



การประเมินผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



Impact Assessment of voltage Swell in Transmission System

Surasit Prakobkit

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

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

บทคัดย่อ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) พบเหตุการณ์ปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินจากผลการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจ่ายไฟชั่วคราวของสถานีไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 115 kV ลพบุรี 2 เป็นเรเดียล โดยเหตุการณ์เกิดจากการที่ ศูนย์ควบคุมระบบนำคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานจนเป็นเหตุให้ผู้ใช้ไฟฟ้าอุตสาหกรรมถูกลงเหล็ก และโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตัวเองออกจากระบบ ซึ่งส่งผลให้ระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ขาดกำลังผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ยังส่งผลต่อความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟด้วย กฟผ. มีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเรียนรู้จากเหตุการณ์นี้ งานวิจัยนี้จึงได้จำลองสร้างโมเดล สถานีไฟฟ้าแรงสูง ลพบุรี 2 และสายส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงต่าง ๆ ของระบบ กฟผ. และ กฟภ. ขึ้นมาด้วยโปรแกรม EMTDC-PSCAD เพื่อใช้วิเคราะห์ศึกษาเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นจากการนำคาปาซิเตอร์แบงค์ เข้าใช้งานที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง ลพบุรี 2 ของ กฟผ. เปรียบเทียบกับผลเหตุการณ์จริง แล้วคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เชื่อมโยงถึง ในท้ายสุด งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการลดผลกระทบแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนจากการใช้งานคาปาซิเตอร์แบงค์ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง ลพบุรี 2 เพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าเกินในอนาคต



Title : Impact Assessment of voltage Swell in Transmission System
Researcher : Mr.Surasit Prakobkit, Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering, RMUTP
Year : 2016

Abstract

Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) encountered problems voltage swell from the changes of power system configuration, high-voltage 115 kV substation name Lopburi2 to radial. Control Center closed capacitor bank caused the steel industry, electric power plants and renewable energy, solar tripped themselves out. As a result, EGAT loosed of power produced of solar power plants. It also affected confidence in the system's power consumption. EGAT's necessary to learn from this event. This research was simulation power system modeling of "High Voltage Substation Lopburi2" and grid connection both the system EGAT and PEA with EMTDC-PSCAD for analysis of the voltage swell caused by close capacitor bank at "Lopburi2" substation compared with actual events, then calculated the voltage swell occurred at high voltage station linkage. Finally, this research presents a method of reduction of their impact of close capacitor bank at "Loburi2" to avoid the voltage swell in the future.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการประเมินผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้านี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณระดมบุญ ทักษณา กองควบคุมระบบ ฝ่ายปฏิบัติการภาคกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาแต่คุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

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	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย	2
1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 การวิเคราะห์เหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	3
2.3 องค์ประกอบสมมาตร	4
2.4 การวิเคราะห์การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	29
บทที่ 3 การจำลองต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า	31
3.1 บทนำ	31
3.2 การจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	31
3.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการจำลองระบบต่อลงดิน	35
4.1 บทนำ	35
4.2 กรณีศึกษาแรงดันไฟฟ้าเกินโดยมีการสับจ่ายชุดตัวเก็บประจุเพื่อพยุลงแรงดันไฟฟ้า	35
4.3 กรณีสับจ่ายคาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ขนาด 24 MVar	37
4.4 กรณีสับจ่ายคาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ขนาด 12 MVar	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการวิจัย	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
บรรณานุกรม	42
ผู้วิจัย	43



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	พารามิเตอร์ของคาปาซิเตอร์แรงดันไฟฟ้า 115 kV	32
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	33

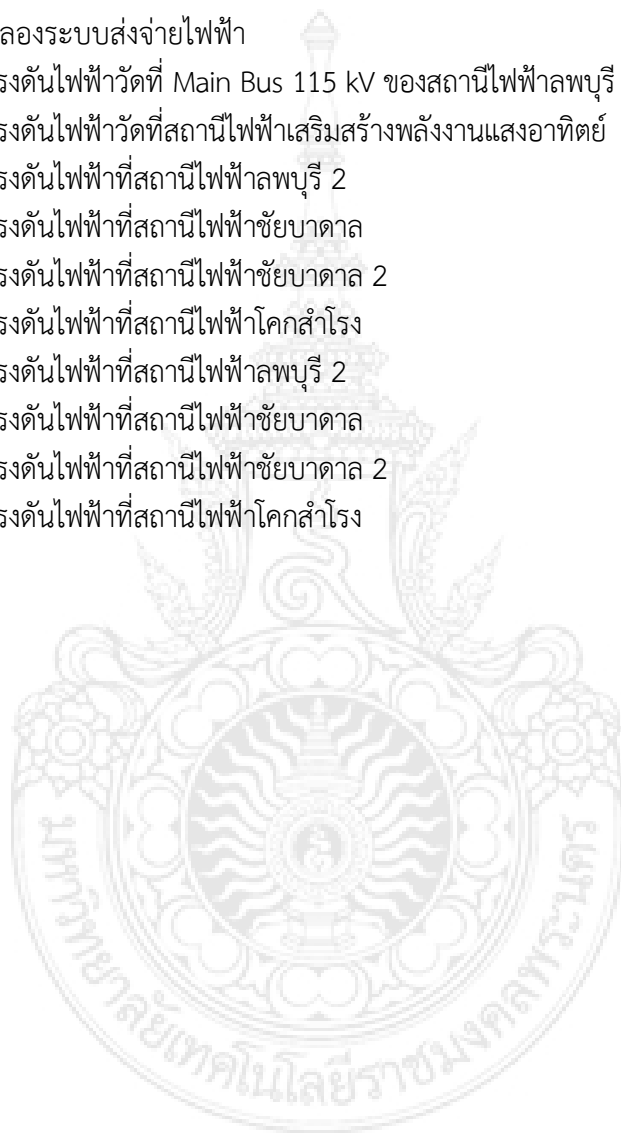


สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเกิดลัดวงจรเมื่อเกิดวาบไฟตามผิวที่ฉนวนลูกถ้วย	3
2.2 ไดอะแกรมการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ตำแหน่ง k	4
2.3 การวางขดลวดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส	5
2.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล	5
2.5 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสบวก	6
2.6 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสลบ	7
2.7 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสศูนย์	7
2.8 เฟสเซอร์ของแรงดันเฟส abc ที่เกิดจากเฟสเซอร์ลำดับบวก ลบ และศูนย์	8
2.9 เฟสเซอร์ของแรงดันเฟสที่แยกตามกลุ่ม	8
2.10 วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบวาย	11
2.11 วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบเดลตา	12
2.12 องค์ประกอบทั่วไปของระบบสามเฟส	15
2.13 เครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบพิกัดเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์	17
2.14 เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n	18
2.15 เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโนด N ไม่ต่อลงกราวด์	19
2.16 สายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	21
2.17 สายส่งไฟฟ้าเฟสเดียวสองเส้นที่เกิดการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส	22
2.18 การต่อหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินทั้งสองด้าน	23
2.19 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินทั้งสองด้าน	23
2.20 การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินทั้งสองด้าน	24
2.21 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินทั้งสองด้าน	24
2.22 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินทั้งสองด้าน	25
2.23 การต่อหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินด้านปฐมภูมิ	25
2.24 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – ยาย ลงดินด้านปฐมภูมิ	25
2.25 การต่อหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตา	26
2.26 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตา	26
2.27 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตา	27
2.28 การต่อหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	27
2.29 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	27
2.30 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	28
2.31 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	28
2.32 วงจรสมมูลการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.1	ไดอะแกรมของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV	31
3.2	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบส่งจ่าย 115 kV	32
3.3	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวคาปาซิเตอร์แบ็งค์	32
3.4	แบบจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	34
4.1	ขนาดแรงดันไฟฟ้าวัดที่ Main Bus 115 kV ของสถานีไฟฟาลพบุรี 2	36
4.2	ขนาดแรงดันไฟฟ้าวัดที่สถานีไฟฟ้าเสริมสร้างพลังงานแสงอาทิตย์	36
4.3	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟาลพบุรี 2	37
4.4	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล	37
4.5	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล 2	38
4.6	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าโคกสำโรง	38
4.7	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟาลพบุรี 2	39
4.8	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล	39
4.9	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล 2	40
4.10	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าโคกสำโรง	40



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป้าหมายหลักของการผลิตกระแสไฟฟ้าก็คือ จัดหา ผลิต พลังงานไฟฟ้าให้ต่อเนื่อง เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้งาน และส่งมอบพลังงานไฟฟ้าที่มีคุณภาพให้แก่ ลูกค้าน่าต่าง ๆ อาทิ ลูกค้าตรงในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนพลังงาน ประเภทพลังงาน แสงอาทิตย์จ่ายไฟฟ้าเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า และมีความไวต่อการรับรู้เมื่อเกิดเหตุการณ์ แรงดันไฟฟ้าตก หรือแรงดันไฟฟ้าเกิน ทำให้ระบบป้องกันสิ่งปลดวงจรออกจากระบบหลัก โดยสาเหตุ การเกิดแรงดันกระเพื่อมมาจากการเกิดฟอลต์ การเปลี่ยนแปลงของโหลดปริมาณมากอย่าง ทันทีทันใด การปลดโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ การสวิตช์อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบหลัก หรือ ปลด-สับ คลังชุด ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบเรเดียลจะมีความรุนแรงของ แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมมากกว่าสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบลูป

ระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ส่งจ่ายพลังงาน ไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ กระบวนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเริ่มจากระบบผลิต (Generation System) ผ่าน ระบบส่ง (Transmission System) ไปยังระบบจำหน่าย (Distribution System) เพื่อส่งไปยังผู้ใช้ ไฟฟ้า หากเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าก็อาจส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า การเกิด เหตุขัดข้องภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอุปกรณ์แต่ละตัวย่อมส่งผลต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละจุด โหลด เช่น ในระหว่างที่เกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายซึ่งทำให้เกิดแรงดันเกิน ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่เกิดขึ้น บ่อยในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยเฉพาะในส่วนของระบบจำหน่ายที่มีโหลดจากอุตสาหกรรมจะมีความ ไวต่อการที่แรงดันเกินในระหว่างการเกิดลัดวงจร

ความรุนแรงของฟอลต์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งฟอลต์ และประเภทของฟอลต์ ซึ่งฟอลต์ทำให้ ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยที่แรงดันไฟฟ้าเกินคือปัญหาคุณภาพไฟฟ้า อย่างหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟโดยเฉพาะผู้ใช้ไฟประเภทอุตสาหกรรม ที่ใช้อุปกรณ์ทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความอ่อนไหว ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญของแรงดันไฟฟ้าเกินประกอบไปด้วย ขนาด (Magnitude) และระยะเวลาของการเกิด ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประเมินผลกระทบ ของแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า โดยได้นำค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมาใช้เป็นสมมติฐาน ในการประเมินแรงดันไฟฟ้าเกิน ซึ่งปัจจัยสำคัญในงานวิจัยนี้ได้แก่เหตุการณ์ฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากเป็นเหตุการณ์ที่พบบ่อยสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า
- 1.3.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง
- 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 โดยจะกล่าวถึงเหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน องค์กรประกอบสมมาตรในระบบไฟฟ้าสามเฟส รวมถึงลักษณะการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

บทที่ 3 เป็นการออกแบบจำลองเหตุการณ์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้เห็นถึงแรงดันไฟฟ้าเกินเมื่อนำคาปาซิเตอร์แบ็งค์เข้าใช้งานที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง

บทที่ 4 เป็นการอธิบายผลการทดลอง ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะที่มีต่อโครงการวิจัยฉบับนี้

