

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยก กระตุ้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่

ศราวุธ โพธิยา¹⁾ สาคร จันทรโทศรี²⁾ สุวิทย์ คำสว่าง¹⁾ และ วิจิตร กิณเรศ²⁾

¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วิธีการในการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่ การระบุเอกลักษณ์นี้เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง นอกจากนี้ยังทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ได้ด้วย ขั้นตอนการดำเนินการเริ่มจากการทดสอบระบบด้วยสัญญาณขั้นบันไดหลายระดับ เพื่อหาผลตอบสนองทางเวลาของระบบ ทำการลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีเวฟเล็ต จากนั้นดำเนินการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ จากผลการดำเนินการสามารถระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน และพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Parameter Identification of a Separately Excite DC Motor Using Tabu Search

S. Pothiya¹⁾ S. Chanposri²⁾ S. Kamsawang¹⁾ and W. Kinaree²⁾

¹⁾ Department of Electrical Engineering and Electronic, Faculty of Engineering, Northeast University.

²⁾ Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University.

Abstract

This paper presents a method for identification of a separately excited DC motor using Tabu Search (TS). This identification found the mathematical model in form second-order transfer function. Furthermore, calculate all parameter of motor from mathematical model. The procedures for identification are following. First, testing the system by multi levels step functions found the time response. After that, reduce noises in the data by wavelet soft thresholding. Next, Identification the system uses TS. Finally, calculate all parameter of motor from mathematical model. The results can identify transfer function of a separately excite DC motor and found all parameter of motor as well as required.

Keywords: Tabu search, System Identification, Separately excite DC motor

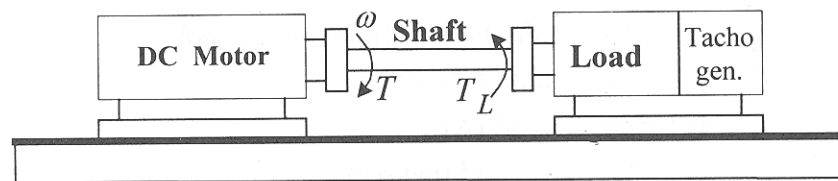
บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการควบคุมความเร็ว พบมากในเครื่องมือต่างๆ และในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเช่น เครื่องจักรรีด เครื่องมือทางกล หุ่นยนต์ เป็นต้น ในการออกแบบการควบคุมความเร็วนี้ จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเสียก่อน วิธีการหนึ่งที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ต้องทราบพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบ ปัญหาที่พบคือ การหาพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบ ต้องอาศัยการทดสอบที่ยุ่งยาก และพารามิเตอร์เหล่านี้ก็มีความผิดพลาดอยู่แล้วบางส่วน เมื่อนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ยิ่งทำให้เกิดความผิดพลาดสะสมของพารามิเตอร์แต่ละตัว ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความผิดพลาดมาก เมื่อเทียบกับทางปฏิบัติ วิธีการนี้เป็นวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยพารามิเตอร์ของระบบ

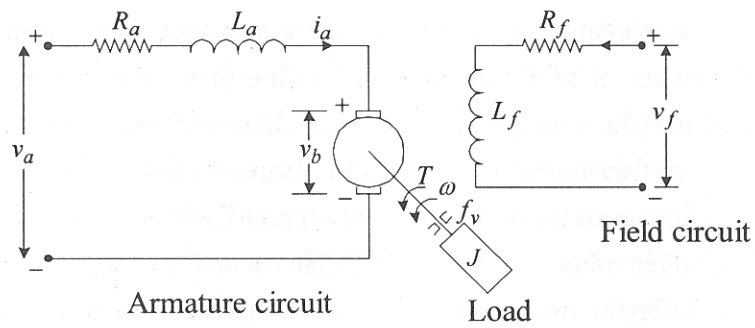
จากข้อด้อยดังกล่าวของวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยพารามิเตอร์ของระบบ ทำให้วิธีการระบุเอกลักษณ์โดยไม่อาศัยพารามิเตอร์ของระบบ เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน การระบุเอกลักษณ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ARX fuzzy logic เจนเนติก การใช้ข่ายประสาทเทียม เป็นต้น ในบทความนี้เสนอวิธีใหม่ในการระบุเอกลักษณ์ เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในปัจจุบัน เพราะสามารถหลีกเลี่ยง คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local optimum solution) ไปยัง คำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไป (global optimum solution) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ บทความนี้ยังนำเสนอวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น ต่อคู่ควบกับโหลด ด้วยเฟลามีทาโคมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดความเร็วต่อคู่ควบอยู่ภายใน แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อคู่ควบกับโหลด



