

บทที่ 4

การกำหนดผลตอบสนองทางพลวัตของตัวสังเกต

4.1 ผลกระทบจากการใช้ตัวสังเกตที่มีสัมประสิทธิ์การหน่วงต่ำต่อระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโร้เซนเซอร์

ผลการจำลองที่จะแสดงในลำดับต่อไปนี้จะชี้ให้เห็นว่าถึงแม้จะออกแบบให้ตัวสังเกตมีเสถียรภาพแล้ว แต่ถ้าการออกแบบระบบประมาณแล้วมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ไม่ดี อาทิเช่น มีสัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping coefficient) ที่ต่ำซึ่งมักจะพบได้โดยเฉพาะในย่านความเร็วสูง จะส่งผลให้ค่าประมาณที่ได้ไม่ว่าจะ เป็น ตำแหน่ง ความเร็ว ฟลักซ์แม่เหล็ก หรือกระแส เกิดการแกว่งขึ้น ซึ่งเมื่อนำค่าประมาณเหล่านั้นมาใช้ในระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโร้เซนเซอร์แล้ว ระบบโดยรวมอาจขาดเสถียรภาพได้ โดยอันดับแรกจะจำลองการทำงานระบบควบคุมแบบเวกเตอร์แบบมีเซนเซอร์ก่อน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพที่อาจเกิดขึ้นได้จากการเชื่อมร่วมระหว่างระบบควบคุมแบบเวกเตอร์กับตัวสังเกต ดังนั้นในกรณีนี้ตัวสังเกตยังคงทำหน้าที่ประมาณค่าตำแหน่ง ความเร็ว ฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสเช่นเดิม เพียงแต่ค่าประมาณเหล่านี้จะไม่ถูกนำไปใช้ในการควบคุม

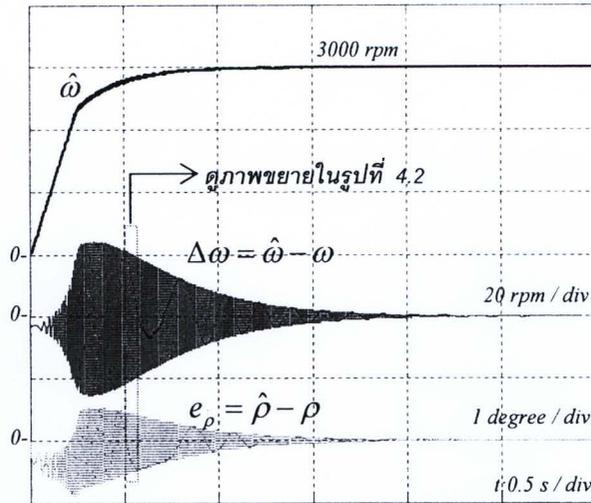
ผลการจำลองการทำงานขณะเริ่มเดินเครื่องที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm แสดงในรูปที่ 4.1 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของอัตราขยายป้อนกลับตามสมการที่ (4.1) ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการมีเสถียรภาพในสมการที่ (3.11) - (3.12)

$$x = \frac{R}{L}, y = -\hat{\omega}, k_2 = 0.0001 \quad (4.1)$$

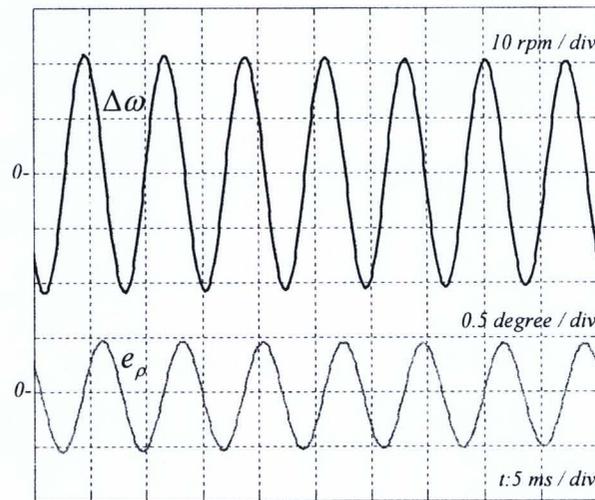
จากการเลือกค่าพารามิเตอร์นี้ ตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิดของฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ คำนวณได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= -118, & z_{2,3} &= -0.27 \pm j945 \\ p_{1,2} &= -0.54 \pm j947, & p_{3,4} &= -118 \pm j4.3 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

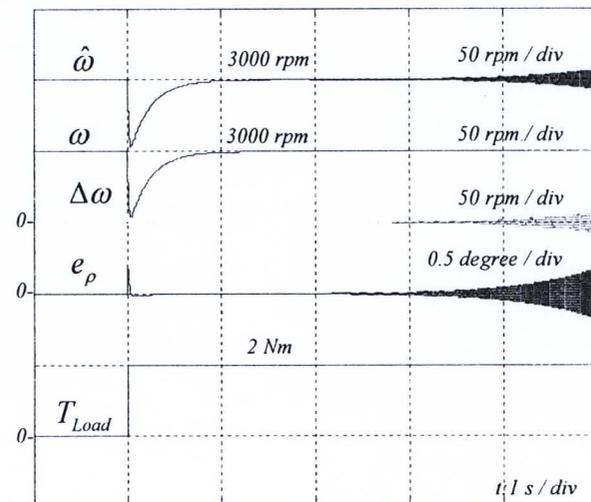
จากสมการที่ (4.2) จะเห็นว่าศูนย์เด่น (Dominant zeros) $z_{2,3}$ และขั้วเด่น (Dominant poles) $p_{1,2}$ จะมีสัมประสิทธิ์การหน่วง (ξ) ที่ต่ำมาก ประมาณ 2.88×10^{-4} และ 5.7×10^{-4} ตามลำดับ ดังนั้นถึงแม้ว่าตัวสังเกตจะมีเสถียรภาพแต่ค่าที่ประมาณได้ก็จะเกิดการแกว่งขึ้น ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ในรูปที่ 4.1 โดยความถี่ในการแกว่งก็สอดคล้องกันกับความถี่ของศูนย์และขั้วดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการทำงานในขณะเริ่มหมุนของตัวส่งเกิดโดยใช้ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์



