



รายงานการวิจัย

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ที่เหมาะสม
โดยใช้ระบบควบคุมกระแสฟัซซี่

**A Vector Controlled Induction Motor Drive with
Fuzzy Current Controller**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ที่เหมาะสม
โดยใช้ระบบควบคุมกระแสฟิชซี

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันท์ อุ่นศิริไธย์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2544

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2547

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2544 และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอบรมส่งเสริมเป็นอย่างดี และที่สำคัญขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยสำหรับการสนับสนุนและกำลังใจอันดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

บทคัดย่อภาษาไทย

การเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยการควบคุมที่มีสมรรถนะสูง อย่างเช่น การควบคุมเวกเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนากันมากขึ้น การควบคุมแบบลูกระแส เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมและโดยมากจะใช้เป็นการควบคุม PI ประกอบภายในทั้งในระบบที่เป็นแบบอนาล็อกและดิจิทัล ยังไม่มีการนำการควบคุมแบบฟิชซีเข้ามาใช้งานในส่วนนี้ ดังนั้น การพัฒนาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ระบบควบคุมฟิชซี จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาปัญหาและสร้างรูปแบบการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากโครงสร้างจริงเพื่อนำมาใช้ปรับแต่งระบบควบคุม ให้การควบคุมมีความถูกต้องและแม่นยำ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Development in introduction motor effectiveness could be done by high performance controller such as vector control that has been used world wide and developed. Closed loop control system is one method that PI control system composed inside including analogue and digital system, has not used fuzzy control system yet. Thus developments of vector control induction motor using fuzzy control system was studied to perform mathematics analysis from structure improve control system that is precise and accurate.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
แหล่งที่มาของข้อมูล	3
ระเบียบวิธีวิจัย	3
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
อภิปรายผล	13
บทที่ 4 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	16
บรรณานุกรม	17
ประวัติผู้วิจัย	20

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 FVSC rule.	8
ตารางที่ 2 SCIM parameters	13

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 โมเดล Simplified field oriented ของระบบ SCIM.	4
รูปที่ 2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ current regulated indirect field-oriented.	5
รูปที่ 3 การปรับฟังก์ชัน membership ด้วย $-m_y$ และ $-m_x$	7
รูปที่ 4 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบ Fuzzy PI.	8
รูปที่ 5 โครงสร้างของบล็อกไดอะแกรมของ observer	10
รูปที่ 6 การฝึกหัดของตัวสังเกตความเร็ว neural network (speed observer neural network)	11
รูปที่ 7 รูปลักษณะของตัวสังเกตความเร็ว ANN (ANN-based speed observer) สำหรับสถานะที่ความเร็วสูงและต่ำ	12
รูปที่ 8 การตอบสนองเป็นขั้นตอนของ SCIM สำหรับค่าที่แตกต่างกันของ m_y และ m_x : $[m_y, m_x] = [10\ 5]$ (dotted), $[5\ 5]$ (dash-dot), $[5\ 10]$ (dashed)	14
รูปที่ 9 การตอบสนองของระบบขับเคลื่อนภายใต้ความเร็วอ้างอิง	14
รูปที่ 10 การตอบสนองของความเร็วจากการเปลี่ยน Load	15

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยการควบคุมที่มีสมรรถนะสูง อย่างเช่น การควบคุมเวกเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนากันมากขึ้น การควบคุมแบบลูป กระแส เป็นวิธีหนึ่งที่นิยม และโดยมากจะใช้เป็นการควบคุม PI ประกอบภายในทั้งในระบบที่เป็นแบบ อนุลอกและดิจิตอล ยังไม่มีการนำการควบคุมแบบฟัซซี่เข้ามาใช้งานในส่วนนี้ ดังนั้นการพัฒนาการควบคุม มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ระบบควบคุมกระแสฟัซซี่ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาปัญหา และสร้างรูปแบบการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากโครงสร้างจริงเพื่อนำมาใช้ปรับแต่งระบบควบคุม ให้การ ควบคุมมีความถูกต้องและแม่นยำ

มอเตอร์แบบ AC เป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบโพรงกระรอก (squirrel-cage induction motor; SCIM) มีข้อดีคือ โครงสร้างง่ายไม่สลับซับซ้อน เชื้อถือได้ ราคาถูก และไม่มีค่าบำรุงรักษา แต่เมื่อนำไปใช้ใน อุตสาหกรรม ระบบควบคุมมีปัญหาเนื่องจากมอเตอร์แบบนี้มีความเป็น non-linear สูง และมีตัวแปรมาก โดยเฉพาะ ความต้านทานของ rotor ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการทำงาน

การควบคุมสนามแม่เหล็กแบบมีทิศทาง (Field orientation control; FOC) หรือ การควบคุมเวกเตอร์ ของเครื่องกลเหนี่ยวนำ ที่ไม่มีกลไกการเกี่ยวโยงกันระหว่างทอร์คและฟลักซ์ จะก่อให้เกิดการควบคุมแบบ อิสระของทอร์คและฟลักซ์ เหมือนกับการกระตุ้นมอเตอร์แบบ DC แบบ แยกออกจากกัน วิธีการของ FOC น่าสนใจแต่มีข้อเสียคือมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ มอเตอร์ เช่น ค่าคงที่ของโรเตอร์ และการวัดฟลักซ์ ที่ผิดพลาด หรือการประมาณการที่ระดับความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการ ควบคุมแบบปกติ คือ PID ที่ไม่สามารถที่จะรักษาการทำงานที่ดีได้ภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์

เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการศึกษาการผสมผสานกันของ artificial intelligent control tools กับเทคนิคด้านการ ควบคุมแบบเดิม หลักการที่ใช้คือนำ Fuzzy และ neural networks มาใช้ในกรณีที่มี unknown parameters และ มีความไม่แน่นอนใน plant parameters ทำให้สามารถจัดการโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และ ก่อให้เกิดการพัฒนาความมั่นคงของระบบควบคุม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. จัดทำโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ โดยใช้ระบบควบคุมกระแส
2. จัดทำโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ โดยใช้ระบบควบคุมกระแสแบบฟลิกซ์

ขอบเขตของการวิจัย

ดำเนินการวิจัยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้ข้อมูลที่มีอยู่เป็นพื้นฐาน และจัดหาข้อมูลในส่วนที่เป็นมาตรฐานในการ โปรแกรม

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

เพิ่มศักยภาพของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ โดยใช้ระบบควบคุมกระแสแบบทั่วไป ให้สามารถใช้ระบบควบคุมกระแสฟลิกซ์ และสามารถนำเทคโนโลยีการปรับแต่งให้ได้ค่าที่เหมาะสมเข้ามาใช้งาน สามารถใช้เทคโนโลยีได้อย่างเหมาะสม ลดการนำเข้าเทคโนโลยี

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

แหล่งที่มาของข้อมูล

ได้จำลองข้อมูลจากข้อมูลจริง

ระเบียบวิธีวิจัย

มีการออกแบบระบบควบคุมโดยนำเอาระบบควบคุมกระแสพื้นฐาน (Basic fuzzy logic controller, FLC) ชนิด VSC (Variable structure controller) ซึ่งมีความเสถียรและมีความคงที่ การออกแบบและพัฒนา ระบบควบคุมใช้การอ่านข้อมูลตามกฎของ IF-THEN และใช้เป็นชุดข้อมูลโครงสร้างระบบควบคุม ซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงตาม process state

ได้มีการประเมินระบบควบคุมที่ออกแบบโดยใช้ Simulation ภายใต้เงื่อนไข operating ต่างๆ ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ และผลการประเมินได้แสดงถึงระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่มีความสามารถของระบบควบคุมที่พัฒนา มีความคงที่และเสถียร

Induction equation

โมเดลไดนามิก $d-q$ ของ SCIM ซึ่งมี frame fix ของ strator กำหนดโดย Trzynadlowski ในปี 2537

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{1}{L_\sigma^2} \left(\begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega L_m^2 & R_r L_m & \omega L_r L_m \\ -\omega L_m^2 & -R_s L_r & -\omega L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega L_s L_m & -R_r L_s & -\omega L_s L_m \\ \omega L_s L_m & R_s L_m & \omega L_s L_m & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (1)$$

ที่ซึ่ง

$$L_\sigma = \sqrt{L_s L_r - L_m^2}$$

ทอร์คของสนามแม่เหล็กคือ

$$T_e = \frac{2pL_m}{3L_r} (i_{qs}^s \Phi_{dr}^s - i_{dr}^s \Phi_{qr}^s) \quad (2)$$

ที่ซึ่ง

$$\Phi_{ds}^s = L_r i_{dr}^s + L_m i_{ds}^s, \quad \Phi_{qs}^s = L_r i_{qr}^s + L_m i_{qs}^s \quad (3)$$

คือส่วนประกอบของโรเตอร์ฟลักซ์แสดงในรูปของ Stator reference frame

หลักการของ Field orientation บนพื้นฐานของเงื่อนไขดังต่อไปนี้ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\Phi_{qr}^e = 0, \quad \Phi_{dr}^e = \text{constant} \quad (4)$$

ดังนั้นสมการรับรอง field orientation แสดงในรูปของ

$$i_{ds}^* = \frac{1 + T_r s}{L_m} \Phi_{dr}^{e*}, \quad i_{ds}^* = \frac{T_e^*}{K_T \Phi_{dr}^{e*}} \quad (5)$$

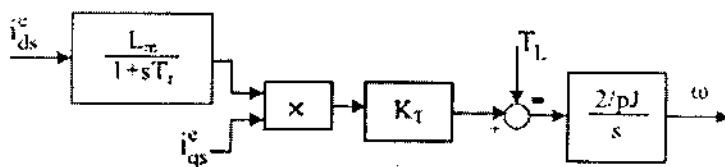
ที่ซึ่ง $T_r = L/R_r$ คือ rotor time constant

ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ เครื่องมือเหนี่ยวนำถูกเปลี่ยนรูปเป็น linear current หรือ torque inverter ดังนี้

$$T_e = K_T \Phi_{dr}^e i_{qs}^e \quad (6)$$

ดังนั้นโรเตอร์ทอร์กและฟลักซ์อาจถูกควบคุมผ่าน i_{qs} และ i_{ds} ตามลำดับ ทอร์กอ้างอิงคือ T_e^* ซึ่งเกิดจาก speed error ของตัวควบคุม ขณะที่ฟลักซ์อ้างอิงคือ Φ_{dr}^* คงที่สำหรับแต่ละจุด operating (operating point)

การออกแบบตัวควบคุม โมเดล Reduced-order ของ SCIM แสดงดังรูปที่ 1.



รูปที่ 1. โมเดล Simplified field oriented ของระบบ SCIM.

