

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ Speed Control of Induction Motor with Its Parameter Different from Nominal Value

กุลพงษ์ บุญมาวงศ์¹, วิโรจน์ แสงรงทอง^{2*}

Kunlapong Boonmawong¹, Wirote Sangtungong^{2*}

Received: 3 April 2019 ; Revised: 13 May 2019 ; Accepted: 4 June 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วที่ได้รับจากระบบควบคุมเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวและมีตัวแปรสถานะ 8 ตัวแปรระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกน 8 ค่าการคำนวณโดยตรงและการสุ่มเลือกจะกำหนดค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวการเลือกค่าไอเกนที่เป็นจำนวนเต็มลบที่เหมาะสม 8 ค่าและการหาค่าตอบของระบบสมการพหุนาม 8 สมการคือการคำนวณค่าเกนโดยตรงการสุ่มเลือกจะปรับจูนค่าเกนที่เป็นจำนวนเต็มบวกการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอโดยตรงจะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและแตกต่างจากค่าที่ระบุการจำลองสถานการณ์จะแบ่งออกเป็น 5 กรณีดังนี้มอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้านทานโรเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุมอเตอร์มีความต้านทานสเตเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุและมอเตอร์และโหลดมีค่าความต้านทานโรเตอร์ ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน

คำสำคัญ: ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การควบคุมแบบเวกเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำค่าไอเกน

Abstract

This paper compares the performance of speed responses given by the direct vector control system of an induction motor. The four PI controllers are incorporated in such a control system with eight state-variables. The coefficient matrix of the above closed-loop system holds eight eigenvalues. The direct computation method and random selection was used to specify all the PI gains. The direct method proceeds with a decision on eight appropriate negative integers of eigenvalues and then solving a set of eight simultaneous polynomial-equations. All its roots become proper PI gains. The random selection assigns arbitrarily each PI gain to a positive integer. When all the parameters of the induction motor and its mechanical load match with the corresponding nominal values and when some parameters deviate from the corresponding ones, the direct method provides speed responses preferable to those caused by random selection. Five instances are included in simulation. These involve matching between each parameter and the corresponding nominal value, tenfold increase of either rotor resistance, stator resistance, or moment of inertia from the corresponding one, and simultaneously a fourfold increase of rotor resistance, stator resistance, and moment of inertia from the corresponding ones.

Keywords: Parameter of induction motor, vector control, induction motor, eigenvalue.

¹ นักศึกษาปริญญาโท, ² อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

¹ Graduate Student, ² Lecturer of Electrical Engineering, Power Electronic Energy Machines and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 30000

* Corresponding author: Email: cewirote@sut.ac.th

บทนำ

การควบคุมเวกเตอร์โดยตรงและโดยอ้อมของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะแยกการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กและทอร์กออกจากกันได้อย่างอิสระ¹ แผนการควบคุมความเร็วและฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงไม่มีความซับซ้อนและมีหลักการที่คล้ายกับการควบคุมความเร็วและฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ดีซีแบบแยกกระตุ้นการควบคุมความเร็วแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอกมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมและในการขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า การวิเคราะห์ลูปควบคุมชั้นในและลูปควบคุมชั้นนอกแยกออกจากกันอย่างอิสระและการกำหนดความกว้างแถบ (bandwidth) ของลูปควบคุมแต่ละลูป จะนำมาใช้คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์² วิธีการนี้ได้รับความนิยมแต่การเลือกความกว้างแถบคืองานลองผิดลองถูกและต้องพิจารณาสมการของสัญญาณรบกวน

ในทางปฏิบัติเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนโหลดเชิงกลความร้อนจะเกิดขึ้นภายในมอเตอร์ และแท่งตัวนำโรเตอร์และชุดขดลวดสเตเตอร์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจากค่าปกติหรือค่าที่ระบุ³ ในบางกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำอาจจะต้องขับเคลื่อนโหลดเชิงกลที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุ³ การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและโมเมนต์ความเฉื่อยจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็ว เพราะระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์มีค่าไอเกนที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุหรือค่าที่ได้เลือกในขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมค่าความต้านทานและโมเมนต์ความเฉื่อย (J) อาจจะเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุได้ถึง² เท่าหรือมากกว่านั้นคือผลตอบสนองความเร็ว (ω_m) ที่ติดตามความเร็วอ้างอิง (ω_m^*) อาจจะมีค่าผิดพลาด ($\Delta\omega_m$) เพิ่มขึ้น และถ้าค่าความต้านทานและโมเมนต์ความเฉื่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปหรือผิดปรกติระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะไม่สามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ได้

บทความนี้จะพิจารณาระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง ระบบควบคุมนี้มีตัวควบคุมพีไอ⁴ ตัวการเลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่ง่ายและสะดวกที่สุดคือการสุ่มเลือกค่าเกนที่เป็นจำนวนเต็มบวกหรือการปรับจูนแบบลองผิดลองถูก (trialanderror) วิธีอื่นในการเลือกค่าเกนของตัวควบคุมคือการคำนวณค่าเกนโดยตรง⁵ ค่าพารามิเตอร์ที่ระบุของมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกล และค่าไอเกนของระบบควบคุมวงปิด จะนำมาใช้คำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ⁴ ตัวการหาค่าตอบเชิงเลขของระบบสมการไม่เชิงเส้นจะได้รับค่าเกนของตัวควบคุม

พีไอระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีสมรรถนะที่ขึ้นอยู่กับค่าไอเกน การเลือกค่าไอเกนที่มีค่าที่เหมาะสมจะได้รับคำตอบหรือค่าเกนทุกค่าที่มีค่าบวกและระบบควบคุมความเร็ววงปิดให้ผลตอบสนองที่ดีตามความเร็วอ้างอิงได้ดีหรือมีสมรรถนะสูง

