

PEMODELAN SISTEM TERDISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE HIRARKI PADA POWER PLANT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)

¹ Ilmi Rizki Imaduddin & ² Hendi Purnata

^{1,2} Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Email: hendipurnata@gmail.com

Abstrak

Sistem kendali berhirarki biasanya untuk mengatasi suatu sistem pengendalian yang kompleks. Prinsip sistem kendali kompleks tidak bisa diterapkan langsung secara efektif dan efisien hal ini disebabkan oleh sistemnya terlalu besar dan permasalahan terlalu kompleks. Sistem kendali berhirarki mempunyai input dan output berjumlah besar. Pada sistem kendali berhirarki, komponennya melakukan berbagai macam interaksi dinamis dan sistem ini mendapatkan bermacam-macam gangguan. Model matematis dari sistem ini mempunyai orde dinamik yang besar dan mencakup banyak parameter sistem. Pencarian alternative dalam kendali suatu sistem berdimensi besar akan menyebabkan pembagian keseluruhan dalam sub-sub permasalahan. Hasil dari penelitian ini sistem mempunyai input langsung menjadi *output* (throughput) syarat input dan outputnya *reachable* sehingga sistem bisa dikatakan *controllable* dan *observable*. Untuk menghasilkan sistem stabil di ketahui bahwa persamaan karakteristik dari sistem tersebut berada di sebelah kiri bidang S. Pada penelitian ini terdapat satu eigen value yang berada di sebelah kanan bidang S maka distabilkan menggunakan pengendalian terdesentralisasi dengan memberikan kompensator

Keyword: sistem kompleks, hirarki, desentralisasi, PLTU

1 Pendahuluan

Teknologi yang telah berkembang pesat, dalam sistem kontrol ada beberapa hal yang tidak bisa mengatasi prinsip efisiensi dan efektifitas. Sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) pada sistem kendali bertujuan agar suatu sistem bekerja bersamaan untuk mencapai efisiensi dan efektifitas, akan tetapi dalam sistem (MIMO) kurang bisa diaplikasikan.

Sistem kendali skala besar pertama kali dikenalkan pada tahun 1960 oleh Dantzing dan Wolfe yang mendekomposisikan permasalahan pemrograman linear. Kemudian dikembangkan dengan pendekatan *multilevel* oleh Mesarovic tahun 1970 dan Cohen tahun 1978. Sistem skala besar mempunyai sejumlah input dan output dengan komponennya melakukan berbagai interaksi dinamis. Sistem ini melalui sistem lingkungannya mempunyai orde dinamik yang besar dan mencakup banyak parameter sistem.

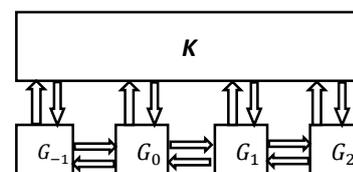
Ide tentang sistem skala besar datang pada saat permasalahan kendali yang pada praktiknya tidak dapat diterapkan secara efisien oleh prinsip dan metode sistem *multivariable*. Beberapa ilustrasi seperti pada sistem tenaga multiarea dengan beberapa unit pembangkit tenaga yang mendistribusikan daya listrik ke banyak tempat, sistem *coupled water reservoir* yang sarat dengan kompleksitas interaksi dinamis antar *reservoir*, proses pembuatan semen dan *power plant*.

Kesulitan untuk mengendalikan suatu sistem berdimensi besar menyebabkan lebih menguntungkan untuk membagi keseluruhan permasalahan ke dalam sub-sub permasalahan yang lebih kecil untuk kemudian dipecahkan secara terpisah dan digabungkan kembali solusi- solusinya untuk mendapatkan suatu solusi global. Sub-sub permasalahan tersebut tidak sepenuhnya independen. Beberapa koordinasi atau modifikasi solusi dari sub-sub permasalahan tersebut dibutuhkan untuk mengatur hubungan antar setiap sub permasalahan. Upaya ini dibutuhkan untuk menyesuaikan sub-sub permasalahan tersebut dalam suatu sistem komputasi terdistribusi. Karena itu dibutuhkan konsep dan teknik untuk memformulasikan suatu permasalahan dan memecahkan sub permasalahan tersebut sebagai suatu sistem pengendalian terdistribusi (*Distributed Control System/DCS*).

