

ANALISIS SISTEM KONTROL ACTIVE MAGNETIC BEARING PADA ROTOR

Active Magnetic Bearing seperti halnya *Bearing* biasa mempunyai tugas dasar yaitu menumpu rotor, tetapi metode operasi dan konstruksinya berbeda. *AMB* adalah sistem tanpa kontak (*contactless*) dan tidak membutuhkan pelumasan sehingga digunakan pada aplikasi–aplikasi tertentu yang *bearing* biasa tidak dapat digunakan seperti pada lingkungan kerja yang vakum dan bersih. *AMB* juga digunakan pada spindle mesin yang berpresisi tinggi, perakitan semi konduktor (getaran rendah dan kontaminasi) dan turbomachinery untuk putaran yang sangat tinggi. Saat ini sedang dalam taraf penelitian penggunaan *AMB* pada *Left Ventricular Assist Device (LVAD)* untuk jantung buatan. *AMB* juga digunakan pada *Momentum Wheels* dan *Flywheel Energy Storage* untuk aplikasi ruang angkasa. *Active Magnetic Bearing* terdiri dari rotor sensor posisi atau peralatan lain untuk mendeteksi posisi rotor, controller, power amplifier dan elektro magnet untuk melevitasi dan menumpu rotor dengan gaya magnetik. Analisis Kontrol sistem *Active Magnetic Bearing* bisa menggunakan kontrol *Proporsional Derivative (PD)* atau Kontrol *Proporsional Inetgral Derivative (PID)* sehingga sistem *Active Magnetic Bearing* menjadi stabil.

Kata Kunci : *Active Magnetic Bearing*, *PD* Kontroller, *PID* Kontroller, Sistem Kontrol.

A. Walujodjati

e-mail: agung_djati@yahoo.com

Laboratorium Perancangan
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Wahid Hasyim
Semarang
Jl Menoreh Tengah X/22
Semarang

Pendahuluan

Dewasa ini, *Active Magnetic Bearing (AMB)* telah banyak digunakan pada berbagai aplikasi seperti industri oli dan gas, pembangkit tenaga, konservasi energi. mesin jet, kompresor, pompa dan system *fly wheel*. *AMB* mempunyai kelebihan dibandingkan dengan *bearing* konvensional yaitu dengan tidak adanya kontak gesekan antara rotor dan bearing sehingga memberi kontribusi efisiensi pada energi, umur yang panjang, dan kemampuan beroperasi pada putaran tinggi. Keuntungan lain termasuk tidak adanya perawatan mekanis dari *bearing* dan pelumasan, sehingga cocok untuk ruang kerja yang bersih dan vakum. Sedangkan kerugian dari *AMB* adalah biaya pembuatan relatif mahal dan ukurannya relatif besar bila dibandingkan dengan *bearing* konvensional.

Sejarah *AMB* dapat dilacak melalui hak paten tentang *AMB* yang ada di Amerika Serikat. Paten paling awal untuk *AMB* diterima Jesse Beams pada tahun 1954 dari Universitas Virginia pada Perang Dunia II yang diteruskan oleh Schweitzer pada tahun 1976 dan Habermann pada tahun 1979. Simposium Internasional untuk *AMB* pertama kali dilaksanakan pada tahun 1988 oleh *International Society of Magnetic Bearing* yang didirikan oleh Prof. Schweitzer, Prof. Allaire (University of Virginia), dan Prof. Okada (Ibaraki University). *AMB* yang pertama kali diaplikasikan secara komersial adalah pada mesin turbo untuk NOVA Gas Transmission Ltd. (NGTL) di Alberta, Canada yang bisa mengurangi fire hazard allowing a substantial reduction. Kesuksesan NGTL

ini membuat mereka menjadi pioneer dalam riset dan pengembangan sistem kontrol digital *magnetic bearing* sebagai pengganti sistem kontrol analog yang dibuat oleh American Company Magnetic Bearings Inc. (MBI). Perusahaan Perancis S2M, yang didirikan pada tahun 1976, adalah perusahaan yang pertama kali memasarkan *AMB*. Pada tahun 1992, NGTL's Magnetic Bearing Research Group membentuk perusahaan Revolve Technologies Inc untuk mengkomersialkan lebih lanjut teknologi *digital magnetic bearing*.

AMB seperti halnya *Bearing* biasa mempunyai tugas dasar yaitu menumpu rotor, tetapi metode operasi dan konstruksinya berbeda. *AMB* adalah sistem tanpa kontak (*contactless*) dan tidak membutuhkan pelumasan sehingga digunakan pada aplikasi–aplikasi tertentu yang *bearing* biasa tidak dapat digunakan seperti pada lingkungan kerja yang vakum dan bersih. *AMB* juga digunakan pada spindle mesin yang berpresisi tinggi, perakitan semi konduktor (getaran rendah dan kontaminasi) dan turbomachinery untuk putaran yang sangat tinggi. Saat ini sedang dalam taraf penelitian penggunaan *AMB* pada *Left Ventricular Assist Device (LVAD)* untuk jantung buatan. *AMB* juga digunakan pada *Momentum Wheels* dan *Flywheel Energy Storage* untuk aplikasi ruang angkasa.



