



การประเมินผลกระทบของการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
ที่มีต่ออุปกรณ์วิกฤต

สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



Assessment of Impacts of Distribution System Short Circuit
on the Installed Critical Equipment

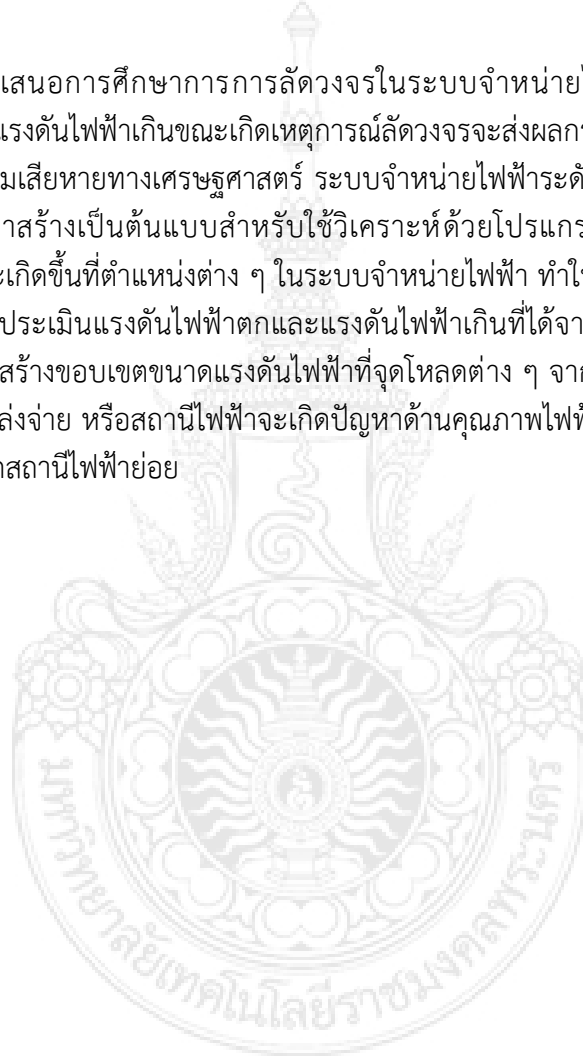
Surasit Prakobkit

This Research in Funded by Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Phra Nakorn
Year 2016

ชื่อเรื่อง : การประเมินผลกระทบของการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์วิกฤต
ผู้วิจัย : นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร
พ.ศ. : 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีผลต่ออุปกรณ์วิกฤตแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟและก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐศาสตร์ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคถูกนำมาสร้างเป็นต้นแบบสำหรับใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการจำลองเหตุการณ์ลัดวงจรจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้ทราบขนาดแรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร เพื่อทำการประเมินแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินที่ได้จากแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยซึ่งเกิดจากการทำซ้ำ จากนั้นได้สร้างขอบเขตขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหลดต่าง ๆ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจุดโหลดที่อยู่ใกล้แหล่งจ่าย หรือสถานีไฟฟ้าจะเกิดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์วิกฤตน้อยกว่าจุดโหลดที่อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อย



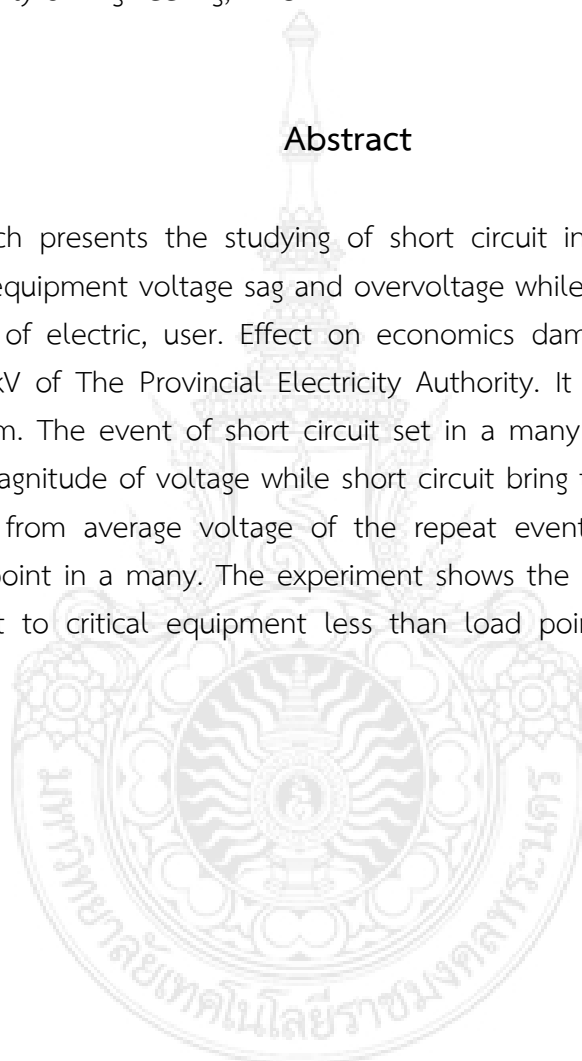
Title : Assessment of Impacts of Distribution System Short Circuit on the Installed Critical Equipment

Researcher : Mr.Surasit Prakobkit, Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering, RMUTP

Year : 2016

Abstract

This research presents the studying of short circuit in distribution system that affect to critical equipment voltage sag and overvoltage while short circuit event. Lead into, the quality of electric, user. Effect on economics damaged, Distribution system voltage level 22kV of The Provincial Electricity Authority. It is the analysis model by computer program. The event of short circuit set in a many distribution systems. The analysis result, Magnitude of voltage while short circuit bring to assessment voltage sag and overvoltage from average voltage of the repeat event. Then, set boundary of voltage at load point in a many. The experiment shows the problem of the quality of electric be affect to critical equipment less than load point close connection with substation.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการประเมินผลกระทบของการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์
วิกฤตนี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ของคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สมชาย ทรงศิริ และผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือ
ตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน ผู้วิจัยรู้สึก
ซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชา
ความรู้แก่คณะผู้วิจัย

สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย	2
1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.3 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน	10
2.4 ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	11
2.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า	26
บทที่ 3 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า	31
3.1 บทนำ	31
3.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร	36
4.1 บทนำ	36
4.2 การประเมินขนาดแรงดันไฟฟ้าตกของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด	36
4.3 การประเมินขนาดแรงดันไฟฟ้าเกินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม	73
ผู้วิจัย	74



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด	32
3.2	ข้อมูลโหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด	34



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง	4
2.2	การเชื่อมต่อของอุปกรณ์แบบระบบเรเดียล	4
2.3	การเชื่อมต่อของอุปกรณ์แบบระบบโครงข่าย	5
2.4	ไดอะแกรมการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสเดียว	6
2.5	ไดอะแกรมการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน	7
2.6	ไดอะแกรมการจัดวางแบบบัสประธานคู่และเบรกเกอร์คู่	8
2.7	ไดอะแกรมการจัดวางแบบบัสวง	9
2.8	ไดอะแกรมการจัดวางบัสแบบเบรกเกอร์ครึ่ง	10
2.9	ส่วนประกอบของระบบป้องกัน	10
2.10	ประเภทของเหตุการณ์ฟอลต์	11
2.11	เหตุการณ์ฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	12
2.12	รูปคลื่นกระแสฟอลต์สมมาตรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่จ่ายโหลด	13
2.13	วงจรสสมมูลสำหรับพิจารณาเหตุการณ์ฟอลต์ 3 เฟส	15
2.14	รูปคลื่นกระแสฟอลต์กรณี $\alpha - \theta = 90^\circ$	16
2.15	โหลด 3 เฟส	18
2.16	ไดอะแกรมเส้นเดียว	20
2.17	วงจรสสมมูลเปอร์ยูนิต	22
2.18	วงจรสสมมูลเทเวนิน	22
2.19	ระบบแบบเรเดียลขณะเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟส	23
2.20	วงจรสสมมูลการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	25
2.21	ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 6 บัส	26
3.1	ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด	31
4.1	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 1 มีขนาดเท่ากับ 0.834 p.u.	36
4.2	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 2 มีขนาดเท่ากับ 0.834 p.u.	37
4.3	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 3 มีขนาดเท่ากับ 0.834 p.u.	37
4.4	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 4 มีขนาดเท่ากับ 0.798 p.u.	38
4.5	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 5 มีขนาดเท่ากับ 0.798 p.u.	38
4.6	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 6 มีขนาดเท่ากับ 0.798 p.u.	39
4.7	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 7 มีขนาดเท่ากับ 0.866 p.u.	39
4.8	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 8 มีขนาดเท่ากับ 0.861 p.u.	40
4.9	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 9 มีขนาดเท่ากับ 0.859 p.u.	40
4.10	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 10 มีขนาดเท่ากับ 0.859 p.u.	41
4.11	แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 11 มีขนาดเท่ากับ 0.858 p.u.	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหตุการณ์ลัดวงจร (Short Circuit) อาจเกิดขึ้นจากธรรมชาติ เช่น เกิดจากกิ่งไม้หรือต้นไม้พาดลงบนสายตัวนำหรืออาจเกิดจากความผิดพลาดของมนุษย์ เช่น รถยนต์ชนเสาไฟฟ้า ทุกครั้งที่เกิดลัดวงจรขึ้นภายในระบบไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าไหลมากผิดปกติถ้าเราไม่มีการป้องกันหรือกำจัดจุดที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบอย่างรวดเร็วก็จะทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้ การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดของระบบก็ได้แต่ส่วนใหญ่จะเกิดที่สายส่งเหนือดิน (Overhead) ดังนั้นการศึกษา และวิเคราะห์เหตุการณ์ลัดวงจรจึงเป็นสิ่งจำเป็นในระบบไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) รีเลย์ (Relay) และฟิวส์ (Fuse) เป็นต้น หากทราบกระแสลัดวงจรก็จะทำให้เราสามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้ถูกต้องและเหมาะสมได้ การเกิดลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดีต้องมีความน่าเชื่อถือสูง มีเสถียรภาพในการทำงาน และมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบในอัตราที่ต่ำ ซึ่งความรุนแรงของเหตุการณ์ลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะผันแปรโดยตรงกับขนาดของกระแสลัดวงจร ประเภทของการลัดวงจร ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร ซึ่งระดับความรุนแรงของกระแสลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการปลดวงจรของระบบป้องกัน ปัญหาที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังปัญหาคุณภาพไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟ การหาค่าอุปกรณ์วิกฤตจึงถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการหาแนวทางป้องกันปัญหาให้กับผู้ใช้ไฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การเกิดลัดวงจร
- 1.2.3 เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับหาค่าอุปกรณ์วิกฤตในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 การวิเคราะห์การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.3.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้าขณะเกิดลัดวงจรที่มีผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟ
- 1.3.3 ประมวลผลจากโปรแกรมจำลองการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.3.4 ประเมินผลโดยใช้กรณีศึกษาโดยสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทบทวนวรรณกรรม
- 1.4.2 กำหนดแนวทางของปัญหา
- 1.4.3 เก็บรวบรวมข้อมูลการประเมินผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าเกิน
- 1.4.4 เขียนรูปแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.4.5 ประมวลผลทดสอบและวิเคราะห์ผล
- 1.4.6 สรุปผลการทดสอบ
- 1.4.7 จัดพิมพ์รูปเล่มงานวิจัย
- 1.4.8 ถ่ายทอดและเผยแพร่ผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

- 1.5.1 การเผยแพร่ผลงานทางเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- 1.5.2 เผยแพร่ในการประชุมสัมมนาวิชาการ

1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งจะสามารถอธิบายขอบเขตของเนื้อหาในแต่ละบทได้ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำของโครงการวิจัย ซึ่งได้กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา รวมถึงได้กำหนดขอบเขต และวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางให้กับโครงการวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้สำหรับโครงการวิจัยฉบับนี้ โดยจะกล่าวถึงการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนประกอบของระบบป้องกัน รวมถึงขนาดของกำลังขณะลัดวงจร

บทที่ 3 เป็นการออกแบบเพื่อสร้างแบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหนด โดยใช้ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

บทที่ 4 เป็นการแสดงผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งจะได้กราฟค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะที่มีต่อโครงการวิจัยฉบับนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าในภาพรวมของระบบสถานะปกติและสถานะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบป้องกัน โดยระบบป้องกันที่ดีต้องสร้างความเชื่อถือได้ให้กับผู้ประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรม ผู้ใช้ไฟที่เป็นบ้านเรือนของประชาชน

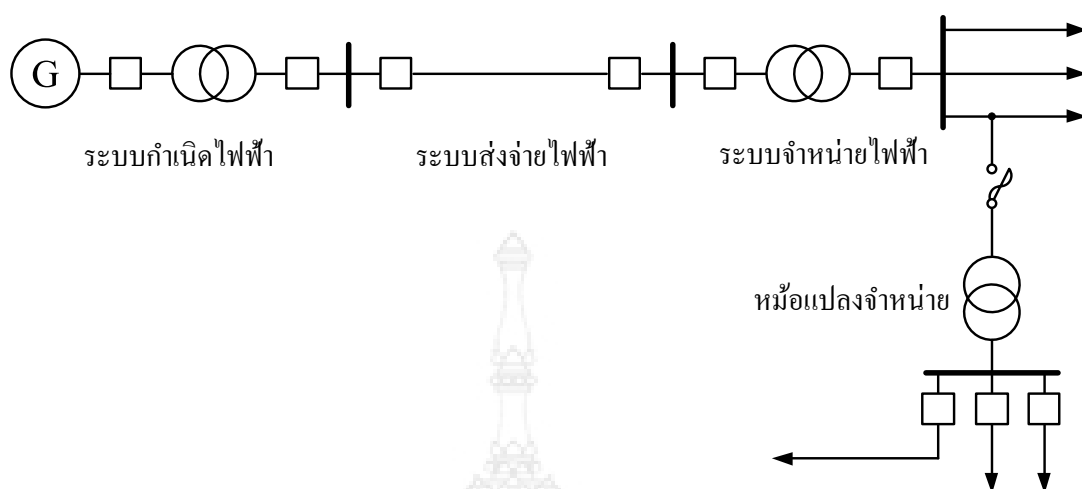
2.2 การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วยกัน 3 ส่วน คือ ระบบกำเนิดไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยที่การทำงานในแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ระบบกำเนิดไฟฟ้า (Generation System) คือ ระบบที่มีการเปลี่ยนพลังงานในรูปอื่นมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นพลังงานจากธรรมชาติ เช่น น้ำ ลม แสงอาทิตย์ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากธรรมชาติดังกล่าวมาเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนมากจะมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 20 kV เนื่องจากข้อจำกัดทางฉนวนของเครื่องกำเนิดมีผลต่อการลงทุนด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดจะถูกส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าโดยส่งเข้าที่ลานไกวไฟฟ้าเพื่อปรับระดับขนาดแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามมาตรฐานของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งลานไกวไฟฟ้า (Switchyard) เป็นส่วนที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระหว่างระบบกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า (Transmission System) คือ ระบบสายส่งที่รับพลังงานไฟฟ้าจากลานไกวไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่ระบบกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ไกลจากผู้บริโภค ดังนั้นจึงต้องอาศัยระบบส่งจ่ายไฟฟ้าส่งต่อพลังงานไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามมาตรฐานของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นส่วนที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

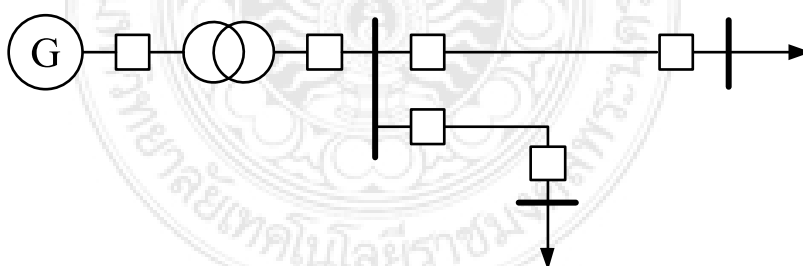
ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) คือ ระบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อจะจำหน่ายให้กับโหลด ผู้ใช้ไฟ โดยระบบจำหน่ายจะเริ่มจากสถานีไฟฟ้าย่อยและมีหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถแสดงไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากภาพที่ 2.1 จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง เป็นอุปกรณ์กำลังที่มีความสำคัญในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ การจัดเรียงอุปกรณ์กำลังโดยเชื่อมต่อเข้าด้วยกันให้เป็นระบบเพื่อส่งจ่ายพลังงานสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ

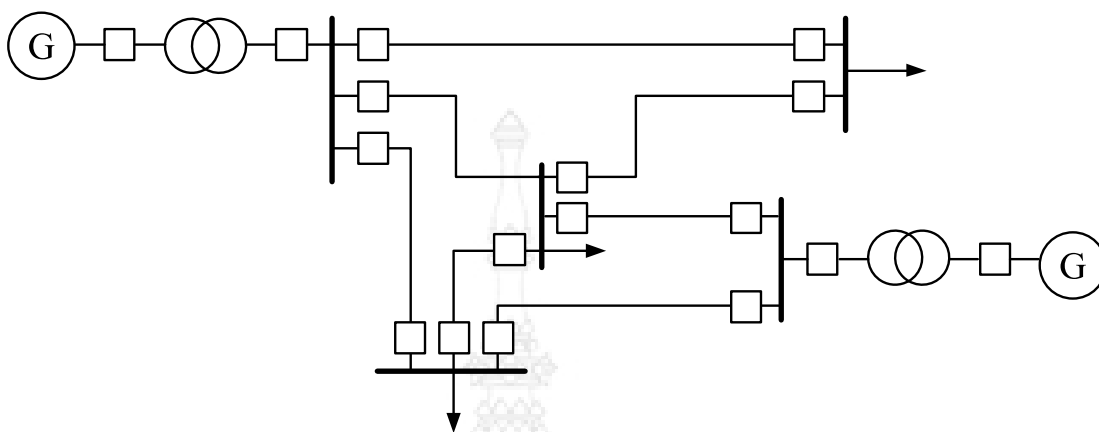
1. ระบบเรเดียล (Radial System) คือ ระบบที่กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะไหลไปยังโหลดในทิศทางเดียว แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์แบบระบบเรเดียล

จากภาพที่ 2.2 โครงสร้างของระบบเมื่อเกิดฟอลต์จะไม่สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดทั้งระบบ หากเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker, CB) เปิดวงจรที่ต้นทางโหลดที่อยู่ถัดไปจะถูกปลดจากระบบไปด้วย จึงทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างต่ำ แต่ข้อดีก็คือเป็นระบบที่ลงทุนต่ำ

2. ระบบโครงข่าย (Network System) คือ ระบบที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 แหล่งขึ้นไป โดยที่กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสามารถไหลไปยังโหลดได้หลายทิศทาง แสดงได้ดังภาพที่ 2.3

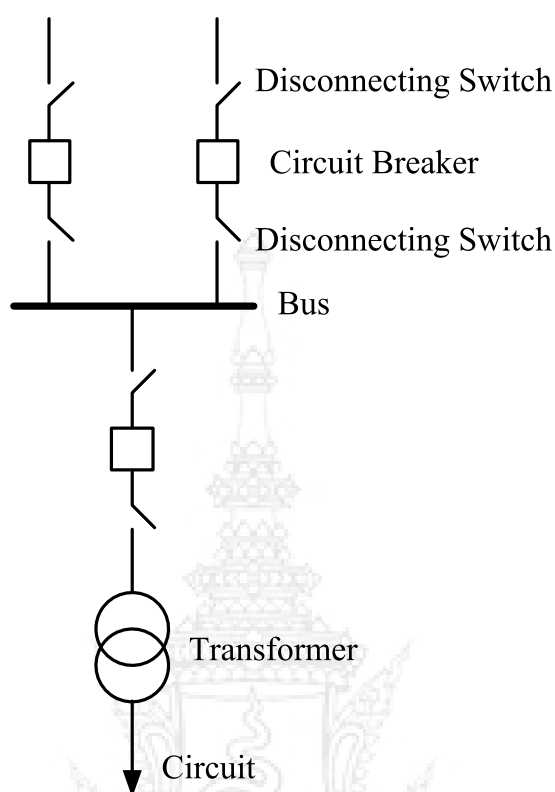


ภาพที่ 2.3 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์แบบระบบโครงข่าย

โครงสร้างของระบบในภาพที่ 2.3 เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในระบบ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะปลดวงจรที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบ แต่ยังมีวงจรที่เป็นวงรอบปิดเชื่อมต่อกันอยู่จึงทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า และกระแสฟอลต์จะแบ่งไหลที่จุดต่อร่วม โดยจุดต่อร่วมดังกล่าวจะใช้สัญลักษณ์บัส (Bus) แทนสถานีไฟฟ้า (Substation) ซึ่งเราสามารถอธิบายสถานีไฟฟ้าได้ดังนี้

สถานีไฟฟ้า เป็นสถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม (Control Equipment) ให้ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ เช่น แรงดัน ความถี่ การไหลของพลังงานไฟฟ้า โดยมีสายส่งหรือโรงจักรไฟฟ้าเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ส่งผ่านพลังงานคือหม้อแปลงไฟฟ้า และติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Equipment) เพื่อปลดอุปกรณ์หลักขณะเกิดฟอลต์ การจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าเพื่อให้สะดวกในการรับและส่งพลังงานไฟฟ้า โดยการจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องคำนึงถึง การลงทุน ความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) ความมั่นคงของการจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Security) ความยืดหยุ่นคล่องตัว (Flexibility) ความสะดวกในการเข้าทำงานบำรุงรักษา โดยการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทำได้หลายแบบ แต่ในบทเรียนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะที่ใช้กันเป็นจำนวนมากซึ่งอธิบายได้ดังนี้

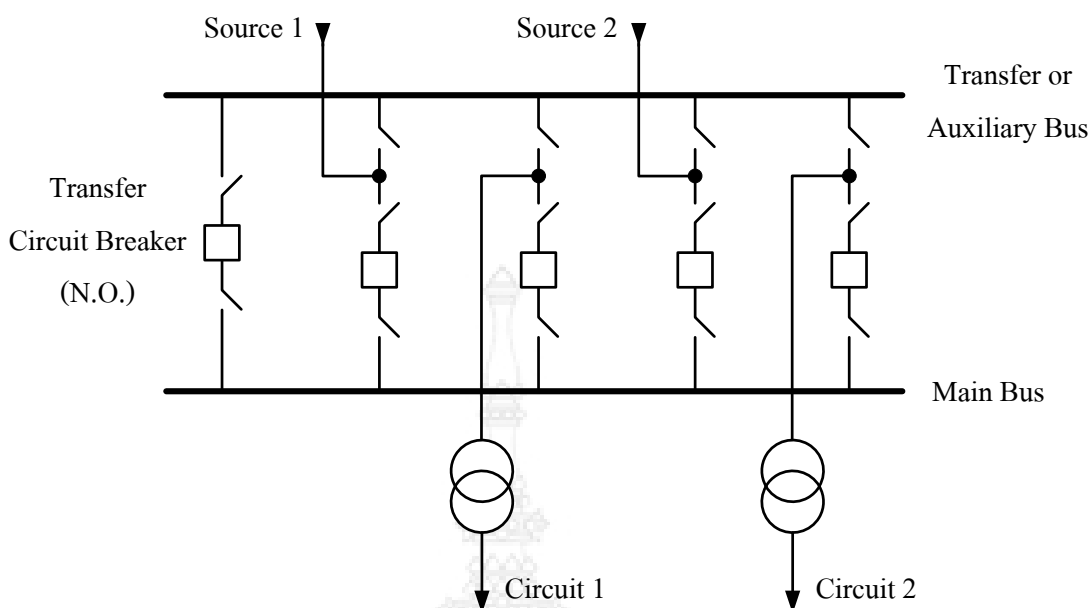
1. **การจัดวางแบบบัสเดี่ยว (Single Bus)** เป็นการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าแบบง่ายที่มีความประหยัด ซึ่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ไดอะแกรมการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสเดียว

จากภาพที่ 2.4 จะพบว่าหากมีการปลดอุปกรณ์ออกเพื่อซ่อมบำรุงหรือเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละวงจรสายป้อนก็จะทำให้วงจรนั้นไม่สามารถจ่ายไฟได้ ซึ่งทำให้ระบบขาดความยืดหยุ่นในการจ่ายไฟ โดยทั่วไปการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสเดียวจะใช้สำหรับการจ่ายไฟในระยะเริ่มต้นของการวางระบบ โดยมีเพียง 2-3 วงจรต่อเข้าที่สถานีไฟฟ้า

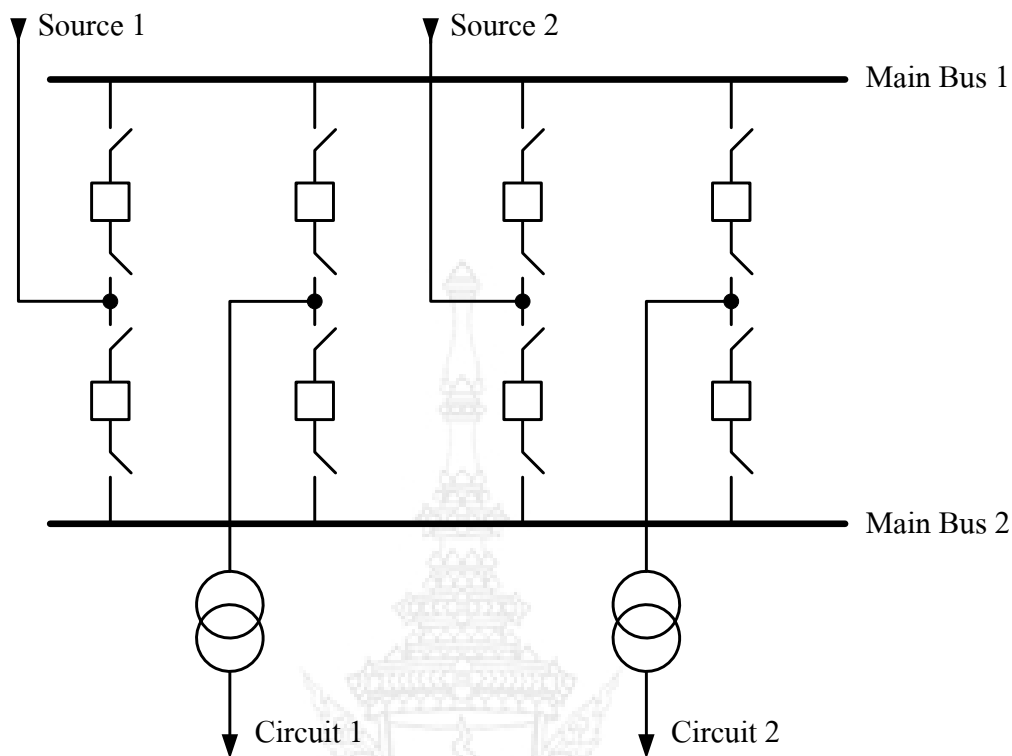
2. การจัดวางแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน (Main and Transfer Bus) เป็นรูปแบบที่ไม่ต้องตัดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหากทำการซ่อมบำรุงเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยจะจ่ายไฟผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ถ่ายโอน (Transfer Circuit Breaker) ซึ่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ไดอะแกรมการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน

จากภาพที่ 2.5 จะพบว่าการจัดวางอุปกรณ์จะมี 2 ชุด ชุดที่ใช้งานเป็นหลักจะเรียกว่า บัสประธาน (Main Bus) และอีกชุดจะเรียกว่า บัสถ่ายโอน (Transfer Bus) เมื่อต้องการซ่อมบำรุง เซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรจ่ายไฟสามารถทำได้โดยถ่ายโอนวงจรสายส่งที่ต่ออยู่กับบัสประธานไปยัง บัสถ่ายโอนโดยจ่ายไฟผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ถ่ายโอนซึ่งเตรียมไว้ใช้แทนเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะที่ยังบำรุงรักษา การจัดวางบัสแบบนี้จะทำให้มีความยืดหยุ่น ความน่าเชื่อถือดีกว่าการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสเดี่ยว และสามารถซ่อมบำรุงอุปกรณ์ได้เพียงตัวเดียวจึงเหมาะกับสถานีไฟฟ้าที่มีวงจรจ่ายไฟที่ต่อเข้าไม่เกิน 7 วงจร

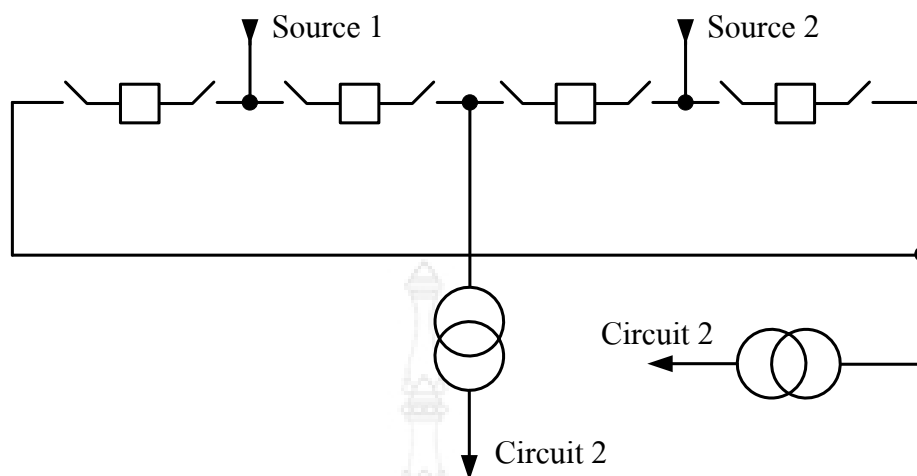
3. การจัดวางแบบบัสประธานคู่ (Double Main Bus) และเบรกเกอร์คู่ (Double Breaker) เป็นรูปแบบที่มีบัสประธาน 2 บัส โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทุกตัวจะสามารถปลดออกจากวงจรส่งจ่ายไฟฟ้าได้ กล่าวคือ สามารถแยกจ่ายไฟเป็น 2 บัส ได้ หากมีความจำเป็นต้องลดระดับความรุนแรงของขนาดกระแสฟอลต์ (Fault Level) ซึ่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ไดอะแกรมการจัดวางแบบบัสประธานคู่และเบรกเกอร์คู่

