

การศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้า
ขับเคลื่อนกระแสลับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**VOLTAGE UNBALANCE STUDY OF AC TRACTION
SUBSTATION TRANSFORMER CONNECTION**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2016

การศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน
กระแสลับ

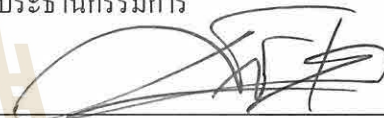
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. อุเทน ถิ่น)

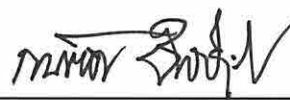
กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพงษ์ มิ่งพฤกษ์ : การศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลง
สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ (VOLTAGE UNBALANCE STUDY OF AC
TRACTION SUBSTATION TRANSFORMER CONNECTION) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรรณิขพงษ์, 148 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของ
รถไฟไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิ้งก์ โดยการประเมินความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า
เมื่อพิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่
แตกต่างกัน 7 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบ
สกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา ควบคู่ไปกับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลง
ช่วงเวลาการเดินรถไฟและน้ำหนักสุทธิของรถไฟ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ กรุงเทพมหานคร
ประเทศไทย ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสาร 8 สถานี มีระยะทางบริการ
ทั้งหมด 28.298 km ใช้ระบบปฏิบัติการไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสามเฟสเหนื่อสิริยะ 25 kV จากผลการ
จำลองพบว่า ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุดเมื่อเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์
หรือแบบรูปเดลตา ดังนั้นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบเหล่านี้สามารถลดผลกระทบของ
ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับการปรับปรุงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใน
ปัจจุบัน และส่วนต่อขยายของระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ในอนาคต



NATTAPONG MINGPRUK : VOLTAGE UNBALANCE STUDY OF AC
TRACTION SUBSTATION TRANSFORMER CONNECTION.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THANATCHAI

KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 148 PP.

VOLTAGE UNBALANCE/AC ELECTRIC RAILWAY/TRANSFORMERS
CONNECTION

This thesis presents a study of voltage unbalance of a power supply system in an AC electrified railway using MATLAB/Simulink program. The voltage unbalance is evaluated by the voltage unbalance factor at the traction substation based on the different types of transformer connections: single-phase connection, cyclic winding connection, V connection, Scott connection, LeBlanc connection, Modified Wood – bridge connection and Roof – Delta connection. Airport Link - Bangkok, Thailand is chosen to be a test system with different scenarios of the train headways and masses. The test system is operated by an AC electrified power feeding scheme via 25 kV overhead catenary system. The total service distance of the Airport Link is 28.298 km with 8 passenger stations. As the results, the lowest voltage unbalance factor achieves by the use of Modified Wood – bridge connection or Roof - Delta connection. Therefore, it is recommended to use these types of the transformer connection to reduce the effect of the voltage unbalance of the power supply for improving the present traction substation and planning the line extension of the Airport Link in the future.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการทำงานและแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความกรุณาใน คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการ

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิยัมชัย ที่ให้ความรู้ทางด้านงานวิจัย รวมทั้งให้ คำปรึกษา แนะนำวิธีการเผยแพร่ผลงานวิจัย รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการ ดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมา โดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต เรื่อยมา

ณัฐพงษ์ มิ่งพฤกษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ทัศนวิจารณ์กรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทัศนวิจารณ์กรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 สรุป.....	10
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
3.1 บทนำ.....	11
3.2 รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....	11
3.2.1 ชนิดรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....	12
3.2.2 โครงสร้างระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์	16
3.3 ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า	17
3.3.1 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส	17
3.3.2 ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า	20
3.3.3 ส่วนประกอบสมมาตร	21
3.3.4 มาตรฐานตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า	23
3.3.5 ผลกระทบจากการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า	28
3.3.6 สาเหตุของการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และวิธีการลด	29
3.4 หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับ	31
3.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	31
3.4.2 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับ	43
3.5 ระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า	49
3.5.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ลากจูง	52
3.5.2 ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	54
3.6 ระบบแรงจูงไฟฟ้า	58
3.6.1 ระบบแรงจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสดับ	58
3.6.2 ระบบแรงจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสดับ	59
3.7 สรุป	64
4 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์	65
4.1 บทนำ	65
4.2 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์	65
4.2.1 แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่ง	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 แบบจำลองหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ	74
4.2.3 แบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า	80
4.2.4 การคำนวณ โหลดศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า	80
4.2.5 การปรับค่าความเร็วและตำแหน่งของรถไฟ	80
4.3 การพัฒนาโปรแกรมแทนสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์	81
4.3.1 การพัฒนาโปรแกรมแทนของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ	82
4.3.2 การพัฒนาโปรแกรมแทนของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า	87
4.3.3 การพัฒนาโปรแกรมแทนของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง	94
4.3.4 การพัฒนาโปรแกรมแทนของแบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า	96
4.3.5 การพัฒนาโปรแกรมแทนของแบบจำลอง ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า	99
4.3.6 การพัฒนาโปรแกรมแทนในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	101
4.4 ขั้นตอนการจำลองระบบทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์	103
4.5 สรุป	105
5 ระบบทดสอบและผลการทดสอบ	106
5.1 บทนำ	106
5.2 ระบบทดสอบโดยรวม	106
5.3 ระบบทดสอบกรณี S1	107
5.4 ระบบทดสอบกรณี S2	111
5.5 ระบบทดสอบกรณี S3	114
5.6 ระบบทดสอบกรณี S4	117
5.7 ระบบทดสอบสถานการณ์เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า	120
5.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	121

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.9 สรุป.....	122
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	123
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	123
6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	124
รายการอ้างอิง.....	125
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการเขียนโค้ดโปรแกรมเมทแลป.....	128
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	148



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3.1 ประเภทและลักษณะทั่วไปของระบบกำลังแม่เหล็กไฟฟ้า (IEEE 1159 – 2009).....	27
3.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส และการใช้งาน.....	40
3.3 มาตรฐานการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส.....	40
3.4 กำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน.....	40
4.1 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำใด ๆ ในหน่วย $m\Omega/km$	68
4.2 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำแคทีแนรีในหน่วย $m\Omega/km$	69
4.3 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งในหน่วย $m\Omega/km$	70
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคทีนารีและรางวิ่ง.....	73
4.5 ค่าพารามิเตอร์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคทีนารี รางวิ่ง และสายฟีดเดอร์.....	74
4.6 ส่วนประกอบของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ.....	84
4.7 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า.....	89
4.8 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา.....	92
4.9 ส่วนประกอบของแบบจำลองสายจ่ายไฟเหนือศีรษะไฟและรางวิ่ง.....	95
4.10 พารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง.....	96
4.11 ส่วนประกอบของแบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า.....	98
4.12 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....	101
5.1 รูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....	106
5.2 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S1.....	111
5.3 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S2.....	114
5.4 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S3.....	117
5.5 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S4.....	120
5.6 %VUF ของการเพิ่มขนาดโหลดศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า.....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	แผนที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์..... 12
3.2	ตัวอย่างรถไฟฟ้า Desiro Class 360/1..... 13
3.3	ตัวอย่างรถไฟฟ้า Desiro Class 360/2..... 13
3.4	ตัวอย่างรถไฟฟ้า Express Line..... 14
3.5	ตัวอย่างรถไฟฟ้า City Line..... 14
3.6	โครงสร้างภายในตู้แรกของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบ รถไฟฟ้าธรรมดา (City Line)..... 15
3.7	โครงสร้างภายในตู้กลางของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบ รถไฟฟ้าธรรมดา (City Line)..... 16
3.8	แผนผังระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน..... 17
3.9	การต่อวงจรไฟฟ้า 3 เฟส แบบ 3 สาย และ 4 สาย..... 18
3.10	ภาพตัดขวางเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส..... 18
3.11	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส..... 18
3.12	เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส..... 19
3.13	เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส..... 21
3.14	ส่วนประกอบสมมาตรของระบบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล..... 21
3.15	ผลรวมทางเวกเตอร์ของส่วนประกอบสมมาตรที่ไม่สมดุล..... 22
3.16	ส่วนประกอบสมมาตรของระบบแรงดันไฟฟ้าสมดุล..... 23
3.17	สมรรถนะของมอเตอร์ลดลงเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล..... 29
3.18	หม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้เครื่องแรก..... 32
3.19	ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 33
3.20	แบบร่างของหม้อแปลงในอุดมคติ และสัญลักษณ์..... 35
3.21	หม้อแปลงเฟสเดียว..... 36
3.22	ลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส..... 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 ลักษณะการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	37
3.24 แรงดันไฟฟ้าในการต่อขดลวดแบบวาย	38
3.25 แรงดันไฟฟ้าในการต่อขดลวดแบบเดลตา	38
3.26 การตรวจสอบการต่อขดลวดแบบเดลตา	39
3.27 การต่อขดลวดแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน	39
3.28 ชนิดหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบเดลตาเปิด 1 ด้าน	42
3.29 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเฟสเดียว	43
3.30 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส	44
3.31 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี	45
3.32 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์	46
3.33 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบแบบเลอบลองก์	47
3.34 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบแบบวูดบริดจ์	48
3.35 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบแบบรูปเดลตา	48
3.36 รถไฟฟ้าความเร็วสูงชันโยชินคันเซ็น	49
3.37 โครงสร้างการจัดระบบลากจูงแบบ Locos และ EMU	50
3.38 โครงสร้างการของขบวนรถไฟฟ้า	50
3.39 รถไฟที่ปรับเอียงได้ในขณะเข้าโค้ง	51
3.40 รถไฟฟ้าความเร็วสูง Acela Express ของประเทศสหรัฐอเมริกา	52
3.41 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวต้านทานอนุกรมสำหรับรถไฟฟ้า	54
3.42 แผนภาพแรงอิสระของรถไฟที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นทางลาดชัน	55
3.43 แรงฉุดการขับเคลื่อนรถไฟ	56
3.44 โหมดการทำงานของรถไฟ	57
3.45 โครงสร้างการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สาม	59
3.46 รถไฟฟ้ามหานคร MRT	59
3.47 การไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าให้ขบวนรถไฟฟ้า	60
3.48 การจ่ายไฟกระแสสลับเข้าระบบ 69 kV ผ่านสายไฟเหนือตัวรถไฟ	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.49 แผนโทกราฟ	62
3.50 โครงสร้างของระบบสายป้อนรถไฟฟ้า	62
3.51 โครงสร้างของระบบการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	63
3.52 การจ่ายไฟในระบบแรงดันไฟฟ้าแบบโดยตรง	63
3.53 การจ่ายไฟในระบบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงออโต	64
4.1 แบบจำลองของระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง	61
4.2 ระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์	71
4.3 แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต	74
4.4 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเฟสเดียว ในเมทแลปซิมูลิงก์	75
4.5 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส ในเมทแลปซิมูลิงก์	75
4.6 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี ในเมทแลปซิมูลิงก์	76
4.7 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ ในเมทแลปซิมูลิงก์	77
4.8 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเลอบลองก์ ในเมทแลปซิมูลิงก์	77
4.9 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์	78
4.10 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ ในเมทแลปซิมูลิงก์	78
4.11 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา	79
4.12 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา ในเมทแลปซิมูลิงก์	79
4.13 วงจรสมมูลโครงสร้างกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	80
4.14 โปรแกรม MATLAB	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 Simulink Library Browser	83
4.16 untitled file	83
4.17 แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในไฟล์ untitled	84
4.18 แบบจำลองเครื่องมือวัดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า	84
4.19 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Three-Phase V-I Measurement	85
4.20 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Three-Phase Source	86
4.21 แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในเมทแลปซิมมูลิงก์	86
4.22 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าในไฟล์ transformer	88
4.23 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า	88
4.24 การตั้งแท็ปกลางของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า	89
4.25 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วนขดลวด 1 : 1	90
4.26 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วนขดลวด 1 : 2	90
4.27 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์	91
4.28 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันขึ้น	91
4.29 การตั้งค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงออโต	92
4.30 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูปเดลตา อัตราส่วนขดลวด 1 : 1	93
4.31 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูปเดลตา อัตราส่วนขดลวด 1 : 2	93
4.32 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าในเมทแลปซิมมูลิงก์	94
4.33 แบบจำลองของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งใน rail file	95
4.34 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Series RLC Branch	96
4.35 แบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งในเมทแลปซิมมูลิงก์	97
4.36 แบบจำลองของขบวนรถไฟฟ้าใน train file	97
4.37 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Series RLC Load	98
4.38 แบบจำลองของขบวนรถไฟฟ้าในเมทแลปซิมมูลิงก์	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39	แบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าใน depot file.....100
4.40	การกำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง Parallel RLC Load.....100
4.41	แบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า ในแมทเพลซิมมูลิงก์.....101
4.42	ขั้นตอนการดำเนินงานจำลองผลระบบการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....102
4.43	ภาพรวมการทดลองในแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่ง แบบระบบจ่ายตรง.....103
4.44	ภาพรวมการทดลองในแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่ง แบบระบบหม้อแปลงออโต.....104
4.45	ขั้นตอนการดำเนินงานจำลองผลระบบการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสดับสำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....104
5.1	แบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบรถไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ.....107
5.2	แผนที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์.....108
5.3	ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน.....108
5.4	การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S1.....109
5.5	รูปแบบการเดินรถของ headway 15 นาทีในกรณี S1.....109
5.6	การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S1.....110
5.7	ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S1.....110
5.8	การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S2.....112
5.9	รูปแบบการเดินรถของ headway 12 นาทีในกรณี S2.....112
5.10	การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S2.....113
5.11	ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S2.....113
5.12	การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S3.....115
5.13	รูปแบบการเดินรถของ headway 12 นาทีในกรณี S3.....115
5.14	การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S3.....116
5.15	ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S3.....116
5.16	การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S4.....118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 รูปแบบการเดินรถของ headway 10 นาทีในกรณี S4.....	118
5.18 การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S4.....	119
5.19 ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S4.....	119



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการขนส่งมวลชนทางบก นับว่าเป็นรูปแบบการขนส่งมวลชนที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการขนส่งมวลชนประเภทอื่น ๆ และระบบการขนส่งมวลชนทางบกที่สามารถขนส่งผู้โดยสารได้เป็นจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน วัตถุประสงค์หลักของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน คือ การให้ความสำคัญกับการลงทุนที่จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงาน และการลดต้นทุนการขนส่ง ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยทั่วไป ประกอบด้วยระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ สำหรับรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เป็นระบบปฏิบัติการไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสัมผัสเหนื่อสรีระ 25 kV ปัจจุบันมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสของการไฟฟ้านครหลวง และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะเชื่อมต่อกับโหลดรถไฟฟ้า และโหลดบริการในสถานีซ่อมบำรุงและสถานีผู้โดยสาร สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับเป็นปัจจัยหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้าเป็นโหลดทางไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่อง กำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในปริมาณที่สูง และระยะเวลาดำเนินการรถไฟฟ้ากำลังแรงออกจากสถานีผู้โดยสารจนกระทั่งความเร็วคงที่ กำลังไฟฟ้าคงที่ หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าจะลดลงเป็นศูนย์เมื่อรถไฟฟ้าจอดที่สถานีผู้โดยสารถัดไป โดยทั่วไปปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ คือ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ และในอนาคตอันใกล้กับการรถไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (รฟท.) มีแผนการขยายเส้นทางรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิไปยังท่าอากาศยานดอนเมือง ดังนั้นเส้นทางการบริการผู้โดยสารจะยาวมากขึ้น และจำนวนรถไฟฟ้าจะมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่บริการอยู่ในปัจจุบันจะมีแนวโน้มการจ่ายโหลดรถไฟฟ้าที่มากขึ้น และปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับมากขึ้นด้วยเช่นกัน ปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่เกินมาตรฐาน จะมีความเสี่ยงทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าทำงาน และระบบไฟฟ้าอาจจะล้มได้ การลดความ

เสียหายในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่เกิดจากความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ทางเลือกหนึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงที่เหมาะสมติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์เตอร์เรลลิงก์

