# การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเพื่อระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนระบบไฟฟ้าเหนือดินและใต้ดิน

# AN APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM AND SUPPORT VECTOR MACHINES ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FAULT TYPES ON OVERHEAD AND UNDERGROUND ELECTRICAL POWER SYSTEM

**กษิภัท คุณาดำรงรัฐ**

KASIPAT KUNADUMRONGRATH


**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ. 2555**


KMITL-2012-EN-M-020-152



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AN APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM AND SUPPORT VECTOR MACHINES ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FAULT TYPES ON OVERHEAD AND UNDERGROUND ELECTRICAL POWER SYSTEM

KASIPAT KUNADUMRONGRATH

THE THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL-2012-EN-M-020-152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเพื่อการแบ่งชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนระบบไฟฟ้าเหนือดินและใต้ดิน

**Thesis Title** An Application of Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Classification of Fault Types on Overhead and Underground Electrical Power System

**นักศึกษา** นายกษิภัท คุณาดำรงรัฐ
**รหัสประจำตัว** 53610543
**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผศ.ดร.อรรถพล เจ่าพิทักษ์กุล
**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2012-EN-M-020-152

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|---|---|---|
| รศ.ดร.อานันทวัฒน์ | คุณากร | |
| ผศ.ดร.เชาว์ | ชมภูอินไหว | |
| ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ | จิระเดชะ | |
| รศ.ศิริวัฒน์ | โพธิเวชกุล | |
| ผศ.ดร.อรรถพล | เจ่าพิทักษ์กุล | |

**วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ** วันศุกร์ที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00-15.00 น.
**สถานที่สอบ** ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว**

**(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)**

**คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**วันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2555**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเพื่อระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนระบบไฟฟ้าเหนือดินและใต้ดิน |
| **นักศึกษา** | นาย กษิภัท คุณาดำรงรัฐ |
| **รหัสประจำตัว** | 53610543 |
| **ปริญญา** | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| **พ.ศ.** | 2555 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** | ผศ.ดร. อรรถพล เจ่าพิทักษ์กุล |

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอกระบวนการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั้งแบบเหนือดินและใต้ดินโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในการตรวจจับความผิดพร่องร่วมกับการประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การแปลงสัญญาณความผิดพร่องซึ่งมีองค์ประกอบความถี่สูงอยู่ในสัญญาณให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่ที่ลำดับต่างๆ โดยจะใช้สัญญาณกระแสลำดับบวกไปทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะตรวจจับความผิดพร่องได้จากความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวก, ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสในแต่ละเฟส และกระแสลำดับศูนย์ ณ เวลาที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะถูกใช้เป็นอินพุทให้กับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนในการระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นออกมาได้ทั้งหมดสิบชนิด วิทยานิพนธ์นี้ได้นำข้อมูลจากระบบไฟฟ้าของประเทศไทยทั้งระบบสายส่งแบบเหนือดินและใต้ดินมาใช้ในการทดลองเรียนรู้เพื่อพัฒนาหาอัลกอลิทึมที่ดีกว่าเดิม ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ถูกพัฒนาเพื่อเปรียบเทียบกับอัลกอลิทึมเดิมที่มีการพัฒนามาก่อนหน้านี้ เช่น การระบุชนิดความผิดพร่องโดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต หรือ อัลกอลิทึมทฤษฎีโครงข่างประสาทเทียมแบบแพร่กลับ ทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่นำเสนอให้ค่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องได้ถูกต้องแม่นยำกว่าและจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาแผนระบบป้องกันสมัยใหม่กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | An Application of Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Classification of Fault Types on Overhead and Underground Electrical Power System |
| **Student** | Mr. Kasipat Kunadumrongrath |
| **Student ID.** | 53610543 |
| **Degree** | Master of Engineering |
| **Program** | Electrical Engineering |
| **Year** | 2012 |
| **Thesis Advisor** | Asst. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul |


# ABSTRACT

This thesis proposes a new technique using discrete wavelet transform (DWT) and support vector machines (SVM) to classify the fault types on overhead and underground transmission systems. The DWT is used to detect the high frequency components from fault signals. Positive sequence current signals are used in fault detection decision algorithm. The variations of first scale high frequency component are used as inputs for the SVM. The outputs of SVM are ten types of faults. Thailand electricity overhead and underground transmission systems have been investigated so that the algorithm can be verified. SVM method is also compared with the coefficients of DWT technique as well as back-propagation neural network algorithms. The proposed method yields satisfactory accuracy, and will be very useful in the development of a modern protection scheme for electrical power transmission and distribution systems.




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก ผศ.ดร. อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆพี่ๆนักศึกษาในห้องปฏิบัติการทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆที่มอบแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณมยุรี จันฑรัตโน และคุณกุณฑล เอนกทรัพย์ สำหรับการสนับสนุนและความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆที่มอบแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณณิชานันท์ อิทธิเบญจพงศ์, ทีมซิสเต็มอินทิเกรชันแอนด์เทสต์ และพี่ๆน้องๆในห้องปฏิบัติการบริษัทบอมบาดิเอร์ทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือ, การสนับสนุนและคำแนะนำในเรื่องต่างๆที่มอบแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบเท้าขอบพระคุณ คุณพ่อทวี แซ่ลี้ คุณแม่ภรธนา คุณาดำรงรัฐ ผู้เป็นพรหมของลูกที่ให้กำเนิดชีวิต มอบ อดีต ปัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย ตลอดชีวิตที่ผ่านมาท่านทั้งสอง อบรมสั่งสอน สรรพวิชา แนะนำ สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคอันยากลำบากต่างๆในชีวิต รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กษิภัท คุณาดำรงรัฐ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย.....I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญตาราง.....VII
สารบัญรูป.....VIII
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 แนวโน้มการพัฒนาในงานวิจัยที่ผ่านมา.....1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา.....7
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....7
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....8
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....9
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....9

บทที่ 2 การวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องบนสายส่ง.....11
2.1 เครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอล.....11
2.1.1 หลักการทำงาน.....10
2.2 การแปลงเวฟเล็ต.....14
2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform: WT).....14
2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT).....17
2.2.3 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet).....18
2.3 ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....21
2.3.1 การแบ่งข้อมูลเชิงเส้น (linear classification).....22
2.3.2 การเรียนรู้บนปริภูมิมิติสูง (Feature space).....27
2.3.3 ทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....31
2.3.4 ผลกระทบของพารามิเตอร์ของเคอร์เนลกับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....35
2.3.5 การเลือกตัวแปรในการเรียนรู้ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....38




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


บทที่ 3 การจำลองความผิดพร่อง .....40
3.1 การจำลองความผิดพร่องของระบบส่งไฟฟ้าเหนือดิน.....40
3.1.1 โครงสร้างของสายส่ง 500 kV.....40
3.1.2 แบบจำลองสายส่ง.....41
3.1.3 ระบบการจำลอง.....43
3.1.3.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณความผิดพร่อง.....43
3.1.3.2 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์.....43
3.2 การจำลองความผิดพร่องของระบบส่งไฟฟ้าใต้พื้นดิน.....47
3.2.1 การจำลองระบบเคเบิล.....47
3.3 พฤติกรรมของความผิดพร่องในระบบส่งกำลังไฟฟ้า.....50
3.3.1 พฤติกรรมของรูปสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นตามประเภทของความผิดพร่อง.....52
3.3.2 พฤติกรรมของรูปสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง.....56
3.3.3 พฤติกรรมของรูปสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นตามมุมที่เกิดความผิดพร่อง.....63

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต.....65
4.1 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตสำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่ง.....66
4.2 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ต.....70
4.2.1 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องชนิดต่างๆ.....70
4.2.2 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องตำแหน่งต่างๆ...74
4.2.3 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องที่มุมต่างๆ.....88
4.3 การตรวจจับความผิดพร่อง (Fault detection).....90
4.3.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภทของความผิดพร่อง.....91
4.3.2 กระบวนการตรวจจับความผิดพร่องในระบบทดลองสายส่ง.....91

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....94
5.1 โครงสร้างกระบวนการระบุชนิดความผิดพร่อง.....94
5.2 การระบุประเภทของฟอลต์โดยซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....96
5.2.1 กระบวนการเตรียมข้อมูล.....96




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1.1 การจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถคำนวณได้อย่างชัดเจน.....96
5.2.1.2 การสเกลค่าข้อมูล.....97
5.2.2 การเลือกเคอร์เนล.....97
5.2.3 กระบวนการของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....99
5.3 การหาค่าตัวแปรพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....101

บทที่ 6 ผลการทดลอง.....107
6.1 รูปแบบการนำเสนอ.....107
6.1.1 ระบบการทดลอง.....107
6.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟ.....107
6.2 ผลการทดลองของระบบทดลองระบบส่งเหนือพื้นดิน.....107
6.3 ผลการทดลองของระบบทดลองระบบส่งใต้พื้นดิน.....110

บทที่ 7 กรณีศึกษา.....113
7.1 ข้อกำหนดในการศึกษา.....113
7.2 กรณีศึกษา.....113
7.3 การจำลองความผิดพร่อง.....114
7.4 การวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่อง.....115

บทที่ 8 บทสรุป.....118
เอกสารอ้างอิง.....124
ภาคผนวก ก. การเรียนรู้บนปริภูมิมิติสูง.....129
ประวัติผู้เขียน.....134



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

1.1 ตารางสรุปข้อดีข้อด้อยของวิธีการต่างๆในการระบุชนิดความผิดพร่อง.....6
2.1 แสดงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณของเวฟเล็ตตระกูล Daubechies.....20
3.1 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์หว่างค่าของ EGAT กับค่าจากโปรแกรม ATP-LCC.....42
3.2 พฤติกรรมของกระแสและแรงดันของความผิดพร่องชนิด AG ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง.....57
3.3 พฤติกรรมของกระแสและแรงดันของความผิดพร่องชนิด ABG ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง.....58
3.4 พฤติกรรมของกระแสและแรงดันของความผิดพร่องชนิด AB ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง.....59
3.5 พฤติกรรมของกระแสและแรงดันของความผิดพร่องชนิด ABC ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง.....61
4.1 แสดงช่วงความถี่ในการแปลงเวฟเล็ตของระบบจำลองสายส่ง.....67
4.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 ความผิดพร่อง AG แต่ละตำแหน่ง.....74
4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 ความผิดพร่อง ABG แต่ละตำแหน่ง.....78
4.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 ความผิดพร่อง AB แต่ละตำแหน่ง.....81
4.5 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 ความผิดพร่อง ABC แต่ละตำแหน่ง.....85
5.1 เอาท์พุทสำหรับแต่ละโมเดลของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....96
5.2 แสดงคุณสมบัติของเคอร์เนลแต่ละประเภท.....98




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ


รูปที่ หน้า

2.1 แผนภาพเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลที่ติดไว้ที่ตำแหน่งของรีเลย์ป้องกัน.....10

2.2 แผนภาพค่าความต้านทานและความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับเมื่อเกิดความผิดพร่องในสายส่ง....13

2.3 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ตแบบ Morlet.....14

2.4 แสดงคุณสมบัติการสเกลและการเลื่อนตาแหน่งของฟังก์ชั่นเวฟเล็ต.....15-16

2.5 แสดงการกระจายสัญญาณสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....16

2.6 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....17

2.7 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบไม่มีชนิดย่อย.....18

2.8 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบมีชนิดย่อย.....19

2.9 มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตของข้อมูลสองจุด.....25

2.10 มาร์จิ้นของกลุ่มข้อมูลฝึกหัด.....25

2.11 slack variable สาหรับปัญหาการแบ่งคลาส.....26

2.12 แสดง Feature map ซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลได้โดยฟังก์ชันเส้นตรง.....29

2.13 แสดงมาร์จิ้นกับซัพพอร์ตเวคเตอร์สาหรับการแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงของข้อมูลตัวอย่าง.....31

2.14 แสดงแถบการแบ่งคลาสที่เป็นไปได้.....32

2.15 แสดงถึงผลกระทบของค่า soft-margin constant *C* กับเส้นแบ่งคลาส.....36

2.16 ผลกระทบของดีกรีของโพลีโนเมียลเคอร์เนล.....36

2.17 ผลของตัวแปรความกว้างของเกาส์เซียนเคอร์เนลสาหรับค่า soft-margin constant คงที่.....37

2.18 ความถูกต้องของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนบนกริดของค่าพารามิเตอร์.....39

2.19 เส้นแบ่งคลาสที่ได้รับจากการใช้ไฮเปอร์พารามิเตอร์ต่างๆของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....39

3.1 แสดงเสาแบบ SL ที่ใช้กับสายส่งวงจรเดี่ยว 500 kV.....40

3.2 แสดงระยะหย่อน (sag) ของสายตัวนาบนเสาแบบ SL ที่ใช้กับสายส่งวงจรเดี่ยว 500 kV.....41

3.3 แสดงระบบทดลอง ความยาว 325 กิโลเมตร.....43

3.4 แสดงวงจรการจาลองของโปรแกรม ATP/EMTP ของระบบทดลอง.....44

3.5 แสดงวงจรในการจาลองฟอลต์แบบ ABG ที่ 97.5 กิโลเมตร ของระบบการทดลอง.....45

3.6 แสดงสัญญาณฟอลต์ของแรงดันที่ได้จากการจาลองที่ปลายด้าน A.....45

3.7 แสดงสัญญาณความผิดพร่องของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้าน B.....46

3.8 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจาลองที่ปลายด้าน A.....46

3.9 แสดงสัญญาณความผิดพร่องของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้าน B.....47




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

3.10 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง....47
3.11 ขนาดของเคเบิลที่ใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง....48
3.12 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส A....48
3.13 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส B....49
3.14 แสดงรูปคลื่นแรงดันทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส A....49
3.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส B....50
3.16 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายสายส่งด้าน A (บัส A)....51
3.17 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายสายส่งด้าน B (บัส B)....51
3.18 รูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด AG ที่ตำแหน่ง 10% เทียบกับสัญญาณกระแสปกติ....52
3.19 รูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด ABG ที่ตำแหน่ง 10% เทียบกับสัญญาณกระแสปกติ....53
3.20 รูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด AB ที่ตำแหน่ง 10% เทียบกับสัญญาณกระแสปกติ....54
3.21 รูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด ABC ที่ตำแหน่ง 10% เทียบกับสัญญาณกระแสปกติ....55
3.22 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด AG....57
3.23 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด ABG....58
3.24 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส B ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด ABG....59
3.25 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด AB....60
3.26 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส B ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด AB....60
3.27 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด ABC....61
3.28 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส B ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด ABC....62
3.29 กระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส C ที่บัส A และ B ความผิดพร่องชนิด ABC....62
3.30 กระแสเฟส A สำหรับความผิดพร่องชนิด AG ที่ตำแหน่ง 10% ณ มุมที่ความผิดพร่องต่างๆ....63
4.1 ลักษณะของการนำระบบสื่อสารมาใช้กับป้องกันสายส่ง....65
4.2 ผลการแปลงเวฟเล็ตของกระแสลำดับบวกของระบบสายส่งเหนือพื้นดินที่ปลายสายส่ง 2 ด้าน....67
4.3 ผลการแปลงเวฟเล็ตของกระแสลำดับบวกของระบบสายส่งใต้พื้นดินที่ปลายสายส่ง 2 ด้าน....68
4.4 ผลการแปลงเวฟเล็ตยกกำลังสองของกระแสลำดับบวกของสายส่งเหนือพื้นดินที่ปลาย 2 ด้าน....69
4.5 ผลการแปลงเวฟเล็ตยกกำลังสองของกระแสลำดับบวกของสายส่งใต้พื้นดินที่ปลาย 2 ด้าน....69
4.6 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ AG ที่ตำแหน่ง 10%....71
4.7 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ ABG ที่ตำแหน่ง 10%....71




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

4.8 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ AB ที่ตำแหน่ง 10%.....72

4.9 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ ABC ที่ตำแหน่ง 10%.....72

4.10 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AG....75

4.11 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AG....75

4.12 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AG.....76

4.13 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AG.....76

4.14 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AG.....77

4.15 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABG..78

4.16 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABG..79

4.17 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABG.....79

4.18 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABG.....80

4.19 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABG.....80

4.20 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AB.....82

4.21 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AB....82

4.22 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AB.....83

4.23 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AB.....83

4.24 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง AB.....84

4.25 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABC..85

4.26 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABC..86

4.27 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABC.....86

4.28 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABC.....87

4.29 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บัส A และ B ความผิดพร่อง ABC.....87

4.30 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดกระแสเฟส A ความผิดพร่อง AG ตำแหน่ง 10% บัส A.....89

4.31 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดกระแสเฟส A ความผิดพร่อง AG ตำแหน่ง 10% บัส B.....89

4.32 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกของสัญญาณปกติกับสัญญาณความผิดพร่อง.....90

4.33 โฟลวชาร์ตแสดงกระบวนการตรวจจับความผิดพร่องบนระบบทดลอง.....93

5.1 แสดงโครงสร้างของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่อง.....95

5.2 โฟลวชาร์ตแสดงกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน.....101




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 5.3 | ความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในระบบสายส่งเหนือพื้นดิน | 102 |
| 5.4 | ความสัมพันธ์ระหว่าง Soft-Margin Variable กับความถูกต้องในระบบสายส่งเหนือพื้นดิน | 103 |
| 5.5 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นกับความถูกต้องในระบบสายส่งเหนือพื้นดิน | 103 |
| 5.6 | ความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในระบบสายส่งใต้พื้นดิน | 104 |
| 5.7 | ความสัมพันธ์ระหว่าง Soft-Margin Variable กับความถูกต้องในระบบสายส่งใต้พื้นดิน | 105 |
| 5.8 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นกับความถูกต้องในระบบสายส่งใต้พื้นดิน | 105 |
| 6.1 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่อง | 108 |
| 6.2 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตาแหน่งต่างๆ | 108 |
| 6.3 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตาแหน่งต่างๆ | 108 |
| 6.4 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตาแหน่งต่างๆ | 109 |
| 6.5 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตาแหน่งต่างๆ | 109 |
| 6.6 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่อง | 110 |
| 6.7 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตาแหน่งต่างๆ | 111 |
| 6.8 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตาแหน่งต่างๆ | 111 |
| 6.9 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตาแหน่งต่างๆ | 111 |
| 6.10 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตาแหน่งต่างๆ | 112 |
| 7.1 | แสดงระบบทดลองความยาว 325 กิโลเมตร | 114 |
| 7.2 | แสดงระบบจำลองสายส่งที่ใช้ในการศึกษา | 114 |
| 7.3 | แสดงสัญญาณความผิดพร่อง AG ที่ตำแหน่ง 30% ที่มุม 90 องศา | 115 |
| 7.4 | แสดงสัญญาณเปรียบเทียบกระแสกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ต | 116 |
| 7.5 | แสดงโครงสร้างของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้ในการระบุความผิดพร่อง | 116 |
| 8.1 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ | 119 |
| 8.2 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตาแหน่งต่างๆ | 119 |
| 8.3 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตาแหน่งต่างๆ | 120 |
| 8.4 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตาแหน่งต่างๆ | 120 |
| 8.5 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ | 121 |
| 8.6 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตาแหน่งต่างๆ | 122 |
| 8.7 | แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตาแหน่งต่างๆ | 122 |




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

8.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตาแหน่งต่างๆ.....123





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่ทำหน้าที่สำคัญในการส่งจ่ายไฟฟ้าไปยังปลายทางโดยผ่านสายส่ง ซึ่งเป็นส่วนหลักสำคัญในการกระจายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้บริโภค ซึ่งหากมีความผิดพร่องเกิดขึ้นในระบบสายส่งแล้ว ความผิดพร่องเหล่านั้นจะสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ในระบบสายส่ง ดังนั้นเพื่อที่จะไม่ให้เกิดความเสียหาย จึงมีระบบป้องกันสายส่งซึ่งควรจะสามารถตรวจจับและระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นแล้วทำการตัดส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบเพื่อรักษาความปลอดภัยให้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

ความถูกต้องแม่นยำในการระบุชนิดความผิดพร่องและรวดเร็วในการตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เทคนิคในการตรวจจับ และระบุชนิดความผิดพร่องนั้นได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วงหลังมานี้ ได้มีการค้นคว้าวิจัยในการระบุชนิดความผิดพร่องโดยกระบวนการต่างๆเช่น กระบวนการลองผิดลองถูก และในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1]- [6] ใช้ทฤษฎีเวฟเล็ตมาใช้ในการตรวจจับ และระบุชนิดความผิดพร่อง แม้ว่าการแปลงเวฟเล็ตนั้นมีประสิทธิภาพอย่างมากในการตรวจจับสัญญาณทรานเซี้ยนต์ซึ่งเกิดจากความผิดพร่องในระบบสายส่ง แต่ว่าการแปลงเวฟเล็ตนั้นไม่ยืดหยุ่นพอในการระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ [1]-[6]

ต่อมาทฤษฎีปัญญาประดิษฐ์ (AI) ได้ถูกนำมาใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่อง ซึ่งในงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกนำมาใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่องบนระบบสายส่งเช่นกัน เช่น ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ แม้ว่าอัลกอลิทึมทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมจะให้ความถูกต้องในการระบุความผิดพร่องได้มากกว่า แต่ว่าถูกจำกัดด้วยความเร็วในการเรียนรู้ซึ่งค่อนข้างใช้เวลานาน [8]-[10]

งานวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการพัฒนาอัลกอลิทึมใหม่ในการระบุชนิดความผิดพร่องเพื่อพัฒนาความถูกต้องและรวดเร็วในการระบุชนิดความผิดพร่องบนระบบสายส่ง โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

## 1.1 แนวโน้มการพัฒนาในงานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยที่ผ่านมานั้นมีทั้งการพัฒนาและการเปลี่ยนแปลงวิธีการ หรืออัลกอลิทึมที่ใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังมาโดยตลอดซึ่งแน่นอนว่าแนวโน้มการพัฒนานั้นเป็นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางที่ดีขึ้นเรื่อยๆ โดยในที่นี้จะอ้างอิงถึงงานวิจัยในช่วงประมาณสิบปีที่ผ่านมาว่ามีการพัฒนากระบวนการอะไรบ้างและผลที่ได้มีประสิทธิภาพเพียงใด

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมานี้มีนำวิธีการต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยการระบุขนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งมากมาย เช่น เทคนิคการแปลงเวฟเล็ต ทฤษฎีปัญญาประดิษฐ์ และซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน โดยแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป

เทคนิคการแปลงเวฟเล็ตเพื่อศึกษาพฤติกรรมหาความแตกต่างของความผิดพร่องแต่ละชนิดแล้วทำการเขียนอัลกอลิทึมขึ้นมาเพื่อระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งก็เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในช่วงก่อนหน้านี้เนื่องจากมีความสามารถในการตรวจจับความผิดพร่องได้ดีกว่าการแปลงฟูเรียร์ เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ตนั้นตอบสนองสัญญาณทรานเซี้ยนต์ได้ดีกว่าการแปลงฟูเรียร์ แต่ว่าการนำการวิเคราะห์การแปลงสัญญาณเวฟเล็ตมาเขียนอัลกอลิทึมเพื่อระบุชนิดความผิดพร่องของระบบสายส่งนั้นมีความยืดหยุ่นต่ำเนื่องจากสัญญาณทรานเซี้ยนต์นั้นมีความแปรปรวนต่อตัวแปรของระบบสายส่งมาก หากความต้านทานความผิดพร่องมีค่าเปลี่ยนแปลงหรือไม่คงที่ จะทำให้ความถูกต้องในการระบุความผิดพร่องนั้นต่ำลง โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยมากมายที่นำเทคนิคนี้มาใช้ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีรูปแบบการใช้การแปลงเวฟเล็ตแตกต่างกันออกไปดังนี้

- งานวิจัยในปี 2003 ได้มีการนำเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตมาใช้โดยการเลือกใช้เวฟเล็ตแม่แบบ db8 ซึ่งเหมาะสมกับรูปสัญญาณที่มีสัญญาณทรานเซี้ยนต์ที่มีความรวดเร็วมาก กับระบบทดลองสายส่งใต้ดิน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 3 มาเป็นอินพุทให้กับอัลกอลิทึมในการระบุชนิดความผิดพร่องเนื่องจากให้ผลได้ดีกว่าในสเกลอื่นๆ โดยอัลกอลิทึมในระบุชนิดความผิดพร่องนั้นคือการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตและระบุชนิดความผิดพร่องออกมาเป็น 4 ชนิดคือ เฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส และสามเฟสสมดุล [1]

- งานวิจัยในปี 2008 ได้มีการนำเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตมาใช้โดยการเลือกใช้เวฟเล็ตแม่แบบ db4 ซึ่งเหมาะสมกับรูปสัญญาณที่มีสัญญาณทรานเซี้ยนต์ซึ่งจะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าแบบ db8 และให้ความถูกต้องในเกณฑ์ที่พอเหมาะ กับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดิน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1-5 มาเป็นอินพุทให้กับอัลกอลิทึมในการระบุชนิดความผิดพร่อง โดยอัลกอลิทึมในระบุชนิดความผิดพร่องนั้นคือการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตและระบุชนิดความผิดพร่องออกมาเป็น 10 ชนิด [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งานวิจัยในปี 2010 ได้มีการนำเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตมาใช้โดยการเลือกใช้เวฟเล็ตแม่แบบ db4 กับระบบทดลองสายส่งคู่เหนือพื้นดินแบบ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1-5 มาเป็นอินพุทให้กับอัลกอลิทึมในการระบุชนิดความผิดพร่อง โดยอัลกอลิทึมในระบุชนิดความผิดพร่องนั้นคือการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตและระบุชนิดความผิดพร่องออกมาเป็น 10 ชนิด [4]

- งานวิจัยในปี 2010 ได้มีการนำเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตมาใช้โดยการเลือกใช้เวฟเล็ตแม่แบบ db4 กับระบบทดลองสายส่งใต้พื้นดิน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1-5 มาเป็นอินพุทให้กับอัลกอลิทึมในการระบุชนิดความผิดพร่อง โดยอัลกอลิทึมในระบุชนิดความผิดพร่องนั้นคือการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตและระบุชนิดความผิดพร่องออกมาเป็น 10 ชนิด [3]

ซึ่งจะเห็นว่าในแต่ละปีจะมีการนำเทคนิคการใช้การแปลงเวฟเล็ตมาใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกันแล้วแต่ความเหมาะสมของตัวระบบสายส่งในแต่ละงานวิจัยนั้นๆ

ต่อมาได้มีการนำกระบวนการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้แทนมากขึ้น ซึ่งมีบ่งชี้อย่างเห็นได้ชัดว่ามีความสามารถในการจำแนกข้อมูล และไม่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ทั้งยังให้ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องสูง ซึ่งกระบวนการนี้จะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในระบบ [8]

ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) นั้นเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งโดยทฤษฎีนี้มีความสามารถในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างเอาท์พุทกับอินพุทโดยที่ไม่จำเป็นต้องหาสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนมากเกินกว่าที่จะหาสมการทางคณิตศาสตร์มานิยาม นักวิจัยจึงนิยมนำมาใช้ในการระบุความผิดพร่องในระบบสายส่งด้วย [9]-[13] โดยทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมนั้นนิยมใช้ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมไปข้างหน้าแบบหลายชั้น (Multi-layer Feed Forward Neural Network ) คู่กับอัลกอลิทึมทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Back Propagation Neural Network) ในการเรียนรู้ระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามแม้ว่าอัลกอลิทึมนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายแต่ก็ยังมีข้อด้อย เช่น ใช้เวลาในการเรียนรู้มาก และไม่เหมาะในกรณีที่ข้อมูลที่จะทำการพิจารณานั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ข้อมูลที่ได้เรียนรู้ไป ซึ่งทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเรเดียลเบสิสฟังก์ชัน (Radial Basis Function Neural Network) นั้นสามารถลดปัญหาเหล่านี้ได้โดยที่โดยปกติแล้วทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับนั้นจะมีเลเยอร์แฝงเร้นอยู่หลายเลเยอร์ และมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายนิวรอนในแต่ละเลเยอร์ แต่สำหรับทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเรเดียลเบสิสฟังก์ชันนั้นจะมีเพียงเลเยอร์แฝงเร้นเดียวและมีนิวรอนอยู่ในจำนวนที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชุดข้อมูลอินพุท อย่างไรก็ตามกระบวนการของทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเรเดียลเบสิสฟังก์ชันนั้นก็ยังมีข้อด้อยเนื่องจากจำเป็นต้องใช้ข้อมูลในการเรียนรู้ค่อนข้างมากหากต้องการความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่ง [9], [11] โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยมากมายที่นำเทคนิคนี้มาใช้ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีรูปแบบการใช้งานแตกต่างกันออกไปดังนี้

- งานวิจัยในปี 2004 ได้มีการนำเทคนิคนิวรอนเน็ตเวิร์คมาใช้งานกับระบบทดลองสายส่งคู่เหนือพื้นดิน โดยจะใช้อินพุท 6 ตัวคือ กระแสลำดับบวก, กระแสลำดับลบ, กระแสลำดับศูนย์ และค่าอิมพิแดนซ์ในสายส่งเฟส A, B และ C และจะได้เอาท์พุท 4 ตัว คือ A, B, C และ N ซึ่งเป็นค่าตรรกะสำหรับแสดงว่าเฟสใดเกิดความผิดพร่อง โดยอัลกอลิทึมของนิวรอนเน็ตเวิร์คที่ใช้คือ ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับซึ่งอัลกอลิทึมนี้จะมีเลเยอร์แฝงเร้นอยู่หลายเลเยอร์ [8]

- งานวิจัยในปี 2004 ได้มีการนำเทคนิคนิวรอนเน็ตเวิร์คมาใช้งานกับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินแบบแหล่งจ่ายเดียว และแบบสองแหล่งจ่าย โดยจะใช้อินพุท 3 ตัวคือ ตัวแปรที่บ่งบอกว่าเกิดความผิดพร่องหรือไม่ (F), ตัวแปรที่บอกว่าความผิดพร่องเกิดในทิศทางใด(D) และตัวแปรที่บอกว่าความผิดพร่องเป็นประภทลงดินหรือไม่ (G) และจะได้เอาท์พุท 4 ตัว คือ A, B, C และ G ซึ่งเป็นค่าตรรกะสำหรับแสดงว่าเฟสใดเกิดความผิดพร่อง โดยอัลกอลิทึมของนิวรอนเน็ตเวิร์คที่ใช้คือ ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเรเดียลเบสิสฟังก์ชัน ซึ่งจะมีเลเยอร์แฝงเร้นเพียงเลเยอร์เดียว และมีความรวดเร็วกว่าแบบแพร่กลับ [9]

- งานวิจัยในปี 2007 ได้มีการนำเทคนิคนิวรอนเน็ตเวิร์คซึ่งใช้เทคนิคทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ มาใช้ร่วมกับการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินซึ่งมีแหล่งจ่ายอยู่ 2 ด้าน โดยจะใช้อินพุท 7 ตัวคือ ค่าองค์ประกอบของกระแสเฟส A, B, C และ กระแสลำดับศูนย์ และตัวแปรที่บอกว่าเกิดความผิดพร่องชนิดลงดิน (G) โดยจะได้เอาท์พุท 4 ตัว คือ เฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน , เฟสต่อเฟส และ สามเฟสสมดุลจากรูปแบบของนิวรอนเน็ตเวิร์คสองตัว โดยตัวแรกจะทำหน้าที่ในการระบุความผิดพร่องชนิดลงดิน และตัวที่สองสำหรับความผิดพร่องชนิดที่ไม่ลงดิน [11]

- งานวิจัยในปี 2010 ได้มีการนำเทคนิคนิวรอนเน็ตเวิร์คซึ่งใช้เทคนิค Lavenberg-Marquardt optimization มาใช้ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยซึ่งใช้เวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่แบบ db6 กับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดิน โดยจะใช้อินพุท 4 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1(CA1) ของกระแสเฟส A, B, C และ กระแสลำดับศูนย์ โดยจะได้เอาท์พุท 4 ตัว คือ A, B, C และ N ซึ่งเป็นค่าตรรกะสำหรับแสดงว่าเฟสใดเกิดความผิดพร่อง [10]

ซึ่งจะเห็นว่าในแต่ละปีจะมีการนำเทคนิคนิวรอนเน็ตเวิร์คใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกันแล้วแต่ความเหมาะสมของตัวระบบสายส่งในแต่ละงานวิจัยนั้นๆ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตเพียงอย่างเดียว

ในช่วง 3-4 ปีที่ผ่านมานี้ทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นได้รับความนิยมอย่างมากในการแก้ปัญหาการจดจำและการแบ่งชนิดข้อมูล ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนซึ่งเป็นทฤษฎีการเรียนรู้ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานการเรียนรู้ทางสถิตินั้นเป็นวิธีการแบ่งชนิดทั่วๆไป ซึ่งการใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะทำให้สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลการเรียนรู้ ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากมายเช่น ความสามารถในการแบ่งชนิดของข้อมูลอย่างถูกต้อง และความเที่ยงตรงในการทำงาน ดังนั้นการใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะไม่ได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงจากตัวแปรต่างๆในระบบสายส่ง ซึ่งการใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์ในการแบ่งชนิดความผิดพร่องในงานวิจัยที่ผ่านมานั้นให้ความถูกต้องแม่นยำค่อนข้างสูงซึ่งส่งผลให้ระบบป้องกันสายส่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น [14]-[16] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งต่อไป

- งานวิจัยในปี 2008 ได้มีการนำเทคนิคซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาใช้ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่แบบ db5 กับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินซึ่งมีแหล่งจ่ายอยู่ 2 ด้าน โดยจะใช้อินพุท 4 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ขของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์ โดยจะได้เอาท์พุท 5 ตัว คือ เฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส, สามเฟสสมดุล และสามเฟสลงดิน [14]

- งานวิจัยในปี 2009 ได้มีการนำเทคนิคซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาใช้ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย กับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินซึ่งมีแหล่งจ่ายอยู่ 2 ด้าน โดยจะใช้อินพุท 4 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ขของกระแสเฟส A, B, C และ กระแสลำดับศูนย์ โดยจะได้เอาท์พุท 9 ตัว คือ AG, BG, CG, ABG, BCG, ACG, AB, BC, AC จากซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนสองรูปแบบ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งานวิจัยในปี 2011 ได้มีการนำเทคนิคซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาใช้ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่แบบ db4 กับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินซึ่งมีแหล่งจ่ายอยู่ 2 ด้าน โดยจะใช้อินพุท 4 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์ โดยจะได้เอาท์พุท 5 ตัว คือ AG, ABG, AB, ABC และสัญญาณปกติ จากซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน [15]

ซึ่งจะเห็นว่าในแต่ละปีจะมีการนำเทคนิคซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกันแล้วแต่ความเหมาะสมของตัวระบบสายส่งในแต่ละงานวิจัยนั้นๆ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในการระบุชนิดความผิดพร่องเมื่อเทียบกับอัลกอลิทึมอื่นๆ

**ตาราง 1.1** ตารางสรุปข้อดีข้อด้อยของวิธีการต่างๆในการระบุชนิดความผิดพร่อง

| วิธีการระบุชนิดความผิดพร่อง | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---|---|---|
| การแปลงเวฟเล็ต | - มีความรวดเร็วในการระบุชนิดความผิดพร่อง<br>- เหมาะในการใช้ในการตรวจจับความผิดพร่อง | - ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องยังอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ<br>- มีข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งไม่มีความยืดหยุ่นเนื่องจากได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของตัวแปรในระบบ |
| ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม | - ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องสูง<br>- มีความยืดหยุ่นสูง โดยไม่ได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของตัวแปรในระบบ | - ต้องใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน<br>- จำเป็นต้องมีข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้มาก |
| ทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน | - ความถูกต้องในการระบุความผิดพร่องสูง<br>- มีความยืดหยุ่นสูงในการนำไปใช้<br>- ใช้เวลาในการประมวลผลไม่สูงนัก | - มีรูปแบบในการเรียนรู้เพื่อจำแนกประเภทน้อย |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้เห็นว่าการวิจัยนั้นมุ่งเน้นเพื่อพัฒนากระบวนการและต่อยอดการพัฒนาผลลัพธ์ที่ได้ให้ดียิ่งขึ้น โดยการพยายามพัฒนาวิธีเดิมๆ หรือหาวิธีการใหม่ๆเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นี่จึงเป็นอีกเหตุผลของจุดประสงค์ในการศึกษาและพัฒนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## 1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์หลัก คือ

1. เพื่อศึกษาการตรวจจับความผิดพร่องโดยกระบวนการแปลงเวฟเล็ต
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาการระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน
3. เพื่อพัฒนาความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการระบุชนิดความผิดพร่อง

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณความผิดพร่อง คือ เมื่อมีความผิดพร่องเกิดขึ้นบนสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่ต่างๆเกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของความผิดพร่องโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงจะมีค่าสูงขึ้นและยังสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับความผิดพร่องที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงในหลายสเกลหรือหลายช่วงความถี่ และทำการประมวลผลโดยอ้างอิงหลักการที่ใช้กับการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานที่มีอยู่เดิมรวมกับวิธีการที่เพิ่มเติมเข้าไป ผลที่ได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจจับความผิดพร่อง และการระบุชนิดความผิดพร่องบนสายส่งต่อไปได้

ซึ่งการตรวจจับความผิดพร่องนั้นสามารถกระทำได้โดยการวิเคราะห์สัญญาณหลังจากการแปลงเวฟเล็ตได้โดยตรงโดยการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ในการแปลงเวฟเล็ตมาเปรียบเทียบกันในช่วงที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องว่ามีการเกิดความผิดพร่องขึ้นในช่วงนั้นหรือไม่ซึ่งเกณฑ์ในการตรวจจับนั้นจะกล่าวในบทถัดไป

ในส่วนของการระบุชนิดความผิดพร่องนั้นจะนำค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นอินพุทให้กับอัลกอลิทึมของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเพื่อที่จะหาเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องให้กับระบบสายส่ง ซึ่งรายละเอียดของอัลกอลิทึมในการระบุชนิดความผิดพร่องนั้นกล่าวโดยคร่าวๆแล้วคือการนำข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มูลค่าสัมประสิทธิ์สเกลที่หนึ่งของสัญญาณที่เกิดความผิดพร่องทุกชนิดจำนวนหลายๆชุดเข้ามาทำการจัดแบ่งชนิดต่างๆเสียก่อน(จำเป็นต้องรู้ชนิดของความผิดพร่องของข้อมูลแต่ละตัวเพื่อใช้ในการเรียนรู้) แล้วจึงค่อยทำการแบ่งข้อมูลนั้นเป็นส่วนๆตามชนิดของชนิดความผิดพร่องหลังจากนั้นจะทำการเรียนรู้จากข้อมูลตัวอย่างเหล่านี้ซึ่งจะเรียกว่าข้อมูลฝึกหัดซึ่งผลลัพธ์ที่จะได้คือฟังก์ชันเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องนั่นเอง หลังจากที่ได้เกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องมาแล้วจะสามารถนำเกณฑ์นี้ไปใช้ต่อได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งความถูกต้องของเกณฑ์เหล่านั้นขึ้นกับตัวแปรต่างๆมากมาย ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 2

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

**ระบบส่งเหนือพื้นดิน**

1. ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณความผิดพร่องเมื่อนำมาผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในสเกลที่ 1-5 เพื่อนำมาใช้สร้างขั้นตอนการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้
2. ทำการจำลองสัญญาณความผิดพร่องด้วยโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อศึกษารูปแบบของสัญญาณความผิดพร่องที่แตกต่างกันโดยอาศัยแบบสายส่งวงจรเดี่ยวระหว่างโรงไฟฟ้าแม่เมาะถึงสถานีไฟฟ้าท่าตะโกเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา
3. ทดสอบตัวอย่างสัญญาณความผิดพร่องกับขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้จากข้อที่ 1 อาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความถูกต้องของขั้นตอนที่นำเสนอ

**ระบบส่งใต้พื้นดิน**

1. ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณความผิดพร่องเมื่อนำมาผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในสเกลที่ 1-5 เพื่อนำมาใช้สร้างขั้นตอนการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้
2. ทำการจำลองสัญญาณความผิดพร่องด้วยโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อศึกษารูปแบบของสัญญาณความผิดพร่องที่แตกต่างกันโดยอาศัยแบบสายส่งวงจรเดี่ยวระหว่างสถานีไฟฟ้าวิภาวดีถึงสามย่านเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทดสอบตัวอย่างสัญญาณความผิดพร่องกับขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้จากข้อที่ 1 อาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความถูกต้องของขั้นตอนที่นำเสนอ

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. การศึกษารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่อง และเวฟเล็ตแม่ที่เหมาะสมโดยอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา

2. ทำการจำลองสัญญาณความผิดพร่องที่แตกต่างกัน 1080 ตัวอย่างสำหรับระบบส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน และ 600 ตัวอย่างสำหรับระบบส่งไฟฟ้าใต้พื้นดิน แล้วนำสัญญาณความผิดพร่องมาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการวิเคราะห์และระบุชนิดความผิดพร่องโดยวิธีการซัพพอร์ตเวคเตอแมชชีนเพื่อหาเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องของแต่ละระบบ โดยจะแบ่งข้อมูลเป็นสามส่วน ซึ่งในระบบส่งไฟฟ้าเหนือดินนั้นจะแบ่ง ข้อมูลเป็นจำนวนสามชุด ดังนี้คือ ชุดข้อมูลฝึกหัดจำนวน 540 ข้อมูล ชุดข้อมูลที่ใช้ในการประเมินเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องในระบบส่งจำนวน 180 ข้อมูล และชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องจำนวน 360 ข้อมูล และในระบบส่งไฟฟ้าใต้ดินนั้นจะแบ่ง ข้อมูลเป็นจำนวนสามชุดเช่นกัน คือ ชุดข้อมูลฝึกหัดจำนวน 300 ข้อมูล ชุดข้อมูลที่ใช้ในการประเมินเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องในระบบส่งจำนวน 150 ข้อมูล และชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องจำนวน 150 ข้อมูล

3. เมื่อได้เกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องแล้วจะนำมาทดสอบกับสัญญาณความผิดพร่องที่ได้จากระบบทดสอบที่สร้างไว้นำผลที่ได้มาสรุปและประมวลผลความถูกต้องของเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องที่นำเสนอ

4. ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำเกณฑ์การระบุชนิดความผิดพร่องที่นำเสนอมาทดสอบกับข้อมูลที่เตรียมไว้เพื่อทดความความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและเสนอแนะแนวทางการพัฒนาการศึกษาต่อไป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถนำการแปลงเวฟเล็ตไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่อง หรือสัญญาณรูปแบบอื่นๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้

3. สามารถนำทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาประยุกต์ใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งรูปแบบต่างๆ

4. สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตและวิธีการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ

5. พัฒนาแนวคิดและอัลกอลิทึมใหม่ๆของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนซึ่งแตกต่างกับอัลกอลิทึมเดิมที่เคยได้รับการพัฒนามาแล้วซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

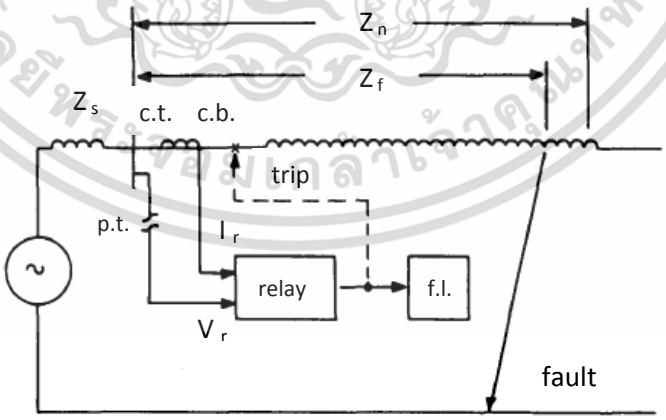
# การวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องบนสายส่ง

ความสามารถในการระบุตำแหน่งและชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้นได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และรวดเร็วนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในการส่งกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพ ซึ่งในปัจจุบันนั้นก็มีเครื่องมือที่ใช้ระบุตำแหน่งความผิดพร่องในสายส่งอยู่มากมาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงระบบการทำงานเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลเบื้องต้น โดยจะยกตัวอย่างเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลซึ่งทำงานโดยการวัดค่ามุมเฟสมาเป็นตัวระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำความสามารถในการระบุชนิดความผิดพร่องที่ได้วิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้ไปประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์ในการระบุตำแหน่งความผิดพร่องต่อไปในอนาคต เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องในสายส่ง

## 2.1 เครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอล

เครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องนั้นมีอยู่หลากหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีหลักการทำงานแตกต่างกันออกไป แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลที่ทำงานโดยการวัดค่ามุมเฟสแล้วนำค่ามุมเฟสนั้นมาแทนลงในสมการเพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง มาเป็นตัวอย่างอ้างอิงในการศึกษาการระบุชนิดความผิดพร่องซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

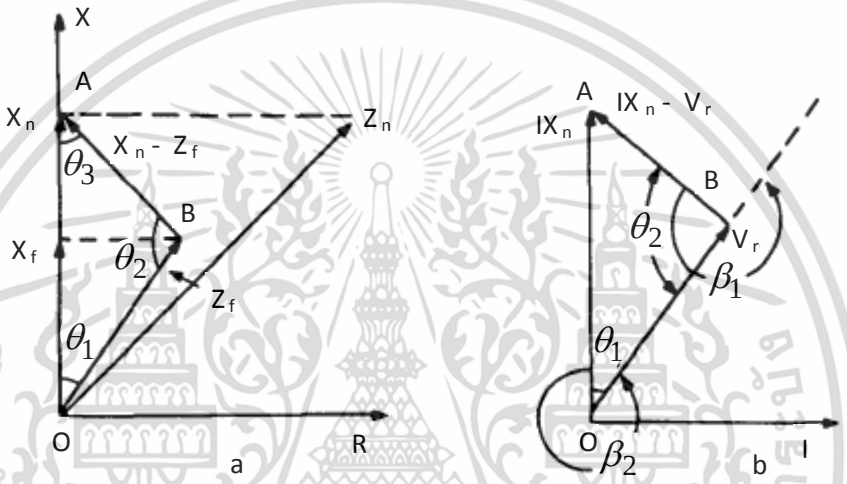
### 2.1 หลักการทำงาน




รูปที่ 2.1 แผนภาพเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลที่ติดไว้ที่ตำแหน่งของรีเลย์ป้องกัน (ที่มา : M.T. Sant, Y.G. Paithankar, “Online digital fault locator for overhead transmission line.”)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลที่กล่าวถึงนี้จะทำงานโดยการวัดค่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับ (Reactance) ของสายส่งจากตำแหน่งที่เครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องอยู่ไปจนถึงตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องมาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับของสายส่ง ( $X_f/X_n$ ) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ รูปที่ 2.1 แสดงระบบเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลที่ติดไว้ที่ตำแหน่งของรีเลย์ป้องกัน




รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพของค่าความต้านทานและความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในสายส่ง

(ที่มา : M.T. Sant, Y.G. Paithankar, “Online digital fault locator for overhead transmission line.”)

โดยที่ $Z_s\angle\theta_s$ คือ อิมพิแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

$Z_n\angle\theta_n = R_n + jX_n$ คือ อิมพิแดนซ์ของสายส่ง

$Z_f = R_f + jX_f$ คือ อิมพิแดนซ์ระหว่างตำแหน่งรีเลย์กับความผิดพร่อง

$V_r, I_r$ คือ แรงดันและกระแสที่ตำแหน่งรีเลย์

จากรูปที่ 2.2 เมื่อใช้ กฎของซายน์ กับสามเหลี่ยมอิมพิแดนซ์ OAB จะได้

$$\frac{Z_f}{\sin\theta_3} = \frac{X_n}{\sin\theta_2} \qquad (2.1)$$

นำ $\sin\theta_1$ คูณเข้าในสมการ (2.1) ทั้งสองข้างและแทนค่า $Z_f\cos\theta_1 = X_f$ ลงไป จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{X_f}{\sin\theta_3} = \frac{X_n \cos\theta_1}{\sin\theta_2}$$

หรือ

$$\frac{X_f}{X_n} = \frac{\sin\theta_3 \cos\theta_1}{\sin\theta_2} \qquad (2.2)$$

โดยที่

$$\theta_1 = \arg\frac{X_n}{Z_f} = \arg\frac{I_r X_n}{V_r}$$

$$\theta_2 = \arg\frac{-Z_f}{X_n - Z_f} = \arg\frac{-V_r}{I_r X_n - V_r}$$

และ

$$\theta_3 = 180 - (\theta_1 + \theta_2)$$

สมการที่ (2.2) แสดงอย่างเห็นได้ชัดว่าตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องนั้นสามารถระบุได้อย่างง่ายดายโดยการพิจารณาค่ามุมเฟสเพียงแค่สองมุมจากทั้งหมดสามมุม คือ $\theta_1$ , $\theta_2$ และ $\theta_3$

ซึ่งในความเป็นจริงนั้นการสร้างเครื่องระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบดิจิตอลตัวต้นแบบที่มีความซับซ้อนทางวงจรไฟฟ้าน้อยที่สุดนั้น จะทำได้สะดวกกว่าเมื่อเครื่องระบุตำแหน่งความผิดทำการวัดค่ามุม $\beta_1$ และ $\beta_2$ โดยใช้ตัวนับแบบดิจิตอล (Digital counter) ในการวัดค่ามุมเหล่านี้เพียงสองตัว ซึ่งมุม $\beta_1$ และ $\beta_2$ นั้นถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 และมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\beta_1 = \arg\frac{V_r}{I_r X_n - V_r}$$

และ

$$\beta_2 = \arg\frac{V_r}{I_r X_n}$$

ซึ่ง $\beta_1 = 180 + \theta_2$ และ $\beta_2 = 360 - \theta_1$ และเมื่อนำมาแทนลงในสมการ (2.2) จะได้

$$\frac{X_f}{X_n} = \frac{\sin(\beta_2 - \beta_1)\cos(360 - \beta_2)}{\sin(\beta_1 - 180)} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า $\beta_1$ และ $\beta_2$ จะถูกวัดด้วยตัวนับแบบดิจิตอลตัวที่หนึ่งและตัวที่สองตามลำดับ

เมื่อได้ค่ามุม $\beta_1$ และ $\beta_2$ มาแล้ว ค่าเหล่านี้จะถูกส่งเข้าสมการ (2.3) เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสกลับเพื่อระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในสายส่งต่อไป

## 2.2 การแปลงเวฟเล็ต

สัญญาณคลื่นถูกนิยามเป็นฟังก์ชันการกวัดแกว่งทางเวลา เช่นสัญญาณคลื่นซายน์ (Sinusoidal wave) ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นนั้นโดยทั่วไปแล้วจะใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier analysis) โดยการแยกองค์ประกอบของคลื่นสัญญาณออกมาเป็นองค์ประกอบย่อยๆในรูปของคลื่นซายน์ที่มีความถี่ต่างๆกัน ซึ่งการวิเคราะห์ฟูเรียร์นั้นมีความเหมาะสมอย่างมากกับสัญญาณคลื่นที่มีลักษณะเป็นคาบ หรือสัญญาณคลื่นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-invariant) แต่เนื่องจากสัญญาณความผิดพร่องบนสายส่งนั้นเป็นสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสัญญาณทรายเซี้ยนต์ (Transient signal) การวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะนี้จึงจำเป็นจะต้องใช้การวิเคราะห์สัญญาณคลื่นที่เหมาะสมกับสัญญาณทรานเซี้ยนต์นี้ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกใช้การวิเคราะห์เวฟเล็ตมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องบนสายส่งเนื่องจากการวิเคราะห์เวฟเล็ตนั้นมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซี้ยนต์

### 2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform: WT)

ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.3

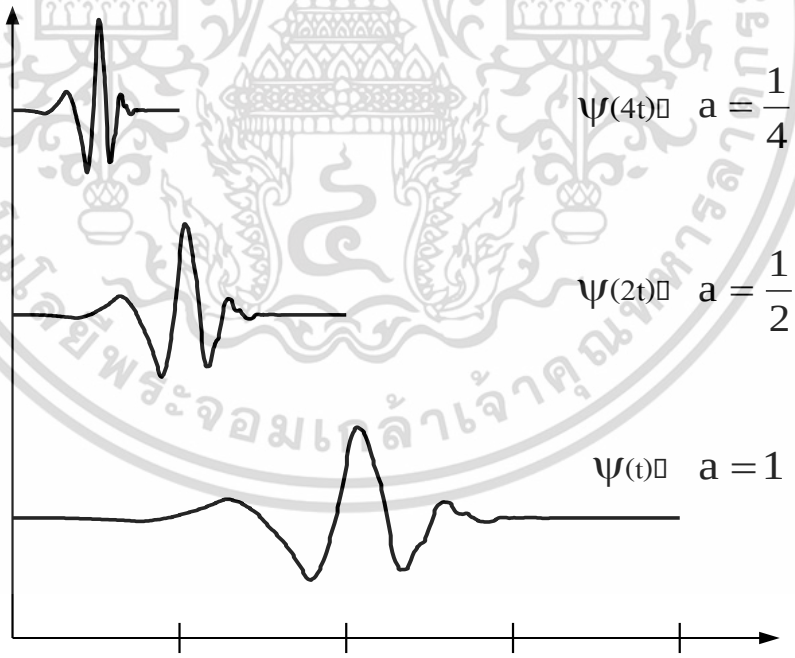
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ตแบบ Morlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตคือการนำกลุ่มของเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชั่นเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชั่นนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการสเกล (Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ตแม่นั้นเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting: b) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลาดัง ดังนั้นถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชั่นเวฟเล็ตแม่จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ได้ดังนี้

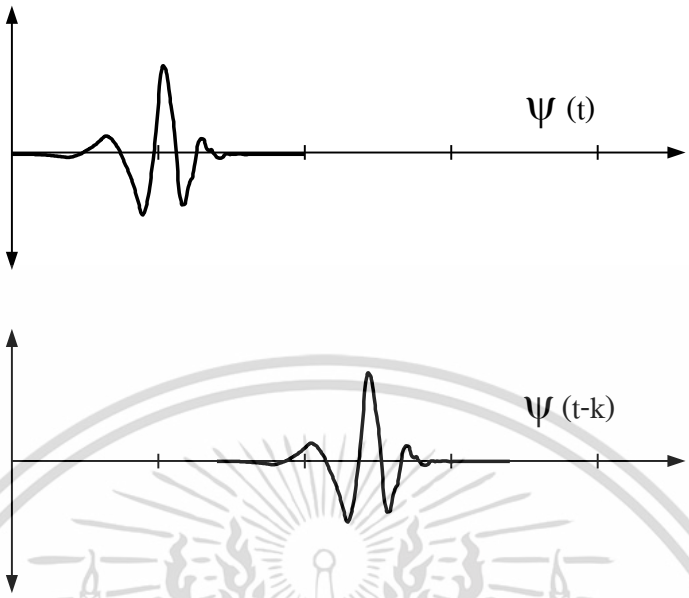
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a}) \tag{2.4}$$

$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชั่นเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ b ตามลำดับ โดยที่เวฟเล็ตแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า a และ b แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเล็ตแม่เดิมอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และเพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่จึงต้องทำการนอมอร์ไลซ์ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ




(ก) คุณสมบัติการเปลี่ยนสเกล (Scaling)

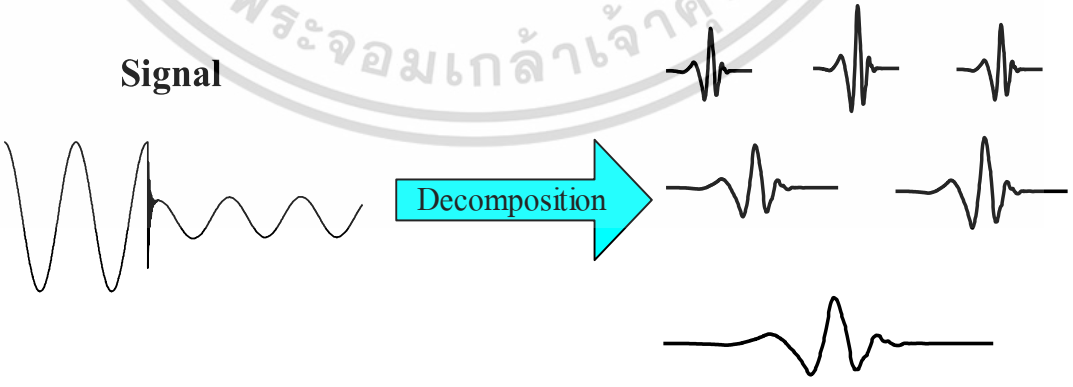
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ข) คุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

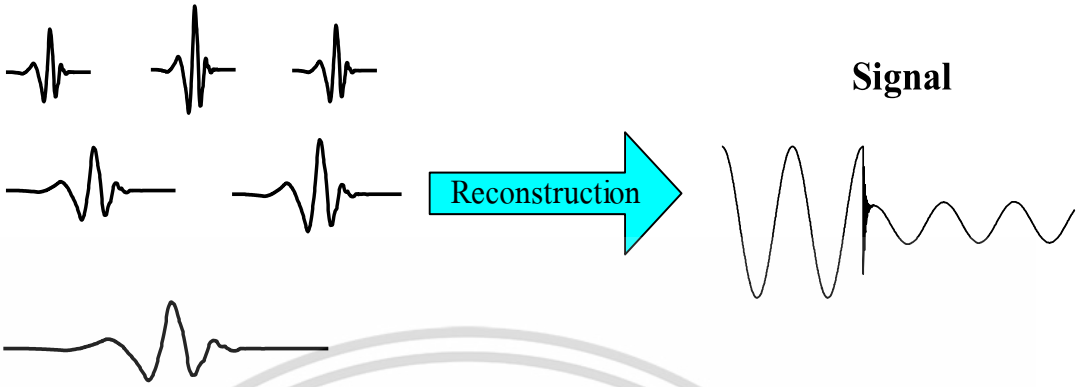
รูปที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชั่นเวฟเล็ต

และเมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาอยู่ในรูปของฟังก์ชั่นเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่าน้ำหนัก(Weight) คูณอยู่ ซึ่งรูปแบบในการแตกกระจายสัญญาณนี้เรียกว่า การกระจายเวฟเล็ต (Wavelet decomposition) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 ในทางกลับกันการรวมกลุ่มของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิมนั้นเรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet reconstruction) ซึ่งก็คือการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse wavelet transform) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6




รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายสัญญาณสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.6 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในสายส่ง เนื่องจากมีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากกว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องในด้านการประมวลผล และการจัดการทางด้านหน่วยความจำ

**2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT)**

เนื่องการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ จึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform :DWT) นั้นมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right)dt \qquad (2.5)$$

โดยที่ $a_0^m$ คือ การสเกล

$nb_0 a_0^m$ คือ การเลื่อนตำแหน่ง

$m, n$ คือ เลขจำนวนเต็มบวก

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้นสมการที่ (2.5) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$DWT\ (m,n) = \frac{1}{\sqrt{{a_0}^m}} \sum_k f\ (k)\psi[\frac{n - k b_0 {a_0}^m}{{a_0}^m}] \qquad (2.6)$$