จากภาพที่ 2.6 จำนวนของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเป็น 2 เท่าของจำนวนสายส่ง ซึ่งจะทำให้การลงทุนสูงขึ้น แต่จะได้ความน่าเชื่อถือสูงขึ้น และมีความมั่นคงเพราะบัส 2 ชุด สามารถต่อสายส่งเข้าที่บัสทั้งสองได้ โดยจะเลือกรับไฟได้จากบัสใดก็ได้ ทำให้การบำรุงรักษาอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากมีอุปกรณ์ป้องกันอีกตัวพร้อมทำงานป้องกันระบบในขณะที่สายส่งยังคงใช้งานได้อยู่ และหากเกิดฟอลต์ที่บัสใดบัสหนึ่งจะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งหมดที่ต่ออยู่กับบัสที่เกิดฟอลต์ทำงานปลดส่วนที่เกิดฟอลต์ แต่จะไม่ส่งผลถึงบัสหรือสายส่งที่ไม่ได้ต่อกับบัสที่เกิดฟอลต์ทำให้ยังจ่ายไฟได้

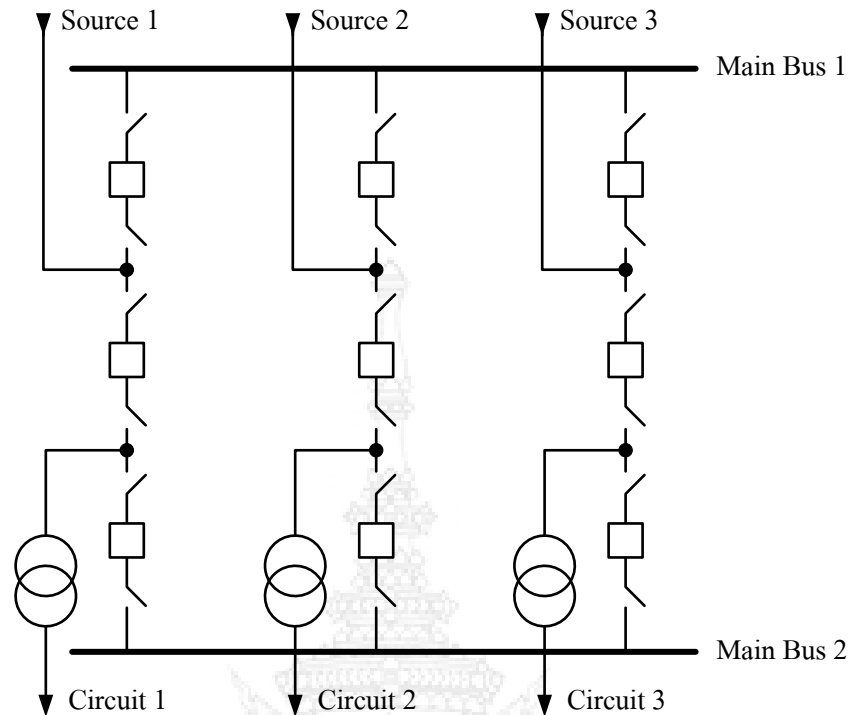
4. การจัดวางแบบบัสวง (Ring Bus) เป็นการออกแบบให้บัสต่อกันเป็นวงด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ กล่าวคือ จะมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ต่ออนุกรม (Series) กันในวง โดยที่ปลายทั้งสองข้างของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะติดตั้งสวิตช์ตัดตอน (Disconnecting Switch) ก่อนต่อเข้าบัส ซึ่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ไดอะแกรมการจัดวางแบบบัสวง

ระบบที่มีการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัสวงจะสามารถรองรับสายจำหน่าย (Feeder Line) ได้มาก แต่การกำหนดขนาดของอุปกรณ์ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงกระแส สวิตช์ตัดตอน ต้องสามารถรองรับกระแสรวมของระบบได้ จึงทำให้อุปกรณ์มีราคาสูง

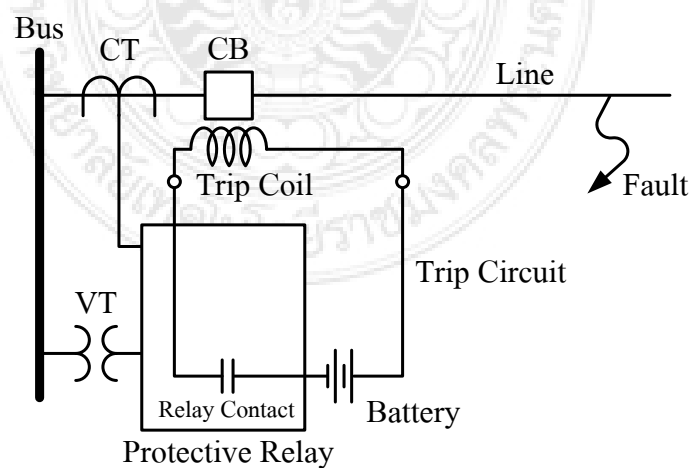
5. การจัดวางแบบเบรกเกอร์ครึ่ง (Breaker and a Half) เป็นการออกแบบให้มีบัส 2 ชุด ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 3 ตัว ต่ออนุกรมกัน โดยที่ปลายแต่ละด้านแยกต่อเข้ากับบัส และนำสายส่งต่อเข้ากับตำแหน่งระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำให้สามารถใช้งานเซอร์กิตเบรกเกอร์ 3 ตัว ต่อ 2 วงจร โดยสายส่งทั้งสองจะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวกลางร่วมกัน ทำให้ระบบมีความมั่นคงในการจ่ายไฟและสะดวกสำหรับการบำรุงรักษา การจัดวางอุปกรณ์แบบนี้ได้รับความนิยมเพราะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องของการจัดวางอุปกรณ์แบบอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การจ่ายไฟทำได้อย่างต่อเนื่องและเหมาะสมสำหรับขยายการจ่ายไฟในอนาคต แต่การจัดวางอุปกรณ์ควรตั้งอยู่บนพื้นฐานของการใช้งานที่เหมาะสม ดังนั้นการออกแบบจึงควรคำนึงถึงจำนวนหม้อแปลง จำนวนวงจรสายส่ง การขยายระบบในอนาคต หรือสถานที่ เป็นต้น ไดอะแกรมการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบเบรกเกอร์ครึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ไดอะแกรมการจัดวางบัสแบบเบรกเกอร์ครึ่ง

2.3 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน

ระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังเป็นการทำงานที่เชื่อมต่อกันของรีเลย์ป้องกัน หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน และอุปกรณ์ช่วยอื่นๆ ซึ่งจะสามารถแสดงส่วนประกอบดังกล่าวได้ดังภาพที่ 2.9

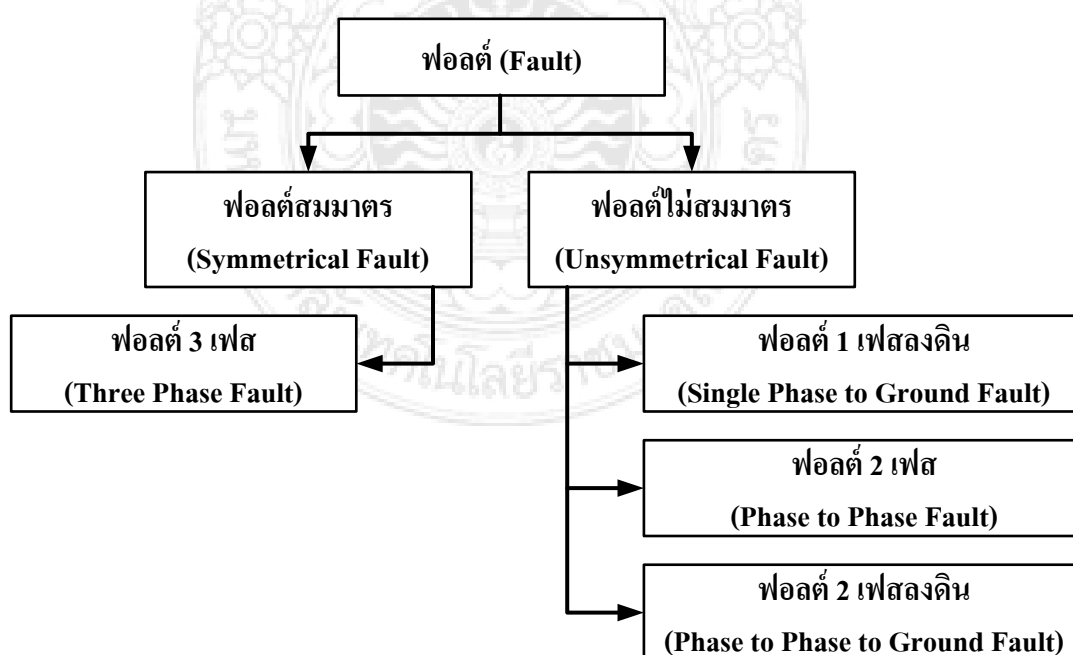


ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน

จากภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบของระบบป้องกันจะทำงานเชื่อมต่อกันโดยเริ่มจากเกิดเหตุการณ์ฟอลต์ที่สายส่ง ซึ่งเป็นวงจรที่ต้องการป้องกัน จากนั้นรีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) จะได้รับสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงกระแส (Current Transformer, CT) และหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer, VT) โดยรีเลย์ป้องกันจะทำการประมวลผลหน้าสัมผัสรีเลย์ (Relay Contact) จะทำงาน กระแสจะไหลจากแบตเตอรี่ (Battery) ผ่านวงจรสั่งปลด (Trip Circuit) ไปยังขดลวดสั่งปลด (Trip Coil) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker, CB) ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานโดยเปิดวงจรเพื่อตัดวงจรที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบ ซึ่งการทำงานในแต่ละส่วนของระบบป้องกันสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.4 ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

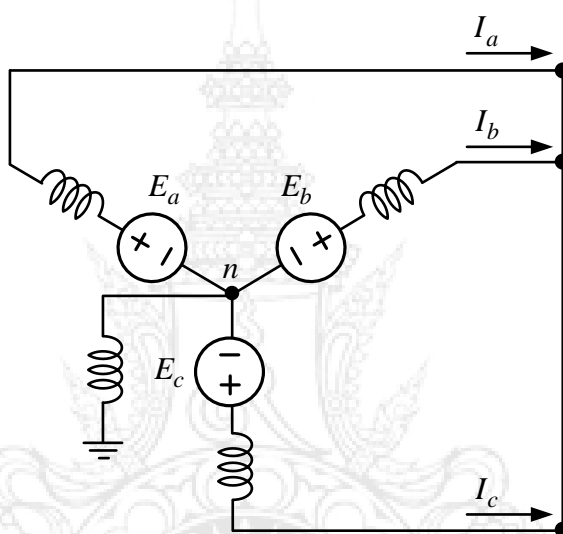
ฟอลต์ (Fault) เป็นปัญหาแรกสำหรับการออกแบบระบบป้องกัน ซึ่งขนาดของกระแสฟอลต์จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อทำการปลดวงจรที่เกิดฟอลต์ให้ระบบปลอดภัย โดยที่อุปกรณ์อื่นๆ เช่น เคเบิล บัสบาร์ หรือสวิตช์เกียร์ ต้องมีความคงทนต่อแรงทางกลและความร้อนขณะเกิดฟอลต์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกันต้องมีการพิจารณาให้เหมาะสมและถูกต้องเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งการศึกษาฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ฟอลต์สมมาตร และฟอลต์ไม่สมมาตร แสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ประเภทของเหตุการณ์ฟอลต์

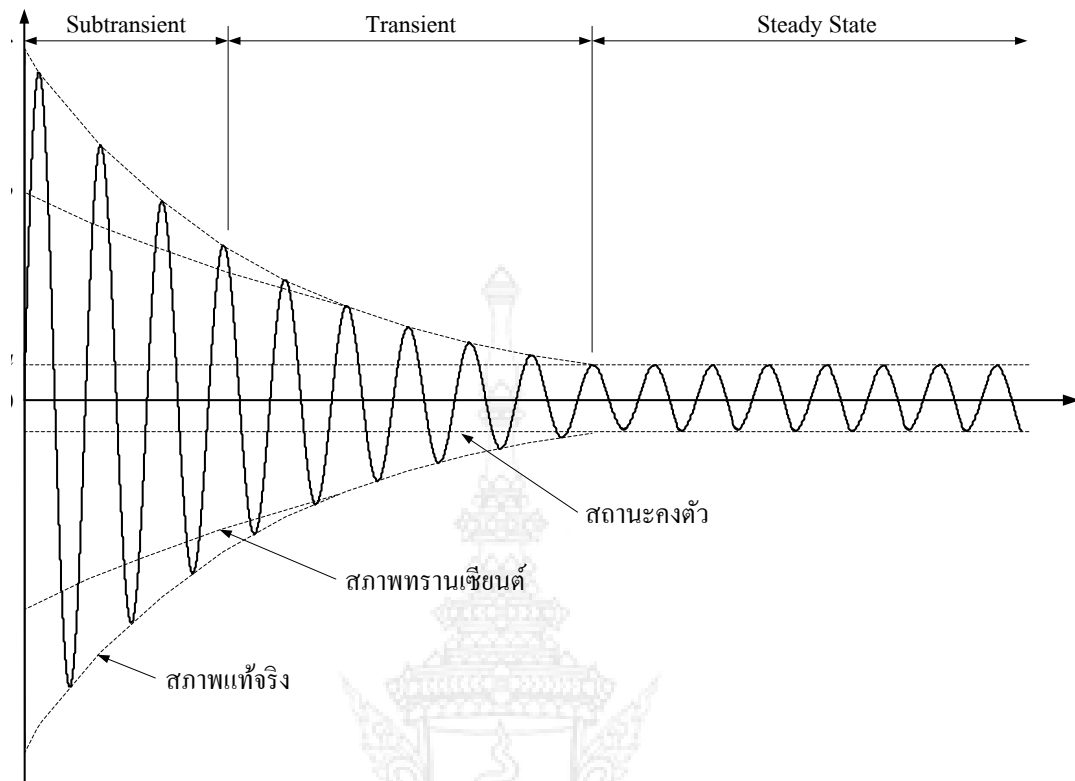
2.4.1 ฟอลต์สมมาตร

ฟอลต์สมมาตรเป็นการเกิดเหตุการณ์ฟอลต์แบบ 3 เฟส ซึ่งพบน้อยมากแต่เมื่อเกิดขึ้นจะเป็นเหตุการณ์ฟอลต์ที่สำคัญมากเนื่องจากมีความรุนแรง และเพื่อป้องกันความเสียหายจึงต้องพิจารณาขนาดของกระแสขณะเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟส เพื่อนำไปกำหนดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และตั้งค่ารีเลย์ป้องกัน ซึ่งในเบื้องต้นสามารถพิจารณาการเกิดเหตุการณ์ฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.11 เพื่อให้เข้าใจแอมพลิจูด (Amplitude) ที่ช่วงเวลาของรูปคลื่น (Cycle) ต่างๆ



ภาพที่ 2.11 เหตุการณ์ฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากภาพที่ 2.11 ขณะเกิดฟอลต์จะเกิดรูปคลื่นกระแสฟอลต์ในสภาวะชั่วคราว โดยจะสามารถแบ่งกระแสฟอลต์ในสภาวะชั่วคราวออกเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาชั้ทรานเซียนต์ (Subtransient) กระแสฟอลต์จะมีแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ 1-3 รูปคลื่นแรก จากนั้นกระแสจะลดลง เข้าสู่ช่วงเวลาต่อมาคือทรานเซียนต์ (Transient) เป็นช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ไปแล้ว 3-10 รูปคลื่น และหลังจากนั้นจะเป็นช่วงเวลาที่มิสถานะคงตัว (Steady State) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับช่วงเวลาจะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 รูปคลื่นกระแสฟอลต์สมมาตรที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่จ่ายโหลด

จากภาพที่ 2.12 เป็นการพิจารณากระแสฟอลต์สมมาตรที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่จ่ายโหลด ซึ่งระยะระหว่าง $0a$ เป็นค่าสูงสุด (Peak) ของกระแสฟอลต์ขณะเข้าสู่สถานะคงตัว โดยจะสามารถคำนวณได้จากแรงดันที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่จ่ายโหลด (E_g)หารด้วยซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเรียกว่า รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง (Direct-Axis Synchronous Reactance, X_d) ซึ่งขณะเกิดฟอลต์จะมีค่าตัวประกอบกำลังและค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ที่ต่ำมาก จึงสามารถละเลยและสามารถแสดงกระแสสถานะคงตัว เป็นค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$I = \frac{0a}{\sqrt{2}} = \frac{E_g}{X_d} \quad (2.1)$$

โดยที่ I คือ กระแสสถานะคงตัว เป็นค่าอาร์เอ็มเอส

E_g คือ แรงดันเฟสที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

X_d คือ สถานะคงตัวรีแอกแตนซ์ซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง

จากภาพที่ 2.12 ระยะระหว่าง Ob เป็นของกระแสทรานเซียนต์ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อค่าทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง (Direct-Axis Synchronous Transient Reactance, X'_d) ดังสมการที่ (2.2)

$$I' = \frac{Ob}{\sqrt{2}} = \frac{E_g}{X'_d} \quad (2.2)$$

โดยที่ I' คือ กระแสทรานเซียนต์ เป็นค่าอาร์เอ็มเอส

X'_d คือ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง

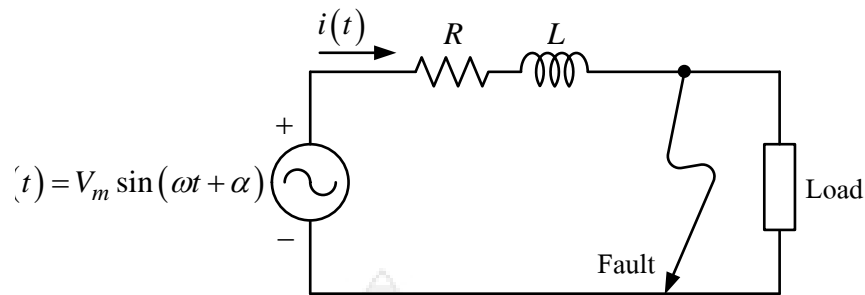
จากภาพที่ 2.12 ระยะระหว่าง $0c$ เป็นค่ากระแสที่เริ่มจากเวลาศูนย์ โดยเรียกกระแส ในช่วงเวลานี้ว่ากระแสซบทรานเซียนต์ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อค่าซบทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง (Direct-Axis Synchronous Subtransient Reactance, X''_d) ดังสมการที่ (2.3)

$$I'' = \frac{0c}{\sqrt{2}} = \frac{E_g}{X''_d} \quad (2.3)$$

โดยที่ I'' คือ กระแสทรานเซียนต์ เป็นค่าอาร์เอ็มเอส

X''_d คือ ซบทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง

จากสมการที่ (2.1) - (2.3) เป็นหลักการเบื้องต้นสำหรับการคำนวณกระแสฟอลต์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีการจ่ายโหลด และหากพิจารณาผลจากอิมพีแดนซ์ของระบบ โดยการคำนวณฟอลต์แบบ 3 เฟส จะคล้ายกับการพิจารณาวงจรที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายที่ต่ออยู่กับตัวต้านทาน (R) และตัวเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 วงจรสมมูลสำหรับพิจารณาเหตุการณ์ฟอลต์ 3 เฟส

จากภาพที่ 2.13 สามารถใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับแรงดัน (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) พิจารณาผลตอบสนองในโดเมนเวลา (Time Domain) จะได้

$$-V_m \sin(\omega t + \alpha) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = 0$$

$$V_m \sin(\omega t + \alpha) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) สามารถใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) เพื่อหาผลตอบสนองกระแสฟอลต์ ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.5)

$$i(t) = \frac{V_m}{|Z|} \left(\underbrace{\sin(\omega t + \alpha - \theta)}_{\text{AC Component}} - \underbrace{\sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{t}{\tau}}}_{\text{DC Component}} \right) \quad (2.5)$$

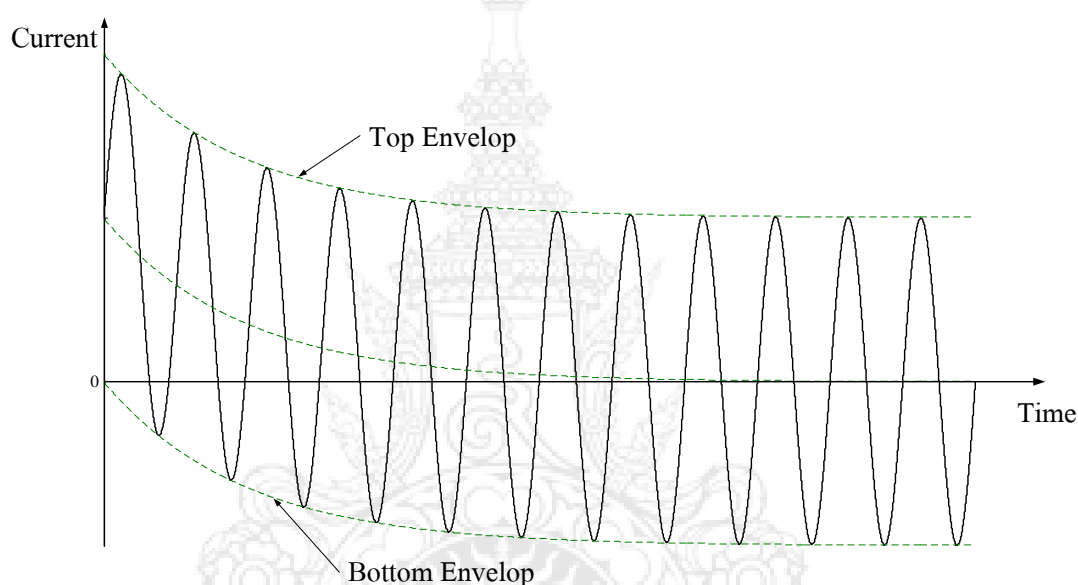
โดยที่ $|Z|$ คือ ขนาดของอิมพีแดนซ์ $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

θ คือ ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ของระบบที่ตำแหน่งฟอลต์ หรือสามารถหาค่าได้จากอัตราส่วนรีแอกแตนซ์ (Reactance) แหล่งกำเนิด ต่อ ความต้านทานแหล่งกำเนิด $\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

τ คือ ค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) $\frac{L}{R} = \frac{X_L}{\omega R} = \frac{X_L}{2\pi fR}$

α คือ มุมของรูปคลื่นไซน์ชอยต์ในขณะที่เกิดฟอลต์

จากสมการที่ (2.5) จะพบว่ากระแสฟอลต์ในวงจร RL ประกอบด้วยกระแส 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบไฟสลับ (AC Component) และ ส่วนประกอบไฟตรง (DC Component) โดยที่ ส่วนประกอบไฟสลับจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ซวยด์และจะแปรผันตามเวลา ซึ่งสามารถเรียกผลตอบสนองกระแสส่วนนี้ว่า กระแสฟอลต์สมมาตร (Symmetrical Fault Current) และในส่วนที่ 2 เป็นส่วนประกอบไฟตรง ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นคาบ (Non-Periodic) และหน่วงลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ด้วยค่าคงตัวทางเวลา (τ) ซึ่งสามารถเรียกระแสในส่วนนี้ว่า กระแสออฟเซตไฟตรง (DC Offset Current) และจากกระแส 2 ส่วนดังกล่าว สามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 รูปคลื่นกระแสฟอลต์กรณี $\alpha - \theta = 90^\circ$

จากภาพที่ 2.14 พบว่าส่วนประกอบไฟตรงในสมการที่ (2.5) จะมีค่าสูงสุดคือมีความต่างระหว่างมุมเฟสของรูปคลื่นไซน์ซวยด์ในขณะที่เกิดฟอลต์กับตัวประกอบกำลังของระบบที่ตำแหน่งฟอลต์เท่ากับ 90° แต่ในทางกลับกันหาก $\alpha - \theta = 0^\circ$ นั้นหมายความว่าไม่มีส่วนประกอบไฟตรงและจะมีส่วนประกอบไฟสลับเพียงส่วนเดียว ดังนั้นจึงสามารถเรียกระแสรวมทั้งสองส่วนนี้ว่า กระแสฟอลต์ไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault Current)

การคำนวณกระแสฟอลต์โดยใช้เฟสเซอร์ (Phasor) จะใช้กระแสฟอลต์ไฟสลับ (AC Fault Current) เป็นค่าอาร์เอ็มเอส ซึ่งจะเรียกว่า กระแสฟอลต์สมมาตร (Symmetrical Fault Current) และสามารถหาขนาดที่เป็นอาร์เอ็มเอสของกระแสฟอลต์ไฟสลับ (RMS AC Fault Current) โดยพิจารณาผลของอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่จากภายนอกได้ดังสมการที่ (2.6)

$$I_F = \frac{V_F}{Z} \quad (2.6)$$

โดยที่ V_F คือ แรงดันของระบบขณะเกิดฟอลต์
 Z คือ อิมพีแดนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์

จากสมการที่ (2.6) เป็นพื้นฐานสำหรับการคำนวณฟอลต์ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์ดังต่อไปนี้

เปอร์ยูนิต (Per Unit, p.u.)

