

รายงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปี 2550

โครงการวิจัย
ระบบมอนิเตอร์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย
ในสภาวะพลวัต

RCH
TK
1007
๑764๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 84577
วัน,เดือน,ปี..... 22 ต.ค. 2551

รศ. ดร. อีสระชัย งามหรรุ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการวิจัย: ระบบมอนิเตอร์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยในสภาวะพลวัต

ผู้ดำเนินงานวิจัย: รศ. ดร. อิศระชัย งามหรุ

Abstract

Due to a longitudinal structure of an interconnected power system between central and southern regions of Thailand, there are possibilities of the occurrence of various power system oscillation modes. Such wide-area oscillations, however, have never been observed between both regions. This paper focuses on a wide-area monitoring system of power system oscillations by GPS-synchronized phasor measurement units (PMUs) via 220 V demand side outlets, which are located at two universities representing both regions. The proposed monitoring system not only requires very low capital cost, but also provides high accuracy of the measured data. The wall outlet can be used as the channel to get the power oscillation characteristic from the electric power network. The validity of the measured PMU data is confirmed by the actual power flow data during steady-state conditions. By applying Fast Fourier Transform and wavelet transform, power oscillation characteristics can be analyzed. In addition, system identification using the reduced second order model is carried out by a least-squares regression. As a result, the eigenvalue corresponding to the oscillation mode can be determined. Monitoring of variation of eigenvalue provides vital information of the wide-area stability. Besides, analyzed results of power system oscillations under transient conditions are given.

Keywords: Power system monitoring, Power system oscillations, Global Positioning System, Synchronized phasor measurement unit, Fast Fourier Transform, Discrete wavelet decomposition

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน ความต้องการทางด้านกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสูงในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างภาคกลางและภาคใต้ที่มีลักษณะโครงสร้างตามยาว (longitudinal structure) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างแบบนี้อาจก่อให้เกิดการสั่นของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเชื่อมโยงระหว่างระบบภาคกลางและภาคใต้ (Inter-area Oscillation) ยิ่งหากรบบไฟฟ้ากำลังถูกรบกวนจากสิ่งผิดปกติต่างๆ เช่น การลัดวงจรของระบบไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดอย่างฉับพลัน และการปลดสายส่งไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบอย่างกะทันหัน เป็นต้น จะส่งผลให้การสั่นของกำลังไฟฟ้ายิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น ผลกระทบของปรากฏการณ์เหล่านี้ส่งผลเสียดเสถียรภาพของระบบโดยตรง โครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับคุณลักษณะพลวัตแบบออนไลน์ของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้โดยใช้เครื่องวัดเฟสเซอร์ แรงดันไฟฟ้า (Phasor Measurement Unit: PMU) ผ่านทางเต้ารับไฟฟ้า 220 โวลต์ ด้วยกระบวนการประมวลผลของข้อมูลเช่น การแปลงฟูรีเยร์ การแปลงเวฟเล็ต เป็นต้น ที่วัดได้จาก PMU จะทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านความเข้าใจที่ถูกต้องในคุณลักษณะเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ เช่น การสั่นของกำลังไฟฟ้า ชนิดของโหมดการสั่น ความถี่ของโหมดการสั่น และคุณสมบัติของโหมดการสั่น เป็นต้น ตลอดจนยังสามารถนำข้อมูลที่วัดได้จาก PMU มาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สร้างองค์ความรู้ใหม่ในด้านของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะพลวัต

คำสำคัญ การเฝ้าดูระบบไฟฟ้ากำลัง การแกว่งไกวของระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบกำหนดตำแหน่งในวงกว้าง เครื่องวัดเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า การแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว การแปลงเวฟเล็ตแบบดิสครีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้
11 พฤศจิกายน 2556

สารบัญ

หน้าสรุปโครงการ	1
บทที่ 1 บทนำ	3
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา	3
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ	5
2.1 จุดประสงค์	5
2.2 ข้อมูลเฉพาะของ PMU	5
2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย	7
2.4 ระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ	7
บทที่ 3 การประมวลสัญญาณข้อมูล PMU	12
3.1 จุดประสงค์	12
3.2 การประเมินข้อมูลที่วัดจาก PMU	12
3.3 สหสัมพันธ์ระหว่างการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยความแตกต่างเฟส	18
3.4 การตรวจจับการแกว่งของกำลังไฟฟ้า	20
3.5 สรุป	27
บทที่ 4 การวิเคราะห์เหตุการณ์ในระบบโดยใช้ข้อมูล PMU	28
4.1 จุดประสงค์	28
4.2 การเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างประเทศไทยและมาเลเซีย	28
4.3 การวิเคราะห์เหตุการณ์โดยข้อมูล	29
4.4 สรุป	34
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	35
เอกสารอ้างอิง	36
ภาคผนวก	39

หน้าสรุปโครงการ

ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ความต้องการทางด้านกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสูงในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างภาคกลางและภาคใต้ที่มีลักษณะโครงสร้างตามยาว ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างแบบนี้อาจก่อให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเชื่อมโยงระหว่างระบบภาคกลางและภาคใต้ (Inter-area Oscillation) ยิ่งหากรบบไฟฟ้ากำลังถูกรบกวนจากสิ่งผิดปกติต่างๆ จะส่งผลให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้ายิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น ผลกระทบของปรากฏการณ์เหล่านี้ส่งผลเสียดต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ทำให้เกิดไฟฟ้าดับทั่วภาคใต้ (Black-out) บ่อยครั้งในช่วงสามถึงสี่ปีที่ผ่านมา และยังมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้อีกมากในอนาคต ซึ่งจะสร้างความสูญเสียต่อประเทศไทยทั้งในด้านเศรษฐกิจและสังคม

สำหรับสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดไฟฟ้าดับทั่วภาคใต้บ่อยครั้งนั้น ยังไม่มีการวิเคราะห์กันอย่างถูกต้องและจริงจัง ทั้งนี้เนื่องมาจากการขาดความเข้าใจอย่างถ่องแท้ในคุณลักษณะพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ นอกจากนี้ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่ใช้ในระบบ ตลอดจนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ที่ไม่เหมาะสมมาทำการจำลองโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุ จึงทำให้ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์นั้นไม่ถูกต้อง ทำให้การวิเคราะห์หาสาเหตุขาดความน่าเชื่อถือ และอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการวางแผนป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังต่อไปในอนาคต ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหานี้และขจัดความผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้น วิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในเชิงพลวัตแนวใหม่จึงมีความจำเป็นต้องเป็นอย่างสูง

โครงการวิจัยนี้นำเสนอโมเดลการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ โดยใช้เครื่องวัดเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า (Phasor Measurement Unit: PMU) ผ่านทางตัวรับไฟฟ้า 220 โวลต์ ด้วยกระบวนการประมวลผลของข้อมูลเช่น การแปลงฟูเรียร์ การแปลงเวฟเล็ต เป็นต้น ที่วัดได้จาก PMU จะทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านความเข้าใจที่ถูกต้องในคุณลักษณะเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ เช่น การแกว่งของกำลังไฟฟ้า ชนิดของโหมดการแกว่ง ความถี่ของโหมดการแกว่ง และคุณสมบัติของโหมดการแกว่ง เป็นต้น ตลอดจนยังสามารถนำข้อมูลที่วัดได้จาก PMU มาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สร้างองค์ความรู้ใหม่ในด้านของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะพลวัต

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อติดตั้งระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้โดยใช้เครื่องวัดเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า (Phasor Measurement Unit, PMU) โดยจะติดตั้ง PMU ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล เป็นตัวแทนระบบภาคกลาง ส่วนที่ภาคใต้นั้นจะทำการหาตำแหน่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งใช้เป็นตัวแทนระบบภาคใต้ได้
- 2) เพื่อนำข้อมูลของความแตกต่างของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสองตำแหน่งที่วัดได้จาก PMU มาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงพลวัตของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยงขนาด 230 kV ระหว่างภาคกลางและภาคใต้และวิเคราะห์เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 3) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จาก PMU ที่ติดตั้งและข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและแสดงให้เห็นว่าข้อมูลทั้งสองนั้นสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 12 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

- 1) จัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด พร้อมทั้งศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในทุกๆ ด้าน
- 2) ทำการติดตั้ง PMU พร้อมระบบคอมพิวเตอร์ ณ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า สจล. จังหวัดกรุงเทพฯ และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในด้านต่างๆ
- 3) ทำการเก็บข้อมูลขนาดและเฟสของแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2 จังหวัดไปตลอดเวลาจนสิ้นสุดโครงการ
- 4) ศึกษากระบวนการประมวลสัญญาณ เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก PMU
- 5) นำข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ในแต่ละเดือนมาวิเคราะห์โดยกระบวนการประมวลสัญญาณ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของระบบเชิงพลวัตในช่วงเวลาและสภาวะต่างๆ ตลอดจนวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 6) ทำรายงานสรุปผลการศึกษา

ผลงานวิจัย

ผลการศึกษารายงานจากโครงการนี้ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ 8th International Power Engineering Conferences (IPEC 2007) ระหว่าง 3-6 ธันวาคม 2007 ณ ประเทศสิงคโปร์ ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

Issarachai Ngamroo, Panlert Lappanakul, Nitus Voraphonpiput, Sanchai Dechanupaprittha, Yasunori Mitani and Jareerat Sakulrat (2007) Dynamic event analysis using synchronized PMUs via 220 V wall outlets. In Proceedings of The 8th International Power Engineering Conference (IPEC2007), Singapore.

ตีพิมพ์บทความได้แนบไว้ในภาคผนวก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย การเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ด้วยสายส่ง 230 kV มีลักษณะโครงสร้างตามยาว (longitudinal structure) ซึ่งทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแบบต่างๆ เช่น การแกว่งระหว่างระบบไฟฟ้ากำลัง (inter-area oscillations) การแกว่งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (local generator oscillations) เป็นต้น นอกจากนี้ การเข้าร่วมของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระในธุรกิจการผลิตกำลังไฟฟ้าส่งจ่ายในระบบยังทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของโหมดการแกว่งเหล่านี้ในสภาวะพลวัตอย่างถูกต้องในสภาวะออนไลน์ ระบบมอนิเตอร์การแกว่งกำลังไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างสูง

เมื่อเร็วๆ นี้ เครื่องวัดเฟสเซอร์ (phasor measurement unit, PMU) ซึ่งอิงโครโมโนโดยระบบกำหนดตำแหน่งในวงกว้าง (global positioning system, GPS) [1,2] ได้ถูกนำมาประยุกต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง [3] การวิเคราะห์เหตุการณ์ระบบ [4] การตรวจจับการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะชั่วขณะ [5] รีเลย์แบบปรับค่าได้ [6] แผนการป้องกันการสูญเสียเสถียรภาพของระบบในสภาวะชั่วขณะ [7] การวัดฮาร์โมนิกส์ [8] การควบคุมการหลุดไปจากระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [9] การควบคุมเสถียรภาพระบบแบบพื้นที่กว้าง [10] การควบคุมและป้องกันเสถียรภาพแรงดัน [11] การควบคุมฉุกเฉินและการป้องกันในพื้นที่กว้าง [12] เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์การมอนิเตอร์การแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังในพื้นที่กว้างนั้น Western Electricity Coordinating Council (WECC) ได้ประสบความสำเร็จในการติดตั้งระบบมอนิเตอร์ระบบแบบพื้นที่กว้าง (Wide-Area Monitoring Systems, WAMS) ในระบบเพาเวอร์กริดของอเมริกาเหนือ ข้อมูลจาก WAMS ในเพาเวอร์กริดภายใต้การดูแลของ WECC ได้แสดงผลงานที่สำคัญอย่างมากในการตรวจสอบและการจำลองระบบ การควบคุมอุปกรณ์ FACTS และการป้องกันระบบแบบพื้นที่กว้างดังแสดงใน [13-19]. ส่วน Eastern Interconnection Phasor Project (EIPP) ได้เริ่มใช้งาน WAMS ในปี 2003 ในระบบไฟฟ้ากำลังฝั่งตะวันออกของอเมริกาอีกด้วย [20-22] นอกจากนี้ ยังมีการใช้งาน WAMS ในระบบไฟฟ้ากำลังทั่วโลก [23-27]

ในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ระบบการวัดเฟสเซอร์ที่อิงโครโมโนด้วย GPS นั้นได้ติดตั้งในระบบส่ง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้า ระบบมอนิเตอร์ซึ่งติดตั้งในระดับระบบจำหน่ายที่ต่ำกว่าแล้ว ยังให้ข้อมูลการวัดที่มีความถูกต้องสูงและราคาที่ถูกกว่า ได้รับการคาดหวังอย่างมาก ในปี 2001 โครงการข่ายการมอนิเตอร์ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังในวงกว้าง (wide area frequency monitoring network FNET) ซึ่งอิงโครโมโนด้วย GPS และใช้ระบบอินเตอร์เน็ตในการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้ถูกติดตั้งในระบบจำหน่าย 110 V ของระบบไฟฟ้ากำลังของอเมริกา [28] จุดประสงค์ของ FNET เพื่อสร้างระบบมอนิเตอร์ที่มีค่าติดตั้งถูกแล้วยังให้ข้อมูลความถี่ ณ จุดติดตั้งในระบบอย่างรวดเร็วและมีความถูกต้อง นอกจากนี้ ความถี่ของระบบยังสามารถวัดได้ที่ระดับเต้ารับไฟฟ้า 110-V FNET ได้ถูกประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังดังแสดงใน [29, 30].

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะนำเสนอระบบมอนิเตอร์การแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังแบบพื้นที่กว้างโดยใช้ PMU ซึ่งอิงโครโมโนด้วย GPS ในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยเพื่อศึกษาคุณลักษณะการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV ที่เชื่อมโยง

ระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทย คุณลักษณะเด่นของระบบที่นำเสนอคือการติดตั้ง PMU ในระดับเต้ารับไฟฟ้าที่พิกัดสาย 220 V โดยเต้ารับไฟฟ้าถูกใช้เป็นช่องทางในการวัดข้อมูลจริงจากระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ ค่าติดตั้งของระบบมอนิเตอร์ที่ถูกรวมแล้วข้อมูลเฟสเซอร์แรงดันที่วัดมายังมีความถูกต้องสูงอีกด้วย ในระบบที่นำเสนอ PMU ถูกติดตั้งที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งใช้แทนระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางและภาคใต้ตามลำดับ การส่งผ่านข้อมูลที่วัดจาก PMU ระหว่างสองมหาวิทยาลัยทำโดยผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ข้อมูลความแตกต่างเฟสระหว่างสองมหาวิทยาลัยสามารถคำนวณจากมุมเฟสแต่ละตำแหน่งที่วัดจาก PMU เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล PMU นั้น ค่าความแตกต่างของเฟสที่วัดจาก PMU ในสภาวะคงตัวถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV ที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยการใช้ข้อมูลเฟสแตกต่างระหว่างสองตำแหน่งติดตั้ง คุณลักษณะทางกายภาพของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีต นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้ระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอไปวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเหตุการณ์ที่พิจารณาคือการส่งผ่านโหลดจากระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยไปยังประเทศมาเลเซียซึ่งส่งผลต่อการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV ผลการศึกษาที่ได้ทำให้เข้าใจคุณลักษณะของการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยอย่างถูกต้องและยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลังจริงอีกด้วย

ในรายงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

บทที่ 2 กล่าวถึงข้อมูลทั่วไปของระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ PMU ซึ่งเชิงโครโมสโคปด้วย GPS ที่นำเสนอ โดยเริ่มจากข้อมูลเฉพาะของ PMU ที่ใช้ซึ่งเป็นรุ่น Network Computing Terminal Type-A, NCT2000 ของบริษัท Toshiba ประเทศญี่ปุ่น ต่อมาอธิบายถึงระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยพร้อมกับปัญหาของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างภาคกลางและภาคใต้ของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย หลังจากนั้น อธิบายถึงแนวคิด ข้อดี เทคนิคการติดตั้ง การส่งผ่านข้อมูล การเก็บข้อมูลของระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอ

บทที่ 3 ทำการประยุกต์ใช้วิธีการประมวลสัญญาณเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของ PMU โดยเริ่มที่การแสดงเฟสแตกต่างระหว่าง สจล และ มหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์ ที่วัดได้จาก PMU ต่อมา แสดงผลการเปรียบเทียบเฟสแตกต่างกับกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเชื่อมโยงที่ได้จาก EGAT ในสภาวะคงตัวจะพร้อมทั้งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสองข้อมูล หลังจากนั้น จะได้กล่าวถึงการตรวจจับสัญญาณการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยเริ่มจากการกำจัด noise ที่ปนมากับข้อมูลที่วัดได้จาก PMU โดยใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีต หลังจากนั้นจึงใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเข้าไปกับสัญญาณ PMU ที่กำจัด noise แล้วเพื่อหาโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แล้วจึงใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีตเพื่อทำการตรวจจับสัญญาณที่ประกอบไปด้วยโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้านั้น

บทที่ 4 ทำการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากระบบที่นำเสนอไปวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเหตุการณ์ที่พิจารณาคือการส่งผ่านโหลดขนาด 80 MW จากระบบไฟฟ้ากำลังในภาคใต้ของประเทศไทยไปยังประเทศมาเลเซียผ่านสายส่งเชื่อมโยง 115 kV ในการส่งผ่านโหลดนั้นจำเป็นต้องทำการเชิงโครโมสโคประหว่างสองระบบเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขึ้นในสายส่งเชื่อมโยง 230 kV ระหว่างภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทย ผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีตและการแปลงฟูเรียร์แบบช่วงเวลาสั้นให้ข้อมูลที่สำคัญซึ่งแสดงพฤติกรรมของระบบในสภาวะไดนามิกสัณฐานในทั้งโดเมนเวลาและความถี่

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ 4 วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

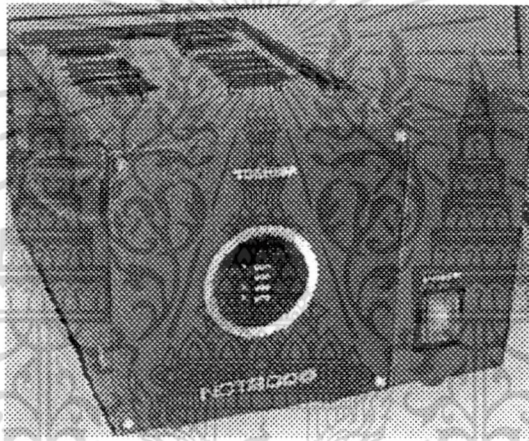
บทที่ 2

ระบบมอโนเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ

2.1 จุดประสงค์

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบมอโนเตอร์การแกว่งในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เครื่องวัดเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่ซิงโครไนซ์ (Synchronized Phasor Measurement Units, PMU) ด้วย GPS โดยเริ่มจากการอธิบายข้อมูลทั่วไปของ PMU ตามด้วยการอธิบายถึงระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ปัญหาของการแกว่งระหว่างระบบไฟฟ้าภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทย ระบบมอโนเตอร์การแกว่ง เทคนิคการติดตั้ง การส่งข้อมูล และการเก็บข้อมูล