2 Diskusi

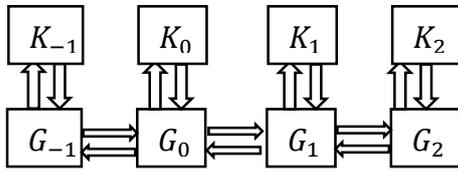
2.1 Strategi Pengendalian

Pada sistem dan kontrol terdapat beberapa strategi pengendalian dalam hirarki agar suatu sistem tersebut dapat didekomposisikan yaitu sistem yang besar menjadi beberapa sub sistem yang relative kecil yang terinterkoneksi satu sama lain.



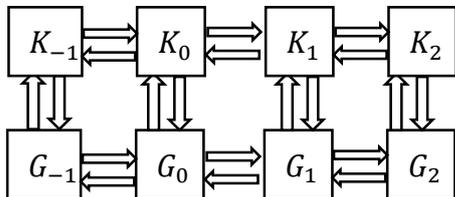
Gambar 1 Sistem Centralisasi

Sistem sentralisasi merupakan sistem dimana suatu element-elementnya berpusat. kelebihan sistem ini adalah dimana gain K atau pusat sentralisasi untuk mengambil suatu keputusan tidak berpengaruh kepada siapa pun.



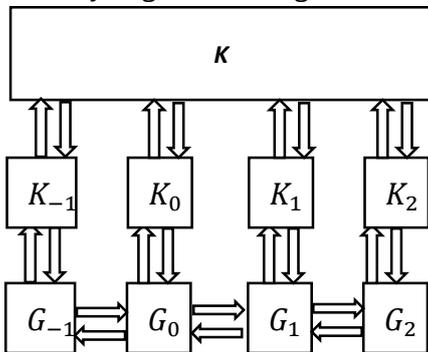
Gambar 2 Sistem Desentralisasi

sistem desentralisasi merupakan suatu sistem yang mempunyai gain K sendiri untuk mengatur suatu sub sistem sendiri.



Gambar 3 Sistem Distribusi

Sistem distriubusi dimana sistem satu dan sistem lain dalam satu jaringan dan saling berkomunikasi.



Gambar 4 Sistem Multilevel

Sistem multilevel adalah gabungan antara sistem sentralisasi dan disentralisasi dimana terdapat gain K yang dapat mengatur element-element dibawahnya.

Pada *power plant* PLTU startegi pengendalian menggunakan sistem multilevel dimana dari suatu proses ke proses lain saling berhubungan dan dapat di monitoring agar bisa memperoleh suatu proses yang diinginkan.

2.2 Model Interaksi

Model interaksi pada sistem pengendalian berhirarki dapat dimodelkan dalam bentuk model seperti pada gambar 5. Dengan u_1 = eksternal input ke subsistem 1, y_1 = ekesternal output dari subsistem 1, s_1 = internal input ke subsistem 1 yang menyatakan pengaruh dari subsistem yang lain, z_1 = internal output dari subsistem 1 yang mempengaruhi subsistem yang lain dan x_1 = state subsistem 1.