เป็นวิธีการคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์ที่ใช้ได้กับระบบไฟฟ้ากำลังทุกระบบ หากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังระบุหน่วยของพิกัดต่างกันเช่น กระแส แรงดัน อิมพีแดนซ์ หรือกำลัง เป็นต้น เปอร์ยูนิตจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดขั้นตอนในการแปลงหน่วย โดยเปอร์ยูนิตจะเป็นการทำให้พิกัดของอุปกรณ์อยู่บนฐาน (Base) ของแต่ละหน่วยที่เป็นค่าอ้างอิง ดังสมการที่ (2.7)

$$p.u. = \frac{\text{Actual Quantity}}{\text{Base Quantity}} \quad (2.7)$$

โดยที่ **Actual Quantity** คือ ปริมาณจริง
Base Quantity คือ ปริมาณฐานหรือปริมาณอ้างอิง

จากสมการที่ (2.7) เป็นพื้นฐานสำหรับการคำนวณในระบบเปอร์ยูนิต ยกตัวอย่างการคำนวณเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ เช่น ระบบส่งจ่ายมีอิมพีแดนซ์ของสายส่ง 5Ω กำหนดให้อิมพีแดนซ์ฐานในส่วนของสายส่งเท่ากับ 10Ω จะได้เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์

$$Z_{p.u.} = \frac{5}{10} = 0.5 \text{ p.u.}$$

ปริมาณจริงเป็นปริมาณพิกัดของอุปกรณ์ทราบค่าได้จากป้ายชื่ออุปกรณ์ (Nameplate) ส่วนปริมาณฐานหรือปริมาณอ้างอิงจะใช้ความสัมพันธ์จากกฎของโอห์ม ซึ่งจะสามารถแสดงสมการปริมาณฐานของระบบเฟสเดียว (Single Phase) และระบบสามเฟส (Three Phase) ได้ ดังสมการที่ (2.8) – (2.11)

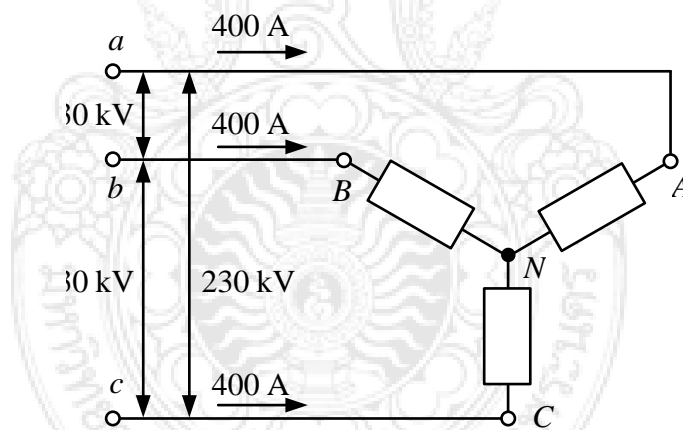
$$I_{B,1\phi} = \frac{\text{Base kVA}_{1\phi}}{\text{Base kV}_{LN}} \quad \text{A} \quad (2.8)$$

$$Z_{B,1\phi} = \frac{(\text{Base kV}_{LN})^2}{\text{Base MVA}_{1\phi}} \quad \Omega \quad (2.9)$$

$$I_{B,3\phi} = \frac{\text{Base kVA}_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{Base kV}_{LL}} \quad \text{A} \quad (2.10)$$

$$Z_{B,3\phi} = \frac{(\text{Base kV}_{LL})^2}{\text{Base MVA}_{3\phi}} \quad \Omega \quad (2.11)$$

จากภาพที่ 2.15 โหลด 3 เฟส ต่อแบบวาย (Y) แรงดัน 230 kV มีกระแสสาย 400 A กำหนดให้แรงดันฐานเท่ากับ 500 kV กำลังฐานเท่ากับ 600 MVA ให้หา $V_{p.u.}$, $I_{p.u.}$, $Z_{p.u.}$ และ $P_{p.u.}$ ที่โหลด



ภาพที่ 2.15 โหลด 3 เฟส

ระบบเปอร์ยูนิตจะใช้หลักการ $p.u. = \frac{\text{Actual Quantity}}{\text{Base Quantity}}$

$$V_{p.u.} = \frac{230}{500} = 0.46 \text{ p.u.}$$

$$I_{p.u.} = \frac{400}{\frac{600 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500}} = 0.577 \text{ p.u.}$$

$$Z_{p.u.} = \frac{V_{p.u.}}{I_{p.u.}} = \frac{0.46}{0.577} = 0.797 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} P_{p.u.} &= V_{p.u.} \times I_{p.u.} \\ &= 0.46 \times 0.577 = 0.265 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

การเปลี่ยนปริมาณเปอร์ยูนิตจากฐานเดิมไปเป็นปริมาณเปอร์ยูนิตฐานใหม่

การเปลี่ยนปริมาณเปอร์ยูนิตของแรงดัน กระแส อิมพีแดนซ์ และกำลัง โดยใช้ฐานของระบบที่กำหนดมาให้ แต่การเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ในระบบทั้งหมดต้องใช้ฐานเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนปริมาณเปอร์ยูนิตจากฐานเดิมไปเป็นปริมาณเปอร์ยูนิตฐานใหม่ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

$$Z_{p.u.} = \frac{(\text{Actual impedance, } \Omega) \times (\text{Base kVA})}{(\text{Base Voltage, kV})^2 \times 1000} \quad (2.12)$$

$$Z_{p.u.(New)} = Z_{p.u.(Given)} \frac{(\text{Base kV}_{Given})^2}{(\text{Base MVA}_{Given})} \times \frac{(\text{Base MVA}_{New})}{(\text{Base kV}_{New})^2} \quad (2.13)$$

ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (X'') ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.25 p.u. ซึ่งมีข้อมูลจากป้ายชื่อ (Nameplate) โดยมีพิกัดเท่ากับ 500 MVA, 18 kV โดยกำหนดค่าฐานใหม่สำหรับการคำนวณ คือ 100 MVA, 20 kV ให้หาค่าซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์เปอร์ยูนิตใหม่ $X''_{p.u.(New)}$

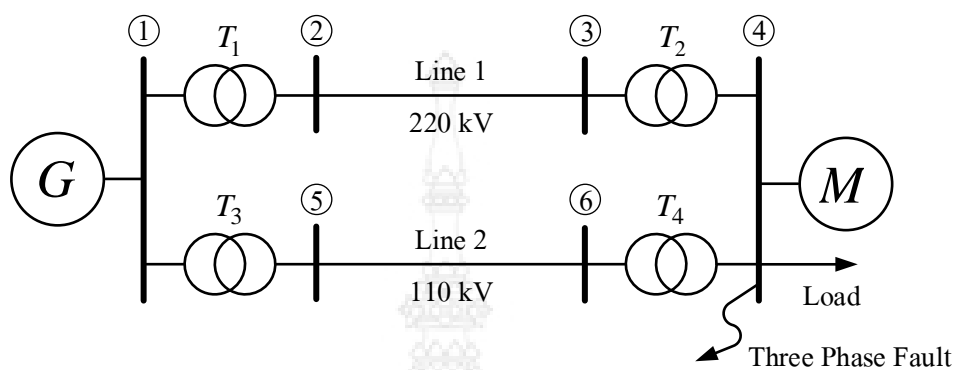
จากสมการที่ (2.12) จะได้

$$X''_{p.u.(New)} = 0.25 \frac{(18)^2}{(500)} \times \frac{(100)}{(20)^2} = 0.0405 \text{ p.u.}$$

หรือ

$$X''_{p.u.(New)} = \frac{0.25(18^2 / 500)}{20^2 / 100} = 0.0405 \text{ p.u.}$$

เครื่องจักรกลซิงโครนัส 2 เครื่อง ต่อยู่ที่บัส 1 และบัส 4 โดยมีหม้อแปลงสามเฟส เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานไปยังสายส่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.16 ให้คำนวณหากระแส ฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่บัส 4 กำหนดให้ค่าฐานใหม่สำหรับการคำนวณ คือ 100 MVA, 22 kV



ภาพที่ 2.16 ไดอะแกรมเส้นเดียว

จากภาพที่ 2.16 มีข้อมูลดังนี้

G	:	90 MVA	22 kV	$X = 18 \%$
T_1	:	50 MVA	22/220 kV	$X = 10 \%$
T_2	:	40 MVA	220/11 kV	$X = 6.0 \%$
T_3	:	40 MVA	22/110 kV	$X = 6.4 \%$
T_4	:	40 MVA	110/11 kV	$X = 8.0 \%$
M	:	66.5 MVA	10.45 kV	$X = 18.5 \%$
Load	:	57 MVA, 0.6 Power Factor Lagging, 10.45 kV		
Line 1	:	48.4 Ω		
Line 2	:	65.43 Ω		

จากสมการที่ (2.12) จะได้

$$G, X_{p.u.(New)} = 0.18 \times \left[\frac{(22)^2}{(90)} \times \frac{(100)}{(22)^2} \right] = 0.20 \text{ p.u.}$$

$$T_1, X_{p.u.(New)} = 0.10 \times \left[\frac{(22)^2}{(50)} \times \frac{(100)}{(22)^2} \right] = 0.20 \text{ p.u.}$$

$$T_2, X_{p.u.(New)} = 0.06 \times \left[\frac{(220)^2}{(40)} \times \frac{(100)}{(220)^2} \right] = 0.15 \text{ p.u.}$$

$$T_3, X_{p.u.(New)} = 0.064 \times \left[\frac{(22)^2}{(40)} \times \frac{(100)}{(22)^2} \right] = 0.16 \text{ p.u.}$$

$$T_4, X_{p.u.(New)} = 0.08 \times \left[\frac{(110)^2}{(40)} \times \frac{(100)}{(110)^2} \right] = 0.20 \text{ p.u.}$$

$$M, X_{p.u.(New)} = 0.185 \times \left[\frac{(10.45)^2}{(66.5)} \times \frac{(100)}{(11)^2} \right] = 0.25 \text{ p.u.}$$

$$\text{Line 1, } X_{p.u.(New)} = 48.4 \times \frac{(100)}{(220)^2} = 0.10 \text{ p.u.}$$

$$\text{Line 2, } X_{p.u.(New)} = 65.43 \times \frac{(100)}{(110)^2} = 0.54 \text{ p.u.}$$

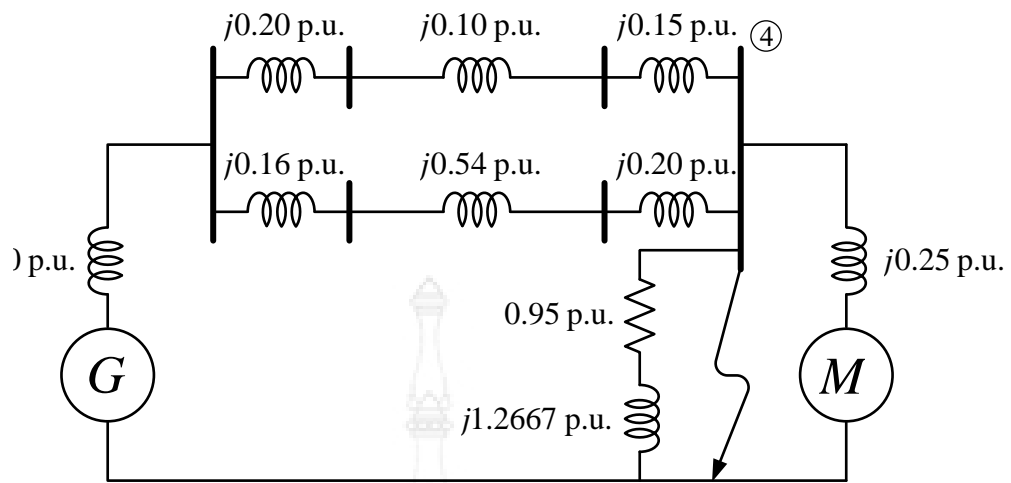
$$S_{L(3\phi)} = 57 \angle 53.13^\circ \text{ MVA}$$

$$S_{p.u.(New)} = \frac{57 \angle 53.13^\circ}{100} = 0.342 + j0.456 \text{ p.u.}$$

$$V_{L-L, p.u.} = \frac{10.45}{11} = 0.95 \text{ p.u.}$$

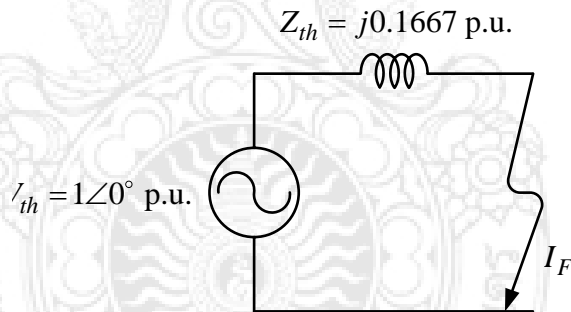
$$\begin{aligned} Z_{Load, p.u.(New)} &= \frac{(V_{L-L, p.u.})^2}{S_{p.u.(New)}^*} \\ &= \frac{(0.95)^2}{0.342 - j0.456} = 0.95 + j1.2667 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าเปอร์ยูนิตใหม่ของระบบ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเปอร์ยูนิต
ได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิต

จากภาพที่ 2.17 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลเทเวนินเพื่อคำนวณหากระแสฟอลต์ได้ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 วงจรสมมูลเทเวนิน

จากภาพที่ 2.18 สามารถกระแสฟอลต์ในระบบเปอร์ยูนิต ($I_{F, \text{p.u.}}$) ได้ดังนี้

$$I_{F, \text{p.u.}} = \frac{1\angle 0^\circ}{j0.1667} = -j6 \text{ p.u.}$$

กระแสฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่บัส 4 สามารถใช้สมการที่ (2.7) โดยใช้ฐานกระแส (I_B) คูณกับกระแสฟอลต์ในระบบเปอร์ยูนิต

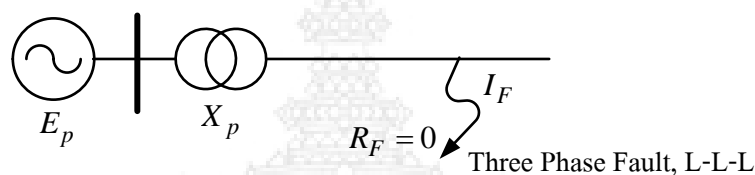
$$I_B = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 11} = 5248.64 \text{ A}$$

$$I_F = -j6 \times 5248.64 = -j31491.84 \text{ A}$$

หรือ $I_F = 31491.84 \angle -90^\circ \text{ A}$

ขนาดของกำลังขณะลัดวงจร (MVA Short Circuit)

เป็นวิธีการคำนวณหาค่ากระแส 3 เฟสฟอลต์อย่างง่าย เหมาะสำหรับระบบที่ไม่ซับซ้อน เช่น ระบบแบบเบเรเดียล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ระบบแบบเบเรเดียลขณะเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟส

จากภาพที่ 2.19 สามารถใช้กฎของโอห์มหาค่ากระแสฟอลต์ (I_F) โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_F = \frac{E_p}{X_p} \quad (2.14)$$

โดยที่ E_p คือ แรงดันเฟสของระบบขณะเกิดฟอลต์

X_p คือ รีแอกแตนซ์เฟสของระบบขณะเกิดฟอลต์

จากภาพที่ 2.15 สามารถเขียนสมการกระแสฟอลต์แบบ 3 เฟส ให้อยู่ในรูปขนาดของกำลังขณะลัดวงจรได้ดังสมการที่ (2.15) และ (2.16)

$$\frac{\text{Short Circuit MVA}}{\text{Rated MVA}} = \frac{\sqrt{3}V_L I_F}{\sqrt{3}V_L I_N} = \frac{I_F}{I_N} = \frac{\left(\frac{E_p}{X_p} \right)}{I_N}$$

$$= \frac{\left(\frac{E_p}{X_p}\right)}{I_N} \times \frac{\left(\frac{X_p}{E_p}\right)}{\left(\frac{X_p}{E_p}\right)} = \frac{1}{I_N \left(\frac{X_p}{E_p}\right)} = \frac{1}{\%Z}$$

$$MVA_{SC} = \frac{MVA_R}{\%Z} \quad (2.15)$$

$$I_F = \frac{MVA_{SC}}{\sqrt{3}V_L} \quad (2.16)$$

- โดยที่ I_F คือ กระแสฟอลต์ (Fault Current)
 I_N คือ กระแสพิกัดโหลด (Full Load Current)
 V_L คือ แรงดันสาย (Line to Line Voltage) ที่ตำแหน่งเกิดฟอลต์
 MVA_R คือ พิกัดกำลังของอุปกรณ์

จากสมการที่ (2.16) ขนาดของกำลังขณะลัดวงจรจะเป็นตัวบอกระดับความรุนแรงของกระแสฟอลต์ (Fault Level) ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยอุปกรณ์ที่ต่อเพิ่มเข้าระบบและทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลง เช่น การเพิ่มสายส่ง การเพิ่มแหล่งจ่าย เข้าในระบบจะทำให้ระดับความรุนแรงของกระแสฟอลต์มีขนาดสูงขึ้นเนื่องจากการลดลงของอิมพีแดนซ์ หรือโรงไฟฟ้าที่มีเครื่องจักรกลเชิงโครนัส จะมีแรงเฉื่อยขณะเกิดฟอลต์ทำให้มีผลต่อระดับความรุนแรงของกระแสฟอลต์ ส่วนการคำนวณขนาดกำลังขณะลัดวงจรของสายส่ง และมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

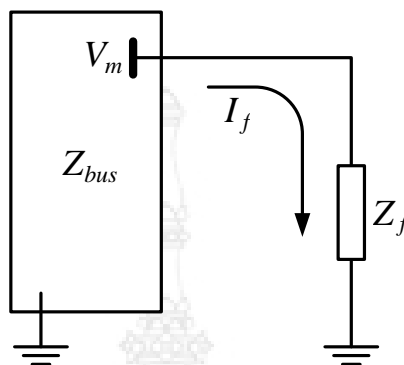
$$MVA_{SC} = \frac{kV^2}{Z} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} MVA_{SC} &= \frac{MVA_R}{X_d''} \\ &= MVA_R \times \frac{I_{LR}}{I_N} \end{aligned} \quad (2.18)$$

- โดยที่ I_{LR} คือ กระแสลัดคร้อเตอร์

2.4.2 การวิเคราะห์การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

การเกิดฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นการเกิดฟอลต์ที่พบบ่อยที่สุดในระบบไฟฟ้า โดยที่การวิเคราะห์ฟอลต์ประเภทนี้เราสามารถพิจารณาได้ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.20 วงจรสมมูลการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

จากภาพที่ 2.20 เราสามารถกำหนดให้ $I_f = I_a$ ซึ่ง I_f เป็นกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า และเกิดการลัดวงจรจากบัส m ลงกราวด์ g ขณะเกิดฟอลต์มี Z_f เป็นอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากฟอลต์ โดยให้ $Z_f = Z_a$ ในที่นี้บัส n ก็คือบัสที่ลงกราวด์ g นั้นเอง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.19)

$$[Z_f + (Z_{mm} - Z_{mg}) - (Z_{gm} - Z_{gg})]I_f = (V_m - V_g) \quad (2.19)$$

โดยที่ Z_{mg}, Z_{gm} คือ อิมพีแดนซ์ระหว่างบัส m กับ กราวด์ ไม่มีค่า จึงให้เท่ากับศูนย์
 Z_{gg} คือ อิมพีแดนซ์ของกราวด์ ไม่มีค่า จึงให้เท่ากับศูนย์
 V_g คือ แรงดันของกราวด์เท่ากับศูนย์

จากสมการที่ (2.19) เมื่อเราแทนตัวแปรที่กำหนดให้ข้างต้นเราจะสามารถหาสมการของกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินได้ดังสมการที่ (2.20)

$$I_f = \frac{V_m}{(Z_{mm} + Z_f)} \quad (2.20)$$

เมื่อเราได้ค่าของกระแสฟอลต์แล้วเราสามารถหาแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละบัสโดยใช้สมการดังนี้

$$\Delta V = V' - V = -Z_{bus}A_c^T [I_f] \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) ในเทอมของ Z_{bus} เราสามารถนำหลักที่ m ของ Z_{bus} มาใช้ในการคำนวณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังสมการที่ (2.22)

$$\Delta V = -Z_{bus}^{(m)} \times I_f \quad (2.22)$$

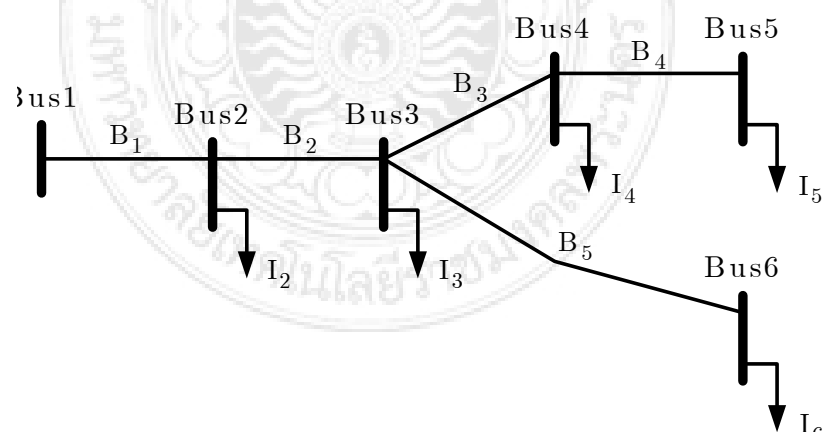
โดยที่ (m) คือ บัสและเฟสที่เกิดฟอลต์

เพราะฉะนั้นแรงดันใหม่ที่บัสแต่ละบัสจะหาได้ดังนี้

$$V' = V + \Delta V \quad (2.23)$$

2.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ทั่วไปโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) จะมีลักษณะเป็นแบบเรเดียล (Radial) ในบทนี้เราจึงได้แสดงการแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบครบทั้งสามเฟสในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นแบบเรเดียล ซึ่งเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการเขียนโปรแกรมที่ไม่ยุ่งยาก และมีความรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีนิวตัน-ราฟสัน อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในสถานะที่โหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล โดยเราได้นำอิมพีแดนซ์เฟส (Phase Impedance) มาใช้คำนวณ และเพื่อให้เกิดความเข้าใจเราจึงได้นำระบบจำหน่ายไฟฟ้า 6 บัส, 5 ปรานช์ (Branch) แสดงได้ดังภาพที่ 2.21 มาเป็นตัวอย่าง ซึ่งเราสามารถอธิบายการคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 2.21 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 6 บัส

จากภาพที่ 2.21 เราสามารถนำมาเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าเฟส a , b และ c ที่บัส i ดังนี้

$$S_i^{abc} = P_i^{abc} + jQ_i^{abc} \quad (2.24)$$

โดยที่ P_i^{abc} คือ กำลังแอกทีฟ (Active Power) เฟส abc ที่บัส i
 Q_i^{abc} คือ กำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power) เฟส abc ที่บัส i

จากสมการที่ (2.24) เราสามารถแสดงสมการกระแสไหลของแต่ละบัสได้ดังนี้

$$I_i^{abc,k} = \left(\frac{P_i^{abc} + jQ_i^{abc}}{V_i^{abc,k}} \right)^* \quad (2.25)$$

โดยที่ $I_i^{abc,k}$ คือ กระแสไหล เฟส abc ที่บัส i รอบที่ k
 $V_i^{abc,k}$ คือ แรงดันไฟฟ้า เฟส abc ที่บัส i รอบที่ k

จากภาพที่ 2.21 เราสามารถนำสมการที่ (2.25) มาหากระแสที่ไหลในแต่ละบรานช์โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law, KCL) จะได้สมการกระแสของแต่ละบรานช์ดังนี้

$$\begin{aligned} B_1^{abc} &= I_2^{abc} + I_3^{abc} + I_4^{abc} + I_5^{abc} + I_6^{abc} \\ B_2^{abc} &= I_3^{abc} + I_4^{abc} + I_5^{abc} + I_6^{abc} \\ B_3^{abc} &= I_4^{abc} + I_5^{abc} \\ B_4^{abc} &= I_5^{abc} \\ B_5^{abc} &= I_6^{abc} \end{aligned} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) เราสามารถเขียนสมการของกระแสบัส i เฟส abc ที่ไหลในบรานช์ m ได้ดังสมการที่ (2.27)

$$\begin{bmatrix} B_m^a \\ B_m^b \\ B_m^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ U \\ U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i^a \\ I_i^b \\ I_i^c \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

โดยที่ U คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของกระแส เฟส abc ที่บัส i ซึ่งมีค่าเท่ากับเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) ดังนี้

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.27) ให้ดูง่ายขึ้น โดยทำให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.28)

$$\begin{bmatrix} B_1^{abc} \\ B_2^{abc} \\ B_3^{abc} \\ B_4^{abc} \\ B_5^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U & U & U & U & U \\ 0 & U & U & U & U \\ 0 & 0 & U & U & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2^{abc} \\ I_3^{abc} \\ I_4^{abc} \\ I_5^{abc} \\ I_6^{abc} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

หรือเขียนอีกอย่างหนึ่งได้

$$B_m^{abc} = BIBC \ I_i^{abc} \quad (2.29)$$

โดยที่ $BIBC$ คือ เมตริกซ์ค่าคงที่ หรือ (Bus Injection to Branch Current, BIBC)

จากความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลในแต่ละบรานช์กับแรงดันไฟฟ้าเราสามารถหาสมการของแรงดันไฟฟ้าที่บัสได้ดังนี้

$$V_2^{abc} = V_1^{abc} - B_1^{abc} Z_{12}^{abc} \quad (2.30)$$

$$V_3^{abc} = V_1^{abc} - B_1^{abc} Z_{12}^{abc} - B_2^{abc} Z_{23}^{abc} \quad (2.31)$$

$$V_4^{abc} = V_1^{abc} - B_1^{abc} Z_{12}^{abc} - B_2^{abc} Z_{23}^{abc} - B_3^{abc} Z_{34}^{abc} \quad (2.32)$$

$$V_5^{abc} = V_1^{abc} - B_1^{abc} Z_{12}^{abc} - B_2^{abc} Z_{23}^{abc} - B_3^{abc} Z_{34}^{abc} - B_4^{abc} Z_{45}^{abc} \quad (2.33)$$

$$V_6^{abc} = V_1^{abc} - B_1^{abc} Z_{12}^{abc} - B_2^{abc} Z_{23}^{abc} - B_5^{abc} Z_{56}^{abc} \quad (2.34)$$

หากเรานำสมการที่ (2.30) ถึง (2.34) มาจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์เราจะได้สมการใหม่ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.35)

$$\begin{bmatrix} V_1^{abc} \\ V_1^{abc} \\ V_1^{abc} \\ V_1^{abc} \\ V_1^{abc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2^{abc} \\ V_3^{abc} \\ V_4^{abc} \\ V_5^{abc} \\ V_6^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12}^{abc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{abc} & Z_{23}^{abc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{abc} & Z_{23}^{abc} & Z_{34}^{abc} & 0 & 0 \\ Z_{12}^{abc} & Z_{23}^{abc} & Z_{34}^{abc} & Z_{45}^{abc} & 0 \\ Z_{12}^{abc} & Z_{23}^{abc} & 0 & 0 & Z_{56}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1^{abc} \\ B_2^{abc} \\ B_3^{abc} \\ B_4^{abc} \\ B_5^{abc} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

หรือเขียนอีกอย่างหนึ่งได้

$$\Delta V_i^{abc} = Z B_m^{abc} \quad (2.36)$$

หากเรานำสมการที่ (3-6) แทนลงในสมการที่ (3-13) จะได้

$$\Delta V_i^{abc} = Z BIBC I_i^{abc} \quad (2.37)$$

$$\Delta V_i^{abc,k+1} = DLF I_i^{abc,k} \quad (2.38)$$

โดยที่ $\Delta V^{abc,k+1}$ คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้า เฟส abc ที่บัส i รอบที่ $k+1$
 DLF คือ เมตริกซ์ผลคูณระหว่างค่า Z^{abc} กับ $BIBC$

เราสามารถทำการตรวจสอบว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.37) เข้าใกล้ค่าตอบหรือไม่ โดยนำขนาดสูงสุด (Maximum) ของกระแสไหลรอบที่ $k+1$ ลบกับขนาดสูงสุดของกระแสไหลรอบที่ k ซึ่งทั้งสองค่านี้นับกันแล้วต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ ค่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (Tolerance) แสดงได้ดังสมการที่ (2.39)

$$\max |I_i^{abc,k+1}| - |I_i^{abc,k}| \leq Tolerance \quad (2.39)$$

จากที่ได้กล่าวมาเราสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ดังนี้

- ขั้นที่ 1 รับข้อมูลของระบบที่จะพิจารณา
- ขั้นที่ 2 กำหนดแรงดันเริ่มต้นที่บัสให้เท่ากับแสลคบัส (Slack Bus) โดยให้ เฟส $a = 1\angle 0^\circ$ เฟส $b = 1\angle -120^\circ$ และเฟส $c = 1\angle 120^\circ$
- ขั้นที่ 3 คำนวณกระแสไหลของแต่ละบัสโดยใช้สมการที่ (3-2)
- ขั้นที่ 4 สร้างเมตริกซ์ *BIBC* เพื่อให้ได้สมการที่ (3-6)
- ขั้นที่ 5 สร้างเมตริกซ์ *Z* เพื่อนำไปคูณกับเมตริกซ์ *BIBC* จะได้เมตริกซ์ *DLF*
- ขั้นที่ 6 ใช้สมการที่ (3-15) หาแรงดันไฟฟ้าที่บัส และปรับปรุง (Update) ค่าของแรงดันไฟฟ้า
- ขั้นที่ 7 ตรวจสอบว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าเข้าใกล้ค่าตอบหรือไม่โดยใช้สมการที่ (2.39) หากใช่คำตอบให้หยุดทำ หากไม่ใช่คำตอบให้กลับไปทำขั้นที่ 3



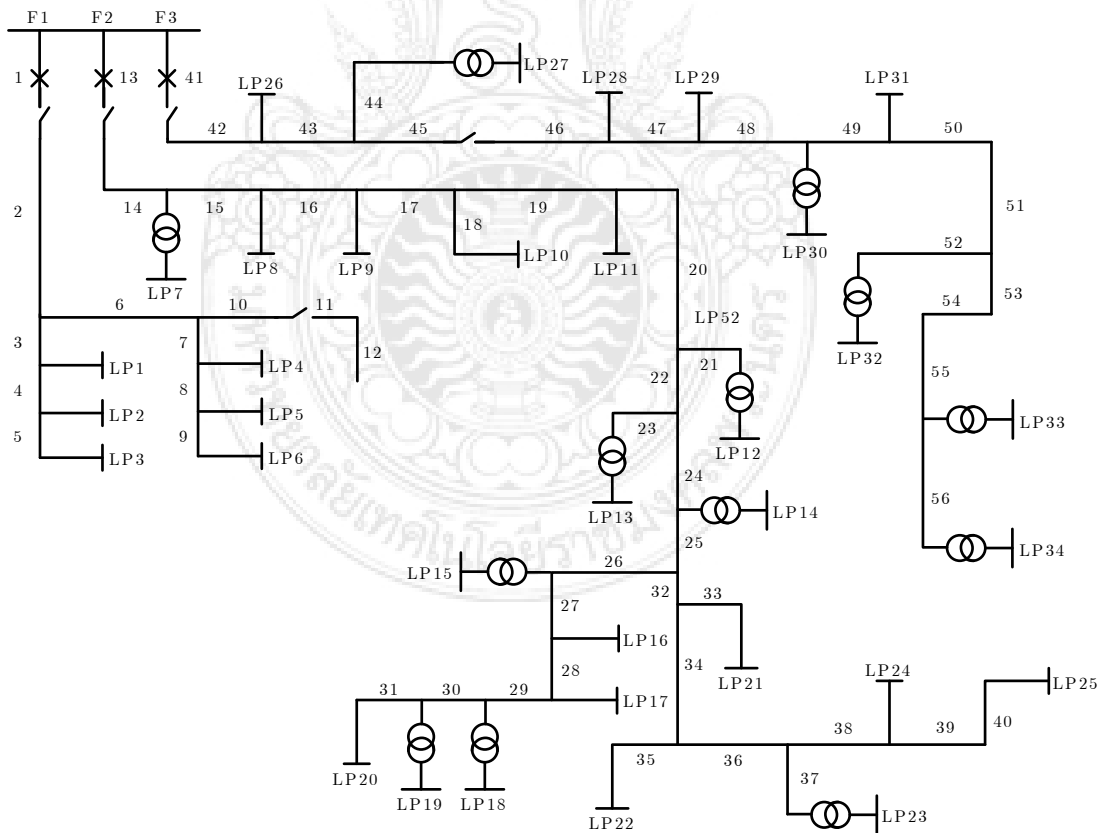
บทที่ 3 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

3.1 บทนำ

การสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าและเหตุการณ์ลัดวงจรเพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าตกขณะลัดวงจร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟที่ต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สายจำหน่าย และหม้อแปลงจำหน่ายจะถูกแทนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าขนาด 34 จุดโหลด (Load Point, LP) แสดงได้ดังภาพที่ 3.1 และมีข้อมูลดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด

หมายเลขสาย	Z p.u.			
	R_1	X_1	R_0	X_0
1	0	0.0180	0.0174	0.0839
2	0	0.0744	0.0720	0.3471
3	0	0.0673	0.0651	0.3142
4	0	0.0005	0.0004	0.0021
5	0	0.0135	0.0131	0.0632
6	0	0.1503	0.1455	0.7016
7	0	0.0287	0.0278	0.1339
8	0	0.0042	0.0041	0.0197
9	0	0.0009	0.0009	0.0042
10	0	0.0677	0.0655	0.3161
11	0	0.3363	0.3255	1.5700
12	0	0.2432	0.2354	1.1355
13	0	0.0140	0.0136	0.0655
14	0	0.0185	0.0179	0.0864
15	0	0.0023	0.0022	0.0106
16	0	0.0312	0.0302	0.1455
17	0	0.0093	0.0090	0.0436
18	0	0.0159	0.0345	0.0679
19	0	0.0037	0.0036	0.0174
20	0	0.0017	0.0017	0.0080
21	0	0.0091	0.0088	0.0426
22	0	0.0067	0.0065	0.0313
23	0	0.0251	0.0243	0.1171
24	0	0.0079	0.0076	0.0368
25	0	0.0285	0.0276	0.1332
26	0	0.0178	0.0172	0.0829

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

หมายเลขสาย	Z p.u.			
	R_1	X_1	R_0	X_0
27	0	0.0147	0.0143	0.0687
28	0	0.0182	0.0176	0.0848
29	0	0.0935	0.0727	0.1797
30	0	0.0791	0.0585	0.0894
31	0	0.0924	0.0720	0.0877
32	0	0.0341	0.0330	0.1594
33	0	0.0572	0.0554	0.2671
34	0	0.0242	0.0524	0.1030
35	0	0.0382	0.0124	0.0596
36	0	0.0271	0.0088	0.0424
37	0	0.0274	0.0089	0.0427
38	0	0.0406	0.0132	0.0635
39	0	0.0200	0.0065	0.0312
40	0	0.0063	0.0020	0.0098
41	0	0.0788	0.1707	0.3358
42	0	0.1302	0.1261	0.6081
43	0	0.0066	0.0064	0.0306
44	0	0.0138	0.0133	0.0642
45	0	0.1155	0.1118	0.5390
46	0	0.0707	0.0684	0.3300
47	0	0.0013	0.0013	0.0061
48	0	0.0030	0.0029	0.0139
49	0	0.0031	0.0031	0.0100
50	0	0.0553	0.0535	0.2581
51	0	0.0261	0.0253	0.1219
52	0	0.0122	0.0118	0.0568

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

หมายเลขสาย	Z p.u.			
	R_1	X_1	R_0	X_0
53	0	0.0172	0.0372	0.0732
54	0	0.0048	0.0016	0.0075
55	0	0.0051	0.0017	0.0080
56	0	0.0531	0.0023	0.0205

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลโหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด

Load Point (LP)	Load	
	MW	MVAR
1	2000	0
2	2000	0
3	630	0
4	100	0
5	300	0
6	300	0
7	50	0
8	250	0
9	100	0
10	30	0
11	100	0
12	315	0
13	1000	0
14	30	0
15	1530	0
16	1500	0
17	2000	0

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Load Point (LP)	Load	
	MW	MVAR
18	100	0
19	30	0
20	30	0
21	250	0
22	2250	0
23	30	0
24	100	0
25	100	0
26	100	0
27	250	0
28	250	0
29	50	0
30	250	0
31	100	0
32	100	0
33	160	0
34	50	0

บทที่ 4

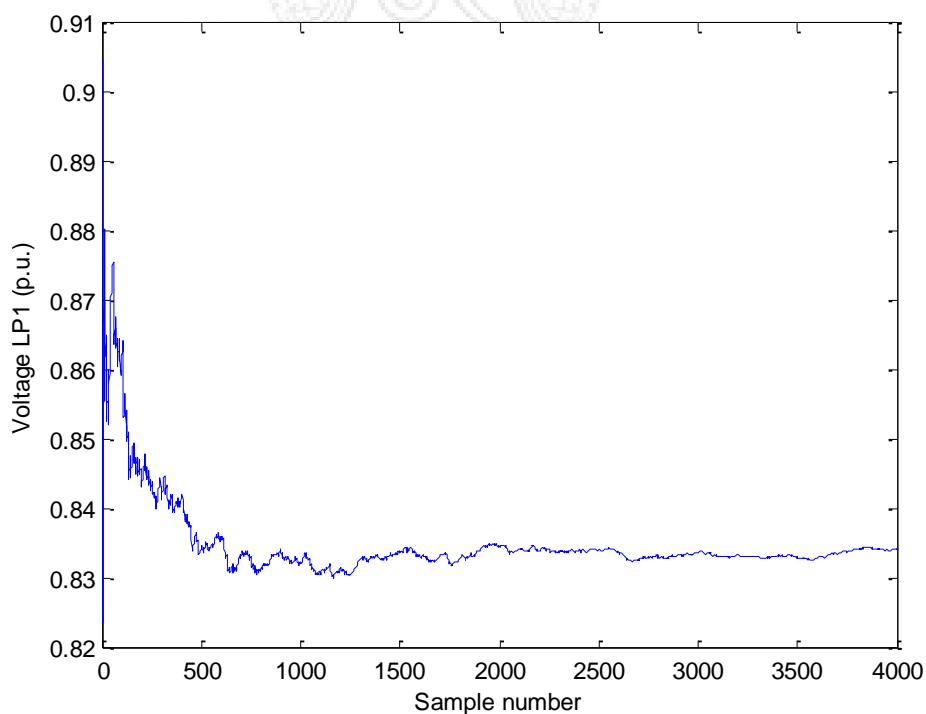
ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร

4.1 บทนำ

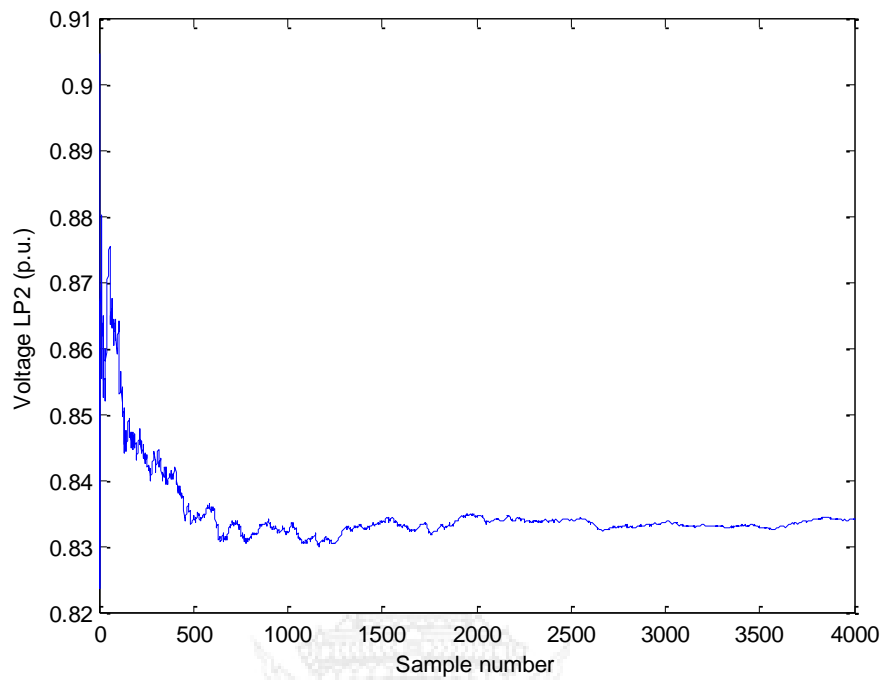
งานวิจัยนี้ได้จำลองให้เกิดการลัดวงจรเพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินที่มีต่ออุปกรณ์วิกฤตในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละจุดโหลด โดยที่การวิเคราะห์จะเริ่มจากการคำนวณแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด ขณะก่อนเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร

4.2 การประเมินขนาดแรงดันไฟฟ้าตกของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด

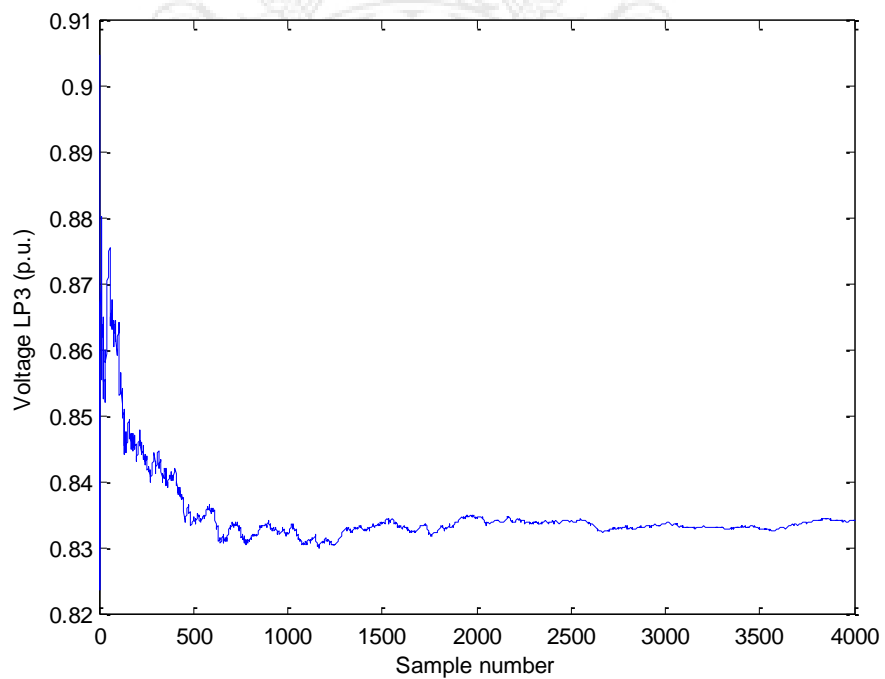
ผลการประเมินแรงดันไฟฟ้าตกที่แสดงในงานวิจัยนี้ได้จากการทำซ้ำและหาค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งหลังจาก 4,000 รอบการคำนวณ จะได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าตกแต่ละจุดโหลด ดังนี้



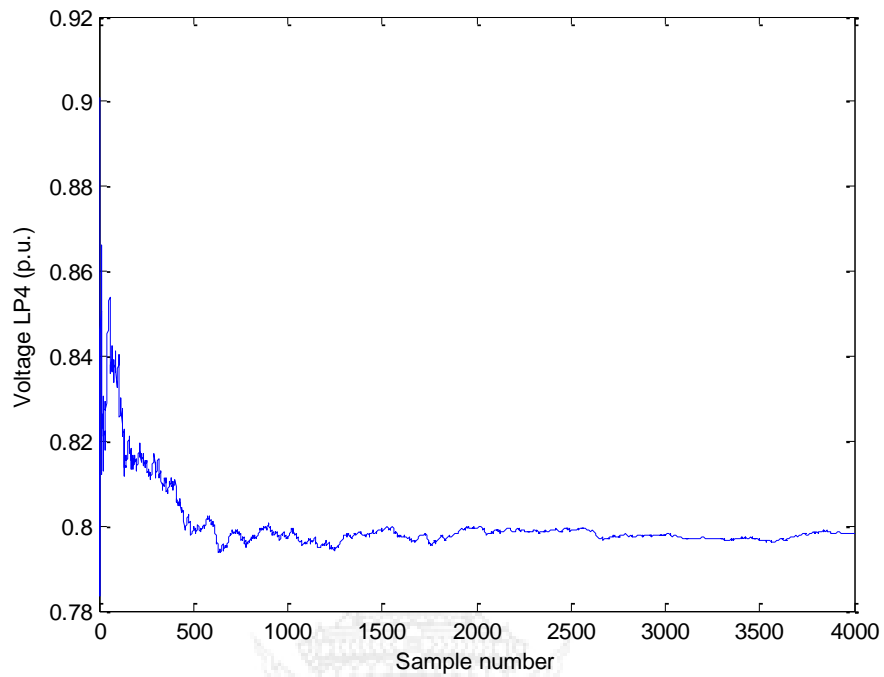
ภาพที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 1 มีขนาดเท่ากับ 0.834 p.u.



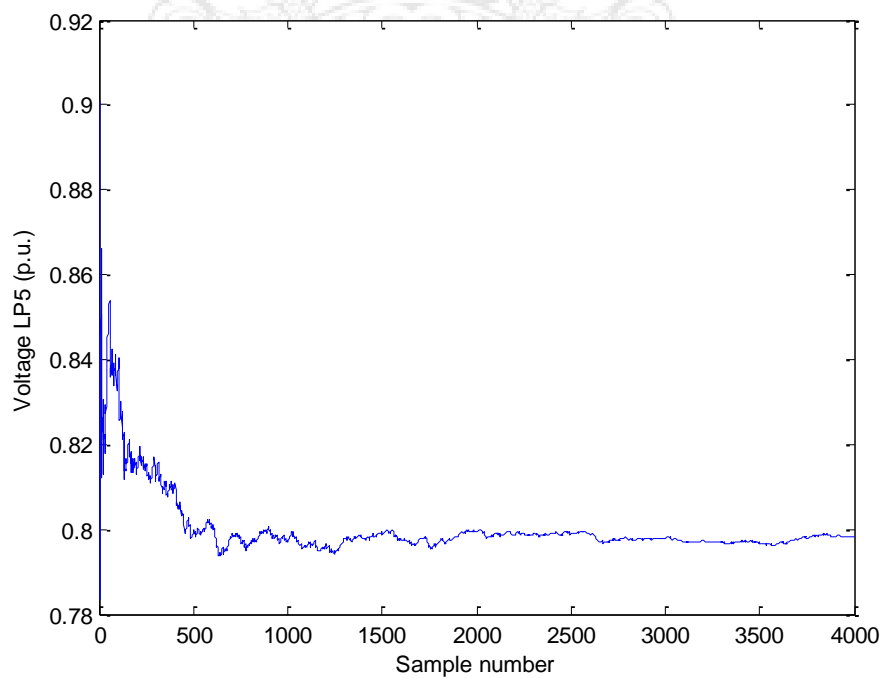
ภาพที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 2 มีขนาดเท่ากับ 0.834 p.u.



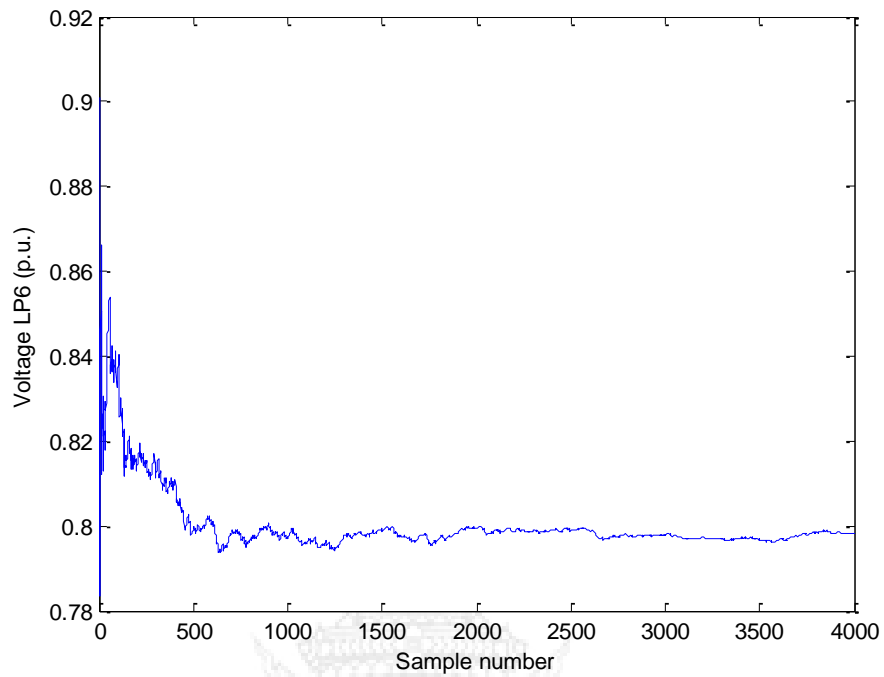
ภาพที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 3 มีขนาดเท่ากับ 0.834 p.u.



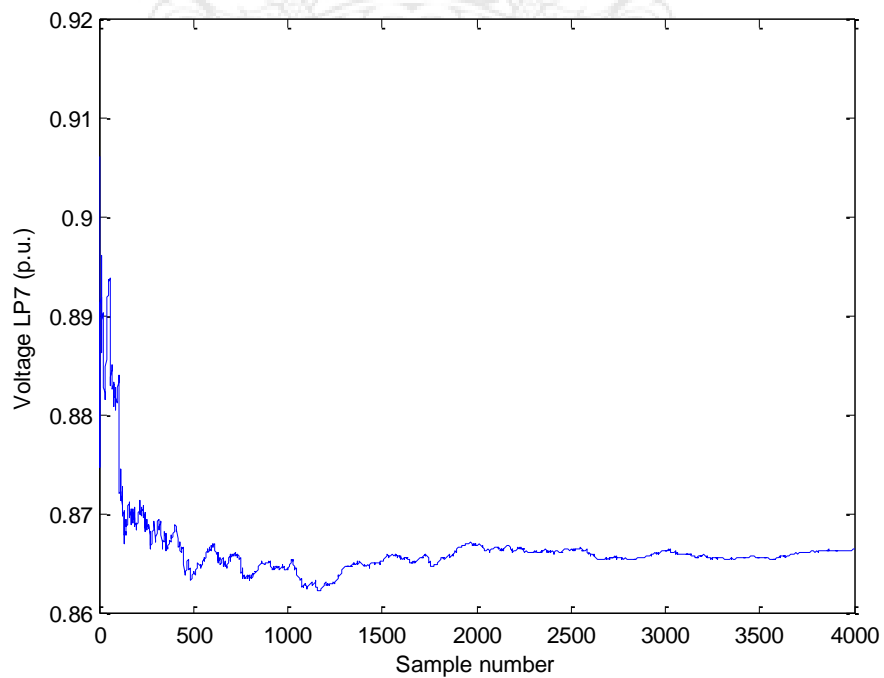
ภาพที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 4 มีขนาดเท่ากับ 0.798 p.u.



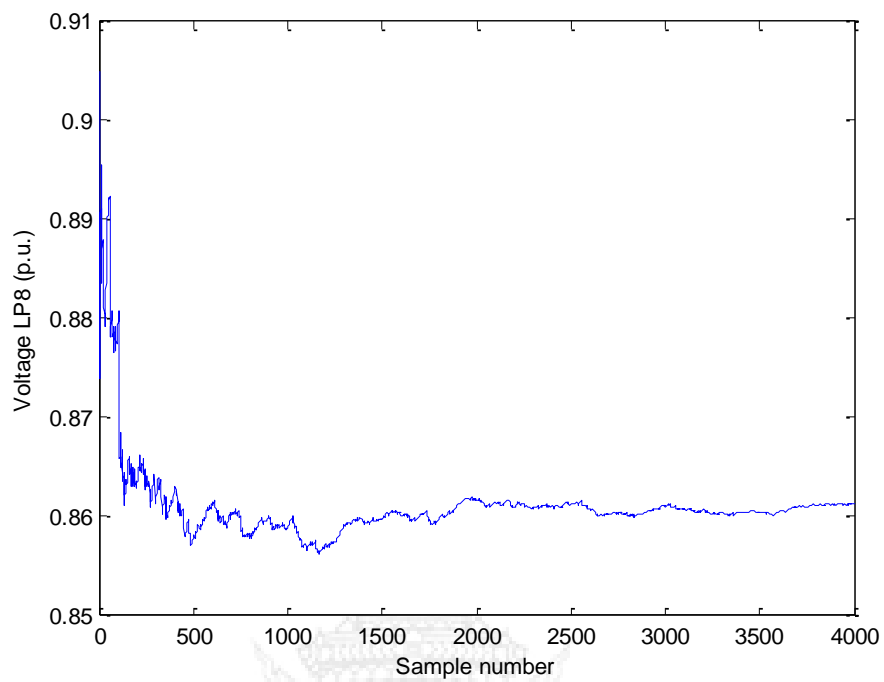
ภาพที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 5 มีขนาดเท่ากับ 0.798 p.u.



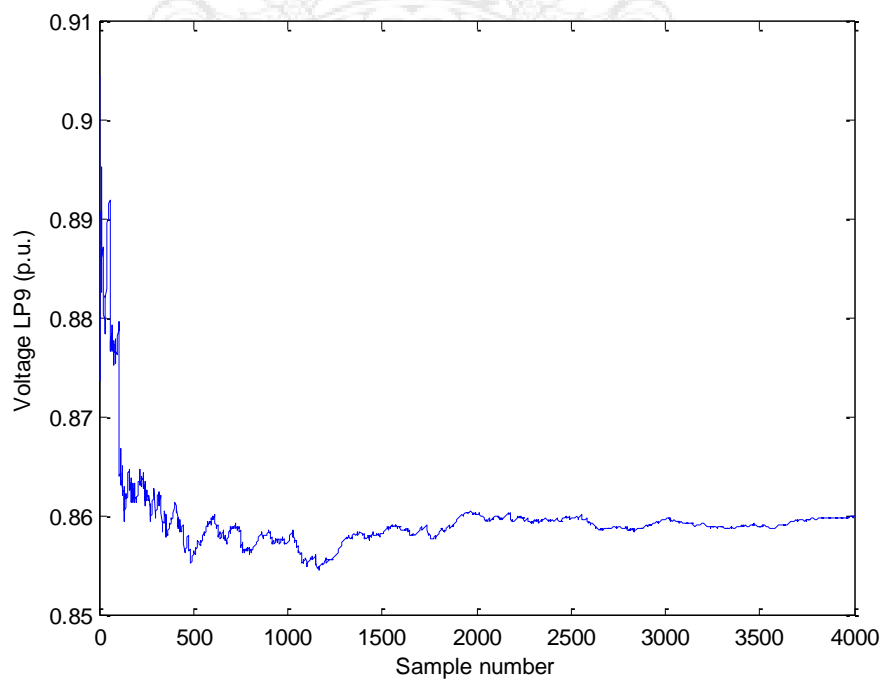
ภาพที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 6 มีขนาดเท่ากับ 0.798 p.u.



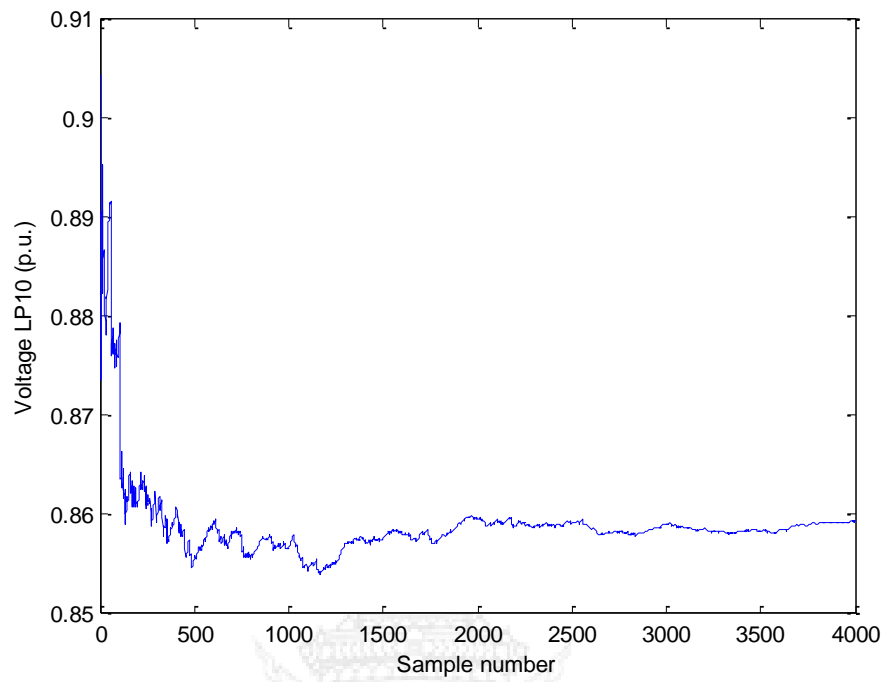
ภาพที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 7 มีขนาดเท่ากับ 0.866 p.u.



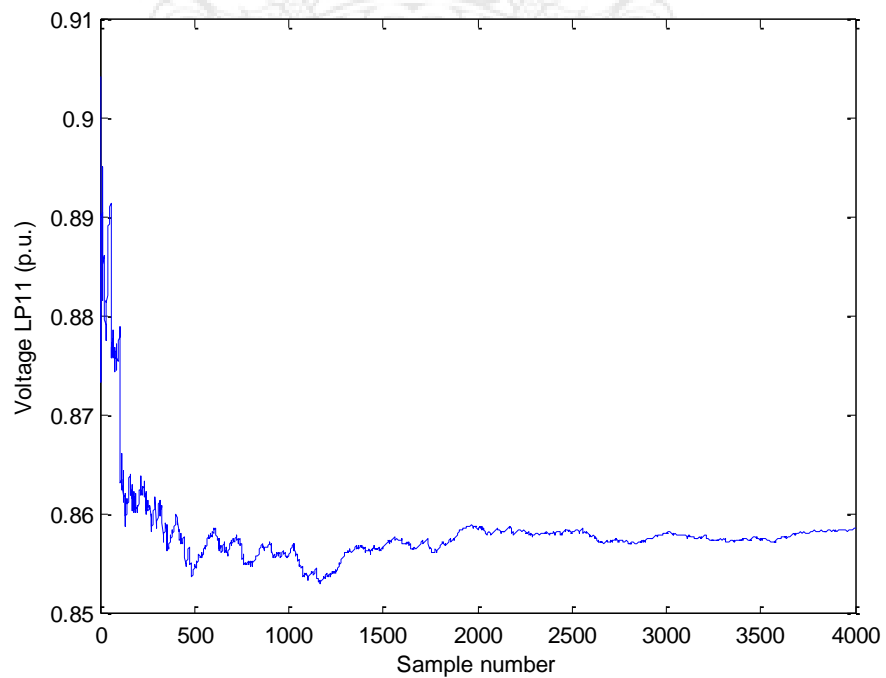
ภาพที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 8 มีขนาดเท่ากับ 0.861 p.u.



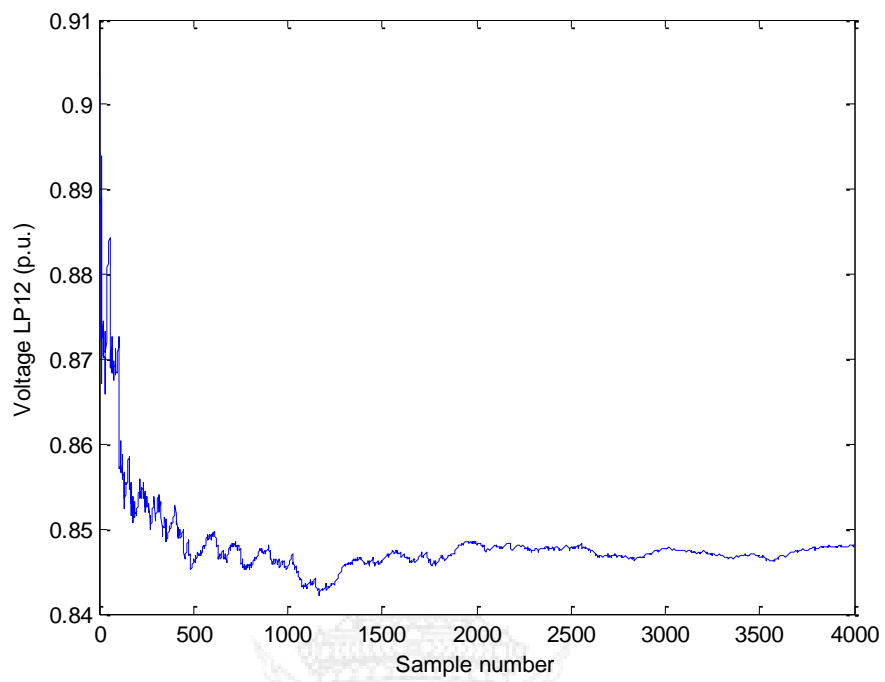
ภาพที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 9 มีขนาดเท่ากับ 0.859 p.u.



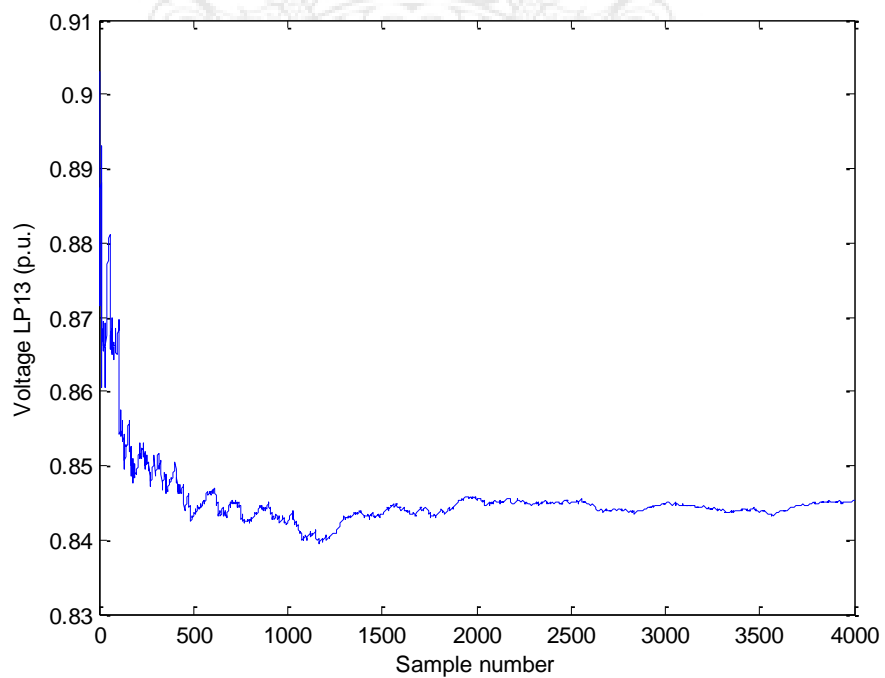
ภาพที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 10 มีขนาดเท่ากับ 0.859 p.u.