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าปกติหรือจากค่าที่ระบุ ผลตอบสนองความเร็วจะมีแนวโน้มของสมรรถนะที่ต่ำลง และมีช่วงระยะเวลาในสถานะชั่วคราวที่ยาวนานขึ้นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่กำลังขับเคลื่อนโหลดเชิงกลอาจจะมีค่าพารามิเตอร์ทุกค่าที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุ มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนโหลดไม่เกินโหลดที่ปกติหรือมอเตอร์ที่ทำงานในสภาวะปกติ จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ภายในขอบเขตหนึ่ง และผู้ผลิตมอเตอร์จะประมาณค่าขอบเขตนี้ แต่ผู้ใช้งานไม่ทราบขอบเขตที่แน่นอนของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ผู้ใช้งานจึงไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อพิจารณาเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกล ผู้ใช้งานจะไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วมากหรือน้อย

บทความนี้จะกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานสเตเตอร์ (R_s) ค่าความต้านทานโรเตอร์ (R_r) และโมเมนต์ความเฉื่อย (J) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญและเปรียบเทียบค่าไอเกนและผลตอบสนองความเร็วของระบบควบคุมวงปิดแบบเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและแตกต่างจากค่าที่ระบุในแต่ละกรณี ตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนที่ได้จากการสุ่มเลือกและได้จากการคำนวณค่าเกนโดยตรงเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ ค่าความต้านทานโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุหรือค่าความต้านทานสเตเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ โมเมนต์ความเฉื่อยจะมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ นอกจากนี้ค่าความต้านทานโรเตอร์ ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และโมเมนต์ความเฉื่อยจะมีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน

บทความนี้มีเนื้อหาที่ประกอบด้วยแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้งาน สมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลที่ใช้งานค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการสุ่มเลือกและได้จากการคำนวณโดยตรงค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ผลการจำลองสถานการณ์

ของระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มีมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและในกรณีที่มอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุการอภิปรายผลการจำลองสถานการณ์ และสรุป

แผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แสดงใน Figure 1 คือแผนการควบคุมทอร์กและฟลักซ์แม่เหล็ก

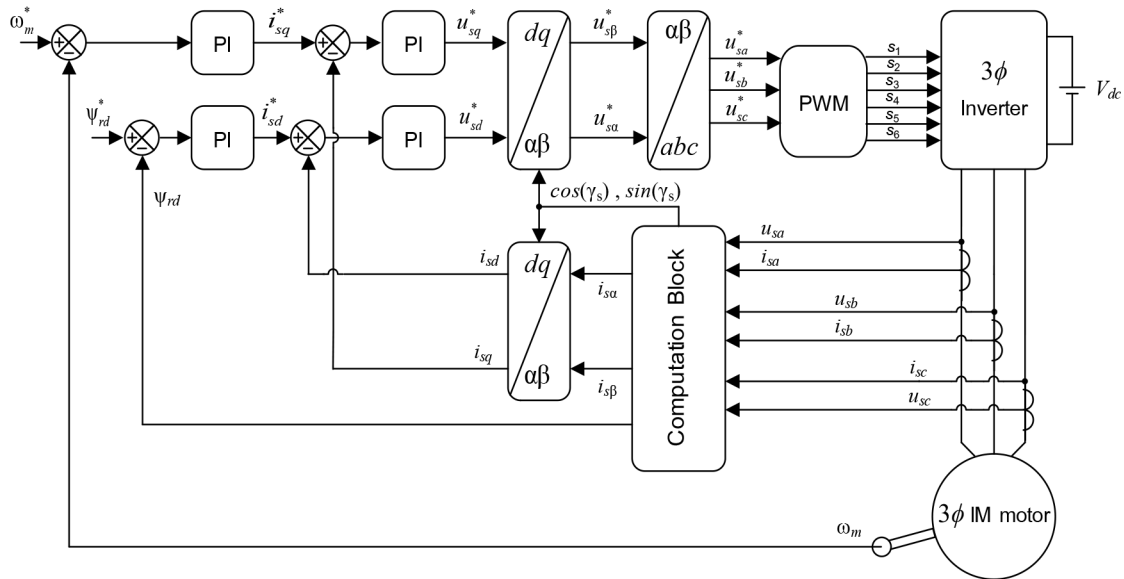


Figure 1 The vector control system of speed of induction motor with inverter supplying stator-voltage

ภายในพร้อมกันที่แยกได้อย่างอิสระที่อยู่ในกรอบอ้างอิงสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (ที่มีแกนตรง d และแกนขวาง q)1 แผนการควบคุมนี้จะเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ดีซีที่มีแปรผันชนิดกระตุ้นแยก ตัวควบคุมความเร็วและตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กคือตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปควบคุมชั้นนอก ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนตรงและแกนขวางคือตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปควบคุมชั้นใน รูปควบคุมชั้นนอกมีการป้อนกลับของความเร็วหรืออัตราเร็วเชิงมุมทางกล (ω) และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd}) และรูปควบคุมชั้นในมีการป้อนกลับของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนตรง (i_{sd}) และแกนขวาง (i_{sq}) ที่อยู่ในกรอบอ้างอิงสนามแม่เหล็กโรเตอร์

ตัวควบคุมความเร็วจะนำความผิดพลาดของความเร็ว ($\Delta\omega = \omega_m^* - \omega_m$) มาคำนวณหากระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนขวางอ้างอิง (i_{sq}^*) ที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิง ($T_e^* = K_T \psi_{rd}^* i_{sq}^*$) ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กจะนำความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็ก ($\Delta\psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \psi_{rd}$) มาคำนวณหากระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนตรงอ้างอิง (i_{sd}^*) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนขวางจะนำความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าแกนขวาง ($\Delta i_{sq} = i_{sq}^* - i_{sq}$) มาคำนวณหาแรงดันสแตเตอร์แกนขวางอ้างอิง (u_{sq}^*) และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนตรงจะนำความ

ผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าแกนตรง ($\Delta i_{sd} = i_{sd}^* - i_{sd}$) มาคำนวณหาแรงดันสแตเตอร์แกนตรงอ้างอิง (u_{sd}^*) แรงดันสแตเตอร์อ้างอิงดังกล่าวคือแรงดันดีซีที่อยู่ในกรอบอ้างอิงสนามแม่เหล็กโรเตอร์การแปลงแกนย้อนกลับจะเปลี่ยนแรงดันสแตเตอร์อ้างอิงที่อยู่ในกรอบอ้างอิงสนามแม่เหล็กไปเป็นแรงดันสแตเตอร์อ้างอิงที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (ที่มีแกนนอน α และแกนตั้ง β) แรงดันสแตเตอร์อ้างอิงที่ได้จากการแปลงแกนคือแรงดันเอชีสองเฟส ($u_{s\alpha}^*, u_{s\beta}^*$) ที่จะเปลี่ยนไปเป็นแรงดันเอชีสองเฟสอ้างอิง ($u_{sa}^*, u_{sb}^*, u_{sc}^*$) การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเอชีสองเฟสอ้างอิงและสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูงจะสร้างสัญญาณพัลส์ 6 สัญญาณที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงหรือการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation) หรือพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 และ S_6) สัญญาณพัลส์ 6 สัญญาณนี้จะบังคับการสวิตช์ของไอจีบีทีที่ตัวที่เชื่อมต่อเป็นอินเวอร์เตอร์สามเฟส การเปิดและปิดของไอจีบีทีแต่ละตัวที่มีรูปแบบแน่นอนจะกำหนดให้อินเวอร์เตอร์แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอชีสองเฟส อินเวอร์เตอร์จะจ่ายแรงดันเอชีสี่ที่มีค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) และความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส กระแสไฟฟ้าเอชีสแตเตอร์สามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ที่ไหลผ่านมอเตอร์จะทำให้เกิด

สนามแม่เหล็กและสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ($T_e = K_T \psi_{rd} i_{sq}$) ที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลให้เกิดการหมุนกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสที่ได้จากการวัดจะเปลี่ยนไปเป็นกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สองเฟส (i_{sa}, i_{sb}) การแปลงแกนจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปเป็นกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์แกนตรงและแกนขวางที่เป็นกระแสไฟฟ้าดีซีและเป็นสัญญาณป้อนกลับ แรงดันเอสเตเตอร์สามเฟส (u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}) ที่ได้จากการวัดจะเปลี่ยนไปเป็นแรงดันสเตเตอร์สองเฟส (u_{sa}, u_{sb}) กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สองเฟสและแรงดันสเตเตอร์สองเฟสที่ได้จากการวัดจะใช้คำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ (ψ_{sa}, ψ_{sb}) และฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{ra}, ψ_{rb}) ที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งตามลำดับ ค่าโคไซน์และค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในการแปลงแกนจะคำนวณได้จาก $\cos(\gamma_s) = (\psi_{ra} / \psi_{rd})$ และ $(\gamma_s) = (\psi_{ra} / \psi_{rd})$ และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะคำนวณได้จาก $\psi_{rd} = \sqrt{\psi_{ra}^2 + \psi_{rb}^2}$

ดังนั้นระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันสเตเตอร์และกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันเอสซีที่มีค่าอาร์เอ็มเอสจำกัดค่าหนึ่งหรือไม่มากกว่าค่ามากที่สุดค่าหนึ่ง

สมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวแปรสถานะ 8 ตัว

เมื่อพิจารณาขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์อ้างอิง (ψ_{rd}^*) เป็นค่าพารามิเตอร์คงที่ ตัวแปรสถานะคือ $\Delta i_{sd}, \Delta i_{sq}, \Delta \psi_{rd}, \Delta \omega_m, \int \Delta i_{sd} d\tau, \int \Delta i_{sq} d\tau, \int \Delta \psi_{rd} d\tau$ และ $\int \Delta \omega_m d\tau$ และอินพุตคือความเร็วอ้างอิง (ω_m^*) ความเร่งอ้างอิง ($\dot{\omega}_m^*$) และโหลดทอร์ก (T_L) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวและมีตัวแปรสถานะ 8 ตัวแปรจะมีสมการปริภูมิสถานะ 5 ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + \Phi + Bu \tag{1}$$

- โดยที่
- x คือเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ
 - A คือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์
 - Φ คือเวกเตอร์การรบกวน
 - B คือเมตริกซ์อินพุต
- และ
- u คือเวกเตอร์ของอินพุต

เวกเตอร์การรบกวนจะเกิดจากการเชื่อมต่อไขว้ (cross-coupling) ของแกนตรงและแกนขวางภายในมอเตอร์เมื่อสมการปริภูมิสถานะมีเวกเตอร์การรบกวน ระบบควบคุมจึงเป็นระบบไม่เชิงเส้น สมการปริภูมิสถานะมีเมตริกซ์

สัมประสิทธิ์ A ที่มีค่าเจาะจงหรือค่าไอเกน^๑ ค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกล ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีสมรรถนะที่สัมพันธ์กับค่าไอเกน^๑ ค่านี้ถ้าค่าไอเกนทุกค่าเป็นจำนวนจริงลบหรือเป็นคู่สังยุคของจำนวนเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ เมื่อความเร็วอ้างอิงและโหลดทอร์กมีค่าคงที่ ($\dot{\omega}_m^* = 0$ และ $T_L = 0$) ความผิดพลาดจะมีแนวโน้มลดลงและลู่เข้าหาศูนย์ในสถานะอยู่ตัว ($\Delta \omega_m(\infty), \Delta \psi_{rd}(\infty), \Delta i_{sq}(\infty), \Delta i_{sd}(\infty) \rightarrow 0$) และระบบควบคุมวงปิดมีจุดสมดุลหรือจุดการทำงานที่ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การรบกวน ความเร็วอ้างอิง และโหลดทอร์ก