T_L คือ disturbance torque, state space กำหนดได้จาก

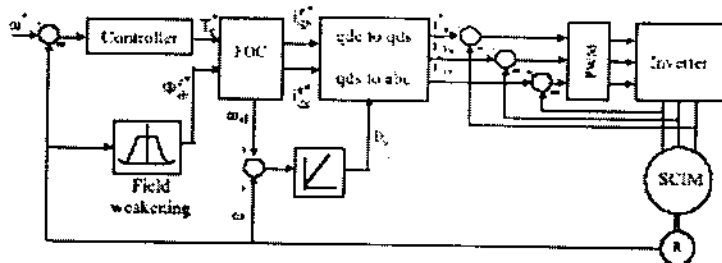
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -T_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_T'/T_r \end{bmatrix} i_{qs}^e \quad (7)$$

ที่ซึ่ง $x_1 = \omega$, $x_2 = d\omega/dt$ และ

$$K_T = \frac{3pL_m}{4L_r}, \quad K_T' = \frac{2}{pJ} L_m K_T i_{ds}^e \quad (8)$$

การออกแบบตัวควบคุมความเร็ว (Speed Controller Design)

แผนผังของการควบคุมกระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำ PWM ด้วย indirect field-orientation แสดงดังรูปที่ 2 และแสดงว่า field-oriented control block รับทอร์คจาก ตัวควบคุมความเร็ว และฟลักซ์จาก field weakening block นอกจากนี้จากตารางคำนวณสำหรับ field weakening ฟลักซ์ถูกสมมุติให้มีค่าคงที่เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ระดับต่ำกว่า rated speed, และถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เมื่อทำงานเร็วกว่า rated speed



รูปที่ 2. การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ current regulated indirect field-oriented.

บล็อกของ FOC ทำหน้าที่คำนวณ slip และให้ค่า i_{qs}^e, i_{ds}^e การแปรรูปเกิดขึ้นภายใน qde ถึง abc transformation block, แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$qde \rightarrow qds \begin{cases} i_{qs}^e = i_{qs}^e \cos \theta_s + i_{ds}^e \sin \theta_s, \\ i_{ds}^e = -i_{qs}^e \sin \theta_s + i_{ds}^e \cos \theta_s \end{cases} \quad (9)$$

$$i_{pls} \rightarrow abc \begin{cases} i_{as}^* = i_{qs}^* \\ i_{bs}^* = -\frac{1}{2}i_{qs}^* - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^* \\ i_{cs}^* = -\frac{1}{2}i_{qs}^* + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^* \end{cases} \quad (10)$$

ซึ่ง θ_s คือผลรวมของ slip และ rotor angles

นอกจากนี้มีการใช้แหล่งกระแส Sinusoidal ของตัวแปร magnitude และความถี่ในการเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของ PVM inverter platform ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการยืดระยะเวลาของ simulation ที่เกิดจากการปรับเปลี่ยน PWM

Fuzzy Variable Structure Control (FVSC)

แนวทางของ VSC คือเปลี่ยนโครงสร้างการควบคุมของ switching surface แต่ละด้าน ตามการกำหนดของ switching function ลักษณะที่ดีของ VSC คือภายใต้เงื่อนไขใด ๆ ระบบมีการตอบสนองด้วย sliding mode บน switching surface และเป็นระบบที่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า parameters และการรบกวนอื่น ๆ

กฎการควบคุมของ Variable Structure Systems (VSS) คือ

$$\mu = -K \operatorname{sgn}(S), \quad (11)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ คือ sign function และ S คือ switching function ซึ่งกำหนดโดย

$$S = f^T x. \quad (12)$$

เมื่อ $S = 0$, แสดง switching surface และเกิด dynamic ที่ต้องการ

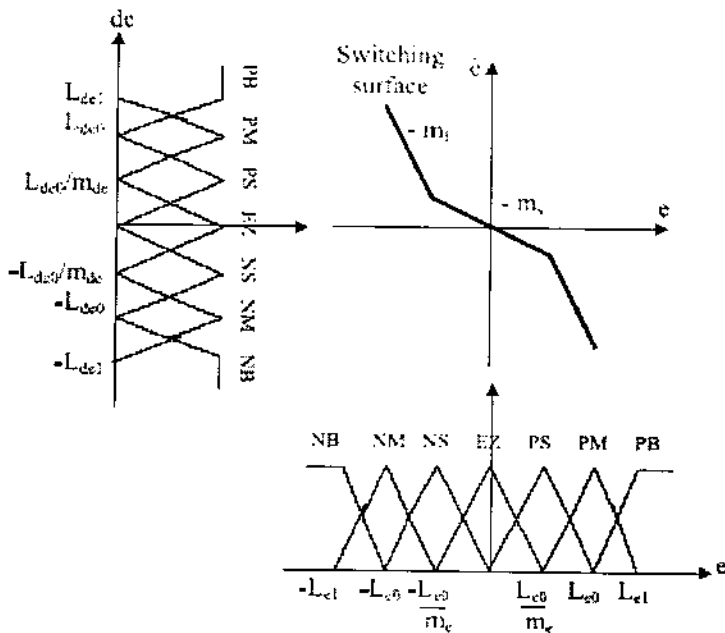
จากกฎของฟัซซี่

$$R_i : \text{IF } A_i \text{ AND } B_i \text{ THEN } C_i \quad (13)$$

อาจแปลความหมายเป็น โครงสร้างควบคุม (control structure) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะของระบบ ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซี่ (fuzzy control) สามารถถูกมองเป็นชุดของตัวแปรโครงสร้างควบคุม(variable structure controller)

กำหนดให้กลศาสตร์การเคลื่อนไหว (dynamics) ของระบบควบคุมให้ในรูปแบบของ switching surface ดังแสดงในรูปที่ 3