1.2.2 เพื่อศึกษาทฤษฎี และหลักการทำงานของ การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.2.3 เพื่อออกแบบ และสร้างแบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับด้วยโปรแกรมแมทแลปซิมูลิงก์

1.2.4 เพื่อศึกษาผลความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา จะลดปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเลอบลองก์ แบบสกอตต์ แบบวี แบบสลับคู่เฟส และแบบเฟสเดียวตามลำดับ

1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น

1.4.1 ศึกษาแบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV 50Hz สำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์เตอร์เรลลิงก์ที่มีการติดตั้งหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตาเท่านั้น

1.4.2 วิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตาเท่านั้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาแบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์เตอร์เรลลิงก์ ที่มีการติดตั้งหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.5.2 พัฒนาแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแอร์พอร์เตอร์เรลลิงก์ ที่มีการติดตั้งหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับโดยใช้โปรแกรมแมทแลปซิมูลิงก์

1.5.3 ทดสอบแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบรางคู่

1.5.4 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ จากแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เข้าใจทฤษฎี และหลักการทำงานของการทำงานของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.6.2 มีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ที่มีการติดตั้งหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.6.3 ได้ทำแบบจำลองแหล่งจ่ายแรง สำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่มีการติดตั้งหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.6.4 ได้ทราบถึงผลกระทบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และการลดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมายของงานวิจัย วิทยานิพนธ์ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจบริบทสุวรรณภูมิ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทาง และระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย 5 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (Airport Rail Link) ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Voltage Unbalance Factor) หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า และระบบรางรถไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ และขั้นตอนต่าง ๆ ในการพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่

เฟสแบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเคลตาเท่านั้น เพื่อหาค่าความไม่สมดุลไฟฟ้าในระบบบรไฟฟ้าแอร์พอร์ตรีลลิงก์ ซึ่งพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบบรไฟฟ้าแอร์พอร์ตรีลลิงก์ขึ้นโดยใช้โปรแกรมเมทแลป ซิมูลิงก์

บทที่ 5 กล่าวถึงระบบการทดสอบและผลการทดสอบ จากการพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบบรไฟฟ้าแอร์พอร์ตรีลลิงก์โดยใช้โปรแกรมเมทแลปซิมูลิงก์ เพื่อวิเคราะห์หาค่าความไม่สมดุลไฟฟ้าภายในระบบ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ พร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการเขียนโค้ดโปรแกรมเมทแลป

ภาคผนวก ข. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ โดยมีการพัฒนาแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูเลชัน ในการจำลองผลเพื่อวิเคราะห์หาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และแรงดันตกในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เคยมีการใช้งานมาก่อน จากผลการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE, IEE และ Science Direct เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางโดยจัดลำดับการเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1996	K.C. Bin and S.G. Bing	ศึกษาเกี่ยวกับโมเดลของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (Single – Phase connection) แบบวี (V connection) และแบบสกอตต์ (Scott connection)

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1997	Y.L. Ching, K.C. Bin, J. L. Wei and F.H. Yen	ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าแบบต่าง ๆ บนการทำงานของมอเตอร์อินดักชัน และผลกระทบจากความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้ากำลัง
1997	C.J .Goodman	ศึกษาเกี่ยวกับ แบบจำลองความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง
1999	Y.L. Ching	ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ ผลกระทบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในมอเตอร์อินดักชันสามเฟส
2000	B.P. Rochard and F. Schmid	อธิบายเกี่ยวกับ การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าความเร็วสูงจากแรงที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ คือ แรงลากจูง แรงโน้มถ่วง และแรงเสียดทาน
2003	T. Kulworawanichpong	อธิบายเกี่ยวกับ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบรถไฟฟ้า วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของระบบรถไฟฟ้า และวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายแรงรถไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ
2004	Applications of Mathematics	อธิบายเกี่ยวกับ วิธีการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า และวิธีการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า มี 4 โหมดการทำงาน คือ โหมดเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการเคลื่อนที่ตามความเฉื่อย และโหมดเบรก
2005	N. Golovanov, G.C. Lazaroiu, M. Rosia and D. Zeninelli	ศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง และได้พัฒนานำหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิดมาทดสอบหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า เพื่อลดการใช้พลังงานของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยทดสอบกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2009	F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder and E. Schneider	อธิบายเกี่ยวกับการกำหนด และวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าชนิดสัมผัสเหนือศีรษะ และรางวิ่งรถไฟของระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสัมผัสเหนือศีรษะ
2009	IEEE	ศึกษาสมการ วิธีการที่ใช้คำนวณหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE
2010	H.C. Yao and J .W. Chi	ศึกษาเกี่ยวกับ การประเมินคุณภาพทางไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า และศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษที่เรียกว่า เลอบลองก์ (Le – Blanc) และในงานวิจัยนี้ยังได้นำมาตรฐานต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ
2011	M.H. Kalantari, M. J. Sadeghi, S.M. Farshad and S.Y. Saeed	ศึกษาเกี่ยวกับ โมเดลหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ และการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในพื้นฐานปัจจัยความถูกต้อง
2011	J.X.T. Tang and N. Bin	ศึกษาเกี่ยวกับ การหารูปแบบความเร็วของรถไฟ (Speed profile) ที่เหมาะสมในการทำงาน
2011	S. Lu	ศึกษาเกี่ยวกับ กลยุทธ์การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงานสำหรับหัวรถจักรไฟ
2012	F. Ciccarelli, M. Fantauzzi, D. Lauria and R. Rizzo	ศึกษาเกี่ยวกับ การจัดการหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2012	A. Horiguchi, H. Morimoto and A. Suzuki	ศึกษาเกี่ยวกับ การพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ (Modified wood - bridge connection) และแบบรูฟเดลตา (Roof – Delta connection)
2014	B. Fukala and J. Palecek	ศึกษาเกี่ยวกับ การเปรียบเทียบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ
2014	L. Ladniak	ศึกษาเกี่ยวกับ การคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับของหม้อแปลงไฟฟ้า
2015	A.D. Rodriguez, F.M. Fuentes and A. J. Matta	ศึกษาเกี่ยวกับ การเปรียบเทียบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE
2015	G. Firat, G. Yang and H.A.H. Al-Ali	ศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟ

จากวรรณกรรม และงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่ดำเนินการศึกษา หรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พอมองภาพออกอย่างกว้าง ๆ ว่ามีคณะนักวิจัยใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียง และจัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดจากหลาย ๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงการนำทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ และยังมีการเสริมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนั้น ๆ โดยย่อ ดังนี้

เริ่มต้นจาก Ching et al. (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าแบบต่าง ๆ บนการทำงานของมอเตอร์อินดักชัน และในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าว่ามีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังด้วย ต่อมา Ching (1999) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในมอเตอร์อินดักชันสามเฟสทำให้เห็นถึงความสำคัญ

ของความไม่สมดุลแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างดี งานวิจัยของ Bin and Bing (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโมเดลของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสในแบบต่าง ๆ เช่น การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (Single – Phase connection) การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวี (V connection) การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวาย – เดลตา (Wye – Delta connection) และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสกอตต์ (Scott connection) ว่ามีการเชื่อมต่อเป็นอย่างไร และแสดงค่าพารามิเตอร์ในหม้อแปลงแบบต่าง ๆ ตามลำดับ งานวิจัยของ Chan et al. (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินคุณภาพทางไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษที่เรียกว่า Le – Blanc และในงานวิจัยนี้ยังได้นำมาตรฐานต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ พบว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองก์ แบบสกอตต์ และแบบวี มีคุณภาพทางไฟฟ้าที่ต่างกัน และงานวิจัยการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับได้เอาแบบจำลองของงานวิจัยนี้ มาทดสอบหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมของงานวิจัยการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับเป็นหลัก งานวิจัยของ Ogawa and Shinada (2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ รูฟเดลตา (Roof – Delta) งานวิจัยของ Golovanov et al. (2005) ได้ศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนานำหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ละชนิดมาทดสอบหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยทดสอบกับโหลดที่เป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูง งานวิจัยของ Kalantari et al. (2011) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโมเดล และการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าในพื้นที่ฐานปัจจัยความถูกต้อง งานวิจัยของ Ciccirelli et al. (2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ งานวิจัยของ Leslaw Ladniak (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ จากการทบทวนวรรณกรรม และสารสนเทศที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะเห็นว่า มีปริมาณการวิจัยอยู่น้อยมากที่พิจารณาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อแสวงหาองค์ความรู้ด้านความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ โดยใช้โปรแกรมเมทแลปซิมมูลิก เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในระบบ

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE, IEE, Science Direct และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นในความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตรেলลิงก์ ส่วนใหญ่จะเป็นการคำนวณค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของโหลดคงที่ หรือมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และการออกแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



บทที่ 3

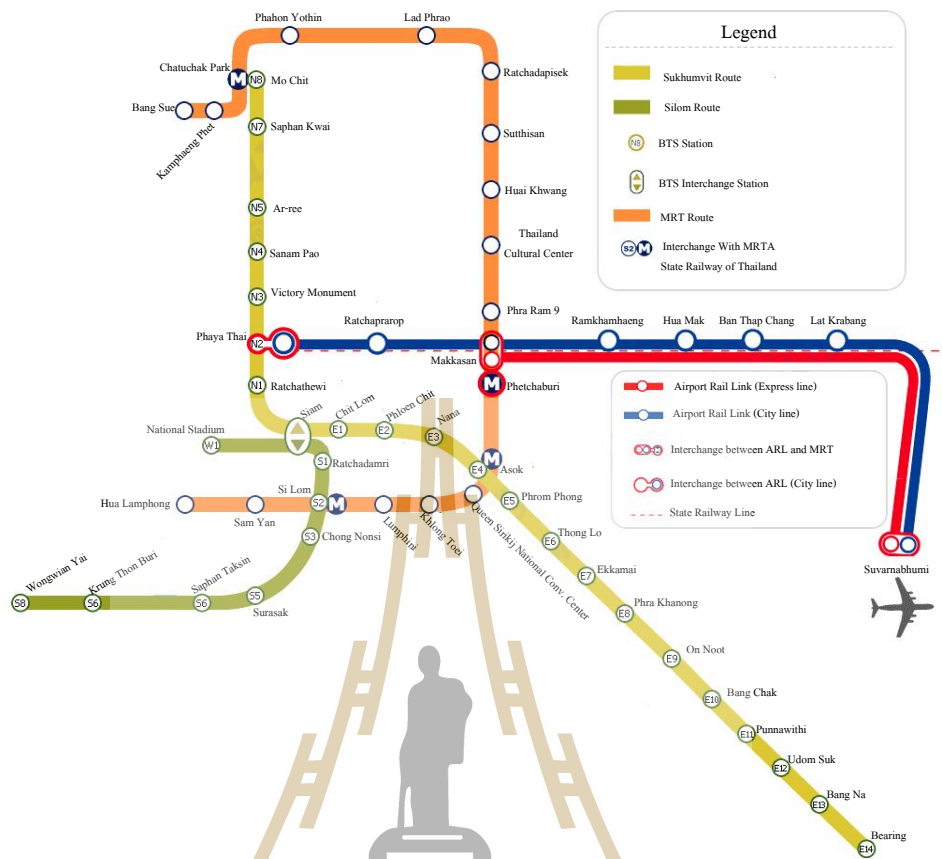
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มีความสำคัญมากในการดำเนินงาน เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (Airport Rail Link) ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Voltage Unbalance Factor) หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับ ระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า และระบบรางรถไฟฟ้า โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์ หรือถูกกล่าวอ้างต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ เพื่อความกระชับ และชัดเจนของเนื้อหา

3.2 รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ หรือรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ มีชื่อโครงการอย่างเป็นทางการว่า โครงการระบบขนส่งมวลชนทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีรับส่งผู้โดยสารอากาศยานกรุงเทพมหานคร เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนแบบพิเศษ ที่เป็นส่วนหนึ่งในโครงการก่อสร้างเส้นทางรถไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าชานเมือง โดยรัฐบาลได้นำโครงการนี้มาเป็นโครงการเร่งด่วน และแยกการก่อสร้างต่างหากจากระบบรถไฟฟ้าชานเมือง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการระบบขนส่งมวลชนทางราง ในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ดำเนินการก่อสร้างโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) และเปิดดำเนินการเชิงพาณิชย์โดยบริษัท รถไฟฟ้า รฟท. จำกัด ซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจในกระทรวงคมนาคม โดยมีรูปแบบรถไฟที่ให้บริการอยู่ 2 แบบ คือ Express Line และ City Line มีสถานีทั้งหมด 8 สถานี คือ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ลาดกระบัง บ้านทับช้าง หัวหมาก รามคำแหง มักกะสัน ราชปรารภ และพญาไท ซึ่งเป็นระยะทางทั้งหมด 28.298 km ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

ที่มาของภาพ : <https://f.ptcdn.info/829/020/000/1404375501-Untitled1-o.jpg>

3.2.1 ชนิดรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

บริษัท ซิเมนส์ (Siemens) ประเทศเยอรมนี เป็นผู้ผลิตรถไฟฟ้าชั้นนำของโลก โดยบริษัท ซิเมนส์ ได้ผลิตรถไฟฟ้า ตระกูลรถซีเมนส์ เดซิโร คลาส 360 (Desiro Class 360) เป็นรถไฟฟ้าที่ใช้ระบบการขับเคลื่อนแบบ EMU (Electric multiple unit) คือ ระบบลากจูงแบบแยกส่วน (Decentralized traction system) รูปแบบนี้ตัวขบวนรถไฟฟ้าจะจัดโครงสร้างมาเป็นเซตมีการติดตั้งห้องควบคุม หรือห้องคนขับที่ปลายทั้งสองด้าน ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์จะถูกติดตั้งกระจายไปตามส่วนต่าง ๆ ไม่รวมกันอยู่ที่ด้านหน้า หรือส่วนใดส่วนหนึ่งเหมือนรูปแบบ Locomotive ซึ่งจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า ใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 – 2003 รถไฟฟ้ารุ่น Desiro Class 360/1 ให้บริการที่เกรตเตอร์แองเกลีย (Greater Anglia) ประเทศอังกฤษ มีรูปแบบรถไฟฟ้า 4 คันต่อ 1 ขบวน (4 Car train) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างรถไฟฟ้า Desiro Class 360/1

ที่มาของภาพ : https://en.wikipedia.org/wiki/First_Great_Eastern#/media/File:360111_at_Ipswich.jpg

ต่อมาปี ค.ศ. 2004 – 2005 รถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานลอนดอนฮีทโธรว์ (London Heathrow Airport) ประเทศอังกฤษนำรถไฟฟ้ารุ่น Desiro Class 360/2 ให้บริการ รูปแบบรถไฟฟ้า 5 คันต่อ 1 ขบวน (5 Car train) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างรถไฟฟ้า Desiro Class 360/2

ที่มาของภาพ : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/360204_at_Ealing_Broadway.jpg

ปี ค.ศ. 2007 – 2008 รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ใช้รถไฟฟ้ารุ่นเดียวกันกับรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานลอนดอนฮีทโธรว์ Desiro Class 360/2 และยังเป็นรถไฟฟ้าขบวนแรกในประเทศไทยที่ใช้การรับกระแสไฟฟ้าผ่านสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead Power line) โดยมีสาลี่ (Pantograph) เป็น

อุปกรณ์รับพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ขบวนรถ และสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ถึง 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ให้บริการรถไฟฟ้ารุ่น Desiro Class 360/2 มีการจัดรูปแบบขบวนรถไฟฟ้าอยู่ 2 แบบ คือ รถไฟฟ้าด่วน (Express Line) มีแถบคาดสีแดง มีตู้โดยสารทั้งหมด 4 ตู้ต่อขบวน แบ่งเป็นตู้โดยสาร 3 ตู้ สำหรับลำเลียงสัมภาระ 1 ตู้ มีทั้งหมด 4 ขบวน ดังรูปที่ 3.4 และรถไฟฟ้าธรรมดา (City Line) มีแถบคาดสีน้ำเงิน มีตู้โดยสารทั้งหมด 3 ตู้ต่อขบวน มีทั้งหมด 5 ขบวนดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรถไฟฟ้า Express Line