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่ระบุที่แสดงในตารางที่ 16 แต่ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนพีและค่าเกนไอที่ไม่ทราบค่า ค่าเกนพีและค่าเกนไอจึงเป็นตัวแปรสมการปริภูมิสถานะจะมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีสมาชิกเป็นนิพจน์ของตัวเลขและตัวแปร เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะให้พหุนามคุณลักษณะที่มีสัมประสิทธิ์ที่เป็นนิพจน์ของตัวเลขและตัวแปรเช่นเดียวกัน แต่สัมประสิทธิ์มีนิพจน์ของตัวเลขและตัวแปรที่ซับซ้อนมากกว่าการเลือกค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นจำนวนจริงลบที่ต้องการจะให้พหุนามคุณลักษณะที่ต้องการการกำหนดให้พหุนามคุณลักษณะทั้งสองมีสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันเท่ากันจะสร้างระบบสมการพหุนามหรือระบบสมการไม่เชิงเส้น 8 สมการที่มีตัวแปร 8 ตัวแปร การหาค่าตอบเชิงเลขแบบวนซ้ำ^{4,7} จากระบบสมการดังกล่าวจะได้รับค่าเกน 8 ค่าของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวนั่นคือค่าไอเกน 8 ค่าจะนำมาใช้คำนวณหา ค่าเกนของตัวควบคุมโดยตรง

Table 1 nominal parameters of motor and load

Parameter	Nominal value
Stator resistance(0.
Rotor resistance(0.
Mutual inductance(69.
Stator inductance(73.
Rotor inductance(71.
Moment of inertia(0.
Load torque(12 N×
Number of poles(4

การสุ่มเลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวที่ทำให้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนทุกตัวที่เป็นจำนวนจริงลบคือการลองผิดลองถูกที่อาจจะใช้เวลาสั้นหรือนานที่ไม่แน่นอน เมตริกซ์สัมประสิทธิ์อาจจะมีค่าไอเกนทุกค่าหรือมีค่าไอเกนบาง

ค่าที่ไม่เป็นค่าที่ต้องการ เมื่อตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรงและมีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการสุ่มเลือก ระบบควบคุมวงปิดแบบเวกเตอร์จะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีสมรรถนะที่แตกต่างกันในกรณีที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์บางค่าแตกต่างจากค่าที่ระบุและเนื่องจากระบบควบคุมวงปิดมีตัวแปรสถานะ 8 ตัวแปรการพิจารณากรณีที่ค่าพารามิเตอร์บางค่าแตกต่างจากค่าที่ระบุจึงมีความน่าสนใจ ถ้าตัวควบคุมพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรงและมอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์บางค่าที่แตกต่างจากค่าที่ระบุ ระบบควบคุมวงปิดอาจจะให้หรือไม่ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการสุ่มเลือก

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอและการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และโหลด

การสุ่มเลือกจะกำหนดให้ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกณฑ์เท่ากันและมีค่าเกณฑ์เท่ากัน ค่าเกณฑ์ที่มีค่าเท่ากับ 8 และค่าเกณฑ์โอมีค่าเท่ากับ 25 ค่าเกณฑ์และค่าเกณฑ์อ้างอิงกล่าวคือค่าเกณฑ์ชุดที่ 1 ที่แสดงใน Table 2 และเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าโอเกณฑ์ชุดที่ 1 ที่แสดงใน Table 3 ค่าโอเกณฑ์ทุกค่าคือจำนวนจริงลบและจำนวนเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ ค่าโอเกณฑ์ 4 ค่าแรกมีตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ค่าโอเกณฑ์ 4 ค่านี้จึงเป็นค่าที่ไม่ต้องการ แต่ค่าโอเกณฑ์ที่เหลืออีก 4 ค่ามีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ การคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมโดยตรงจะเกิดจากการกำหนดให้ค่าโอเกณฑ์ทุกค่าเป็นจำนวนจริงลบที่แตกต่างกันและมีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพเรียงตามลำดับที่แสดงในตารางที่ 34 ค่าโอเกณฑ์ทุกค่านี้คือค่าโอเกณฑ์ที่ต้องการและเป็นค่าโอเกณฑ์ชุดที่ 2 เมื่อมอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ การหาค่าตอบเชิงเลขของระบบสมการพหุนาม 8 สมการและ 8 ตัวแปรจะให้ค่าเกณฑ์และค่าโอเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว ค่าตอบที่ได้รับคือค่าโอเกณฑ์ชุดที่ 2 ที่แสดงใน Table 2 ค่าเกณฑ์ทุกค่ามีค่าบวก

ค่าความต้านทานโรเตอร์อาจจะเพิ่มขึ้นถึง 7 เท่า 8 และในทางปฏิบัติ เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนโหลดเชิงกลมอเตอร์และโหลดจะมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุภายในขอบเขตหนึ่ง แต่ผู้ใช้งานจะไม่ทราบขอบเขตที่ชัดเจนและแน่นอน การพิจารณาความต้านทานโรเตอร์และค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุจะประมาณขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าปกติ และ

ถ้ามอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลในสภาวะปกติการพิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุจะประมาณขอบเขตที่มากกว่าปกติเช่นเดียวกัน เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าโอเกณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม นอกจากนี้การพิจารณาค่าความต้านทานโรเตอร์ ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันจะประมาณขอบเขตที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้

Table 2 PI controller gains in the case of the parameters equal to their nominal values

Gain	The first set	The second set
K_{pd}	8	5.
K_{pq}	8	6.
$K_{p\psi}$	8	66.
$K_{p\omega}$	8	4.
K_{ld}	2	9.
K_{lq}	2	36.
$K_{l\psi}$	2	302.
$K_{l\omega}$	2	40.

Table 3 eigenvalues of coefficient matrix when the parameters match nominal values

Eigenvalue	The first set	The second set
λ	0.	-
λ	0.	-
λ	-	-
λ	0.	-
λ	15.	-
λ	184.	-
λ	-	-
λ	-	-

เมื่อค่าความต้านทานโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรงเมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าโอเกณฑ์ชุดที่ 3 และชุดที่ 4 ที่แสดงใน Table 4 ตามลำดับ

เมื่อค่าความต้านทานสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และตัวควบคุมพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรงเมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าโอเกณฑ์ชุดที่ 5 และชุดที่ 6 ที่แสดงใน Table 5 ตามลำดับ

Table 4 The eigenvalues in the case of R_l larger than its nominal value by ten times

Eigenvalue	The third set	The fourth set
λ	-	-
λ	-	-
λ	-	-
λ	-	-
λ	-	-
λ	-	-
λ	-	-
λ	-	-

Table 5 The eigenvalues in the case of R_s larger than its nominal value by ten times

