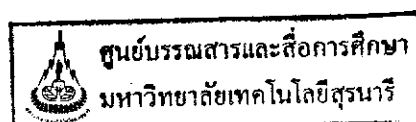




SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

The 4th Annual Seminar on Graduate Research in
Electrical Engineering (2007)

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology



คำนำ

การสัมมนาทางวิชาการบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าประจำปีครั้งที่ 4 หรือ ASGREE2007 จัดขึ้นด้วยมีจุดมุ่งหมายให้นักศึกษบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นำเสนอบทความผลงานวิจัย ในการสัมมนาในครั้งนี้มีนักศึกษบัณฑิตศึกษาส่งบทความผลงานวิจัยเข้าร่วมจำนวน 14 บทความ โดยแยกตามกลุ่มงานวิจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้าดังนี้

ระบบควบคุมและอัตโนมัติ	2 บทความ
ไฟฟ้ากำลังและระบบพลังงาน	5 บทความ
การประมวลผลสัญญาณและสัญญาณภาพ	5 บทความ
ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค	2 บทความ

สารบัญ

		หน้า
สาขาบทความ CT		
ระบบควบคุมและอัตโนมัติ		
CT-01	ระบบควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วงปิด (The Closed-Loop Speed-Sensorless Vector-Controlled Induction Motor System) วิโรจน์ แสงชงทอง	1
CT-02	ปริทัศน์วรรณกรรมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถี (Literature Survey of Multipath Adaptive Tabu Search) จักรกฤษณ์ เคลือบวัง	9
สาขาบทความ PW		
ไฟฟ้ากำลังและระบบพลังงาน		
PW-01	การวางแผนการกู้คืนระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติ (Restoration planning of electric power distribution systems for an automatic substation) จิตติพงษ์ จารุวัฒน์	11
PW-02	การวิเคราะห์ความผิดปกติพร้อมด้วยผลการแปลงพีคิวอาร์ (Fault Analysis Using PQR Transformation) บรรณณัติ บริบูรณ์	18
PW-03	แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดกระตุ้นตัวเอง (Power flow models of a self-excited induction generator) ประมวล แสงสารวัตร	22
PW-04	การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับที่จ่ายด้วย อินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (Torque-speed estimation of an inverter-fed AC motor for electric vehicle drives) ชรินทร์ สุขเจริญ	36
PW-05	การประมาณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วย วิธีเครือข่ายประสาทเทียม (Electric Field Estimation around an Overhead Power Transmission Line using Neural Network Model) รัฐรงค์ บุญวุฒิวิวัฒน์	45

สาขาบทความ SP

การประมวลผลสัญญาณและสัญญาณภาพ

SP-01	การรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและ เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น (License Plate Recognition Using Wavelet Transform and Probabilistic Neural Network) วิฑูรย์ มารมย์	55
SP-02	การค้นหารถยนต์บนถนนด้วยฟังก์ชันกาบอร์แบบลอการิทึมและ เครื่องตรวจเวคเตอร์ (On road vehicle detection using log-gabor filters and support vector machines) ชานนท์ โสติดถาวร	60
SP-03	กระบวนการสร้างแผนภาพบ่งบอกความลึก (Disparity Map Estimation) บัณฑิต ดวงชาทม	65
SP-04	การตรวจจับจุดบกพร่องด้วยตัวกรองกาบอร์ (Defect Detection using gabor filters) วิไลลักษณ์ คัดสร้าง	73
SP-05	การใช้ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมและเครื่องตรวจเวคเตอร์ ในการคัดแยกภาพคนเดินถนน (Pedestrian detection using log-gabor filters and support vector machines) จักรวาล จันทา	81

สาขาบทความ EM

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

EM-01	การพัฒนากระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาคโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (Process Development of Microstructure Production Using X-Ray Lithography) วินัย วันบุรี	88
EM-02	การออกแบบและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้วที่มีพิกัดกระแส 20 แอมแปร์ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม (Winding Design and Implementation of a Sextupole Magnet with Current Rating of 20 Amperes for the Siam Photon Source) ศุภชัย ประวันตา	94

ระบบควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
แบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วงปิด
The Closed-Loop Speed-Sensorless Vector-Controlled
Induction Motor System

สรารวุฒิ สุจิตจร และ วิโรจน์ แสงชงทอง
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ด.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224395 โทรสาร 044-224601 Email: sarawut@sut.ac.th, cewirote@sut.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากระบบควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์ที่มีส่วน
ชดเชยการรบกวนของโหลดทอร์ก ต้องการตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์และตัวสังเกตสถานะโหลด
ทอร์กที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์และโหลดทอร์กตามลำดับ เพื่อแทนที่ตัวตรวจรู้เชิงกล
วัดอัตราเร็วและอุปกรณ์วัดทอร์กในทางเดินป้อนกลับและป้อนไปหน้าของระบบควบคุม บทความนี้จึง
นำเสนอการใช้งานตัวสังเกตทั้งสองที่มีโครงสร้างโหมคการเลื่อนแบบปรับตัวในลักษณะที่ต่อเรียงกันสอง
ตอนและรวมเป็นส่วนหนึ่งในระบบวงปิดดังกล่าว ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ข้างต้นที่พิจารณา
กำลังงานสูญเสียเปล่าในแกนได้รับแรงดันและกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่เกิดจากการวัด ในขณะที่ตัวสังเกต
สถานะโหลดทอร์กได้รับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ที่เกิดจากการคำนวณและอัตราเร็วเชิงมุมโร
เตอร์ที่เกิดจากการประมาณค่า เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณตัวแปรสถานะและประมาณค่าพารามิเตอร์
แบบออนไลน์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงสมรรถนะที่น่าพอใจในการประมาณค่าอัตราเร็วและ
โหลดทอร์ก และผลตอบสนองของอัตราเร็วเพลาหมุนที่ติดตามคำสั่งอัตราเร็ว

คำสำคัญ: ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์, ตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์ก, มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ระบบวงปิด
การจำลองสถานการณ์

Abstract

In order to replace mechanical speed sensor and rotational torque transducer into
feedback and feed-forward paths, a speed-sensorless vector-controlled three-phase induction
motor system with external load-torque compensation usually demands a rotor-flux observer and
a load torque observer which both estimate rotor speed and load torque quantity respectively.
According to the above aim, this article describes exploitation of such both state observers that
be type of adaptive sliding-mode manner and join together along cascade fashion forming two
stages as well as then be included into and become a portion of the speed control system. The
rotor-flux observer embracing core loss acquires monitored terminal stator voltages and currents
whereas the load torque observer obtains calculated electromagnetic torque of the motor and the
estimated rotor speed from the rotor-flux observer in order to compute state variable and on-line
estimate some parameters. Ultimately, outcomes of simulation offer satisfactory performance of
speed and load torque estimations as well as the closed-loop speed response that moderately
tracks speed command.

Keywords: rotor-flux observer, load torque observer, induction motor, closed-loop system, simulation

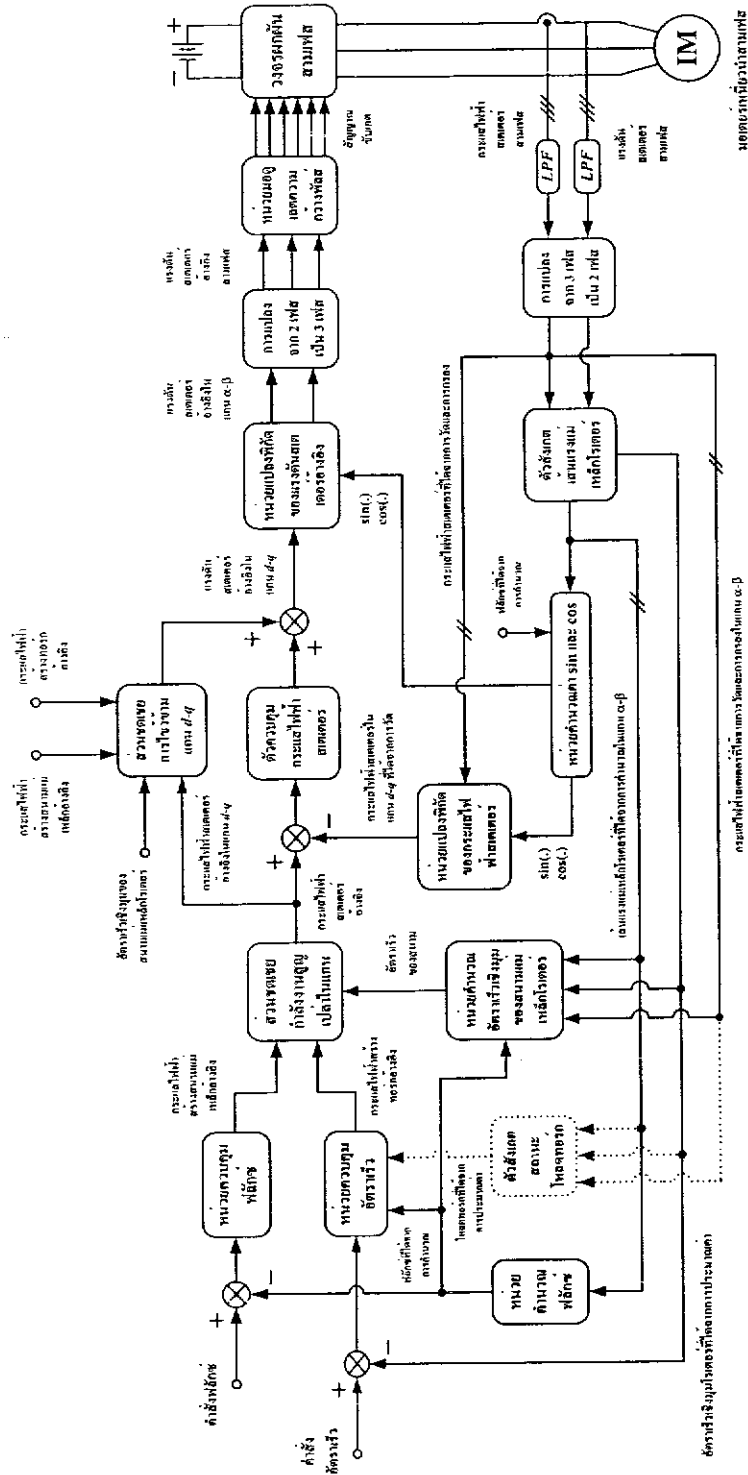
1. บทนำ

วัตถุประสงค์หลักในการออกแบบและพัฒนาตัวสังเกตอัตราเร็ว(ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์) และตัวสังเกตสถานะโพลตอร์คชนิดใหม่คือการเลียนแบบปรับตัว คือการใช้งานตัวสังเกตเหล่านั้นแทนที่ตัวตรวจรู้เชิงกลวัดอัตราเร็วและอุปกรณ์วัดทอร์กในระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์ ในการทดสอบแนวคิดด้วยการจำลองสถานการณ์ระบบวงเปิด[1] เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและโพลตอร์คเกิดการหมุน ตัวสังเกตทั้งสองมีความสามารถในการประมาณค่าอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์และโพลตอร์คแบบออนไลน์ ที่มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอัตราเร็วจริงและโพลตอร์คจริงได้ตามลำดับ จึงเป็นไปได้ในการใช้งานตัวสังเกตทั้งสองในระบบควบคุมวงปิด แต่การประมาณค่าอัตราเร็วต้องมีสมรรถนะที่รวดเร็วใกล้เคียงกับพลวัตการหมุนของระบบมอเตอร์และโพลตอร์ค และการประมาณค่าโพลตอร์คของตัวสังเกตสถานะโพลตอร์คอาจมีค่าพุ่งเกิน(overshoot)จากโพลตอร์คจริงคงที่ ได้พอสมควร ทำให้ค่าเกนบางค่าในตัวสังเกตทั้งสองต้องได้รับการปรับจูนใหม่ บทความนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวที่ใช้ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ทำหน้าที่ป้อนกลับการประมาณค่าของอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์และขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์(หรือฟลักซ์)แทนที่ปริมาณจริงที่ได้จากการวัด และระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวสังเกตสถานะโพลตอร์คทำหน้าที่ป้อนการประมาณค่าของโพลตอร์คในลักษณะไปหน้า เพื่อชดเชยการรบกวนภายนอกของโพลตอร์ค

2. ระบบควบคุมวงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์

วิสัยควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์ที่พิจารณาในที่นี้ มีแผนภาพแทนระบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 (พิจารณาองค์ประกอบที่แสดงไว้ด้วยเส้นทึบเท่านั้น) และมีองค์ประกอบหลายส่วน ได้แก่ (1) วงรอบภายในทำหน้าที่คุมค่ากระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในพิกัด(หรือกรอบอ้างอิง)สนามแม่เหล็กโรเตอร์ (2) วงรอบภายนอกทำหน้าที่คุมค่าอัตราเร็วและฟลักซ์ในลักษณะที่แยกออกจากกันอย่างอิสระ (3) หน่วยคำนวณค่าไซน์(sin)และโคไซน์(cos)ของตำแหน่งเชิงมุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในการแปลงพิกัดของกระแสไฟฟ้าและแรงดัน (4) หน่วยคำนวณอัตราเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (5) หน่วยแปลงกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ได้จากการวัดและอยู่ในพิกัดหยุดนิ่ง(พิกัดสเตเตอร์)ให้อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (6) หน่วยแปลงแรงดันสเตเตอร์อ้างอิงที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ให้อยู่ในพิกัดหยุดนิ่ง(หรือการแปลงย้อนกลับ) และ (7) ตัวกรองผ่านต่ำ(LPF)ชนิดบัตเตอร์เวิร์ท(Butterworth)อันดับสามที่มีหน้าที่ปรับรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดให้มีความเรียบมากขึ้นก่อนการแปลงและป้อนกลับ

หน่วยสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์(PWM)ของวงจรหมักผันสามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบดังแผนภาพในรูปที่ 1 ได้รับแรงดันสเตเตอร์อ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง ทำให้แรงดันกระแสสลับสเตเตอร์ที่ปรากฏในปลายขั้วไฟฟ้าของมอเตอร์มีค่าอาร์เอ็มเอสและความถี่หลักมูลเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอ้างอิง เป็นผลให้แบบจำลองพลวัตทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณากำลังงานสูญเสียในแกนในพิกัดหยุดนิ่งสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดและทิศทางเปลี่ยนแปลงตามความต้องการได้ นั่นคือแบบจำลองเชิงกลของมอเตอร์และโพลตอร์คสามารถหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ หรืออัตราเร็วที่มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิม หรือสามารถหมุนกลับทิศทางได้ หน่วยควบคุมอัตราเร็วและฟลักซ์ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ(Pi) ที่มีเอาต์พุตคือทอร์ก



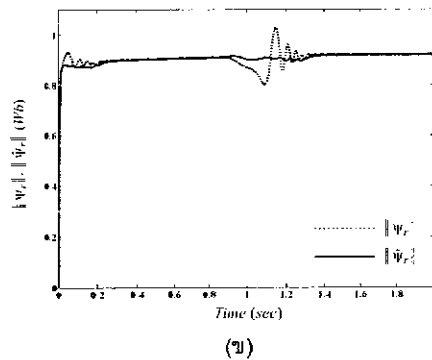
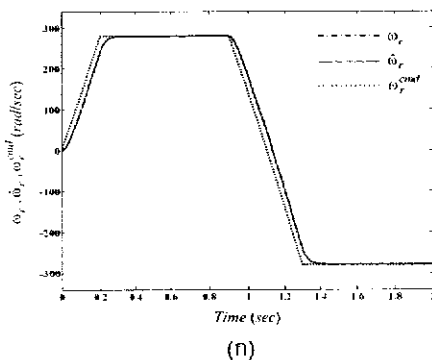
รูปที่ 1 แผนภาพกรอบของหน่วยต่างๆ ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นวิธีควบคุมอัตราเร็วแบบเวกเตอร์ไว้
 เช่นเซอร์

ทางแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กอ้างอิงตามลำดับ ผลลัพธ์ที่เกิดจากการหารระหว่างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิงและฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณ คือกระแสไฟฟ้าสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิง หน่วยควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์คือตัวควบคุมแบบพีไอในแกน $d-q$ ที่มีส่วนชดเชยกำลังงานสูญเสียเปล่าในแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำและส่วนป้อนไปหน้าที่ชดเชยการไขว้ข้าม(หรือคู่ต่อ)ระหว่างแกน $d-q$ [2] โดยที่อินพุตของหน่วยควบคุมกระแสไฟฟ้าข้างต้นคือกระแสไฟฟ้าสร้างทอร์กและสนามแม่เหล็กอ้างอิง และเอาต์พุตของหน่วยควบคุมนี้คือแรงดันสเตเตอร์อ้างอิง ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ได้รับแรงดันสเตเตอร์และกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสจากตัวกรองผ่านต่ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประมาณค่าอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์และคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ในพิกัดหยุดนิ่ง และป้อนกลับการประมาณค่าของอัตราเร็วเชิงมุมและฟลักซ์ถึงหน่วยควบคุมอัตราเร็วและฟลักซ์ตามลำดับ ค่าขายน์และโคซายน์ของตำแหน่งเชิงมุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ถูกคำนวณได้จากผลหารระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในแกนตั้ง(แกน β)และฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณ และผลหารระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในแกนนอน(แกน α)และฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณตามลำดับ ในขณะที่อัตราเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กโรเตอร์คือผลรวมระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าและอัตราเร็วเชิงมุมสลิปที่ได้จากการคำนวณ โดยที่ผลหารระหว่างปริมาณที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและกำลังสองของฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณคืออัตราเร็วเชิงมุมสลิป ปริมาณที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ถูกคำนวณจากเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากการคำนวณและกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ได้จากการวัดและผ่านการกรองด้วยตัวกรองผ่านต่ำแล้ว หน่วยควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ได้รับอัตราเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กโรเตอร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลหนึ่งในการชดเชยกำลังงานสูญเสียเปล่าในแกนและการไขว้ข้ามระหว่างแกน $d-q$ ค่าเกนอินทิกรัลในกฎการปรับคัตว์ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ในตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ ถูกปรับเปลี่ยนให้มีค่ามากเพียงพอจนกว่าสมรรถนะของการประมาณค่าเริ่มพุ่งเกินจากอัตราเร็วเชิงมุมจริงในการหมุนของระบบมอเตอร์และโหลด แต่ค่าเกนสัดส่วนในกฎการปรับคัตว์นี้ ถูกปรับเปลี่ยนให้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเกนอินทิกรัล เพราะค่าเกนสัดส่วนที่มีค่ามากอาจเป็นสาเหตุให้อัตราเร็วเชิงมุมที่ได้จากการประมาณค่าเกิดการกวัดแกว่งด้วยความถี่สูงในสถานะอยู่ตัว

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกรงกระรอก 3 กิโลวัตต์มีค่าพารามิเตอร์ที่ระบุไว้ใน[1] แบบจำลองพลวัตทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังกล่าวคือวงจรสมมูลแบบที(T)ในแกน α - β ในความถี่หลักมูลของการกระตุ้นสเตเตอร์ ที่มีตัวต้านทานที่แทนกำลังงานสูญเสียเปล่าในแกนเชื่อมต่อแบบขนานกับตัวเหนี่ยวนำสร้างแม่เหล็ก ซึ่งสมมูลกับตัวต้านทานที่แทนกำลังงานสูญเสียเปล่าในแกนเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำรวมในกิ่งสร้างแม่เหล็กที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ หน่วยมอดูลิตีความกว้างพัลส์มีความถี่ของสัญญาณพาหะเท่ากับ 4,000 เฮิรตซ์ ตัวกรองผ่านต่ำมีความถี่คัตออฟเท่ากับ 2,000 เฮิรตซ์ แหล่งจ่ายกระแสตรงที่เชื่อมต่อบริเวณอินพุตของวงจรผกผันสามเฟสมีแรงดันเท่ากับ 630 โวลต์ (แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง) ตัวควบคุมอัตราเร็วมีค่าเกนสัดส่วนและค่าเกนอินทิกรัลเท่ากับ 3.2 และ 3.4 ตามลำดับ ตัวควบคุมฟลักซ์มีค่าเกนสัดส่วนและค่าเกนอินทิกรัลเท่ากับ 100 และ 120 ตามลำดับ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกน $d-q$ มีค่าเกนสัดส่วน เท่ากับ 200 และค่าเกนอินทิกรัลเท่ากับ 1 ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์มีกฎการปรับคัตว์ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็ว ซึ่งได้รับการปรับจูนค่าเกนสัดส่วนและค่าเกนอินทิกรัลให้เท่ากับ 5 และ 6,000 ตามลำดับ และค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์แบบออนไลน์มีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่ค่าเกนพีเอ็นพีว ค่าเกนแก๊ซ ค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าความต้านทานแบบออนไลน์ ค่าเกนสัดส่วนและค่าเกนอินทิกรัลอื่น ๆ ในตัวสังเกตนี้ มีค่าเดียวกันกับใน[1] ตัวแปรสถานะเริ่มต้นของมอเตอร์และตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ มีค่าเท่ากับศูนย์ ฟลักซ์อ้างอิงหรือคำสั่งฟลักซ์ของหน่วยควบคุมฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 0.92 เวเบอร์ และอัตราเร็วเชิงมุมเพลลาหมุนอ้างอิงหรือคำสั่งอัตราเร็วเชิงมุมเพลลาหมุนมีลักษณะเป็นขั้นบันไดแบบลาดเอียง

3. ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์

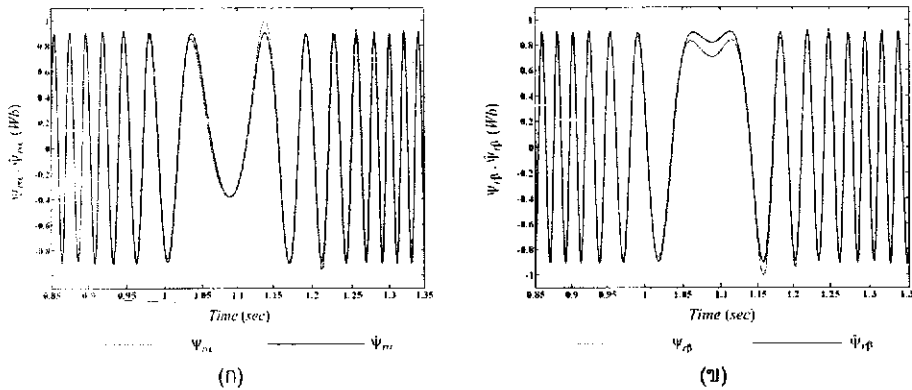
ในการจำลองสถานการณ์ ระบบย่อยต่างๆในโปรแกรม MATLAB\Simulink ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์ สมมุติว่าโหลดทอร์คจริงที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลดมีขนาดคงที่เท่ากับ 5 นิวตัน-เมตร และเมื่อมอเตอร์หมุนกลับทิศทางจากเดิม โหลดทอร์คดังกล่าวสามารถกลับทิศทางด้านการหมุนของระบบได้ ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานที่น่าพอใจของตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ที่พิจารณากำลังงานสูญเสียในแกน ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) และในช่วงระยะเวลาที่มอเตอร์และโหลดกำลังหมุนกลับทิศทาง(ในช่วงเวลา 0.9 ถึง 1.3 วินาที) ตัวสังเกตอัตราเร็วคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ในแกนนอนและแกนตั้งได้ใกล้เคียงและติดตามเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์จริงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ดังนั้นการแปลงพิกัดของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ที่วัดได้และการแปลงพิกัดย้อนกลับของแรงดันสแตเตอร์อ้างอิงมีความถูกต้อง เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยอัตราเร็วเกือบคงที่ในสถานะอยู่ตัว ตัวสังเกตประมาณค่าอัตราเร็วที่มีแนวโน้มของความผิดพลาดค่อยๆลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ทำให้มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยอัตราเร็วที่เข้าใกล้กับคำสั่งอัตราเร็ว(แต่หมุนด้วยอัตราเร็วที่น้อยกว่าคำสั่งอัตราเร็ว) นั่นคือความผิดพลาดของผลตอบสนองอัตราเร็วมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าศูนย์



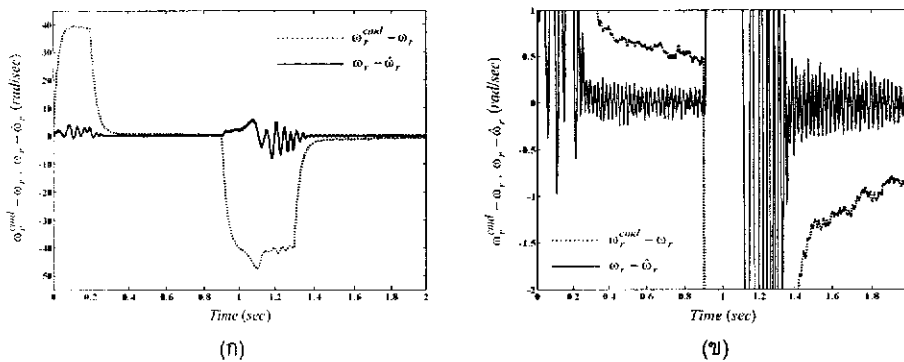
รูปที่ 2 (ก) ผลตอบสนองของอัตราเร็ว (ω_r) เมื่อเปรียบเทียบกับคำสั่งอัตราเร็ว (ω_r^{cmd}) และอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า ($\hat{\omega}_r$) ของตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์
(ข) ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ($\|\psi_r\|$) และฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณ ($\|\hat{\psi}_r\|$) ของตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์

4. ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่มีการชดเชยแบบป้อนไปหน้า

เมื่อระบบควบคุมวงปิดแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์มีตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์คที่ต่อเรียงกันกับตัวสังเกตอัตราเร็ว เพื่อชดเชยโหลดทอร์คในลักษณะป้อนไปหน้า ซึ่งการเพิ่มเติมตัวสังเกตสถานะนี้แสดงไว้ด้วยเส้นประในรูปที่ 1 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุมอัตราเร็วและโหลดทอร์คที่ได้จากการประมาณค่า ระบบควบคุมวงปิดขณะนี้มีส่วนป้อนไปหน้าชดเชยการรบกวนภายนอกโดยไม่ใช้อุปกรณ์วัดทอร์ค ตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์คดังกล่าวได้รับกระแสไฟฟ้าสมมูลที่เป็นสัดส่วนกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์จากตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ เพื่อประมาณค่า



รูปที่ 3 (ก) เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์จริงในแกนนอน ($\Psi_{r\alpha}$) และเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ในแกนนอนที่ได้จากการคำนวณ ($\Psi_{r\alpha}^*$) ของตัวสังเกตอัตราเร็ว
(ข) เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์จริงในแกนตั้ง ($\Psi_{r\beta}$) และเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ในแกนตั้งที่ได้จากการคำนวณ ($\Psi_{r\beta}^*$) ของตัวสังเกตอัตราเร็ว



รูปที่ 4 (ก) ความผิดพลาดของผลตอบสนองอัตราเร็ว ($\omega_r^{cmd} - \omega_r$) และความผิดพลาดของอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่เกิดจากการประมาณค่า ($\omega_r - \hat{\omega}_r$) ของตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์
(ข) ภาพขยายการแสดงผล (ก) ในแกนตั้งในช่วง -2 ถึง 1 เรเดียนต่อวินาที

โพลทอริกแบบออนไลน์ โดยที่กระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์ที่ได้จากการวัดและเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้รับจากตัวสังเกตอัตราเร็ว คือข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในการจำลองสถานการณ์ ค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะต่างๆของมอเตอร์ ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์และตัวสังเกตสถานะโพลทอริก รวมถึงค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าแบบออนไลน์ของอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์และโพลทอริก ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าแกนพื้นผิว ค่าแกนแก๊ซ ค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าพารามิเตอร์เชิงกลแบบออนไลน์ ค่าแกนสัดส่วนและค่าแกนอินทิกรัลในตัวสังเกตสถานะโพลทอริก มีค่าเดียวกันกับใน[1] ในขณะที่ค่าแกนพื้นผิว ค่าแกนแก๊ซ ค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าความต้านทานแบบออนไลน์ ค่าแกนสัดส่วนและค่าแกนอินทิกรัลในตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ทุกค่า รวมถึงค่าแกนของตัวควบคุมอัตราเร็ว ฟลักซ์ และกระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์ทุกค่า ใช้ค่าเดียวกันกับในหัวข้อ 2 ค่าแกนอินทิกรัลในกฎการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าโพลทอริกในตัวสังเกตสถานะโพลทอริก ถูกปรับเปลี่ยนให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ถึง 10 เท่าขึ้น เพื่อไม่ให้เกิดการประมาณค่าโพลทอริกเกิดการ

พุ่งเกินมากเกินไป แต่ค่าเกินสัดส่วนในกฎการปรับตัวนี้ ถูกปรับเปลี่ยนให้มีค่าเท่ากับ 0.1 เพราะค่าเกินสัดส่วนที่มีค่ามากอาจเป็นสาเหตุให้โหลดทอร์กที่ได้จากการประมาณค่าเกิดการกวัดแกว่งด้วยความถี่สูงในสถานะอยู่ตัว

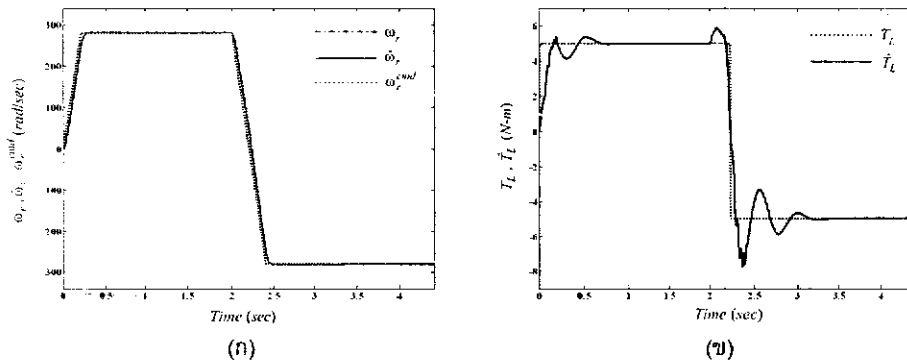
ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์กที่ต่อเรียงกันกับตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ในระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดในทางปฏิบัติ กล่าวคือ ในช่วงระยะเวลาที่ค่าสั่งอัตราเร็วกำลังเปลี่ยนแปลง และมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดหมุนด้วยอัตราเร็วที่กำลังเปลี่ยนแปลง(ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.2 วินาที และ 2 ถึง 2.4 วินาที) ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์มีสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่เหมือนกับการประมาณค่าในระบบควบคุมวงปิดที่ไม่มีการชดเชยโหลดทอร์กในลักษณะป้อนไปหน้า ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5(ก) แต่ผลตอบสนองของอัตราเร็วมีความผิดพลาดน้อยกว่า ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6(ก) (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4(ก)) เพราะระบบควบคุมวงปิดมีส่วนป้อนไปหน้าและตัวควบคุมแบบพีไอที่ทำหน้าที่คุมค่าอัตราเร็ว และในช่วงระยะเวลานี้ ส่วนป้อนไปหน้าไม่สามารถชดเชยโหลดทอร์กได้อย่างสมบูรณ์ เพราะตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์กประมาณค่าโหลดทอร์กที่มีขนาดน้อยกว่าโหลดทอร์กจริงหรือมีความผิดพลาด ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5(ข) ความผิดพลาดนี้มีสาเหตุจากเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากการคำนวณและอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าเกิดความผิดพลาด นั่นคือถ้าตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์คำนวณตัวแปรสถานะและประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความผิดพลาด ตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์กจะประมาณค่าโหลดทอร์กที่มีความผิดพลาดเช่นเดียวกัน หลังจากค่าสั่งอัตราเร็วมีค่าคงที่ ผลตอบสนองของอัตราเร็วมีค่าพุ่งเกินเล็กน้อย(มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยอัตราเร็วที่มากกว่าค่าสั่งอัตราเร็วเล็กน้อย) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6(ข) (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4(ข)) และตัวสังเกตสถานะประมาณค่าโหลดทอร์กที่พุ่งเกินจากโหลดทอร์กจริง ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5(ข) เพราะตัวสังเกตสถานะใช้ช่วงระยะเวลาหนึ่งในการปรับตัวให้เหมือนกับระบบพลวัตเชิงกล เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยอัตราเร็วเกือบคงที่ในสถานะอยู่ตัว ตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ ประมาณค่าอัตราเร็วที่มีแนวโน้มของความผิดพลาดค่อยๆลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6(ข) ทำให้มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยอัตราเร็วที่เข้าใกล้กับค่าสั่งอัตราเร็ว นั่นคือความผิดพลาดของผลตอบสนองอัตราเร็วมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ในขณะที่ตัวสังเกตสถานะประมาณค่าโหลดทอร์กที่เท่ากับ(หรือใกล้เคียงกับ)โหลดทอร์กจริง ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5(ข)

5. สรุป

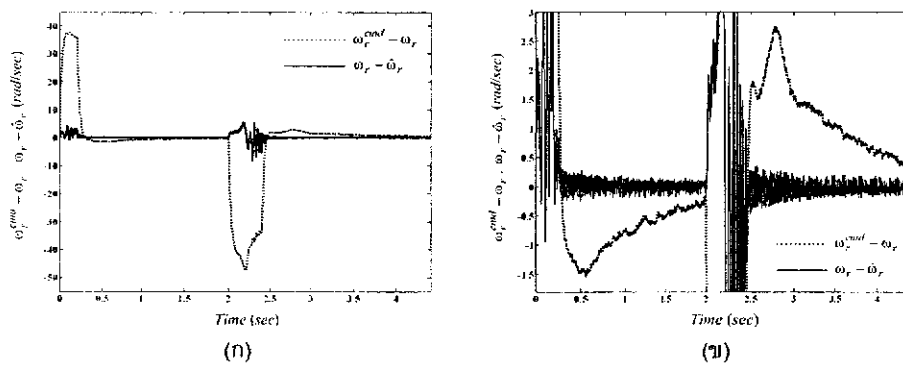
ในการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์ แนวคิดของการต่อเรียงกันระหว่างตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์และตัวสังเกตสถานะโหลดทอร์ก มีความเป็นไปได้ในการใช้งานแทนที่ตัวตรวจวัดอัตราเร็วเพลลาหมุนและทอร์กในวงป้อนกลับอัตราเร็วและวงป้อนไปหน้าของปริมาณโหลดทอร์กในทางปฏิบัติ เพราะการประมาณค่าอัตราเร็วและโหลดทอร์กมีสมรรถนะที่ติดตามอัตราเร็วจริงและโหลดทอร์กจริงตามลำดับ และผลตอบสนองอัตราเร็วติดตามค่าสั่งอัตราเร็วได้อย่างน่าพอใจ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ(สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน) มูลนิธิการศึกษาเซล 100 ปี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้กรุณาให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย



รูปที่ 5 (ก) ผลตอบสนองของอัตราเร็ว(ω_r)เมื่อเปรียบเทียบกับคำสั่งอัตราเร็ว (ω_r^{cmd}) และอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า ($\hat{\omega}_r$) ของตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ (ข) โหลดทอร์กจริง(T_L) และโหลดทอร์กที่ได้จากการประมาณค่าแบบออนไลน์(\hat{T}_L)



รูปที่ 6 (ก) ความผิดพลาดของผลตอบสนองอัตราเร็ว ($\omega_r^{cmd} - \omega_r$) และความผิดพลาดของอัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ที่เกิดจากการประมาณค่า ($\omega_r - \hat{\omega}_r$) ของตัวสังเกตเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ (ข) ภาพขยายการแสดงผล (ก) ในแกนตั้งในช่วง -1.8 ถึง 3 เรเดียนต่อวินาที

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sangtong, W. and Sujitjorn, S. "Adaptive Sliding-Mode Speed-Torque Observer". WSEAS Transactions on Systems 5(3): March 2006, pp. 458-466.
- [2] Mannan, M.A., Murata, T., Tamura, J., and Tsuchiya, T. "Indirect Field Oriented Control for High Performance Induction Motor Drives using Space Vector Modulation with Consideration of Core Loss". In IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference (PESC) (Volume 3, pp. 1449-1454): 15-19 June 2003.