ที่มาของภาพ : <http://www.railpictures.net/images/d1/2/3/0/4230.1324588002.jpg>



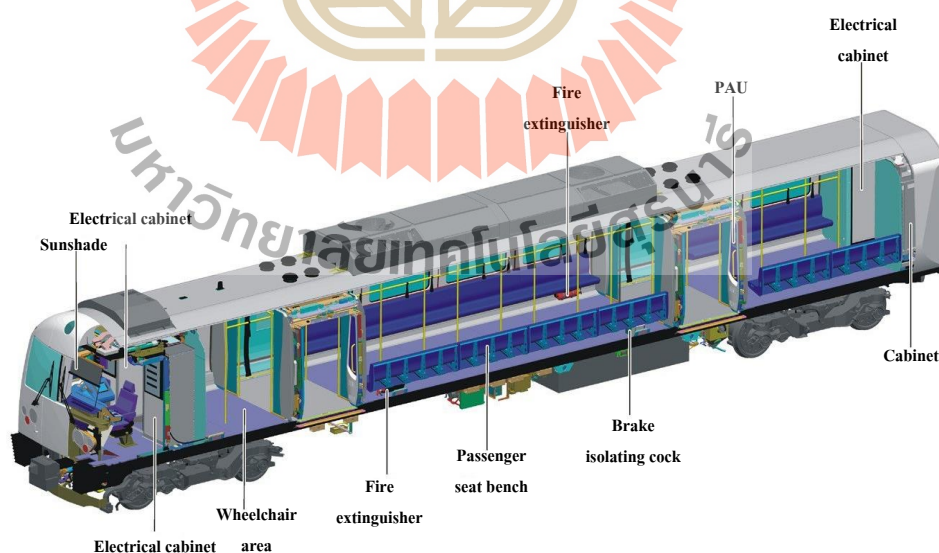
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างรถไฟฟ้า City Line

ที่มาของภาพ : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/ARL_Bangkok_CityLine1.JPG

3.2.2 โครงสร้างระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

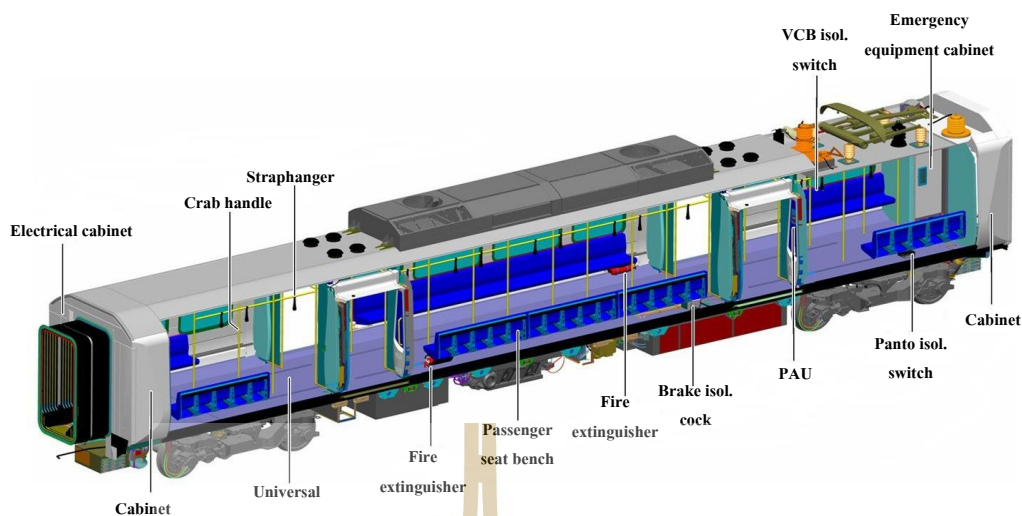
โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบรถไฟฟ้าธรรมดา (City Line) มีตู้โดยสารทั้งหมด 3 ตู้ต่อขบวน (3 Car train) โดยที่ตู้แรกมีการติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนทำหน้าที่ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า มีอุปกรณ์อยู่ในโครงสร้างภายใน เช่น ห้องคนบังคับ ตู้วางระบบไฟฟ้า (Electrical cabinet) พื้นที่ว่างสำหรับรถเข็นผู้พิการ (Wheelchair area) ที่นั่งสำหรับผู้โดยสาร (Passenger seat bench) และมีถังดับเพลิง 2 ถัง (Fire extinguished) โครงสร้างภายในตู้แรกของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบรถไฟฟ้าธรรมดา (City Line) ดังรูปที่ 3.6 (Suvarnabhumi Airport Rail Link, 2010)

ส่วนตู้ที่สอง หรือตู้กลาง ทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบรถไฟฟ้า โดยผ่านแป้นโทกราฟ (pantograph) ในส่วนของแป้นโทกราฟจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.6.1 ระบบจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้า โครงสร้างภายในของตู้กลางจะเป็นตู้ผู้โดยสาร จะไม่มีมอเตอร์ขับเคลื่อน เหมือนส่วนตู้แรก โดยมีอุปกรณ์อยู่ในโครงสร้างภายใน เช่น ตู้วางระบบไฟฟ้า ราวจับ (Crab handle) ที่นั่งสำหรับผู้โดยสาร ตู้เครื่องมือฉุกเฉิน (Emergency equipment cabinet) และถังดับเพลิง เป็นต้น โครงสร้างภายในตู้กลางของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบรถไฟฟ้าธรรมดา (City Line) ดังรูปที่ 3.7 ส่วนในตู้ที่สาม หรือตู้สุดท้ายจะมีลักษณะ และโครงสร้างดังตู้ที่หนึ่ง หรือตู้แรกทั้งหมด คือเป็นตู้ที่มีการติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 โครงสร้างภายในตู้แรกของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบรถไฟฟ้าธรรมดา (City Line)

ที่มาของภาพ : <http://www.srtet.co.th/index.php/th/system-airport-expressline>

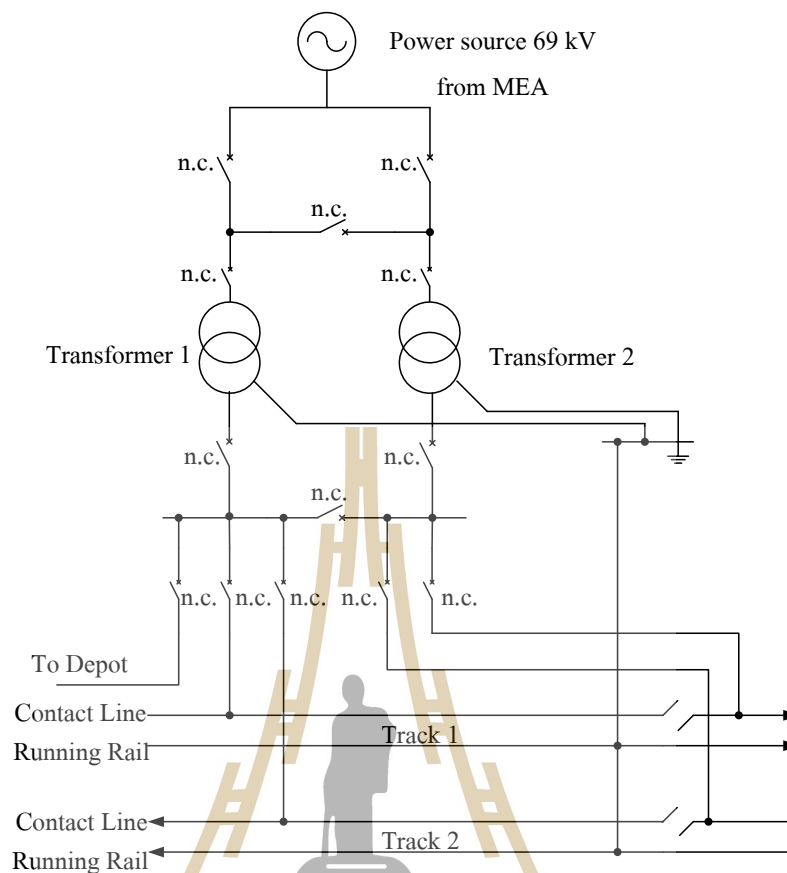


รูปที่ 3.7 โครงสร้างภายในตู้กลางของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบรถไฟฟ้าธรรมดา (City Line)

ที่มาของภาพ : <http://www.srtet.co.th/index.php/th/system-airport-expressline>

3.2.3 ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

สำหรับรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสามเฟสเหนือศีรษะ 25 kV ปัจจุบันมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส (Cyclic winding connection model) สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับนับว่าเป็นปัจจัยหลักในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟฟ้า ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ คือ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ และในอนาคตการรถไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (รฟท.) จะมีการขยายเส้นทางรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิถึงท่าอากาศยานดอนเมือง ดังนั้นสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับจะมีการรับไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสมากขึ้น ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัด 20 MVA อยู่สองตัว ดังรูปที่ 3.8 ทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 69 kV เป็น 27.5 kV ตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนจะอยู่ที่ระยะทาง 8.078 km นับจากสถานีพญาไท อยู่ใกล้กับสถานีรามคำแหง (Suvarnabhumi Airport Rail Link, 2010)



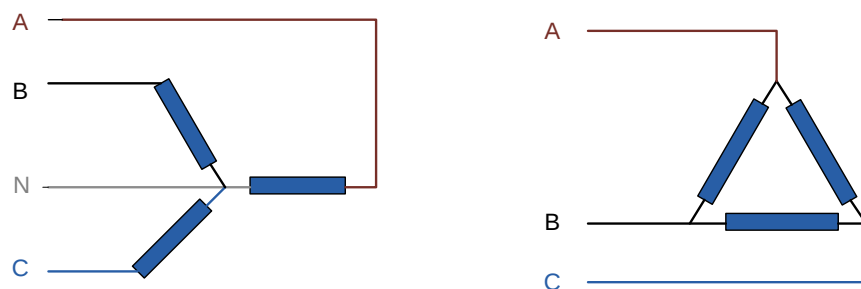
รูปที่ 3.8 แผนผังระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

3.3 ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Voltage Unbalance Factor)

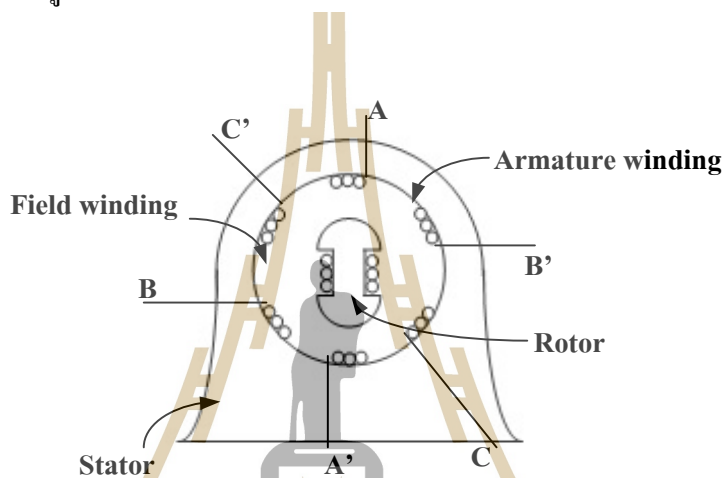
3.3.1 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่สร้างแรงดันไฟฟ้าคลื่น sine จำนวน 3 เฟส ซึ่งมีขนาดเท่ากันทุกเฟส แต่มีมุมเฟสต่างกันเฟสละ 120° และระบบไฟฟ้า 3 เฟสสามารถผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าได้เป็นปริมาณมากด้วยประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสเดียว ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ยังสามารถส่งจ่ายแรงดัน และกระแสไฟฟ้าได้ทั้งแบบ 3 สาย และ 4 สายขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

การเกิดแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะต้องมีการต่อขดลวดอาร์เมเจอร์ จำนวน 3 ชุดวางตัวอยู่ในสเตเตอร์ทำมุมห่างกัน 120° และขดลวดสนามฝังตัวอยู่ในโรเตอร์ รับไฟกระแสตรง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงใน รูปที่ 3.10 เมื่อโรเตอร์หมุนจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อน (แรงดัน) รูปคลื่นไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งแรงดันทั้ง 3 ทำมุมห่างกัน 120°

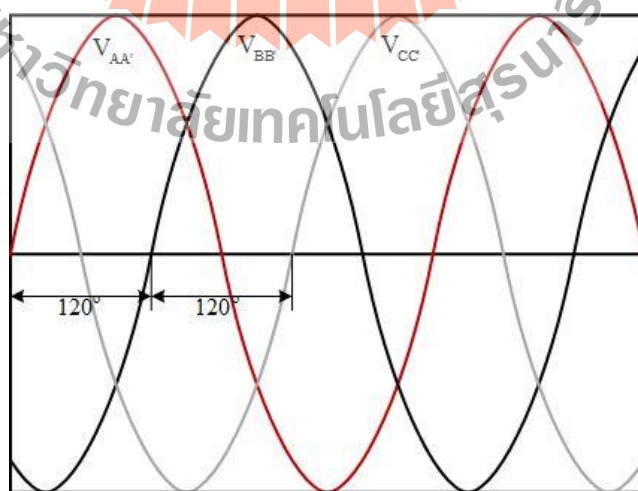


รูปที่ 3.9 การต่อวงจรไฟฟ้า 3 เฟส แบบ 3 สาย และ 4 สาย



รูปที่ 3.10 ภาพตัดขวางเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

ที่มา <http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/courses/429296/old/course/3-phase.pdf>



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

จากรูปที่ 3.11 สามารถเขียนเป็นสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้เป็น

$$V_{AA'} = V_m \sin(\omega t) = V_m \angle 0^\circ \text{ V} \quad (3.1)$$

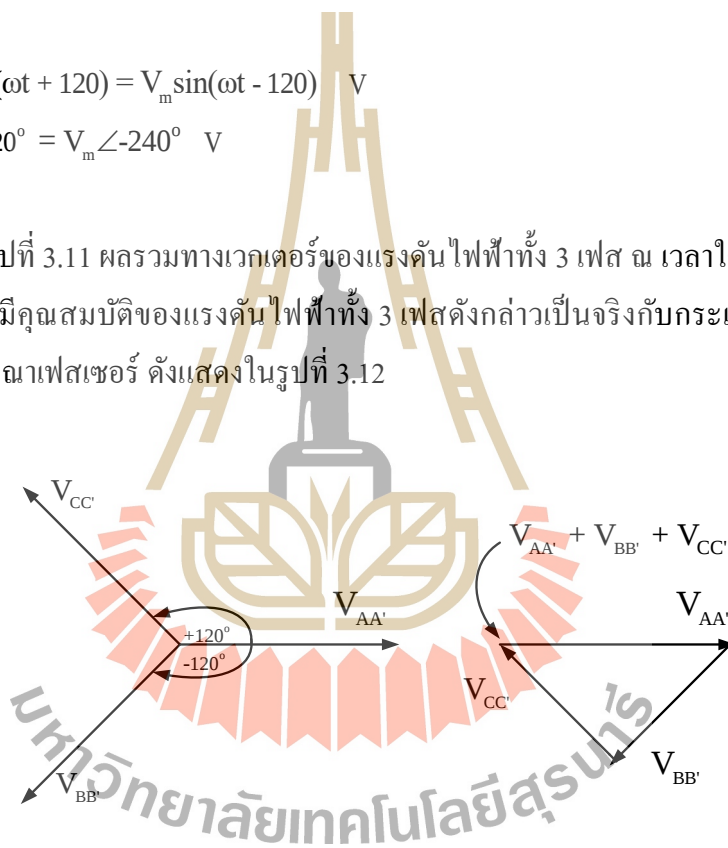
$$V_{BB'} = V_m \sin(\omega t - 120) = V_m \angle -120^\circ \text{ V} \quad (3.2)$$

$$V_{CC'} = V_m \sin(\omega t + 120) = V_m \angle 120^\circ \text{ V} \quad (3.3)$$

เมื่อ $V_m \sin(\omega t + 120) = V_m \sin(\omega t - 120) \text{ V}$

และ $V_m \angle 120^\circ = V_m \angle -240^\circ \text{ V}$

จากรูปที่ 3.11 ผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ณ เวลาใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ ศูนย์เสมอ และมีคุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสดังกล่าวเป็นจริงกับกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส เมื่อพิจารณาเฟสเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