เมื่อ m, n, k เป็นเลขจำนวนเต็มโดยที่

n คือ จำนวนข้อมูล

m คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

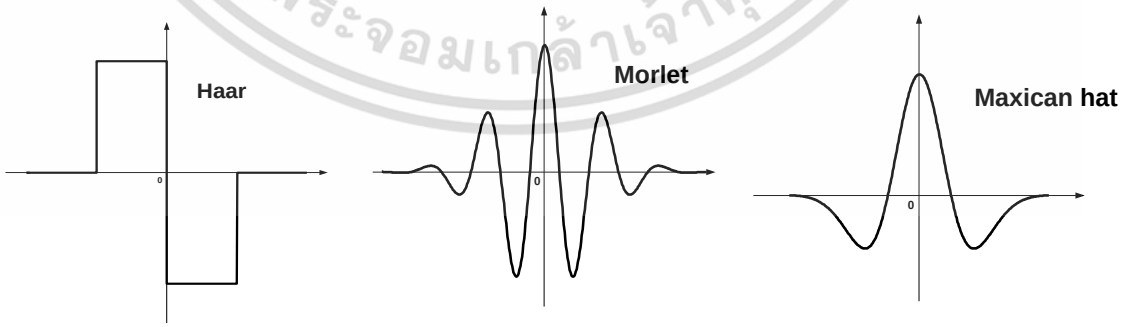
k คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครั้งละ 2 เท่า ($a_0 = 2; b_0 = 1$) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้

$$DWT\ (m,n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f\ (k)\psi[\frac{n - k\,2^m}{2^m}] \qquad (2.7)$$

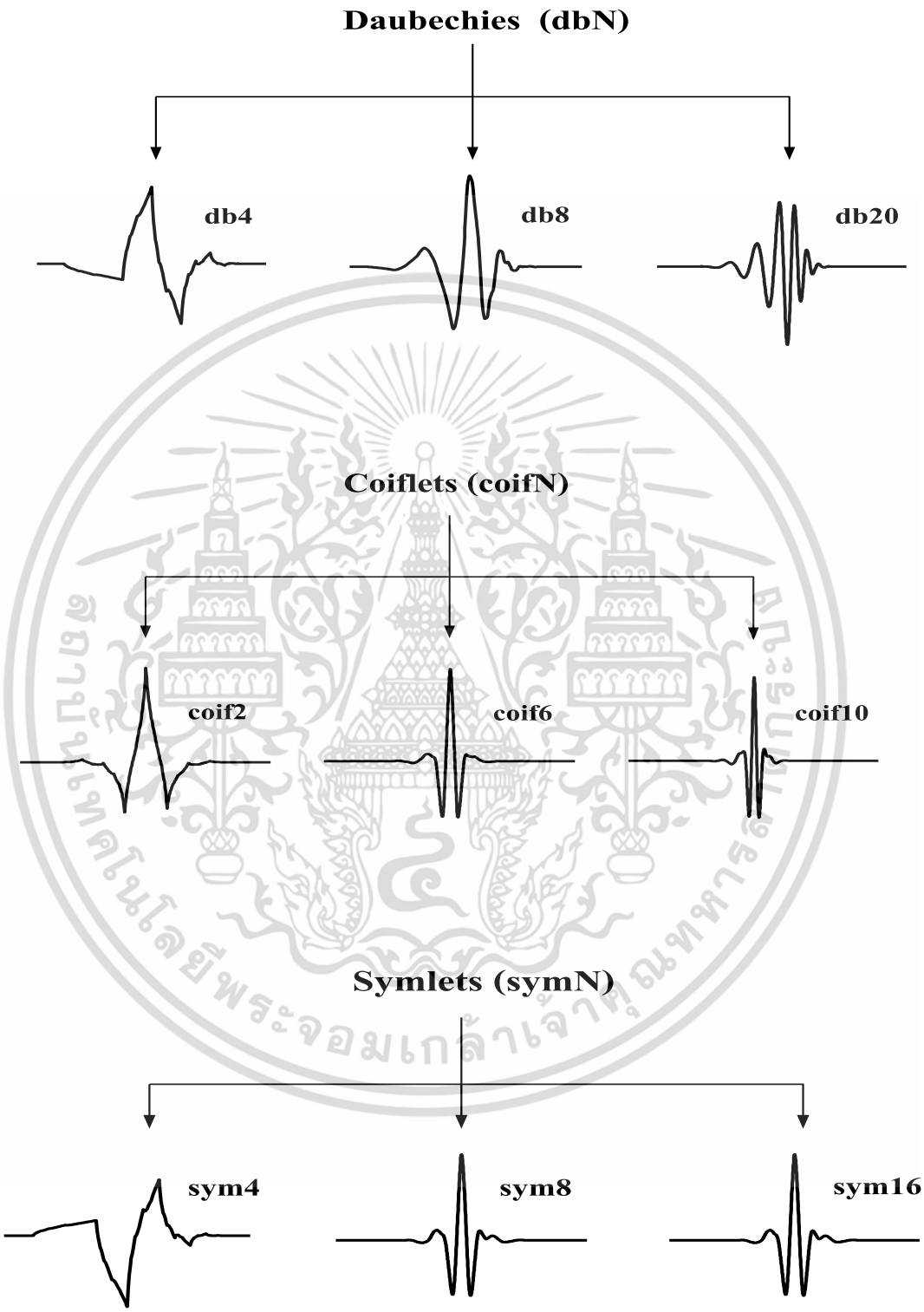
**2.2.3 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet)**

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้วยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองสัญญาณนั้นๆ ให้เหมาะสมด้วย สำหรับการแปลงเวฟเล็ตนั้นตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเล็ตแม่นั้นเอง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อยๆ ลงไปอีก และเนื่องจากรูปแบบของเวฟเล็ตแม่ที่หลากหลายนี้เองจึงทำให้การแปลงเวฟเล็ตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานโดยเลือกเวฟเล็ตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่การวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของเวฟเล็ตแม่ได้ดังรูปที่ 2.7 - 2.8




รูปที่ 2.7 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบไม่มีชนิดย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.8 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบมีชนิดย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.1** แสดงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณของเวฟเล็ตตระกูล Daubechies ที่ N มีค่าเป็น 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 20

| Order | n | Filter coefficients | Order | n | Filter coefficients | Order | n | Filter coefficients |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N=4 | 0 | 0.4829629131 | N=14 | 0 | 0.0778520541 | N=18 | 0 | 0.0380779474 |
| | 1 | 0.8365163037 | | 1 | 0.3965393195 | | 1 | 0.2438346746 |
| | 2 | 0.2241438680 | | 2 | 0.7291320908 | | 2 | 0.6048231237 |
| | 3 | -0.1294095226 | | 3 | 0.4697822874 | | 3 | 0.6572880781 |
| N=6 | 0 | 0.3326705530 | | 4 | -0.1439060039 | | 4 | 0.1331973858 |
| | 1 | 0.8068915093 | | 5 | -0.2240361850 | | 5 | -0.2932737833 |
| | 2 | 0.4598775021 | | 6 | 0.0713092193 | | 6 | -0.0968407832 |
| | 3 | -0.1350110200 | | 7 | 0.0806126092 | | 7 | 0.1485407493 |
| | 4 | -0.0854412739 | | 8 | -0.0380299369 | | 8 | 0.0307256815 |
| | 5 | 0.0352262919 | | 9 | -0.0165745416 | | 9 | -0.0676328291 |
| N=8 | 0 | 0.2303778133 | | 10 | 0.0125509986 | | 10 | 0.0002509471 |
| | 1 | 0.7148465706 | | 11 | 0.0004295780 | | 11 | 0.0223616621 |
| | 2 | 0.6308807679 | | 12 | -0.0018016407 | | 12 | -0.0047232048 |
| | 3 | -0.0279837694 | | 13 | 0.0003537138 | | 13 | -0.0042815037 |
| | 4 | -0.1870348117 | N=16 | 0 | 0.0544158422 | | 14 | 0.0018476469 |
| | 5 | 0.0308413818 | | 1 | 0.3128715909 | | 15 | 0.0002303858 |
| | 6 | 0.0328830117 | | 2 | 0.6756307363 | | 16 | -0.0002519632 |
| | 7 | -0.0105974018 | | 3 | 0.5853546837 | | 17 | 0.0000393473 |
| N=10 | 0 | 0.1601023980 | | 4 | -0.0158291053 | N=20 | 0 | 0.0266700579 |
| | 1 | 0.6038292698 | | 5 | -0.2840155430 | | 1 | 0.1881768001 |
| | 2 | 0.7243085284 | | 6 | 0.0004724846 | | 2 | 0.5272011889 |
| | 3 | 0.1384281459 | | 7 | 0.1287474266 | | 3 | 0.6884590395 |
| | 4 | -0.2422948871 | | 8 | -0.0173693010 | | 4 | 0.2811723437 |
| | 5 | -0.0322448696 | | 9 | -0.0440882539 | | 5 | -0.2498464243 |
| | 6 | 0.0775714938 | | 10 | 0.0139810279 | | 6 | -0.1959462744 |
| | 7 | -0.0062414902 | | 11 | 0.0087460940 | | 7 | 0.1273693403 |
| | 8 | -0.0125807520 | | 12 | -0.0048703530 | | 8 | 0.0930573646 |
| | 9 | 0.0033357253 | | 13 | -0.0003917404 | | 9 | -0.0713941472 |
| N=12 | 0 | 0.1115407434 | | 14 | 0.0006754494 | | 10 | -0.0294575368 |
| | 1 | 0.4946238904 | | 15 | -0.0001174768 | | 11 | 0.0332126741 |
| | 2 | 0.7511339080 | | | | | 12 | 0.0036065536 |
| | 3 | 0.3152503517 | | | | | 13 | -0.0107331755 |
| | 4 | -0.2262646940 | | | | | 14 | 0.0013953517 |
| | 5 | -0.1297668676 | | | | | 15 | 0.0019924053 |
| | 6 | 0.0975016056 | | | | | 16 | -0.0006858567 |
| | 7 | 0.0275228655 | | | | | 17 | -0.0001164669 |
| | 8 | -0.0315820393 | | | | | 18 | 0.0000935887 |
| | 9 | 0.0005538422 | | | | | 19 | -0.0000132642 |
| | 10 | 0.0047772575 | | | | | | |
| | 11 | -0.0010773011 | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 ค่า N เป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่แสดงถึงลำดับ (Order) ของเวฟเล็ตแม่ชนิดนั้นๆ ในบางครั้งได้มีความจำกัดความว่า N เป็นตัวเลขที่ใช้แสดงจำนวนของสัมประสิทธิ์ตัวกรอง (Filter) ของเวฟเล็ตแม่ตัวนั้นๆ และยังแสดงความราบเรียบ (Smooth) ของเวฟเล็ตแม่ตัวนั้นๆ อีกด้วย เช่น db4 หมายถึงเวฟเล็ตแม่แบบ daubechies ที่มีสัมประสิทธิ์การกรอง 4 ตัว, db20 หมายถึงเวฟเล็ตแม่แบบ daubechies ที่มีสัมประสิทธิ์การกรอง 20 ตัว โดยที่ db20 จะมีรูปร่างที่ราบเรียบกว่า db4 ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์ได้แสดงในตารางที่ 2.1

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมาใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ซึ่งทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาหลายช่วงความถี่ (สเกล) แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์และแปรความหมายต่อไป และสำหรับการเลือกเวฟเล็ตนั้นได้เลือกใช้เป็นแบบ daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซี้ยนต์ เช่น ความผิดพร่อง และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ที่น้อยเพียง 4 ตัว โดยแบ่งการนำการแปลงเวฟเล็ตมาใช้วิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1) การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (wavelet decomposition)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณกระแสและแรงดันออกมาในสเกลที่ 1- 5 ซึ่งในที่นี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง(detail) เท่านั้น

2) การรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction)

เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลให้มีขนาดเดียวกันหรืออยู่บนฐานเวลาเดียวกันจึงต้องทำการรวมกลับสัญญาณในแต่ละสเกลให้มีจำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับสัญญาณต้นแบบที่ทำการวิเคราะห์ และนอกจากนี้เพื่อให้การพิจารณาเห็นความแตกต่างมากขึ้นจึงยกกำลังสองสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกล ซึ่งสัมประสิทธิ์ทั้งหมดก็จะอยู่ในด้านบวก โดยที่รายละเอียดทั้งหมดจะได้กล่าวอยู่ในบทที่ 4

## 2.3 ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเป็นอัลกอลิทึมที่ใช้ในการแบ่งประเภทซึ่งได้รับการเสนอโดย Boser, Guyon และ Vapnik โดยซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในวงการชีววิทยาและในสายงานอื่นๆมากมายเนื่องด้วยความถูกต้องเที่ยงตรง และความสามารถในการรองรับข้อมูลที่มีความซับซ้อนมาก เช่น ข้อมูลทางรหัสพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นจะต้องเข้าใจถึงการทำงานของตัวซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน การศึกษาซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นผู้ศึกษาจะต้องเรียนรู้ในหลายๆอย่าง เช่น การตระเตรียมข้อมูล การเลือกใช้เคอร์เนล (Kernel) และสุดท้ายการเลือกค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนและเคอร์เนล หากไม่เข้าใจถึงกระบวนการเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนลดลง เนื้อหาในบทนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความเข้าใจซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนและสามารถประยุกต์ใช้กับตัวโครงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในกระบวนการเรียนรู้นั้น เครื่องมือการเรียนรู้ซึ่งในที่นี้ก็คือซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนจะได้รับข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง (Input) พร้อมกับระบุประเภทของตัวอย่างแต่ละตัว (Output) เพื่อให้เครื่องมือการเรียนรู้ได้เรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทเองอัตโนมัติโดยที่ไม่ต้องสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบาย ซึ่งทำให้เหมาะต่อการนำมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาใช้ในการระบบประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งโดยใช้ความสามารถในการเรียนรู้สำหรับการแบ่งคลาสข้อมูล โดยมีหลักการทำงานคล้ายๆกับการแบ่งคลาสเชิงเส้น จึงมีความจำเป็นจะต้องกล่าวถึงทฤษฎีการแบ่งคลาสเชิงเส้นในเบื้องต้นก่อนดังนี้

### 2.3.1 การแบ่งข้อมูลเชิงเส้น (linear classification)

การแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนนั้นโดยส่วนมากกระทำโดยการใช้ฟังก์ชันค่าจริง $f : X \subseteq R^n \to R$ โดยที่ อินพุท $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, ..., x_n\}'$ จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มข้อมูลชนิดบวก (Positive class) ถ้า $f(\mathbf{x}) \geq 0$ นอกนั้นจะจัดอยู่ในกลุ่มข้อมูลชนิดลบ (Negative class) โดยจะพิจารณาในกรณีที่ $f(\mathbf{x})$ เป็นฟังก์ชันเส้นตรงของ $\mathbf{x} \in X$ ดังนั้นจะได้

$$f(x) = <\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}> + b$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b$$

โดยที่ $(\mathbf{w}, b) \in R^n \times R$ เป็นตัวแปรที่ควบคุมฟังก์ชันและเกณฑ์การแบ่งคลาสซึ่งกำหนดโดย $\text{sgn}(f(\mathbf{x}))$ โดยที่จะให้ $\text{sgn}(f(0) = 1$ จากทฤษฎีการเรียนรู้นั้นบอกเป็นนัยว่าตัวแปรเหล่านี้นั้นจะได้มาจากข้อมูลตัวอย่าง

<u>นิยาม</u> กำหนดให้ $X$ แสดงถึงปริภูมิอินพุท และ $Y$ แสดงถึงเอาท์พุทโดเมน โดยปกติแล้ว $X \in R^n$ และ $Y = \{-1, 1\}$ สำหรับการแบ่งคลาสแบบออกเป็นสองคลาส และ $Y = \{1, 2, ..., m\}$ สำหรับการแบ่งคลาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกเป็นจำนวน $m$ คลาส และ $Y \in R$ สำหรับกระบวนการรีเกรสชัน (Regression) กลุ่มข้อมูลฝึกหัด (Training set) เป็นกลุ่มของข้อมูลตัวอย่าง (Examples) ซึ่งเรียกอีกชื่อว่าข้อมูลฝึกหัด (Training data) ซึ่งแสดงดังในสมการด้านล่างนี้

$$S = ((\mathbf{x}_1, y_1),...,(\mathbf{x}_l, y_l)) \subseteq (X \times Y)^l$$

โดยที่ $l$ คือจำนวนของข้อมูลตัวอย่าง (Number of examples) และให้ $\mathbf{x}_i$ เป็นข้อมูลตัวอย่าง และ $y_i$ เป็นคลาสของข้อมูลนั้นๆ

Rosenblatt's Perceptron

อัลกอลิทึมสำหรับการแบ่งคลาสเชิงเส้นได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Frank Rosenblatt ในปี ค.ศ. 1956 ซึ่งอัลกอลิทึมนี้จะเริ่มโดยใช้ค่าเริ่มต้น $\mathbf{w}_0$ (โดยปกติแล้ว $\mathbf{w}_0 = 0$) และค่าจะปรับเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ทุกครั้งที่มีข้อมูลถูกจัดคลาสผิด ตัวอัลกอลิทึมจะอัพเดทค่าเวคเตอร์ถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสโดยตรงดังแสดงในอัลกอลิทึมข้างล่าง

หากกระบวนการนี้สามารถหาระนาบในการแบ่งคลาสข้อมูลฝึกหัดได้อย่างถูกต้อง ในกรณีนี้จะกล่าวว่าข้อมูลนั้นสามารถถูกจัดแบ่งคลาสเชิงเส้นได้ หากไม่สามารถหาระนาบในการแบ่งคลาสข้อมูลฝึกหัดได้ จะกล่าวว่าข้อมูลนั้นไม่สามารถถูกจัดแบ่งคลาสเชิงเส้นได้ นิยามข้างล่างนั้นแสดงถึงจำนวนครั้งในการทำซ้ำนั้นขึ้นกับปริมาณที่เรียกว่ามาร์จิ้น (Margin) ปริมาณนี้จะมีบทบาทสำคัญอย่างมากในทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

นิยาม กำหนดให้มาร์จิ้นเชิงฟังก์ชัน (Functional margin) ของข้อมูลฝึกหัดหนึ่งตัว $(\mathbf{x}_i, y_i)$ เทียบกับระนาบ $(\mathbf{w}, b)$ เป็นปริมาณดังนี้

$$\gamma_i = y_i(<\mathbf{w} \cdot x_i> + b)$$

โดยที่ $\gamma_i > 0$ หมายถึงการแบ่งคลาสของข้อมูลฝึกหัดหนึ่งตัว $(\mathbf{x}_i, y_i)$ ได้ถูกต้อง

การกระจายของมาร์จิ้นเชิงฟังก์ชัน (Functional margin) ของระนาบ $(\mathbf{w}, b)$ เทียบกับกลุ่มข้อมูลฝึกหัด (Training set) S คือการกระจายของมาร์จิ้นของข้อมูลแต่ละตัวในกลุ่มข้อมูลฝึกหัด ในบางครั้งจะใช้ค่าน้อยที่สุดของการกระจายของมาร์จิ้นเป็นค่ามาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันของระนาบ $(\mathbf{w}, b)$ เทียบกับกลุ่มข้อมูลฝึกหัด S. จากนิยามทั้งสอง ถ้าทำการแทนมาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันด้วยมาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

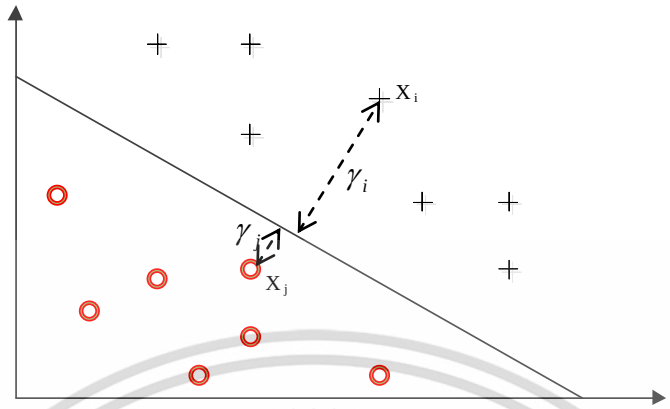
(Geometric margin) จะได้ค่า $(\frac{1}{\|\mathbf{w}\|}\mathbf{w}, \frac{1}{\|\mathbf{w}\|}b)$ สำหรับการนอมอลไลซ์ฟังก์ชันเส้นตรง ซึ่งค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตเป็นค่าระยะห่างในแนวตั้งฉากจากเส้นขอบเขตการแบ่งคลาสไปยังข้อมูลบนปริภูมิอินพุท และสุดท้ายมาร์จิ้นของชุดข้อมูลฝึกหัด S คือ ค่า มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตที่มากที่สุดจากระนาบทั้งหมด ระนาบที่ให้ค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตที่มากที่สุดนั้นจะเรียกว่า Maximum margin hyperplane และขนาดของมาร์จิ้นนั้นจะมีค่าเป็นบวกสำหรับกลุ่มข้อมูลที่สามารถแบ่งคลาสด้วยฟังก์ชันเส้นตรง

*Perceptron Algorithm*

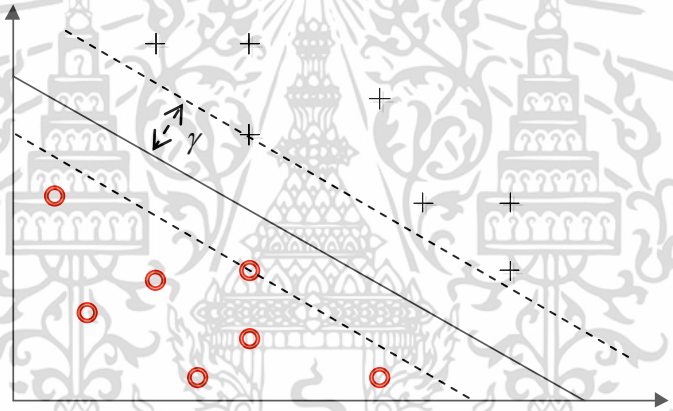
$Given: training\ set\ S\ and\ learning\ rate\ \eta \in R^+$
$\mathbf{w}_0 \leftarrow 0\ ;\ b_0 \leftarrow 0\ ;\ k \leftarrow 0$
$\mathrm{R} \leftarrow \max_{1 \le i \le l} \|\mathbf{x}_i\|$
*repeat*
  *for* $i = 1$ *to* $l$
    *if* $y_i(<\mathbf{w}_k \cdot \mathbf{x}_i> + b_k) \le 0$ *then*
      $\mathbf{w}_{k+1} \leftarrow \mathbf{w}_k + \eta y_i \mathbf{x}_i$
      $b_{k+1} \leftarrow b_k + \eta y_i \mathrm{R}^2$
      $k \leftarrow k + 1$
    *end if*
  *end for*
*until* *no mistakes made within the for loop*
*return* $(\mathbf{w}_k, b_k)$ *where* $k$ *is the number of mistakes*

รูป 2.9 แสดงมาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต สำหรับข้อมูลสองจุดเทียบกับระนาบ (Hyperplane) บนปริภูมิสองมิติ โดยที่ มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต จะมีค่าเท่ากับมาร์จิ้นเชิงฟังก์ชัน ถ้าเวคเตอร์ถ่วงน้ำหนักมีขนาดเป็นหนึ่งหน่วย $(\|\mathbf{w}\| = 1)$ รูป 2.10 แสดงมาร์จิ้นของกลุ่มข้อมูลฝึกหัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.9 มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต ของข้อมูลสองจุด




รูป 2.10 มาร์จิ้นของกลุ่มข้อมูลฝึกหัด

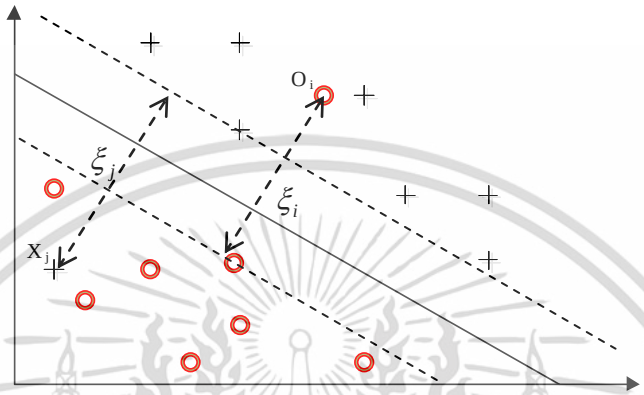
นิยาม กำหนดค่า $\gamma > 0$ จะสามารถนิยาม Margin slack variable ($\xi$) ของข้อมูลฝึกหัดหนึ่งตัว $(\mathbf{x}_i, y_i)$ เทียบกับระนาบ $(\mathbf{w}, b)$ และ มาร์จิ้นเป้าหมาย (Target margin, $\gamma$ ) ดังนี้

$$\xi((\mathbf{x}_i, y_i), (\mathbf{w}, b), \gamma) = \xi_i = \max(0, \gamma - y_i(<\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i> + b))$$

ซึ่งค่า Margin slack variable นี้เป็นปริมาณที่บ่งบอกความห่างของข้อมูลจากค่ามาร์จิ้นเป้าหมาย (Target margin, $\gamma$ ) จากระนาบ (Hyperplane) ถ้า $\xi_i > \gamma$ แล้วนั่นหมายถึง ข้อมูลอินพุท $\mathbf{x}_i$ นั้นถูกจัดผิดคลาสโดยระนาบ $(\mathbf{w}, b)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.11 แสดงถึงขนาดของ Margin slack variable สำหรับข้อมูลสองตัวที่ถูกจัดแบ่งผิดคลาส โดยระนาบ $(\mathbf{w}, b)$ ส่วนข้อมูลตัวอื่นๆนั้นมีค่า Margin slack variable เท่ากับศูนย์เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้มีค่ามาร์จิ้น มากกว่าค่ามาร์จิ้นเป้าหมาย




รูป 2.11 slack variable สำหรับปัญหาการแบ่งคลาส

Perceptron Algorithm (dual form)

*Given training set S*

$\alpha \leftarrow 0\ ;\ b \leftarrow 0$

$R \leftarrow \max_{1 \le i \le l} \|\mathbf{x}_i\|$

*repeat*

*for* $i = 1$ *to* $l$

*if* $y_i(\sum_{j=1}^{l} \alpha_i y_i < \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{x}_i > + b) \le 0$ *then*

$\alpha_i \leftarrow \alpha + 1$

$b \leftarrow b + y_i R^2$

*end if*

*end for*

*until no mistake made within the for loop*

*return* $(\alpha, b)$ *to define function* $h(x)$ *of equation* (2.1)

อัลกอลิทึมการแบ่งคลาสนั้นทำงานโดยการบวกค่าอินพุทให้กับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสำหรับกรณีที่เกิดการจัดคลาสให้ข้อมูลที่เป็นคลาสบวกผิด และจะทำการลบค่าอินพุทออกจากเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่เกิดการจัดคลาสให้ข้อมูลที่เป็นคลาสลบผิด หากสมมติว่า ค่าเริ่มต้นของเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์แล้วจะได้สมการเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักดังนี้

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$$

โดยที่เครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ของอินพุท $\mathbf{x}_i$ นั้นได้จากการแบ่งคลาส $y_i$ และค่า $\alpha_i$ นั้นมีค่าเป็นบวกและเป็นสัดส่วนกับจำนวนครั้งที่เกิดการจัดคลาสอินพุท $\mathbf{x}_i$ ผิด และทำให้เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง ข้อมูลอินพุทตัวที่มีการแบ่งคลาสผิดน้อยครั้งจะมีค่า $\alpha_i$ น้อย ในขณะที่ข้อมูลตัวที่มีการแบ่งคลาสผิดพลาดบ่อยครั้งจะมีค่า $\alpha_i$ มาก ค่า $\alpha_i$ นี้มักเรียกว่า Embedding strength ของรูปแบบอินพุท $\mathbf{x}_i$

Multi-class Discrimination

การแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสที่ได้กล่าวมาตั้งแต่ต้นนั้นสามารถกระทำได้โดยการหาค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก $\mathbf{w}_i$ กับค่าไบอัส $b_i$ สำหรับแต่ละคลาส ทุกครั้งที่มีการจัดแบ่งคลาสให้แก่ข้อมูลตัวใหม่นั้นค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสจะได้รับการคิดค่าใหม่และข้อมูลตัวนั้นจะถูกจัดอยู่ในคลาส 1 (positive class) ถ้า $< \mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x} > + b_1 \geq < \mathbf{w}_{-1} \cdot \mathbf{x} > + b_{-1}$ นอกเหนือจากนั้นจะถูกจัดอยู่ในคลาส -1 (negative class) โดยที่สมมติฐานนี้จะเสมือนกับการแบ่งคลาสเป็นสองคลาสโดยใช้ระนาบ hyperplane $(\mathbf{w}, b)$ ถ้าแทนค่า $\mathbf{w} = \mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_{-1}, b = b_1 - b_{-1}$

สำหรับการแบ่งคลาสออกเป็นหลายคลาสนั้นโดเมนของเอาท์พุทคือ $Y = \{1,2,...,m\}$ การจัดแบ่งคลาสข้อมูลออกเป็น $m$ คลาสของเครื่องมือการเรียนรู้เชิงเส้นนั้น (Linear learning machine) นั้นไม่มีอะไรซับซ้อน โดยแต่ละคลาสจะมีค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสของแต่ละคลาส $(\mathbf{w}_i, b_i),\ i \in \{1,2,...,m\}$ และฟังก์ชันการแบ่งคลาสจะเป็นดังนี้

$$c(x) = \arg\max_{1 \leq i \leq m} (< \mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x} > + b_i)$$

### 2.3.2 การเรียนรู้บนปริภูมิมิติสูง (Feature space)

ความซับซ้อนของฟังก์ชันเป้าหมายสามารถเรียนรู้ได้โดยขึ้นกับรูปแบบของข้อมูลที่นำเสนอ และความยากของการเรียนรู้นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบของการนำเสนอข้อมูล ในทางอุดมคติควรเลือกใช้รูปแบบการนำเสนอข้อมูลนั้นจะเหมาะกับปัญหาที่ต้องการเรียนรู้ ดังนั้นกลยุทธ์ของกระบวนการเรียนรู้ในเครื่องมือการเรียนรู้นั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับรูปแบบที่ข้อมูลได้ถูกนำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{x} = (x_1,...,x_n) \mapsto \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\phi_1(\mathbf{x}),...,\phi_n(\mathbf{x}))$$

ขั้นตอนนี้เสมือนกับการแมพปิ้ง (Mapping) ปริภูมิอินพุท (Input space) $X$ ไปยังปริภูมิใหม่ $F = \{\phi(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in X\}$

ตัวอย่าง พิจารณาฟังก์ชันเป้าหมาย

$$f(m_1, m_2, r) = C\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ซึ่งเป็นกฎของนิวตันที่ว่าด้วยแรงดึงดูดระหว่างมวล $m_1, m_2$ และระยะห่าง $r$ กฎนี้นั้นประกอบด้วยปริมาณของมวลและระยะทาง ซึ่งจากความสัมพันธ์ของกฎของนิวตันนี้จะทำให้รู้ว่าเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นไม่สามารถใช้กับฟังก์ชันเป้าหมายดังกล่าวได้ แต่ว่าหากลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุทเล็กน้อยดังนี้

$$(m_1, m_2, r) \mapsto (x, y, z) = (\ln m_1, \ln m_2, \ln r)$$

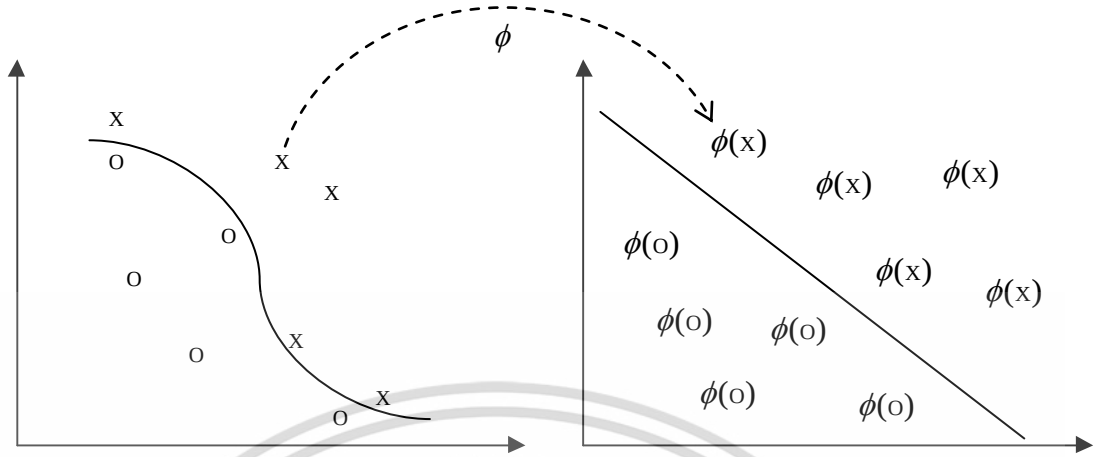
โดยนำเสนอข้อมูลในรูปแบบดังนี้

$$g(x, y, z) = \ln f(m_1, m_2, r) = \ln C + \ln m_1 + \ln m_2 - 2\ln r = c + x + y - 2z$$

ซึ่งสามารถเรียนรู้ได้โดยใช้เครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้น

การแมพปิ้ง (Mapping) ข้อมูลจากปริภูมิหนึ่งไปยังอีกปริภูมิหนึ่งนั้นเป็นที่รู้จักกันมานานในเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้น ซึ่งทำให้มีเทคนิคมากมายในการหารูปแบบการแสดงข้อมูลที่ดีที่สุด โดยที่ปริมาณที่ใช้ในการแทนข้อมูลบนปริภูมิใหม่ซึ่งจะเรียกว่า Features ในขณะที่ปริมาณที่ใช้ในการแทนข้อมูลบนปริภูมิเดิมจะเรียกว่า Attributes ซึ่งการหารูปแบบการแสดงข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเรียกว่า Feature selection โดยที่ปริภูมิ $X$ นั้นเรียกว่าปริภูมิอินพุท (Input space) ในขณะที่ปริภูมิใหม่ $F = \{\phi(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in X\}$ นั้นจะเรียกว่าปริภูมิมิติสูง (Feature space) รูป 2.12 แสดงตัวอย่างของการแมพปิ้งจากปริภูมิอินพุทสองมิติไปยังปริภูมิมิติสูงสองมิติ ซึ่งข้อมูลนั้นไม่สามารถถูกแบ่งด้วยฟังก์ชันเส้นตรงบนปริภูมิอินพุท แต่สามารถแบ่งด้วยฟังก์ชันเส้นตรงบนปริภูมิมิติสูง จุดประสงค์ของหัวข้อนี้คือเพื่อที่จะแสดงว่าจะสามารถทำการแมพปิ้งให้ไปอยู่ในปริภูมิที่สูงขึ้นได้อย่างไรซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลด้วยฟังก์ชันเส้นตรงได้ง่ายกว่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.12 แสดง Feature map ซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลได้โดยฟังก์ชันเส้นตรง

มีวิธีการมากมายในการทำ Feature selection โดยที่บ่อยครั้งการหาเซ็ตของ features ที่เล็กที่สุดแต่ยังคงเก็บข้อมูลสำคัญไว้อย่างครบถ้วนซึ่งวิธีการนี้ถูกเรียกว่า dimensionality reduction

$$\mathbf{x} = (x_1, \ldots, x_n) \mapsto \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\phi_1(\mathbf{x}), \ldots, \phi_d(\mathbf{x})), \qquad d < n$$

ซึ่งมีประโยชน์ด้านประสิทธิภาพในการคำนวณ

ตัวอย่าง พิจารณากฎของนิวตันที่ว่าด้วยแรงดึงดูดระหว่างมวล แต่ว่าครั้งนี้กำหนดให้ตำแหน่งของมวลนั้นถูกแสดงโดยองค์ประกอบสามตัวที่บ่งบอกตำแน่งพร้อมกับปริมาณของมวล ดังนี้

$$\mathbf{x} = (p_1^x, p_1^y, p_1^z, p_2^x, p_2^y, p_2^z, m_1, m_2)$$

วิธีการหนึ่งในการทำ Dimensionality reduction สามารถทำได้โดยการ แมพปิ้ง $\phi : R^8 \mapsto R^3$

$$\mathbf{x} = (p_1^x, p_1^y, p_1^z, p_2^x, p_2^y, p_2^z, m_1, m_2) \mapsto \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\sqrt{\sum_{i \in \{x,y,z\}} (p_1^i - p_2^i)^2}, m_1, m_2)$$

ซึ่งยังคงสามารถรักษาข้อมูลที่สำคัญทั้งหมดไว้ได้

เพื่อที่จะเรียนรู้ความสัมพันธ์แบบ ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเครื่องมือเรียนรู้แบบเชิงเส้นจึงจำเป็นต้องเลือกหากลุ่มของลักษณะของ ความไม่เป็นเชิงเส้น และเขียนข้อมูลอินพุทในรูปแบบใหม่ ลักษณะที่กล่าวมานี้เหมือนกับการทำแมพปิ้งข้อมูลอินพุทด้วยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นให้ไปอยู่ในปริภูมิมิติสูงที่ทำให้เครื่องมือการเรียนรู้เชิงเส้นสามารถแบ่งคลาสให้กับข้อมูลนั้นได้ ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันการแบ่งคลาสดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N} w_i \phi_i(\mathbf{x}) + b$$

โดยที่ $\phi : X \to F$ คือฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้แมพปิ้งข้อมูลอินพุทจากปริภูมิอินพุทไปยังปริภูมิที่สูงขึ้น กระบวนการนี้เหมือนกับการสร้างเครื่องมือการเรียนรู้แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยขั้นแรกให้ทำการแมพปิ้งข้อมูลอินพุทจากปริภูมิที่ไม่สามารถแบ่งคลาสได้ด้วยเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นไปยังปริภูมิซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลอินพุทให้อยู่ในคลาสแต่ละคลาสอย่างถูกต้องได้โดยใช้เครื่องมือการเรียนรู้เชิงเส้น โดยการใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นในการแมพปิ้ง

ตามที่กล่าวมาก่อนหน้านั้นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นคือสามารถเขียนออกมาให้อยู่ในรูปแบบ Dual representation ซึ่งหมายความว่าฟังก์ชันการแบ่งคลาสสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของการคูณกันระหว่างเวกเตอร์ของตัวข้อมูลฝึกหัดกับตัวข้อมูลที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i \langle \phi(\mathbf{x}_i) \cdot \phi(\mathbf{x}) \rangle + b$$

ถ้าสามารถหาวิธีคำนวณผลคูณเชิงสเกลาร์ $\langle \phi(\mathbf{x}_i) \cdot \phi(\mathbf{x}) \rangle$ บน ปริภูมิมิติสูง ได้โดยตรงเหมือนกับตัว $\langle \phi(\mathbf{x}_i) \cdot \phi(\mathbf{x}) \rangle$ ซึ่งเป็นตัวอินพุทดั้งเดิม โดยสามารถรวมวิธีการทั้งสองขั้นตอนซึ่งใช้ในการสร้างเครื่องมือการเรียนรู้แบบ ไม่เป็นเชิงเส้น ได้ (Non-linear learning machine) และจะเรียกวิธีการคำนวณแบบนี้ว่าเคอร์เนลฟังก์ชัน (Kernel function)

นิยาม เคอร์เนล คือฟังก์ชัน $K$ สำหรับทุก $\mathbf{x}, \mathbf{z} \in X$

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \langle \phi(\mathbf{x}) \cdot \phi(\mathbf{z}) \rangle$$

โดยที่ $\phi$ คือ ฟังก์ชันในการแมพปิ้งจากโดเมน $X$ ไปยัง ปริภูมิมิติสูง $F$

การเขียนฟังก์ชันการเรียนรู้ในรูปแบบของ Dual representation นั้นให้ผลลัพธ์ที่สำคัญคือมิติของปริภูมิมิติสูงจะไม่มีผลต่อการคำนวณ

จำนวนขั้นตอนการดำเนินการประมวลผลของผลคูณเชิงสเกลาร์ในการหาเคอร์เนลฟังก์ชันนั้นไม่ได้แปรผันไปกับจำนวนของ Feature แม้ว่า Feature นั้นๆจะไม่ได้แสดงออกมาในรูปของ Feature vector อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

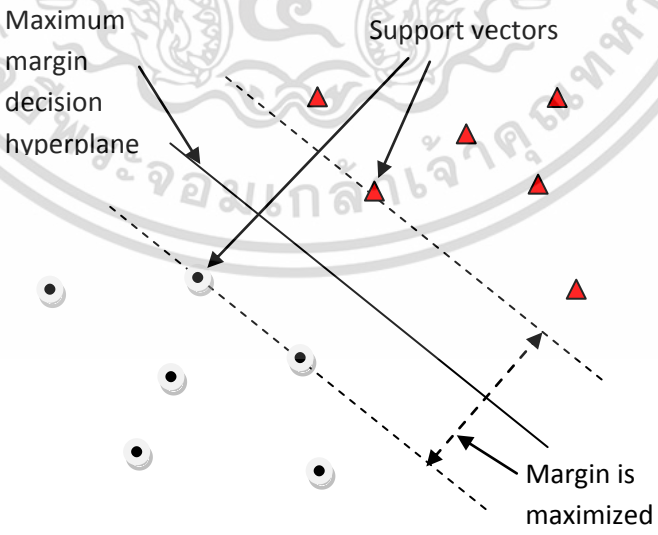
การใช้เคอร์เนลทำให้สามารถแมพปิ้งข้อมูลไปยังปริภูมิมิติสูง และเพื่อที่จะใช้เครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นได้บนปริภูมิ (Space) นั้น ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันเกณฑ์การแบ่งคลาสดังนี้

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b$$

การใช้เคอร์เนลฟังก์ชันเป็นเส้นทางลัดในการคำนวณที่น่าสนใจ หากจะใช้วิธีการนี้จำเป็นต้องสร้างปริภูมิมิติสูงซึ่งค่อนข้างซับซ้อนเสียก่อน แล้วคำนวณผลลัพธ์ของผลคูณเชิงสเกลาร์ และสุดท้ายก็หาวิธีการคำนวณโดยตรงโดยใช้ค่าในรูปแบบของอินพุทเดิม

### 2.3.3 ทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

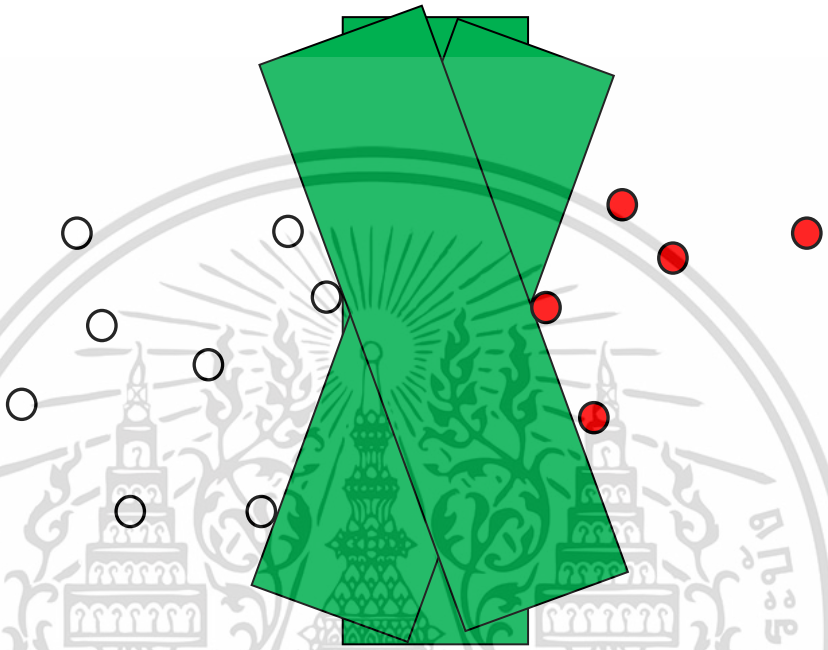
สำหรับการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสนั้นสามารถแบ่งโดยเส้นตรงได้หลายแบบ ซึ่งเส้นตรงที่สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสได้ชัดเจนย่อมดีกว่าเส้นตรงที่แบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสโดยที่มีข้อมูลบางตัวใกล้เส้นตรงที่ทำการแบ่งข้อมูลมากเกินไป ซึ่งซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะหาเกณฑ์การแบ่งคลาสหรือเส้นตรงที่ใช้แบ่งคลาสที่สามารถแบ่งคลาสโดยให้ข้อมูลที่แบ่งนั้นอยู่ห่างจากเส้นแบ่งมากที่สุดซึ่งเป็นเส้นตรงที่ใช้ในการแบ่งคลาสที่ดีที่สุดซึ่งระยะห่างระหว่างเส้นตรงกับจุดข้อมูลที่ใกล้ที่สุดซึ่งเรียกว่ามาร์จิ้น (Margin) และจุดข้อมูลที่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากที่สุดซึ่งเรียกว่าซัพพอร์ตเวคเตอร์ (บนปริภูมิเวคเตอร์ จุดข้อมูลสามารถมองเป็นเวคเตอร์ระหว่างจุดกำเนิดกับจุดข้อมูลนั้น) รูปที่ 2.13 แสดงมาร์จิ้นกับซัพพอร์ตเวคเตอร์ สำหรับการแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงของข้อมูลตัวอย่าง




รูปที่ 2.13 แสดงมาร์จิ้นกับซัพพอร์ตเวคเตอร์สำหรับการแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงของข้อมูลตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแบ่งคลาสด้วยมาร์จิ้นมากๆนั้น โดยการบังคับให้มาร์จิ้นมีค่ามากจะทำให้จำนวนฟังก์ชันที่สามารถเป็นไปได้นั้นลดลง จากรูปจะเห็นว่าจำนวนมุมของการวางตัวของแถบการแบ่งคลาสนั้นมีน้อยกว่าเส้นการแบ่งคลาส



รูปที่ 2.14 แสดงแถบการแบ่งคลาสที่เป็นไปได้

การทำให้มาร์จิ้นมีค่ามากที่สุดนั้นเป็นแนวโน้มที่ดีเพราะจุดข้อมูลที่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากเกินไปนั้นแสดงถึงการแบ่งคลาสที่ไม่มีความเสถียร ซึ่งมีโอกาสที่จะแบ่งคลาสผิดเกิดขึ้นประมาณ 50% การแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงที่ให้มาร์จิ้นมากจะทำให้เกิดความเสถียรในการแบ่งคลาส

การแบ่งคลาสโดยใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะทำให้ได้ค่ามาร์จิ้นมากที่สุดจากเส้นแบ่งคลาส เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นแบ่งคลาสและหากทำการใส่แถบการแบ่งคลาสไปแทนที่เส้นแบ่งคลาสจะเห็นได้ว่ามีโอกาสที่สามารถใส่แถบแบ่งคลาสแทนเส้นแบ่งคลาสได้ไม่มากนักซึ่งส่งผลให้การใช้หน่วยความจำลดลงด้วยและยังเพิ่มความถูกต้องในการแบ่งคลาสอีกด้วย

ดังนั้นซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนคือเครื่องมือการเรียนรู้ที่ใช้ในการหาเกณฑ์การแบ่งคลาสโดยที่จะหาเกณฑ์การแบ่งคลาสที่ดีที่สุด คำถามก็คือจะสามารถหาเกณฑ์การแบ่งคลาสที่ดีที่สุดได้อย่างไร

สิ่งที่บ่งบอกว่าเกณฑ์การแบ่งคลาสที่ได้นั้นดีหรือไม่เพียงใดนั้นจะวัดกันที่ค่ามาร์จิ้น ซึ่งค่ามาร์จิ้นที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นมี มาร์จิ้นเชิงฟังก์ชัน และ มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต ซึ่งค่า มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต นั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการสเกล (Scaling) และค่ามาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันกับมาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตจะมีค่าเท่ากันเมื่อ $\|\mathbf{w}\|=1$ แต่เนื่องจากสามารถทำการสเกล (Scaling) ค่ามาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันได้เพื่อความง่ายในการแก้ปัญหาซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนจึงทำการสเกล (Scaling) โดยทำให้มาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันของข้อมูลทุกตัวมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 1 จะได้

$$\gamma_i = y_i(<\mathbf{w}\cdot x_i>+b) \geq 1$$

และจากข้อมูลแต่ละตัวนั้นมีระยะห่างจากเส้นแบ่งคลาสเท่ากับ $\gamma_i = \frac{y_i(<\mathbf{w}\cdot x_i>+b)}{\|\mathbf{w}\|}$ ทำให้ค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต คือ $\rho = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ จะเห็นได้ว่าหากต้องการให้ค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตมีค่ามากดังนั้นต้องหาค่า $\mathbf{w}$ กับ $b$ ที่ทำให้

1. $\rho = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ มีค่ามากที่สุด
2. สำหรับทุก $(\mathbf{x}_i, y_i) \in S, y_i(\mathbf{w}\cdot\mathbf{x}+b) \geq 1$

ซึ่งการทำให้มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตมีค่ามากที่สุดนั้นก็คือการทำให้ $\frac{\|\mathbf{w}\|}{2}$ มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งก็คือสมการมาตรฐานของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนโดยการหาผลเฉลยของสมการเงื่อนไขดังนี้

หาค่า $\mathbf{w}$ และ $b$ ที่ทำให้

1. $\frac{1}{2}\|\mathbf{w}\|^2$ มีค่าน้อยที่สุด
2. สำหรับทุก $(\mathbf{x}_i, y_i) \in S, y_i(\mathbf{w}\cdot\mathbf{x}+b) \geq 1$

โดยเงื่อนไขและสมการการผลเฉลยข้างบนนั้นเป็นสมการและเงื่อนไขที่ทำให้สามารถหาฟังก์ชันการแบ่งคลาสให้แก่ข้อมูลตัวอย่างได้อย่างถูกต้อง 100 % โดยที่มีระยะมาร์จิ้นมากที่สุด ซึ่งสมการและเงื่อนไขเหล่านี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงหากข้อมูลที่ทำการแบ่งคลาสนั้นเป็นข้อมูลที่สามารถแบ่งได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น ในทางปฏิบัติแล้วข้อมูลส่วนใหญ่ไม่สามารถถูกแบ่งคลาสได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นและถึงแม้จะเป็นอย่างนั้นการทำให้ระยะมาร์จิ้น มีค่ามากขึ้นสามารถทำได้โดยยอมให้เกิดการแบ่งคลาสของข้อมูลบางตัวมีโอกาสผิดพลาดมากขึ้น แน่นอนการยอมให้เกิดการแบ่งข้อมูลบางตัวมีความผิดพลาดมากขึ้นนั้นจึงจำเป็นจะต้องกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมเข้าไปในสมการผลเฉลยข้างต้น โดยใช้ตัวแปร $\xi$ (Margin slack variable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามาเป็นตัวกำหนดโอกาสความผิดพลาดในการแบ่งคลาสของฟังก์ชันการแบ่งคลาสที่ได้ จะได้สมการผลเฉลยตามสมการข้างล่างนี้

$$y_i(\mathbf{w}\cdot\mathbf{x}_i+b)\geq 1-\xi_i, \qquad i=1,2,...,n;$$

โดยที่ $\xi\geq 0$ คือ Margin slack variable ที่ยอมให้ข้อมูลสามารถอยู่ในระยะมาร์จิ้นได้ ($0\leq\xi\leq 1$ ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า margin error) หรือบ่งบอกว่าข้อมูลมีการจัดแบ่งคลาสผิด ($\xi\geq 1$ ) เนื่องจากข้อมูลถูกแบ่งคลาสผิดพลาดสิ่งทำให้ค่า Margin slack variable มีค่าเกิน 1 ดังนั้น $\sum_i\xi_i$ จะขึ้นกับจำนวนการแบ่งคลาสผิดของข้อมูลชุดนั้น ดังนั้นเงื่อนไขที่ว่าต้องทำให้ค่ามาร์จิ้น มีค่ามากที่สุดนั่นก็คือค่า $\frac{1}{2}\|\mathbf{w}\|^2$ มีค่าน้อยที่สุดจะต้องรวมเอาพจน์ $C\sum_i\xi_i$ เพื่อที่จะปรับการแบ่งคลาสผิดพลาดกับ Margin slack varaible ดังนั้นสมการผลเฉลยและเงื่อนไขจะกลายเป็นดังนี้

$$\min imize\ \frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^{n}\xi_i$$

$$subject\ to:\ y_i(w\cdot x_i+b)\geq 1-\xi_i, \qquad \xi_i\geq 0$$

โดยที่ค่าคงที่ $C$ เป็นตัวกำหนดความสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างการทำให้ระยะมาร์จิ้นที่มีค่ามากที่สุด กับการทำให้มีจำนวนข้อมูลที่มีโอกาสเกิดการแบ่งคลาสผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งสมการข้างบนนี้ถูกเรียกว่า Soft-margin SVM ซึ่งได้รับการนำเสนอโดย Cortes และ Vapnik เมื่อใช้วิธีการของลากรองจ์มัลติพลายเออร์ (Lagrange multiplier) จะได้สมการผลเฉลยในรูปแบบ Dual form ดังนี้

$$\max imize\ \sum_{i=1}^{n}\alpha_i-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}y_iy_j\alpha_i\alpha_j\mathbf{x}_i\mathbf{x}_j$$

$$subject\ to:\ \sum_{i=1}^{n}y_i\alpha_i=0, \qquad 0\leq\alpha_i\leq C$$

ข้อมูล $\mathbf{x}_i$ ซึ่ง $\alpha_i>0$ คือข้อมูลที่อยู่ในระยะบนเส้นมาร์จิ้น หรืออยู่ในระยะมาร์จิ้น ถ้าหากใช้สมการผลเฉลยแบบ Soft-margin SVM ในการหาฟังก์ชันการแบ่งคลาส ซึ่งเรียกข้อมูลเหล่านี้ว่าซัพพอร์ตเวคเตอร์ (Support vectors) เช่นกัน

รูปแบบ Dual form ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นขึ้นกับข้อมูลที่ผ่านกระบวนการคูณเชิงสเกลาร์ (Inner product) ซึ่งผลคูณเชิงสเกลาร์นี้สามารถแทนด้วยการใช้เคอร์เนลแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งก็คือการหาฟังก์ชันการแบ่งคลาสที่ให้ระยะมาร์จิ้นมากๆในปริภูมิมิติสูงของเคอร์เนลโดยปกติแล้วการหาผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problem) นั้นนิยมหาในรูปแบบของ Dual form แต่ในช่วงหลังมานี้เป็นที่ทราบกันว่า Primal form นั้นเป็นเหตุทำให้การเรียนรู้แบบใช้เคอร์เนลที่มีประสิทธิภาพมาก

กระบวนการ Quadratic programming (QP)

หลังจากที่ทำการจัดเตรียมข้อมูลเรียบร้อยแล้ว และทดลองหาค่าตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีเรียบร้อยแล้ว จะเริ่มนำข้อมูลและตัวแปรเหล่านั้นมาเข้ากระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในเบื้องต้นว่าซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นเป็นทฤษฎีการเรียนรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งคลาสข้อมูลได้โดยสามารถหาฟังก์ชันการแบ่งคลาสที่สามารถแบ่งข้อมูลได้โดยให้ระยะมาร์จิ้นที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งการจะหาค่าฟังก์ชันการแบ่งคลาสนี้ได้นั้นทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นได้อาศัยทฤษฎี Quadratic programming เข้ามาช่วยหาผลเฉลยสมการเงื่อนไขให้แก่ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ซึ่งสมการเงื่อนไขของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนคือ

$$\max imize \sum_{i=1}^{n} \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} y_i y_j \alpha_i \alpha_j \mathbf{x}_i \mathbf{x}_j$$

$$subject\ to: \sum_{i=1}^{n} y_i \alpha_i = 0, \qquad 0 \le \alpha_i \le C$$

ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆนั้นจะหาได้จากกระบวนการที่จะอธิบายต่อจากนี้ ตัวแปรที่ต้องการจากสมการผลเฉลยนี้คือตัวแปร $\alpha$ ซึ่งจะนำมาทำการสร้างฟังก์ชันการแบ่งคลาสโดยแทนลงในสมการข้างล่างนี้ก็จะได้ฟังก์ชันการแบ่งคลาสออกมาเป็นผลลัพธ์

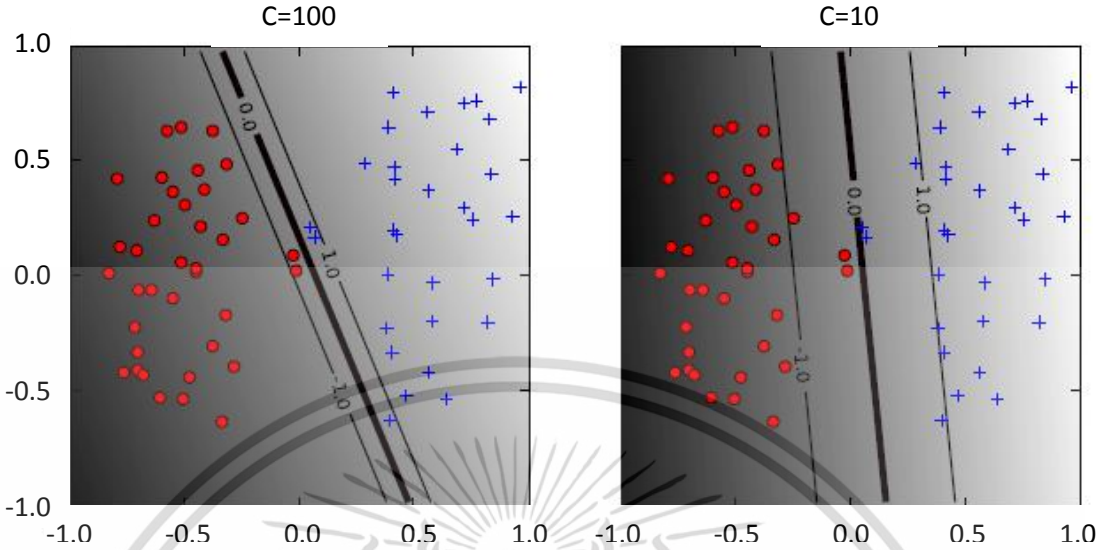
$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b$$

**2.3.4 ผลกระทบของพารามิเตอร์ของเคอร์เนลกับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน**

การเรียนรู้ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนจะหาระยะมาร์จิ้นที่มากที่สุด โดยการกำหนดค่าตัวแปร $\alpha_i$ และ $b$ ซึ่งซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นยังมีกลุ่มของตัวแปรซึ่งเรียกว่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) อยู่ เช่น soft margin constant $C$ และตัวแปรต่างๆของเคอร์เนลฟังก์ชัน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับประสิทธิภาพในการแบ่งคลาสของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ในส่วนนี้จะทำการแสดงถึงผลกระทบของไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) กับประสิทธิภาพในการแบ่งคลาสของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

โดยจะเริ่มการวิเคราะห์ตัวแปรไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters)โดยเริ่มจาก soft-margin constant $C$ ซึ่งมีหน้าที่ซึ่งถูกแสดงในรูป 2.15 สำหรับค่า soft-margin constant ที่มีค่ามากนั้นจะยิ่งให้ระยะ margin นั้นมีค่าน้อยลง ซึ่งแสดงในรูป 2.15 ด้านซ้าย ซึ่งมีข้อมูลสองตัวอยู่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากซึ่งส่งกับการวางตัวของเส้นแบ่งคลาสทำให้ hyperplane ที่ได้นั้นใกล้กับข้อมูลตัวอื่นๆอีกด้วย เมื่อค่า $C$ มีค่าลดลง (ตามรูป 2.15 ด้านขวา) จุดเหล่านั้นจะกลายเป็น margin error การวางตัวของ hyperplane ก็จะเปลี่ยนไป ทำให้ได้ค่าระยะ margin ที่มีค่ามากขึ้นมากสำหรับข้อมูลตัวที่เหลืออยู่