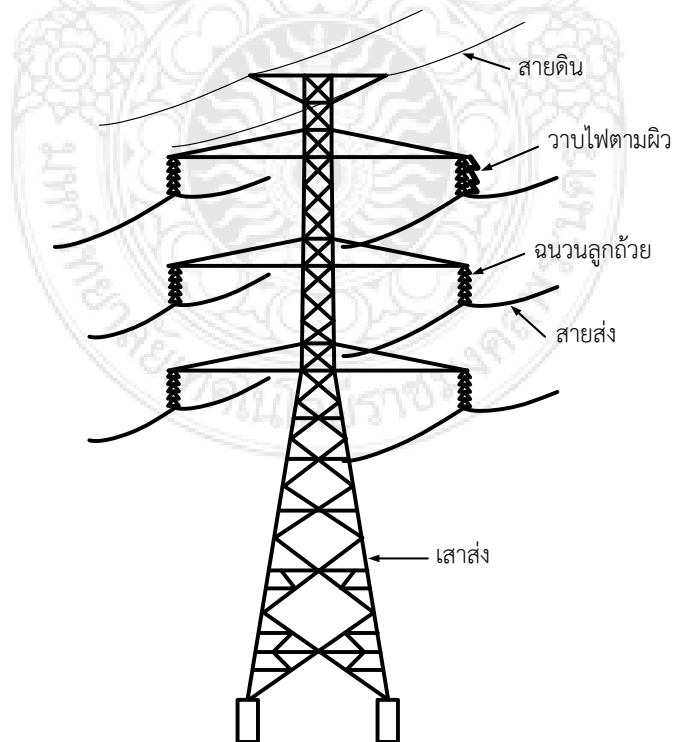
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ฟอลต์ (Fault) หรือความผิดปกติ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอาจมีสาเหตุมาจากธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า หรือสาเหตุภายในระบบไฟฟ้า เช่น การสับ – ปลดเบรกเกอร์ โดยที่ฟอลต์จะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อชีวิต ฟอลต์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นแบบสมมาตร หรือแบบไม่สมมาตร และอาจเกิดขึ้นได้ทุกตำแหน่งในระบบไฟฟ้าแต่ส่วนมากจะเกิดที่สายส่งเหนือดิน (Overhead Line) โดยฟอลต์ที่พบบ่อยสุดเป็นเหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ซึ่งขณะเกิดลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งผู้ใช้ไฟที่ต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบดังกล่าว โดยที่แรงดันตกเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

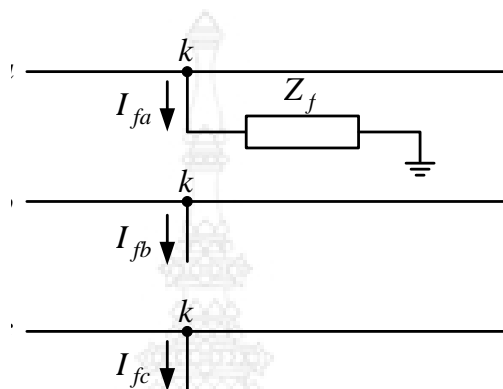
2.2 การวิเคราะห์เหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

เหตุการณ์ลัดวงจรส่วนใหญ่มาจากฟ้าผ่าหรือการเปิด-ปิดวงจร ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเกินตกคร่อมที่ฉนวนลูกถ้วยหากฉนวนลูกถ้วยทนต่อแรงดันเกินไม่ได้ก็จะเกิดวาบไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยลงดิน โดยที่การเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินในระบบไฟฟ้าจะมีลักษณะที่เฟสใดเฟสหนึ่งลัดวงจรลงดินหรือสายตัวนำเฟสใดเฟสหนึ่งขาดแล้วลัดวงจรลงดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเกิดลัดวงจรเมื่อเกิดวาบไฟตามผิวที่ฉนวนลูกถ้วย

จากภาพที่ 2.1 พบว่าการติดตั้งลูกถ้วยเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวทำให้ต้องลงทุนฉนวนลูกถ้วยเพิ่มขึ้นและเสาต้องรับน้ำหนักมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบ่อยครั้งเมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้น และเมื่อนำเหตุการณ์การเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินมาเขียนเป็นไดอะแกรมสำหรับวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจร จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ไดอะแกรมการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ตำแหน่ง k

จากภาพที่ 2.2 แสดงการเกิดลัดวงจรที่เฟส a ลงดินโดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_f ที่ตำแหน่ง k ซึ่งสามารถหาค่ากระแสลัดวงจรได้ดังสมการ (2.1)

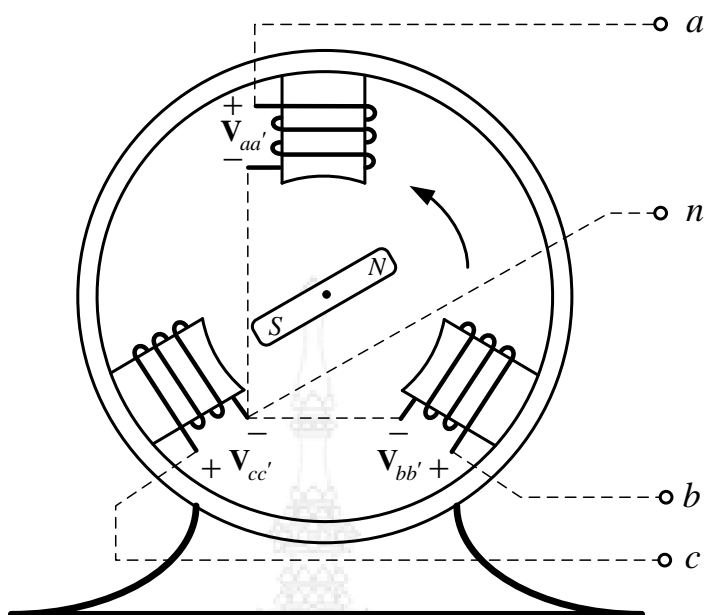
$$I_{fb} = 0 \quad ; \quad I_{fc} = 0 \quad ; \quad V_{ka} = Z_f I_{fa} \quad (2.1)$$

โดยที่ I_{fa} คือ กระแสลัดวงจรเฟส a
 I_{fb} คือ กระแสลัดวงจรเฟส b
 I_{fc} คือ กระแสลัดวงจรเฟส c
 V_{ka} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส a ที่ตำแหน่ง k

จากภาพที่ 2.2 พบว่าการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นการลัดวงจรไม่สมมาตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการขององค์ประกอบสมมาตรมาใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรซึ่งหลักการขององค์ประกอบสมมาตรสามารถอธิบายได้ดังนี้

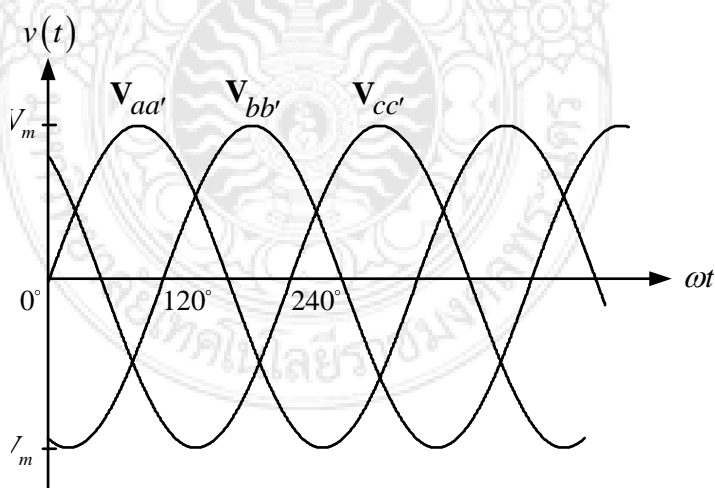
2.3 องค์ประกอบสมมาตร

โดยทั่วไปโครงสร้างของระบบผลิตกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบสามเฟสสมมาตร ซึ่งเกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีลักษณะการพันขดลวดทั้งสามเหมือนกันแต่จะวางห่างกันทำมุม 120° ทางไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การวางขดลวดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

จากภาพที่ 2.3 เมื่อหมุนส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องต้นกำลังในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในลักษณะของฟังก์ชันไซน์ขอยด์ขึ้นในขดลวดทั้งสาม ซึ่งสามารถเขียนรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูลได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูล

จากภาพที่ 2.4 สามารถเขียนแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสแบบสมมูลที่แทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสามแหล่ง ได้ดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.4)

$$v_{aa'}(t) = \sqrt{2}V_p \cos \omega t \quad (2.2)$$

$$v_{bb'}(t) = \sqrt{2}V_p \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.3)$$

$$v_{cc'}(t) = \sqrt{2}V_p \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.4)$$

โดยที่ V_p คือ ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของแรงดันเฟสแต่ละเฟส

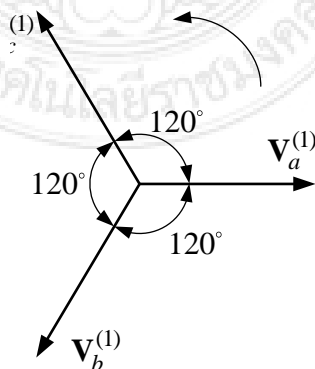
จากสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) สามารถนำหลักการของเฟสเซอร์มาเขียนเป็นสมการในรูปของแรงดันเฟสเซอร์อาร์เอ็มเอสได้ดังสมการที่ (2.5) ถึง (2.7)

$$\mathbf{V}_{aa'} = V_p \angle 0^\circ \quad (2.5)$$

$$\mathbf{V}_{bb'} = V_p \angle -120^\circ \quad (2.6)$$

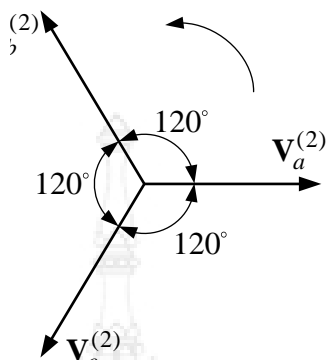
$$\mathbf{V}_{cc'} = V_p \angle 120^\circ \quad (2.7)$$

องค์ประกอบสมมาตรจะใช้วิธีการแปลงระบบเดิมที่มีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล (Unbalance) ไปวิเคราะห์เป็นแบบระบบสมดุล (Balance) กล่าวคือองค์ประกอบสมมาตรจะใช้การแยกเฟสเซอร์ไม่สมดุลของระบบสามเฟสออกเป็นเฟสเซอร์สมมาตรที่มีองค์ประกอบสามส่วนได้แก่ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Component) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) เพื่อใช้ในการคำนวณหาองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่สมมาตร ซึ่งจากสมการที่ (2.5) ถึง (2.7) องค์ประกอบลำดับบวกสามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังได้ดังภาพที่ 2.5 โดยจะมีลำดับเฟส (Phase Sequence) เหมือนกับลำดับเฟสเดิมของแรงดันหรือกระแส



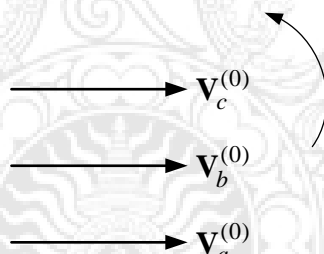
ภาพที่ 2.5 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสบวก

องค์ประกอบลำดับลบจะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับองค์ประกอบลำดับบวกแต่มีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับลำดับบวก สามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมมูลที่มีลำดับเฟสลบ

องค์ประกอบลำดับศูนย์ประกอบด้วยเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสต่างกันศูนย์องศา สามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังได้ดังภาพที่ 2.7

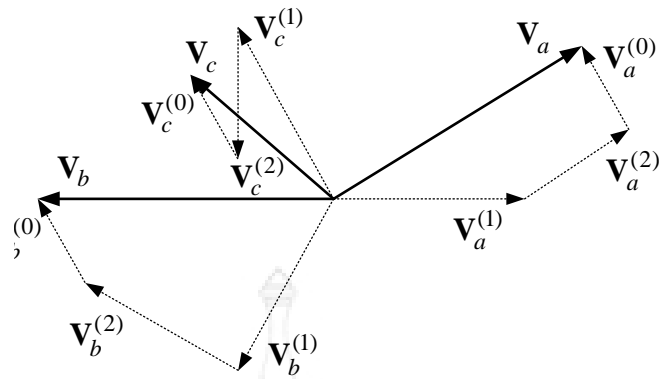


ภาพที่ 2.7 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมมูลที่มีลำดับเฟสศูนย์

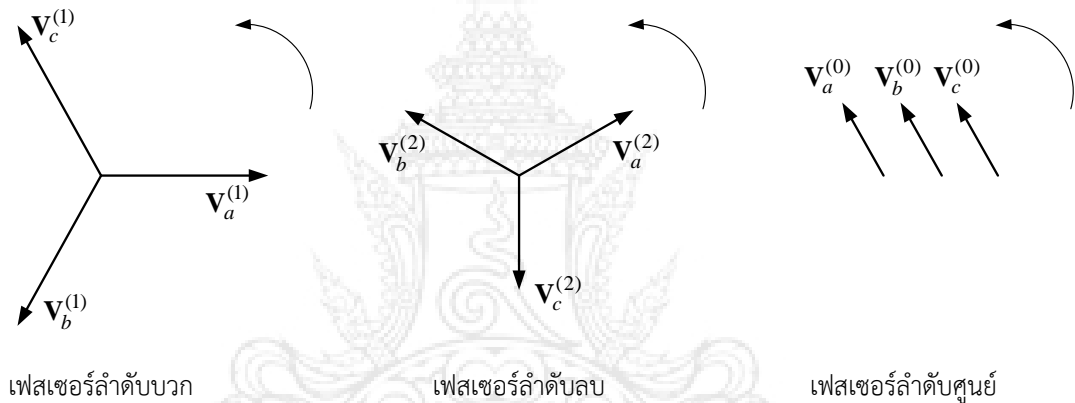
การนำเฟสเซอร์สามเฟสสมมูลที่มีเฟสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของแต่ละเฟสมารวมกันจะได้เฟสเซอร์ของแต่ละเฟสดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_a &= \mathbf{V}_a^{(0)} + \mathbf{V}_a^{(1)} + \mathbf{V}_a^{(2)} \\ \mathbf{V}_b &= \mathbf{V}_b^{(0)} + \mathbf{V}_b^{(1)} + \mathbf{V}_b^{(2)} \\ \mathbf{V}_c &= \mathbf{V}_c^{(0)} + \mathbf{V}_c^{(1)} + \mathbf{V}_c^{(2)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) พบว่าแรงดันหรือกระแสที่ไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถแยกออกเป็นกลุ่มเฟสเซอร์ 3 กลุ่ม ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เฟสเซอร์ของแรงดันเฟส abc ที่เกิดจากเฟสเซอร์ลำดับบวก ลบ และศูนย์