ปริทัศน์วรรณกรรมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถี Literature Survey of Multipath Adaptive Tabu Search

จักรกฤษณ์ เคลือบวัง และ สรวุฒิ สุจิตจร
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-4400 โทรสาร 0-4422-4601 Email: jukkritk@gmail.com

บทคัดย่อ

การค้นหาแบบตาบู่ถูกคิดค้นและเผยแพร่ครั้งแรกโดย Fred Glover เพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสานไม่ต่อเนื่อง (combinatorial optimization) สำหรับงานระเบียบวิธีวิจัย (operations research) ด้วยโครงสร้างที่อ่อนตัวและสมรรถนะที่สูงทำให้การค้นหาแบบตาบู่ถูกนำไปประยุกต์กับงานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น งานวางแผนการผลิตกระแสไฟฟ้า การกำหนดน้ำหนักสัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุม PID และการคาดเดาโครงสร้างโปรตีน เป็นต้น พร้อมกันนี้ยังได้ถูกพัฒนาต่อยอดให้สูงขึ้น โดยสามารถแบ่งได้หกแนวทางวิจัย ได้แก่ การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว การค้นหาแบบตาบู่เชิงปฏิบัติ การค้นหาแบบตาบู่เชิงขนาน การค้นหาแบบตาบู่เชิงตัดแปลง การค้นหาแบบตาบู่เชิงความน่าจะเป็น และการค้นหาแบบตาบู่เชิงผสมผสาน ภายในกลุ่มการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวที่ถูกพัฒนาด้วยคณะวิจัยหลายแห่ง และคณะวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีก็เป็นอีกหนึ่งคณะที่ได้ใช้ชื่อการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจนได้รับการยอมรับให้เผยแพร่ในสิ่งพิมพ์ระดับนานาชาติหลายแห่ง เพื่อเป็นการพัฒนางานวิจัยดังกล่าวผู้ประพันธ์และคณะ จึงได้เสนออัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถี โดยมีหลักการพอสังเขปดังนี้ เริ่มต้นด้วยกลไกการแบ่งส่วน (partitioning mechanism) ทำการแบ่งปริภูมิการค้นหาออกเป็นปริภูมิการค้นหาย่อย แล้วดำเนินการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวแต่ละปริภูมิการค้นหาย่อยตามลำดับการแบ่งทางเวลา (time sharing) โดยมีกลไกการยกเลิก (discarding mechanism) คอยลดจำนวนปริภูมิการค้นหาย่อยเพื่อรักษาคุณลักษณะความเข้มข้น (intensification strategy) ทำให้การค้นหามีความรวดเร็วขึ้นคุณสมบัติที่คาดหวังของการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถีคือการเข้าสู่หาค่าผลเฉลยความเสถียรเร็วทันกับตัก ความเร็วในการค้นหา และคุณภาพของผลเฉลย เป็นต้น

คำสำคัญ : การค้นหาแบบตาบู่, การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว, การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถี

Abstract

Tabu search was originated and firstly published in 1986 by Fred Glover. It was very impressive solution to combinatorial optimization problem in operations research field. Since its both flexible structure and high performance make it be applicable to many fields, such electricity commitment, obtaining an optimum PID Controller and expectation of a protein structure, etc. Development of tabu search is still going on the ways, which are classified to five ways from articles published around the world. These ways are adaptive tabu search (ATS), reactive tabu search (RTS), parallel tabu search (PTS), modified tabu search (MTS), probabilistic tabu search (PrTS) and hybrid tabu search (HTS). A version of adaptive tabu search have been developed and issued by research team of Suranaree University of Technology (Nakorn Ratchasima, Thailand) since 2004. Following the ATS version, we decided to adopt it in multipath structure for

goal of higher performance. The proposed multipath ATS scheme get started to divide search space to subsearch spaces in partitioning mechanism, then begin ATS sequentially for local search activity in each subsearch spaces, according to time sharing concept. Discarding mechanism will be active for intensification approach when its conditions are met. Expected properties of the proposed multipath ATS are an existence of convergence rate, trap escapes, speed of search and solution quality.

Keywords: tabu search, adaptive tabu search, multipath adaptive tabu search

การวางแผนการกู้คืนระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับสถานีไฟฟ้า อัตโนมัติ

Restoration planning of electric power distribution systems for an automatic substation

จิตติพงษ์ จารุวัฒน์ และ ธนัตถ์ชัย กุลสุวรรณิชพงษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-4400 โทรสาร 0-4422-4601
Email: charuwat_t@hotmail.com, thanatch@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังร่วมกับการแยกโหนดส่วนของระบบที่เกิดความผิดปกติด้วยอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อลดพื้นที่หรือจำนวนผู้ใช้ไฟที่เกิดไฟดับ การวางแผนการสับสวิตช์ของสายส่งสำรองในระบบ อาศัยการประเมินการสูญเสียโหลดโดยใช้ดัชนี AENS (average energy not supplied) ผ่านการกาค่าเหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม การศึกษานี้ได้นำมาทดสอบกับระบบจำหน่ายทดสอบ 25 โหนดและระบบจำหน่ายมาตรฐาน IEEE 118 โหนด ผ่านการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ AENS เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลการดำเนินงานพบว่าการใช้จีเนติกอัลกอริทึมมีความเหมาะสมเนื่องจากการใช้งานตัวแปรสตริงที่นำเสนอสถานะการเปิดหรือปิดวงจร ทำให้นำมาหาจุดการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังได้เป็นอย่างดี ทำให้พื้นที่เกิดความผิดปกติถูกตัดออกไปเป็นบริเวณแคบ ช่วยลดผลกระทบที่เกิดกับผู้ใช้ไฟรายย่อยได้

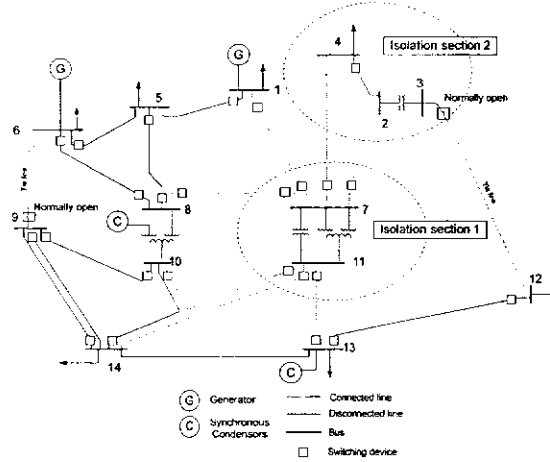
คำสำคัญ : การแยกโหนดความผิดปกติ, จีเนติกอัลกอริทึม, การจ่ายไฟในสภาวะฉุกเฉิน

1. คำนำ

การพัฒนาด้านการใช้พลังงานไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาประเทศในอนาคต การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกควบคุมด้วยระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เพื่อการสังเกต วางแผน และสั่งการควบคุมอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบไฟฟ้าได้โดยตรง โดยที่รวบรวมการทำงานไว้ในสถานีไฟฟ้าทั้งหมด โดยเรียกสถานีไฟฟ้าดังกล่าวว่า สถานีไฟฟ้าอัตโนมัติ ระบบไฟฟ้าให้มีระบบที่ใหญ่มักจะประสบปัญหามากมายทั้งด้านการดูแลรักษา การซ่อมบำรุง การปรับปรุงและพัฒนา รวมทั้งปัญหาการทำงานภายใต้การจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินเช่น เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง การทำงานในลักษณะนี้จำเป็นต้องอาศัยการวางแผนที่รัดกุม และการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ที่เข้ามามีส่วนร่วมในการตัดสินใจเพื่อที่จะลดผลกระทบของผู้ใช้ไฟฟ้ามิให้เกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้าง และยังเฝ้าต่อการกู้คืนระบบในภายหลัง บทความนี้จะได้นำเสนอการวางแผนการกู้คืนระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติเพื่อแนวทางการแก้ไขระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่ดี สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ต่อเนื่องและใกล้เคียงกับระบบก่อนเกิดสภาวะนั้น

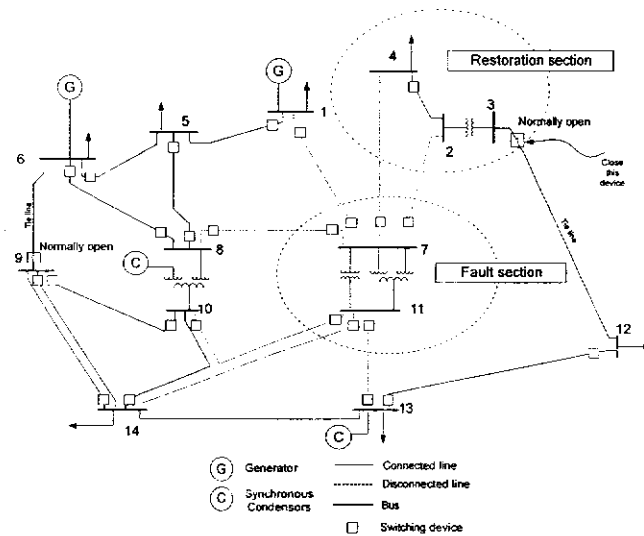
2. การทำงานที่เหมาะสมภายใต้การจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉิน

การทำงานที่เหมาะสมภายใต้การจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินมีรูปแบบการทำงานในหลายลักษณะ ทั้งนี้บทความนี้จะนำเสนอรูปแบบของพื้นที่ที่เกิดความผิดปกติจะต้องน้อยที่สุดพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 ระบบ 14 บัสในสภาวะเกิดความผิดปกติที่โหนด 7

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่โหนด 7 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังจะแยกโหนดที่เกิดความผิดปกติออกเป็น 2 บริเวณคือ บัส 7, 11 และ บัส 2, 3, 4 จะเห็นได้ว่าบริเวณ บัส 2, 3, 4 เป็นส่วนที่ปรกติแต่ถูกแยกโดดออกเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ทำให้บริเวณที่เกิดไฟฟ้าดับมีบริเวณที่กว้าง การแก้ปัญหาที่เหมาะสมคือต่อสายส่งสำรองระหว่างบัส 3 – 12 เพื่อเชื่อม บัส 2, 3, 4 เข้ามาในระบบจำหน่ายหลักซึ่งจะได้ระบบดังรูปที่ 2



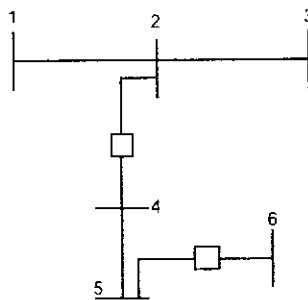
รูปที่ 2 ระบบ 14 บัสในสภาวะการทำงานที่เหมาะสมภายใต้การจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉิน

จะเห็นว่าระบบหลังการกู้คืนจะสามารถจ่ายโหลดได้ใกล้เคียงกับสภาวะปรกติซึ่งช่วยลดพื้นที่เกิดไฟฟ้าดับได้ การจำลองผลสามารถจำลองได้ด้วยหลักการดังต่อไปนี้

3. การแยกโดดของความผิดปกติ (fault isolation)

แบบจำลองดังกล่าวได้พัฒนามาจากพื้นฐานของการตัดต่อสวิตช์ ด้วยหลักการของการค้นหาสวิตช์ที่ติดตั้งอยู่บนสายส่งในระบบไฟฟ้าและสั่งการให้สวิตช์ที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่เกิดความผิดปกติที่สุดทำงานเป็นลำดับแรก จากนั้นทำการพิจารณาสายส่งที่เชื่อมต่อถัดไปจนกระทั่งสามารถแยกโดดส่วนที่เกิดความผิดพร่องนั้นออกจากระบบได้ โดยตั้งสมมติฐานให้อุปกรณ์ป้องกันสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถตรวจสอบจุดที่เกิดความผิดปกติได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นสามารถเขียนหลักการการทำงานของอัลกอริทึมแยกโดดระบบได้ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบสถานะของสายส่งที่เชื่อมต่อกับโหนดที่เกิดความผิดปกติว่าอยู่ในสถานะเปิดวงจรหรือไม่และต่อไปยังโหนดใด
2. ตรวจสอบว่าสายส่งเส้นนั้นมีสวิตช์ต่ออยู่หรือไม่ ถ้ามีให้เปิดการทำงานของอุปกรณ์นั้น ถ้าไม่มีให้พิจารณาเปิดวงจรสวิตช์ที่ต่ออยู่กับโหนดปลายสาย
3. เรียกใช้อัลกอริทึมเพื่อนับจำนวนสายส่งที่ต่ออยู่กับระบบที่เกิดความผิดปกติ
4. หยุดการคำนวณ เมื่อจำนวนสายส่งที่เชื่อมกับระบบที่เกิดความผิดปกติเท่ากับศูนย์ นั่นคือส่วนที่เกิดความผิดปกติถูกตัดออก

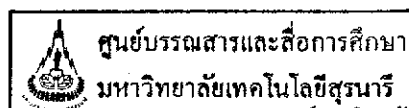


รูปที่ 3 ระบบตัวอย่าง 6 โหนด

จากรูปที่ 1 กำหนดให้เกิดความผิดปกติขึ้นที่โหนดที่ 4 จะพบว่า โหนด 4 มีสายส่งเชื่อมต่ออยู่ 2 เส้น คือ สายส่ง 2 – 4 มีสวิตช์ติดตั้งอยู่ ดังนั้น สวิตช์ตัวนี้ต้องทำงานเพื่อตัดความผิดปกติออกจากระบบ นอกจากนี้ โหนด 4 ยังเชื่อมต่อกับสายส่ง 4 – 5 ซึ่งไม่มีสวิตช์ต่ออยู่ ดังนั้นให้เลื่อนไปพิจารณาที่โหนดปลายสาย ได้แก่ โหนด โหนด 5 นั่นเอง ซึ่งโหนด 5 นี้ มีสายส่ง 5 – 6 เชื่อมต่ออยู่พร้อมกับสวิตช์ ดังนั้น สวิตช์ตัวนี้จะต้องทำงานเปิดวงจรออกนั่นเอง หลักการนี้ค่อนข้างง่าย แต่ถ้าระบบมีขนาดใหญ่ มีสวิตช์ต่ออยู่เป็นจำนวนมาก การพิจารณาเปิด/ปิดสวิตช์ทำได้ยากมาก ดังนั้น ในบทความนี้ ได้นำเสนอการแก้ปัญหาการเปิดปิดสวิตช์ให้เหมาะสมเพื่อแยกโดดความผิดปกติออกจากระบบ และในขณะเดียวกัน พื้นที่ที่เกิดไฟฟ้าดับต้องมีค่าน้อยที่สุดด้วย

4. ปัญหาการจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉิน

เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย การทำงานของระบบภายใต้สภาวะฉุกเฉินจะต้องแยกโดดความผิดปกติออกจากระบบจำหน่าย โดยให้มีผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟน้อยที่สุด ถึงแม้ว่า การประเมินผลกระทบของผู้ใช้ไฟทำได้หลายวิธีบทความนี้ จะใช้การประเมินค่า AENS (average energy not supplied) ซึ่งนิยามโดยสมการต่อไปนี้



$$AENS = \frac{\text{total energy not supplied}}{\text{number of customer served}} \quad \text{----- (1)}$$

จะเห็นได้ว่า ดัชนี AENS สะท้อนขนาดของพื้นที่ที่เกิดไฟฟ้าดับ ดังนั้นการวางแผนปฏิบัติงานในสภาวะการจ่ายโหลดฉุกเฉินโดยใช้ AENS เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีความสมเหตุสมผล จะได้รูปแบบของปัญหาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้วางแผนปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะดังกล่าวดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && AENS \\ & \text{Subject to} && \text{fault isolation criterion} \end{aligned}$$

โดยใช้ ตัวแปรควบคุมเป็นสถานการณ์เปิดปิดของสวิตช์เชื่อมต่อ (tie switch) ตัวอย่างเช่น ถ้าระบบที่พิจารณาจำนวนสวิตช์ทั้งสิ้น 4 ตัว ตัวแปรควบคุมสามารถเขียนในรูปของตัวแปรสตริง (string variable) ดังต่อไปนี้

$$X = S_1 S_2 S_3 S_4, \quad S_i = \{0,1\}$$

จะพบว่าปัญหาในลักษณะนี้เป็นปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบคอมบินาทอเรียล (combinatorial optimization) การแก้ปัญหาด้วยจีเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms) มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับปัญหาประเภทนี้

โดยใช้การแก้ปัญหาดังกล่าวจะช่วยลดความเสียหายในการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างในระบบจำหน่ายกรณีที่เกิดความผิดปกติในระบบได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากจีเนติกอัลกอริทึมเป็นกระบวนการค้นหาทางปัญญาระดับสูงที่ใช้กันแพร่หลาย ในบทความนี้จะไม่นำเสนอในรายละเอียดของกระบวนการดังกล่าว

5. ระบบทดสอบและการจำลองผล

ระบบทดสอบ 25 โคน ดังรูปที่ 3 มีโหลดรวมขนาด 4.81MW, 2.26 Mvar มีสวิตช์ที่ต่อเข้ากับระบบทั้งสิ้น 19 ตัว ข้อมูลของสวิตช์กำหนดไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลสวิตช์และโหลดของระบบทดสอบ 25 โคน

switch	from bus	to bus	status	node	MW	Mvar
1	1	2	1	1	0.2	0.14
2	2	3	1	2	0.25	0.16
3	3	4	1	5	0.28	0.2
4	4	5	1	4	0.34	0.25
5	4	23	1	3	0.6	0.24
6	23	24	1	21	0.7	0.23
7	24	25	1	19	0.8	0.14
8	3	18	1	20	0.34	0.21

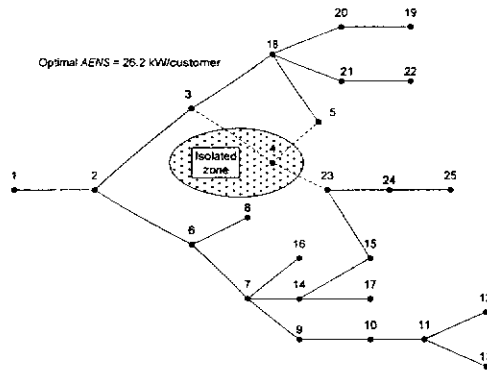
9	18	20	1	24	0.26	0.16
10	20	19	1	10	0.41	0.3
11	18	21	1	11	0.33	0.12
12	21	22	1	16	0.18	0.06
13	2	6	1	14	0.05	0.01
14	6	8	1	12	0.07	0.04
15	14	15	1			
16	14	17	1			
17	11	12	1			
18	23	15	0			
19	5	18	0			

การทดสอบ ศึกษาการเกิดความผิดพลาดแยกเป็นสองกรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เกิดความผิดพลาดที่ โหนด 4 และ กรณีที่ 2 เกิดความผิดพลาดที่โหนด 7 โดยใช้การแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเนติกอัลกอริทึม จะได้ผลเฉลยดังตารางต่อไปนี้

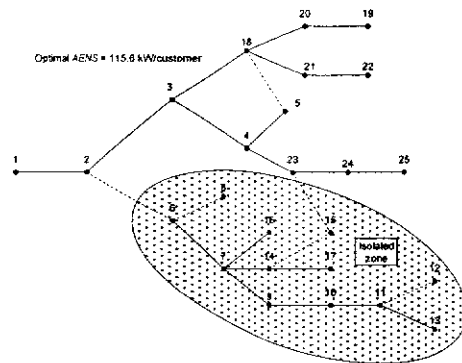
ตารางที่ 2 ผลเฉลยกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

switch	from bus	to bus	switching status	
			case 1	case 2
1	1	2	1	1
2	2	3	1	1
3	3	4	0	1
4	4	5	0	1
5	4	23	0	1
6	23	24	1	1
7	24	25	1	1
8	3	18	1	1
9	18	20	1	1
10	20	19	1	1
11	18	21	1	1
12	21	22	1	1
13	2	6	1	0
14	6	8	1	0
15	14	15	1	0
16	14	17	1	0
17	11	12	1	0
18	23	15	1	0
19	5	18	1	0

จะได้รูปวงจรมายหลังจากการแก้ปัญหาของทั้งสองกรณี ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ระบบทดสอบ 25 โหนดภายหลังการแก้ปัญหากรณีที่ 1



รูปที่ 5 ระบบทดสอบ 25 โหนดภายหลังการแก้ปัญหากรณีที่ 2

กรณีที่ 1 ผลเฉลยที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ตัวที่ 3, 4 และ 5 จากสถานะเปิดวงจร เป็นเปิดวงจร และสวิตช์ตัวที่ 18 และ 19 จากสถานะเปิดวงจรเป็นปิดวงจร

สำหรับกรณีที่ 2 ผลเฉลยที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ตัวที่ 13 – 17 จากสถานะเปิดวงจรเป็นเปิดวงจร ผลเฉลยที่ได้ ถือได้ว่าทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟน้อยที่สุดภายใต้การประเมินค่า AENS

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคอัลกอริทึมผ่านการประเมินการสูญเสียโหลดโดยใช้ AENS (average energy not supplied) ทดสอบกับระบบทดสอบ 25 บัส โดยจำลองการเกิดความผิดพลาดที่โหนด 4 และ 7 ผลการดำเนินงานพบว่าการใช้เทคนิคอัลกอริทึมสามารถแก้ปัญหาหาจุดการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังได้เป็นอย่างดี โดยสามารถแยกระบบที่เกิดความผิดพลาดออกจากระบบจำหน่าย และเลือกสวิตช์เพื่อเชื่อมต่อระบบปกติที่ถูกแยกโหนดให้ได้รับการจ่ายไฟแทนที่การถูกตัดออกเนื่องจากความผิดพลาด เป็นการลดความสูญเสียจากการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. J. Mun, J.H. Park, H. Kim, J. Seo, "Development of real-time-service restoration system for distribution automation system", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2001), 12 – 16 June 2001, pp. 1514 - 1519
- [2] M. Lehtonen, A. Matsinen, E. Antila, J. Kuru, "An advanced model for automatic fault management in distribution networks", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000, 23 – 27 January 2000, pp. 1900 - 1904
- [3] N.D.R. Sarma, V.C. Prasad, P. Rao, V. Sankar, "A new network reconfiguration technique for service restoration in distribution networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp. 1936 – 1942
- [4] D. Choi, C. Kim, J. Hasegawa, "An application of genetic algorithms to the network reconfiguration in distribution for loss minimization and load balancing problem", International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD 1995), 21 – 23 November 1995, pp. 376 - 381
- [5] T. D. Sudhakar, N. Shanmuga Vadivoo, S.M.R. Slochanal, "Heuristic based strategy for the restoration problem in electric power distribution system", International Conference on Power System Technology (POWERCON 2004), 21-24 November 2004, pp. 635 – 639
- [6] W. Li, P. Wang, Z. Li, Y. Liu, "Reliability evaluation of complex radial distribution system considering restoration sequence and network constraints", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, , April 2004, pp. 753 – 758

การวิเคราะห์ความผิดปกติพร้อมด้วยผลการแปลงพีคิวอาร์ Fault Analysis Using PQR Transformation

บรรณณัติ บริบูรณ์ และ ธนัตชัย กุลรวรานิชพงษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-3392 โทรสาร 0-4422-3394 Email: bbanyat@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลอง และการจำลองผลระบบจำหน่ายแบบบริษัท วิเคราะห์ความผิดปกติ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคผลการแปลงพีคิวอาร์ กระแสหรือแรงดันที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นกระแสตรง เครื่องมือวัดโดยทั่วไปจึงสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ง่าย จากผลการจำลองของงานวิจัยนี้พบว่า เทคนิคผลการแปลงพีคิวอาร์ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วกว่าเทคนิคการกำลังสองเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 6.7 ms.

คำสำคัญ : แบบจำลอง การจำลองผล ผลการแปลงพีคิวอาร์ การวิเคราะห์ความผิดปกติ

Abstract

This article describes modeling, simulation, and PQR transformation fault analysis of radial distribution system. The resultant current or voltage of PQR transformation is DC which the simple fault detection can be obtained by any measurement instruments. The simulation result is shown that the processing of PQR transformation is faster than the root mean square technique. The maximum different of simulated time is 6.7 ms.

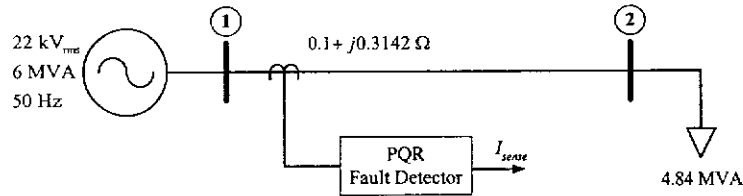
Keywords: modeling, simulation, PQR transformation, fault analysis

1. คำนำ

การวิเคราะห์เพื่อจำแนกชนิดหรือค้นหาตำแหน่งความผิดปกติ เป็นการประมวลผลข้อมูลของระบบไฟฟ้าในภาวะชั่วคราว เนื่องจากช่วงเวลาในระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ คือช่วงเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับความเดือดร้อนเพราะไม่มีไฟฟ้าใช้ ดังนั้น ความรวดเร็วของการได้มาซึ่งข้อมูลของระบบไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ และความถูกต้องของการประมวลผลข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ขั้นตอนการประมวลผลที่สำคัญของการวิเคราะห์ความผิดปกติในภาวะชั่วคราวคือ การคำนวณเฟสเซอร์กระแสและแรงดัน ประเด็นปัญหาสำคัญที่จะต้องพิจารณาประกอบการคำนวณ คือ ฮาร์มอนิกส์หรือสัญญาณรบกวน อัตราการซีกตัวอย่าง ระเบียบวิธีที่นำมาใช้เพื่อคำนวณเฟสเซอร์ เป็นต้น ซึ่งย่อมนำมาซึ่งผลให้การวิเคราะห์เพื่อจำแนกชนิดหรือค้นหาตำแหน่งความผิดปกติ มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้พีคิวอาร์เพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติ ซึ่งสามารถลดทั้งขั้นตอนการคำนวณเฟสเซอร์ได้บางส่วนหรือทั้งหมดของการประมวลผล

2. ระบบจำหน่ายทดสอบ

ระบบจำหน่ายที่ใช้เป็นระบบศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสสมมูล สายป้อนจำหน่าย โหลดสามเฟสสมมูล และตัวตรวจจับความผิดปกติ (fault detector) โดยประยุกต์ใช้เทคนิคผลการแปลงพีคิวอาร์



รูปที่ 1 ระบบจำหน่าย

3. ผลการแปลงพีคิวอาร์

สมการการแปลงจากระบบอ้างอิง $a-b-c$ ไปสู่ระบบอ้างอิง $p-q-r$ คือสมการที่ (1) - (4)

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่

$$C = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 0 & i_{areff}/i_{a\beta reff} & i_{breff}/i_{a\beta reff} \\ 0 & -i_{breff}/i_{a\beta reff} & i_{areff}/i_{a\beta reff} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{areff} \\ i_{breff} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{areff} \\ i_{breff} \\ i_{creff} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$i_{a\beta reff} = \sqrt{i_{areff}^2 + i_{breff}^2} \quad (4)$$

เมื่อ i_a, i_b, i_c คือ กระแสเฟสในระบบอ้างอิง $a-b-c$
 $i_{areff}, i_{breff}, i_{creff}$ คือ กระแสสามเฟสสมมูลอ้างอิงสำหรับระบบอ้างอิง

ประเด็นสำคัญที่ผู้ศึกษาให้ความสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของสัญญาณที่ได้จากผลการแปลงพีคิวอาร์ คือ 1) การเลือกขนาดและมุมเฟสของสัญญาณอ้างอิงอาจส่งผลให้สัญญาณผลการแปลงเป็นกระแสดตรงหรือสัญญาณรูปร่างชนิดอื่น 2) การวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณที่ได้จากผลการแปลงพีคิวอาร์ จะสามารถนำไปสู่การจำแนกชนิดความผิดปกติพร้อมได้หรือไม่ จากประเด็นปัญหาดังกล่าวนี้ ผู้ศึกษาจึงได้ทำการจำลองผลระบบจำหน่ายทดสอบที่แสดงในรูปที่ 1 โดยกำหนดให้เกิดความผิดปกติพร้อม 1 กรณี คือ ลัดวงจรสามเฟสลงดิน พารามิเตอร์ของการจำลองผลได้มีการกำหนดดังนี้ คือ ช่วงเวลาของการจำลองผล เท่ากับ $0 \text{ s} - 0.2 \text{ s}$ ชั่วเวลาของการจำลองผล เท่ากับ 0.0001 s ช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติพร้อม เท่ากับ $0.1 \text{ s} - 0.2 \text{ s}$ ความต้านทานผิดปกติพร้อม เท่ากับ $10 \text{ } \Omega$ และตำแหน่งของความผิดปกติพร้อมทุกกรณี คือ บัส 2

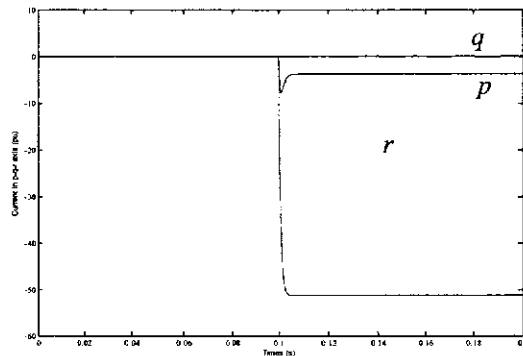
4. ผลการจำลอง

การจำลองผลจะกำหนดให้สถานการณ์มีความแตกต่างกันทั้งหมด 2 กรณี โดยจะเป็นการแปรค่ามุมเฟสของสัญญาณอ้างอิง และขนาดแรงดันของสัญญาณอ้างอิง สำหรับความผิดพลาดสามเฟสตัวจรลงดิน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

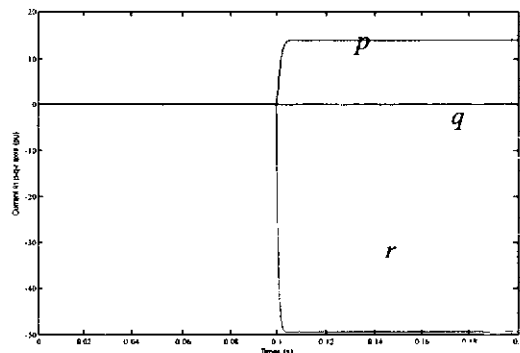
ตารางที่ 1 ข้อกำหนดสำหรับการจำลองสถานการณ์และการแปลงฟีดวอร์