2.2 ข้อมูลเฉพาะของ PMU



รูปที่ 1 PMU

ระบบมอโนเตอร์การแกว่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่นำเสนอใช้นั้นใช้ PMU รุ่น NCT2000 (Network Computing Terminal Type-A) ของบริษัทโตชิบา [31] ดังแสดงในรูปที่ 1 ข้อมูลทั่วไปได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดย PMU สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวขนาด 220 V จากตัวรับไฟในที่พักอาศัยได้ ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของ PMU ในรุ่นนี้ โดยการติดตั้ง PMU ไว้ที่ต่างๆ ค่าเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นจะสามารถวัดได้ในเวลาเดียวกันโดยใช้ระบบกำหนดตำแหน่งในวงกว้าง (Global Positioning System, GPS) ค่าเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{V} = \frac{\sqrt{2}}{N} \left\{ \sum_{k=1}^N V_k \sin k\theta + j \sum_{k=1}^N V_k \cos k\theta \right\} \quad (1)$$

เมื่อ \dot{V} คือค่าเฟสเซอร์แรงดัน V_k คือค่าข้อมูลค่าแรงดันชั่วขณะจากตัวรับไฟ 220 V ที่สุ่มเก็บโดยตัวคอนเวอร์เตอร์อนาล็อกเป็นดิจิทัล N คือค่าจำนวนการสุ่มเบข้อมูลแรงดันและ θ คือค่ามุมของการสุ่มเก็บข้อมูล สำหรับ NCT2000 ค่า $N=96$ และ $\theta=2\pi/N=3.75$ องศา. จากสมการ (1) มุมเฟสของแรงดันสามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ข้อมูล PMU

ขนาด	กว้าง 135 มม สูง 133 มม ยาว 245 มม
น้ำหนัก	6.5 kg
ขนาดความจุของข้อมูล	5 MB
ความถี่ที่ทำงาน	50 Hz or 60 Hz
ความละเอียดของ A/D	16 bit
กระแสอินพุทของคอนเวอร์เตอร์	1 A or 5 A
แรงดันอินพุทของคอนเวอร์เตอร์	63.5 V
แรงดันของแหล่งจ่าย	DC 110 V/AC 100 V
ความต้านทานฉนวน	Ground Resistance : 10 M Ω Mutual Resistance : 5 M Ω
อุณหภูมิแวดล้อม	-10 ° C ~ +50 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \tan^{-1}[\text{Im}(\dot{V})/\text{Re}(\dot{V})] \quad (2)$$

เมื่อ $\text{Re}(\dot{V})$ และ $\text{Im}(\dot{V})$ เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเฟสเซอร์แรงดัน \dot{V} ตามลำดับ โดยที่ PMU มีอัตราการสุ่มเก็บข้อมูล 96 ข้อมูลต่อหนึ่งลูกคลื่นขาขึ้นของแรงดันที่ความถี่ของระบบไฟฟ้า สำหรับความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยนั้นเท่ากับ 50 Hz ดังนั้นอัตราการสุ่มข้อมูลมีค่าเท่ากับ $50 \times 96 = 4,800$ ข้อมูลต่อหนึ่งวินาที ข้อมูลมุมเฟส δ ถูกเก็บรวบรวมในตัว PMU เป็นข้อมูลตามลำดับเวลา ผลการคำนวณใน (2) จะให้ค่าเฟสมุมแรงดันเมื่อใช้ GPS อ้างอิง โดย PMU บันทึกข้อมูลเฟสแรงดันที่คำนวณทุกๆ 40 ms หรือ 2 รอบลูกคลื่นแรงดัน เนื่องจากข้อจำกัดของการจัดการข้อมูลของอุปกรณ์นี้ การเก็บข้อมูลจึงไม่ต่อเนื่อง PMU วัดค่าแรงดันหนึ่งเฟสและคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันทุก 20 นาที (2 ครั้งต่อหนึ่งชั่วโมง) แล้วใช้เวลาเก็บข้อมูลในเซพเวอร์ 10 นาที (2 ครั้งต่อหนึ่งชั่วโมง) ยกตัวอย่างเช่น 0.20 a.m. - 0.40 a.m. เป็นช่วงเวลากการวัดและคำนวณเฟสเซอร์แรงดัน โดยข้อมูลเฟสเซอร์จะถูกบันทึกในช่วง 0.41 a.m. - 0.49 a.m. ต่อมาช่วงเวลา 0.50 a.m. - 1.10 a.m.จะเป็นช่วงของการวัดและคำนวณเฟสเซอร์แรงดันต่อไป หลังจากนั้น ช่วงเวลา 1.11 a.m. - 1.19 a.m. จะใช้บันทึกข้อมูลเฟสเซอร์ ดังนั้น ในเวลา 20 นาที จะมีข้อมูลของเฟสเซอร์แรงดัน 30,000 ข้อมูล เนื่องจากการเก็บข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องของอุปกรณ์นี้เป็นปัญหาที่สำคัญที่คาดว่าจะได้รับการแก้ไขในอนาคตโดยผู้ผลิตเพื่อจะทำให้การเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและเพื่อให้การส่งข้อมูลสามารถทำได้แบบเรียลไทม์ได้ต่อไป

2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

ระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยประกอบไปด้วยสามส่วนของผู้ดำเนินการได้แก่

1. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand, EGAT)
2. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority, PEA)
3. การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority, MEA)

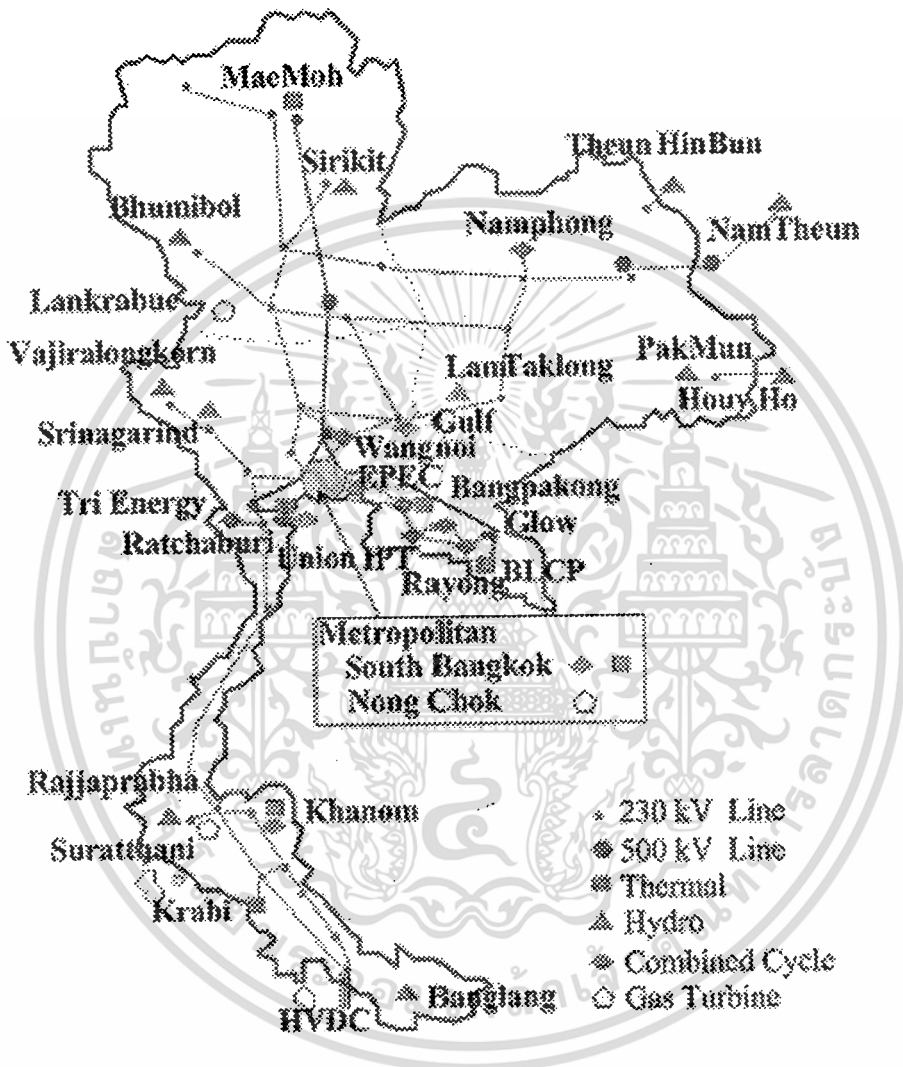
EGAT มีหน้าที่รับผิดชอบในส่วนการผลิตและการส่งกำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันสูง ส่วน MEA และ PEA นั้นทำหน้าที่ส่งกำลังไฟฟ้าในระดับจำหน่าย รูปที่ 2 แสดงโรงจักรไฟฟ้าและสายส่ง 230/500 KV ในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย EGAT ประกอบไปด้วยสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย 196 สถานี มีความยาวของสายส่งรวมทั้งระบบเท่ากับ 28,330.8 วงจร-กิโลเมตร มีจำนวนบัส 820 บัส และมีกำลังการผลิตติดตั้ง 25,324.92 MW ซึ่งประกอบไปด้วยโรงจักรไฟฟ้าของ EGAT, ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (IPP), ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (SPP), และการนำเข้ากำลังไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 19,325.8 MW เกิดขึ้นที่เวลา 14:30 วันที่ 30 มีนาคม 2004

2.4 ระบบมอดินเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ

รูปที่ 3 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ โดยทั้งสองระบบเชื่อมโยงด้วยสายส่ง 230 KV มีความยาว 800 km เนื่องจากโครงสร้างการเชื่อมโยงนี้เป็นแบบตามยาว (longitudinal structure) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างสองระบบ (inter-area oscillation) เป็นโหมดเด่น (dominant mode) เพื่อมอดินเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างสองระบบ งานวิจัยนี้จึงติดตั้ง PMU ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช โดยสมมุติว่าทั้งสองตำแหน่งที่ติดตั้ง PMU ระบบมอดินเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 4 PMU ทั้งสองวัดค่าเฟสเซอร์แรงดันผ่านตัวรับไฟฟ้า 220 V พร้อมกันโดยการซิงโครไนซ์ของ GPS จุดเด่นของระบบมอดินเตอร์ที่นำเสนอก็คือการใช้ตัวรับไฟฟ้าเป็นช่องทางเพื่อให้ได้ข้อมูลคุณลักษณะของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังด้วยการติดตั้ง PMU

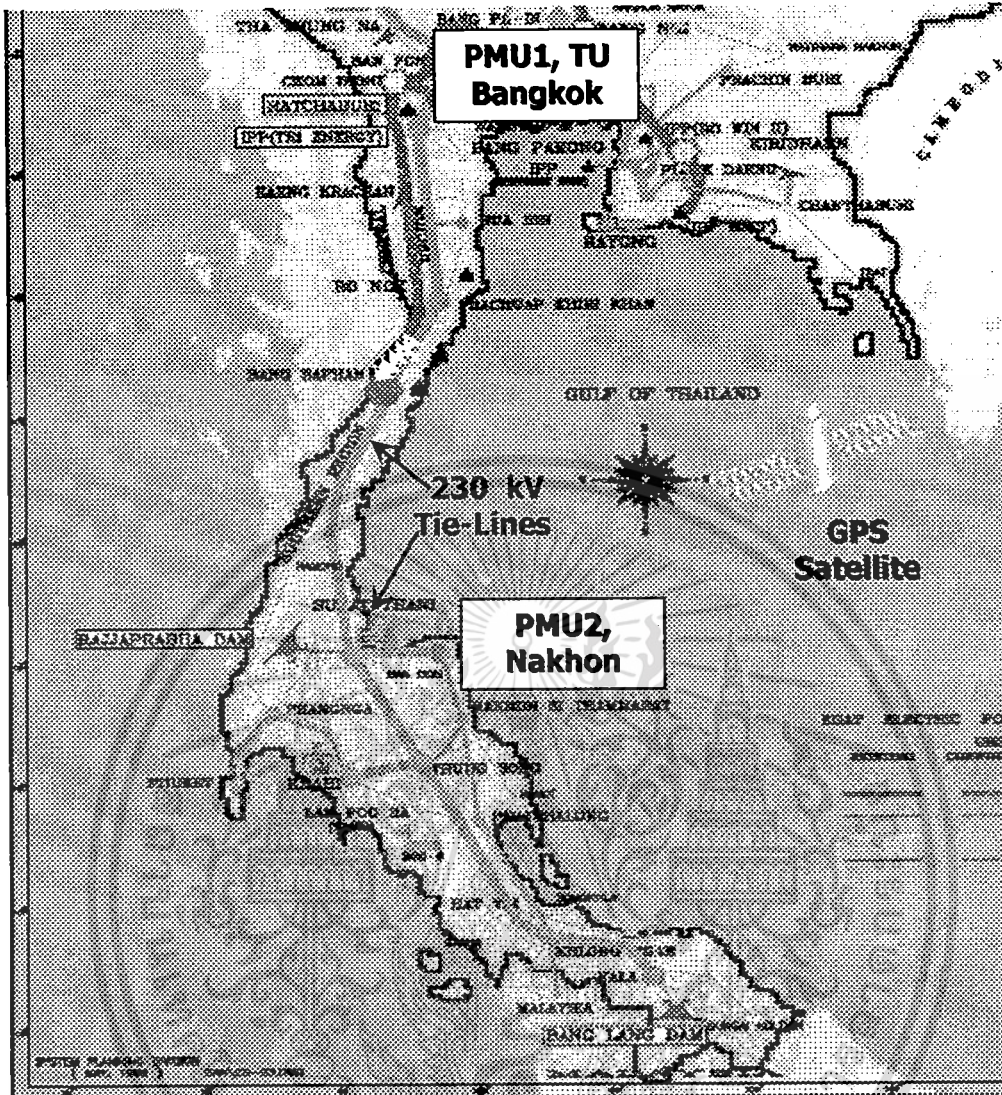
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สะดวก ราคาไม่แพงมาก รูปที่ 5 แสดงรูปถ่ายของระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอ สำหรับข้อมูลเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์นั้นถูกส่งผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อส่งไปเก็บในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่สจล



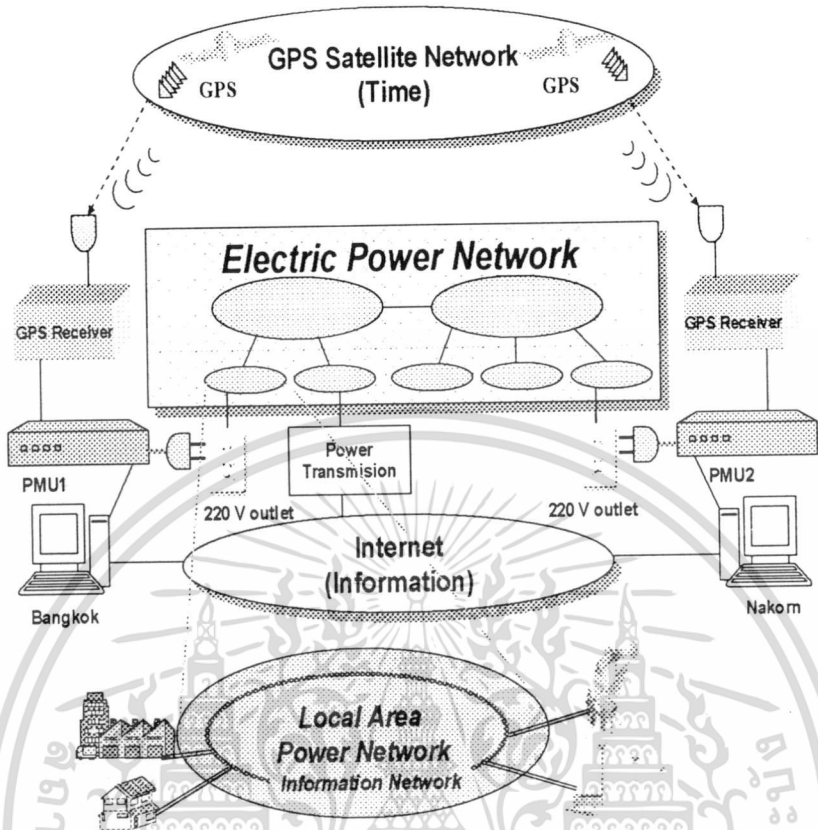
รูปที่ 2. ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

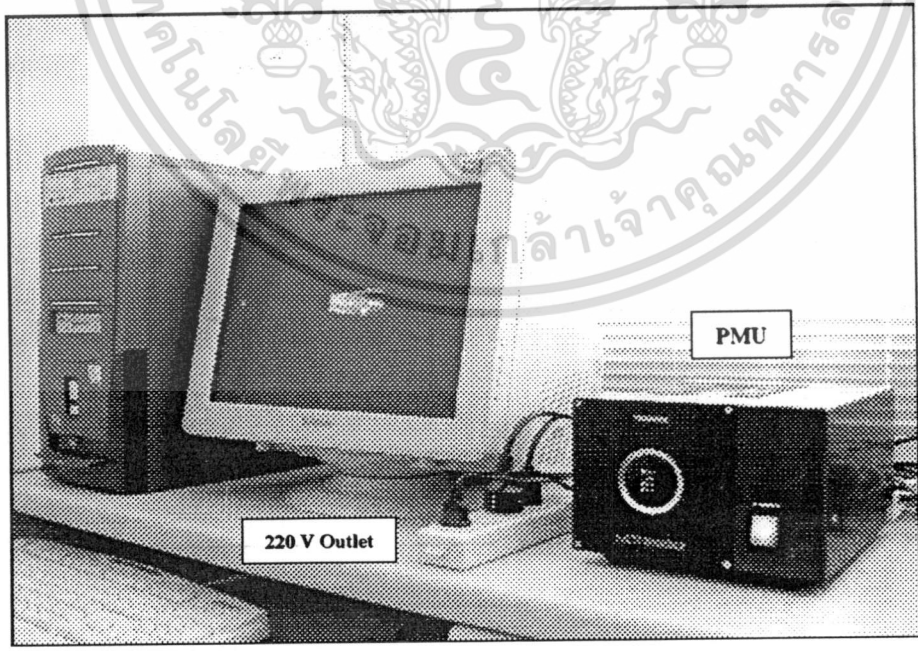


รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้ง PMU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 9
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