รูปที่ 4.2 การแกว่งของค่าความผิดพลาดของความเร็วและตำแหน่ง (ภาพขยายในรูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองการทำงานขณะเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่มีการใช้ตัวส่งที่มีสัมประสิทธิ์การหน่วงต่ำ

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการขาดเสถียรภาพของระบบโดยรวมเมื่อนำค่าที่ประมาณได้จากตัวสังเกตมาใช้ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์ จากรูปจะเห็นว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อถูกกระตุ้นด้วยโพลแบบขั้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำตัวสังเกตมาใช้ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ สัมประสิทธิ์การหน่วงของตัวสังเกตมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวมมาก ปัญหาความไม่เสถียรในลักษณะนี้จึงมีความสำคัญมาก รองจากปัญหาความไม่เสถียรที่ได้แก้ไขไปแล้วในบทที่ 3 ดังนั้นงานหลักอีกประเด็นหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ก็คือการออกแบบให้ตัวสังเกตมีสัมประสิทธิ์การหน่วงที่เพียงพอและเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้ระบบโดยรวมมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน เนื่องจากข้อจำกัดที่กำหนดโดยตำแหน่งของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดจึงจำเป็นต้องหาตำแหน่งของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดก่อนเป็นอันดับแรก

4.2 ตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิด

งานวิจัยในอดีตยังไม่มี การนำเสนอตำแหน่งของศูนย์และขั้วที่แสดงในเชิงสมการอย่างชัดเจนจึงไม่อาจทราบได้ว่าระบบที่ออกแบบให้มีเสถียรภาพแล้วจะมีพฤติกรรมเชิงพลวัตอย่างไร ซึ่งถ้าหากสามารถที่จะหาสมการตำแหน่งของศูนย์และขั้วที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ x, y, k_2 ของอัตราขยายป้อนกลับได้อย่างชัดเจนแล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะวางตำแหน่งของศูนย์และขั้วเพื่อให้ได้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ต้องการได้ ดังนั้นในที่นี้จะวิเคราะห์หาตำแหน่งของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดโดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.2.1 ตำแหน่งของศูนย์

จากสมการที่ (3.9) เมื่อแทนค่า $n = 0$ ตามเงื่อนไขความไม่เสถียรภาพในสมการที่ (3.13) แล้วนำมาเขียนใหม่จะได้เป็น

$$z(s) = s^3 + xs^2 + (\omega_0^2 + m)s + \omega_0^2 x \quad (4.3)$$

จากการพิจารณาสัมประสิทธิ์ของ $z(s)$ ในสมการที่ (4.3) จะพบว่าพหุนาม $z(s)$ สามารถแยกองค์ประกอบได้ดังสมการที่ (4.4)

$$\begin{aligned} z(s) &= (s + (1 - \gamma)x)(s^2 + \gamma xs + \omega_0^2 / (1 - \gamma)) \\ z(s) &= s^3 + xs^2 + (\omega_0^2 / (1 - \gamma) + (1 - \gamma)\gamma x^2)s + \omega_0^2 x \end{aligned} \quad (4.4)$$



โดยที่ $0 < \gamma < 1$ (เพราะตำแหน่งของศูนย์ต้องเสถียร [23])

จากสมการที่ (4.4) ตำแหน่งของศูนย์แสดงในสมการที่ (4.5)

$$z_i = \begin{cases} -(1-\gamma)x \\ -\frac{1}{2}\gamma x \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\gamma x)^2 - 4\omega_0^2/(1-\gamma)} \end{cases} \quad (4.5)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ของ s ในสมการที่ (4.3) กับสมการที่ (4.4) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(1-\gamma)}\omega_0^2 + (1-\gamma)\gamma x^2 = \omega_0^2 + m = \omega_0^2 + \frac{k_2}{L}\omega^2 \quad (4.6)$$

ดังนั้นค่า γ มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ k_2 และ x ของอัตราขยายป้อนกลับดังสมการที่ (4.7)

$$k_2 = \frac{L}{\omega^2} \left[\frac{\gamma}{(1-\gamma)}\omega_0^2 + (1-\gamma)\gamma x^2 \right] \quad (4.7)$$