ถ้า error มีเส้นกราฟเข้าใกล้ switching surface เปลี่ยนแปลงตามความชัน $-m_f$ และ $-m_s$ สัมพันธ์กับความเร่งและช้าตามลำดับ



รูปที่ 3 การปรับฟังก์ชัน membership ด้วย $-m_f$ และ $-m_s$

จากรูปที่ 3 ความชันของทางโคจร error ได้จาก

$$m_s = \frac{L_{de0}m_e}{L_{e0}m_{de}}$$

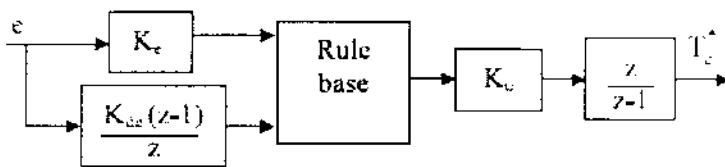
$$m_f = \frac{L_{de0} - \frac{L_{de0}}{m_{de}}}{L_{e0} - \frac{L_{e0}}{m_e}} = \frac{L_{de1} - \frac{L_{de1}}{m_{de}}}{L_{e1} - \frac{L_{e1}}{m_e}} \quad (14)$$

โดยการกำหนดค่าที่เหมาะสมของ m_f และ m_g และสมมุติช่วงของสัญญาณ error $\{L_e, m_e\}$ ฟังก์ชันซึ่งสัมพันธ์กับ error จะมีการเปลี่ยนแปลงของ triangular shape ซึ่งถูกปรับโดยสมการดังต่อไปนี้

$$m_{dc} = \frac{L_{de0} m_e}{m_g L_{e0}}$$

$$L_{de0} = m_f L_{e0} - (m_f - m_g) \frac{L_{e0}}{m_e}, \quad i = 0, 1. \tag{15}$$

โครงสร้างตัวควบคุมเป็น proportional-Integral (PI) และแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4. โครงสร้างของระบบควบคุมแบบ Fuzzy PI.

ในที่นี้ $K_p = K_c R(K_d)$ และ $K_i = K_c R(K)$ เป็น proportional และ integral gains และ $R(\cdot)$ ถูกกำหนดโดยกฎพื้นฐานตัวควบคุมดังสรุปในตารางที่ 1. ที่ซึ่ง NB (Negative big), NM(Negative Medium), NS (Negative Small), Z (Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), และ PB(Positive Big) คือ linguistic variables มีการใช้วิธี Max-min inference และ defuzzification ซึ่งเป็นพื้นฐานของวิธีจุดกึ่งกลางของพื้นที่ (centre of area method)

ตารางที่ 1. FVSC rule.

		← e →						
		NB	NM	NS	EZ	PS	PM	PB
↑	PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB
	PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
de	EZ	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
↓	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z

การออกแบบการสังเกตความเร็วมอเตอร์ (Design speed observer)

ในตัวควบคุมมอเตอร์แบบ closed-loop มักจะมีตัว rotational transducer เพื่อวัดความเร็วของสัญญาณ feedback (feedback signal) ตัว sensor เหล่านี้ ทำให้ระบบมีความเสถียรลดลงเมื่ออยู่ใน สิ่งแวดล้อมที่ขัดแย้งกัน (hostile environment) และทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบมากขึ้น การศึกษาในปัจจุบันได้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบระบบขับเคลื่อนที่ปราศจาก sensor

การออกแบบตัววัดความเร็ว (speed estimator) โดยอาศัยพื้นฐานของ neural networks แสดงดังสมการต่อไปนี้

เริ่มต้นด้วยสมการของฟลักซ์คือ

$$\Phi_s^s = L_s i_s^s + L_m i_r^s, \quad \Phi_r^s = L_m i_s^s + L_r i_r^s. \quad (16)$$

โดยมีค่า Φ_s^s และ i_r^s คำนวณได้จากสมการ

$$\Phi_s^s = \frac{L_m}{L_r} \Phi_r^s + \sigma L_s i_s^s, \quad i_r^s = \frac{1}{L_r} (\Phi_r^s - L_m i_s^s). \quad (17)$$

แทนค่า Φ_s^s และ i_r^s ในสมการ drive voltage จะได้

$$V_s^s = R_s i_s^s + s \Phi_s^s, \quad V_r^s = R_r i_r^s + (s - j\omega) \Phi_r^s. \quad (18)$$

ดังนั้น

$$s \begin{bmatrix} \Phi_{dr}^s \\ \Phi_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \left(\begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + s\sigma L_s & 0 \\ 0 & R_s + s\sigma L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \right). \quad (19)$$

$$s \begin{bmatrix} \Phi_{dr}^s \\ \Phi_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{1}{T_r} \left(L_m \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & \omega T_r \\ -\omega T_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr}^s \\ \Phi_{qr}^s \end{bmatrix} \right) \quad (20)$$

สมการดังกล่าว(19 และ 20) แสดงถึงตัวสังเกตฟลักซ์ของโรเตอร์ (rotor flux observer) และถูกเรียกว่า voltage model และ current model ตามลำดับ

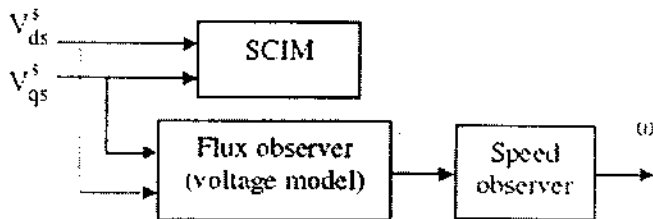
Rotor flux amplitude และ phrase คือ

$$\Phi_r = \sqrt{\Phi_{dr}^{s2} + \Phi_{qr}^{s2}} \text{ and } \theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{qr}^s}{\Phi_{dr}^s} \right) \quad (21)$$