ลำดับที่	ชนิดความผิดพลาด	มุมเฟสสัญญาณอ้างอิง (ϕ)	ขนาดของสัญญาณอ้างอิง (pu)
1	สามเฟสตัวจรลงดิน	-20°	0.8
2		0°	1.0

รูปสัญญาณผลการแปลงฟีดวอร์ทั้ง 2 กรณี แสดงดังรูปที่ 2 – 3



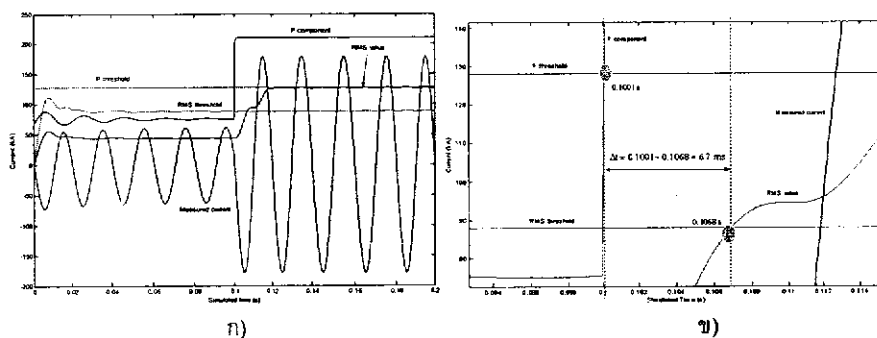
รูปที่ 2 ผลการแปลงฟีดวอร์สำหรับกรณีสัญญาณอ้างอิง $\phi = -20^\circ$ และ $pu = 0.8$



รูปที่ 3 ผลการแปลงฟีดวอร์สำหรับกรณีสัญญาณอ้างอิง $\phi = 0^\circ$ และ $pu = 1.0$

จากการจำลองผลการตรวจวัดกระแสผิดพลาดสามเฟสตัวจรลงดิน และพารามิเตอร์ของสัญญาณอ้างอิง คือ $\phi = -20^\circ$ และ $pu = 0.8$ โดยการประยุกต์ใช้ผลการแปลงฟีดวอร์ และรวากกำลังสองเฉลี่ย จะได้รูปสัญญาณในมุมมองปกติดังแสดงในรูปที่ 5-ก) และแสดงในมุมมองขยายดังรูปที่ 5-ข) เมื่อกำหนดให้ P threshold คือค่ากระแส p สูงสุดที่อุปกรณ์ป้องกันจะตรวจจับพบ และวินิจฉัยว่าไม่ใช่กระแสผิดพลาด RMS

threshold คือค่ากระแสรากล้างสองเฉลี่ยสูงสุดที่อุปกรณ์ป้องกันจะตรวจจับพบ และวินิจฉัยว่าไม่ใช่กระแสผิดปกติ การจำลองผลในระยะเวลาหลัง 0.1 s คือ ช่วงเวลาที่ระบบจำหน่ายเกิดความผิดปกติที่บัส 2 เมื่อสังเกตจากรูปสัญญาณของกระแสในส่วนประกอบที่จะพบว่า เส้นกราฟจะตัดกับเส้นกราฟ P threshold ที่เวลาประมาณ 0.1001 s วินาที ในขณะที่รูปกราฟของค่ารากล้างสองเฉลี่ย จะตัดกับเส้นกราฟ RMS threshold ที่เวลาประมาณ 0.1068 s วินาที เมื่อพิจารณาจุดตัดของกราฟทั้งสองคู่ดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่า การตรวจจับความผิดปกติสำหรับกรณีนี้ด้วยเทคนิคการแปลงพีคิวอาร์ ใช้เวลาที่รวดเร็วกว่าด้วยค่าที่แตกต่างกันเท่ากับ $0.1068 - 0.1001 = 6.7 \text{ ms}$



รูปที่ 5 ผลการตรวจวัดความผิดปกติสามเฟสคลื่นวงจรลงดิน และพารามิเตอร์ของสัญญาณอ้างอิง คือ $\phi = -20^\circ$ และ $pu = 0.8$

5. บทสรุป

จากการศึกษาผลการแปลงพีคิวอาร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับความผิดปกติ และเมื่อพิจารณาผลการจำลองกับระบบจำหน่ายทดสอบพบว่า การตรวจจับความผิดปกติชนิดสามเฟสลงดิน สามารถกระทำได้อย่างง่ายดายและรวดเร็วกว่าวิธีการคำนวณรากล้างสองเฉลี่ย เนื่องจากรูปสัญญาณที่ได้เป็นกระแสตรงซึ่งเครื่องมือวัดโดยทั่วไปสามารถตรวจจับได้ง่าย

6. รายการอ้างอิง

- [1] Kim, H, Ji, J., K., Kim, J., H., Sul, S., K., and Kim, K., H. (2004). Novel topology of a line interactive UPS using PQR instantaneous power theory. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. 4:2232 - 2238.
- [2] Lee, S., J., Kim, H. Sul, K., S., and Blaabjerg, F. (2004). A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory. IEEE Transactions on Power Electronics. 19(3):814 - 827.
- [3] Kim, H, Lee, S., J. and Sul, S., K. (2004). A calculation for the compensation voltages in dynamic voltage restorers by use of PQR power theory. Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004 (APEC '04). 1:573 - 579.

แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดกระตุ้นตัวเอง

Power flow models of a self-excited induction generator

ประมวล แสงสารวัตร และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 044-224400 โทรสาร 044-224601 Email: thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง เพื่อใช้สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นผลมาจาก การต่อเชื่อมโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลมเป็นตัวต้นกำลัง เป็นต้น โดยนำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองรวมทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลัง ไฟฟ้า แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการสูญเสีย และความแม่นยำของแบบจำลอง เพื่อนำไปทำนายผลของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง ที่เป็นผลมาจากการต่อเชื่อมโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบ ผลจากการนำเสนอแบบจำลองนี้ ช่วยให้คำนวณแรงดันที่จุดต่างๆ ในระบบกำลังงานสูญเสียในระบบ ตลอดจนใช้วินิจฉัยและแสวงหาแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ เช่น แรงดันตกในระบบ หรือการลัดวงจร เป็นต้น เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบสายป้อน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ถูกนำมาประเมินผล ผลการวิจัยที่ได้จะเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวางแผนทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อป้องกันปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับและการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ : แบบจำลอง แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย

Abstract

This paper presents power flow models of a self-excited induction generator. These models is used for steady state power flow calculation in electric power systems which a generating plant driven by renewable energy sources, such as wind energy, is connected to serve loads. This research demonstrates the induction generator by two forms: i) power model ii) voltage bus control model and iii) admittance model. Solution convergence and model accuracy are carefully observed in order to predict power flow distribution through feeder lines resulting from the grid connection of a renewable power plant. From the proposed models, voltage profiles and power losses of the system can be calculated. To verify the models, standard IEEE 37-node, 118 node and a PEA 's 22-kV distribution power system in Nakhon Ratchasima are evaluated. In addition, satisfactory results can be employed to develop system stability analysis and operation planning in order to prevent supply service interruption and conserve electrical energy.

Keywords : modeling, power flow models, distributed generators

1. บทนำ

พลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานลม พลังงานจากคลื่นทะเล หรืออื่น ๆ ได้รับความสนับสนุนขึ้นมาเป็นพลังงานทางเลือกเพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานสำรอง และเป็นทางเลือกปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) ที่มีราคาแพงกว่าและมีปริมาณจำกัด การเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ย่อมส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่อเชื่อมอยู่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ถึงแม้ว่าโรงไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสในการผลิตกำลังงานไฟฟ้า กรณีของโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมีจำนวนไม่น้อยที่ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเหตุผลบางประการ

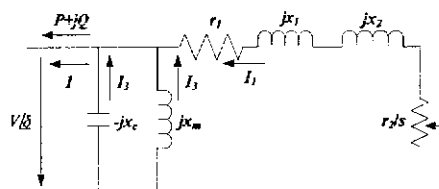
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed generators : DGs) คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก(น้อยกว่า 15 MW) [1] ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) กังหันลม (wind turbines) หรือกังหันน้ำขนาดเล็ก (small-scale hydraulic turbines) เป็นตัวต้นกำลังที่ติดตั้งเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปยังระบบ และเรียกระบบส่งจ่ายที่มีการติดตั้ง DGs ว่า distributed generation (DG) โดยส่งผลให้เกิดข้อดี คือ ช่วยลดต้นทุนการนำเข้าพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำงานของ DG ส่วนใหญ่มาจากแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้น ผลจากการติดตั้งนี้ ย่อมทำให้จุดการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า การกระจายของขนาดแรงดันตลอดระยะความยาวของสายบ่อน หรือกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งระบบ เป็นต้น ดังนั้นการเพิ่ม DG เข้าไปในระบบ ต้องผ่านการวิเคราะห์ความมั่นคงในระบบอย่างรอบคอบ เพื่อให้ DG ที่ติดตั้งช่วยทำให้ความเชื่อถือได้ในระบบเพิ่มสูงขึ้น (high reliability) ระดับแรงดันในระบบดีขึ้น (voltage profile improvement) และกำลังงานสูญเสียทั้งระบบลดน้อยลง (reduction of power loss)

บทความนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วนๆ ดังนี้ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า รวมทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ส่วนที่ 3 นำเสนอการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทั้งสามแบบจำลอง เพื่อหาผลเฉลยแรงดันและกำลังไฟฟ้าโดยสังเขป ส่วนที่ 4 นำเสนอผลการทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบสายบ่อน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดนครราชสีมา เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการลู่เข้า และความแม่นยำของแบบจำลอง

2. แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (PQ model)

จากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นพบว่าแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง สามารถพิจารณาได้จากรูป ดังนี้



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อ x_1 คือ stator reactance x_2 คือ rotor reactance
 r_1 คือ stator resistance r_2 คือ rotor resistance
 x_m คือ excitation reactance x_c คือ capacitor banks reactance
 s คือ slip of induction generator

จากวงจรสมมูล สามารถคำนวณหากระแสที่ไหลในแต่ละจุด ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} + j \frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I_2 = \frac{-V \sin \delta + jV \cos \delta}{x_m} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$I_3 = \frac{V \sin \delta - jV \cos \delta}{x_c} \quad \dots\dots\dots (3)$$

คำนวณหากระแสทั้งหมด จาก $I = I_1 + I_2 + I_3$ จะได้

$$I = \frac{-(sr_2V \cos \delta + s^2xV \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \sin \delta}{x_p} + j \left(\frac{(s^2xV \cos \delta - sr_2V \sin \delta)}{r_2^2 + s^2x^2} - \frac{V \cos \delta}{x_p} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ $x = x_1 + x_2$, $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$ และไม่พิจารณาผลของ r_1

คำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ และจัดรูปสมการ

$$S = VI^* = P + jQ$$

จะได้

$$P = -\frac{sr_2V^2}{r_2^2 + s^2x^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = -\left(\frac{s^2xV^2}{r_2^2 + s^2x^2} + \frac{V^2}{x_p} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

หรือ

$$Q = \frac{Psx}{r_2} - \frac{V^2}{x_p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

จากสมการ (5) สามารถจัดรูปสมการ ได้ดังนี้

$$s = \frac{-V^2r_2 + \sqrt{V^4r_2^2 - 4P^2x^2r_2^2}}{2Px^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกัน โดยพิจารณาจาก (7) และ (8) จะได้

$$Q = \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2x^2}}{2x} - \frac{V^2}{x_p} \quad \dots\dots\dots (9)$$

เนื่องจาก DG ไม่เกี่ยวข้องกับ การควบคุมความถี่ [2] ดังนั้นสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ที่พิจารณา กำลังไฟฟ้าจริงของ DG เป็นค่าคงที่ จะได้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่สามารถอธิบาย ได้ดังนี้

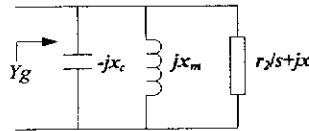
$$\begin{cases} P = P_s \\ Q = f(V) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

การกำหนดค่าเริ่มต้นของกำลังไฟฟ้าจริงของ DG เป็นค่าคงที่ ต้องอยู่ในขอบเขตที่ไม่ทำให้ค่าสลิปในสมการ (8) เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งค่าของกำลังไฟฟ้าจริง ต้องสอดคล้องกับสมการ

$$V^4 r_2 - 4P^2 x^2 r_2^2 \geq 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

2.2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Admittance model)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 1 สามารถเขียนวงจรใหม่ ได้ดังนี้



รูปที่ 2 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2 ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจร ได้ดังนี้

$$Z_g = -jx_c // jx_m // (r_2/s + jx) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจร

$$Y_g = \frac{1}{-jx_c} + \frac{1}{jx_m} + \frac{1}{r_2/s + jx} \quad \dots\dots\dots (13)$$

จะได้

$$Y_g = \frac{sr_2}{r_2^2 + s^2x^2} - j \frac{r_2^2 + s^2x^2 + x_p s^2x}{x_p(r_2^2 + s^2x^2)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

3. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือที่รู้จักกันในชื่อ power flow ซึ่งรูปแบบของปัญหาจะเป็นการหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านอกที่พในแต่ละสายส่ง ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยในการแก้ปัญหาจะพิจารณาระบบภายใต้ balance condition และใช้ single phase model ในการทดสอบ

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่งบัสมีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่ และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อ บัสสลัก (slack bus) และไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวน

บัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง n-1 บัส เท่านั้น

3.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่โหนดที่มีการติดตั้ง DG คือ

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i^{sch} + \sum_{j=1}^n P_{ij} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_i^{sch} + \sum_{j=1}^n Q_{ij} + \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

เมื่อ m คือ จำนวน DG ทั้งหมดที่ติดตั้งที่โหนด i

P_k คือ กำลังไฟฟ้าจริงของ DG ตัวที่ k ที่ติดตั้งที่โหนด i

Q_k คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ DG ตัวที่ k ที่ติดตั้งที่โหนด i

โดย Q_k สามารถคำนวณได้จาก (9) ดังนั้น การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ต้องมีการปรับค่า $\frac{\partial \Delta Q}{\partial V_i} V_i$ ในจาโคเบียนเมตริกซ์ ในทุกๆ รอบการคำนวณ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอน ได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงของ DG ที่ติดตั้งในระบบ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก
2. คำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ จากข้อมูลสายส่ง ในรูปแบบต่อหน่วย
3. คำนวณค่าสลิปจาก (8) และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจาก (7) หรือ (9)
4. คำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยใช้สมการ (15) สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่โหนดที่มีการติดตั้ง DG
5. ปรับปรุงขนาดและมุมเฟสแรงดันไฟฟ้า และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ให้กลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 3
6. ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ
7. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง (line flow) แต่ละเส้นและค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า (power losses) จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้

3.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์

พิจารณา (8) และ (14) พบว่า ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจรขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่ ดังนั้น ในขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในทุกๆ รอบการคำนวณ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ และกำลังไฟฟ้าจริงของ DG ที่ติดตั้งในระบบ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก
2. คำนวณค่าสลิปโดย (8) คำนวณแอดมิตแตนซ์รวมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดย (14) และคำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ ในรูปแบบต่อหน่วย
3. คำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน
4. ปรับปรุงขนาดและมุมเฟสแรงดันไฟฟ้า และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Delta|V|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ให้กลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 2

5. ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ
6. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง (line flow) แต่ละเส้นและค่ากำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า (power losses) จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้

4. ระบบทดสอบและผลการทดสอบ

การศึกษานี้จะใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบจำหน่ายทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง DG โดยเริ่มจากคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในระบบ ก่อนการติดตั้ง DG จากนั้นทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เมื่อมีการติดตั้ง DG เพิ่มในระบบ โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า (PQ model) แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน (PV model) และ แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance model) โดย DG ทุกตัวที่ติดตั้งในระบบมีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

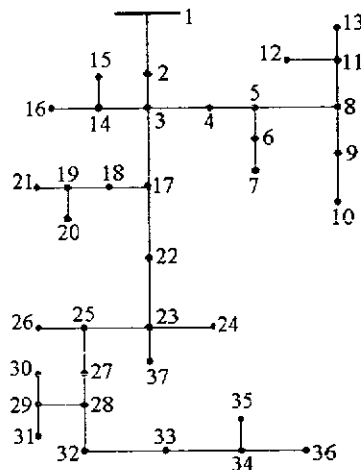
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [3]

พารามิเตอร์	$x_1/p.u.$	$x_2/p.u.$	$r_2/p.u.$	$x_m/p.u.$
ค่า	0.09985	0.10906	0.00373	3.54708

สำหรับระบบทดสอบที่ใช้ ได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบจำหน่าย 22 kV ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดการจำลองผลและผลการคำนวณดังต่อไปนี้

4.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 37 โหนด [4]

ระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด ใช้กับระดับแรงดัน 4.8 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ดังรูป



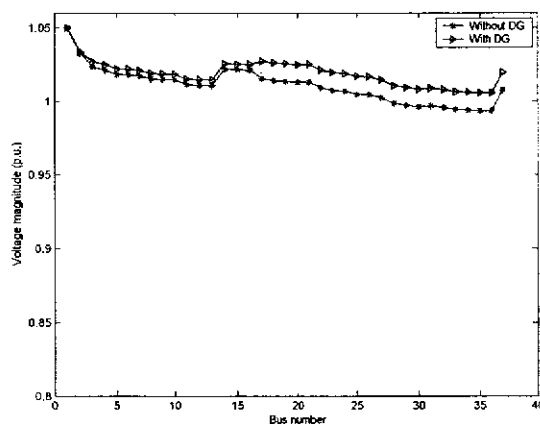
รูปที่ 3 ระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด

การทดสอบได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ ไว้ที่ 1×10^{-6} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการลู่เข้า และความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน ในการทดลองแยกออกเป็น 4 กรณีดังนี้

ตารางที่ 2 กรณีทดสอบของระบบ 37 โหนด

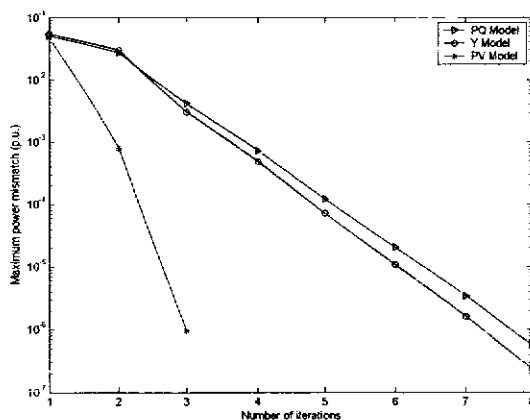
กรณี	ระบบ
1	ก่อนทำการติดตั้ง DG
2	ภายหลังติดตั้ง DG (PQ model) ที่โหนด 17
3	ภายหลังติดตั้ง DG (Y model) ที่โหนด 17
4	ภายหลังติดตั้ง DG (PV model) ที่โหนด 17

จากการทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 17 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส แสดงดังรูป



รูปที่ 4 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติด DG ในระบบ IEEE 37 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอมิตแดนซ์ ของระบบ IEEE 37 โหนดแสดงดังรูป



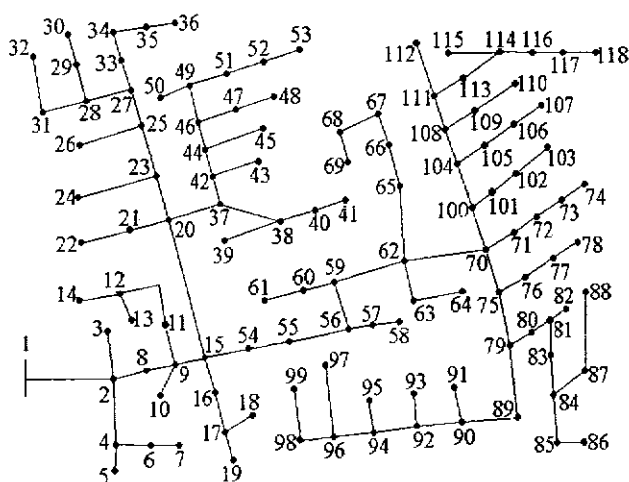
รูปที่ 5 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด

จากรูปที่ 4 เมื่อติดตั้ง DG เข้าไปที่ โหนด 17 และคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเพิ่ม ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน พบว่าผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และแรงดันในแต่ละโหนดของระบบมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้ง DG ด้วย

จากรูปที่ 5 คุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าอัตราการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน ของการคำนวณทั้ง 3 แบบ เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และแบบจำลองกำลังไฟฟ้า

4.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 118 โหนด

ระบบทดสอบ 118 โหนดของ IEEE ใช้กับระดับแรงดัน 4.16 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ดังรูป



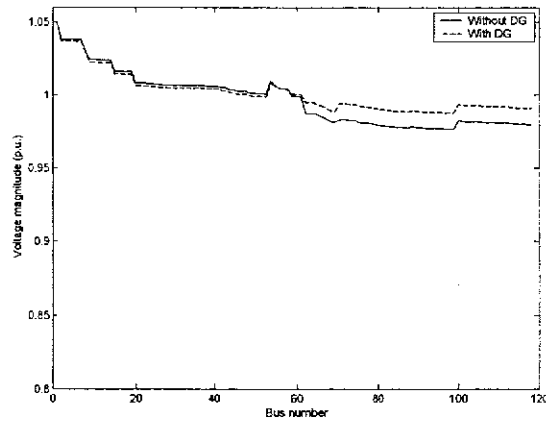
รูปที่ 6 ระบบทดสอบ IEEE 118 โหนด

การทดสอบได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ ไว้ที่ 1×10^{-6} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการลู่เข้า และความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งทั้ง 3 แบบจำลอง ในการทดลองแยกออกเป็น 4 กรณีดังนี้

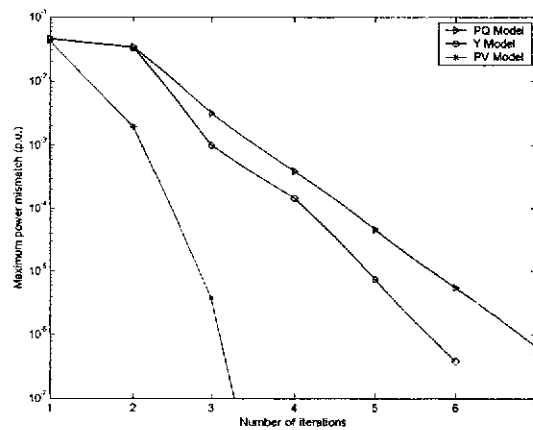
ตารางที่ 3 กรณีทดสอบของระบบ 118 โหนด

กรณี	ระบบ
1	ก่อนทำการติดตั้ง DG
2	ภายหลังติดตั้ง DG (PQ model) ที่โหนด 70
3	ภายหลังติดตั้ง DG (Y model) ที่โหนด 70
4	ภายหลังติดตั้ง DG (PV model) ที่โหนด 70

จากการทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 70 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส แสดงดังรูป



รูปที่ 7 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติดตั้ง DG ในระบบ IEEE 118 โหนด
 สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณา
 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ของระบบ IEEE118 โหนด แสดงดังรูป



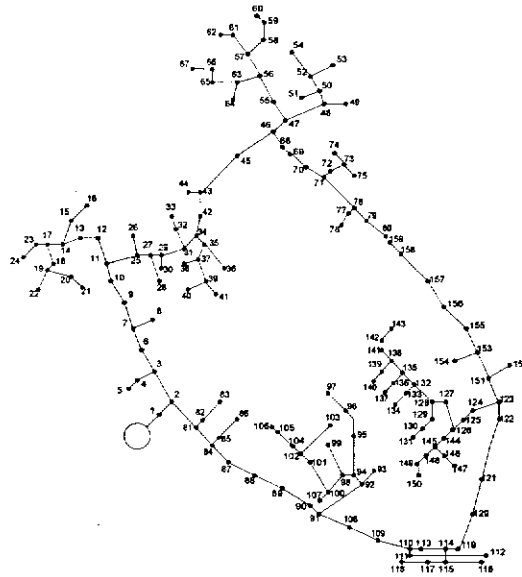
รูปที่ 8 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE118 โหนด

จากรูปที่ 7 เมื่อติดตั้ง DG เข้าไปที่ โหนด 70 และคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณา
 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเพิ่ม ในรูปของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่า ผลเฉลยของแรงดันในแต่ละ
 โหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และแรงดันในแต่ละโหนดของระบบ โดยเฉพาะ
 โหนดที่อยู่ใกล้เคียงกับโหนด 70 มีค่าดีขึ้นกว่าก่อนติดตั้ง DG

จากรูปที่ 8 คุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณการไหลของกำลัง ไฟฟ้า พบว่าการคำนวณด้วย
 แบบจำลองบังคับควบคุมแรงดัน มีอัตราการลู่เข้าหาค่าคอนเวิร์จเร็วที่สุด รองลงมา คือ การคำนวณด้วยแบบจำลอง
 แอสมิตแตนซ์ และการคำนวณด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ

4.3 ระบบสายป้อนจำหน่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 โหนด

ระบบสายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) 159 โหนด ใช้กับระดับแรงดัน 22 KV ที่ค่า
 กำลังไฟฟ้าฐาน 100 kVA ดังรูป



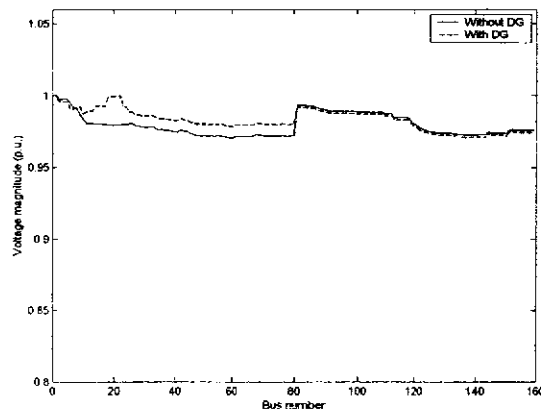
รูปที่ 9 ระบบทดสอบสายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 โหนด

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านอัตราการใช้และความแม่นยำของแบบจำลอง ได้ทำการทดลองโดยแยกออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

ตารางที่ 4 กรณีทดสอบของระบบ 159 โหนด

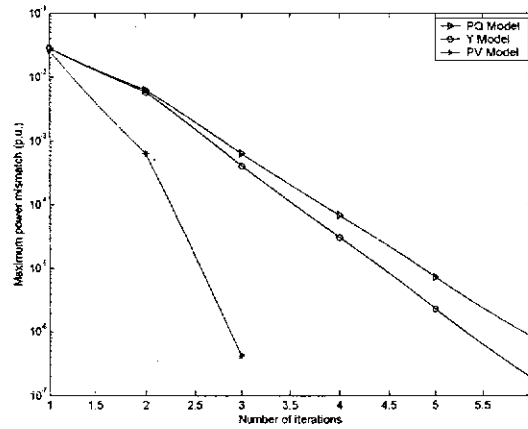
กรณี	ระบบ
1	ก่อนทำการติดตั้ง DG
2	ภายหลังติดตั้ง DG ที่โหนด 22 (PQ, Y, PV model)
3	ภายหลังติดตั้ง DG ที่โหนด 150 (PQ, Y, PV model)
4	ภายหลังติดตั้ง DG ที่โหนด 22 และ 150 (PQ, Y, PV model)

กรณีที่ 2 ทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 22 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้ง ในรูปแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัสดังต่อไปนี้



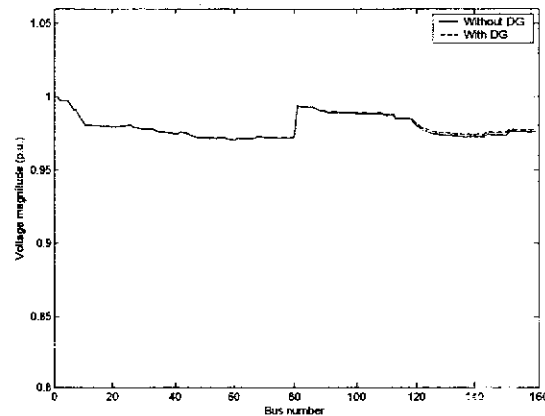
รูปที่ 10 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติด DG ในระบบ SUT 159 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ในกรณีที่ 2 ของระบบ SUT 159 โหนด แสดงดังรูป



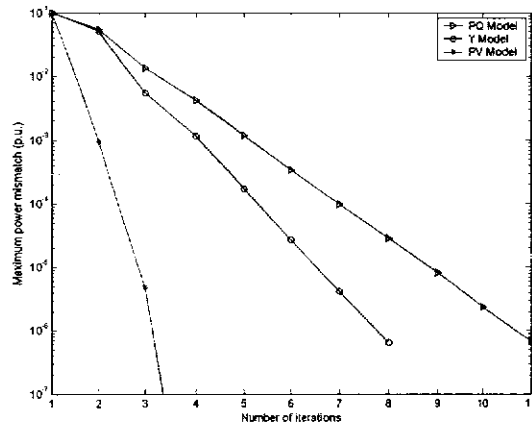
รูปที่ 11 คุณสมบัติการลู่เข้าการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด

กรณีที่ 3 ทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 150 และคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า ทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันดังนี้



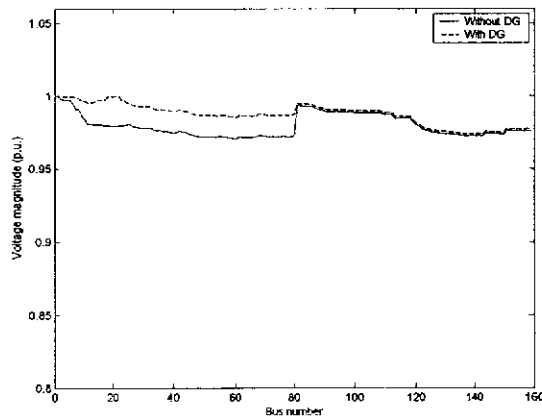
รูปที่ 12 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติด DG ในระบบ SUT 159 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ในกรณีที่ 3 ของระบบ SUT 159 โหนด แสดงดังรูป



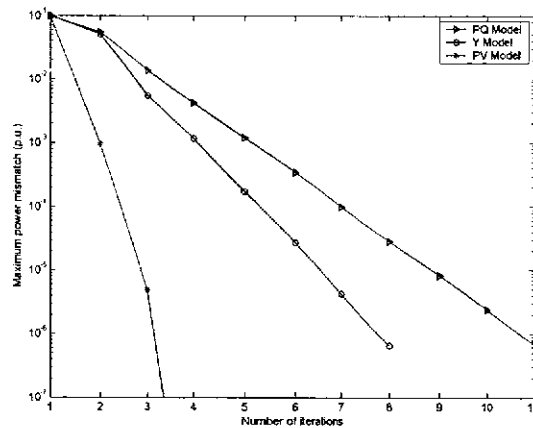
รูปที่ 13 คุณสมบัติการลู่เข้าการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด

กรณีนี้ 4 ทดลองติดตั้ง DG ที่โหนด 22 และ โหนด 150 จากนั้นคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า ทั้ง 3 แบบจำลอง ได้ผลเฉลยแรงดันในแต่ละบัส ดังต่อไปนี้



รูปที่ 14 ผลเฉลยแรงดันก่อนและหลังติด DG ในระบบ SUT 159 โหนด

สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกติดตั้ง ในรูปของแบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแทนซ์ในกรณีนี้ 4 ของระบบ SUT 159 โหนด แสดงดังรูป



รูปที่ 15 คุณสมบัติการลู่เข้าการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด

จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของจำนวนการไหลของกำลังไฟฟ้า ในการทดลองการติดตั้ง DG ในระบบ SUT 159 โหนด ที่โหนด 22 (รูปที่ 10) โหนด 150 (รูปที่ 12) และทั้งสองโหนด พร้อมกัน (รูปที่ 14) โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งเพิ่ม ในรูปของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และแรงดันในแต่ละโหนด ในระบบทดสอบ โดยเฉพาะโหนดที่อยู่ใกล้กับโหนดที่ติดตั้ง DG เพิ่ม มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนการติดตั้ง DG ด้วย

จากรูปคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับการทดสอบกับระบบ SUT 159 โหนด พบว่าอัตราการลู่เข้าหาค่าตอบของการคำนวณทั้ง 3 แบบ มีลักษณะเดียวกันกับผลการทดลองของระบบ IEEE 37 โหนด และ IEEE 118 โหนด

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง เพื่อใช้สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยนำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองรวมทั้งอีก 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ จากผลการทดสอบกับระบบทดสอบ มาตรฐาน IEEE 37 โหนด 118 โหนด และระบบสายป้อน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ผลเฉลยของแรงดันในแต่ละโหนด ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกันมาก สำหรับคุณสมบัติการลู่เข้าของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ พบว่าการคำนวณด้วยแบบจำลองบัสควบคุมแรงดัน มีอัตราการลู่เข้าหาค่าตอบเร็วที่สุด รองลงมา คือ การคำนวณด้วยแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ และการคำนวณด้วยแบบจำลองกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ และแรงดันในแต่ละโหนดของระบบ โดยเฉพาะโหนดที่อยู่ใกล้เคียงกับโหนดที่ติดตั้ง DG เพิ่ม มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีก่อนการติดตั้ง DG

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลระบบทดสอบ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.Celli, and F.Pilo.: "Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks". Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 20-24 May 2001
- [2] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan.: "Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation". Power Engineering Society General Meeting, on 18-22 June 2006 . IEEE
- [3] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan.: "Multi-stage Dynamic Optimal Power Flow in Wind Power Integrated System" Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, 2005.
- [4] Distribution System Subcommittee, "IEEE 37 node test feeder", IEEE Power Engineering Society, 1998
- [5] Andrés E, Feijóo and José Cidrás.: "Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 15, NO. 1, February 2000
- [6] Y.Zhu, K.Tomsovic.: "Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems With Dispersed Generation", IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827
- [7] Wang Zhiqun, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi et al, "Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile", Automation of Electric Power System, 2004, 28(16): 56-60
- [8] M.S.Srimvas.: "Distribution load flows: A brief review", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. Volume 2, 23-27 Jan. 2000 Page(s):942 - 945 vol.2
- [9] Arturo Losi, Mario Russo.: "Dispersed Generation Modeling for Object oriented Distribution Load Flow", IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 1-9

การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับที่จ่ายด้วย อินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า Torque-speed estimation of an inverter-fed AC motor for electric vehicle drives

Thanatchai Kulkarni และ ชรินทร์ สุขเจริญ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 E-mail:
thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

รถขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ไฟฟ้ามีใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในสนามกอล์ฟ โรงงาน อุตสาหกรรม หน่วยงานราชการ รัฐวิสาหกิจ หรือสวนสัตว์ เป็นต้น การขับเคลื่อนดำเนินการผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าที่ควบคุมง่าย แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น การบำรุงรักษายุ่งยาก ราคาแพง และขนาดค่อนข้างโตกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเอซี เป็นต้น การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเอซีมาใช้งานต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟให้เป็นเอซี ที่มีสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สมรรถนะของมอเตอร์เอซีภายใต้แหล่งจ่ายไฟนี้ มีความแตกต่างจากกรณีที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายไฟรูปไซน์โดยตรง งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เอซีผ่านคุณลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ ภายใต้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยมแบบจำลองในสภาวะชั่วคราว ถูกนำมาใช้งานเพื่อจำลองผลการจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายรูปสี่เหลี่ยมผลตอบสนองที่ได้จะถูกนำมาใช้ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปของสมการอย่างง่าย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้นำมาใช้ออกแบบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์เอซีที่ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยประหยัดพลังงานในขนาดได้ มอเตอร์ที่ซีพีกัด 1.86 kW มอเตอร์เอซีเฟสเดียว พิกัด 0.26 kW และมอเตอร์เอซีสามเฟสพิกัด 0.37 kW ถูกนำมาใช้ทดสอบ เพื่อประเมินสมรรถนะแรงบิด-ความเร็วรอบ ผลจากการทดสอบ พบว่า คุณลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วรอบจากการป้อนไฟโดยใช้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม มีรูปร่างคล้ายกับการป้อนด้วยแหล่งจ่ายรูปไซน์ ต่างกันเพียงขนาดแรงบิดสูงสุดเท่านั้น ทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดได้โดยใช้ตัวปรับคูณที่เหมาะสม

คำสำคัญ : รูปคลื่นสี่เหลี่ยม มอเตอร์เหนี่ยวนำ อินเวอร์เตอร์

Abstract

Electric vehicles driven by an on-board battery have been widely used in various applications, e.g. a golf cart in golf yard, a folk lift in an industrial plant or service car in zoo. Their traction drive conventionally employs a simply-controlled DC motor. However, there are still several disadvantages of using the DC motor, such as maintenance problems, expensive cost and larger size. Alternatively, to drive an AC motor by using the on-board battery requires a power inverter circuit in which a square-wave voltage is produced across its output terminal and then energizes the motor. AC motor characteristics especially the torque-speed curve under the square-wave excitation differ from that obtained by the sinusoidal excitation. This research is to study the AC motor characteristics through the torque-speed curve estimation under the square-wave power supply. Obtained torque-speed responses are used to formulate a simple expression

to represent the motor characteristic. The results can lead to traction-motor design of an electric vehicle with high efficiency and energy saving. One DC motor, one single-phase AC motor and one three-phase AC motor with the same rating (10 hp) were tested to evaluate the torque-speed characteristic. As a result, the torque-speed response obtained from the square-wave supply is very similar in shape to that obtained by the sinusoidal supply. The key different is only the maximum pull-out torque. The torque equation of the square-wave case can be simply estimated by using a sinusoidal-excited steady-state torque equation with an appropriate scaling factor.