รูปที่ 2 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 2 จะแสดงวงจรเทียบเคียงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ต่อคู่ควบกับโหลด ถ้ากระแสฟิลด์ $i_f(t)$ มีค่าคงที่มีเพียงแรงดันที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์เท่านั้นที่สามารถปรับค่าได้เรียกว่า วิธีการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ (armature controlled) ค่าของแรงบิดของมอเตอร์ และแรงดันย้อนกลับ (back emf) จะหาได้จาก

$$T(t) = k_t i_a(t) \quad (1)$$

$$v_b(t) = k_b \omega(t) \quad (2)$$

เมื่อ

v_b คือ แรงดันย้อนกลับ (back emf), มีหน่วยเป็นโวลต์

T คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)

i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ (rad/sec)

k_t คือ ค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์

k_b คือ ค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์ (V-sec/rad)

จากวงจรเทียบเคียงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เขียนสมการ ได้เป็น

$$R_a i_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega(t) = v_a(t) \quad (3)$$

เมื่อ

R_a คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ (H)

แรงบิดของมอเตอร์ใช้ในการขับโหลด จะได้

$$T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + f_v \omega(t) \quad (4)$$

เมื่อ

J คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์ (kg-m^2)

f_v คือ ค่าความเสียดทานหนืด (viscous friction)

ใช้สมการที่ (1) (3) และ (4) เพื่อหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ โดยการแปลงลาปลาซ จะได้

$$k_t I_a(s) = JsW(s) + f_v W(s) \quad (5)$$

$$R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + k_b W(s) = V_a(s) \quad (6)$$

ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันที่อาร์เมเจอร์ V_a กับความเร็วของมอเตอร์ W ในรูปสมการอันดับสอง คือ

$$G(s) = \frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t}{JL_a s^2 + (JR_a + L_a f)s + R_a f_v + k_t k_b} \quad (7)$$

เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$G(s) = \frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t}{JL_a s^2 + JR_a s + k_t k_b} \quad (8)$$

เมื่อ ค่าคงที่ทางกล τ_m และ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า τ_e ของมอเตอร์หาได้จากสมการ

$$\tau_m = \frac{R_a J}{k_t k_b} \quad (9)$$

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (10)$$

เมื่อ

τ_m คือ ค่าคงที่ทางเวลาของมอเตอร์ (sec)

τ_e คือ ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ (sec)

จัดรูปสมการที่ (8) ใหม่ในเทอมของ τ_m และ τ_e จะได้

$$G(s) = \frac{1/k_b}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (11)$$

เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$G(s) = \frac{b_0}{a_1 s^2 + a_0 s + 1} \quad (12)$$