เมื่อทำการ สมการอนุพันธ์ และแทนค่า current model ทำให้ได้ความเร็วของไครฟ์ (drive)

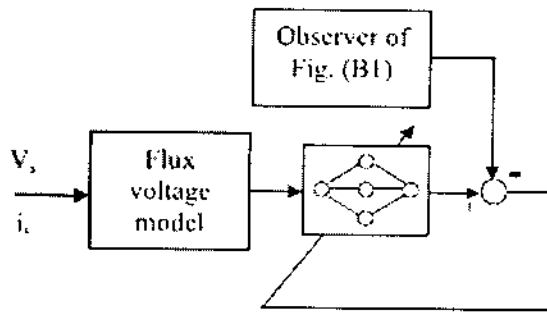
$$\omega = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r \Phi_r^2} (i_{qs}^s \Phi_{dr}^s - i_{ds}^s \Phi_{qr}^s) \quad (22)$$

โครงสร้างของบล็อกไดอะแกรมของ observer แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5. โครงสร้างของบล็อกไดอะแกรมของ observer

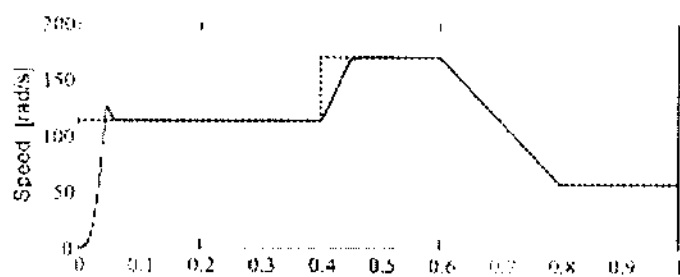
จากนี้ ขั้นตอนต่อมาคือ ประยุกต์ MLP neural network ซึ่งมี ชั้นนิวรอนที่ซ่อนไว้ หนึ่งถึงสิบชั้น (one-ten-neuron hidden layer) และมีการใช้ฟังก์ชันลอกการิทึม (logarithmic activation function) ในการระบุความเร็ว (speed identification) และมีการฝึกหัดตามขั้นตอนรายละเอียดดังรูปที่ 6.



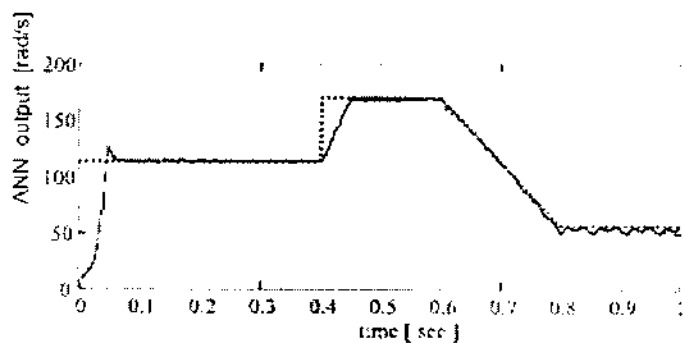
รูปที่ 6. การฝึกหัดของตัวสังเกตความเร็ว neural network (speed observer neural network)

ตัวสังเกต neural network ถูกฝึกหัดให้ประมาณการสมการของตัวสังเกตความเร็ว (speed observer) ในวิธีการฝึกหัด มีการใช้ชุดข้อมูลเพื่อปรับน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างกันของ network และเมื่อมีการกำหนดน้ำหนักนี้ ชุดข้อมูลทดสอบ(testing data) จะถูกป้อนเข้าไปใน NN speed observer เพื่อที่ประเมิน และเพื่อตรวจสอบความสามารถของระบบ ชุดข้อมูลฝึกหัด(training data) มี 5000 ชุดและชุดข้อมูลทดสอบ(testing data)มี 500 ชุด

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งได้แสดงถึงความสามารถฝึกหัด neural network ที่สามารถติดตาม waveforms ได้ที่ระดับความเร็วต่ำและสูง



(a)



(b)

รูปที่ 7. รูปลักษณะของตัวสังเกตความเร็ว ANN (ANN-based speed observer) สำหรับสภาวะที่ความเร็วสูงและต่ำ

(a) ความเร็วมอเตอร์จริง (actual motor speed)

(b) ผลจาก neural network (neural network output)

โมเดล ถูกฝึกหัดเฉพาะภายใต้เงื่อนไขความเร็วที่กำหนดและอาจสังเกตการเกิดการแกว่งไปแกว่งมาที่ระดับความเร็วต่ำได้

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

อภิปรายผล

การประเมินการทำงานของตัวควบคุม (Performance Evaluation)

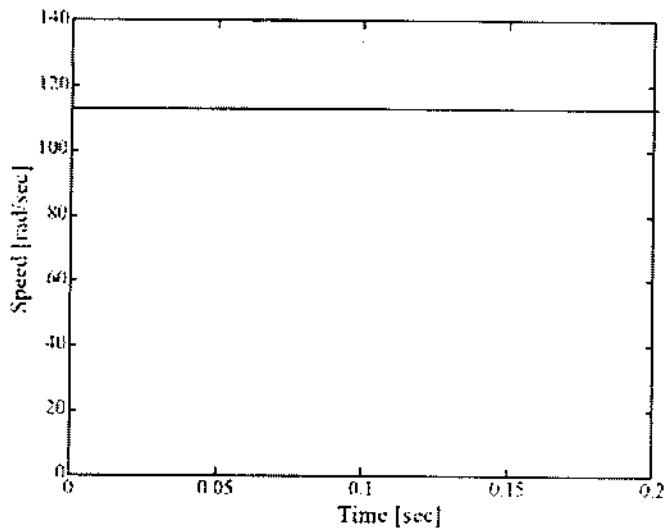
ตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้ในการศึกษานี้สรุปในตารางที่ 2 การทำงานของตัวควบคุมถูกประเมินอย่างเป็นอิสระภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2. SCIM parameters