Persamaan model interaksi

$$\dot{x} = A_i x_i + B_i u_i + E_i s_i$$

$$y_i = C_i x_i + D_i u_i + F_i s_i$$

$$z_i = C_{zi} x + D_{zi} u_i + F_{zi} s_i \quad (1)$$

$s = Lz$ dimana $i = 1, 2, 3 \dots N$ = banyaknya subsistem

Bila interaksi antara subsistem lemah ($s=0$), maka:

$$\dot{x} = A_i x_i + B_i u_i$$

$$y_i = C_i x_i + D_i u_i \quad (2)$$

Berarti sistem diatas menjadi subsistem-subsistem yang independent, dengan

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix}, s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix}, z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

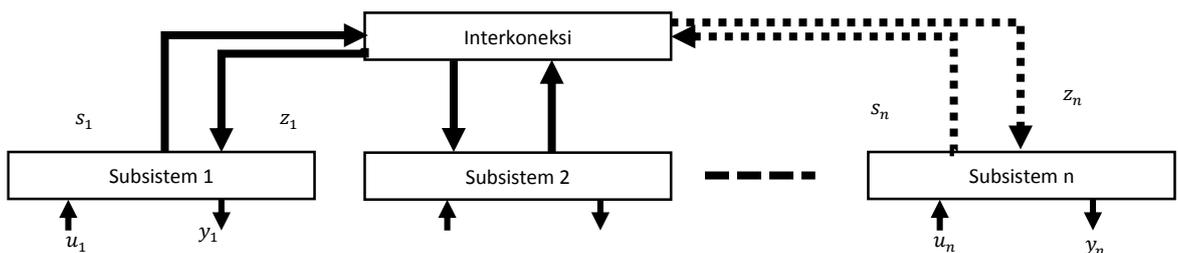
Maka,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & E_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bila sistem tidak memiliki *throughput* (input langsung menjdai output), maka persamaan menjadi:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx \quad (5)$$



Gambar 5 Model Interaksi

$$\text{Dengan } A = \text{diag } A_i + (\text{diag } E_i)L \text{diag } C_{zi}$$

$$B = \text{diag } B_i$$

$$C = \text{diag } C_i$$

$$D = 0 \quad (6)$$

Model diatas sering dinamakan model input output.

2.3 Dekomposisi Berdasarkan Strongly Coupled Sistem (SCS)

Pada persamaan (1) suatu sistem dapat didekomposisikan menjadi beberapa subsistem-subsistem dengan menyusunnya secara hirarki. Adapun matriks L tersebut adalah

$$L = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1N} \\ L_{21} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{N1} & \dots & \dots & L_{44} \end{pmatrix}$$

$$\text{dengan elemen } (L) = \begin{cases} 1 & \text{bila } L_{ij} = 0 \\ 0 & \text{bila } L_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Dengan demikian diperoleh beberapa subsistem dengan interaksi yang diberikan oleh (L). Kemudian diadakan pengaturan ulang terhadap kondisi (L) sehingga diperoleh matrik lower diagonal.

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & \dots & 0 \\ L_{21} & L_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & L_{33} & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} & \dots & L_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pengelompokan tersebut berdasarkan pada graph struktur dari sistem dengan melihat keadaan matrik L, dengan syarat:

1. Dua Vertex yang *strongly coupled* berada dalam satu kelas yang ekuivalenya sama
2. Himpunan vertex N oleh matrik L didekomposisi menjadi beberapa kelas ekuivalen.
3. Dengan satu transformasi urutan dari vertex dan kelasnya dibuat supaya diperoleh L' yang berupa matrik *lower diagonal*
4. $L' = P'LP$

Penelitian ini menggunakan metode hirarki yaitu memodelkan suatu sistem besar dengan menggunakan pengaturan berjenjang kemudian sistem besar didekomposisi menjadi beberapa sub sistem yang relatif kecil sehingga terinterkoneksi satu sama lain. Metode ini diharapkan dapat merancang sistem yang sesuai untuk tiap subsistem dari keseluruhan sistem yaitu baik secara desentralisasi maupun sentralisasi. Metode ini dilakukan dengan pendekatan dengan *fixed mode* desentralisasi dimana untuk menstabilkan sistem dapat dilakukan dengan memberikan kompensator terdesentralisasi.

