นิพนธ์ต้นฉบับ

การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยวิธีการควบคุมแบบคลาสสิก

รณเดช จันทรมัส[1] และ สราวุฒิ สุจิตจร[2]

Abstract

Chantaramas, R. and Sujitjorn, S.

Torsional resonance suppression via the classical control method

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(6) : 895-906

This article presents torsional resonance suppression of a mechanical coupling system via the classical control approach. Three different methods are considered namely root locus method of PIDA compensator, pole placement method with two parameter configuration, and the Coefficient Diagram Method (CDM), to control the speed of rotation and suppress the torsional resonance behavior. This is to achieve satisfactory operation subject to full range of input. The simulation results indicate that the CDM method gives the most preferable performance.

Key words : torsional resonance, PIDA, two parameter compensators, CDM

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

---

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า [2]Ph.D.(Electrical Engineering), รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Corresponding e-mail: ronnadate@hotmail.com

รับต้นฉบับ 3 กุมภาพันธ์ 2547 รับลงพิมพ์ 19 เมษายน 2547

บทคัดย่อ

รณเดช จันทรมัส และ สราวุฒิ สุจิตจร
การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยวิธีการควบคุมแบบคลาสสิก
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(6) : 895-906

บทความนี้นำเสนอการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดของระบบคู่ควบเชิงกลด้วยวิธีการควบคุมแบบคลาสสิก ได้พิจารณาเปรียบเทียบแนวทางที่แตกต่างกันสำหรับแก้ปัญหา 3 วิธี ได้แก่ วิธีโลกัสของรากของตัวชดเชยพีไอดีเอ วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ และวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อควบคุมความเร็วรอบการหมุนของระบบและกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ ให้ระบบสามารถทำงานอย่างน่าพึงพอใจได้ตลอดย่านอินพุตด้วยการจำลองสถานการณ์ พบว่าตัวชดเชยที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ให้ผลดีที่สุด

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มีการใช้ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ากับกระบวนการผลิต ซึ่งมีมอเตอร์ เพลาและโหลดต่อคู่ควบกัน มักประสบกับปัญหาอันเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด (torsional resonance) ที่อาจปรากฏเป็นการเคลื่อนตัวอย่างไม่ราบเรียบ เกิดการสั่นในชิ้นส่วนทางกล ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางกล ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง รวมทั้งทำให้ระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย แนวทางการแก้ปัญหานี้ได้มีผู้เสนอหลายวิธี เช่น การใช้ตัวสังเกตตามหลักการป้อนกลับสถานะ (Fujikawa *et al.*, 1991) การเลือกอัตราการป้อนกลับสถานะที่เหมาะสม (Song *et al.*, 1993) การควบคุมความเร็วแบบอัตราขยายอันดับสองเชิงเส้นด้วยการชดเชยแรงบิดโหลดป้อนไปหน้า (Ji *et al.*, 1993) การควบคุมความเร็วที่เหมาะสมโดยการควบคุมอัตราส่วนรีโซแนนซ์อย่างช้า (slow resonance ratio control) (Hori *et al.*, 1999) ในประเทศไทย สราวุฒิ สุจิตจร และคณะ ได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหารีโซแนนซ์การบิดในระบบสองมวลด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร การแก้ไขปัญหารีโซแนนซ์การบิดดังกล่าวมีข้อจำกัดคือการใช้งานระบบจำกัดไว้ที่จุดปฏิบัติงานเพียงจุดเดียว ต่อมาได้มีการขยายย่านการทำงานของระบบให้กว้างขึ้นโดยคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (กองพัน และคณะ, 2544) การปฏิบัติแบบนี้มีความยุ่งยากซับซ้อน และสมรรถนะของระบบในสภาวะคงตัวถูกจำกัดค่อนข้างมาก

บทความนี้จึงนำเสนอแนวทางแก้ปัญหารีโซแนนซ์การบิดด้วยการคำนึงว่าระบบเป็นเชิงเส้น ดำเนินงานที่หลายๆ จุดปฏิบัติงาน การชดเชยทางพลวัตสามารถประยุกต์ทฤษฎีระบบควบคุมแบบคลาสสิก การชดเชยกระทำให้ระบบตลอดย่านอินพุตที่ระบบจะสามารถใช้งานได้จริง

แบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล

ระบบคู่ควบเชิงกล (mechanical coupled system) มีแผนภาพแสดงใน Figure 1 เมื่อเพลามีความยาวพอสมควรและเส้นผ่าศูนย์กลางสั้น ปรากฏการณ์รีโซแนนซ์

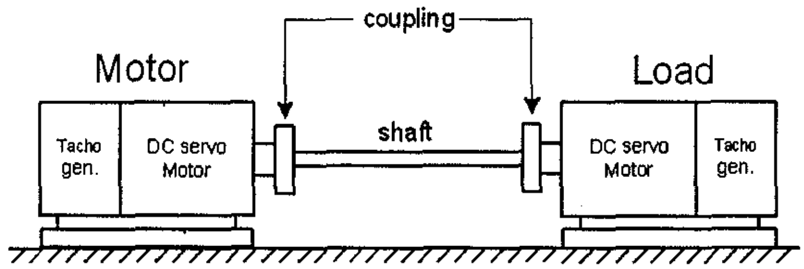

Figure 1. Diagram represents a mechanical coupling system.