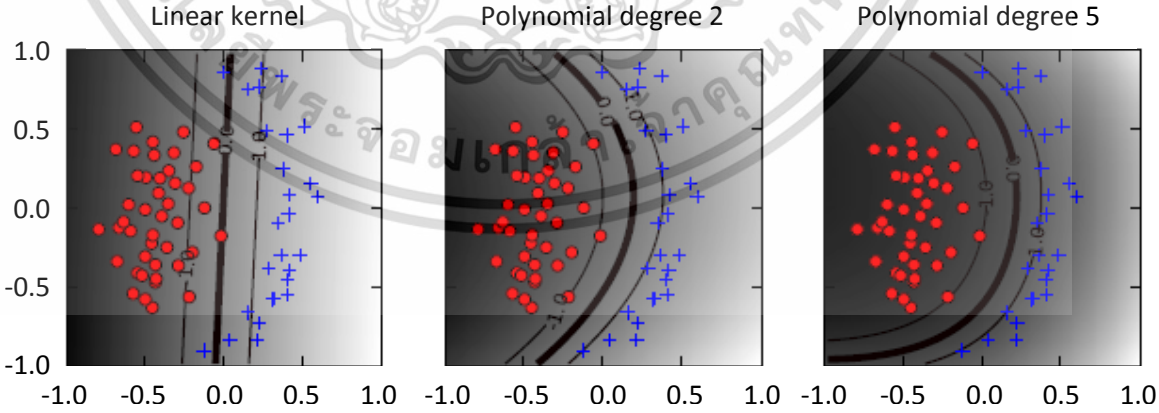
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.15 แสดงถึงผลกระทบของค่า soft-margin constant ($C$) กับเส้นแบ่งคลาส

(ที่มา : Asa Ben-Hur, Jason Weston, “A user’s guide to support vector machines”)

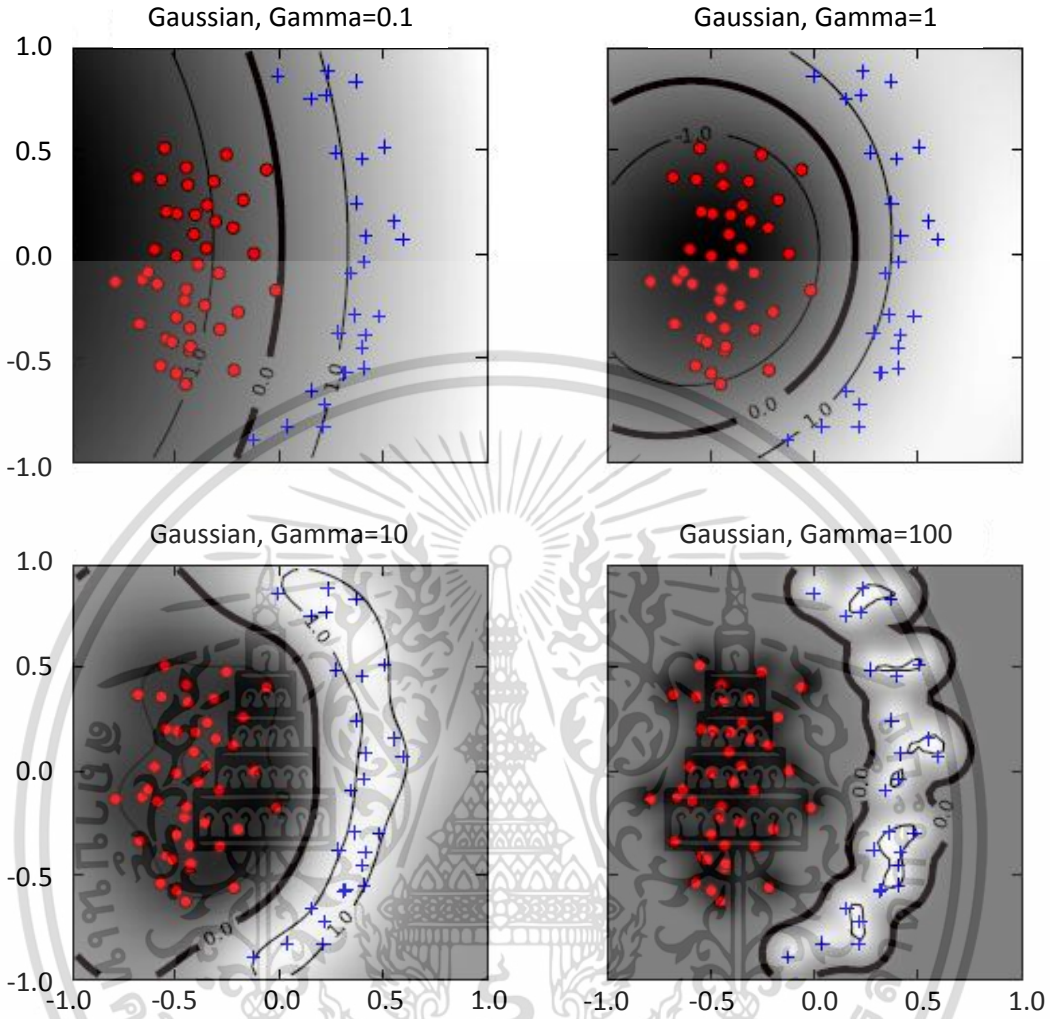
ตัวแปรของเคอร์เนลนั้นก็มีผลกับเส้นแบ่งคลาสอย่างมาก ดีกรีของโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) และ ตัวแปรความกว้างของเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian kernel) เป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นของเส้นแบ่งคลาสที่ได้ (ดูรูป 2.16 และ 2.17) ดีกรีต่ำที่สุดของโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) ก็คือ เคอร์เนลแบบเชิงเส้น (Linear Kernel) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เมื่อข้อมูลเป็นลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับข้อมูลในรูปที่ 2.16 นั้น แค่เพียงใช้โพลีโนเมียลดีกรี 2 เท่านั้นก็มีความยืดหยุ่นเพียงพอในการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสด้วยระยะมาร์จิ้นที่มีขนาดใหญ่มาก หากใช้โพลีโนเมียลเคอร์เนลดีกรี 5 ก็จะได้เส้นแบ่งคลาสเหมือนกันเพียงแต่มีความโค้งมากกว่าเท่านั้นเอง




รูป 2.16 ผลกระทบของดีกรีของโพลีโนเมียลเคอร์เนล

(ที่มา : Asa Ben-Hur, Jason Weston, “A user’s guide to support vector machines”)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.17 ผลของตัวแปรความกว้างของเกาส์เซียนเคอร์เนลสำหรับค่า Soft-margin constant คงที่

(ที่มา : Asa Ben-Hur, Jason Weston, “A user’s guide to support vector machines”)

หัวข้อนี้จะเน้นเรื่องเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian kernel) : $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) = \exp(-\gamma\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}\|^2)$ โดยสมการนี้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ถ้าหากระยะระหว่าง $\mathbf{x}_i$ กับ $\mathbf{x}$ มีค่ามากกว่า $1/\sqrt{\gamma}$ มากๆ ถ้ากำหนดให้ค่า $\mathbf{x}$ นั้นอยู่คงที่ตัวข้อมูลอื่นๆจะถูกจำกัดวงให้อยู่รอบๆ $\mathbf{x}$ และเมื่อค่า $\gamma$ มีค่าน้อย (ตามรูป 2.17 ด้านบนซ้าย) ทำให้จุดข้อมูล $\mathbf{x}_i$ มีค่าของเคอร์เนลที่ไม่เป็นศูนย์ซึ่งสัมพันธ์กับข้อมูลตัวอื่นๆในกลุ่มของซัพพอร์ตเวคเตอร์ ดังนั้นกลุ่มของซัพพอร์ตเวคเตอร์ทั้งหมดจะส่งผลกระทบกับค่าของฟังก์ชันการแบ่งคลาสที่ $\mathbf{x}_i$ ทำให้เกิดเส้นแบ่งคลาสที่มีความราบเรียบมากขึ้น ในขณะเดียวกันถ้าค่า $\gamma$ มีค่ามากขึ้นการกระจายของตำแหน่งซัพพอร์ตเวคเตอร์จะมีมากขึ้นทำให้ได้เส้นการแบ่งคลาสที่มีความโค้งมากขึ้น เมื่อค่า $\gamma$ มีค่ามากค่าของฟังก์ชันการแบ่งคลาสจะมีค่าเกือบจะคงที่ในบริเวณที่ไม่มีข้อมูลไปรวมตัวอย่างหนาแน่น (ดูตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 ด้านล่างขวา) ในรูปจะเห็นว่าค่าตัวแปร $\gamma$ นี้ทำให้เกิดเส้นแบ่งคลาสที่ค่อนข้างจะเกินความเหมาะสมในการแบ่งคลาสข้อมูลชุดนี้

จากรูปจะเห็นว่าข้อมูลในรูป 2.16 และ 2.17 นั้น ค่าตัวแปร $\gamma$ ของเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian Kernel) และดีกรีของโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) นั้นเป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นที่ทำให้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูล ถ้าหากค่าตัวแปรซึ่งซับซ้อน $\gamma$ นี้มีค่ามากเกินไปก็จะส่งผลให้การแบ่งคลาสข้อมูลไม่เหมาะสม (ตามรูป 2.17 ด้านล่าง)

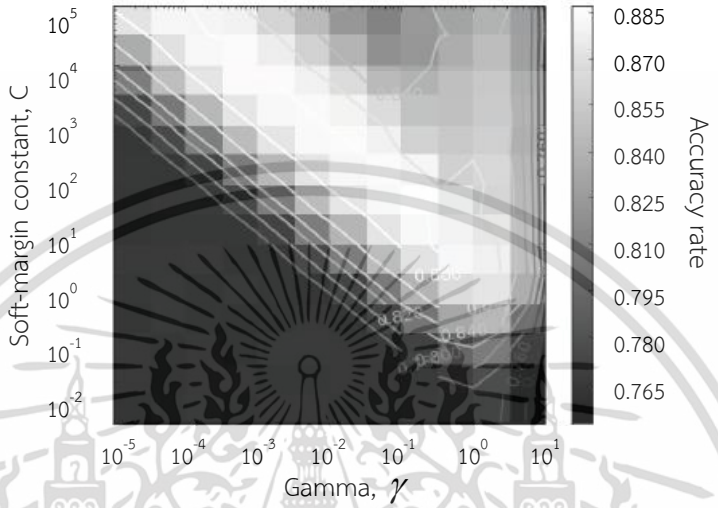
คำถามที่พบกันบ่อยสำหรับผู้ที่ใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนคือ “เคอร์เนล (Kernel) แบบไหนที่ควรจะเลือกใช้สำหรับข้อมูล” คำตอบนั้นมีอยู่หลายประการ ประการแรกคือ การลองผิดลองถูกเหมือนกับคำตอบเดิมๆสำหรับเครื่องมือการเรียนรู้ โดยการลองผิดลองถูกนั้นโดยปกติจะทำตามกระบวนการดังนี้ โดยการเริ่มลองจากเคอร์เนลเชิงเส้น (Linear kernel) ก่อนแล้วลองดูว่าสามารถพัฒนาประสิทธิภาพโดยใช้เคอร์เนลแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear kernel) เพราะความยืดหยุ่นของเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian Kernel) และโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) ซึ่งเป็นเคอร์เนลแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นสามารถทำให้เกิดการแบ่งคลาสที่เกินพอดีบนกลุ่มข้อมูลหลายมิติที่มีจำนวนน้อย ยิ่งไปกว่านั้นซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้เคอร์เนลเชิงเส้น (Linear kernel) นั้นง่ายต่อการปรับแต่งเนื่องจากค่าตัวแปรที่ใช้ในการปรับแต่งนั้นมีเพียงแค่ soft-margin constant, $C$ เมื่อได้เส้นแบ่งคลาสซึ่งเป็นผลลัพธ์จากเคอร์เนลเชิงเส้นแล้วยังสามารถนำเอาเส้นแบ่งคลาสนี้ไปเป็นเส้นฐาน (Baseline) ในการลองปรับปรุงโดยใช้เคอร์เนลแบบไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย โดยที่ระหว่างเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian Kernel) และโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) นั้น เมื่อดูจากจากที่ผ่านๆมาแล้วนั้นแสดงให้เห็นว่าเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian kernel) นั้นให้ผลที่ดีกว่าโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) ทั้งด้านความถูกต้องและระยะเวลาในการประมวลผล

### 2.3.5 การเลือกตัวแปรในการเรียนรู้ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

ความเป็นอิสระของเส้นการแบ่งคลาสของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนบนไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนถูกแปลงให้อยู่ในรูปของความเป็นอิสระของความถูกต้องของเส้นแบ่งคลาสบนไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) เมื่อใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนควบคู่กับเคอร์เนลแบบเชิงเส้น (Linear kernel) นั้น ตัวแปรไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) ที่จำเป็นจะต้องทำการปรับนั้นมีเพียง Soft-margin constant ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน สำหรับโพลีโนเมียลกับเกาส์เซียนเคอร์เนลนั้น ปริภูมิในการค้นหานั้นเป็นแบบ 2 มิติ วิธีการมาตรฐานสำหรับสำรวจปริภูมิสองมิตินี้คือการค้นหาผ่านทางกริด (via-grid search) จุดของกริดนั้นโดยทั่วไปจะถูกเลือกบนลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

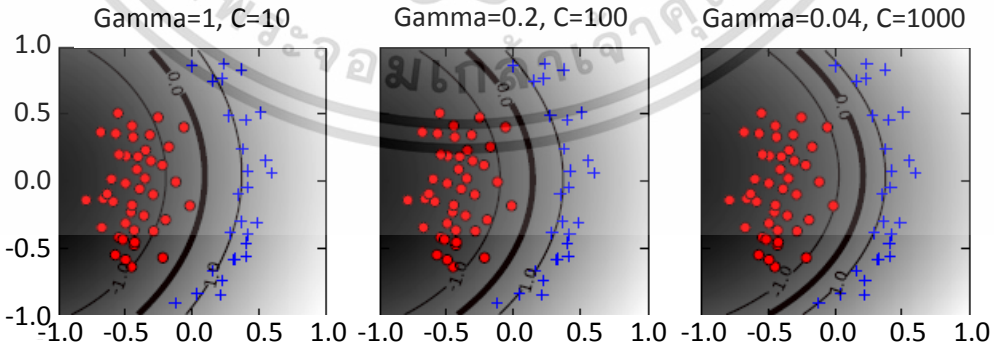
กาลิทึมสเกล (Logarithm scale) และความถูกต้องของเส้นแบ่งคลาสจะถูกประมาณสำหรับทุกจุดบนกริดดังแสดงในรูป 2.18 เส้นแบ่งคลาสจะได้จากการเรียนรู้ที่ใช้ค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) จากกริดที่ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด




รูป 2.18 ความถูกต้องของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนบนกริดของค่าพารามิเตอร์

(ที่มา : Asa Ben-Hur, Jason Weston, “A user’s guide to support vector machines”)

ภาพความถูกต้องในรูป 2.18 นั้นมีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้ หนึ่งคือมีช่วงของค่าของตัวแปรที่ให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดของเส้นแบ่งคลาส ยิ่งไปกว่านั้นคือ ที่จุดสมมูลในปริภูมิพารามิเตอร์นั้นมีค่าลดลงตามแนวในปริภูมิพารามิเตอร์ ปรากฏการณ์นี้สามารถทำความเข้าใจได้ดังนี้ ให้พิจารณาค่าเฉพาะของ $(\gamma, C)$ ถ้าลดค่าของ $\gamma$ การลดลงของค่า $\gamma$ จะทำให้ความโค้งของเส้นแบ่งคลาสลดลง และถ้าเพิ่มค่า $C$ จะทำให้เส้นแบ่งคลาสถูกบังคับให้โค้งเพื่อให้รองรับเข้ากับกลุ่มข้อมูลเพื่อที่จะทำให้ค่ามาร์จิ้นมีค่ามากขึ้นสำหรับข้อมูลสองมิติ ซึ่งแสดงในรูป 2.19




รูป 2.19 แสดงเส้นแบ่งคลาสที่ได้รับจากการใช้ไฮเปอร์พารามิเตอร์ต่างๆของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

(ที่มา : Asa Ben-Hur, Jason Weston, “A user’s guide to support vector machines”)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

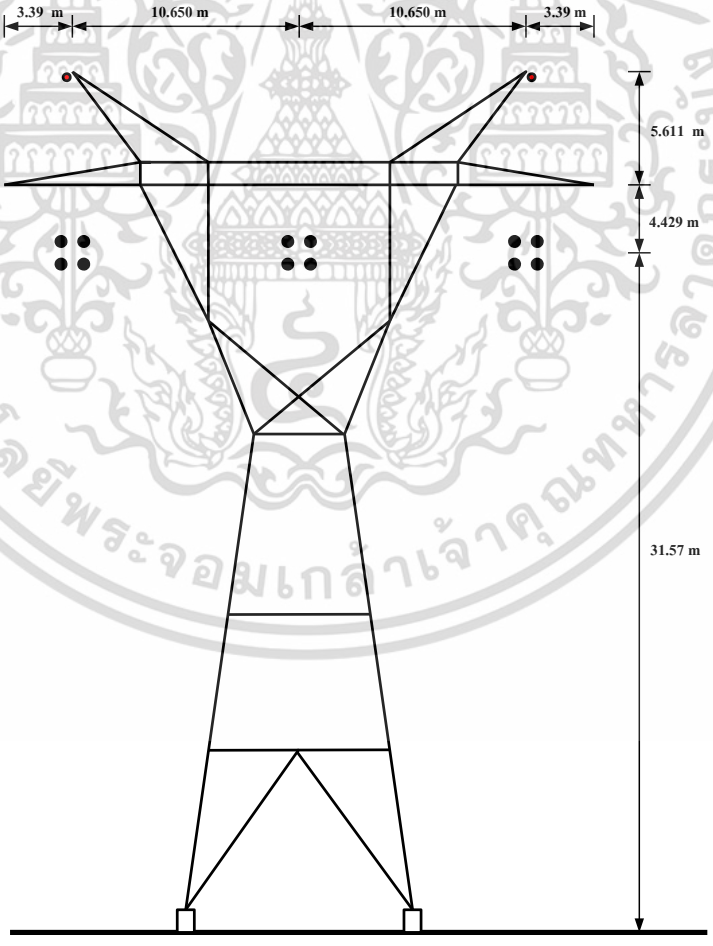
# บทที่ 3
# การจำลองความผิดพร่อง

เพื่อเป็นการทดสอบสมมติฐานที่ได้กล่าวมาทั้งหมดวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการจำลองความผิดพร่องบนสายส่งด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองทรานเซี้ยนต์ในระบบกำลังไฟฟ้ารวมถึงสัญญาณความผิดพร่องด้วยโดยมีรายละเอียดในการจำลองความผิดพร่องดังต่อไปนี้

## 3.1 การจำลองความผิดพร่องของระบบส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน

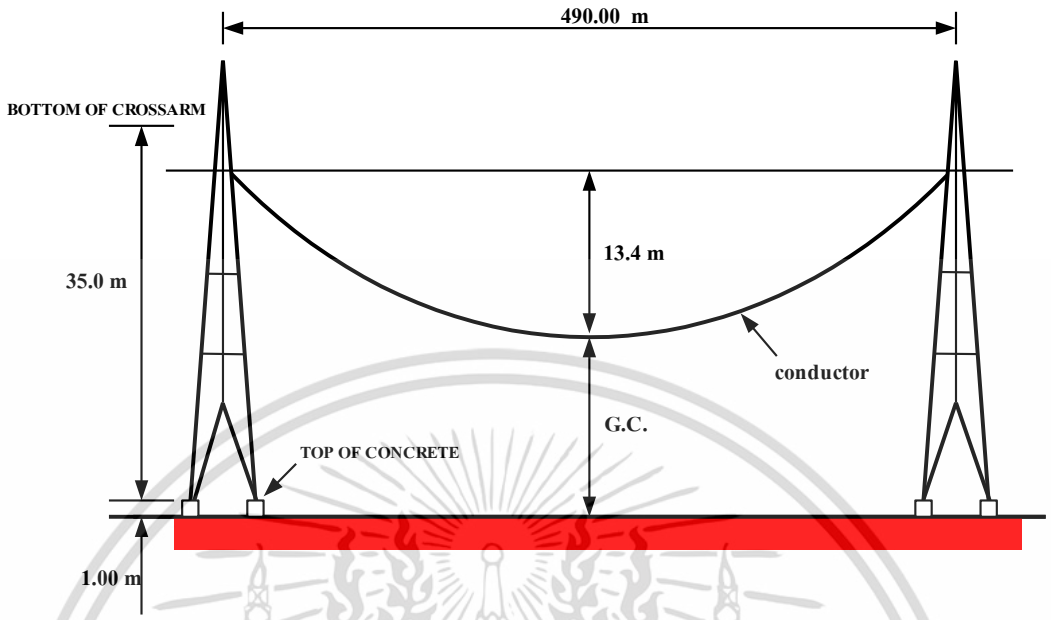
### 3.1.1 โครงสร้างของสายส่ง 500 kV

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบจำลองสายส่งระบบ 500 kV แบบวงจรเดี่ยว (Single circuit) ซึ่งเป็นสายส่งที่มีใช้งานจริงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะถึงสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (MM3 – TTK) และจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโกถึงสถานีไฟฟ้าหนองจอก (TTK-NCO) โดยสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างของเสา (Tower) ที่ใช้ได้ดังรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.1 แสดงเสาแบบ SL ที่ใช้กับสายส่งวงจรเดี่ยว 500 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.2 แสดงระยะหย่อน (sag) ของสายตัวนำบนเสาแบบ SL ที่ใช้กับสายส่งวงจรเดี่ยว 500 kV

โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

- โครงสร้างเสาส่ง (Tower) แบบ SL tangent 3 °
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 4 ตัวนำ ( 4 bundle)
- ประเภทสาย ACSR 795 cmil (Al42/St7)
- ประเภทของสายล่อฟ้า (Over head ground wire) 3/8 inch ,EHS GALV (St7)
- ความต้านทานของสายตัวนำ 0.0716 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ความต้านทานของสายล่อฟ้า 4.19 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ระยะห่างของตัวนำระหว่างเฟส 10.65 เมตร
- ความสูงของตัวนำที่เสาส่ง(วัดจากพื้น) 31.571 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่เสา(วัดจากพื้น) 41.611 เมตร
- ความสูงของตัวนำที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา(Sag) (วัดจากพื้น) 18.16 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา(Sag) (วัดจากพื้น) 31.611 เมตร
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างต้น (Span) 490 เมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม. เมตร

### 3.1.2 แบบจำลองสายส่ง

ในการศึกษาความผิดพร่องที่เกิดบนสายส่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่งให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองความผิดพร่อง ดังนั้นจึงต้องเลือกรูปแบบในการคำนวณให้เหมาะสมด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งนั้นมีให้เลือกใช้อยู่ด้วยกันหลายรูปแบบเช่น แบบวงจรพาย (Pi-model) ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายในการคำนวณ แต่รูปแบบของวงจรพายไม่เหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษาทฤษฎีของคลื่นเดินทางหรือการศึกษาสภาวะทรานเซี้ยนต์ เช่น ความผิดพร่องบนสายส่ง โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความถูกต้องในการจำลองความผิดพร่องนั้นจะต้องแบ่งวงจรพายให้สั้นลงและใช้วงจรพายจำนวนมากมาเรียงต่อกัน(Cascade) และเนื่องจากสัญญาณความผิดพร่องจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่าความถี่พื้นฐานอยู่มาก ดังนั้นถ้าต้องการแสดงผลของความถี่สูงมากขึ้นเท่าใดก็ต้องใช้วงจรพายขนาดที่สั้นมาเรียงต่อกันมากขึ้น ในบางครั้งสายส่งระยะทางสั้นๆ อาจต้องใช้วงจรพายถึง 100 วงจรด้วยกันจึงทำให้ยุ่งยาก และวงจรในการจำลองความผิดพร่องมีขนาดที่ใหญ่เกินไป

จากข้อจำกัดของวงจรพายจึงมีการนำรูปแบบการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งในรูปแบบของพารามิเตอร์ขึ้นอยู่ความถี่ (Frequency – dependent parameter) หรือนิยมเรียกกันว่า J. marti ซึ่งจะมีการคำนวณอย่างละเอียดโดยพารามิเตอร์ในการคำนวณจะเปลี่ยนไปตามความถี่ที่ใช้คำนวณ รูปแบบของ J. marti นี้จะเหมาะสมกับการศึกษาผลของคลื่นเดินทาง และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสภาวะทรานเซี้ยนต์ต่างๆ รวมถึงการจำลองความผิดพร่องบนสายส่งโดยไม่ต้องการแบ่งช่วงของวงจรด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้รูปแบบของ J. marti ในการสร้างแบบจำลองของสายส่ง

สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งนั้นเนื่องจากในทางปฏิบัติระยะห่างของเสา (Span) และระยะหย่อน (Sag)นั้นจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non – uniform) ขึ้นอยู่กับสถานที่ในการติดตั้ง แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ระยะห่างของเสาและระยะหย่อนของสายตัวนำและสายล่อฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ(Uniform) ตลอดช่วงระยะทางทั้งหมด และเพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม รวมทั้งการกำหนดระยะห่างและระยะหย่อนให้คงที่ว่าผลที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเพียงใด จึงทำการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะถึงสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (MM3 – TTK) ซึ่งในระบบจริงนั้นมีการไขว้สลับสายแบบสมบูรณ์ (Complete transposition) ที่ความยาว 325.6 กิโลเมตร โดยอาศัยโปรแกรมคือATP–LCC ในการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง และเลือกใช้การคำนวณแบบพารามิเตอร์คงที่ (Parameter constant) ที่ความถี่ 50 Hz เพื่อหาค่าขององค์ประกอบต่างโดยผลการคำนวณที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับค่าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)

**ตารางที่ 3.1** แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์หว่างค่าของ EGAT กับค่าจากโปรแกรม ATP-LCC

| MM3-TTK | Positive sequence (p.u.) | | | Zero sequence (p.u.) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 325.6 km | R1 | X1 | Y1 | R0 | X0 | Y0 |
| EGAT | 0.00267 | 0.03590 | 3.34380 | 0.03296 | 0.13002 | 2.09302 |
| ATP-LCC | 0.00239 | 0.03449 | 3.41000 | 0.03060 | 0.13297 | 1.96880 |

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณด้วยโปรแกรม ATP–LCC และการคำนวณของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแล้วพบว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าจะไม่สามารถ

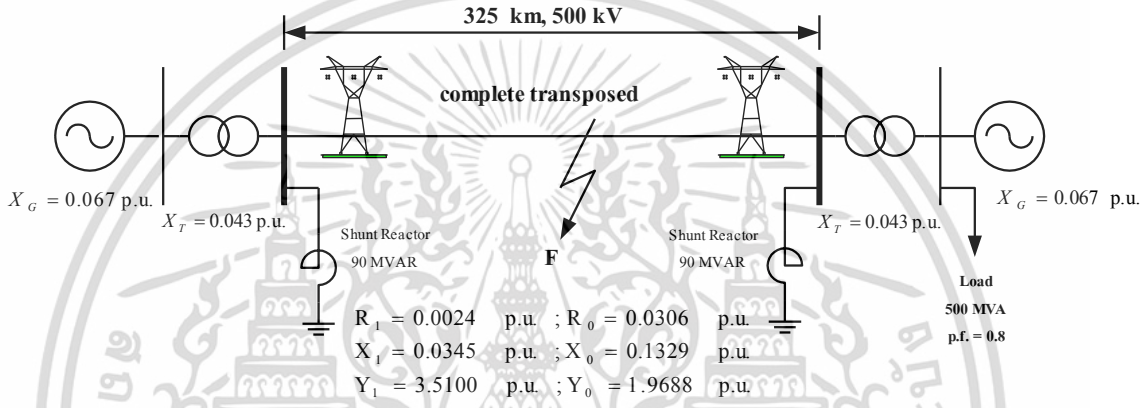
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดพารามิเตอร์ได้ตามสภาพความเป็นจริงได้ทั้งหมด แต่ผลการคำนวณก็มีที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถยอมรับได้

### 3.1.3 ระบบการจำลอง

#### 3.1.3.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณความผิดพร่อง

เนื่องจากในสภาวะที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของเหตุการณ์เกิดขึ้นดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความผิดพร่องได้ครอบคลุมในหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างระบบจำลองแบบ 2 บัส ขึ้นมาดังรูปที่ 3.3




รูปที่ 3.3 แสดงระบบทดลอง ความยาว 325 กิโลเมตร

ระบบจำลอง เป็นสายส่งแบบยาว (Long line) ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีการไขว้สลับสายเพื่อทำให้มีค่าอิมพิแดนซ์ในแต่ละเฟสเท่ากันและมีติดตั้งรีแอคเตอร์ขนาน (Shunt reactor) ซึ่งในที่นี้ได้อ้างอิงระบบจากสายส่งแม่เมาะถึงท่าตะโก (325.6 กิโลเมตร) ที่มีการติดตั้งรีแอคเตอร์ขนานขนาด 90 MVAR

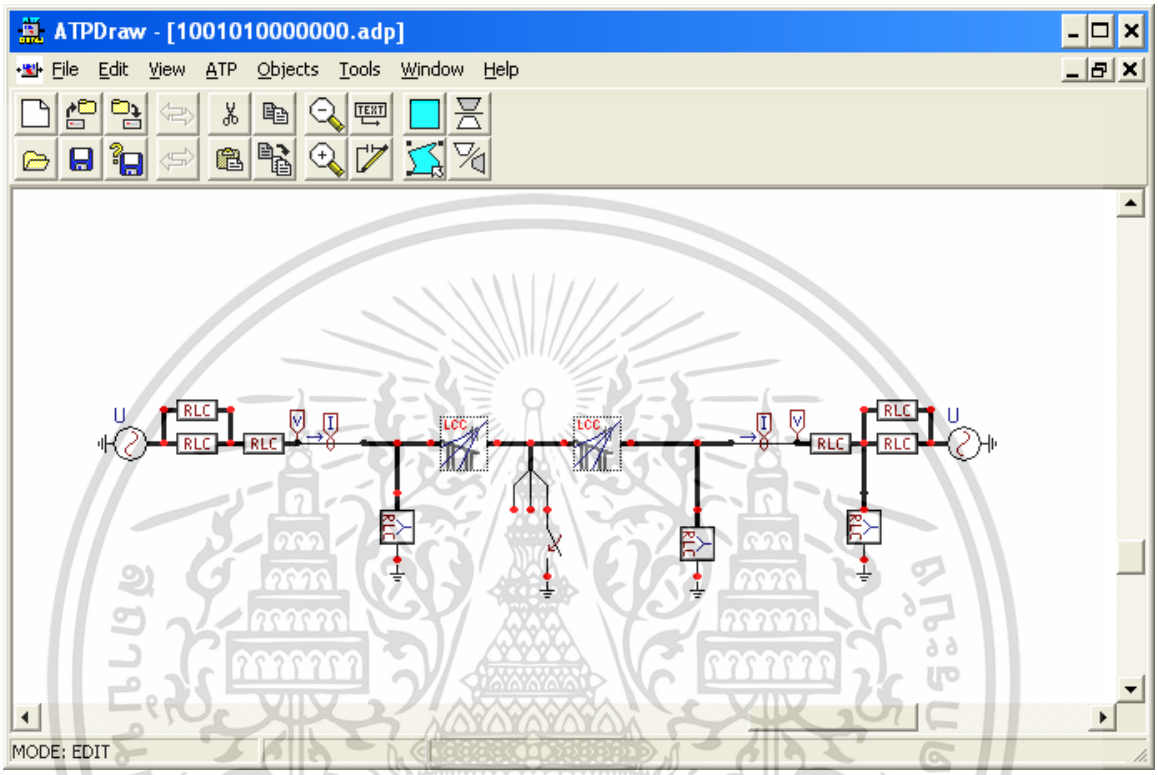
#### 3.1.3.2 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

ในการจำลองความผิดพร่องนั้นเพื่อศึกษาของความผิดพร่องที่แตกต่างกันจึงทำการการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ประเภทของความผิดพร่อง 10 ประเภทได้แก่ AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง 10%, 30%, 50%, 70% และ 90% ของระยะทางทั้งหมด
- ขนาดของโหลดระบบทดลองเท่ากับ 500 MVA (p.f. = 0.8 )
- มุมที่เริ่มเกิดความผิดพร่อง 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300° และ 330° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A
- ความต้านทานของความผิดพร่อง 10 โอห์ม

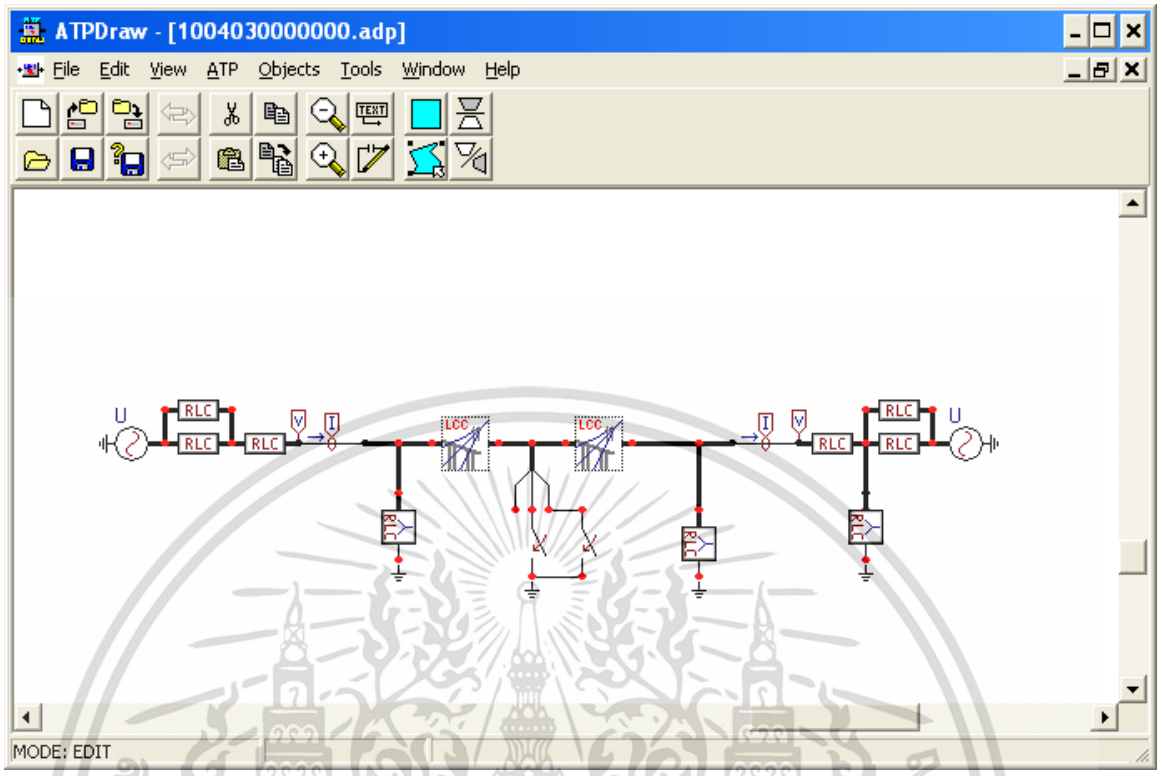
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้สวิทช์ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบและเวลาของการเกิดความผิดพร่อง ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เริ่มเกิดความผิดพร่องที่ t = 0.04 วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล (0 – 0.1 วินาที) โดยไม่มีการกำจัดความผิดพร่องออก ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 3.6-3.8

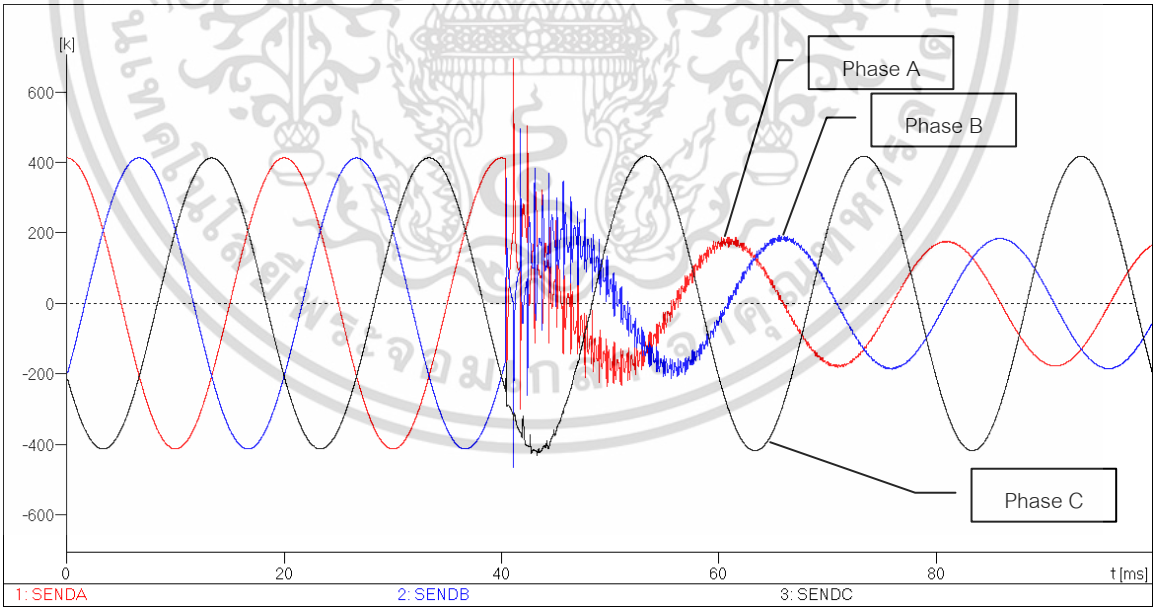



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรการจำลองของโปรแกรม ATP/EMTP ของระบบทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

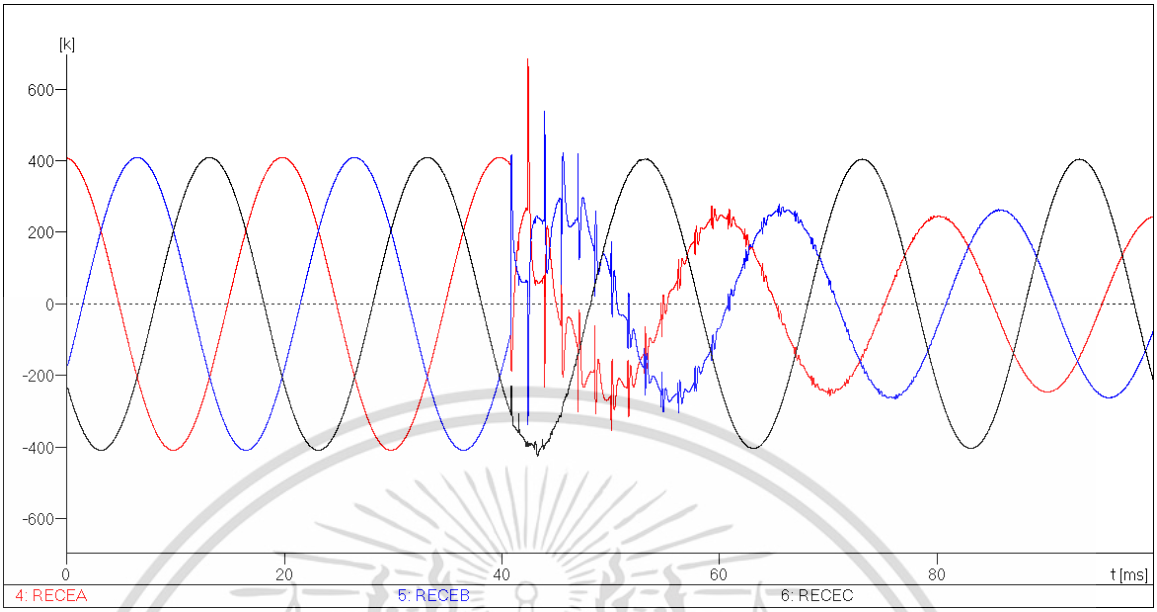



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรในการจำลองความผิดพร่องแบบ ABG ที่ 97.5 กิโลเมตร ของระบบการทดลอง

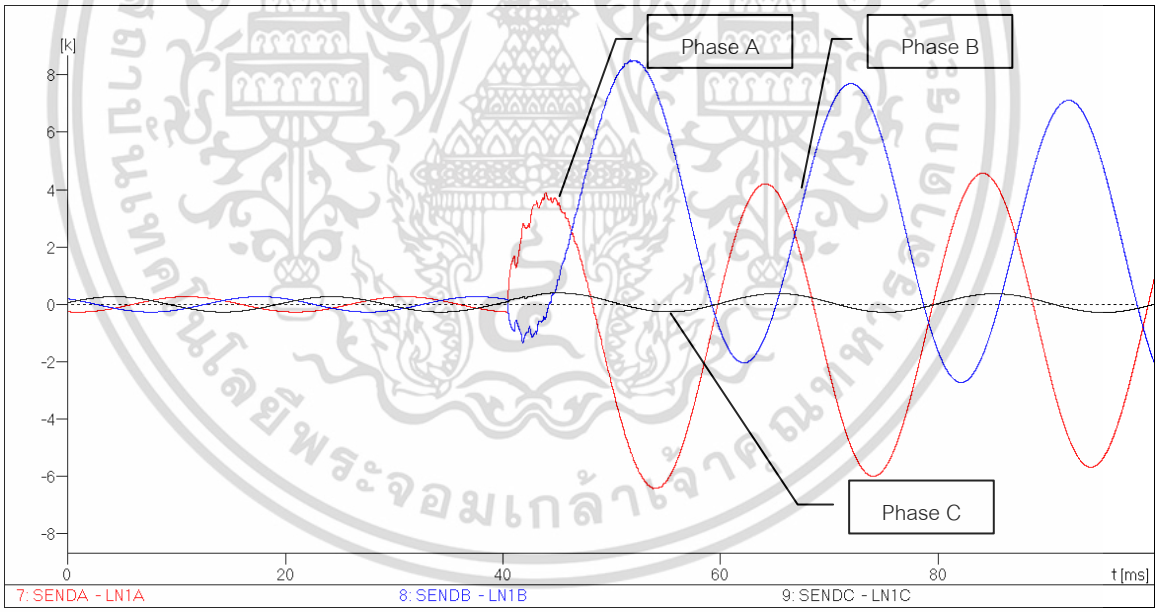



รูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณความผิดพร่องของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้าน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

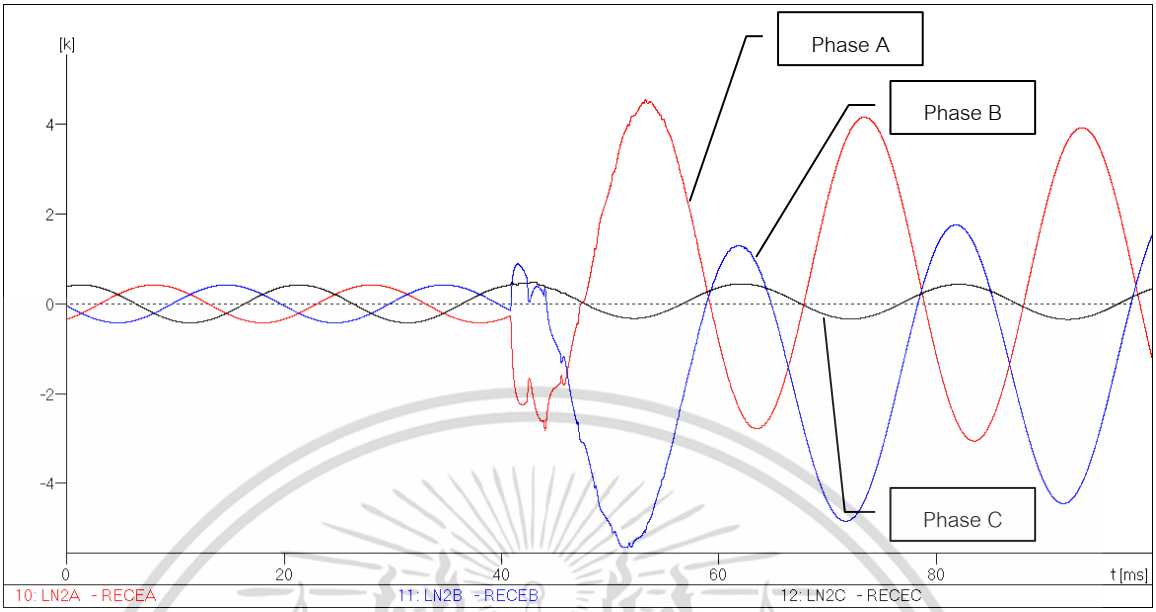



รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณความผิดพร่องของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้าน B




รูปที่ 3.8 แสดงสัญญาณความผิดพร่องของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้าน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

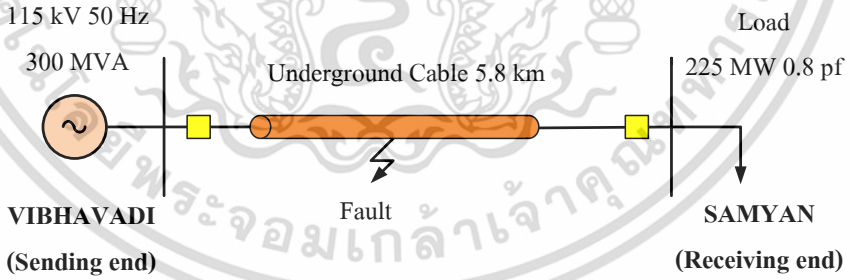



รูปที่ 3.9 แสดงสัญญาณความผิดพร่องของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้าน B

## 3.2 การจำลองความผิดพร่องของระบบส่งไฟฟ้าใต้พื้นดิน

### 3.2.1 การจำลองระบบเคเบิล

การจำลองเคเบิลเคเบิลใต้ดินจะใช้เคเบิลในกรณีศึกษาเป็นเคเบิลใต้ดินจากวิภาวดี ไปยังสามย่านที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV เป็นระยะทาง 5.8 กิโลเมตร ดังรูปที่ 3.10 ทำการจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP



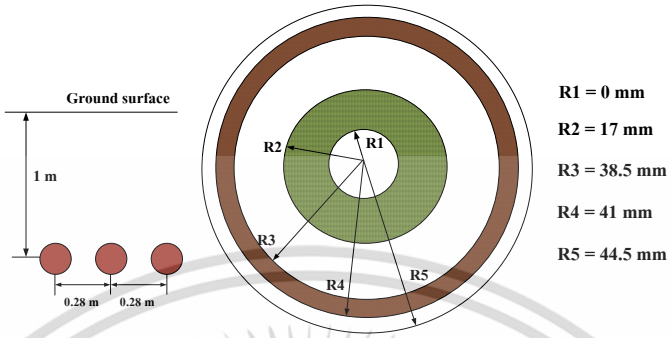

รูปที่ 3.10 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง

ทำการจำลองระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องดังนี้

- ชนิดของความผิดพร่องทั้งหมด 4 รูปแบบคือ ความผิดพร่องลงดินเส้นเดียว (SLG) ความผิดพร่องสองสายลงดิน (DLG) ความผิดพร่องระหว่างสาย (L-L) และ ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล (3-P)
- เปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการเกิดความผิดพร่องที่ 1, 1.5, 2, 2.5, 2.9, 3, 3.5, 4 และ 4.8 กิโลเมตร

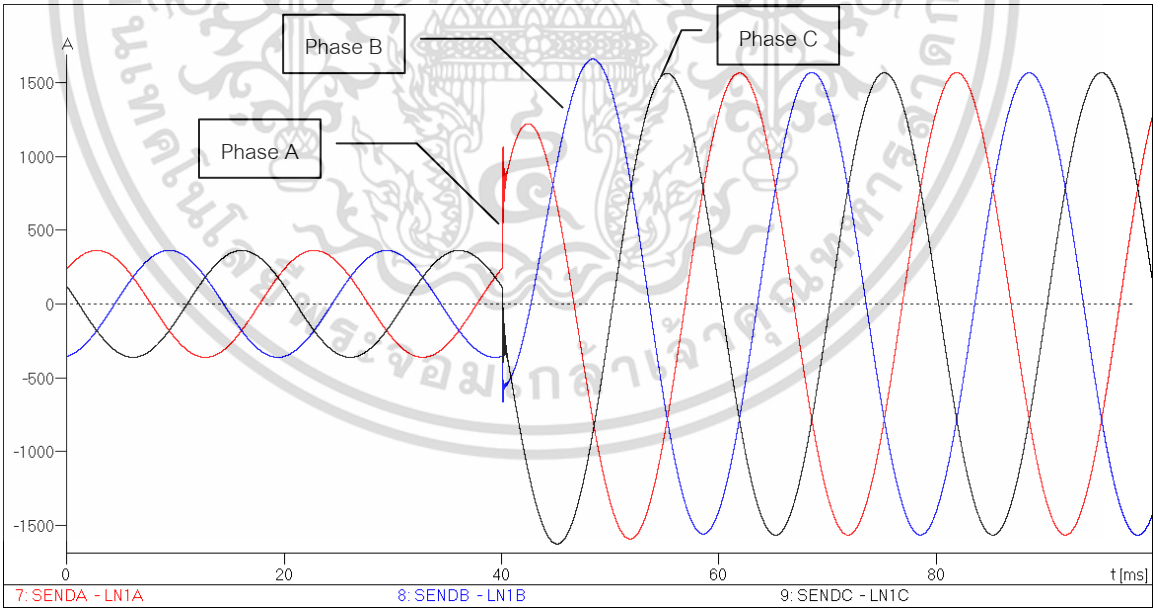
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปลี่ยนแปลงมุมเริ่มเกิดความผิดพร่องตั้งแต่ 0° - 180° โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 30° ให้แรงดันไฟฟ้าที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง



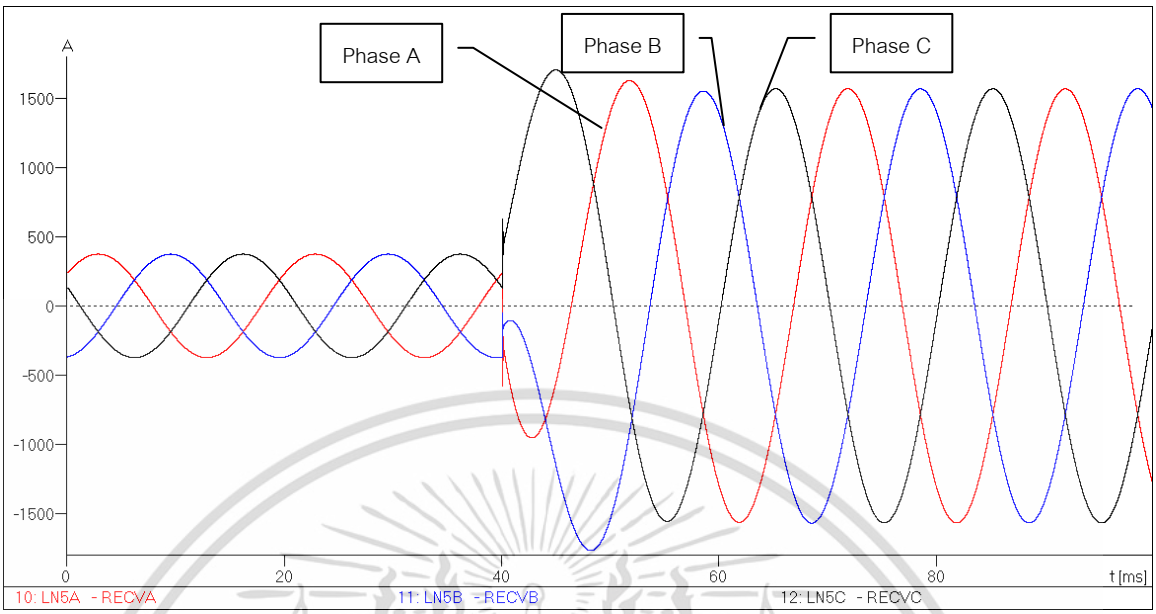

รูปที่ 3.11 ขนาดของเคเบิลที่ใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง

จากรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และลักษณะการจัดวางใต้ดิน นำรูปคลื่นของกระแสที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม ATP/EMTP ดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ซึ่งเป็นตัวอย่างแสดงกระแสในกรณีความผิดพร่องสามเฟสสมดุล และรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นตัวอย่างแสดงแรงดันในกรณีเกิดความผิดพร่องประเภทสามเฟสสมดุล

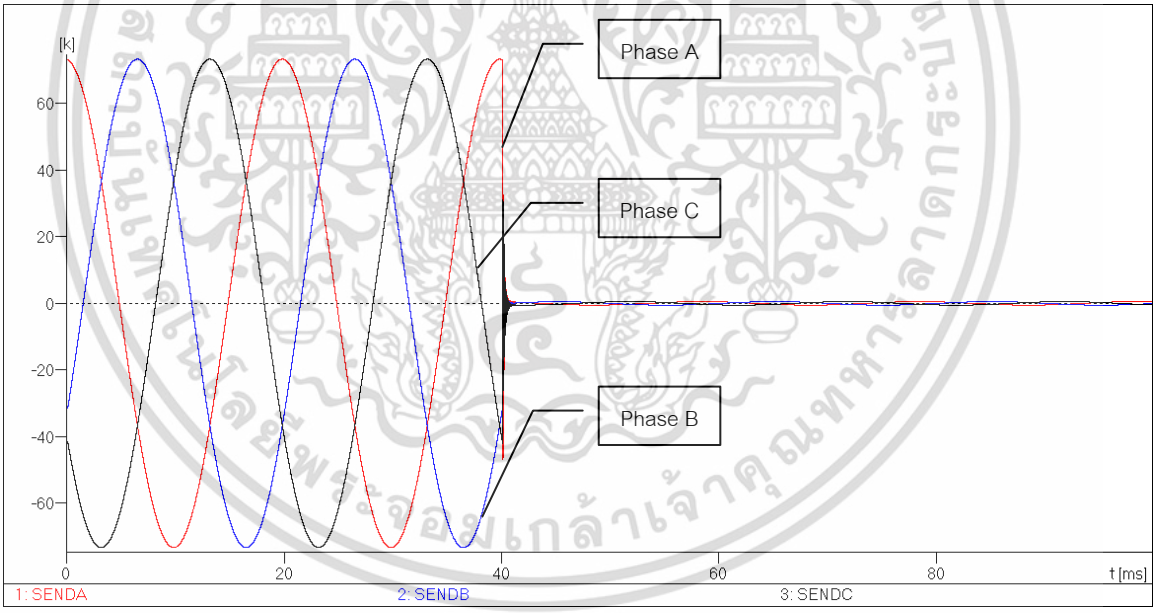



รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

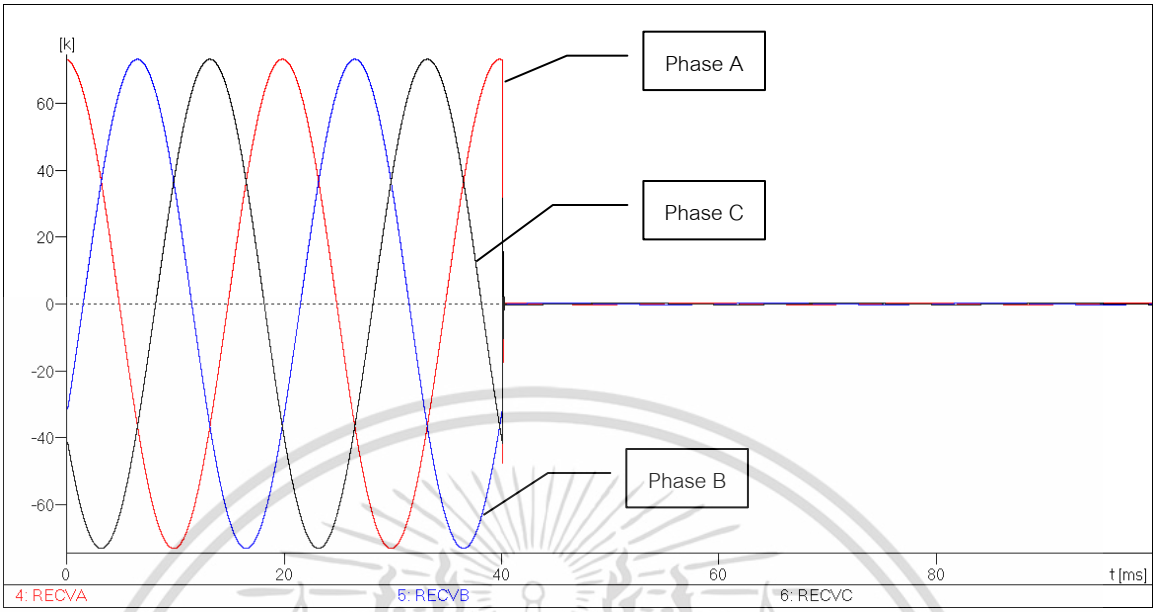



รูปที่ 3.13 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส B




รูปที่ 3.14 แสดงรูปคลื่นแรงดันทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



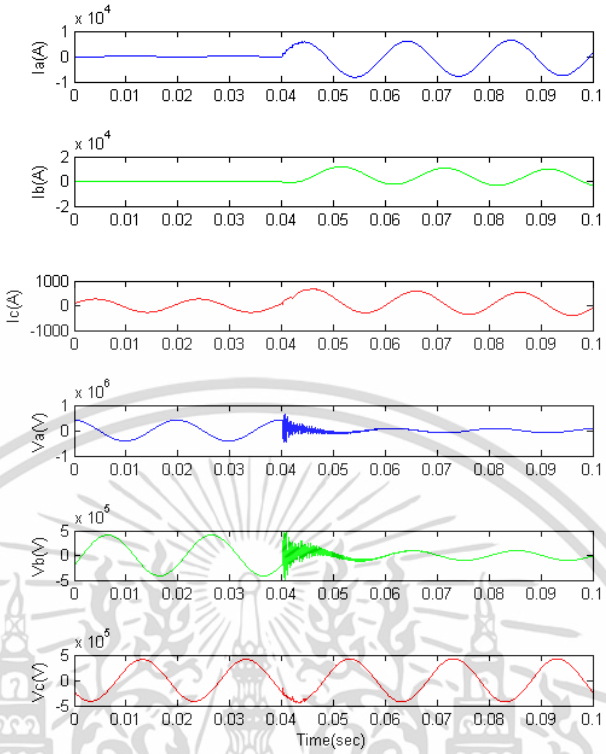

รูปที่ 3.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันทั้ง 3 เฟส ที่ความผิดพร่องสามเฟสสมดุล ที่บัส B