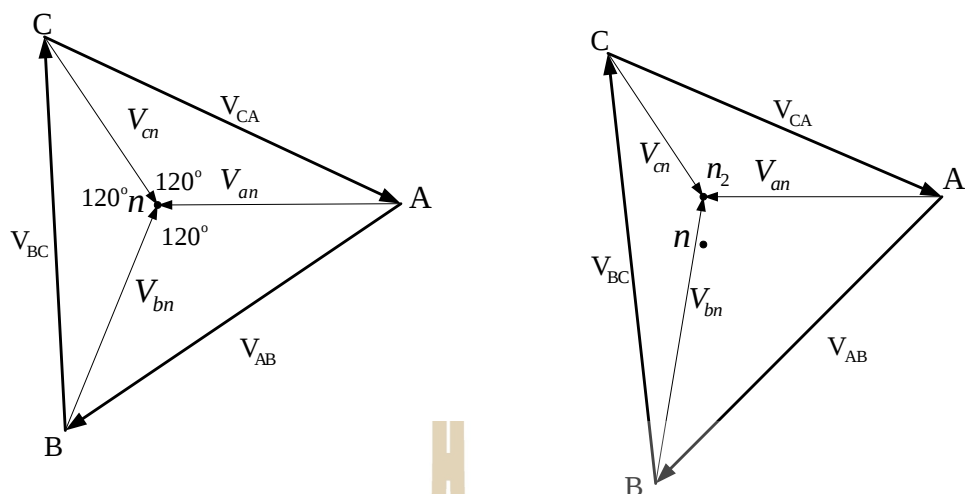
ประโยชน์ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

- 1) ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่โหลดได้คงที่กว่า ระบบไฟฟ้า 1 เฟส
- 2) ใช้ขนาดสายไฟฟ้าน้อยกว่าระบบ 1 เฟส กรณีที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากัน
- 3) สายไฟฟ้าขนาดเล็กกว่า จะมีความสูญเสียในสายไฟน้อยกว่า
- 4) เมื่อใช้จ่ายโหลดมอเตอร์ขนาดใหญ่ไฟฟ้า 3 เฟส จะทำให้ทอร์คคงที่กว่าใช้ระบบไฟฟ้า 1 เฟส

ในหัวข้อที่ 3.3.1 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟสในอุดมคติ หมายถึง มีแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส แต่ในความเป็นจริงการนำระบบไฟฟ้า 3 เฟสไปใช้งาน ผู้ใช้งานที่ทำงานด้านการบำรุงรักษาอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะประสบปัญหาว่า แรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟสภายในโรงงาน มีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสทั้ง 3 เฟส จะพบว่ามีการใช้ไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งมากเกินไป เช่น ภายในโรงงาน หรือสำนักงานส่วนใหญ่ จะใช้โหลดเป็นแบบ 1 เฟส ซึ่งจะประกอบด้วย อุปกรณ์สำนักงาน และเครื่องใช้สำนักงานมากมาย เช่น เครื่องเชื่อม เครื่องตัดเหล็ก คอมพิวเตอร์ เครื่องถ่ายเอกสาร โทรทัศน์ และอื่น ๆ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้ไฟฟ้าผ่านตัวรับ ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าแบบ 1 เฟส และจะมีผลทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างเฟสทั้งแรงดัน และกระแสไฟฟ้าภายในโรงงาน ซึ่งการเกิดความไม่สมดุลดังกล่าว ก็ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของโรงงาน เช่น เกิดการสูญเสียด้านพลังงานไฟฟ้าในสายที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้น สายนิวทรัล มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้น การใช้โหลดประเภทที่ใช้ไฟฟ้าเป็นแบบระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะทำให้จ่ายแรงดัน และกระแสไฟฟ้าน้อยลง เนื่องจากการเกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า ทำให้เฟสใดเฟสหนึ่งจ่ายเต็มพิกัดกว่าเฟสอื่น และทำให้สมรรถนะและอายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.3.2 ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

3.3.2 ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

ในทางอุดมคติแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามเฟส ที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าฯ จะมีขนาด และมุมระหว่างเฟสเท่ากัน เรียกว่า ความสมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.13 ก) แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเทียบกับจุดนิวทรัล (n) มีขนาดเท่ากัน ($|V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}|$) และมุมระหว่างเฟสห่างกัน 120° ($\theta_{ab} = \theta_{bc} = \theta_{ca} = 120^\circ$) ส่งผลทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส มีค่าเท่ากัน ($|V_{AB}| = |V_{BC}| = |V_{CA}|$) ในทางตรงกันข้าม ถ้าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสมีขนาด และมุมระหว่างเฟสไม่เท่ากัน เรียกว่า ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.13 ข) แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเทียบกับ จุดนิวทรัล (n_2) มีขนาดไม่เท่ากัน ($|V_{an}| \neq |V_{bn}| \neq |V_{cn}|$) และมุมระหว่างเฟสไม่เท่ากัน ($\theta_{ab} \neq \theta_{bc} \neq \theta_{ca}$) ส่งผลทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ($|V_{AB}| \neq |V_{BC}| \neq |V_{CA}|$) ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้านี้ สามารถสังเกตได้จากการเคลื่อนย้ายของจุดนิวทรัลจากตำแหน่ง n ไปเป็นตำแหน่ง n_2 ผลเสียของการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเช่นนี้ อาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดสามเฟส เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าชำรุดเสียหายได้ง่าย มีอายุการใช้งานและประสิทธิภาพลดลงเป็นต้น (Mingpruk, 2016)



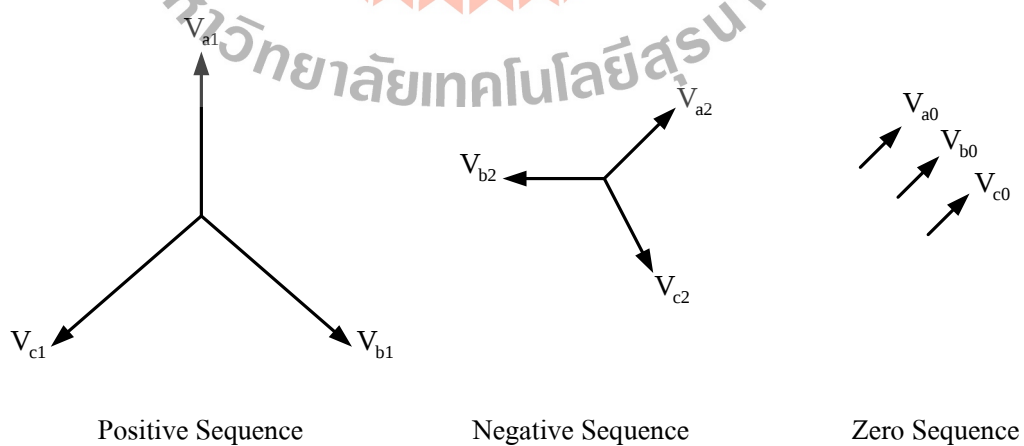
ก) สภาวะสมดุล (Symmetrical)

ข) สภาวะไม่สมดุล (Asymmetrical)

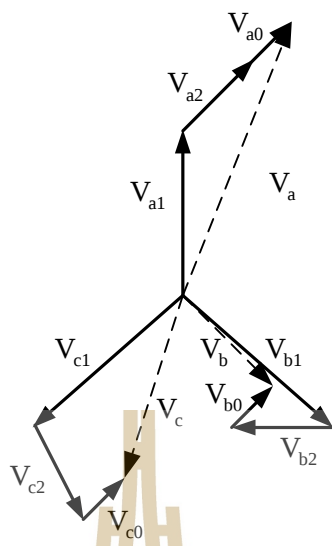
รูปที่ 3.13 เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

3.3.3 ส่วนประกอบสมมาตร

ส่วนประกอบสมมาตร เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในกรณีที่เกิดสภาวะไม่สมดุล โดยใช้การอ้างอิงของส่วนประกอบ 3 ส่วน ในกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.14 นอกจากนี้สามารถหาผลรวมทางเวกเตอร์ของส่วนประกอบสมมาตรที่ไม่สมดุลได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบสมมาตรของระบบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล



รูปที่ 3.15 ผลรวมทางเวกเตอร์ของส่วนประกอบสมมาตรที่ไม่สมดุล

- ส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสบวก (Positive Sequence) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ ที่มีขนาดเท่ากัน และมุมเฟสต่างกัน 120°
- ส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสลบ (Negative Sequence) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ ที่มีขนาดเท่ากัน และมุมเฟสต่างกัน 120° แต่มีลำดับเฟสตรงข้ามกับส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสบวก
- ส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสศูนย์ (Zero Sequence) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ ที่มีขนาดเท่ากัน และมุมเฟสเท่ากัน

ดังนั้น สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสได้ ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad ; \quad V_a \text{ แทน แรงดันไฟฟ้าเฟส A}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad ; \quad V_b \text{ แทน แรงดันไฟฟ้าเฟส B}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad ; \quad V_c \text{ แทน แรงดันไฟฟ้าเฟส C}$$

ในกรณีที่ต้องการให้ระบบสมดุล ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้าบางตัวต้องมีการปรับจูนโอเปอเรเตอร์เอ (a) เมื่อ a มีค่าเท่ากับ $1 \angle 120^\circ$ ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสใหม่ได้ ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = a^2 V_{b1} + a V_{b2} + V_{b0}$$

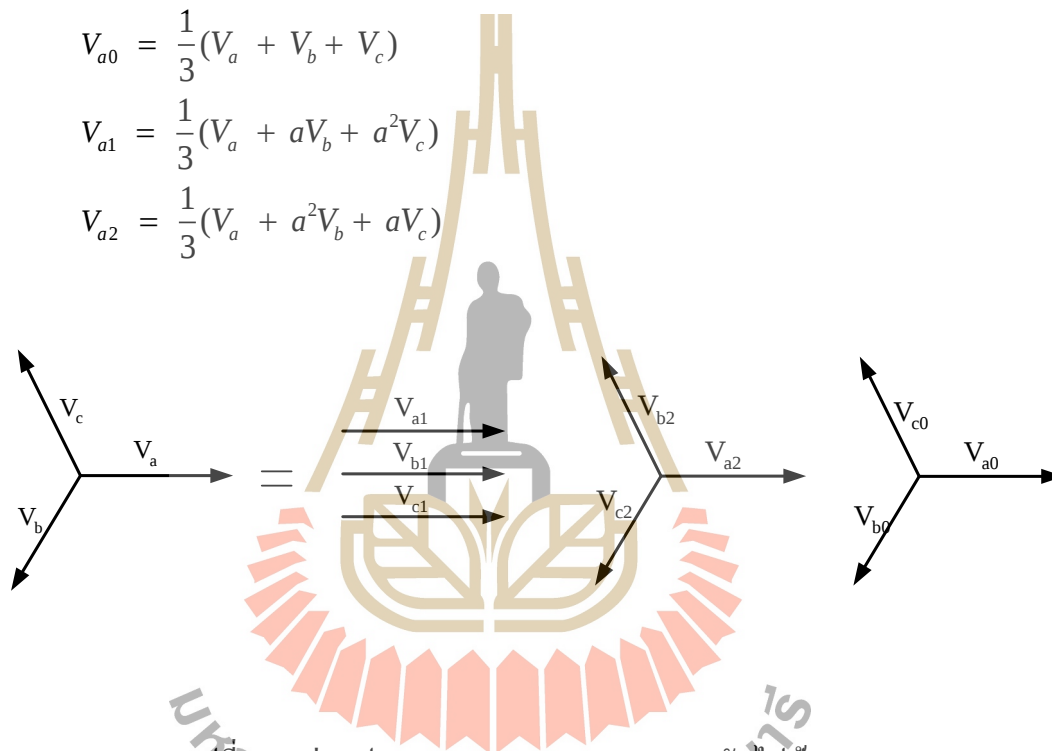
$$V_c = a V_{c1} + a^2 V_{c2} + V_{c0}$$

ดังนั้นสามารถเขียนส่วนประกอบสมมาตรของระบบแรงดันไฟฟ้าสมดุล ดังรูปที่ 3.16 และสมการแรงดันไฟฟ้าส่วนประกอบสมมาตรโดยอ้างอิงที่เฟสเอได้ ดังนี้

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)$$



รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบสมมาตรของระบบแรงดันไฟฟ้าสมดุล

3.3.4 มาตรฐานตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไปการหาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีวิธีการคำนวณ และมาตรฐานในการวัดมากมาย เช่น มาตรฐาน ANSI (American National Standards Institute) มาตรฐาน NEMA (National Electrical Manufacturers Association) และมาตรฐาน IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) โดยมาตรฐานในแถบทวีปอเมริกาส่วนใหญ่ จะใช้การคำนวณหาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า โดยพิจารณาจากค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส เช่น ตามมาตรฐาน ANSI และ NEMA มักจะใช้ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสในการหาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า การหาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

ระหว่างเฟส คือ การหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างเฟส (RMS Line - Voltage) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$\%VUF = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{3 - 6\beta})}{(1 + \sqrt{3 - 6\beta})}} \times 100\% \quad (3.4)$$

โดยที่ $\beta = \frac{(V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4)}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2}$

เมื่อ $\%VUF$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า
 V_{AB} V_{BC} และ V_{CA} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส

และการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Voltage Deviation) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$\%VUF = \text{Max}(|\delta_k|), k = A, B, C \quad (3.5)$$

โดยที่ $\delta_A = \frac{V_{AB} - V_{avg}}{V_{avg}}, \delta_B = \frac{V_{BC} - V_{avg}}{V_{avg}}, \delta_C = \frac{V_{CA} - V_{avg}}{V_{avg}}$
 $V_{avg} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$

เมื่อ V_{avg} คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟส (V)

ในกลุ่มประเทศแถบทวีปยุโรป และมาตรฐาน IEEE ยังนิยมใช้ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) เป็นตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการหาดังกล่าวด้วยวิธีนี้ จะต้องใช้เครื่องมือวัดชนิดพิเศษ ซึ่งในปัจจุบัน การไฟฟ้าในประเทศไทย ก็ใช้วิธีการแบบส่วนประกอบสมมาตรในการหาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า มาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 เป็นมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า กล่าวถึงความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามเฟส คือ อัตราส่วนของส่วนประกอบ

สมมาตรลำดับเฟสลบ (Negative Sequence Voltage) กับส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสบวก (Positive Sequence Voltage) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ (3.6) คำนิยามนี้ สามารถนำมาใช้หาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลไฟฟ้าได้ ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ในมาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าต้องมีค่าไม่เกิน 2% โดยพิจารณาที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (IEEE, 2009)

$$\%VUF = \left| \frac{V_{neg}}{V_{pos}} \right| \times 100\% \quad (3.6)$$

เมื่อ V_{pos} คือ แรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสบวก
 V_{neg} คือ แรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสลบ

และนอกจากวิธีหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าที่กล่าวข้างต้น ยังมีอีกหนึ่ง วิธีที่สามารถประมาณค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า คือ การคาดการณ์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Prediction of the voltage unbalance) ตามสมการที่ (3.7)

$$VUF \approx \frac{S_{TR}}{S_{CC}} \quad (3.7)$$

เมื่อ VUF คือ ค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า
 S_{TR} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน
 S_{CC} คือ Short-circuit capacity ของสถานีไฟฟ้าย่อย

ตัวอย่างเช่น พิจารณาข้อมูลเมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเป็น $230\angle 0^\circ$, $237\angle -118^\circ$ และ $240.6\angle 119.6^\circ$ V เฟส AB BC และ CA ตามลำดับ จากวิธีการหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างเฟส จะได้ว่า

$$V_{pos} = \frac{1}{3}(V_{AB} + V_{BC} \times 1\angle 120^\circ + V_{CA} \times 1\angle -120^\circ) = 235.8\angle 0.5^\circ$$

$$V_{neg} = \frac{1}{3}(V_{AB} + V_{BC} \times 1\angle -120^\circ + V_{CA} \times 1\angle 120^\circ) = 6.18\angle -159.4^\circ$$

จะได้เปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$\%VUF = \frac{|6.18|}{|235.8|} \times 100\% = 2.6\%$$

สำหรับการหาค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า แบบการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุด ตามมาตรฐาน ANSI C84.1 – 2006 จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง เท่ากับ 235.9 V และค่าแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดจากแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 230 V เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$\%VUF (ANSI) = \left| \frac{235.9 - 230}{235.7} \right| \times 100\% = 2.5\%$$