Eigenvalue	The fifth set	The sixth set
λ	0.	-
λ	0.	-
λ	-	-
λ	0.	-
λ	14.	-
λ	120.	-
λ	-	-
λ	-	-

Table 6 The eigenvalues in the case of J_l larger than its nominal value by ten times

Eigenvalue	The seventh set	The eighth set
λ	0.	-
λ	0.	-
λ	-	-
λ	0.	4.
λ	15.	-
λ	16.	-
λ	-	-
λ	-	-

เมื่อโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ที่เกิดจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรงเมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 7 และชุดที่ 8 ที่แสดงใน Table 6 ตามลำดับ

เมื่อค่าความต้านทานโรเตอร์ ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน และตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ที่เกิดจากการสุ่มเลือกและ

การคำนวณโดยตรงเมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 9 และชุดที่ 10 ที่แสดงใน Table 7 ตามลำดับ

Table 7 The eigenvalues at R_r , R_s , and J_l larger than their nominal values by four times

Eigenvalue	The ninth set	The tenth set
λ	-	-
λ	0.	-
λ	0.	-
λ	-	7.
λ	-	-
λ	50.	-
λ	-	-
λ	-	-

ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีมอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุเมื่อตัวควบคุมพีไอชุดที่มีค่าเกณฑ์ที่ 1 (GainPI1) ค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่แสดงใน Table 3 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองความเร็ว (กราฟเส้นทึบ) ที่ใช้เวลานานในการลู่เข้าหาความเร็วอ้างอิง (กราฟเส้นประ) ที่แสดงใน Figure 2 เมื่อตัวควบคุมพีไอชุดที่มีค่าเกณฑ์ที่ 2 (GainPI2) ค่าไอเกนชุดที่ 2 ที่แสดงใน Table 3 จะมีค่าไอเกนที่ใกล้กับแกนจินตภาพอยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากขึ้นผลตอบสนองความเร็วจึงมีสถานะชั่วครู่ในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากที่แสดงใน Figure 3 และติดตามความเร็วอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว แต่เกิดการพุ่งเกินเล็กน้อยในสถานะชั่วครู่ เพราะผลตอบสนองที่มีความรวดเร็วจะกระตุ้นพลวัตไม่เชิงเส้นของการรั้งความตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกณฑ์ที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็ว (กราฟเส้นประ) มากกว่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้รับจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกณฑ์ที่ 2 (กราฟเส้นทึบ) ที่แสดงใน Figure 4

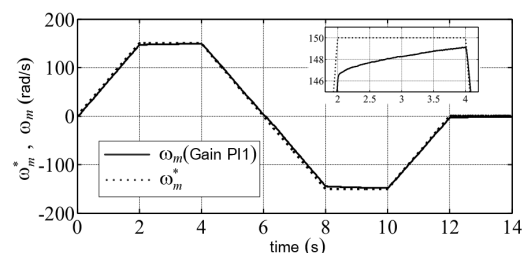


Figure 2 speed reference and speed response caused by the first set of the PI gains and the parameters at nominal values

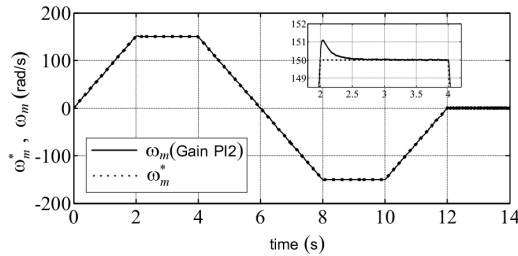


Figure 3 speed reference and speed response due to the second set of the PI gains and the parameters at nominal values

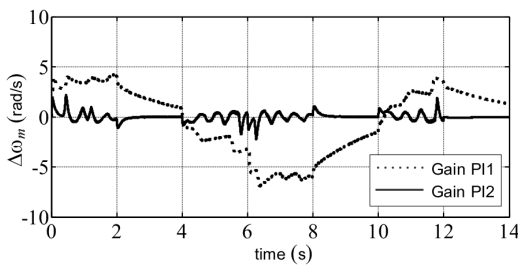


Figure 4 speed errors owing to the first and second gains and the nominal parameters

ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ

1. ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ Rr มีค่าเป็น 10 เท่าของค่าที่ระบุ

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานโรเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 ค่าไอเกนชุดที่ 3 ที่แสดงใน Table 4 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่ใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพที่แสดงใน Table 3 และค่าไอเกนชุดที่ 3 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 5 จึงเหมือนกับผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 2 เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 7 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 ค่าไอเกนชุดที่ 4 ที่แสดงใน Table 4 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่ใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 2 ที่แสดงใน Table 3 และค่าไอเกนชุดที่ 4 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 3 ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 6 มีการพุ่งเกิน

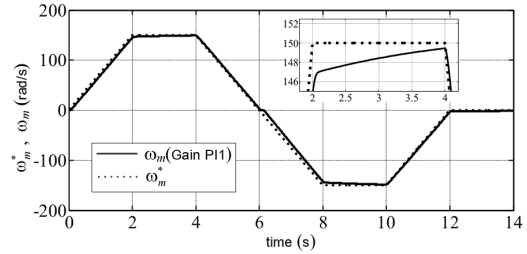


Figure 5 speed reference and speed response thanks to the first PI gains and Rr at the ten times of its nominal value

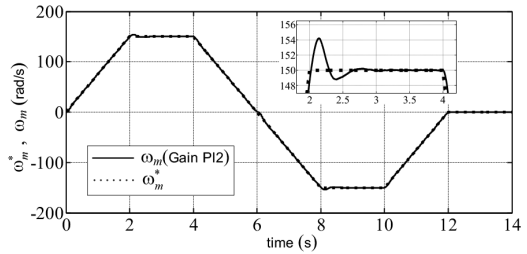


Figure 6 speed reference and speed response caused by the second PI gains and Rr at the ten times of its nominal value

เพิ่มขึ้นและมีการพุ่งต่ำในสถานะชั่วคราว เพราะพลวัตไม่เชิงเส้นของการรั้งความเร็วได้รับการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะใช้ช่วงระยะเวลานานกว่าในการลู่เข้าหาความเร็วอ้างอิง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 7 (กราฟเส้นทึบ) จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วมากกว่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2