ภาพที่ 2.9 เฟสเซอร์ของแรงดันเฟสที่แยกตามกลุ่ม

จากภาพที่ 2.9 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลกับองค์ประกอบสมมาตรโดยใช้เฟสเอเป็นเฟสอ้างอิง ซึ่งกำหนดให้ตัวปฏิบัติการ (Operator, a) มีค่า $a = 1\angle 120^\circ$ และความสัมพันธ์ขององค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ เมื่อเทียบกับเฟสเอจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_b^{(0)} &= \mathbf{V}_a^{(0)} & ; & & \mathbf{V}_c^{(0)} &= \mathbf{V}_a^{(0)} \\
 \mathbf{V}_b^{(1)} &= a^2 \mathbf{V}_a^{(1)} & ; & & \mathbf{V}_c^{(1)} &= a \mathbf{V}_a^{(1)} \\
 \mathbf{V}_b^{(2)} &= a \mathbf{V}_a^{(2)} & ; & & \mathbf{V}_c^{(2)} &= a^2 \mathbf{V}_a^{(2)}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสของระบบเดิม และองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ ในสมการที่ (2.9) นำไปแทนลงในสมการที่ (2.8) จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (2.10) ถึงสมการที่ (2.12)

$$\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_a^{(0)} + \mathbf{V}_a^{(1)} + \mathbf{V}_a^{(2)} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{V}_b = \mathbf{V}_a^{(0)} + a^2 \mathbf{V}_a^{(1)} + a \mathbf{V}_a^{(2)} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{V}_a^{(0)} + a \mathbf{V}_a^{(1)} + a^2 \mathbf{V}_a^{(2)} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.10) ถึง (2.12) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a^{(0)} \\ \mathbf{V}_a^{(1)} \\ \mathbf{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

หรือ $\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{A} \mathbf{V}_a^{(012)} \quad (2.14)$

เมื่อ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

และสามารถเขียนส่วนกลับ (Invert) ของเมตริกซ์ \mathbf{A} ได้เป็น

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถนำมาใช้คำนวณหาองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ ของแรงดันได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a^{(0)} \\ \mathbf{V}_a^{(1)} \\ \mathbf{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{V}_a^{(012)} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{V}_{abc} \quad (2.18)$$

การคำนวณหากระแสไม่สมดุลจะสามารถใช้ความสัมพันธ์ของกระแสลำดับบวก ลบ ศูนย์ เช่นเดียวกับแรงดัน โดยกระแสเฟส abc สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^{(0)} \\ \mathbf{I}_a^{(1)} \\ \mathbf{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{I}_{abc} = \mathbf{A} \mathbf{I}_a^{(012)} \quad (2.20)$$

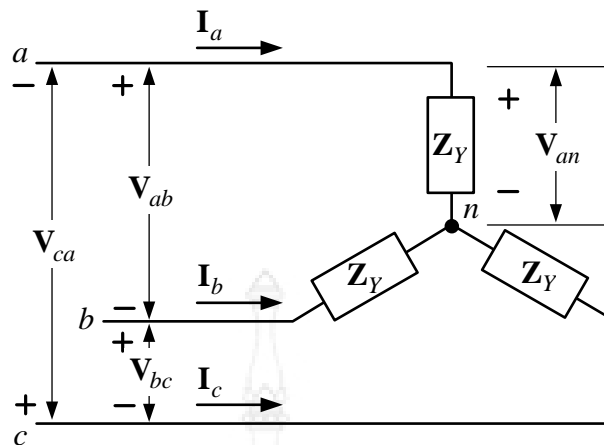
จากสมการที่ (2.19) สามารถนำมาใช้คำนวณหาองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ของกระแสได้ดังสมการที่ (2.21)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^{(0)} \\ \mathbf{I}_a^{(1)} \\ \mathbf{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{I}_a^{(012)} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_{abc} \quad (2.22)$$

2.3.1 องค์ประกอบของวงจรแบบวาย (Y) และแบบเดลตา (Δ)

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส abc จะมีการเชื่อมต่อโดยผ่านอิมพีแดนซ์ในลักษณะแบบวาย และเดลตา ซึ่งทั้งสองแบบมีองค์ประกอบของแรงดันและกระแสที่แตกต่างกัน วงจรที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบวายสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบวาย
จากภาพที่ 2.10 กระแสสายแต่ละสายซึ่งจะเท่ากับกระแสเฟสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Z_Y ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{V}_{an}}{\mathbf{Z}_Y} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{I}_b = \frac{\mathbf{V}_{bn}}{\mathbf{Z}_Y} = \mathbf{I}_a \angle -120^\circ \quad (2.24)$$

$$\mathbf{I}_c = \frac{\mathbf{V}_{cn}}{\mathbf{Z}_Y} = \mathbf{I}_a \angle 120^\circ \quad (2.25)$$

กระแสสายนิวทรัล n จะมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.21) จะพบว่า $3\mathbf{I}_a^{(0)} = \mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c$ ซึ่งจะสามารถเขียนสมการใหม่ได้
ดังนี้

$$\mathbf{I}_n = 3\mathbf{I}_a^{(0)} \quad (2.27)$$

จากภาพที่ 2.10 สามารถใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับแรงดันเพื่อหาแรงดันระหว่างสาย
ได้ดังสมการที่ (2.8)

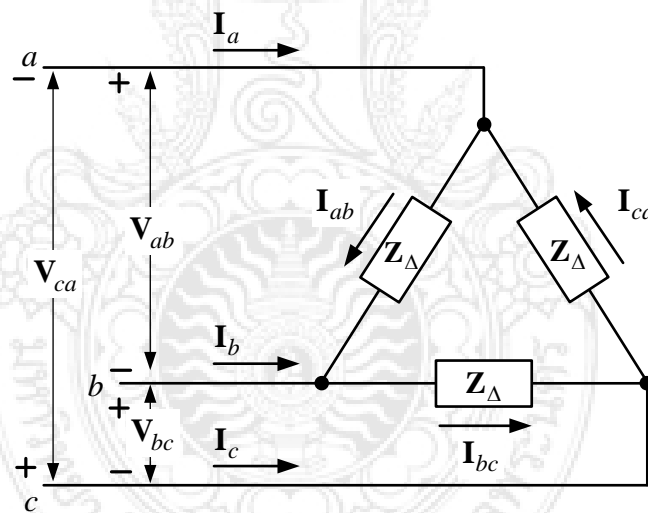
$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_{ab} &= \mathbf{V}_{an} - \mathbf{V}_{bn} \\
 \mathbf{V}_{bc} &= \mathbf{V}_{bn} - \mathbf{V}_{cn} \\
 \mathbf{V}_{ca} &= \mathbf{V}_{cn} - \mathbf{V}_{an}
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟส V_p ที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ Z_Y กับแรงดันระหว่างสาย ที่อิมพีแดนซ์ Z_Y จะพบว่าขนาดของแรงดันระหว่างสายที่ไหลจะมีค่าเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของขนาดแรงดันเฟสที่อิมพีแดนซ์ Z_Y ดังสมการที่ (2.29)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_{ab} &= \sqrt{3}V_p \angle 30^\circ \\
 \mathbf{V}_{bc} &= \sqrt{3}V_p \angle -90^\circ \\
 \mathbf{V}_{ca} &= \sqrt{3}V_p \angle 150^\circ
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

การเชื่อมต่อโดยผ่านอิมพีแดนซ์ในลักษณะแบบเดลตาจะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่

2.11



ภาพที่ 2.11 วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบเดลตา

จากภาพที่ 2.11 ใช้เคอร์เซอร์สำหรับกระแสพิจารณาที่โหนด a , b และ c จะสามารถเขียนสมการกระแสสาย I_a , I_b และ I_c ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{ab} - I_{ca} \\
 I_b &= I_{bc} - I_{ab} \\
 I_c &= I_{ca} - I_{bc}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

$$\mathbf{I}_a = \sqrt{3}I_{ab}\angle -30^\circ \quad (2.31)$$

$$\mathbf{I}_b = \sqrt{3}I_{ab}\angle -150^\circ \quad (2.32)$$

$$\mathbf{I}_c = \sqrt{3}I_{ab}\angle 90^\circ \quad (2.33)$$

ดังนั้นกระแสเฟสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ \mathbf{Z}_Δ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.34) - (2.36)

$$\mathbf{I}_{ab} = \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}_\Delta} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{I}_{bc} = \frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}_\Delta} = \mathbf{I}_{ab}\angle -120^\circ \quad (2.35)$$

$$\mathbf{I}_{ca} = \frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}_\Delta} = \mathbf{I}_{ab}\angle 120^\circ \quad (2.36)$$

จากสมการกระแสเฟสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ \mathbf{Z} จะพบว่า การต่อวงจรสามเฟสแบบสตาร์ กับแบบเดลตาขนาดของกระแสสายจะเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของขนาดกระแสเฟส และมุมเฟสของกระแสสายจะตามหลังมุมเฟสของกระแสเฟสอยู่ 30° และการแปลงอิมพีแดนซ์สามเฟสสมมูลแบบวาย \mathbf{Z}_Y ไปเป็นอิมพีแดนซ์สามเฟสสมมูลแบบ \mathbf{Z}_Δ จะสามารถทำได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_{Nn} = \mathbf{Z}_{Nn} + \mathbf{I}_n = 0 \quad (2.37)$$

$$\mathbf{Z}_{AN} = \mathbf{Z}_{BN} = \mathbf{Z}_{CN} = \mathbf{Z}_Y = \frac{1}{3}\mathbf{Z}_\Delta \quad (2.38)$$

$$\mathbf{Z}_{AB} = \mathbf{Z}_{BC} = \mathbf{Z}_{CA} = \mathbf{Z}_\Delta = 3\mathbf{Z}_Y \quad (2.39)$$

2.3.2 อิมพีแดนซ์องค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นฟอลต์แบบไม่สมมาตรการนำความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันขององค์ประกอบสมมาตรมาเป็นเครื่องมือในการสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์เพื่อจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถทำได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_a^{(012)} = \mathbf{Z}_{bus}^{(012)} \mathbf{I}_a^{(012)} \quad (2.40)$$

โดยที่ $\mathbf{V}_a^{(012)}$ คือ แรงดันในรูปขององค์ประกอบสมมาตร

$\mathbf{Z}_{bus}^{(012)}$ คือ อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในรูปขององค์ประกอบสมมาตร

$\mathbf{I}_a^{(012)}$ คือ กระแสในรูปขององค์ประกอบสมมาตร

จากสมการที่ (2.40) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.41)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a^{(0)} \\ \mathbf{V}_a^{(1)} \\ \mathbf{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^{(0)} \\ \mathbf{I}_a^{(1)} \\ \mathbf{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

เราสามารถแปลงค่าแรงดัน และกระแสที่อยู่ในรูปขององค์ประกอบสมมาตร (012) ไปเป็นเฟส abc ได้โดยผ่านค่าคงที่ \mathbf{A} โดยสามารถหาอิมพีแดนซ์เฟสจากอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในรูปขององค์ประกอบสมมาตรได้ดังสมการที่ (2.42)

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{AZ}_{bus}^{(012)} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_{abc} \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) สามารถหาสมการของอิมพีแดนซ์เฟสได้ดังสมการที่ (2.43)

$$\mathbf{Z}_{abc} = \frac{1}{3} \mathbf{AZ}_{bus}^{(012)} \mathbf{A}^* \quad (2.43)$$

โดยที่ \mathbf{Z}_{abc} คือ อิมพีแดนซ์เฟส ซึ่งเราสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์จะได้