ต่อมาจะใช้วิธีการหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างเฟส จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$\beta = \frac{(240^4 + 237^4 + 240.6^4)}{(230^2 + 237^2 + 240.6^2)^2} = 0.3338$$

$$\%VUF = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{3(6)(0.3338)})}{(1 + \sqrt{3(6)(0.3338)})}} \times 100\% = 2.6\%$$

จะเห็นว่า วิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าแบบ ส่วนประกอบสมมาตร และวิธีการหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างเฟสมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างเฟส สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าได้แม่นยำเช่นกัน

ในมาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 ได้กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลไม่ควรเกิน 2% โดยการวัดที่แหล่งจ่ายปฐมภูมิสามารถดูได้ตาม ตารางที่ 3.1 ประเภทและลักษณะทั่วไปของระบบกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ประเภทและลักษณะทั่วไปของระบบกำลังแม่เหล็กไฟฟ้า (IEEE 1159 – 2009)

Categories		Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.	Transients			
1.1	Impulsive			
1.1.1	Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2	Microsecond	1 μ s rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3	Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2	Oscillatory			
1.2.1	Low frequency	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu ²
1.2.2	Medium frequency	5–500 kHz	20 μ s	0–8 pu
1.2.3	High frequency	0.5–5 MHz	5 μ s	0–4 pu
2.	Short-duration root-mean-square (rms) variations			
2.1	Instantaneous			
2.1.1	Sag		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.2	Swell		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.2	Momentary			
2.2.1	Interruption		0.5 cycles – 3 s	< 0.1 pu
2.2.2	Sag		30 cycles – 3 s	0.1–0.9 pu
2.2.3	Swell		30 cycles – 3 s	1.1–1.4 pu
2.3	Temporary			
2.3.1	Interruption		> 3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2	Sag		> 3 s – 1 min	0.1–0.9 pu
2.3.3	Swell		> 3 s – 1 min	1.1–1.2 pu
3.	Long duration rms variations			
3.1	Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2	Undervoltages		> 1 min	0.8–0.9 pu
3.3	Overvoltages		> 1 min	1.1–1.2 pu
3.4	Current overload		> 1 min	
4.	Unbalance			
4.1	Voltage		steady state	0.5–2.0%
4.2	Current		steady state	1.0–3.0%
5.	Waveform distortion			
5.1	DC offset		steady state	0–0.1%
5.2	Harmonics	0–9 kHz	steady state	0–20%
5.3	Interharmonics	0–9 kHz	steady state	0–2%
5.4	Notching		steady state	
5.5	Noise	broadband	steady state	0–1%
6.	Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7%
7.	Power frequency variations		< 10 s	$\pm$ 0.10 Hz

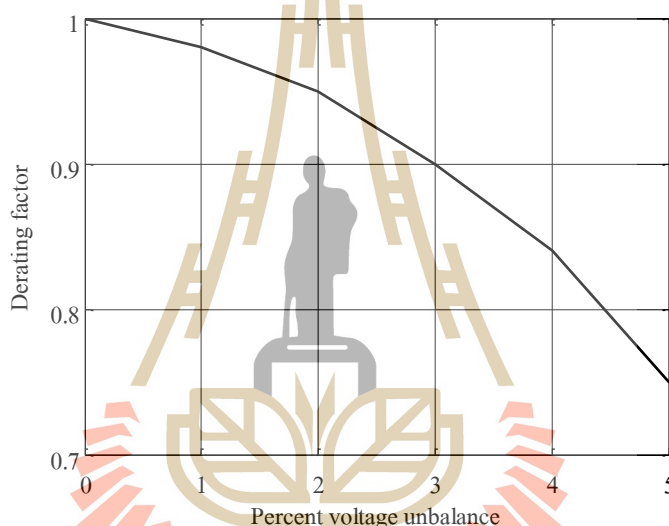
3.3.5 ผลกระทบจากการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไป การไฟฟ้า ๓ เฟส จะกำหนดค่า มาตรฐานค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้า จะต้องไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์หากระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเกิด แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขึ้น จะส่งผลกระทบทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีความร้อนเกิดขึ้นผิดปกติ เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสลบ (Negative Sequence Currents) ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเป็น จำนวนมาก กระแสไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสลบนี้ จะไปสร้างสนามแม่เหล็กต้านกับสนามแม่เหล็ก ที่กำลังทำงาน ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลง ในสถานะที่มอเตอร์ทำงานปกติ ค่าต้านทาน ของมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสลบของระบบไฟฟ้า คือ จะมีค่าความต้านทานต่ำมาก ๆ ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานของมอเตอร์ในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง (Locked Rotor Start Impedance) ดังนั้น แม้ว่าระบบไฟฟ้าจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟส ลบเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่ด้วยค่าความต้านทานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าสมมาตร ลำดับเฟสลบ ทำให้ค่าความต้านทานมีค่าที่ต่ำมาก ๆ เหตุผลนี้จึงทำให้เกิดค่ากระแสไฟฟ้าลำดับเฟส ลบจำนวนมากไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้า จนทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าร้อน หรืออาจเกิดการชำรุดเสียหายลง ได้

ดังนั้น หากนำมอเตอร์ไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ไปใช้ในระบบไฟฟ้าที่มีความไม่สมดุล แรงดันไฟฟ้า ก็จำเป็นต้องพิจารณาถึงความสามารถ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า ควบคู่ไปด้วย ซึ่งตามมาตรฐาน NEMA และ ANSI ได้กำหนดค่าตัวคูณลด (Derating Factor) เพื่อใช้ ในการลดขนาดพิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าลง เมื่อถูกนำไปต่อใช้งานในระบบไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าไม่ สมดุลกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เช่น หากนำมอเตอร์ไฟฟ้าไปใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 1% สามารถใช้มอเตอร์ไฟฟ้าได้ตามพิกัดปกติ แต่ถ้าระบบ ไฟฟ้ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า เพิ่มขึ้น เช่น 3% จะต้องลดขนาดพิกัดของมอเตอร์ ไฟฟ้าลงเหลือประมาณ 90% ของพิกัดปกติ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า เมื่อใช้งานที่ สถานะความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า 3% ขนาดพิกัดกำลังจะลดลงเหลือ 9 แรงม้า ($10 \text{ HP} \times 0.9$) อย่างไรก็ตาม หากแรงดันไม่สมดุลเกินกว่า 5% ไม่แนะนำให้ใช้งานมอเตอร์ในสถานะดังกล่าว เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์เสียหายได้อย่างรวดเร็ว

นอกจากภาระทางไฟฟ้าประเภท มอเตอร์ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาความไม่สมดุล แรงดันไฟฟ้า ยังมีอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ได้รับผลกระทบจากความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ด้วย เช่นกัน เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Loads) และมอเตอร์ปรับความเร็วรอบ ซึ่งอุปกรณ์ ไฟฟ้าเหล่านี้ จะเกิดปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลขึ้น ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้านี้ อาจมีค่ามากพอที่ทำให้

ระบบป้องกันโหลดเกิน (Over Load Protection) เกิดการทำงาน (Trip) ได้เนื่องจากที่ชุดเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifies) ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดปรับความเร็วรอบได้ จะได้รับไฟจากระบบไฟฟ้าระหว่างเฟส เพื่อชาร์ตไฟให้แก่ บัสดีซี (DC Bus) อยู่ตลอดเวลา ดังนั้น หากค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมชุดเรียงกระแสไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดสูงเกินกว่าแรงดันไฟฟ้าเฟสอื่นที่เหลือ ก็จะส่งผลทำให้ชุดเรียงกระแสไฟฟ้าเฟสนั้นนำค่ากระแสมากกว่าเฟสอื่นที่เหลือ ซึ่งมีผลทำให้อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าเกิดการ ทำงานที่ผิดพลาดได้เช่นกัน ดังนั้น ค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า เพียงแค่ 3% อาจมีผลทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดปรับความเร็วรอบได้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดได้ และนอกจากนี้ผลของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ยังทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ได้อีกด้วย



รูปที่ 3.17 สมรรถนะของมอเตอร์ลดลงเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ที่มา : NEMA MG-1 - 1998

3.3.6 สาเหตุของการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และวิธีการลด

โดยทั่วไปสาเหตุหลักของการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า จะเกิดจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ไม่สมดุลตั้งแต่ 15 - 20% ขึ้นไป ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ยังใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวต่อรวมอยู่ในวงจรเดียวกัน เช่น อุปกรณ์สำนักงานต่าง ๆ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว และถ้าหากขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวมีขนาดใหญ่ ก็จะทำให้ดึงกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ไม่เท่ากันในปริมาณที่มากด้วยเช่นกัน ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในสายนิวทรัล นอกจากนั้นหากมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเฟสเดียวที่เป็นแหล่งจ่ายกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์รวมอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก เช่น

เครื่องถ่ายเอกสาร หลอดไฟที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์บาราส์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 (ความถี่ 150 Hz) ไหลอยู่ในสายนิวทรัลรวมอยู่ด้วย หรือในบางครั้งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายนิวทรัลนั้น ก็อาจมีค่าสูงกว่า หรือใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟฟ้าในสายเฟสเลยก็ได้ และในที่สุดก็จะทำให้เกิดปัญหา ดังนี้

- 1) เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบไฟฟ้า
- 2) เกิดแรงดันไฟฟ้าตกมากขึ้นในกรณีการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดแบบเฟสเดียว
- 3) เกิดอันตรายจากกระแสไฟฟ้าดูด เมื่อไปสัมผัสกับสายนิวทรัล เนื่องจากสายนิวทรัลมีแรงดันไฟฟ้าตกอยู่
- 4) อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน (Ground Over Current Relay) ทำงานผิดพลาดได้ (หากตั้งค่าไม่เหมาะสม)
- 5) ทำให้พิกัดของระบบไฟฟ้ามีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังระบบพิกัดขนาด 1000 kVA พิกัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสเท่ากับ 1500 A แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานในแต่ละเฟสมีค่า 1480 1300 และ 1270 (เฟส A B และ C ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่าค่ากระแสในเฟส B และ C ยังไม่เต็มพิกัดสามารถจ่ายไฟเพิ่มได้อีก แต่ในขณะที่เฟส A มีค่าใกล้พิกัด จึงไม่สามารถเพิ่มโหลดชนิด 3 เฟสได้อีก

วิธีการลดผลกระทบเนื่องจากความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

- 1) ควรจัดการกับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวให้สมดุลกันทั้ง 3 เฟส
- 2) พิจารณาเปลี่ยนโหลดไฟฟ้าแบบเฟสเดียวที่มีขนาดใหญ่ อาจพิจารณาเปลี่ยนเป็นโหลดชนิด 3 เฟส
- 3) หมั่นตรวจสอบจุดต่อสายไฟฟ้าต่าง ๆ (Connectors)
- 4) ตรวจสอบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulators) แบบแยกเฟส และกำหนดค่าการทำงานให้เหมาะสม
- 5) คัดเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสามารถทนต่อปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้สูงขึ้น เช่น มาตรฐาน IEC 61000 – 2 – 4 ได้กำหนดจัดหมวดหมู่ (Class) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความทนต่อปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่แตกต่างกัน
- 6) พิจารณาค่าตัวคูณลด (Derating Factor) ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า
- 7) ควรเลือกชนิดการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่เหมาะสม

3.4 หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศอย่างยิ่งทั้ง ในด้าน เศรษฐกิจ และสังคม นอกจากนี้การที่มีระบบขนส่งมวลชนที่ดี มีรูปแบบการเดินทางที่หลากหลาย และสะดวกสบาย ยังมีส่วนช่วยในการตัดสินใจในการเดินทางมาท่องเที่ยวยังประเทศไทยของ นักท่องเที่ยวชาวต่างชาติอีกด้วย ซึ่งส่งผลให้อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวของประเทศไทยเติบโตมากขึ้น และในปัจจุบันการขนส่งมวลชนทางบกนับว่าเป็นรูปแบบการขนส่งมวลชนที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยเฉพาะระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยให้ความสำคัญกับการลงทุนที่จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนการขนส่ง

สำหรับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับนับว่าเป็นปัจจัยหลักในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า ให้กับระบบรถไฟฟ้า ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ คือ ความไม่ สมดุลแรงดันไฟฟ้า และแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ เนื่องจากระบบรถไฟฟ้า แอร์พอร์ตเรลลิงก์ใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ดังนั้น สถานีไฟฟ้า ขับเคลื่อนกระแสสลับจำเป็นต้องรับไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งระบบไฟฟ้าสามเฟสถ้าไม่มีการจัดการใช้งานที่ดี และการเลือกชนิดการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่เหมาะสม อาจจะทำให้เกิดผลเสียแก่ ระบบรถไฟฟ้า และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับได้ ดังนั้น หม้อแปลงสถานี ไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับมีความจำเป็นในการศึกษา ซึ่งในบทหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับนี้มีเนื้อหาหลักประกอบได้ด้วย หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) และการเชื่อมต่อหม้อ แปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

3.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากระดับแรงดัน หนึ่งเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับอีกระดับแรงดันหนึ่งโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า หม้อ แปลงส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยขดลวด (Coils) มากกว่า 2 ขดขึ้นไปพันรอบแกนแม่เหล็ก (Ferromagnetic Core) ขดลวดเหล่านี้ไม่ได้เชื่อมต่อกันโดยตรง แต่ถูกเชื่อมด้วยฟลักซ์แม่เหล็กที่ ไหลในแกนแม่เหล็กแทน ขดลวดกลุ่มหนึ่งจะถูกเชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) ส่วนขดลวดอีกกลุ่มหนึ่งจะส่งจ่ายพลังงานไปให้กับ อุปกรณ์ เรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ถ้ามีขดลวดกลุ่มที่ 3 จะเรียกว่าตติยภูมิ (Tertiary Winding) หม้อแปลงที่สามารถใช้งานได้เครื่องแรกสร้างขึ้นโดยนักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ชื่อ William Stanley เมื่อปี 2428 มีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยเริ่มต้นจากระบบสายส่งแห่ง

แรกของโลกลงทุนโดย Thomas A. Edison ในเมือง New York เมื่อปี 2423 แต่ประสบปัญหาเรื่องแรงดันตก และความสูญเสียในระบบสายส่ง เนื่องจากใช้แรงดัน 120 V เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปได้ไกล ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าช่วยในการเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น จึงสามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปยังที่ห่างไกลออกไปได้ ในปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำเนิดแรงดันในช่วง 12 ถึง 25 kV ถูกเพิ่มแรงดันขึ้นระหว่าง 110 kV ถึง 1000 kV ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนที่จะลดแรงดันอีกครั้งกลับเป็น 12 ถึง 25 kV สำหรับผู้ใช้ไม่ว่าจะเป็นที่พักอยู่อาศัย สถานประกอบการ และโรงงาน ระบบไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยมีขนาดตั้งแต่ 12 kV 33 kV 69 kV 115 kV 230 kV และ 500 kV โดยอยู่ในความควบคุมดูแลของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)



รูปที่ 3.18 หม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้เครื่องแรก

ที่มาของภาพ : http://sites.ieee.org/ny-monitor/files/2011/04/4_PDF_MEL4.pdf

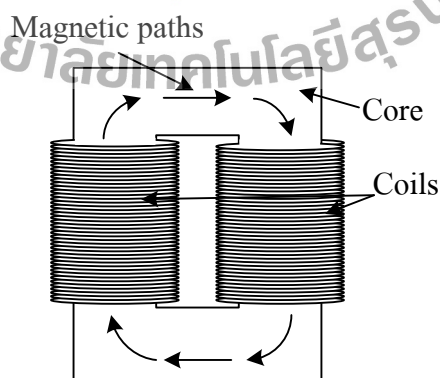
สำหรับประเภท และ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ แกนเหล็ก ขดลวดคาน้ำ และฉนวน อาจจะมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของหม้อแปลง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีถังบรรจุหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลง ระบายความร้อน ขั้วแรงดันด้านสูง ขั้วแรงดันด้านต่ำ และอื่น ๆ เป็นต้น