## 3.3 พฤติกรรมของความผิดพร่องในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

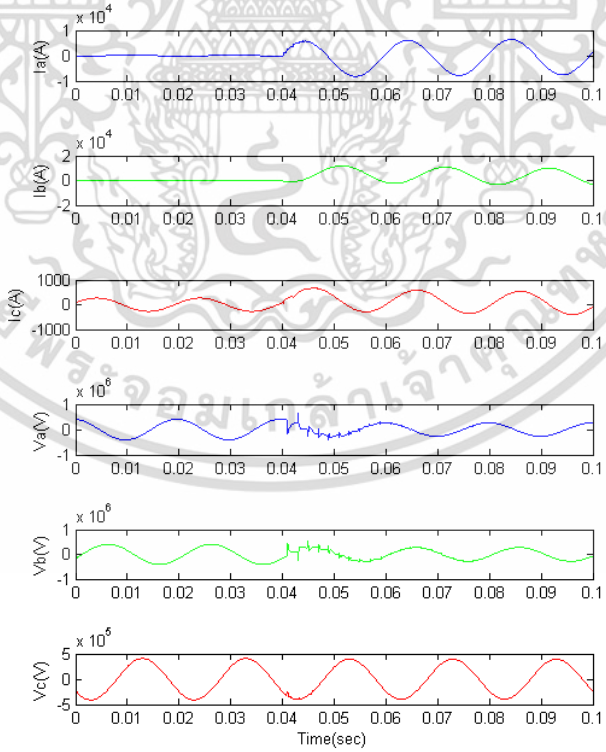
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของสัญญาณความผิดพร่องที่ได้จากระบบจำลองสายส่งที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของสัญญาณเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นว่ามีพฤติกรรมอย่างไร และส่งผลอย่างไรกับรูปของสัญญาณ โดยรูปที่ 3.16 และ 3.17 นั้นแสดงถึงรูปสัญญาณของแรงดันและกระแสของแต่ละเฟสเมื่อมีความผิดพร่องประเภท ABG ที่ตำแหน่ง 30%

โดยจะเห็นว่าเมื่อเกิดความผิดพร่อง ขึ้นในระบบสายส่งนั้นค่ากระแสในเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทาให้เกิด สภาวะทรานเซี้ยนต์ซึ่งจะมีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงเกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณ ความผิดพร่องนั้นจึงควรวิเคราะห์ในรูปของสัญญาณเวฟเล็ตมากกว่าสัญญาณกระแสปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.16 แสดงสัญญาณความผิดพร่องที่พิจารณาจากปลายสายส่งด้าน A (บัส A)



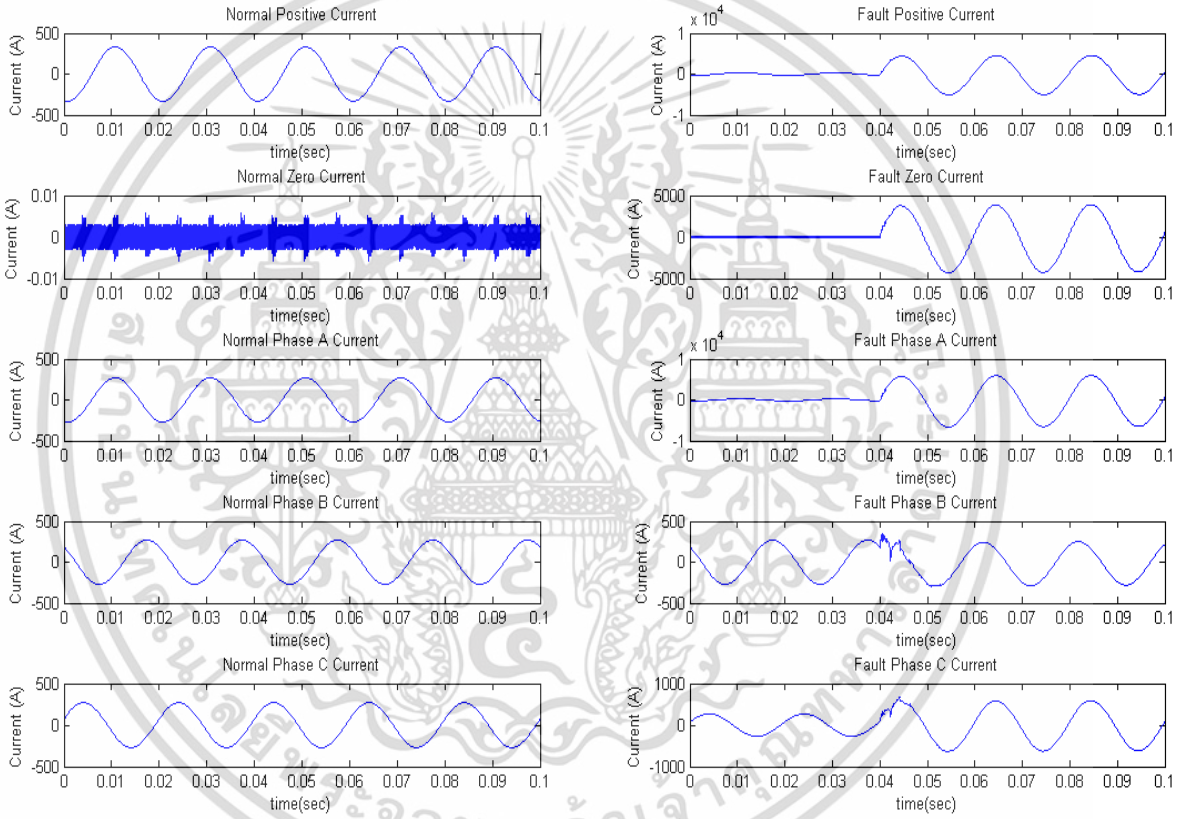

รูปที่ 3.17 แสดงสัญญาณความผิดพร่องที่พิจารณาจากปลายสายส่งด้าน B (บัส B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 พฤติกรรมของรูปสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นตามประเภทของความผิดพร่อง

เนื่องจากระบบจำลองความผิดพร่องที่จำลองสัญญาณความผิดพร่องนั้นจะทำการจำลองสัญญาณความผิดพร่องต่างๆ โดยที่มีการจำลองประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้นออกเป็น 10 ประเภท โดยแต่ละประเภทย่อมให้รูปสัญญาณที่มีความแตกต่างกันออกไป

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณสำหรับความผิดพร่องแต่ละประเภทโดยที่จะสุ่มมา 4 ประเภท คือ AG, ABG, AB และ ABC เพื่อเป็นตัวแทนของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส และสามเฟสสมดุลตามลำดับ



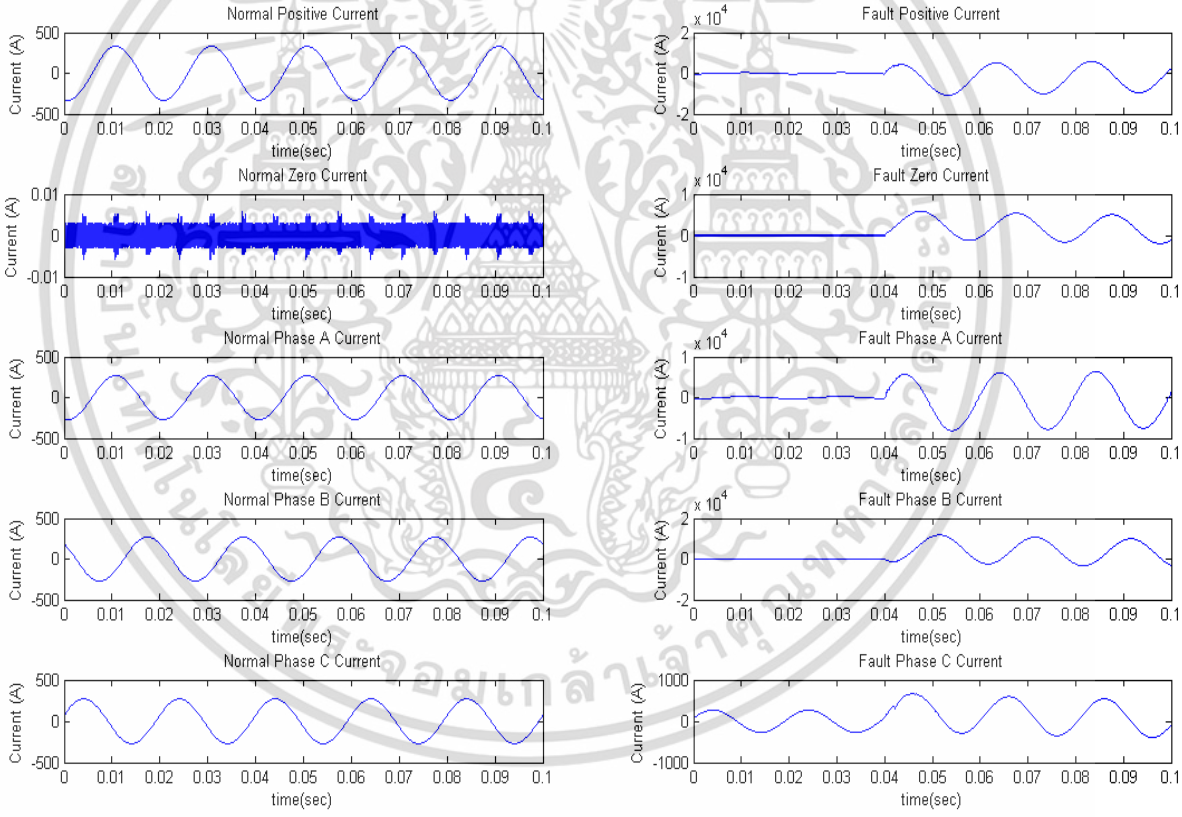

รูป 3.18 แสดงรูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด AG ที่ตำแหน่ง 10% เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ

จากรูป 3.18 ซึ่งแสดงสัญญาณความผิดพร่องชนิด AG เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ จะเห็นว่าสัญญาณกระแสมีค่าสูงขึ้นทันทีเมื่อมีการเกิดความผิดพพร่องขึ้นโดยจะเห็นความแตกต่างของปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังนี้

- กระแสลำดับบวกนั้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากทันทีโดยรูปคลื่นจะยังคงรูปเป็นรูปซายน์ปกติแต่มีความแตกต่างด้านขนาดก่อนและหลังการเกิดความผิดพร่องอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสลำดับศูนย์นั้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากทันทีโดยรูปคลื่นจะเปลี่ยนเป็นรูปเป็นรูปซายน์ จากแต่เดิมเป็นเพียงสัญญาณกระแสรบกวนซึ่งมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์ เนื่องจากเกิดความผิดพร่องชนิดลงดินทำให้กระแสลำดับศูนย์มีค่าสูงตามไปด้วย
- กระแสเฟส A นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส B นั้นมีแนวโน้มค่อนข้างปกติโดยจะมีช่วงทรานเซี้ยนต์เล็กน้อยในช่วงที่เกิดความผิดพร่องเนื่องจากผลกระทบจากการไหลของกระแสจากเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส C นั้นมีแนวโน้มค่อนข้างปกติโดยจะมีช่วงทรานเซี้ยนต์เล็กน้อยในช่วงที่เกิดความผิดพร่อง และปริมาณกระแสที่ไหลหลังเกิดจากความผิดพร่องนั้นจะมีมากขึ้นเนื่องจากผลกระทบจากการไหลของกระแสจากเฟสอื่นๆ

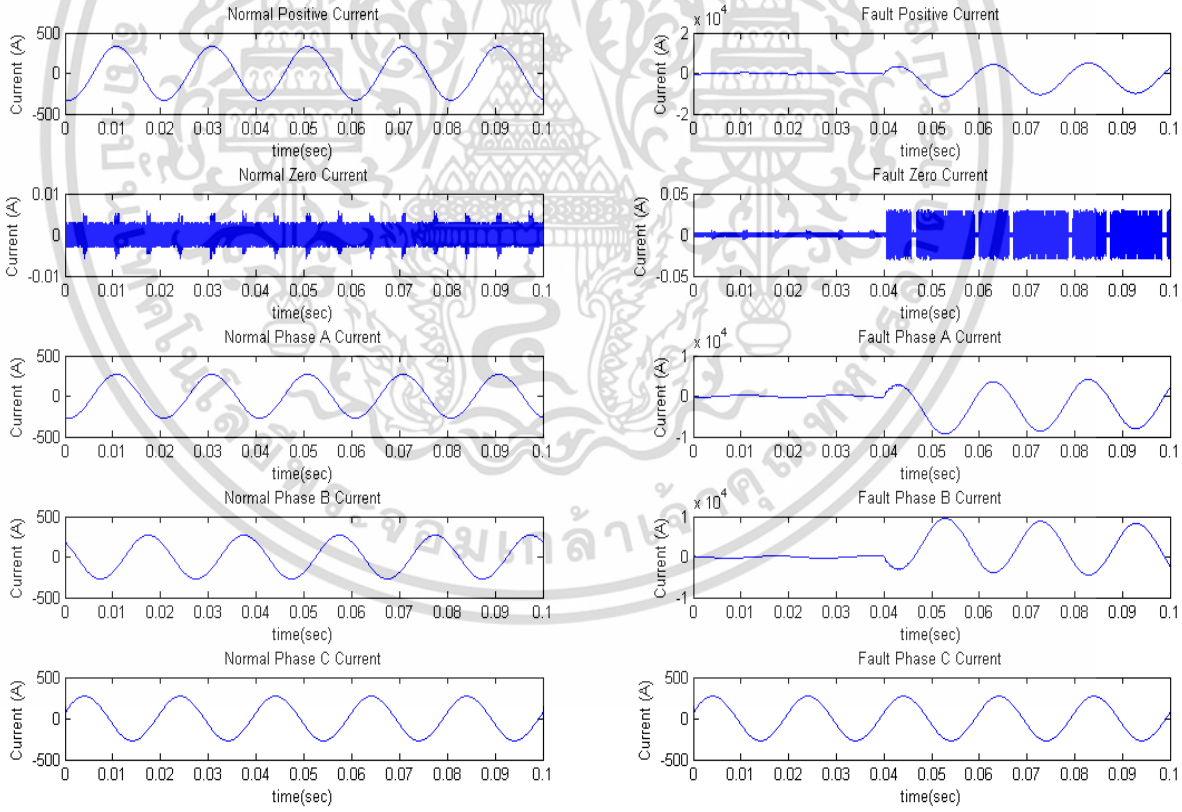



รูป 3.19 แสดงรูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด ABG ที่ตำแหน่ง 10% เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ

จากรูป 3.19 ซึ่งแสดงสัญญาณความผิดพร่องชนิด ABG เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ จะเห็นว่าสัญญาณกระแสมีค่าสูงขึ้นทันทีเมื่อมีการเกิดความผิดพพร่องขึ้นโดยจะเห็นความแตกต่างของปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสลำดับบวกนั้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากทันทีโดยรูปคลื่นจะยังคงรูปเป็นรูปซายน์ปกติแต่มีความแตกต่างด้านขนาดก่อนและหลังการเกิดความผิดพร่องอย่างมาก
- กระแสลำดับศูนย์นั้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากทันทีโดยรูปคลื่นจะเปลี่ยนเป็นรูปเป็นรูปซายน์ จากแต่เดิมเป็นเพียงสัญญาณกระแสรบกวนซึ่งมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์ เนื่องจากเกิดความผิดพร่องชนิดลงดินทำให้กระแสลำดับศูนย์มีค่าสูงตามไปด้วย
- กระแสเฟส A นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส B นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส C นั้นมีแนวโน้มค่อนข้างปกติโดยจะมีช่วงทรานเซี้ยนต์เล็กน้อยในช่วงที่เกิดความผิดพร่อง และปริมาณกระแสที่ไหลหลังเกิดจากความผิดพร่องนั้นจะมีมากขึ้นเนื่องจากผลกระทบจากการไหลของกระแสจากเฟสอื่นๆ

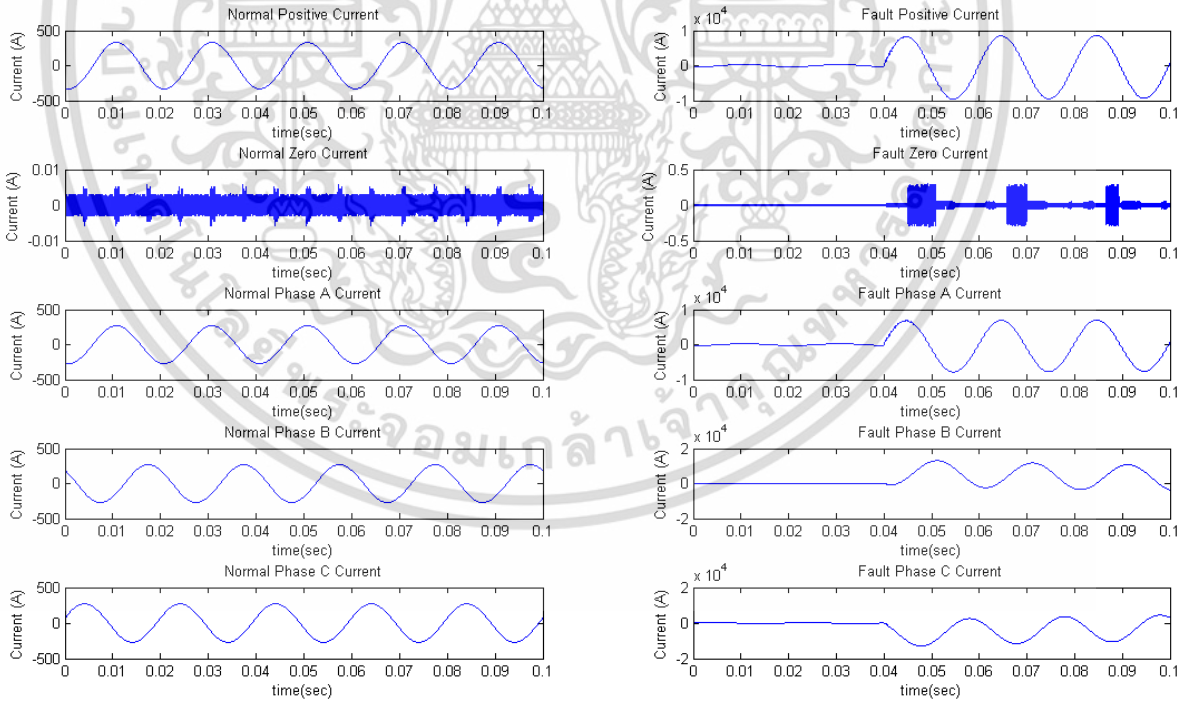



รูป 3.20 แสดงรูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด AB ที่ตำแหน่ง 10% เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.20 ซึ่งแสดงสัญญาณความผิดพร่องชนิด AB เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ จะเห็นว่าสัญญาณกระแสมีค่าสูงขึ้นทันทีเมื่อมีการเกิดความผิดพพร่องขึ้นโดยจะเห็นความแตกต่างของปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังนี้

- กระแสลำดับบวกนั้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากทันทีโดยรูปคลื่นจะยังคงรูปเป็นรูปซายน์ปกติแต่มีความแตกต่างด้านขนาดก่อนและหลังการเกิดความผิดพร่องอย่างมาก
- กระแสลำดับศูนย์นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย จากแต่เดิมเป็นเพียงสัญญาณกระแสรบกวนซึ่งมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์อย่างไรก็ตามค่าที่สูงขึ้นนี้ก็ยังถือว่ามีค่าน้อยมากและมีลักษณะเหมือนสัญญาณรบกวนเช่นเดิม เนื่องจากเกิดความผิดพร่องชนิดไม่ลงดินทำให้กระแสลำดับศูนย์มีค่าไม่สูงตามไปด้วย
- กระแสเฟส A นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส B นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส C นั้นมีแนวโน้มค่อนข้างปกติเหมือนไม่ได้รับผลกระทบจากการไหลของกระแสจากเฟสอื่นๆ




รูป 3.21 แสดงรูปสัญญาณกระแสความผิดพร่องชนิด ABC ที่ตำแหน่ง 10% เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.21 ซึ่งแสดงสัญญาณความผิดพร่องชนิด ABC เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสปกติ จะเห็นว่าสัญญาณกระแสมีค่าสูงขึ้นทันทีเมื่อมีการเกิดความผิดพพร่องขึ้นโดยจะเห็นความแตกต่างของปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังนี้

- กระแสลำดับบวกนั้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากทันทีโดยรูปคลื่นจะยังคงรูปเป็นรูปซายน์ปกติแต่มีความแตกต่างด้านขนาดก่อนและหลังการเกิดความผิดพร่องอย่างมาก
- กระแสลำดับศูนย์นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย จากแต่เดิมเป็นเพียงสัญญาณกระแสรบกวนซึ่งมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์อย่างไรก็ตามค่าที่สูงขึ้นนี้ก็ยังถือว่ามีค่าน้อยมากและมีลักษณะเหมือนสัญญาณรบกวนเช่นเดิม เนื่องจากเกิดความผิดพร่องชนิดไม่ลงดินทำให้กระแสลำดับศูนย์มีค่าไม่สูงตามไปด้วย
- กระแสเฟส A นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส B นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ
- กระแสเฟส C นั้นมีแนวโน้มเหมือนกระแสลำดับบวกคือมีค่าสูงขึ้นทันทีหลังจากเกิดความผิดพร่องและเห็นปริมาณความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องทำให้มีกระแสไหลค่อนข้างมากกว่าเฟสอื่นๆ

จากรูปที่ 3.18 ถึง 3.21 ทำให้สรุปได้ว่าไม่ว่าจะเกิดความผิดพร่องประเภทไหนค่ากระแสลำดับบวกจะมีค่าสูงขึ้นทันทีและมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้าจะเกิดความผิดพร่อง และกระแสในเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าพุ่งสูงขึ้นอย่างทันทีเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นและมีค่าความแตกต่างระหว่างกระแส ณ เวลาก่อนเกิดความผิดพร่องกับกระแส ณ หลังช่วงเวลาที่เกิดความผิดพร่องค่อนข้างสูงมาก และสำหรับความผิดพร่องชนิดลงดินนั้นจะทำให้ค่ากระแสลำดับศูนย์มีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้าที่จะเกิดความผิดพร่อง อย่างไรก็ตามในช่วงที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะเห็นว่าเกิดช่วงทรานเซี้ยนต์ขึ้นในกระแสสำหรับกระแสทุกๆเฟสซึ่งคุณสมบัตินี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

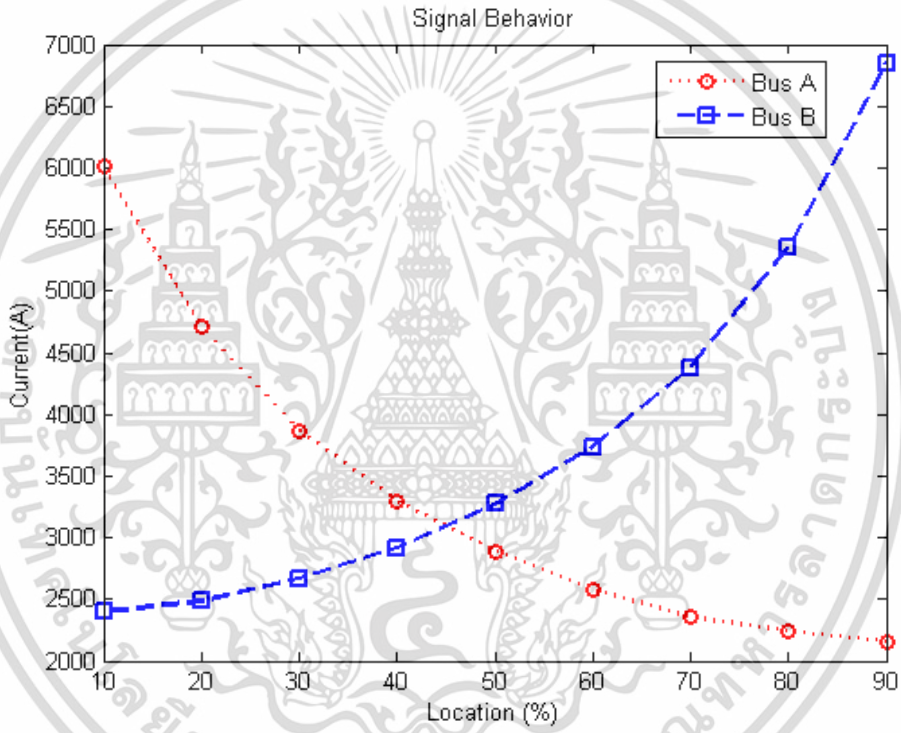
### 3.3.2 พฤติกรรมของรูปสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง

เนื่องจากมีการจำลองความผิดพร่องให้เกิดขึ้นในระบบจำลองที่ระยะตำแหน่งต่างๆในสายส่งจึงจำเป็นต้องรู้ถึงพฤติกรรมของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบจำลองว่าเป็นไปในแนวโน้มที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง 3.2** แสดงพฤติกรรมของกระแสของความผิดพร่องชนิด AG ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง

| Location | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ia1 | 6010.45 | 4708.83 | 3864.62 | 3299.26 | 2891.13 | 2580.09 | 2357.5 | 2243.08 | 2154.44 |
| Ia2 | 2398.3 | 2484.03 | 2669.99 | 2919.78 | 3271.95 | 3736.04 | 4379.99 | 5352.54 | 6851.38 |
| Ib1 | 343.786 | 287.165 | 268.058 | 268.006 | 266.86 | 312.447 | 371.084 | 465.376 | 604.954 |
| Ib2 | 419.582 | 420.644 | 421.732 | 421.774 | 425.785 | 495.154 | 567.369 | 662.602 | 796.05 |
| Ic1 | 674.699 | 540.196 | 430.991 | 375.932 | 317.422 | 269.475 | 268.058 | 269.395 | 270.702 |
| Ic2 | 710.664 | 637.879 | 571.204 | 545.836 | 524.969 | 527.897 | 502.8 | 466.964 | 423.116 |



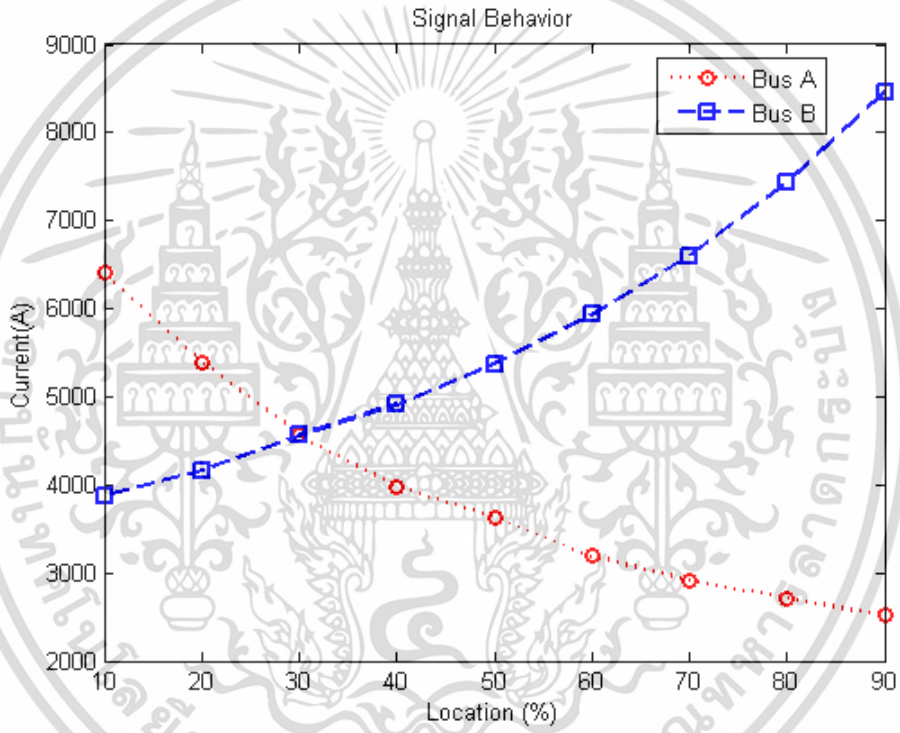

รูปที่ 3.22 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด AG

จากรูปที่ 3.22 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่ากระแสสูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรกระแสสูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

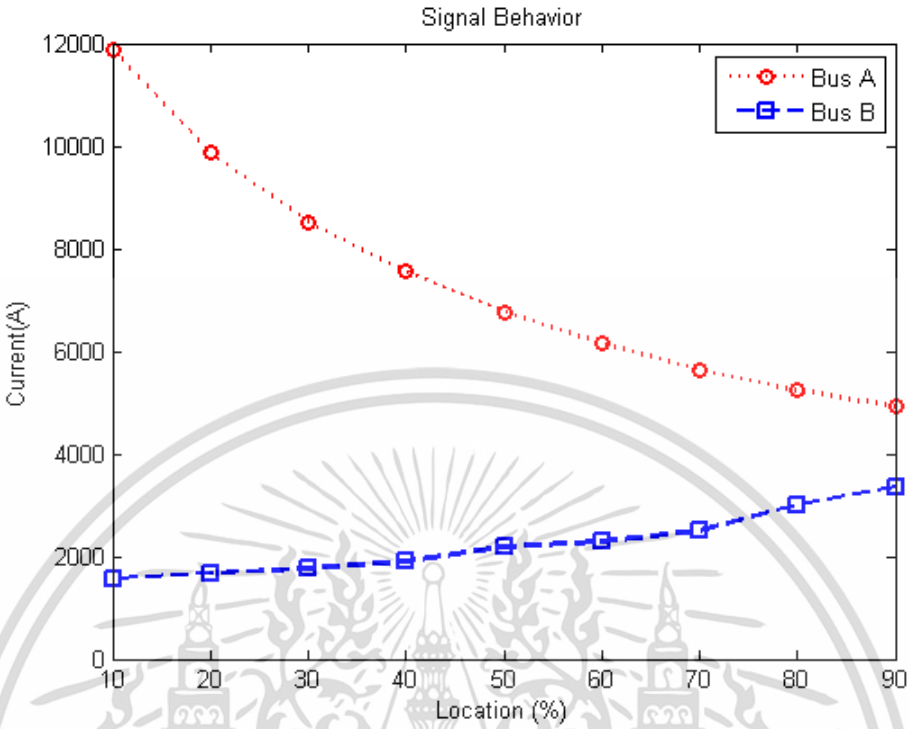
**ตาราง 3.3** พฤติกรรมของกระแสของความผิดพร่องชนิด ABG ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง

| Location | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ia1 | 6404.84 | 5388.19 | 4567.01 | 3981.17 | 3626.95 | 3195.21 | 2913.51 | 2715.86 | 2514.43 |
| Ia2 | 3874.7 | 4165.81 | 4560.41 | 4915.74 | 5367.97 | 5931.32 | 6604.47 | 7430.47 | 8466.32 |
| Ib1 | 11889.2 | 9861.77 | 8511.63 | 7548.22 | 6757.86 | 6152.71 | 5648.71 | 5234.14 | 4919.64 |
| Ib2 | 1575.84 | 1681.06 | 1762.79 | 1911.07 | 2188.84 | 2285.02 | 2504.01 | 3001.82 | 3359.92 |
| Ic1 | 665.927 | 504.771 | 411.54 | 344.969 | 283.397 | 268.005 | 268.058 | 269.395 | 270.702 |
| Ic2 | 634.489 | 555.917 | 493.245 | 473.886 | 460.978 | 451.99 | 433.973 | 474.493 | 550.044 |




รูปที่ 3.23 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด ABG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



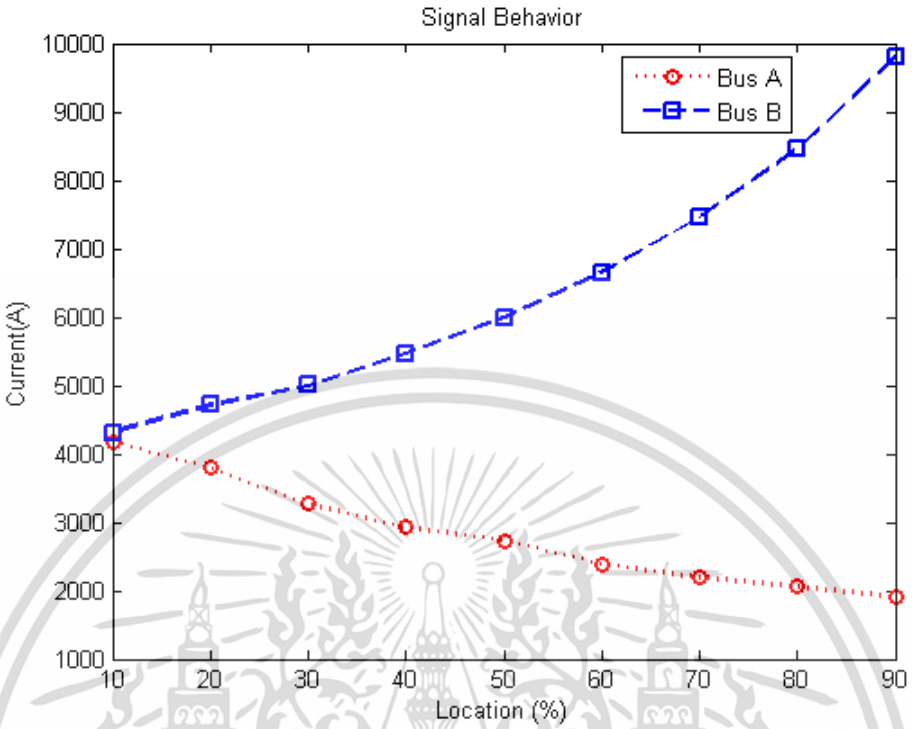

รูปที่ 3.24 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส B ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด ABG

จากรูปที่ 3.23 และ 3.24 นั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 3.22 แต่ว่ามีความไม่สมมาตรในปริมาณของกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสได้มีการแบ่งไหลไปทางเฟส A และ B ที่ตำแหน่งความผิดพร่องต่างๆอย่างไม่เท่ากันทำให้กราฟที่ออกมานั้นเหลื่อมกัน และกระแสที่วัดได้จากบัส A แสดงว่ากระแสไหลผ่านเฟส A ต่ำกว่าเฟส B ในขณะที่บัส B กลับวัดได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านเฟส A มีค่าสูงกว่าเฟส B

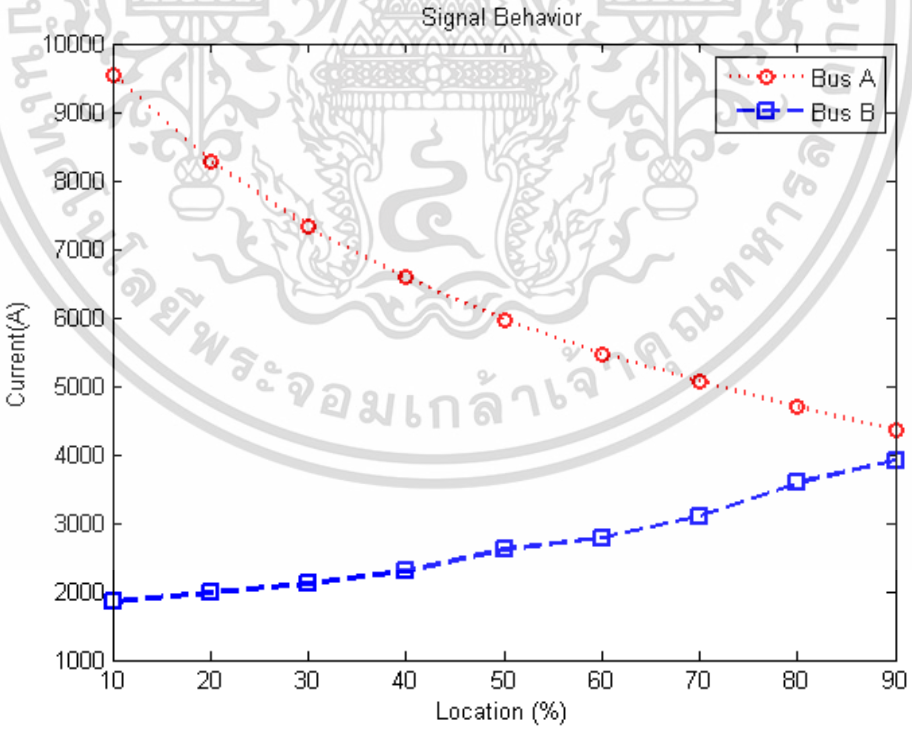
**ตาราง 3.4** พฤติกรรมของกระแสของความผิดพร่องชนิด AB ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง

| Location | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ia1 | 4181.86 | 3789.82 | 3270.74 | 2921.33 | 2728.2 | 2392.95 | 2188.25 | 2054.7 | 1899.54 |
| Ia2 | 4315.53 | 4712.53 | 5000.27 | 5462.14 | 5989.11 | 6652.74 | 7459.5 | 8452.15 | 9803.99 |
| Ib1 | 9550.41 | 8274.3 | 7326.04 | 6582.27 | 5973.2 | 5462.5 | 5073.71 | 4690.82 | 4362.76 |
| Ib2 | 1842.23 | 1984.4 | 2105.65 | 2293.79 | 2609.82 | 2779.95 | 3099.93 | 3586.88 | 3920.51 |
| Ic1 | 270.702 | 269.395 | 268.058 | 268.005 | 266.86 | 268.005 | 268.058 | 269.395 | 270.702 |
| Ic2 | 419.582 | 420.644 | 421.732 | 421.774 | 422.695 | 421.774 | 421.732 | 420.644 | 419.582 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.25 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด AB



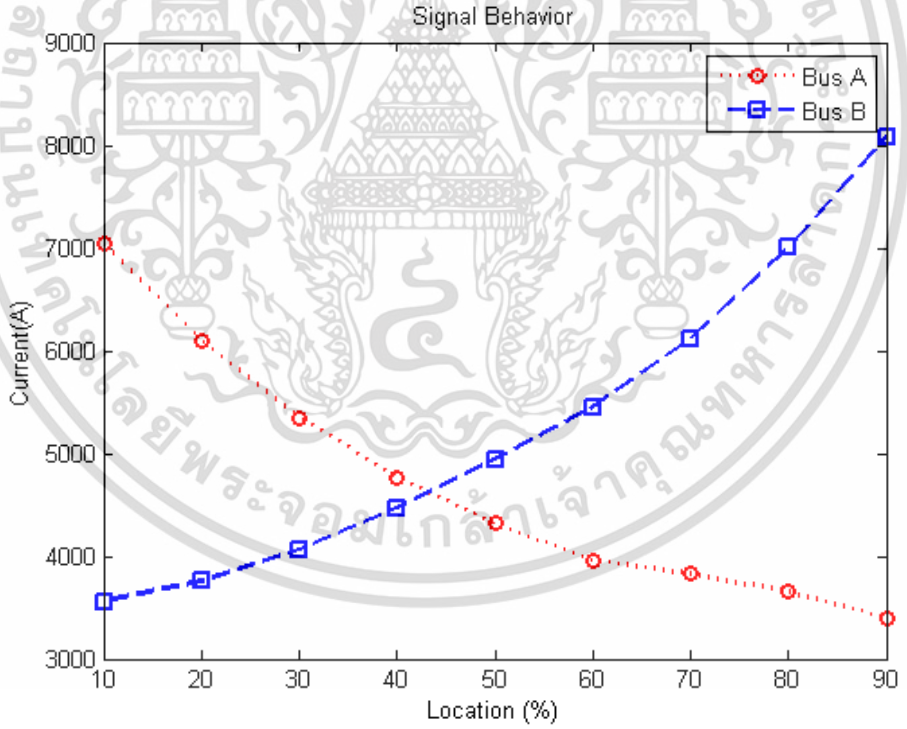

รูปที่ 3.26 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส B ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด AB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.25 และ 3.26 นั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 3.23 และ 3.24 และกระแสที่วัดได้จากบัส A แสดงว่ากระแสไหลผ่านเฟส A ต่ำกว่าเฟส B ในขณะที่บัส B กลับวัดได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านเฟส A มีค่าสูงกว่าเฟส B แต่จะเห็นว่าค่ากระแสรวมที่วัดได้จากทั้งสองบัสของเฟส A และ B นั้นมีค่าเท่ากัน เนื่องจากเป็นความผิดพร่องแบบ AB

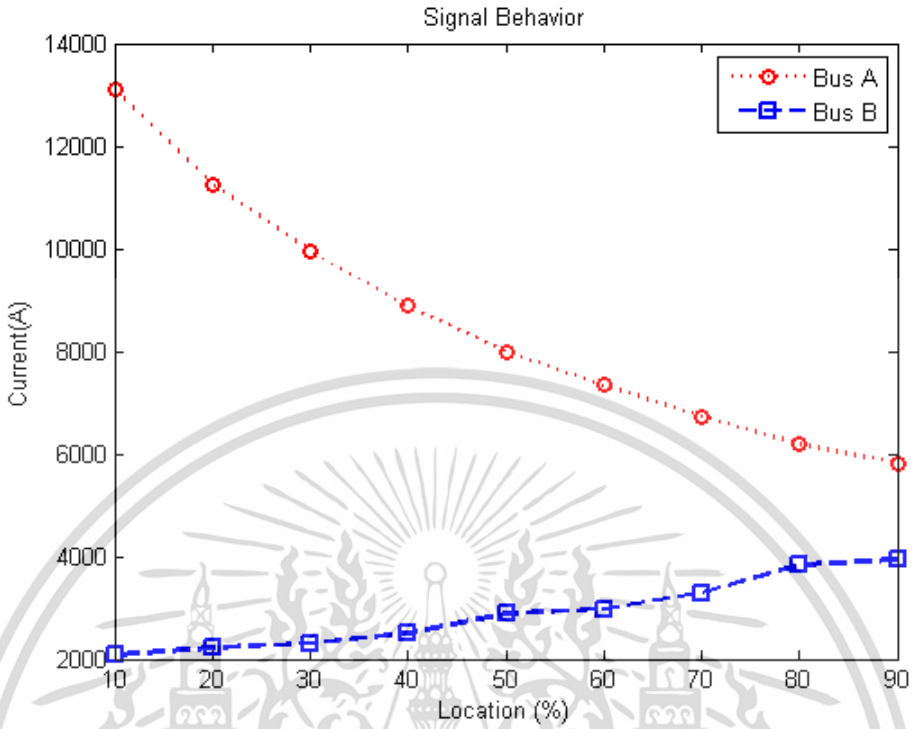
**ตาราง 3.5** พฤติกรรมของกระแสของความผิดพร่องชนิด ABC ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายส่ง

| Location | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ia1 | 7043.58 | 6102.07 | 5349.88 | 4769.58 | 4318.17 | 3960.97 | 3827.77 | 3656.09 | 3397.67 |
| Ia2 | 3560.01 | 3756.72 | 4064.71 | 4469.26 | 4938.76 | 5450.42 | 6122.66 | 7006.22 | 8084 |
| Ib1 | 13108.5 | 11262.6 | 9946.1 | 8885.07 | 7985.52 | 7335.18 | 6724.64 | 6183.71 | 5811.9 |
| Ib2 | 2080.7 | 2226.45 | 2309.5 | 2497.77 | 2888.61 | 2977.21 | 3289.97 | 3831.5 | 3944.32 |
| Ic1 | 4481.37 | 4289.67 | 3719.74 | 3373.36 | 3241.15 | 2840.66 | 2630.86 | 2527.3 | 2364.36 |
| Ic2 | 5786.14 | 6078.47 | 6545.05 | 7152.85 | 7784.11 | 8623.54 | 9601.22 | 10847 | 12615 |

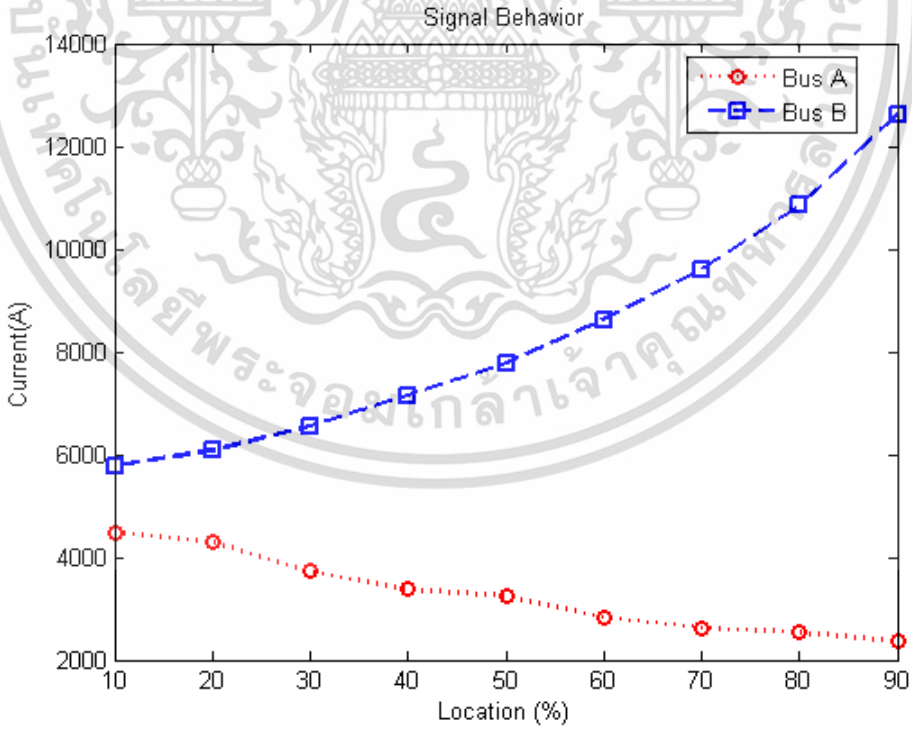



รูปที่ 3.27 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส A ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.28 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส B ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด ABC




รูปที่ 3.29 แสดงแนวโน้มของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบจำลองของเฟส C ที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องชนิด ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.27 ถึง 3.29 นั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 3.25 และ 3.26 และจะเห็นว่าค่ากระแสรวมที่วัดได้จากทั้งสองบัสของเฟส A, B และ C นั้นมีค่าเท่ากันเนื่องจากเป็นความผิดพร่องแบบ ABC

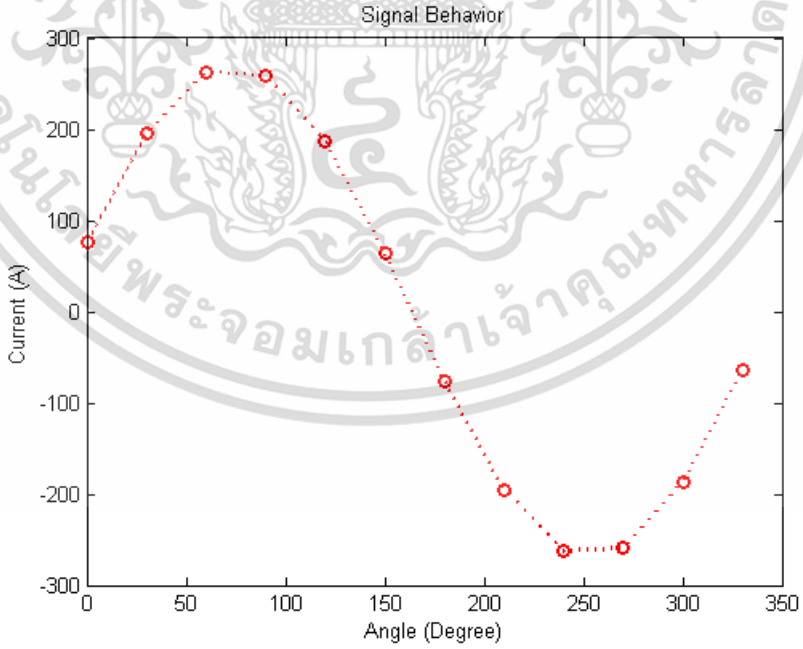
จากรูปกราฟที่ได้แสดงมาจะเห็นว่าค่าของกระแสจะลดลงเรื่อยๆเมื่อยิ่งห่างจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยหากวัดค่ากระแสจากบัส A เมื่อตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องเกิดห่างจากบัส A จะเห็นว่าค่ากระแสมีค่าลดลงซึ่งยิ่งห่างมากค่ากระแสก็จะยิ่งลดลง ในทำนองเดียวกันหากวัดค่ากระแสจากบัส B เมื่อตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องเกิดห่างจากบัส B จะเห็นว่าค่ากระแสมีค่าลดลง ซึ่งได้ผลเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกัน

จากกราฟแสดงเพียงแค่พฤติกรรมจากความผิดพร่องที่เกิดจากความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส และสามเฟสสมดุล ซึ่งสุ่มมาแสดงเพียงประเภทละหนึ่งตัวอย่างเท่านั้นคือ AG, ABG, AB และ ABC ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มพฤติกรรมไปในแนวเดียวกัน

### 3.3.3 พฤติกรรมของรูปสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นตามมุมที่เกิดความผิดพร่อง

จากการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณกระแสในหัวข้อย่อยที่ผ่านมานั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงประเภทความผิดพร่อง และตาแหน่งที่เกิดความผิดพร่องเพื่อทาการศึกษาถึงพฤติกรรม แต่ในหัวข้อนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่เกิดความผิดพร่อง และทาการสังเกตและวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณสำหรับความผิดพร่องประเภท AG ที่ตำแหน่ง 10% โดยมีการเปลี่ยนแปลงมุมที่เกิดความผิดพร่องเปลี่ยนจาก 0 ถึง 330 องศา โดยเพิ่มทีละ 30 องศา




รูป 3.30 แสดงกระแสเฟส A สำหรับความผิดพร่องชนิด AG ที่ตำแหน่ง 10% ณ มุมที่ความผิดพร่องต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.30 จะเห็นว่ารูปกราฟเป็นรูปคลื่นซายน์ซึ่งมีแนวโน้มตรงตามสัญญาณกระแส ณ มุมที่เกิดความผิดพร่องต่างๆ โดยที่มุม 0 และ 180 องศาจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด และที่มุม 90 จะให้ค่ากระแสสูงที่สุด ในขณะที่มุม 270 องศาจะให้ค่ากระแสมากที่สุด ซึ่งค่ากระแสที่ได้นั้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปคลื่นซายน์ ณ มุมต่างๆเหมือนปกติ

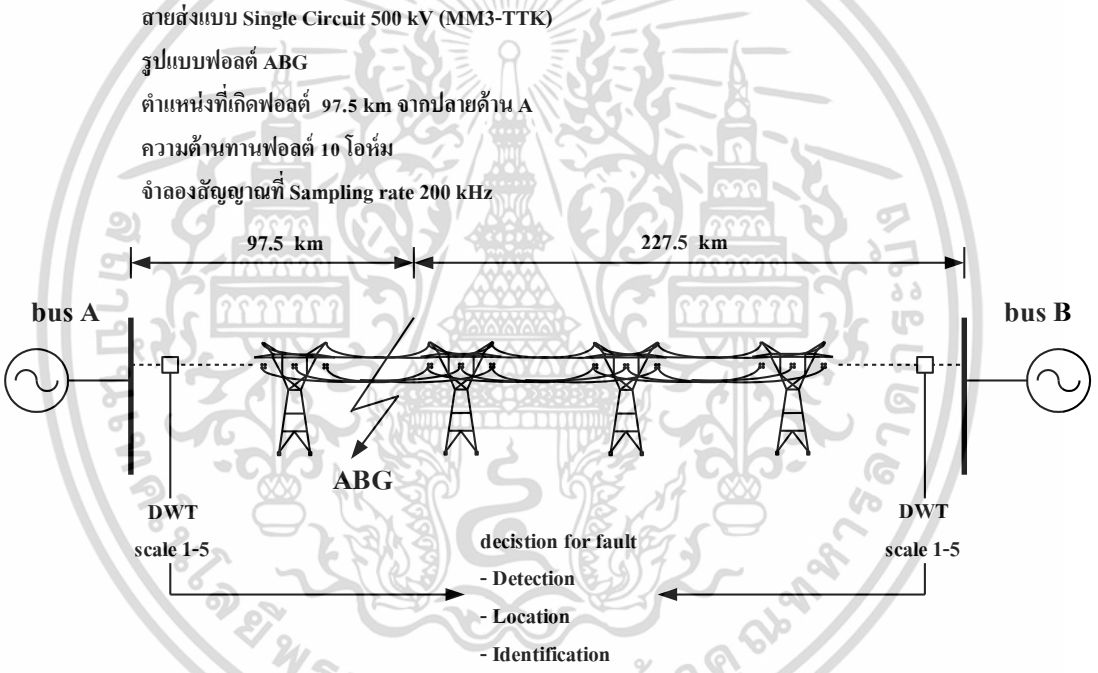
จากการศึกษาถึงพฤติกรรมของสัญญาณกระแสในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าสัญญาณที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตคือค่าสัญญาณกระแสลำดับบวก, กระแสลำดับศูนย์ และกระแสเฟสต่างๆ ซึ่งรายละเอียดในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตนั้นจะกล่าวต่อในบทที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยทำการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่ปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่ง ผลการวิเคราะห์ที่ปลายแต่ละด้านถูกนำมาประมวลผลอีกครั้งเพื่อใช้ในการตัดสินใจและแสดงรายละเอียดของสัญญาณความผิดพร่องต่อไป ซึ่งลักษณะการนำข้อมูลที่ปลายทั้ง 2 ด้านมาใช้งานนี้เป็นการนำหลักการของระบบป้องกันแบบสื่อสาร (Tele-protection) มาประยุกต์ใช้นั่นเอง ในปัจจุบันระบบการสื่อสารที่มีหลายประเภทด้วยกัน เช่น ระบบ power line carier (PLC) , ระบบไมโครเวฟ, ระบบไฟเบอร์ออฟติค ,ระบบดาวเทียม GPS เป็นต้น




รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของการนำระบบสื่อสารมาใช้กับป้องกันสายส่ง

สมมติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องคือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสและแรงดันจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีความผิดพร่องจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มุมที่เริ่มเกิดความผิดพร่อง ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดความผิดพร่อง เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษารูปแบบของความผิดพร่องที่แตกต่างกันจำนวน 1080 ตัวอย่าง สำหรับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินและ 600 ตัวอย่างสำหรับระบบทดลองใต้พื้นดิน ซึ่งสัญญาณความผิดพร่องแต่ละแบบจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในหลายสเกลเพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะที่สำคัญ โดยนำมาพิจารณาร่วมกับหลักการและเทคนิคพื้นฐานที่มีอยู่เดิมเข้ามาประกอบและพยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความสะดวกในการอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์จึงได้นำตัวอย่างของสัญญาณความผิดพร่องกระแสและแรงดันที่ได้จากการจำลองด้วยความถี่การสุ่ม (Sampling frequency rate) 200 kHz สำหรับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดิน และ 1000 kHz สำหรับระบบทดลองสายส่งใต้พื้นดิน (รายละเอียดได้กล่าวในบทที่ 3) มาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่จากสัมประสิทธิ์ที่ได้ในแต่ละสเกล ผลที่ได้จะนำมาใช้ใน 2 ลักษณะคือ การตรวจจับหาความผิดพร่องที่เกิดขึ้นและใช้เป็นอินพุทในการระบุประเภทของความผิดพร่อง โดยเลือกใช้ข้อมูลในช่วง ¼ ไซเคิลหลังจากที่เริ่มเกิดความผิดพร่อง ซึ่งสั้นกว่าเมื่อเทียบกับหลักการเดิมที่ใช้การแปลงฟูเรียร์ที่ต้องใช้ช่วงของข้อมูลในการวิเคราะห์อย่างน้อย 1 ไซเคิล ในการอธิบายการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตนี้จึงได้ยกตัวอย่างของสัญญาณความผิดพร่องตามระบบในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นความผิดพร่องที่เฟส A และ B ลงดิน (ABG) ที่ระยะทาง 97.5 กิโลเมตร วัดจากปลายด้าน A (30 % ของระยะทางเต็ม 325 กิโลเมตร) เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาวิเคราะห์ซึ่งจะได้รูปสัญญาณตามรูปที่ 3.16 และ 3.17 โดยจะเห็นว่าเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบสายส่งนั้นค่ากระแสในเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทำให้เกิดสภาวะทรานเซี้ยนต์ซึ่งจะมีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงเกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องนั้นจึงควรวิเคราะห์ในรูปของสัญญาณเวฟเล็ตมากกว่าสัญญาณกระแสปกติ

## 4.1 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตสำหรับวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องบนสายส่ง

รูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำสัญญาณกระแสความผิดพร่องมาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพื่อลดจำนวนในการวิเคราะห์และความซับซ้อนในการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเล็ตจะนำสัญญาณกระแสความผิดพร่องที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP ในแต่ละเฟสจากปลายเคเบิลแต่ละด้านมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence) โดยใช้เมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation Matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ 4.1

งานวิจัยฉบับได้เลือกใช้เมตริกซ์การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transformation Matrix) เนื่องระบบเคเบิลที่ใช้ในการจำลองนั้นเป็นระบบที่มีการไขว้สลับสายแบบสมบูรณ์

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \qquad (4.1)$$

เมื่อ $I_0$ = Ground mode หรือ Zero sequence

$I_1$ = Aerial mode หรือ Positive sequence

$I_2$ = Aerial mode หรือ Negative sequence

T = เมตริกซ์การแปลงซึ่งในตัวอย่างที่นี้ใช้เมตริกการแปลงของคาร์ก (Clarke)

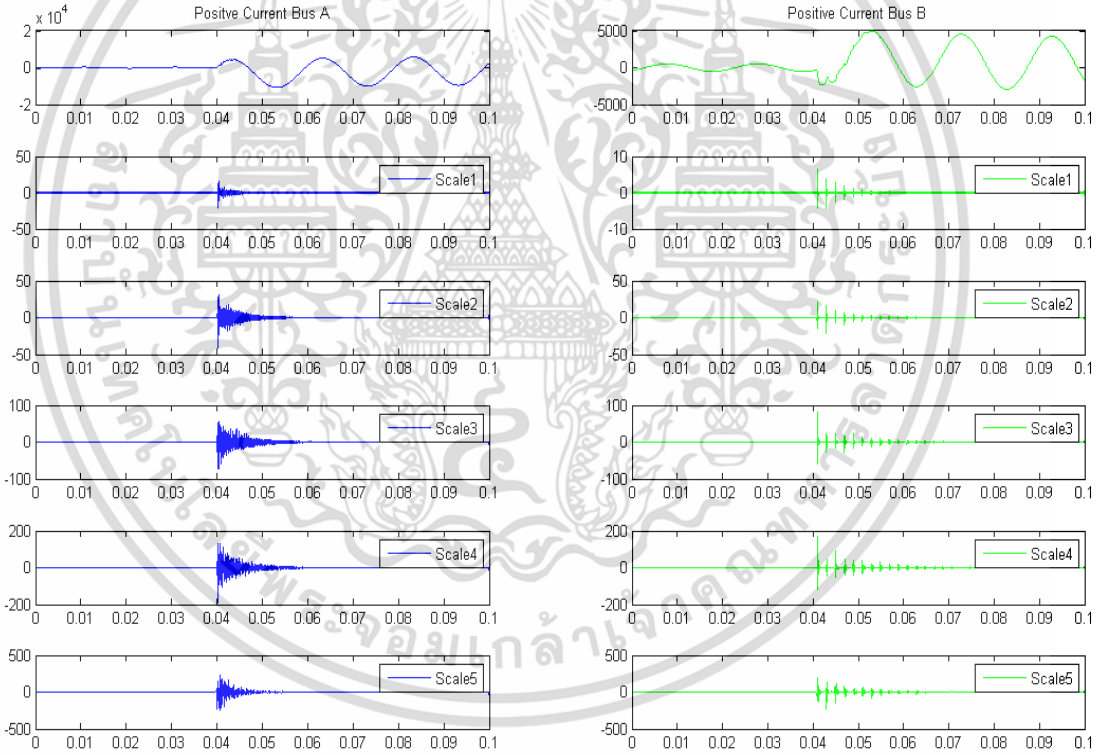
หลังจากที่ทำการแปลงองค์ประกอบในแต่ละเฟสให้อยู่ในรูปองค์ประกอบลำดับต่างๆ แล้วการวิเคราะห์สัญญาณทำได้โดยการนำองค์ประกอบลำดับบวกของปลายเคเบิลแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด daubechies4 (db4) มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกัน ซึ่งแต่ละสเกลจะแสดงค่าของช่วงความถี่ดังนี้