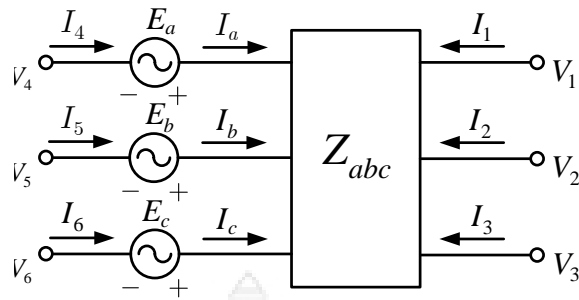
$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{aa} & \mathbf{Z}_{ab} & \mathbf{Z}_{ac} \\ \mathbf{Z}_{ba} & \mathbf{Z}_{bb} & \mathbf{Z}_{bc} \\ \mathbf{Z}_{ca} & \mathbf{Z}_{cb} & \mathbf{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

จากสมการที่ (2.41) การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฟส แรงดันเฟส และอิมพีแดนซ์เฟสของระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ดังสมการที่ (2.45)

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{I}_{abc} \quad (2.45)$$

2.3.3 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าสามเฟส

องค์ประกอบทั่วไปในระบบสามเฟสประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันในแต่ละเฟส โดยที่กำหนดให้แรงดันในเฟส a คือ E_a , แรงดันในเฟส b คือ E_b และแรงดันในเฟส c คือ E_c ซึ่งในแต่ละเฟสมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา และต่ออยู่กับอิมพีแดนซ์เฟส ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 องค์ประกอบทั่วไปของระบบสามเฟส

จากภาพที่ 2.12 เราจะพบว่า มีโหนดทั้งหมด 6 โหนด โดยที่เรากำหนดแรงดันในแต่ละโหนด เป็น V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 และ V_6 และมีกระแสไหลตามลูกศรที่กำหนดในภาพ ซึ่งจากข้อมูลเหล่านี้ สามารถหาความสัมพันธ์โดยจะเริ่มจาก

$$V_{abc} = E_{abc} - Z_{abc}I_{abc} \quad (2.46)$$

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

โดยที่ E_{abc} คือ แรงดันที่ผลิตได้ในแต่ละเฟส ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ (2.48)

$$[E_{abc}] = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันเราสามารถแทนสมการที่ (2.47) และ (2.48) ลงในสมการที่ (2.46) จะได้สมการที่ (2.49)

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

จากภาพที่ 2.12 เมื่อเราพิจารณาทิศทางของกระแสในส่วนต่าง ๆ เราจะได้กระแสในแต่ละเฟส ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\begin{aligned}
 I_a &= -I_1 = I_4 \\
 I_b &= -I_2 = I_5 \\
 I_c &= -I_3 = I_6
 \end{aligned}
 \tag{2.50}$$

จากสมการที่ (2.50) เราสามารถหาค่ากระแสในแต่ละเฟสได้จากการย้ายตัวแปร E_{abc} และ Z_{abc} ทางขวามือให้มาอยู่ทางซ้ายมือ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ (2.51)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.51}$$

โดยที่ $[Y_{abc}] = [Z_{abc}]^{-1}$

จากกระแส I_1, I_2 และ I_3 ในสมการที่ (2.50) แทนลงใน I_a, I_b และ I_c ของสมการที่ (2.51) จะได้สมการที่ (2.52)

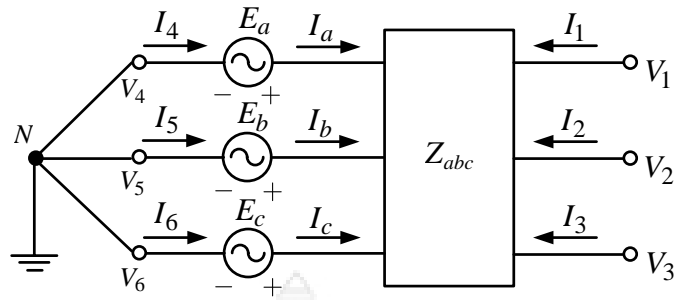
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = -[Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} + [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.52}$$

จากกระแส I_4, I_5 และ I_6 แทนลงใน I_a, I_b และ I_c ของสมการที่ (2.51) จะได้สมการที่ (2.53)

$$\begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = [Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.53}$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อแบบวายลงกราวด์

จากภาพที่ 2.12 ถ้าเรานำโนดที่ 4, 5 และ 6 มาต่อร่วมกันแล้วลงกราวด์ โดยแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งเป็นการแทนเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์



ภาพที่ 2.13 เครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบพิกัดเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์

จากภาพที่ 2-3 เมื่อนำโหนดที่ 4, 5, และ 6 มาต่อรวมกัน และลงกราวด์ที่โหนด N ซึ่งเราพิจารณาจากภาพพบว่าในสภาวะปกติคือ ในสภาวะที่โหลดสมดุล จะได้

$$\begin{aligned} I_N &= I_4 + I_5 + I_6 = 0 \\ V_N &= V_4 = V_5 = V_6 = 0 \\ E_N &= E_a + E_b + E_c = 0 \end{aligned} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54) เราสามารถลดรูปมาเป็นสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - [Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.55)$$

โดยที่ $y^{(1)}$ คือ แอดมิตแตนซ์ลำดับบวก

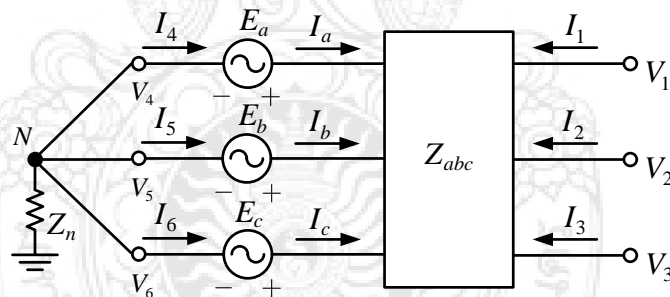
จากสมการที่ (2.55) เป็นสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคุณลบทหนึ่งเข้าทางขวามือของสมการที่ (2.55) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในสมการที่ (2.56)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้ามีลักษณะการต่อหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n เราไม่สามารถนำสมการที่ (2.55) และ (2.56) ไปใช้งานได้ ดังนั้นเราจึงสามารถอธิบายรูปแบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีทีโนด N ต่อลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ได้ดังต่อไปนี้

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n

เราสามารถอธิบายในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีลักษณะการต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n

จากสมการที่ (2.54) เมื่อพิจารณากรณีโนด N ลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n เราสามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} + Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \\ -y^{(0)} E_N \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

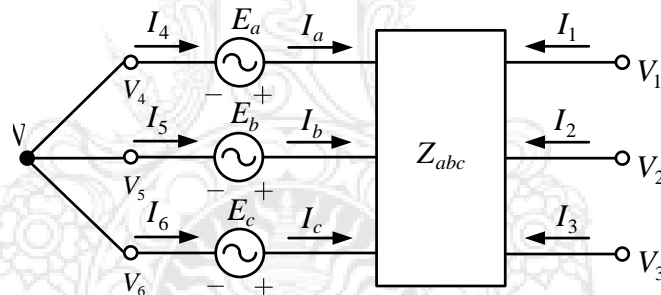
โดยที่ $y^{(0)}$ คือ แอดมิตแตนซ์ลำดับศูนย์

จากสมการที่ (2.57) เป็นสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคุณลบหนึ่งเข้าทางขวามือของสมการที่ (2.57) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2.58)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} + Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \\ -y^{(0)} E_N \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโนด N ไม่ต่อลงกราวด์

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีลักษณะการต่อแบบวายโดยที่โนด N ไม่ต่อลงกราวด์ให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโนด N ไม่ต่อลงกราวด์

จากภาพที่ 2.15 เราสามารถหาสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีที่โนด N ไม่ต่อลงกราวด์ได้คล้ายกับสมการที่ (2.58) เพียงแต่ไม่มีในส่วนของ Y_n ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีที่โนด N ไม่ต่อลงกราวด์ ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \\ -y^{(0)} E_N \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

จากสมการที่ (2.59) เป็นสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อแบบววาย โดยที่โนด N ไม่ต่อลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคูณลบหนึ่งเข้าทางขวามือของสมการที่ (2.59) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในสมการที่ (2.60)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^{(1)}E_a \\ y^{(1)}E_b \\ y^{(1)}E_c \\ -y^{(0)}E_N \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

จากสมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n และเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายกรณีโนด N ไม่ต่อลงกราวด์ จะมีขนาดของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เพิ่มขึ้น 1 แถว และ 1 หลัก เมื่อเรานำไปสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบจะทำให้เมตริกซ์มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการลดรูปเมตริกซ์ คือ กำจัดแถว และหลักของโนด N ซึ่งเราสามารถกำจัดแถวและหลักโดยใช้วิธีการกำจัดแบบครอน (Kron Reduction) ได้ดังนี้

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk(old)} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}} \quad (2.61)$$

โดยที่ $Y_{jk(new)}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ใหม่ที่ตำแหน่งแถว j และ คอลัมน์ k
 $Y_{jk(old)}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์เก่า ที่ตำแหน่งแถว j และ คอลัมน์ k
 Y_{jp} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ต้องกำจัด ที่ตำแหน่งแถว j และ คอลัมน์ p
 Y_{pk} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ต้องกำจัด ที่ตำแหน่งแถว p และ คอลัมน์ k
 Y_{pp} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ต้องกำจัด ที่ตำแหน่งแถว p และ คอลัมน์ p
 $j, k = 1$ ถึง N ; $j, k \neq p$

จากสมการที่ (2.61) เมื่อเราพิจารณาในส่วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n เราสามารถลดรูปสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ด้วยวิธีการกำจัดแบบครอนได้ดังสมการที่ (2.62)

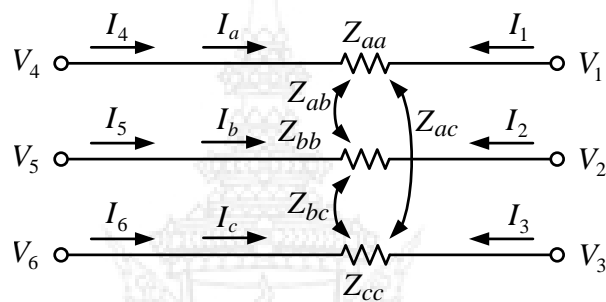
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} + Z_n & Z_{ab} + Z_n & Z_{ac} + Z_n \\ Z_{ba} + Z_n & Z_{bb} + Z_n & Z_{bc} + Z_n \\ Z_{ca} + Z_n & Z_{cb} + Z_n & Z_{cc} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อเราใช้วิธีการกำจัดแบบครอนลด์รูปสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีนอด N ไม่ต่อลงกราวด์ เราจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.63)

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

สายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

อิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 สายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากภาพที่ 2-6 สังเกตได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับภาพองค์ประกอบทั่วไปของระบบสามเฟส เพียงแต่ไม่มีแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งเราสามารถหาแรงดันตกคร่อมในแต่ละเฟสได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (V_4 - V_1) &= Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ac}I_c \\ (V_5 - V_2) &= Z_{ba}I_a + Z_{bb}I_b + Z_{bc}I_c \\ (V_6 - V_3) &= Z_{ca}I_a + Z_{cb}I_b + Z_{cc}I_c \end{aligned} \quad (2.64)$$

สามารถจัดรูปสมการที่ (2.64) ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.65)

$$\begin{bmatrix} V_4 - V_1 \\ V_5 - V_2 \\ V_6 - V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

จากภาพที่ 2.16 ได้กำหนดทิศทางของกระแสตามลูกศร ซึ่งเราสามารถหากระแสได้ตามทิศทางของลูกศรได้ดังนี้

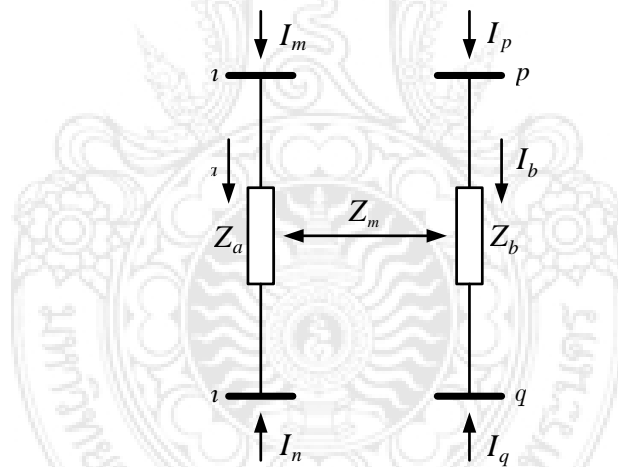
$$\begin{aligned} I_a &= -I_1 = I_4 \\ I_b &= -I_2 = I_5 \\ I_c &= -I_3 = I_6 \end{aligned} \quad (2.66)$$