1) แกนหลัก (Core): มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ เคลือบด้วยฉนวนนำมาอัดซ้อนกันเป็นรูปแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก แกนเหล็กที่ดีต้องเป็นเหล็กอ่อนมีส่วนผสมของสารซิลิกอน มีความซึมซับได้ (Permeability) สูง การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) ต่ำ มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำสูง เป็นเหล็กประเภทเกรนโอเรียนเตด (Grain oriented steel) ฉนวนที่นำมาฉาบแผ่นเหล็กทั้งสองด้านมีความเป็นฉนวนตามผิวสูง เพื่อป้องกันการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ซึ่งจะเป็นสารจำพวกวานิช (Vanish)

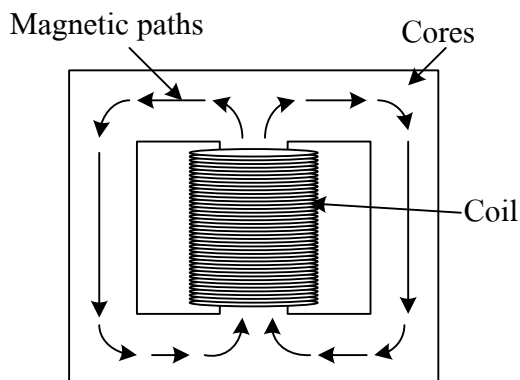
2) ขดลวด (Winding): ขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะเป็นขดลวดทองแดง หรือ ขดลวดอลูมิเนียมที่หุ้มหรือเคลือบด้วยฉนวน อาจจะเป็นได้ทั้งลวดแบนที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือลวดกลมก็ได้ หม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) โดยขดลวดปฐมภูมิจะเป็นชุดที่รับไฟเข้า ส่วนขดลวดทุติยภูมิเป็นชุดที่จ่ายไฟออกไปใช้งาน

3) ฉนวน (Insulation): ฉนวนมีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็ก และป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นสัมผัสกันได้ (Short Turn) หากต้องการให้ฉนวนมีคุณภาพดี และทนความร้อนได้มากจะต้องเคลือบด้วยไวนิลเฟล็กซ์ (Viniflex) หรือพันทับด้วยไหมแคปรอน (Caprone) เทเรไลน์ (Teleline) หรือฟ้าย ส่วนตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจะต้องพันทับด้วยฉนวนไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) สำหรับฉนวนที่คั่นระหว่างชั้นของขดลวดส่วนมากจะเป็นกระดาษเคลือบ และจำนวนชั้นของกระดาษจะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า

นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้ายังสามารถแบ่งประเภทได้ตามชนิดรูปร่างของแกนแม่เหล็กซึ่งทำจากแผ่นแม่เหล็กหลาย ๆ ชั้น (Laminated Sheets) เพื่อลดกระแสไหลวนได้เป็น 2 ประเภท คือ แกนเหล็กแบบคอร์ และแกนเหล็กแบบเชลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 แกนเหล็กแบบคอร์จะมีลักษณะแกนเหล็กทำจากแผ่นเหล็กบางรูปตัว L ประกอบกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม และขดลวดจะพันทั้งสองด้านของแกนเหล็ก และแกนเหล็กแบบเชลล์ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางแบบ Three - Legged Laminated Sheets หรือแกนเหล็กแบบ E - I แล้วขดลวดพันรอบ Center Leg



ก) แกนเหล็กแบบคอร์ (Core Type)



ข) แกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell Type)

รูปที่ 3.19 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า

ที่มา <http://2.bp.blogspot.com/-gXaKYi3Kxjw/U9qXq5MIDQI/AAAAAAAAABUg/dkEzuo9W-mU/s1600/Core+and+Shell+type+transformer>

ข้อแตกต่างระหว่างแกนเหล็กแบบคอร์ และแกนเหล็กแบบเชลล์ คือ

- 1) แกนเหล็กแบบคอร์: สามารถออกแบบให้มีฉนวนระหว่างขดลวดได้มากกว่า แกนเหล็กแบบเชลล์ และง่ายต่อการซ่อมแซม
- 2) แกนเหล็กแบบเชลล์: มีแกนแม่เหล็กห่อหุ้มด้านนอกทำให้ปกป้องขดลวดได้มากกว่า แกนเหล็กแบบคอร์
- 3) แกนเหล็กแบบคอร์: เหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง ส่วนแกนเหล็กแบบเชลล์ เหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำเนื่องจากแบบแกนเหล็กแบบคอร์สามารถพันขดลวดแรงดันสูงที่ขดลวดแรงดันต่ำ แรงดันสูงอยู่ด้านนอก และแรงดันต่ำไว้ด้านในการพันลักษณะนี้มีประโยชน์ 2 ประการคือ สามารถเพื่อกันผลการรบกวนของแรงดันสูงจากแกนแม่เหล็กได้ และมีฟลักซ์รั่วไหลน้อยกว่า

และนอกจากนี้ หม้อแปลงยังสามารถแบ่งประเภทได้ตามลักษณะการใช้งานได้ด้วย ได้แก่ หม้อแปลงที่ใช้ปรับแรงดันเพิ่มจากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (Unit transformers หรือ Generator Transformers) หม้อแปลงที่ใช้ปรับแรงดันลงสำหรับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation transformers หรือ Tie Transformers) และหม้อแปลงที่ปรับแรงดันให้เหมาะสมกับผู้ใช้งาน (Distribution Transformers) นอกจากนี้ยังเรียกหม้อแปลงได้ตามลักษณะการปรับระดับ

แรงดัน ได้แก่ หม้อแปลงที่ปรับระดับแรงดันขึ้น (Step-up transformers) และหม้อแปลงที่ปรับระดับแรงดันลง (Step-down transformers)

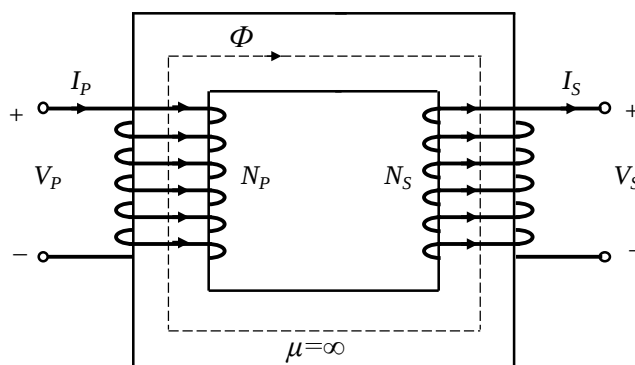
หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal Transformer) คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่เกิดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปรับแรงดัน ดังนั้นการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเริ่มต้นจะวิเคราะห์ให้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติทั้งหมด ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติไม่มีกำลังสูญเสียในขดลวด และในแกนเหล็ก
- 2) ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดไหลภายในแท่งแม่เหล็กไม่เกิดฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Fluxes)
- 3) แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติไม่มีการอิ่มตัว และความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นค่าอนันต์
- 4) ความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติเป็นศูนย์

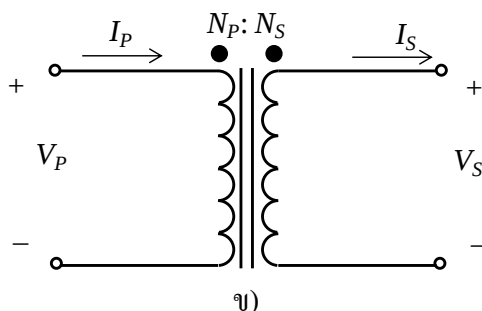
หม้อแปลงในอุดมคติมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเข้า และแรงดันออกดังแสดงในสมการ (3.8) - (3.9) โดยที่ตัวแปรต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.20 และตัวแปร a เรียกว่า อัตราส่วนของหม้อแปลง

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3.8)$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (3.9)$$



ก)



รูปที่ 3.20 ก) แบบร่างของหม้อแปลงในอุดมคติ และ ข) สัญลักษณ์

โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยยังสามารถ แบ่งเป็นลักษณะการทำงานได้ออกเป็น 2 แบบ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (Single Phase Transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส (Three Phase Transformer)

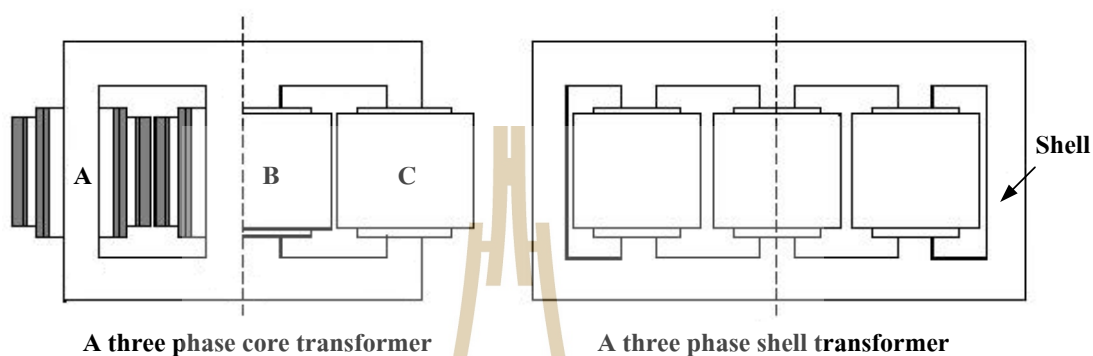
1) หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว: เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส มีขนาดโหลดปฐมภูมิ และทุติยภูมิอย่างละหนึ่งชุด ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 หม้อแปลงเฟสเดียว

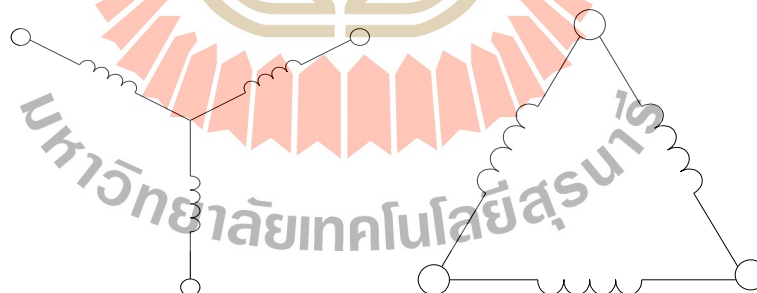
2) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส: เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีขนาดโหลดปฐมภูมิ และขนาดโหลดทุติยภูมิอย่างละ 3 ชุด หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสใช้งานในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า โดยแหล่งจ่ายที่ต่อเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายชนิด 3 เฟส ซึ่งระบบ 3 เฟสเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสายส่ง ระบบจำหน่าย และงานอุตสาหกรรม หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส มี

ลักษณะเป็นชุดขดลวดของหม้อแปลง 1 เฟส จำนวน 3 ชุด อยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน แสดงในรูปที่ 3.22 สามารถใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสมาต่อขนานกัน 3 ชุด เพื่อทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสได้ ซึ่งในกรณีนี้การขยาย หรือลดขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำได้สะดวกกว่า กรณีเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสทั้งโครงสร้าง



รูปที่ 3.22 ลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

โดยที่มีลักษณะรูปแบบการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะมี 2 ลักษณะ แสดงในรูปที่ 3.23



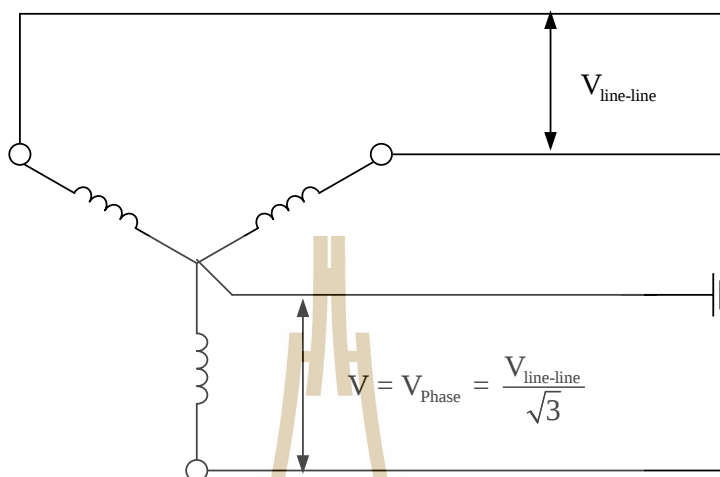
ก) วาย

ข) เดลตา

รูปที่ 3.23 ลักษณะการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

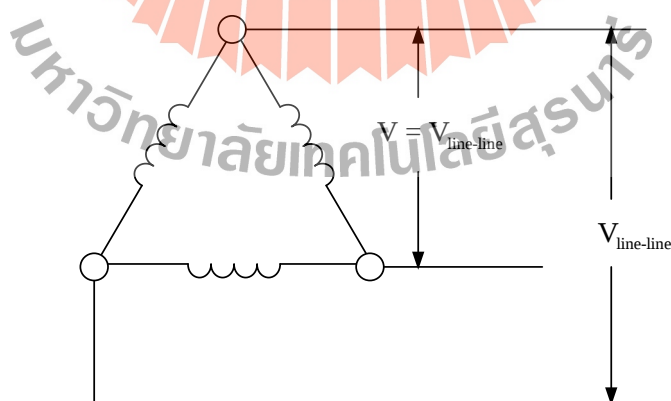
- 1) การต่อขดลวดแบบวาย (Wye): การต่อขดลวดแบบวายจะมีแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวด 2 เส้น (V_{phase}) มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าจากระบบ 3 เฟส ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมแต่ละขดลวด

กับสายนิวทรัล (V_{phase}) จะมีขนาดเป็นเศษหนึ่งส่วนรากที่สองของสาม ($1/\sqrt{3}$) ของแรงดันระหว่างขดลวด 2 เส้น สามารถแสดงขนาดแรงดันในการต่อขดลวดแบบวาย ได้ดังรูปที่ 3.24



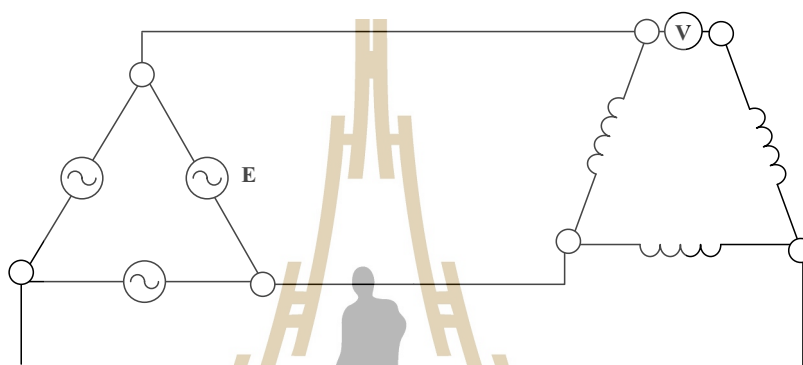
รูปที่ 3.24 แรงดันไฟฟ้าในการต่อขดลวดแบบวาย

2) การต่อขดลวดแบบเดลตา: การต่อขดลวดแบบเดลตาจะมีแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมขดลวดแต่ละขด จะมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย 2 เส้นจากระบบสามเฟส สามารถแสดงขนาดแรงดันในการต่อขดลวดแบบเดลตาได้ดังรูปที่ 3.25



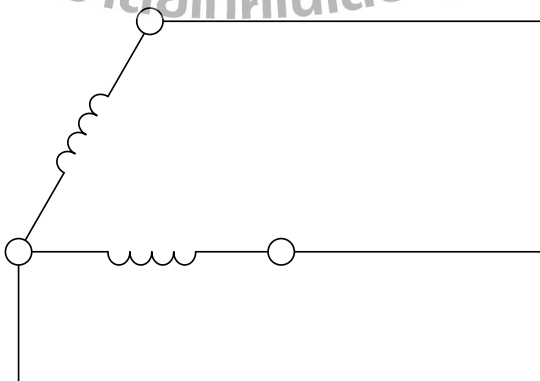
รูปที่ 3.25 แรงดันไฟฟ้าในการต่อขดลวดแบบเดลตา