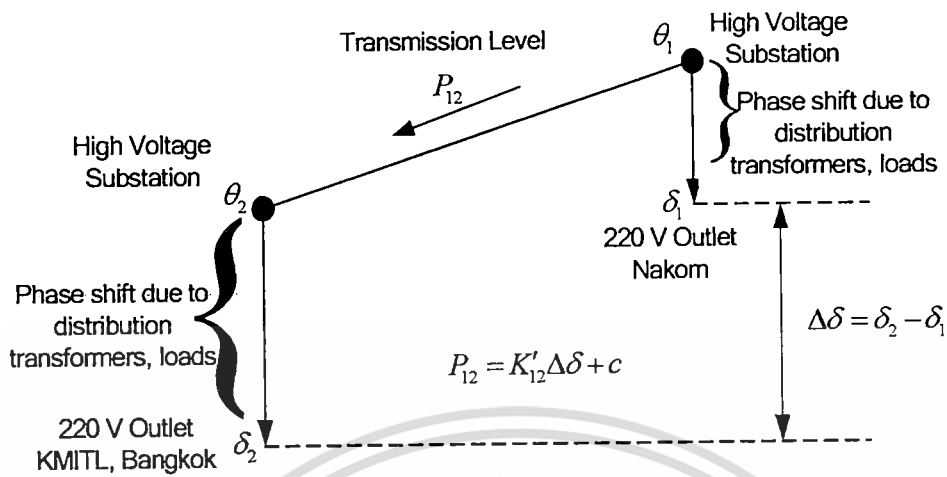


รูปที่ 4 ระบบการมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ



รูปที่ 5 ระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 10
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 เฟสเลื่อนเนื่องจากหม้อแปลงจำหน่ายและโหลด

เนื่องจากข้อมูลที่วัดจาก PMU นั้นได้มาจากเต้ารับไฟฟ้า 220 V ดังนั้นข้อมูลที่ได้นั้นย่อมได้รับผลกระทบต่างๆ ดังนี้

1. การปิดเปิดสวิตช์ของโหลดต่างๆ อาจทำให้เกิด noise ปนกับข้อมูลที่ได้นั้น โดยทั่วไป noise ที่เกิดขึ้นนี้มักเกิดขึ้นที่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่ของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะนำการแปลงเวฟเล็ทแบบดิสคริตมากำจัด noise ออกจากข้อมูลของ PMU
2. ผลกระทบของเฟสเลื่อน (phase shift) เนื่องมาจากหม้อแปลงในระบบจำหน่าย ดังแสดงในรูปที่ 6 เฟสเซอร์แรงดันที่สถานีและมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์นั้นได้จากเต้ารับ 220 V โดยระหว่างบัสแรงสูงและเต้ารับไฟฟ้านั้นมีหม้อแปลงจำหน่ายจำนวนมากซึ่งทำให้เกิดเฟสเลื่อนเป็นจำนวนเท่าของ 30 องศา เนื่องจากในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะเฟสแตกต่าง $\Delta\delta$ ดังนั้นเฟสเลื่อนจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาแต่อย่างไร ผลกระทบของเฟสเลื่อนเนื่องมาจากหม้อแปลงในระบบจำหน่ายนั้นได้นำเข้ามาพิจารณาแล้วในค่าเฟสแตกต่าง $\Delta\delta$

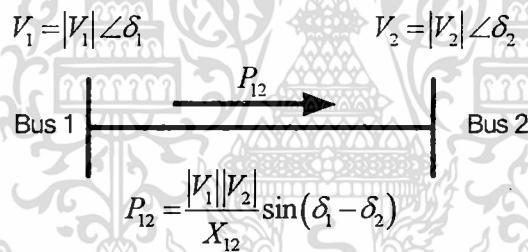
บทที่ 3

การประมวลสัญญาณข้อมูล PMU

3.1 จุดประสงค์

ในบทนี้จะทำการประยุกต์ใช้วิธีการประมวลสัญญาณเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของ PMU เพื่อตรวจจับการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยเริ่มที่การหาค่ามุมเฟสแตกต่างกันระหว่าง สจล และ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่วัดได้จาก PMU ต่อมา ได้ทำการเปรียบเทียบเฟสแตกต่างกันกับกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเชื่อมโยงที่ได้จาก EGAT ในสภาวะคงตัวและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสองข้อมูล หลังจากนั้น จะได้กล่าวถึงการตรวจจับสัญญาณการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยเริ่มจากการกำจัด noise ที่ปนมากับข้อมูลที่วัดได้จาก PMU โดยใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีต [32,33] หลังจากนั้นจึงใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว [34] เข้าไปกับสัญญาณ PMU ที่กำจัด noise แล้วเพื่อหาโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แล้วจึงใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีตเพื่อทำการตรวจจับสัญญาณที่ประกอบไปด้วยโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้านั้น

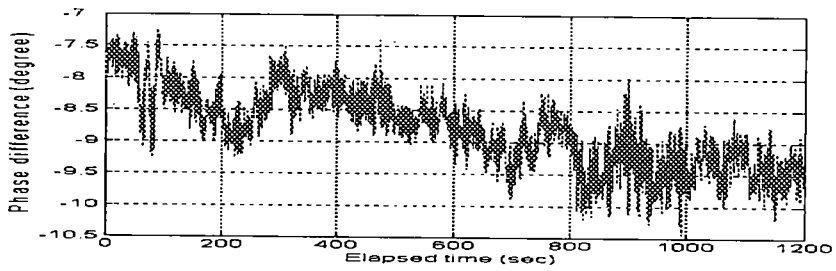
3.2 การประเมินข้อมูลที่วัดจาก PMU



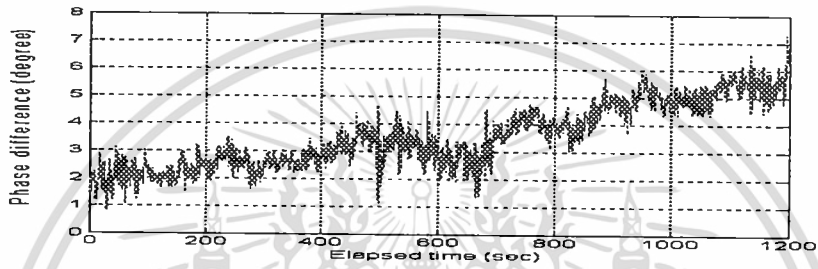
รูปที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างสองบัส

รูปที่ 1 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างสองบัสและสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เมื่อ V_1 และ V_2 เป็นค่าเฟสเซอร์แรงดันที่บัส 1 และ 2 ตามลำดับ $|V_1|$ และ $|V_2|$ เป็นขนาดของแรงดันที่บัสที่ 1 และ 2 ตามลำดับ δ_1 และ δ_2 เป็นเฟสของแรงดันที่บัส 1 และ 2 ตามลำดับ X_{12} เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง โดยทั่วไปขนาดของแรงดันทั้งสองบัสและค่ารีแอกแตนซ์สายส่งมีค่าคงที่ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจึงเป็นฟังก์ชันของเฟสแตกต่างกันระหว่างสองบัส โดยกำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากบัสที่มีมุมเฟสสูงไปหาบัสที่มีมุมเฟสต่ำ ในหัวข้อนี้จะนำแนวคิดพื้นฐานข้างต้นมาประยุกต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่วัดจาก PMU

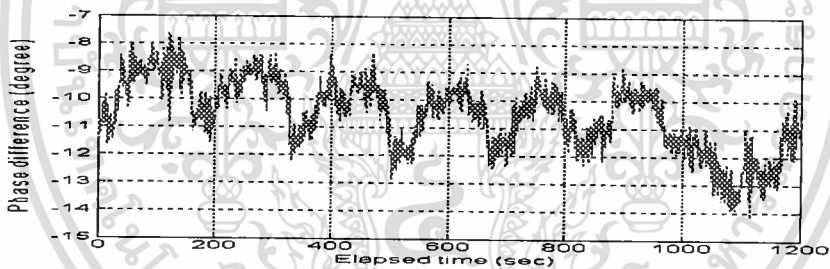
รูปที่ 2 และ 3 แสดงสัญญาณเฟสแตกต่างกันระหว่างสจลและมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ทุกๆ หกชั่วโมง ระหว่าง 2.20 a.m. ถึง 2.40 a.m., 8.20 a.m. ถึง 8.40 a.m., 2.20 p.m. ถึง 2.40 p.m. และ 8.20 p.m. ถึง 8.40 p.m. ณ วันเสาร์ที่ 4 มิถุนายน 2548 และ วันอังคารที่ 30 สิงหาคม 2548 ค่าเฟสแตกต่างกันที่เป็นบวกแสดงว่ากำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับจากภาคใต้ไปยังภาคกลาง แต่ถ้าค่าเฟสแตกต่างกันเป็นลบแสดงว่ากำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับจากภาคใต้ไปยังภาคกลาง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสแตกต่างกันจะแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสอง เริ่มจากคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเฟสแตกต่างกันระหว่างสองตำแหน่งในแต่ละช่วง 20 นาที ดังนั้นใน 1 วันจะมีจำนวนข้อมูลค่าเฉลี่ยของเฟสเท่ากับ 48



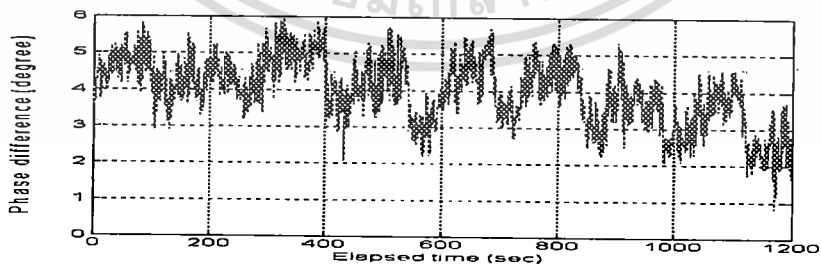
(a) 2.20 a.m. - 2.40 a.m.



(b) 8.20 a.m. - 8.40 a.m.

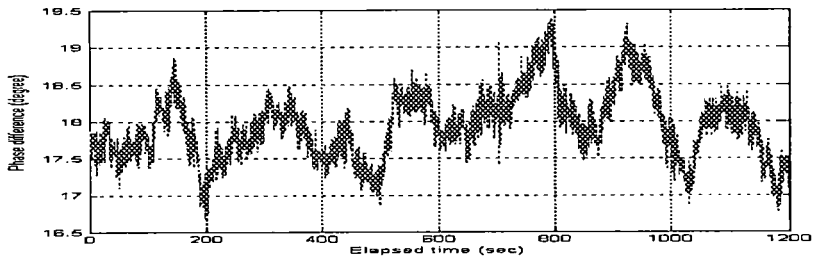


(c) 2.20 p.m. - 2.40 p.m.

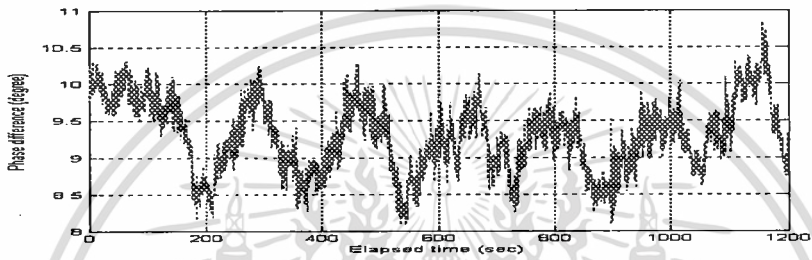


(d) 8.20 p.m. - 8.40 p.m.

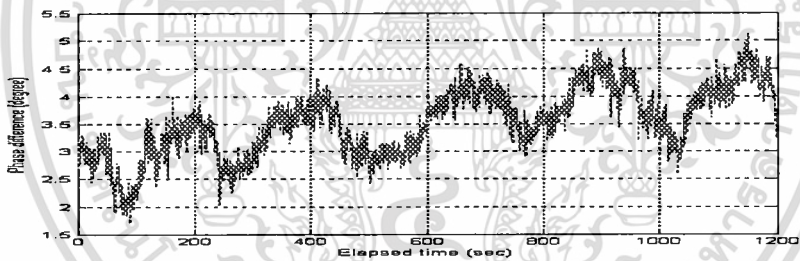
รูปที่ 2 เฟสแตกต่างกันระหว่างสองตำแหน่ง ณ วันที่ 4 มิถุนายน 2548



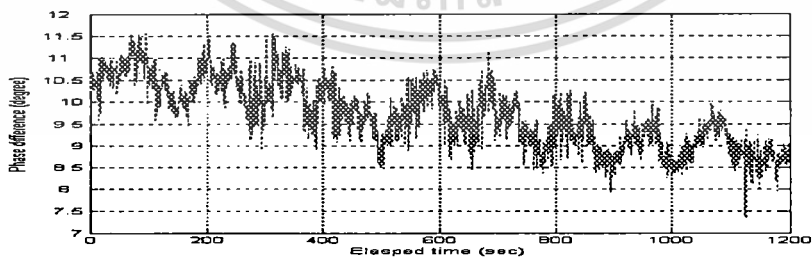
(a) 1.20 a.m. – 1.40 a.m.



(b) 7.20 a.m. – 7.40 a.m.



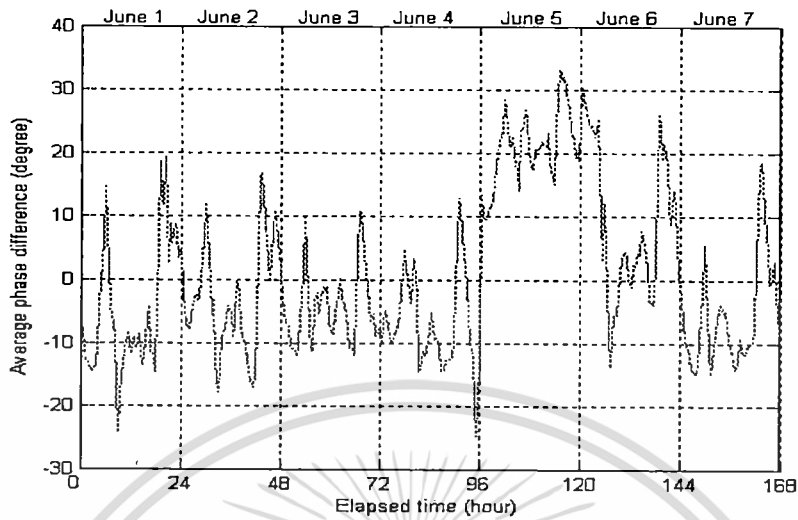
(c) 1.20 p.m. – 1.40 p.m.



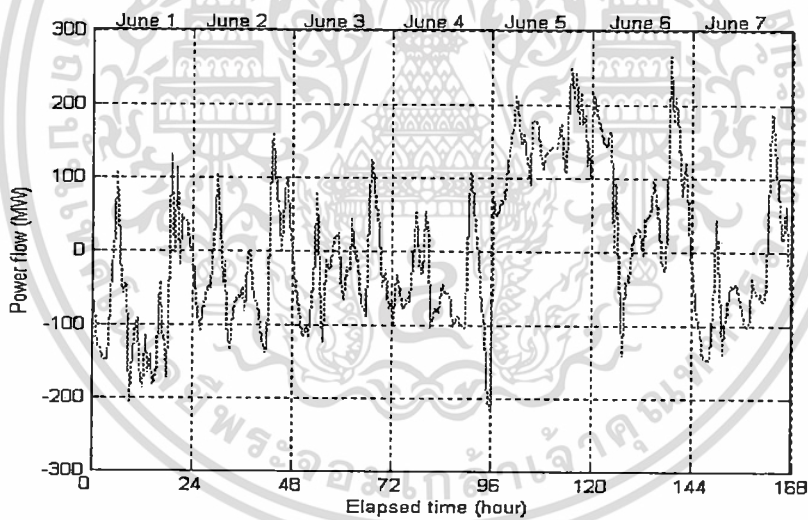
(d) 7.20 p.m. – 7.40 p.m.

รูปที่ 3 เฟสแตกต่างกันระหว่างสองตำแหน่ง ณ วันที่ 30 สิงหาคม 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

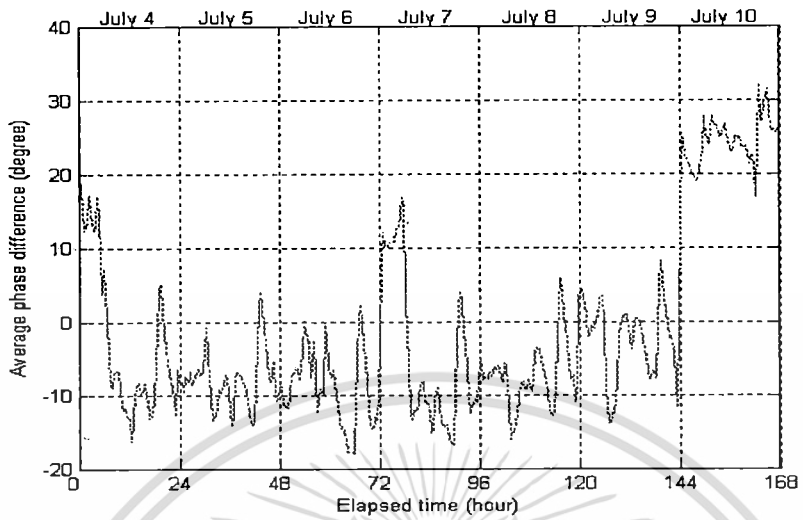


รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยเฟสแตกต่างระหว่างสองตำแหน่งระหว่าง 1 – 7 มิถุนายน 2548