P_n	nominal power	15 kW
R_s	stator resistance	0.1062 Ω
R_r	rotor resistance	0.0764 Ω
L_s	stator inductance	0.01604 H
L_r	rotor inductance	0.01604 H
L_m	mutual inductance	0.01547 H
J	rotor inertia	0.01768 kg.m ²
2_p	number of pole pairs	4

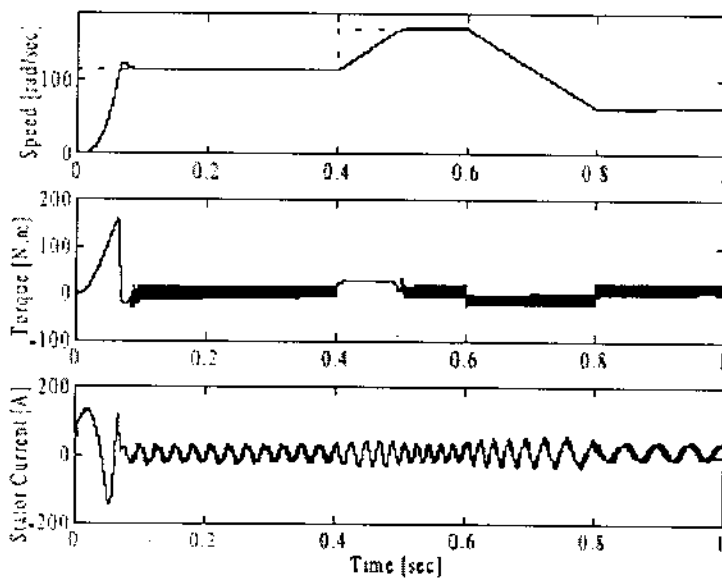
FVSC

มีการทำ Simulation ในตอนเริ่มแรกเพื่อสร้างช่วงที่เหมาะสมของ คิวแปร m_r และ m_s ในรูปที่ 8 แสดงความเร็วที่ตอบสนองต่อค่า parameter ต่าง ๆ tuning parameter ถูกกำหนดแน่นอนที่ [5, 5] เพื่อให้ได้ การตอบสนองที่ดีใน simulation



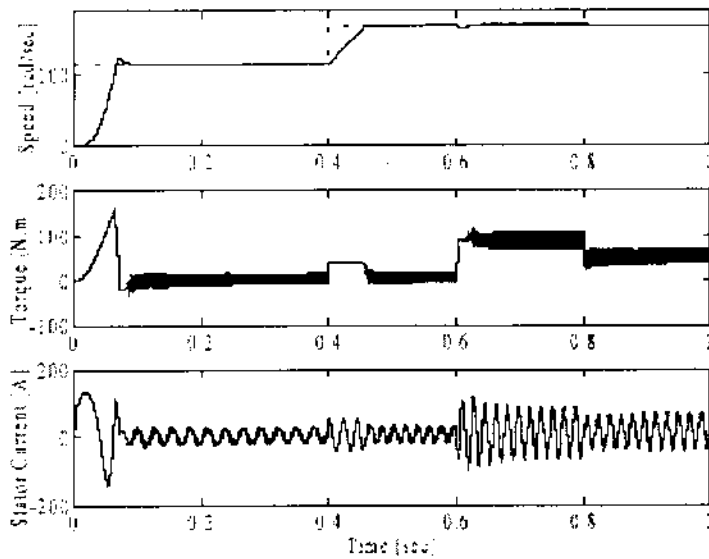
รูปที่ 8. การตอบสนองเป็นขั้นตอนของ SCIM สำหรับค่าที่แตกต่างกันของ m_r และ m_s : $[m_r \ m_s] = [10 \ 5]$ (dotted), $[5 \ 5]$ (dash-dot), $[5 \ 10]$ (dashed)

ต่อจากนั้น ระบบขับเคลื่อนภายใต้ FVSC ถูกป้อนเข้าไปในรูปแบบที่มีการปรับค่าความเร็วอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 9.



รูปที่ 9. การตอบสนองของระบบขับเคลื่อนภายใต้ความเร็วอ้างอิง

จากรูปจะเห็นว่า ความเร็วมอเตอร์คาบเกี่ยวกับกับความเร็วอ้างอิง การทำงานของการออกแบบตัวควบคุมถูกประเมินโดยการเปลี่ยนแปลง load



รูปที่ 10. การตอบสนองของความเร็วจากการเปลี่ยน load.