ในการต่อแบบเดลตานี้ จะต้องทำการตรวจสอบขั้วของขดลวดแต่ละเฟสก่อนการใช้งาน เพราะถ้าวัดขั้วเฟสใดเฟสหนึ่งไม่ถูกต้อง จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก เมื่อมีการใช้งาน ซึ่งจำเป็นที่ต้องตรวจสอบ การตรวจสอบสามารถทำได้โดยการเปิดวงจรที่จุดใดจุดหนึ่ง แล้วใช้ โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันที่จุดนั้น เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาจากแหล่งจ่าย ถ้าขั้วถูกต้อง โวลต์ มิเตอร์จะต้องวัดได้ค่า 0 แต่ถ้าขั้วของขดลวดไม่ถูกต้อง จะวัดแรงดันไฟฟ้าได้เป็นสองเท่าของ แรงดันแหล่งจ่าย วิธีการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การตรวจสอบการต่อขดลวดแบบเดลตา

ต่อมา มีการดัดแปลงการต่อขดลวดแบบเดลตา เป็นแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน มีลักษณะการต่อ เหมือนการต่อขดลวดแบบเดลตา (Open Delta) แต่จะไม่ต่อขดลวด 1 ขดในการต่อ แสดงการต่อใน รูปที่ 3.27 ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีความจุกำลังไฟฟ้าลดลง ทำให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ได้น้อยกว่าการต่อแบบเดลตา แต่ค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้าจะเหมือนกัน



รูปที่ 3.27 การต่อขดลวดแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน

ในการใช้งานจริงสามารถต่อขดลวด 3 เฟส ด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส และการใช้งาน

	ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ	ลักษณะงานที่ใช้
1.	เดลตา	เดลตา	ใช้ในงานอุตสาหกรรม
2.	เดลตา	วาย	ใช้งานทั่วไป และงานอุตสาหกรรม
3.	วาย	เดลตา	ใช้ในระบบสายส่งแรงสูง
4.	วาย	วาย	ไม่ค่อยมีใช้ เนื่องจากมีปัญหาทางฮาร์มอนิกส์ และทำระบบให้สมดุลยาก

นอกจากนี้ ยังมีมาตรฐาน และรหัส (Code) สำหรับการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส เพื่อใช้ในผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส โดยแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

รหัส	Connection	สัญลักษณ์		การเชื่อมต่อ	
		ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ	ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				

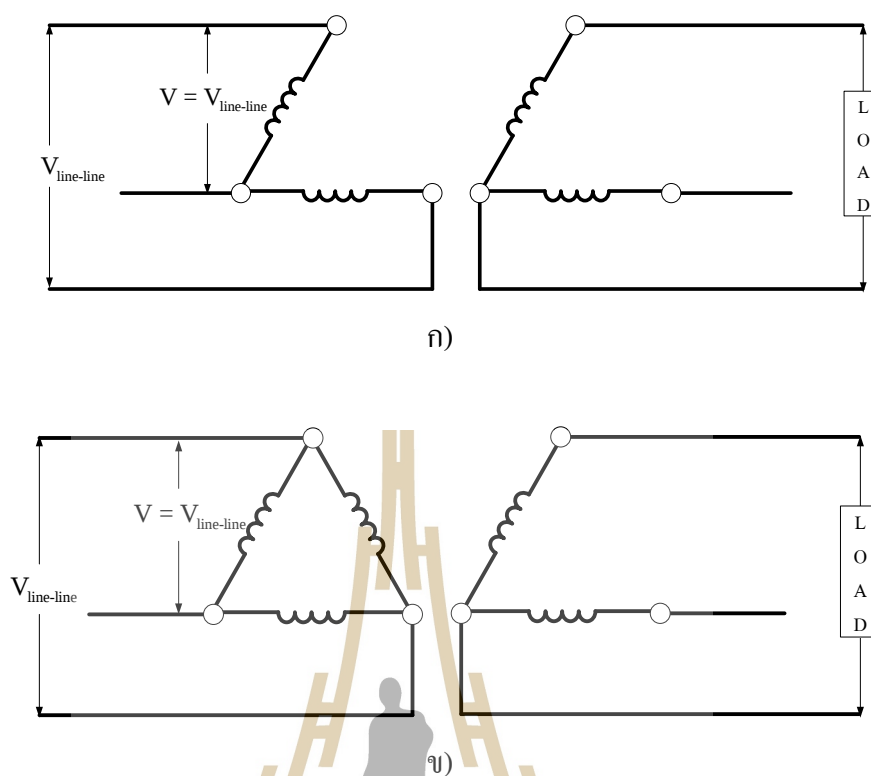
ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส (ต่อ)

6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

นอกจากนี้ ยังมีการต่อหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตาเปิด 1 ด้าน และแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน – เดลตาเปิด 1 ด้าน ซึ่งส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่ากรณี เดลตา – เดลตา ทำให้เหมาะในการใช้สำหรับระบบที่มีการจ่ายโหลดไฟฟ้าลดลง เช่น โหลดในระบบมีปริมาณลดลง อันเนื่องจากการถอดอุปกรณ์ไฟฟ้าบางตัว การใช้หม้อแปลงขนาดเท่าเดิม จะส่งผลในเรื่องกำลังสูญเสียที่มากเกินไป ก็อาจลดขนาดหม้อแปลงโดยต่อแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน ก็จะลดในเรื่องกำลังสูญเสียที่ขดลวดได้ ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านได้ของการต่อหม้อแปลงแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน แสดงในตารางที่ 3.4 และการต่อขดลวดแสดงในรูปที่ 3.28

ตารางที่ 3.4 กำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน

ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ	กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านได้
เดลตาเปิด 1 ด้าน	เดลตาเปิด 1 ด้าน	87 % ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ชุดที่นำมาต่อ
เดลตา	เดลตาเปิด 1 ด้าน	58 % ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า 3 ชุดที่นำมาต่อ



รูปที่ 3.28 ชนิดหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบเดลตาเปิด 1 ด้าน

ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสต่อแบบ เดลตาเปิด 1 ด้าน – เดลตาเปิด 1 ด้าน โดยหม้อแปลง 1 เฟสที่นำมาต่อมีขนาดตัวละ 25 kVA จงหาขนาดกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงตัวนี้สามารถส่งผ่านได้

วิธีทำ หม้อแปลงต่อแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสจำนวน 2 ตัวต่อกัน โดยต่อการต่อเป็นแบบในรูปที่ 3.28 ก) จะได้พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้ง 2 ชุดที่นำมาต่อเป็น

$$25 \text{ kVA} \times 2 = 50 \text{ kVA}$$

จากตารางที่ 3.4 เพราะฉะนั้นจะสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เป็น

$$50 \text{ kVA} \times 0.87 = 43.5 \text{ kVA}$$

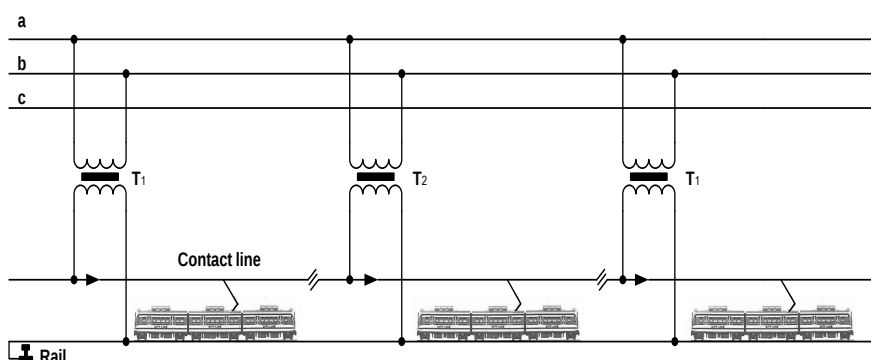
จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นได้ว่า ชนิดการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการเชื่อมต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละแบบมีความสำคัญแตกต่างกันขึ้นอยู่กับงานของแต่ละหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ศึกษาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัด เพื่อแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากโหลดที่เป็นระบบขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.4.2 ต่อไป

3.4.2 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัด

ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัด คือ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับระบบรางรถไฟฟ้าเพื่อลดปัญหาของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัด เช่น ค่าจำกัดแรงดันมีค่าน้อย (ไม่เกิน 3000 V) การเกิดแรงดันตกมาก และค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 เริ่มมีการนำมอเตอร์กระแสสลับเข้ามาใช้ในระบบขับเคลื่อน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัดอีก 7 ชนิด ได้แก่

1) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัดแบบเฟสเดียว (Single-phase connection)

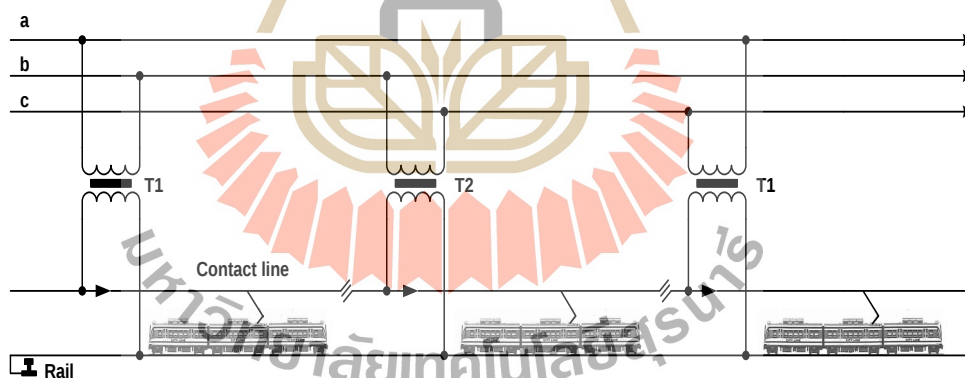
เริ่มต้นจากต้นศตวรรษที่ 20 เริ่มมีการนำมอเตอร์กระแสสลับเข้ามาใช้ในระบบขับเคลื่อนกระแสดลัด บวกกับระยะทางที่ระบบรถไฟฟ้าให้บริการมีระยะทางไกลขึ้นจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นจึงเป็นจุดเริ่มต้นทำให้มีการใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสขึ้นใช้งาน โดยเริ่มต้นจากการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัดแบบเฟสเดียว คือ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่รับไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ๑ หรือโรงไฟฟ้าเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส แต่ใช้แค่สองเฟส เป็นการเชื่อมต่อหม้อแปลงแต่ละชุดที่อยู่ในเฟสเดียวกันเช่น เฟส ab และ ab เป็นต้นดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัดแบบเฟสเดียว

2) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส (Connection by cyclic permutation of phases)

ต่อมาเนื่องจากการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเฟสเดียวมีการใช้งานเฉพาะเฟสสองเฟสแต่อีกเฟสหนึ่งไม่ได้ใช้งานจึงประสบปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมดุลทางแรงดันไฟฟ้าขึ้น และปัญหาดังกล่าวยังก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านแรงดันไฟฟ้าตกอีกด้วย จึงเริ่มมีการใช้ไฟฟ้าระบบสามเฟสให้ครบทุกเฟส ด้วยวิธีการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส มีข้อดีในเรื่องการจัดวางองค์ประกอบที่ง่ายต่อการดำเนินการ หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสรับไฟสองเฟสจากระบบไฟฟ้าสามเฟสทางด้านปฐมภูมิ จากนั้นระบบไฟฟ้าสามเฟสดังกล่าวจะถูกทำให้สมดุลโดยให้หม้อแปลงหนึ่งเฟสของแต่ละสถานีไฟฟ้าดึงไฟฟ้าแต่ละคู่เฟสสลับกันทำให้เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าได้ แต่ในกรณีที่โหลดหนึ่งเฟส หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าใดสถานีหนึ่งเกิดกำลังไฟฟ้าล้นวงจรของระบบไฟฟ้าด้านปฐมภูมิขึ้น ก็จะทำให้เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า แก่ระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส เป็นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชุด หรือแต่ละสถานีไฟฟ้าให้อยู่แต่ละคู่เฟสกันเช่น เฟส ab, bc และ ca เป็นต้นดังรูปที่ 3.30

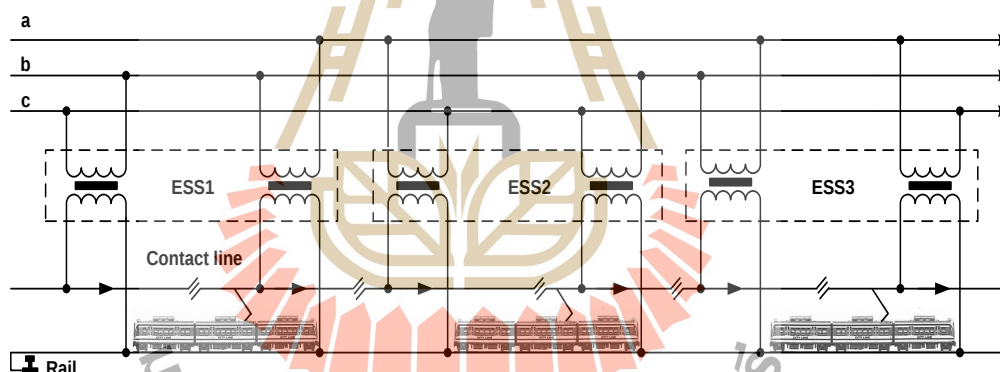


รูปที่ 3.30 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส

3) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี (V Connection)

จากข้อจำกัดของการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส ทางด้านการเกิดกำลังไฟฟ้าล้นวงจรของระบบไฟฟ้าด้านปฐมภูมิดังกล่าว ทำให้เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าแก่ระบบไฟฟ้าสามเฟสขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี ซึ่งการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

แบบวี ประกอบด้วยหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้าสองลูก แต่ละลูกสามารถเชื่อมต่อกับคู่เฟสที่ต่างกัน ระบบจ่ายไฟฟ้าจะถูกแบ่งเป็นเขตจ่ายไฟซึ่งแยกจากกันโดยผ่านนิวทรัลเซกชัน (neutral sections) ทั้งที่สถานีไฟฟ้า และจุดกึ่งกลางระหว่างสถานีไฟฟ้า แรงดันด้านทฤษฎีของการต่อหม้อแปลง สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี มีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา ข้อเสียหลักของการต่อหม้อแปลง สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี คือ เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าลูกหนึ่งไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ หม้อแปลงอีกลูกหนึ่งจะต้องจ่ายไฟฟ้าแทนในส่วนที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ซึ่งต้องอาศัย กระบวนการสวิตชิง (switching process) ทำให้ระบบไฟฟ้าสามเฟสถูกขัดจังหวะระหว่างการสวิตชิง เมื่อเหลือหม้อแปลงไฟฟ้าลูกเดียวทำให้ระบบกลายเป็นแบบการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเฟสเดียว ซึ่งทำให้ระบบกลับมาเกิดปัญหาความไม่สมดุล แรงดันไฟฟ้าเช่นเดิม การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี เป็นการเชื่อมต่อ หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 2 ชุด อยู่ในชุดเดียวกันโดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแต่ละชุดจะเชื่อมต่อ ต่างคู่เฟสกัน เช่น cb กับ ba และ ac กับ cb ดังรูปที่ 3.31

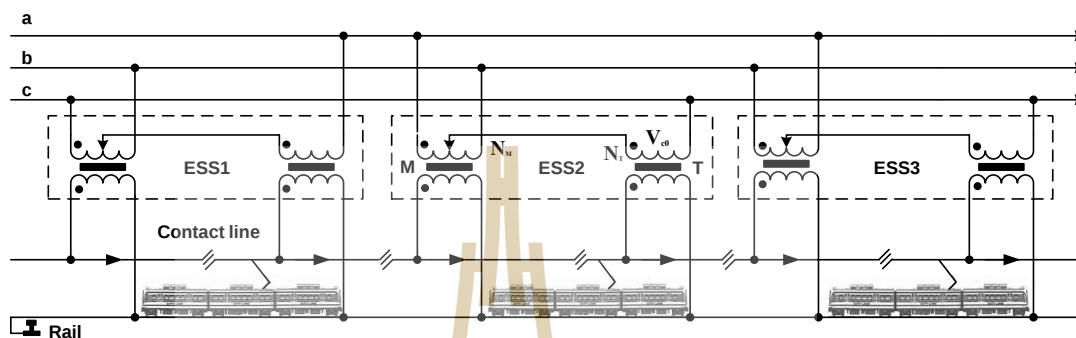


รูปที่ 3.31 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี

- 4) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ (Scott Connection)