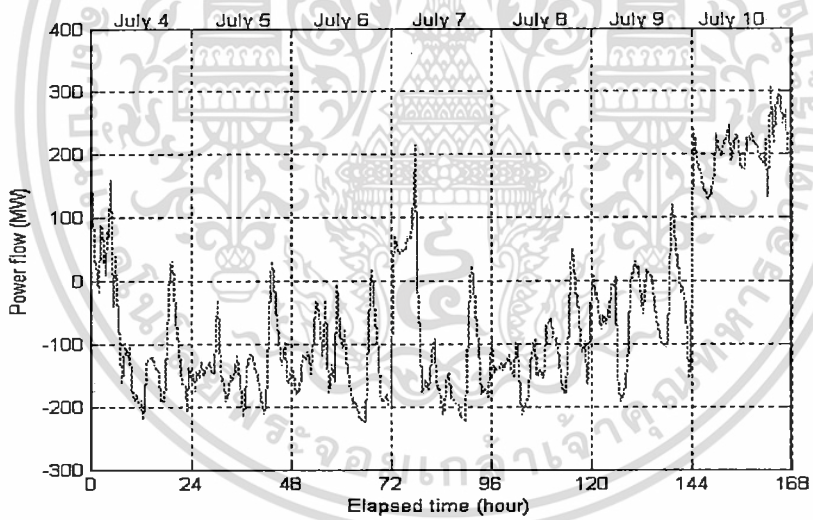


รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่าง 1 – 7 มิถุนายน 2548

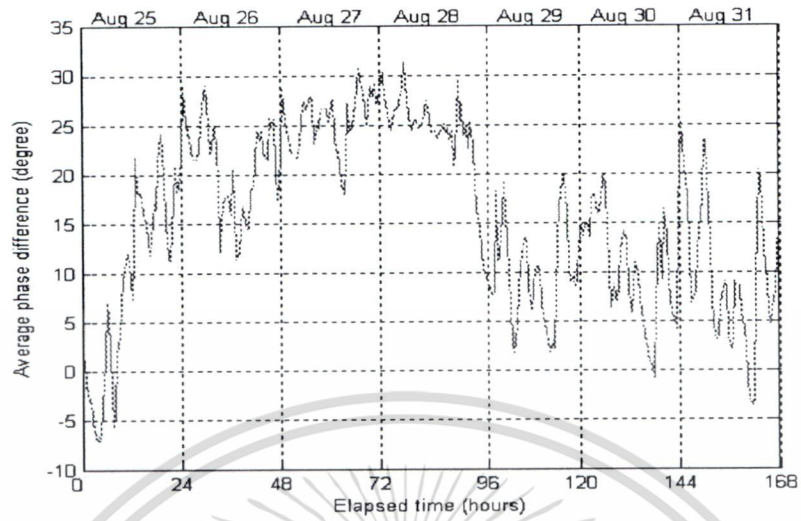
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



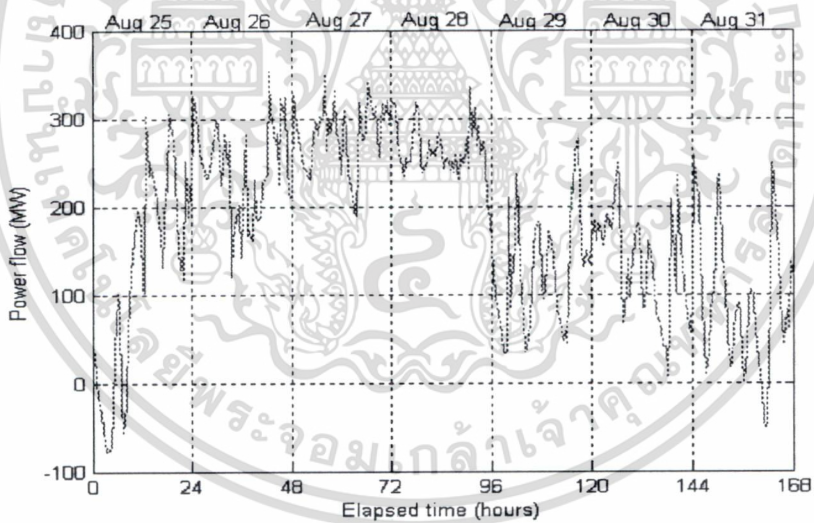
รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยเฟสแตกต่างระหว่างสองตำแหน่งระหว่าง 4 – 10 กรกฎาคม 2548



รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่าง 4 – 10 กรกฎาคม 2548



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยเฟสแตกต่างระหว่างสองตำแหน่งระหว่าง 25 – 31 สิงหาคม 2548



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่าง 25 – 31 สิงหาคม 2548

84577

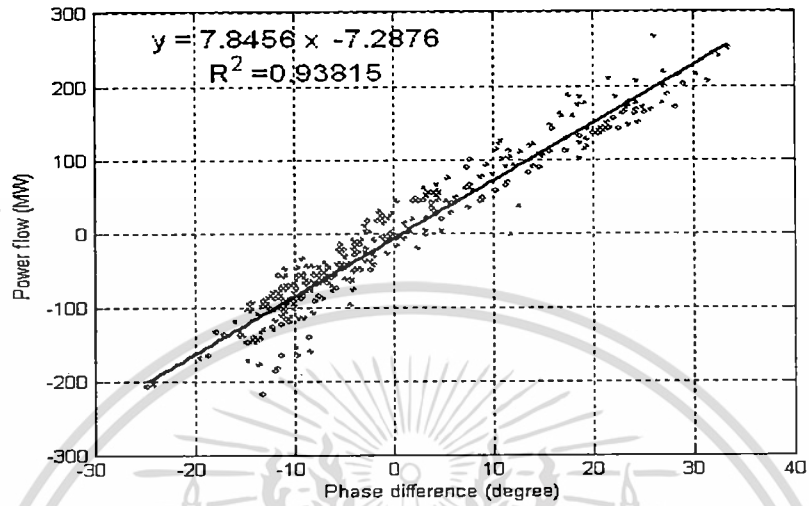
รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองตำแหน่งระหว่าง 1 – 7 มิถุนายน 2548 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสในแต่ละวันนั้นแตกต่างกันอย่างมากซึ่งมีทั้งค่าบวกและลบ ค่าความแตกต่างของมุมเฟสที่เป็นบวกหมายถึงกำลังไฟฟ้านั้นไหลจากภาคกลางไปยังภาคใต้ ส่วนค่าความแตกต่างของมุมเฟสที่เป็นลบนั้นหมายถึงกำลังไฟฟ้านั้นไหลจากภาคใต้ไปยังภาคกลาง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่วัดจาก PMU ในสภาวะคงตัว ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสจะนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง 230 kV ที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ที่ได้มาจาก EGAT ระหว่าง 1 – 7 มิถุนายน 2548 ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้จาก EGAT นั้นวัดค่าทุกครึ่งชั่วโมง ดังนั้นในหนึ่งวันจึงมี 48 ข้อมูลเท่ากับข้อมูลที่วัดจาก PMU จากรูปจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของมุมเฟสนั้นเกือบจะเหมือนกับการไหลของกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ายังสอดคล้องกับเครื่องหมายของค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟส รูปที่ 6 และ 7 แสดงค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองตำแหน่งและค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของ EGAT ระหว่าง 4 – 10 กรกฎาคม 2548 ตามลำดับ รูปที่ 8 และ 9 แสดงค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองตำแหน่งและค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของ EGAT ระหว่าง 25 – 31 สิงหาคม 2548 ตามลำดับ จะเห็นว่าในแต่ละช่วงเวลานั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสเหมือนกับการไหลของกำลังไฟฟ้า ผลการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสซึ่งวัดได้จาก PMU

3.3 สหสัมพันธ์ระหว่างการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยความแตกต่างเฟส

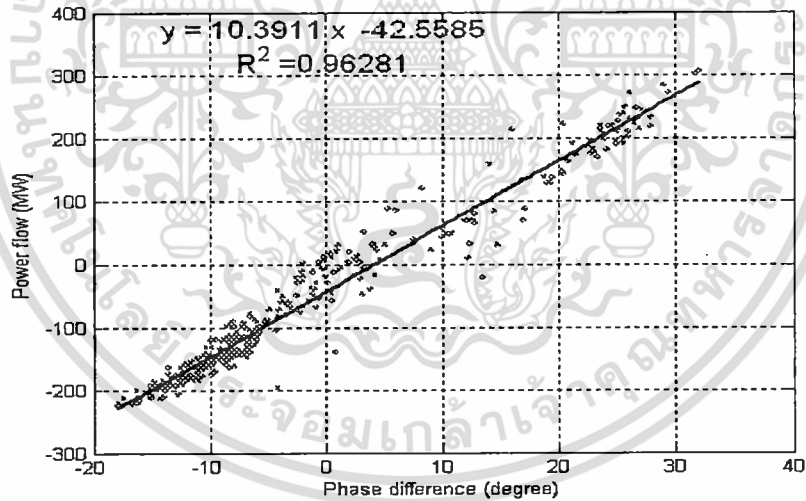
สหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสสามารถหาได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares regression) ในที่นี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรด้วยสมการเส้นตรง $P_{12} = K'_{12}\Delta\delta + c$ ผลการคำนวณกราฟเส้นตรงระหว่างสองตัวแปรระหว่าง 1 – 7 มิถุนายน 2548, 4 – 10 กรกฎาคม 2548, 25 – 31 สิงหาคม 2548 แสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ เพื่อประเมินค่า fitness ของข้อมูลทั้งสอง สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรสามารถคำนวณได้จาก

$$R^2 = \left[\frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2]} \sqrt{[n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \right]^2 \quad (1)$$

เมื่อ x เป็นค่าเฉลี่ยความแตกต่างเฟส y เป็นค่าการไหลของกำลังไฟฟ้า n เป็นจำนวนข้อมูล สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดง fitness ของข้อมูล ถ้า R^2 มีค่าใกล้หนึ่ง แสดงให้เห็นว่าสหสัมพันธ์ที่ดีมากระหว่างการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟส ถ้า R^2 น้อยกว่าหนึ่งมาก ๆ แสดงว่าสหสัมพันธ์ไม่ดี ดังแสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรมีค่าใกล้หนึ่งดังนั้นค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสที่วัดโดย PMU มีสหสัมพันธ์ที่สูงกับค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าของ EGAT ในสภาวะคงตัว ผลการคำนวณนี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความแตกต่างของมุมเฟสตัวรับไฟฟ้า 220 V และสถานีไฟฟ้าย่อย $\delta_1 - \theta_1$ หรือ $\delta_2 - \theta_2$ ในรูปที่ 6 ของบทที่ 2 นั้นน้อยมาก การแกว่งในสัญญาณความแตกต่างของมุมเฟสที่วัดได้ $\Delta\delta$ สามารถแสดงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงได้ อย่างไรก็ตาม สมการสหสัมพันธ์ของรูปที่ 10, 11 และ 12 มีสัมประสิทธิ์ K'_{12} และ c ที่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการวัดค่านี้กระทำที่ระดับจำหน่าย 220 V เฟสเลื่อนของหม้อแปลงจำหน่ายมีผลกระทบอย่างมากต่อสหสัมพันธ์ของสองตัวแปร นอกจากนี้ ค่าสหสัมพันธ์ยังเป็นฟังก์ชันของโหลดต่างๆที่ติดตั้ง ณ จุดใช้งานนั้น โดยโหลดเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อมุมเฟสและขนาดของเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่วัดมาแต่ไม่มีผลต่อความถี่ของระบบ

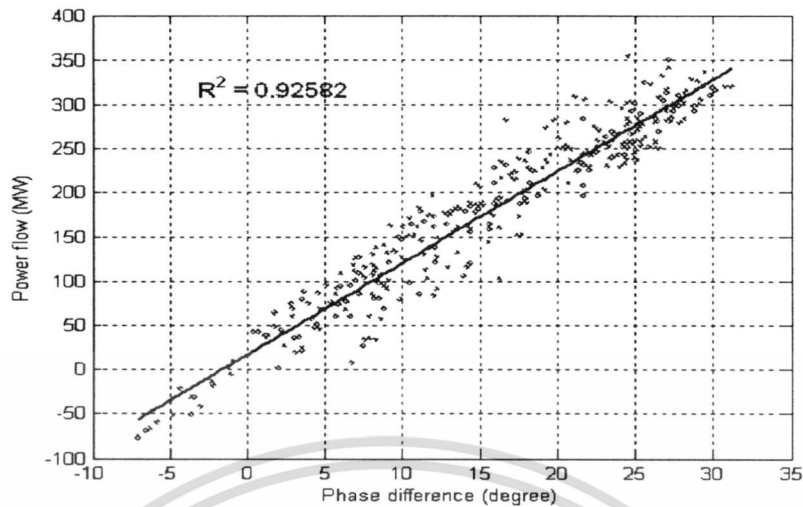


รูปที่ 10 สมการเชิงเส้นจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด, 1 – 7 มิถุนายน 2548

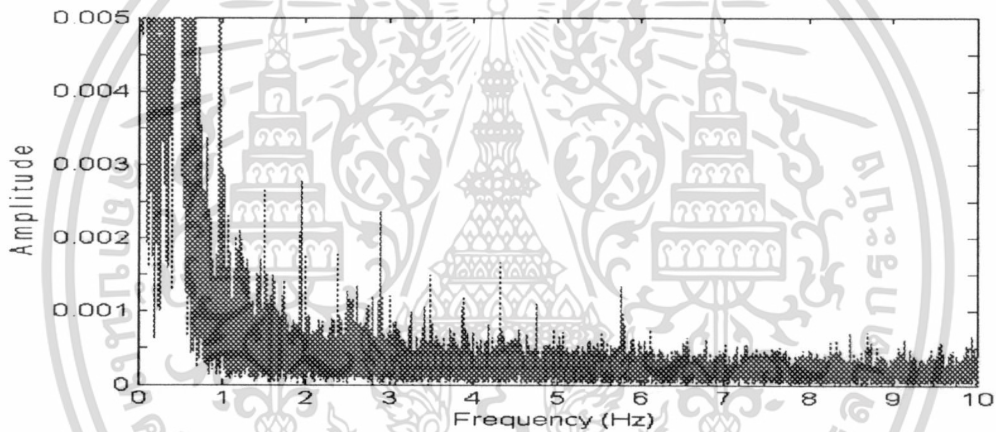


รูปที่ 11 สมการเชิงเส้นจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด, 4 – 10 กรกฎาคม 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 19
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 สมการเชิงเส้นจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด, 25 – 31 สิงหาคม 2548



รูปที่ 13 ผล FFT ของความแตกต่างของมุมเฟสก่อนการกำจัด noise

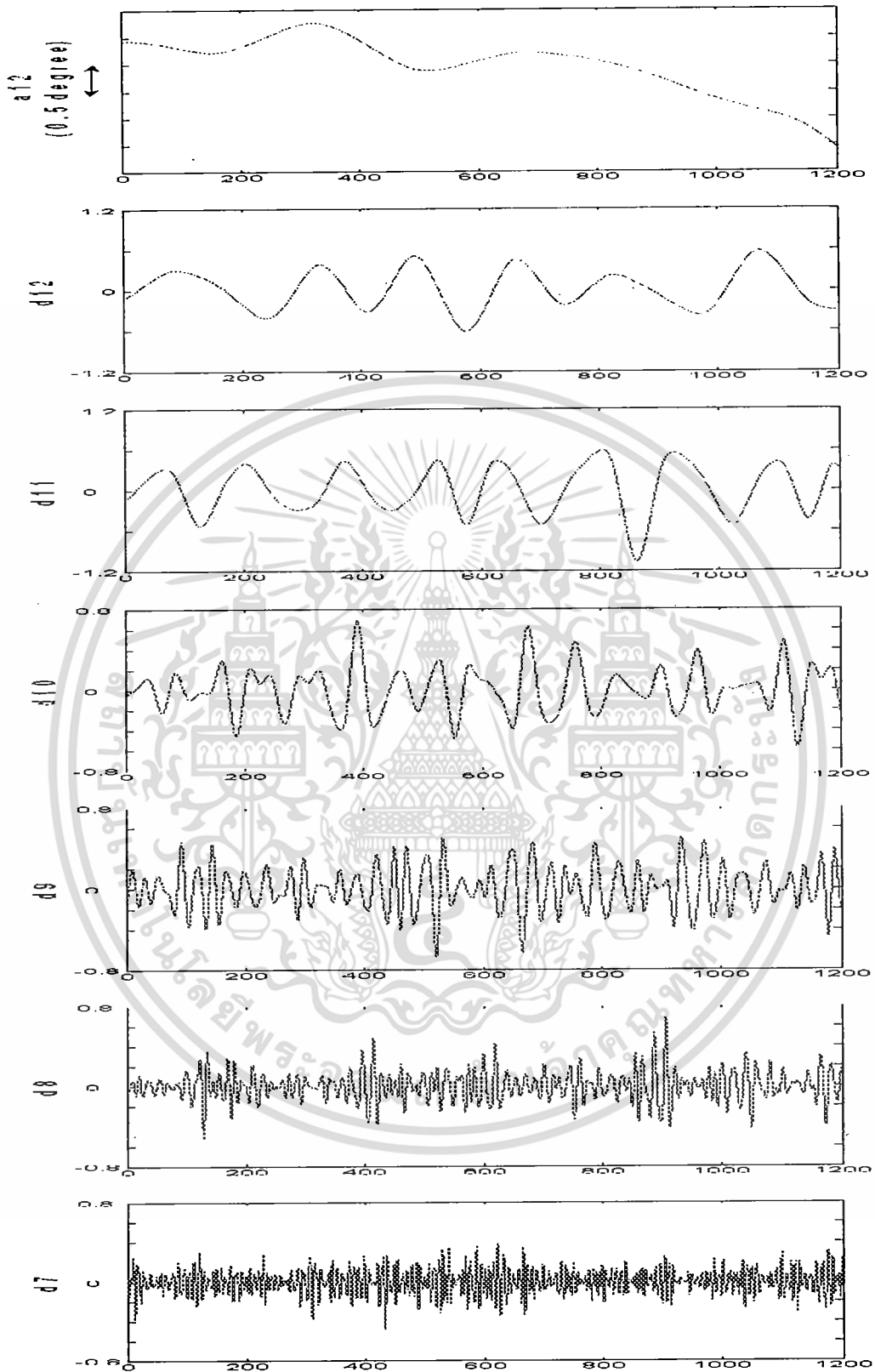
3.4 การตรวจจับการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

ในระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอ นั้น ค่ามุมเฟสของแรงดัน ณ สองตำแหน่งสามารถวัดโดย PMU ได้พร้อมกัน เนื่องจากค่าอนุพันธ์ของมุมเฟสเมื่อเทียบกับเวลานั้นคือค่าการเบี่ยงเบนของมุมเฟสในระบบไฟฟ้า ดังนั้นการเบี่ยงเบนของมุมเฟสในระบบไฟฟ้า ณ ตำแหน่งติดตั้ง PMU สามารถคำนวณได้ หลังจากนั้นได้นำ FFT มาทดสอบกับข้อมูลมุมเฟสหรือความเบี่ยงเบนความถี่ ณ ตำแหน่งเดียว และ ความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองตำแหน่ง ผลปรากฏว่า โดยการใช้ความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองตำแหน่งสามารถสังเกตโหมดการแกว่งที่เด่นได้ง่ายกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ความแตกต่างของมุมเฟสมาวิเคราะห์คุณลักษณะของโหมดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