Keywords: square-wave, AC motor, inverter

1. คำนำ

มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแทนที่มอเตอร์กระแสตรงทั้งนี้เนื่องจากข้อได้เปรียบหลายประการ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งราคาการบำรุงรักษาและขนาดต่อพิกัดที่โตกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเอซี ดังนั้น ในการใช้งานได้เลือกใช้งานได้เลือกใช้งานประเภทที่ภาระเหมาะสม กับแรงขับของตัวรถที่ไม่มากนักเช่น รถส่งเอกสารในโรงพยาบาล ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ขนาดโตมาขับเคลื่อน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้มอเตอร์เอซีขับเคลื่อนแทนมอเตอร์ดีซี ซึ่งขนาดต่อพิกัดโตกว่าและพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนนั้นก็มากกว่ามอเตอร์เอซี เนื่องจากว่า แหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนนั้นมาจากแบตเตอรี่ ซึ่งแรงดันที่ได้จากแบตเตอรี่นั้นเมื่อผ่านตัวอินเวอร์เตอร์แล้ว จะได้รูปคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมแทนที่แหล่งจ่ายไฟรูปไซน์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ปรับค่าแรงดันและค่าความกว้างของรูปคลื่น ให้มีค่าแรงดันเฉลี่ยให้เท่ากับพิกัดแรงดันของมอเตอร์ จากนั้นได้ทำการจำลองผลเพื่อทดสอบประเมินสมรรถนะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เอซีเฟสเดียว และมอเตอร์เอซีสามเฟส ผลการวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาตัวต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต่อไป

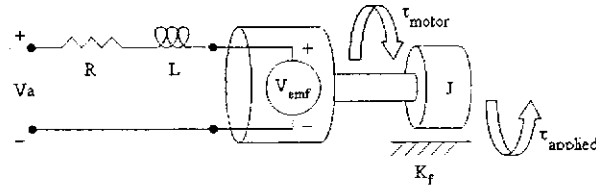
2. มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลซึ่งมีการใช้งานในปัจจุบันอย่างหลากหลาย การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน แต่ละประเภทซึ่งดูว่าเหมาะกับงานประเภทใดบ้างเช่น งานที่ใช้ความเร็วรอบสูง งานที่ต้องการแรงบิดมาก ๆ งานที่ต้องการควบคุมความเร็ว เป็นต้น มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามกระแสไฟที่ใช้ใช้งาน คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวและมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ในที่นี้ได้กล่าวถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 มอเตอร์ดีซี

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามลักษณะของสเตเตอร์ [1] คือ ขดลวดสนามแม่เหล็ก (wound field) และแบบขั้วแม่เหล็กถาวร ถ้าแบ่งตามขดลวดสนามแม่เหล็กจะ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการกระตุ้นของ สนามแม่เหล็ก คือ แบบกระตุ้นแยก (Separately Excited) และแบบกระตุ้นตัวเอง (Self-Excited) หลัก การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าดีซี นั้นอาศัยหลักการของปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามแม่เหล็กและ ขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวขดลวดตัวนำนั้นแรงที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ใน

การจำลองผลนั้นได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [2] จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของมอเตอร์ดีซีและจากโครงสร้างของมอเตอร์ดีซีนั้น



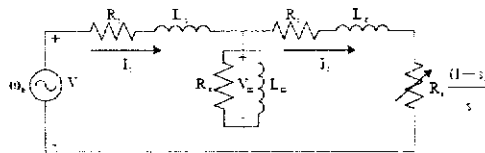
รูปที่ 1 โครงสร้างของมอเตอร์ดีซี

จะสามารถเขียนสมการสถานะ [3] ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & -K_b \\ L & L \\ K_m & -K_f \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ \tau_{applied} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งแบบ 3 เฟส และ แบบเฟสเดียวนั้น จากการศึกษาพบว่ามีการวิเคราะห์อยู่ 2 แบบ คือ พิจารณาแบบสภาวะคงตัว (steady-state model) และ แบบสภาวะพลวัต (dynamic model) โดยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสจะพิจารณาวงจรสมมูลแบบ ต่อเฟสที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดัน ที่สแตเตอร์กับแรงดันที่โรเตอร์ด้วยอัตราส่วนของรอบประสิทธิผล (effective turn ratio) โดยจะมีการย้ายค่าพารามิเตอร์ของโรเตอร์ไปอยู่บนสแตเตอร์ [3] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลสมการกระแสของโรเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2-5 [4]

$$I_r = \frac{V_m}{(R_m + \frac{R_s}{s}) + j(X_m + X_s)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

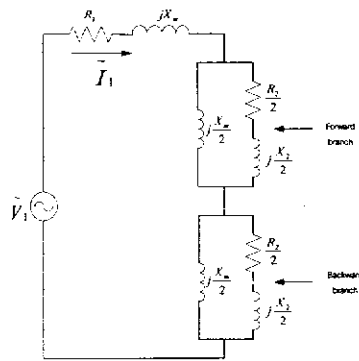
$$V_m = \frac{X_m}{X_m + X_s} V_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_m = R_m + jX_m = \frac{jX_m(R_s + jX_s)}{R_s + j(X_m + X_s)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

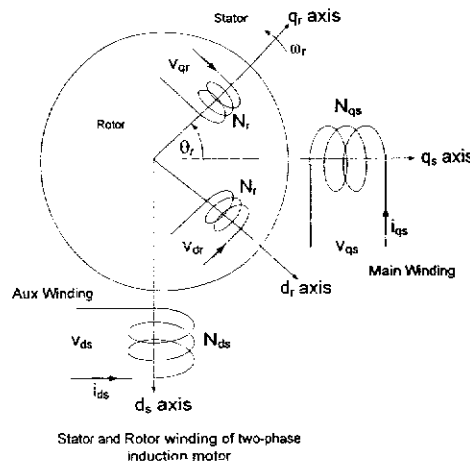
$$T_{me} = \frac{3V_m^2 R_s / s}{\omega_s [(R_m + R_s/s)^2 + (X_m + X_s)^2]} \quad \dots\dots\dots (5)$$

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

ในกรณีของแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว [5] มีการพิจารณาวงจรสมมูลจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนทำให้วงจรเสมือนของโรเตอร์ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และ เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปด้านหลัง ดังรูปที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวประกอบด้วย ขดลวดหลัก ขดลวดช่วยที่วางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าบนส่วนที่อยู่กับที่ (stator) ขดลวดขดลวดตัวหมุน (rotor winding) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะใช้แบบจำลองแบบพลวัตซึ่งต้องอาศัยการพิจารณา มอเตอร์แบบ 2 แกน ซึ่งประกอบด้วย direct axis (แกน d) และ quadrature axis (แกน q) ซึ่งทั้ง 2 แกนจะตั้งฉากกัน ดังนั้นด้วยลักษณะการวางตัวของขดลวดขดลวดหลักและขดลวดช่วยทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน จึงสามารถพิจารณาโดยใช้หลักการของทฤษฎี 2 แกนได้ ในที่นี้จะ พิจารณาที่แกนอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame) [6]



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส



รูปที่ 4 direct axis และ quadrature axis ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิจารณาค่าแรงดันของขดลวดที่บนสเตเตอร์และโรเตอร์ จะได้ตามสมการที่ (7) และสมการที่ (8) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

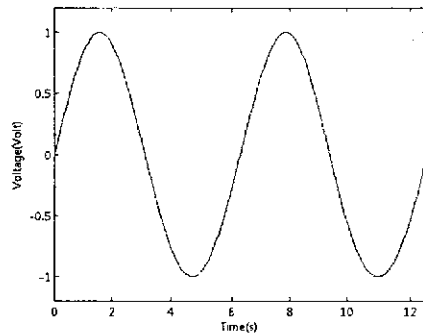
$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqs} & L_{drds} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

3. แหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวกำลังของการขับเคลื่อนต่าง ๆ แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีด้วยกัน 3 ประเภท

3.1 แหล่งจ่ายไฟเอซี

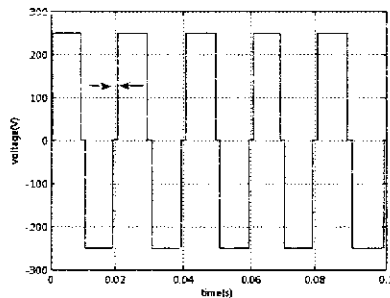
แหล่งกำเนิดไฟเอซีหรือไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้มาจากโรงไฟฟ้านั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าแปรค่าเป็นฟังก์ชันของไซน์ ด้วยความถี่ 50 รอบต่อวินาที (Hz) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5 ซึ่งเป็น รูปคลื่นสัญญาณไซน์ในอุดมคติ



รูปที่ 5 แหล่งจ่ายไฟรูปไซน์

3.2 แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม

แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเอซีนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6 ซึ่งรูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่นที่ได้จากการแปลงของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 6 แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม

โดยที่ค่าแรงดันเฉลี่ย (V_{rms}) ของรูปคลื่นนั้นมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์โดยที่มีค่า delta เป็นตัวกำหนดความกว้างของแหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม [7] จากความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเฉลี่ยนั้นจะสามารถประยุกต์สมการดังต่อไปนี้

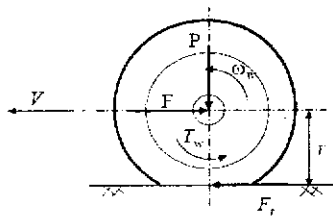
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v_i)^2 dt} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ให้เป็นสมการที่เกี่ยวข้อง กับค่า δ (delta) เพื่อคำนวณหาค่าของ δ โดยการกำหนดค่าแรงดันสูงสุด (Vm) และ V_{rms} รูปแบบของสมการมีดังนี้

$$\delta = \frac{T}{4} \left(\frac{1 - V_{rms}^2}{V_m^2} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

4. การคำนวณเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงจุดดึง (tractive effort) กับความเร็ว

การหาความสัมพันธ์ของแรงจุดดึง (tractive effort) เทียบกับความเร็วที่เป็นเชิงเส้นนั้นมีหลายองค์ประกอบซึ่งแรงจุดหรือแรงดึงจะเป็นส่วนที่สำคัญในการที่จะแสดงให้เห็นถึงการส่งถ่ายแรงจุดไปยังล้อของรถไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแรงจุดลากดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การส่งถ่ายแรงจากแกนสู่ล้อ

สมการที่แสดงถึงแรงจุดลาก ของแกนที่ส่งถ่ายไปยังล้อนั้นแสดงให้เห็นในสมการที่ 11 -12

$$TE = \frac{Torque}{r} \quad \dots\dots\dots (11)$$

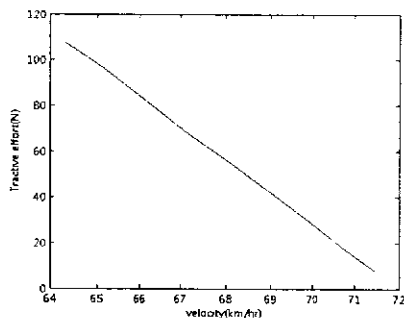
$$V = \omega r \quad \dots\dots\dots (12)$$

- โดยที่
- TE คือ แรงจุดลาก
 - $Torque$ คือ แรงบิดของมอเตอร์
 - r คือ รัศมีของล้อ
 - V คือ ความเร็วเชิงเส้น
 - ω คือ ความเร็วเชิงมุม

6. ผลการจำลอง

6.1 การจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง

เป็นต้นกำลังโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $R = 0.6 \Omega$, $K_b = 0.55 \text{ V-s/rad}$, $K_m = 0.55 \text{ kg-m/A}^2$, $K_f = 0.004 \text{ N-m-s}$, $L = 8e-3 \text{ H}$, $J = 0.0465 \text{ kg-m-s}^2$, $V = 110 \text{ Volt}$



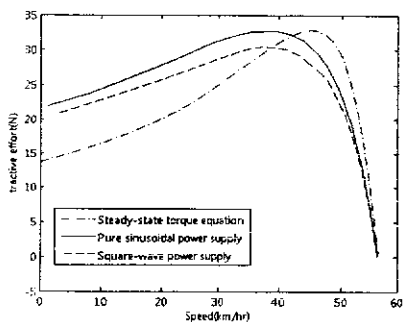
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดและความเร็ว

ในการจำลองผลนี้ได้ทำการป้อนโพลต์ตั้งแต่ 0-100 เพื่อให้มอเตอร์นั้นหมุนตัวเปล่าจนกระทั่งหยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนั้นจะได้ผลดัง รูปที่ 8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดและความเร็ว

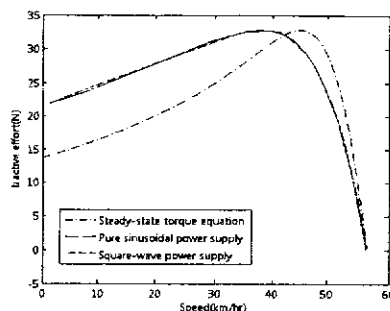
6.2 ผลการจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

เป็นต้นกำลังโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $r_{qs}=7.5 \Omega$, $r_{ds}=21.3 \Omega$, $r_r=8.8533 \Omega$, $L_{mqs}=0.37716 \text{ H}$, $L_r=0.03776 \text{ H}$, $L_{iqs}=0.03776 \text{ H}$, $L_{ids}=0.03243 \text{ H}$, $J=0.0738 \text{ N-m-s}^2/\text{rad}$;

การจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรม matlab แล้วทำการป้อนโพลต์ตั้งแต่ 0 นิวตันจนมอเตอร์ นั้นหยุดหมุนซึ่งจะได้ผลของแรงขับเคลื่อนและความเร็วดังรูปที่ 9 เมื่อทำการป้อนโพลต์ให้กับมอเตอร์แล้วความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองผลที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดกับความเร็ว ในที่นี้ได้ทำการจำลองผลที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การจำลองผลโดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แหล่งจ่ายไฟเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและการใช้สมการแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 9 จากนั้นได้ทำการใช้ตัวปรับคูณ 1.08 กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดกับความเร็วเปรียบเทียบกัน

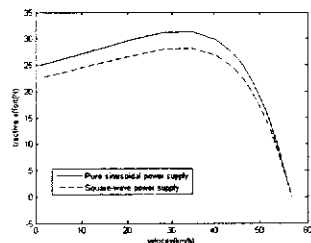


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่ายที่ใช้ตัวปรับคูณแล้ว

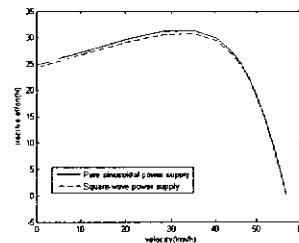
6.3 ผลการจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นต้นกำลัง

โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ $L_s=0.2087 \text{ H}$, $L_r=0.2087 \text{ H}$, $L_m=3.4377 \text{ H}$, $r_s=74.02 \Omega$, $J=0.0024 \text{ N-m-s}^2/\text{rad}$, $B_m=0.0009 \text{ N-m-s/rad}$ การจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรม matlab แล้วทำการป้อนโพลต์เพื่อให้มอเตอร์ นั้นหมุนตัวเปล่า จนกระทั่ง หยุดนิ่งซึ่งผลการ จำลองนั้นจะได้ผลดังรูปที่ 11 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุด

ดิ่งกับความเร็วในที่นี้ได้ทำการจำลองผลที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ การจำลองผลโดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 11 จากนั้นได้ทำการใช้ตัวปรับคูณ 1.08 กับ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่ง



รูปที่ 12 ทำการคูณด้วยตัวปรับคูณ

แล้ว

และความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 2 แหล่งจ่าย

7. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงการจำลองผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็วเชิงเส้นที่ส่งผ่านจากแกนสู่ล้อโดยการเปรียบเทียบกันสองแบบซึ่งแตกต่างกันตรงที่แหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้นเป็นคนละชนิดซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำป้อนแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์เทียบกับแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้วจำลองผลกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส กับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งผลการจำลองนั้นคล้ายคลึงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นที่เป็นสี่เหลี่ยมแต่ก็ยังไม่เท่ากันเลยทีเดียวดังนั้นจึงได้ทำการใช้ตัวปรับคูณผลกับผลการจำลองที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมการจำลองนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ตัวปรับคูณแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วที่ใกล้เคียงกันทั้งแบบจำลองที่ใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์กับแบบจำลองที่ใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยม

8. เอกสารอ้างอิง

1. N. Barakat, R. Rajagopalan, "Speed Control of a DC Motor Using a Feedforward Computed Torque Control Scheme", IEEE International Symposium on Intelligent Control Dearborn, MI, September 15-18, 1996
2. Syed A . Nasar, "Electric Machines and Power" System, Volum McGraw-Hill, New York, 1995
3. William H. Yeadon, P.E., Alan W. Yeadon, P.E., "Handbook of Small Electric Motors", McGraw - Hill, New York, 2001
4. T. Kulworawanichpong, K-L. Areerak, P. Pao-ia- or, D. Puangdownreong, S. Sujitjorn, "Dynamic Parameter Identification of Induction Motors Using Intelligent Search Technique" Thailand, (2005)
5. N. Na ewngemdee, C. Sukcharoen & T. Kulworawanichpong, "Optimizing Voltage Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives" IEEE
6. Jimmie J. Cathey, "Electric Machines Analysis and Design Applying Matlab", McGraw - Hill, International Edition, New York 2001

7. A.A. Arkadan, V.Rossillo-Johnson, N.A. Demerdash, "A DC-AC Inverter - Induction Motor System
Network Model Compatible With Commonly Know Network Analysis Software Package
IEEE,1989
- 8 Bhag S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu, "Electric Machinery and Transformers", Third Edition,
OxfordUniversity Press, New York 2001
9. R. Krishnan, "Electric Motor Drive Modeling analysis and Control", International Edition
Prentice
Hall, New Jersey, 2001
10. D.P. Kothari, I.J. Nagrath, "Electric Machines", Third Edition, Tata McGraw-Hill Publishing
Company Limited, New Delhi, 2004
11. Mulkutla S. Sarma, "Electric Machines Steady State Theory and Dynamic Performance",
Second
Edition, West Publishing Company, New York, 1994
12. Liuchen Chang, "Recent Development of Electric Vehicles and Their Propulsion Systems",
IEEE
AES System magazine, December 1993
13. Hanrong Fan, Graham E., Dowson Tony R. Eastham," Model of Electric Vehicle Induction
Motor
Drive System", IEEE (1993)

การประมาณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วย วิธีเครือข่ายประสาทเทียม

Electric Field Estimation around an Overhead Power Transmission Line using Neural Network Model

รัฐรงค์ บุญภูมิวิวัฒน์, ธนัตถ์ชัย กุลวรรานิชพงษ์, เพ็ญใจ เผ่าละออ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000
rattarong@hotmail.com {padej, thanatch}@sut.ac.th <http://eng.sut.ac.th/ee>

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีเครือข่ายประสาทเทียม (artificial network : ANN) ในการประมาณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แม้ว่าจะมีหลายวิธีที่ได้ความนิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพราะเนื่องจากสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างจำกัด (finite difference method : FDM), ระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด (finite element method : FEM) และระเบียบวิธีค่าขอบ (boundary element method : BEM) โดยทั่วไปในการหาค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูง จำเป็นจะต้องอาศัยระยะเวลาในการคำนวณที่ยาวนาน รวมถึงในกรณีที่ต้องการทราบค่าสนามไฟฟ้าที่มีการแปรเปลี่ยนตามเวลา (time-varying) การใช้วิธีเครือข่ายประสาทเทียมที่มีโครงสร้างเครือข่ายแบบไปข้างหน้า (feedforward network) สำหรับการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (backpropagation) สามารถช่วยประมาณค่าสนามไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีและรวดเร็วโดยระบบที่ใช้ทดสอบจะเป็นระบบไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 22kV และ 3 เฟสขนาด 230kV ที่มีพื้นที่ทดสอบขนาด 100 ตร.ม. และ 400 ตร.ม. ตามลำดับ สำหรับผลเฉลยที่ได้จากวิธีเครือข่ายประสาทเทียมจะทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยวิธี FDM และ FEM

คำสำคัญ : การประมาณค่าสนามไฟฟ้า, FDM, FEM และ ANN

Abstract

This paper presents the use of artificial neural networks (ANN) to estimate electric fields around an overhead power transmission line. Although there exist many efficient numerical methods, e.g. finite difference method (FDM), finite element method (FEM), boundary element method (BEM), etc. to estimate electric field distribution caused by live conductors, it typically consumes substantial execution time when high accuracy of obtained solutions is required or especially when time-varying field is involved. Therefore, to estimate the electric field strength using ANN employing feedforward network with backpropagation learning can be an alternative. To evaluate its use, an overhead single-phase power line of 100 m² and 400 m² test area was simulated with 22 kV and 230 kV respectively standard distribution level of Thailand. The results obtained from the ANN are compared with those obtained by the analytical method, the FDM and the FEM.

Key-Words: estimate electric fields, FDM, FEM and ANN

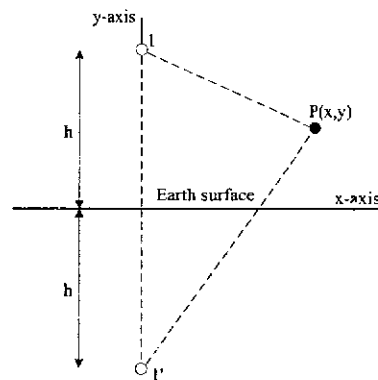
1. คำนำ

สำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าเป็นเรื่องยุ่งยากและซับซ้อนในการหาผลเฉลย จึงมีหลายวิธีที่ได้ความนิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น FDM, FEM และ BEM เพราะเนื่องจากสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้นในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการประมาณค่าสนามไฟฟ้า แต่สำหรับในกรณีที่ต้องการหาผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยระยะเวลาในการคำนวณที่ยาวนาน รวมถึงในกรณีที่ต้องการทราบค่าสนามไฟฟ้าที่มีการแปรเปลี่ยนตามเวลา และในบางครั้งบริเวณที่ต้องการทราบค่าอยู่นอกเหนือผลเฉลยที่ได้จากวิธีดังกล่าว ซึ่งก็มีวิธีทางปัญญาระดับสูงบางวิธี เช่น วิธีเครือข่ายประสาทเทียมที่สามารถช่วยประมาณค่าสนามไฟฟ้าได้ โดยผ่านแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม ซึ่งวิธีนี้จะเป็นประโยชน์มากเมื่อคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมที่มีปัจจัยต่อการกระจายค่าสนามไฟฟ้ารอบสายส่ง เช่น อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น เมื่อทำการฝึกสอนระบบได้ตามต้องการ โดยอาศัยการปรับค่าน้ำหนักประสาทที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอินพุตก็จะได้รับระบบเครือข่ายประสาทเทียมที่สามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆได้อย่างรวดเร็ว

ในบทความนี้ ประโยชน์จากการใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมในการประมาณค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดต่างๆรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จะใช้ที่มีโครงสร้างเครือข่ายแบบไปข้างหน้า สำหรับการเรียนรู้แบบแพร่กลับ โดยหัวข้อที่ 2 จะนำเสนอผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ของสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นตัวนำ 1 เฟส และอธิบายวิธี FDM และ FEM ในการประมาณค่าสนามไฟฟ้า ส่วนแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมของสนามไฟฟ้าจะอธิบายในหัวข้อที่ 3 และหัวข้อ 4 กับ 5 จะแสดงผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเครือข่ายประสาทเทียม และสรุปบทความตามลำดับ

2. การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในระบบตัวนำ 1 เฟส

รูปที่ 1 นำเสนอระบบตัวนำ 1 เฟสใน 2 มิติ โดยที่จุด 1 และ 1' ในรูปเป็นตำแหน่งตัวนำในสายส่งที่มีศักย์ไฟฟ้า (electric potential) V_1



รูปที่ 1 ระบบตัวนำ 1 เฟส

ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง $P(x,y)$ สามารถคำนวณหาได้หลายวิธี ซึ่งในบทความนี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical method), FDM และ FEM ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์

จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง $P(x,y)$ ได้จากการหาได้ตั้งสมการที่ (1)

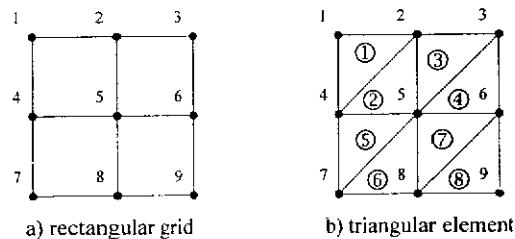
$$E(x,y) = \frac{2hV_1}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)\sqrt{x^4+y^4+h^4+2h^2x^2+2x^2y^2-2h^2y^2}} \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ V_1 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของสายส่ง
 r คือ รัศมีของสายส่ง
 h คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำในสายส่งกับพื้นดิน

ซึ่งสมการจากระเบียบเชิงวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการกำหนดค่าขอบ (boundary condition) สำหรับการคำนวณด้วยวิธี FDM และ FEM เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาผลเฉลยให้แก่ระบบ

2.2 FDM และ FEM

ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) สามารถอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้ FDM และ FEM ซึ่งทั้ง 2 วิธีจะแบ่งพื้นที่ออกเป็นชิ้นส่วนย่อย (element) ที่ไม่มีความต่อเนื่องกัน (discrete) เพื่อนำไปสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) ที่กำหนดคุณลักษณะตามค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ โดยกำหนดเงื่อนไขค่าขอบตามบริเวณที่พิจารณา และทำการประมาณค่าผลเฉลยได้โดยง่ายด้วยการแก้สมการพีชคณิต (algebraic equation) สำหรับปัญหา 2 มิติ กริดรูปสี่เหลี่ยม (rectangular grid) และกริดรูปสามเหลี่ยม (triangular grid) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นการกำหนดกริดสำหรับวิธี FDM และ FEM ตามลำดับ



รูปที่ 2 การกำหนดกริดด้วยวิธี FDM และ FEM

หลังจากทำการกำหนดสมการในแต่ละโนดหรือสมการในแต่ละชิ้นส่วนย่อยแล้ว สามารถนำสมการทั้งหมดมาประกอบรวมกันทั้งระบบ ซึ่งจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น $[C][V] = [F]$ โดยที่ $[C]$ คือเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ (coefficient matrix), $[V]$ คือเวกเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (vector of unknown) และ $[F]$ คือ เวกเตอร์ที่ทราบค่า (vector of external forces) ซึ่งในการหาผลเฉลยสามารถประยุกต์วิธีคำนวณหลายวิธีในการหาคำตอบได้ เช่น วิธีการกำจัดแบบเกาส์เซียน (Gaussian elimination) เป็นต้น

3. แบบจำลองสนามไฟฟ้าโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม

วิธีเครือข่ายประสาทเทียมเป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งสำหรับปัญหาทางสนามไฟฟ้าภายในบทความนี้จะพิจารณาชุดข้อมูลแบบ 2 มิติ ที่ใช้ป้อนให้กับระบบประสาทเทียม เพื่อให้ระบบดังกล่าวเรียนรู้ชุดข้อมูลทั้งหมด 36 ข้อมูล โดยที่ อินพุต คือตำแหน่งพิกัดโนดของโครงสร้างทั้ง 36 โหนดที่ทราบค่า ส่วนเอาต์พุต คือ ค่าสนามไฟฟ้าของตำแหน่งโนดที่ไม่ทราบค่า ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมของระบบได้ดังรูปที่ 3 สำหรับการประมาณค่าฟังก์ชันจะเลือกใช้ MATLAB Neuron Network Toolbox ที่มีโครงสร้างเครือข่ายแบบไปข้างหน้า สำหรับการเรียนรู้แบบแพร่กลับ คำสั่งที่ใช้สร้างเครือข่ายดังกล่าวใน MATLAB คือ newff ที่มีรูปแบบการเรียกใช้ดังสมการที่ (2) ซึ่งเป็นคำสั่งที่มี