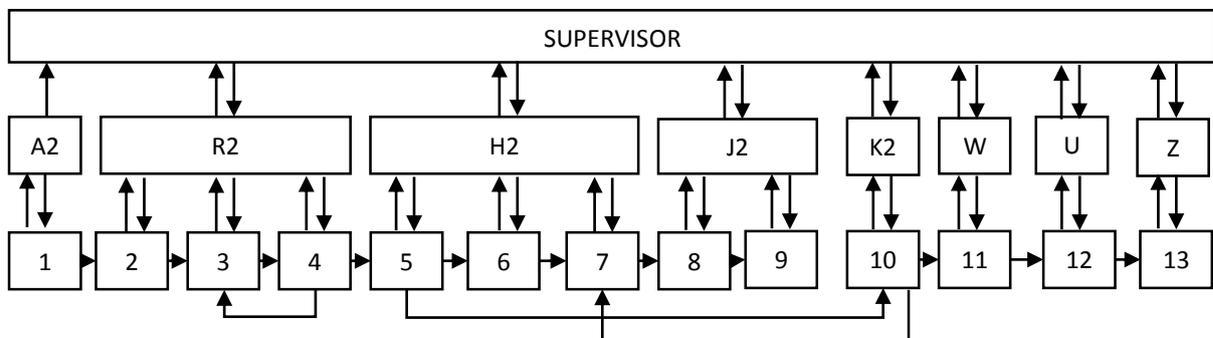
3 Hasil Penelitian

Pada sistem kendali pada power plant menggunakan signal processing sebagaimana terlihat pada gambar 6 di bawah.

Pada gambar 6 tampak bahwa informasi sebagai berikut:

- s_2 menginformasikan z_1
- s_3 menginformasikan z_2 dan z_5
- s_4 menginformasikan z_3
- s_5 menginformasikan z_3
- s_6 menginformasikan z_5
- s_7 menginformasikan z_6
- s_8 menginformasikan z_7

Dengan kondisi fisik dari subsistem yang terhubung sebagaimana informasi di atas maka dapatlah dibentuk sebuah model subsistem dengan model interaksi sebagai berikut:



Gambar 6 Alirans Proses pada Power Plant PLTU

a. Subsystem I

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1$$

$$y_1 = C_1 x_1 + D_1 u_1$$

$$z_1 = C_{z1} x_1 + D_{z1} u_1$$

$$L = 0$$

b. Subsystem II

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 + E_2 s_2$$

$$y_2 = C_2 x_2 + D_2 u_2 + F_2 s_2$$

$$z_2 = C_{z2} x_2 + D_{z2} u_2 + F_2 s_2$$

$$L = L_{21} z_1$$

c. Subsystem III

$$\dot{x}_3 = A_3 x_3 + B_3 u_3 + E_3 s_3$$

$$y_3 = C_3 x_3 + D_3 u_3 + F_3 s_3$$

$$z_3 = C_{z3} x_3 + D_{z3} u_3 + F_3 s_3$$

$$L = L_{32} z_2 + L_{35} z_5$$

d. Subsystem IV

$$\dot{x}_4 = A_4 x_4 + B_4 u_4 + E_4 s_4$$

$$y_4 = C_4 x_4 + D_4 u_4 + F_4 s_4$$

$$z_4 = C_{z4} x_4 + D_{z4} u_4 + F_4 s_4$$

$$L = L_{43} z_3$$

e. Subsystem V

$$\dot{x}_5 = A_5 x_5 + B_5 u_5 + E_5 s_5$$

$$y_5 = C_5 x_5 + D_5 u_5 + F_5 s_5$$

$$z_5 = C_{z5} x_5 + D_{z5} u_5 + F_5 s_5$$

$$L = L_{54} z_4$$

f. Subsystem VI

$$\dot{x}_6 = A_6 x_6 + B_6 u_6 + E_6 s_6$$

$$y_6 = C_6 x_6 + D_6 u_6 + F_6 s_6$$

$$z_6 = C_{z6} x_6 + D_{z6} u_6 + F_6 s_6$$

$$L = L_{65} z_5$$

g. Subsystem VII

$$\dot{x}_7 = A_7 x_7 + B_7 u_7 + E_7 s_7$$

$$y_7 = C_7 x_7 + D_7 u_7 + F_7 s_7$$

$$z_7 = C_{z7} x_7 + D_{z7} u_7 + F_7 s_7$$

$$L = L_{76} z_6$$

h. Subsystem VIII

$$\dot{x}_8 = A_8 x_8 + B_8 u_8 + E_8 s_8$$

$$y_8 = C_8 x_8 + D_8 u_8 + F_8 s_8$$

$$z_8 = C_{z8} x_8 + D_{z8} u_8 + F_8 s_8$$

$$L = L_{87} z_7$$

Dari persamaan subsistem-subsistem diatas dibentuk matrik interaksi (L) berikut ini:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

Sistem pada *power plant* PLTU diatas merupakan pengolahan proses yang tidak memiliki *throughput* (pada sistem ini kondisi input menjadi output) sehingga berlaku pada persamaan (5) dan (6) jadi persamaan struktur sistem dalam model input output menjadi:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_2 C_{z1} & A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_3 C_{z2} & A_3 & 0 & E_3 C_{z5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_4 C_{z3} & A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_5 C_{z4} & A_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_6 C_{z5} & A_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_7 C_{z6} & A_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_8 C_{z7} & A_8 \end{bmatrix} x$$

$$+ \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_8 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_2 C_{z1} & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_2 C_{z2} & C_3 & 0 & F_2 C_{z5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_2 C_{z3} & C_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_2 C_{z4} & C_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_2 C_{z5} & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_2 C_{z6} & C_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_2 C_{z7} & F_8 \end{bmatrix} x$$

4 Analisis dan Pembahasan

Dari persamaan diatas maka kita dapat menyusun suatu matrik struktur sebagai berikut:

$$S_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Diatas merupakan kondisi dari struktur-rank (S-Rank) untuk $[S_a \ S_b]$ dan $[S_a \ S_c]^T$ dari sistem diatas. Adapun struktur-rank (S-Rank) dari $[S_a \ S_b] = 8$ dengan S-Rank $[S_a \ S_c]^T = 8$. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tersebut bisa dikatakan *controllable* dan *observable* karena syarat dari sistem tersebut *output* dan input *reachable* (yaitu ada lintasan yang menghubungkan salah satu input ke setiap state). Selanjutnya kita dekomposisi kan menjadi subsistem-subsistem yang dapat disusun secara struktur hirarki.

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{32} & 0 & 0 & L_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{54} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{65} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{76} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{87} & 0 \end{bmatrix}$$

Dari struktur matrik L terbukti bahwa matrik tersebut merupakan *lower diagonal* bahwa pengendalian proses diatas mempunyai struktur berhirarki. Matriks diatas didekomposisi menjadi 6 subsistem baru yang mempunyai karakteristik *strongly coupled system*. Persamaan sistem tiap *strongly coupled system* adalah sebagai berikut:

1. SCS 1 (Level 6)

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1$$

$$y_1 = C_1 x_1$$

2. SCS 2 (Level 5)

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2$$

$$y_2 = C_2 x_2$$

3. SCS 3 (Level 4)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & 0 & E_3 C_{z5} \\ E_4 C_{z3} & A_4 & 0 \\ 0 & E_5 C_{z4} & A_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_3 & 0 & 0 \\ 0 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & B_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & 0 \\ 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$$