Gambar 1. Active Magnetic Bearing

Rotor yang menggunakan AMB dapat mengalami gangguan periodik (*periodic disturbances*) yang bisa mengganggu kinerja dari sistem rotor tersebut. Gangguan periodik ini sebagian besar disebabkan oleh ketidakseimbangan massa (*mass unbalance*) dan *Sensor Runout* (SRO)]. *Mass unbalance* disebabkan oleh cacat kesejajaran (*lack of alignment*) antara *geometric axis* dan *principal axis of inertia* yang menyebabkan gaya *synchronous unbalance* dengan kecepatan angular rotor. *Mass unbalance* ini dapat dikurangi secara signifikan pada aplikasi industri atau dengan membalans rotor. Mizuno membuat desain kontrol sistem AMB berdasarkan estimasi gangguan dengan menggunakan *unbalance compensation* untuk mengetahui kestabilan pada pusat massa yang ditekankan pada poros geometrik (*geometric centering*). Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa kestabilan pusat massa atau pusat geometri dapat tercapai dengan cara menghilangkan gangguan pada arus sinyal atau perpindahan sinyal. Hu dan Shafai melakukan pendekatan lain untuk menghilangkan gangguan periodik yaitu dengan menggunakan Kontrol Umpan Balik Adaptif (*Adaptive Feedback Control*). Kanemitsu juga menunjukkan permasalahan *compensation* dari kombinasi gangguan yang disebabkan oleh *mass unbalance* dan SRO, sedangkan Setiawan J.D menggunakan *Adaptive Sensor Runout Compensation* (ASCR) untuk mengatasi gangguan SRO.

Active Magnetic Bearing terdiri dari rotor sensor posisi atau peralatan lain untuk mendeteksi posisi rotor, *controller*, *power amplifier* dan elektro magnet untuk *melevitasi* dan menumpu rotor dengan gaya magnetic. *Differential gap sensor* mengukur lokasi dari pusat geometri relatif terhadap stator. Setelah membandingkan pengukuran posisi dengan posisi referensi, hasil error diteruskan ke *kompensator*. *Kompensator* menyediakan perintah yang diperlukan ke *power amplifier* yang mengendalikan arus pada *magnetic coil*. Sinyal diteruskan ke atas dan bawah amplifier yang dibuat berlawanan satu sama lain, dengan mempertimbangkan rotor yang *terlevitasi* secara magnetik. Rotor mempunyai dua derajat kebebasan sepanjang koordinat *x* dan *y*. jarak sepanjang koordinat diukur oleh *non-contact gap sensor*.

Teknik Kontrol

Kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan

teknologi. Kontrol otomatis telah menjadi bagian yang penting dan terpadu dari proses-proses dalam pabrik dan industri modern. Sebagai contoh, kontrol otomatis sangat diperlukan dalam operasi-operasi di industri untuk mengontrol tekanan, temperatur, kelembaban, viskositas, aliran proses produksi, pengerjaan dengan mesin perkakas, penanganan dan perakitan bagian-bagian mekanik dalam industri manufaktur.

Karena kemajuan dalam teori dan praktek, kontrol otomatis memberikan kemudahan dalam mendapatkan perfromansi dari sistem dinamik, mempertinggi kualitas dan menurunkan biaya produksi, mempertinggi laju produksi, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin dan membosankan yang harus dilakukan oleh manusia, dan sebagainya.

Fungsi transfer

Dalam teori kontrol, fungsi transfer digunakan untuk mencirikan hubungan input dan output dari komponen atau sistem yang dapat digambarkan dengan persamaan differensial linier, invarian-waktu. Fungsi transfer persamaan diferensial linier, invarian-waktu suatu sistem didefinisikan sebagai perbandingan antara transformasi Laplace keluaran (fungsi tanggapan) terhadap transformasi Laplace masukan (fungsi penentu) dengan anggapan bahwa semua syarat awal nol.

Perhatikan persamaan differensial linier, invarian-waktu sistem yang didefinisikan dengan persamaan diferensial berikut:

$$a_0 y^n + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^m + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x$$

Dengan *y* adalah keluaran dan *x* adalah masukan. Fungsi transfer sistem ini diperoleh dengan mengambil transformasi laplace kedua sisi persamaan dengan anggapan semua syarat awal nol.