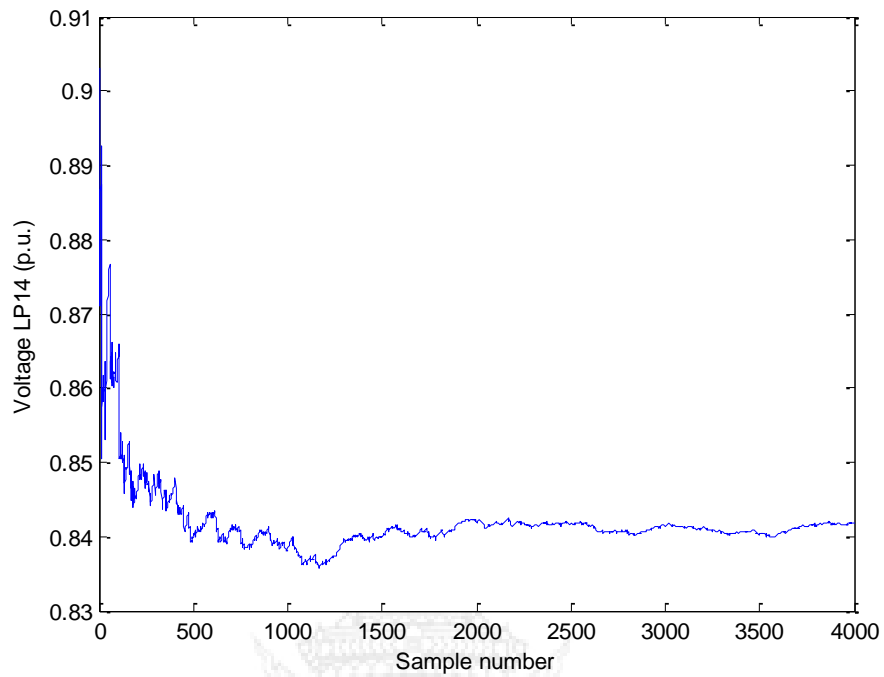
ภาพที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 11 มีขนาดเท่ากับ 0.858 p.u.



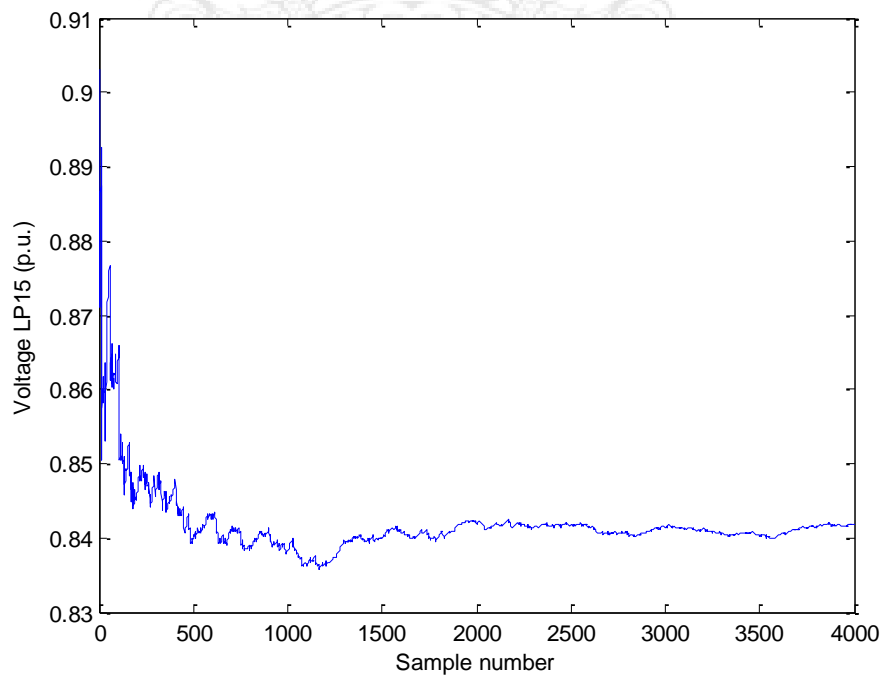
ภาพที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 12 มีขนาดเท่ากับ 0.848 p.u.



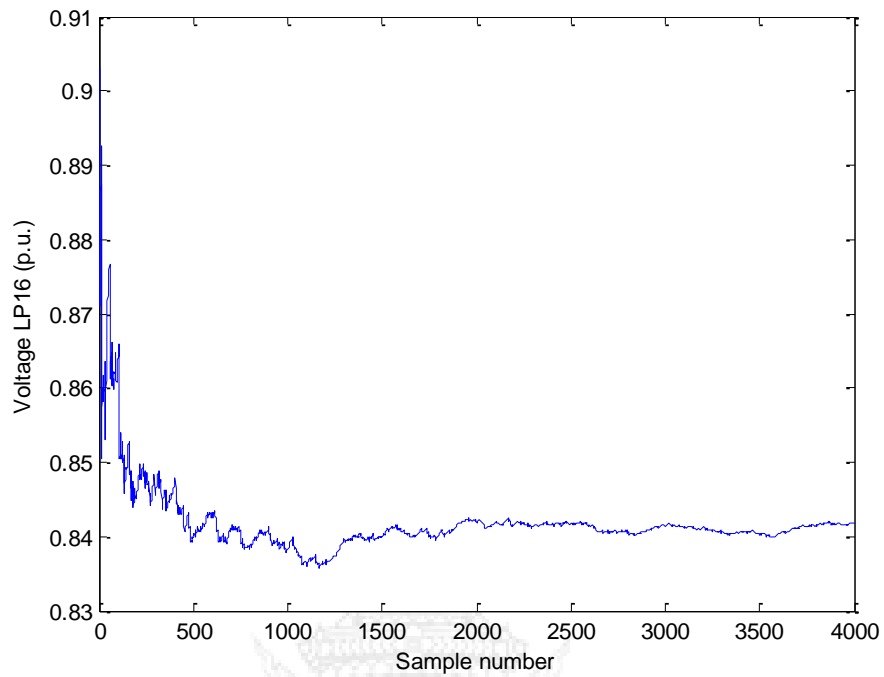
ภาพที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 13 มีขนาดเท่ากับ 0.845 p.u.



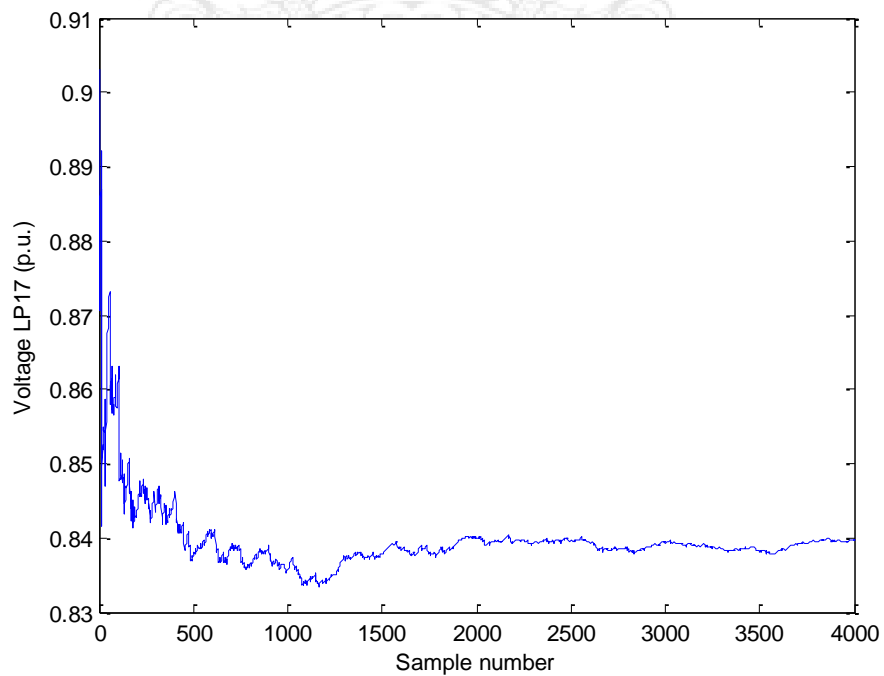
ภาพที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 14 มีขนาดเท่ากับ 0.841 p.u.



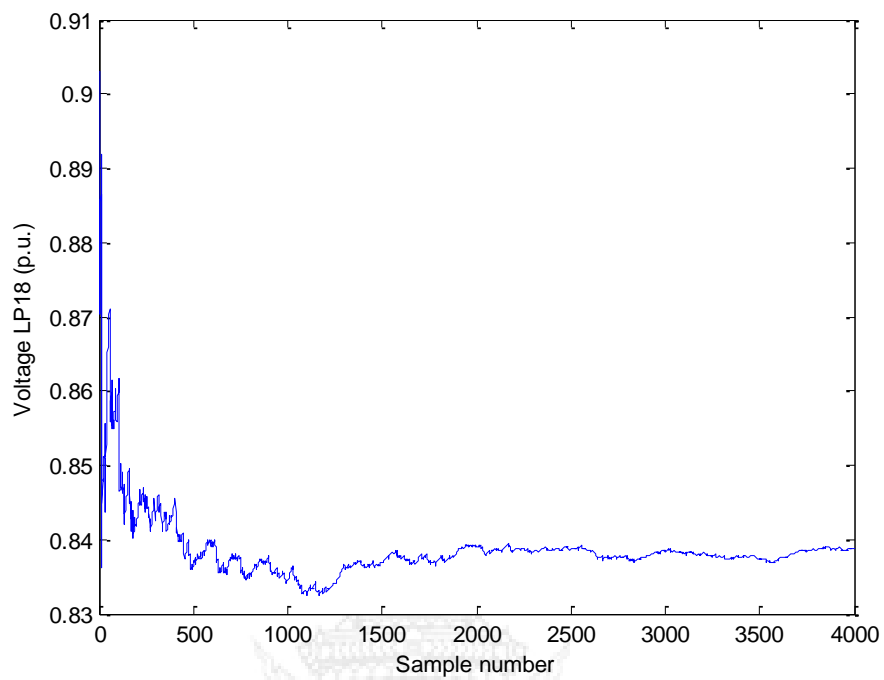
ภาพที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 15 มีขนาดเท่ากับ 0.841 p.u.



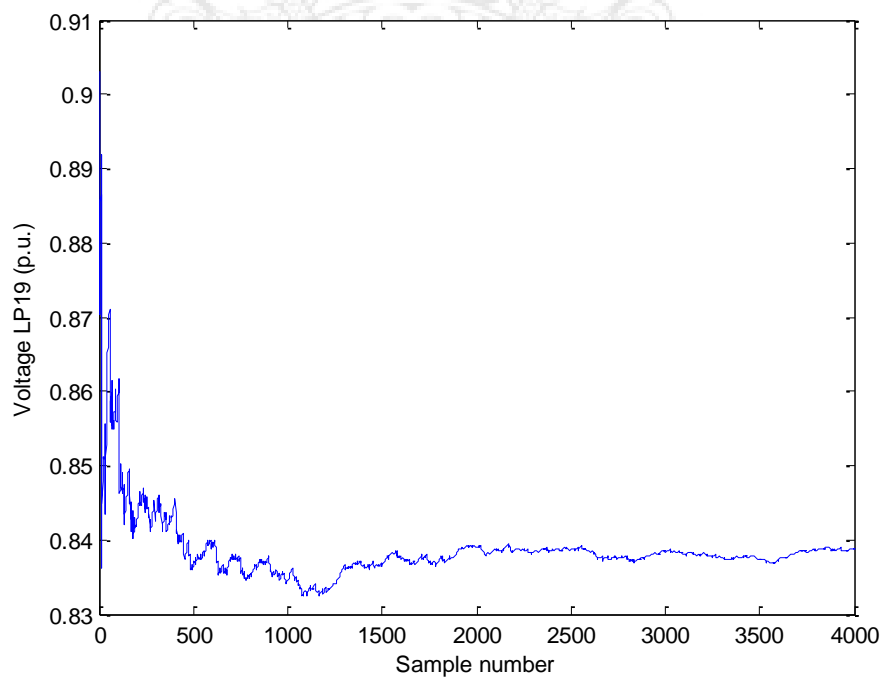
ภาพที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 16 มีขนาดเท่ากับ 0.841 p.u.



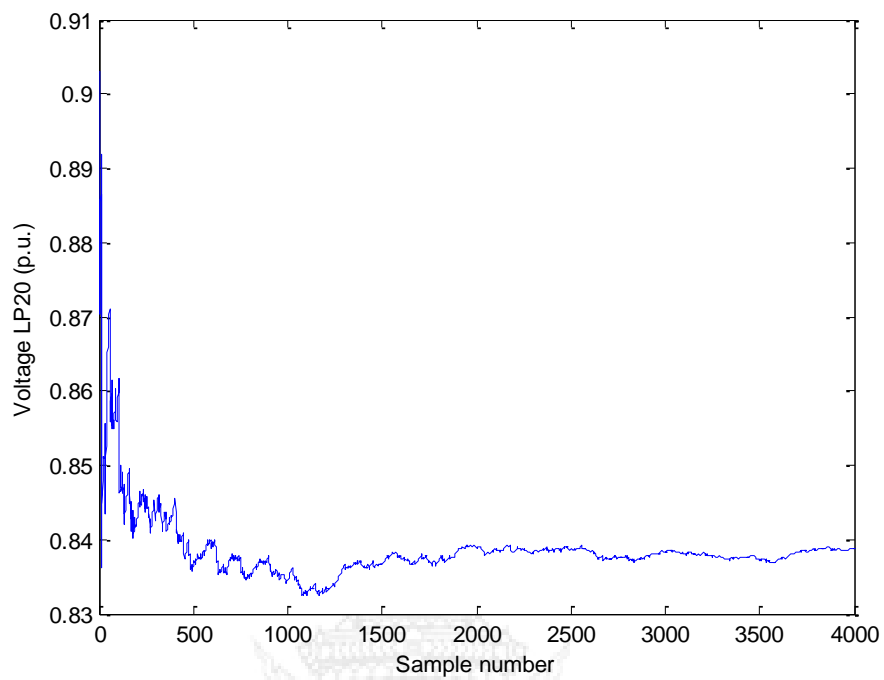
ภาพที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 17 มีขนาดเท่ากับ 0.839 p.u.



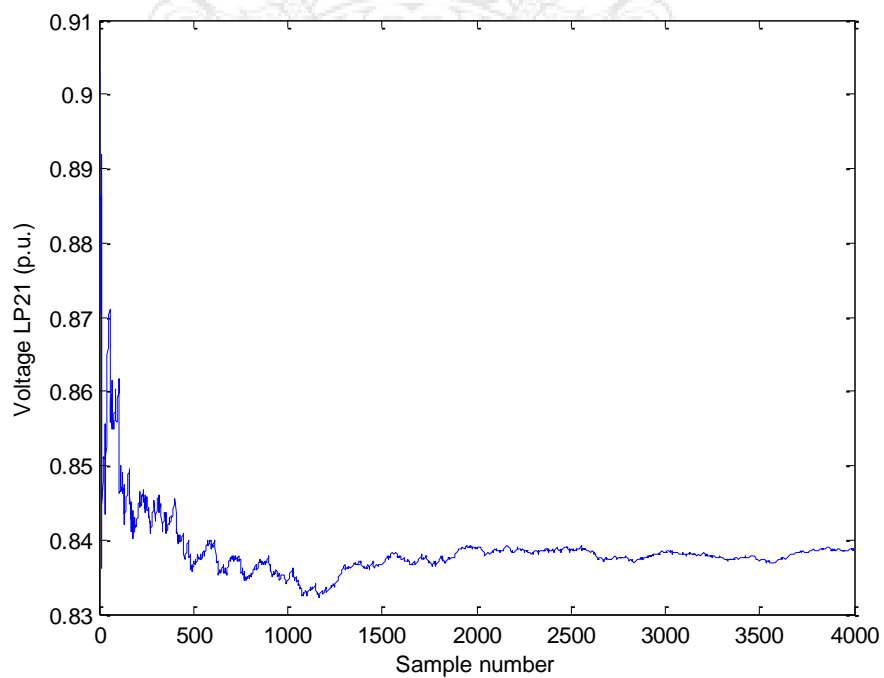
ภาพที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 18 มีขนาดเท่ากับ 0.838 p.u.



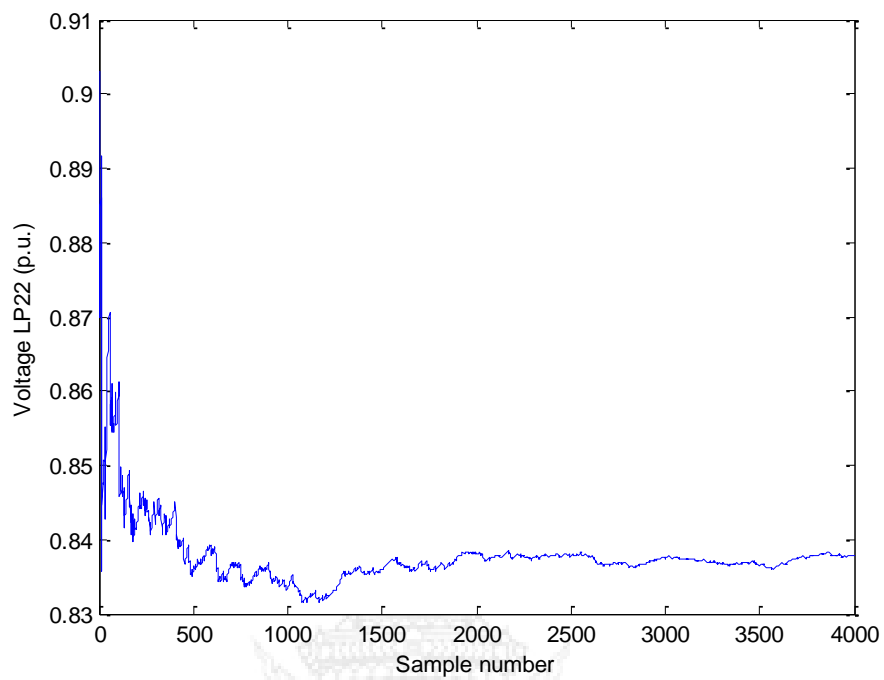
ภาพที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 19 มีขนาดเท่ากับ 0.838 p.u.



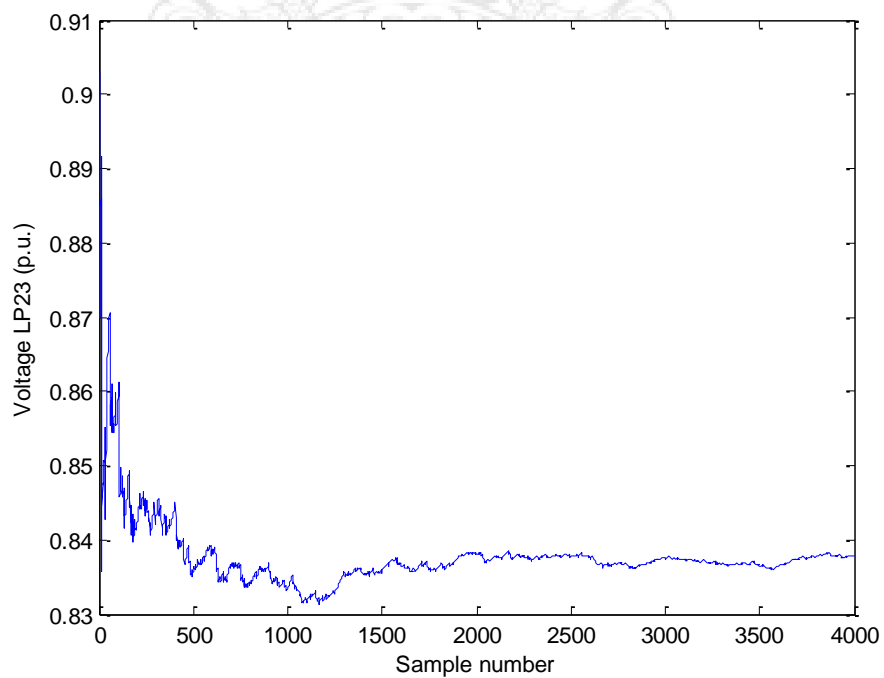
ภาพที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 20 มีขนาดเท่ากับ 0.838 p.u.



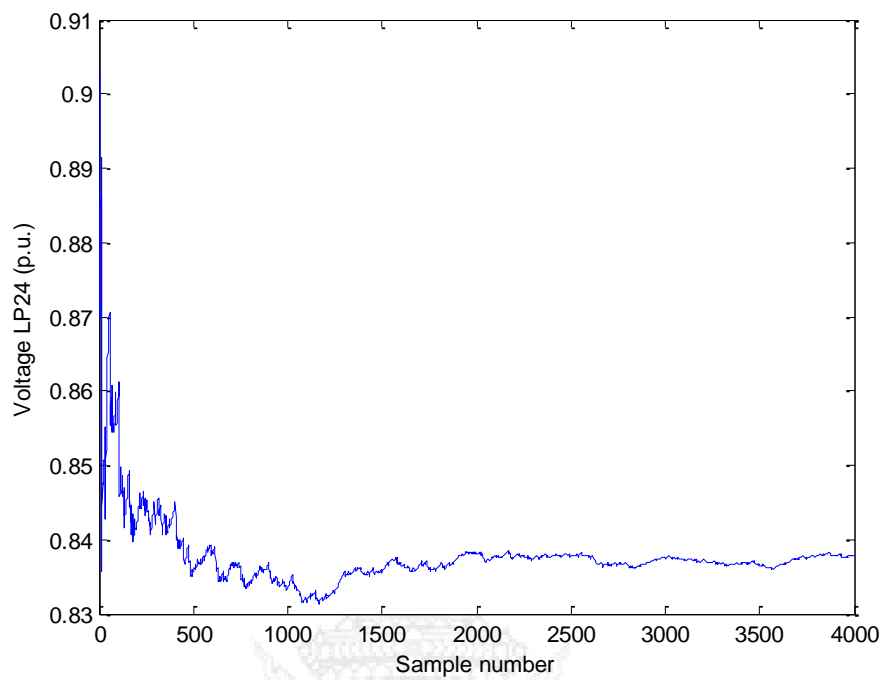
ภาพที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 21 มีขนาดเท่ากับ 0.838 p.u.



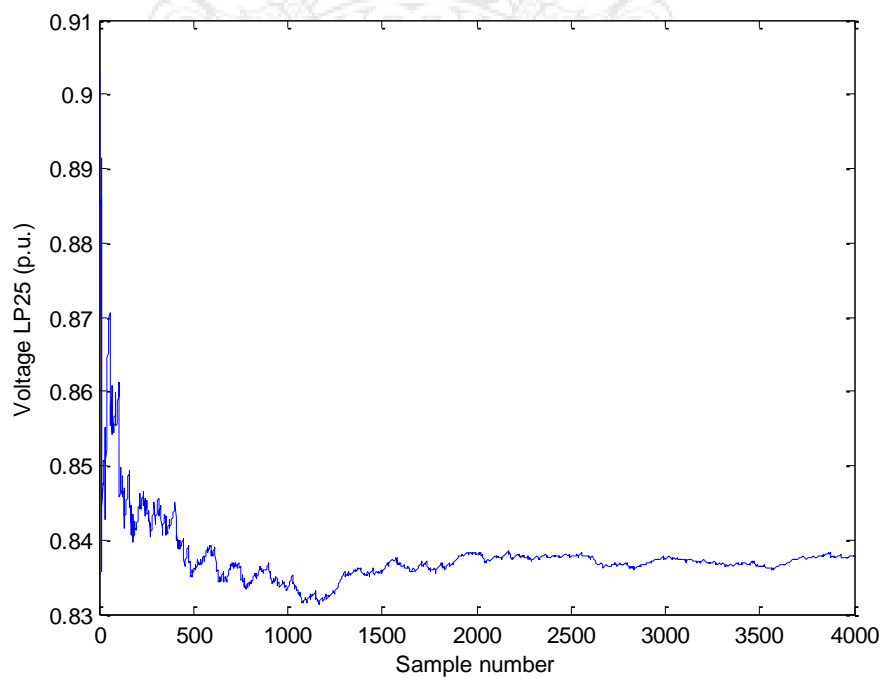
ภาพที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 22 มีขนาดเท่ากับ 0.837 p.u.



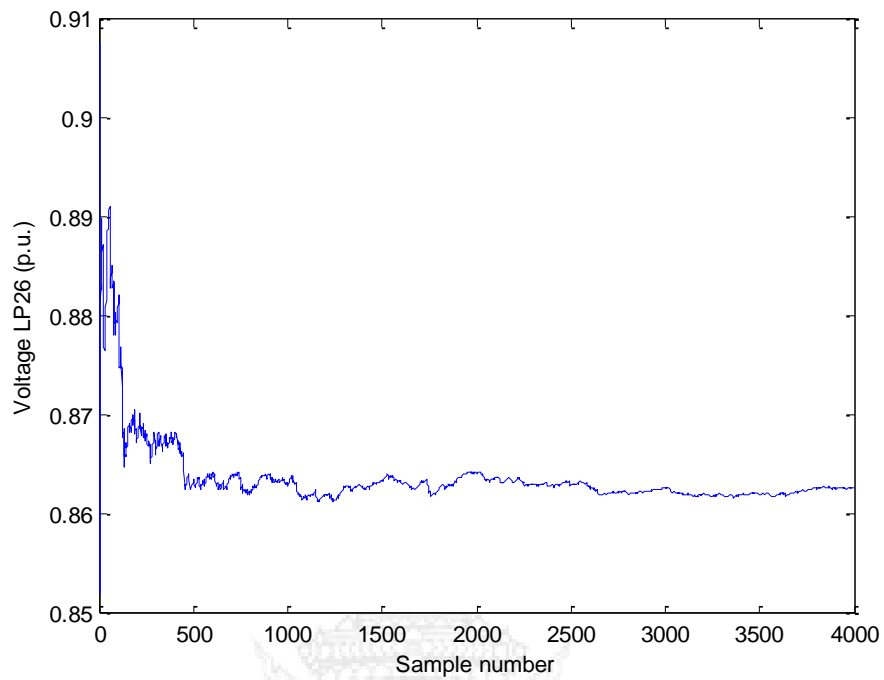
ภาพที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 23 มีขนาดเท่ากับ 0.837 p.u.



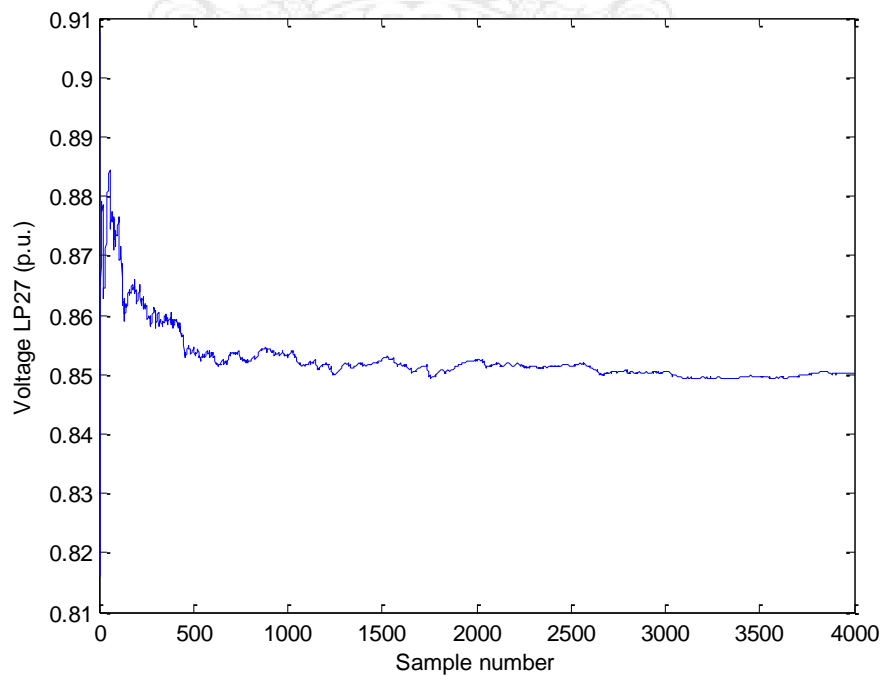
ภาพที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 24 มีขนาดเท่ากับ 0.837 p.u.



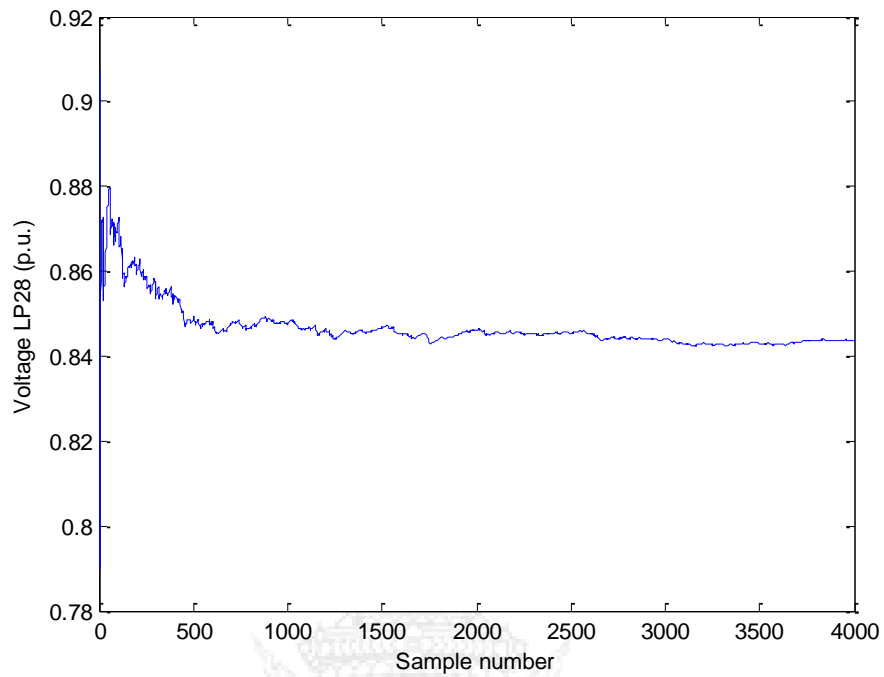
ภาพที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 25 มีขนาดเท่ากับ 0.837 p.u.