จากสมการที่ (2.65) เราสามารถหาสมการของกระแสในแต่ละโนดของสายส่งโดยนำสมการที่ (2.66) แทนลงในสมการที่ (2.67) เราจะได้สมการของกระแสในแต่ละโนดดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = -[Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_4 - V_1 \\ V_5 - V_2 \\ V_6 - V_3 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$\begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_4 - V_1 \\ V_5 - V_2 \\ V_6 - V_3 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

กรณีในระบบมีอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส การหาแอดมิตแตนซ์เฟสของสายส่ง เราสามารถเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สายส่งเฟสเดียวสองเส้นที่มีการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สายส่งไฟฟ้าเฟสเดียวสองเส้นที่เกิดการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส

จากภาพที่ 2.17 มีสมการเริ่มต้นดังนี้

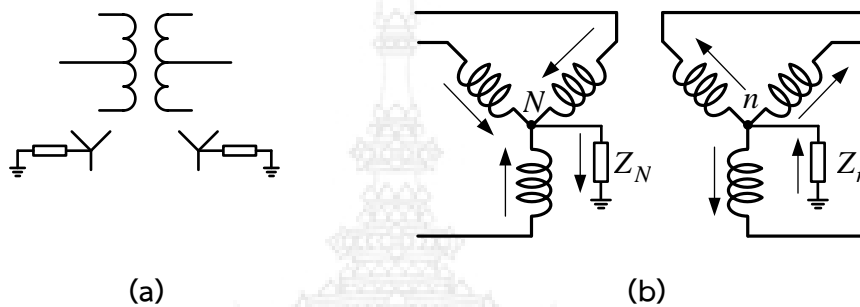
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$\begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.70)$$

ลักษณะการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

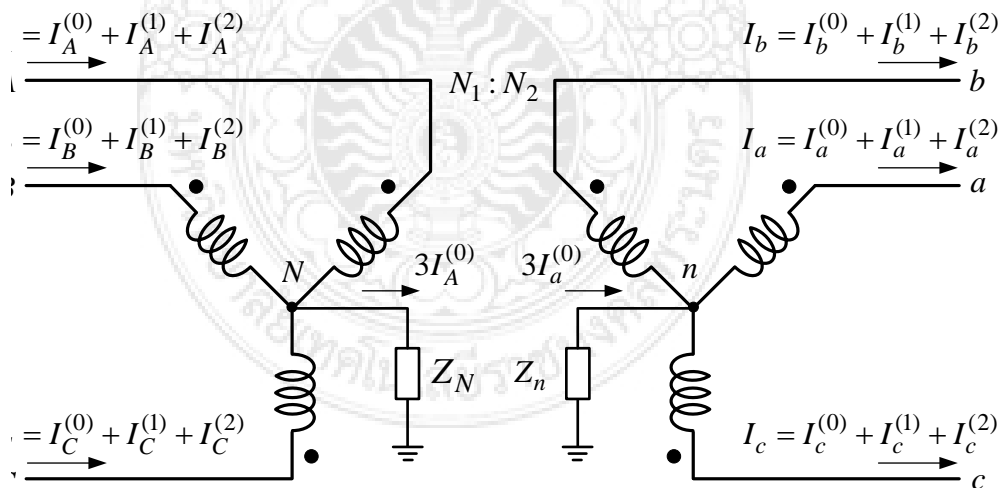
ภาคอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัยถูกเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวส่งผ่านพลังงาน ซึ่งการต่อลงดินด้านจ่ายโวลต์ของหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้าจะมีผลต่อวงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้คำนวณหากระแสลัดวงจรลงดินเพื่อวิเคราะห์แรงดันตกขณะเกิดลัดวงจร โดยลักษณะการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การต่อแบบวาย - วาย



ภาพที่ 2.18 การต่อหม้อแปลงแบบวาย - วาย ลงดินทั้งสองด้าน

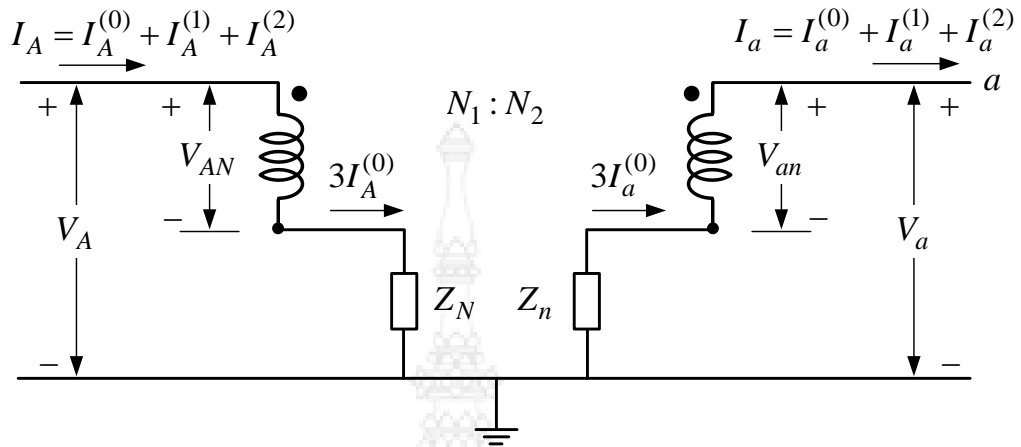
การต่อหม้อแปลงแบบวาย - วาย มีสัญลักษณ์ดังภาพที่ 2.18 (a) ส่วนภาพที่ 2.18 (b) เป็นไดอะแกรมการเชื่อมต่อขดลวดเฟสภายในตัวหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถอธิบายการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวาย - วาย ลงดินทั้งสองด้าน

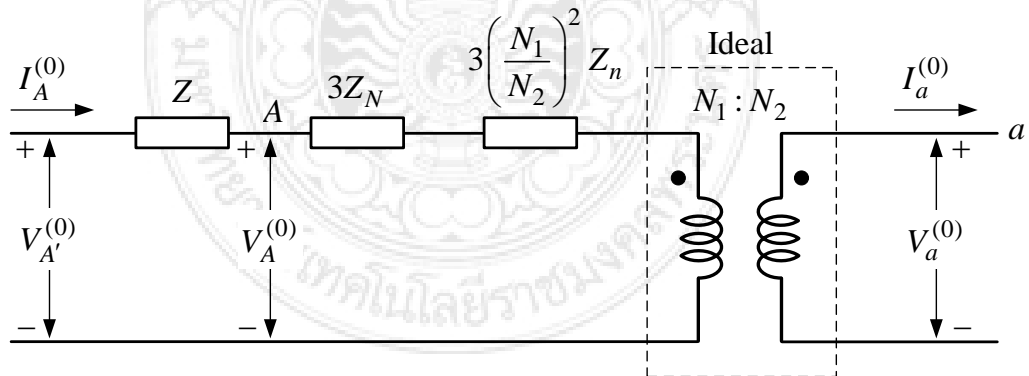
จากภาพที่ 2.19 การเชื่อมต่อขดลวดสามเฟสผ่านอิมพีแดนซ์ลงดินและพบว่าการต่อขดลวดแบบวาย - วายโดยมีจุดนิวทรัลต่อลงดินจะทำให้กระแสลำดับศูนย์ด้านปฐมภูมิไหลลงดิน ซึ่ง

การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงที่ต่อขดลวดแบบววาย - ววาย จะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.20



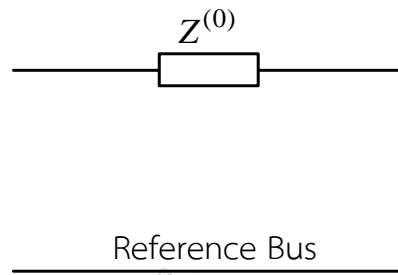
ภาพที่ 2.20 การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงแบบววาย - ววาย ลงดินทั้งสองด้าน

จากภาพที่ 2.20 พบว่ากระแสลำดับศูนย์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำลำดับศูนย์ที่ขดลวดทุติยภูมิจึงทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์ไหลออกทางด้านทุติยภูมิ เหตุนี้จึงทำให้วงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเชื่อมต่อกันผ่านอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถอธิบายเป็นวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 2.21



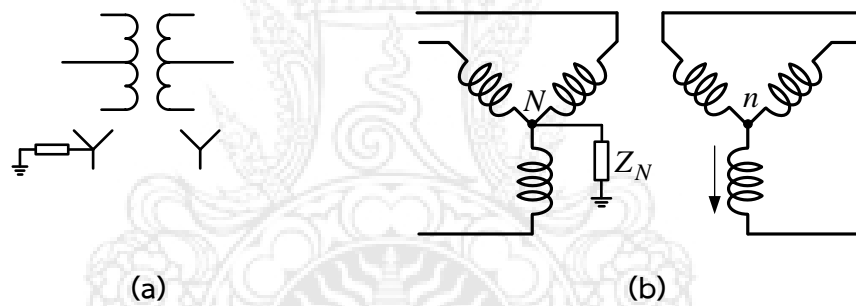
ภาพที่ 2.21 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบววาย - ววาย ลงดินทั้งสองด้าน

จากภาพที่ 2.21 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบววาย - ววาย ลงดินทั้งสองด้านสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.22



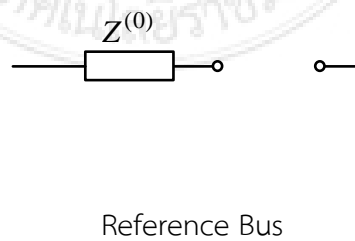
ภาพที่ 2.22 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน

จากภาพที่ 2.21 หากหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเชื่อมต่อลงดินโดยผ่านตัวรีแอกเตอร์ ค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ทั้งสองฝั่งจะต้องถูกคูณด้วยสามก่อนที่จะนำมารวมกับค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงก็จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรลำดับศูนย์ แต่ในกรณีที่หม้อแปลงต่อขดลวดเป็นแบบวาย – วาย โดยที่ด้านปฐมภูมิต่อลงดินเพียงด้านเดียว ดังภาพที่ 2.23



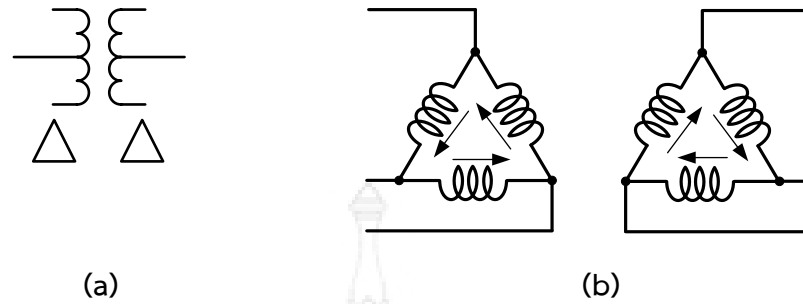
ภาพที่ 2.23 การต่อหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐมภูมิ

จากภาพที่ 2.23 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐมภูมิสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.24



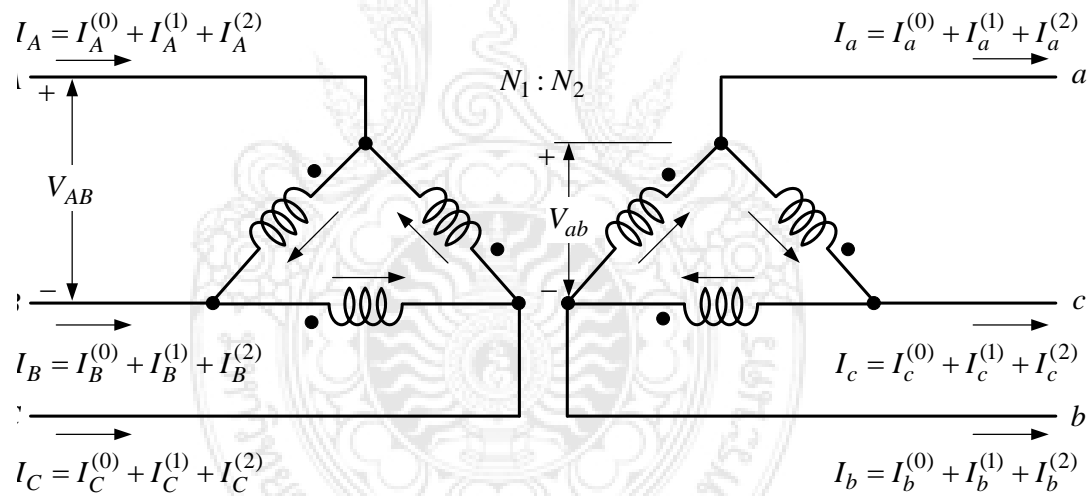
ภาพที่ 2.24 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐม