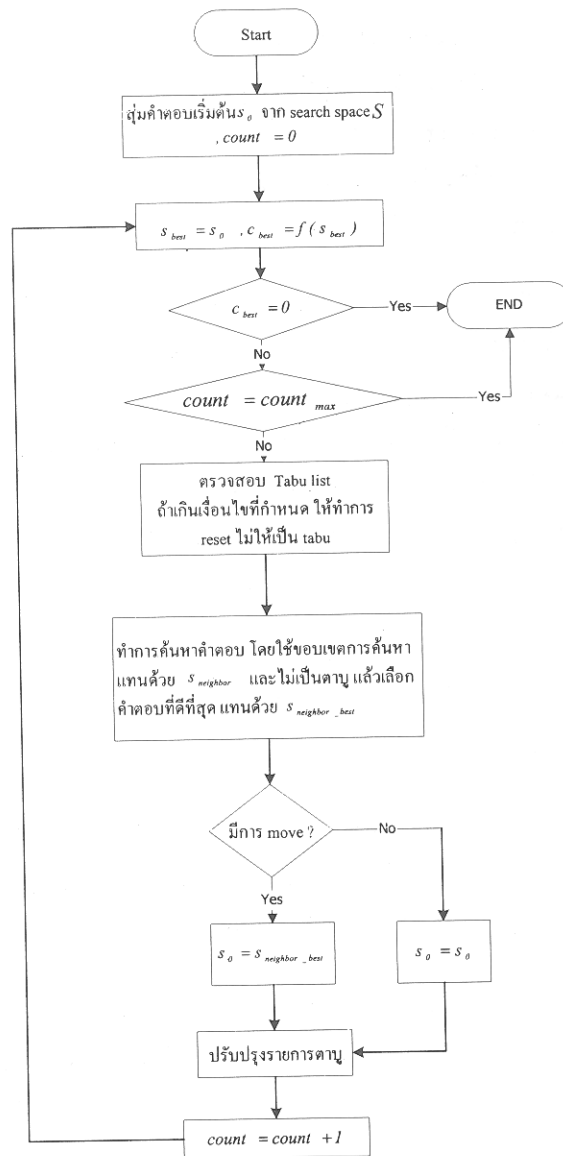
เมื่อ $b_0 = \frac{1}{k_b}$, $a_0 = \tau_m$, และ $a_1 = \tau_m \tau_e$

จากสมการที่ (8) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง จะเห็นได้ว่าหากทำการหาแบบจำลองด้วยวิธีฟิวด์พารามิเตอร์ต้องทราบพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ครบถ้วน ซึ่งเป็นงานที่ละเอียดซับซ้อนมากและเสียเวลา ในการใช้ประโยชน์แบบจำลองอันดับสอง ดังสมการที่ (12) ประเด็นสำคัญอยู่ที่การทราบค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_1 และ b_0 ที่ทำให้แบบจำลองมีผลตอบสนองทางทฤษฎีใกล้เคียงกับผลที่ตรวจวัดได้ในทางปฏิบัติอย่างใกล้เคียงที่สุด คือ มีความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงถือได้ว่าเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization problem) สามารถประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูได้

การค้นหาแบบตามู (Tabu Search)

J.A. Bland and G.P. Dawson [2] และ Glover F. [3, 4] ได้สรุปแนวคิดและขั้นตอนของการค้นหาแบบตามู ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีการคิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นก็เป็นที่ยอมรับแพร่หลายมากขึ้นเรื่อย ๆ

หลักการพื้นฐานที่การค้นหาแบบตามู แตกต่างไปจากการค้นหาแบบธรรมดา คือ มีการเพิ่ม รายการตามู (Tabu list) และเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ที่ทำให้การค้นหาค่าตอบเสร็จสิ้นได้เร็ว สามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินการได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างการดำเนินการของการค้นหาแบบตาบอด

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากคำตอบที่มีอยู่ กำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด $s_{best} = s_0$ พิจารณาแผนภูมิรูปที่ 3 เริ่มดำเนินการโดยการสุ่มคำตอบ s_0 จากสมาชิกของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือ S (search space) หากไม่ใช้การสุ่มอาจกำหนดขึ้นเองก็ได้

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าฟังก์ชันคุณค่า (cost function) ของ s_{best} นั่นคือ $c_{best} = f(s_{best})$ เมื่อ f คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขว่าคำตอบที่มีอยู่เหมาะสมหรือไม่อย่างไร ตัวอย่างที่พบได้บ่อยๆ ก็คือ ฟังก์ชันที่คำนวณค่าความผิดพลาด ระหว่างเอาต์พุตของระบบโดยใช้คำตอบที่มีอยู่ เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากการวัดระบบจริง

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบรายการดาบ เป็นรายการที่คอยเก็บบันทึกข้อมูลกระบวนการค้นหาในอดีต หลักการทั่วไปในการออกแบบรายการดาบ จะขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิดแตกต่างกันไป แต่หลักการที่ใช้ในบทความนี้ออกแบบให้รายการดาบ เก็บข้อมูลการดำเนินการค้นหาในอดีต เก็บเงื่อนไขของ ความถี่ (frequency) ของการดำเนินการในทิศทางใดๆ และเก็บเงื่อนไขของ ความคงอยู่ (recency) เป็นสิ่งที่บอกว่าทิศทางนั้นๆ ห้ามดำเนินการมานานเท่าใดแล้ว ซึ่งค่านี้จะนำไปรวมกับค่าฟังก์ชันคุณค่าเพื่อเป็นเงื่อนไขการหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการค้นหาคำตอบเริ่มจาก s_0 ในบริเวณรอบๆ ของ s_0 กำหนดให้บริเวณรอบๆ s_0 แทนด้วย $s_{neighbor}$ ขอบเขตจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้ดำเนินการ และ $s_{neighbor}$ จะต้องไม่เป็นดาบ หมายถึง สามารถเป็นคำตอบได้

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าฟังก์ชันคุณค่าของสมาชิกแต่ละตัวของ $s_{neighbor}$ แล้วเลือกสมาชิกที่มีค่าฟังก์ชันคุณค่าที่ดีที่สุด โดยกำหนดให้เป็น $s_{neighbor_best}$ และค่าฟังก์ชันคุณค่าของแต่ละ $s_{neighbor}$ ต้องดีกว่าค่าฟังก์ชันคุณค่าของ s_0

ขั้นตอนที่ 6 ทำการย้ายตำแหน่ง กำหนดให้ $s_0 = s_{neighbor_best}$ แล้วปรับปรุงรายการดาบให้เป็นปัจจุบัน และเพิ่มจำนวนครั้งในการค้นหาที่ผ่านมาแล้ว ถ้ายังไม่ได้คำตอบ ก็ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ใหม่

ขั้นตอนที่ 7 เมื่อทำการค้นหาเท่ากับจำนวนครั้งที่กำหนด หรือได้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าที่กำหนด ถ้าไม่มีสมาชิกใด ๆ ของ $s_{neighbor}$ ที่ให้ค่าฟังก์ชันคุณค่าที่ดีกว่าค่าฟังก์ชันคุณค่าของ s_0 ก็กำหนดให้ s_0 เป็นคำตอบ

การค้นหาแบบดาบ จะเพิ่มเติมการดำเนินการใด อนุญาตให้ดำเนินการได้หรือไม่ได้ การดำเนินการใดที่ไม่อนุญาตเรียกว่า ดาบ สิ่งนี้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการค้นหาแบบดาบ ที่ทำให้การค้นหามีลักษณะพิเศษที่สามารถหลุดจากคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสม

ที่สุดเฉพาะถิ่นไปหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไป ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

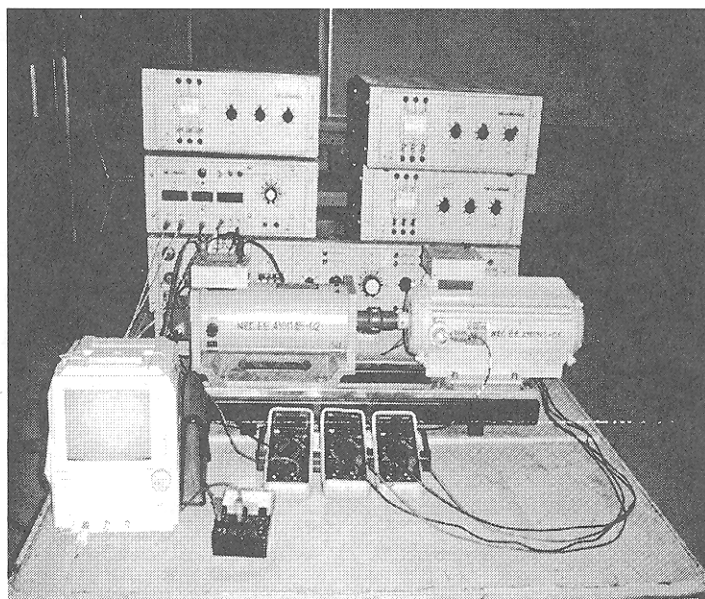
วิธีการดำเนินการ

ลำดับขั้นตอนในการหาแบบจำลอง ด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์นั้น ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบระบบจริง บทความนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นมีพิกัด 220 V 6.5 A ความเร็วพิกัด 3,000 rpm และแรงบิดพิกัด 4 N-m ดังแสดงในรูปที่ 4