4.2.2 ตำแหน่งของขั้ววงรอบเปิด

สำหรับการหาสมการตำแหน่งขั้วของพหุนาม $p(s)$ ในสมการที่ (3.9) นั้น เนื่องจากขั้วของฟังก์ชันกโอนย้าย $G'_{22}(s)$ ก็คือขั้วของฟังก์ชันกโอนย้าย $G(s)$ บนแกนอ้างอิงของพลาซมา เราจึงสามารถหาขั้ววงรอบเปิดได้ 2 วิธี กล่าวคือจะหาจากสมการที่ (4.8) หรือจะหาขั้วของสมการที่ (4.9) ก็ได้ เพื่อความสะดวกในที่นี้จะหาขั้วจากสมการที่ (4.9) แทน

$$\det[s\mathbf{I} + \mathbf{J}\omega_0 - \mathbf{A}] = \mathbf{0} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} G'(s) &= G(s') \Big|_{s' = s\mathbf{I} + \mathbf{J}\omega_0} \\ &= s \left[s^2 \mathbf{I} + (x\mathbf{I} + y\mathbf{J})s + m\mathbf{I} + n\mathbf{J} \right]^{-1} / L \Big|_{s' = s\mathbf{I} + \mathbf{J}\omega_0} \\ &= (s\mathbf{I} + \mathbf{J}\omega_0) \left[(s\mathbf{I} + \mathbf{J}\omega_0)^2 + (x\mathbf{I} + y\mathbf{J})(s\mathbf{I} + \mathbf{J}\omega_0) + m\mathbf{I} + n\mathbf{J} \right]^{-1} / L \end{aligned} \quad (4.9)$$

เราสามารถหาขั้วได้โดยแสดงสมการที่ (4.9) ในปริภูมิจำนวนเชิงซ้อนและแทนค่า $n=0$ ได้ ดังนี้คือ

$$G'(s) = (s + j\omega_0) \left[(s + j\omega_0)^2 + (x + jy)(s + j\omega_0) + m \right]^{-1} / L$$

เพราะฉะนั้นขั้วของ $G'(s)$ หาได้จากสมการที่ (4.10)

$$\begin{aligned} (s + j\omega_0)^2 + (x + jy)(s + j\omega_0) + m &= 0 \\ s^2 + (x + jy + j2\omega_0)s + j\omega_0x - \omega_0^2 - \omega_0y + m &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) สามารถหาตำแหน่งขั้วได้ดังแสดงในสมการที่ (4.11)

$$\begin{aligned} p_i &= -\frac{1}{2}(x + jy) - j\omega_0 \pm \frac{1}{2} \sqrt{(x + jy + j2\omega_0)^2 - 4(j\omega_0x - \omega_0^2 - \omega_0y + m)} \\ &= -\frac{1}{2}(x + jy) - j\omega_0 \pm \frac{1}{2} \sqrt{(x + jy)^2 - 4m} \\ &= -\frac{1}{2}(x + jy) - j\omega_0 \pm \frac{1}{2} \sqrt{(x + jy)^2 - 4\frac{k_2}{L}\omega^2} \end{aligned} \quad (4.11)$$

โดยที่ p_i, p_i^* คือตำแหน่งของขั้ววงรอบเปิด

สมการที่ (4.11) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขั้ววงรอบเปิดกับค่าพารามิเตอร์ x, y, k_2 ของอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต ซึ่งทำให้เราสามารถเลือกวางตำแหน่งขั้วได้ง่ายโดยไม่ต้องกังวลเรื่องเสถียรภาพของการประมาณ

4.3 การวางตำแหน่งศูนย์และขั้วของตัวสังเกตเพื่อการกำหนดสัมประสิทธิ์การหน่วงของตัวสังเกต

นอกเหนือจากการทำให้ตัวสังเกตมีเสถียรภาพแล้ว เรายังมีอิสระในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับเพื่อให้ตัวสังเกตมีสัมประสิทธิ์การหน่วงที่เหมาะสมผ่านพารามิเตอร์ x, y, k_2 อีกด้วย หัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับเพื่อให้ตัวสังเกตมีค่าสัมประสิทธิ์การ

หน่วงที่เพียงพอและมีค่าคงที่ในทุกค่าความเร็ว วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกค่าพารามิเตอร์ของอัตราขยายป้อนกลับให้เป็นตามสมการที่ (4.12)

$$x = \alpha |\omega_0|, y = -\omega_0, k_2 = \beta L \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \quad (4.12)$$

โดยที่ $\alpha > 0$ และ $\beta = \gamma/(1-\gamma) + \gamma(1-\gamma)\alpha^2 > 0$

โดยการแทนค่าสมการที่ (4.12) ลงในสมการที่ (4.5) และ (4.11) จะได้ค่าปาทัสฐาน (Normalized) ของตำแหน่งของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดสำหรับทุกความถี่การทำงาน ดังนี้คือ

ค่าปาทัสฐานของศูนย์:

$$\frac{z_i}{|\omega_0|} = \begin{cases} -(1-\gamma)\alpha \\ -\frac{\gamma\alpha}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\gamma\alpha)^2 - 4/(1-\gamma)} \end{cases} \quad (4.13)$$

ค่าปาทัสฐานของขั้ววงรอบเปิด:

$$\frac{p_i}{|\omega_0|} = -\frac{1}{2}(\alpha + j) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\alpha^2 - 1 - 4\beta) - j2\alpha} \quad (4.14)$$