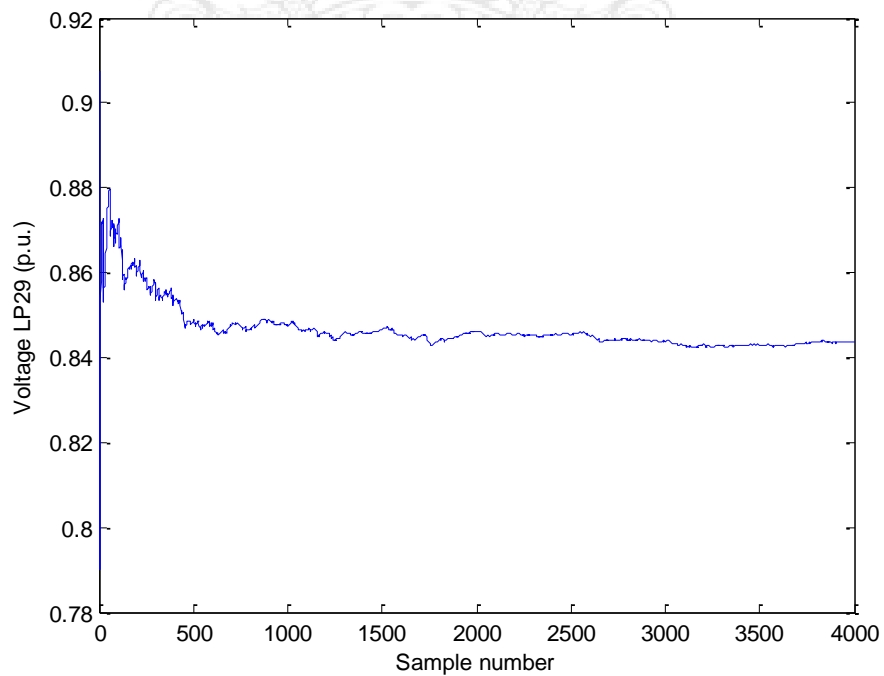
ภาพที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 26 มีขนาดเท่ากับ 0.862 p.u.



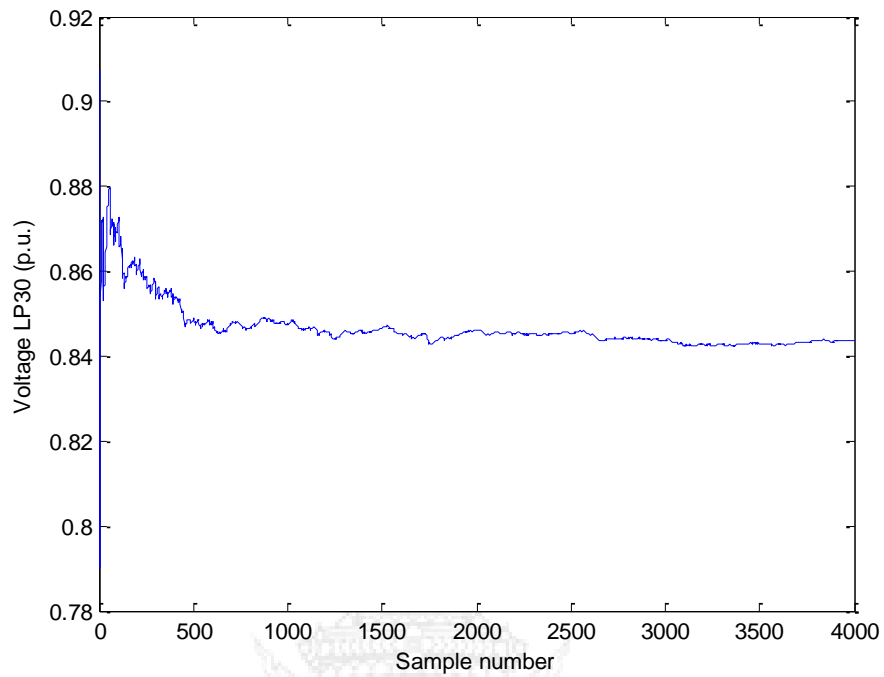
ภาพที่ 4.27 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 27 มีขนาดเท่ากับ 0.851 p.u.



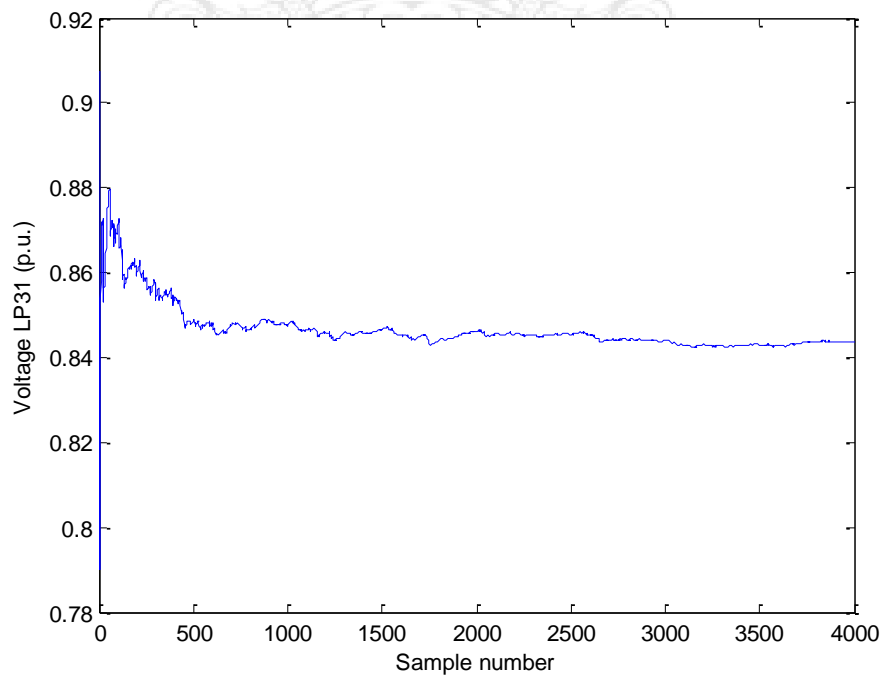
ภาพที่ 4.28 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 28 มีขนาดเท่ากับ 0.843 p.u.



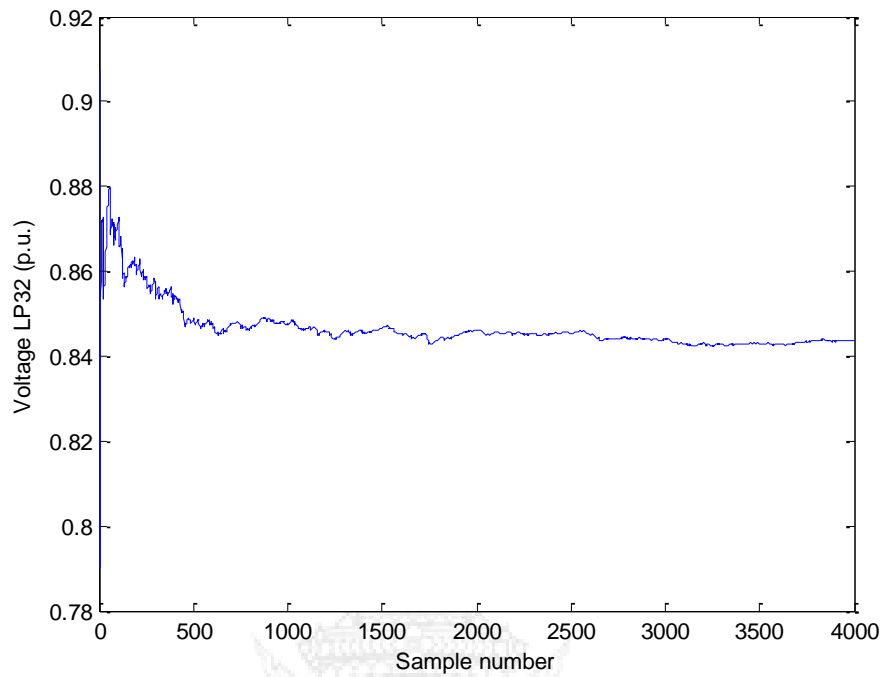
ภาพที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 29 มีขนาดเท่ากับ 0.935 p.u.



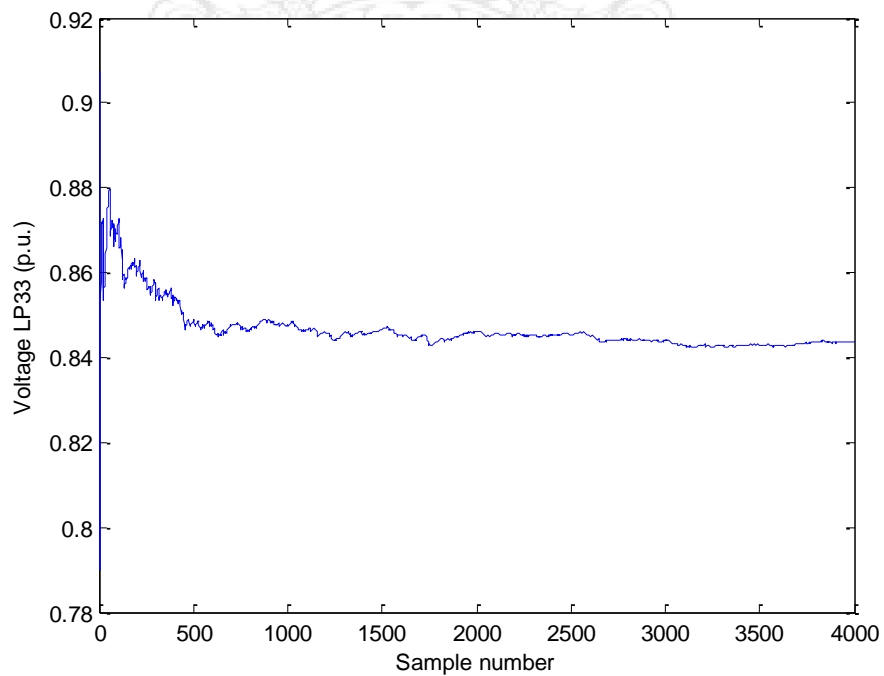
ภาพที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 30 มีขนาดเท่ากับ 0.843 p.u.



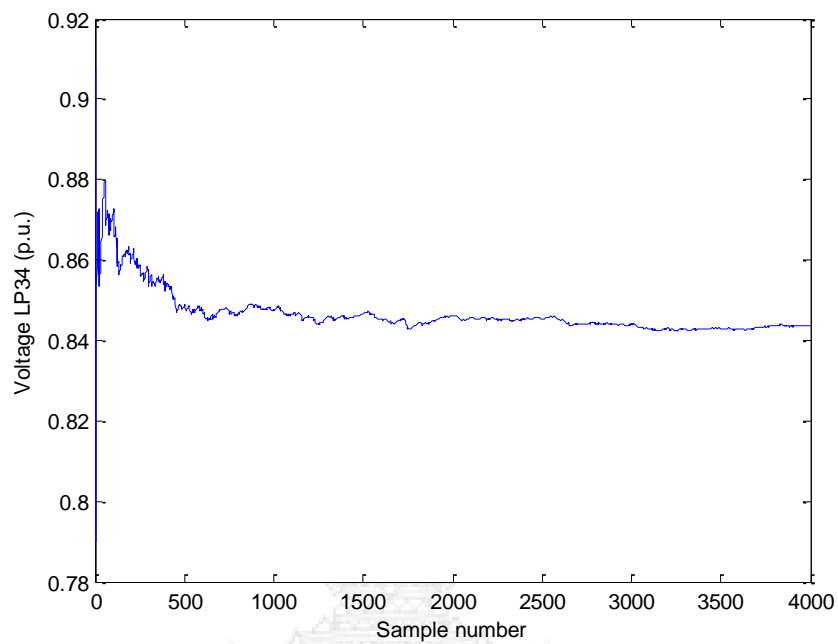
ภาพที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 31 มีขนาดเท่ากับ 0.843 p.u.



ภาพที่ 4.32 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 32 มีขนาดเท่ากับ 0.843 p.u.



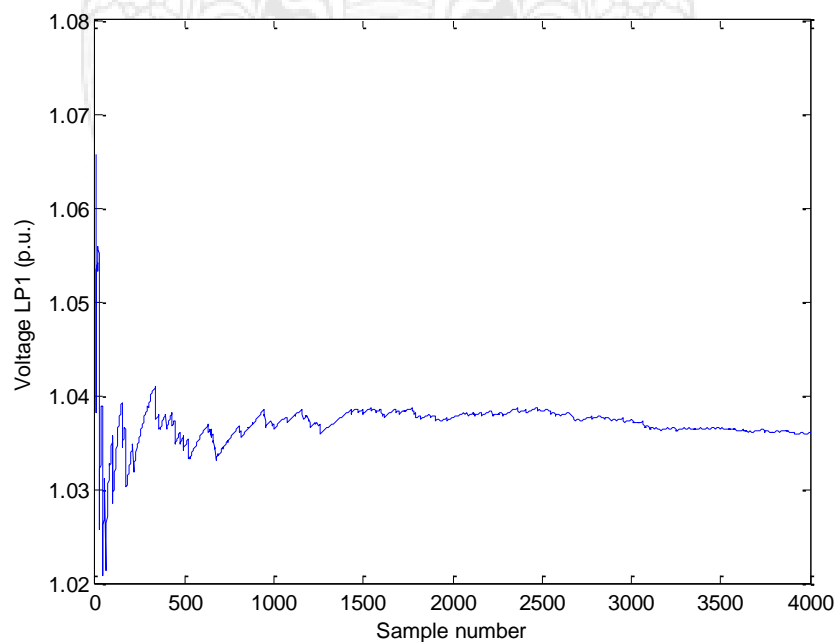
ภาพที่ 4.33 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 33 มีขนาดเท่ากับ 0.843 p.u.



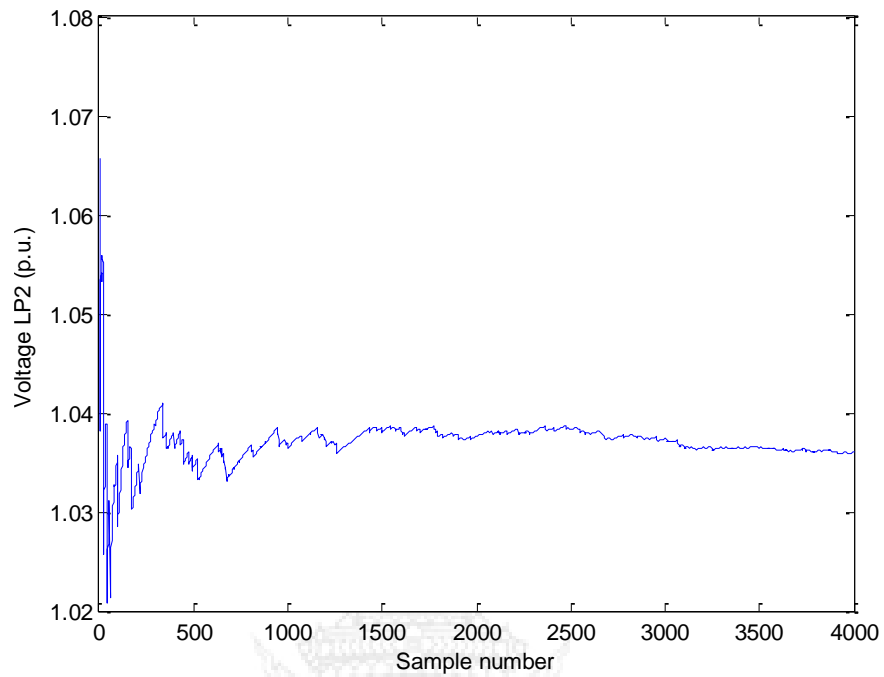
ภาพที่ 4.34 แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ยที่จุดโหลด 34 มีขนาดเท่ากับ 0.843 p.u.

4.3 การประเมินขนาดแรงดันไฟฟ้าเกินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 34 จุดโหลด

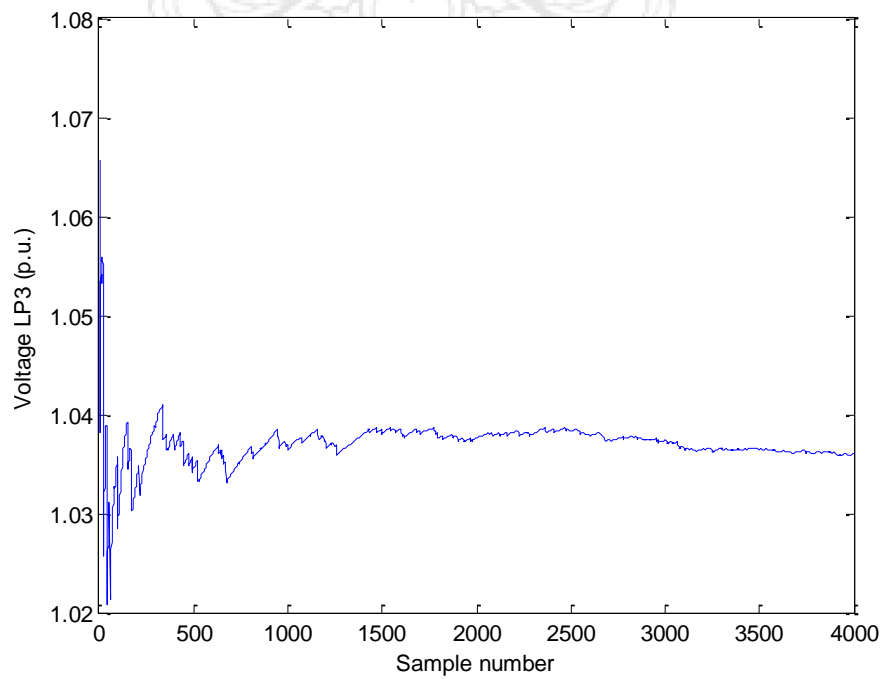
ผลการประเมินแรงดันไฟฟ้าเกินสามารถทำได้โดยการทำซ้ำและหาค่าเฉลี่ย โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งหลังจาก 4,000 รอบการคำนวณ จะได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเกินแต่ละจุดโหลด ดังนี้



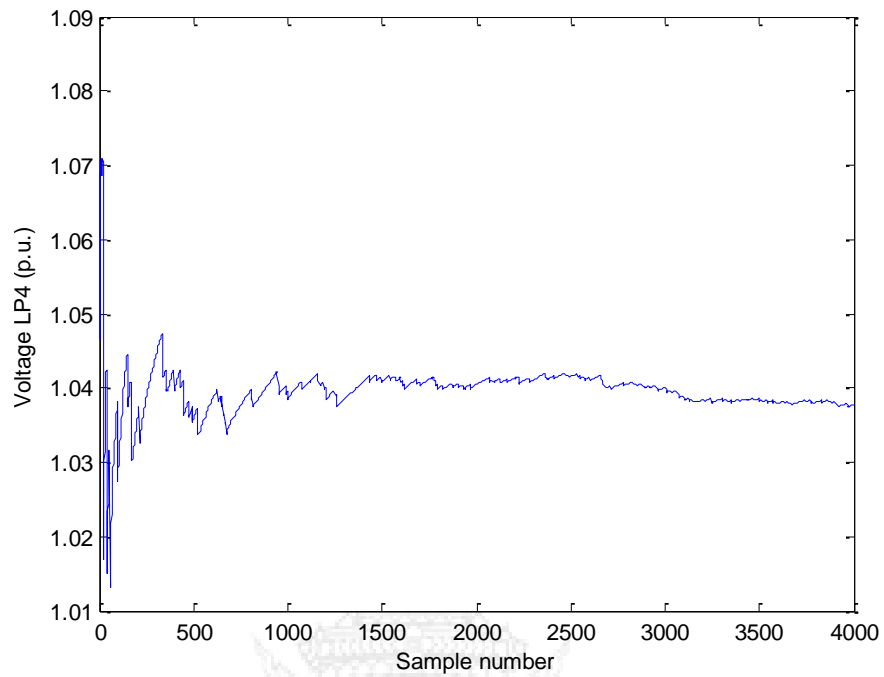
ภาพที่ 4.35 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 1 มีขนาดเท่ากับ 1.036 p.u.



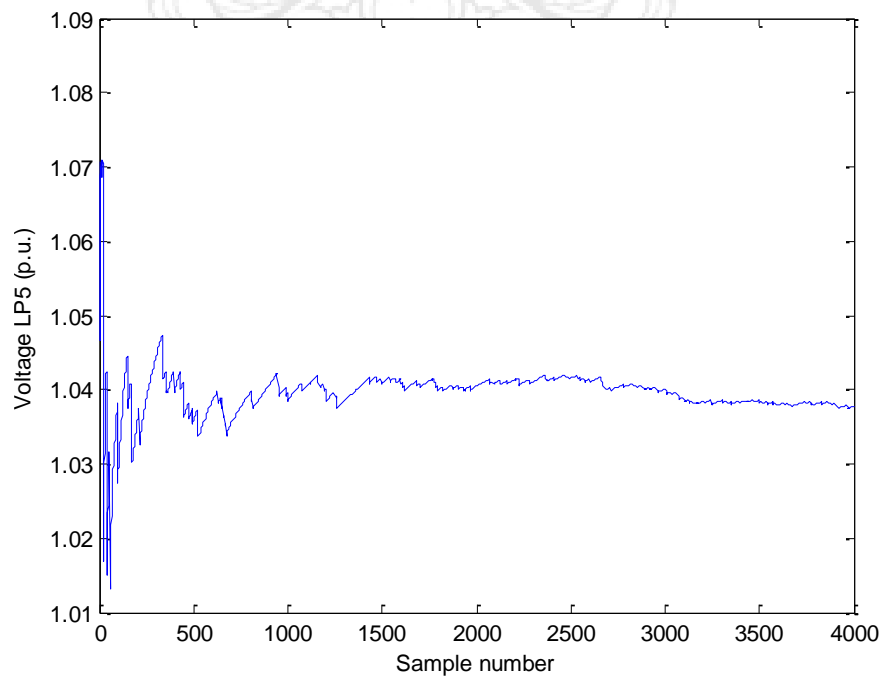
ภาพที่ 4.36 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 2 มีขนาดเท่ากับ 1.036 p.u.



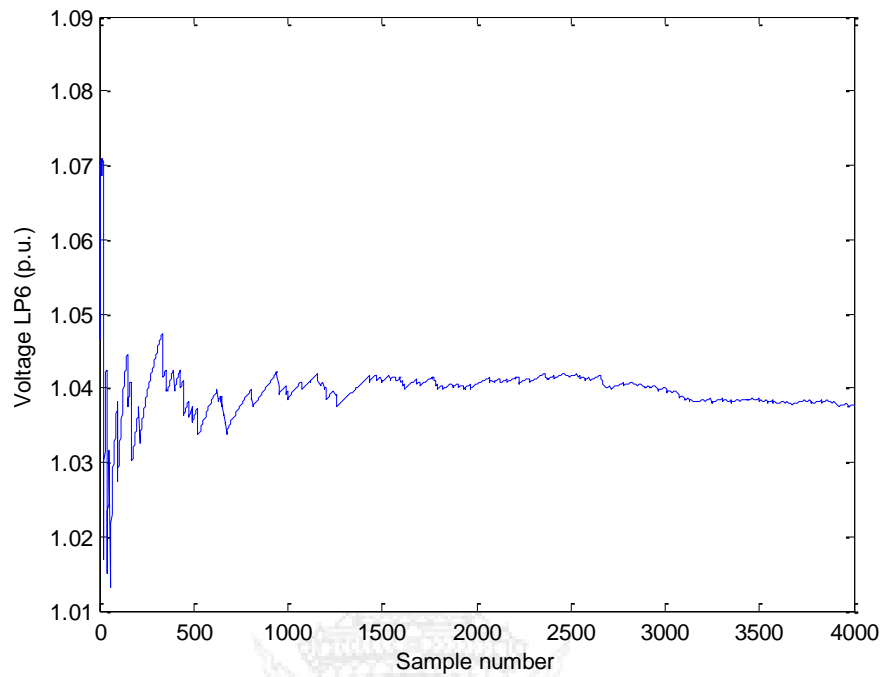
ภาพที่ 4.37 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 3 มีขนาดเท่ากับ 1.036 p.u.



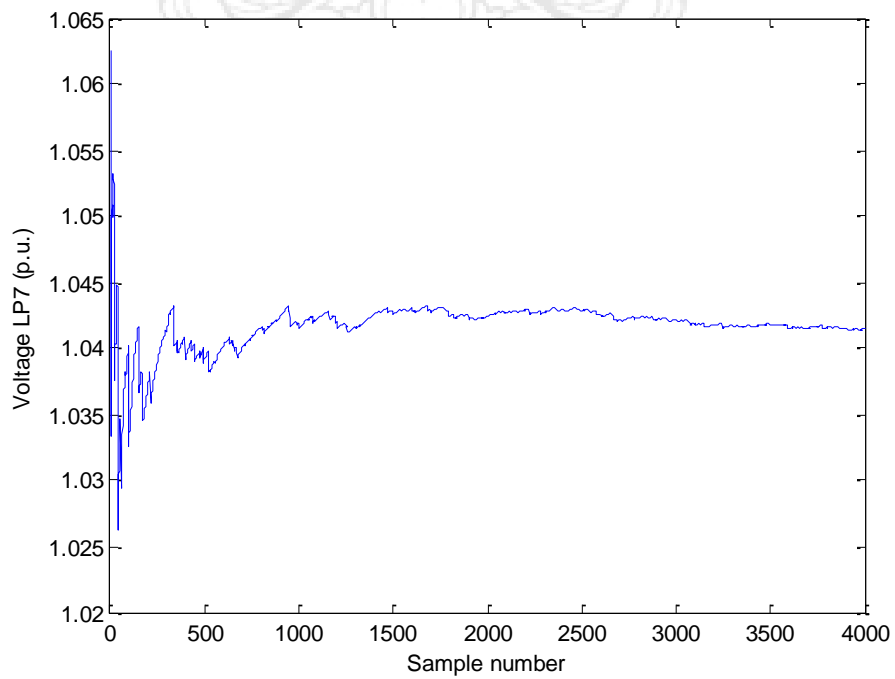
ภาพที่ 4.38 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 4 มีขนาดเท่ากับ 1.037 p.u.



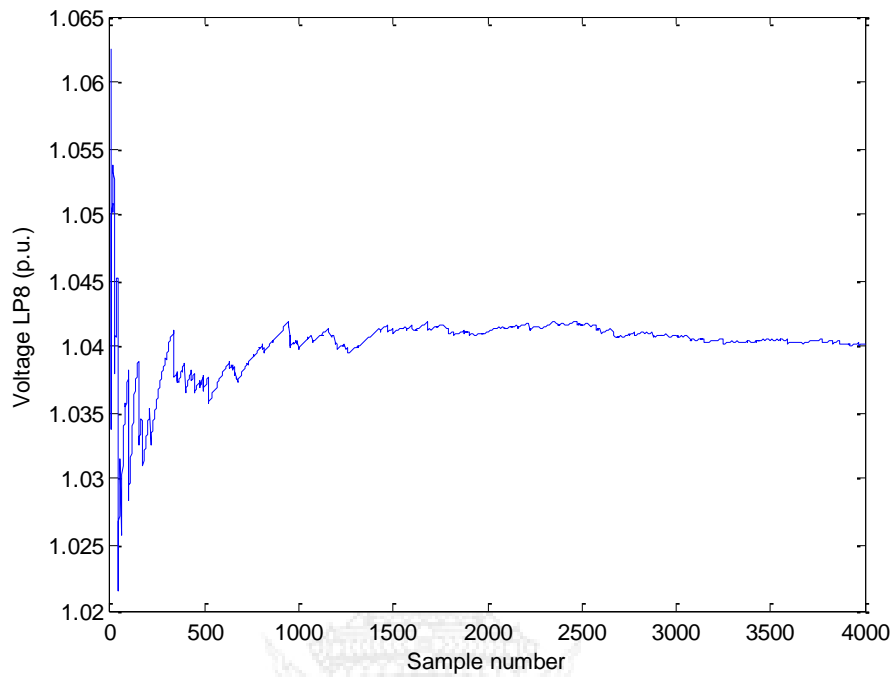
ภาพที่ 4.39 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 5 มีขนาดเท่ากับ 1.037 p.u.