Fungsi

$$\text{transfer} = G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{keluaran}]}{\mathcal{L}[\text{masukan}]_{\text{keadaan awal}=0}}$$

$$= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} s + a_n}$$

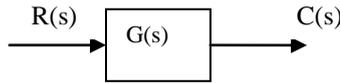
Dengan menggunakan konsep fungsi transfer dapat dinyatakan sistem dinamik dengan persamaan aljabar dalam *s*. jika pangkat tertinggi dari *s* dalam penyebut fungsi transfer sama dengan *n*, maka sistem disebut sistem *orde ke-n*.

Diagram Blok

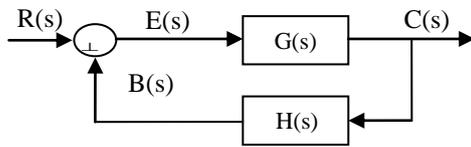
Suatu sistem kontrol dapat terdiri dari beberapa komponen. Untuk menunjukkan fungsi yang dilakukan oleh tiap komponen, dalam teknik kontrol kita menggunakan suatu diagram yang disebut

diagram blok. Diagram blok suatu sistem adalah suatu penyajian bergambar dari fungsi yang dilakukan oleh tiap komponen dan aliran sinyalnya.

Dalam suatu diagram blok, semua variabel sistem saling dihubungkan dengan menggunakan blok fungsional. Fungsi transfer dari komponen biasanya ditulis di dalam blok, yang dihubungkan dengan anak panah untuk menunjukkan arah aliran sinyal. Blok diagram suatu sistem kontrol secara eksplisit menunjukkan suatu sifat searah.



Gambar 2. Sistem loop terbuka



Gambar 3. Sistem loop tertutup

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan suatu contoh diagram blok sistem loop terbuka dan loop tertutup. Pada sistem loop tertutup, keluaran $C(s)$ diumpan-balikkan ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan masukan acuan $R(s)$. Keluaran blok, $C(s)$, diperoleh dengan mengalikan fungsi transfer $G(s)$ dengan masukan blok $E(s)$. Untuk sistem yang ditunjukkan Gambar 3, keluaran $C(s)$ dan masukan $R(s)$ dihubungkan sebagai

$$C(s) = G(s)E(s) \tag{1}$$

$$E(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)C(s) \tag{2}$$

dengan eliminasi $E(s)$ dari persamaan tersebut memberikan

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)]$$

atau

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \tag{3}$$

Fungsi transfer yang menghubungkan $C(s)$ dengan $R(s)$ disebut fungsi transfer *close-loop*. Fungsi transfer ini menghubungkan dinamika sistem loop tertutup dengan dinamika elemen umpan-maju dan elemen umpan-balik.

Ruang-keadaan (*state-space*)

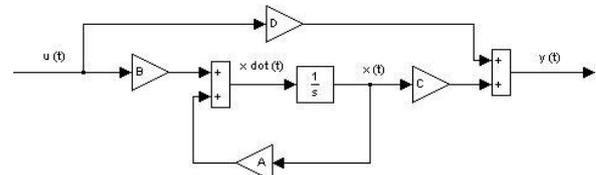
Keadaan atau *state* suatu sistem dinamik adalah sekelompok variabel terkecil (disebut variabel keadaan) sehingga pengetahuan dari variabel tersebut pada $t = t_0$, bersama masukan untuk $t \geq t_0$, secara

lengkap untuk menentukan kelakuan sistem untuk $t \geq t_0$.

Bentuk standar persamaan ruang-keadaan untuk sistem yang linier invarian-waktu adalah

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{4}$$

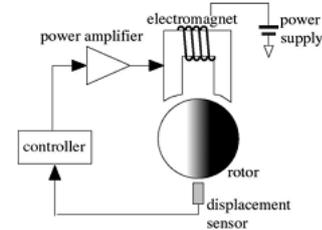
Dengan A disebut matriks keadaan, B matriks masukan, C matriks keluaran dan D adalah matriks transmisi langsung. Blok diagram yang menunjukkan persamaan ruang-keadaan tersebut ditunjukkan pada gambar 2.8. Baris pertama pada persamaan 2.25 disebut persamaan keadaan (*state equation*), sistem yang tidak berubah terhadap waktu. Baris keduanya adalah persamaan sistem keluaran untuk sistem yang sama.