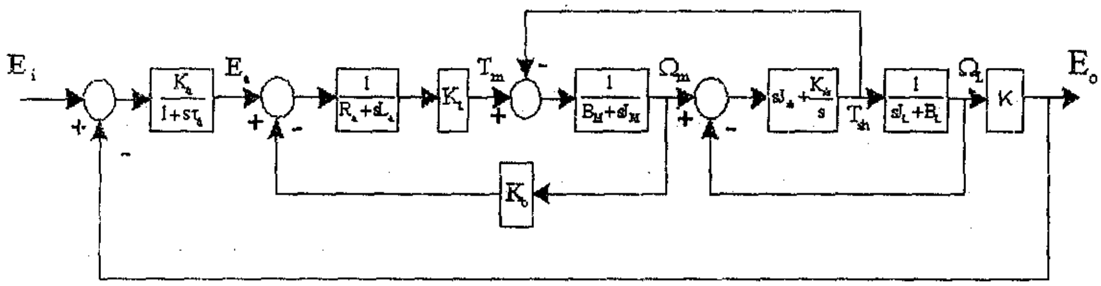

Figure 2. Block diagram of a mechanical coupling system.

การบิดจะเกิดอย่างเด่นชัดโดยเฉพาะในย่านความเร็วรอบต่ำ จะสังเกตเห็นได้ว่าการหมุนไม่ราบเรียบและเพลาแกว่ง

ระบบเชิงกลดังแสดงใน Figure 1 นี้ ได้เคยมีผู้ศึกษาและนำเสนอแบบจำลองไว้แล้ว (ชัชชัย, 2543) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพบล็อกดังแสดงใน Figure 2

จาก Figure 2 นี้ สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณอินพุต E_i ไปสัญญาณเอาต์พุต E_o ได้เป็น

$$G_p(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}=\frac{As^2+Bs+C}{Ds^5+Es^4+Fs^3+Gs^2+Hs+I} \quad (1)$$

โดยที่ E_i คือ แรงดันอินพุต
E_o คือ แรงดันเอาต์พุต
K_i คือ ค่าคงที่ของตัวขับ
τ_i คือ ค่าคงที่ทางเวลาของตัวขับ
R_a คือ ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์
L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์
K_t คือ ค่าคงที่แรงบิด
J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B_m คือ ค่าความฝืดวิสคอสของมอเตอร์
K_b คือ ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ
J_{sh} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเพลา
K_{sh} คือ ค่าความแข็งตึงของเพลา
J_L คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโหลด
B_L คือ ค่าความฝืดวิสคอสของโหลด
K คือ ค่าคงที่ของทาโคเจนเนอเรเตอร์

การหาพารามิเตอร์ในแบบจำลองของระบบ $G_p(s)$ จะอาศัยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ที่ได้จากการทดสอบสภาวะชั่วครู่ด้วยสัญญาณขั้นบันได (step transient test) ข้อมูลที่ได้นำมาผ่านกระบวนการระบุเอกลักษณ์ (system identification) ซึ่งใช้แบบจำลองมีโครงสร้างเป็น ARMAX (Auto Regressive Moving Average with External input) (Ljung, 1987; Ljung, 1995)

แบบจำลอง ARMAX สามารถอธิบายได้ด้วยสมการความแตกต่างเชิงเส้น (linear difference equation) คือ

$$\begin{aligned} &y(t)+a_1y(t-1)+\ldots+a_{n_a}y(t-n_a) \\ &=b_1u(t-1)+\ldots+b_{n_b}u(t-n_b)+e(t)+c_1e(t-1)+\ldots \\ &\quad+c_{n_c}e(t-n_c) \end{aligned} \quad (2)$$

ถ้าให้

$$A(q)=1+a_1q^{-1}+\ldots+a_{n_a}q^{-n_a} \quad (3)$$

$$B(q)=b_1q^{-1}+\ldots+b_{n_b}q^{-n_b} \quad (4)$$

$$C(q)=1+c_1q^{-1}+\ldots+b_{n_c}q^{-n_c} \quad (5)$$

โดยที่ q และ q^{-1} คือ ตัวดำเนินการเลื่อนไปหน้าและย้อนหลังตามลำดับ

จากสมการที่ (2) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$y(t) = A^{-1}(q)[B(q)u(t) + C(q)e(t)] \quad (6)$$

โดยที่ $y(t)$ คือ สัญญาณเอาต์พุต
$u(t)$ คือ สัญญาณอินพุต
$e(t)$ คือ สัญญาณรบกวน

จากสมการที่ (6) สามารถเขียนโครงสร้างของแบบจำลอง ARMAX ดังแสดงใน Figure 3

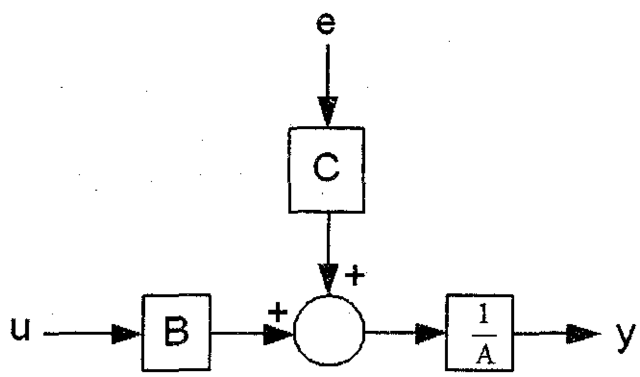

Figure 3. The ARMAX model structure.

1. ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาแบบจำลอง

การทดสอบระบบคู่ควบเชิงกล มีขั้นตอนดังนี้

1) ป้อนแรงดันอินพุตเท่ากับ 2.7 โวลต์เข้าสู่ระบบ

2) จับสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตและจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ (แรงดันเอาต์พุต 1 โวลต์ มีความหมายเป็นความเร็วรอบ 143 rpm)

3) ดำเนินการซ้ำตามข้อ 2 โดยปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตเป็น 2.9, 3.1, 3.3, ..., 8.0 โวลต์ ตามลำดับ

เมื่อได้ข้อมูลอินพุต-เอาต์พุตครบถ้วนแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการดำเนินการหาแบบจำลองโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ให้แบบจำลองมีโครงสร้างแบบ ARMAX

2. แบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล

การหาแบบจำลองของระบบที่ย่านการทำงาน 2.7-8.0 โวลต์อินพุต ได้แบบจำลองระบบจำนวน 6 ชุด แสดงด้วย G1, G2, ..., G6 ใน Table 1 และผลตอบสนองของ

Table 1. 5^{th} order model of each region.

model	output region (volt)	transfer function
G_1	2.7-3.3	$\dfrac{3.78\times10^6s^2+5.53\times10^8s+9.08\times10^{10}}{s^5+339s^4+2.41\times10^5s^3+3.73\times10^7s^2+1.39\times10^{10}s+5.61\times10^{10}}$
G_2	3.3-4.2	$\dfrac{9.76\times10^5s^2+3.1\times10^8s+1.04\times10^{11}}{s^5+73.11s^4+2.35\times10^5s^3+9.78\times10^6s^2+1.34\times10^{10}s+5.52\times10^{10}}$
G_3	4.2-5.1	$\dfrac{7.44\times10^5s^2+2.82\times10^9s+3.77\times10^{11}}{s^5+32.12s^4+4.67\times10^5s^3+7.52\times10^6s^2+4.29\times10^{10}s+1.61\times10^{11}}$
G_4	5.1-6.1	$\dfrac{8.33\times10^5s^2+1.15\times10^9s+1.29\times10^{11}}{s^5+147.6s^4+2.35\times10^5s^3+1.8\times10^7s^2+1.33\times10^{10}s+4.71\times10^{10}}$
G_5	6.1-7.4	$\dfrac{9.99\times10^6s^2+7.89\times10^9s+6.0\times10^{11}}{s^5+103.3s^4+5.8\times10^5s^3+1.54\times10^8s^2+6.15\times10^{10}s+2\times10^{11}}$
G_6	7.4-8.0	$\dfrac{1.96\times10^6s^2+9.98\times10^9s+7.93\times10^{11}}{s^5+61.66s^4+7.14\times10^5s^3+2.32\times10^7s^2+7.63\times10^{10}s+2.49\times10^{11}}$

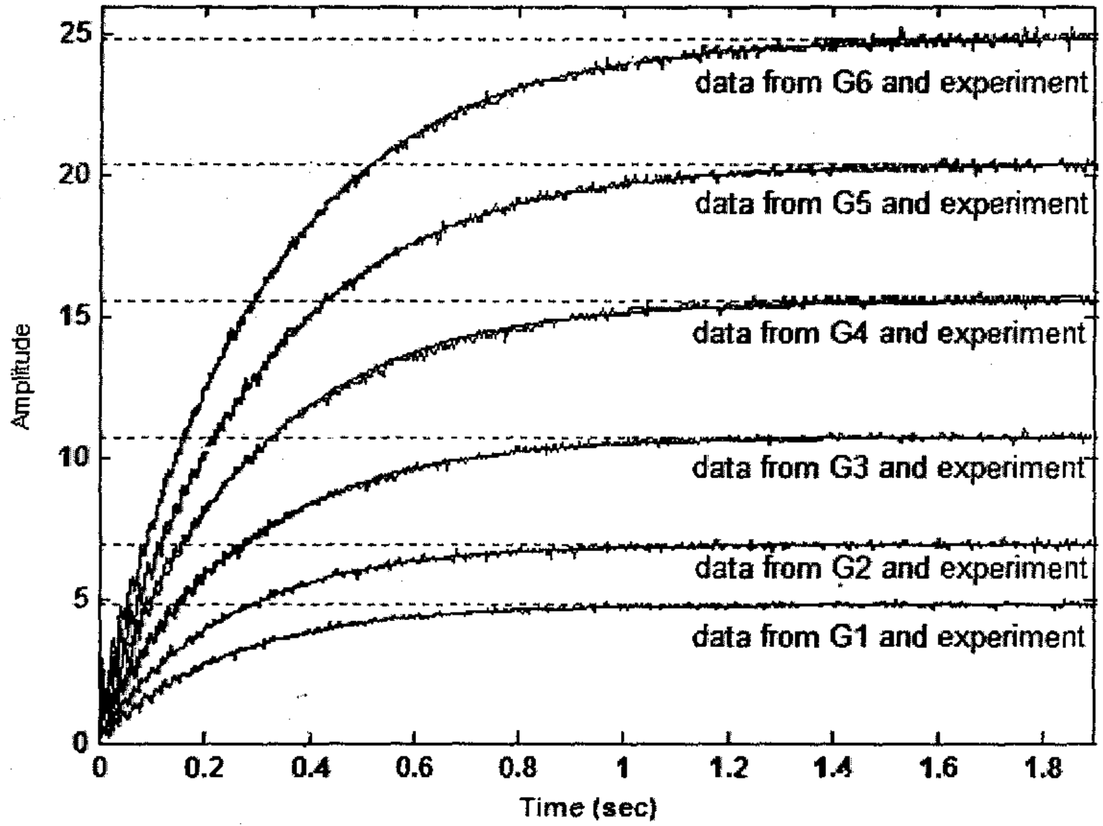

Figure 4. Results of step-transient tests(models plotted against experiments).