4. SCS 4 (Level 3)

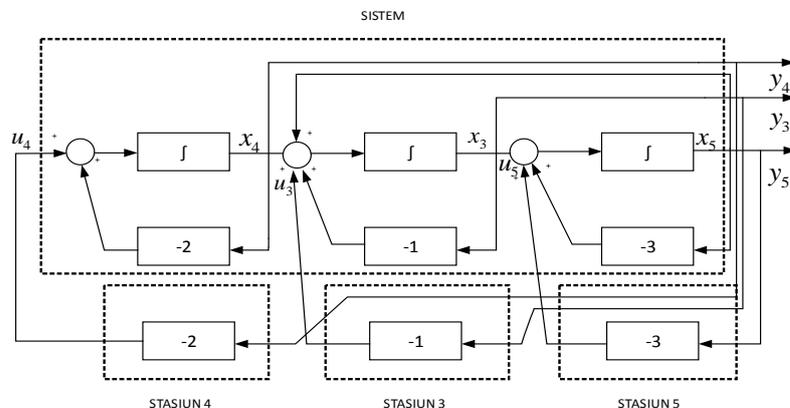
$$\dot{x}_6 = A_6 x_6 + B_6 u_6$$

$$y_6 = C_6 x_6$$

5. SCS 5 (Level 2)

$$\dot{x}_7 = A_7 x_7 + B_7 u_7$$

$$y_7 = C_7 x_7$$



Gambar 7 Diagram Blok SCS3 dengan Kompensator Terdesentralisasi statis

6. SCS 6 (Level 1)

$$\dot{x}_8 = A_8 x_8 + B_8 u_8$$

$$y_8 = C_8 x_8$$

Pengelompokkan tersebut tentunya berdasar pada graph struktur sistem dengan memperhatikan interaksi pada L. Dekomposisi sistem dapat mempermudah analisa kestabilan sistem, karena suatu sistem dikatakan stabil jika dan hanya jika semua *strongly coupled sistem* adalah stabil. Karena sistem pengendalian pada power plant di atas mempunyai matriks interaksi L yang lower diagonal maka sistem tersebut mempunyai struktur berhirarki.

Sistem dikatakan stabil jika dan hanya jika semua *eigenvalue* sistem tersebut berada pada bagian negative bidang kompleks. Setelah didekomposisi sistem dikatakan stabil dan hanya jika semua SCS nya stabil.

Kita asumsikan tiap subsistem adalah orde 1 dengan konstan waktu (T) untuk tiap subsistem adalah 1, 0.5, 1, 1, 1, 0.5, 0.2, 1 maka persamaan sistem untuk tiap SCS adalah:

1. SCS 1 (Level 6)

$$\dot{x}_1 = -x_1 + u_1$$

$$y_1 = x_1$$

2. SCS 2 (Level 5)

$$\dot{x}_2 = -2x_2 + 2u_2$$

$$y_2 = x_2$$

3. SCS 3 (Level 4)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$$

4. SCS 4 (Level 3)

$$\dot{x}_6 = -2x_6 + 2u_6$$

$$y_6 = x_6$$

5. SCS 5 (Level 2)

$$\dot{x}_7 = -5x_7 + 5u_7$$

$$y_7 = x_7$$

6. SCS 6 (Level 1)

$$\dot{x}_8 = -x_8 + u_8$$

$$y_8 = x_8$$

Untuk menentukan kestabilan sistem diatas maka akan dicari *eigenvalue* masing-masing *strongly coupled sistem* diatas

SCS 1, mempunyai *eigenvalue* pada $\lambda_1 = -1$

SCS 2, mempunyai *eigenvalue* pada $\lambda_2 = -2$ **SCS 3**, mempunyai *eigenvalue* pada $\lambda_3 = -1.5 + 0.866i$, $\lambda_4 = -1.5 - 0.866i$, $\lambda_5 = 0$