Gambar 4. Diagram blok persamaan ruang keadaan

Analisa Kontrol Sistem *Active Magnetic Bearing*

Sistem Kontrol *Active Magnetic Bearing* Sistem Kontrol AMB dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 5. Sistem Kontrol *Active Magnetic Bearing*

Gaya yang terjadi pada AMB adalah

$$f = k_x x + k_i i \tag{5}$$

Berdasarkan hukum Newton, didapat :

$$f = m\ddot{x} \tag{6}$$

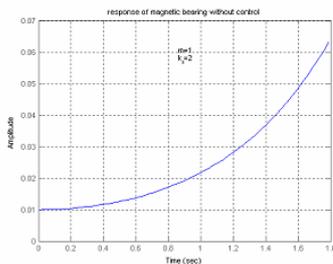
Substitusi persamaan diatas, menjadi

$$m\ddot{x} - k_x x = k_i i \tag{7}$$

Jika arus kontrol diasumsikan nol, maka persamaannya menjadi

$$m\ddot{x} - k_x x = 0 \tag{8}$$

Dari persamaan diatas, maka respon AMB terhadap rotor akan menjadi grafik eksponensial yang berakibat rotor akan jatuh atau menyentuh magnet.



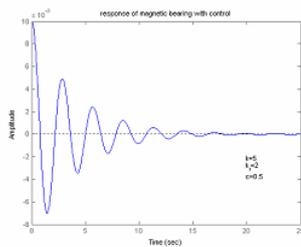
Gambar 6. Respon AMB tanpa kontrol
Jika diberikan arus kontrol (i) sebagai berikut :

$$i(x) = \frac{k + k_x}{k_i} x + \frac{c}{k_i} \dot{x} \tag{9}$$

Sehingga persamaannya menjadi :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{10}$$

Sehingga respon AMB terhadap rotor akan menjadi stabil, seperti yang terlihat pada grafik dibawah ini :

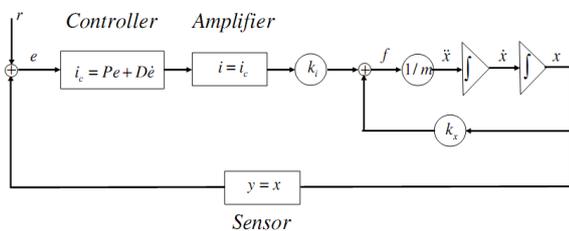


Gambar 7. Respon AMB dengan kontrol arus

Dengan menggunakan kontrol PD (Proporsional Derivatif) yaitu dengan:

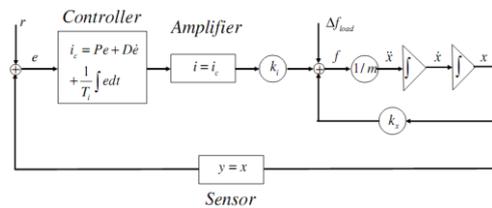
$$P = \frac{k + k_x}{k_i} \quad D = \frac{c}{k_i} \tag{11}$$

Maka Diagram Blok Active Magnetic Bearing dengan kontrol PD adalah sebagai berikut :



Gambar 8. Diagram Blok PD Kontroller

Dan apabila menggunakan kontrol PID yaitu proporsional Integral Derivatif, maka Diagram Blok Active Magnetic bearing adalah sebagai berikut :



Gambar 9. Diagram Blok PID kontroller

Penutup

Kesimpulan

Sistem Kontrol pada Active Magnetic Bearing bisa menggunakan PD kontroller maupun PID kontroller.

Daftar Pustaka

Chiba, A., Fukao, T., 2005, *Magnetic Bearing and Bearingless Drive*, Newness.

D’azzo and Constantine., Houpis Stuart, n. Sheldon, *Linear Control System Analysis and Design with Matlab*,

Habermann, H., Liard, (September 1979) G. *Practical Magnetic Bearings*, IEEE Spectrum, Vol. 16, No. 9.

Hu, J., and Tomizuka, M., 1993, *A New Plug-in Adaptive Controller for Rejection of Periodic Disturbance*, ASME Journal of Dynamics, Systems, Measurements and Controls, Vol 115, pp.543-546.

Kanemitsu, Y., Kijimoto, S., Matsuda, K., and Jin, P.T., 1999, *Identification and Control of Unbalance and Sensor Run Out on Rigid by Active Magnetic Bearing Systems*, Proceedings of The Fifth International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Santa Barbara, CA.

Matti, A. 1998, *Electromechanical Properties of Radial Active Magnetic Bearing.*, PhD. Dissertation, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Finland.

Mizuno, T., and Higuchi, T., 1990, *Design of Magnetic Bearing Controllers Based on Disturbance Estimation*. 2nd International Symposium on Magnetic Bearing, July 12-14 Tokyo Japan pg 281 – 288.

Schweitzer, G., Bleuler, H Traxler, A., 1994 *Active Magnetic Bearing, 2nd Edition*, ADF Hochschulvertag.

Setiawan J.D, 2001, *Adaptive Compensation of Sensor Run Out and Mass Unbalance in Active Magnetic Bearings*. PhD Dissertation, Michigan State University.

Shafai, B., Beale, S., Larocca, P., and Cusson, E., 1994, *Magnetic Bearing Control Systems and Adaptive Forced Balancing*, IEEE Control Systems, Vol 14, pp 4-13J.