ระบบที่ได้จากการทดสอบเทียบกับผลจากแบบจำลอง ดังแสดงใน Figure 4

จากทั้งหกแบบจำลองสามารถหาแบบจำลองเฉลี่ยได้เป็น

$$G(s) = \frac{3.05\times10^{6}s^{2}+3.79\times10^{9}s+3.49\times10^{11}}{s^{5}+281.1s^{4}+4.12\times10^{5}s^{3}+4.17\times10^{7}s^{2}+3.69\times10^{10}s+1.28\times10^{11}}$$

$$= \frac{N(s)}{D(s)} \tag{7}$$

ในบทความนี้ จะใช้แบบจำลองเฉลี่ยเป็นแบบจำลองแทนระบบคู่ควบเชิงกลตลอดย่านการทำงาน

แบบจำลองเฉลี่ยเมื่อนำไปใช้ที่อินพุตย่านอื่นๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเอาต์พุตที่สภาวะคงตัวเกิดขึ้น อัตราขยาย K ดังแสดงใน Figure 5 จะช่วยแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวที่กล่าวถึงนี้ได้ ซึ่ง

$$K = \frac{\text{ขนาดของอินพุต}}{\text{ขนาดของเอาต์พุตที่วัดได้}}$$

ในการออกแบบตัวชดเชยระบบ จะเลือกค่า K ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ เนื่องจากที่จุดปฏิบัติงานนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตน้อยที่สุด

แนวทางดำเนินงานออกแบบ

ในบทความนี้ จะทำการออกแบบตัวชดเชยระบบ 3 วิธี ได้แก่

1. วิธีโลกัสของรากของตัวชดเชย PIDA (proportional-integral-derivative-acceleration) เนื่องจากตัวชดเชย PID ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเพราะสามารถสร้างได้ง่ายสำหรับระบบอันดับสอง แต่เมื่ออันดับสูงขึ้นการควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีการ

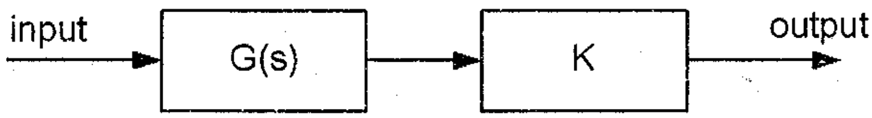

Figure 5. Diagram describes the open loop system.

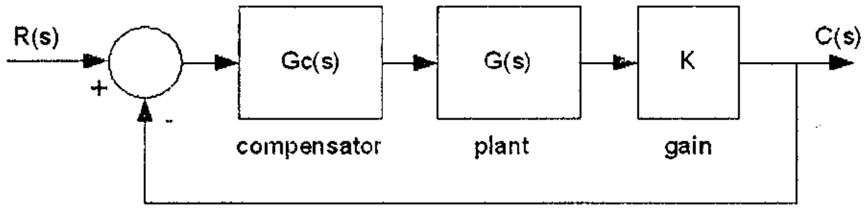

Figure 6. System structure using a PIDA compensator.

ใช้ตัวชดเชย PIDA สำหรับระบบที่มีอันดับสูงๆ ที่มีคุณสมบัติให้ผลตอบสนองชั่วครู่และสภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพ (วิทยา และคณะ, 2541; Jung and Dorf, 1996)

2. วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ วิธีนี้จะกำหนดโพลของระบบให้มีผลตอบสนองตามต้องการ โดยใช้ตัวชดเชยสองชุดคือตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับซึ่งกำหนดตำแหน่งโพลและรักษาเสถียรภาพของระบบ และตัวชดเชยอินพุตซึ่งเป็นตัวปรับปรุงสมรรถนะของระบบ (ชัชชัย, 2543)

3. วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ เป็นการออกแบบโดยพิจารณาความมีเสถียรภาพ ผลตอบสนองและความคงทน (robust) ของระบบพร้อมๆ กันอย่างมีประสิทธิภาพ (นันทวัฒน์ และอานุภาพ, 2542)

1. แนวทางดำเนินงานออกแบบโดยใช้วิธีโลกัสของรากของตัวชดเชย PIDA (วิทยา และคณะ, 2541; Jung and Dorf, 1996)

ระบบที่ใช้ตัวชดเชย PIDA จะมีโครงสร้างเป็นดังแสดงใน Figure 6 ซึ่งตัวชดเชย PIDA ในเชิงทฤษฎีจะมีรูปแบบดังนี้

$$G_c(s) = \frac{K_A s^3 + K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \tag{9}$$

การออกแบบวิธีโลกัสของรากของตัวชดเชย PIDA สามารถดำเนินงาน 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเวลาเข้าที่ (settling time: Ts) และการพุ่งเกินสูงสุด (percent overshoot: P.O.)

ขั้นตอนที่ 2 หาค่า ς และ ω_n จากสมการ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$\varsigma = \sqrt{\frac{(\ln\frac{P.O.}{100})^2}{\pi^2 + (\ln\frac{P.O.}{100})^2}} \tag{10}$$

$$T_s = \frac{4}{\varsigma\omega_n} \tag{11}$$

จะได้ โพลเด่น (dominant pole:sd) โดยที่

$$s_d = -\varsigma\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\varsigma^2} \tag{12}$$

ขั้นตอนที่ 3 เลือกค่ารากจำนวนจริงให้เท่ากับส่วนจริงของคู่โพลเชิงซ้อนที่สำคัญคือ

$$R = \mathrm{Re}\{\mathrm{dominant\ roots}\} \le -\varsigma\omega_n$$

ขั้นตอนที่ 4 เลือกค่ารากของจำนวนจริง r_1, r_2, r_3 โดยกำหนดให้ $r_i << -\varsigma\omega_n$; $i = 1, 2$ และ 3