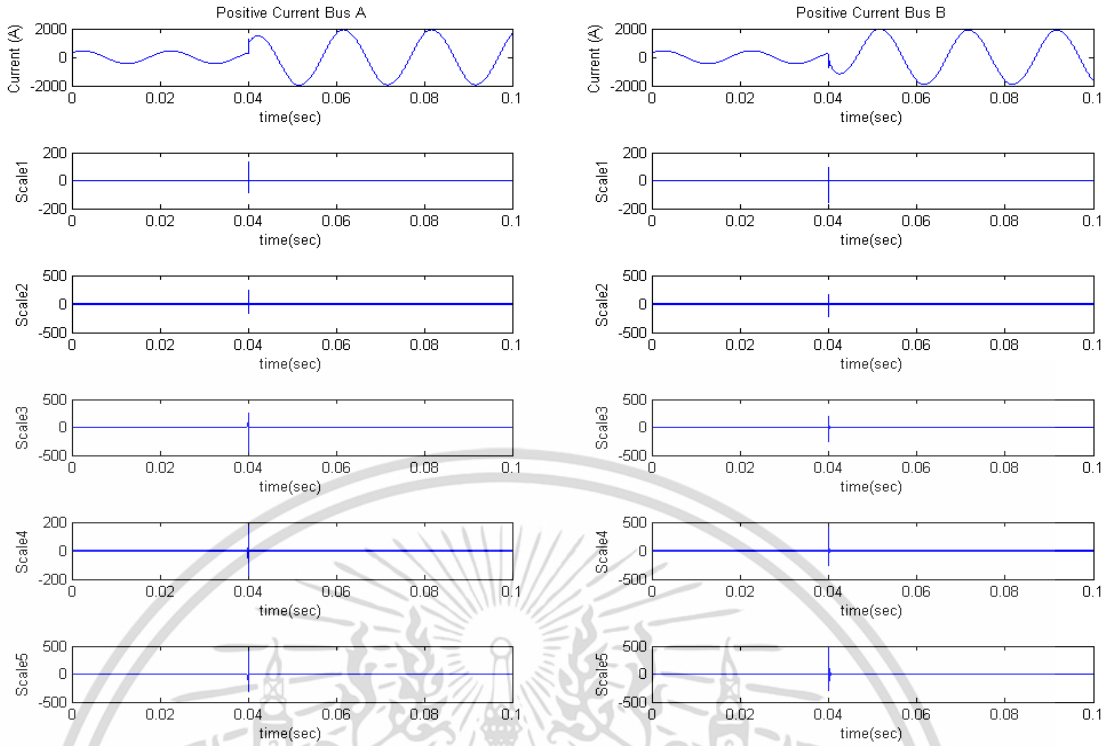
**ตาราง 4.1** แสดงช่วงความถี่ในการแปลงเวฟเล็ตของระบบจำลองสายส่ง

| สเกล | ช่วงความถี่ (kHz) | |
|---|---|---|
| | ระบบสายส่งเหนือพื้นดิน | ระบบสายส่งใต้พื้นดิน |
| 1 | 50-100 | 250-500 |
| 2 | 25-50 | 125-250 |
| 3 | 12.5-25 | 62.5-125 |
| 4 | 6.25-12.5 | 31.25-62.5 |
| 5 | 3.125-6.25 | 15.625-31.25 |




รูปที่ 4.2 แสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของกระแสลำดับบวกของระบบสายส่งเหนือพื้นดินที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

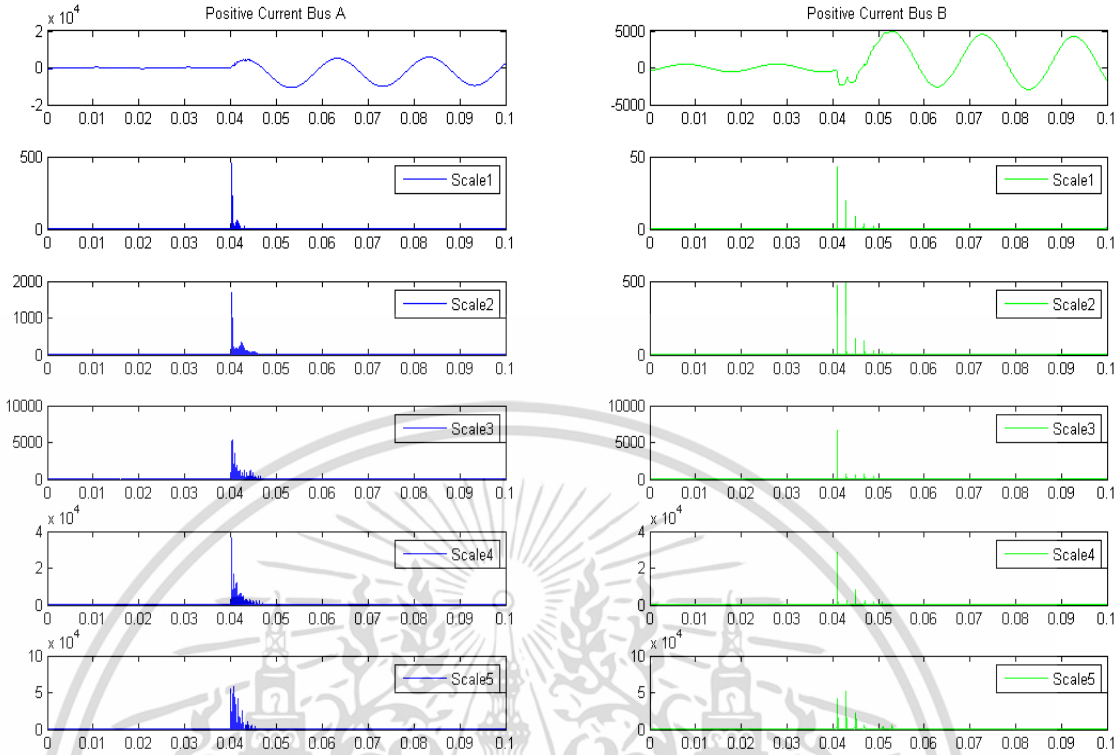



รูปที่ 4.3 แสดงการแปลงเวฟเล็ตของกระแสลำดับบวกของระบบสายส่งใต้พื้นดินที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน

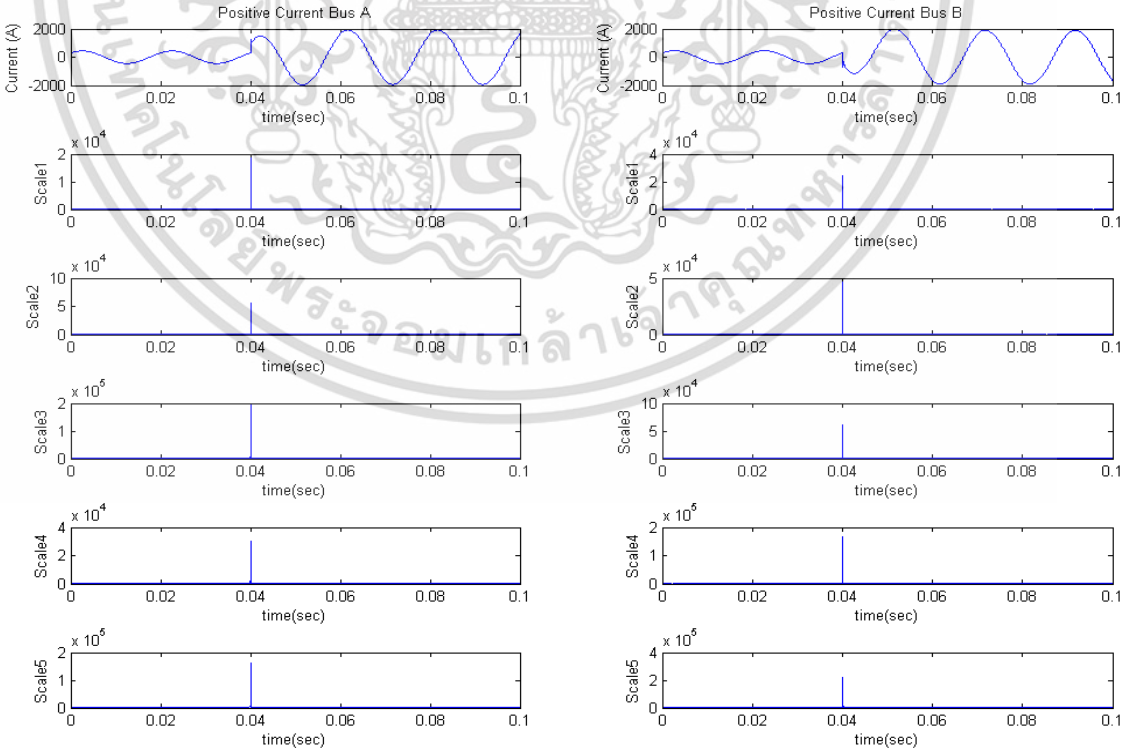
จากผลการแปลงเวฟเล็ตสามารถสังเกตได้ว่าก่อนมีความผิดพร่องเกิดขึ้น ($t<0.04$ s) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตจะมีต่ำมากๆประมาณศูนย์แต่ในสภาวะที่เริ่มมีความผิดพร่อง ($t\geq0.04$s) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1–5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งในระบบสายส่งแบบเหนือพื้นดินและระบบสายส่งแบบใต้พื้นดิน

แต่จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ในช่วงหลังการเกิดความผิดพร่องมีสัญญาณรบกวนอยู่มากซึ่งทำให้เห็นความแตกต่างไม่ชัดเจนเท่าไร ดังนั้นเพื่อให้การพิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นโดยสัญญาณรบกวนในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำกว่าหนึ่งนั้นจะถูกลดทอนออกไปด้วย ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะจะนำไปวิเคราะห์ต่อคือค่าสัมประสิทธิ์ที่ยกกำลังสองแล้วในรูปที่ 4.4 และ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.4 แสดงการแปลงเวฟเล็ตยกกำลังสองของกระแสลำดับบวกของระบบสายส่งเหนือพื้นดินที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน




รูปที่ 4.5 แสดงการแปลงเวฟเล็ตยกกำลังสองของกระแสลำดับบวกของระบบสายส่งใต้พื้นดินที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการแปลงเวฟเล็ตสามารถสังเกตได้ว่าก่อนมีความผิดพร่องเกิดขึ้น ($t<0.04$ s) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตจะมีต่ำมากๆประมาณศูนย์แต่ในสภาวะที่เริ่มมีความผิดพร่อง ($t\geq0.04$s) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1–5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในระบบสายส่งเหนือพื้นดินและสายส่งใต้พื้นดิน และจะเห็นว่าสัญญาณรบกวนนั้นถูกตัดออกไปอย่างเห็นได้ชัด ทำให้สามารถนำค่าสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตยกกำลังสองนี้มาใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งได้ทั้งสองระบบ และทำให้มีความสะดวกในการวิเคราะห์และกำหนดเกณฑ์ต่างๆได้ง่ายขึ้น แต่ก่อนที่จะนำสัญญาณหลังจากการแปลงเวฟเล็ตไปทำการตรวจจับและระบุประเภทความผิดพร่องในระบบสายส่งนั้นจำเป็นจะต้องศึกษาถึงพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตเพื่อศึกษาถึงแนวโน้มพฤติกรรมที่สัญญาณเวฟเล็ตได้แสดงออกมาว่ามีแนวโน้มอย่างไรแล้วจึงนำพฤติกรรมเหล่านั้นไปเป็นข้อมูลที่จะใช้ในการกำหนดตัวแปรในการตรวจจับและระบุประเภทความผิดพร่องต่อไป

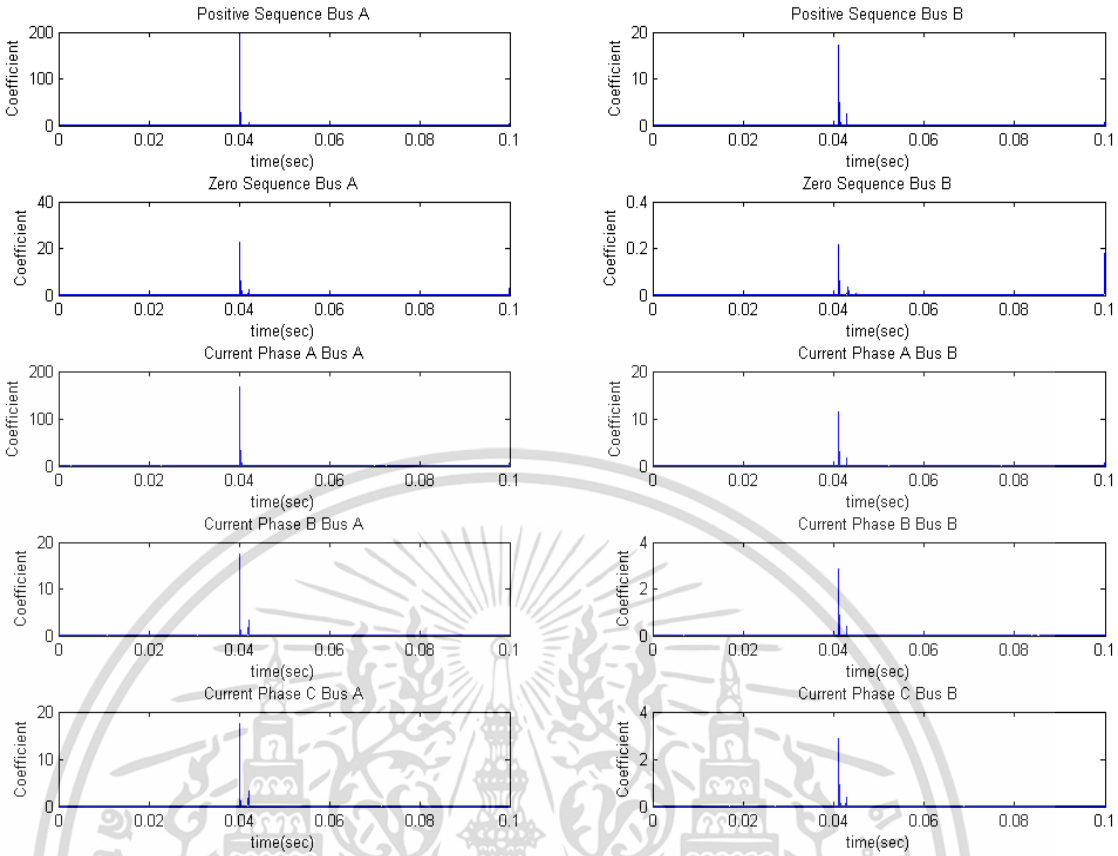
## 4.2 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ต

ในบทที่ 3 นั้นได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณของกระแสในแต่ละเฟสที่ไปแล้ว และในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณหลังจากผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตเป็นที่เรียบร้อยแล้วเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบพฤติกรรมว่าเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันโดยในส่วนนี้จะนำค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสต่างๆในสเกลที่ 1 ที่เกิดความผิดพร่องในตำแหน่งต่างๆ บนสายส่งที่วัดได้จากทั้งฝั่งบัส A และ B มาทำการพิจารณา ซึ่งสาเหตุสำคัญที่จะทำการพิจารณาถึงพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตก็คือเพื่อสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณเวฟเล็ตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงประเภทความผิดพร่องหรือตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง

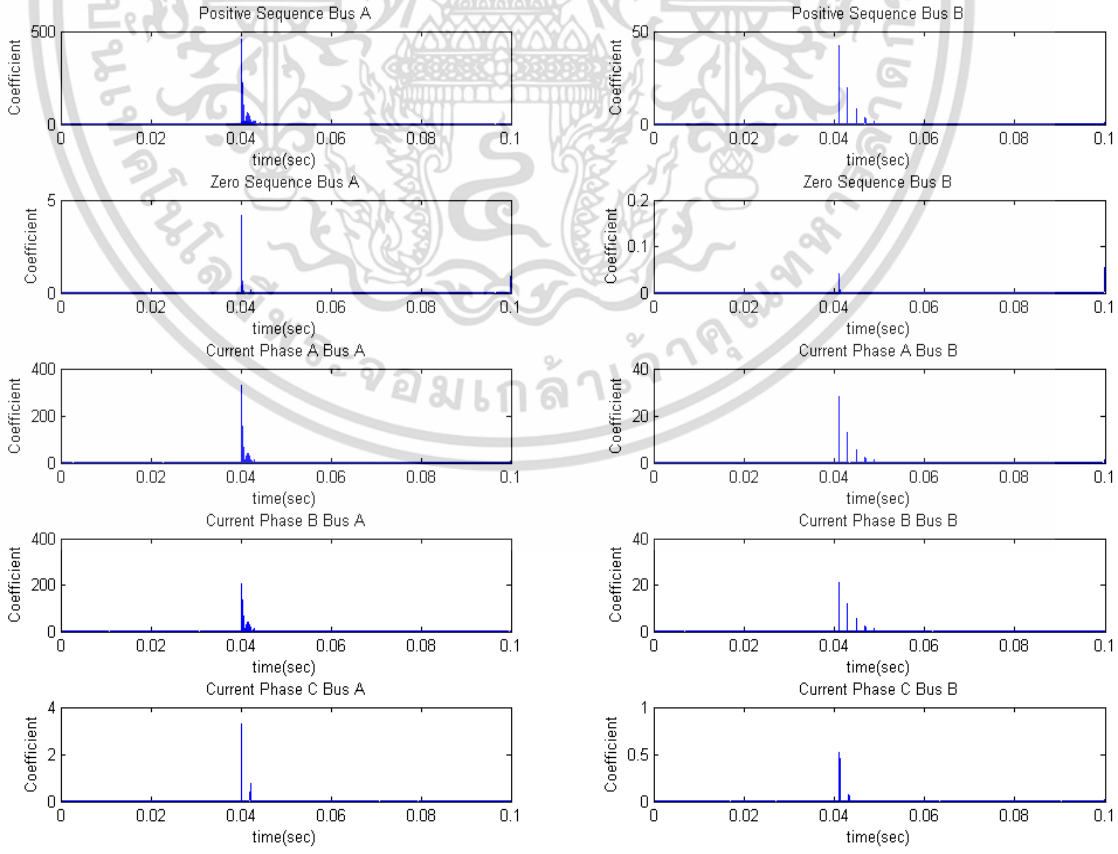
โดยการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมของสัญญาณเวฟเล็ตนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำมาวิเคราะห์เพื่อหาว่าตัวแปรใดควรจะนำมาใช้ในการตรวจจับหรือระบุประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จะเป็นอินพุทให้กับอัลกอลิทึมในการตรวจจับ หรือระบุประเภทความผิดพร่องของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการแสดงพฤติกรรมของสัญญาณเวฟเล็ตสำหรับระบบที่เกิดความผิดพร่องชนิด AG, ABG, AB และ ABC เพื่อเป็นตัวแทนพฤติกรรมของความผิดพร่องในแบบเฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส และสามเฟสสมดุลตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดความผิดพร่อง, ตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง และมุมเฟสที่เกิดความผิดพร่องซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อยๆดังนี้

### 4.2.1 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

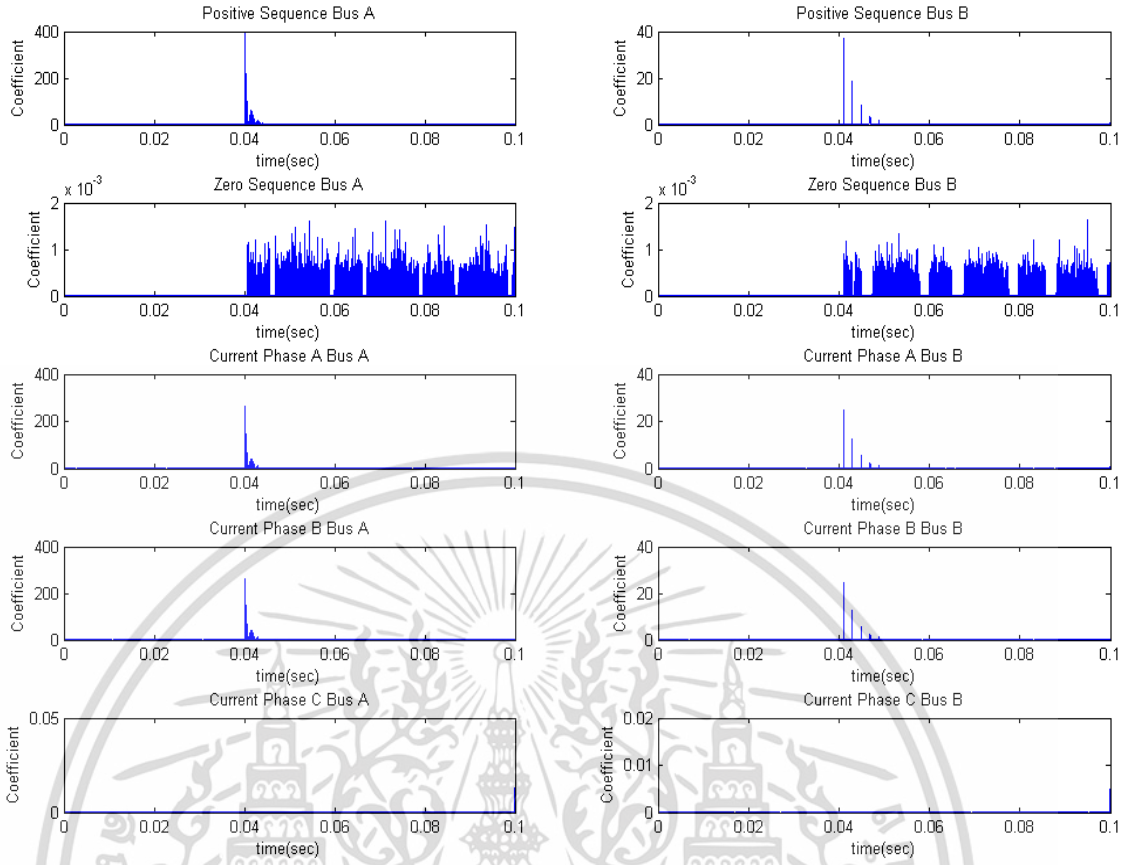



รูปที่ 4.6 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ AG ที่ตำแหน่ง 10%

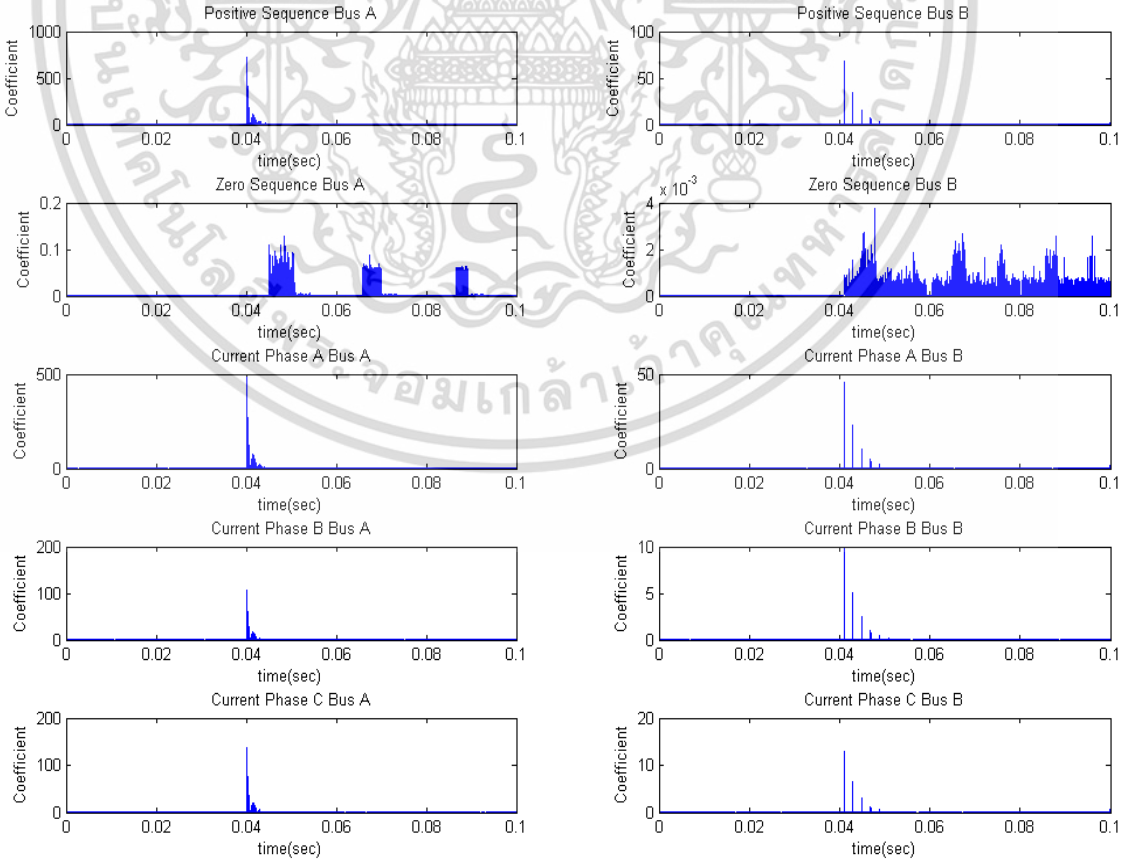



รูปที่ 4.7 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ ABG ที่ตำแหน่ง10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.8 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ AB ที่ตำแหน่ง10%




รูปที่ 4.9 การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสต่างๆของความผิดพร่องแบบ ABC ที่ตำแหน่ง10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.6 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสที่เฟสต่างๆของความผิดพร่องชนิด AG นั้น จะเห็นว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสที่เฟส A ที่บัส A นั้นจะมีค่าสูงมากโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 170 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเฟส B และ C อย่างมาก เพราะเฟส A นั้นเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องซึ่งเกิดสัญญาณทรานเซี้ยนต์ขึ้นอย่างรุนแรงในขณะที่เกิดความผิดพร่องทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้มีค่าสูงมาก ในขณะที่เฟส B และ C นั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 17-18 ในขณะที่ค่าที่วัดได้จากบัส B จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากบัส A มากเนื่องจากตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ที่ 10% ของสายส่งซึ่งจะใกล้กับทางบัส A มากกว่า

จากรูป 4.7 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสที่เฟสต่างๆของความผิดพร่องชนิด ABG นั้น จะเห็นว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสที่เฟส A และเฟส B ที่บัส A นั้นจะมีค่าสูงมากโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 320 และ 200 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเฟส C อย่างมาก เพราะเฟส A และ B นั้นเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องซึ่งเกิดสัญญาณทรานเซี้ยนต์ขึ้นอย่างรุนแรงในขณะที่เกิดความผิดพร่องทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้มีค่าสูงมาก ในขณะที่เฟส C นั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3 ในขณะที่ค่าที่วัดได้จากบัส B จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากบัส A มากเนื่องจากตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ที่ 10% ของสายส่งซึ่งจะใกล้กับทางบัส A มากกว่า

จากรูป 4.8 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสที่เฟสต่างๆของความผิดพร่องชนิด AB นั้น จะเห็นว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสที่เฟส A และเฟส B ที่บัส A นั้นจะมีค่าสูงมากโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 260 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเฟส C อย่างมาก เพราะเฟส A และ B นั้นเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องซึ่งเกิดสัญญาณทรานเซี้ยนต์ขึ้นอย่างรุนแรงในขณะที่เกิดความผิดพร่องทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้มีค่าสูงมาก ในขณะที่เฟส C นั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณศูนย์ และจะเห็นว่าค่ากระแสลำดับศูนย์ของความผิดพร่องชนิดนี้นั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณศูนย์ในขณะที่ความผิดพร่องชนิด AG และ ABG ซึ่งได้กล่าวไปก่อนหน้านี้นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์อยู่ที่ประมาณ 4-20 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วนั้นจะเห็นว่าค่ากระแสลำดับศูนย์สำหรับความผิดพร่องประเภทลงดินจะมีค่าสูงกว่าความผิดพร่องประเภทที่ไม่ลงดินมาก และค่าที่วัดได้จากบัส B จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากบัส A มากเนื่องจากตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ที่ 10% ของสายส่งซึ่งจะใกล้กับทางบัส A มากกว่า

จากรูป 4.9 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสที่เฟสต่างๆของความผิดพร่องชนิด ABC นั้น จะเห็นว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสที่เฟส A, B และเฟส C ที่บัส A นั้นจะมีค่าสูงมากโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 100-500 ซึ่งมีค่าสูงมาก เพราะเฟส A, B และ C นั้นเป็นเฟสที่เกิดความผิดพร่องซึ่งเกิดสัญญาณทรานเซี้ยนต์ขึ้นอย่างรุนแรงในขณะที่เกิดความผิดพร่องทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้มีค่าสูงมาก ในขณะค่ากระแสลำดับศูนย์นั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณศูนย์ และค่าที่วัดได้จากบัส B จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากบัส A มากเนื่องจากตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ที่ 10% ของสายส่งซึ่งจะใกล้กับทางบัส A มากกว่า

จากรูปกราฟที่แสดงมาเบื้องต้นนั้นทำให้สรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้สำหรับเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าสูงกว่าเฟสที่ไม่เกิดความผิดพร่องอยู่หลายเท่า และค่าสัมประสิทธิ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสลำดับศูนย์ของความผิดพร่องประเภทลงดินจะมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ของความผิดพร่องประเภทที่ไม่ลงดิน และค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกจะมีค่าสูงไม่ว่าจะเกิดความผิดพร่องประเภทอะไร

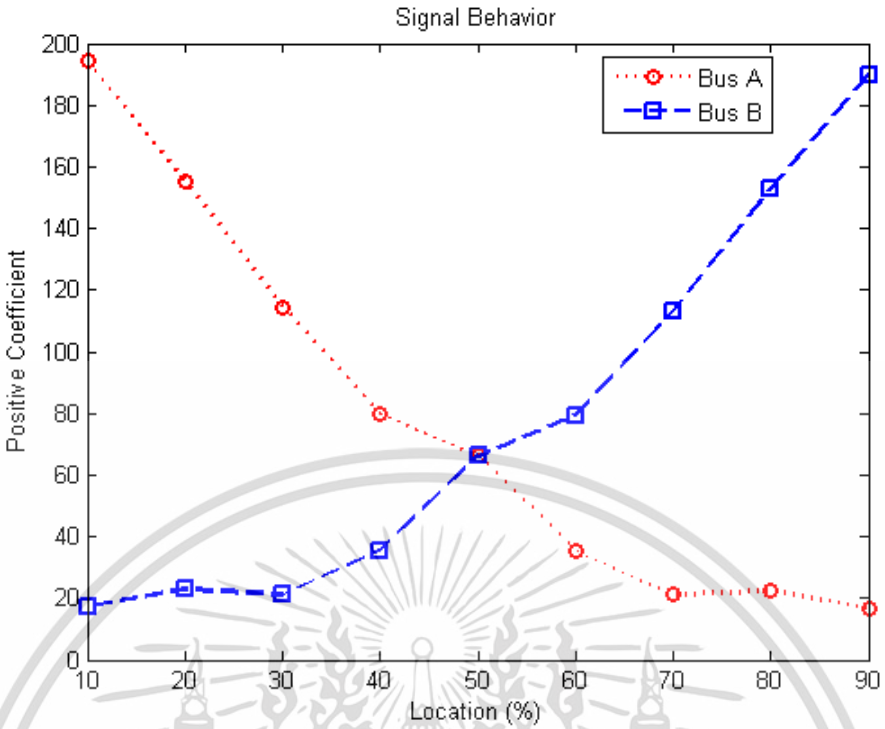
### 4.2.2 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องที่ตำแหน่งต่างๆ

ในหัวข้อย่อยที่ผ่านมานั้นได้กล่าวถึงพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตที่ความผิดพร่องประเภทต่างๆแล้วซึ่งจะเห็นว่าแนวโน้มของพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตนั้นมีแนวโน้มไปทางเดียวกับพฤติกรรมของสัญญาณกระแสก่อนการแปลงเวฟเล็ต แต่ในหัวข้อย่อยนี้จะทำการแสดงความแตกต่างของพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง จากตำแหน่ง 10% - 90% โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10% เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ต

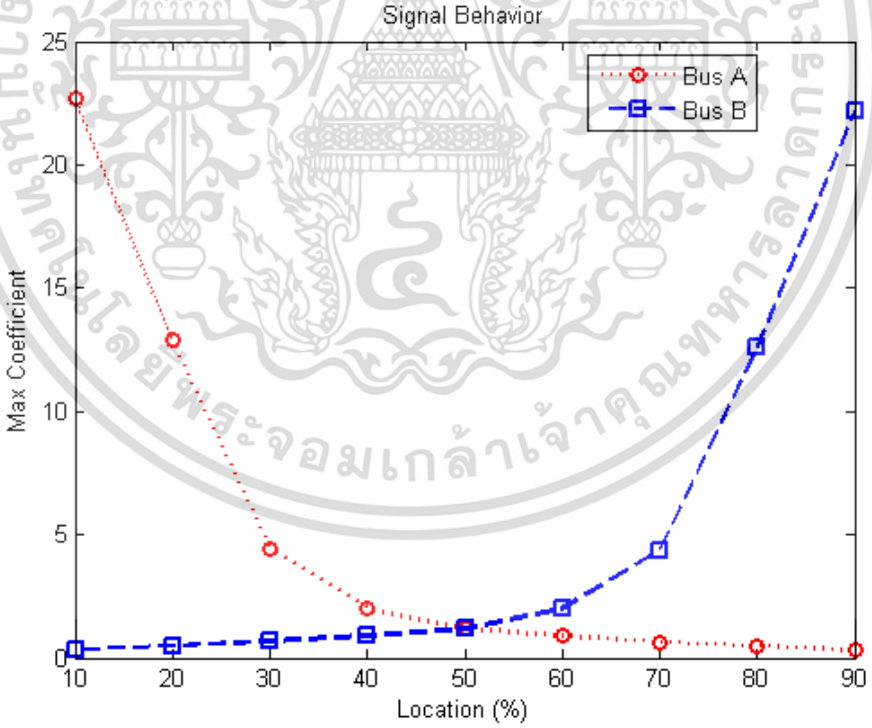
**ตาราง 4.2** ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 กรณีความผิดพร่องแบบ AG ในแต่ละตำแหน่ง

| ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด | | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| กระแสลำดับบวก | บัส A | 194.22 | 155.42 | 114.38 | 79.804 | 66.323 | 35.368 | 21.077 | 22.438 | 16.854 |
| | บัส B | 17.198 | 22.834 | 21.334 | 35.583 | 66.342 | 79.352 | 113.14 | 152.68 | 189.84 |
| กระแสลำดับศูนย์ | บัส A | 22.671 | 12.879 | 4.4209 | 2.0085 | 1.1932 | 0.8781 | 0.6578 | 0.4778 | 0.323 |
| | บัส B | 0.3363 | 0.4919 | 0.6697 | 0.8876 | 1.1954 | 2.0022 | 4.3639 | 12.622 | 22.163 |
| กระแสเฟส A | บัส A | 165.81 | 101.69 | 73.667 | 52.484 | 44.116 | 23.588 | 14.052 | 14.962 | 11.246 |
| | บัส B | 11.469 | 15.222 | 14.228 | 23.726 | 44.132 | 52.197 | 72.881 | 99.88 | 162.09 |
| กระแสเฟส B | บัส A | 17.568 | 26.879 | 20.39 | 13.664 | 11.104 | 5.8903 | 3.5128 | 3.7375 | 2.8038 |
| | บัส B | 2.8619 | 3.8086 | 3.5557 | 5.9374 | 11.112 | 13.577 | 20.162 | 26.414 | 17.171 |
| กระแสเฟส C | บัส A | 17.567 | 26.881 | 20.392 | 13.664 | 11.104 | 5.8899 | 3.5128 | 3.7381 | 2.8043 |
| | บัส B | 2.8671 | 3.8026 | 3.5507 | 5.9205 | 11.098 | 13.585 | 20.158 | 26.412 | 17.167 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

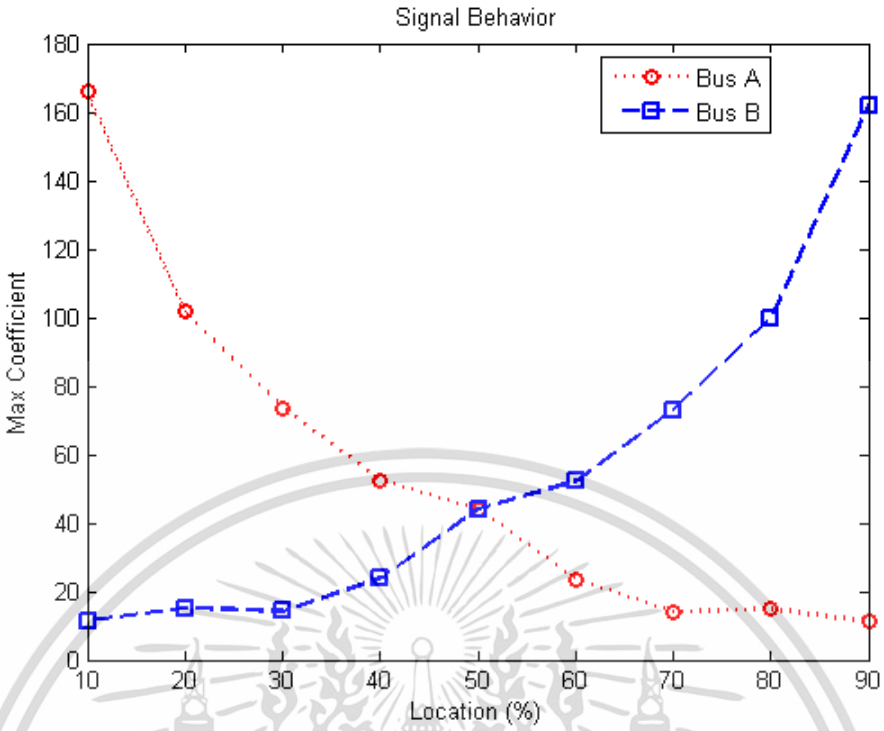



รูปที่ 4.10 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AG

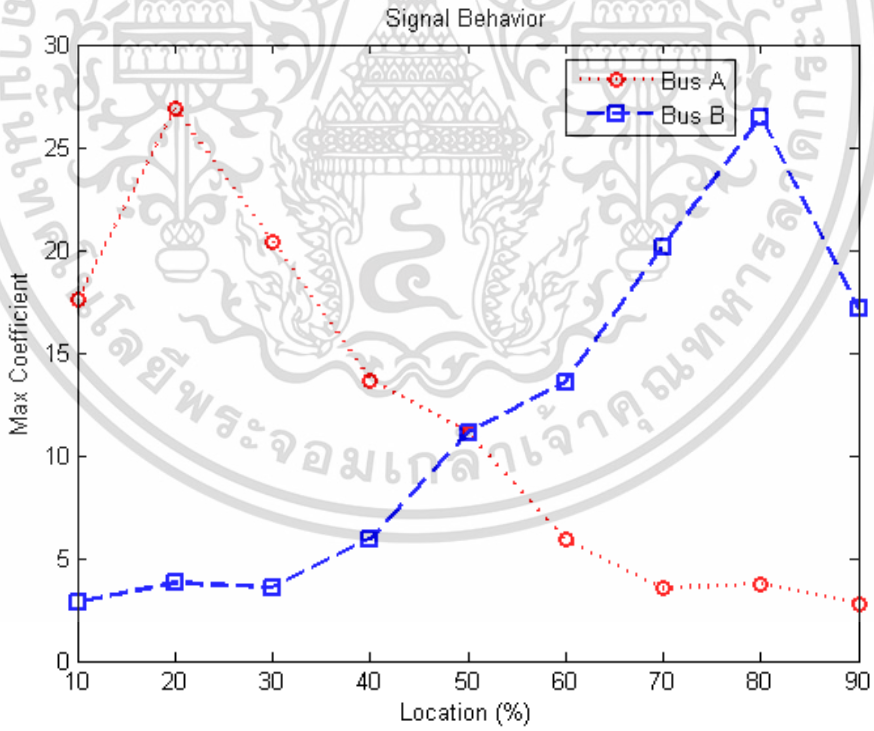



รูปที่ 4.11 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

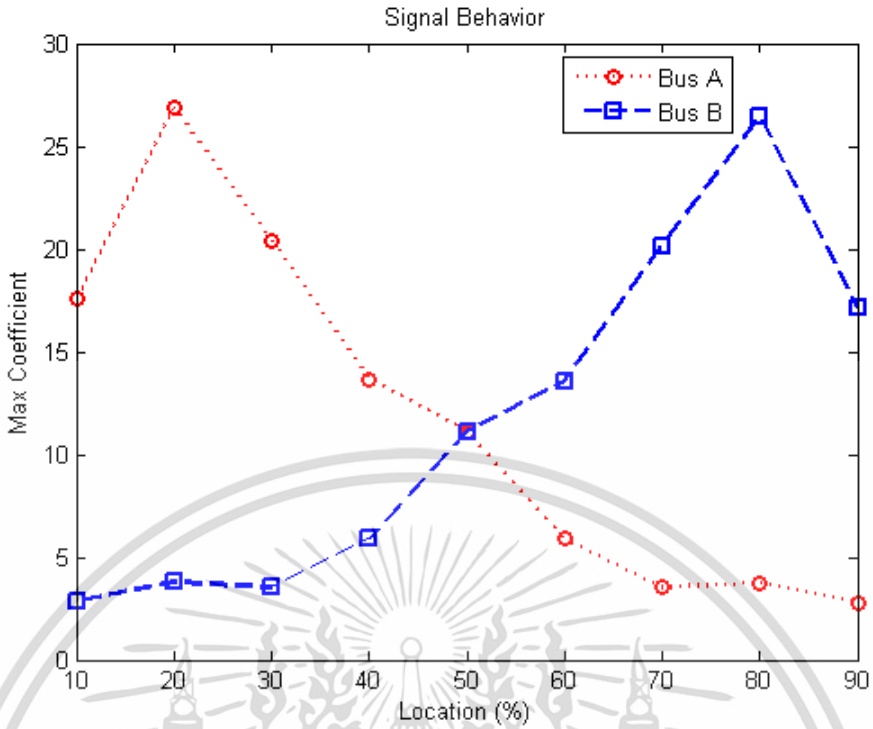



รูปที่ 4.12 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AG




รูปที่ 4.13 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.14 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AG

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในรูปที่ 4.10 และ 4.12 นั้นแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกและกระแสเฟส A ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของเฟสอื่นๆเนื่องจากเกิดความผิดพร่องที่เฟส A ลงดินทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้นั้นมีค่าสูง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์ในรูปที่ 4.10 นั้นจะเห็นว่ามีค่าต่ำเมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์นั้นถือว่าสูงมากเมื่อเทียบกับความผิดพร่องประเภทที่ไม่ลงดิน และมีแนวโน้มซึ่งแปรผกผันกับระยะทางที่เกิดความผิดพร่องอีกด้วย

ส่วนในรูปที่ 4.13 และ 4.14 นั้นสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเหมือนกับรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดต่ำกว่ามากและที่ตำแหน่งที่ใกล้บัส A และ B ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีค่าลดลงเนื่องจากเป็นเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในบางตำแหน่งที่เกิดขึ้นอาจมีค่าไม่เป็นไปตามแนวโน้มบ้าง

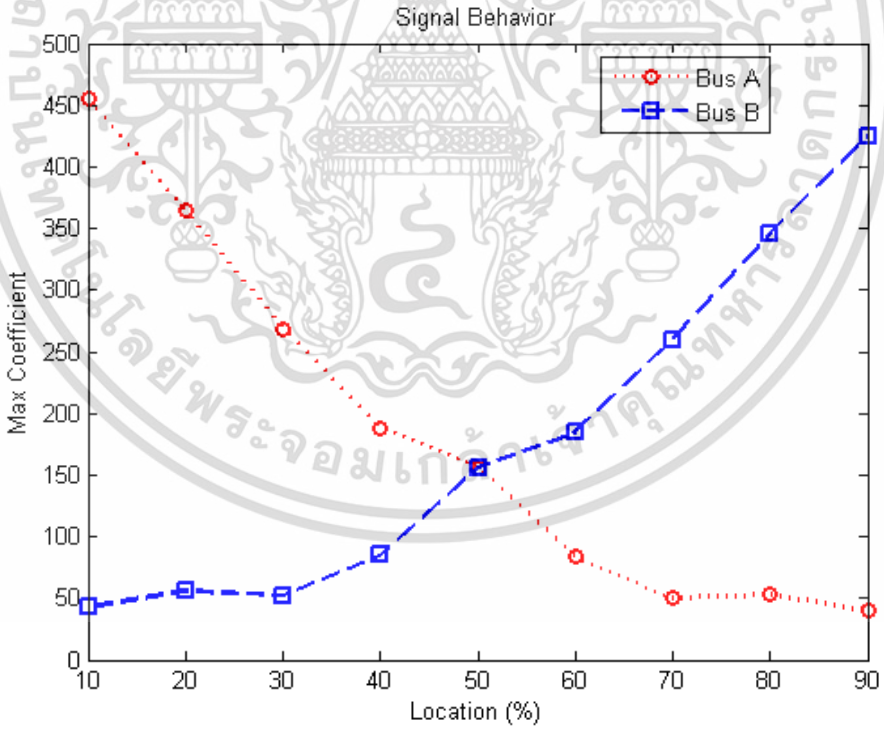
จะเห็นได้ว่าเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง และที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้เด่นชัดในเฟสที่เกิดความผิดพร่อง

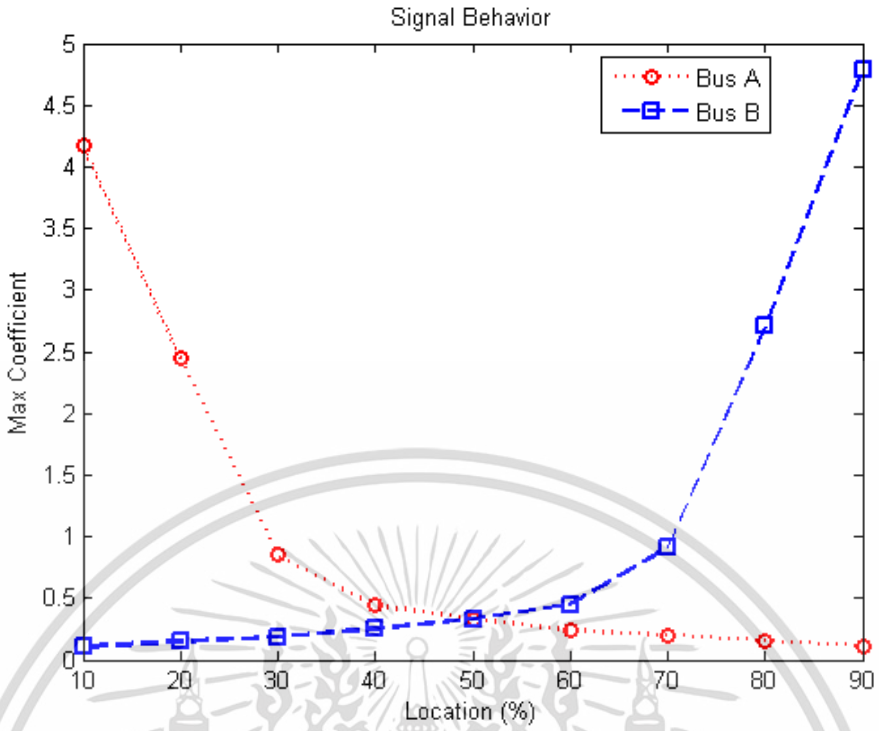
**ตาราง 4.3** ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 กรณีความผิดพร่องแบบ ABG ในแต่ละตำแหน่ง

| ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด | | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| กระแสลำดับบวก | บัส A | 454.92 | 364.47 | 268.78 | 188.05 | 155.74 | 83.738 | 50.209 | 52.887 | 39.713 |
| | บัส B | 42.538 | 55.749 | 51.998 | 85.129 | 155.76 | 184.89 | 259.67 | 346.14 | 425.3 |
| กระแสลำดับศูนย์ | บัส A | 4.1672 | 2.4426 | 0.8498 | 0.4405 | 0.3354 | 0.2375 | 0.2029 | 0.1537 | 0.1158 |
| | บัส B | 0.1058 | 0.1528 | 0.1858 | 0.2529 | 0.3317 | 0.4483 | 0.911 | 2.7095 | 4.794 |
| กระแสเฟส A | บัส A | 326.43 | 241.76 | 177.45 | 124.88 | 103.76 | 55.825 | 33.46 | 35.246 | 26.486 |
| | บัส B | 28.358 | 37.15 | 34.671 | 56.73 | 103.79 | 122.76 | 171.3 | 229.46 | 307.59 |
| กระแสเฟส B | บัส A | 204.48 | 179.68 | 132.95 | 92.209 | 75.792 | 40.708 | 24.389 | 25.54 | 19.084 |
| | บัส B | 21.183 | 27.639 | 25.668 | 41.782 | 75.804 | 89.897 | 126.36 | 166.29 | 182.23 |
| กระแสเฟส C | บัส A | 3.2787 | 5.1147 | 3.942 | 2.682 | 2.219 | 1.1911 | 1.0489 | 0.7854 | 0.6005 |
| | บัส B | 0.5225 | 0.7084 | 0.9763 | 1.1504 | 2.2167 | 2.7745 | 4.2221 | 5.6698 | 3.7622 |

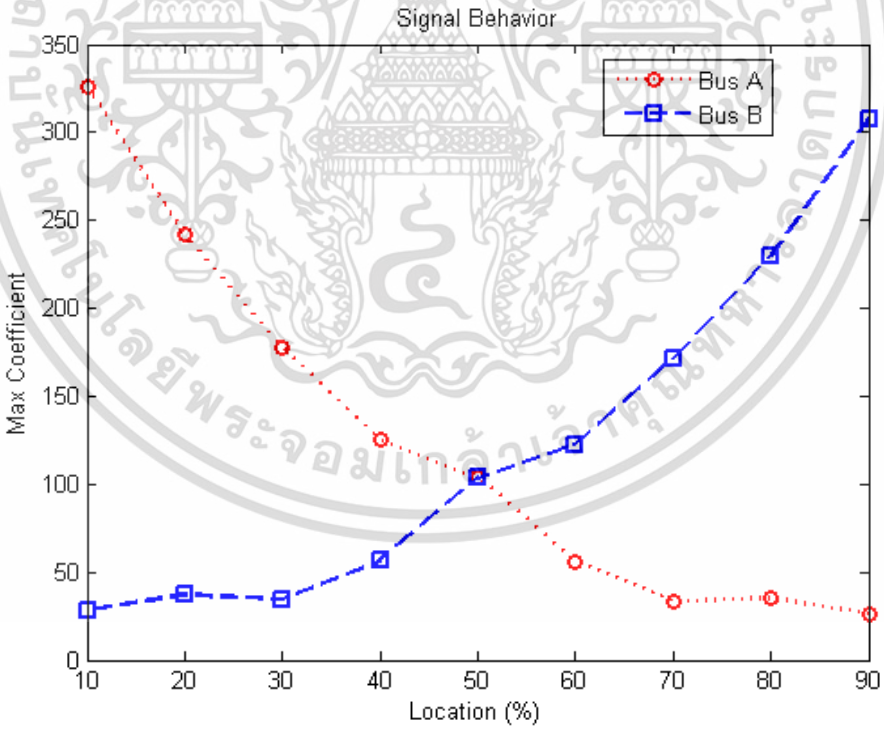



รูปที่ 4.15 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

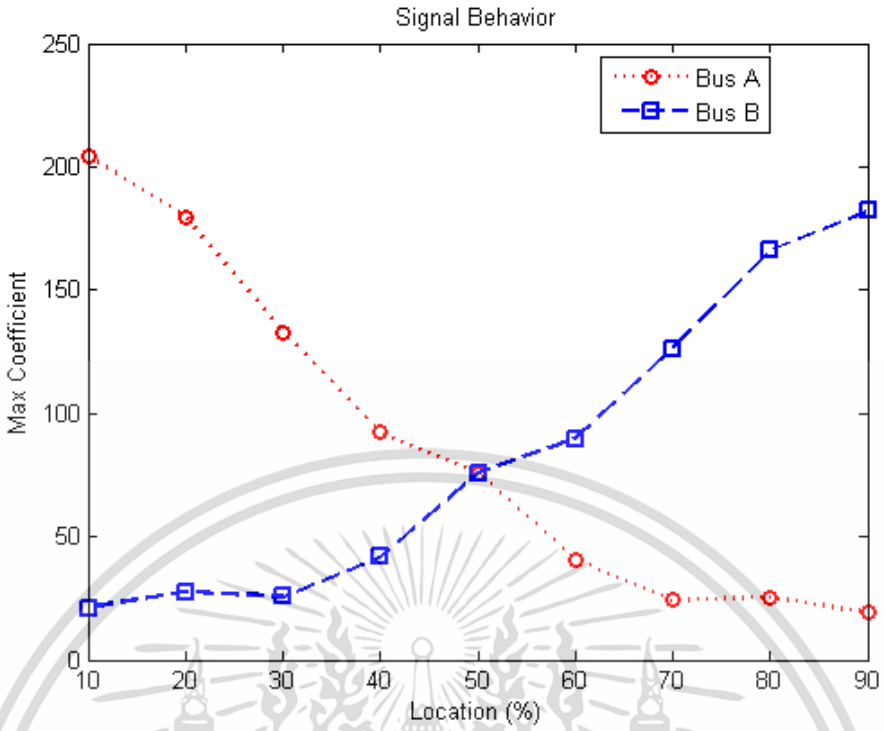



รูปที่ 4.16 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABG

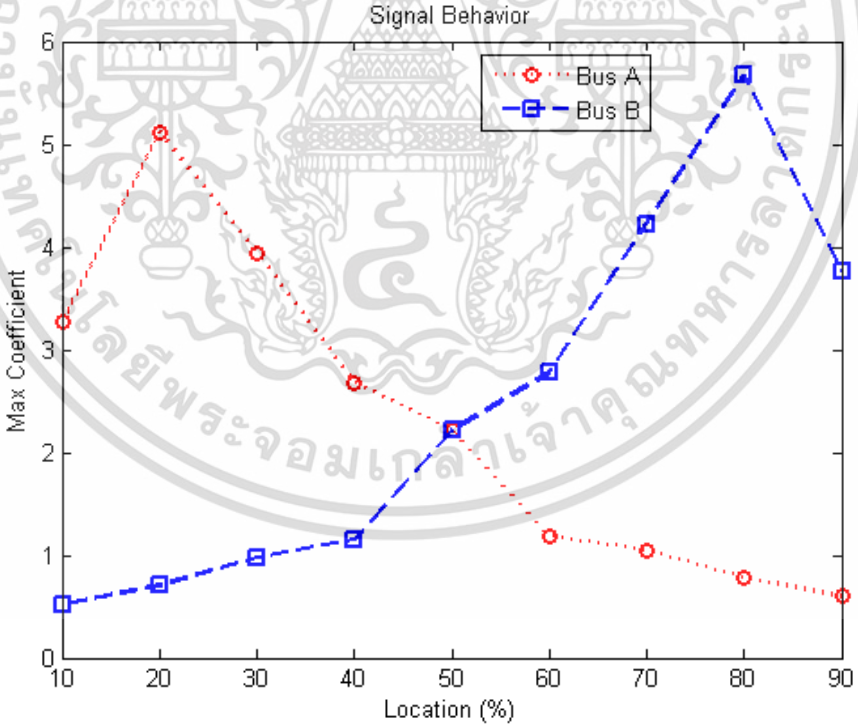



รูปที่ 4.17 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.18 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABG




รูปที่ 4.19 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

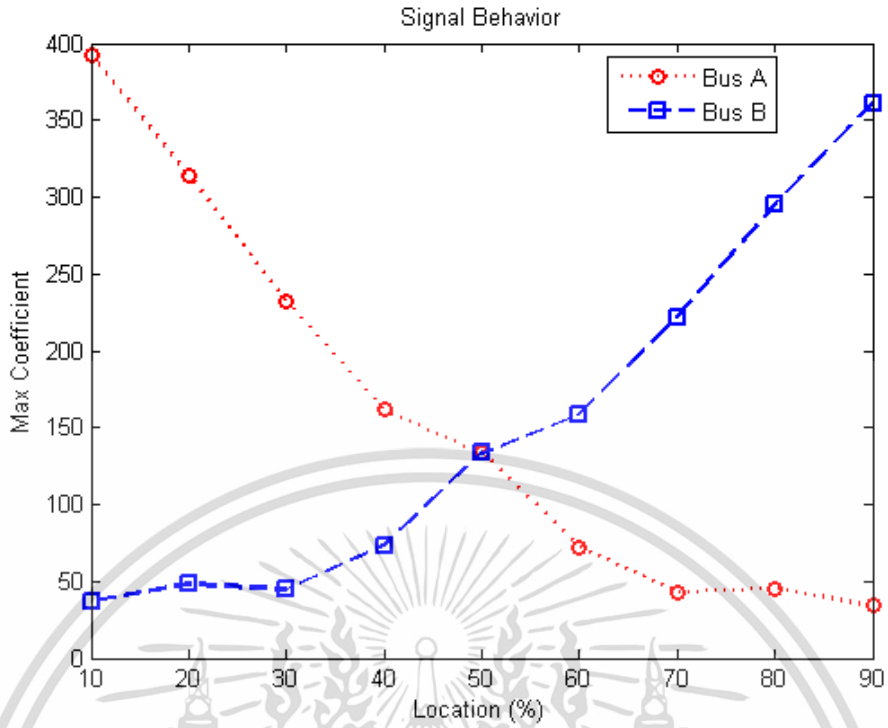
ส่วนในรูปที่ 4.19 นั้นสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเหมือนกับรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดต่ำกว่ามากและที่ตำแหน่งที่ใกล้บัส A และ B ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากเป็นเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง

จะเห็นได้ว่าเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง และที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้เด่นชัดในเฟสที่เกิดความผิดพร่อง