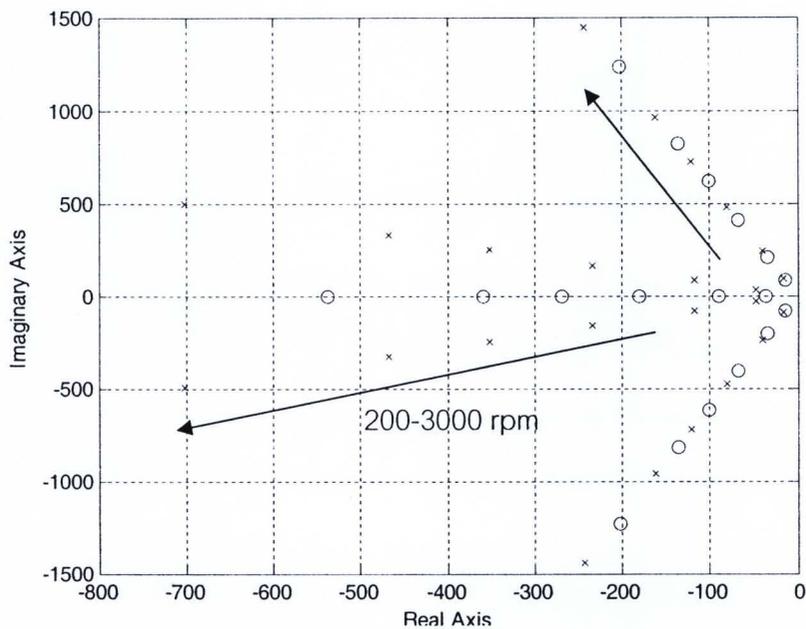
สุดท้ายแล้วพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบจะเป็น α, β (หรือ γ) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ x, y, k_2 อีกทีหนึ่ง จากสมการที่ (4.13) และ (4.14) จะเห็นว่าค่าปาทัสฐานของศูนย์และขั้วจะมีค่าคงที่สำหรับค่า α, β ที่กำหนด วิธีการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ นี้ จึงทำให้ทางเดินของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดจะเป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดในระนาบเชิงซ้อนทำให้สัมประสิทธิ์การหน่วงทั้งศูนย์และขั้ววงรอบเปิดมีค่าคงที่ตลอดทุกความถี่การทำงาน เนื่องจากขั้วเด่นของวงรอบปิดก็จะอยู่รอบ ๆ เส้นทางเดิน (loci) ของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดที่กำหนด ดังนั้นการออกแบบตามวิธีการที่นำเสนอนี้จึงสามารถกำหนดสัมประสิทธิ์การหน่วงตามที่ต้องการได้ในทุก ๆ ค่าความเร็ว อย่างไรก็ตามในย่านความเร็วต่ำนั้นส่วนจริงของศูนย์และขั้วจะมีค่าต่ำ ดังนั้นแนวทางที่ดีกว่าควรจะมีการจำกัดค่า x ดังแสดงในสมการที่ (4.15) เพื่อให้อัตราการลู่เข้าไม่ช้าจนเกินไป

$$x = \alpha \left[\max(|\omega_0|, \omega_{\min}) \right] \quad (4.15)$$

โดยที่ ω_{\min} คือค่าความเร็วต่ำสุดที่กำหนดเพื่อให้ส่วนจริงของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดมีค่าคงที่ตลอดค่าความเร็วที่ต่ำกว่า ω_{\min} เส้นทางเดินของตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิดแสดงเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.4 ขั้นตอนการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับทั้งหมดแสดงเป็นแผนภาพได้ดังนี้

ขั้นตอนการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ:

1. เลือกค่า α, β ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงที่ต้องการ โดยใช้สมการที่ (4.13) และ (4.14)
2. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ x, y, k_2 จากสมการที่ (4.12)
3. คำนวณค่าอัตราขยายป้อนกลับ G_1, G_2, H_1, H_2 จากสมการที่ (3.11)



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิดจากการใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ

4.3.1 แนวทางในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัว

อัตราขยายการปรับตัวแบบพีไอก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่เราต้องออกแบบเพื่อให้ระบบประมาณสามารถทำงานได้โดยมีคุณลักษณะตามต้องการ วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแนวทางในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัว โดยจะพิจารณาจากทางเดินของราก (Root loci)

ของช่วงรอบปิดและพิจารณาจากความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็วในขณะเร่งหรือลดความเร็วแบบแรมปี [22] ดังนี้คือ

การออกแบบความถี่หักมุม (k_i / k_p : Corner frequency) ของอัตราขยายการปรับตัว

จากรูปไดอะแกรมของระบบประมาณในรูปที่ 3.2 จะพบว่าอัตราขยายการปรับตัวแบบพีไอ จะทำให้เกิดตำแหน่งศูนย์เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งที่ความถี่หักมุม k_i / k_p และทำให้เกิดขั้วที่จุดกำเนิดอีกหนึ่งตัว จากตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิดของ $G'_{22}(s)$ ที่นำเสนอในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเราควรจะวางความถี่หักมุมของอัตราขยายการปรับตัวให้อยู่ทางซ้ายของศูนย์ที่เป็นค่าจริง $-(1-\gamma)x$ ของ $G'_{22}(s)$ ซึ่งใกล้กับขั้วที่เป็นค่าสังยุคเชิงซ้อนคู่ที่อยู่ซ้ายสุดในระนาบเชิงซ้อน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ทางเดินของขั้ววงรอบปิดที่ดีดังรูปที่ 4.5 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงเลือกออกแบบความถี่หักมุมของอัตราขยายการปรับตัวตามสมการที่ (4.16)