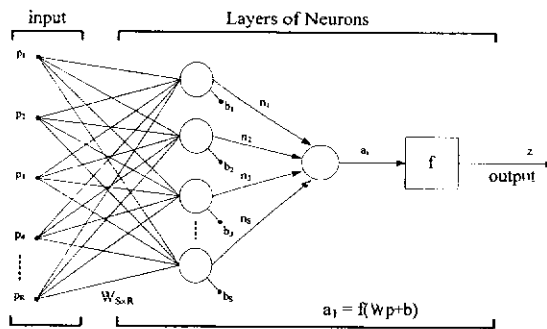
การปรับค่าน้ำหนักประสาทแบบป้อนกลับในระหว่างทำการฝึกสอนจึงมีโครงสร้างเครือข่ายตามรูปที่ 4 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าตอบโดยอาศัยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ ค่าต่ำสุดกำลังสองสัมบูรณ์ (minimize mean square error) ดังสมการที่ (3)

$$\text{net} = \text{newff} (\text{PR}, \{ S_1, S_2, \dots, S_N \}, \{ \text{TF1}, \text{TF2}, \dots, \text{TFN} \}, \text{BTF}, \text{BLF}, \text{PF}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

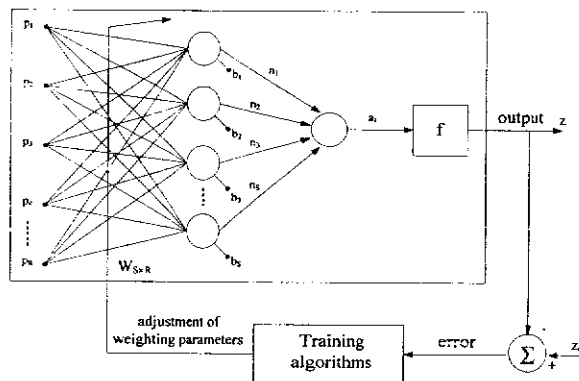
โดยที่

- PR = เมทริกซ์ R×2 ของค่าต่ำสุดและสูงสุดของ R อินพุต
- S_i = ขนาดของชั้นที่ i สำหรับทั้งหมด N ชั้น
- TF_i = ฟังก์ชันถ่ายโอนของชั้นที่ i
- BTF BLF และ PF = พารามิเตอร์ของการฝึกสอนแบบแพร่กลับ

$$\underset{w \in \mathbb{R}^{S \times R}}{\text{minimize}} \quad \text{MSE} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (z_{di} - z_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (z_{di} - f(Wp+b))^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

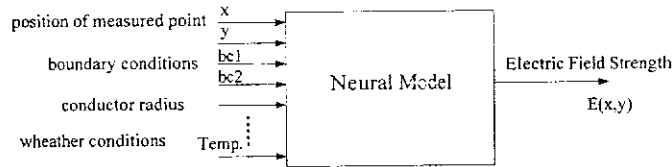


รูปที่ 3 โครงสร้างเครือข่ายแบบไปข้างหน้า



รูปที่ 4 รูปแบบการฝึกสอนโครงสร้างเครือข่ายแบบไปข้างหน้า

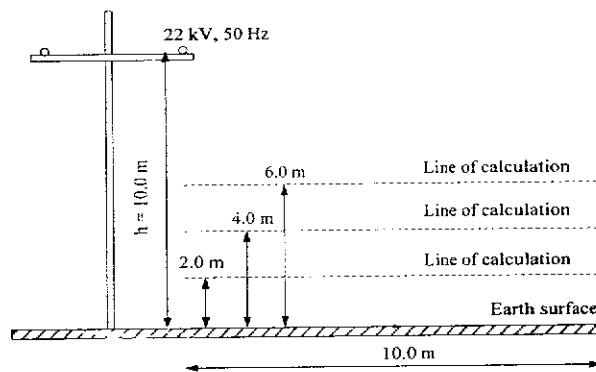
สำหรับบทความนี้ ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากวิธีเครือข่ายประสาทเทียม จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งต่างๆที่พิจารณา, การกำหนดค่าขอบเขตในกับระบบ, รัศมีตัวนำในสายส่ง รวมถึงเงื่อนไขทางสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น และสภาพยอม (permittivity) ที่แปรเปลี่ยนตามฤดูกาล ซึ่งสามารถเพิ่มเงื่อนไขในการฝึกสอนให้กับแบบจำลองเครือข่ายได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เงื่อนไขเพิ่มเติมในการฝึกสอนให้กับแบบจำลองเครือข่าย

4. ผลการคำนวณ

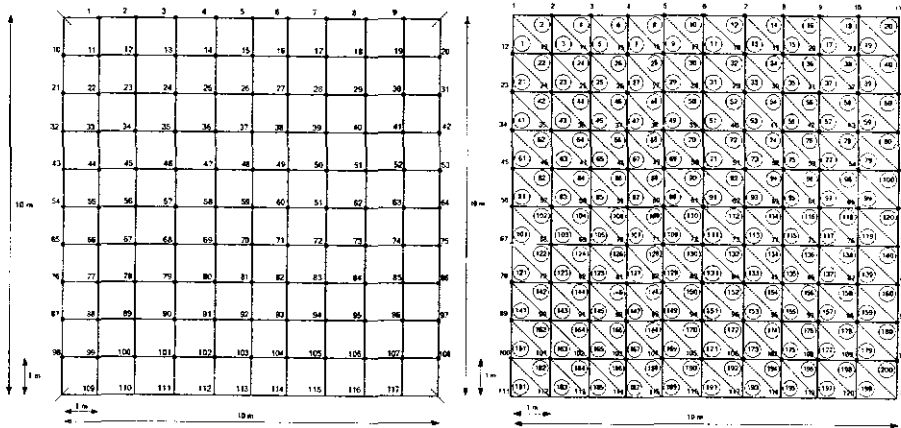
ระบบทดสอบที่จะพิจารณากายในบทความ จะเลือกใช้ระบบสายส่งมาตรฐานของประเทศไทย แบบ 1 เฟสขนาด 22kV และแบบ 3 เฟสขนาด 230kV ที่มีพื้นที่ทดสอบขนาด 100 ตร.ม. และ 400 ตร.ม. ตามลำดับ สำหรับกรณี 1 เฟสขนาด 22 kV พื้นที่ทดสอบ 100 ตร.ม. จะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า ณ ระดับความสูง 2 เมตร, 4 เมตร และ 6 เมตรวัดจากระดับความสูงบนพื้นดินตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 1 เฟสขนาด 22 kV 50Hz

เปรียบเทียบโครงสร้างกริดที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆด้วยวิธี FDM และ FEM ตามรูปที่ 7

วิธีเครือข่ายประสาทเทียมจะคำนวณโดยอาศัยสมการที่ (3) โดยจะกำหนดให้ระบบมีการสร้างเครือข่าย 2 ชั้น โดยที่ชั้นที่ 1 และ 2 ประกอบไปด้วยจำนวนนิวรอนเท่ากับ 300 และ 1 ตามลำดับ โดยเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นที่ 1 เป็นเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ "logsig" และชั้นที่ 2 เป็นเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ "purelin" ในการฝึกสอนจะใช้ชุดข้อมูลในการฝึกสอนทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล โดยในแต่ละชุดจะมีข้อมูล 36 ข้อมูลแทนรัศมีตัวนำในสายส่งที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 35, 70 และ 150 ตร.มม. AAC (All Aluminium Conductor) ตามรูปที่ 8

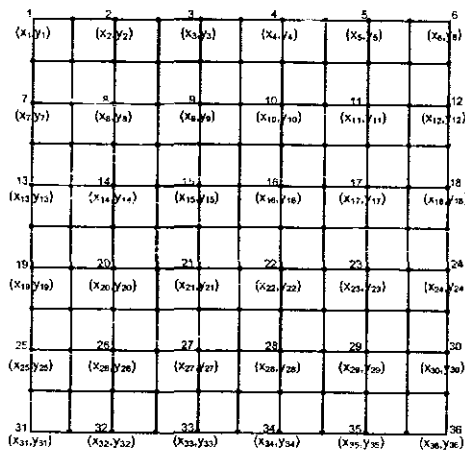


ก) FDM

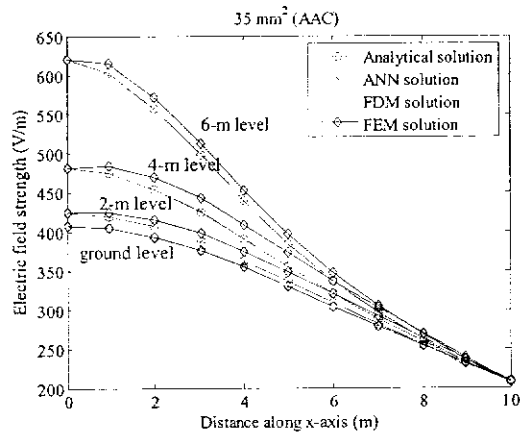
ข) FEM

รูปที่ 7 ค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆที่ได้จากการหาผลเฉลย
 ด้วยวิธี FDM และ FEM

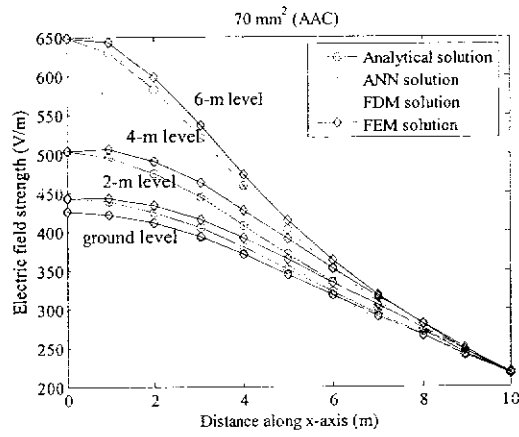
หลังจากทำการฝึกสอนให้กับเครือข่ายประสาทเทียม ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณ ณ ระดับความสูง 2 เมตร, 4 เมตรและ 6 เมตร ในแต่ละรัศมีตัวนำในสายส่ง 3 ขนาด คือ 35, 70 และ 150 ตร.มม. สามารถแสดงได้ในรูปที่ 9, 10 และ 11 ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีเครือข่ายประสาทเทียมจะเห็นได้ว่าสามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จาก FDM และ FEM นอกจากนี้วิธีเครือข่ายประสาทยังสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อเอาต์พุตในระหว่างทำการฝึกสอนได้โดยง่าย ในที่นี้ เช่น ขนาดตัวนำ, อุณหภูมิ, ความชื้น และสภาพยอม เป็นต้น



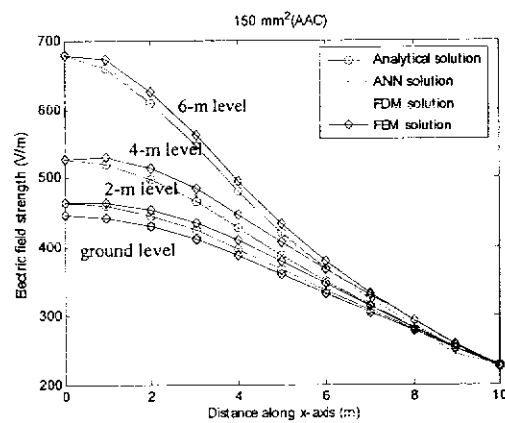
รูปที่ 8 ข้อมูล 36 จุดที่ใช้สำหรับฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม
 ของแต่ละรัศมีตัวนำขนาดต่างๆ



รูปที่ 9 ค่าสนามไฟฟ้ากรณีรัศมีตัวนำในสายส่งขนาด 35 ตร.มม.

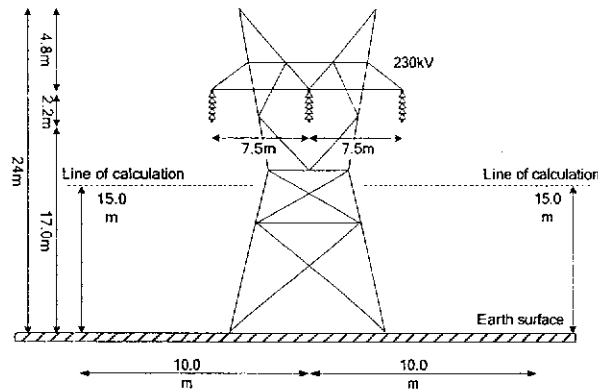


รูปที่ 10 ค่าสนามไฟฟ้ากรณีรัศมีตัวนำในสายส่งขนาด 70 ตร.มม.



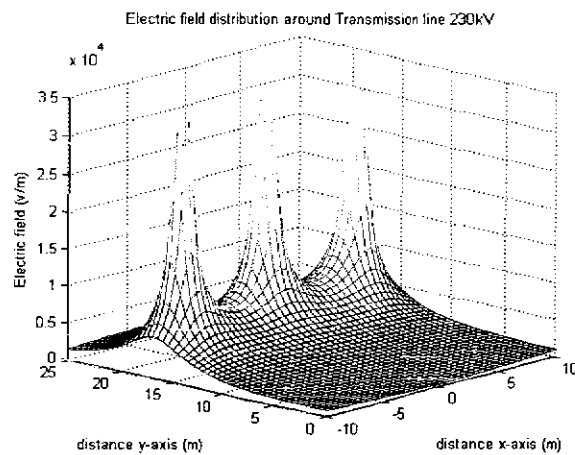
รูปที่ 11 ค่าสนามไฟฟ้ากรณีรัศมีตัวนำในสายส่งขนาด 150 ตร.มม.

สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟสขนาด 230kV ที่มีพื้นที่ทดสอบขนาด 400 ตร.ม. จะคำนวณหา
ค่าสนามไฟฟ้า ณ ระดับความสูง 15 เมตรวัดจากระดับความสูงบนพื้นดินตามรูปที่ 12

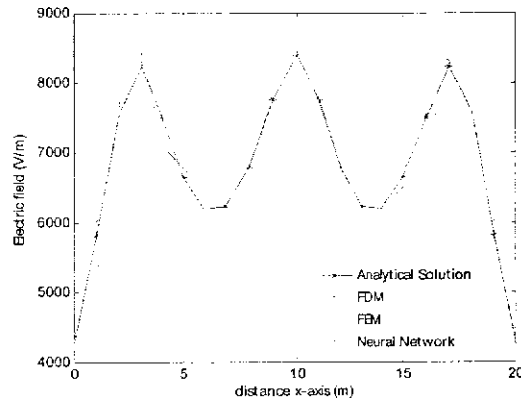


รูปที่ 12 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟสขนาด 230 kV 50Hz

คำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้ในทำนองเดียวกับระบบไฟฟ้า 1 เฟสด้วย
วิธี FDM, FEM และ ANN ซึ่งสามารถแสดงการกระจายค่าสนามไฟฟ้าทั้งระบบขนาด 400 ตร.ม. ได้ดังรูป
ที่ 13 และสามารถเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าด้วยวิธี FDM, FEM และ ANN ณ ระดับความสูง 15 เมตรได้
ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟส
ขนาด 230 kV 50Hz



รูปที่ 14 ค่าสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟสขนาด 230 kV 50Hz
ณ ระดับความสูง 15 เมตร

5. สรุป

การหาค่าสนามไฟฟ้าในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถใช้วิธีเครือข่ายประสาทเทียมในการประมาณค่าสนามไฟฟ้าได้ โดยในบทความนี้ได้ทดสอบระบบไฟฟ้าแรงสูง 1 เฟส 22kV และระบบไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟส 230kV ภายใต้เงื่อนไขในการกำหนดโนดทั้งหมด 121 โนดและ 441 โนดตามลำดับ ส่วนการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียมจะใช้ชุดข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งในระบบทดสอบจะทำการฝึกสอนด้วยข้อมูล 108 ข้อมูลสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง 1 เฟส 22kV และ 121 ข้อมูลสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟส 230kV โดยอาศัยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบค่าต่ำสุดกำลังสองสัมบูรณ์ในการปรับค่าน้ำหนักประสาทให้มีความผิดพลาดที่ถูกต้อง จากผลการคำนวณที่ได้จะเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากวิธีเครือข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์มากที่สุด เมื่อเทียบกับวิธี FDM และ FEM สำหรับกรณีระบบไฟฟ้าแรงสูง 1 เฟส 22kV จึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่สามารถนำวิธีเครือข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับงานในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้ยังสามารถทำนายค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายส่งอันเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกต่างๆ เช่น ขนาดตัวนำ, อุณหภูมิ, ความชื้น และสภาพพอม เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bossavit, A., *Computational Electromagnetics - Variational Formulations, Complementarity, Edge Elements*. Academic Press, New York (1998)
- [2] Lu, J., Thiel, D.V., *Computational and Visual Electromagnetics Using an Integrated Programming Language for Undergraduate Engineering Students*, IEEE Transactions on Magnetics 4 (2000), 1000 – 1003
- [3] Zhou, Q., Sun, C., Liu, L., Sima, W., An, W., *Electromagnetic Environment of the EHV Transmission Line and its Effect*, International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001), 19 – 22 November 2001, 229 – 232
- [4] Neskovic, A., Neskovic, N., Paunovic, D., *Indoor Electric Field Level Prediction Model Based on the Artificial Neural Networks*, IEEE Communications Letters 6 (2000), 190 – 192

- [5] Youngang, G., Lifang, Y., *Determination of Dangerous Region of the Electromagnetic Pollution Caused by the Electric Fields around Power Line*, International Conference on Communication Technology (ICCT'98), October 1998, 22-24
- [6] Sadiku, M.N.O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2nd ed., CRC Press, New York, (2001)
- [7] Hertz, J., Krogh, A., Palmer, R.G., *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley (1991)
- [8] Yundong, C., Dong, L., Xiaoming, L., Yuan, T., *Optimization Design of Electric Field Using Artificial Neural Networks*, The Fourth International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2002), 8 – 11 April 2002, 44 – 45

การรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต
และเครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น
License Plate Recognition Using Wavelet Transform
and Probabilistic Neural Network

วิฑูรย์ มารมย์, รศ. ดร.กิตติ อัครกิจมงคล และ ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-4400 Email: toon_win@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์นั้นสามารถแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) การค้นหาตำแหน่งของการป้ายทะเบียนรถยนต์ (2) การตัดแยกตัวอักษรและ (3) การรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์ทั้งวิธีการค้นหาตำแหน่งของป้ายทะเบียนรถยนต์ การตัดแยกตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์และการรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์โดยอัตโนมัติ โดยส่วนของการค้นหาตำแหน่งของป้ายทะเบียนรถยนต์และการตัดแยกตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์นั้น อาศัยทฤษฎีของการหาขอบวัตถุในภาพแนวตั้ง และกระบวนการรูปร่างลักษณะร่วมกับคุณลักษณะพิเศษของป้ายทะเบียนและตัวอักษร ในส่วนของการรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ อาศัยทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นเครื่องมือในการหาคุณลักษณะพิเศษของตัวอักษร และใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็นในการรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ โดยทำการทดสอบกับภาพถ่ายรถยนต์ที่มุมเอียง ความเข้มแสง สภาพแวดล้อมและขนาดของป้ายทะเบียนรถยนต์ที่ต่างกันไป ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถ ค้นหาตำแหน่งของการป้ายทะเบียนรถยนต์ ตัดแยกตัวอักษรและรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์, การแปลงเวฟเล็ต, เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น
การค้นหาตำแหน่งป้ายทะเบียนรถยนต์, การตัดแยกตัวอักษร

Abstract

Research about license plate recognition can be divided into three parts; (1) license plate detection (2) character segmentation and (3) character recognition. This paper presents a method of automatic license plate recognition covering those three parts. The proposed license plate detection and character segmentation use vertical edge detection, morphological operation with feature extraction of license plate and character. The proposed recognition method is based on wavelet transform and probabilistic neural network. A set of experiments have been were conducted to test the performance of the system under difference angles, luminance, environments and sizes of license plate. The preliminary results show that the proposed algorithm is efficient for license plate recognition.

Keywords: license plate recognition, wavelet transform, probabilistic neural network, license plate detection, character segmentation

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีของหน่วยประมวลผลกลางของเครื่องคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณภาพดิจิทัลมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นประกอบกับแนวโน้มของราคาที่ลดลง การพัฒนาระบบงานที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัลจึงได้รับความสนใจอย่างมาก งานการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์ก็เป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการค้นหาตำแหน่งของป้ายทะเบียนรถยนต์ การตัดแยกตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ทั้งบรรทัดบนและบรรทัดล่างและการรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ทั้งแบบเก่าและแบบใหม่ โดยที่ป้ายทะเบียนรถยนต์แบบใหม่นี้จะครอบคลุมตรงตามมาตรฐานที่ถูกกำหนด โดยกฎกระทรวงฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติรถยนต์ พ.ศ. 2522 ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับป้ายทะเบียนรถยนต์ประเภท 1 รถยนต์ประเภท 2 และ รถยนต์ประเภท 3 โดยภาพที่ใช้เป็นภาพที่ถ่ายจากกล้องเพียง 1 ตัวและมีป้ายทะเบียนรถยนต์เพียง 1 ป้ายเท่านั้น

2. การค้นหาตำแหน่งป้ายทะเบียนรถยนต์

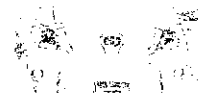
เนื่องจากงานวิจัยของ [1] ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การหาขอบของวัตถุในภาพแนวตั้งให้ข้อมูลที่ดีกว่าการหาขอบของวัตถุในภาพแนวนอนและสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนของแสง และ [2] ได้แสดงการกำจัดส่วนที่เป็นพื้นหลังและสัญญาณรบกวนออกจากภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเริ่มจากการแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับเทาแล้วนำกระบวนการหาขอบของวัตถุในภาพแนวตั้งแล้วใช้กระบวนการกำจัดส่วนที่เป็นพื้นหลังและสัญญาณรบกวนออกดังแสดงในรูปที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) การหาขอบของวัตถุในภาพในแนวตั้ง
(ค) การกำจัดส่วนที่เป็นพื้นหลังและสัญญาณรบกวนออก

เมื่อได้ภาพที่ทำการกำจัดส่วนที่เป็นพื้นหลังและสัญญาณรบกวนแล้ว หลังจากนั้นใช้กระบวนการรูปร่างลักษณะเพื่อมาเป็นเครื่องมือในการกำหนดบริเวณที่น่าจะเป็นป้ายทะเบียนรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 2 งานวิจัยของ [3] ได้แสดงถึงคุณลักษณะพิเศษของตัวอักษรซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ ในงานวิจัยนี้ใช้คุณลักษณะพิเศษของป้ายทะเบียนรถยนต์ทั้งหมด 5 ลักษณะด้วยกันคือ (1) เปอร์เซนต์ความดำของป้ายทะเบียนรถยนต์ (2) เปอร์เซนต์ความดำของบริเวณที่คาดว่าจะเป็นตัวอักษร (3) อัตราความกว้างต่อความสูงของป้ายทะเบียน (4) ความสม่ำเสมอของการเว้นช่วงตัวอักษร และ (5) อัตราส่วนของพื้นที่ที่คาดว่าจะเป็นตัวทะเบียนรถยนต์ต่อพื้นที่ทั้งหมดของภาพ

จากการใช้คุณลักษณะพิเศษของป้ายทะเบียนรถยนต์ทั้ง 5 ลักษณะดังกล่าวจะได้ส่วนที่เป็นป้ายทะเบียนรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 3



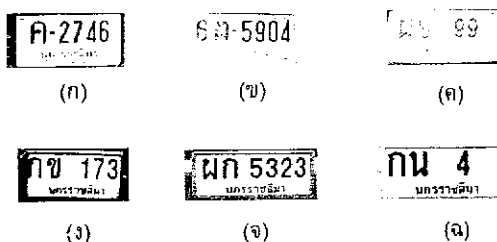
รูปที่ 2 การใช้กระบวนการรูปร่างลักษณะ



รูปที่ 3 ส่วนที่เป็นป้ายทะเบียนรถยนต์

3. การตัดแยกตัวอักษร

การตัดแยกตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์ โดยขั้นตอนแรกจะทำการแยกประเภทของป้ายทะเบียนรถยนต์ก่อน ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนของการรู้จำตัวอักษรลงได้ ป้ายทะเบียนรถยนต์สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้หลายแบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยที่แบบที่ 1-2 เป็นป้ายทะเบียนรถยนต์แบบเก่า และแบบที่ 3-6 เป็นป้ายทะเบียนแบบใหม่ เมื่อทราบประเภทของป้ายทะเบียนแล้ว สำหรับการตัดแยกบรรทัดล่างของป้ายทะเบียนรถยนต์นั้นจะทำการตัดแยกทั้งบรรทัดหรือทั้งจังหวัด ส่วนของบรรทัดบนจะทำการตัดแยกทีละตัวอักษรเพื่อส่งให้การรู้จำตัวอักษรต่อไป ผลของการตัดแยกตัวอักษรของบรรทัดบนและบรรทัดล่างแสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ก-จ ป้ายทะเบียนรถยนต์พื้นฐานแบบที่ 1-6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลของการตัดแยกตัวอักษร (ก) บรรทัดบน (ข) บรรทัดล่าง

4. การรู้จำตัวอักษร

สำหรับในงานวิจัยนี้ ในส่วนของการรู้จำตัวอักษรจะทำการรู้จำทั้งบรรทัดบนและบรรทัดล่างของป้ายทะเบียนรถยนต์โดยการใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network, PNN) ร่วมกับการแปลงเวฟเลต (Wavelet transform) โดยที่ [4-6] ได้แสดงถึงข้อดีของการใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น เช่น มีโครงสร้างที่ง่าย การฝึกสอนทำได้เร็ว ทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นและการลู่ออกทำได้ดีกว่า ในส่วนของการแปลงเวฟเลตนั้นใช้เป็นเครื่องมือในการหาคุณลักษณะพิเศษของตัวอักษร โดยที่ขั้นตอนการใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็นร่วมกับการแปลงเวฟเลตมีดังนี้

1. นำภาพในส่วนที่ได้จากการตัดแยกตัวอักษรซึ่งเป็นภาพแบบไบนารี (0 และ 1) นำมาเรียงเป็นเวกเตอร์
2. ใช้การแปลงเวฟเลตใน 3 ระดับ แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตของแต่ละระดับบวกกัน

3. นำค่าที่ได้จากการบวกกันของแต่ละระดับมาเรียงเป็นเวกเตอร์แล้วส่งให้ เครือข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็นทำการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์ต่อไป

5. ผลการวิจัย

เมื่อทำการทดสอบโปรแกรมสำหรับการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์ที่พัฒนาขึ้นกับภาพรถยนต์ทั้งหมด 102 ภาพ แล้วทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของโปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าประสิทธิภาพของโปรแกรมการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์

การทดลอง	ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง
การค้นหาค่าแห่งของป้ายทะเบียนรถยนต์	99.02 %
การตัดแยกตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์	
- บรรทัดบน	77.45 %
- บรรทัดล่าง	89.22 %
การรู้จำตัวอักษรในป้ายทะเบียนรถยนต์	
- บรรทัดบน	65.89 %
- บรรทัดล่าง	-

6. สรุป

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์นั้นงานแต่ละส่วนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์ซึ่งงานวิจัยนี้การค้นหาค่าแห่งของป้ายทะเบียนรถยนต์นั้นสามารถค้นหาได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างที่ได้อ้างไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพถึง 99.02 % จากภาพที่ทำการทดสอบ 102 ภาพ แต่ประสิทธิภาพจะลดลงในกรณีของการตัดแยกตัวอักษรซึ่งมีประสิทธิภาพที่ 77.45 % และ 89.22 % กรณีการตัดแยกบรรทัดบนและบรรทัดล่างตามลำดับ สำหรับการรู้จำตัวอักษรในบรรทัดบนมีประสิทธิภาพที่ 65.89 % และวิธีการที่นำเสนอมีความเร็วในการประมวลผลสูง แต่จะเห็นว่าประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนยังอยู่ในระดับพอใช้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้ยังต้องการพัฒนาขึ้นไปพร้อมกับการดำเนินงานการรู้จำบรรทัดล่างของป้ายทะเบียนต่อไป เพื่อให้ประสิทธิภาพของโปรแกรมการรู้จำป้ายทะเบียนรถยนต์สูงมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hongliang, B. and Changping, L., "A hybrid license plate extraction method based on edge statistics and morphology", Proceedings of the 17th International Conference on Pattern recognition, 831-834,
- [2] Zheng, D., Zhao, Y. and Wang, J., "An efficient method of license plate location", Pattern Recognition Letters, Vol. 26, No. 15, 2431-2438, 2005
- [3] Lu, Y., "Machine printed character segmentation -- an overview", Pattern Recognition, Vol. 28, No. 1: 67-80, 1995

- [4] Hu, Y., Zhu, F. and Zhang, X., "A novel approach for license plate recognition using subspace projection and probabilistic neural network", Lecture Notes in Computer Science, 216-221, 2005
- [5] Wu, S., "Abnormal pattern parameters estimation of control chart based on wavelet transform and probabilistic neural network", Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition, Vol. 345, 112-119, 2006
- [6] Zaknich, A., "Neural network for intelligent signal processing", Series on Innovative Intelligence. Vol. 4. The University of Western Australia. Austral, 2003

การค้นหารถยนต์บนถนนด้วยฟังก์ชันกaborแบบลอการิทึมและ เครื่องตรวจเวคเตอร์

On road vehicle detection using log-gabor filters and support vector machines

ชานนท์ โสทธิถาวร และ ผศ. ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111. ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 089-2810627 Email: electrical_master@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับการดึงเอาลักษณะเด่นและการจัดแยกภาพรถยนต์ โดยใช้ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมในการดึงเอาลักษณะเด่นของภาพรถยนต์ ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมเป็นการหาผลตอบสนองของภาพโดยการกำหนดค่า ทิศทาง และ สเกล ที่ค่าต่างๆ กัน ภาพที่ได้จะบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะของรถยนต์ และผลตอบสนองนี้ถูกใช้สำหรับฝึกสอนโดยใช้เครื่องตรวจเวคเตอร์ เพื่อให้สามารถการแยกภาพรถจากสิ่งแวดล้อมได้ และผลที่ได้มีค่าความถูกต้อง 95.125% เมื่อทดสอบกับภาพที่ไม่ได้ใช้ในการฝึกสอน

คำสำคัญ : การค้นหารถยนต์, ฟังก์ชันกaborแบบลอการิทึม, เครื่องตรวจเวคเตอร์

Abstract

This article describes feature extraction and classification for vehicle detection. Log-Gabor filters provide a mechanism for obtaining some degree of invariance to intensity due to global illumination, selectivity in scale, and selectivity in orientation. These feature are then used to train a support vector machine classifier. It demonstrate the proposed approach which has achieved an average accuracy of 95.125% % on completely novel test images.