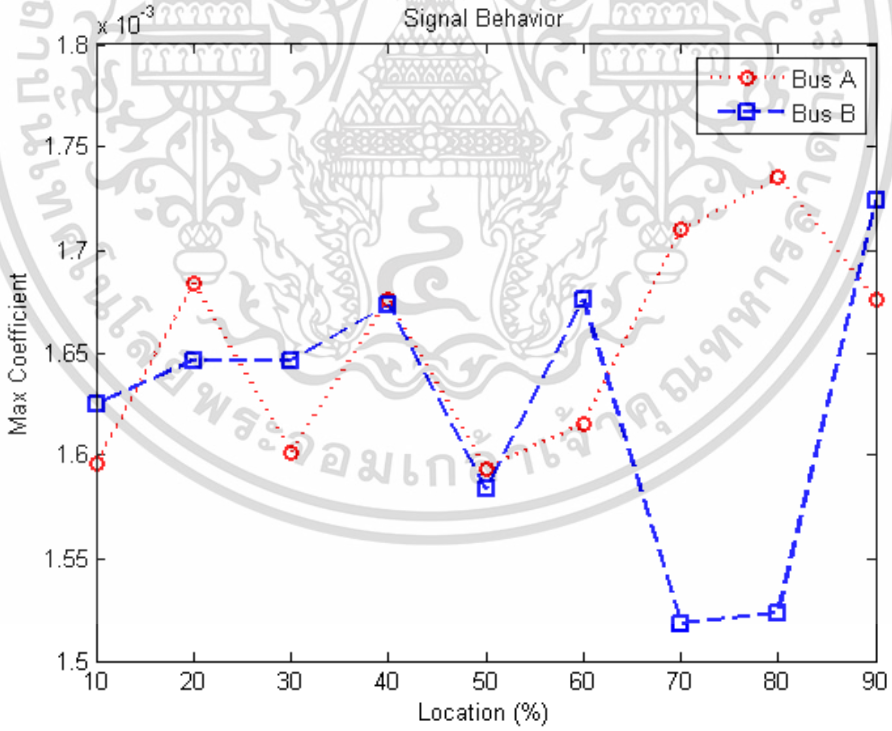
**ตาราง 4.4** ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 กรณีความผิดพร่องแบบ AB ในแต่ละตำแหน่ง

| ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด | | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| กระแสลำดับบวก | บัส A | 392.86 | 314.3 | 231.63 | 161.93 | 133.87 | 71.991 | 43.172 | 45.31 | 33.95 |
| | บัส B | 36.95 | 48.314 | 45.007 | 73.455 | 133.83 | 158.46 | 222 | 295.07 | 361.28 |
| กระแสลำดับศูนย์ | บัส A | 0.0016 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0017 |
| | บัส B | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0017 |
| กระแสเฟส A | บัส A | 261.88 | 209.53 | 154.45 | 107.97 | 89.253 | 48.004 | 28.789 | 30.203 | 22.641 |
| | บัส B | 24.646 | 32.194 | 30.012 | 48.967 | 89.206 | 105.61 | 148.01 | 196.76 | 240.86 |
| กระแสเฟส B | บัส A | 261.95 | 209.53 | 154.34 | 107.91 | 89.218 | 47.97 | 28.768 | 30.216 | 22.617 |
| | บัส B | 24.613 | 32.249 | 29.995 | 48.982 | 89.257 | 105.7 | 148 | 196.63 | 240.86 |
| กระแสเฟส C | บัส A | 0.0444 | 0.0439 | 0.0436 | 0.0436 | 0.0431 | 0.0436 | 0.0436 | 0.0439 | 0.0444 |
| | บัส B | 0.0171 | 0.0172 | 0.0171 | 0.0172 | 0.0175 | 0.0172 | 0.0171 | 0.0172 | 0.0171 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

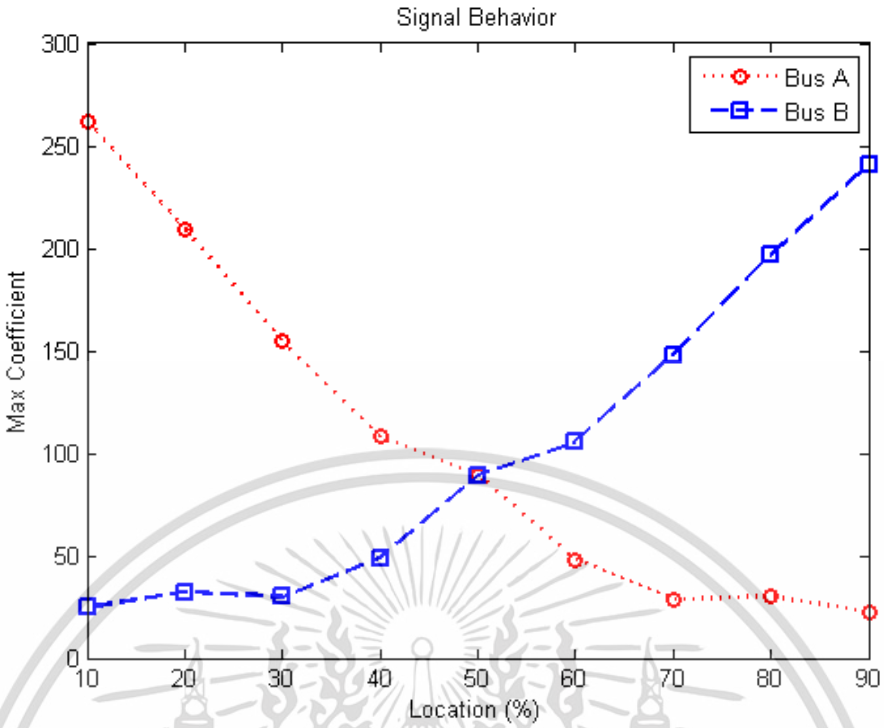



รูปที่ 4.20 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AB

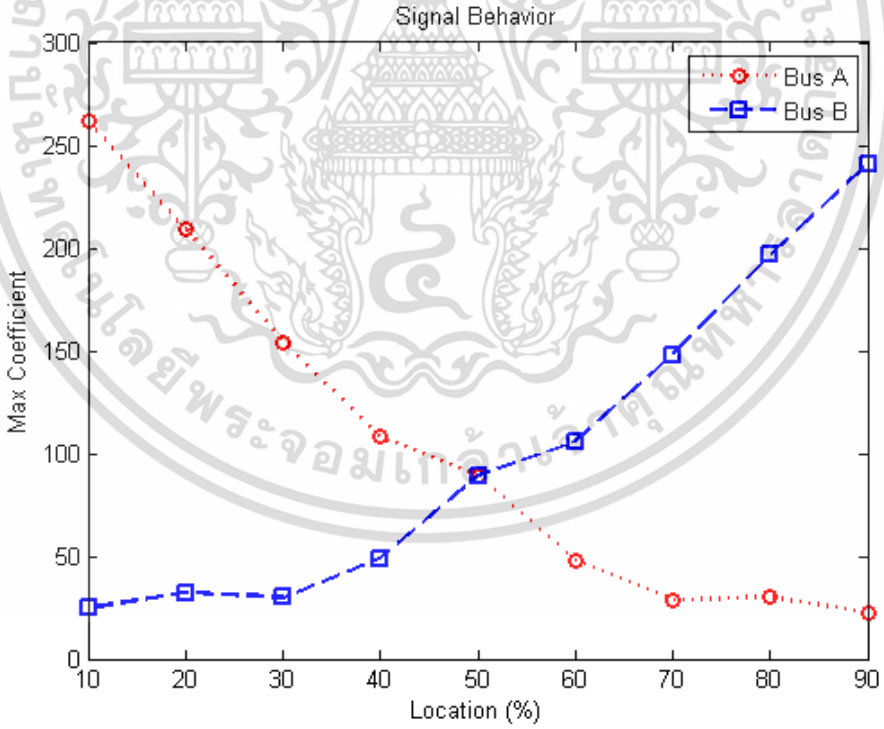



รูปที่ 4.21 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

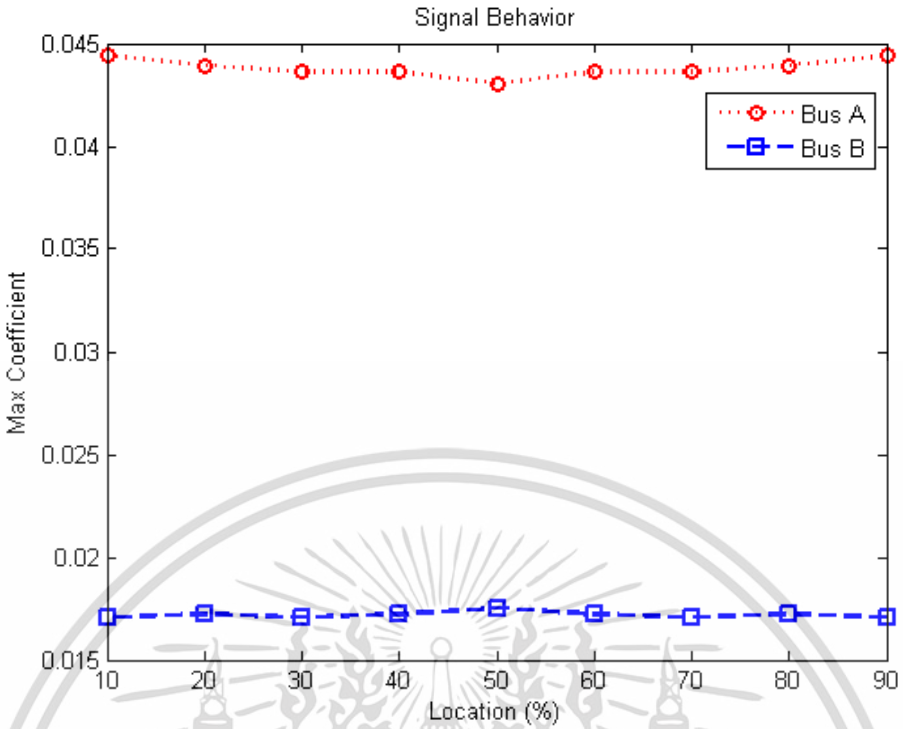



รูปที่ 4.22 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AB




รูปที่ 4.23 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.24 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท AB

จากรูปที่ 4.20, 4.22 และ 4.23 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 4.21 นั้นจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในตำแหน่งต่างๆจะแกว่งอยู่ในช่วงแคบมากๆแทบจะไม่มีความแตกต่างเมื่อตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องเปลี่ยนเนื่องจากความผิดพร่องเป็นแบบเฟสต่อเฟส จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์มีค่าน้อยกว่ากระแสลำดับศูนย์ของความผิดพร่องแบบลงดินอย่างมาก

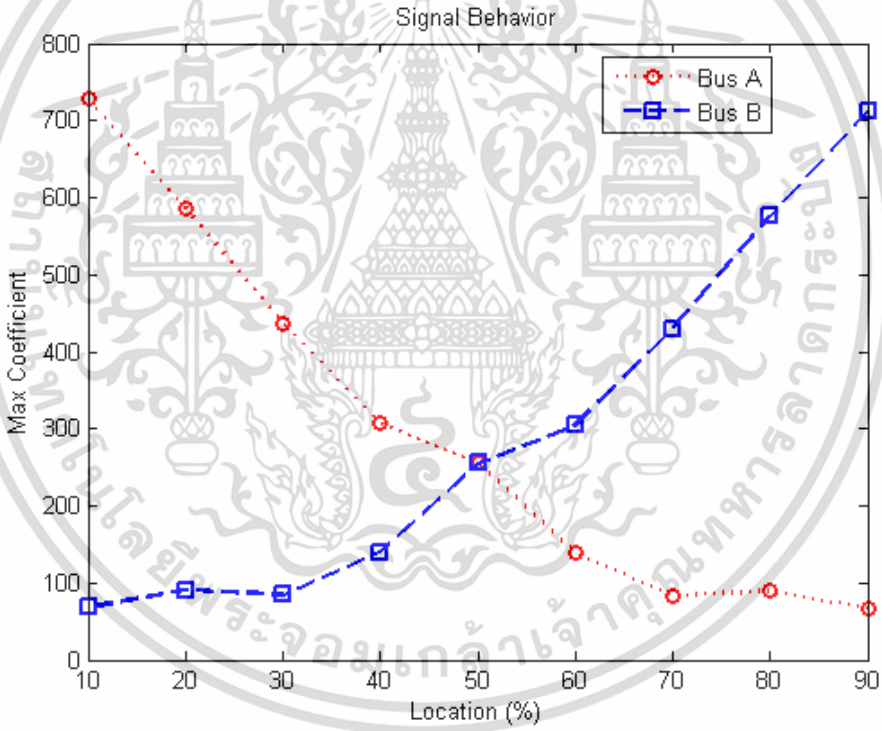
ส่วนในรูปที่ 4.24 นั้นสังเกตได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดต่ำมากโดยค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกๆตำแหน่งเนื่องจากเป็นเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง

จะเห็นได้ว่าเฟสที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง และที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้เด่นชัดในเฟสที่เกิดความผิดพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

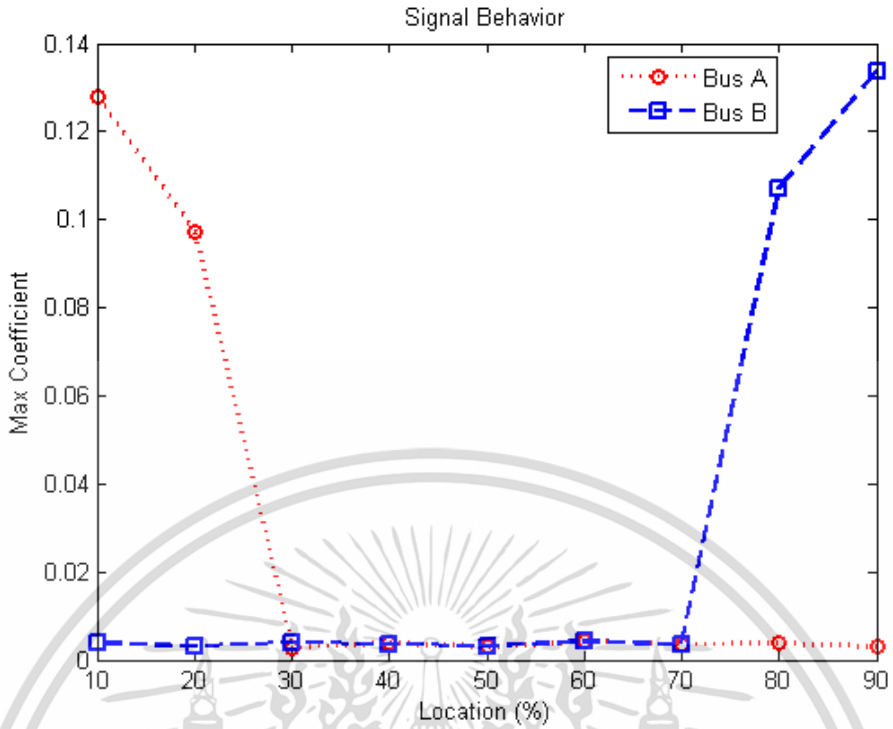
**ตาราง 4.5** ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 1 กรณีความผิดพร่องแบบ ABC ในแต่ละตำแหน่ง

| ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด | | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| กระแสลำดับบวก | บัส A | 727.86 | 586.3 | 435.17 | 306.79 | 255.62 | 138.65 | 83.926 | 88.892 | 67.091 |
| | บัส B | 68.712 | 90.458 | 84.862 | 139.46 | 255.53 | 304.9 | 430.22 | 576.29 | 711.62 |
| กระแสลำดับศูนย์ | บัส A | 0.1281 | 0.0973 | 0.0028 | 0.0038 | 0.003 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0038 | 0.003 |
| | บัส B | 0.0037 | 0.0032 | 0.004 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0043 | 0.0035 | 0.1072 | 0.1338 |
| กระแสเฟส A | บัส A | 485.18 | 390.83 | 290.09 | 204.54 | 170.44 | 92.427 | 55.95 | 59.269 | 44.711 |
| | บัส B | 45.821 | 60.31 | 56.564 | 93.006 | 170.36 | 203.21 | 286.78 | 384.19 | 474.38 |
| กระแสเฟส B | บัส A | 106.91 | 84.213 | 61.033 | 41.932 | 34.101 | 17.957 | 10.543 | 10.872 | 7.9608 |
| | บัส B | 9.9467 | 12.855 | 11.788 | 18.952 | 34.09 | 39.7 | 54.655 | 71.314 | 85.657 |
| กระแสเฟส C | บัส A | 136.68 | 112.26 | 85.041 | 61.224 | 52.027 | 28.917 | 17.919 | 19.358 | 14.968 |
| | บัส B | 13.049 | 17.47 | 16.726 | 27.936 | 52.019 | 63.362 | 91.101 | 124.46 | 156.94 |

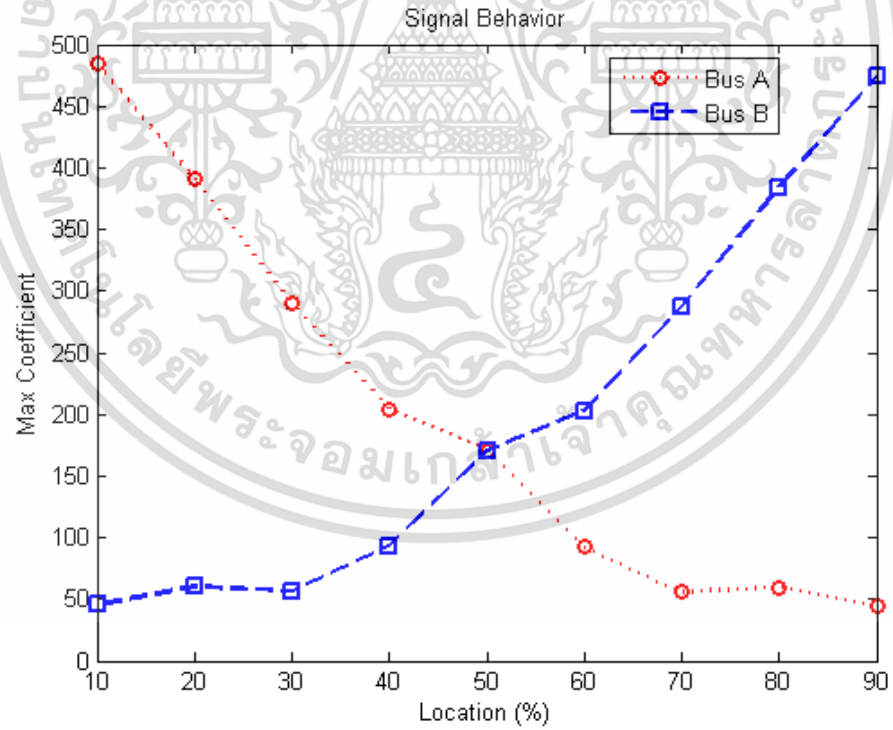



รูปที่ 4.25 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับบวกที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

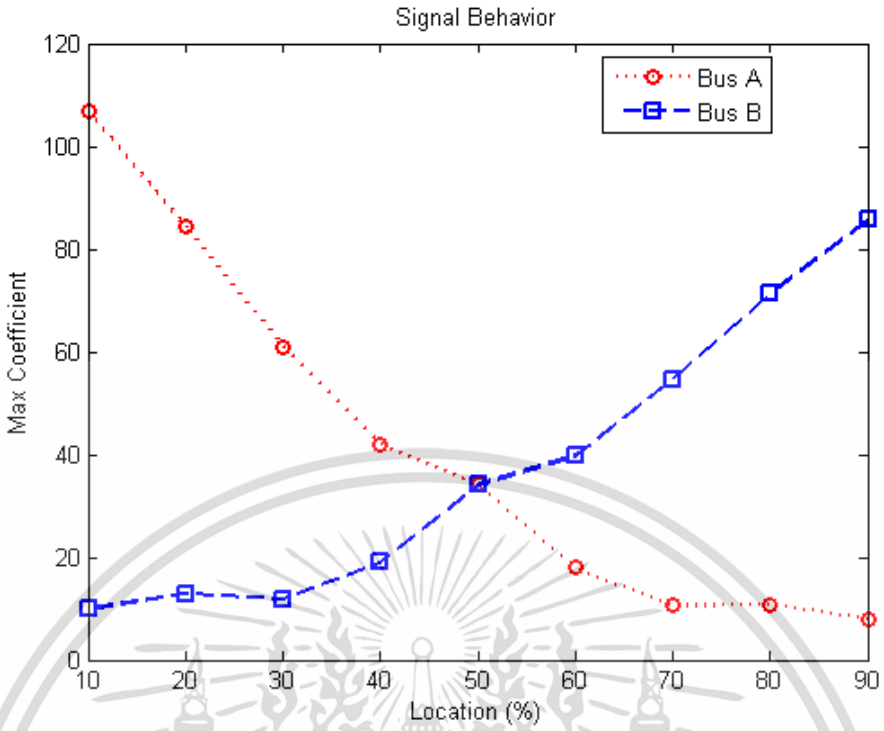



รูปที่ 4.26 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABC

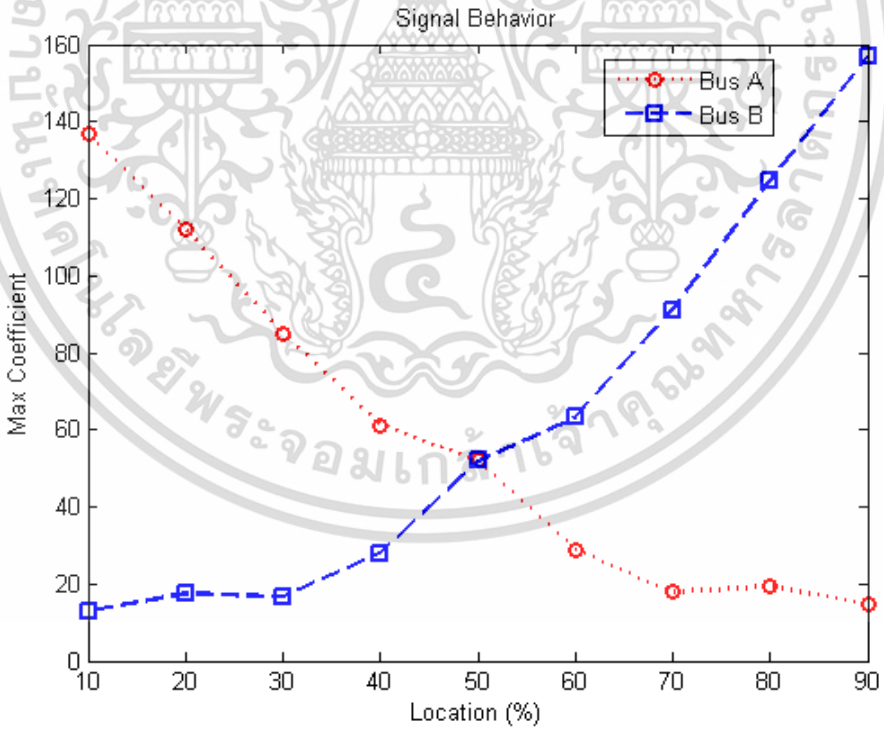



รูปที่ 4.27 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.28 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส B ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABC




รูปที่ 4.29 แสดงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจำลองที่บัส A และ B สำหรับความผิดพร่องประเภท ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.25 และ 4.27 ถึง 4.29 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งความผิดพร่องห่างจากบัส A ยิ่งมากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส A จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันยิ่งตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องยิ่งเข้าใกล้บัส B มากเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่วัดได้จากบัส B ก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

ส่วนในรูปที่ 4.26 นั้นสังเกตได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธ์สูงสุดของกระแสลำดับศูนย์ในประเภทความผิดพร่องแบบลงดินและมีการแกว่งของค่าสัมประสิทธิ์อยู่ในช่วงแคบๆ

จะเห็นว่าการวิเคราะห์พฤติกรรมข้างต้นนั้นจะนำชนิดความผิดพร่องประเภท AG, ABG, AB และ ABC มาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณเวฟเล็ตโดยความผิดพร่องเหล่านี้เป็นตัวอย่างของพฤติกรรมของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดิน, สองเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส และ สามเฟสสมดุลที่ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของสัญญาณเวฟเล็ตนั้นมีแนวโน้มเป็นไปตามชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในแนวทางเดียวกัน

ในกรณีของเฟส A, B และ C จะเห็นว่าเมื่อเกิดความผิดพร่องที่เฟสใดค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดนั้นจะมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับเฟสที่ไม่มีความผิดพร่องเกิดขึ้นโดยจะมีค่าแปรผกผันกับระยะทางซึ่งก็คือยิ่งระยะทางที่เกิดความผิดพร่องห่างจากจุดวัดสัญญาณค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้จะมีค่าลดลงในทางกลับกันยิ่งระยะทางที่เกิดความผิดพร่องใกล้จุดวัดสัญญาณค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ในกรณีของกระแสลำดับศูนย์จะให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบลงดิน แต่ในทางกลับกัน จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ต่ำเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบอื่น อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ

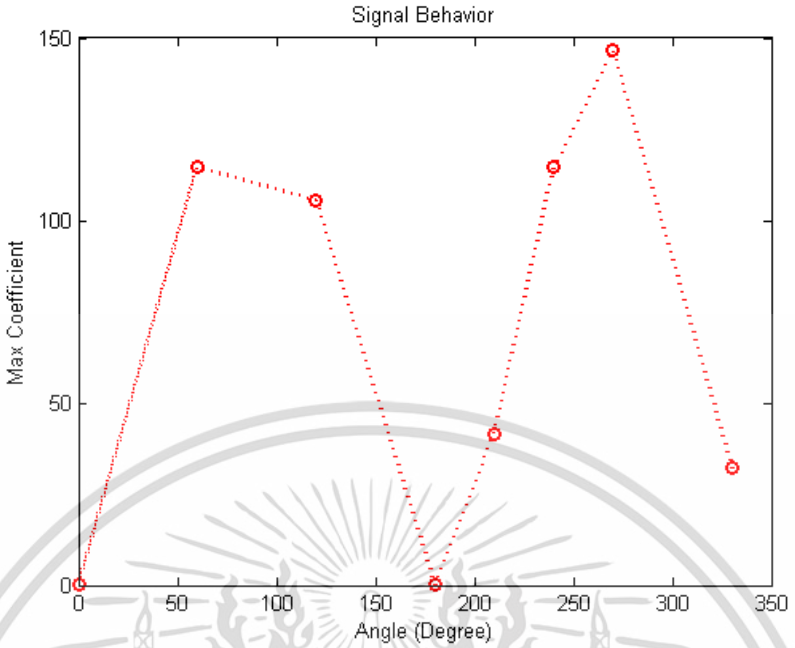
ในกรณีของกระแสลำดับบวกนั้นจะเห็นว่าไม่ว่าจะเกิดความผิดพร่องชนิดใดค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทันที ดังนั้นจึงเห็นความเหมาะสมที่จะนำค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกนี้ไปใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องที่จะเกิดขึ้นในระบบทดลอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการระบุประเภทความผิดพร่องในระบบทดลอง

### 4.2.3 พฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องที่มุมต่างๆ

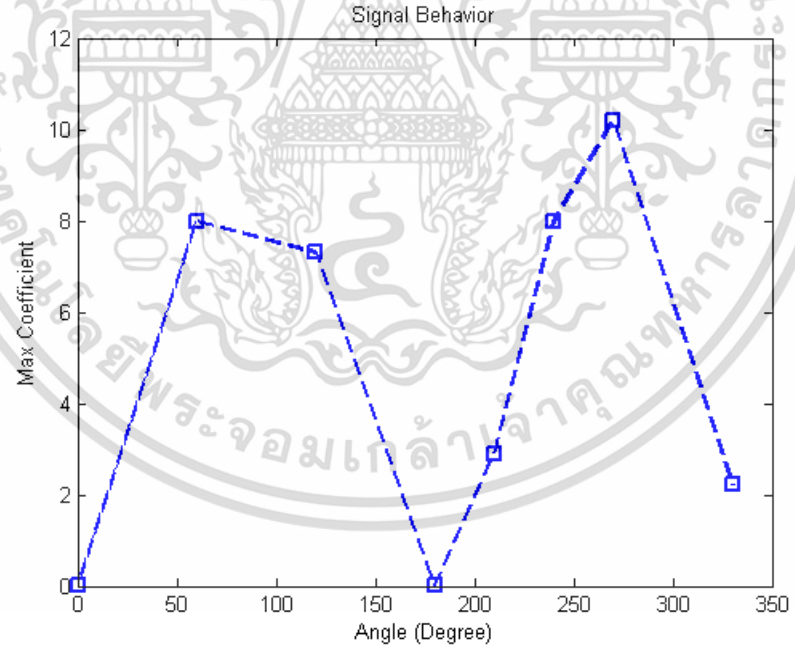
จากการจำลองสัญญาณในบทที่ 3 นั้นได้ทำการจำลองสัญญาณให้เกิดความผิดพร่องที่มุมต่างๆ กันด้วยเพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณและพฤติกรรมของสัญญาณที่มีความผิดพร่องเกิดขึ้นที่มุมต่างๆกันด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณเวฟเล็ตสำหรับความผิดพร่องที่มุมต่างๆกันเพื่อสังเกตและวิเคราะห์ให้เป็นไปตามแนวโน้มเช่นเดียวกับสัญญาณกระแสที่จำลองขึ้นมา

จากการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณการแปลงเวฟเล็ตในหัวข้อย่อยที่ผ่านมานั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงประเภทความผิดพร่อง และตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องเพื่อทำการศึกษาถึงพฤติกรรม แต่ในหัวข้อนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่เกิดความผิดพร่อง และทำการสังเกตและวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A สำหรับความผิดพร่องประเภท AG ที่ตำแหน่ง 10% ที่บัส A




รูป 4.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส A สำหรับความผิดพร่องประเภท AG ที่ตำแหน่ง 10% ที่บัส B

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นว่ารูปกราฟมีลักษณะเป็นรูปซายน์โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดอยู่ที่มุม 90 และ 270 องศา และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่มุม 0 และ 180 องศา จะเห็นว่าในหนึ่งไซเคิล

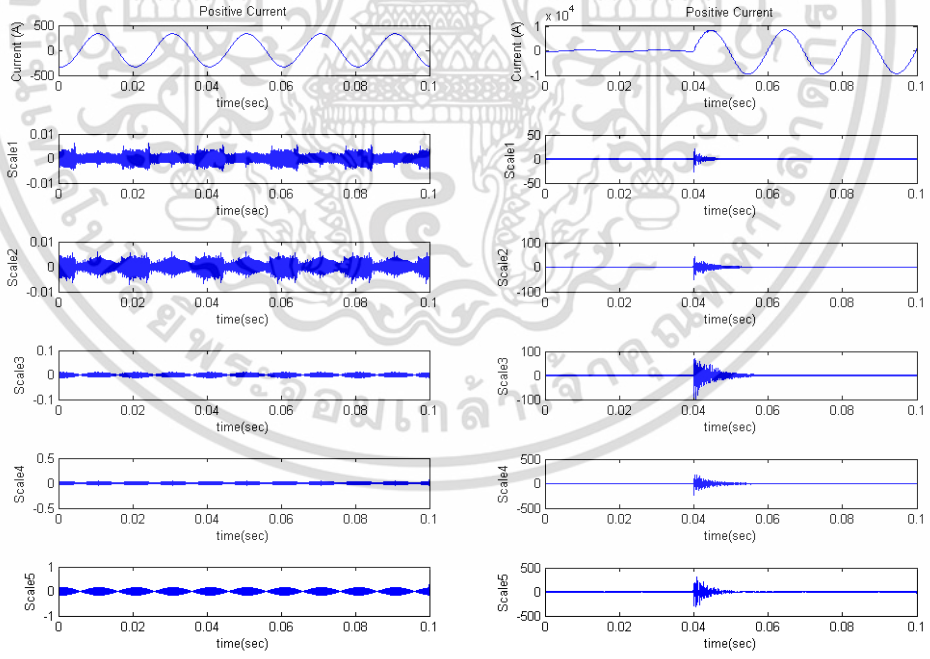
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นจะมีรูปกราฟซึ่งมีค่าในแนวโน้มเดียวกันซ้ำกันอยู่ถึงสองครั้ง ดังนั้นจึงสามารถทำการจำลองข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลการเรียนรู้ในช่วงมุมเพียง 0-180 องศาเท่านั้น ไม่จำเป็นจะต้องจำลองข้อมูลในช่วง 180-360 องศาเนื่องจากจะให้ข้อมูลในลักษณะที่ซ้ำกันซึ่งยิ่งทำให้เสียเวลาในการคำนวณ และจะเห็นว่ารูปทั้งสองนั้นมีแนวโน้มเหมือนกันต่างกันเพียงแค่ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่วัดได้จากบัส A จะมีค่ามากกว่าที่บัส B เนื่องจากตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องอยู่ที่ 10% ซึ่งอยู่ใกล้บัส A มากกว่า

## 4.3 การตรวจจับความผิดพร่อง (Fault detection)

จากการวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณหลังจากการแปลงเวฟเล็ตข้างต้นนั้น จึงได้ข้อสรุปว่าจะนำค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกนี้ไปใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องที่จะเกิดขึ้นในระบบทดลอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการระบุประเภทความผิดพร่องในระบบทดลอง

จากรูป 4.32 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกของสัญญาณปกตินั้นมีค่าประมาณศูนย์ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกของสัญญาณที่เกิดความผิดพร่องนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ ณ ช่วงเวลาที่เกิดความผิดพร่องสูงมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ไม่เกิดความผิดพร่อง เนื่องจาก ณ ช่วงเวลาที่เกิดความผิดพร่องนั้นจะเกิดสัญญาณทรานเซี้ยนต์ซึ่งมีองค์ประกอบความถี่สูงปะปนอยู่มากทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ ณ ช่วงเวลานั้นมีค่าสูง




รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกของสัญญาณปกติกับสัญญาณที่เกิดความผิดพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากงานวิจัยที่ผ่านๆมานั้นเห็นสมควรว่าจะกำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง ¼ ไซเคิลหลังจากเกิดความผิดพร่องและค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดความผิดพร่องเป็นจำนวนเท่า ซึ่งพิจารณาในสเกลใดสเกลหนึ่งโดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า “**ถ้าสัมประสิทธิ์ในสเกลใดมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากสภาวะปกติแสดงว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้นในสายส่งวงจรนั้น**” เนื่องจากเกณฑ์ที่ใช้นี้ได้รับการพิสูจน์ในงานวิจัยที่ผ่านมามากมายว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานได้ นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดความผิดพร่องบนสายส่งยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณความผิดพร่องด้วย แต่ในรูปแบบการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยที่มีการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้ ในบางครั้งอาจจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานของการตรวจจับความผิดพร่องในสเกลที่ 1 แต่ก็สามารถพบการเปลี่ยนแปลงในสเกลถัดไปได้ ในขั้นตอนสุดท้ายของจากตรวจจับความผิดพร่องคือการตัดสินว่าเกิดความผิดพร่องหรือไม่นั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การพิจารณาข้อมูลที่ปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่งมาใช้ดังนี้คือ **“ถ้าผลการพิจารณาสัมประสิทธิ์เพื่อตรวจจับความผิดพร่องทั้ง 2 ด้านบอกว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้นแล้วให้ถือว่าสายส่งวงจรนั้นมีความผิดพร่องเกิดขึ้น”** ซึ่งจากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตจากกระแสลำดับบวกที่ปลายทั้ง 2 ด้านแล้วสามารถระบุได้ว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้น และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตจากกระแสลำดับบวกพบว่าผลที่ได้นั้นมีลักษณะเดียวกัน โดยกระบวนการตรวจจับความผิดพร่องนั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.33

### 4.3.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภทของความผิดพร่อง

เพื่อสะดวกในการอธิบายขั้นตอนทั้งหมดจึงทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$P^{L}_{\max\,(0\to t)}$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับบวกตั้งแต่ t=0 ถึง t ที่สเกล L

$P^{L}_{ckk}$ = ตัวแปรแสดงสถานะว่าปกติหรือเกิดความผิดพร่องขึ้นที่สเกล L

$P^{L}_{(t+1\mu s)}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบลำดับบวกที่เวลา t=t+1μs

และเนื่องจากขั้นตอนทั้งหมดเป็นลักษณะการเปรียบเทียบของค่าต่างๆ ซึ่งบางครั้งการอธิบายด้วยการลักษณะของคำพูดนั้นอาจจะทำให้เข้าใจยาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้ลักษณะการอธิบายในรูปแบบของโฟลวชาร์ต (Flow chart) ซึ่งจะช่วยทำให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

### 4.3.2 กระบวนการตรวจจับความผิดพร่องในระบบทดลองสายส่ง

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณเวฟเล็ตแล้วจะเห็นว่าค่าที่เหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องในระบบทดลองสายส่งก็คือค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวก

ดังนั้นกระบวนการตรวจจับความผิดพร่องในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตของกระแสลำดับบวกแล้วนำมายกกำลังสองเพื่อเป็นอินพุทให้กับกระบวนการตรวจจับซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. นำค่าสัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของกระแสลำดับบวกมาเป็นอินพุทให้กับกระบวนการตรวจจับความผิดพร่อง
2. เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ ณ เวลาปัจจุบันกับค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในช่วงเวลาก่อนหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หากค่าสัมประสิทธิ์ ณ เวลาปัจจุบันมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในช่วงเวลาก่อนหน้า แสดงว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้น
- หากค่าสัมประสิทธิ์หากค่าสัมประสิทธิ์ ณ เวลาปัจจุบันมีค่าน้อยกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในช่วงเวลาก่อนหน้า แสดงว่ายังไม่มีความผิดพร่องเกิดขึ้น

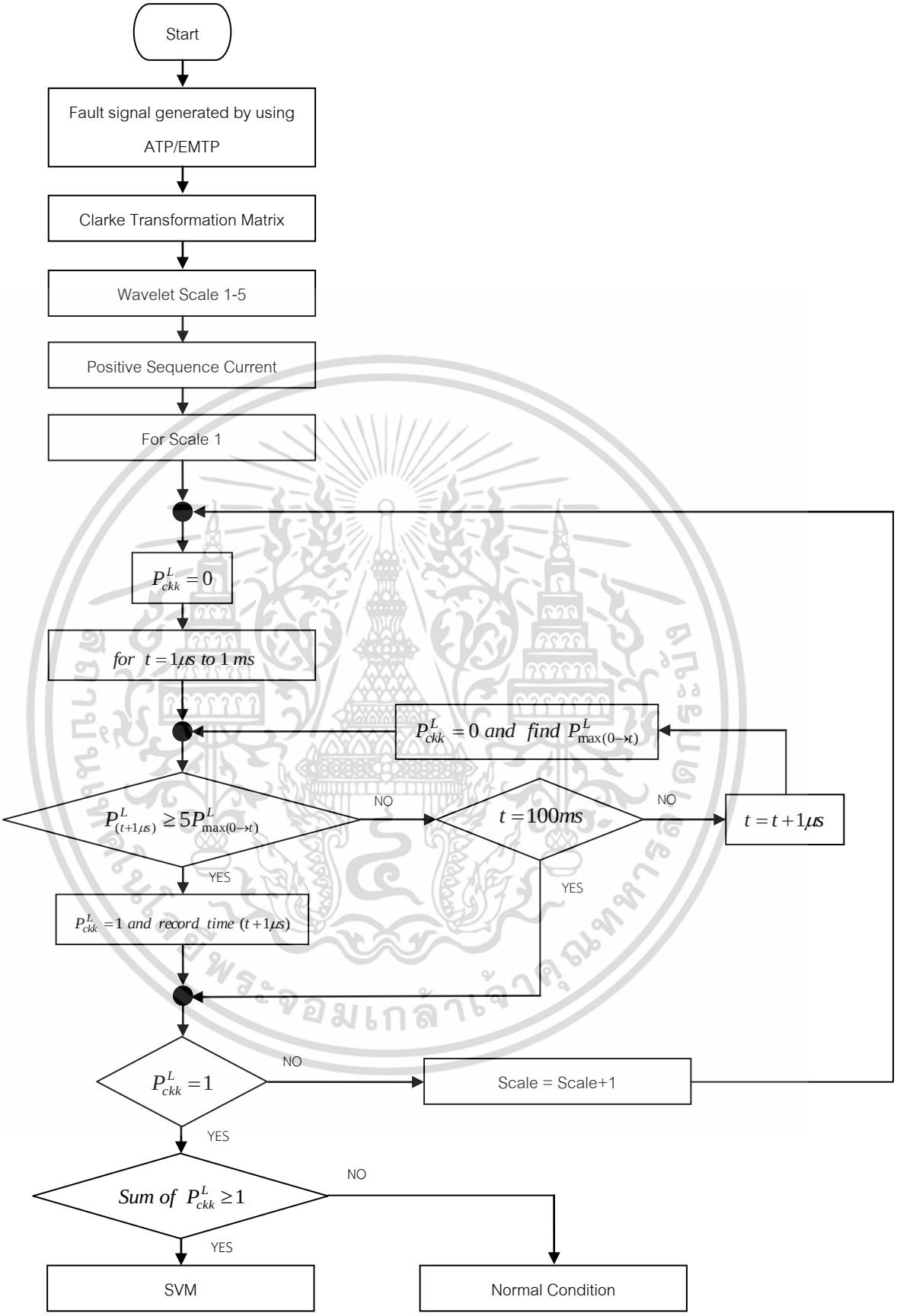
3. หากยังไม่พบความผิดพร่อง ก็นำค่าสัมประสิทธิ์ ณ เวลาถัดไปมาทำการเปรียบเทียบเหมือนในข้อ 1 และ2 จนกระทั่งหมดช่วงค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 แล้วจึงนำค่าสัมประสิทธิ์ในเกลที่ 2, 3 จนถึง 5 มาผ่านขั้นตอนที่ 1-3 จนกว่าจะพบความผิดพร่องหากยังไม่พบแสดงว่าสัญญาณนั้นไม่มีความผิดพร่องเกิดขึ้น
4. ในกรณีที่พบว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1-3 นั้น จะนำสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์, กระแสเฟส A, กระแสเฟส B และกระแสเฟส C ณ เวลาที่ตรวจพบความผิดพร่องนั้นๆมาเป็นอินพุทให้กับกระบวนการระบุประเภทความผิดพร่อง

ซึ่งกระบวนการการตรวจจับความผิดพร่องนั้นได้แสดงในรูปโฟลวชาร์ต ดังรูปที่ 4.33

ลักษณะของความผิดพร่องแต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะปรับปรุงจากงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งใช้กระบวนการทางการแปลงเวฟเล็ตมาใช้ในการระบุประเภทความผิดพร่อง แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมาทำการระบุประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้น

การระบุประเภทความผิดพร่องโดยซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะใช้ค่าเอาท์พุทที่ได้จากกระบวนการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นอินพุทให้กับกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนโดยข้อมูลอินพุทที่จะส่งให้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นมีเพียง 4 ตัว ซึ่งก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์หลังจากการแปลงเวฟเล็ตของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์ ณ เวลาที่ตรวจพบความผิดพร่อง โดยใช้เพียงแค่ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดในกระบวนการระบุชนิดความผิดพร่องนั้นจะกล่าวในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.33 โฟลวชาร์ตแสดงกระบวนการตรวจจับความผิดพร่องบนระบบทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# การประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเป็นอัลกอลิทึมที่ใช้ในการแบ่งประเภทซึ่งได้รับการเสนอโดย Boser, Guyon และ Vapnik โดยซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในวงการชีววิทยาและในสายงานอื่นๆมากมายเนื่องด้วยความถูกต้องเที่ยงตรง และความสามารถในการรองรับข้อมูลที่มีความซับซ้อนมาก เช่น ข้อมูลทางรหัสพันธุกรรม

ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นถูกจัดอยู่ในหมวดของวิธีการทางเคอร์เนล (Kernel) ซึ่งวิธีการทางเคอร์เนลนั้นเป็นอัลกอลิทึมที่แปรตามข้อมูลผ่านทางกระบวนการคูณเชิงสเกลาร์ (Inner product) ในกรณีเช่นนี้ จะสามารถแทนที่การคูณเชิงสเกลาร์โดยการใช้ฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel function) ซึ่งจะคำนวณผลคูณเชิงสเกลาร์ (Inner product) บนปริภูมิมิติสูง (Feature space) ซึ่งเป็นปริภูมิที่มีความมิติสูงกว่า ซึ่งจะให้ผลดีสองประการคือ ความสามารถในการสร้างเส้นแบ่งชนิดของข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ด้วยวิธีการแบบเชิงเส้น (Linear) และการใช้ฟังก์ชันเคอร์เนลนั้นทำให้ผู้ใช้สามารถแบ่งคลาสของข้อมูลที่ไม่สามารถแสดงในปริภูมิอินพุท (Input space) ได้อย่างชัดเจน ซึ่งตัวอย่างข้อมูลที่สำคัญของข้อมูลเหล่านั้นคือข้อมูลในเชิงชีววิทยาเช่น DNA, โปรตีน หรือ โครงสร้างโปรตีนต่างๆ

การใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นจะต้องเข้าใจถึงการทำงานของตัวซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน การศึกษาซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นผู้ศึกษาจะต้องเรียนรู้ในหลายๆอย่าง เช่น การตระเตรียมข้อมูล การเลือกใช้เคอร์เนล และสุดท้ายการเลือกค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนและเคอร์เนล หากไม่เข้าใจถึงกระบวนการเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนลดลง เนื้อหาในบทนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความเข้าใจซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนและสามารถประยุกต์ใช้กับตัวโครงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.1 โครงสร้างกระบวนการระบุชนิดความผิดพร่อง

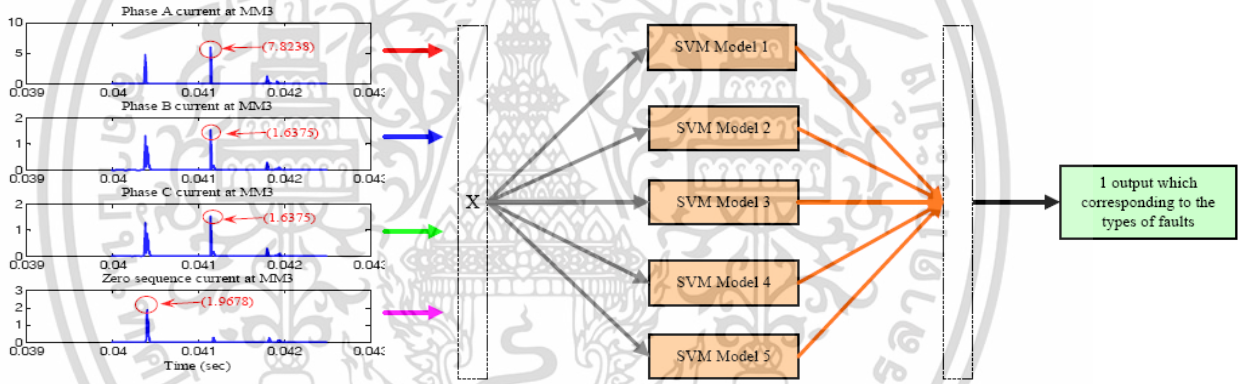
โครงสร้างของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนประกอบด้วยอินพุท 4 ตัวคือ เวฟเล็ตของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์ เพื่อนำมาผ่านโมเดลของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่องทั้งหมด 5 โมเดลซึ่งแต่ละโมเดลนั้นจะมีความเหมาะสมในการระบุประเภทความผิดพร่องแตกต่างกันออกไปโดยที่

โมเดลที่ 1 จะสามารถระบุชนิดความผิดพร่องประเภท AG และ BG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลที่ 2 จะสามารถระบุชนิดความผิดพร่องประเภท CG และ ABG
โมเดลที่ 3 จะสามารถระบุชนิดความผิดพร่องประเภท BCG และ ACG
โมเดลที่ 4 จะสามารถระบุชนิดความผิดพร่องประเภท ABC และ AB
โมเดลที่ 5 จะสามารถระบุชนิดความผิดพร่องประเภท BC และ CA

ซึ่งหากแต่ละโมเดลจะทำงานขนานกันไปพร้อมกันซึ่งต่างจากกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนแบบงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมานั้นจะเอาค่าอินพุทผ่านเข้ากระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนทีละโมเดล โดยเอาท์พุทของโมเดลแรกจะเป็นอินพุทของโมเดลถัดไปซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการระบุชนิดความผิดพร่องผิดประเภทซึ่งส่งผลแบบลูกโซ่ต่อเนื่องกันไป และเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหานั้นจึงเปลี่ยนวิธีการโดยให้อินพุทเข้าผ่านกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนพร้อมกันทั้ง 5 โมเดลซึ่งแต่ละโมเดลจะรับอินพุทเหมือนๆกัน และได้เอาท์พุทออกมาซึ่งแต่ละโมเดลจะให้ค่าเอาท์พุทตามความสามารถของแต่ละโมเดลตามตารางที่ 5.1 แล้วค่อยนำผลลัพธ์มารวมกัน ดังรูปที่ 5.1




รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่อง

โดยที่แต่ละโมเดลนั้นจะทำกระบวนการของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเหมือนๆกัน แต่ผลที่ได้แตกต่างออกไปเนื่องการการกำหนดประเภทความผิดพร่องที่ต่างกันทำให้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นมองข้อมูลในแต่ละโมเดลมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันออกไป ส่วนสาเหตุที่ทำให้ต้องใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนถึง 5 โมเดลนั้นก็คือความซับซ้อนของข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากทำให้ไม่สามารถระบุประเภทความผิดพร่องโดยใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนเพียงโมเดลเดียวกับประเภทความผิดพร่องถึงสิบประเภท

จากโครงสร้างในรูป 5.1 นั้นแสดงให้เห็นถึงกระบวนการโดยรวมในการระบุประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบทดลอง แต่ในหัวข้อต่อจากนี้จะกล่าวถึงกระบวนการซึ่งจะอยู่ในบล็อคของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนโมเดลโดยละเอียดซึ่งจะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการทำงานของซัพพอร์เวคเตอร์แมชชีนในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง 5.1** เอาท์พุทสำหรับแต่ละโมเดลของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

| Models of SVM | Output of SVM | Classification of fault type | Types of fault |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | Phase A to ground fault | AG |
| | 2 | Phase B to ground fault | BG |
| | 3 | Other fault | N/A |
| 2 | 4 | Phase C to ground fault | CG |
| | 5 | Phase A,B to ground fault | ABG |
| | 6 | Other fault | N/A |
| 3 | 7 | Phase B,C to ground fault | BC |
| | 8 | Phase A,C to ground fault | AC |
| | 9 | Other fault | N/A |
| 4 | 10 | Three phase fault | ABC |
| | 11 | Phase A to phase B fault | AB |
| | 12 | Other fault | N/A |
| 5 | 13 | Phase A to phase C fault | AC |
| | 14 | Phase B to phase C fault | BC |
| | 15 | Other fault | N/A |

## 5.2 การระบุประเภทของความผิดพร่องโดยซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

ลักษณะของความผิดพร่องแต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำการแปลงเวฟเล็ตมาพิจารณาเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นแต่ละเฟส ด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันลำดับศูนย์เพื่อทำให้ค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสมีฐานอ้างอิงเดียวกัน(จากการศึกษาตัวอย่างสัญญาณความผิดพร่องในเบื้องต้นพบว่าการอ้างอิงกับค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์จะให้ความถูกต้องมากกว่าการใช้องค์ประกอบอื่นๆ) ซึ่งจะทำให้ง่ายและสะดวกต่อการเปรียบเทียบมากยิ่งขึ้น โดยมีรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของความผิดพร่องดังต่อไปนี้

### 5.2.1 กระบวนการเตรียมข้อมูล

#### 5.2.1.1 การจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถคำนวณได้อย่างชัดเจน

ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนต้องการให้ข้อมูลแต่ละตัวนั้นแสดงอยู่ในรูปแบบของเวคเตอร์จำนวนจริง ดังนั้นหากข้อมูลมีคุณลักษณะที่ชัดเจน ต้องแปลงให้คุณสมบัติเหล่านั้นแสดงอยู่ในรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลเชิงตัวเลข ในที่นี้แนะนำให้ใช้ตัวเลข 1,2,...,m แทนคุณลักษณะแต่ละชนิดของข้อมูลแต่ละตัว มีเพียงแค่หนึ่งคุณลักษณะจากทั้งหมดจำนวน m ชนิด ของข้อมูลแต่ละตัวเท่านั้นที่จะมีค่าเป็น 1 นอกนั้นคุณลักษณะที่เหลือของข้อมูลตัวนั้นๆจะเป็นศูนย์ทั้งหมด เช่น ข้อมูลที่มีคุณลักษณะอยู่ชนิดอย่างเช่นสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน สามารถแทนคุณลักษณะเหล่านี้ให้อยู่ในรูปเชิงตัวเลขได้ดังนี้ (0,0,1),(0,1,0) และ (1,0,0) แต่ในกรณีนี้จะนำข้อมูลที่ได้หลังจากการแปลงเวฟเล็ตของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์มาเป็นอินพุทซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาคำนวณได้โดยตรงอยู่แล้ว

**5.2.1.2 การสเกลค่าข้อมูล**

การสเกลค่าข้อมูลก่อนเริ่มใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นมีความสำคัญมาก ซึ่งประโยชน์หลักของการสเกลค่าข้อมูลก็คือเพื่อหลีกเลี่ยงช่วงของค่าคุณลักษณะในเชิงตัวเลขที่มีค่ามากๆ และประโยชน์อีกประการก็คือเพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากซับซ้อน และเนื่องจากค่าของเคอร์เนล โดยปกติจะขึ้นกับผลของการคูณเชิงสเกลาร์ ของ Feature vector ดังนั้นสำหรับเคอร์เนลแบบเชิงเส้น และโพลีโนเมียลเคอร์เนลนั้น หากค่าคุณลักษณะที่ถูกแปลงมาให้อยู่ในรูปเชิงตัวเลขนั้นมีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างมากจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณอย่างมาก ซึ่งข้อมูลอินพุทสำหรับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนในที่นี้เป็นค่าที่ได้รับจากการแปลงเวฟเล็ตซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้างและมีการกระโดดค่อนข้างชัดเจนจึงสามารถทำการสเกลข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่แคบลง โดยแนะนำให้ทำการสเกลในเชิงเส้นตรงกับข้อมูลในแต่ละคุณลักษณะให้อยู่ในช่วง [-3, 3] เพื่อลดการคำนวณทางคณิตศาสตร์

**5.2.2 การเลือกเคอร์เนล**

ถึงแม้ว่าจะมีเคอร์เนลให้เลือกใช้ไม่มากนักแต่ว่าก็มีจำเป็นจะต้องคัดเลือกว่าจะเลือกใช้เคอร์เนลไหนเป็นอันดับแรก แล้วค่อยทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเคอร์เนล และค่าพารามิเตอร์ $C$

**เคอร์เนลแบบเชิงเส้น (Linear Kernel)**

เคอร์เนลแบบเชิงเส้นนั้นโดยทั่วไปแล้วมีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับข้อมูลทั่วๆไปที่มีความซับซ้อนน้อย แต่ในทางปฏิบัติแล้วมีการนำมาใช้ค่อนข้างน้อยเนื่องจากข้อมูลทางวิศวกรรมส่วนใหญ่นั้นเป็นข้อมูลในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น และข้อมูลที่ทำการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก็เป็นไปในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเคอร์เนลแบบเชิงเส้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

**เกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian Kernel, RBF)**

โดยทั่วไปเกาส์เซียน นั้นมักจะเป็นตัวเลือกแรกในการนำมาใช้ เนื่องจากเคอร์เนลชนิดนี้นั้นเป็นเคอร์เนลแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำการแมพปิ้งข้อมูลแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากปริภูมิอินพุทไปยังปริภูมิมิติสูง (Feature space) ซึ่งเหมาะกับการใช้รองรับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของข้อมูล (เอาท์พุท) กับคุณลักษณะของข้อมูล (อินพุท) เป็นไปในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นยิ่งไปกว่านั้น เคอร์เนลแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงเส้นนั้นก็คือเกาส์เซียนเคอร์เนลแบบหนึ่งเนื่องจากเคอร์เนลแบบเชิงเส้นที่มีค่าพารามิเตอร์ $\tilde{C}$ จะมีสมรรถนะเหมือนกับเกาส์เซียนเคอร์เนลที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ $(\gamma, C)$ บางค่า

เหตุผลข้อที่สองที่มักจะเลือกใช้เกาส์เซียนเคอร์เนลเป็นตัวแรกก็คือจำนวนตัวแปรไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) ที่มีผลกับความซับซ้อนในการเลือกโครงสร้างของเคอร์เนล ซึ่งโพลีโนเมียลเคอร์เนลนั้นมีจำนวนไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) มากกว่าเกาส์เซียนเคอร์เนล

เหตุผลข้อสุดท้ายคือเกาส์เซียนเคอร์เนลนั้นมีความยากในเชิงตัวเลขน้อยกว่าเนื่องจากค่าจะแปรผันอยู่ระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง ในทางกลับกันค่าของโพลีโนเมียลเคอร์เนลนั้นจะลู่เข้าอนันต์หรือมีค่าเป็นศูนย์

**โพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial Kernel)**

โพลีโนเมียลเคอร์เนลนั้นมีความสามารถในการแมพปิ้งข้อมูลทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นจึงมีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้ค่อนข้างสูง ทั้งยังสามารถรองรับข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูงได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการนำโพลีโนเมียลเคอร์เนลไปใช้นั้นมีข้อจำกัดทางด้านความเร็วในการประมวลผล เนื่องจากมีจำนวนพารามิเตอร์ค่อนข้างมากทำให้เสียเวลาในการประมวลผลอย่างมากเมื่อเทียบกับเกาส์เซียนเคอร์เนล และเคอร์เนลแบบเชิงเส้น

แม้ว่าโพลีโนเมียลเคอร์เนลนั้นสามารถนำมาใช้กับข้อมูลการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แต่กลับใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนานและให้ความถูกต้องใกล้เคียงกับเกาส์เซียนเคอร์เนลทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความซับซ้อนน้อยจึงไม่เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านความถูกต้องของเคอร์เนลทั้งสอง ทั้งยังต้องทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของเคอร์เนลมากกว่าแบบเกาส์เซียน จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

**ตารางที่ 5.2** แสดงคุณสมบัติของเคอร์เนลแต่ละประเภท

| ประเภทเคอร์เนล | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---|---|---|
| เคอร์เนลแบบเชิงเส้น | - ความรวดเร็วในการประมวลผลสูงมาก<br>- สะดวกต่อการนำไปใช้<br>- ใช้พารามิเตอร์น้อย | - ไม่สามารถใช้กับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น |
| เคอร์เนลแบบเกาส์เซียน | - สามารถใช้กับข้อมูลทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น<br>- ความถูกต้องและรวดเร็วในการประมวลผลสูง<br>- ใช้พารามิเตอร์ไม่มากเท่าแบบโพลีโนเมียล | - ไม่เหมาะกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูง |
| เคอร์เนลแบบโพลีโนเมียล | -สามารถใช้กับข้อมูลทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น<br>- สามารถใช้กับข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูง<br>- มีความยืดหยุ่นสามารถใช้กับข้อมูลทุกประเภท | - ใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก<br>- ใช้จำนวนพารามิเตอร์มาก |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางจะแสดงให้เห็นความเหมาะสมของเคอร์เนลแต่ละประเภท โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เล็งเห็นว่าข้อมูลที่จะทำการประมวลผลนั้นมีความซับซ้อนไม่สูงนัก อีกทั้งยังเป็นข้อมูลในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำการเลือกใช้เคอร์เนลแบบเกาส์เซียนในการทดลอง

### 5.2.3 กระบวนการของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

หลังจากที่ทำการจัดเตรียมข้อมูลเรียบร้อยแล้ว และทดลองหาค่าตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีเรียบร้อยแล้ว จะเริ่มนำข้อมูลและตัวแปรเหล่านั้นมาเข้ากระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในเบื้องต้นว่าซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นเป็นทฤษฎีการเรียนรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งคลาสข้อมูลได้โดยสามารถหาฟังก์ชันการแบ่งคลาสที่สามารถแบ่งข้อมูลได้โดยให้ระยะมาร์จิ้นที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งการจะหาค่าฟังก์ชันการแบ่งคลาสนี้ได้นั้นทฤษฎีซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นได้อาศัยทฤษฎี Quadratic programming เข้ามาช่วยหาผลเฉลยสมการเงื่อนไขให้แก่ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ซึ่งสมการเงื่อนไขของซัพพอร์ตเวตเตอร์แมชชีนที่ได้กล่าวไว้แต่แรกเริ่มในบทที่ 2 คือ

$$\max imize \sum_{i=1}^{n}\alpha_i - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} y_i y_j \alpha_i \alpha_j \mathbf{x}_i \mathbf{x}_j$$

$$subject\ to: \sum_{i=1}^{n} y_i \alpha_i = 0, \qquad 0 \le \alpha_i \le C$$

ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆนั้นจะหาได้จากกระบวนการที่จะอธิบายต่อจากนี้ ตัวแปรที่ต้องการจากสมการผลเฉลยนี้คือตัวแปร $\alpha$ ซึ่งจะนำมาทำการสร้างฟังก์ชันการแบ่งคลาสโดยแทนลงในสมการข้างล่างนี้ก็จะได้ฟังก์ชันการแบ่งคลาสออกมาเป็นผลลัพธ์