การทดสอบทำได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับมอเตอร์ ในระดับแรงดันต่างๆ เป็นสัญญาณขั้นบันได (step function) แล้วบันทึกความเร็วในแต่ละระดับแรงดันที่ป้อน จากผลการทดสอบพบว่า มีสัญญาณรบกวนมาก จะต้องทำการลดหรือกำจัดสัญญาณรบกวนนั้นออกไปก่อน เมื่อกำจัดสัญญาณรบกวนออกแล้วจึงนำผลการทดสอบมาประมวลผลหาแบบจำลอง ซึ่งจากการทดสอบจะได้ข้อมูลหลายชุดในระดับอินพุตต่างๆ สามารถหาแบบจำลองของแต่ละชุดได้ ประกอบเป็น แบบจำลองช่วง (interval plant model) และหาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบในทุกๆระดับสัญญาณขั้นบันได เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เป็นตัวแทนของระบบสำหรับทุกระดับอินพุตออกมาหนึ่งชุด เรียกว่า แบบจำลองแทนระบบ (nominal plant model)

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

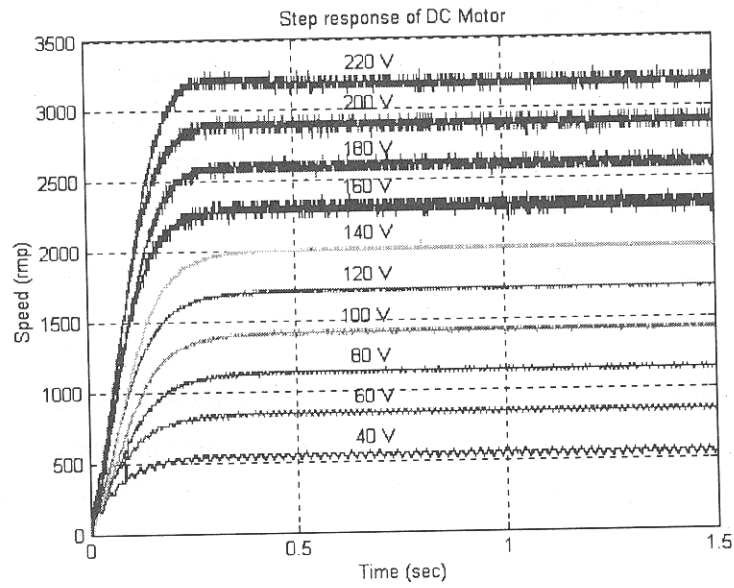
การดำเนินการทดสอบ ทำโดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ ที่ระดับแรงดันต่างๆ ตั้งแต่ระดับแรงดันน้อยจนถึงแรงดันพิกัดของมอเตอร์ แบ่งทดสอบเป็น 10 ระดับอินพุตคือ ตั้งแต่ 40 60 80 100 120 140 160 180 200 และ 220V ตามลำดับ จากนั้นวัดรูปคลื่นและข้อมูลของสัญญาณความเร็วจากทาโคมิเตอร์ที่ยึดติดกับเพลา สัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปของแรงดัน พร้อมทั้งใช้ทาโคมิเตอร์แบบสะท้อนแสงวัดความเร็วขณะความเร็วคงตัว ค่าที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยรอบต่อนาที (rpm) ผลการทดสอบได้สัญญาณที่วัดได้จากทาโคมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5