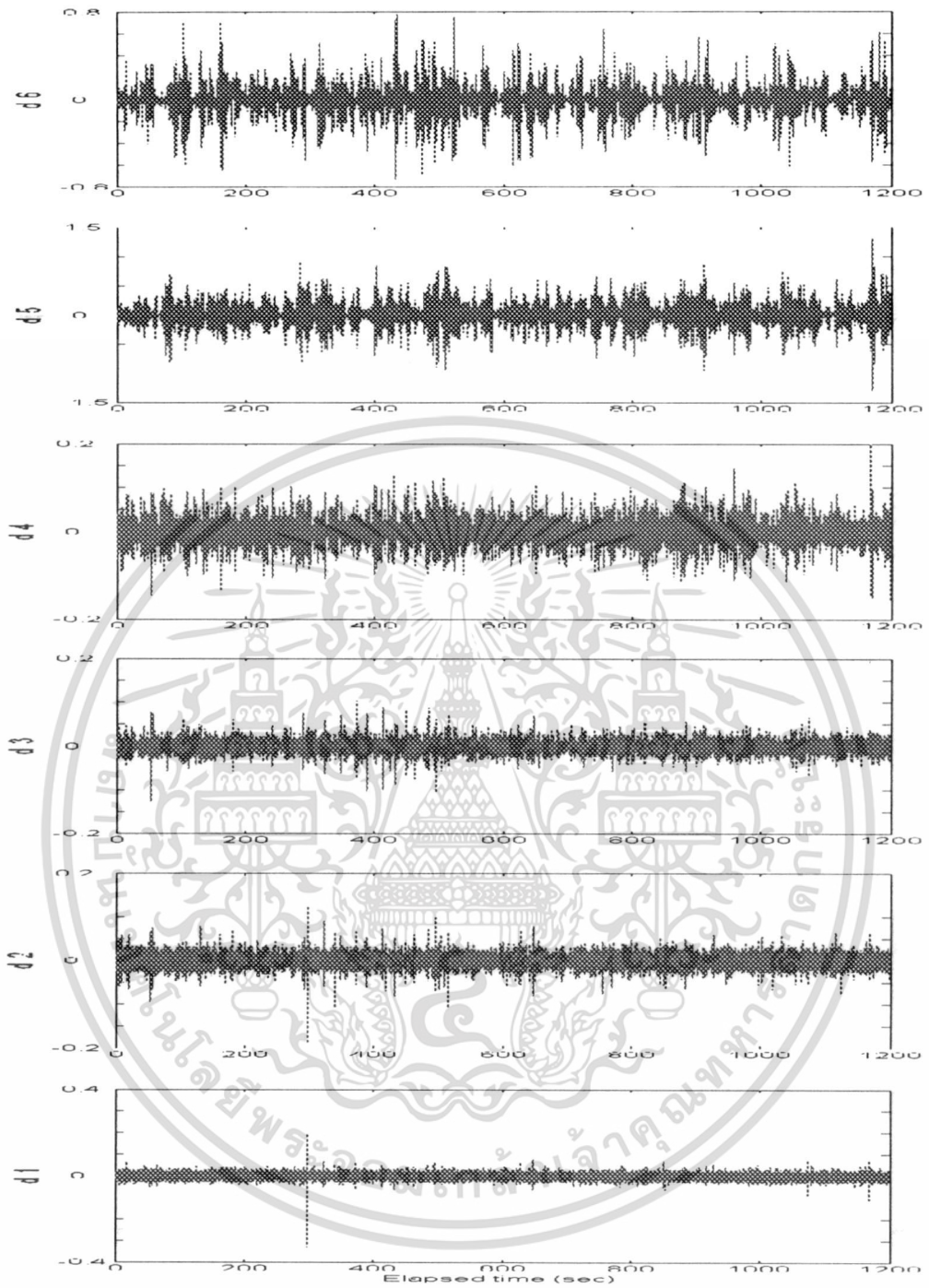
จะเห็นว่าความแตกต่างของมุมเฟสในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยสัญญาณการแกว่งที่ความถี่ต่างๆ รวมไปถึง noise อันเกิดจากการปิดเปิดของโหลดต่างๆ โดยทั่วไป noise ชนิดนี้จะเกิดที่ความถี่สูงกว่าความถี่ของการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัด noise นี้ก่อนที่จะตรวจจับสัญญาณการแกว่งของกำลังไฟฟ้า รูปที่ 13 แสดงผลของ FFT ของสัญญาณความแตกต่างของมุมเฟสในช่วง 8.20 p.m.- 8.40 p.m. สังเกตเห็นว่าสัญญาณความแตกต่าง

ของมูมเฟสประกอบไปด้วย noise ที่ความถี่สูง เพื่อกำจัด noise การแปลงเวฟเล็ทแบบดีสครีตได้นำมาใช้เพื่อแยกสัญญาณความแตกต่างของมูมเฟสออกเป็นสัญญาณย่อยที่มีความถี่ต่างๆ รูปที่ 14 แสดงผลการแปลงเวฟเล็ทของสัญญาณความแตกต่างมูมเฟสในช่วง 8.20 p.m.- 8.40 p.m. โดยใช้ Symlet wavelet functions ชนิด 12 ระดับ โดยใช้ FFT เข้ากับสัญญาณย่อยที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท (d1-d12) สามารถหาค่าความถี่เด่นของแต่ละสัญญาณที่ได้จากค่าสูงสุดของขนาดของเพาเวอร์สเปกตรัม รูปที่ 15 แสดง ผล FFT ของสัญญาณย่อย d4, d5 และ d6 ค่าความถี่เด่นของสัญญาณ d4, d5 และ d6 มีค่าประมาณ 0.32, 0.45 และ 1.1 Hz ตามลำดับ ตารางที่ 1 แสดงช่วงของความถี่และความถี่เด่นของสัญญาณย่อยเวฟเล็ท เป็นที่ทราบกันว่าความถี่ของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอยู่ต่ำกว่า 2 Hz สังเกตได้ว่าสัญญาณย่อย d1, d2, และ d3 มีความถี่สูง ดังนั้นสัญญาณเหล่านี้เป็น noise ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดสัญญาณย่อย d1, d2, และ d3 ออกจากสัญญาณความแตกต่างของมูมเฟสก่อนเพื่อกำจัดผลกระทบของการสวิตช์ที่ปิดเปิดโหลด



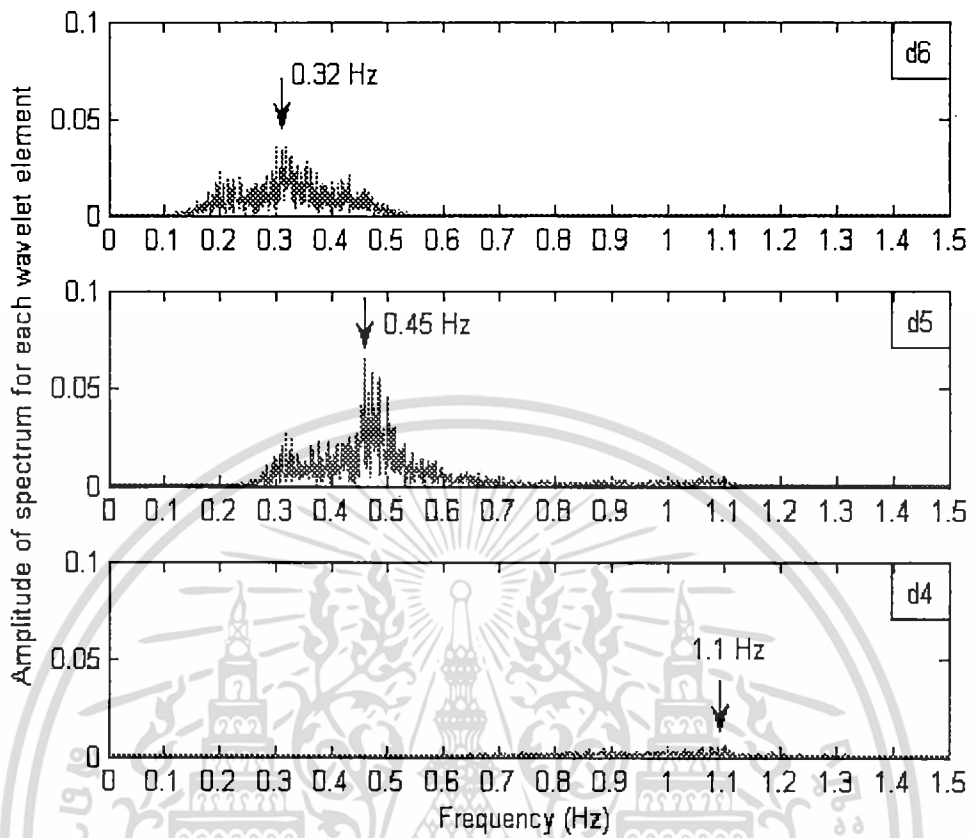


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14. ผลการแปลงเวฟเฟิร์ทของเฟสความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



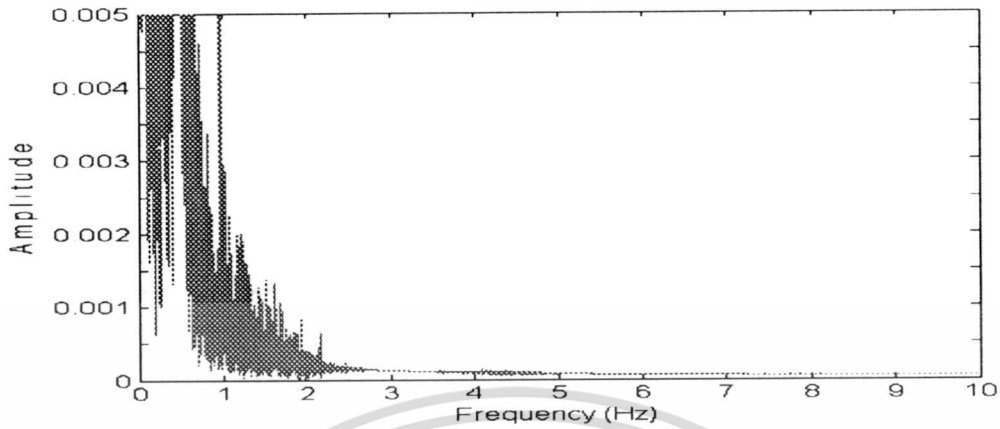
รูปที่ 15 ผล FFT ของสัญญาณเวฟเล็ตย่อย d4, d5, และ d6

ตารางที่ 1

ช่วงของความถี่และความถี่เด่นของสัญญาณเวฟเล็ตย่อย

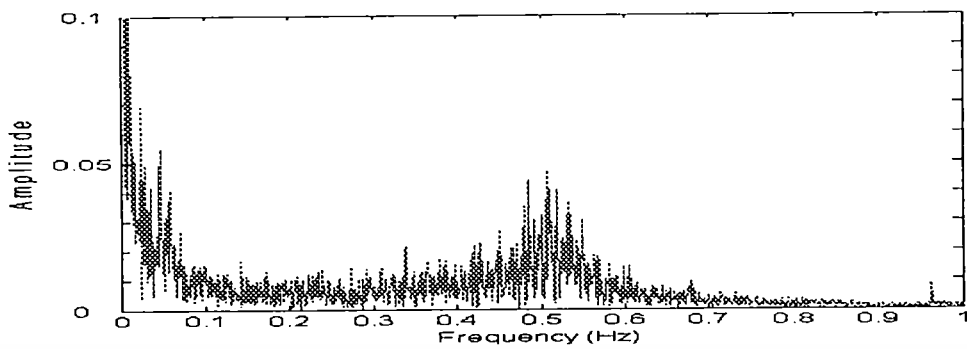
Wavelet level	Frequency (Hz)
d1	> 4
d2	1.5 – 10.2 (4.32)
d3	1.3 – 4.52 (2.5)
d4	0.52 – 2.32 (1.1)
d5	0.2 – 1.23 (0.45)
d6	0.11 – 0.52 (0.32)
d7	0.05 – 0.29 (0.11)
d8	0.03 – 0.15 (0.05)
d9	0.01 – 0.08 (0.028)
d10	0.01 – 0.04 (0.014)
d11	0.005 – 0.03 (0.0065)
d12	0.001 – 0.01 (0.005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

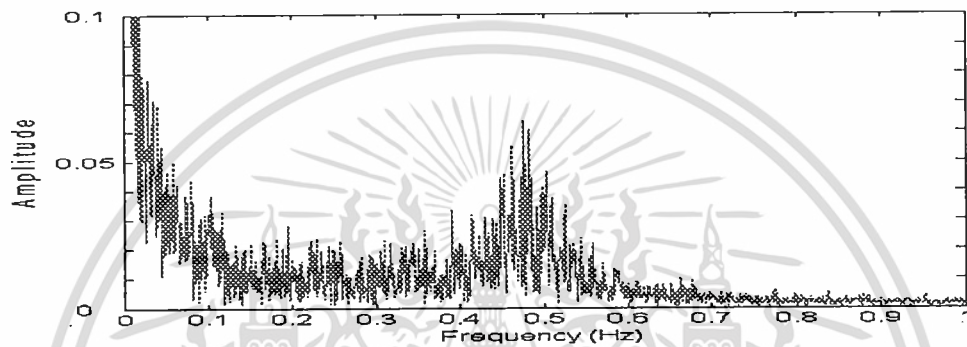


รูปที่ 16 ผล FFT ของสัญญาณความแตกต่างของมุมเฟสหลังจากกำจัด noise

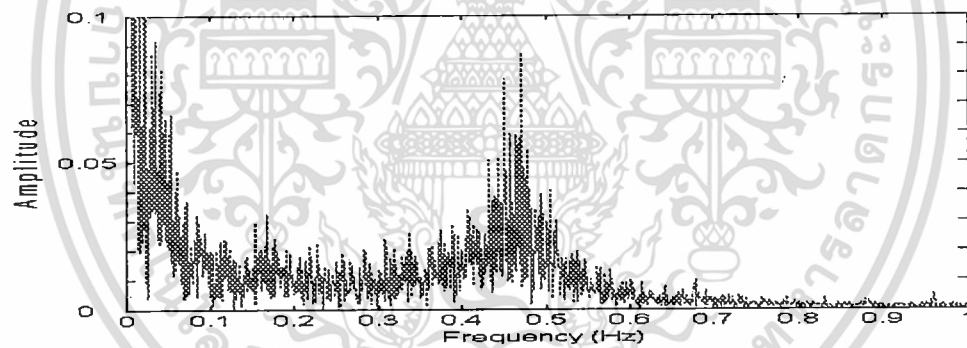
ดังนั้นสัญญาณของมุมเฟสแตกต่างที่วัดมาโดย PMU สามารถแตกออกเป็นสัญญาณย่อยที่มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเป็นหลัก รูปที่ 16 แสดงผลของ FFT ของสัญญาณความแตกต่างของมุมเฟสหลังจากกำจัด noise จะเห็นว่า noise ที่ความถี่สูงถูกกำจัดออกไปจนหมด รูปที่ 17 แสดงผลของ FFT ของความแตกต่างของมุมเฟสหลังจากการกำจัด noise ทุก ๆ หกชั่วโมง ในช่วง 2.20 a.m. - 2.40 a.m., 8.20 a.m. - 8.40 a.m., 2.20 p.m. - 2.40 p.m. และ 8.20 p.m. - 8.40 p.m. ณ วันเสาร์ที่ 4 มิถุนายน 2548 ผลของ FFT ชี้ให้เห็นว่าความถี่เด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.4 - 0.5 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของการแกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบ (0.2 - 0.8 Hz) นอกจากนี้ความถี่การแกว่งยังแปรเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา ทั้งนี้เป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงของความต้องการกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา



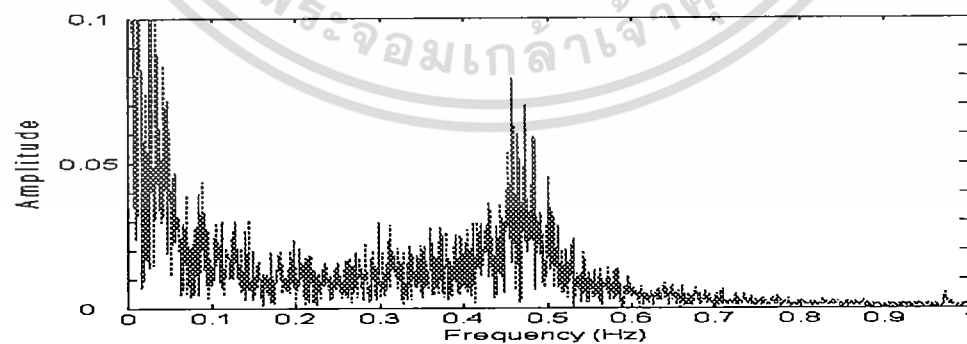
(a) 2.20 a.m. - 2.40 a.m.



(b) 8.20 a.m. - 8.40 a.m.



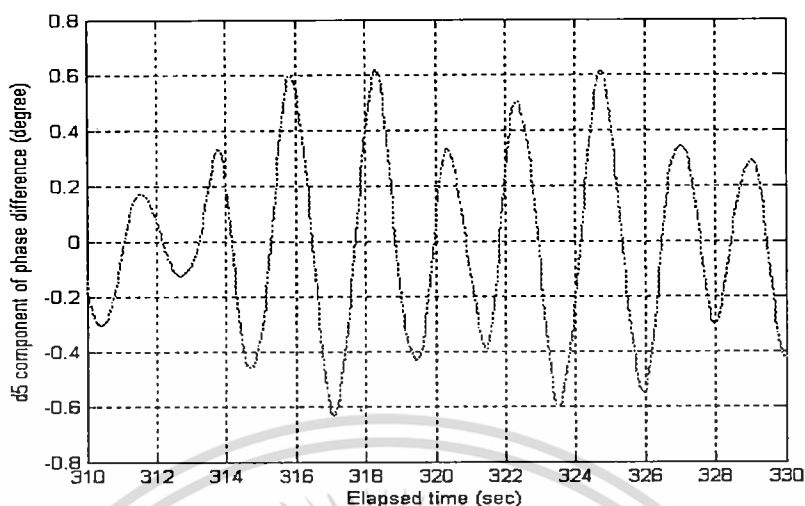
(c) 2.20 p.m. - 2.40 p.m.



(d) 8.20 p.m. - 8.40 p.m.

รูปที่ 17 ผล FFT ของสัญญาณความแตกต่างเฟสแต่ละช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 สัญญาณย่อย d5 ที่ขยายให้เด่นชัดขึ้น

ดังแสดงในตารางที่ 1 ความถี่ของสัญญาณย่อย d1-d3 และ d7-d12 ไม่ได้อยู่ในช่วงของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบ ส่วนความถี่ของ d4, d5 และ d6 นั้นอยู่ในช่วงที่สนใจ อย่างไรก็ตาม แอมพลิจูดของเพาเวอร์สเปกตรัมของ d5 นั้นสูงกว่า d4 และ d6 ดังนั้นจึงถือว่าสัญญาณ d5 จึงเป็นสัญญาณการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบ และหลังจากการสอบถามกับ EGAT พบว่าความถี่ของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบภาคกลางและภาคใต้มีค่าประมาณ 0.47 Hz รูปที่ 18 แสดงภาพขยายใหญ่ของสัญญาณ d5 ในช่วง 310 - 330 วินาที ของช่วงเวลา 8.20 - 8.40 p.m. จะเห็นว่าคาบของการแกว่งมีค่าประมาณ 2.0 s

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเทคนิคการประมวลสัญญาณได้แก่ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว การแปลงเวฟเล็ตแบบดีสครีต มาวิเคราะห์ข้อมูล PMU การกำจัด noise ออกจากข้อมูลที่วัดได้จาก PMU อันเนื่องมาจากการสวิตช์ปิดเปิดของโหลด การ fitting ข้อมูลค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสที่วัดจาก PMU และค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของ EGAT ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดพบว่าข้อมูลทั้งสองมีสหสัมพันธ์ที่สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่วัดได้จาก PMU ทางเต้ารับไฟฟ้า 220 V นั้นมีความถูกต้องเชื่อถือได้ นอกจากนี้ผลการตรวจจับการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ยังพบว่าโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเป็นโหมดการแกว่งระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางและภาคใต้ซึ่งมีความถี่ประมาณ 0.4-0.5 Hz.