$$k_i / k_p \cong x \quad (4.16)$$

การออกแบบค่า k_p และ k_i

เพื่อเป็นการป้องกันการขยายค่าความผิดพลาดของฟลักซ์จากค่าความผิดพลาดของความเร็วในสภาวะชั่วคราว งานวิจัย [22] ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบค่า k_i โดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดในการประมาณค่าของความเร็ว (δ) ในช่วงเร่งหรือลดความเร็ว สำหรับอัตราสูงสุดของการเร่งหรือลดความเร็วที่คำนวณได้จาก T_{rated} / J และพิจารณาผลตอบสนองแบบแรมปีในขณะเร่งหรือลดความเร็วจะคำนวณได้ว่า ค่าความผิดพลาดในช่วงเร่งหรือลดความเร็วเป็นดังสมการที่ (4.17)

$$\delta = \frac{T_{rated}}{Jk_i \hat{\lambda}^2 G'_{22}(0)} \quad (4.17)$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดค่าความผิดพลาด δ ที่ยอมรับได้จะสามารถหาค่า k_i ได้จากสมการที่ (4.18)

$$k_i = \frac{T_{rated}}{J\delta \hat{\lambda}^2 G'_{22}(0)} \quad (4.18)$$

โดยที่ J คือค่าความเฉื่อยของระบบขับเคลื่อน T_{rated} คือค่าแรงบิดพิคักต์ของมอเตอร์ และจาก อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอสมาการที่ (3.11) สามารถคำนวณหาค่า $G'_{22}(0)$ ได้เป็น

$$G'_{22}(0) = \frac{1}{L} \frac{\alpha}{\beta + \alpha^2} \cdot \frac{1}{|\omega_0|} \quad (4.19)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (4.19) ในสมการที่ (4.18) จะได้อัตราขยายการปรับตัวดังนี้คือ

$$k_i = \underbrace{\left[\frac{T_{rated}}{J} \cdot \frac{1}{\delta \hat{\lambda}^2} \cdot \frac{L(\beta + \alpha^2)}{\alpha} \right]}_{=a \approx \text{constant}} \Big|_{\omega_0} \quad (4.20)$$

$$k_p = \frac{k_i}{x} = \begin{cases} a / \alpha & \text{for } \omega_0 \geq \omega_{min} \\ \frac{a}{\alpha \omega_{min}} |\omega_0| & \text{for } \omega_0 < \omega_{min} \end{cases} \quad (4.21)$$

เมื่อพิจารณาผลการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวแบบพีไอ (สมการที่ (4.20)-(4.21)) จะพบว่า อัตราขยาย k_i จะแปรตามความถี่ทำงาน ในขณะที่อัตราขยาย k_p จะมีค่าคงที่ ยกเว้นในย่านความถี่ต่ำกว่า ω_{min} ซึ่ง k_p จะมีค่าลดลงตามความถี่

กล่าวโดยสรุปแล้ว การออกแบบตัวสังเกตเติมอันดับแบบปรับตัวถูกกำหนดโดย อัตราขยายป้อนกลับในรูปแบบคำตอบทั่วไป (3.11) แนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต (4.12) และแนวทางการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวแบบพีไอ (4.20) - (4.21) ซึ่งทั้งหมดถูกแสดงในเชิงสมการอย่างชัดเจน ทำให้สามารถคำนวณได้ในแบบเวลาจริง (Real time) และสามารถนำไปใช้กับ PMSM ใด ๆ ได้โดยง่าย ผลที่ได้คือระบบประมาณจะมีเสถียรภาพและมีคุณสมบัติเชิงพลวัตตามที่กำหนดตลอดช่วงการทำงาน

4.4 ตัวอย่างการออกแบบ

ตามแนวทางการออกแบบตัวสังเกตที่นำเสนอสมาการ ในลำดับต่อไปจะนำเสนอตัวอย่างการออกแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) เลือกค่า α, β ที่ทำให้ได้สัมประสิทธิ์การหน่วงของขั้ววงรอบปิด ตามที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่นเลือก $\alpha = 1, \beta = 1$ ($\gamma = 0.43$) จากสมการที่ (4.13)-(4.14) ค่า ปาหัทฐานของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดแสดงในสมการที่ (4.22) และ (4.23) ตามลำดับ

$$\frac{z_i}{|\omega_0|} = \begin{cases} -0.57 \\ -0.215 \pm j1.31 \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\frac{p_i}{|\omega_0|} = \begin{cases} -0.257 \pm j1.53 \\ -0.743 \pm j0.53 \end{cases} \quad (4.23)$$

จากตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิดในรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าสัมประสิทธิ์การหน่วง จะมีค่าคงที่ในทุก ๆ ค่าความเร็ว โดยมีค่าประมาณ 0.16

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณค่าพารามิเตอร์ x, y, k_2 ของอัตราขยายป้อนกลับ โดยการแทน ค่า $\alpha = 1, \beta = 1$ ในสมการที่ (4.12) จะได้

$$x = |\omega_0|, \quad y = -\omega_0, \quad k_2 = L \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \quad (4.24)$$

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณค่าอัตราขยายป้อนกลับ โดยการแทนสมการที่ (4.24) ในสมการ ที่ (3.11) จะได้