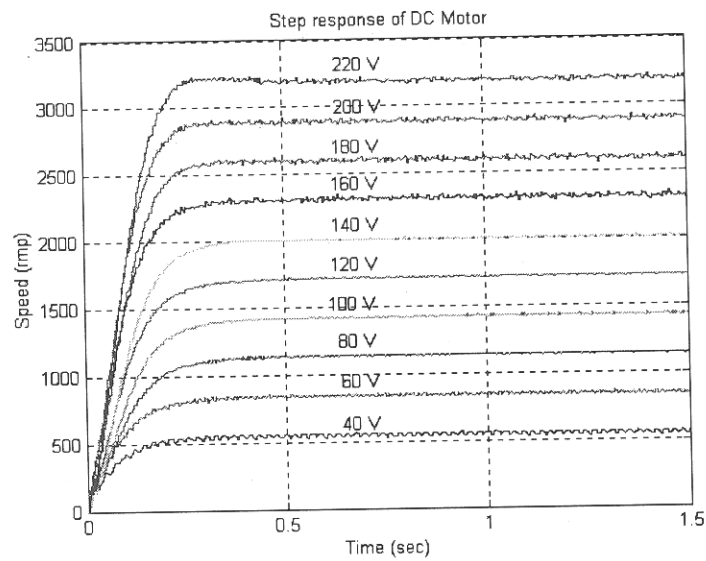
รูปที่ 4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรง ที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์

การลดสัญญาณรบกวน

เมื่อพิจารณารูปคลื่นที่บันทึกได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าสัญญาณมีสัญญาณรบกวนมาก ในบทความนี้จะใช้วิธีการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ วิธีเวฟเลตซอฟท์เทรชโฮลดิ้ง (wavelet soft thresholding) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยที่ D.L.Denoho[5] ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีเวฟเลตซอฟท์เทรชโฮลดิ้ง มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการกำจัดสัญญาณรบกวน โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่สำคัญของค่าเทรชโฮล จะเปรียบได้กับสัญญาณรบกวน ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญของค่าเทรชโฮล จะเปรียบได้กับโครงสร้างหลักของสัญญาณ ผลการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีเวฟเลตซอฟท์เทรชโฮลดิ้ง แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ปริมาณหนึ่ง เป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 5 สัญญาณความเร็วของระบบ ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 6 สัญญาณความเร็วของระบบ หลังลดสัญญาณรบกวน

การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยการระบุเอกลักษณ์โดยใช้วิธีค้นหาแบบตาบอด เพื่อค้นหาค่าของสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการที่ (12) ที่ทำให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากระบบเอกลักษณ์ ประพฤติตัวเหมือนกับสัญญาณที่วัดได้จริงมากที่สุด

การหาแบบจำลอง จะแสดงตัวอย่างการหาแบบจำลองในกรณีที่แรงดันอินพุต มีค่า 120 โวลต์ ส่วนที่ระดับแรงดันอื่น ก็ดำเนินการในลักษณะเดียวกัน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เป็นการหาค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับสัญญาณที่วัดได้จริง ใช้ความผิดพลาดเป็นผลรวมกำลังสอง (Sum Square error; SSE) อีกทั้งพิจารณาความคล้อยคลึงของรูปสัญญาณทั้งสองด้วย การดำเนินการทั้งหมดได้อำนวยความสะดวกการดั่งกล่าวด้วยโปรแกรม MATLAB

การคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์

จากผลของการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการที่ (12) จะเห็นได้ว่าการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ทำได้ดังต่อไปนี้

- ค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็ว k_b หาได้จาก

$$k_b = \frac{1}{b_0} \quad (13)$$

- ค่าคงที่ทางกลของมอเตอร์ τ_m หาได้จาก

$$\tau_m = a_0 \quad (14)$$

- ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ τ_e หาได้จาก

$$\tau_e = \frac{a_1}{a_0} \quad (15)$$

- ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ R_a หาได้จาก

$$R_a = \frac{L_a}{\tau_e} \quad (16)$$

(ค่า L_a หาค่าได้จากการทดสอบ)