บทที่ 4

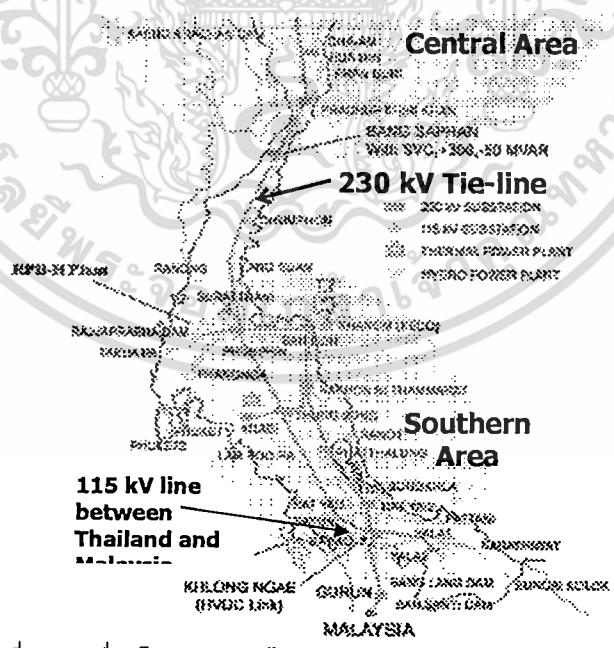
การวิเคราะห์เหตุการณ์ในระบบโดยใช้ข้อมูล PMU

4.1 จุดประสงค์

ในบทนี้จะประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอมาใช้วิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะพลวัต โดยเหตุการณ์ที่พิจารณาคือการส่งผ่านโหลดขนาด 80 MW จากระบบไฟฟ้ากำลังในภาคใต้ของประเทศไทยไปยังประเทศมาเลเซียซึ่งเชื่อมโยงด้วยสายส่ง 115 kV ในการส่งผ่านโหลดนั้นมีความจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์ระหว่างสองระบบเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขึ้นในสายส่งเชื่อมโยง 230 kV ระหว่างภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทย ผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบดิสครีตและการแปลงฟูเรียร์แบบช่วงเวลาสั้นให้ข้อมูลที่สำคัญซึ่งแสดงพฤติกรรมของระบบในสภาวะไดนามิกส์ในทั้งโดเมนเวลาและความถี่

4.2 การเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างประเทศไทยและมาเลเซีย

รูปที่ 1 แสดงการเชื่อมโยงด้วยสายส่ง 115 kV AC และระบบไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างประเทศไทยและมาเลเซีย EGAT สามารถส่งและรับกำลังไฟฟ้ากับบริษัท Tenaga Nasional Berhad (TNB) ของประเทศมาเลเซียผ่านสายส่งเชื่อมโยงทั้งสอง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่พิจารณาคือการส่งผ่านโหลดย่อยบางส่วนขนาด 80 MW ที่สถานีย่อยสะเดาผ่านสายส่ง 115 kV ไปยังระบบไฟฟ้ากำลังของมาเลเซีย ในการส่งผ่านโหลดนี้จะทำได้เมื่อมีการซิงโครไนซ์ระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสองประเทศ ข้อมูลความแตกต่างเฟสที่บันทึกโดย PMU ในระหว่างการซิงโครไนซ์ได้นำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายพฤติกรรมในสภาวะไดนามิกส์ของระบบไฟฟ้ากำลัง



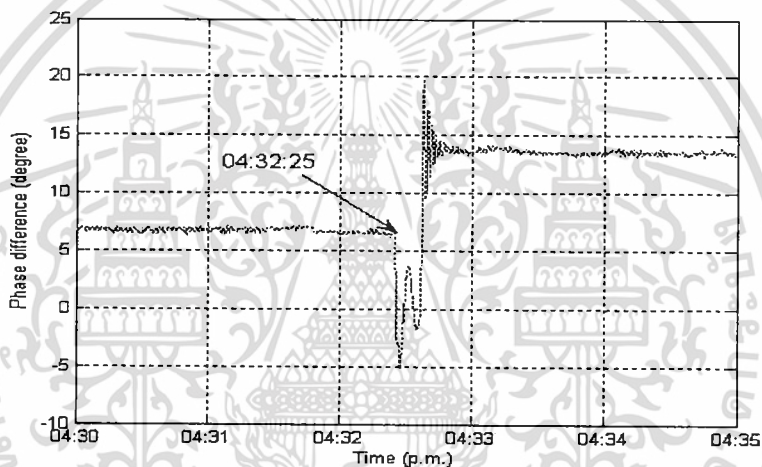
รูปที่ 1 การเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างประเทศไทยและมาเลเซีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ๒๘เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

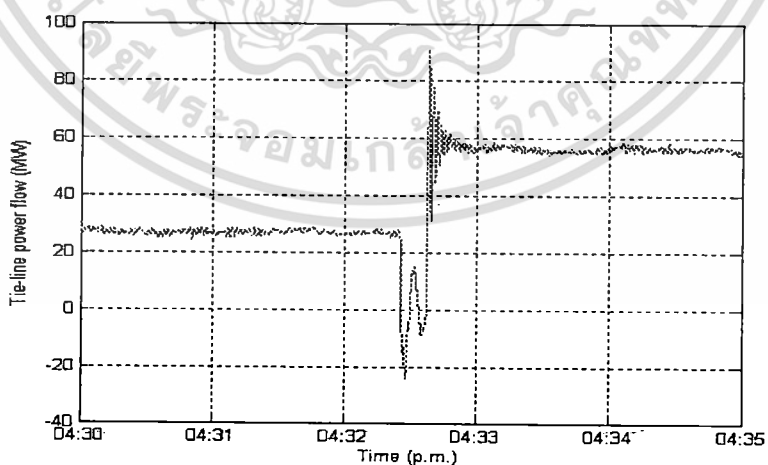
4.3 การวิเคราะห์เหตุการณ์โดยข้อมูล PMU

รูปที่ 2 แสดงสัญญาณความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสจล และ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในช่วง 4.30 p.m. - 4.35 p.m. ของวันที่ 20 มีนาคม 2549 ในการส่งผ่านโหลดนั้นจำเป็นต้องซิงโครไนซ์ระบบทั้งสองเข้าด้วยกัน ซึ่งการซิงโครไนซ์นั้นเกิดขึ้นที่เวลา 04:32:25 p.m. จะเห็นว่าในสัญญาณความแตกต่างเฟสนั้น มีทั้งค่าบวกและลบ โดยค่าบวกหมายถึงกำลังไฟฟ้านั้นไหลจากภาคกลางไปยังภาคใต้ ในทางตรงกันข้ามค่าลบหมายถึงกำลังไฟฟ้าไหลจากภาคใต้ไปยังภาคกลาง นอกจากนี้ค่าความแตกต่างเฟสยังแสดงให้เห็นถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV เชื่อมโยงระหว่างสองภาค

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล PMU จึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองตำแหน่งที่ติดตั้ง PMU กับข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยง 230 kV ระหว่างภาคกลางและภาคใต้ของ EGAT ดังแสดงในรูปที่ 3 เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองข้อมูลนั้นมีลักษณะไปในทางเดียวกัน

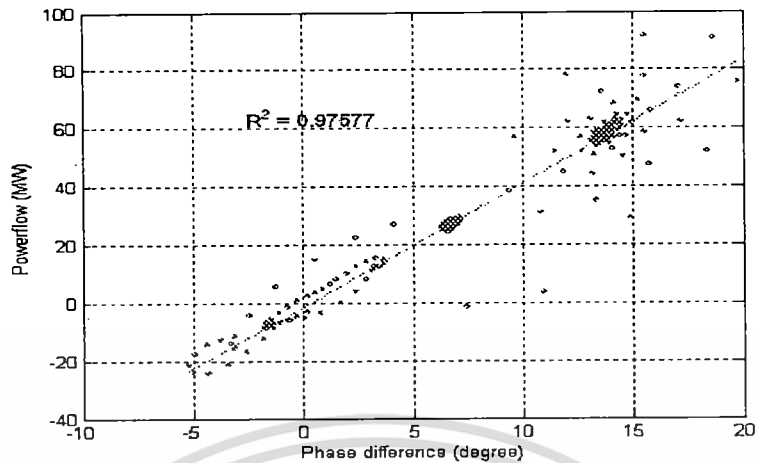


รูปที่ 2 ความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสจลและมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์



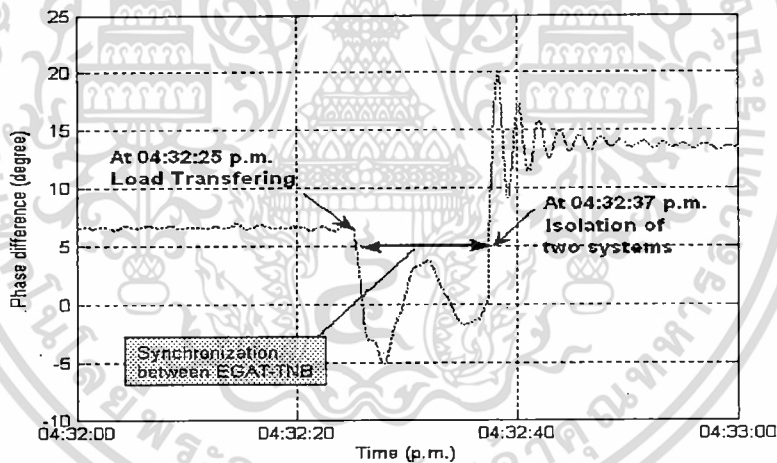
รูปที่ 3 การไหลของกำลังไฟฟ้าของ EGAT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ 29 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



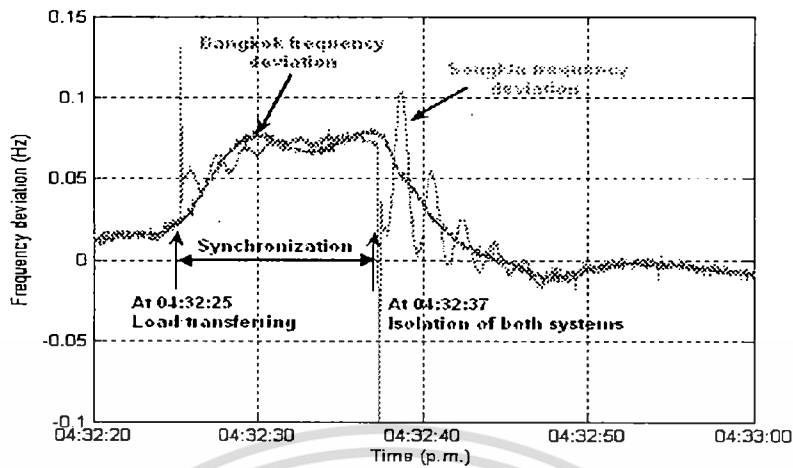
รูปที่ 4 เส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสองข้อมูลจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความแตกต่างเฟสและการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสองข้อมูลเป็นสมการเชิงเส้น ผลของกราฟเส้นตรงของทั้งสองข้อมูลแสดงในรูปที่ 4 ค่าสหสัมพันธ์ของทั้งสองข้อมูลมีค่า 0.976 ซึ่งใกล้เคียงหนึ่งมาก ดังนั้นทั้งสองข้อมูลมีสหสัมพันธ์ที่สูง



รูปที่ 5 ภาพขยายความแตกต่างเฟสระหว่าง สจล และ มหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์

รูปที่ 5 แสดงภาพขยายของความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสจล และ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ที่วัดจาก PMU ในช่วงการส่งผ่านโหลด ที่เวลา 04:32:25 p.m. ระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยกับมาเลเซียถูกซิงโครไนซ์เข้าด้วยกันผ่านสายส่ง 115 kV โดยระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยทำการส่งผ่านโหลดขนาด 80 MW ไปให้ระบบของมาเลเซีย จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างสองระบบเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและมีแนวโน้มที่จะเกิดการแกว่งอย่างรุนแรงขึ้นในช่วงการซิงโครไนซ์ หลังจากการส่งผ่านโหลดเสร็จสิ้น ทั้งสองระบบถูกแยกออกจากกันที่เวลา 4:32:37 p.m. ความแตกต่างของมุมเฟสเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและแกว่งอย่างรุนแรงอีกครั้งหนึ่ง ต่อมาการแกว่งของความแตกต่างของมุมเฟสจึงค่อย ๆ ลดลงหายไป



รูปที่ 6 ความเบี่ยงเบนความถี่ของสจล และ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ความถี่ของระบบในช่วงการส่งผ่านโหลดสามารถคำนวณได้จากข้อมูลของมูมเฟสที่ตำแหน่งติดตั้ง PMU แต่ละแห่ง โดยความเบี่ยงเบนของความถี่ (frequency deviation) แต่ละที่นั้นสามารถคำนวณได้จากค่าอนุพันธ์ของมูมเฟส ณ จุดติดตั้ง PMU ดังนี้

$$\Delta f_n = \frac{\delta_{n+1} - \delta_n}{360\Delta t_n} \quad (1)$$

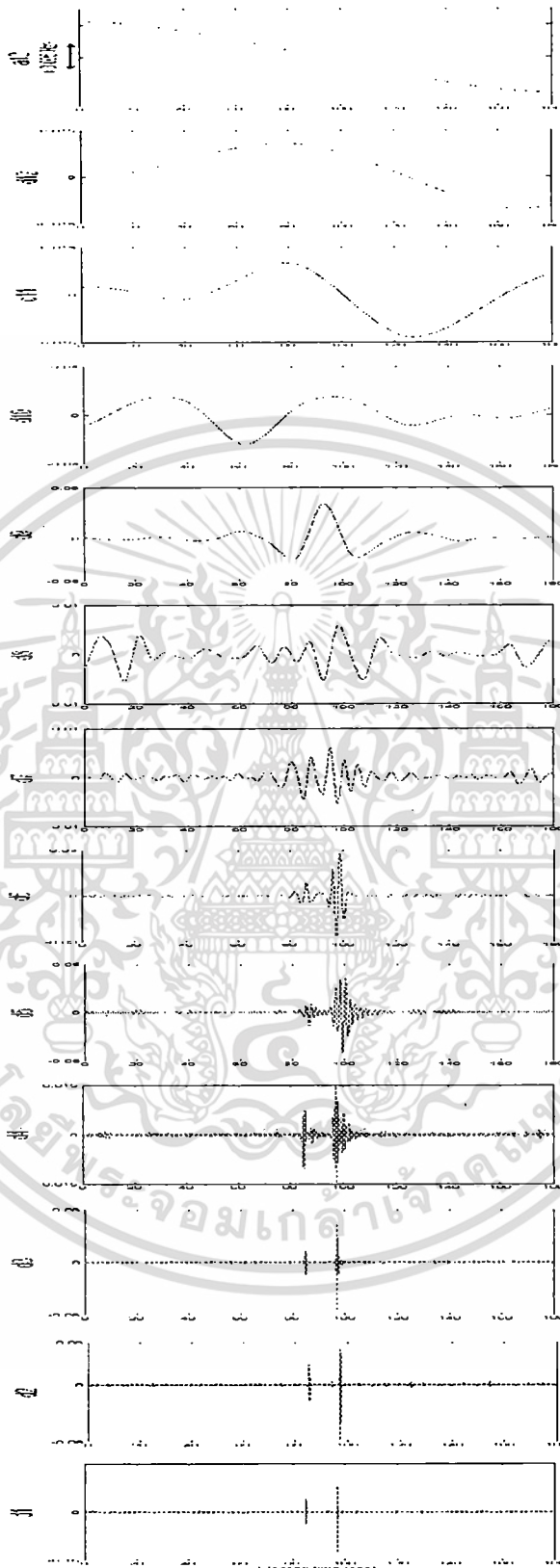
เมื่อ Δt_n เป็นช่วงเวลาการสุ่มของข้อมูลมูมเฟส δ_n ณ จุดติดตั้ง PMU แต่ละตำแหน่ง มีค่าเท่ากับ 1/25 วินาที และ n เป็นค่าจำนวนข้อมูลของมูมเฟสที่เก็บรวบรวมมา

รูปที่ 6 แสดงความเบี่ยงเบนของความถี่ของสจล และ มหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์ ในช่วงที่เกิดเหตุการณ์ ก่อนการส่งผ่านโหลด ความเบี่ยงเบนความถี่ของทั้งสองตำแหน่งนั้นเกือบจะเหมือนกัน ที่เวลา 04:32:25 p.m. ความเบี่ยงเบนความถี่ที่สงขลาเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดและเริ่มแกว่งออกจากความถี่ของสจล แสดงให้เห็นว่าการชิงโครไนซ์ระหว่างสองระบบนั้นไม่ค่อยดีนัก ในช่วงของการส่งผ่านโหลดนี้ ระบบไฟฟ้ากำลังของภาคใต้ถูกเชื่อมโยงเข้ากับทั้งระบบภาคกลางและมาเลเซีย จึงส่งผลให้เกิดการแกว่งระหว่างระบบประเทศไทยและมาเลเซียซึ่งสมมูลกับการแกว่งของสองเครื่องจักรไฟฟ้าผ่านทางสายส่งเชื่อมโยง เสถียรภาพของทั้งสองระบบอาจจะเลวลงไปกว่านี้ถ้าการชิงโครไนซ์ระหว่างสองระบบยังดำเนินการอยู่ เพื่อรักษาเสถียรภาพระบบ จึงจำเป็นต้องทำการชิงโครไนซ์สองระบบในระยะเวลานั้นๆ ในช่วงการส่งผ่านโหลด ที่เวลา 04:32:37 p.m., ระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยถูกแยกออกจากระบบของมาเลเซีย โหลดบางส่วนของ EGAT ได้ถูกนำไปฝากไว้กับระบบไฟฟ้ากำลังของมาเลเซีย ณ เวลาของการแยกจากกันของทั้งสองระบบ โหมตการแกว่งระหว่างระบบถูกกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง การแกว่งในช่วงนี้มีความรุนแรงกว่าช่วงของการชิงโครไนซ์ระบบ หลังจากนั้นการแกว่งของความเบี่ยงเบนของความถี่ของมหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์ค่อยๆ ลดหายไป ความถี่ของมหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์กลับมาชิงโครไนซ์กับสจล อีกครั้ง

ต่อมาทำการตรวจสอบผลกระทบของการโอนย้ายโหลดต่อโหมตการแกว่งระหว่างระบบในสายส่ง 230 kV. ที่เชื่อมโยงระหว่างภาคกลางและภาคใต้ ดังแสดงในรูปที่ 8 ความถี่ของการแกว่งของความเบี่ยงเบนความถี่ที่มหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์อยู่ในช่วง 0.2-0.8 Hz ซึ่งเป็นความถี่ของโหมตการแกว่งระหว่างระบบ เพื่อที่จะแยกสัญญาณของโหมตการแกว่งระหว่างระบบออกจากความป่ายเบนความถี่ที่ มหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์ นั้น จำเป็นต้องใช้การแปลง.