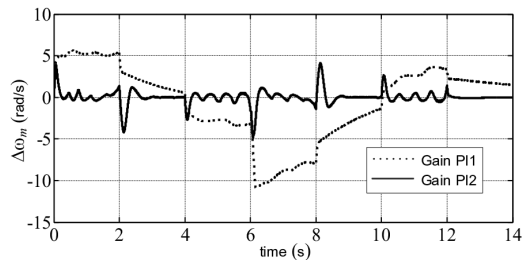


Figure 7 speed errors due to the first and second PI gains and Rr at the ten times of its nominal value

2. ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ Rs มีค่าเป็น 10 เท่าของค่าที่ระบุ

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานสเตเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่า

เกณฑ์ที่ 1 ค่าไอเกณฑ์ที่ 5 ที่แสดงใน Table 5 จะมีค่าไอเกณฑ์ 4 ค่าแรกที่เป็นคู่สังยุคของจำนวนเชิงซ้อน 2 คู่ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพของระนาบเชิงซ้อน และค่าไอเกณฑ์ที่ 5 มีค่าไอเกณฑ์ที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 8 จึงเหมือนกับผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 2 เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 10 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ 2 ค่าไอเกณฑ์ที่ 6 ที่แสดงใน Table 5 จะมีค่าไอเกณฑ์ 4 ค่าแรกที่ไม่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ และมีค่าไอเกณฑ์ที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 9 มีการพุ่งเกินที่ใกล้เคียงกับการพุ่งเกินของผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 3 และมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่นานกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 10 (กราฟเส้นทึบ) จะมากกว่าความผิดพลาดที่แสดงใน Figure 4 (กราฟเส้นทึบ) ค่าเกณฑ์ที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วมากกว่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้รับจากค่าเกณฑ์ที่ 2

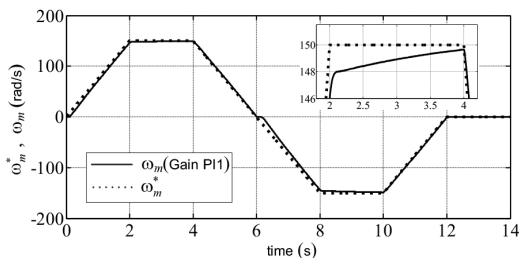


Figure 8 speed reference and speed response owing to the first PI gains and Rs at the ten times of its nominal value

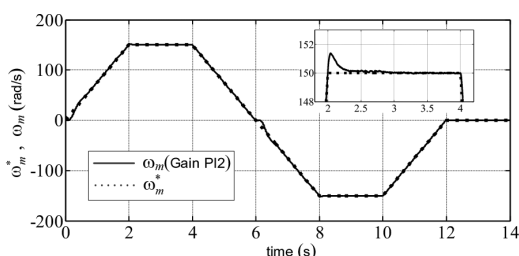


Figure 9 speed reference and speed response thanks to the second PI gains and Rs at the ten times of its nominal value

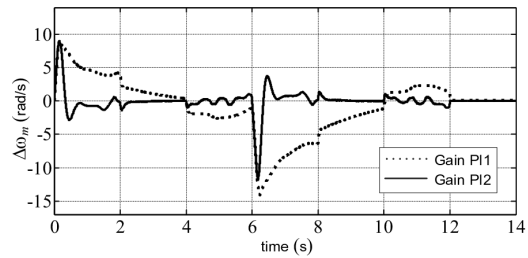


Figure 10 speed errors caused by the first and second PI gains and Rs at the ten times of its nominal value

ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งาน มีแผนการคำนวณฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่ใช้ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจะนำมาใช้ในการแปลงพิกัด การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานสเตเตอร์จะมีผลกระทบต่อความถูกต้องของการคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ผลตอบสนองจึงมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น

3. ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีค่าเป็น 10 เท่าของค่าที่ระบุ

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ 1 ค่าไอเกณฑ์ที่ 7 ที่แสดงใน Table 6 จะมีค่าไอเกณฑ์ 4 ค่าแรกที่ใกล้เคียงกับค่าไอเกณฑ์ 4 ค่าแรกของค่าไอเกณฑ์ที่ 1 ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพที่แสดงใน Table 3 และค่าไอเกณฑ์ที่ 7 มีค่าไอเกณฑ์ที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ แต่ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 11 มีความแตกต่างจากผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 2 เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วแสดงใน Figure 13 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ 2 ค่าไอเกณฑ์ที่ 8 ที่แสดงใน Table 6 จะมีค่าไอเกณฑ์ 5 ค่าแรกที่ไม่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ แต่ค่าไอเกณฑ์ 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจินตภาพมากกว่าขนาดของส่วนจริง และค่าไอเกณฑ์ที่ 8 มีค่าไอเกณฑ์ที่เหลืออีก 3 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 3 ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 12 มีการพุ่งเกินมากกว่า มีการพุ่งต่ำ มีการแกว่ง และมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน เพราะค่าไอเกณฑ์ที่ 8 มีค่าไอเกณฑ์ 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนเด่น ผลตอบสนองมีแนวโน้มเข้าสู่หาความเร็วอ้างอิง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 13 (กราฟเส้นทึบ) จะมากกว่าความผิดพลาดที่แสดงใน Figure 4

(กราฟเส้นทึบ) ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วมากกว่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2

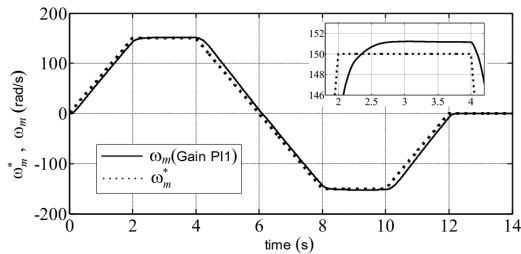


Figure 11 speed reference and speed response due to the first PI gains and J at the ten times of its nominal value