Keywords: vehicle detection, Log-Gabor filters, support vector machine

1. คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยที่มีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการปรับปรุงด้านความปลอดภัยและการลดอุบัติเหตุบนท้องถนน จากสถิติการเกิดอุบัติเหตุพบว่า โดยหลักๆแล้วอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นล้วนเกิดจากตัวคนขับรถ ดังนั้นจึงนำไปสู่การสร้างระบบช่วยเหลือคนขับขึ้นเพื่อทำการเตือนเมื่อรถมีโอกาชนกักรถคันอื่นๆ หรือสามารถควบคุมรถให้สามารถหลบเลี่ยงอุบัติเหตุเองได้

โดยทั่วไปแล้วในการค้นหารถจะมีตัวรับรู้ 2 แบบ ได้แก่ ตัวรับรู้แบบแอ็กทิฟ เช่น lidar, millimeter wave radars และ laser เป็นต้น แต่อุปกรณ์เหล่านี้มีข้อเสียคือ มีความละเอียดต่ำ มีความเร็วในการสแกนต่ำ และมีราคาแพง เป็นต้น ตัวรับรู้แบบพาสซีฟ เช่น ตัวรับรู้แสง(กล้อง) มีข้อดีคือ หาง่าย มีราคาถูก มีความละเอียดที่ดี และสามารถนำข้อมูลภาพที่ได้ไปใช้พร้อมกันได้หลายงาน เช่น การค้นหาช่องเดินรถ การจดจำเครื่องหมายจราจร เป็นต้น ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้ตัวรับรู้แสง

ในบทความนี้ใช้ตัวกรองกานอร์แบบลอการิทึมในการดึงเอาลักษณะเด่นของภาพและใช้เครื่องตรวจเวคเตอร์ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

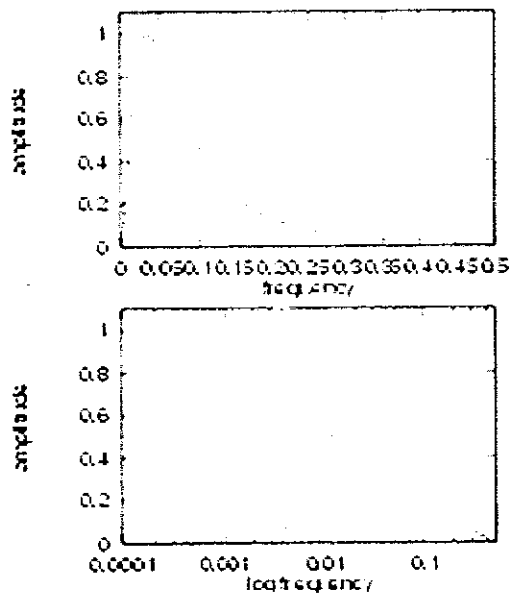
2. ตัวกรองกานอร์แบบลอการิทึม(Log-Gabor Filter)

ฟังก์ชันการบอร์แบบลอการิทึมคิดค้นโดย Field[1998] Field ได้เสนอว่า สำหรับภาพโดยทั่วไปผ่านตัวกรองที่มีฟังก์ชันเกาส์เซียนที่มีแกนความถี่แบบลอการิทึมจะให้ผลการประมวลผลที่ดีกว่าการใช้ฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบปกติซึ่งมีแกนความถี่แบบเชิงเส้น ฟังก์ชันกานอร์แบบลอการิทึมสามารถพิจารณาได้ตามสมการ (1)

$$G(w) = e^{(-\log(w/w_0)^2)/(2(\log(k/w_0)^2))} \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ w_0 คือ ค่าความถี่ศูนย์กลางตัวกรอง

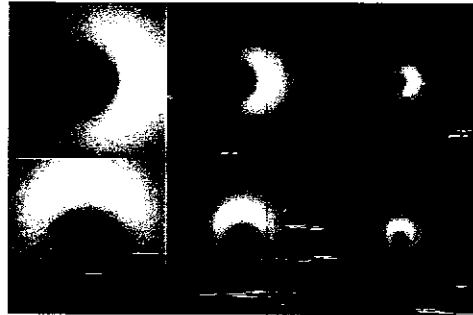
k/w_0 คือ อัตราส่วนที่ใช้ในการกำหนดค่า octave ของตัวกรองกานอร์แบบลอการิทึม เช่น ที่อัตราส่วน เท่ากับ 0.74, 0.55 และ 0.41 จะให้ความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ตัวกรองประมาณ 1, 2 และ 3 octave ตามลำดับ



รูปที่ 1 ภาพตัวอย่างของฟังก์ชันกานอร์บนแกนความถี่แบบเชิงเส้นและแบบลอการิทึม

ลักษณะสำคัญของตัวกรองชนิดนี้ คือ ฟังก์ชันกานอร์แบบลอการิทึมจะไม่มี DC component และส่วนปลายของสัญญาณที่ได้จากฟังก์ชันจะขยายไปสู่ความถี่สูง ดังนั้นฟังก์ชันกานอร์แบบลอการิทึมจึงมีความสามารถในการประมวลผลภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ฟังก์ชันกานอร์แบบปกติ

รูปที่ 2 ตัวภาพอร์แบบลอการิทึมที่ใช้
 2 orientation และ 3 scale



รูปที่ 3 ตัวภาพที่ผ่านตัวภาพอร์
 แบบลอการิทึม



3. เครื่องตรวจเวกเตอร์ (support vector machine)

เครื่องตรวจเวกเตอร์แต่เดิมได้ถูกออกแบบให้เป็นตัวที่ใช้แยกกลุ่มข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม โดยใช้ได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น เครื่องตรวจเวกเตอร์คือขั้นตอนวิธีในการหาระนาบเกิน (hyperplan) เพื่อใช้แยกจุดข้อมูลที่อยู่กลุ่มเดียวกันให้อยู่ฝั่งเดียวกันโดยให้ระยะห่างระหว่างข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มกับระนาบเกินมีค่ามากที่สุดนั่นคือค่า m ดังรูปที่ 4 สมมติให้มีข้อมูล L ชุดจากทั้งสองกลุ่ม ได้แก่

$$(x_1, y_1)(x_2, y_2) \dots (x_L, y_L) \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ $x_L \in R^N$ คือ ข้อมูลของทั้งสองกลุ่ม, $y \in (-1, +1)$ คือ การกำหนดว่าข้อมูลชนิดนั้นเป็นข้อมูลของกลุ่มไหน

และในการหาระนาบเกินเป็นการใช้เทคนิคการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของสมการดังต่อไปนี้

$$f(x) = \sum_{i=1}^N y_i \alpha_i k(x, x_i) + b \dots \dots \dots (3)$$

เมื่อ

N คือ จำนวนชุดของข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน

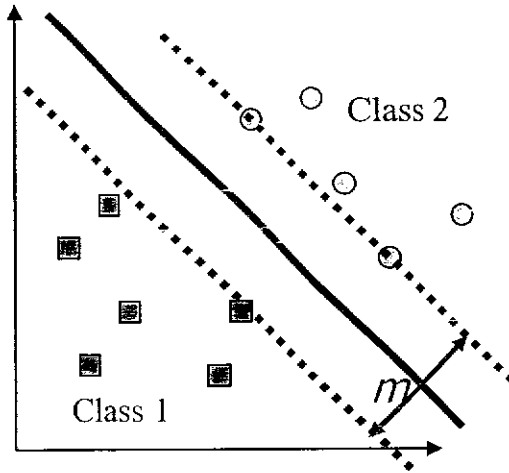
(x_i, y_i) คือ ชุดข้อมูลที่ i

α_i และ b คือ ค่าน้ำหนักการเรียนรู้

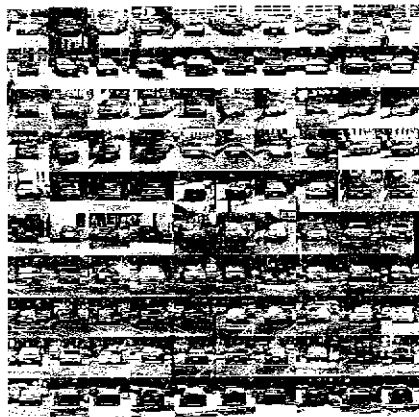
$k(\dots)$ คือ ฟังก์ชันหลัก (kernel function) ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันเรเดียลเบสิก(Radial Basic Function) ซึ่งมีสมการ (4) ดังนี้

$$k(x, y) = \exp(-\|x - y\|^2 / (2\sigma^2)) \quad \dots\dots\dots (4)$$

รูปที่ 4 การแยกข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม ด้วยระนาบเกิน



4. การคัดแยกกรด



รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพที่ฝึกสอนของกลุ่มที่เป็นรถ



รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพที่ฝึกสอนของกลุ่มที่ไม่ใช่รถ

เมื่อเก็บภาพที่เป็นรถยนต์และไม่ใช่รถยนต์ได้แล้ว จากนั้นนำภาพที่ได้มาฝึกโดยใช้ภาพรถและไม่ใช่รถจำนวน 100 ภาพ และในขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้ภาพรถและไม่ใช่รถที่ไม่ได้ใช้ในการฝึกสอนมาทดสอบมี ภาพรถ 400 ภาพ และภาพที่ไม่ใช่รถ 100 ภาพ ได้ผลดังตาราง

จำนวนภาพที่ใช้ฝึกสอน		ผลจากการทดสอบโดย	
ภาพรถ	ภาพที่ไม่ใช่รถ	ภาพรถ (%)	ภาพที่ไม่ใช่รถ (%)
10	10	82.5	89
30	30	93.25	89
50	50	82	90
80	80	94.5	90
100	100	96.25	94

5. สรุป

จากการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการคัดแยกภาพที่เป็นรถและไม่ใช่รถที่เป็นภาพขาวดำโดยการใช้ฟังก์ชันกaborแบบลอการิทึมตั้งเอียงและเส้นตรงที่ orientation และ scale ต่างกัน โดยขอบและเส้นตรงที่ได้จะบ่งบอกลักษณะเฉพาะของรถ จากนั้นนำภาพที่ผ่านกaborแบบลอการิทึมไปเข้าเครื่องตรวจแควเตอร์ก็ทำให้ทราบว่าภาพที่ได้นั้นเป็นภาพของรถหรือไม่ จากการใช้ฟังก์ชันกaborแบบลอการิทึมและเครื่องตรวจแควเตอร์ผลการคัดแยกที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Sun, G. Bebis, and R. Miller, "On-Road Vehicle Detection Using Gabor Filters and Support Vector Machines," Proc. IEEE Int'l Conf' Digital Signal Processing, July 2002.
- [2] Z. Sun, G. Bebis, and R. Miller, "Improving the Performance of On-Road Vehicle Detection by Combining Gabor and Wavelet Features," Proc. IEEE Fifth Int'l Conf. Intelligent Transportation Systems, Sept. 2002.
- [3] Z. Sun, G. Bebis, and R. Miller, "On-Road Vehicle Detection Using Evolutionary Gabor Filter Optimization," IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, vol. 6, no. 2, pp. 125-137, 2005

กระบวนการสร้างแผนภาพบ่งบอกความลึก Disparity Map Estimation

บัณฑิต ดวงชาต และ ผศ. ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-4400 โทรสาร 0-4422-4601 Email: BunditSutEE9@gmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ มีความประสงค์ที่จะนำเสนอวิธีการสร้างแผนภาพบ่งบอกความลึก(Disparity Map) โดยใช้ภาพมาประมวลผล 2 ภาพ ที่ได้จากกล้อง 2 ตัวที่อยู่ในระยะเดียวกัน โดยใช้กระบวนการพื้นฐานใช้เป็นตัวตัดสิน ในการหาความเหมือนของจุดภาพ (Pixel) ซึ่งผลที่ได้จะให้ค่าที่น้อยที่สุด หรือมากที่สุด เช่น วิธีการหาผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสอง (SSD), การหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง (SAD), ใช้วิธีการ correlation เป็นต้น

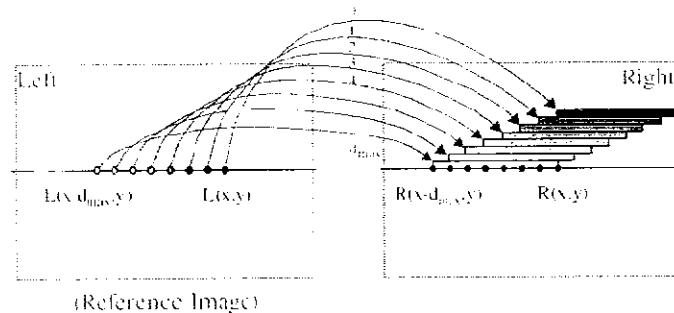
คำสำคัญ: Disparity Map, ผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสอง, ผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง, Correlation

1. บทนำ

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การจับคู่ในแต่ละจุดของภาพจากภาพ 2 ภาพเป็นปัญหาทางด้าน Computer Vision ซึ่งได้พัฒนาวิธีการวัดค่าความเหมือนของจุดภาพที่จะนำมาจับคู่ เช่น ใช้วิธีการหาผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสอง (SSD), การหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง (SAD), ใช้วิธีการ correlation เป็นต้น ในแต่ละวิธีการจะนำเอาค่าที่ให้จากแต่ละวิธีที่เป็นค่าน้อยที่สุดมาตัดสินความคล้ายของแต่ละจุดหรือแต่ละกลุ่ม (window) ของภาพนอกจากนี้ยังมีการพัฒนา Algorithm ที่นำเอา Dynamics Programming มาช่วยหาเส้นทางในการจับคู่แต่ละจุดภาพ วิธีการที่นำเสนอจะใช้วิธีการหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง มาใช้ในการวัดความเหมือนของกลุ่มจุดภาพ

2. Stereo Matching

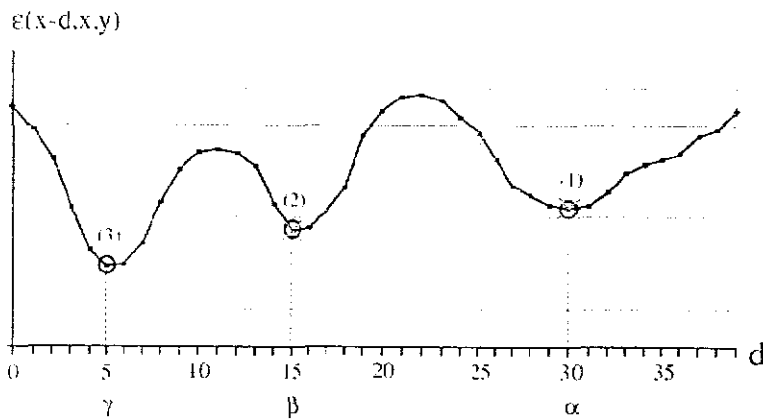
สมมุติว่า เรามีภาพที่มีเส้น epipolar ที่ตรงกันทั้งสองภาพ เราจะสามารถทำการจับคู่ได้ข้างขึ้นโดยเราจะทำการหาในแนวแกน x ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจับคู่ของแต่ละจุดภาพ

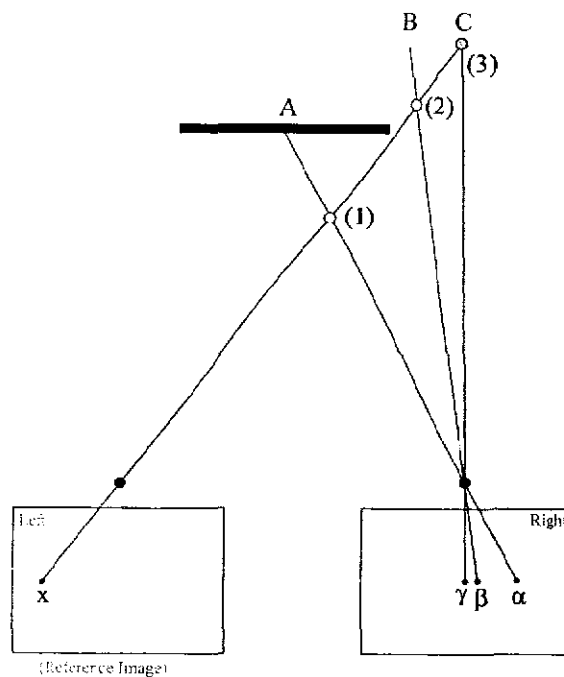
ในแต่ละจุดจะใช้การหาค่าที่น้อยที่สุดจากการหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง มาตัดสินการจับคู่ของกลุ่มจุดภาพ

การสร้าง Disparity Map ขึ้นจากภาพ 2 ภาพ จะต้องอาศัยการจับคู่แต่ละจุดโดยจะกำหนดค่าความลึกที่มากที่สุดซึ่งจะกลายเป็นการกำหนดช่วงในการหา $d = [0 \dots d_{max}]$ ซึ่งการหามีการหาจากภาพทางด้านซ้าย ไปยังภาพทางด้านขวา จะได้ว่า $L(x,y) \rightarrow R(x+d,y)$ และจะทำไปจนถึง $d = d_{max}$ จะได้กราฟดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง ที่จุด $L(x,y)$

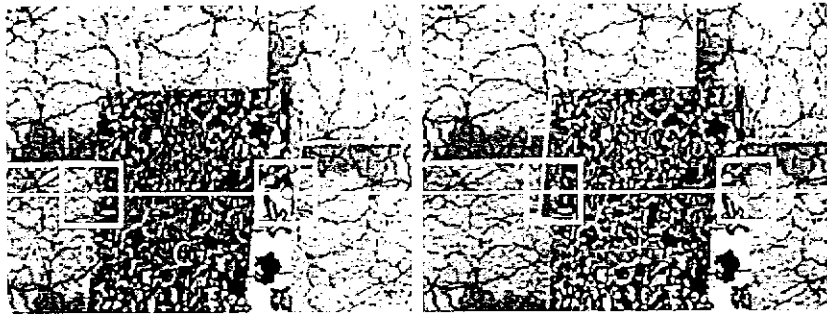
จากรูปที่ 2 จะสังเกตได้ว่ามีจุดต่ำสุดอยู่ 3 จุด ซึ่งเกิดจากความคล้ายของแสงแต่ละจุดดังรูปที่ 3



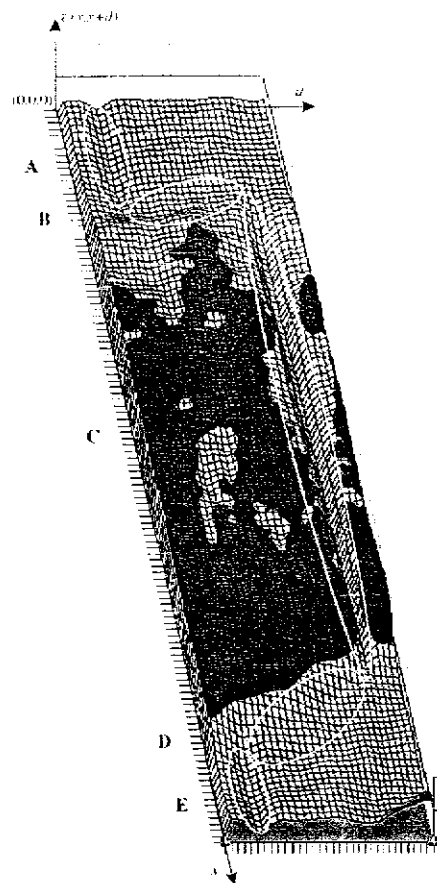
รูปที่ 3 จุดที่ให้ค่าต่ำสุดในแต่ละจุด

ซึ่งเราต้องการค่าที่ต่ำที่สุด (Global) บางครั้งเราจำเป็นต้องใช้วิธีการหาค่าต่ำสุดมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณในแต่ละรอบ

สมมุติเราให้ภาพที่ต้องการหาเป็นภาพดังภาพที่ 4 และทำการจับคู่ตามเส้นสีขาว โดยกำหนดช่วงการสังเกตไว้ 5 ตำแหน่ง A, B, C, D และ E แล้วคำนวณหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่างในแต่ละจุดตลอดเส้น จะได้ค่าผิดพลาด (error, \mathcal{E}) ในแต่ละค่าของ d จนถึง d_{max} ซึ่งจะได้ตามรูปที่ 5



รูปที่ 4 ภาพตัวอย่างการคำนวณ



รูปที่ 5 กราฟที่ได้จากการหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง จากภาพที่ 4

จะสังเกตได้ว่าบริเวณวงกลมสีขาวจะเป็นตำแหน่งที่เป็นค่าที่ต่ำที่สุด(Global) และบริเวณ A,E จะเป็นพื้นหลัง B,D เป็นขอบหินอ่อน และ C เป็นตำแหน่งของหินอ่อน และจะเห็นเป็นภาพ 3มิติขึ้นมาเมื่อทำให้ครบทุกตำแหน่งในแนวแกน Y

3. การคำนวณ

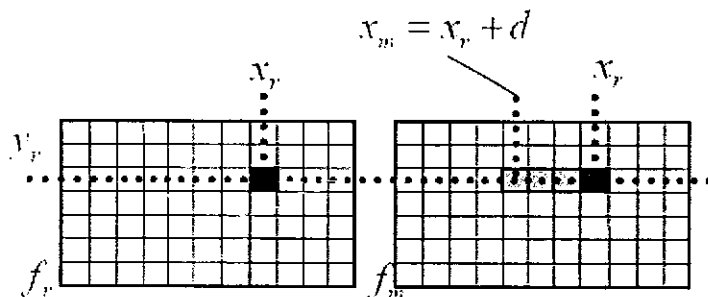
การคำนวณจะคำนวณจากด้านซ้ายไปขวา และจากด้านบนลงด้านล่าง โดยจะคำนวณในแนวแกน X จนหมดจึงจะเปลี่ยนค่า Y ดังรูปที่ 6 โดยจะกำหนดหน้าต่างในการคำนวณในแต่ละครั้งให้มีขนาดเป็น $(2n+1) \times (2n+1)$ เมื่อคำนวณได้แล้วจึงนำผลไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าต่างที่เรากำหนด โดยที่สมการที่ใช้ในการคำนวณจะอยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$SAD(x, y, d) = \sum_{i,j=-n}^n |L(x+j, y+i) - R(x+d+j, y+i)| \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมทริกซ์ SAD เก็บค่าผิดพลาดที่คำนวณได้ หลังจากนั้นนำผลการคำนวณ SAD ไปหาค่าที่น้อยที่สุดในแนวแกน d จะได้

$$Disparity(x, y) = \min(SAD(x, y, d)) \quad \dots\dots\dots (2)$$

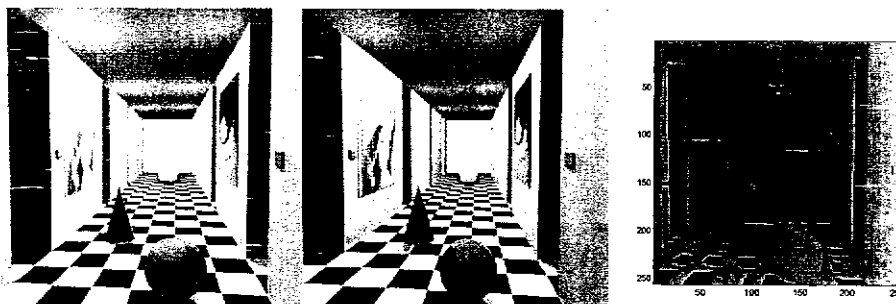
เมื่อ Disparity คือ เมทริกซ์ที่บ่งบอกความลึกของภาพ



รูปที่ 6 ตำแหน่งในการคำนวณ

4. ผลการคำนวณในแต่ละภาพ

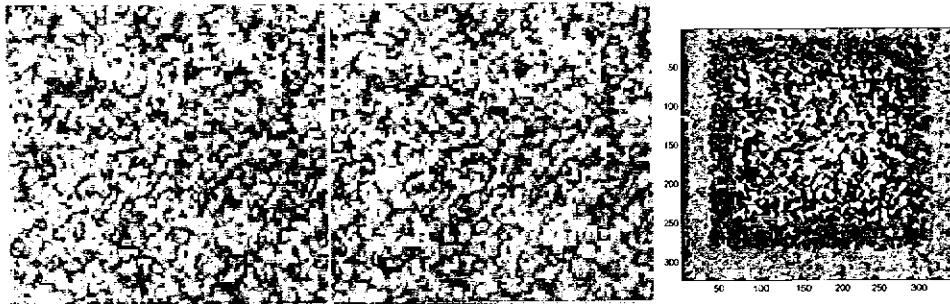
ในการคำนวณ กำหนดให้หน้าต่างมีขนาด 5×5 และกำหนดให้ $d_{max} = 15$ ให้ผลดังต่อไปนี้ ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 1



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

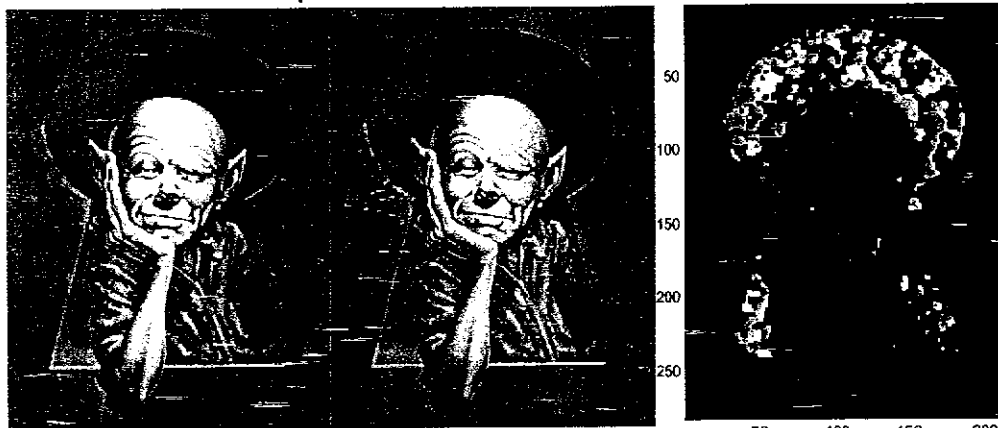
ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 2



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 3



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

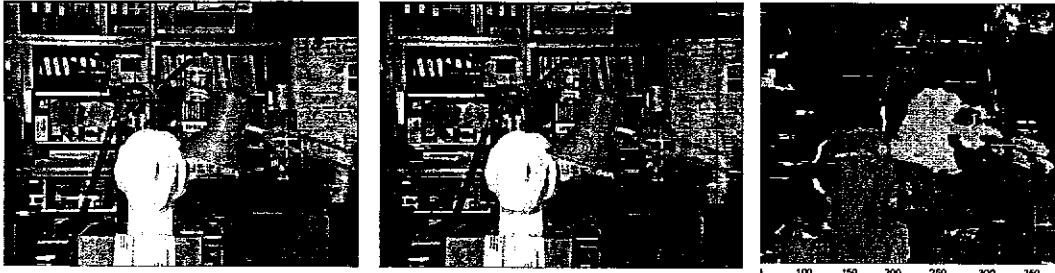
ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 4



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 5



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 6



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 7



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 8



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

ผลการทดสอบของชุดภาพที่ 9



ภาพทางด้านซ้าย

ภาพทางด้านขวา

จากการทดสอบภาพต่างๆ จะเห็นว่าสามารถสร้างภาพ Disparity ได้จากวิธีการคำนวณผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง จากผลที่ได้จะสังเกตเห็นจุดภาพบางกลุ่มจะเป็นสีดำซึ่งอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับวัตถุหรือคนที่อยู่ด้านหน้า ซึ่งมีสาเหตุมาจากสีผิวของวัตถุที่มีสีเดียวกัน สังเกตได้จากภาพชุดที่ 10 ช่วงตรงกลางของเส้นจะมีสีดำปนอยู่ เมื่อทำการหาค่าผลรวมของสัมบูรณ์ผลต่าง ในกลุ่มจุดภายในนั้น จะให้ค่าที่ต่ำที่สุดที่จุดเดิมหรือจุดที่ตำแหน่งใกล้เคียง ซึ่งไม่ใช่จุดที่ถูกต้อง บางครั้งเราก็ต้องการเลือกค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่น (Local) ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะทำให้รู้ว่าเป็นบริเวณใดที่เป็นจุดที่ถูกต้องโดยเลือกจากค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่นได้ แต่บางวิธีการจะสามารถแก้จุดนี้ได้ ซึ่งต้องแลกกับความเร็วที่ต้องเสียไปกับการคำนวณ

5. การนำไปใช้งาน

การนำไปใช้งานสามารถใช้งานได้หลากหลาย โดยหลักๆแล้วมี 2 อย่างที่จะนำไปใช้งานแบบกว้างๆก็คือ ใช้ในงานตรวจจับ (Sensor) โดยจะอาศัยคุณสมบัติของ Disparity ที่ไม่มีพื้นหลัง ซึ่งจะสามารถทำการคัดแยก (Segment) วัตถุได้ง่ายโดยที่รูปร่างของวัตถุยังคงอยู่ การใช้งานอีกอย่างก็คือสามารถนำไปใช้ในการสร้างโมเดล ของวัตถุ ในงานสร้างโมเดลวัตถุบางครั้งเราต้องการความง่ายในการสร้าง ซึ่งมีงานวิจัยในข่ายนี้ออกมา โดยใช้ Disparity มาช่วยในการสร้างภาพ 3 มิติ บางครั้งก็จะออกไปในรูปแบบการสร้างภาพ 3 มิติ เพื่อใช้ในงานวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งก็มีงานวิจัยในลักษณะนี้ออกมา และต้องการความละเอียดของ Disparity พอสมควร

การพัฒนาในรูปแบบของตัวตรวจจับ เราสามารถพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์เล็กๆ ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบไปด้วย ตัวประมวลผล(FPGA, DSP, ARM และตัวประมวลผลอื่นๆ) หน่วยความจำภายนอก (RAM, FLASH MEMORY และ STORAGE DEVICE อื่นๆ) กล้อง แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง และตัวแปรสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) ชนิดหนึ่งที่สามารถแปรสัญญาณจาก เอาท์พุทของกล้องที่มีรูปแบบมาตรฐาน NTSC หรือ PAL มาเป็นสัญญาณที่อยู่ในรูป RGB, YUV เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่นำเสนอมาสามารถที่จะนำมาใช้ในการหาได้

6. สรุป

การหา Disparity ของภาพ จำเป็นต้องใช้กล้องในการรับภาพมาประมวลผล 2 ตัวขึ้นไป จึงจะให้ผลที่ดี แต่ในงานวิจัยสามารถใช้กล้องเพียงตัวเดียวก็สามารถหา Disparity จากภาพได้เช่นกัน โดยงานวิจัยในข่ายนี้เรียกว่า Optical Flow หรือ Motion Estimation ซึ่งจะให้ผลที่ต่างจากการคำนวณโดยใช้กล้อง 2 ตัว ที่จะบอกความลึกโดยใช้ลูกศร และ ขนาดของลูกศร แทนการบอกด้วยระดับเทา แต่ในการคำนวณให้ได้นั้น วัตถุในภาพจะต้องเคลื่อนที่ หรือให้กล้องเป็นตัวเคลื่อนที่ ซึ่งงานวิจัยในข่ายนี้จะใช้การคำนวณมากกว่า การแก้ปัญหาการจับคู่ที่ไม่ถูกต้องสามารถทำได้แบบอย่างง่ายโดยการเพิ่มหน้าต่างที่ใช้คำนวณ จะช่วยทำให้ค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่นที่ถูกต้องกลายมาเป็นจุดที่ต่ำที่สุดได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ อาทิตย์ ศรีแก้ว ที่ให้คำแนะนำต่างๆ และเพื่อนๆ ภายในอาคารเครื่องมือ5 ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและกำลังใจ ให้เกิดบทความนี้ขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] *di Stefano, L.[Luigi], Marchionni, M.[Massimiliano], Mattoccia, S.[Stefano], A Fast Area-Based Stereo Matching Algorithm, IVC(22), No. 12, 1 October 2004*
- [2] K. Konolige, **Small Vision System: Hardware and Implementation**, *IEEE Conference on Computer Eighth International Symposium on Robotics Research*, Hayama, Japan, 1997

การตรวจจับจุดบกพร่องด้วยตัวกรองกาบอร์ Defect Detection using gabor filters

วิไลลักษณ์ กิตสร้าง และ ผศ. ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ.มหาวิทยาลัย ค.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-3410 Email: khitsang.nuy@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการประมวลผลภาพโดยผ่านเทคโนโลยีการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นในหลายๆ ด้าน ดังจะเห็นได้จากการนำแขนกล หุ่นยนต์ มาใช้งานตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย หนึ่งในงานวิจัยที่สำคัญที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อการใช้งานเทคโนโลยีดังกล่าว ก็คือ การตรวจจับสิ่งผิดปกติ หรือจุดบกพร่อง ความไม่สมบูรณ์ ฯลฯ ของสิ่งต่างๆ บทความนี้จะนำเสนอเทคนิคการตรวจจับจุดบกพร่องด้วยตัวกรองกาบอร์ โดยเนื้อหาที่จะพิจารณาเลือกใช้เพื่อการตรวจจับตามเทคนิคดังกล่าวต้องเป็นเนื้อหาแบบสม่ำเสมอ ไม่มีผลของแสง เช่น การสะท้อน มาเกี่ยวข้อง ผลการทดลองสามารถพิสูจน์ได้ถึงประสิทธิภาพในการค้นหาดินแดนของเนื้อหาที่แตกต่างหรือผิดเพี้ยนไปจากเดิมได้ของฟังก์ชันกาบอร์ ส่วนการคัดแยกจุดบกพร่องสามารถให้ผลดีได้แต่ไม่เป็นอัตโนมัติ

คำสำคัญ : ตัวกรอง ตัวกรองกาบอร์ การตรวจจับจุดบกพร่อง การคัดแยก

Abstract

At present, image processing technology using computer that has an important roles in variety society. Considerations from artificial hand or robots are widely used to work in industries. One research which important to develop in this technology is defect detection or non-perfect shape. This article proposes about defect detection using gabor filters. Texture which is used by this technique must be uniform and without affect of light e.g. reflection. The experiment results can prove efficient in searching different or miss texture form of gabor function. In segmentation has good result but don't automatic system.