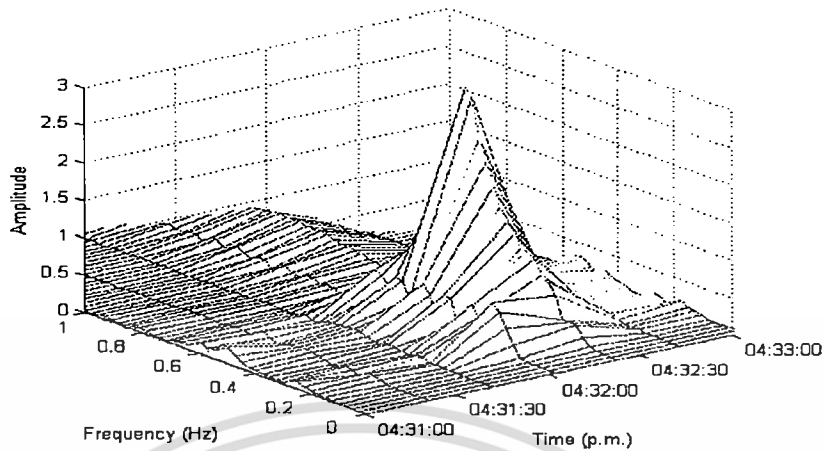
เวฟเล็ทแบบดีสครีตเข้ามา ในงานวิจัยนี้ Symlet wavelets function ขนาด 12 ระดับได้นำมาใช้เพื่อแยกสัญญาณ ความเบี่ยงเบนความถี่ที่ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในช่วง 04:31 p.m. ถึง 04:34 p.m. รูปที่ 7 แสดงผลการแปลงเวฟ เล็ทที่ประกอบไปด้วยส่วนสัญญาณละเอียด (detailed components d1-d12) จำนวน 12 สัญญาณ และส่วนสัญญาณ ประมาณ (approximated component, a12). จากผลการศึกษาในบทที่ 3 พบว่าความถี่ของโหมดเด่นของการแกว่ง ระหว่างระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.6 Hz. เพื่อหาสัญญาณละเอียดที่มีความถี่อยู่ในช่วงนี้ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ได้นำมาใช้วิเคราะห์ ผลปรากฏว่า ช่วงความถี่ของสัญญาณละเอียด d4, d5 และ d6 นั้นอยู่ในช่วง 0.6-2.0 Hz, 0.2-1.1 Hz, และ 0.17-0.6 Hz ตามลำดับ ดังนั้น สัญญาณละเอียด d4, d5 และ d6 อยู่ในช่วงของโหมดการแกว่งระหว่างระบบ เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของโหมดการแกว่งระหว่างระบบ ในที่นี้จึงใช้ผลรวมของสัญญาณย่อย d4+d5+d6 มาวิเคราะห์ เพื่อแสดงคุณลักษณะของโหมดการแกว่งระหว่างระบบในทั้งโดเมนความถี่และเวลา การแปลงฟูเรียร์ในช่วงเวลา สั้นจึงนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณ d4+d5+d6 รูปที่ 8 แสดงผล พบว่าความถี่ของโหมดการแกว่งเด่นระหว่างระบบอยู่ใน ช่วง 0.4-0.6 Hz เกิดขึ้นที่ 04:32:25 p.m. เหมือนกับที่ปรากฏในความเบี่ยงเบนความถี่ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าช่วงเวลาสั้นๆของการชิงโครไนซ์ระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยและมาเลเซียผ่านสาย ส่ง 115 kV และการแยกกันของทั้งสองระบบจะกระตุ้นโหมดการแกว่งของในสายส่ง 230 kV ที่เชื่อมโยงระหว่างภาค กลางและภาคใต้





รูปที่ 7 ผลการแปลงเวฟเล็ทของความเบี่ยงเบนความถี่ ณ มหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 33
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ผลการแปลงฟูเรียร์แบบช่วงเวลาสั้น

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการประยุกต์ระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ PMU ไปวิเคราะห์เหตุการณ์การส่งผ่านโหลดขนาด 80 MW จากระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยไปยังระบบของมาเลเซียโดยใช้ข้อมูล PMU ที่วัดมา ผลการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ในช่วงเวลาสั้นและการแปลงเวฟเล็ทแบบดีสครีตในทั้งโดเมนความถี่และเวลาพบว่าความถี่เด่นของโหมดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.6 Hz การส่งผ่านโหลดจากระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยไปยังมาเลเซียจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์ระบบเข้าด้วยกันในระยะเวลาดังกล่าวเพื่อรักษาเสถียรภาพระบบไว้ สังเกตได้ว่าในขณะที่ระบบทั้งสองซิงโครไนซ์เข้าด้วยกันและแยกออกจากกันนั้นจะทำให้เกิดการแกว่งของโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV ที่เชื่อมโยงระหว่างสองภาคซึ่งปรากฏอย่างชัดเจนในความเบี่ยงเบนของความถี่ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ผลการวิเคราะห์นี้เป็นประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติสำหรับการเชื่อมโยงกันของระบบประเทศไทยและมาเลเซีย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าแบบพื้นที่กว้างโดยใช้ PMU ซึ่งซิงโครไนซ์ด้วย GPS ในสายส่ง 230 kV เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทยเพื่อศึกษาคุณลักษณะการแกว่งของกำลังไฟฟ้า สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. คุณลักษณะเด่นของระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอคือการติดตั้ง PMU ในระดับเต้ารับไฟฟ้าที่พิกอ้าย 220 V โดยเต้ารับไฟฟ้าถูกใช้เป็นช่องทางในการวัดข้อมูลการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ค่าติดตั้งของระบบมอนิเตอร์ยังมีราคาถูกมากและข้อมูลเฟสเซอร์แรงดันที่วัดมายังมีความถูกต้องเชื่อถือได้อีกด้วย
2. ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการประมวลสัญญาณได้แก่ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว การแปลงเวฟเล็ทแบบดิสคริต มาวิเคราะห์ข้อมูล PMU และการกำจัด noise ออกจากข้อมูลที่วัดได้จาก PMU อันเนื่องมาจากการสวิตช์ที่ปิดเปิดของโหลด นอกจากนี้การ fitting ข้อมูลค่าเฉลี่ยความแตกต่างของมุมเฟสที่วัดจาก PMU และค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของ EGAT ด้วยวิธีการสองน้อยที่สุดชี้ให้เห็นว่าข้อมูลทั้งสองมีสหสัมพันธ์ที่สูง ซึ่งแสดงถึงข้อมูลที่วัดได้จาก PMU ทางเต้ารับไฟฟ้า 220 V นั้นมีความถูกต้องเชื่อถือได้ ผลการตรวจจับการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ยังพบว่าโหมดเด่นของการแกว่งกำลังไฟฟ้าเป็นโหมดการแกว่งระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางและภาคใต้ซึ่งมีความถี่ประมาณ 0.4-0.5 Hz.
3. ระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ PMU ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์เหตุการณ์การส่งผ่านโหลดขนาด 80 MW จากระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยไปยังระบบไฟฟ้ากำลังของมาเลเซียโดยใช้ข้อมูล PMU ที่วัดมา ผลการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ในช่วงเวลาสั้นและการแปลงเวฟเล็ทแบบดิสคริตในทั้งโดเมนความถี่และเวลาพบว่าความถี่เด่นของโหมดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.6 Hz การส่งผ่านโหลดจากระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยไปยังมาเลเซียนั้นจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์ระบบเข้าด้วยกันในระยะเวลาสั้นๆ เพื่อรักษาเสถียรภาพระบบไว้ สังเกตได้ว่าในขณะที่ระบบทั้งสองซิงโครไนซ์เข้าด้วยกันและแยกออกจากกันนั้นจะทำให้เกิดการแกว่งของโหมดเด่นของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 230 kV ที่เชื่อมโยงระหว่างสองภาคซึ่งปรากฏอย่างชัดเจนในความถี่ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ระบบมอนิเตอร์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอมีข้อดีมากมายที่กล่าวข้างต้นแล้วยังเพิ่มความยืดหยุ่นสูงมากสำหรับนักวิจัยในระดับมหาวิทยาลัยในการวิเคราะห์ข้อมูลจริงเพื่อให้เข้าใจคุณลักษณะทางกายภาพที่ถูกต้อง นอกจากนี้ผลการวิจัยจากระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติในการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย จึงคาดหวังได้ว่าระบบมอนิเตอร์ที่นำเสนอจะนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้ากำลังจริงต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 6, no. 2, pp. 10-15, Apr. 1993.
- [2] K. E. Martin et al, "IEEE standard for synchrophasors for power systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 1, pp. 73-77, 1998.
- [3] A. G. Phadke, J. S. Thorp, and K. J. Karimi, "State estimation with phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no.1, pp. 233-241, Feb.1986.
- [4] R. O., Jr. Burnett, M. M. Butts, T. W. Cease, V. Centeno, G. Michel, R. J. Murphy, and A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements of a power system event," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1643-1650, Aug. 1994.
- [5] C. W. Liu, J. S. Thorp, J. Lu, R. J. Thomas, and H. D. Chiang, "Detection of transiently chaotic swings in power systems using real-time phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1285-1292, Aug. 1994.
- [6] V. Centeno, J. De La Ree, A. G. Phadke, G. Michel, J. Murphy, and R. Burnett, "Adaptive out-of-step relaying using phasor measurement techniques," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 10, no. 1, pp. 25-30, Jan. 1997.
- [7] O. Faucon and L. Dousset, "Coordinated defense plan protects against transient instabilities," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 10, no. 3, pp. 22-26, July 1997.
- [8] B. Fardanesh, S. Zelingher, A. P. Sakis Meliopoulos, G. Cokkinides, and J. Ingleson, "Multifunctional synchronized measurement network," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 11, no. 1, pp. 26-30, Jan. 1998.
- [9] D. N. Kosterev, J. Esztergalyos, and C. A. Stigers, "Feasibility study of using synchronized phasor measurements for generator dropping controls in the Colstrip System," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 755-761, Aug.1998.
- [10] I. Kanwa, R. Grondin, and Yves Hebert, "Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems – a decentralized /hierarchical approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.16, no. 1, pp. 136-153, Feb. 2001.
- [11] B. Milosevic and M. Begovic, "Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 121-127, Feb. 2003.
- [12] M. Begovic, D. Novosel, D. Karlsson, C. Henville, and G. Michel, "Wide-area protection and emergency control," *Proc. of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 876 – 891, May 2548.
- [13] J. F. Hauer, D. Trudnowski, G. Rogers, W. A. Mittelstadt, W. H. Litzemberger, and J. Johnson, "Keeping an eye on power system dynamics," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 10, no. 4, pp. 50-54, Oct. 1997.
- [14] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, R. Adapa, W. H. Litzemberger, and M. K. Donnelly, *Direct analysis of wide area dynamics*. Section 11.8, pp.11-82 through 11-120 of *The Electric Power Engineering Handbook*, L.L. Grigsby ed., CRC Press, 2001.

- [15] J. F. Hauer and J. G. DeSteese, "A tutorial on detection and characterization of special behavior in large electric power systems," Pacific Northwest National Laboratory, July 2004.
- [16] J. F. Hauer, "List of working documents produced with support by the WAMS outreach activity funded under the DOE program for transmission reliability," *DOE/CERTS Working Note*, Pacific Northwest National Laboratory, Jan. 19, 2549. These documents are available at
ftp://ftp.bpa.gov/pub/WAMS_Information/
<http://www.wecc.biz/rap.php?file=rap/committee.html>
http://www.transmission.bpa.gov/orgs/opi/Wide_Area/index.shtml
<http://phasors.pnl.gov/>
- [17] J. F. Hauer, K. E. Martin, and H. Lee, "Evaluating the dynamic performance of phasor measurement units: Experience in the western power system," *Interim Report of WECC Disturbance Monitoring Working Group*, Aug. 5, 2548. Available at websites in [16].
- [18] J. F. Hauer, W. A. Mittelstadt, K. E. Martin, J. W. Burns, and H. Lee, "Integrated dynamic information for the western power system: WAMS Analysis in 2548," *Interim Report of the WECC Disturbance Monitoring Working Group*, Dec. 5, 2548. Available at websites in [16].
- [19] J. Y. Cai, Zhenyu Huang, J. Hauer, and K. Martin, "Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America," *Proc. 2548 Asia and Pacific IEEE/PES Trans & Distr. Conf. Exhib.*, pp. 1-7.
- [20] J. F. Hauer, N. B. Bhatt, K. Shah, and S. Kolluri, "Performance of "WAMS East" in providing dynamic information for the North East blackout of August 14, 2003," *Proc. 2004 IEEE PES General Meeting*, vol. 2, pp. 1685 – 1690.
- [21] Eastern Interconnection Phasor Project: Real-Time Dynamic Monitoring System, available at
EIPP Project Information: <http://phasors.pnl.gov>
WECC WAMS Effort: ftp://ftp.bpa.gov/pub/WAMS_Information/
- [22] M. Donnelly, M. Ingram, and J. R. Carroll, "Eastern Interconnection Phasor Project," *Proc. 39th Annual Hawaii Inter. Conf. Syst. Sci.*, vol. 10, pp. 245a.
- [23] C. Rehtanz, "Tack Force on Wide area monitoring and control for transmission capability enhancement," CIGRE WG C4.6.01, 2549.
- [24] J. Rasmussen and P. Jorgensen, "Synchronized phasor measurements of a power system event in Eastern Denmark," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 278-283, Feb. 2549.
- [25] X. Xie, Y. Xin, J. Xiao, J. Wu, and Y. Han, "WAMS applications in chinese power systems," *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 54-63, Jan. - Feb. 2549.
- [26] D. Karlsson, M. Hemmingsson, and S. Lindahl, "Wide area system monitoring and

- control," *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 2, no. 5, pp. 68-76, Sept. and Oct. 2004.
- [27] H. Saitoh, "GPS synchronized measurement applications in Japan," *Proc. 2002 IEEE/PES Transmission and Distribution Conf.*, vol. 1, pp.494 -499.
- [28] Bin Qiu, Ling Chen, V. Centeno, Xuzhu Dong, and Yilu Liu, "Internet based frequency monitoring network (FNET)," *Proc. 2001 IEEE Power Engineering*
- [29] Yilu Liu, GPS/internet based frequency monitoring network (FNET), Eastern Interconnect Phasor Project (EIPP) Meetings, April 19-20, 2548. available at <http://phasors.pnl.gov/EIPP Meetings.htm>
Virginia Tech FNET Project: <http://www.powerit.vt.edu>
- [30] Zhian Zhong; Chunchun Xu, B. J. Billian, Li Zhang, S. - J. S. Tsai, R. W. Conners, V. A. Centeno, A. G. Phadke, and Yilu Liu, "Power system frequency monitoring network (FNET) implementation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.20, no.4, pp.1914-1921, Nov. 2004.
- [31] TOSHIBA Corporation, *PMU Document*, 2001.
- [32] W. A. Wilkinson and M. D. Cox, "Discrete wavelet analysis of power system," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 2034-2044, Nov.1996.
- [33] The MathWorks, *MATLAB Wavelet Toolbox*, User's Guide, 2005.
- [34] The MathWorks, *MATLAB Signal Processing Toolbox*, User's Guide, 2005.

ภาคผนวก

ผลการศึกษาวิจัยจากโครงการนี้ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ 8th International Power Engineering Conferences (IPEC 2007) ระหว่าง 3-6 ธันวาคม 2007 ณ ประเทศสิงคโปร์ ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

Issarachai Ngamroo, Panlert Lappanakul, Nitus Voraphonpiput, Sanchai Dechanupaprittha, Yasunori Mitani and Jareerat Sakulrat (2007) Dynamic event analysis using synchronized PMUs via 220 V wall outlets. In *Proceedings of The 8th International Power Engineering Conference (IPEC2007)*, Singapore.



Dynamic Event Analysis using Synchronized PMUs via 220 V Wall Outlets

Issarachai Ngamroo, Panlert Lappanakul, Nitus Voraphonpiput, Sanchai Dechanupaprittha,
Yasunori Mitani and Jareerat Sakulrat

Abstract—This paper presents the dynamic analysis results of a system event in Thailand power network using a wide-area monitoring system based on synchronized phasor measurement units (PMUs). The salient feature of the proposed monitoring system is the convenient installation of PMU at 220V wall power outlets. The event considering here is a 80 MW load transferring from Thailand to Malaysia systems through a weak 115 kV tie-line. To perform load transferring, a synchronization between both systems is required. This causes a problem of frequency oscillation in a southern area of Thailand. Besides, this event severely excites the inter-area oscillation in a 230 kV tie-line between central and southern areas of Thailand. Analyzed results based on discrete wavelet decomposition and short-time Fourier Transform provide valuable information of the system dynamic behavior in both frequency and time domains.

Index Terms— Synchronized Phasor measurement units, Wide-area monitoring, Inter-area oscillation, Discrete wavelet decomposition, Least-squares regression, Short-time Fourier Transform

I. INTRODUCTION

THE interconnection between central and southern areas of Thailand 50 Hz power system by a 230 kV tie-line formulates a longitudinal structure. This interconnection causes a problem of inter-area oscillation between both areas. To monitor inter-area oscillations, the phasor measurement units (PMUs) which are synchronized based on the time stamp of the global positioning system (GPS) [1], [2] have been applied [3]-[6]. In these former works, phasor measurement systems are constructed in a transmission level. To increase the feasibility of the wide-area monitoring, a new PMU-based monitoring system with convenient installation at a distribution level, Internet based data transmission, easy

access for university researchers and cost-effective system is significantly expected.