การต่อแบบเดลตา - เดลตา



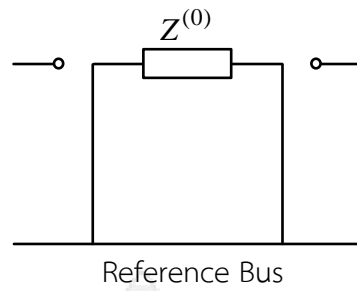
ภาพที่ 2.25 การต่อหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา

การต่อหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา มีสัญลักษณ์ดังภาพที่ 2.25 (a) ส่วนภาพที่ 2.25 (b) เป็นไดอะแกรมการเชื่อมต่อขดลวดเฟสภายในตัวหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถอธิบายการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 2.26



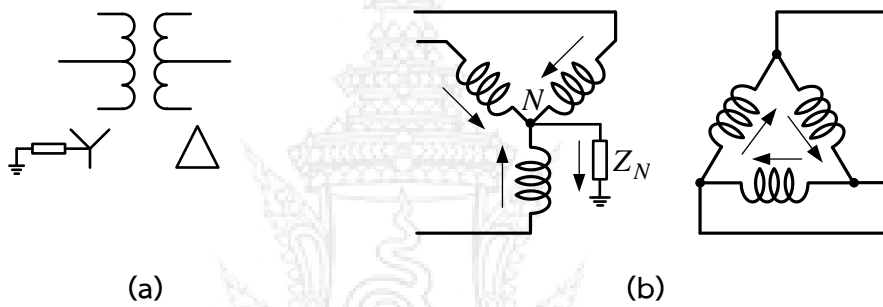
ภาพที่ 2.26 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา

จากภาพที่ 2.26 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบเดลตา - เดลตา สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.27

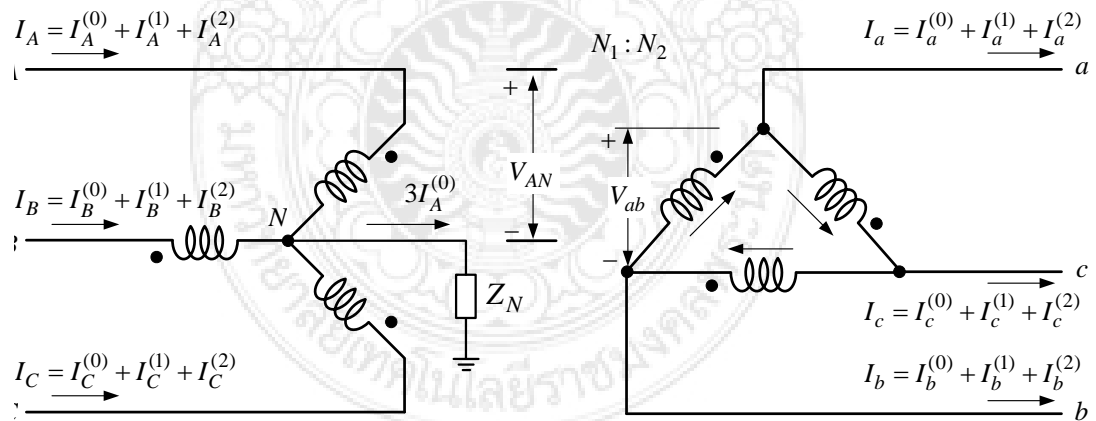


ภาพที่ 2.27 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา

การต่อแบบวาย - เดลตา

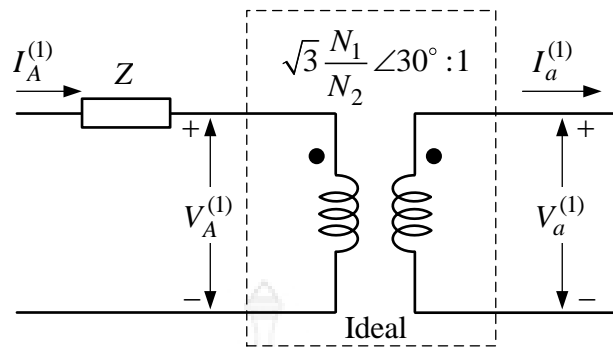


ภาพที่ 2.28 การต่อหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

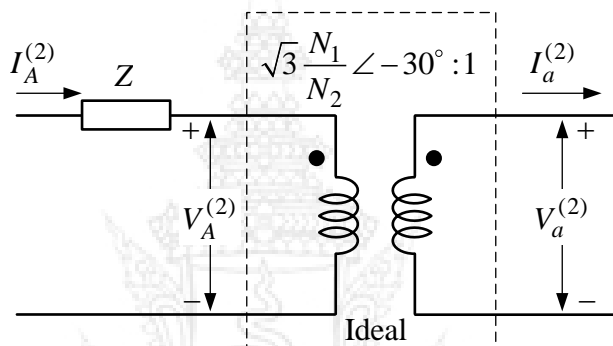


ภาพที่ 2.29 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลง สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.30



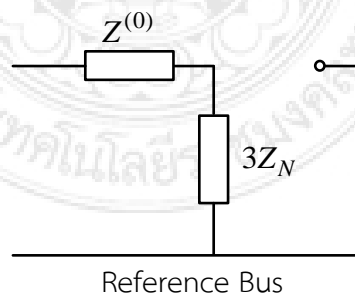
(a)



(b)

ภาพที่ 2.30 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

จากภาพที่ 2.30 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวายลงดิน - เดลตา สามารถเขียนเป็น วงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

จากวงจรสมมูลของการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวาย - วาย แบบวาย - เดลตา แบบเดลตา - วาย และแบบเดลตา - เดลตา สามารถเขียนเป็นสมการอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.71)$$

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.72)$$

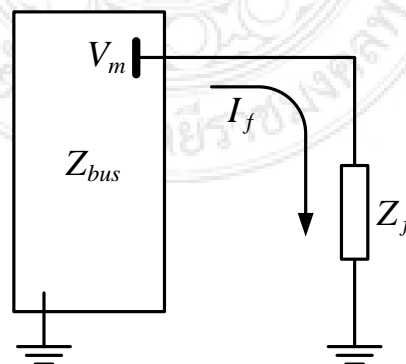
$$\left| \frac{V_{LL}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.73)$$

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1 / \sqrt{3}}{N_2 / \sqrt{3}} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.74)$$

- โดยที่ V_{LL} คือ line to line voltage on the primary
 V_{ll} คือ line to line voltage on the secondary
 V_{LN} คือ line to neutral voltage on the primary
 V_{ln} คือ line to neutral voltage on the secondary
 N_1 คือ number of turn on the primary
 N_2 คือ number of turn on the secondary

2.4 การวิเคราะห์การลัดลงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

การเกิดฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นการเกิดฟอลต์ที่พบบ่อยสุดในระบบไฟฟ้า โดยที่การวิเคราะห์ฟอลต์ประเภทนี้เราสามารถพิจารณาได้ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 วงจรสมมูลการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

จากภาพที่ 2.32 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 (2.75)

$$[Z_f + (Z_{mm} - Z_{mg}) - (Z_{gm} - Z_{gg})]I_f = (V_m - V_g) \quad (2.75)$$

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

จากสมการที่ (2.75) เมื่อเราแทนตัวแปรที่กำหนดให้ข้างต้นเราจะสามารถหาสมการของกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินได้ดังสมการที่ (2.76)

$$I_f = \frac{V_m}{(Z_{mm} + Z_f)} \quad (2.76)$$

เมื่อเราได้ค่าของกระแสฟอลต์แล้วเราสามารถหาแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละบัสโดยใช้สมการดังนี้

$$\Delta V = V' - V = -Z_{bus} A_c^T [I_f] \quad (2.77)$$

จากสมการที่ (2.77) ในเทอมของ Z_{bus} เราสามารถนำหลักที่ m ของ Z_{bus} มาใช้ในการคำนวณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังสมการที่ (2.78)

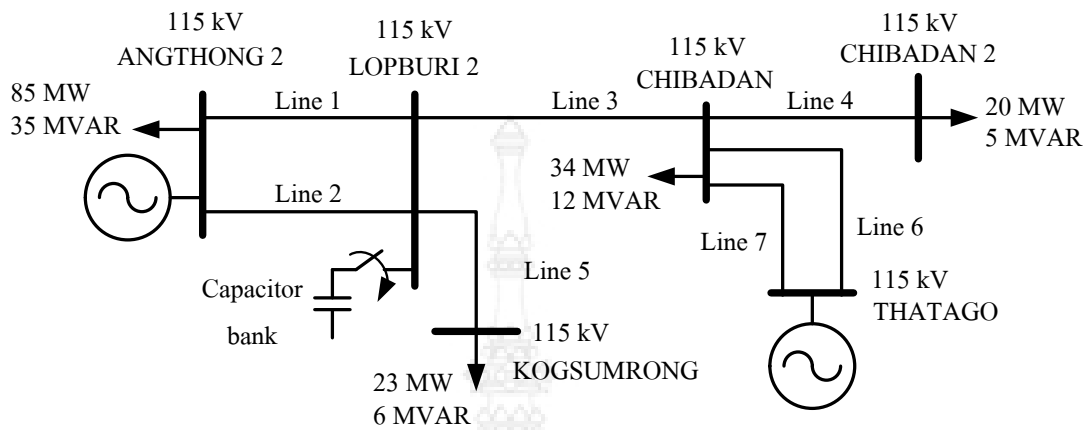
$$\Delta V = -Z_{bus}^{(m)} \times I_f \quad (2.78)$$

โดยที่ (m) คือ บัสและเฟสที่เกิดฟอลต์

เพราะฉะนั้นแรงดันใหม่ที่บัสแต่ละบัสจะหาได้ดังนี้

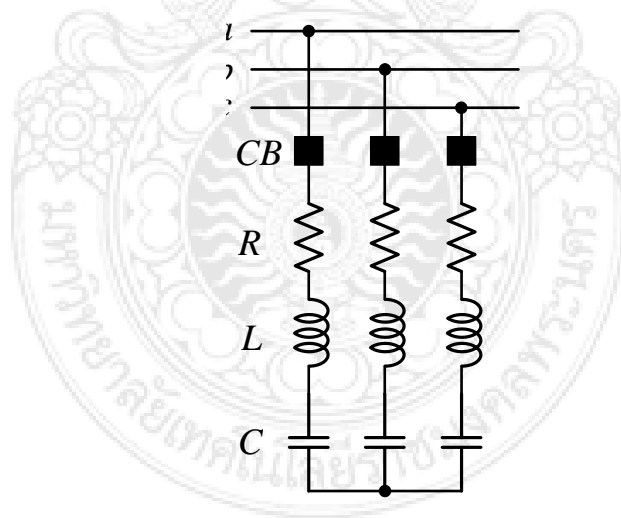
$$V' = V + \Delta V \quad (2.79)$$

จากภาพที่ 3.1 สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวเพื่อทำการจำลองเหตุการณ์ได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบส่งจ่าย 115 kV

จากภาพที่ 3.2 คาปาซิเตอร์เบ็งค์สามารถจำลองเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 3.3 และมีข้อมูลดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.3 ไดอะแกรมเส้นเดียวคาปาซิเตอร์เบ็งค์

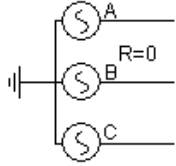
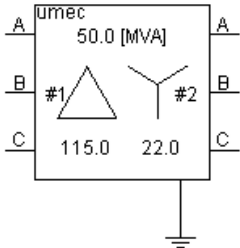
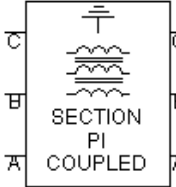
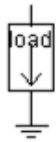
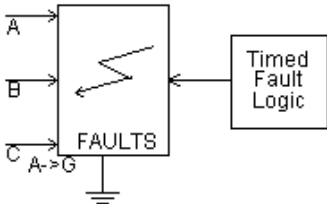
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของคาปาซิเตอร์เบ็งค์ ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV

Capacitor Bank Parameters		
Damping Resistance (R)	Series Inductance (L)	Capacitance (C)
0.1 ohm	0.5 mH	5.348 μ F

3.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้จำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเกิน ซึ่งเราสามารถอธิบายถึงเครื่องมือเบื้องต้นที่นำมาใช้ได้ดังตารางที่ 3.2