ขั้นตอนที่ 5 เขียนสมการลักษณะเฉพาะ (characteristic equation) $1+G_cG(s) = 0$ และ

$$(s-s_d)(s-R)(s-r_1)(s-r_2)(s-r_3) = 0$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาสมการลักษณะเฉพาะ

ขั้นตอนที่ 7 แก้สมการจากขั้นตอนที่ 6 เพื่อหาค่า KA, KD, KP และ KI ของตัวชดเชยแบบ PIDA

2. แนวทางดำเนินงานออกแบบโดยใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์

(ชัชชัย, 2543; Chen, 1992; 1993)

การออกแบบโดยวิธีนี้จะทำการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทั้งหมดโดยใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งโพล หลังจากนั้นจะทำการหาตัวชดเชยที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์โดยใช้วิธีพีชคณิตเชิงเส้น

โครงสร้างของระบบที่ใช้ตัวชดเชยที่มีโครงสร้างแบบ 2 พารามิเตอร์ ดังแสดงใน Figure 7

จาก Figure 7 จะได้แบบจำลองของระบบที่ใช้หาตัวชดเชยเป็น

$$G_1(s) = KG(s) = \frac{N_1(s)}{D_1(s)} \qquad (13)$$

โดยที่อันดับของ $D_1(s) = n$

การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลมี 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทั้งหมด ($G_0(s)$) โดยใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลจะได้

$$G_0(s) = \frac{N_0(s)}{D_0(s)} \qquad (14)$$

จาก Figure 7 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G_0(s) = \frac{L(s)N_1(s)}{A(s)D_1(s) + M(s)N_1(s)} \qquad (15)$$

ดังนั้น

$$G_0(s) = \frac{N_0(s)}{D_0(s)} = \frac{L(s)N_1(s)}{A(s)D_1(s) + M(s)N_1(s)} \qquad (16)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณ

$$\frac{G_0(s)}{N_1(s)} = \frac{N_0(s)}{D_0(s)N_1(s)} = \frac{N_p(s)}{D_p(s)} \qquad (17)$$

โดยที่ $N_p(s)$, $D_p(s)$ เป็น coprime และอันดับของ $D_p(s)$ ให้เท่ากับ p

จากสมการ (17) ทำการจัดรูปใหม่เป็น

$$G_0(s) = \frac{N_1(s)N_p(s)}{D_p(s)} \qquad (18)$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเลือกพหุนามเฮอร์วิทซ์ $\overline{D}_p(s)$ โดยที่อันดับของ $\overline{D}_p(s) = 2n-1-p$

ขั้นตอนที่ 4 จากสมการที่ (18) เขียนใหม่ได้เป็น

$$G_0(s) = \frac{N_1(s)N_p(s)}{D_p(s)} = \frac{N_1(s)[N_p(s)\overline{D}_p(s)]}{D_p(s)\overline{D}_p(s)}$$

$$= \frac{N_1(s)L(s)}{A(s)D_1(s) + M(s)N_1(s)} \qquad (19)$$

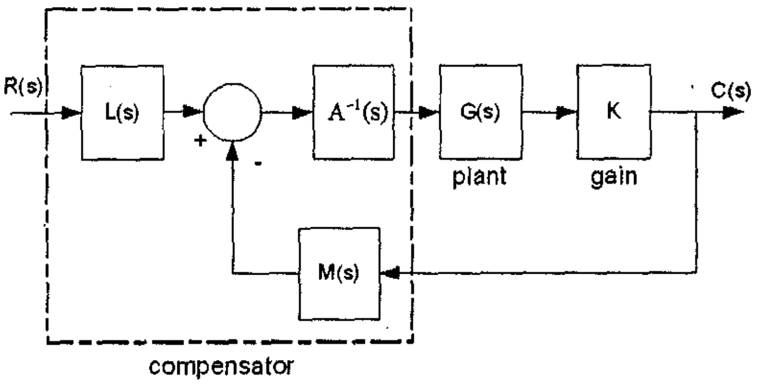

Figure 7. System structure of two-parameter configuration.

จาก (19) จะได้

$$L(s) = N_p(s)\overline{D}_p(s) \qquad (20)$$

$$D_p(s)\overline{D}_p(s) = A(s)D_1(s) + M(s)N_1(s) \qquad (21)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการแก้สมการที่ (21) ก็จะได้ตัวชดเชย A(s) และ M(s)

จาก Figure 7 สามารถจัดรูปแบบตัวชดเชยใหม่เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จริง ได้ดังแสดงใน Figure 8

3. แนวทางดำเนินงานออกแบบโดยใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) (นันทวัฒน์ และอานุภาพ, 2542; Manabe, 1998)

การออกแบบตัวชดเชยด้วย CDM เป็นการออกแบบตัวชดเชยจากสมการคุณลักษณะ โดยพิจารณาเวลาเข้าที่ (T_s) ในการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธี CDM จะมีโครงสร้างเป็นดังแสดงใน Figure 9

กำหนดให้

$$G_p(s) = KG(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} \qquad (22)$$

พิจารณาฟังก์ชันของบล็อกดังแสดงใน Figure 9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปพหุนามได้ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1}s^{k-1} + \dots + p_0 \qquad (23)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1}s^{m-1} + \dots + q_0 \qquad (24)$$