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b$$

ก่อนที่จะหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการหาเกณฑ์การระบุประเภทความผิดพร่อง ในหัวข้อย่อยนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนของกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน โดยจะแสดงในรูปของโฟลงชาร์ต (Flow chart) พร้อมคำอธิบายดังนี้

1. เนื่องจากข้อมูลที่เตรียมไว้นั้นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและมีค่าอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง ดังนั้นก่อนเข้ากระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนจึงจำเป็นต้องทำการสเกลให้อยู่ในช่วงที่พอเหมาะ ในที่นี้จะสเกลให้อยู่ในช่วง [-3,3] เพื่อให้ง่ายต่อการประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเคอร์เนล ($\gamma$) เพื่อกำหนดความยืดหยุ่นในการแมพปิ้งข้อมูลอินพุทที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นข้อมูลที่สามารถแบ่งคลาสได้ด้วยเส้นตรง โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเลือกใช้เกาส์เซียนเคอร์เนล ( $K(x,y)=e^{(-\gamma\|x-y\|^2)}$ )
3. กำหนดค่า Soft-Margin Variable (C) เพื่อกำหนดความยืดหยุ่นให้กับเกณฑ์ที่จะหาเพื่อให้ได้เกณฑ์การแบ่งคลาสที่มีระยะมาร์จิ้นที่กว้างมากขึ้น
4. กำหนดค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Initial Condition) สำหรับกระบวนการแก้ปัญหาสมการผลเฉลยสำหรับสมการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน
5. ทำการแมพปิ้ง (Mapping) ข้อมูลอินพุทให้ไปอยู่ในปริภูมิมิติสูง (Feature space) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะสามารถถูกแบ่งคลาสได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น ซึ่งข้อมูลจากขั้นตอนนี้จะเป็นอินพุทให้กับกระบวนการแก้สมการผลเฉลยสำหรับสมการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน
6. ทำการแก้ปัญหาสมการผลเฉลยของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

$$\max imize \sum_{i=1}^{n}\alpha_i-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}y_i y_j\alpha_i\alpha_j\mathbf{x}_i\mathbf{x}_j$$

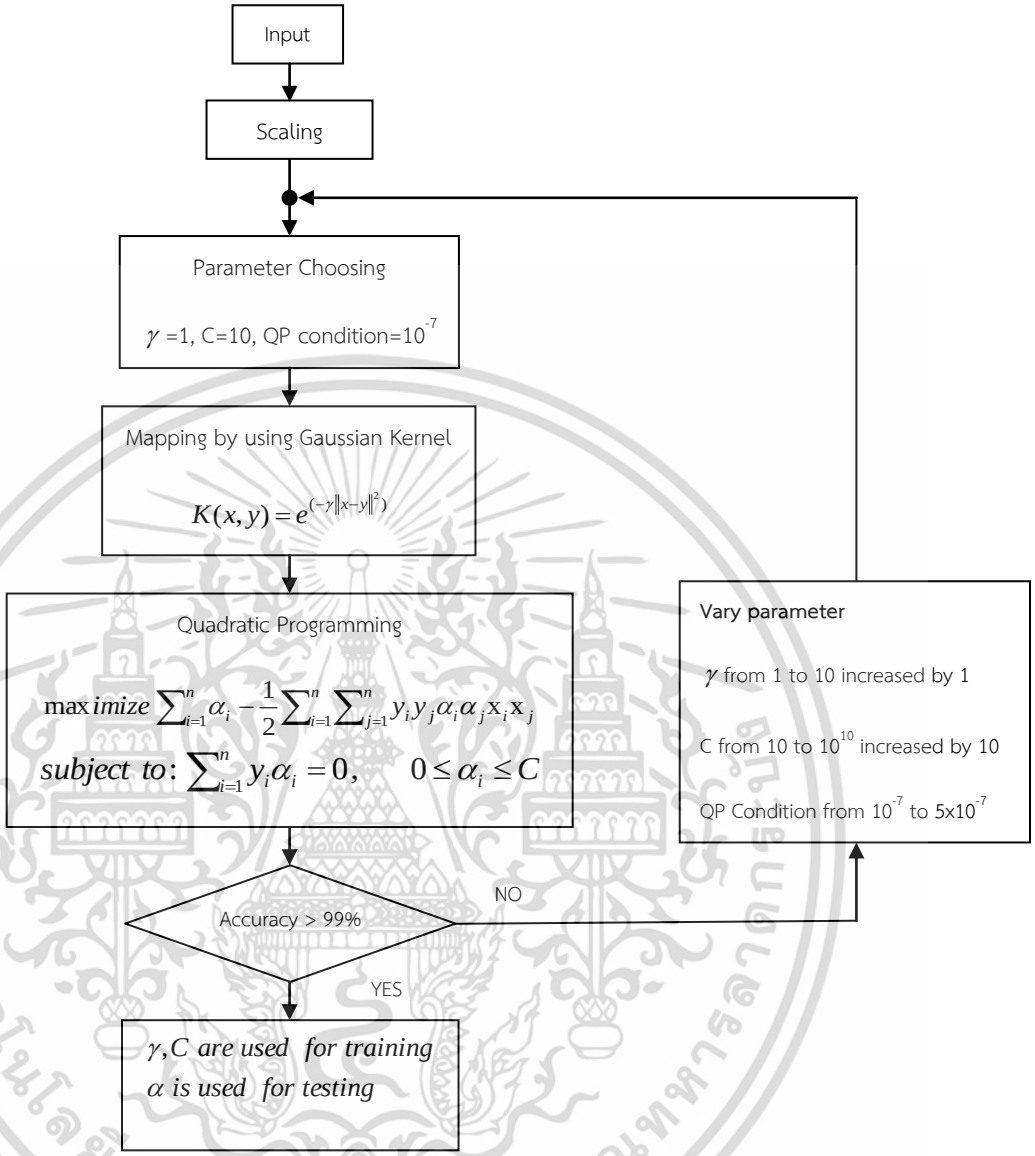
$$subject\ to:\ \sum_{i=1}^{n}y_i\alpha_i=0,\quad 0\le\alpha_i\le C$$

- ถ้าค่าผลลัพธ์ที่ได้จากสมการให้ผลการแบ่งคลาสถูกต้องมากกว่า 99% จะทำการนำค่าตัวแปรที่กำหนดในขั้นตอนที่ 2-4 มาเป็นตัวแปรกำหนดกระบวนการเรียนรู้ของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน และนำค่าผลลัพธ์ $\alpha$ มาเป็นตัวแปรในการสร้างเกณฑ์การแบ่งประเภทความผิดพร่องโดยแทนลงในสมการข้างล่างนี้

$$f(\mathbf{x})=\sum_{i=1}^{l}\alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i,\mathbf{x})+b$$

- ถ้าค่าผลลัพธ์ที่ได้จากสมการให้ผลการแบ่งคลาสถูกต้องน้อยกว่า 99% จะทำการเลือกตัวแปรในขั้นตอนที่ 2-4 ใหม่จนกระทั่งได้ความถูกต้องมากกว่า 99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 5.2 โฟลงชาร์ตแสดงกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

## 5.3 การหาค่าตัวแปรพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

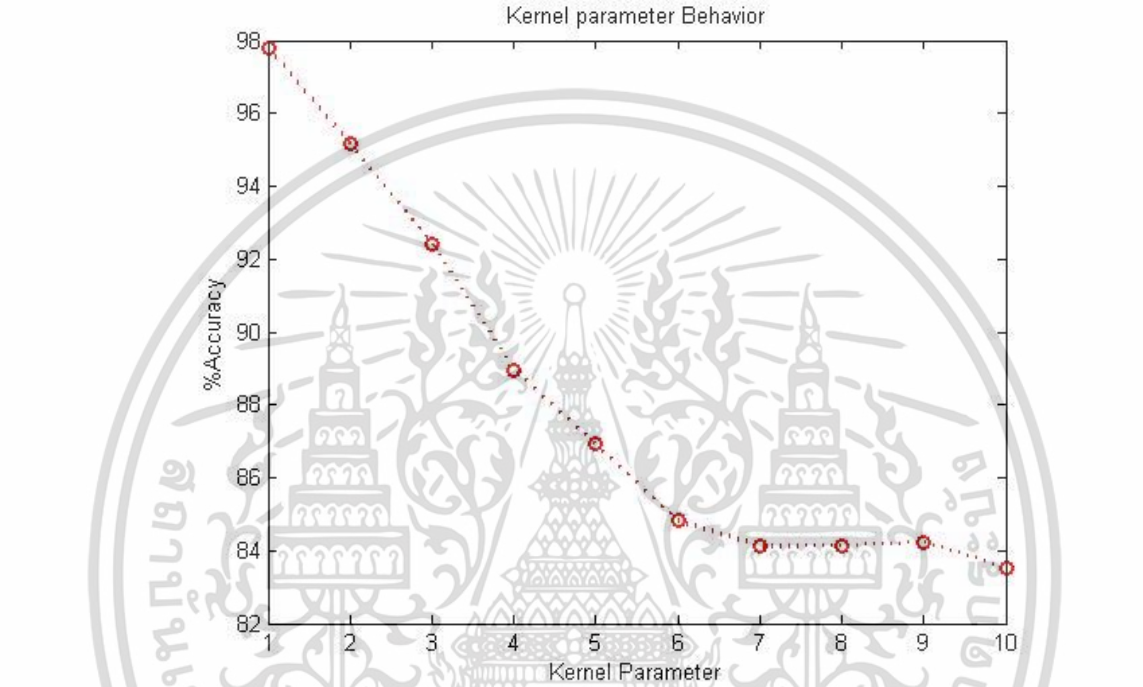
เนื่องจากในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการเลือกใช้เกาส์เซียนเคอร์เนลในการประมวลผลดังนั้นจะทำการพิจารณาการเลือกตัวแปรพารามิเตอร์สำหรับเกาส์เซียนเคอร์เนล ซึ่งก็คือ ค่า $C$ กับค่า $\gamma$ เป้าหมายของกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนคือการหาค่า $(\gamma, C)$ ที่มีความเหมาะสม

โดยวิธีการนั้นก็คือกระบวนการลองผิดลองถูกที่ได้กล่าวมาในช่วงก่อนหน้านี้นั่นเองแต่ว่าในวิทยานิพนธ์นี้จะลองใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อทดสอบดูว่าค่าใดเหมาะสมที่จะนำมาใช้ โดยจะนำข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

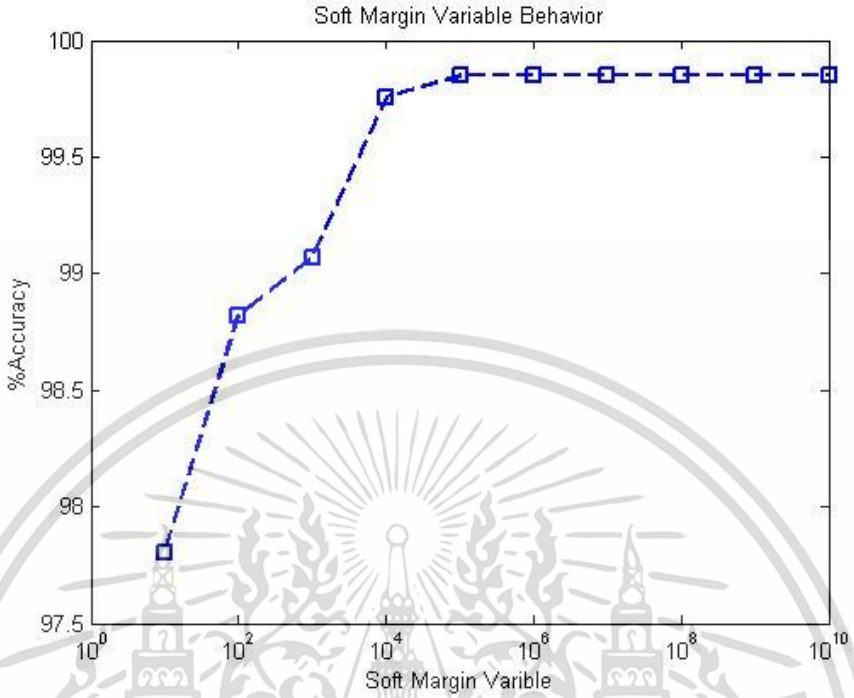
จำนวน 180 ตัวสำหรับระบบทดลองสายส่งเหนือพื้นดินกับข้อมูลจำนวน 150 ตัวสำหรับระบบทดลองสายส่งใต้พื้นดินในการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

และจากการทดลองจะทราบถึงพฤติกรรมของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกระทบกับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในการทดลองนี้ตามรูปกราฟที่แสดงด้านล่าง

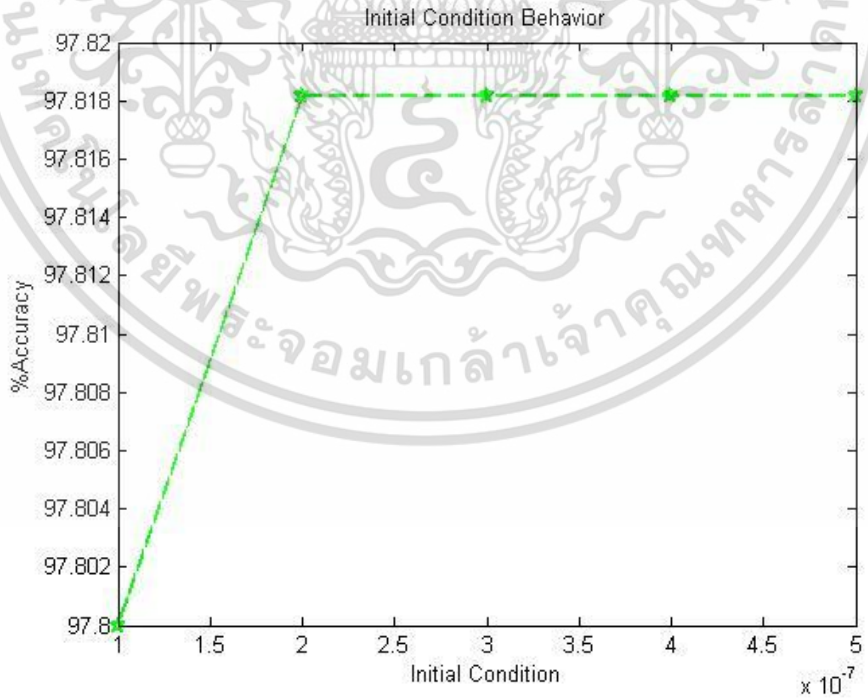



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งเหนือพื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soft-Margin Variable กับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งเหนือพื้นดิน



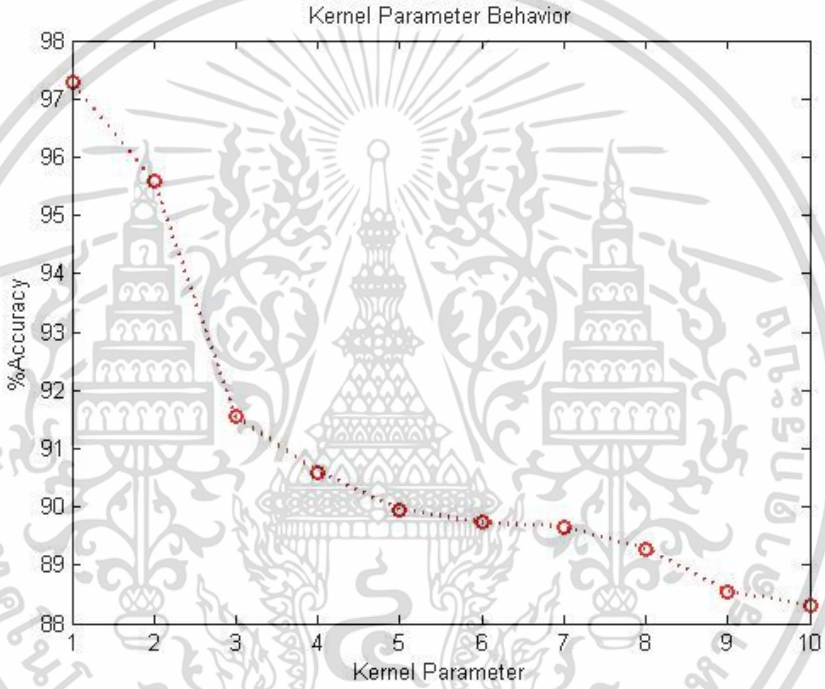

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นกับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งเหนือพื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 5.3 ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของพฤติกรรมระหว่างค่าเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบทดลอง ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ผกผันกัน

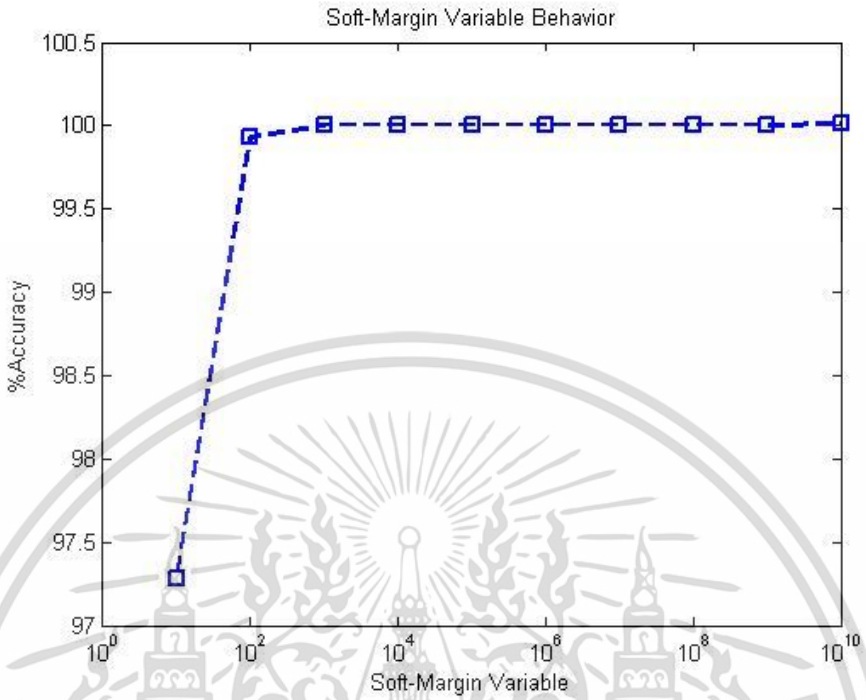
กราฟที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของค่า Soft-Margin Variable ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบทดลองในลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกัน

กราฟที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของกระบวนการ Quadratic programming ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบทดลองในลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกัน

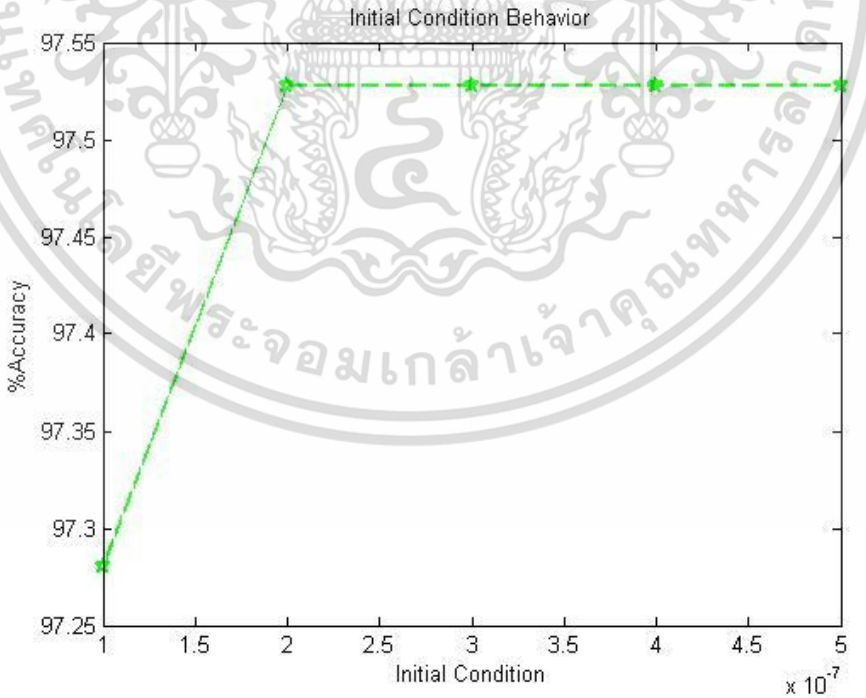



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งใต้พื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soft Margin Variable กับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งใต้พื้นดิน




รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นกับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งใต้พื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 5.6 ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของพฤติกรรมระหว่างค่าเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบทดลอง ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ผกผันกัน

กราฟที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของค่า Soft-Margin Variable ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบทดลองในลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกัน

กราฟที่ 5.8 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของกระบวนการ Quadratic programming ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบทดลองในลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกัน

ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟ 5.3-5.5 กับ 5.6-5.7 แล้วจะพบว่ามีแนวโน้มเหมือนกัน ซึ่งทำให้สามารถบอกเป็นนัยยะว่าค่าตัวแปร $\alpha$ ที่จะเป็นผลลัพธ์หลังจากกระบวนการ Quadratic Programming นั้นสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่องได้ทั้งระบบไฟฟ้าเหนือดินและระบบไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นมีความยืดหยุ่นเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่องทั้งในระบบไฟฟ้าเหนือดินและใต้ดิน

ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้ทำให้สามารถเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการเรียนรู้เพื่อหาค่า $\alpha$ ซึ่งจะเป็นตัวแปรในการกำหนดฟังก์ชันการระบุประเภทความผิดพร่องในระบบจำลองสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6

# ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งจะแบ่งรูปแบบในการนำเสนอดังต่อไปนี้

## 6.1 รูปแบบการนำเสนอ

### 6.1.1 ระบบการทดลอง

ระบบการทดลองระบบส่งแบบเหนือพื้นดิน ความยาวสายส่ง 325 กิโลเมตร แสดงในรูปที่ 6.1-6.5

ระบบการทดลองระบบส่งแบบใต้พื้นดิน ความยาวสายส่ง 5.8 กิโลเมตร แสดงในรูปที่ 6.6-6.10

### 6.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟ

การแสดงผลของกราฟจะแสดงผลของการระบุชนิดความผิดพร่องที่เกิดในระบบทดลองทั้งสองโดยจะบอกความถูกต้องของความผิดพร่องของแต่ละประเภท และจะเรียงตามตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง ซึ่งรายละเอียดของแต่ละกราฟจะประกอบไปด้วย

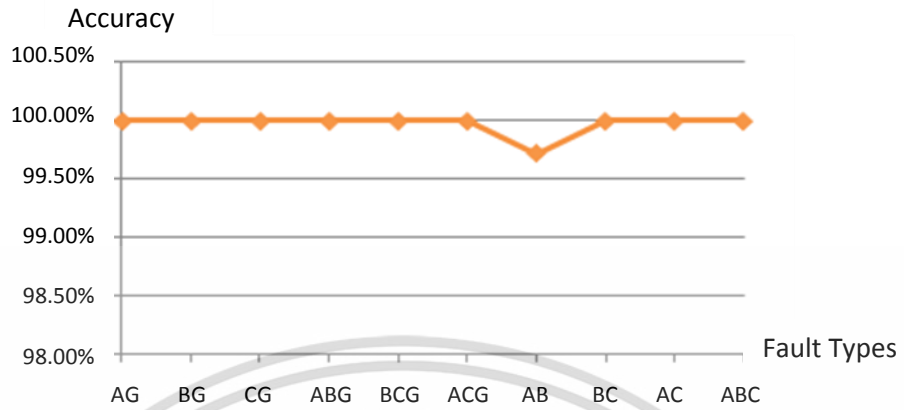
6.1.2.1 แสดงความถูกต้องในการระบุประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบทดลองทั้งระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือพื้นดินและระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้พื้นดินโดยกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน

6.1.2.2 การเรียงลำดับจะเรียงตามประเภทของความผิดพร่อง คือ AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, BC, CA และ ABC ตามลำดับ

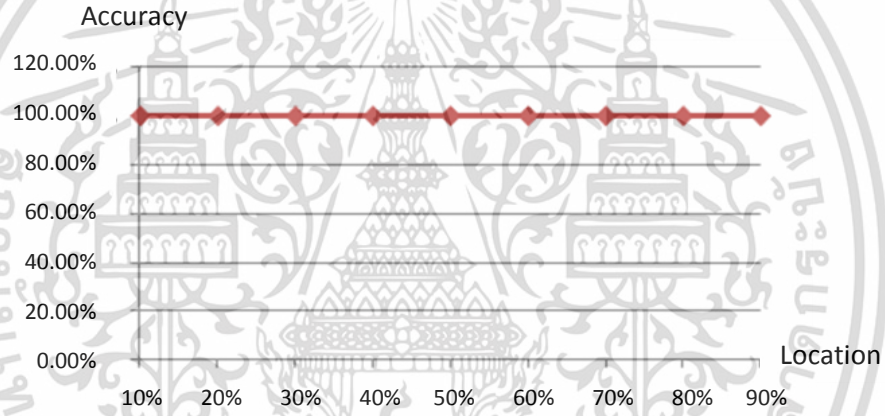
6.1.2.3 ความผิดพร่องแต่ละประเภทจะเรียงลำดับตามตำแหน่งที่เริ่มเกิดความผิดพร่อง คือ 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% และ 90% ของความยาวสายส่งเมื่อเทียบกับปลายสายส่งด้านบัส A

## 6.2 ผลการทดลองของระบบทดลองระบบส่งเหนือพื้นดิน

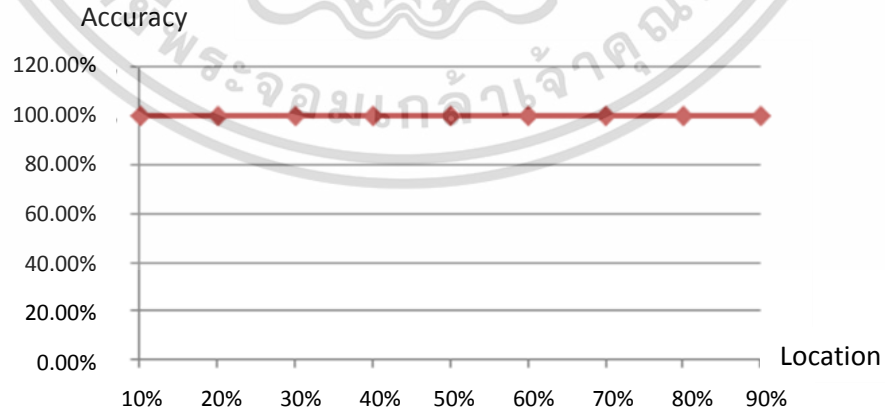
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 6.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่อง

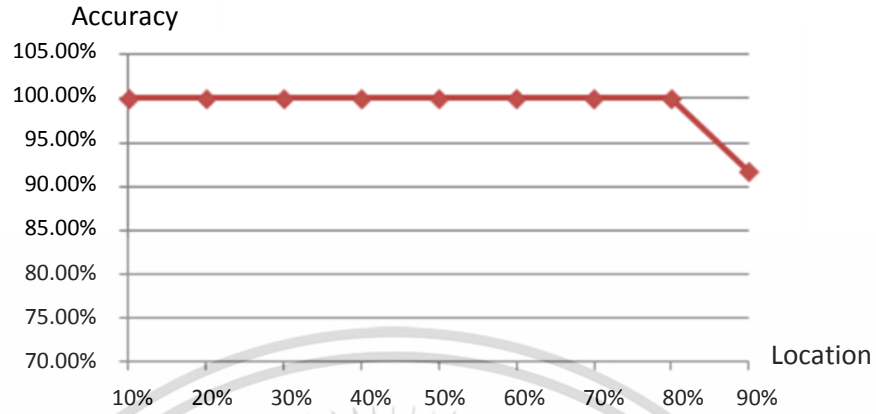



รูป 6.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

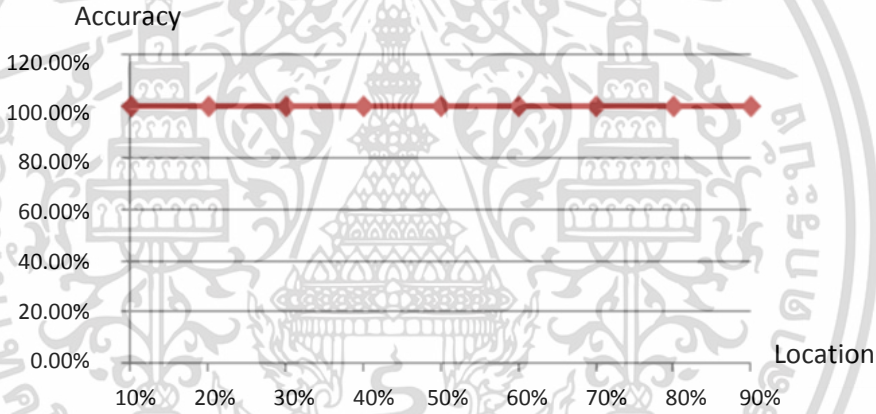



รูป 6.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 6.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ




รูป 6.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่งต่างๆ

จากผลการทดลองในรูป 6.1-6.5 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

**การตรวจจับความผิดพร่อง** สามารถตรวจจับความผิดพร่องจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตของกระแสได้ถูกต้อง 100%

**การระบุประเภทของความผิดพร่อง** ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ถูกแสดงในรูปด้านบนนั้นสรุปได้ว่า

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นว่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องนั้นมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 97.22% ที่ประเภทความผิดพร่องแบบ AB ซึ่งจะได้ความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ 99.72%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

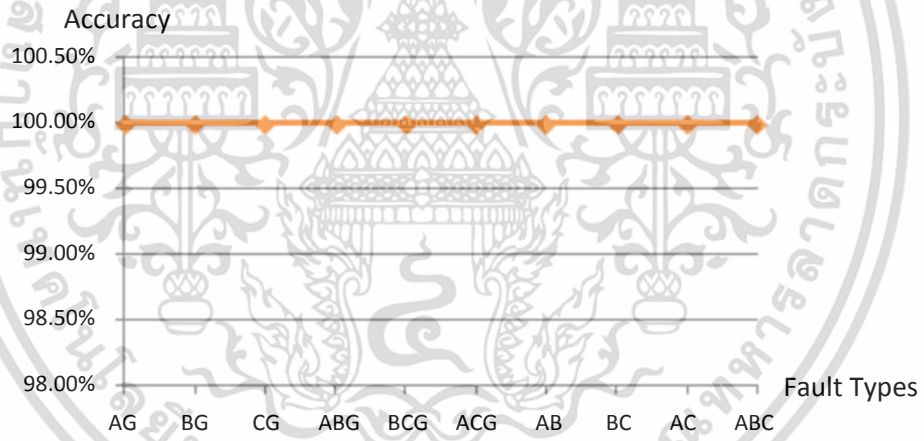
จากรูปที่ 6.2 จะเห็นว่าสามารถระบุประเภทความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดินได้ถูกต้อง 100% ณ ทุกตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

จากรูปที่ 6.3 จะเห็นว่าสามารถระบุประเภทความผิดพร่องแบบสองเฟสลงดินได้ถูกต้อง 100% ณ ทุกตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าสามารถระบุประเภทความผิดพร่องแบบสอบแบบเฟสต่อเฟสได้ถูกต้องประมาณ 91.67% ณ ตำแหน่ง 90% จากปลายสายส่งด้าน A ซึ่งทำให้ความถูกต้องโดยรวมของการระบุชนิดของความผิดพร่องแบบเฟสต่อเฟสอยู่ที่ 97.22%

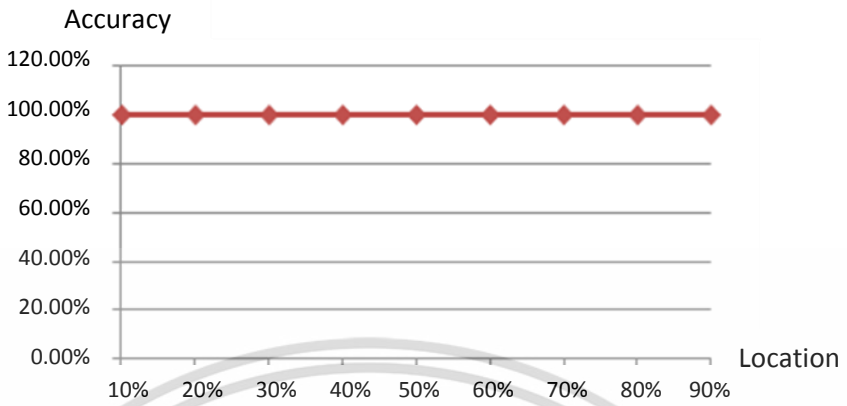
จากรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าสามารถระบุประเภทความผิดพร่องแบบสามเฟสได้ถูกต้อง 100% ณ ทุกตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

## 6.3 ผลการทดลองของระบบทดลองระบบส่งใต้พื้นดิน

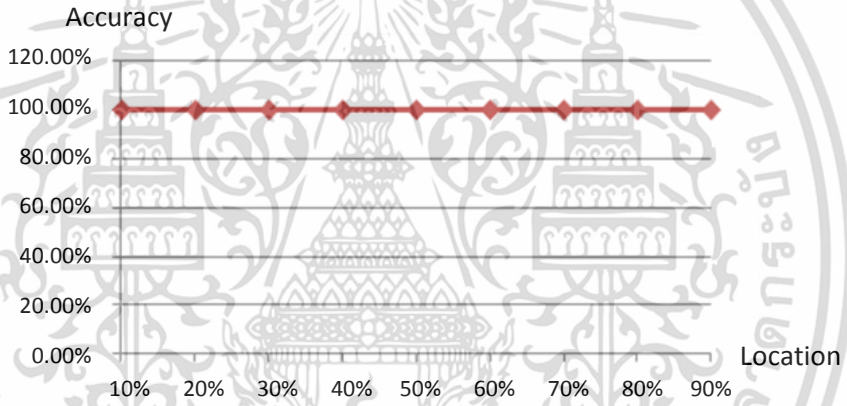



รูป 6.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่อง

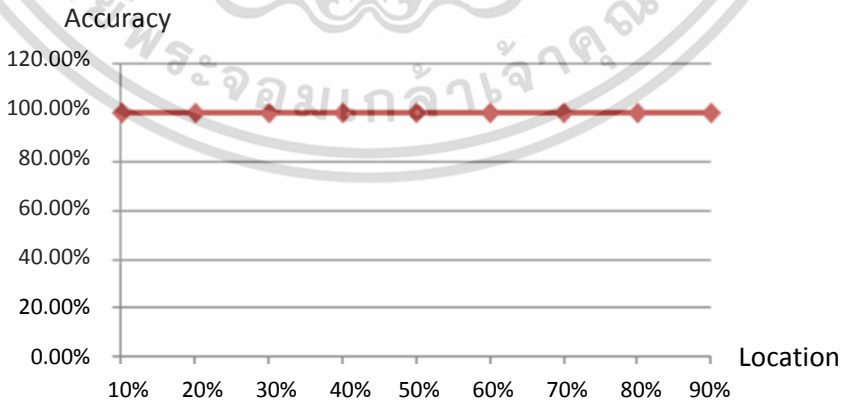
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 6.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

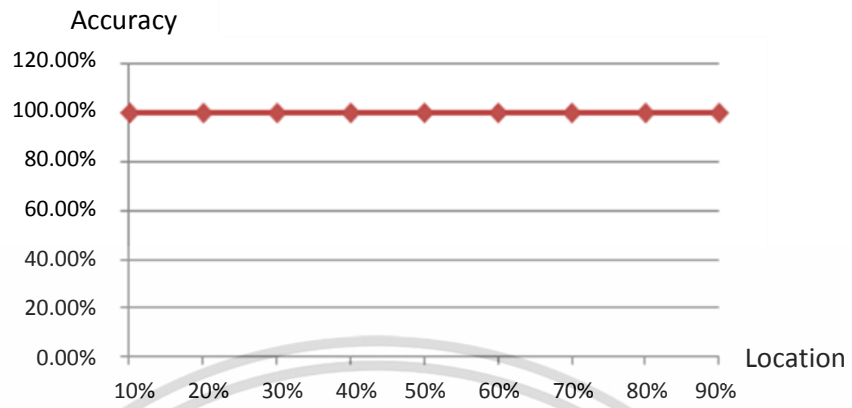



รูป 6.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ




รูป 6.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 6.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่งต่างๆ

จากผลการทดลองในรูป 6.6-6.10 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

**การตรวจจับความผิดพร่อง** สามารถตรวจจับความผิดพร่องจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตของกระแสได้ถูกต้อง 100%

**การระบุประเภทของความผิดพร่อง** ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ถูกแสดงในรูปด้านบนนั้นสรุปได้ว่า

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นว่าความถูกต้องในการระบุชนิดความผิดพร่องนั้นมีค่าถูกต้องถึง 100.00%

จากรูปที่ 6.7, 6.8, 6.9 และ 6.10 จะเห็นว่าสามารถระบุประเภทความผิดพร่องได้ถูกต้อง 100% ณ ทุกตำแหน่งและทุกประเภทความผิดพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 7

# กรณีศึกษา

เนื่องจากจุดประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือการพัฒนาอัลกอลิทึมในการระบุชนิดความผิดพร่องในระบบสายส่งให้มีความถูกต้องรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำอัลกอลิทึมที่ทำการพัฒนานี้มาทดลองใช้ในทางปฏิบัติเพื่อทดสอบและรับรองถึงความสามารถในการระบุชนิดความผิดพร่องว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้จริง

ในบทนี้จึงนำเสนอกรณีศึกษาของเหตุการณ์ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นจริงในสายส่งและทำการวิเคราะห์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดสำหรับกรณีศึกษาดังนี้

## 7.1 ข้อกำหนดในการศึกษา

1. ลักษณะของเหตุการณ์และโครงสร้างของระบบไฟฟ้าเหนือดินถูกจำลองขึ้นมาในห้องปฏิบัติการเพื่อให้สอดคล้องกับระบบไฟฟ้าเหนือดินระหว่างสถานีไฟฟ้าแม่เมาะกับสถานีไฟฟ้าท่าตะโก

2. ทำการจำลองที่อัตราการสุ่ม 5 kHz

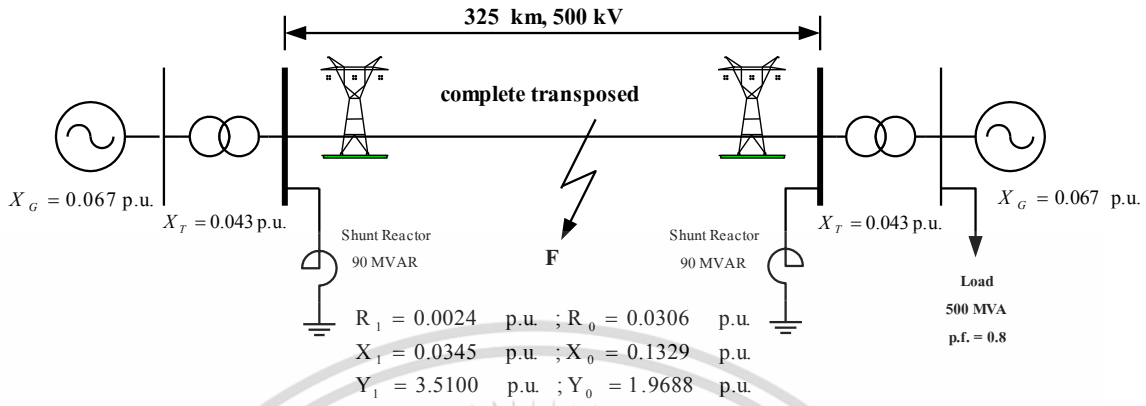
3. รูปแบบการวิเคราะห์นั้นทำโดยการนำสัญญาณที่เกิดความผิดพร่องมาตรวจจับหาความผิดพร่อง และทำการระบุความผิดพร่องตามอัลกอลิทึมที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์

4. รูปแบบของกรณีศึกษาที่ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการคือความผิดพร่องชนิด AG ซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 30% ของสายส่ง และมุมที่เกิดความผิดพร่องคือ 90 องศา

## 7.2 กรณีศึกษา

กรณีศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้คือการจำลองความผิดพร่องชนิด AG ที่เกิดขึ้นบนสายส่งระหว่างสถานีไฟฟ้าแม่เมาะกับสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ซึ่งมีความยาวเป็นระยะทั้งหมด 325.6 กิโลเมตร โดยให้เกิดความผิดพร่องที่ตำแหน่ง 30% ของความยาวสายส่ง และมีมุมที่เกิดความผิดพร่องเท่ากับ 90 องศา

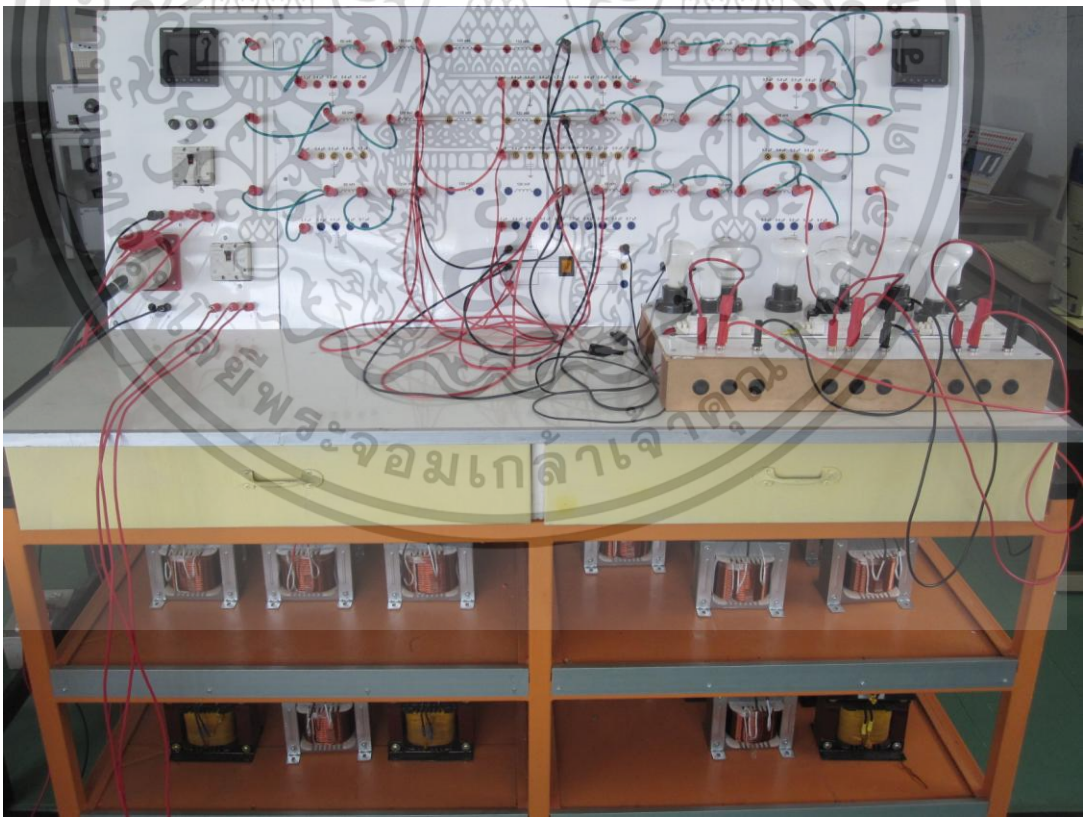
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 7.1 แสดงระบบทดลอง ความยาว 325 กิโลเมตร

## 7.3 การจำลองความผิดพร่อง

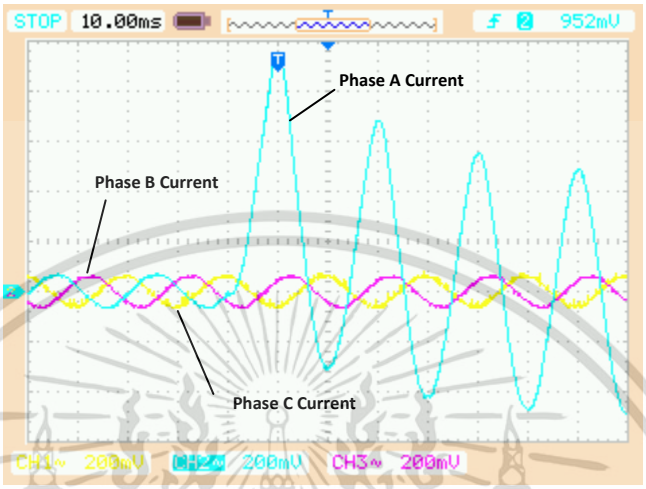
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองความผิดพร่องโดยใช้ระบบจำลองในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นระบบจำลองสายส่งระหว่างสถานีไฟฟ้าแม่เมาะถึงสถานีไฟฟ้าท่าตะโกซึ่งแสดงดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงระบบจำลองสายส่งที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าในบทนี้จะทำการจำลองความผิดพร่องชนิด AG ที่ตำแหน่ง 30% ของสายส่ง และเกิดความผิดพร่องที่มุม 90 องศา ทำให้ได้รูปสัญญาณจากเครื่องวัดสัญญาณดังรูปที่ 7.3




รูปที่ 7.3 แสดงสัญญาณความผิดพร่องชนิด AG ที่ตำแหน่ง 30% ของสายส่งและเกิดความผิดพร่องที่มุม 90 องศา

โดยที่ CH2 แสดงสัญญาณกระแสที่เฟส A

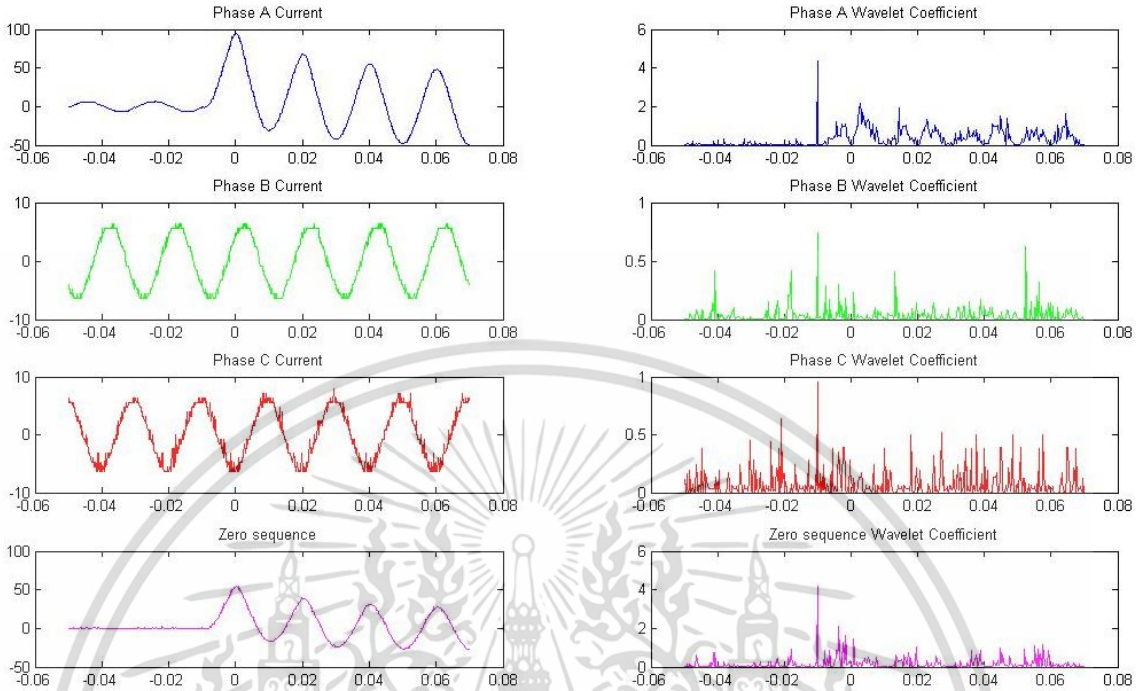
CH3 แสดงสัญญาณกระแสที่เฟส B

CH1 แสดงสัญญาณกระแสที่เฟส C

## 7.4 การวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่อง

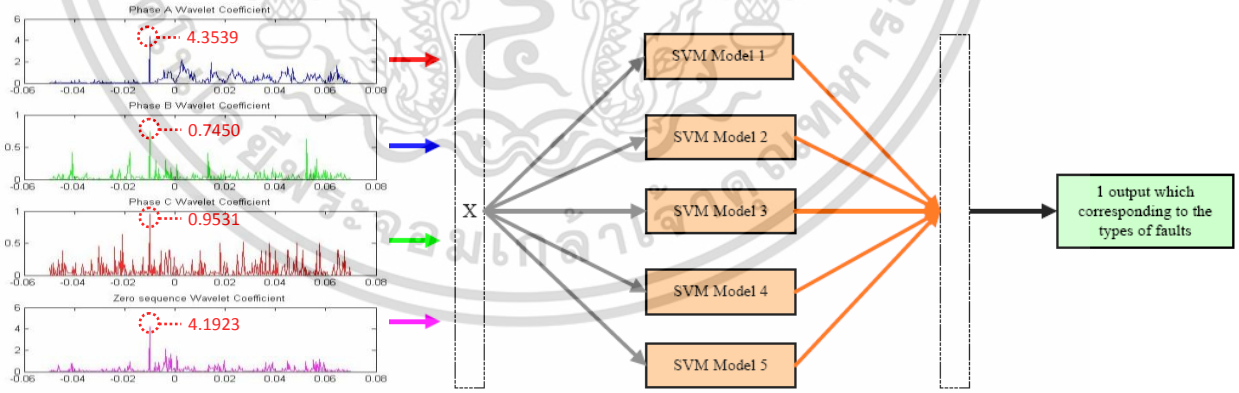
หลังจากที่ได้สัญญาณความผิดพร่องที่ทำการจำลองขึ้นมาแล้ว จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณนั้นมีสัญญาณรบกวนแฝงอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งแตกต่างจากระบบซิมมูเลชันอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญอย่างยิ่งที่จำเป็นต้องทดสอบกระบวนการระบุชนิดความผิดพร่องโดยซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนกับระบบจำลองในทางปฏิบัติเพื่อเป็นการรับรองว่ากระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ได้ทำการพัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปพัฒนาและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยหลังจากที่ได้สัญญาณกระแสทั้งสามเฟสมาแล้วจะนำสัญญาณดังกล่าวมาหากระแสลำดับศูนย์แล้วจึงทำการแปลงเวฟเล็ตเพื่อทำการตรวจจับว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้นหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 7.4 แสดงสัญญาณกระแสเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ต

หลังจากที่ทำการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณความผิดพร่องแล้ว ขั้นต่อไปจะนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่เกิดขึ้นในกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์ไปเป็นอินพุทให้กับโมเดลของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนดังรูปที่ 7.5




รูปที่ 7.5 แสดงแสดงโครงสร้างของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนที่ใช้ในการระบุชนิดความผิดพร่อง

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ไปเป็นอินพุทให้กับซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนซึ่งได้สร้างเกณฑ์การแบ่งชนิดความผิดพร่องจากข้อมูลฝึกหัดเรียบร้อยแล้วจะได้เอาท์พุทเป็นชนิดความผิดพร่องของสัญญาณออกมา ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้เอาท์พุทที่ได้คือความผิดพร่องชนิด AG จะเห็นเกณฑ์การแบ่งชนิดความผิดพร่องที่ได้จากกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นสามารถนำมาใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 8

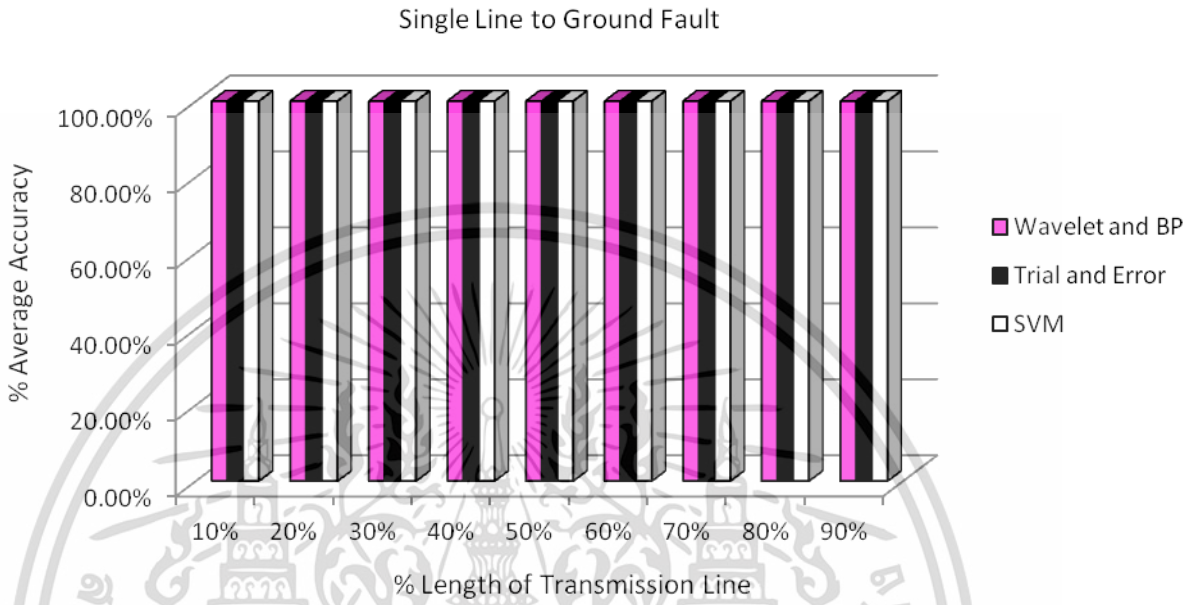
# บทสรุป

จากรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย และนำผลที่ได้มาประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้แล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

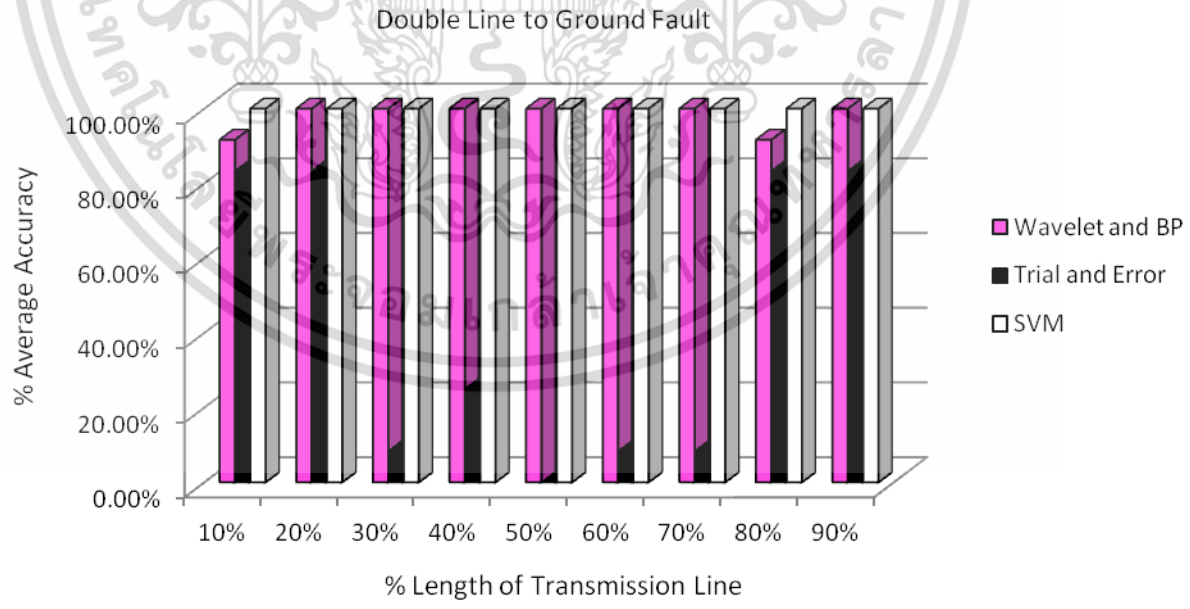
1. รูปแบบการวิเคราะห์อาศัยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณความผิดพร่อง ซึ่งองค์ประกอบความถี่สูงนี้ถูกแยกออกมาด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่แบบ Daubechies 4 (db4) ในการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่อง โดยทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาในสเกลที่ 1-5 และผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นถูกนำมาประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในสายส่ง
2. สัญญาณความผิดพร่องที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งอาศัยแบบจำลองสายส่งวงจรเดี่ยวระหว่างโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (MM3) ถึงสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) เป็นแบบสายส่งที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจำลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของความผิดพร่องในหลายรูปแบบที่อัตราสุ่ม 200 kHz สำหรับแบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน และแบบจำลองสายส่งระหว่างวิภาวดีถึงสามย่าน โดยมีอัตราสุ่มเท่ากับ 1000 kHz
3. รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินในการตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในช่วง ¼ ไซเคิลหลังจากเกิดความผิดพร่อง โดยเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลดังนี้
    - การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตขององค์ประกอบลำดับบวกระหว่างก่อนและหลังเกิดความผิดพร่องเพื่อใช้สำหรับตรวจจับความผิดพร่อง
    - การนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของเฟส A, B และ C กับองค์ประกอบลำดับศูนย์ไปผ่านกระบวนการซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน เพื่อทำการระบุประเภทของความผิดพร่อง
4. การทดลองวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองวิธีการด้วยการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่ได้จากระบบการทดลองระบบสายส่งเหนือพื้นดิน ความยาว 325 กิโลเมตร และระบบสายส่งใต้พื้นดิน ความยาว 5.8 กิโลเมตรซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ระบบจำลองสายส่งเหนือพื้นดิน**