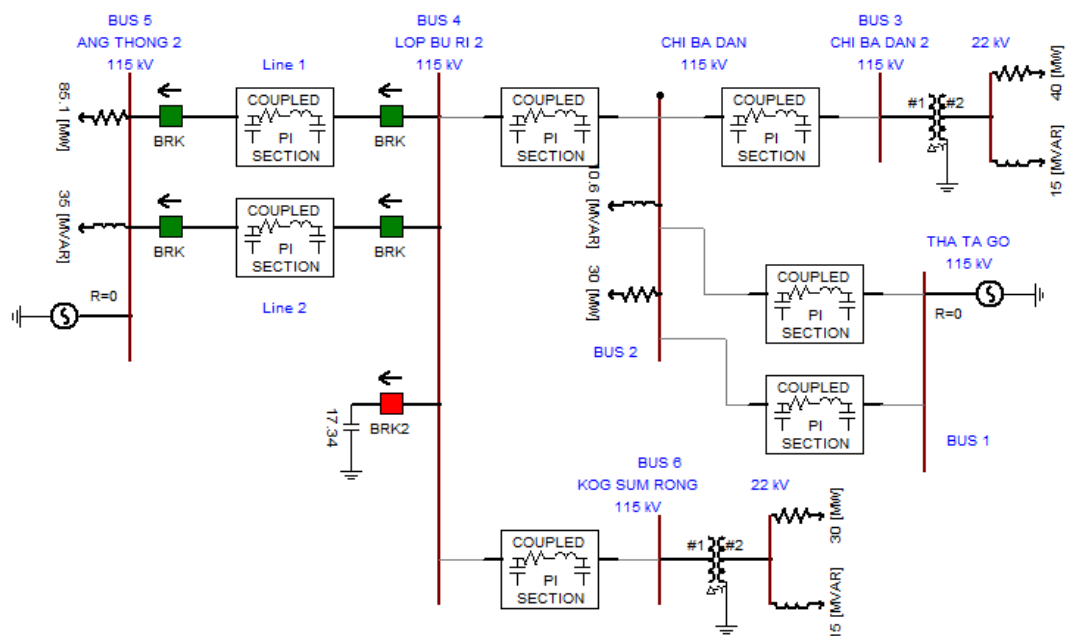
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

เครื่องมือ	รายละเอียดแบบจำลอง
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส
	หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส
	สายส่ง
	โหลด
	เหตุการณ์ลัดวงจร

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

เครื่องมือ	รายละเอียดแบบจำลอง
	เครื่องมือวัดที่แสดงผลเป็น RMS

จากตารางที่ 3.2 สามารถเลือกเครื่องมือที่แถบเครื่องมือเพื่อจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

บทที่ 4

ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

4.1 บทนำ

การสับจ่ายชุดตัวเก็บประจุขนานกับระบบเพื่อช่วยพยุงแรงดันไฟฟ้าให้กลับมาเป็น 1 p.u. แต่การสับจ่ายชุดตัวเก็บประจุที่มีขนาดไม่เหมาะสม ในช่วงเวลาที่แรงดันไฟฟ้าตก อาจส่งผลกระทบต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความอ่อนไหวกับแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม บทความนี้ได้ทำการทดลองจำลองให้เหมือนเหตุการณ์ในระบบ คือ ปลดสายส่ง Line 1 และ Line 2 จากนั้นจะทำการสับ คาปาซิเตอร์แบงค์ ขนาด 24 MVar ที่สถานีไฟฟ้า LOPBURI 2 เพื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงของ กฟภ. ได้แก่ สถานีไฟฟ้า CHIBADAN 2 และ สถานีไฟฟ้า KOGSUMRONG ซึ่งมีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมโยงอยู่ และจำลองเหตุการณ์เปรียบเทียบเพื่อเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาต่อไป

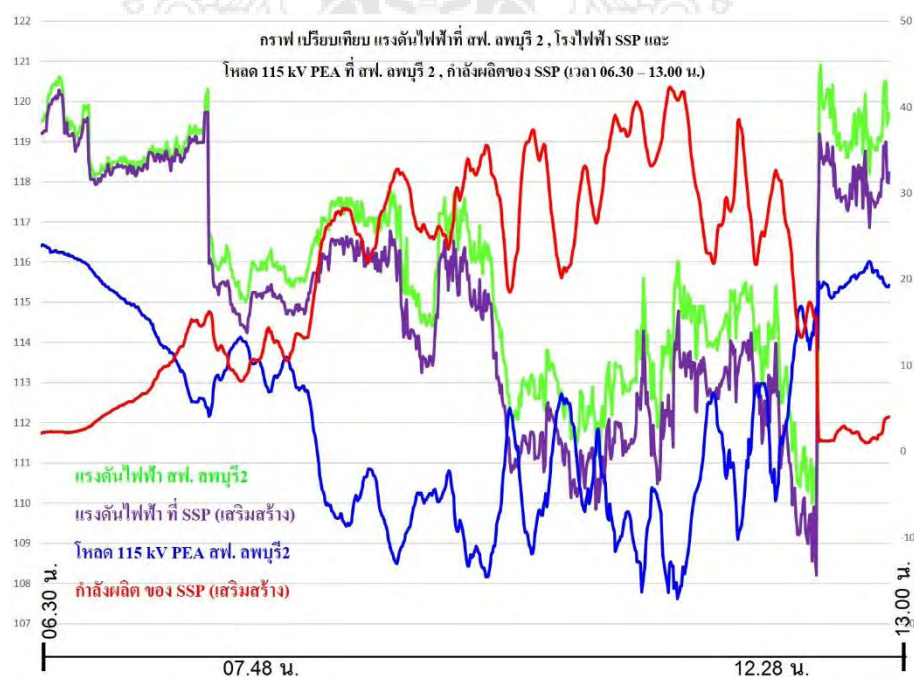
4.2 กรณีศึกษาแรงดันไฟฟ้าเกินโดยมีการสับจ่ายชุดตัวเก็บประจุเพื่อพยุงแรงดันไฟฟ้า

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จะใช้เครื่องมือสำหรับการควบคุมเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคือ หม้อแปลงไฟฟ้า คาปาซิเตอร์แบงค์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปลด-สับ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีระยะทางไกลๆ ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้วิธีต่าง ๆ เหล่านี้ ควบคุมดูแลระดับแรงดันไฟฟ้าของจุดโผลูก้าของให้อยู่ในกรอบมาตรฐานการควบคุมคือระหว่าง 97 – 107 % ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าจะใช้วิธี การเพิ่ม-ลด แท็บของหม้อแปลงไฟฟ้า การปลด-สับ คาปาซิเตอร์แบงค์ ควบคุมแรงดันไฟฟ้า 22 kV 33 kV 69 kV 115 kV และ การเพิ่ม-ลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปลด-สับ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้า 230 kV สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ สฟ. ลพบุรี 2 จะใช้การ การเพิ่ม-ลด แท็บของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ สถานีไฟฟ้า อ่างทอง 2 และ ท่าตะโก แต่เนื่องจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ห่างจากสถานีไฟฟาลพบุรี 2 เป็นระยะทางไกล หรือประมาณ 163 กิโลเมตร ทำให้การเพิ่ม-ลด แท็บของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่สถานีไฟฟ้าท่าตะโกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าการปลด-สับ คาปาซิเตอร์แบงค์ ทั้ง 3 Step ในบริเวณสถานีไฟฟาลพบุรี 2 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อปลดสายส่ง 115 kV สถานีไฟฟ้าอ่างทอง 2 – สถานีไฟฟาลพบุรี 2 ทั้ง 2 วงจร เพื่อก่อสร้างปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะทำให้สถานีไฟฟาลพบุรี 2 เปลี่ยนแปลงรูปแบบการรับไฟจากเดิมจากลูป เป็น เรเดียล



ภาพที่ 4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้าวัดที่ Main Bus 115 kV ของสถานีไฟฟ้าลพบุรี 2

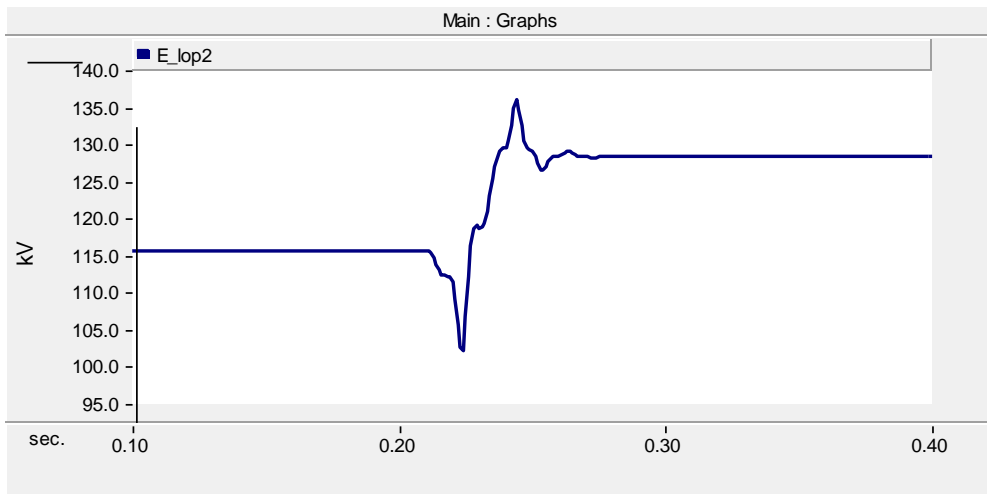
จากภาพที่ 4.1 ได้แสดงขนาดของแรงดันที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าลพบุรี 2 ขณะปลดสายส่ง การปลดสายส่ง Line 1 และ Line 2 และแรงดันไฟฟ้าที่สถานีเสริมสร้างพลังงานแสงอาทิตย์สามารถ แสดงได้ดังภาพที่ 4.2



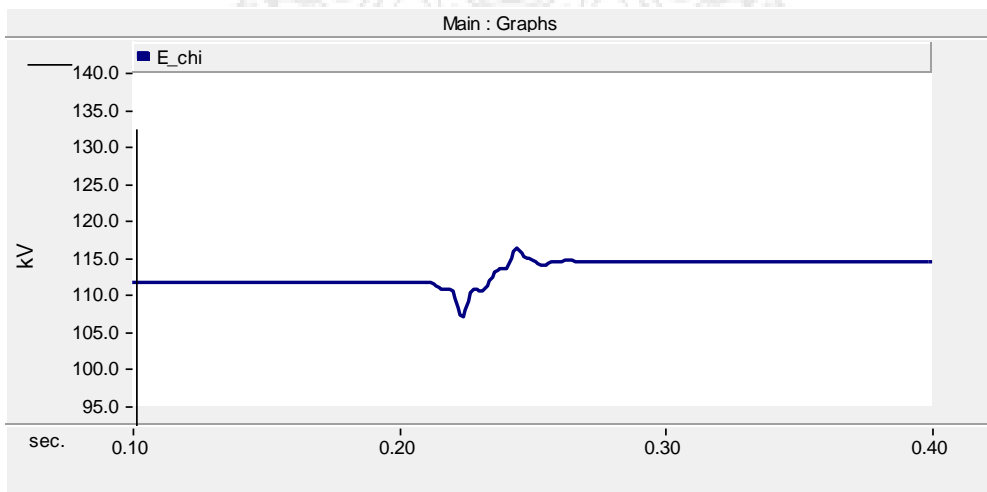
ภาพที่ 4.2 ขนาดแรงดันไฟฟ้าวัดที่สถานีไฟฟ้าเสริมสร้างพลังงานแสงอาทิตย์

4.3 กรณีสับจ่ายคาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ขนาด 24 MVar

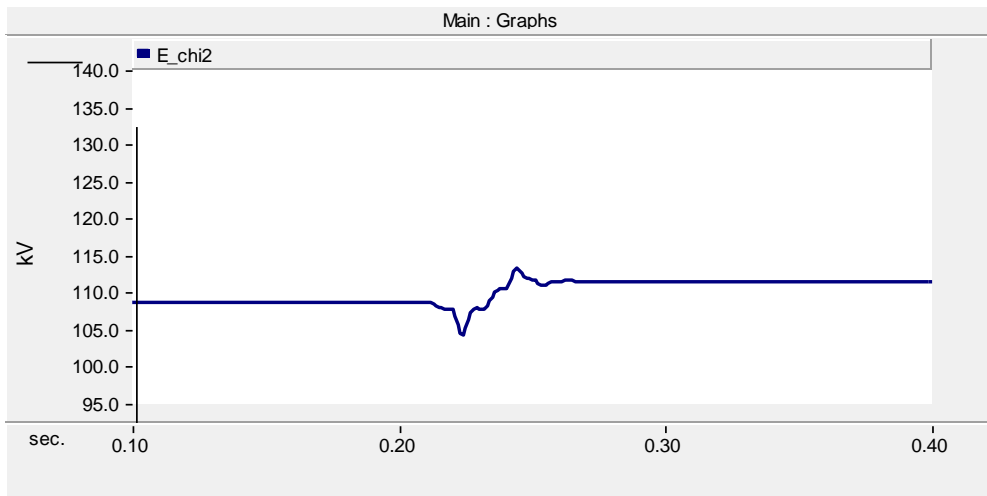
การจำลองเหตุการณ์เมื่อสับจ่ายคาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ขนาด 24 MVar เพื่อประเมินแรงดันไฟฟ้า ที่ สฟ. ลพบุรี 2, ชัยบาดาล, ชัยบาดาล 2 และ โศกสโรงเมื่อ สับ คาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ ที่ สฟ. ลพบุรี 2 ขนาด 24 MVar แสดงรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.6