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1}s^{\lambda-1} + \dots + l_0 \qquad (25)$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1}s^{\lambda-1} + \dots + k_0 \qquad (26)$$

$$B_a(s) = k_0 \qquad (27)$$

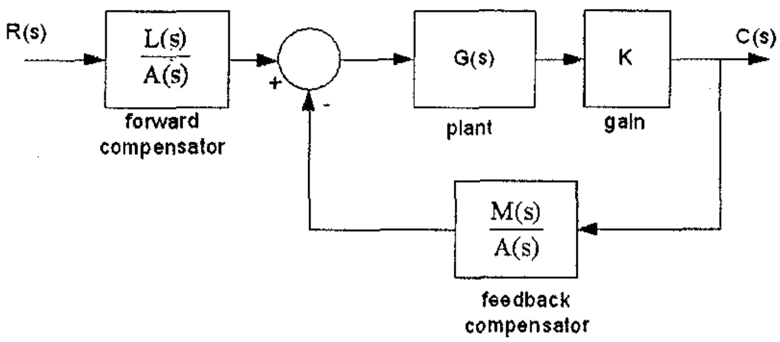

Figure 8. System structure of two-parameter configuration showing forward and feedback compensators explicitly.

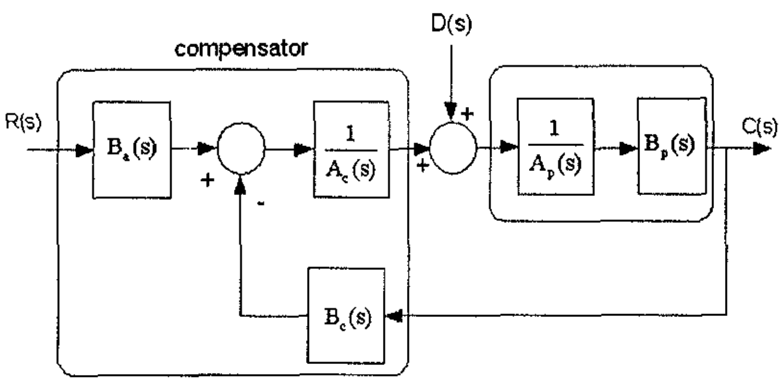

Figure 9. System structure of CDM method.

โดยที่ $\lambda < m$ ส่วนเทอม $B_a(s)$ เรียกว่าพรีฟิลเตอร์ (pre-filter) ถูกปรับให้เท่ากับ k_0 เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบที่มีตัวชดเชยไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว

การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธี CDM มี 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเวลาเข้าที่ (T_s) แล้วคำนวณค่าคงที่ทางเวลา (τ) จากสมการ (28)

$$\tau = \frac{T_s}{(2.5 : 3)} \tag{28}$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ (γ_i) โดยที่

$$\gamma_i = [2.5, 2, 2, ..., 2];\ i = 1, ..., n\text{-}1 \tag{29}$$

ค่า γ_i สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้ เงื่อนไขในสมการที่ (30) ต้องเป็นจริง ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริง ให้ปรับค่า $\gamma_{n-1}, \gamma_{n-2}$ และค่าอื่นๆ จนกระทั่งสมการที่ (30) เป็นจริง

$$\frac{p_k}{p_{k-1}} > \frac{\tau}{(\gamma_{n-1})(\gamma_{n-2})\cdots(\gamma_1)} \tag{30}$$

โดยที่ p_k และ p_{k-1} คือ สัมประสิทธิ์ของพลานต์ ที่อันดับที่ k และ k-1 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 3 ทำการหาสมการคุณลักษณะของระบบที่มีตัวชดเชย ดังแสดงใน Figure 9 ได้เป็น

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \tag{31}$$

และถ้าจัด P(s) ให้อยู่ในรูปของพหุนาม จะได้

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + ... + a_0 \tag{32}$$

โดยที่ $a_n, a_1, ..., a_0$ เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบ และ n คืออันดับของสมการคุณลักษณะ

ตามวิธีของ CDM มีสูตรการหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_i ($i = 1, 2, ..., n$) ได้จากสมการที่ (33)

$$a_i = a_0\tau^i \frac{1}{(\gamma_{i-1})\cdots(\gamma_2)^{i-2}(\gamma_1)^{i-1}}$$

$$= a_0\tau^i \prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \tag{33}$$

และสามารถหาค่าสมการคุณลักษณะ P(s) ได้ดังสมการที่ (34)

$$P(s) = a_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{n}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{\left(\gamma_{i-j}\right)^j}\right)(\tau s)^i\right\} + \tau s + 1\right] \tag{34}$$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับค่า

ผลและอภิปราย

ผลออกแบบตัวชดเชยทั้ง 3 วิธีได้ผลดังต่อไปนี้

1. วิธีโลกัสของรากของตัวชดเชย PIDA

การออกแบบ จะกำหนดค่า $T_s = 0.04$ sec และ P.O. = 4% จะได้โพลเด่น $s_d = -100 \pm j100$ และเลือก $R = -100$, $r_1 = 800$, $r_2 = 1600$ และ $r_3 = 2400$ จะได้ตัวชดเชยดังสมการที่ (35)

$$G_c(s) = \frac{1.087s^3 + 923.6s^2 + 1.64\times10^5 s + 1.43\times10^7}{s} \tag{35}$$

2. วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์

การออกแบบ จะกำหนดโพลเด่น ให้อยู่ที่เดียวกับวิธีการออกแบบวิธีที่ 1 และเลือกโพลด้อย (non-dominant pole) อยู่ที่ -1000, -2000 และ -3000

จากการออกแบบ จะได้ตัวชดเชยดังสมการ (36)-(38)

$$L(s) = 1.2\times10^{14}(s+2000)^2 \tag{36}$$

$$M(s) = 6.724\times10^{10}s^4 + 6.754\times10^{13}s^3 + 3.714\times10^{16}s^2 + 4.764\times10^{18}s + 4.752\times10^{20} \tag{37}$$

$$A(s) = 1.119\times10^6 s^4 + 1.248\times10^{10}s^3 + 5.62\times10^{13}s^2 + 5.378\times10^{16}s + 4.843\times10^{18} \tag{38}$$

3. วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

การออกแบบจะกำหนดค่า $T_s = 0.065$ sec เมื่อทำการออกแบบจะได้ตัวชดเชยดังสมการ (39)-(41)

$$B_c = 1.216\times10^5s^4 + 1.19\times10^8s^3 + 5.376\times10^{10}s^2 + 7.167\times10^{12}s + 5.83\times10^{14} \quad (39)$$

$$A_c = s^4 + 1.203\times10^4s^3 + 7.2\times10^7s^2 + 7.18\times10^{10}s + 6.1\times10^{12} \quad (40)$$

$$B_a = 5.894\times10^{14} \quad (41)$$

ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวชดเชยทั้งสามวิธีแสดงดังแสดงใน Figure 10

นำตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบทั้งสามวิธีไปใช้กับอินพุตระดับต่างๆ กัน ได้ผลดังที่รวบรวมนำเสนอไว้ใน Table 2

โดยที่ T_r = เวลาในการไต่ระดับ (rise time)

E_{ss} = เปอร์เซนต์ค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (percent of steady state error)

จากการออกแบบตัวชดเชย และทำการจำลองสถานการณ์ของระบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบเมื่อดูผลตอบสนองที่สภาวะชั่วครู่ เปรียบเทียบกันระหว่างตัวชดเชยทั้ง

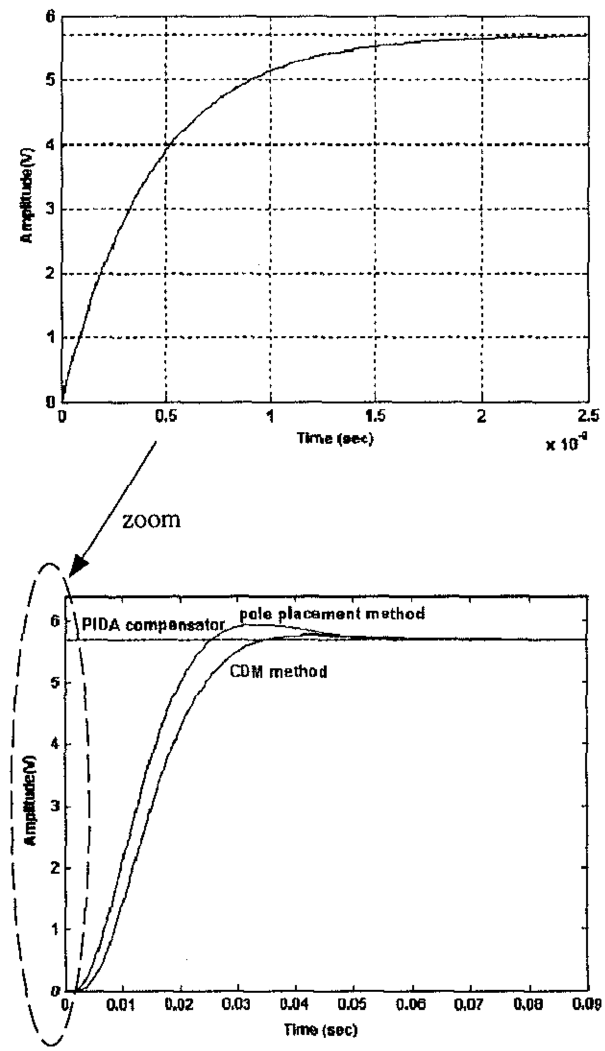

Figure 10. Step response of compensated system (5.7 volt input corresponding to 815 rpm).

สามแบบดังแสดงใน Table 1, 2 และ 3 พบว่าวิธีโลกัสของรากของตัวชดเชย PIDA ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด แต่ระบบที่มีตัวชดเชยนี้จะมีการตัดทอนโพลด้วยซีโร่ ซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ (สราวุฒิ, 2541; Lumkes, 2002) ยกเว้นแต่ว่ามีการใช้กลไกการปรับตัวเองแบบออนไลน์ (on-line adaptation)

2. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวชดเชยที่ได้จากวิธีที่ 2 และ 3 ดังแสดงใน Table 2 พบว่า วิธี CDM จะให้ค่า P.O. ที่ต่ำกว่ามาก ส่วนค่า Tr, Ts และ E_{ss} มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงสรุปว่า ตัวชดเชยที่ได้จากวิธี CDM จะมีความเหมาะสมกับการแก้ปัญหารีโซแนนซ์การบิดในระบบคู่ควบเชิงกล

สรุป

การหาแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกลให้ใช้งานที่ย่านการทำงาน 2.7-8.0 โวลต์ พบว่าแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองเฉลี่ยยังคงมีความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว ในการออกแบบตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิด จะเลือกอินพุตที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเอาต์พุตที่สภาวะคงตัวที่น้อยที่สุด (อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์) มาใช้เป็นปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาการออกแบบ การกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวของระบบกระทำได้ด้วยอัตราขยายป้อนกลับแบบธรรมดา ต่อมาได้ดำเนินการออกแบบตัวชดเชยสามวิธี แล้วนำระบบที่มีตัวชดเชยมาทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบผล จะพบว่าการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบคู่ควบเชิงกลที่สนใจ

เอกสารอ้างอิง

กองพัน อารีรักษ์, สราวุฒิ สุจิตจร, อาทิตย์ ศรีแก้ว, และ โยธิน เปรมปราณีรัชต์. 2544. การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูสำหรับระบบสองมวลความเฉื่อย. ว.เนคเทค 2(9): 88-99.