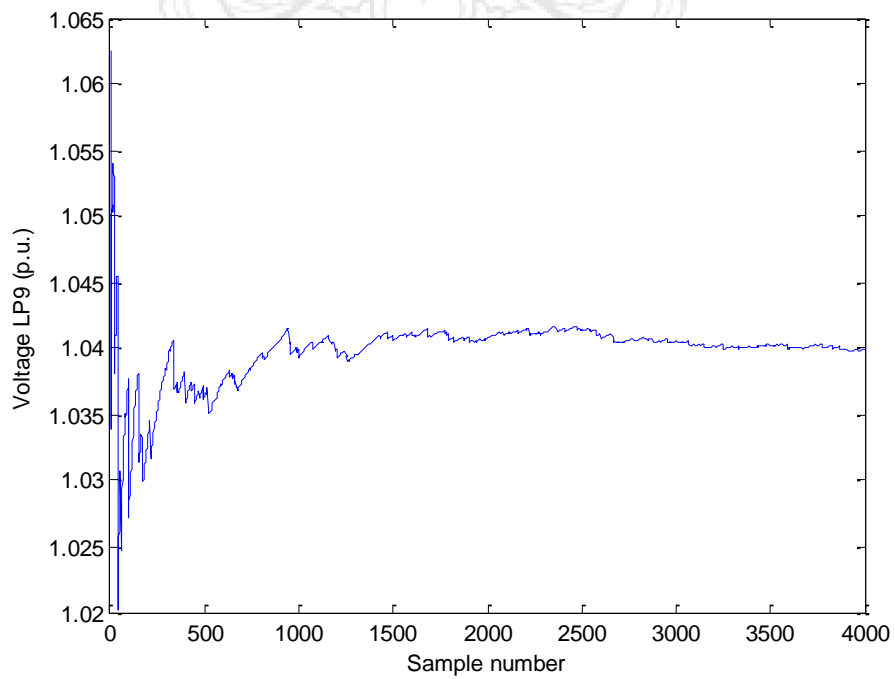
ภาพที่ 4.40 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 6 มีขนาดเท่ากับ 1.037 p.u.



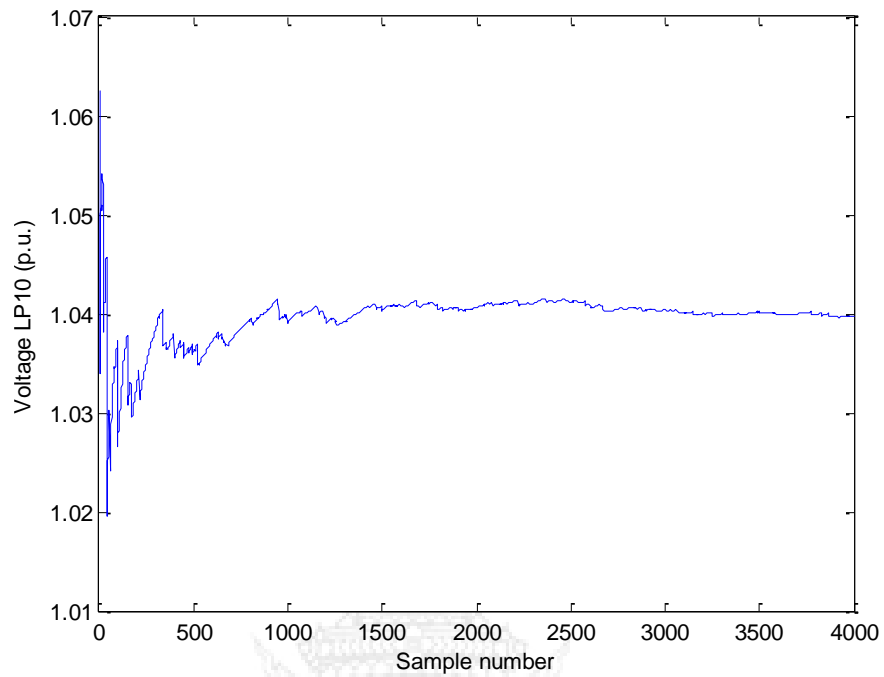
ภาพที่ 4.41 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 7 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



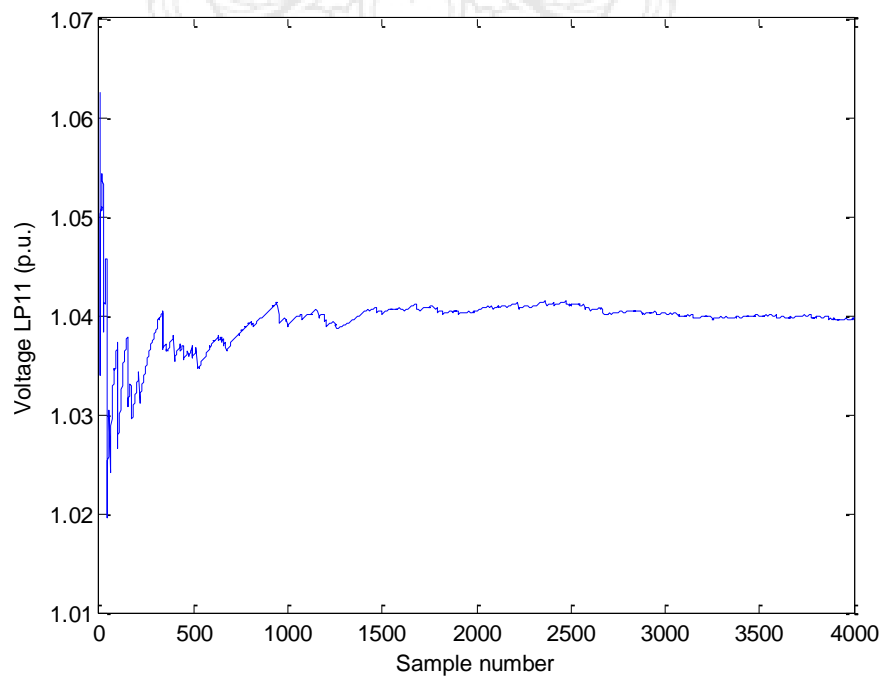
ภาพที่ 4.42 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 8 มีขนาดเท่ากับ 1.040 p.u.



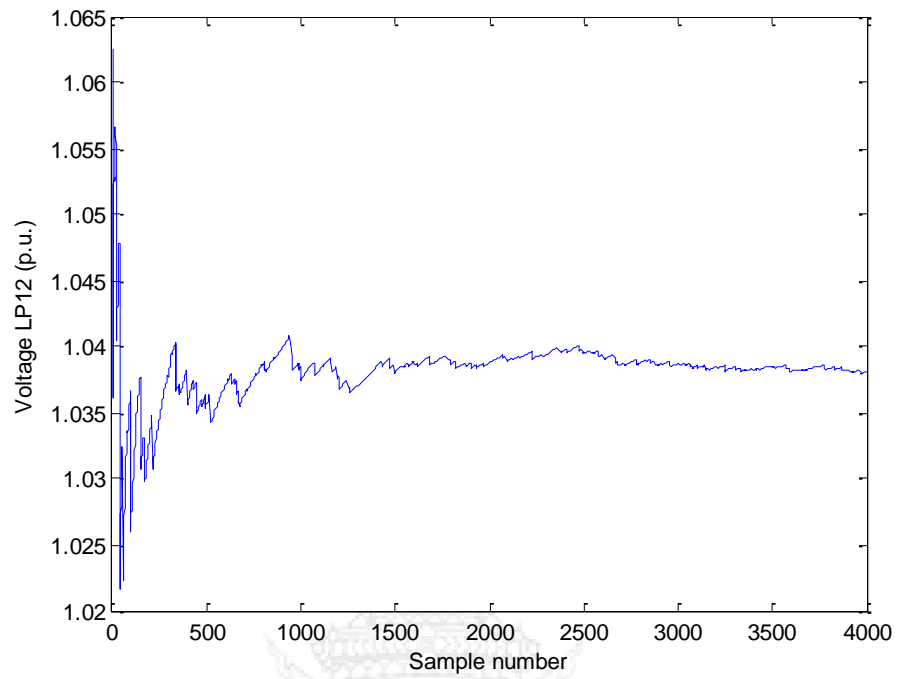
ภาพที่ 4.43 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 9 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



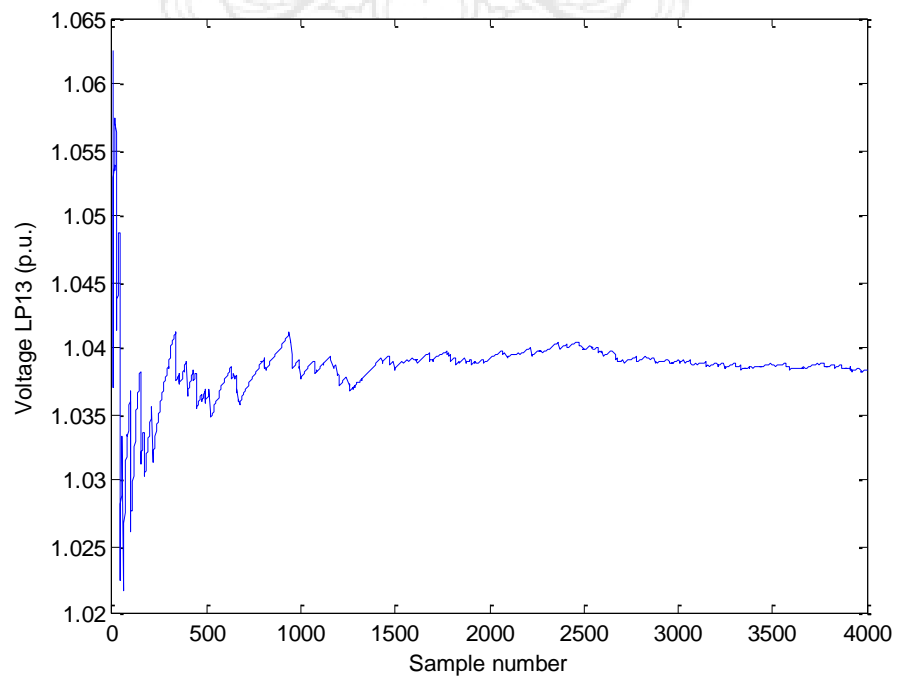
ภาพที่ 4.44 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 10 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



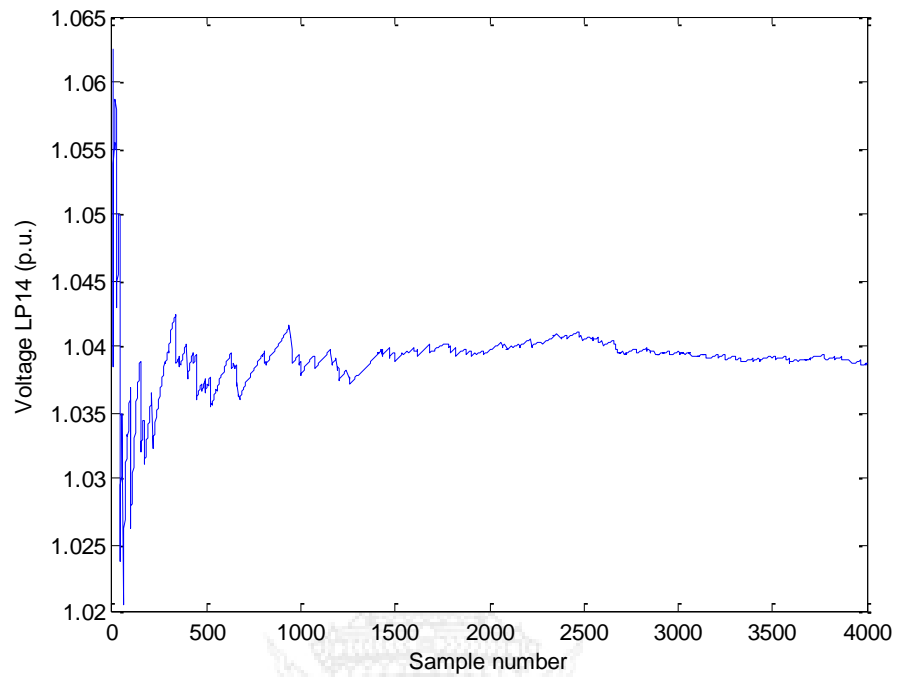
ภาพที่ 4.45 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 11 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



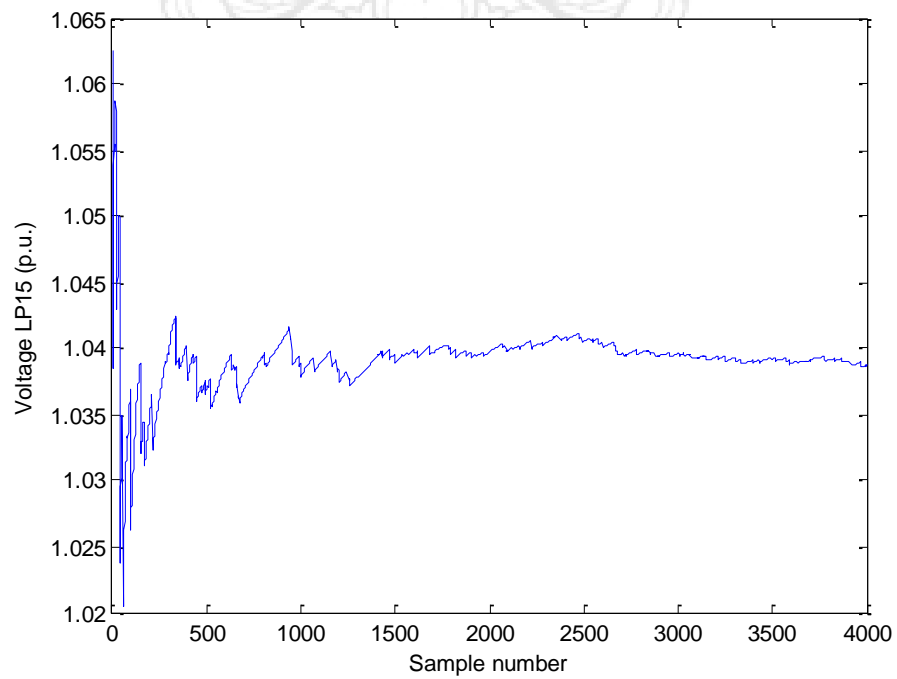
ภาพที่ 4.46 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 12 มีขนาดเท่ากับ 1.038 p.u.



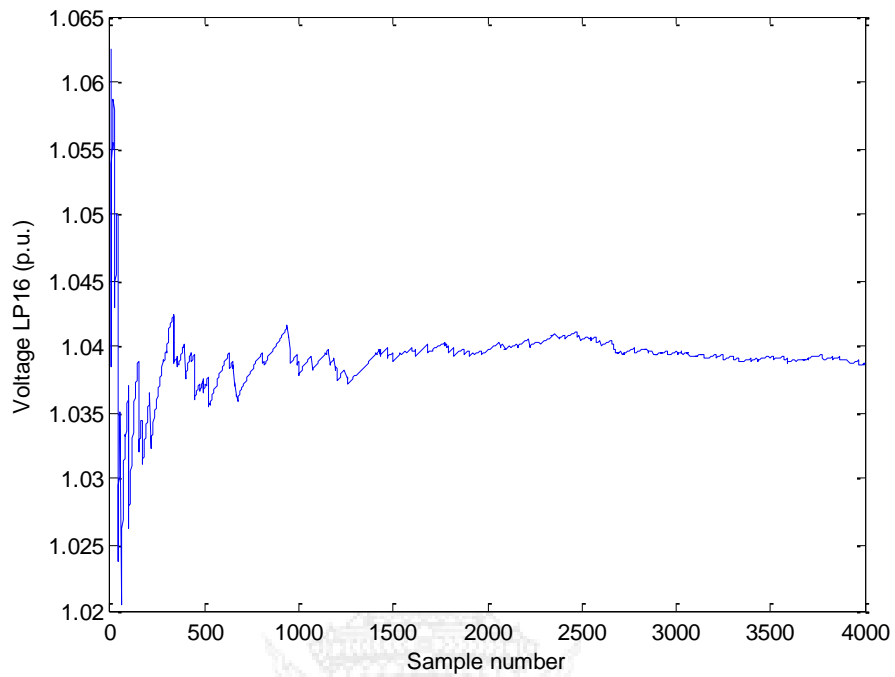
ภาพที่ 4.47 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 13 มีขนาดเท่ากับ 1.038 p.u.



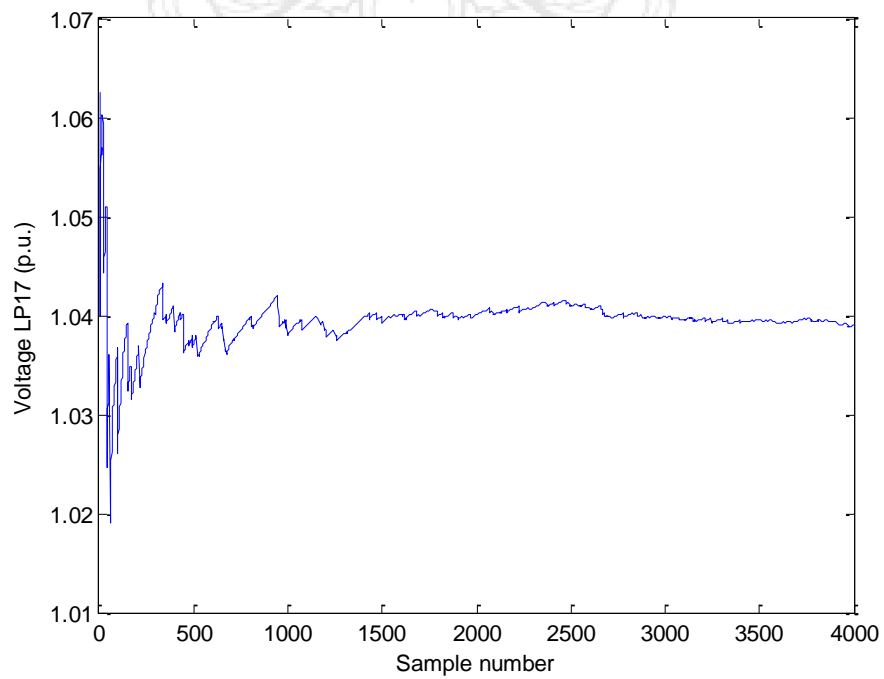
ภาพที่ 4.48 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 14 มีขนาดเท่ากับ 1.038 p.u.



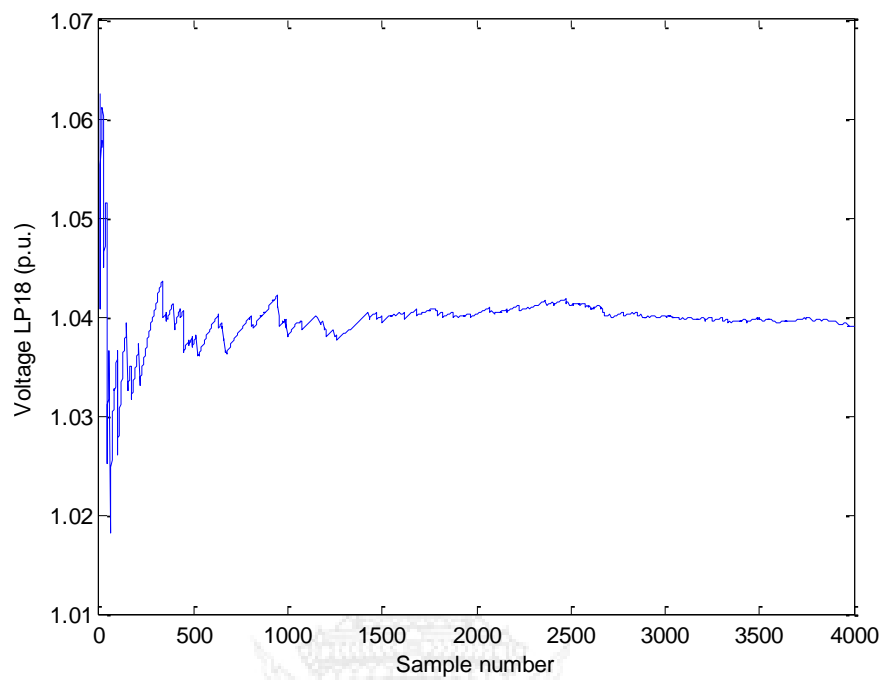
ภาพที่ 4.49 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 15 มีขนาดเท่ากับ 1.038 p.u.



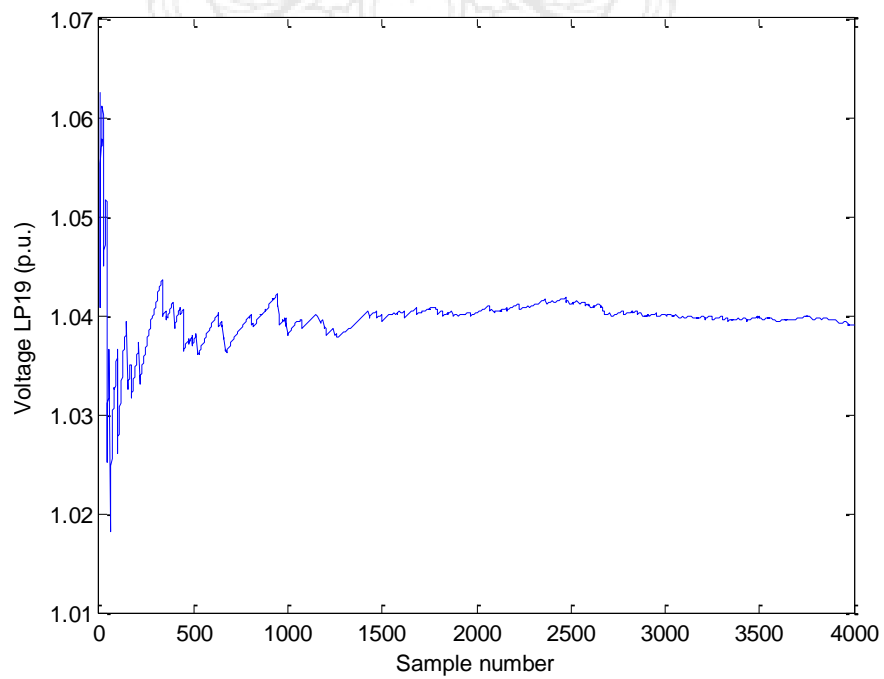
ภาพที่ 4.50 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 16 มีขนาดเท่ากับ 1.038 p.u.



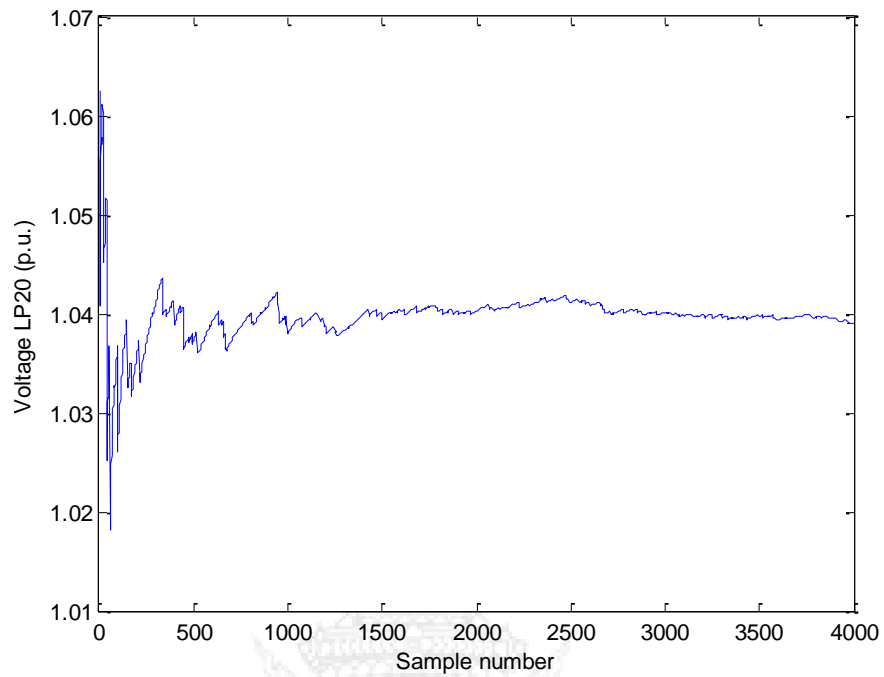
ภาพที่ 4.51 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 17 มีขนาดเท่ากับ 1.038 p.u.



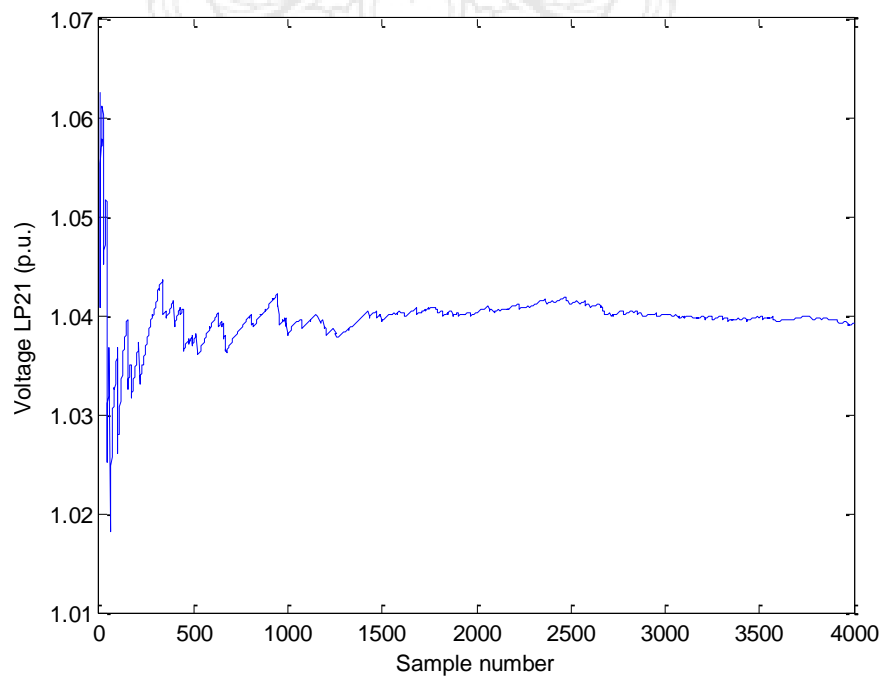
ภาพที่ 4.52 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 18 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



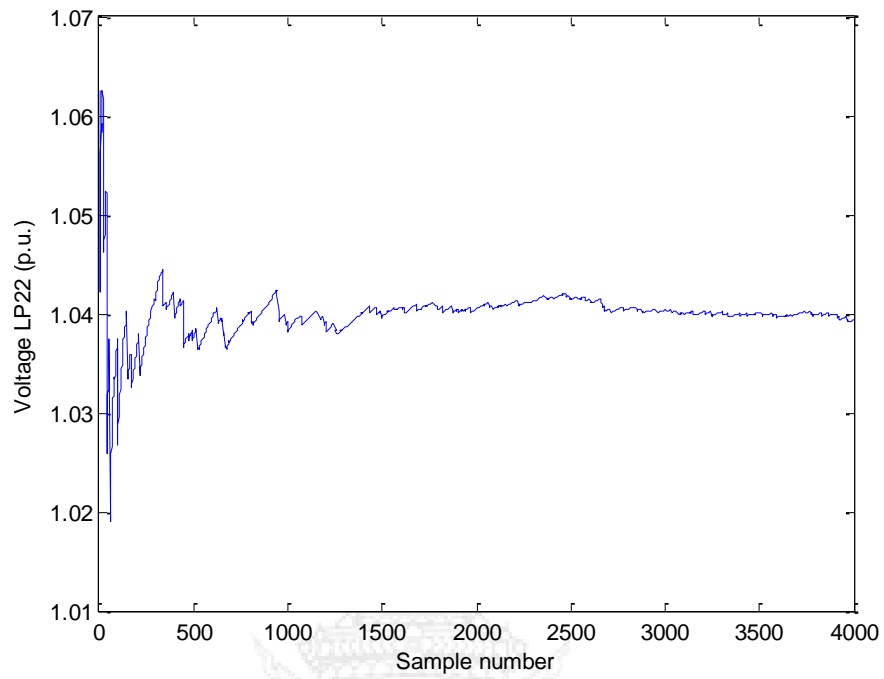
ภาพที่ 4.53 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 19 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



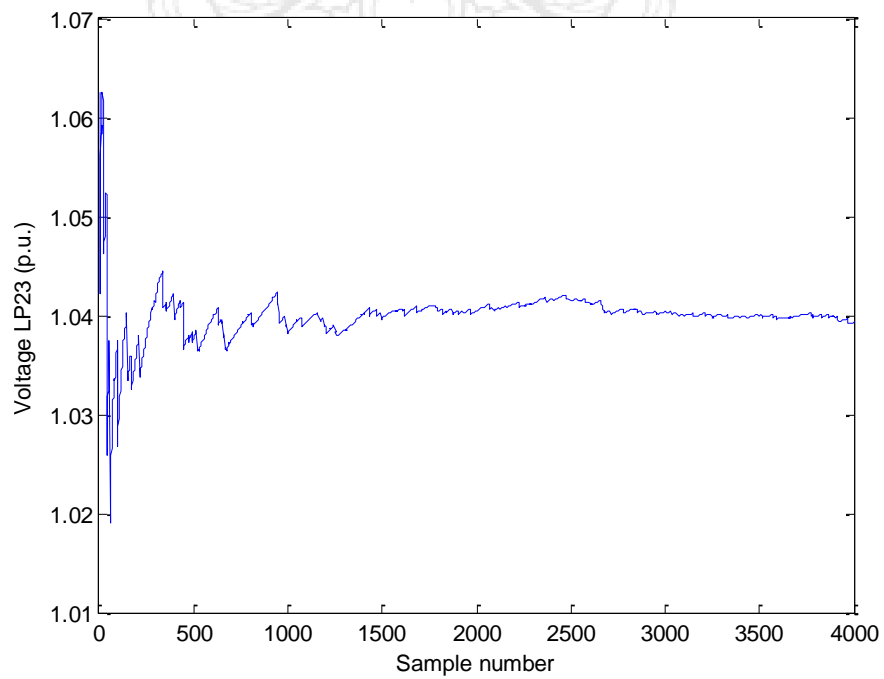
ภาพที่ 4.54 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 20 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