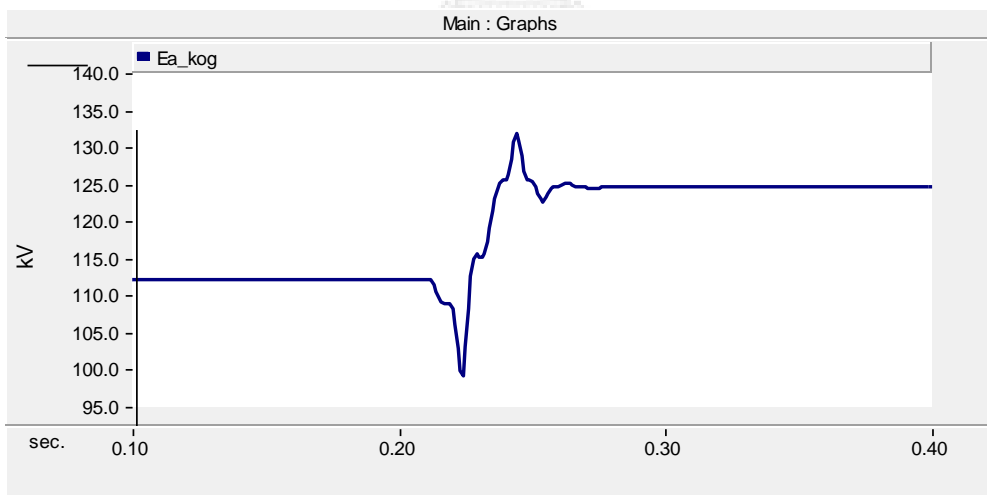
ภาพที่ 4.3 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าลพบุรี 2



ภาพที่ 4.4 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล



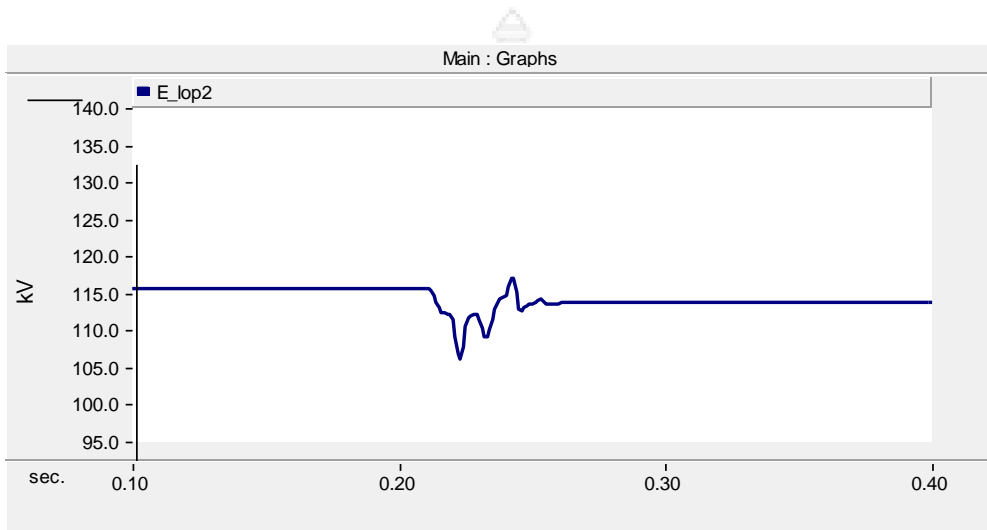
ภาพที่ 4.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล 2



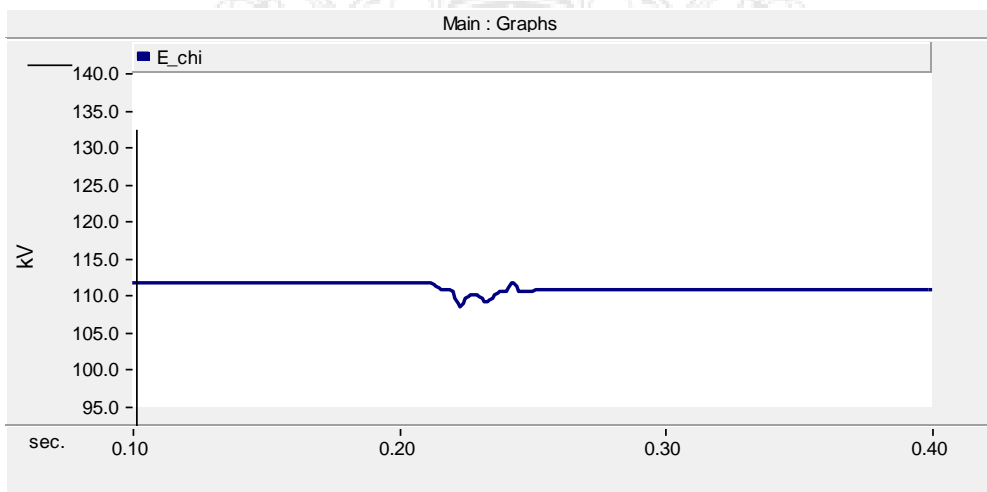
ภาพที่ 4.6 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าโคกสำโรง

4.4 กรณีสับจ่ายคาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ขนาด 12 MVar

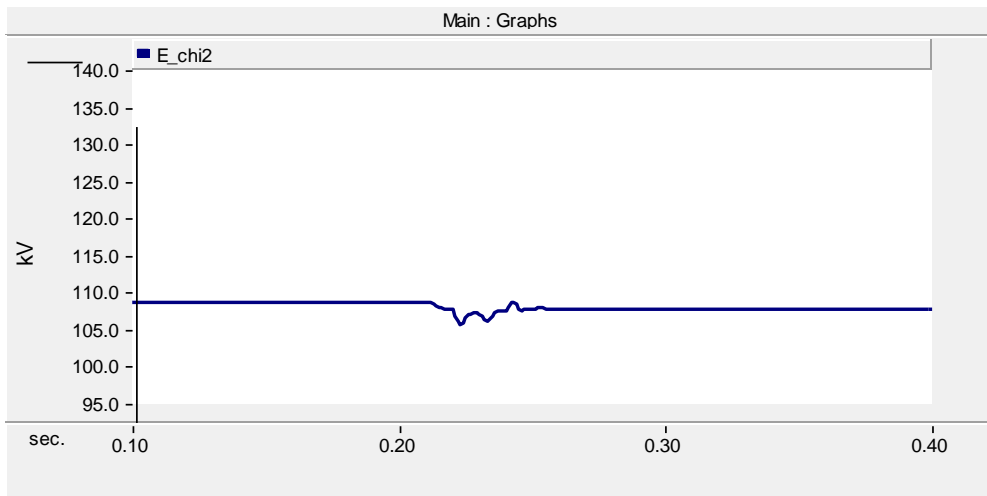
การจำลองเหตุการณ์เมื่อสับจ่ายคาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ขนาด 12 MVar เพื่อประเมินแรงดันไฟฟ้าที่ สฟ. ลพบุรี 2, ชัยบาดาล, ชัยบาดาล 2 และ โศกสาร์เมื่อ สับ คาปาซิเตอร์เบี่ยงค์ที่ สฟ. ลพบุรี 2 ขนาด 24 MVar แสดงรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.10



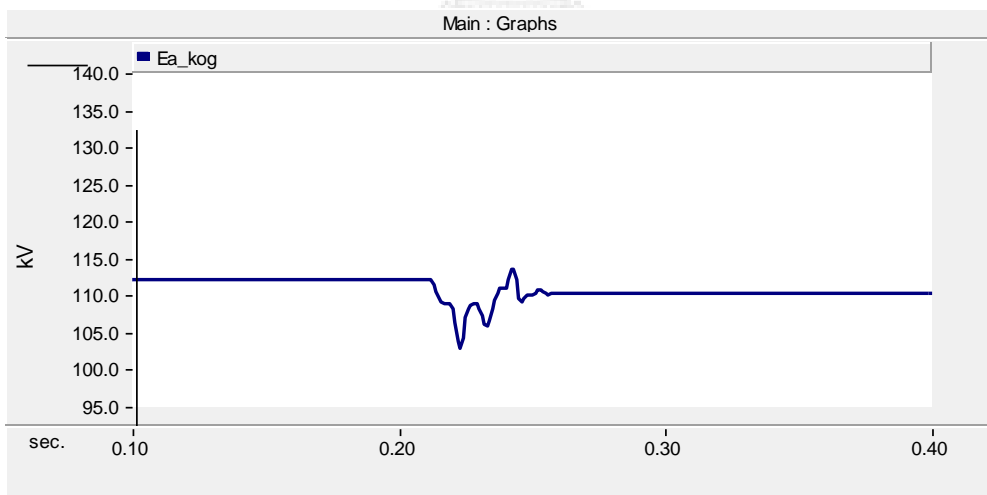
ภาพที่ 4.7 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟาลพบุรี 2



ภาพที่ 4.8 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล



ภาพที่ 4.9 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าชัยบาดาล 2



ภาพที่ 4.10 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าโคกสำโรง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองวิเคราะห์พบว่าที่ สถานีไฟฟ้าแรงสูงของ กฟภ. คือ สฟ. โคนเสาโรงชั้บาดาล และ ชั้บาดาล 2 ต่างก็ได้รับผลกระทบเกิด แรงดันไฟฟ้าเบ้ียงเบนเหมือนกับที่ สฟ. ลพบุรี 2 ของ กฟผ. จึงกล่าวได้ว่า ผลจากวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบ กฟผ. ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นเมื่อสถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งหนึ่ง ของ กฟผ. ต้องเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจ่ายไฟเป็น เรเดียล วิธีการ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายไฟลูกค้าก็ต้องเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเพื่อ หลีกเลี่ยงผลกระทบแรงดันไฟฟ้าเบ้ียงเบนจากมาตรฐานควบคุม ใน บทความนี้ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงขนาดของ คาปาซิเตอร์เบ้ียงค้ ที่ สฟ. ลพบุรี 2 จากเดิมมี ขนาด 24 MVar จำนวน 2 Step เป็น ขนาด 24 MVar จา นวน 1 Step และ 12 MVar จำนวน 2 Step ซึ่งการใช้งาน คาปาซิเตอร์เบ้ียงค้ ขนาด 12 MVar จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเบ้ียงเบนน้อยกว่า คาปาซิเตอร์เบ้ียงค้ ขนาด 24 MVar การปรับปรุงอุปกรณ์ตามที่บทความนี้เสนอจะรองรับการจ่ายไฟเมื่อ สฟ. ลพบุรี 2 ต้องจ่ายไฟแบบเรเดียล

5.2 ข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยมีความคาดหวังจะศึกษาเรื่องการลำดับนำคาปาซิเตอร์เบ้ียงค้เข้าใช้งานที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง ชั้บาดาล และ ลพบุรี 2 มาศึกษา โดยเสนอแนวทางการใช้งานเพื่อลดผลของเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าเกินให้ดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- Information Technology Industry Council. 2000. ITI (CBEMA) Curve Application Note,” Technology Committee 3 (TC3) of the ITI Council. Washington DC.
- 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.
- IEEE std 80-2000. 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Power and Energy Society.
- K. Ngamsanroj and W. Tayati, “An Analysis Of Switching Overvoltages in the EGAT 500 kV Transmission System,” Power Engineering, 2003 Large Engineering Systems Conference, pp. 149-153, May 2003.
- Sarawut Kanitpanyacharoen and Suttichai Premrudeepreechacharn, “Investigation of 115 kV Capacitor Bank Failure During Switching in Chiang Mai 3 Substation,” IEEE Conference Publications, 2011.
- พงศ์ศรีณย์ ตานะประทีปกุล. 2539. วงจรและระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : สยามสปอร์ต ซินดิเคท. มงคล เดชนครินทร์, (บรรณาธิการ). 2554. พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ วสท. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์ ประสิทธิ์ ที่มพุดิ และปฐมทัศน์ จิระเดชะ, (บรรณาธิการ). 2549. ความรู้พื้นฐานวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรออกแบบและปรึกษาเครื่องกลและไฟฟ้าไทย สมาคมช่างเหมาไฟฟ้าและเครื่องกลไทย.

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 การลดผลกระทบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากระบบไฟฟ้าใกล้เคียงในขณะปฏิบัติงานแบบดับไฟ