kondisi poros saat itu ($d\omega_0 / dt = 0$), torsi bebanya sebesar

$$T_L = K_A K_m (V_i - nK_T \omega_0)$$

$$T_L = K_A K_m (nK_T \omega_i - nK_T \omega_0) \dots \dots \dots \quad (\text{VI-28})$$

Mengingat tegangan referensi masukan (V_i) dapat dikalibrasikan dengan kecepatan yang dikehendaki (ω_i), maka perbandingan roda gigi yang diperlukan disini bisa dihitung sesuai dengan persamaan (VI – 26).

Perbedaan kecepatan sudut putar antara yang dikehendaki (ω_i) dan kecepatan putar yang sebenarnya (ω_0), dapat dicari dengan rumus :

$$T_L = K_A K_m (nK_T \omega_i - nK_T \omega_0)$$

$$T_L = K_A K_m nK_T (\omega_i - \omega_0)$$

Atau

$$\varepsilon = \omega_i - \omega_0 = \frac{T_L}{nK_T K_A K_m} \dots \dots \dots \quad (\text{VI-29})$$

Kesalahan yang terjadi disini disebut “droop“. Dalam hal ini akan dapat dicatat bahwa kesalahan tersebut tidak terikat atas kecepatan putar poros keluaran. Dengan demikian untuk kecepatan putar poros yang tinggi ini akan menyatakan presentase kesalahan yang lebih kecil dari pada kecepatan putar poros yang lambat. Droop tersebut dapat dieliminir dengan menggunakan piranti “kompensasi integral kesalahan “ seperti halnya pada pengendali posisi sistem servo.

Contoh soal :

Di dalam sistem kendali kecepatan model “ Veloldyne “ seperti tertera pada Gambar (III. 8), mempunyai konstanta-konstanta sebagai berikut:

Transkonduktansi penguat = 200 mA/V, torsi motor = 5×10^{-3} Nm/mA, tachogenerator = 10 V/1000 rpm. Carilah besarnya tegangan masukan agar dihasilkan kecepatan 2000 rpm, jika setting masukannya separuh dari harga semula. Hitung “ droop “ nya (regulasi kecepatan) bila bebannya bertorsi 6×10^{-2} Nm.

Penyelesaian :

Konstanta tachogenerator :

$$K_T = \frac{10 \times 60}{1000 \times 2\pi} = 0,96 \text{ V/rad/sec}$$

$$K_T = 0,573 \text{ V/rad/sek.}$$

Karena tidak memakai roda gigi pereduksi kecepatan, menurut persamaan (VI-26) didapat :

$$\omega_0 = \frac{V_i}{K_T} \rightarrow V_i = K_T \omega_0 = 20 \text{ Volt}$$

Bila masukan diset pada 10 volt, dimana putaran poros tanpa beban akan sebesar = 1000 rpm. Bila torsi beban tadi ($6 \times 10^{-2} \text{ Nm}$) benar-benar terpasang, maka V_e yang harus dikuatkan melalui masukan penguat operasi adalah

$$V_e = \frac{T_L}{K_A K_m} = \frac{6 \times 10^{-2} \text{ Nm}}{200 \text{ mA/V} \times 5 \times 10^{-3} \text{ Nm/mA}} = 6 \times 10^{-2} \text{ Volt}$$

Keluaran tachogenerator = $10 - (6 \times 10^{-2})$ volt, dan kecepatan putar poros yang sebenarnya = $(10 \times 10^{-2} \times 1000/10)$ rpm. Di sini “droop” nya adalah:

$(6 \times 10^{-2} \times 1000/10) = 6$ rpm. Atau dapat pula dicari dengan persamaan (VI-29), yakni :

Regulasi kecepatan

$$\varepsilon = \omega_i - \omega_0 = \frac{T_L}{n K_T K_A K_m} = \frac{6 \times 10^{-2}}{1 \times 0,96 \times 200 \times 5 \times 10^{-3}} = 0,006$$

atau

$$\varepsilon = 0,6 \%$$

Soal-soal latihan

1. Pengukuran kesalahan posisi poros yang menggunakan potensiometer pembagi tegangan bersudut geser 330° dan tercatu tegangan 20 V_{dc} . Berapakah besar tegangan per radian kesalahan ?
2. Pengendali posisi servo menggunakan sinkro sebagai detektor kesalahan dengan keluaran sebesar 1 V per derajat kesalahan. Motor diberi beban melalui roda gigi pereduksi kecepatan dengan rasio 100 : 1. Sistem tersebut dilengkapi komponen pendukung dan konstanta penting lainnya yaitu

transkonduktansi penguat = 400 mA/V, konstanta torsi motor = 5×10^{-4} N-m/mA, inersia motor = 30×10^{-6} kg-m². Hitunglah (a) Koefisien gesek viskos (N-m-s) pada poros keluaran agar dihasilkan faktor redaman $\zeta = 0,60$, (b) frekuensi alami tanpa redaman, dan (c) kasalahan tunak (steady state) dalam derajat apabila poros masukan diputar 12 rpm.

3. Berikut ini diketahui sejumlah data pada pengendalian posisi sitem servo dengan keluaran terhubung langsung pada poros motor.

- ❖ Konstanta transduser (tachogenerator) = 57,4 V/rad
- ❖ Konstanta torsi motor = 10^{-2} N-m/mA keluaran amplifier
- ❖ Momen inersia pada poros motor = 0,143 kg-m²
- ❖ Koefisien gesekan viskon pada poros motor = 0,13 N-m-s
- ❖ Rasio redaman = 1,03

Tentukan (a) transduktansi amplifier, dan (b) frekuensi isolasi alami tanpa redaman

4. Sistem pengendalian kecepatan model “ Velodyne “ menggunakan amplifier dengan transkonduktansi 300 mA/V, konstanta torsi motor = 2×10^{-4} N-m/mA, dan konstanta tachogenerator = 2 V/1000 rpm. Tegangan referensi masukan dan umpan balik dari tachogenerator keduanya diumpan ke amplifier melalui resistor yang sama harganya. Tentukan (a) besar tegangan referensi masukan agar dihasilkan kecepatan putar poros motor tanpa beban sebesar 2500 rpm dan (b) besar “ droop “ atau regulasi kecepatan manakala dikenai beban dengan torsi 8×10^{-3} N-m.