ในรูปที่ 10. แสดงความเร็วตอบสนองภายใต้การเปลี่ยนแปลง load จาก 0 ถึง 80 Nm และจาก 80 ถึง 40 Nm ที่ 0.6 วินาที และ 0.8 วินาทีตามลำดับ ผลการทดสอบนี้แสดงถึงความสามารถของตัวควบคุมที่มีการปรับทอร์คเพื่อรักษาการตอบสนองที่มีเสถียรภาพ

นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับกันดีอยู่แล้วว่าระหว่างการทำงานของไครฟ์ ตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, ความอิ่มตัว (saturation), และผลการความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear effect) และยังมีค่าความต้านทานของโรเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าคงที่เวลาของโรเตอร์ (rotor time constant) เปลี่ยนแปลงได้ถึง 50% และทำให้เกิดคุณสมบัติโดยรวมของ FOC เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้ผสมผสานสถาปัตยกรรมตัวควบคุมระหว่างเทคนิคการควบคุมแบบดั้งเดิม กับ Fuzzy logic และ neural network เข้าด้วยกัน โครงสร้างที่ผสมผสานและปรับปรุงแล้วนี้ก่อให้เกิดความคงที่ และการปรับตัวควบคุมที่ง่าย และเหมาะสำหรับระบบที่ไม่ทราบตัวแปรในระบบของเครื่องจักร โรงงานหรือโครงสร้าง

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นระบบหนึ่งที่ยาก และเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่ทำนายสำหรับการประเมินคุณสมบัติตัวควบคุมที่ได้ออกแบบ

คุณสมบัติและความคงที่ของตัวควบคุมได้ถูกประเมินผลภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของระบบ ใดเฟส และผลการทดสอบแสดงถึงนำเสนอความมีประสิทธิภาพของ โครงสร้างตัวควบคุม

การศึกษาเทคนิคการควบคุมมีความเหมาะสมมากสำหรับการนำไปใช้จริง เนื่องจากมีความเรียบง่าย, คงที่, และสามารถปรับได้ง่าย

บรรณานุกรม

- Brdy's M.A. and Kulawski G.J. (1999): Dynamic neural controllers for induction motor. — IEEE Trans. Neur. Netw., Vol. 10, No. 2, pp. 340–355.
- Cao S.G., Rees N.W. and Feng G. (1999): Analysis and design of fuzzy control systems using dynamic fuzzy state space models.—IEEE Trans. Fuzzy Syst., Vol. 7, No. 2, pp. 192–199.
- Chan C.C. and Wangs H. (1990): An effective method for rotor time constant identification for high performance induction motor vector control. — IEEE Trans. Indust. Electr., Vol. 37, No. 6, pp. 477–482.
- Chen C-Li and Chang M-Hui (1998): Optimal design of fuzzy sliding mode control: A comparative study. Fuzzy Sets Syst., Vol. 93, pp. 37–48.
- Chin T., Miyashita I. and Koga T. (1996): Sensorless induction motor drive: An innovative component of advanced motion control. — Proc. IFAC 13-th World Congress, San-Francisco, USA.
- Elloumi M., Al-Hamadi A. and Ben-Brahim L. (1998): Survey of speed sensorless controls of induction motor drive. Proc. IEEE/IECON'98 Conf. Record, Aachen, Germany, pp. 1018–1023.
- Hung J.Y., Gao W. and Hung J.C. (1993): Variable structure control: A survey. IEEE Trans. Industr. Electr., Vol. 40, No. 1, pp. 2–21.
- Hunt K.J. and Sbarbaro D. (1991): Neural networks for nonlinear model control. IEE Proc., Part D, Vol. 138, pp. 431–438.

- Hunt K.J., Sbarbaro D., Zbikowski R. and Gawthrop P.J. (1992): Neural networks for control Systems: A survey. *Automatica*, Vol. 28, pp. 1083–1112.
- Kawaji S. and Matsunaga N. (1994): Fuzzy control of VSS type and its robustness, In: *Fuzzy Control Systems* (A. Kandel and G. Langholz, Eds.).—Boca Raton, pp. 226–242.
- Kim Y.H., Kim S.S. and Hong I.P. (1998): Speed sensorless vector control of high speed induction motor using intelligent control algorithm. — *Proc. IEEE/IECON'98 Conf. Record*, Aachen, Germany, pp. 888–892.
- Kung Y.S., Liaw C.M. and Ouyang M.S. (1995): Adaptive speed control for induction motor drives using neural networks. *IEEE Trans. Industr. Electr.*, Vol. 42, No. 1, pp. 25–32.
- Kwan C.M. and Lewis F.L. (2000): Robust backstepping control of induction motors using neural networks. *IEEE Trans. Neur. Netw.*, Vol. 11, No. 5, pp. 1178–1187.
- Lee C.C. (1990): Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller – Parts I and II. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp. 404–435.
- Mei F., Zhihong M., Yu X. and Nguyen T. (1998): A robust tracking control scheme for a class of non-linear Systems with fuzzy nominal models. — *Appl. Math. Comp. Sci.*, Vol. 8, No. 1, pp. 145–158.
- Morari M. and E. Zafiriou E. (1989): *Robust Process Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Palm R. (1994): Robust control by fuzzy sliding mode. *Automatica*, Vol. 30, pp. 1429–1437.
- Shaw A. and Doyle F. (1997): Multivariable non-linear control application for a high purity distillation column using a recurrent dynamic neuron model. *J. Process Contr.*, Vol. 7, No. 4, pp. 255–268.

Si J. and Zhou G. (1996): A reduced memory Levenberg-Marquardt algorithm. Proc. 13-th IFAC World Congress, San Francisco, USA, pp. 233–236.

Tajima H. (1993): Speed sensorless field orientation control of induction motor. IEEE Trans. Industr. Applic., Vol. 29, No. 1, pp. 175–181.

Trzynadlowski A.M. (1994): The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors. Dordrecht: Kluwer.

Umanand L. and Bhat S.R. (1994): Adaptation of the rotor time constant for variation in rotor resistance of induction motor. Proc. IEEE Annual Meeting, Denver, pp. 738–743.

Vas P. (1990): Vector Control of AC Machines. London: Oxford University Press.