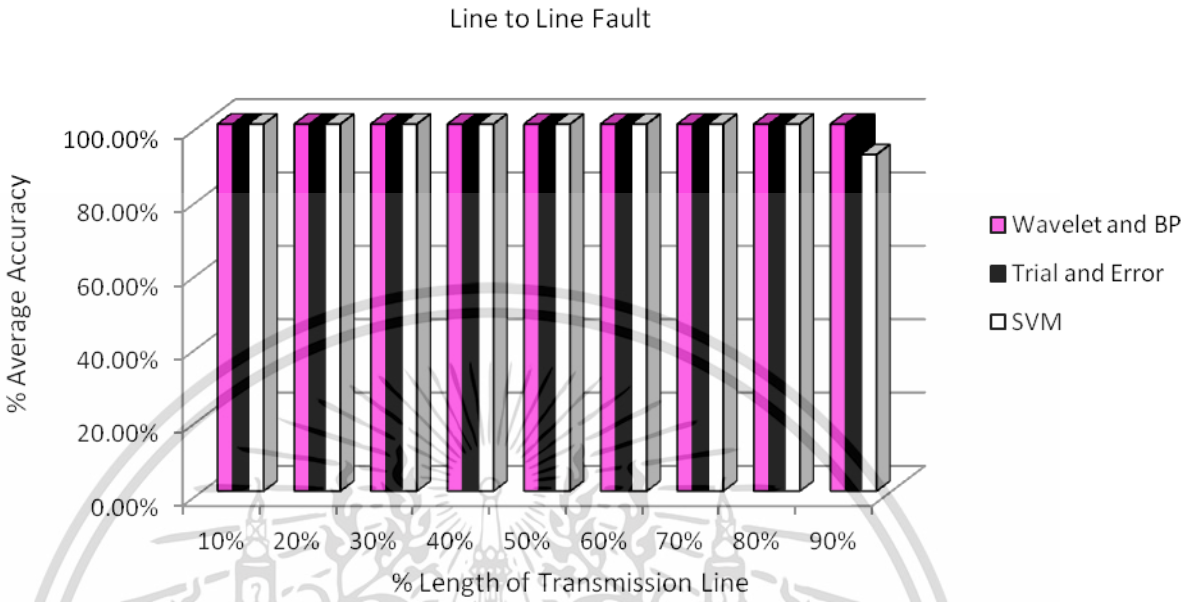



รูป 8.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

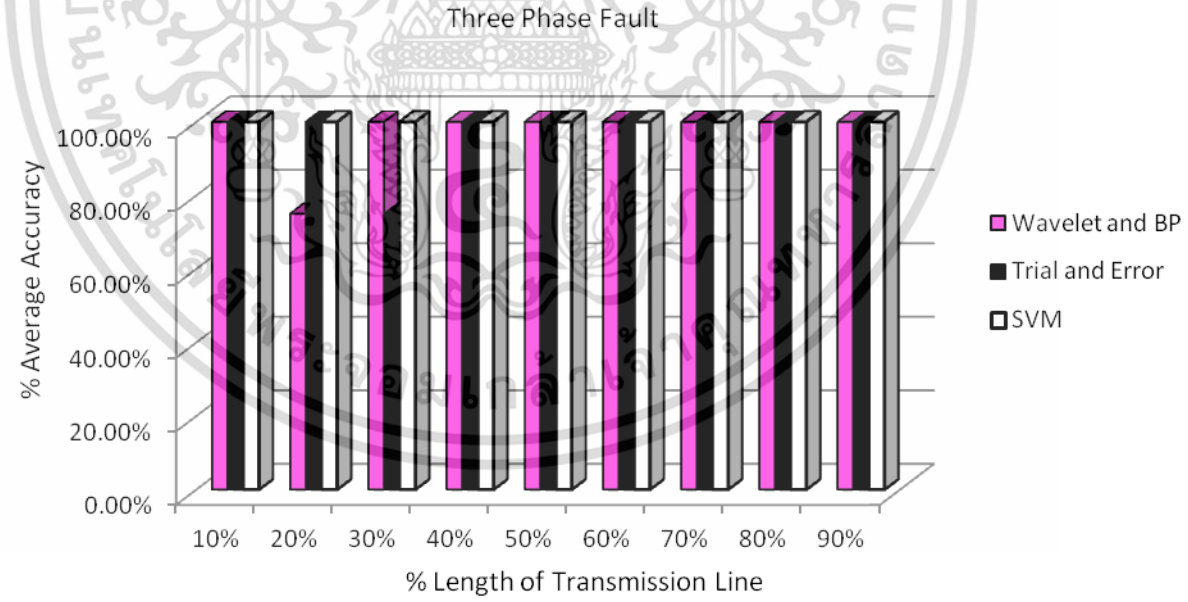



รูป 8.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 8.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ



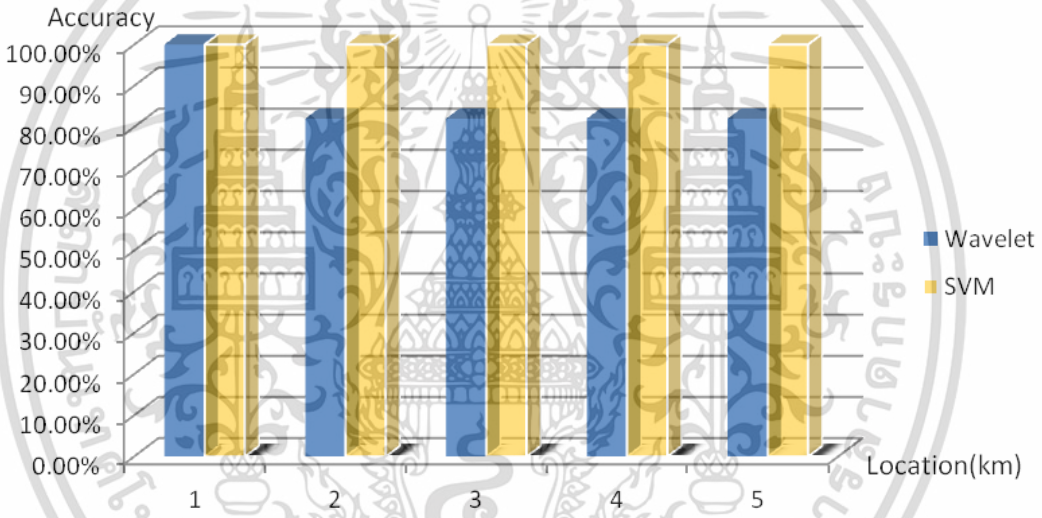

รูป 8.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูป 8.1-8.4 สามารถสรุปได้ดังนี้

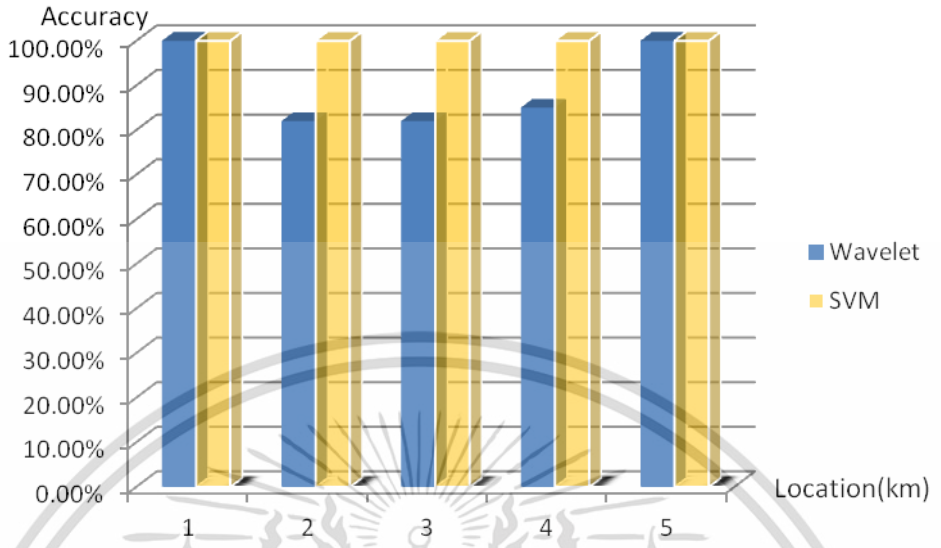
**การระบุประเภทของความผิดพร่อง** ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนถูกแสดงรูปด้านบนนั้นสรุปได้ว่า ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในการระบุประเภทความผิดพร่องในระบบสายส่งโดยให้ความถูกต้องมากกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอลิทึมอื่นๆในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ และวิธีการลองผิดลองถูก [21-22]

**ระบบจำลองสายส่งใต้พื้นดิน**

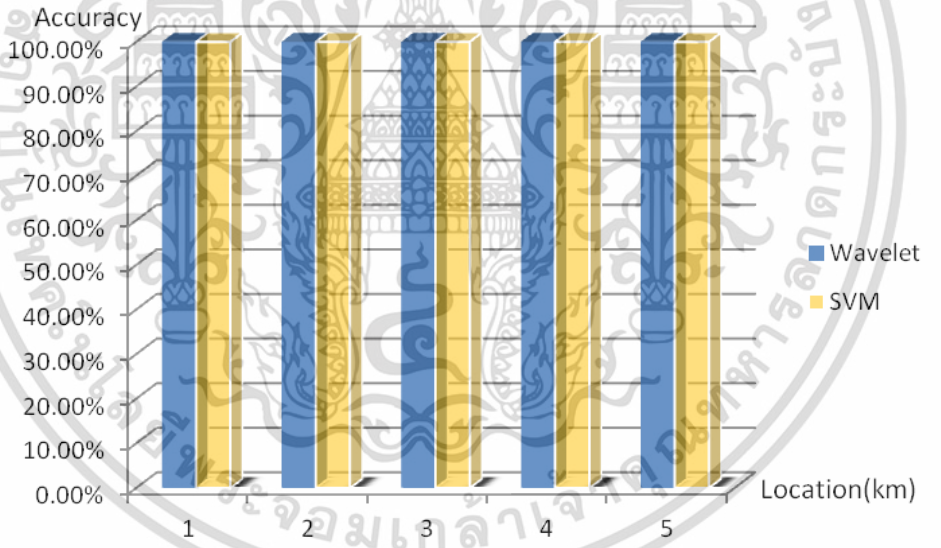



รูปที่ 8.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสเดียวลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

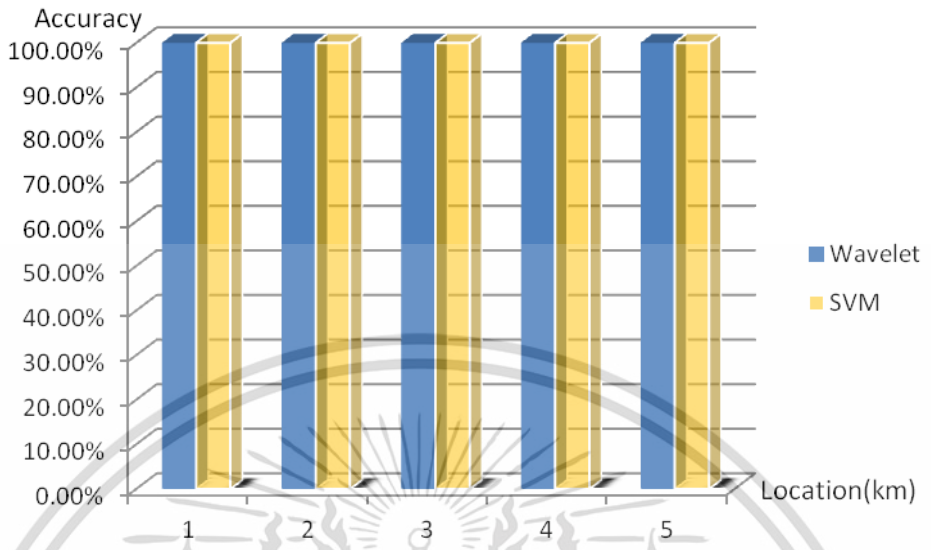



รูปที่ 8.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสองเฟสลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ




รูปที่ 8.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความผิดพร่องชนิดสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่งต่างๆ

จากผลการทดลองในรูป 8.5-8.8 สามารถสรุปได้ดังนี้

**การระบุประเภทของความผิดพร่อง** ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทางซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน ถูกแสดงรูปด้านบนนั้นสรุปได้ว่า ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในการระบุประเภทความผิดพร่องในระบบสายส่งโดยให้ความถูกต้องมากกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอลิทึมอื่นๆในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น การแปลงเวฟเล็ต[17-19] ดังแสดงในรูปกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


[1] D. Chanda, N.K. Kishore, A.K. Sinha, “Application of Wavelet Multiresolution Analysis for Classification of Faults on Transmission lines.”, IEEE 2003, pp.1464-1469.

[2] A. Ngaopitakkul, C. Pothisan, M. Leelajindakrairerk, “Study of Characteristics for Simultaneous Faults in Distribution Underground Cable using DWT.”, IEEE 2011, pp.1375-1378.

[3] A. Ngaopitakkul, S. Kaitwanidvilai, C. Apisit, “Coefficient Comparison Technique for indentifying the Fault Types in Underground Cable.”, IEEE 2010, pp.984-988.

[4] A. Ngaopitakkul, S. Kaitwanidvilai., “A New Directional Relay Algorithm for the Protection of Transmission Network Systems Using Discrete Wavelet Transforms.”, IEEE 2010., pp.980-983

[5] A. Ngaopitakkul, W. Pongchaisrikul, A. Kunakorn, “Analysis of Characteristics of Simultaneous Faults in Electrical Power Systems using Wavelet Transform.”, IEEE 2008. pp.249-252.

[6] F.B. Costa, A.H.P. Sobrinho, M. Ansaldi, M.A.D. Almeida, “The Effects of the Mother Wavelet for Transmission Line Fault Detection and Classification.”, IEEE 1996. pp.1050-1058.

[7] Parmod Kumar, Majid Jamil, Mini S. Thomas, Moinuddin, “Fuzzy Approach to Fault Classification for Transmission Line Protection.”, IEEE 1999, pp.1046-1050.

[8] H. Khorashadi-Zadeh, “Artificial Neural Network Approach to Fault Classification For Double Circuit Transmission Lines” IEEE 2004, pp.859-862.

[9] R.N. Mahanty, P.B. Dutta Gupta, “Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines.”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.151, No.2, March 2004, pp.201-212.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Salma. A. Shaaban., Takashi Hiyama, “Discrete Wavelet and Neural Network for Transmission Line Fault Classification.”, 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development (ICCTD2010)., pp.446-450.

[11] M. Tarafdar Hagh, K. Razi, H. Taghizadeh, “Fault Classification and Location of Power Transmission Lines Using Artificial Neural Network.”, The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007)., pp.1109-1114.

[12] T. Patcharoen, A. Ngaopitakkul, A. Kunakorn, “Identification of fault types for a three-bus transmission network using Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks.”, The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007)., pp.1137-1142.

[13] C. Pothisarn, A. Ngaopitakkul, “Discrete Wavelet Transform and Back-propagation Neural Networks Algorithm for Fault Classification on Transmission Line.”, IEEE T&D 2009, pp.1250-1257.

[14] V. Malathi, N.S. Marimuthu, “Multi-class Support Vector Machine Approach for Fault classification in Power Transmission Line.”, IEEE 2008, pp.67-71.

[15] Manohar singh, Dr. B.K Panigrahi, Dr. R.P. Maheshwari, “Transmission Line Fault Detection and Classification.”, PROCEEDING OF ICETECT 2011, pp.15-21.

[16] Omar A.S.Youssef, “An Optimized Fault Classification Technique Based on Support-Vector Machines.”, IEEE 2009, pp.1-8.

[17] A. Ngaopitakkul, A. Kunakorn, S. Bunjongjit, “Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks Algorithm for Identification of Fault Locations on Transmission Systems.”, 2004 International Conference on Power System Technology-POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004, pp.270-274.

[18] A. Ngaopitakkul, S. Kaitwanidvilai, “A New Directional Relay Algorithm for the Protection fo Transmission Network Systems Using Discrete Wavelet Transforms.”, IEEE 2010, pp.980-983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[19] T. Patcharoen, A. Ngaopitakkul, A. Kunakorn, “Identification of fault types for a three-bus transmission network using Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks.”, The 8th International Power Engineering Conference (IPEC2007), pp.1137-1142.

[20] Bo Z.Q., Weller G., Jiang F. and Yang Q.X., “Application of GPS based fault location scheme for distribution system.”, Proc. IEEE International Conference on Power System Technology, vol. 1, 1998, pp. 53-57.

[21] Laszlo Prikler and Hans Kr. Holdalen, **ATPdraw for Windows 3.1/95/NT version 1.0 User’s Manual.**, Release 1.0.1, Nov 1998.

[22] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์, **คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์**, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ Info press, เมษายน 2543.

[23] ระบบสายส่ง 500 kV ปี 2000, ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

[24] Hermann W. Dommel, Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book., University of British Columbia, Vancouver Canada, August 1986.

[25] สรพล ดำรงกิตติกุล, ดร.ประดิษฐ์พงษ์ สุขสิริถาวรกุล, เอกสารการอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง “Application of Electromagnetic Transients Program for Electrical Transients in Power System.”, 18-22 พฤษภาคม 2541.

[26] C. Dufour and H. Le-Huy, “Highly Accurate Modeling of Frequency-Dependent Banlanced Transmission Lines.”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 2, April 2000, pp. 610-615.

[27] ข้อมูลอิมพิแดนซ์สายส่งระบบ 500 kV ปี 2000, ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

[28] Tavares M.C., Pissalato J. and Portela C.M., “Mode domain multiphase transmission line model use in transient studies.”, IEEE Trans on Power Delivery, vol. 14, Issue:4, Oct. 1999, pp. 1533-1544.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[29] **MATLAB User's Guide version 5.**, MathWorks, Inc. September 1998.

[30] ข้อมูลสายส่งระบบ 230 kV, ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

[31] Omar A.S. Youssef, "Fault Classification Based On Wavelet Transforms", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 531-538, 2001.

[32] C.H. Kim, H. Kim, Y.H. Ko, S.H. Byun, R.K. Aggrawal and A.T. Johns, "A Novel Fault Detection Technique of High Impedance Arcing Faults in Transmission Lines Using the Wavelet Transform", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp.921-929, 2002.

[33] P. Markming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando, "Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transform analysis", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Asia Pacific, 2002, Vol. 3, pp. 2246-2250, 2002.

[34] M. Jayabharata Reddy and D.K. Mohanta, "A wavelet-fuzzy combined approach for classification and location of transmission line faults", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, pp. 669-678, 2007.

[35] S. El Safty, A. El-Zonkoly, "Applying wavelet entropy principle in fault classification", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 31, pp. 604-607, 2009.

[36] R. N. Mahanty and P.B. Dutta Gupta, "Comparison of fault classification Methods Based on Wavelet Analysis and ANN", Electric Power Components and Systems, Vol. 34, No. 1, 47-60, 2006.

[37] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, 2058-2063, 2006.

[38] P. Chiradeja and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet transform and Artificial Neural Networks",

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In Proceedings of 2009 International Conference on Electrical Engineering (ICEE2009), Hong Kong, pp. 1-6, 2009.

[39] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, “Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, no. 4, pp. 2058-2063, 2006.

[40] J. Upendar, C.P Gupta, G.K. Singh, G. Ramakrishna, “PSO and ANN-based fault classification for protective relaying”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol .4, No. 10, 1197 – 1212, 2010.

[41] N. Perera, A.D. Rajapakse, “Recognition of Fault Transients Using a Probabilistic Neural-Network Classifier”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, pp. 410 – 419, 2011.

[42] “Switching and Transmission Line Diagram”, Electricity Generation Authorisation Thailand (EGAT). [13] N. S. D. Brito, B. A. Souza and F. A. C Pires, “Daubechies wavelets in Quality of Electrical Power,” Proc. IEEE/PES ICHQP, pp511-515, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

## ก. การเรียนรู้บนปริภูมิมิติสูง

ความซับซ้อนของฟังก์ชันเป้าหมายสามารถเรียนรู้ได้โดยขึ้นกับรูปแบบของข้อมูลที่นำเสนอ และความยากของการเรียนรู้นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบของการนำเสนอข้อมูล ในทางอุดมคตินั้นควรเลือกใช้รูปแบบการนำเสนอข้อมูลนั้นจะเหมาะกับปัญหาที่ต้องการเรียนรู้ ดังนั้นกลยุทธ์ของกระบวนการเรียนรู้ในเครื่องมือการเรียนรู้นั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับรูปแบบที่ข้อมูลได้ถูกนำเสนอ

$$\mathbf{x} = (x_1,...,x_n) \mapsto \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\phi_1(\mathbf{x}),...,\phi_n(\mathbf{x}))$$

ขั้นตอนนี้เสมือนกับการแมพปิ้ง (Mapping) ปริภูมิอินพุท (Input space) $X$ ไปยังปริภูมใหม่ $F = \{\boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in X\}$

ตัวอย่าง พิจารณาฟังก์ชันเป้าหมาย

$$f(m_1, m_2, r) = C\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ซึ่งเป็นกฎของนิวตันที่ว่าด้วยแรงดึงดูดระหว่างมวล $m_1, m_2$ และระยะห่าง $r$ กฎนี้นั้นประกอบด้วยปริมาณของมวลและระยะทางซึ่ง จากความสัมพันธ์ของกฎของนิวตันนี้จะรู้ว่า เครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นไม่สามารถใช้กับฟังก์ชันเป้าหมายดังกล่าวได้ แต่ว่าหากทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุทเล็กน้อยดังนี้

$$(m_1, m_2, r) \mapsto (x, y, z) = (\ln m_1, \ln m_2, \ln r)$$

โดยนำเสนอข้อมูลในรูปแบบดังนี้

$$g(x, y, z) = \ln f(m_1, m_2, r) = \ln C + \ln m_1 + \ln m_2 - 2\ln r = c + x + y - 2z$$

ซึ่งสามารถเรียนรู้ได้โดยใช้เครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้น

การแมพปิ้งข้อมูลจากปริภูมิหนึ่งไปยังอีกปริภูมิหนึ่งนั้นเป็นที่รู้จักกันมานานในเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้น ซึ่งทำให้มีเทคนิคมากมายในการหารูปแบบการแสดงข้อมูลที่ดีที่สุด โดยที่ปริมาณที่ใช้ในการแทนข้อมูลบนปริภูมิใหม่โดยจะเรียกว่า features ในขณะที่ปริมาณที่ใช้ในการแทนข้อมูลบนปริภูมิเดิมจะถูกเรียกว่า attributes ซึ่งการหารูปแบบการแสดงข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะถูกเรียกว่า feature selection โดยที่ปริภูมิ $X$ เรียกว่า ปริภูมิอินพุท (Input space) ในขณะที่ปริภูมิใหม่ $F = \{\boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in X\}$จะเรียกว่าปริภูมิมิติสูง (Feature space) รูป 3.1 แสดงตัวอย่างของการแมพปิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปริภูมิอินพุทสองมิติไปยังปริภูมิมิติสูงสองมิติ ซึ่งข้อมูลนั้นไม่สามารถถูกแบ่งด้วยฟังก์ชันเส้นตรงบนปริภูมิอินพุทแต่สามารถแบ่งด้วยฟังก์ชันเส้นตรงบนปริภูมิมิติสูง โดยจุดประสงค์ของหัวข้อนี้คือเพื่อที่จะแสดงว่าจะสามารถทำการแมพปิ้งให้ไปอยู่ในปริภูมิที่สูงขึ้นได้อย่างไรซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลด้วยฟังก์ชันเส้นตรงได้ง่ายกว่ามาก

มีวิธีการมากมายในการทำ Feature selection โดยที่บ่อยครั้งจะหาเซ็ตของ features ที่เล็กที่สุดแต่ยังคงเก็บข้อมูลสำคัญไว้อย่างครบถ้วนซึ่งวิธีการนี้เรียกว่าการลดมิติ (Dimensionality reduction)

$$\mathbf{x} = (x_1, ..., x_n) \mapsto \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\phi_1(\mathbf{x}), ..., \phi_d(\mathbf{x})), \qquad d < n$$

ซึ่งมีประโยชน์ด้านประสิทธิภาพในการคำนวณ

ตัวอย่าง พิจารณากฎของนิวตันที่ว่าด้วยแรงดึงดูดระหว่างมวล แต่ว่าครั้งนี้กำหนดให้ตำแหน่งของมวลนั้นถูกแสดงโดยองค์ประกอบสามตัวที่บ่งบอกตำแน่งพร้อมกับปริมาณของมวล ดังนี้

$$\mathbf{x} = (p_1^x, p_1^y, p_1^z, p_2^x, p_2^y, p_2^z, m_1, m_2)$$

วิธีการหนึ่งในการทำการลดมิติ สามารถทำได้โดยการแมพปิ้ง $\phi : R^8 \mapsto R^3$

$$\mathbf{x} = (p_1^x, p_1^y, p_1^z, p_2^x, p_2^y, p_2^z, m_1, m_2) \mapsto \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = (\sqrt{\sum_{i \in \{x,y,z\}} (p_1^i - p_2^i)^2}, m_1, m_2)$$

ซึ่งยังคงสามารถรักษาข้อมูลที่สำคัญทั้งหมดไว้ได้

เพื่อที่จะเรียนรู้ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) โดยเครื่องมือเรียนรู้แบบเชิงเส้นจำเป็นต้องเลือกหากลุ่มของลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้น และเขียนข้อมูลอินพุทในรูปแบบใหม่ลักษณะที่กล่าวมานี้เหมือนกับการทำแมพปิ้งข้อมูลอินพุทด้วยฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้ไปอยู่ในปริภูมิมิติสูง (Feature space) ที่ทำให้เครื่องมือการเรียนรู้เชิงเส้นสามารถแบ่งคลาสให้กับข้อมูลนั้นได้ ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันการแบ่งคลาสดังนี้

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N} w_i \phi_i(\mathbf{x}) + b$$

โดยที่ $\phi : X \to F$ คือฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้แมพปิ้งข้อมูลอินพุทจากปริภูมิอินพุทไปยังปริภูมิที่สูงขึ้น กระบวนการนี้เหมือนกับการสร้างเครื่องมือการเรียนรู้แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยขั้นแรกจะทำการแมพปิ้งข้อมูลอินพุทจากปริภูมิที่ไม่สามารถแบ่งคลาสได้ด้วยเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นไปยังปริภูมิซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแบ่งข้อมูลอินพุทให้อยู่ในคลาสแต่ละคลาสอย่างถูกต้องได้โดยใช้เครื่องมือการเรียนรู้เชิงเส้น โดยการใช้ฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการแมพปิ้ง

ตามที่กล่าวมาก่อนหน้านั้นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นคือสามารถเขียนออกมาให้อยู่ในรูปแบบของ Dual representation ซึ่งหมายความว่าฟังก์ชันการแบ่งคลาสสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของการคูณกันระหว่างเวกเตอร์ของตัวข้อมูลฝึกหัดกับตัวข้อมูลที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i \langle \phi(\mathbf{x}_i) \bullet \phi(\mathbf{x}) \rangle + b$$

ถ้าสามารถหาวิธีคำนวณผลคูณเชิงสเกลาร์ของ $\langle \phi(\mathbf{x}_i) \bullet \phi(\mathbf{x}) \rangle$ บนปริภูมิมิติสูงได้โดยตรงเหมือนกับตัว $\langle \mathbf{x}_i \bullet \mathbf{x} \rangle$ ซึ่งเป็นตัวอินพุทดั้งเดิม จะสามารถรวมวิธีการทั้งสองขั้นตอนซึ่งใช้ในการสร้างเครื่องมือการเรียนรู้แบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ (Non-linear learning machine) และเรียกวิธีการคำนวณแบบนี้ว่าเคอร์เนลฟังก์ชัน (Kernel function)

<u>นิยาม</u> เคอร์เนล คือฟังก์ชัน $K$ สำหรับทุก $\mathbf{x}, \mathbf{z} \in X$

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \langle \phi(\mathbf{x}) \bullet \phi(\mathbf{z}) \rangle$$

โดยที่ $\phi$ คือ ฟังก์ชันในการแมพปิ้งจากโดเมน $X$ ไปยังปริภูมิมิติสูง $F$

การเขียนฟังก์ชันการเรียนรู้ในรูปแบบของ Dual representation นั้นให้ผลลัพธ์ที่สำคัญคือ มิติของปริภูมิมิติสูงจะไม่มีผลต่อการคำนวณ

จำนวนขั้นตอนการดำเนินการประมวลผลของการคูณเชิงสเกลาร์ในการหาเคอร์เนลฟังก์ชันนั้นไม่ได้แปรผันไปกับจำนวนของ Feature แม้ว่า Feature นั้นๆจะไม่ได้แสดงออกมาในรูปของ Feature vector อย่างชัดเจน

การใช้เคอร์เนลทำให้สามารถแมพปิ้งข้อมูลไปยังปริภูมิมิติสูง และเพื่อที่จะใช้เครื่องมือการเรียนรู้แบบเชิงเส้นได้บนปริภูมินั้น ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันเกณฑ์การแบ่งคลาสดังนี้

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เคอร์เนลฟังก์ชันเป็นเส้นทางลัดในการคำนวณที่น่าสนใจ หากจะใช้วิธีการนี้จำเป็นต้องสร้างปริภูมิมิติสูงซึ่งค่อนข้างซับซ้อนเสียก่อน แล้วคำนวณผลลัพธ์ของการคูณเชิงสเกลาร์และสุดท้ายก็หาวิธีการคำนวณโดยตรงโดยใช้ค่าในรูปแบบของอินพุทเดิม

<u>ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีน</u>

สำหรับการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสนั้นสามารถแบ่งโดยเส้นตรงได้หลายแบบ ซึ่งเส้นตรงที่สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสได้ชัดเจนย่อมดีกว่าเส้นตรงที่แบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสโดยที่มีข้อมูลบางตัวใกล้เส้นตรงที่ทำการแบ่งข้อมูลมากเกินไป ซึ่งซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะหาเกณฑ์การแบ่งคลาสหรือเส้นตรงที่ใช้แบ่งคลาสที่สามารถแบ่งคลาสโดยให้ข้อมูลที่แบ่งนั้นอยู่ห่างจากเส้นแบ่งมากที่สุดซึ่งเป็นเส้นตรงที่ใช้ในการแบ่งคลาสที่ดีที่สุดซึ่งระยะห่างระหว่างเส้นตรงกับจุดข้อมูลที่ใกล้ที่สุดเรียกว่ามาร์จิ้น (Margin) และจุดข้อมูลที่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากที่สุดเรียกว่าซัพพอร์ตเวคเตอร์ (Support vectors, บนปริภูมิเวคเตอร์จุดข้อมูลสามารถมองเป็นเวคเตอร์ระหว่างจุดกำเนิดกับจุดข้อมูลนั้น)

สำหรับการแบ่งคลาสด้วยมาร์จิ้น (Margin) มากๆนั้น โดยการบังคับให้มาร์จิ้นมีค่ามากจะทำให้จำนวนฟังก์ชันที่สามารถเป็นไปได้นั้นลดลง จากรูปจะเห็นว่าจำนวนมุมของการวางตัวของแถบการแบ่งคลาสนั้นมีน้อยกว่าเส้นการแบ่งคลาส

การทำให้มาร์จิ้นมีค่ามากที่สุดนั้นเป็นแนวโน้มที่ดีเพราะจุดข้อมูลที่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากเกินไปนั้นแสดงถึงการแบ่งคลาสที่ไม่มีความเสถียร ซึ่งมีโอกาสที่จะแบ่งคลาสผิดเกิดขึ้นประมาณ 50% การแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงที่ให้มาร์จิ้นมากจะทำให้เกิดความเสถียรในการแบ่งคลาส

การแบ่งคลาสโดยใช้ซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนนั้นจะทำให้ได้ค่ามาร์จิ้นมากที่สุดจากเส้นแบ่งคลาส เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นแบ่งคลาสหากทำการใส่แถบการแบ่งคลาสไปแทนที่เส้นแบ่งคลาสจะเห็นได้ว่ามีโอกาสที่สามารถใส่แถบแบ่งคลาสแทนเส้นแบ่งคลาสได้ไม่มากนักซึ่งส่งผลให้การใช้หน่วยความจำลดลงด้วยและยังเพิ่มความถูกต้องในการแบ่งคลาสอีกด้วย

ดังนั้นซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนคือเครื่องมือการเรียนรู้ที่ใช้ในการหาเกณฑ์การแบ่งคลาสโดยที่จะหาเกณฑ์การแบ่งคลาสที่ดีที่สุด คำถามก็คือจะสามารถหาเกณฑ์การแบ่งคลาสที่ดีที่สุดได้อย่างไร

สิ่งที่บ่งบอกว่าเกณฑ์การแบ่งคลาสที่ได้นั้นดีหรือไม่เพียงใดนั้นจะวัดกันที่ค่ามาร์จิ้น ซึ่งค่ามาร์จิ้นที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นมี 2 แบบคือ มาร์จิ้นเชิงฟังก์ชัน (Functional margin) และ มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิต (Geometric margin) ซึ่งค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการสเกล (Scaling) และค่ามาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันกับมาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตจะมีค่าเท่ากันเมื่อ $\|\mathbf{w}\|=1$ แต่เนื่องจากสามารถทำการสเกลค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันได้เพื่อความง่ายในการแก้ปัญหาซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนจึงทำการสเกล โดยทำให้มาร์จิ้นเชิงฟังก์ชันของข้อมูลทุกตัวมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 1 จะได้

$$\gamma_i = y_i(<\mathbf{w} \bullet x_i> + b) \geq 1$$

และจากข้อมูลแต่ละตัวนั้นมีระยะห่างจากเส้นแบ่งคลาสเท่ากับ $\gamma_i = \frac{y_i(<\mathbf{w} \bullet x_i> + b)}{\|\mathbf{w}\|}$ ทำให้ค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตคือ $\rho = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ จะเห็นได้ว่าหากต้องการให้ค่ามาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตมีค่ามากดังนั้นต้องหาค่า $\mathbf{w}$ กับ $b$ ที่ทำให้

1. $\rho = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ มีค่ามากที่สุด
2. สำหรับทุก $(\mathbf{x}_i, y_i) \in S, y_i(\mathbf{w} \bullet \mathbf{x} + b) \geq 1$

ซึ่งการทำให้มาร์จิ้นเชิงเรขาคณิตมีค่ามากที่สุดนั้นก็คือการทำให้ $\frac{\|\mathbf{w}\|}{2}$ มีค่าน้อยที่สุด และนี่ก็คือสมการมาตรฐานของซัพพอร์ตเวคเตอร์แมชชีนโดยการหาผลเฉลยของสมการเงื่อนไขดังนี้

หาค่า $\mathbf{w}$ และ $b$ ที่ทำให้

1. $\frac{1}{2}\|\mathbf{w}\|^2$ มีค่าน้อยที่สุด
2. สำหรับทุก $(\mathbf{x}_i, y_i) \in S, y_i(\mathbf{w} \bullet \mathbf{x} + b) \geq 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

**ชื่อ-นามสกุล** นายกษิภัท คุณาดำรงรัฐ

**วัน เดือน ปี เกิด** 18 กันยายน 2528

**สถานที่เกิด** กรุงเทพมหานคร

**ประวัติการศึกษา** วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2550

**ประวัติการทำงาน** ปี พ.ศ. 2551-2553

Test Engineer UTAC Thai Limited.

ปี พ.ศ. 2554

Test Engineer Bombardier Transportation Signal

**ผลงานทางวิชาการ** “Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Classification of Fault Types on Transmission Line”, IAENG International Conference on Electrical Engineering (ICEE’12), Hong Kong, 14-16 March, 2012.

“Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Fault Locations on Single Circuit Transmission Line”, IAENG International Conference on Electrical Engineering (ICEE’12), Hong Kong, 14-16 March, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

# IMECS 2012

## International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012

Volume II

S. I. Ao
Oscar Castillo
Craig Douglas
David Dagan Feng
Jeong-A Lee (Eds.)

Hong Kong
14-16 March, 2012

IA ENG
International Association of Engineers

ISBN: 978-988-19251-9-0
ISSN: 2078-0958

# Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Classification of Fault Types on Transmission Line

K. Kunadumrongrath and A. Ngaopitakkul, *Member, IAENG*

***Abstract*— This paper proposes a new technique using discrete wavelet transform (DWT) and support vector machines (SVM) to classify the fault types on transmission systems. The DWT is used to detect the high frequency components from fault signals. Positive sequence current signals are used in fault detection decision algorithm. The variations of first scale high frequency component that detects fault are used as an input for the SVM. Various cases studies based on Thailand electricity transmission systems have been investigated so that the algorithm can be implemented. SVM is also compared with the comparison of the coefficients DWT technique as well as back-propagation neural network algorithm. The proposed method gives satisfactory accuracy, and will be very useful in the development of a modern protection scheme for electrical power transmission systems.**

***Index Terms*—Wavelet Transform, Fault Classification, Transmission Line, Support Vector Machines**

## I. Introduction

Protecting transmission line is an important task to safeguard electric power system. The precision protection scheme is necessary to be detected, classified and located accurately, and cleared as soon as possible. The development in power system protection technology has been progressed, especially in recent years. In several research papers, the fault classification can be obtained by employing trial and error method [1-5]. In previous research works [3], by considering the pattern of the spectra, the comparison of the coefficients from first scale that can detect fault is considered. The division algorithm between the maximum coefficients of DWT at ¼ cycle of phase A, B, C is performed. For identifying the phase with fault appearance, the comparisons of the maximum ratio obtained from division algorithm have been performed so that the types of fault can be analysed. Although the wavelet transform is very effective in detecting transient signals generated by the faults, but the wavelet transform may not be adequate to complete characterization.

In addition, artificial intelligence (AI) has been reported in the literature for fault classification [6-11]. In several research papers, the back-propagation neural network (BPNN) [8] is employed as well as Probabilistic neural network in order to identify types of fault on the transmission line. Even if artificial neural network algorithm can give precise results for fault types, it is partly limited by the slow training performance. This drawback of artificial neural networks should be improved, otherwise the other types of artificial intelligence should be developed instead. It is interesting to investigate an appropriate support vector machines if the fault types on the transmission line can be identified using wavelet transform and support vector machines for being included in newly-developed protection systems.

Therefore, this paper presents a development of a new decision algorithm used in the protective relays in order to classify types of fault along the transmission systems. The fault conditions are simulated using ATP/EMTP. The current waveforms obtained from the simulation, then, are extracted using the DWT. The validity of the proposed algorithm is tested with various fault inception angles, fault locations and faulty phases. In addition, the construction of the decision algorithm is detailed and implemented with various case studies based on Thailand electricity transmission systems. Moreover, the results from the proposed algorithm are compared with those from the trial-error [3] and the BPNN [8] in order to show the advantage of the proposed method.

## II. Power System Simulation using EMTP

The ATP/EMTP is used to simulate fault signals at a sampling rate of 200 kHz. The fault types are chosen based on the Thailand's transmission system as shown in Figure 1. Fault patterns in the simulations are performed with various changes in system parameters as follows:

- Fault types considered in this study are : single line to ground (SLG : AG, BG, CG), double-line to ground (DLG : ABG, BCG, CAG), line to line (L-L : AB, BC, CA) and three-phase fault (3-P : ABC).
- Fault locations are varied from 10% to 90%, with the increase of 10% of the transmission line length measured from the bus MM3.
- Inception angle on a voltage waveform is varied between 0°-330°, with the increasing step of 30°. Phase A is used as a reference.
- Fault resistance is equal to 10 Ω.

Manuscript received January 8, 2012.

K. Kunadumrongrath and A. Ngaopitakkul are with Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: knatthap@kmitl.ac.th).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-19251-9-0
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

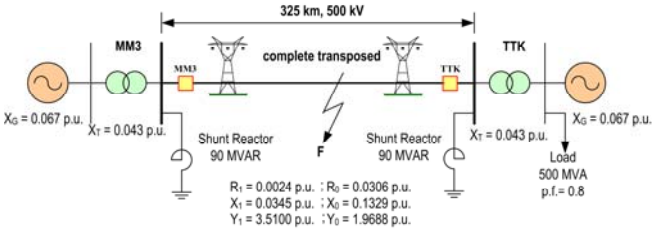



Fig. 1 The system used in simulation studies [12].

The example of simulated fault signals by ATP/EMTP is illustrated in Figure 2. This is a fault occurring in phase A to ground at 30% of transmission line length measured from the bus MM3 as depicted in Figure 1. The fault signals generated using ATP/EMTP are interfaced to MATLAB for the fault detection algorithm.

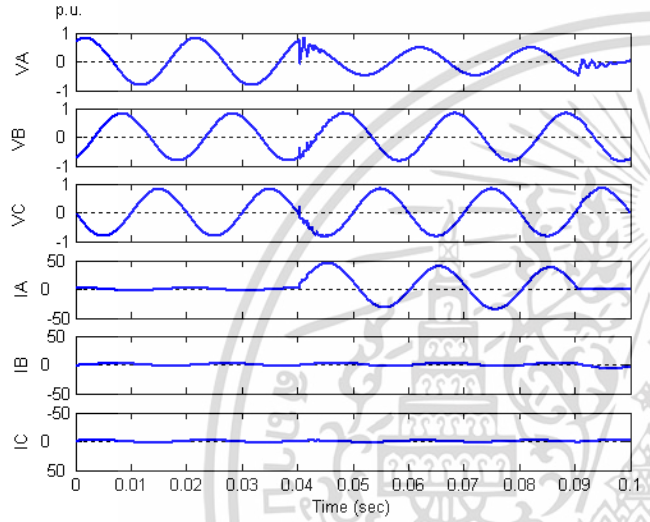



Fig. 2 Example of simulated fault signals by ATP/EMTP for AG fault at sending end.

The Clark's transformation matrix is employed for calculating the positive sequence and zero sequence of currents. With several trial and error processes, the fault detection decision algorithm on the basis of computer programming technique is constructed as shown in Fig. 3.

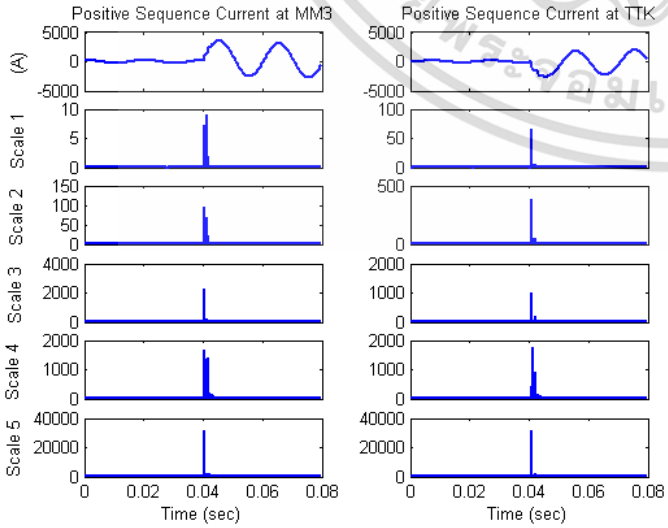



Fig. 3. Wavelet transform from scale 1 to 5 for the positive sequence of current signal shown in Fig. 2.

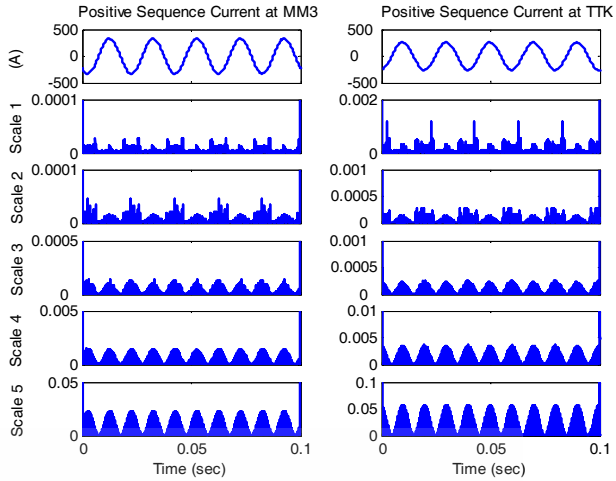



Fig. 4. Wavelet transform from scale 1 to 5 for the positive sequence of current signal in normal condition.

The mother wavelet daubechies4 (db4) [3, 8, 13] is employed to decompose high frequency components from the positive sequence current signals. Fault detection decision algorithm [3, 8] is proceeded using positive sequence current signal. Coefficients obtained using DWT of signals are squared so that the abrupt change in the spectra can be clearly found, and it is clearly seen that the coefficients of high frequency components, when fault occurs, have a sudden change compared with those before an occurrence of the faults as shown in Fig. 3. The fault detection decision algorithm has been proposed that if coefficients of any scales are change around five times before an occurrence of the faults, there are faults occurring on transmission lines.

From Fig. 4., the coefficient in each scale of the wavelet transform does not clearly change then it presumes that these signals are in normal operating condition. By performing many simulations, it has been found that the coefficient in scale 1 from DWT seems enough to indicate the fault inception on the single circuit transmission line. As a result, it is unnecessary to use other coefficients from higher scales in this algorithm, and the coefficients in scale 1 from DWT are used in training processes for the neural networks later.

## III. Decision Algorithm and Result

From the simulated signals, DWT is applied to the quarter cycle of voltage and current waveforms after the fault inception. The coefficients of scale 1 obtained using the DWT are used for SVM. The basic idea of SVM is to map the training data from the input space into a higher dimensional feature space via kernel function. In this feature space optimal hyper plane is determined to maximize the generalization ability of the classifier.

Before the training process, input data are normalized and divided into 720 sets for training and 360 sets for test. A structure of the support vector machines consists of 4 inputs, 5 SVM models and 1 output. The input patterns are maximum coefficients of DWT at ¼ cycle of phase A, B, C and zero sequence for post-fault current waveforms as illustrated in Figure 5. The output variables of the support vector machines are designated as value range from 1 to 15, which corresponds to various types of fault as shown in Table 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-19251-9-0
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

Table 1 Output of SVM for classifying the fault types

| Models of SVM | Output of SVM | Classification of fault type | Types of fault |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | Phase A to ground fault | AG |
| | 2 | Phase B to ground fault | BG |
| | 3 | Other fault | NA |
| 2 | 4 | Phase C to ground fault | CG |
| | 5 | Phase A,B to ground fault | ABG |
| | 6 | Other fault | NA |
| 3 | 7 | Phase B,C to ground fault | CAG |
| | 8 | Phase C,A to ground fault | BCG |
| | 9 | Other fault | NA |
| 4 | 10 | Three phase fault | ABC |
| | 11 | Phase A to phase B fault | AB |
| | 12 | Other fault | NA |
| 5 | 13 | Phase C to phase A fault | CA |
| | 14 | Phase B to phase C fault | BC |
| | 15 | Other fault | NA |

During training process, five SVM models are investigated and each model contains two fault types as shown in Table 1. For each SVM model, the adjusted parameters with minimum error are selected as the most appropriate parameters so that the obtained output is only determined as fault or other fault.

After the training process, case studies are varied so that the decision algorithm capability can be verified. The total numbers of the case studies are 360. Various case studies are performed with various types of faults at each location on the transmission line including the variation of fault inception angles and locations at each transmission lines as shown in Table 2 and Figure 6. In addition, the results obtained from the comparison of average accuracy among decision algorithm using the proposed technique, BPNN algorithm and decision algorithm using the comparison of the coefficients DWT which developed by Markming et al [3] are shown in Table 2. It is shown that the average accuracy of fault classification from the decision algorithm proposed in this paper is highly satisfactory. This is an improvement of the fault classification which is detected using the trial and error method developed by Markming et al [3] as well as BPNN [8].

## IV. Conclusion

This paper proposed a new algorithm for fault classification on transmission lines, using DWT and SVM. Daubechies4 (db4) is employed as mother wavelet in order to decompose high frequency components from fault signals. Positive sequence current signal is used in fault detection. The coefficients detail of DWT at the first peak time that positive sequence current can detect fault, were performed as an input pattern of SVM in a decision algorithm. The results show clearly that the accuracy of the combination of discrete wavelet transform and support vector machines algorithm is highly accepted as shown in Table 2. The further work will be the improvement of the algorithm by taking into account the effects of other transmission line configurations, instance loop circuits or double circuits for the development of the practical protection system.

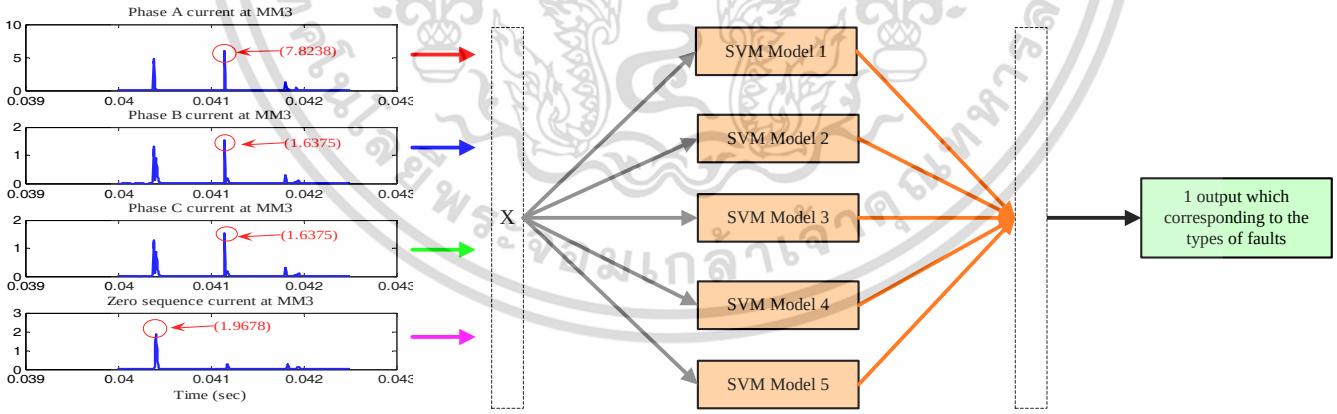


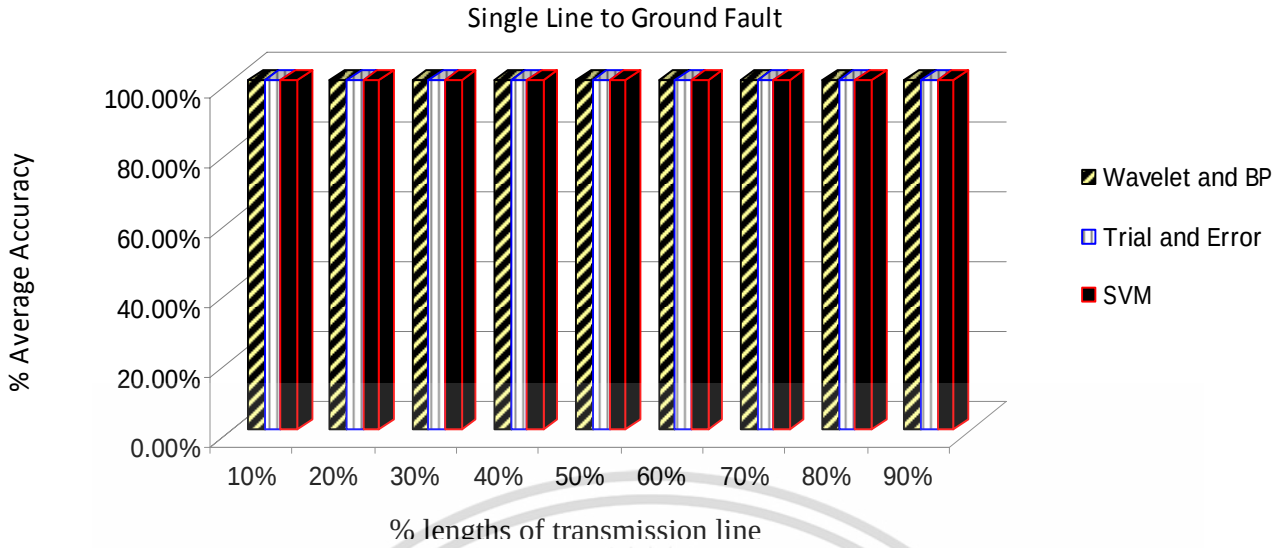

Fig. 5 Structure of SVM for classifying types of fault.

Table 2 summary of overall accuracy obtained from the proposed algorithms

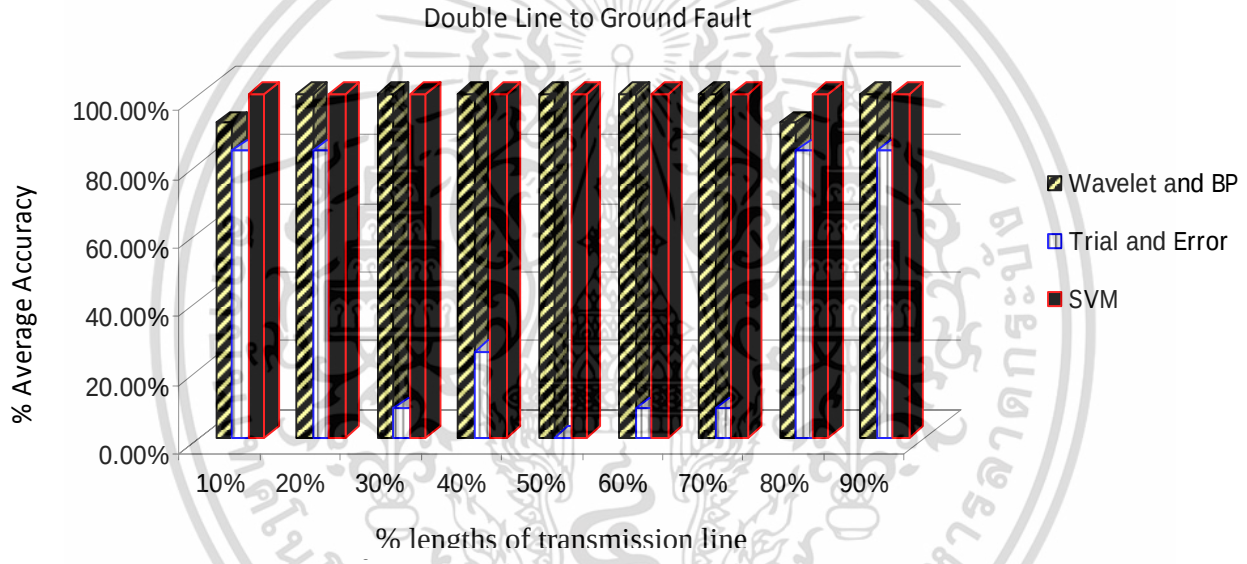
| Classification of the fault types | Number of Case Studies | Fault Classification | | |
|---|---|---|---|---|
| | | DWT and BPNN [8] | DWT and SVM | Trail and error method [3] |
| Single line to ground fault | 108 | 100.00% | 100% | 100.00% |
| Double line to ground fault | 108 | 98.12% | 100% | 42.59% |
| Line to line fault | 108 | 100.00% | 99.07% | 100.00% |
| Three phase fault | 36 | 97.22% | 100% | 97.22% |
| Average | | 98.83% | 99.76% | 83.33% |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

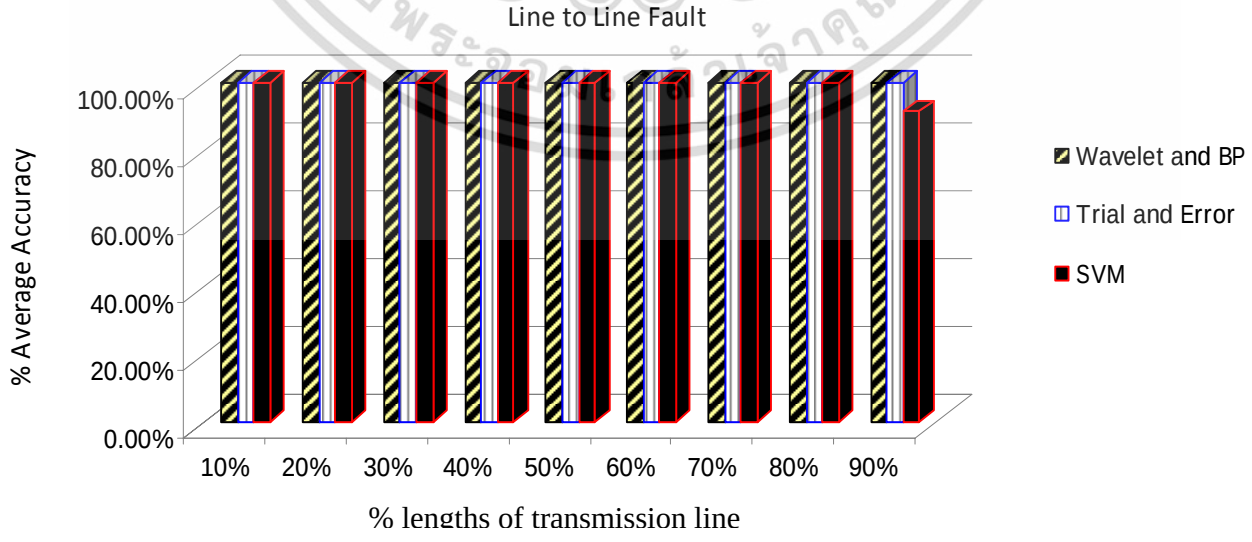
ISBN: 978-988-19251-9-0
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)




(a) In case of single line to ground fault



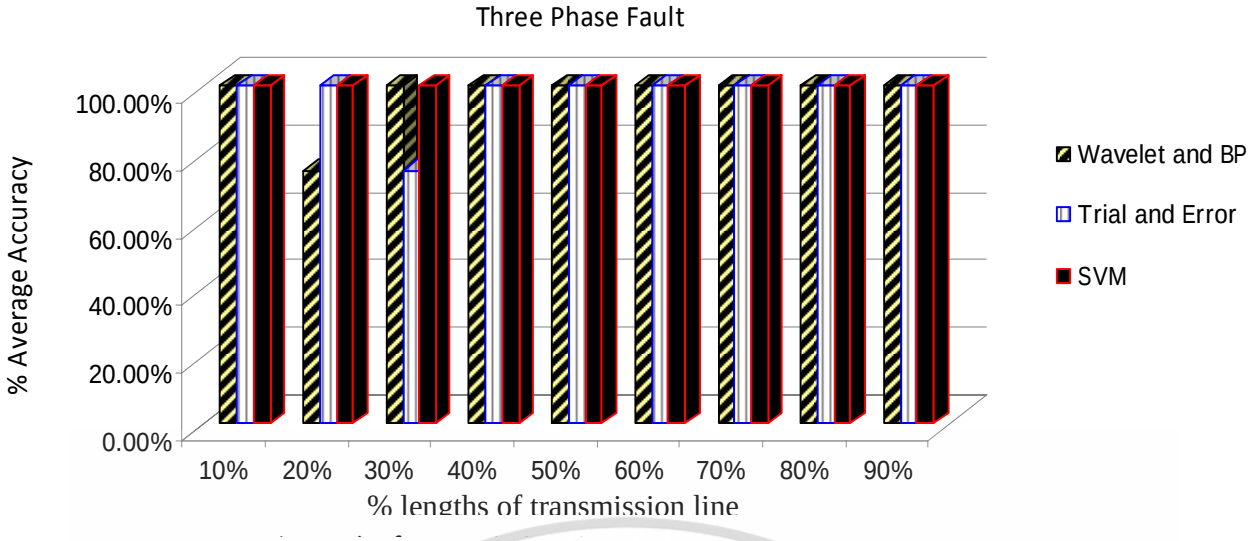

(b) In case of double line to ground fault




(c) In case of line to line fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-19251-9-0
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)




(d) In case of three phase fault

Fig 6. Comparison of average accuracy for fault classification at various lengths of the transmission lines that fault occurs

## References

[1] Omar A.S. Youssef, "Fault Classification Based On Wavelet Transforms", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Vol. 1, pp. 531-538, 2001.

[2] C.H. Kim, H. Kim, Y.H. Ko, S.H. Byun, R.K. Aggrawal and A.T. Johns, "A Novel Fault Detection Technique of High Impedance Arcing Faults in Transmission Lines Using the Wavelet Transform", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp.921-929, 2002.

[3] P. Markming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando, "Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transform analysis", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Asia Pacific, 2002*, Vol. 3, pp. 2246-2250, 2002.

[4] M. Jayabharata Reddy and D.K. Mohanta, "A wavelet-fuzzy combined approach for classification and location of transmission line faults", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 29, pp. 669-678, 2007.

[5] S. El Safty, A. El-Zonkoly, "Applying wavelet entropy principle in fault classification", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 31, pp. 604-607, 2009.

[6] R. N. Mahanty and P.B. Dutta Gupta, "Comparison of fault classification Methods Based on Wavelet Analysis and ANN", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 34, No. 1, 47-60, 2006.

[7] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 21, No. 4, 2058-2063, 2006.

[8] P. Chiradeja and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet transform and Artificial Neural Networks", *In Proceedings of 2009 International Conference on Electrical Engineering (ICEE2009)*, Hong Kong,pp. 1-6, 2009.

[9] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 21, no. 4, pp. 2058-2063, 2006.

[10] J. Upendar, C.P Gupta, G.K. Singh, G. Ramakrishna, "PSO and ANN-based fault classification for protective relaying", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol .4, No. 10, 1197 – 1212, 2010.

[11] N. Perera, A.D. Rajapakse, Recognition of Fault Transients Using a Probabilistic Neural-Network Classifier, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 1, 410 – 419, 2011.

[12] "Switching and Transmission Line Diagram", Electricity Generation Authorisation Thailand (EGAT).

[13] N. S. D. Brito, B. A. Souza and F. A. C Pires, "Daubechies wavelets in Quality of Electrical Power," Proc. IEEE/PES ICHQP, pp511-515, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้