- ค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแส k_t หาได้จาก

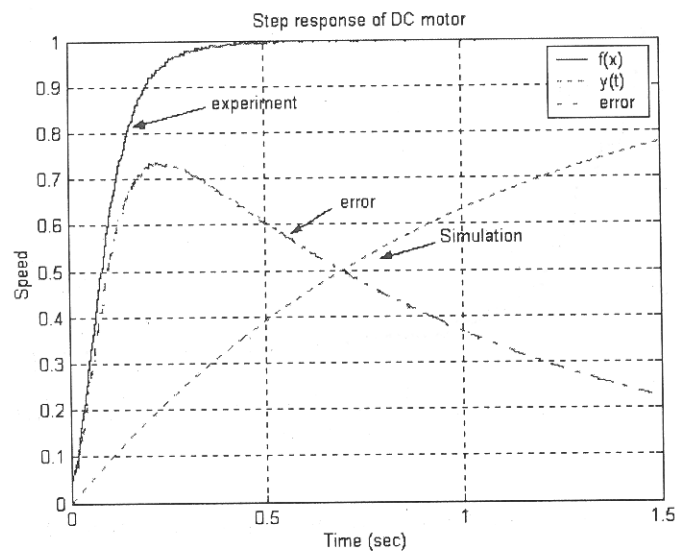
$$k_t = \frac{R_a J}{\tau_m k_b} \quad (17)$$

(ค่า J หาค่าได้จากการทดสอบ)

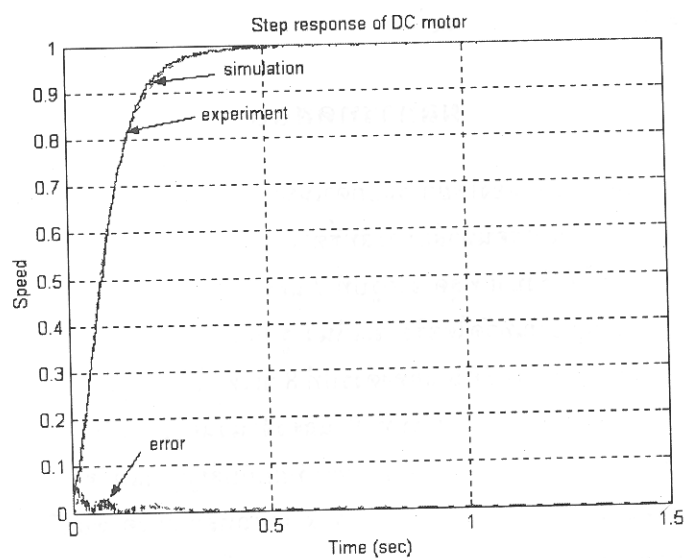
จากการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์สามารถหาค่า $L_a = 186$ mH และ $J = 5.14 \times 10^{-4}$ Nm-sec²

ผลการทดสอบ

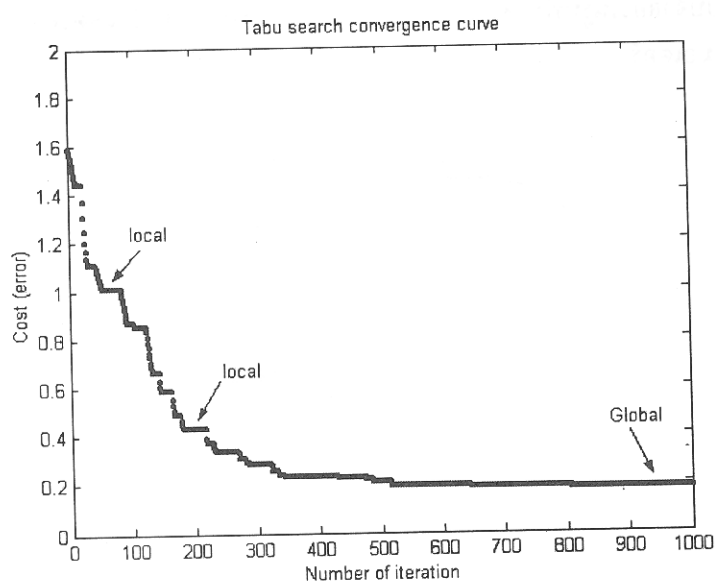
การค้นหาลักษณะการตอบสนองโดยการแยกดำเนินการที่ระดับแรงดันอินพุตคือ ตั้งแต่ 40 ถึง 220 โวลต์ เป็นการค้นหาสมรรถนะต่างๆ ของระบบที่ให้ผลตอบแทนใกล้เคียงกับสัญญาณที่วัดได้จริงมากที่สุด จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบแทนเริ่มต้นที่กำหนดขึ้น กับสัญญาณที่วัดได้จริง จะเห็นว่ารูปสัญญาณทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก หลังจากดำเนินการ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความผิดพลาดน้อยลง รูปที่ 9 แสดงจำนวนครั้งการค้นหาหาค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณที่ได้จากการการค้นเปรียบเทียบกับสัญญาณที่วัดได้จริง จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะลู่เข้าหาค่าที่น้อยที่สุด และสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local optimal) ไปหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไป (global optimal) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการดำเนินการแสดงในตารางที่ 1 แสดงแบบจำลองในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง และตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของระบบก่อนการดำเนินการค้นหา