Recently, the authors have proposed a wide-area monitoring system of the inter-area oscillation based on GPS-based synchronized PMUs developed in Thailand power system [7]. The main feature of the presented system is the convenient installation of PMUs at 220 V domestic outlets. Besides, the initial installation cost is extremely low. In the proposed system, PMUs are located at two universities which represent central and southern areas of Thailand power system. The PMU data transmission between both universities is performed via the Internet. Based on phasor voltages collected by PMUs, the phase difference between two universities can be calculated. The validity of the phase difference data of PMUs is verified by comparing with the actual tie-line power flow data of the Electricity Generation Authority of Thailand (EGAT) during steady-state conditions. As given in [7], the dominant frequency of inter-area oscillation is about 0.4-0.6 Hz. Besides, system identification has been applied to calculate the eigenvalue corresponding to the inter-area mode. The proposed system can monitor the variation of damping ratio and oscillation frequency of the inter-area mode in any time periods. It's not only indicates the oscillatory behavior of the inter-area mode, but also provides useful information of wide-area dynamic stability.

In this paper, the application of the proposed PMU-based monitoring system is the analysis of a power system event under a major disturbance. The power system event explained here is a 80 MW load transferring through a 115 kV line interconnection between Thailand and Malaysia systems. The phase difference data between central and southern areas during load transferring collected by PMUs is analyzed by signal processing techniques. First, the phase difference is compared with the actual tie-line power flow between both areas of EGAT. The correlation between the tie-line power flow data of EGAT and phase difference data measured by PMUs is evaluated. Next, the frequency deviation is calculated from PMU data. Subsequently, the discrete wavelet decomposition is applied to analyze the impact of the load transferring on the inter-area oscillation between central and southern areas. Besides, the short-time Fourier Transform is used to analyze an inter-area oscillation characteristic in both time and frequency domains. Analyzed results yield vital information for practical operation. Finally, the conclusion is given.

This work was supported by the Thailand Research Fund under Research Career Development Grant No. RSA4780015 and by the research grant of the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Issarachai Ngamroo and Panlert Lappanakul are with Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (e-mail knissara@kmitl.ac.th, tongmvp@hotmail.com)

Nitus Voraphonpiput is with Power System Analysis Department, Control and Protection, Electricity Generation Authority of Thailand (email nitus.v@egat.co.th)

Sanchai Dechanupaprittha and Yasunori Mitani are with Department of Electrical Engineering, Kyushu Institute of Technology, Fukuoka, Japan (e-mail: d300404d@tobata.isc.kyutech.ac.jp and mitani@ele.kyutech.ac.jp)

Jareerat Sakulrat is with Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, Thailand (e-mail: sjareerat@psu.ac.th)

II. PMU-BASED MONITORING SYSTEM

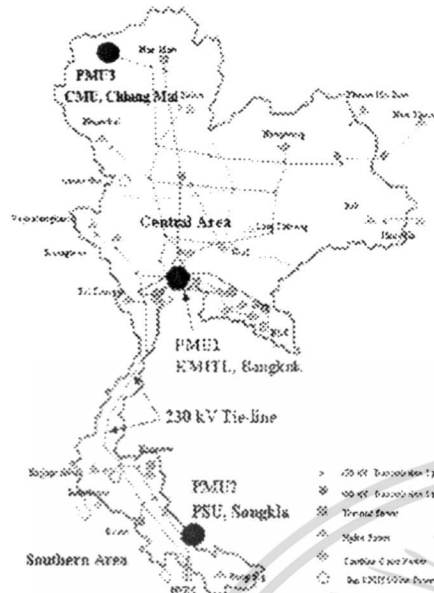


Fig. 1. Location of PMUs.

An overview of the Thailand power system is delineated in Fig.1. The EGAT is responsible for generation and transmission grids of 500 kV, 230 kV and 115 kV levels. The power generation capacity is about 26,459 MW. The maximum demand is 20,744 MW. The EGAT power system mainly consists of two areas i.e. the remote area (Southern area) and the remainder (Central, Northern and Northeastern areas). Here, the target area is the southern part. The installed capacity of the southern area is about 1,720 MW. On the other hand, the maximum demand of the southern area is about 1,760 MW. To supply power demands in the southern area, the 230 kV tie-line between central and southern areas is employed to transfer electrical power from the central to southern areas. This interconnection establishes a longitudinal structure between both areas. As a result, it causes an inter-area oscillation problem in this tie-line. To monitor the characteristic of the inter-area mode between both areas, PMUs are located at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok and Prince of Songkla University (PSU), Songkla, which represent central and southern areas, respectively. Additionally, one more PMU has been installed at Chiang Mai University (CMU), Chiang Mai, in the northern area.

The phasor measurement system employs a manufactured PMU as a commercial product, which is a Network Computing Terminal Type-A, NCT2000 of Toshiba [8, 9] as shown in Fig. 2. The PMU can measure a single-phase instantaneous voltage from 220 V wall outlet, with correcting its clock based on the time stamps of GPS. As the PMU uses the time stamps of GPS for its clock correction, the time

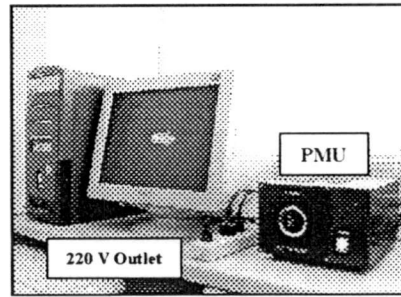


Fig. 2. PMU based monitoring system via 220 V outlet.

synchronization between PMUs located at distant places is easily accomplished by keeping their internal clocks synchronous with the time stamps of GPS. As given in [8, 9], the phasor voltage is computed by

$$\dot{V} = \frac{\sqrt{2}}{N} \left\{ \sum_{k=1}^N V_k \sin k\theta + j \sum_{k=1}^N V_k \cos k\theta \right\} \quad (1)$$

where, V is the phasor voltage. V_k is a sequential data of the instantaneous voltage of 220 V outlet sampled by an A/D converter, N is the sampling number of the voltage and θ is the sampling angle. For this apparatus, $N = 96$ and $\theta = 2\pi/N = 3.75$ deg.

Based on (1), the phase angle can be calculated by

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(\dot{V})}{\text{Re}(\dot{V})} \right] \quad (2)$$

where, $\text{Re}(\dot{V})$ and $\text{Im}(\dot{V})$ are the real part and the imaginary part of the phasor voltage \dot{V} , respectively. The phase angle δ is accumulated in the PMU as the time sequential data. Calculation in (2) provides phase angle referred to the GPS time. The PMU records the calculated phasor voltages every 40 ms (2 cycles) and measures at the domestic outlets for 20 minutes twice an hour, for example, 0.20-0.40 a.m. and 0.50-1.10 a.m. etc. Hence, there are 30,000 data of phasor voltages for 20 minutes. The measured phasor voltages at PSU and CMU are transmitted via the Internet to a server at KMITL.

III. OVERVIEW OF INTERCONNECTION BETWEEN THAILAND AND MALAYSIA POWER SYSTEMS

As shown in Fig. 3, there are two interconnections between Thailand and Malaysia power systems, i.e. a 115 kV AC link and an HVDC link. The EGAT can exchange electricity with the Tenaga Nasional Berhad (TNB) through AC and DC interconnections. The system event considering here is the transferring of partial loads about 80 MW at SADAO 115 kV substation to the Malaysia power grid. To transfer loads, a synchronization between both system is required. The phase difference data recorded by PMUs during synchronization are collected and used to analyze a system dynamic behavior as explained in the following parts.

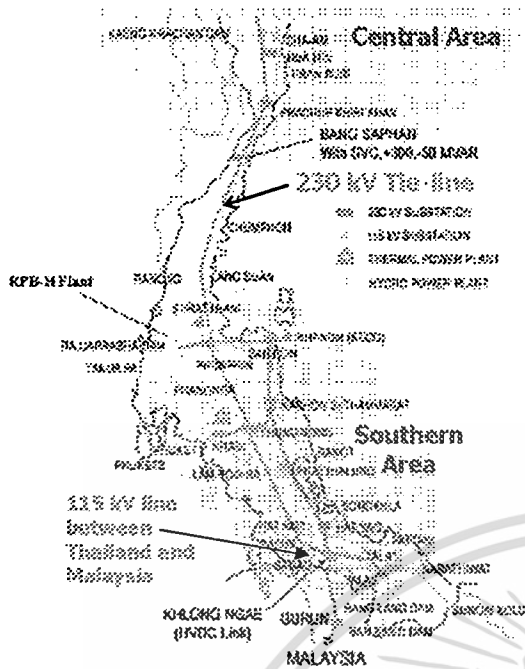


Fig. 3 Interconnection between Thailand and Malaysia.

IV. VALIDATION OF PMU DATA

Fig. 4 depicts a waveform of phase difference between Bangkok and Songkla from 4.30 p.m. to 4.35 p.m. on March 20, 2006. The load transferring by synchronization of two systems has been performed at 04:32:25 p.m. In a phase difference signal, there are both positive and negative phase differences. The positive phase difference implies that the real power flows from the central area to the southern area and vice versa. Moreover, the phase difference between two interconnected areas reflects the active power flow in a 230 kV tie-line between both areas.

To verify the validity of the PMU data, the phase difference is compared to the actual power flow of a 230 kV tie-line between central and southern areas of EGAT as demonstrated in Fig. 5. Obviously, the phase difference changes in the same fashion as the power flow.

Next, the correlation between the tie-line power flow data of EGAT and phase difference data measured by PMUs is evaluated by a least-squares regression. The linear equation with two variables is used as a regression model. The resulted least-squares linear equation of the power flow and phase difference can be delineated in Fig. 6.

To evaluate the fitness of both data, the correlation coefficient between two variables is calculated by

$$R^2 = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{[\sqrt{n\sum x^2 - (\sum x)^2}][\sqrt{n\sum y^2 - (\sum y)^2}]} \quad (3)$$

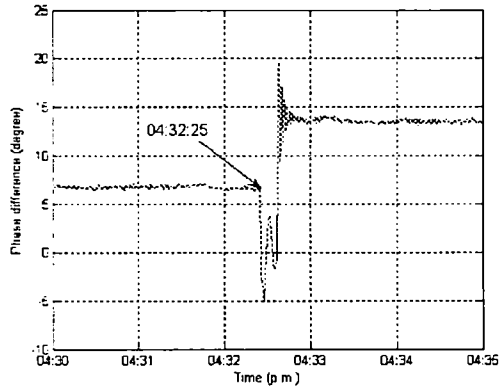


Fig. 4. Phase difference between Bangkok and Songkla of PMUs.

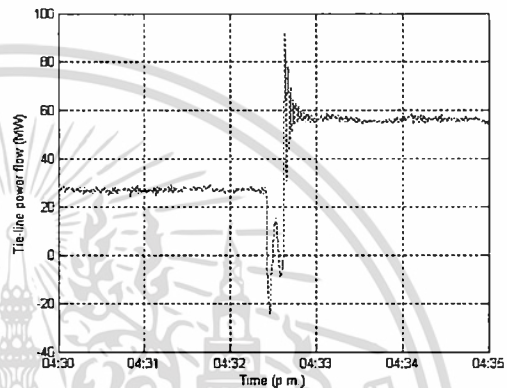


Fig. 5. Active power flow of EGAT.

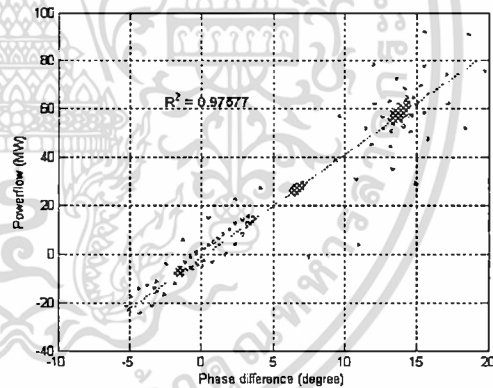


Fig. 6. Least-squares linear equation.

where x is phase difference data, y is power flow data, and n is a number of data. The correlation coefficient R^2 indicates the fitness of data. If R^2 is close to unity, then the power flow strongly correlates with the phase difference. If not, the correlation is weak. As given in Fig. 6, the correlation coefficient of two variables is nearly equal to one. The phase difference data measured by PMUs strongly correlates with

the power flow data of EGAT. This confirms the validity of the phase difference data of PMUs measured from 220 V wall outlets.

V. ANALYZED RESULTS

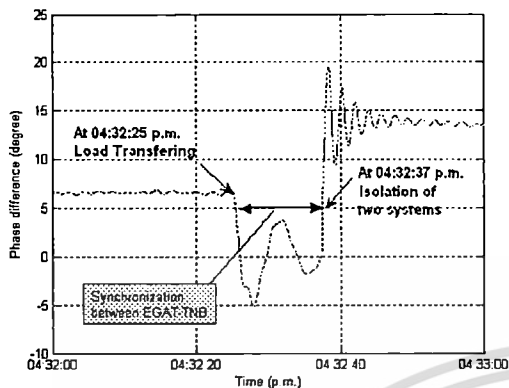


Fig. 7. Amplified phase difference waveform between Bangkok and Songkla.

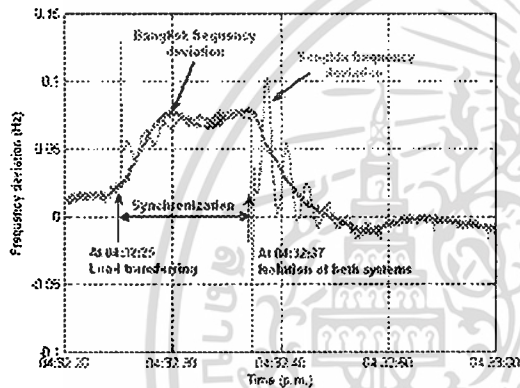


Fig. 8. Frequency deviations of Bangkok and Songkla.

Fig. 7 shows the amplified waveform of phase difference during load transferring. At 04:32:25 p.m. both systems are synchronized via a 115 kV line. Thailand system imports electricity from the Malaysia system to supply 80 MW loads. It can be seen that the phase difference between both areas abruptly changes and tends to severely oscillate during synchronization. After the load transferring is completed, both systems are isolated at 4:32:37 p.m. The phase difference immediately increases and oscillates. Eventually, the phase difference reaches a new steady-state value.

Next, the system frequency during load transferring is calculated from phase data at each PMU's location. The time derivative of phase angle corresponds to the deviation of system frequency. Accordingly, the frequency deviation is calculated by

$$\Delta f_n = \frac{\delta_{n+1} - \delta_n}{360\Delta t_n} \quad (4)$$

where Δt_n is a sampling interval of sequential phase angle data δ_n at each location, that is 1/25 second and n is the number of accumulated phase angle data. Therefore, the variation of frequency at either location can be observed by PMUs with accumulating the sequential frequency deviation data Δf_n .

Fig. 8 depicts the frequency deviations of Bangkok and Songkla during the event. Before load transferring, frequency deviations of both locations are almost the same. At 04:32:25 p.m. the frequency deviation of Songkla abruptly increases. It begins to oscillate and tends to apart from the frequency deviation of Bangkok. The central and southern areas can not synchronize well. During load transferring, the southern area is connected to both central areas of Thailand and Malaysia system. As a result, Thailand system swings against Malaysia system. This is equivalent to an oscillation between two machines through a weak tie-line. Stability of both systems may be deteriorated if a synchronous link is still performed. To prevent the electricity interruption, it is necessary to perform a synchronous link in a few seconds during load transferring. At 04:32:37 p.m., Thailand system is isolated from Malaysia system. The partial loads of EGAT transmission grid are completely transferred to the TNB, Malaysia. At the time of system isolation, the inter-area mode is also excited again, the oscillation is more dominant than that during system synchronization. Subsequently, the frequency deviation of Songkla damps out and synchronizes with that of Bangkok again.

Next, the impact of load transferring on the inter-area oscillation mode in a 230 kV tie-line between central and southern areas of Thailand system is investigated. It can be observed in Fig. 8 that the frequency deviation at Songkla oscillates at the frequency of the inter-area mode (0.2-0.8 Hz) [10]. To extract the signals with the frequency of the inter-area mode from the Songkla frequency deviation, the discrete wavelet decomposition is applied. Here, the Symlet wavelets function with 12 levels [11], [12] is used to decompose the frequency deviation signal of Songkla from 04:31 p.m. to 04:34 p.m. Fig. 9 depicts the wavelet decomposition results which consist of 12 detailed components (d1-d12) and the approximated component (a12). Based on analyzed results in [7], the oscillation frequency of the dominant inter-area mode is around 0.4-0.6 Hz. To find the detailed components which have an oscillation frequency in the range of the dominant inter-area mode, the Fast Fourier Transform is applied. As a result, the frequency ranges of the wavelet d4, d5 and d6 elements are 0.6-2.0 Hz, 0.2-1.1 Hz, and 0.17-0.6 Hz, respectively. Thus, d4, d5 and d6 elements are in the vicinity of the inter-area oscillation mode. The summation of d4, d5 and d6 signals (d4+d5+d6) are used to analyze the dynamic characteristic of the inter-area mode.

VII. REFERENCES

- [1] A.G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *IEEE Computer Application in Power*, vol.6, no.2, pp. 10-15, Apr. 1993.
- [2] K.E. Martin et al, "IEEE standard for synchrophasors for power systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.3, no.1, pp. 73-75, 1998.
- [3] J.F. Hauer, D. Trudnowski, G. Rogers, W.A. Mittelstadt, W.H. Litzemberger, and J. Johnson, "Keeping an eye on power system dynamics," *IEEE Computer Application in Power*, vol. 10, no. 4. pp. 50-45, 1997.
- [4] J.F. Hauer, W.A. Mittelstadt, R. Adapa, W.H.Litzemberger, and M.K. Donnelly, *Direct analysis of wide area dynamics. Section 11.8, pp. 11-82 through 11-120 of The Electric Power Engineering Handbook*. L.L.Grigsby ed., CRC Press, 2001.
- [5] J. F. Hauer, N.B. Bhatt, K. Shah, and S. Kolluri, "Performance of "WAMS East" in providing dynamic information for the North East blackout of August 14, 2003," *Proc. IEEE PES General Meeting*, 2004, pp. 1685 – 1690.
- [6] J. Rasmussen and P. Jorgensen, "Synchronized phasor measurements of a power system event in Eastern Denmark," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 278-283, 2006.
- [7] I. Ngamroo, Y. Mitani, S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, P. Jintakosonwit, Y. Ota, H. Ukai, J. Sakulrat, A. Sode-Yome and M. Watanabe, "Detection of power system oscillations using synchronized phasor measurement units through home power outlets," *Proceedings of the 7th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2006)*, Hong Kong, 2006, No. 326.
- [8] R. Tsukui, P. Beaumont, T. Tanaka and K. Sekiguchi, "Power system protection and control utilizing Intranet technology," *Power Engineering Journal*, vol. 15, 249-255, 2001.
- [9] TOSHIBA Corporation, *PMU Document*, 2001.
- [10] G. Rogers. *Power System Oscillations*, Kluwer Academic, 2000.
- [11] W. A. Wilkinson and M. D. Cox, "Discrete wavelet analysis of power system," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 2034-2044, 1996.
- [12] MATLAB Wavelet Toolbox, User's Guide, The MathWorks, 2005.
- [13] MATLAB Signal Processing Toolbox, User's Guide, The MathWorks, 2005.