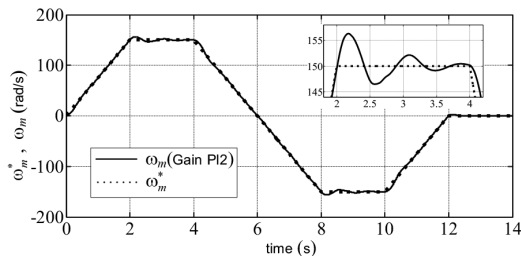


Figure 12 speed reference and speed response owing to the second PI gains and J at the ten times of its nominal value

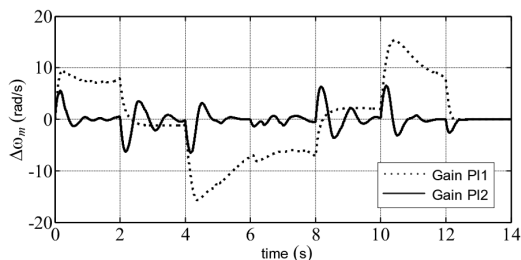


Figure 13 speed errors thanks to the first and second PI gains and J at the ten times of its nominal value

4. ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มี Rr, Rs และ J มีค่าเป็น 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานโรเตอร์และค่าความต้านทานสเตเตอร์เท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน และมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 ค่าไอเกนชุดที่ 9 ที่แสดงใน Table 7 จะมีค่าไอเกน 4

ค่าแรกทีใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพที่แสดงใน Table 3 และค่าไอเกนชุดที่ 9 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ แต่ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 14 มีความแตกต่างจากผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 2 เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 16 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 ค่าไอเกนชุดที่ 10 ที่แสดงใน Table 7 จะมีค่าไอเกน 5 ค่าแรกที่ไม่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ แต่ค่าไอเกน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจินตภาพมากกว่าขนาดของส่วนจริง และค่าไอเกนชุดที่ 10 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 3 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่แสดงใน Figure 3 ผลตอบสนองความเร็วที่แสดงใน Figure 15 มีการพุ่งเกินมากกว่า มีการพุ่งต่ำ มีการแกว่ง และมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน เพราะค่าไอเกนชุดที่ 10 มีค่าไอเกน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนเด่น ผลตอบสนองมีแนวโน้มลู่ออกหาความเร็วอ้างอิง ความผิดพลาดของความเร็วที่แสดงใน Figure 16 (กราฟเส้นทึบ) จะมากกว่าความผิดพลาดที่แสดงใน Figure 4 (กราฟเส้นทึบ) ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วมากกว่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2

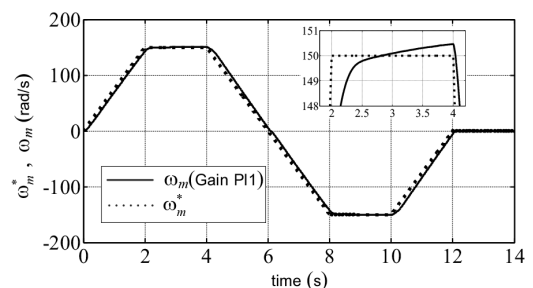


Figure 14 speed reference and speed response caused by the first PI gains and Rr, Rs, J at the four times of nominal values

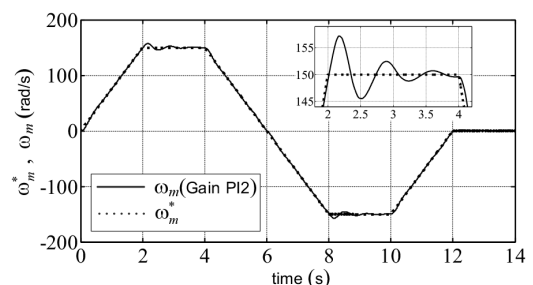


Figure 15 speed reference and speed response due to the second PI gains and Rr, Rs, J at the four times of nominal values

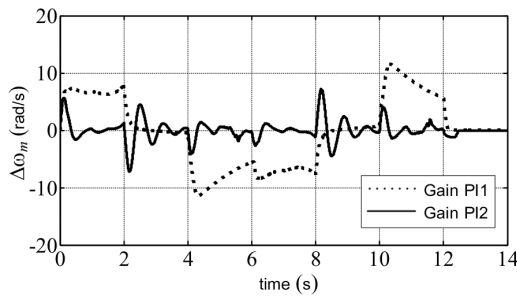


Figure 16 speed errors owing to the first and second PI gains and R_r , R_s , J at the four times of their nominal values

5. ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเป็น 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน และมอเตอร์หมุนในสภาวะไร้โหลด

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกินชุดที่ 1 (Gain PI1) และมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีโหลดทอร์ค ($T_L = 0$) ด้านทานการหมุนหรือมอเตอร์หมุนในสภาวะไร้โหลด (no-load condition) หลังจากความเร็วอ้างอิง (กราฟเส้นประ) ที่แสดงใน Figure 17 มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงและมีค่าคงที่ที่ไม่เป็นศูนย์ ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็ว (กราฟเส้นทึบ) ที่มีการพุ่งเกินในช่วงระยะเวลายาวนาน และมีแนวโน้มของการเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกินชุดที่ 2 (Gain PI2) ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็ว (กราฟเส้นทึบ) ที่แสดงใน Figure 18 ที่มีการพุ่งเกินสูงกว่าเล็กน้อย แต่การพุ่งเกินเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น และสถานะชั่วคราวมีช่วงระยะเวลาสั้นกว่า ผลตอบสนองจะลู่เข้าหาความเร็วอ้างอิง (กราฟเส้นประ) ในสถานะอยู่ตัว และผลตอบสนองจะติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วอ้างอิงได้ดีกว่า เพราะตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกินชุดที่ 2 ให้ความผิดพลาดของความเร็ว (กราฟเส้นทึบ) ที่แสดงใน Figure 19 น้อยกว่าความผิดพลาดของความเร็ว (กราฟเส้นประ) ที่ได้รับจากค่าเกินชุดที่ 1