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบกับสัญญาณ หลังการดำเนินการ



รูปที่ 9 กราฟการลู่เข้าสู่คำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมทั่วไป

ตารางที่ 1
ฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละระดับแรงดันอินพุต

อินพุต (V)	ฟังก์ชันถ่ายโอน
40	$\frac{14.13}{0.002509s^2+0.108881s+1}$
60	$\frac{14.04}{0.001524s^2+0.091297s+1}$
80	$\frac{14.25}{0.001740s^2+0.1004001s+1}$
100	$\frac{14.27}{0.002449s^2+0.107764s+1}$
120	$\frac{14.13}{0.002509s^2+0.108881s+1}$
140	$\frac{14.35}{0.002862s^2+0.108185s+1}$
160	$\frac{14.30}{0.002440s^2+0.099073s+1}$
180	$\frac{14.15}{0.001976s^2+0.088898s+1}$
200	$\frac{14.45}{0.002198s^2+0.094526s+1}$
220	$\frac{14.50}{0.002554s^2+0.101916s+1}$

ตารางที่ 2
พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์

อินพุต(โวลต์)	k_b	τ_m	τ_e	R_a	k_t
40	0.070	0.108	0.023	8.08	0.539
60	0.071	0.091	0.016	11.13	0.881
80	0.070	0.100	0.017	10.75	0.784
100	0.070	0.107	0.022	8.19	0.557
120	0.069	0.100	0.020	8.98	0.661
140	0.069	0.108	0.026	7.02	0.478
160	0.069	0.099	0.024	7.56	0.566
180	0.070	0.088	0.022	8.37	0.685
200	0.069	0.094	0.023	7.98	0.627
220	0.069	0.101	0.025	7.41	0.541

สรุป

การหาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู ผลการดำเนินการสามารถหาแบบจำลองในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีค่าความผิดพลาดน้อย ได้แบบจำลองที่แทนระบบในระดับอินพุตต่างๆ สามารถใช้แบบจำลองเหล่านี้ในการออกแบบควบคุมความเร็วได้เป็นอย่างดี เพราะมีความถูกต้องสูง ง่ายต่อการดำเนินงาน อีกทั้งสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ได้ เพื่อใช้ในการศึกษาถึงคุณลักษณะของมอเตอร์ทางด้านไดนามิกส์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศราวุธ โพธิยา “การระบุเอกลักษณ์ระบบสองมวลเฉื่อยที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิดด้วยการค้นหาแบบตามู” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544.
- [2] A. Bland and G.P. Dawson, “Tabu search and design optimization” *Computer-aided design*. Vol.23, No.3, pp.195-201, 1991.
- [3] F. Glover, “Tabu search part I”, *ORSA J. Comput.*, Vol.1 No.3, pp.190-206, 1989.
- [4] F. Glover, “Tabu search part II”, *ORSA J. Comput.*, Vol.2 No.1, pp.4-32, 1990.
- [5] D.L. Denoho, “De-noising by Soft Thresholding”, *IEEE Trans. On Information Theory*, Vol.41, pp.613-627, 1995.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สรายุภูมิ สุจิตจร และ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ตลอดจนสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และสนับสนุน ในการเขียนบทความวิจัยนี้