ชัชชัย อุทัยวศิน. 2543. การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวล โดยใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

Table 2. Summary of performance (compensated).

	PIDA compensator				Pole placement method with two parameter configuration				CDM method			
input (volt)	Tr (sec)	Ts (sec)	P.O.	Ess (%)	Tr (sec)	Ts (sec)	P.O.	Ess (%)	Tr (sec)	Ts (sec)	P.O.	Ess (%)
2.7	9.46×10^{-7}	1.67×10^{-6}	0	0	0.014	0.0457	8.85	-0.481	0.0166	0.0485	4.23	-0.556
3.1	1.11×10^{-6}	1.97×10^{-6}	0	0	0.0143	0.0456	7.86	-0.387	0.017	0.0476	3.5	-0.439
3.5	1.19×10^{-6}	2.1×10^{-6}	0	0	0.0144	0.0456	7.42	-0.343	0.0171	0.0471	3.19	-0.394
3.9	1.29×10^{-6}	2.28×10^{-6}	0	0	0.0145	0.0455	6.84	-0.282	0.0174	0.0461	2.77	-0.333
4.3	1.44×10^{-6}	2.54×10^{-6}	0	0	0.0148	0.0452	6.04	-0.209	0.0177	0.0437	2.22	-0.247
4.7	1.57×10^{-6}	2.76×10^{-6}	0	0	0.015	0.0449	5.38	-0.128	0.0181	0.0302	1.8	-0.174
5.1	1.67×10^{-6}	2.94×10^{-6}	0	0	0.0152	0.0446	4.87	-0.078	0.0183	0.0308	1.48	-0.116
5.5	1.75×10^{-6}	3.08×10^{-6}	0	0	0.0154	0.0422	4.48	-0.036	0.0185	0.0314	1.26	-0.069
5.7	1.81×10^{-6}	3.18×10^{-6}	0	0	0.0155	0.044	4.21	0.000	0.0187	0.0318	1.11	-0.035
5.9	1.82×10^{-6}	3.32×10^{-6}	0	0	0.0155	0.0439	4.16	0.000	0.0187	0.0318	1.08	-0.031
6.3	1.91×10^{-6}	3.36×10^{-6}	0	0	0.0157	0.0434	3.74	0.063	0.019	0.0325	0.865	0.025
6.7	1.97×10^{-6}	3.46×10^{-6}	0	0	0.158	0.043	3.48	0.090	0.0191	0.033	0.745	0.058
6.9	1.99×10^{-6}	3.5×10^{-6}	0.01	0	0.0158	0.0429	3.38	0.116	0.0192	0.0331	0.722	0.065
7.1	2.02×10^{-6}	3.55×10^{-6}	0	0	0.0159	0.0426	3.24	0.127	0.0192	0.0332	0.698	0.071
7.5	2.05×10^{-6}	3.61×10^{-6}	0	0	0.016	0.0424	3.11	0.147	0.0193	0.0334	0.641	0.089
8	2.1×10^{-7}	3.69×10^{-6}	0	0	0.0161	0.0419	2.92	0.175	0.0194	0.0337	0.585	0.107

นันทวัฒน์ วีรัชพิสิฐ และ อานุภาพ พงษานุสรณ์. 2542. การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, สุพรรณ กุลพาณิชย์ และ เกียรติ์อนันต์ สุขชู. 2541. การสร้างตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกกระตุ้น. วิศวสาร ลาดกระบัง, 14(2): 49-56.

สราวุฒิ สุจิตจร. 2541. การออกแบบและอนุวัตระบบควบคุมด้วยการจัดวางตำแหน่งซีโร่. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ.

Chen, C.T. 1993. Analog & digital control system design transfer function, state space & algebraic methods. Forth Worth: Saunders College.

Chen, C.T. and Seo; B. 1990. Application of the linear algebraic method for control system design. IEEE Contr. Syst. Mag. Jan.: 43-47.

Fujikawa, K., Yang, Z.Q., Kobayashi H., and Koga, T. 1991. Robust and fast speed control for torsional system based on state-space method. Proc. IEEE EECON' 91: 687-692.

Hori, Y., Sawada, H., and Chun, Y. 1999. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system. IEEE Trans. Industrial Electronics, 46(1): 162-168.

Ji, J.K., Lee, D.C., and Sul, S.K. 1993. LQG based speed controller for torsional vibration suppression in 2-Mass system. Proc. IEEE IECON' 93: 1157-1162.

Jung, S., and Dorf, R.C. 1996. Analytic controller design technique for a third order system. Proc. of the 35th Conference on Decision and Control Kobe, Japan.: 2513-2517.

Ljung, L. 1995. System identification toolbox for use with MATLAB. The Math Works, Inc.

Ljung, L. 1987. System identification theory for the user. Prentice Hall Inc.

Lumkes, J.H., 2002. Control strategies for dynamic systems: design and implementation, Marcel Dekker, Newyork.

Manabe, S. 1998. Coefficient Diagram Method. The 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. August: 24-28.

Song, S.H., Ji, J.K., Sul S.K., and Park, M.H. 1993. Torsional vibration suppression control in 2-mass system by state feedback speed controller. Proc. IEEE CCA' 93: 129-134.

Sujitjorn, S., U-Thaiwasin, C., Prempraneerat, Y. 2000. Torsional resonance suppression via pole-zero assignment. Proc. of the IASTED Int. Con. On Modeling Control Identification and Control, Innsbruck, Austria, Feb.: 288-292.