Zhen L. and Xu L. (1998): Sensorless field orientation control of induction machines based on mutual MRAS scheme. IEEE Trans. Industr. Electr., Vol. 45, No. 5, pp. 824–830.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันท์ อุ่นศิริไธย์
Asst. Prof. Dr. Anant Oonsivilai
2. ตำแหน่งปัจจุบัน
 - อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 - ผู้อำนวยการเทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร เทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร 044-224-811 โทรสาร 044-224-814 และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา-วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร 044-224-400 โทรสาร 044-224-220
4. ประวัติการศึกษา 1986 B.Eng. (Electrical Engineering)
Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand
1992 M.Eng. (Electrical Engineering)
King Mongkut's Institute of technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Thesis Title: Synchronous Machine Parameter's Identifier for Power System Stabilizer
2000 Ph. D. (Electrical & Computer Engineering)
Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada
Thesis Title: Load Modeling and Forecasting via Wavelet and Fuzzy Neural Networks.
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ Neural Network, Wavelet, Optimization< Computer Network and Control, Fuzzy System, Speech Image and Signal Processing, Power System

6. ประสบการณ์

1986-1987 Electrical Engineering at Metropolitan Electricity Authority (MEA) which the following:

- Power System Planning and Operation in Transmission and Distribution System
- Economic Operation

1987-1994 Maintenance, Development and Research Engineer at Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) which the following:

- Thyristor Power Sources for Excitation
- AVR and Excitation System
- Governor System
- PSS Tuning and Generator Parameter Measurement for Load Flow Studies.
- Data Communication

1994-Present Lecturer, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Publication:

- Oonsivilai and M.E. El-Hawary : "A Self-Organizing Fuzzy Power System Stabilizer", IEEE. CCECE'98, 1998.
- Oonsivilai and M.E. El-Hawary : "Power System Dynamic Load Modeling using Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE. CCECE'99, 1999.
- Oonsivilai and M.E. El-Hawary : "Wavelet Neural Network Based Short Term Load Forecasting of Electric Power System Commercial Load", IEEE. CCECE'99, 1999.

Training:

- Successful Completion Attended and passed the IATCA Compliant ISO 9000:2000 series Auditor/Lead Auditor Training Course No:A18021 certified by IRCA

- ประกาศนียบัตรผู้นำการบริหารการเปลี่ยนแปลงจังหวัดแบบบูรณาการ(Leader Of Change Management), 2004
- การพัฒนาผู้บริหารระดับสูงมหาวิทยาลัย รุ่นที่ 12 , 2004

7. ประวัติและผลงานความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก

1. สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยความร่วมมือกับ สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (ISMED)
2. ศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงาน โดยความร่วมมือกับ สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงาน ภาค 5 จ.นครราชสีมา
3. เครื่องช่วยคลินิกเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยความร่วมมือกับ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. สถาบันเครื่องช่วยพัฒนาบุคลากร สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน (กพ) โดยความร่วมมือกับ สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน (กพ)
5. ศูนย์พัฒนาปรับปรุงและถ่ายทอดเทคโนโลยีใหม่ครบวงจร โดยความร่วมมือ กับ สำนักงานจังหวัดนครราชสีมา
6. ศูนย์ประสานความร่วมมือเพื่อการพัฒนาศักยภาพอุตสาหกรรมอาหารและอาหารไทยสู่ครัวโลก สถาบันอาหารสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
7. กรรมการสถาบันเครื่องช่วยพัฒนาบุคลากรสำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน
8. กรรมการศูนย์นันทนาการเพื่อการเรียนรู้ สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา เครื่องช่วยอุดมศึกษา หอการค้าจังหวัดนครราชสีมา
9. กรรมการเครื่องช่วยโครงการสนับสนุนการอุตสาหกรรมเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย ITAP สวทช.
10. กรรมการเครื่องช่วยสถาบันการศึกษาในการสนับสนุนการพัฒนาระบบราชการและการบริหารราชการจังหวัด บูรณาการ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำนักงานพัฒนาระบบราชการ (กพร) กระทรวงมหาดไทยและจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
11. กรรมการเครื่องช่วยอุทยานวิทยาศาสตร์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
12. อนุกรรมการประสานความร่วมมือภาครัฐและเอกชน จังหวัดนครราชสีมา

13. กรรมการคณะทำงานยุทธศาสตร์การพัฒนางังหวัดแบบบูรณาการ (CEO) จังหวัดนครราชสีมา
 14. ที่ปรึกษาสภาอุตสาหกรรมจังหวัดนครราชสีมา
 15. ที่ปรึกษาหอการค้าจังหวัดนครราชสีมา
 16. กรรมการหน่วยฝึกอบรมเพื่อคัดเลือกเป็นผู้ประเมินระดับการศึกษาขั้นพื้นฐาน สำนักงานรับรองมาตรฐานและประเมินคุณภาพการศึกษา (สมศ.)
 17. ผู้จัดการหน่วยบ่มเพาะวิสาหกิจในสถาบันอุดมศึกษา (UBI) สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา
8. ประวัติดูที่ปรึกษาเกี่ยวกับฐานข้อมูล
1. ที่ปรึกษารฐานข้อมูลผู้เชี่ยวชาญประจำมหาวิทยาลัยของ SCIENCE PARK
 2. ที่ปรึกษารฐานข้อมูล ผู้ประกอบการใหม่ NEC
 3. ที่ปรึกษารฐานข้อมูลด้าน OTOP
 4. ที่ปรึกษารฐานข้อมูลอุตสาหกรรมชนบท
 5. ที่ปรึกษารฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์ใหม่