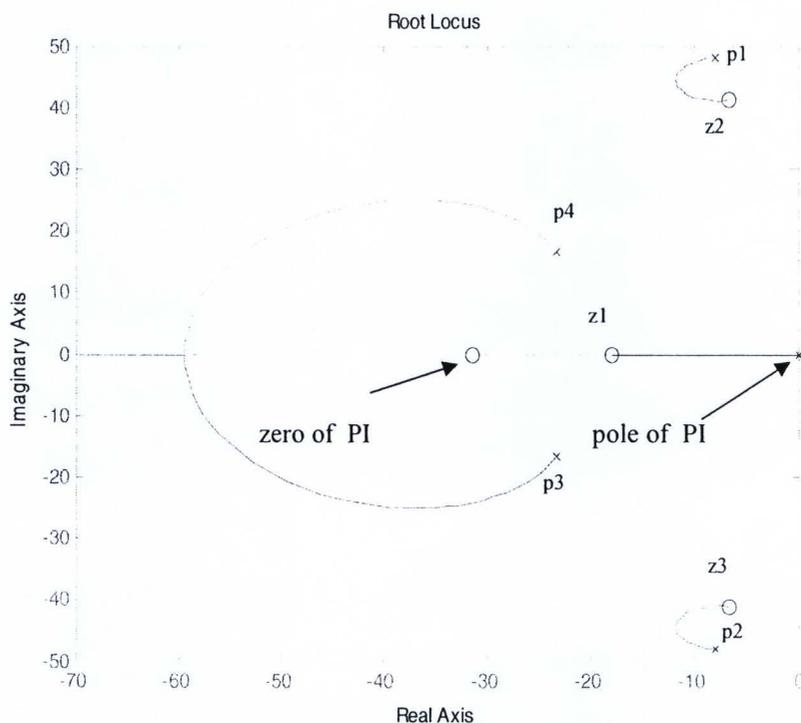
$$\left. \begin{aligned} G_1 &= -|\omega_0| + \frac{R}{L}, \quad G_2 = \omega_0 - \omega, \\ H_1 &= L|\omega_0|, \quad H_2 = -L(\omega_0 - \omega) - L \frac{\omega_0^2}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

ขั้นตอนที่ 4) คำนวณค่าอัตราขยายการปรับตัว จากแนวทางการออกแบบตาม สมการที่ (4.19) - (4.20) โดยให้ $\delta = 1.05$ rad/s (10 rpm) และ $\omega_{\min} = 21$ rad/s (200 rpm) จะ ได้

$$k_i = 436|\omega_0| \quad (4.26)$$

$$k_p = \begin{cases} 436 & \text{for } \omega_0 \geq \omega_{\min} \\ 436|\omega_0|/\omega_{\min} & \text{for } \omega_0 < \omega_{\min} \end{cases} \quad (4.27)$$

จากการออกแบบนี้ทางเดินของขั้ววงรอบปิดจะเป็นดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าคุณสมบัติด้านการหน่วงถูกกำหนดโดยศูนย์และขั้ววงรอบเปิดตามที่ได้ออกแบบ ประสิทธิภาพของการออกแบบตัวสั่งเกตที่นำเสนอนี้ สามารถยืนยันได้ด้วยผลการจำลองการทำงานดังต่อไปนี้