Keywords: filter, gabor filters, defect detection, segmentation

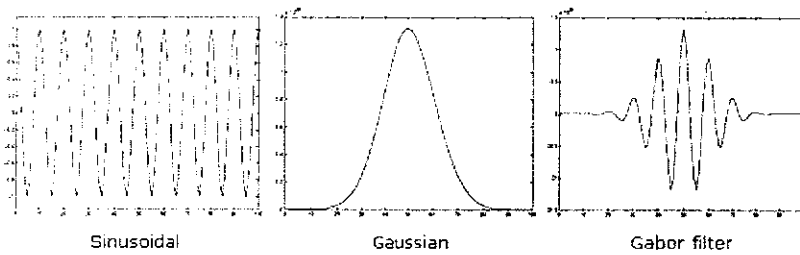
1. คำนำ

การวิจัยและพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับกระบวนการตรวจจับจุดบกพร่องได้รับความสนใจและพัฒนา มาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลากว่า 2 ทศวรรษ[1] มีการคิดค้นเทคนิควิธีการใหม่ๆ เพื่อให้เกิด ประสิทธิภาพทั้งในเรื่องเวลา ต้นทุน และความแม่นยำอยู่เสมอ เทคนิคดังกล่าวล้วนเป็นเทคนิคที่ต้องอาศัย หลักการประมวลผลข้อมูลภาพแทบทั้งสิ้น โดยทั่วไปก็มักเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พื้นผิวหรือเนื้อหาของ ภาพ (texture analysis) เป็นการคำนวณหาคุณลักษณะของพื้นผิว (texture feature) ที่โดดเด่นมี เอกลักษณะเฉพาะตัวในการแสดงความเป็นพื้นผิวนั้นๆ ซึ่งจะแตกต่างจากคุณลักษณะพื้นผิวที่ได้จากภาพ พื้นผิวอื่นๆ คุณลักษณะของพื้นผิวดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ในปริภูมิภายใต้เกณฑ์

การกระจายสัญญาณสี่เหลี่ยม ฟังก์ชันกานบอร์เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกพื้นผิว เนื่องจากสามารถดำเนินการง่ายและให้ผลการจำแนกที่มีประสิทธิภาพ

2. ตัวกรองกานบอร์

ตัวกรองกานบอร์ [2] เป็นเทคนิคการแปลงเวฟเลตรูปแบบหนึ่ง ถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ.1946 โดยชาวเยอรมันชื่อ Gabor [3] ซึ่งใช้วิเคราะห์สัญญาณเพื่อให้ได้ทั้งข้อมูลทางความถี่ และข้อมูลทางเวลา ตัวกรองกานบอร์เป็นแบบจำลองการคำนวณที่พัฒนามาจากการทดลองทางด้านชีววิทยาและจิตวิทยาที่เกี่ยวข้องกับระบบการมองเห็นที่มีส่วนใกล้เคียงกับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ทฤษฎีดังกล่าวมาจากการพิจารณาว่าโดยพื้นฐานแล้วข้อมูลภาพสามารถพิจารณาได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง พิจารณาในเชิงเวลา (spatial domain) มองภาพว่าเป็นที่รวมของพิกเซลต่างๆ แต่ละพิกเซลมีระยะห่างจากจุดเริ่มต้นแตกต่างกัน และ แบบที่สองพิจารณาในเชิงความถี่ (frequency domain) มองภาพว่าเป็นผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่มีอยู่อย่างไรขอบเขตจำกัด โดยทำการพิจารณาภาพในเชิงเวลา และในระนาบความถี่เข้าด้วยกัน เพื่อค้นหาดินแดนที่มีพื้นผิวแตกต่าง คล้ายคลื่น หรือผิดเพี้ยนไปจากเดิม สามารถกระทำได้โดยกลุ่มของตัวกรองผ่านแถบ (band-pass filter) พิจารณาตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟังก์ชันกานบอร์ 1 มิติ

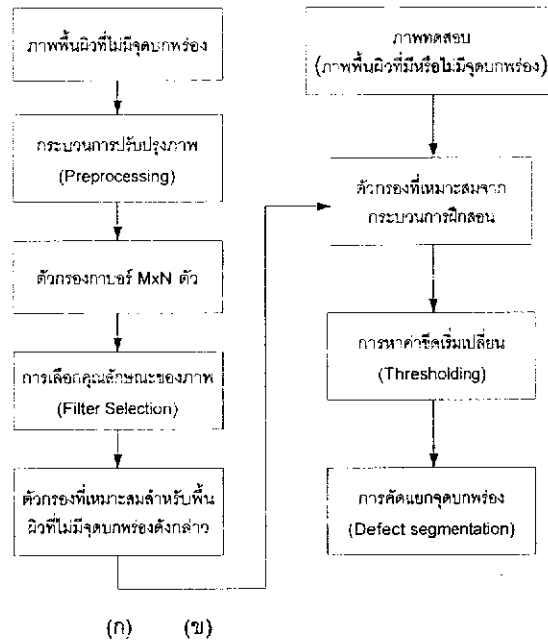
ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับจุดบกพร่องออกจากพื้นผิวด้วยตัวกรองกานบอร์ โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการฝึกสอน โดยเริ่มต้นจะทำการสร้างกลุ่มของตัวกรองกานบอร์ ต่อมาทำการหาตัวกรองกานบอร์ตัวที่ดีที่สุด ซึ่งให้คุณลักษณะของพื้นผิวออกมาดีที่สุดด้วยเช่นกัน ซึ่งจะพิจารณาจากภาพพื้นผิวที่ไม่มีจุดบกพร่อง จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนทดสอบ คือ นำภาพพื้นผิวที่ต้องการทดสอบมาทำคอนโวลูชัน (convolution) กับตัวกรองกานบอร์ที่ดีที่สุดที่หาได้จากขั้นตอนแรก แล้วจึงทำการ คัดแยกจุดบกพร่องออกจากพื้นผิวที่เหมาะสม พิจารณากระบวนการในการตรวจจับได้ตามรูปที่ 2

ตัวกรองกานบอร์เป็นตัวกรองผ่านแถบ สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันผลตอบสนองแรงกระตุ้น (Impulse Response Function: IRF) ซึ่งได้จากฟังก์ชันเกาส์เขียนมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ฟังก์ชันกานบอร์ 2 มิติ สามารถพิจารณาได้ตามสมการ (1)

$$\psi(x, y) = \underbrace{\frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right)}_{\text{Gaussian envelope}} \underbrace{\exp(j2\pi Wx)}_{\text{sinusoid}} \quad \text{----- (1)}$$

- เมื่อ $\psi(x, y)$ เป็นคลาสหนึ่งของเวฟเลตแม่ (mother wavelet)
W คือ ความถี่การมอดูเลต (modulation frequency) ของฟังก์ชันกานบอร์

σ_x, σ_y คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเกาส์เขียนตามแนวแกน x และ y



รูปที่ 2 ขั้นตอนการตรวจจบบจุดบกพร่องในขั้นต้น (ก) ขั้นตอนการฝึกสอน (ข) ขั้นตอนทดสอบ

ตัวกรองเวฟเลต (Gabor Wavelet filters) สามารถพิจารณาได้จากฟังก์ชันต่อไปนี้

$$\Psi_{mn}(x, y) = \alpha^{-m} \Psi(x', y')$$

เมื่อ $\alpha > 1$, $m = 0, 1, \dots, M-1$; $n = 0, 1, \dots, N-1$

$$x' = a^{-m} (x \cos \theta_n + y \sin \theta_n), \quad y' = a^{-m} (-x \sin \theta_n + y \cos \theta_n)$$

$$\theta_n = \frac{(n-1)\pi}{N}$$

การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ของ $f(x, y)$ พิจารณาได้ตามสมการ

$$\Psi(u, v) = \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{(u-W)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2} \right) \right] \quad \text{----- (2)}$$

เมื่อ $\sigma_u = \frac{(a-1) \cdot W}{(a+1)\sqrt{2\ln 2}}$

$$\sigma_v = \tan \left(\frac{\pi}{2L} \right) \left[W - 2\ln 2 \left(\frac{\sigma_u^2}{W} \right) \right] \left[2\ln 2 - \frac{(2\ln 2)^2 \sigma_u^2}{W^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_x = \frac{1}{2\pi\sigma_u}, \quad \sigma_y = \frac{1}{2\pi\sigma_v}$$

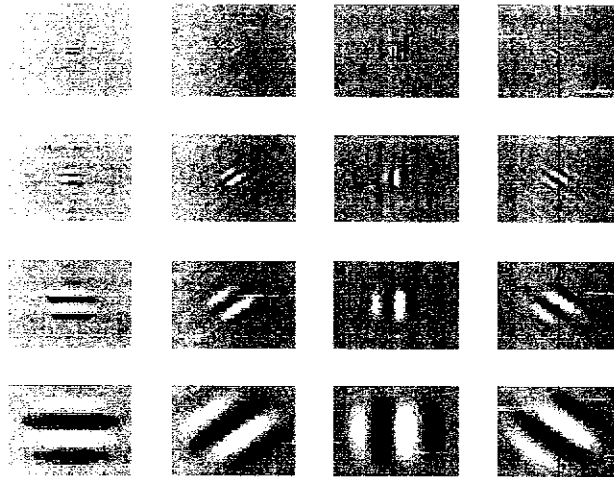
กำหนดให้พารามิเตอร์ต่างๆ มีสมการ ดังนี้

$$W_{m,n} = a^{-m} U_h, \quad \alpha = \left(\frac{U_h}{U_l} \right)^{1/(M-1)}$$

$$\sigma_u = \frac{1}{2\pi\sigma_x}, \quad \sigma_v = \frac{1}{2\pi\sigma_y}$$

- ซึ่ง α เป็นความยาวคลื่นของตัวกรองกบอร์
 x', y' เป็นพิกัดที่ถูกหมุนไปด้วยมุม θ_n
 θ_n เป็นการปรับทิศทาง (rotation / orientation) ของตัวกรองกบอร์
 m, n ใช้แทนตัวบ่งชี้สำหรับการปรับมาตราส่วนหรือการปรับสเกล (dilation) และการปรับทิศทางของเวฟเล็ต
 M, N เป็นจำนวนทั้งหมดของการปรับมาตราส่วนและการปรับทิศทาง ตามลำดับ

ถ้ากำหนดให้ กบอร์มีการปรับมาตราส่วน (M) = 4 และการปรับทิศทาง (N) = 4 สามารถพิจารณาแบงก์ของตัวกรองกบอร์ (Gabor filter bank) ที่มีองค์ประกอบเป็นส่วนจินตภาพได้ตามรูปที่ 3 โดยมีจำนวนฟิลเตอร์แบงก์ทั้งหมด (Filter banks) = $M \times N$



รูปที่ 3 รูปร่างที่เป็นองค์ประกอบของส่วนจินตภาพของตัวกรองกบอร์ในโดเมนเวลา
 $m = 1, 2, \dots, 4$ scales และ $n = 1, 2, \dots, 4$ orientations

สำหรับการพิจารณาเลือกความถี่เชิงมุม W จะพิจารณาจากหน่วย octave ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้วัดความถี่เชิงมุม 2 ค่าใดๆ โดย 1 octave จะเป็นสองเท่าหรือครึ่งหนึ่งของความถี่ที่พิจารณาอยู่ พิจารณาการคำนวณตามสมการ

$$\text{octave} = \log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad \text{----- (3)}$$

Pollen และ Rouner [4] พบว่าย่านความถี่ของเซลล์ประสาทรับรู้การมองเห็นมีค่าประมาณ 1 octave เพื่อจำลองระบบการมองเห็นของมนุษย์ให้สมจริงมากที่สุดจึงพิจารณาออกแบบตัวกรองกาบอร์ให้มีย่านความถี่ครึ่งหนึ่งของสัญญาณสูงสุดเท่ากับ 1 octave เช่นกัน

3. คุณลักษณะของภาพ

กำหนดให้ข้อมูลภาพ $T(x, y)$ มีขนาด $P \times Q$ สมการการแปลงกาบอร์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete gabor wavelet transform) จะเขียนในรูปการคอนโวลูชันได้ดังสมการ

$$G_{mn}^T(x, y) = \sum_s \sum_t T(x - s, y - t) \psi_{mn}^*(s, t) \quad \text{----- (4)}$$

เมื่อ s และ t เป็นขนาดของตัวกรอง, ψ_{mn}^* เป็นค่าคอนจูเกต (conjugate) ของ ψ_{mn} ซึ่งเป็นคลาสหนึ่งของเวฟเลตแม่ และ $G_{mn}^T(x, y)$ คือ ภาพที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองกาบอร์ 24 ตัว พิจารณา $M = 4$ และ $N = 6$

ขั้นตอนต่อมาทำการหาค่าพลังงาน ซึ่งเป็นผลรวมของค่า $G_{mn}^T(x, y)$ ที่สเกลและมุมต่างๆ ของภาพ

$$E(m, n) = \sum_x \sum_y |G_{mn}^T(x, y)| \quad \text{----- (5)}$$

จากนั้นทำการคำนวณค่าเฉลี่ย (mean) μ_{mn} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) σ_{mn} ของผลรวมจากสมการ (5) ค่าเหล่านี้จะใช้แทนคุณลักษณะพื้นผิวของรูปภาพ

$$\mu_{mn}^T = \frac{E(m, n)}{P \times Q} \quad \text{----- (6)}$$

$$\sigma_{mn}^T = \frac{\sqrt{\sum_x \sum_y (|G_{mn}^T(x, y)| - \mu_{mn}^T)^2}}{P \times Q} \quad \text{----- (7)}$$

เมื่อ $m = 1, 2, \dots, M$ และ $n = 1, 2, \dots, N$

4. การคัดเลือกคุณลักษณะของภาพ

การเลือกใช้ตัวกรองที่ได้จากกาบอร์ จะพิจารณาจากคุณลักษณะของภาพที่ผ่านการคอนโวลูชันกับตัวกรองกาบอร์ โดยพิจารณา ค่า F_{mn}^T ที่ได้จากตัวกรองทุกตัวมาทำการหาตัวกรองตัวที่ดีที่สุดจากตัวกรองทั้งหมด $M \times N$ ตัว

$$F_{mn}^T = \frac{\mu_{mn}^T}{\sigma_{mn}^T} \quad \text{----- (8)}$$

ตัวกรองตัวที่ดีที่สุดจะให้ค่าฟังก์ชัน (cost function) ตามสมการ (8) มากที่สุด

$$F_{kl}^T = \max \{ F_{mn}^T \} \quad \text{----- (9)}$$

5. การตัดแยกจุดบกพร่อง

จุดบกพร่องที่เกิดขึ้น เป็นการเปลี่ยนแปลงเฉพาะที่ของภาพที่เล็กน้อย ผลที่ได้จะสอดคล้องกับความไม่ต่อเนื่องในระดับเทาของภาพที่ได้ การตัดแยกจุดบกพร่องจะทำโดยการให้นิยามพิกเซลแต่ละพิกเซล และพิจารณาลักษณะภาพรวมจากการนิยามว่าเป็นจุดบกพร่องหรือไม่ตามสมการต่อไปนี้

$$D(x, y) = \begin{cases} 255 & |G_{kl}^T - \mu_{kl}^T| \geq \zeta \sigma_{kl}^T \\ 0 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad \text{----- (10)}$$

โดยที่ ζ = ความไว (sensitivity)

6. ผลการจำลอง

ค่าความถี่เชิงมุมต่ำสุดและสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 0.05 และ 0.4 ตามลำดับ [5] กำหนดให้จำนวนความถี่เชิงมุมที่ใช้ในการทดลองคือ 4 ดังนั้นค่าความถี่เชิงมุมทั้งหมดมีค่าดังนี้ 0.05 0.1 0.2 และ 0.4 cycles/pixel นั่นคือ $W = 0.05 \ 0.1 \ 0.2$ และ 0.4 พิจารณา $M = 4 \ N = 6 \ U_1 = 0.05$ และ $U_2 = 0.4$ จะได้ค่าพารามิเตอร์จากการสร้างกลุ่มตัวกรองภาพอร์ 24 ซองสัญญาณ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการตรวจจับจุดบกพร่องตามอัลกอริทึมดังกล่าว

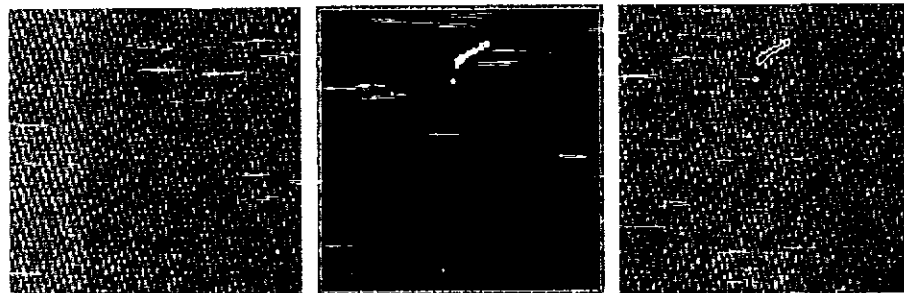
ซองสัญญาณที่	ความถี่เชิงมุม (cycles/pixel)	โอเรียนเตชัน (degree)	σ_x	σ_y	σ_u	σ_v
1-6	0.05	0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°	11.24	14.83	0.014	0.011
7-12	0.1	0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°	5.62	7.418	0.028	0.023
13-18	0.2	0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°	2.811	3.709	0.057	0.043
19-24	0.4	0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°	1.405	1.854	0.113	0.086



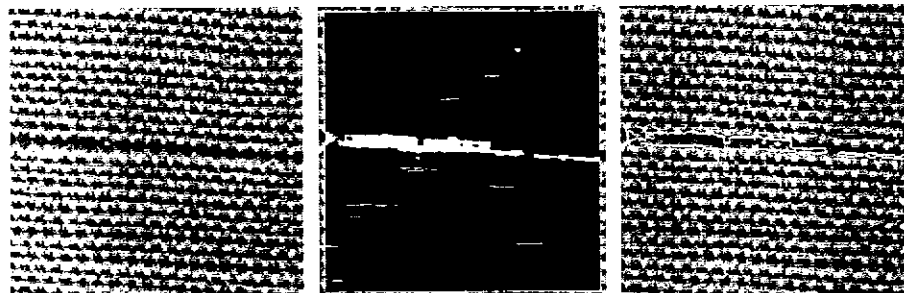
(ก) จุดบกพร่องแบบรู (Hole defect) Size of mask = 11 $\zeta = 1$ time = 5.89 sec



(ข) จุดบกพร่องแบบรอยฉีก (Tear defect) Size of mask = $21 \zeta = 1$ time = 6.1 sec



(ค) จุดบกพร่องแบบรอยปมขนาดใหญ่ (Big-knot defect) Size of mask = $9 \zeta = 2$ time = 3.55 sec



(ง) จุดบกพร่องแบบรอยสะเก็ดหยาบ (Coarse pick defect) Size of mask = $15 \zeta = 1$ time = 5.1 sec

รูปที่ 4 การตรวจจับและคัดแยกจุดบกพร่องจากพื้นผิวต่างๆ

7. บทสรุป

จากการศึกษาผลการตรวจจับจุดบกพร่องด้วยตัวกรองกบอร์ พบว่า ฟังก์ชันกบอร์สามารถค้นหาดินแดนของเนื้อหา (พื้นผิว) ที่แตกต่างกันหรือผิดเพี้ยนไปจากเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การตรวจจับยังสามารถดำเนินการได้ง่ายและรวดเร็ว โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาขนาดหน้าภาพหรือตัวดำเนินการเล็กๆ แต่เนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้ในการคัดแยกยังต้องการการปรับขนาดความไว โดยการพิจารณาด้วยสายตา จึงยังขาดประสิทธิภาพและดำเนินการได้ยาก ซึ่งต้องการการพัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมเพื่อการใช้งานต่อไปในอนาคต

8. รายการอ้างอิง

- [1] Ajay Kumar, and Grantham K. H. Pang, "Defect Detection in Textured Materials Using Gabor Filters", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol.38, No.2, March/April 2002
- [2] Hao Liu, "Defect Detection in Textiles Using Optimal Gabor Wavelet Filter", IEEE Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, June 21-23, 2006, pp. 10005-10007
- [3] Gabor D., "Theory of communication", Journal of the Institute of Electrical Engineer, vol.93, pp. 429-549, 1946
- [4] Jain A.K. and Farrokhnia F., "Unsupervised Texture Segmentation using Gabor Filters", Pattern Recognition, Vol.24, No.12, 1991, pp. 1167-1186
- [5] Tawee Kusumawalee, "Texture Image Segmentation using Gabor Filter", KMIT, 2545

การใช้ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมและเครื่องตรวจเวกเตอร์ ในการคัดแยกภาพคนเดินถนน Pedestrian detection using log-gabor filters and support vector machines

จักรวาล จันทา และ ผศ. ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111. ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทร 0-4422-4400 Email: janta2002@hotmail.com

บทคัดย่อ

การคัดแยกภาพคนเดินถนนในปัจจุบันนิยมใช้การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision) ซึ่งนำไปใช้งานในระบบเสริมช่วยการขับขี่รถยนต์ ที่มีลักษณะเป็นระบบสังเกตการณ์และเตือนภัยแก่ผู้ขับขี่รถยนต์ เพื่อช่วยลดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นทั้งผู้ขับขี่รถยนต์และคนเดินถนน ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการตามแนวความคิดหลักด้านรูปร่างของคนเดินถนน โดยการใช้ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึม (Log-Gabor Filters) ในการตรวจจับภาพคนเดินถนน และใช้เครื่องตรวจเวกเตอร์ (Support Vector Machine) ในการรู้จำและคัดแยกภาพคนเดินถนน

คำสำคัญ : การคัดแยกภาพคนเดินถนน, คอมพิวเตอร์วิทัศน์, ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึม, เครื่องตรวจเวกเตอร์

Abstract

Pedestrian detection is an important research content of vehicle active safety. The central idea behind such pedestrian safety systems is to protect the driver and pedestrian from injuries. In this paper, we proposed a pedestrian detection approach based on Log-Gabor Filters and used Support Vector Machine to classify the pedestrian.

Keywords: pedestrian detection, Log-Gabor Filters, Support Vector Machine

1. บทนำ

เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การตรวจจับและคัดแยกภาพคนเดินถนนออกจากภาพบริเวณถนน เพื่อระบุขนาดและตำแหน่งของภาพคนเดินถนนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบเสริมช่วยในการขับขี่รถยนต์ โดยนำภาพจากกล้องถ่ายภาพดิจิทัลไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีพื้นฐานมาจากประสบการณ์การเรียนรู้ของมนุษย์ ความสามารถในการรับรู้ เข้าใจ และคัดแยกความหมายของวัตถุต่าง ๆ ภายในภาพของมนุษย์ถือเป็นตัวอย่างที่แสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดของระบบนี้ ถึงแม้ว่ากล้องถ่ายภาพดิจิทัลมีความสามารถบันทึกภาพได้ข้อมูลที่หลากหลาย แต่ภาพที่ได้ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้ได้โดยตรง ต้องอาศัยการกรองข้อมูล ซึ่งการกรองข้อมูลภาพคนเดินถนนนั้นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ สภาพคนเดินถนนอยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมกลางแจ้งจึงมีองค์ประกอบที่ ซับซ้อนและไม่สามารถควบคุมได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างภายในภาพซึ่งอาจเกิดจากสภาพอากาศและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ อีกทั้งคนเดินถนนจะพบ

มากในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นซึ่งมีพื้นหลังที่หลากหลายและซับซ้อน เช่น อาคาร รถยนต์ ต้นไม้ เสาและป้ายต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยด้านความหลากหลายของลักษณะรูปร่างมนุษย์อันเนื่องมาจาก ชุด แต่งกาย ท่าทาง การเคลื่อนไหว ขนาดของร่างกาย สีผิวและเงา

วิธีการต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาเพื่อคัดแยกภาพคนเดินถนน งานวิจัยในปัจจุบันแบ่งได้สองแนวความคิดหลัก ได้แก่แนวความคิดหลักด้านการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ข้อมูลภาพต่อเนื่องเพื่อที่จะคัดแยกท่าทางเดินของมนุษย์ซึ่งมีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่ต่อเนื่องและแนวความคิดหลักด้านรูปร่างซึ่งอาศัยลักษณะเด่นของรูปร่างมนุษย์ เพื่อใช้ในการจดจำและคัดแยกภาพคนเดินถนน

ในงานวิจัยนี้ได้อาศัยแนวความคิดหลักด้านรูปร่าง ซึ่งไม่ต้องการข้อมูลภาพที่ต่อเนื่องและสามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่ไม่มีการเคลื่อนที่ได้ งานวิจัยแนวความคิดหลักด้านรูปร่างได้แก่ (Zhao and Thorpe, 1999) ใช้เครือข่ายไปข้างหน้าสามชั้นหาภาพเกรเดียนตหนาแน่น (Intensity Gradient Image) แทนการใช้ภาพแบบธรรมดา (Gavrilu, 1999) ใช้การวิเคราะห์การแปลงระยะภาพด้วยฟังก์ชันเบสิก (Radial Basic Function) ซึ่งฝึกสอนด้วยกลุ่มภาพคนเดินถนน โดยจะใช้การวิเคราะห์รูปร่างเป็นวิธีการหลักในการตรวจจับและคัดแยกภาพคนเดินถนน (Cheng, Zheng and Qin, 2005) ใช้ตัวกรองกาบอร์ (Spare Gabor Filters) ร่วมกับเครื่องตรวจเวกเตอร์ในการคัดแยกภาพคนเดินถนน โดยระบบจะส่งค่าชุดตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละภาพทดสอบที่ได้จากตัวกรองกาบอร์ซึ่งผ่านการเรียนรู้และจดจำชุดภาพคนเดินถนนตัวอย่างมาแล้วให้เครื่องตรวจเวกเตอร์คัดแยกภาพคนเดินถนน

ในงานวิจัยนี้เสนอแนวทางวิธีการของตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมในการตรวจจับภาพคนเดินถนนว่าส่วนใดของภาพบริเวณถนนที่มีความน่าจะเป็นว่ามีภาพคนเดินถนนอยู่ และใช้เครื่องตรวจเวกเตอร์ในการรู้จำและคัดแยกภาพที่ผ่านการกรองว่าเป็นภาพคนเดินถนนหรือไม่

2. ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึม (Log-Gabor Filters)

ตัวกรองกาบอร์ เป็นเทคนิคการแปลงเวฟเลต (wavelet transform) รูปแบบหนึ่งซึ่งมีแบบจำลองการคำนวณที่พัฒนามาจากการทดลองทางด้านชีววิทยาและจิตวิทยาที่เกี่ยวข้องกับระบบการมองเห็นที่มีส่วนใกล้เคียงกับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ทฤษฎีดังกล่าวมาจากการพิจารณาว่าโดยพื้นฐานแล้วข้อมูลภาพสามารถพิจารณาได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง พิจารณาในเชิงเวลา (Spatial domain) มองภาพว่าเป็นที่รวมของพิกเซลต่าง ๆ แต่ละพิกเซลมีระยะห่างจากจุดเริ่มต้นแตกต่างกัน และ แบบที่สองพิจารณาในเชิงความถี่ (Frequency domain) มองภาพว่าเป็นผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่มีอยู่อย่างไรขอบเขตจำกัด โดยทำการพิจารณาภาพในเชิงเวลา และในระนาบความถี่เข้าด้วยกันเพื่อค้นหาดินแดนที่มีพื้นผิวแตกต่างกัน คล้ายคลึง หรือผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งสามารถกระทำได้โดยกลุ่มของแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Band-pass filter)

ทางเลือกหนึ่งของฟังก์ชันกาบอร์ คือ ฟังก์ชันกาบอร์แบบลอการิทึม ซึ่งคิดค้นโดย (Field, 1987) ได้เสนอว่า สำหรับภาพโดยทั่วไปแล้วเมื่อผ่านตัวกรองที่มีฟังก์ชันเกาส์เขียนบนแกนความถี่แบบลอการิทึม จะให้ผลการประมวลผลที่ดีกว่าการใช้ฟังก์ชันเกาส์เขียนแบบปกติซึ่งใช้แกนความถี่แบบเชิงเส้น ฟังก์ชันกาบอร์แบบลอการิทึมสามารถพิจารณาได้ตามสมการ(1)

$$G(w) = \exp(-\log(w/w_0)^2 / (2(\log(k/w_0))^2)) \dots\dots\dots (1)$$

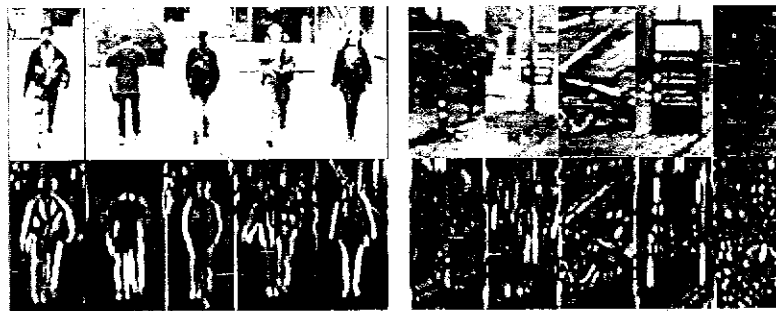
เมื่อ w_0 คือ ค่าความถี่ศูนย์กลางตัวกรอง

k/w_0 คือ อัตราส่วนที่ใช้ในการกำหนดค่า octave ของตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึม

เช่น ที่อัตราส่วน k/w_0 เท่ากับ 0.74 ,0.55 และ 0.41 จะให้ความกว้างแถบความถี่(bandwidth) ที่ตัวกรองประมาณ 1 ,2 และ 3 octave ตามลำดับ octave เป็นหน่วยที่ใช้วัดความถี่เชิงมุม 2 ค่าใดๆ โดย 1 octave จะเป็นสองเท่าหรือครึ่งหนึ่งของความถี่ที่พิจารณาอยู่

ลักษณะเด่นของตัวกรองชนิดนี้ คือ ฟังก์ชันกานอร์แบบลอการิทึมจะไม่ทำให้เกิด DC component และส่วนปลายของสัญญาณที่ได้จากฟังก์ชันจะแผ่ขยายไปที่ตำแหน่งความถี่สูง ทำให้ตัวกรองกานอร์แบบลอการิทึมความสามารถประมวลผลภาพทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ตัวกรองกานอร์แบบปกติที่มีฟังก์ชันแกussianบนแกนความถี่แบบเชิงเส้น

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวกรองกานอร์แบบลอการิทึมในขั้นตอนการตรวจจับภาพคนเดินถนน โดยใช้การปรับมาตราส่วนขนาดของตัวกรองทั้งหมด 4 ขนาดภายในการกำหนดการปรับทิศทางของตัวกรองให้แก่ของตัวกรองมีมุม 90 องศากับแนวระนาบ ซึ่งชุดตัวกรองนี้ได้จากการทดสอบกับภาพคนเดินถนนแล้วให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือภาพคนเดินถนนที่ได้จากการผ่านชุดตัวกรองนี้จะมีลักษณะเส้นเด่นชัดและเป็นรูปแบบที่ค่อนข้างชัดเจนมากกว่าภาพวัตถุอื่นที่ใช้ทดสอบ เช่น ภาพรถยนต์ ภาพต้นไม้ หรือภาพป้าย เนื่องจากลักษณะของคนเดินถนนส่วนใหญ่มีลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบ ดังนั้นภาพคนเดินถนนทั่วไปเป็นภาพในแนวตั้งซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ดีกับชุดตัวกรองที่ใช้

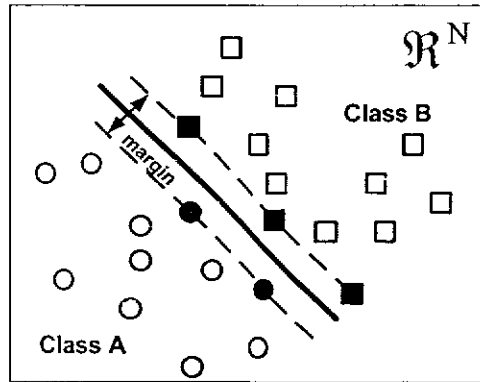


(ก) ภาพคนเดินถนน (ข) ภาพที่ไม่มีคนเดินถนน
รูปที่ 1 ภาพตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองกานอร์แบบลอการิทึม

ในการประมวลผลภาพจะนำชุดตัวกรองที่ได้ทำการคอนโวลูชัน (Convolution) กับภาพที่ผ่านการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) แล้ว ซึ่งเป็นการทำงานในโดเมนความถี่ จากนั้นนำภาพที่ได้ไปแปลงฟูเรียร์กลับเพื่อให้ข้อมูลภาพกลับมาอยู่ในโดเมนเวลา และคำนวณผลรวมของค่าสัมบูรณ์ส่วนจินตภาพของภาพที่ได้จากชุดตัวกรองทั้งหมด เมื่อนำภาพบริเวณถนนผ่านตัวกรองจะได้ภาพใหม่ที่มีลักษณะเป็นภาพคล้ายกลุ่มเส้นสีขาวในแนวตั้งบนพื้นสีดำดังรูปที่ 1 ซึ่งให้ผลตอบสนองที่ดีต่อภาพวัตถุในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบและวัตถุที่มีสีแตกต่างจากสีของพื้นหลังชัดเจน จากนั้นจะนำภาพที่ได้ไปประมวลผลในระบบคัดแยกภาพคนเดินถนนในลำดับต่อไป

3. เครื่องมือตรวจเวกเตอร์ (Support Vector Machine)

พื้นฐานของเครื่องตรวจเวกเตอร์คือการออกแบบให้เป็นเครื่องมือที่สามารถแยกกลุ่มชุดข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม โดยสามารถใช้งานได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น เครื่องตรวจเวกเตอร์มีขั้นตอนวิธีในการหาระนาบเกิน (hyperplane) เพื่อใช้แยกจุดข้อมูลที่อยู่กลุ่มเดียวกันให้อยู่ฝั่งเดียวกันโดยที่ไม่มีระยะห่างระหว่างข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มกับระนาบเกินมีค่ามากที่สุด ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เส้นแบ่งกลุ่มระนาบเกินระหว่างข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มแบบเชิงเส้น

สมมติให้มีข้อมูล L ชุดจากทั้งสองกลุ่ม ได้แก่

$$(x_1, y_1)(x_2, y_2) \dots (x_L, y_L) \text{ เมื่อ } x_L \in R^N, y \in (-1, +1) \dots \dots \dots (2)$$

และในการหาระนาบเกินใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของสมการดังต่อไปนี้

$$f(x) = \sum_{i=1}^N y_i \alpha_i k(x, x_i) + b \dots \dots \dots (3)$$

เมื่อ N คือ จำนวนชุดของข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน

(x_i, y_i) คือ ชุดข้อมูลที่ i

α_i และ b คือ ค่าน้ำหนักการเรียนรู้

$k(\dots)$ คือ ฟังก์ชันกึ่งหลัก (kernel function)

ระบบการคัดแยกภาพคนเดินถนนในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องตรวจเวกเตอร์เป็นเครื่องมือในการรู้จำและคัดแยกภาพคนเดินถนน โดยฝึกสอนภาพคนเดินถนนจำนวน 300 ภาพ และภาพที่ไม่มีคนเดินถนนจำนวน 300 ภาพ โดยแต่ละภาพจะมีขนาด 64×32 จุดภาพ หลังจากการฝึกสอนได้เวกเตอร์ใกล้เส้นระนาบเกิน(Support Vector)จำนวนทั้งหมด 152 เวกเตอร์ โดยเลือกใช้ฟังก์ชันกึ่งหลักของเครื่องตรวจเวกเตอร์เป็นแบบฟังก์ชันเรดิคัลเบสิก(Radial Basic Function) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$k(x, y) = \exp(-\|x - y\|^2 / (2\sigma^2)) \dots \dots \dots (4)$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่ที่กำหนดขนาดความกว้างของฟังก์ชัน