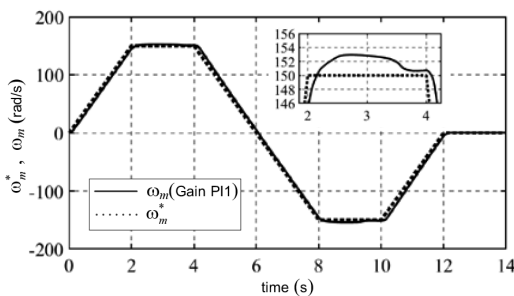


Figure 17 speed reference and speed response thanks to the first PI gains and R_r , R_s , J at the four times of their nominal values under no-load condition

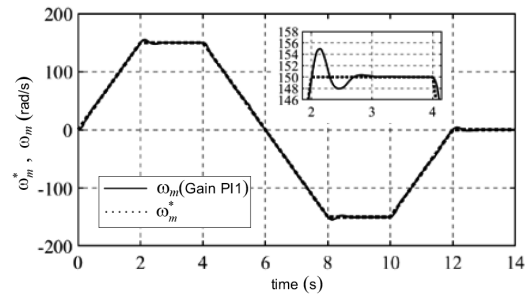


Figure 18 speed reference and speed response caused by the second PI gains and R_r , R_s , J at the four times of their nominal values under no-load condition

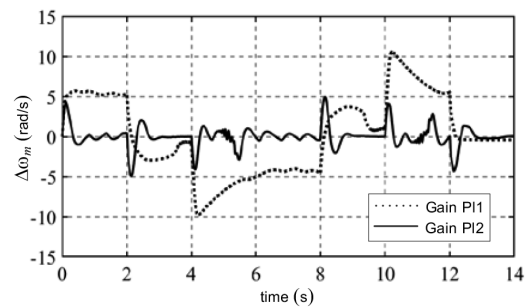


Figure 19 speed errors due to the first and second PI gains and R_r , R_s , J at the four times of their nominal values under no-load condition

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนโหลดเชิงกลและมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนในสภาวะไร้โหลด ตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกินที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรง จะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าความผิดพลาดของผลตอบสนองความเร็วที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกินที่ได้รับจากการสุ่มเลือก

สมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการคำนวณค่าเกินโดยตรงและการสุ่มเลือกค่าเกิน

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและแตกต่างจากค่าที่ระบุ เมื่อความเร็วอ้างอิงต้องการให้มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น ความเร็วที่ลดลง และหมุนกลับทิศทาง ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวที่มีค่าเกินที่ได้จากการคำนวณโดยตรงจะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และถ้าความเร็วอ้างอิงต้องการให้มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วคงที่ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานมากขึ้น ผลตอบสนองความเร็วจะมีแนวโน้มลู่เข้าหาความเร็วอ้างอิง เพราะเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนที่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุดอยู่ห่างจากแกน

จินตภาพ และถ้าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนบางค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนเด่น ค่าไอเกนจะมีขนาดของส่วนจินตภาพที่มากกว่าขนาดของส่วนจริงน้อยกว่า 2 เท่า และผลตอบสนองความเร็วจะมีการพุ่งเกินที่ไม่สูงมากในสถานะชั่วคราว เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนที่ได้จากการสุ่มเลือก ผลตอบสนองความเร็วที่มีความผิดพลาดมากกว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นสูงกว่า เพราะเมตริกซ์สัมประสิทธิ์อาจจะมีค่าไอเกนบางค่าที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมาก การสุ่มเลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวที่ทำให้ค่าไอเกนทุกค่าอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ คืองานที่ใช้ระยะเวลายาวนานและไม่มีความแน่นอน

สรุป

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว จะมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกน 8 ค่า เมื่อมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงและแตกต่างจากค่าที่ระบุ ค่าไอเกนบางค่าหรือทุกค่าจะเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมหรือจากค่าที่ได้เลือกในขั้นตอนการคำนวณโดยตรง การเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนจะมีผลกระทบต่อผลตอบสนองความเร็วที่มีแนวโน้มของความผิดพลาดมากขึ้น การนำค่าไอเกน 8 ค่ามาคำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมโดยตรงและค่าไอเกนที่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุดมีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ระบบควบคุมจะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า แต่การเลือกค่าไอเกนทุกค่าที่มีค่าลบที่เหมาะสมเท่านั้นจะได้รับค่าเกนทุกค่าของตัวควบคุมที่มีค่าบวก การสุ่มเลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวอาจจะได้รับค่าไอเกนบางค่าที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมาก และระบบควบคุมจะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีความผิดพลาดมากกว่า

เอกสารอ้างอิง

1. Abu Rub H, Iqbal A, Guzinski J. High performance control of AC drives with MATLAB/SIMULINK models. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons; 2012.
2. Ohishi K, Hayasaka E, Nagano T, Harakawa M, Kanmachi T. High-performance speed servo system considering voltage saturation of a vector-controlled induction motor. IEEE Trans Ind Electron 2006 Jun;53(3):795-802.
3. Sul SK. Control of electric machine drive systems. New Jersey, USA: John Wiley & Sons; 2011.
4. กุลพงษ์ บุญมาวงศ์, วิโรจน์ แสงธงทอง. การเขียนโปรแกรมเชิงสัญลักษณ์ที่ใช้หาค่าตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปร. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41 (Volume 2). 21-23 พฤศจิกายน 2561; โรงแรมสุนีย์แกรนด์. อุบลราชธานี: หน้า 282-5.
5. กุลพงษ์ บุญมาวงศ์, วิโรจน์ แสงธงทอง. สมการปริภูมิสถานะของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัว. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (Volume II). 15-17 พฤศจิกายน 2560; โรงแรมเดอะชาयน์. บางละมุง, ชลบุรี: หน้า 476-9.
6. Hydro-Quebec TransEnergie Technologies. SimPowerSystems for use with Simulink: user's guide version 3. Natick, MA: The MathWorks; 2003.
7. Lopez CP. MATLAB symbolic algebra and calculus tools: hands-on MATLAB training and exercises. New York, USA: Springer; 2014. (MATLAB solutions series). 8. Tang J, Yang Y, Diao L, Chen J, Chang Y, Liu Z. Parameter identification of induction motors for railway traction applications. In: Proceedings of the 10th Annual 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE); 2018 Sep 23-27; Portland, OR, USA; p. 284-8.