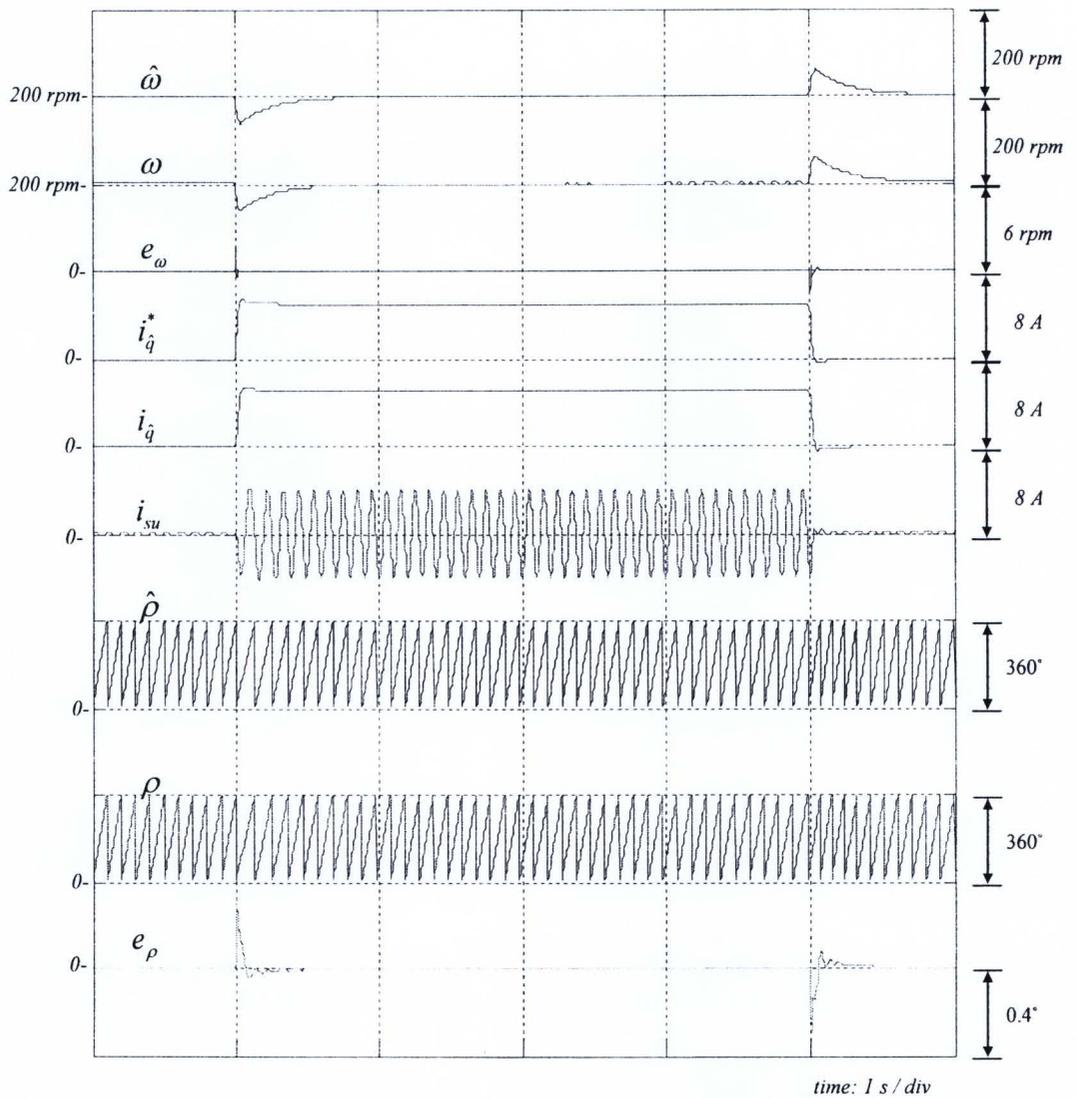


รูปที่ 4.5 ทางเดินของขั้ววงรอบปิดจากการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวที่นำเสนอ

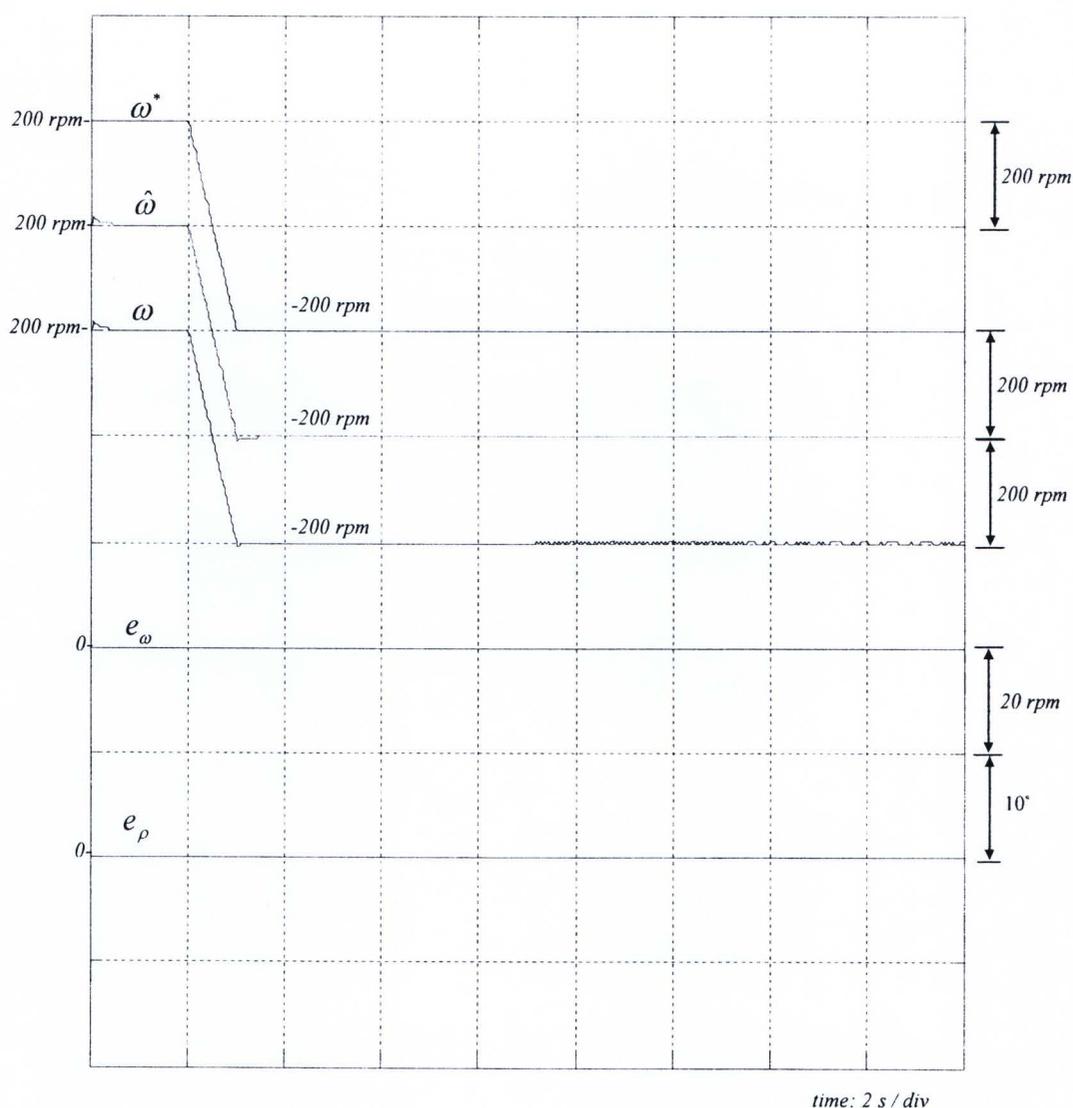
ผลการจำลองการทำงานทางด้านเสถียรภาพ:

เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับตามสมการที่ (2.16) ซึ่งทำให้ระบบประมาณขนาดเสถียรภาพในช่วงความเร็วเป็นลบ ในที่นี้จึงจำลองการทำงานในเงื่อนไขเดียวกัน กล่าวคือเงื่อนไขการขับโหลดพิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm และในขณะกลับทิศทางหมุนจาก 200 \rightarrow -200 rpm แต่จะใช้อัตราขยายป้อนกลับตามแนวทางการออกแบบที่ได้นำเสนอแทน ซึ่งผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7





รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ขณะขับโหลดพิกัด เมื่อใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายตามที่นำเสนอ



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์ขณะกลับทิศทางหมุนจาก 200 \rightarrow -200 rpm เมื่อใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับตามที่นำเสนอ

จากผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะเห็นได้ว่าในขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 200 rpm นั้นระบบประมาณสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังคงมีเสถียรภาพเมื่อทำงานที่ความเร็ว -200 rpm อีกด้วย โดยมีค่าความผิดพลาดของความเร็วและตำแหน่งเป็นศูนย์ในสภาวะอยู่ตัว ในสภาวะชั่วครู่นั้นมีค่าความผิดพลาดของความเร็วสูงสุดประมาณ 2 rpm ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตตามที่กำหนดคือ 10 rpm สำหรับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งสูงสุดประมาณ 0.3 องศา

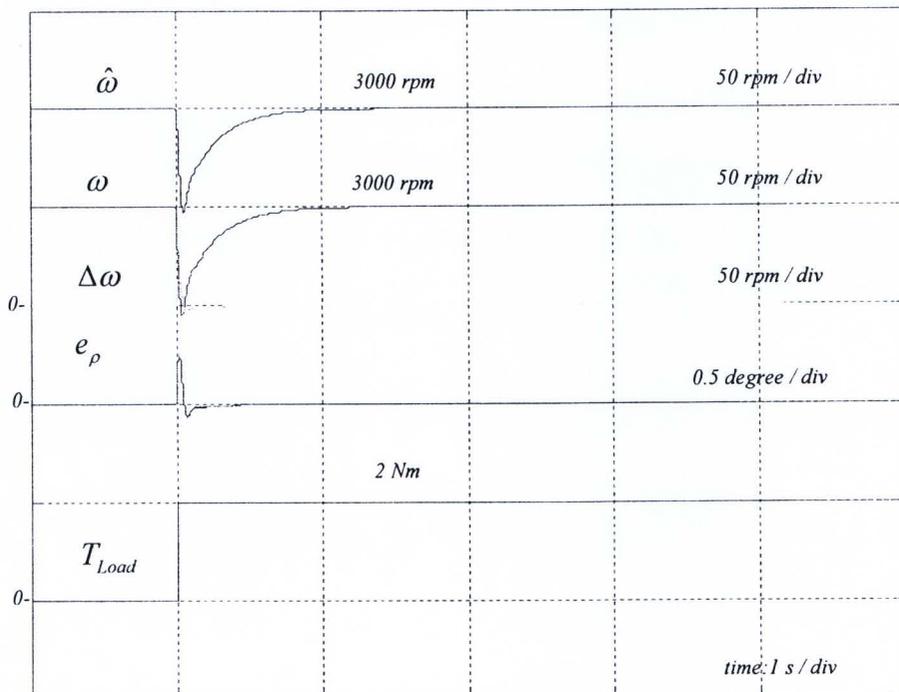
ผลการจำลองการทำงานทางด้านสมรรถนะเชิงพลวัต:

เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.3 ที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับตามสมการที่ (4.1) ซึ่งทำให้ระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์ขาดเสถียรภาพเมื่อถูกกระตุ้นด้วยโหลดแบบขั้น ทั้งนี้เนื่องจากตัวสังเกตมีสัมประสิทธิ์การหน่วงต่ำ ในที่นี้จึงจำลองการทำงานในเงื่อนไขเดียวกัน แต่จะใช้อัตราขยายป้อนกลับตามแนวทางการออกแบบที่ได้นำเสนอแทน

จากแนวทางการออกแบบตัวสังเกตที่นำเสนอ ค่าตำแหน่งของศูนย์และขั้ววงรอบเปิดของตัวสังเกตที่ความเร็ว 3000 rpm แสดงในสมการที่ (4.28) และ (4.29) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงที่พอเพียงที่ทำให้ระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์โดยรวมยังคงมีเสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

$$z_i = \begin{cases} -537 \\ -203 \pm j1234 \end{cases} \quad (4.28)$$

$$p_i = \begin{cases} -240 \pm j1441 \\ -700 \pm j500 \end{cases} \quad (4.29)$$



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm เมื่อใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับตามที่นำเสนอ