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องตรวจเวกเตอร์ในการรู้จำและคัดแยกภาพคนเดินถนนที่ไม่ได้ฝึกสอนจำนวน 300 ภาพ พบว่า ระบบสามารถคัดแยกได้ถูกต้องจำนวน 272 ภาพ คิดเป็นอัตราการคัดแยกภาพคนเดินถนนถูกต้อง 90.67 เปอร์เซ็นต์ และทดสอบภาพที่ไม่มีคนเดินถนนจำนวน 300 ภาพ พบว่า ระบบสามารถคัดแยกได้ถูกต้องจำนวน 279 ภาพ คิดเป็นอัตราการคัดแยกภาพที่ไม่มีคนเดินถนนถูกต้อง 93.00 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1

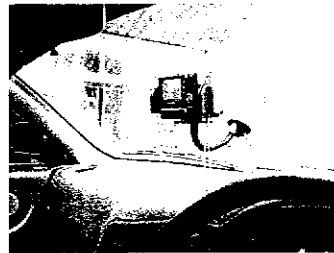
ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์การคัดแยกภาพคนเดินถนนที่ไม่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้เครื่องตรวจเวกเตอร์

ประเภทของภาพที่ใช้ทดสอบ	จำนวนภาพที่คัดแยกได้ ถูกต้อง	อัตราการคัดแยกภาพ ถูกต้อง
1. ภาพคนเดินถนน	272	90.67%
2. ภาพที่ไม่มีคนเดินถนน	279	93.00 %

สำหรับภาพคนเดินถนนและภาพที่ไม่มีคนเดินถนนที่ใช้ในการฝึกสอน เครื่องตรวจเวกเตอร์สามารถคัดแยกได้ถูกต้อง 100% จะเห็นได้ว่าเครื่องตรวจเวกเตอร์สามารถในการรู้จำและคัดแยกภาพคนเดินถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

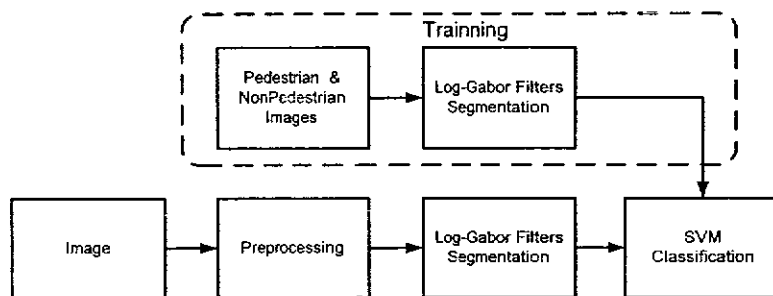
4. การตรวจจับและคัดแยกคนเดินถนน

ในการคัดแยกภาพคนเดินถนนระบบจะใช้ชุดภาพบริเวณถนนที่ต่างๆทดสอบ แต่ละภาพจะมีขนาด 320x240 จุดภาพ ซึ่งได้จากการสกัดภาพนิ่งจากข้อมูลภาพเคลื่อนไหวโดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลติดตั้งภายในรถยนต์บริเวณกลางกระจกหน้าในระยะสูงจากพื้นดินประมาณ 1.1 เมตรตั้งรูปที่ 3 โดยให้ตัวกล้องขนานกับพื้นดิน โดยกล้องบันทึกข้อมูลภาพเคลื่อนไหวด้วยความเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที ในเวลากลางวัน บริเวณถนนเส้นหลักภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งติดตั้งกล้องดิจิทัลภายในรถยนต์

การทำงานของระบบแบ่งเป็นสองส่วนหลัก คือการตรวจจับและการคัดแยกภาพคนเดินถนน ในขั้นตอนการตรวจจับนั้นเริ่มจากการนำภาพบริเวณถนนส่งเข้าสู่กระบวนการเตรียมภาพ (Preprocessing) ซึ่งจะแปลงภาพให้อยู่ในระดับสีเทา 256 ระดับและทำการปรับสมดุลฮิสโทแกรม (Histogram Equalization) ให้มีความแตกต่างระหว่างความสว่างและความมืดของภาพมากขึ้น ทำให้สามารถแยกวัตถุออกจากภาพพื้นหลังได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4 โครงสร้างของระบบการคัดแยกภาพคนเดินถนน

ขนาดภาพคนเดินถนนโดยทั่วไปจะมีขนาดที่หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามขนาดของภาพคนเดินถนนจะมีความสัมพันธ์กับระยะห่างจากคนเดินถนนถึงกล้องและเป็นอัตราส่วนที่ค่อนข้างคงที่เนื่องจากการติดตั้งกล้องที่ระยะสูงจากพื้นดินคงที่ในแนวนานกับพื้นดิน และการกำหนดให้คนเดินถนนทั่วไปมีความสูงมาตรฐานเฉลี่ยที่ 160 เซนติเมตรและความกว้างมาตรฐานของลำตัวด้านหน้าเฉลี่ยที่ 70 เซนติเมตร จากนั้นนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการตรวจจับภาพคนเดินถนน โดยใช้การตัดภาพตามตำแหน่งของจุดภาพต่าง ๆ ภายในภาพบริเวณถนนที่ผ่านตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมแล้วให้มีขนาดของภาพสัมพันธ์กับชุดข้อมูล จากนั้นปรับขนาดของภาพที่ได้จากการตัดภาพแต่ละภาพให้มีขนาดเท่ากันที่ 64x32 จุดภาพ และคำนวณค่าความหนาแน่นของภาพในแต่ละภาพว่ามีค่ามากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) ความหนาแน่นของภาพที่ได้ตั้งไว้หรือไม่ สำหรับภาพที่มีค่าความหนาแน่นของภาพมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ความหนาแน่นของภาพแสดงว่าเป็นภาพที่มีความน่าจะเป็นว่ามีภาพคนเดินถนนอยู่ในภาพนั้นและถูกส่งต่อไปให้ระบบจัดแยกภาพคนเดินถนนซึ่งใช้เครื่องตรวจเวกเตอร์ที่ผ่านการฝึกสอนด้วยกลุ่มภาพคนเดินถนนและกลุ่มภาพที่ไม่มีภาพคนเดินถนนแล้ว เครื่องตรวจเวกเตอร์จะสามารถคัดแยกภาพที่เข้ามาได้ว่าเป็นภาพคนเดินถนนหรือไม่

ด้วยการทดสอบชุดภาพบริเวณถนนห่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีพบว่า ระบบสามารถตรวจจับภาพคนเดินถนนและสามารถคัดแยกได้ว่าในภาพบริเวณถนนต่าง ๆ มีภาพคนเดินถนนอยู่หรือไม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถระบุตำแหน่งของภาพคนเดินถนนได้อย่างถูกต้อง โดยเฉพาะในภาพบริเวณถนนที่มีภาพคนเดินถนนที่สวมใส่เสื้อผ้าที่มีสีแตกต่างกับสีของภาพพื้นหลังชัดเจน และมีลักษณะท่าทางยืนหรือเดินในท่าปกติ รวมถึงมีภาพพื้นหลังไม่ซับซ้อนมากนัก สำหรับภาพคนเดินถนนที่มีพื้นหลังซับซ้อนปานกลางถึงซับซ้อนมาก ภาพคนเดินถนนมีรูปร่างหลากหลาย เช่น แยกล้มการะ รวมถึงมีวัตถุอื่นรวมอยู่ในภาพบริเวณถนนด้วย เช่น รถยนต์ หรือ ป้ายสัญญาณจราจร ระบบยังสามารถคัดแยกได้ว่าในภาพบริเวณถนนมีภาพคนเดินถนนอยู่หรือไม่ได้ แต่การระบุตำแหน่งและขนาดของภาพคนเดินถนนในภาพบริเวณถนนจะมีความคลาดเคลื่อนบ้างขึ้นอยู่กับรายละเอียดของแต่ละภาพ สำหรับภาพบริเวณถนนที่ไม่มีคนเดินถนนอยู่ในภาพแต่มีวัตถุอื่นที่มีลักษณะภาพซับซ้อนภายในภาพ เช่น ภาพต้นไม้ ภาพรถยนต์ พบว่าระบบสามารถแยกแยะได้ว่าในภาพบริเวณถนนนั้นไม่มีภาพคนเดินถนนอยู่ด้วย

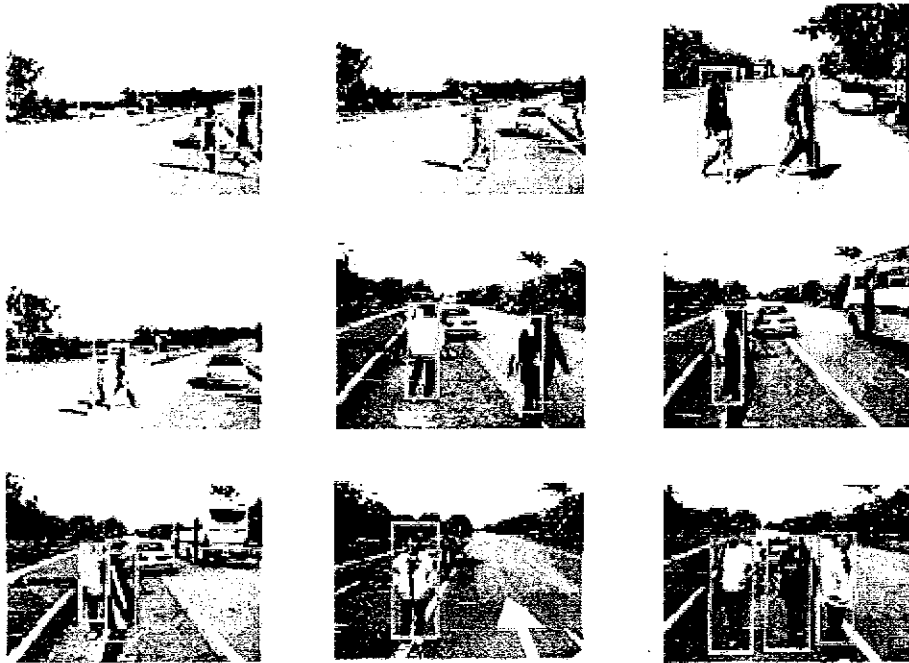
5. สรุป

จากผลการทดสอบระบบการใช้ตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมและเครื่องตรวจเวกเตอร์ในการคัดแยกภาพคนเดินถนน พบว่าตัวกรองกาบอร์แบบลอการิทึมสามารถกรองภาพบริเวณถนนให้ข้อมูลภาพคนเดินถนนมีความชัดเจนขึ้น และเครื่องตรวจเวกเตอร์ที่ผ่านการฝึกสอนด้วยข้อมูลที่เพียงพอสามารถคัดแยกภาพคนเดินถนนที่ผ่านการกรองแล้วได้อย่างถูกต้อง เห็นได้ว่าเป็นระบบมีประสิทธิภาพในการคัดแยกภาพคนเดินถนนที่มีชุดแต่งกาย ขนาด รูปร่าง และท่าทางแตกต่างกันได้ อย่างไรก็ตามระบบคัดแยกภาพคนเดินถนนนี้ ยังมีข้อจำกัดในการคัดแยกภาพคนเดินถนนที่มีชุดแต่งกายที่มีสีคล้ายคลึงกับกับสีถนนหรือสีพื้นหลังและวัตถุอื่นในภาพที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายคลึงกับภาพคนเดินถนน นอกจากนี้แล้วระบบที่สามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย จำเป็นต้องมีข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนที่หลากหลาย และมีจำนวนเพียงพอที่จะใช้แทนกลุ่มข้อมูลได้ทุกกลุ่ม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Zhao and C. Thorpe, "Stereo and neural network based pedestrian detection", *IEEE Trans. Int. Transp. Sys.*, 1(3), pp. 148-154, 1999.
- [2] D. M. Gavrilu, "The visual analysis of human movement: a survey", *Comp. Vis. Image Underst.*, vol. 73(1), pp. 82-98, 1999.

- [3] H. Cheng, N. Zheng and J. Qin, "Pedestrian detection using sparse gabor filter and support vector machine", *IEEE Trans. Int. Transp. Sys.*, 2(13), pp. 583-587, 2005.
- [4] D. J. Field, "Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells", *Journal of The Optical Society of America A*, 4(12):2379-2394, 1987.



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบการตัดแยกภาพคนเดินถนนจากระบบ

การพัฒนากระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค
โดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์
Process Development of Microstructure Production
Using X-Ray Lithography.

วินัย วันบุรี และ อ.ดร.นิมิต ชมนาวัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111, ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4400 โทรสาร 0-4422-4601 Email: electrical.sut@gmail.com, sut.mems@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการพัฒนากระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Lithography) โดยการนำรังสีเอ็กซ์จาก Beamline 6 ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ มาใช้ในกระบวนการ และทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมกับการฉายรังสีเอ็กซ์ ให้สามารถใช้เป็นกระบวนการพื้นฐานภายในศูนย์วิจัยได้ และทำการพัฒนาหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ (X-ray mask) โดยใช้เงินเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอ็กซ์ แทนทองคำที่ใช้กันในปัจจุบัน เพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต และสารไวแสงในกระบวนการใช้สารไวแสง SU-8 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ โดยสามารถควบคุมความหนาของสารไวแสงตามต้องการในระดับหนึ่ง จนสามารถใช้หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่พัฒนาขึ้นร่วมกับการใช้สารไวแสง SU-8 เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในกระบวนการและสามารถนำกระบวนการที่พัฒนาขึ้นไปสร้างอุปกรณ์ในระดับจุลภาคต่างๆได้

คำสำคัญ : หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์, สารไวแสง SU-8, กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์, อุปกรณ์จุลภาค

Abstract

This article presents a newly developed x-ray lithography for microstructure production. An x-ray source from beamline 6 at National Synchrotron Research Center (NSRC) of Thailand was input of process. Parameters for x-ray lithography were developed to fundamental process at NSRC. Since silver electroplating bath solution cost about three-times lower than gold electroplating bath solution. Substituting gold absorber with silver for fabricating x-ray mask are presented. SU-8 resist was used as standard photoresist in process and showing spin coating conditions to achieve the desired film thickness.

Keywords: X-ray mask, SU-8 photoresist, x-ray lithography, micro devices

1. คำนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์ระดับจุลภาคเข้ามามีบทบาทกับการพัฒนาเทคโนโลยีมากขึ้น นักวิจัยที่สังเกตเห็นประโยชน์ของการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีขนาดเล็ก ได้มีการคิดค้นกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ระดับจุลภาคขึ้น หรือเรียกว่าระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-

Mechanical Systems: MEMS) ซึ่งเป็นการสร้างเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กถึงระดับไมโครเมตร โดยที่ยังสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ในลักษณะเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า และในกระบวนการสร้างนั้น ใช้เทคโนโลยีที่พัฒนามาจาก เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuits: IC) โดยระบบจะประกอบไปด้วยระบบจักรกลในการขับเคลื่อนการทำงาน และส่วนของระบบไฟฟ้าต้นกำลังในกรณีระบบขับเคลื่อนหรือส่วนของไฟฟ้าตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในกรณีเป็นระบบเซนเซอร์ ซึ่งทั้งส่วนจักรกลและส่วนของไฟฟ้าจะทำงานร่วมกัน ในการสร้างระบบดังกล่าว เรียกว่าเป็นกระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (Microfabrication) และในปัจจุบัน ความต้องการในการผลิตอุปกรณ์ขนาดเล็กได้เพิ่มมากขึ้น และมีผู้คิดค้นกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพ ประสิทธิภาพสูงและต้นทุนการผลิตที่ลดลง ดังนั้นกระบวนการผลิตแบบใหม่จึงได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ขึ้น ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตโครงสร้างจุลภาคที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของโครงสร้างมากๆ ได้ (High aspect ratio) โดยได้นำเสนอการพัฒนาจากเริ่มต้นจนถึงขั้นสุดท้าย กระบวนการ ซึ่งกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปสร้างอุปกรณ์ระดับจุลภาคต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. กระบวนการลิโธกราฟี

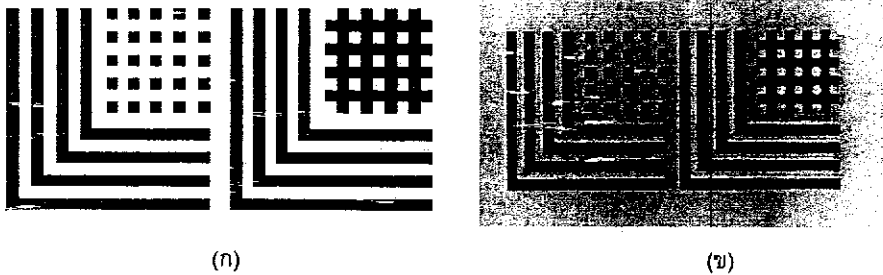
ความหมายของลิโธกราฟี (Lithography) นั้น หมายถึงการใช้กระบวนการทางเคมีในการถอดแบบลวดลายจากลวดลายต้นแบบที่เป็นลายเส้นที่บดแสงลงบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งอาจเป็นการสร้างลวดลายลงบนกระดาษหรือวัสดุอื่นๆ โดยวัสดุดังกล่าวต้องมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ ในการถอดแบบนี้จะใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เรียกว่าสารดังกล่าวว่า สารไวแสง (Photoresist) สารไวแสงสามารถจำแนกออกได้เป็นสองชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive tone photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative tone photoresist) ซึ่งสารไวแสงทั้งสองชนิดนั้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของสารเปลี่ยนไป ในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยสารไวแสงชนิดบวกนั้น บริเวณที่มีแสงมาตกกระทบจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาเดเวลอปเปอร์ (Developer) เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น ส่วนสารไวแสงชนิดลบนั้น บริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาเดเวลอปเปอร์ (Developer) เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น โดยแสงที่ใช้ในการฉายลงบนสารไวแสงนั้น จะอยู่ในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet: UV) ซึ่งจากคุณสมบัติของสารทั้งสองชนิด เมื่อต้องการถอดแบบลวดลายจึงสามารถทำลวดลายที่แตกต่างกันได้สองลักษณะ ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของสารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการนั้นใช้สารไวแสง SU-8 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ และสารไวแสงจะอยู่ในรูปของเหลว ทำการเคลือบลงบนแผ่นฐาน (Substrate) ด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin coat) ซึ่งสามารถกำหนดความหนาของสารไวแสงได้ด้วยการกำหนดความเร็วในการหมุนเคลือบนั่นเอง

2.1 หน้ากากกันแสงในกระบวนการลิโธกราฟี

ส่วนหนึ่งที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการลิโธกราฟีคือ หน้ากากกันแสง (Mask) ซึ่งในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงนั้น หน้ากากกันแสงจะเป็นกระจกหรือแผ่นใสที่แสงสามารถทะลุผ่านได้ดี และมีลวดลายที่ต้องการเป็นหมึกที่บดแสงเพื่อกำหนดลวดลายลงบนสารไวแสงด้วยเงาหรือแสงที่ตกกระทบขึ้นงานหลังผ่านหน้ากากกันแสงนั่นเอง

ในการออกแบบลวดลายของหน้ากากกันแสง หรือการออกแบบลวดลายอุปกรณ์ที่ต้องการ นั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LASI เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการออกแบบลวดลายจุลภาคสูง และถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบลวดลายซึ่งเป็นลักษณะแท่งทดสอบ เมื่อทำการออกแบบเรียบร้อยแล้วสร้างเป็นหน้ากากกันแสงจะได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หน้ากากกันแสงรูปลวดลายทดสอบ (ก) ลวดลายที่ออกแบบในโปรแกรม LASI
(ข) หน้ากากกันแสงที่เป็นหมึกค่าที่บแสงบนแผ่นใส

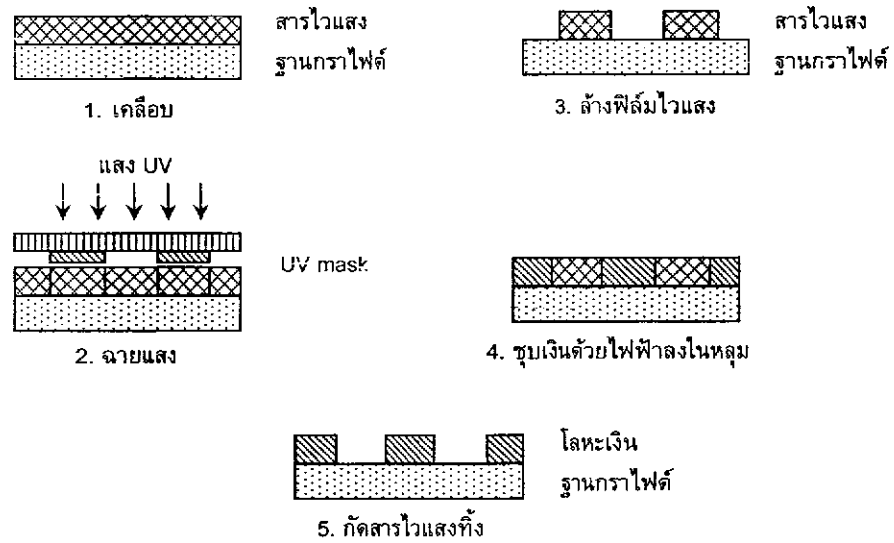
3. กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray lithography) นั้น เป็นกระบวนการในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการลิโธกราฟีทั่วไป แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดแสงในกระบวนการนั้น จะใช้รังสีเอ็กซ์แทนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งจะทำให้สามารถฉายลงบนสารไวแสงที่มีความหนาหลายร้อยไมโครเมตรได้ ในขณะที่การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตนั้น ความหนาของสารไวแสงที่สามารถฉายแล้วได้ลวดลายที่ดีนั้น ถูกจำกัดอยู่ที่มากที่สุดประมาณ 200 ไมโครเมตร

3.1 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟี

หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ (X-ray mask) จะทำหน้าที่ในลักษณะเดียวกันกับหน้ากากกันแสงในกรณีของกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสง แต่ฐานรองนั้นจะทำจากวัสดุที่มีความโปร่งรังสีเอ็กซ์สูงและบริเวณที่เป็นลวดลายจะใช้วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับรังสีเอ็กซ์ได้ดี โดยทั่วไปแล้วใช้ทองคำเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอ็กซ์แทนทองคำ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนในกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ได้มากกว่าสองเท่าเมื่อเทียบกับการใช้ทองคำ ซึ่งคุณสมบัติของเงินนั้น ก็เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่สามารถดูดซับรังสีเอ็กซ์ได้ดี อีกทั้งสามารถขึ้นรูปเป็นลวดลายโดยกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าได้ และแผ่นฐานรองนั้นเลือกใช้แผ่นกราไฟต์บางความหนา 150 ไมโครเมตร เนื่องจากมีคุณสมบัติโปร่งรังสีเอ็กซ์ได้ดี ทั้งยังนำไฟฟ้าเหมาะกับการนำไฟชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

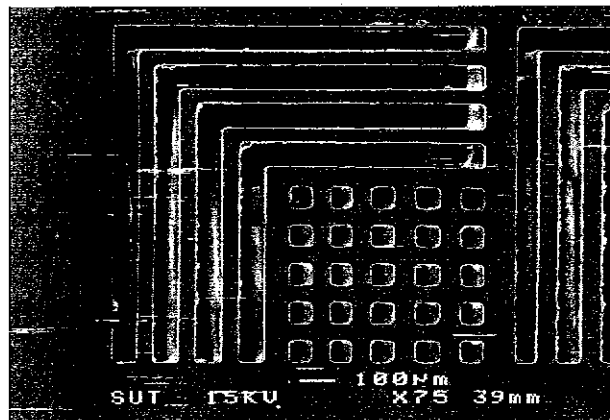
การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์นั้น จะสร้างโดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV lithography) ซึ่งจะนำหน้ากากกันแสงในรูปที่ 1 มาเป็นหน้ากากในกระบวนการสร้าง และใช้สารไวแสง SU-8 ความหนา 20 ไมโครเมตร ในการสร้างลวดลาย ก่อนทำการชุบเงินด้วยไฟฟ้าลงไปในลวดลายที่สร้างขึ้น โดยลำดับกระบวนการสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลำดับขั้นการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ และการชุบเงินด้วยไฟฟ้าลงในลวดลาย

3.2 การสร้างแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

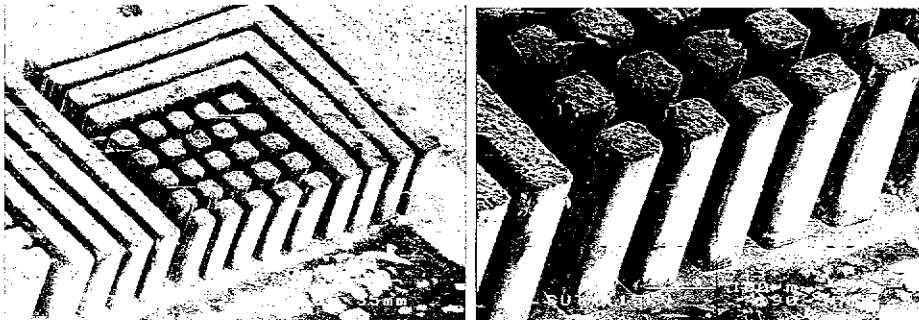
เมื่อทำการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว กระบวนการสร้างแม่พิมพ์หรือสร้างอุปกรณ์จุลภาคโดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น ลำดับขั้นของกระบวนการจะเป็นลักษณะเดียวกันกับลำดับขั้นการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ หากแต่แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ นั้น จะใช้รังสีเอ็กซ์แทนรังสีอัลตราไวโอเล็ต และส่วนของหน้ากากกันแสงก็ใช้หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่สร้างขึ้นนั่นเอง เมื่อสิ้นสุดกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเปรียบได้กับกระบวนการลำดับที่ 3 ในรูปที่ 2 จะได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งความสูงของสารไวแสงประมาณ 500 ไมโครเมตร อยู่บนฐานสแตนเลส



รูปที่ 3 แม่พิมพ์ชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

3.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนแม่พิมพ์ชิ้นงาน

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์แล้ว ในอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้สารไวแสงเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์นั้น ก็จะเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชิ้นงาน แต่ในอุปกรณ์บางชนิดที่ต้องการโลหะเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์นั้น จำเป็นต้องอาศัยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ลงไปในแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้สาธิตการชุบนิคเกิลลงไปในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้โลหะนิคเกิลเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ ซึ่งเมื่อทำการชุบนิคเกิลลงไปจนเต็มและกัดสารไวแสงทิ้งแล้ว จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นโครงสร้างของโลหะนิคเกิล สูงประมาณ 500 ไมโครเมตร



รูปที่ 4 โครงสร้างนิคเกิลที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนแม่พิมพ์
ที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

4. สรุป

กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ทำการพัฒนานั้น ณ Beamline 6 ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนนั้น ถือว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างอุปกรณ์จุลภาค ทั้งยังสามารถลดต้นทุนของกระบวนการลงได้โดยการใช้เงินเป็นวัสดุชุบรังสีเอ็กซ์แทนทองคำ การพัฒนากระบวนการดังกล่าวยังคงทำการหาข้อบกพร่องและแก้ไขให้ได้กระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างโครงสร้างจุลภาคต่างๆ และในการทดสอบสร้างโครงสร้างจุลภาคหลายชนิด พบว่าสามารถใช้กระบวนการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

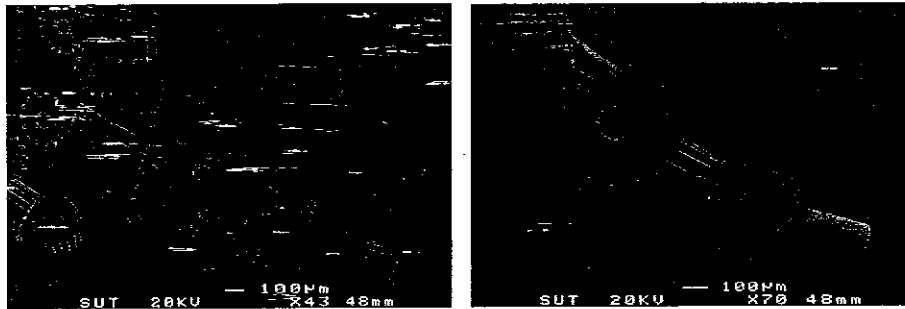
5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J A Cairms, M R Davidson, G J Berry, A G Fitzgerald, and J Thomson, "A New Approach to the Production of High Resolution X-ray Masks", Cental Laser Facility Annual Report 2001/2002 : 145-146.
- [2] Linke Jian, Bernd Loechele, Heinz-Ulrich Scheunemann, Martin Bednarzik, Yohannes M. Desta, and Jost Goettert, "Fabrication of Ultra Thick, Ultra High Aspect Ratio Microcomponents by Deep and Ultra Deep X-ray Lithography", MEMS, NANO and Smart Systems:10-14, 2003.
- [3] Linke Jian, Yohannes M. Destaa, Jost Goetterta, Martin Bednarzikb, Bernd Loecheleb, Jin Yoonyounga, Georg Aigeldingera, Varshni Singha, Gisela Ahrens, Gabi Gruetzner, Ralf Ruhmann, and Reinhard Degend "SU-8 based deep x-ray lithography/LIGA", Micromachining and Microfabrication Process Technology VIII, Vol. 4979 : 394-401, 2003.

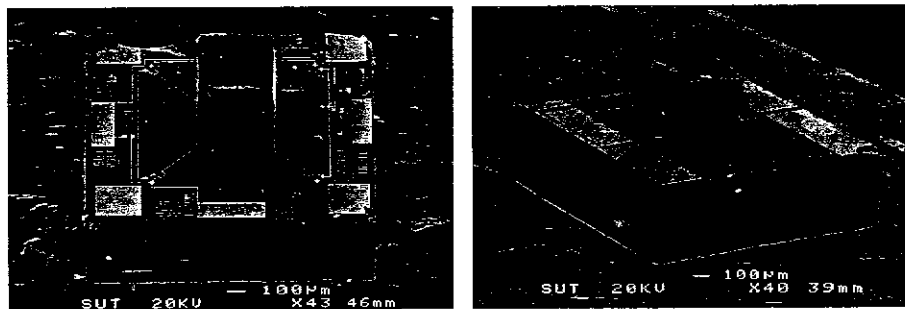
- [4] S. Cabrini, F. Pe'renne's, B. Marmioli, A. Olivo, A. Carpentiero, R. Kumar, P. Candeloro, and E.Di. Fabrizio, "Low cost transparent SU-8 membrane mask for deep X-ray lithography",
Microsystem Technologies 11 : 370-373, 2005.

ภาคผนวก

ตัวอย่างชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พัฒนาขึ้น



ชิ้นส่วนเฟืองจุลภาค



การสร้างก้อนมวลบนตัวตรวจวัดความเร่งจุลภาค



ตราสัญลักษณ์ฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี ลายเส้นจุลภาค

**การออกแบบและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้ว
ที่มีพิกัดกระแส 20 แอมแปร์ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม
Winding Design and Implementation of a Sextupole Magnet
with Current Rating of 20 Amperes for the Siam Photon Source**

ศุภชัย ประวันตา¹, ศุภกร รักใหม่², น.ท.สรวุฒิ สุจิตจร³

^{1,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

บทความนี้ ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้ว ที่มีประโยชน์ต่อการแก้ไขโครมาติซิตีของเครื่องกำเนิดแสงสยามระดับพลังงานอิเล็กตรอน 1.2 GeV โดยการออกแบบและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้วให้สามารถรับพิกัดกระแส 20 แอมแปร์ วิธีการออกแบบอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปต่างๆ ในการคำนวณ ได้แก่ โปรแกรม POISSON จำลองผลสนามแม่เหล็กในสองมิติ โปรแกรม RADIA จำลองผลสนามแม่เหล็กในสามมิติ โปรแกรม COSMOSWorksTM จำลองผลความร้อนของขดลวดแม่เหล็ก โปรแกรม Accelerator Toolbox จำลองผลโครมาติซิตีของเครื่องกำเนิดแสงสยาม มีการเปรียบเทียบผลคำนวณกับผลทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม และกับผลทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่

คำสำคัญ : แม่เหล็กหกขั้ว, โครมาติซิตี, เครื่องกำเนิดแสงสยาม

Abstract

This article presents the improvement of sextupole magnet properties for the chromaticity correction of Siam Photon Source 1.2 GeV. The approach is to design and implement a new winding for the sextupole magnet to absorb 20 A - current rating. Our calculation utilizes various software packages, i.e. POISSON 2D, RADIA 3D, COSMOSWorksTM, and Accelerator Toolbox, to simulate 2D and 3D magnetic field, heat distribution, and chromaticity, respectively. The simulation results are compared with the measured results for both the existing magnet and that with a new winding.

Keywords : sextupole magnet, chromaticity, Siam Photon Source