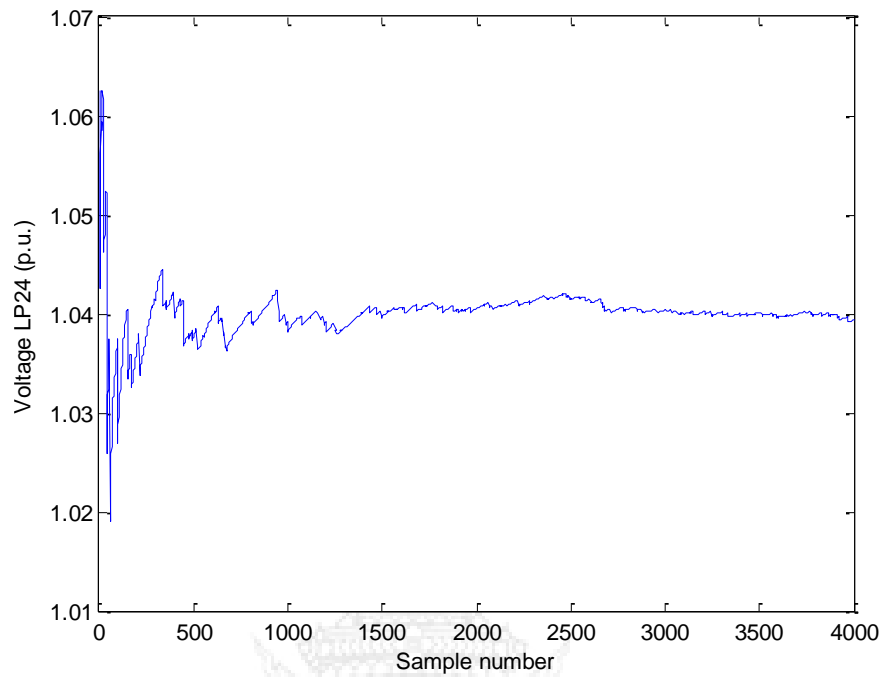
ภาพที่ 4.55 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 21 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



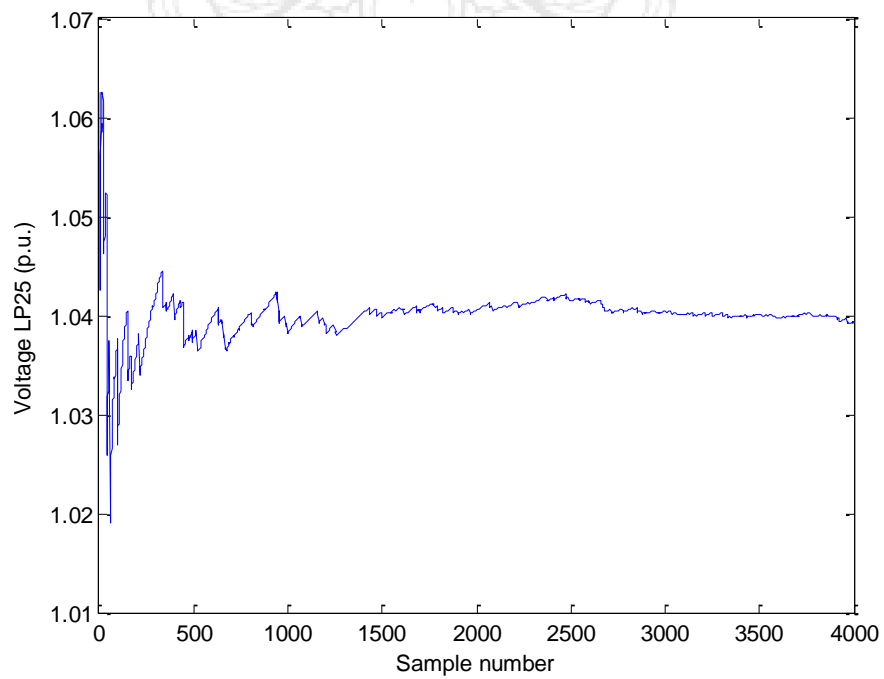
ภาพที่ 4.56 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 22 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



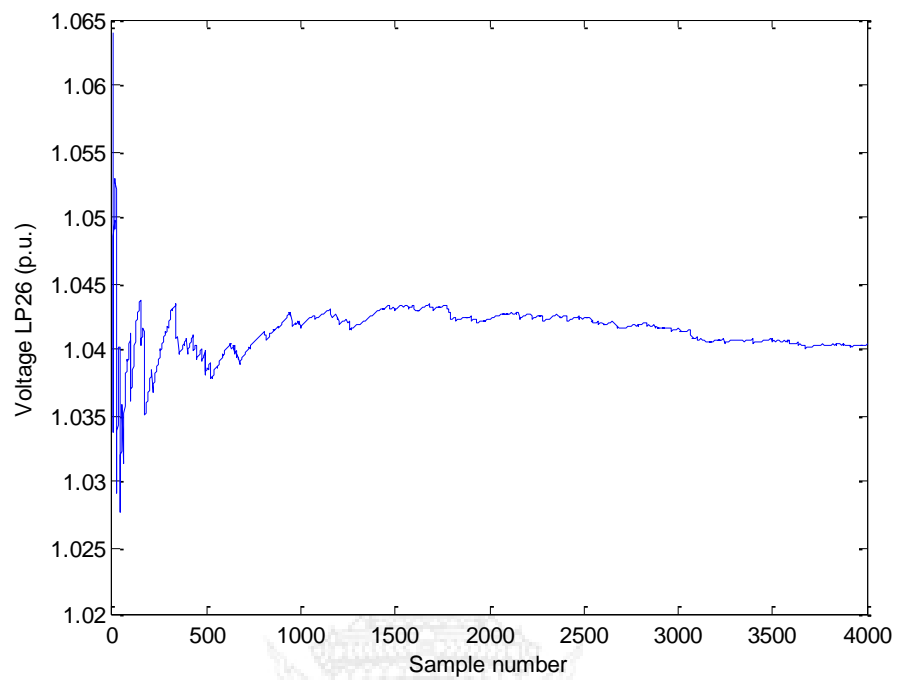
ภาพที่ 4.57 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 23 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



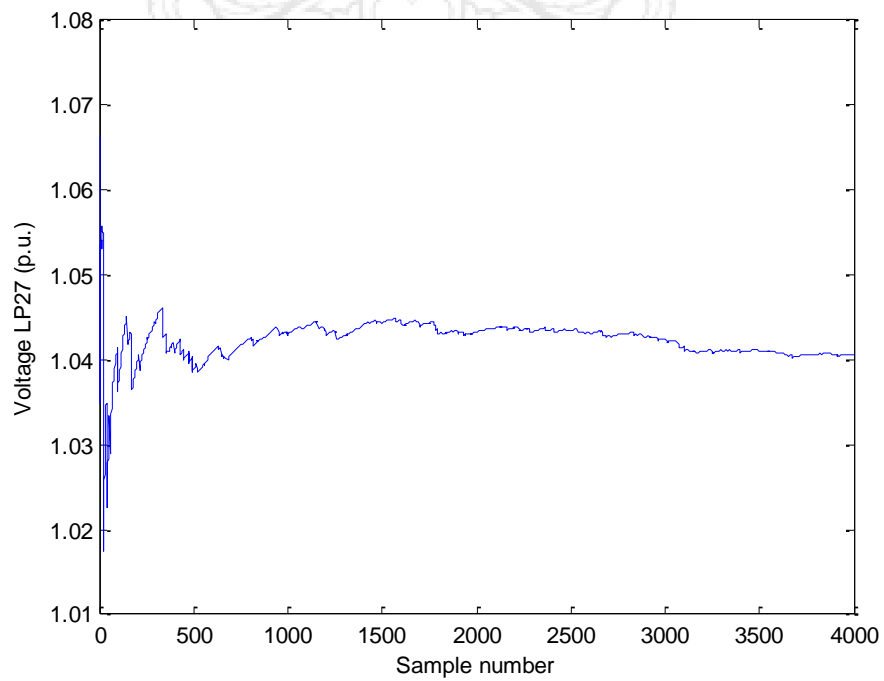
ภาพที่ 4.58 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 24 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



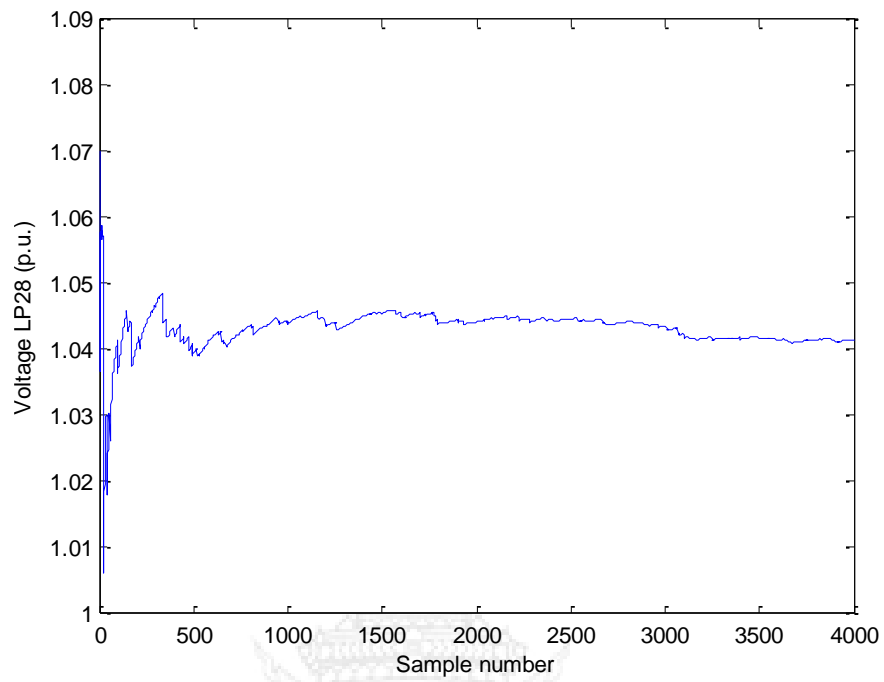
ภาพที่ 4.59 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 25 มีขนาดเท่ากับ 1.039 p.u.



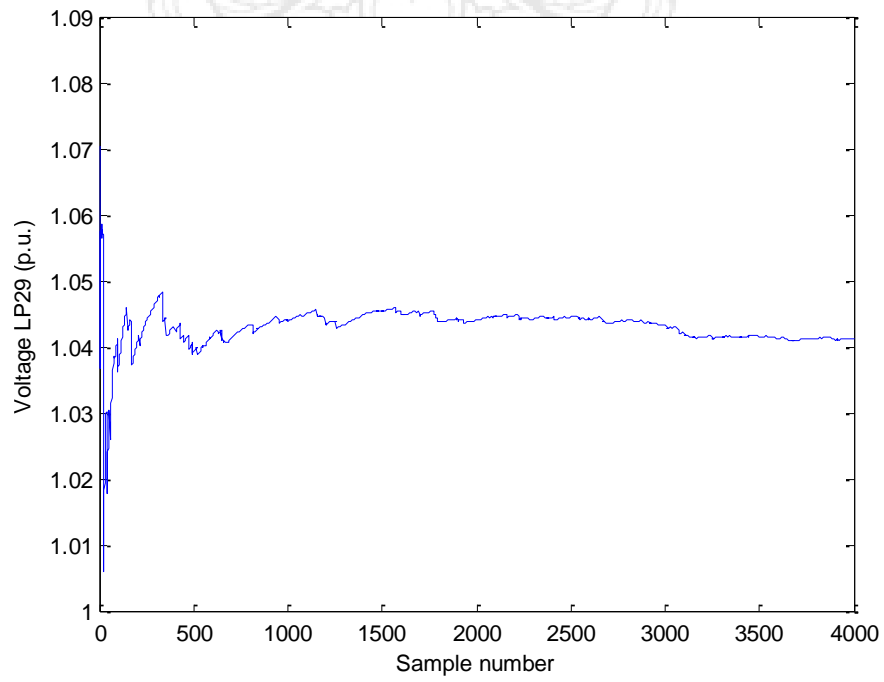
ภาพที่ 4.60 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 26 มีขนาดเท่ากับ 1.040 p.u.



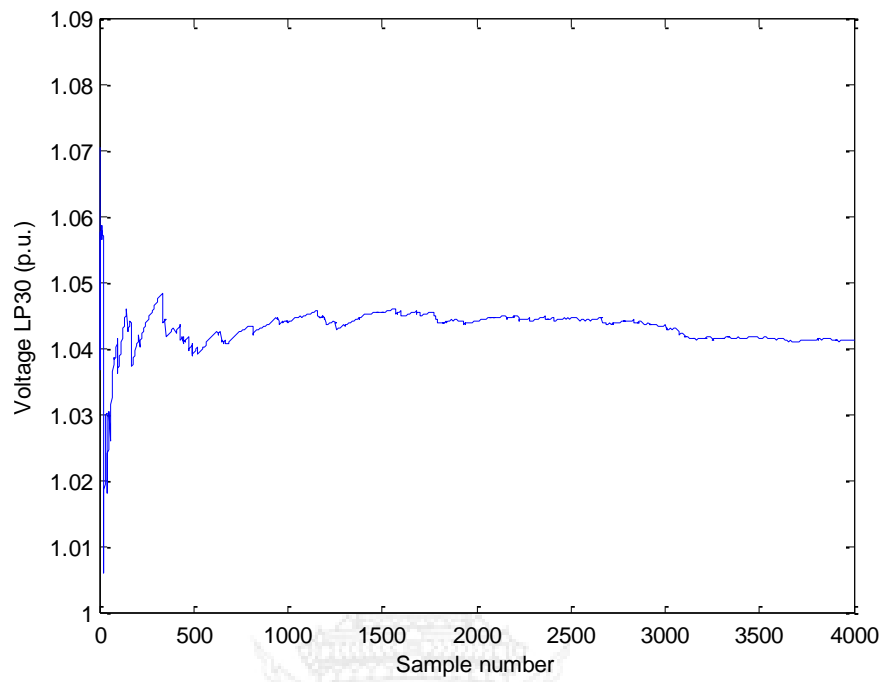
ภาพที่ 4.61 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 27 มีขนาดเท่ากับ 1.040 p.u.



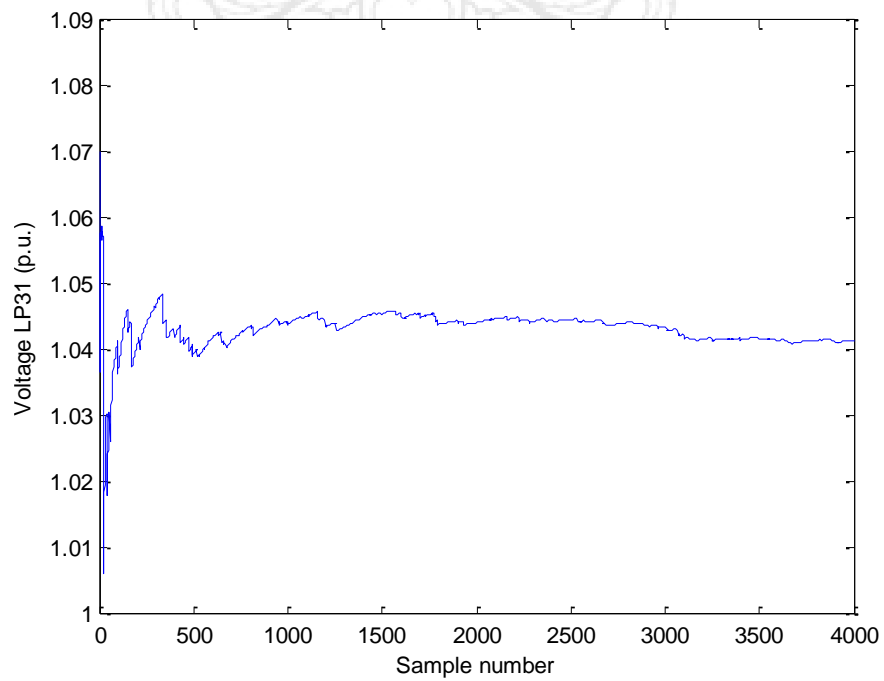
ภาพที่ 4.62 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 28 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



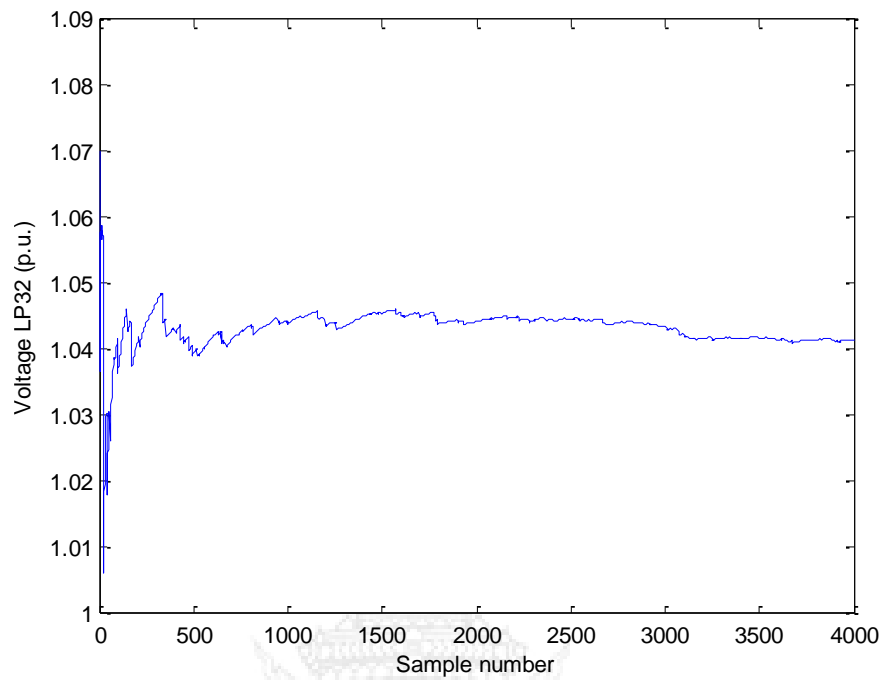
ภาพที่ 4.63 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 29 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



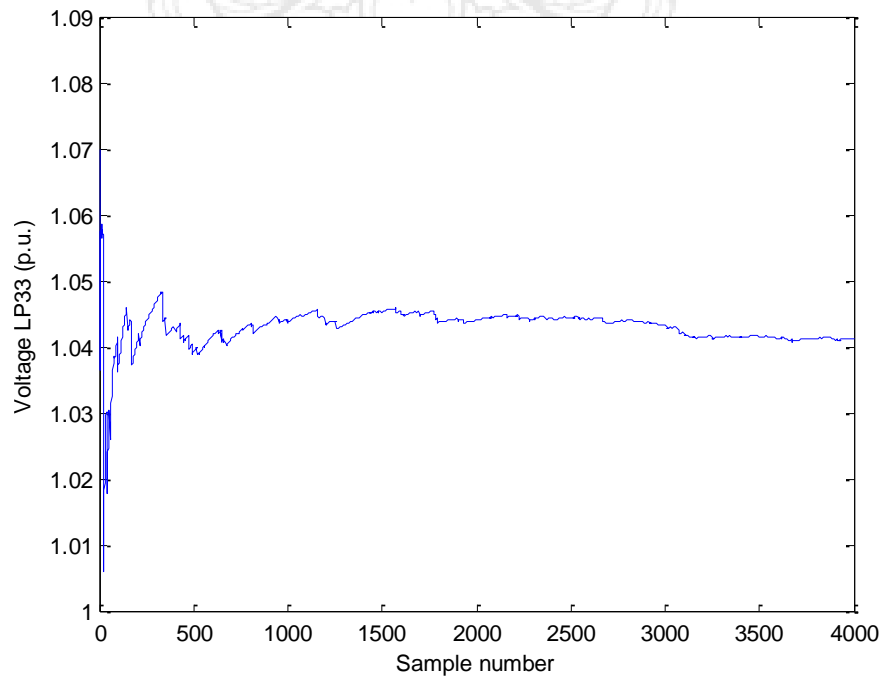
ภาพที่ 4.64 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 30 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



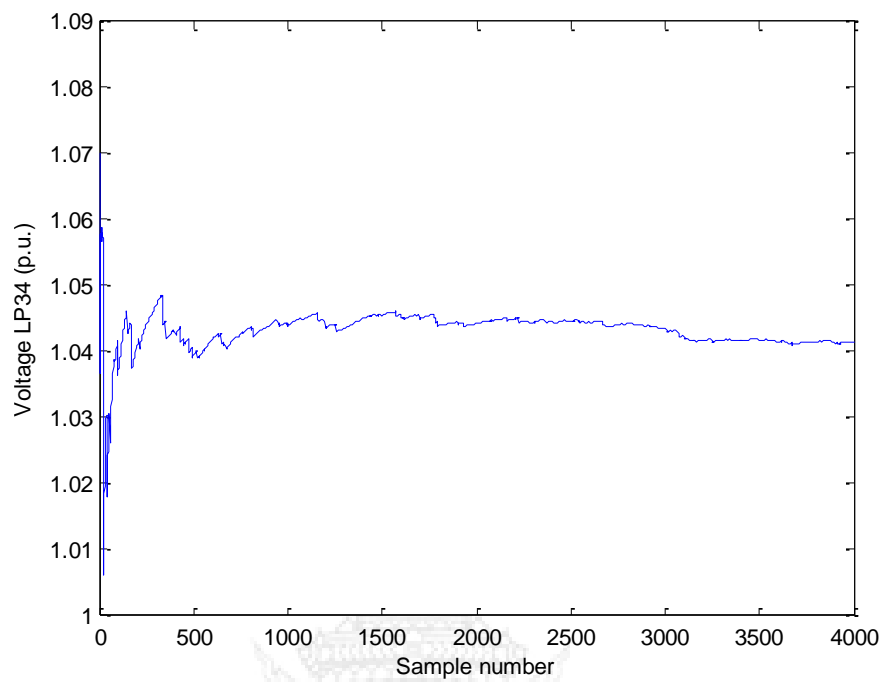
ภาพที่ 4.65 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 31 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



ภาพที่ 4.66 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 32 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



ภาพที่ 4.67 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 33 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



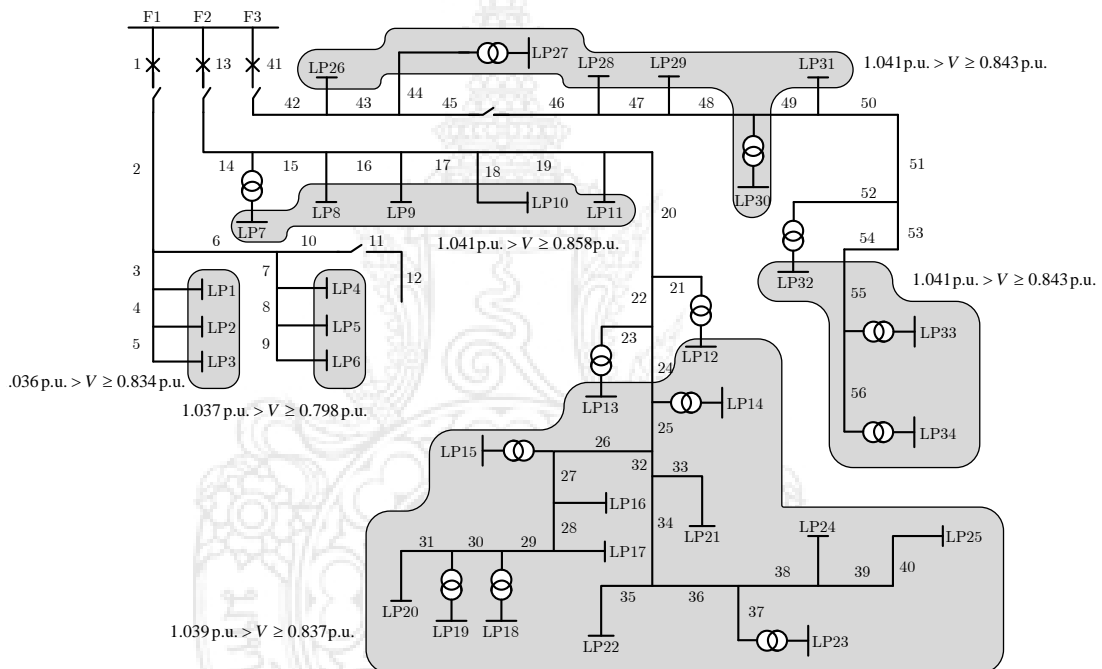
ภาพที่ 4.68 แรงดันไฟฟ้าเกินเฉลี่ยที่จุดโหลด 34 มีขนาดเท่ากับ 1.041 p.u.



บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

อุปกรณ์วิกฤตในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงกับกราฟตามมาตรฐาน ITIC (The Information Technology Industry Council) ซึ่งสามารถแสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินที่จุดโหลดต่างๆ ทั้ง 34 จุดโหลด ได้ดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 34 จุดโหลด

จากภาพที่ 5.1 จะพบว่าจุดโหลดที่อยู่ใกล้กับสถานีไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบที่มีต่ออุปกรณ์วิกฤตน้อยกว่าจุดโหลดที่อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้า กล่าวคือ จุดโหลดที่ต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าทั้งสามสายป้อน LP1-LP3, LP4-LP6, LP7-LP11, LP12-LP25, LP26-LP31 และ LP32-LP34 จะมีค่าเฉลี่ยขนาดแรงดันไฟฟ้าตกมีค่าเท่ากับ 0.834 p.u., 0.798 p.u., 0.858 p.u., 0.837 p.u., 0.843 p.u. และ 0.843 p.u. ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยขนาดแรงดันไฟฟ้าเกินมีค่าเท่ากับ 1.036 p.u., 1.037 p.u., 1.041 p.u., 1.039 p.u., 1.041 p.u. และ 1.041 p.u. ตามลำดับ

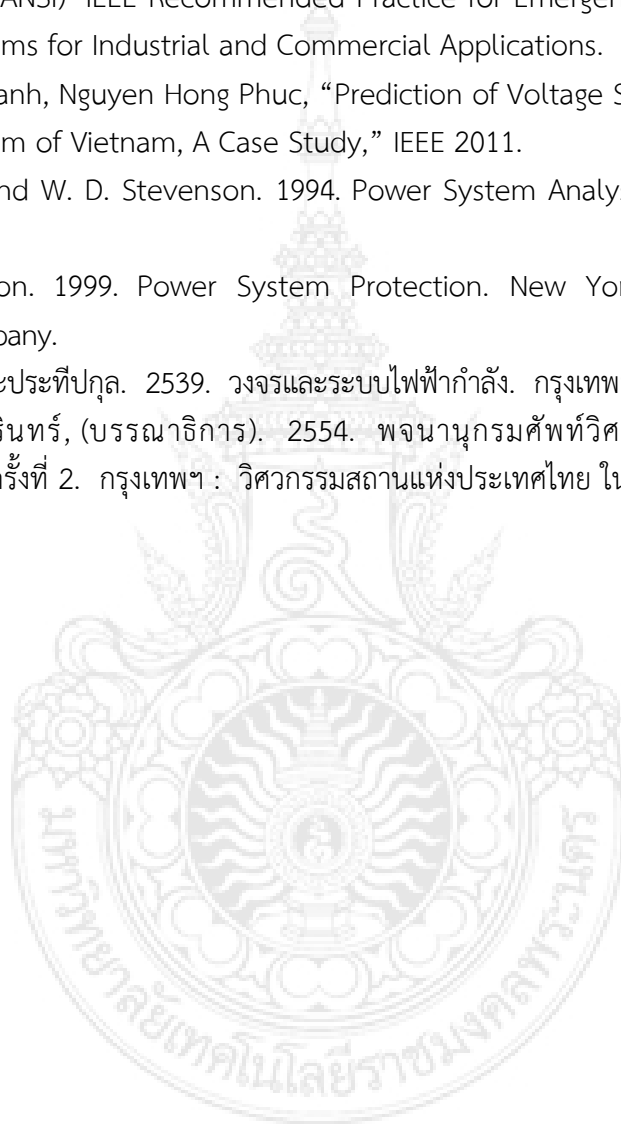
5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลต่ออุปกรณ์วิกฤตอีกประการหนึ่งนอกจากแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน ก็คือปัญหาด้านสัญญาณฮาร์โมนิก ซึ่งจะเข้ามารบกวนสัญญาณมูลฐานทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม หากไม่มีตัวกรองฮาร์โมนิกที่ดีก็จะเกิดผลกระทบต่อสัญญาณในระบบจำหน่ายไฟฟ้า หรือผู้ใช้ไฟจะต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



บรรณานุกรม

- Information Technology Industry Council. 2000. ITI (CBEMA) Curve Application Note,” Technology Committee 3 (TC3) of the ITI Council. Washington DC.
- IEEE 446-1995(ANSI) "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.
- Bach Quoc Khanh, Nguyen Hong Phuc, “Prediction of Voltage Sag in The Transmission System of Vietnam, A Case Study,” IEEE 2011.
- J. J Grainger and W. D. Stevenson. 1994. Power System Analysis. Singapore : McGraw-Hill.
- P. M. Anderson. 1999. Power System Protection. New York : McGraw-Hill Book Company.
- พงศ์ศรีธัญย์ ตานะประทีปกุล. 2539. วงจรและระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : สยามสปอร์ต ซินดิเคท.
- มงคล เดชนครินทร์, (บรรณาธิการ). 2554. พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ วสท. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.



ผู้วิจัย



1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Surasit Prakobkit
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
3. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381ถนนประชากรราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 – 4151
e-mail: surasit.pr@rmutp.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
ปริญญาโท วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปริญญาตรี อส.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) วิทยาลัยปทุมธานี
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
- การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน
6. ประสบการณ์งานวิจัย
- ตำแหน่ง นักวิจัย โครงการวิจัย การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการสับจ่ายชุดตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสแบบทีละเฟสในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- ตำแหน่ง นักวิจัย โครงการวิจัย การลดผลกระทบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนาจากระบบไฟฟ้าใกล้เคียงในขณะปฏิบัติงานแบบดับไฟ