SCS 4, mempunyai *eigenvalue* pada $\lambda_6 = -2$

SCS 5, mempunyai *eigenvalue* pada $\lambda_7 = -5$

SCS 6, mempunyai *eigenvalue* pada $\lambda_8 = -1$

Terdapat satu *eigenvalue* yaitu $\lambda_5 = 0$ sehingga SCS3 diperkirakan tidak stabil akan mengakibatkan sistem lebih labil. Sistem yang tidak stabil dapat distabilkan dengan menggunakan pengendalian terdesentralisasi dengan syarat sistem tersebut tidak memiliki *fixed mode* terdesentralisasi. Sistem dapat distabilkan dengan memberikan kompensator terdesentralisasi statis pada sistem. Kompensator berupa umpan balik dari y_3 ke u_3 , y_4 ke u_4 dan y_5 ke u_5 .

$$u_3 = -K_3 y_3$$

$$u_4 = -K_4 y_4$$

$$u_5 = -K_5 y_5$$

Sehingga,

$$A - BKC = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_3 & 0 & 0 \\ 0 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_3 & 0 & 0 \\ 0 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -1-K_3 & 0 & 1 \\ 1 & -1-K_4 & 0 \\ 0 & 1 & -1-K_5 \end{bmatrix}$$

Eigenvalue dicari dari persamaan $|\lambda I - (A - BKC)| = 0$, sehingga diperoleh

$$\begin{bmatrix} \lambda - (-1 - K_3) & 0 & 1 \\ 1 & \lambda - (-1 - K_4) & 0 \\ 0 & 1 & \lambda - (-1 - K_5) \end{bmatrix} = 0$$

$$\lambda^3 + (2 + K_3 K_5 + K_4 K_5) \lambda^2 + (K_4 K_5 + K_3 K_5 + K_3 K_4 K_5) \lambda + 1 = 0$$

Jika diasumsikan spectrum loop tertutup $\sigma_0 = -2, -3, -4$ maka akan mendapatkan persamaan

$$(-1 + K_3)(-2 + K_4)(-3 + K_5) = 0$$

Maka dieperoleh kompensator statis $K_3 = 1, K_4 = 2$ dan $K_5 = 3$, sehingga aksi kendalinya adalah

$$u_3 = -1y_3, u_4 = -2y_3 \text{ dan } u_5 = -3y_3.$$

Gambar 7 diatas merupakan diagram blok SCS3 ditambah kompensator K_3, K_4 dan K_5 kemudian dipasang pada stasiun kendali 3, 4 dan 5 menjadi sistem yang stabil.

5 Kesimpulan

Dari hasil analisis diatas sistem mempunyai input langsung menjadi output (throughput) dan sistem diatas memenuhi syarat input dan outputnya *reachable* sehingga sistem bisa dikatakan *controllable* dan *observable*. Untuk menghasilkan sistem stabil di ketahui bahwa persamaan karakteristiknya berada di sebelah kiri bidang S, terdapat SCS3 yang tidak stabil karna salah satu $\lambda_5 = 0$ maka distabilkan menggunakan pengendalian terdesentralisasi dengan memberikan kompensator.

6 Daftar Pustaka.

- [1] Khairudin, Moh. "sistem kendali pada sistem kompleks multivariable dengan metode berhirarki" (*Telecommunication Computing Electronics and Control*) 3.1 (2005): 27-37.
- [2] Koo, Geun Bum, Jin Bae Park, and Young Hoon Joo. "Decentralized fuzzy observer-based output-feedback control for nonlinear large-scale systems: an LMI approach." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 22.2 (2014): 406-419.
- [3] Albertoe, P & Sala, A "Multivariable Control System: An Engineering Approach" Springer: Verlag London, London 2004.
- [4] Lunze, Jan, "Feedback Control of Large Scale System" PrenticeHall International, Englewood Cliffs, 1992.
- [5] Li, Duan. "Hierarchical control for large-scale systems with general multiple linear-quadratic structure." *Automatica* 29.6 (1993): 1451-1461.
- [6] Ngan, H. W., A. K. David, and K. L. Lo. "Decentralized hierarchical optimal control of dynamic instability in AC/DC power systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 14.5 (1992): 358-363.