ต่อมาได้มีการพัฒนาการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ ขึ้นมา เพื่อแก้ปัญหาในส่วนของข้อเสียของการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี ดังกล่าวข้างต้น การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองลูก ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า Main และหม้อแปลงไฟฟ้า Teaser ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสามเฟสด้านปฐมภูมิ การเชื่อมตődังกล่าว ทำให้แรงดันด้าน

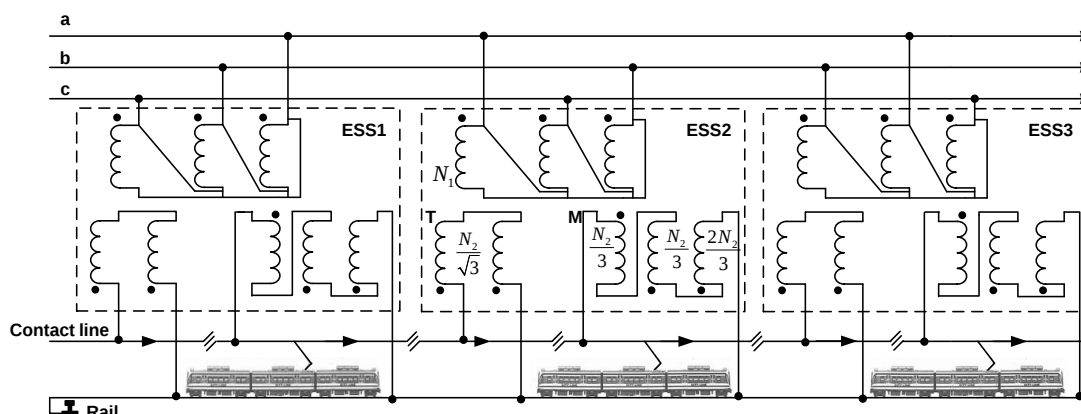
ทุติยภูมิมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา และทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองระบบ กำหนดให้หม้อแปลง Main มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N_M และรับไฟฟ้าจากเฟส ab (V_{ab}) ในขณะที่จำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง Teaser เท่ากับ N_T และรับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $V_{c0} = (V_{ca} + V_{ab}) / 2$ ดังรูปที่ 3.32 (Ciccarelli, 2012)



รูปที่ 3.32 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบสกอตต์

5) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเลอบลองก์ (Leblanc Connection)

ในช่วงที่มีการพัฒนาการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบสกอตต์ ก็ได้มีการพัฒนาการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเลอบลองก์ เพื่อแก้ปัญหาในส่วนของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบวี ดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน ในส่วนของการใช้งานการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเลอบลองก์ จะเป็นประเทศไต้หวันที่นิยมใช้การต่อหม้อแปลงแบบนี้ (Yao-Hung Cha, 2010) การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบสกอตต์ และเลอบลองก์ทำหน้าที่แปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสซึ่งช่วยลดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า แต่สภาวะไม่สมมาตรจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของโหลดด้วย หม้อแปลงดังกล่าวจึงไม่สามารถแก้ปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งหมด (Ciccarelli, 2012) โดยที่การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเลอบลองก์ เป็นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามลูกโดยทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อกันแบบเดลตา ส่วนทางด้านทุติยภูมิประกอบด้วยขดลวด 5 ขดลวดเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 3.33



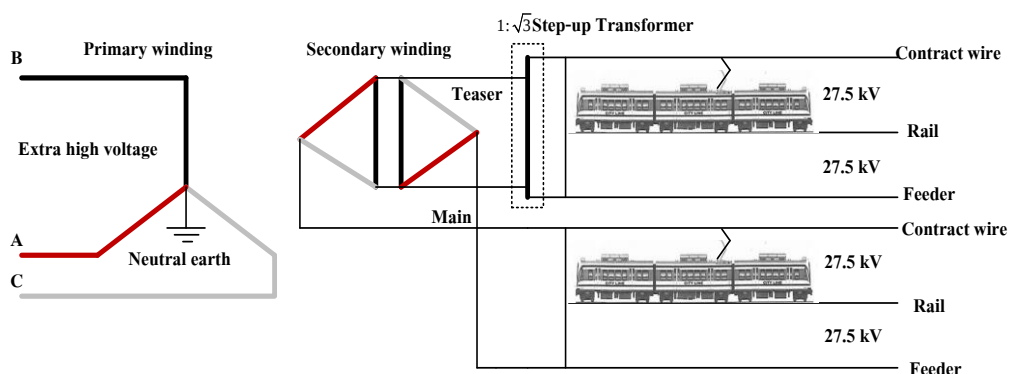
รูปที่ 3.33 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบแบบเลอบลองก์

6) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ (Modified wood - bridge connection)

ในประเทศญี่ปุ่นก่อนปี ค.ศ. 1972 มีการใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ แต่ต่อมาหลังจากปี ค.ศ. 1972 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟกระแสสลับ ให้รับกำลังไฟฟ้าระดับไฟฟ้าแรงสูงเอกซ์ตรา (extra high voltage system) เพื่อระบบรถไฟความเร็วสูง และพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟไฟฟ้าใช้ที่สูงขึ้น และในประเทศญี่ปุ่นมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงสูงเอกซ์ตราอยู่ 3 ข้อ คือ

- 1) จะต้องแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสด้านปฐมภูมิให้เป็นสองเฟสด้านทุติยภูมิ
- 2) การเชื่อมต่อด้านปฐมภูมิต้องต่อแบบวายที่จุดกลางลงดิน
- 3) การเชื่อมต่อด้านทุติยภูมิต้องต่อแบบเดลตา ซึ่งในกระแสส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสศูนย์สามารถหมุนเวียนได้

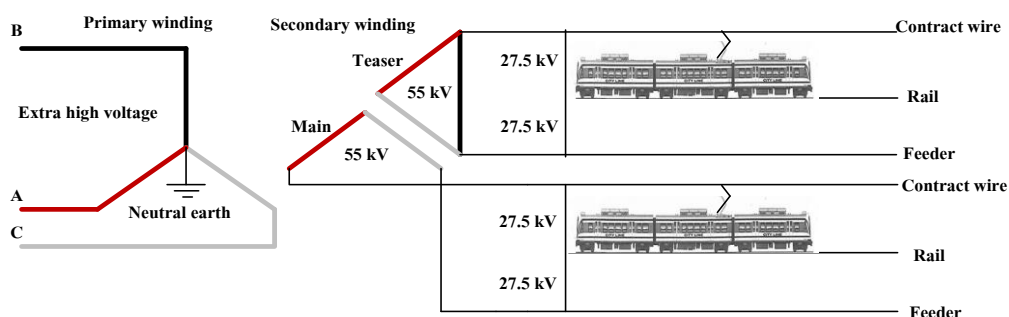
จึงได้พัฒนาการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ขึ้น ตามข้อกำหนดของการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูงเอกซ์ตราทุกข้อ โดยด้านปฐมภูมิรับไฟฟ้าสามเฟสระดับไฟฟ้าแรงสูงเอกซ์ตรา (มากกว่า 170 kV) ด้านทุติยภูมิมี 2 เฟส คือ Main และ Teaser โดยที่เฟส Teaser จะมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงที่ปรับระดับแรงดันขึ้น 1 ต่อ $\sqrt{3}$ เพื่อปรับระดับแรงดันขึ้น ดังรูปที่ 3.34 (Akira, 2012)



รูปที่ 3.34 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบแบบรูปเดลตา

7) การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา (Roof - Delta connection)

ต่อมาเดือนมีนาคม ค.ศ. 1972 ประเทศญี่ปุ่นได้ใช้การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับชินคันเซ็น โดยเปิดให้บริการรถไฟฟาสันโยชินคันเซ็น (Sanyo Shinkansen) ดังรูปที่ 3.36 อย่างไรก็ตามการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา มีความซับซ้อนมากเพราะมีการติดตั้งหม้อแปลงปรับระดับแรงดันขึ้น ทำให้เกิดการศึกษาและพัฒนาการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบใหม่ขึ้น คือ การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา เพื่อลดต้นทุนการติดตั้งหม้อแปลงปรับระดับแรงดันขึ้น และปริมาณการต่อขดลวดด้านทุติยภูมิ เพราะมีการเชื่อมต่อขดลวดด้านทุติยภูมิ 2 เฟส คือ Main และ Teaser โดยที่เฟส Main มีการเชื่อมต่อขดลวดแบบวิกัว หรือแบบหลังคาบ้าน (roof) และเฟส Teaser มีการเชื่อมต่อขดลวดแบบเดลตา ดังรูปที่ 3.35 (Akira, 2012)



รูปที่ 3.35 การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบแบบรูปเดลตา



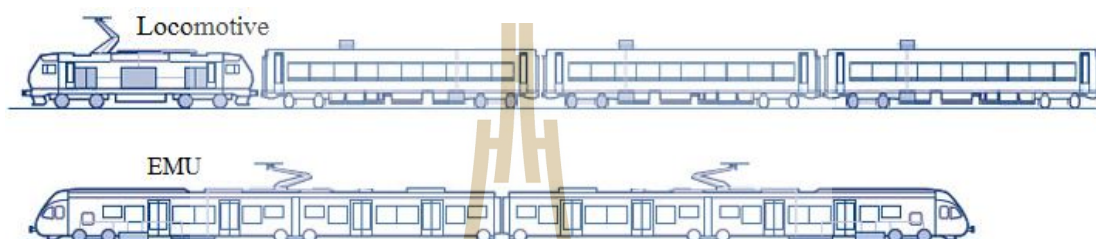
รูปที่ 3.36 รถไฟฟ้าความเร็วสูงชานโยชินคันเซ็น

ที่มาของภาพ : http://www.japan-guide.com/g17/2018_sanyo_01.jpg

3.5 ระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า

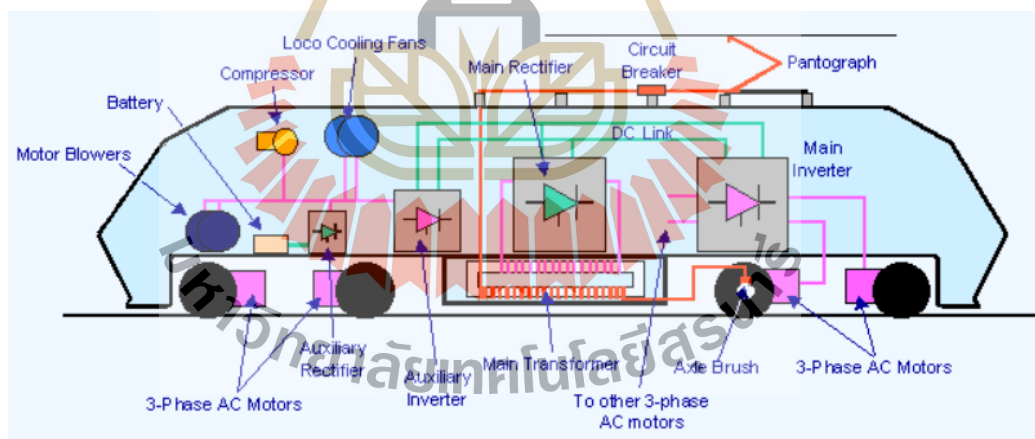
รถไฟฟ้าความเร็วสูงระหว่างเมือง (Intercity High Speed Train) ถูกนำมาใช้งานในทศวรรษที่ 30 ไม่ว่าจะเป็นประเทศเยอรมัน ประเทศอังกฤษ ประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศในทวีปยุโรปอีกหลายประเทศมีการใช้งานระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงระหว่างเมือง โครงสร้างของขบวนรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็นได้สองรูปแบบ ได้แก่ ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (centralized traction system) รูปแบบนี้จะใช้หัวรถจักรไฟฟ้าที่ติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าอย่างน้อยหนึ่งชุดเป็นระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบรวมศูนย์ (electric locomotive: Loco) หัวรถจักรจะถูกติดตั้งอยู่ทางด้านหน้า หรือด้านหลังสุดของขบวนอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือติดตั้งทั้งสองด้านก็ได้ ตู้โดยสารที่อยู่ระหว่างกลางขบวนจะไม่มีติดตั้งระบบมอเตอร์ขับเคลื่อน ในส่วนรูปแบบที่สองเป็นระบบลากจูงแบบแยกส่วน (Electric Multiple Unit) รูปแบบนี้ตัวขบวนรถจะมีโครงสร้างมาเป็นชุด มีการจัดวางโดยให้ห้องควบคุม หรือห้องคนขับอยู่ที่ด้านหน้า และหลังสุดของขบวนรถไฟฟ้า ระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟจะถูกติดตั้งกระจายไปตามส่วนต่าง ๆ ไม่รวมกันอยู่ที่ด้านหน้า ด้านหลัง หรือส่วนใดส่วนหนึ่งเหมือนรูปแบบระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ ความแตกต่างระหว่างรูปแบบทั้งสองนี้สามารถดูได้จากรูปที่ 3.37 กล่าวเพิ่มเติมในส่วนรูปแบบระบบลากจูงแบบแยกส่วน ที่มีระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟถูกติดตั้งกระจายไปตามส่วนต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยที่มอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟจะทำงานพร้อมกันโดยควบคุมจากคนขับที่อยู่บนรถไฟฟ้า ในการ

สร้างรถไฟฟ้าจำเป็นต้องแบ่งรถไฟออกเป็นหลายขบวนเพื่อสำหรับการใช้งาน การซ่อมบำรุง และเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้าง ดังนั้นขบวนรถไฟอาจจะมีบางขบวนที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟ เรียกว่า รถพ่วง (Trailer Car) ส่วนขบวนที่มีการติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟนั้นจะเรียกว่า รถกำลัง (Power Car หรือ Motor Car) เมื่อต้องการใช้งานระบบรถไฟจะนำขบวนต่าง ๆ มาประกอบกันตามรูปแบบของระบบลากจูง (traction system) โครงสร้างและส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในขบวนรถไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.37 โครงสร้างการจัดระบบลากจูงแบบ Locos และ EMU

ที่มาของภาพ : <http://www.voith.com/en/products-services/power-transmission/traction-inverter-10375.html>



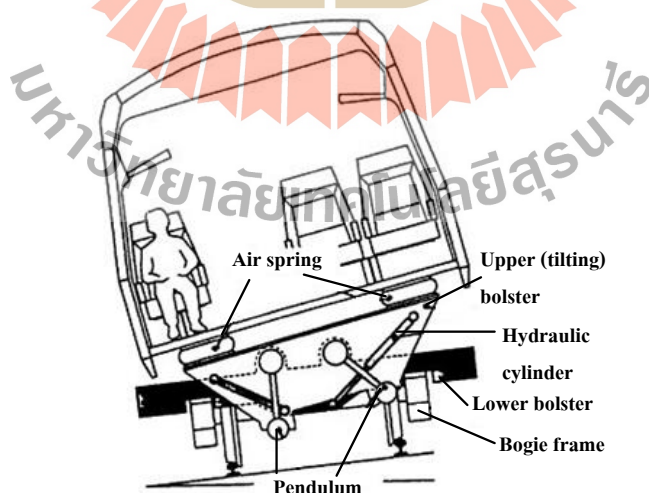
รูปที่ 3.38 โครงสร้างการของขบวนรถไฟฟ้า

ที่มาของภาพ : <http://imgarcade.com/1/electric-locomotive-engine/>

ประเทศแรกที่น่าแนวทางระบบลากจูงแบบแยกส่วนมาใช้ คือ ประเทศญี่ปุ่น เริ่มนำเทคโนโลยีแบบแยกส่วนมาใช้งานกับระบบรถไฟความเร็วสูงชิงกันเซ็ง ซึ่งเป็นต้นแบบของระบบรถไฟความเร็วสูงที่ใช้งานใน ณ ปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามในยุคทศวรรษที่ 90 วิศวกรด้านระบบรถไฟความเร็วสูงในประเทศแถบทวีปยุโรปมีความคิดเห็นคัดค้านเกี่ยวกับการใช้ระบบ

ลากจูงแบบแยกส่วน โดยอ้างเหตุผลว่าการที่มีการติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟกระจายไปตามส่วนต่าง ๆ ทำให้ผู้โดยสารเกิดการรบกวนทางเสียง (Audible Noise) เนื่องจากเสียงที่มาจากการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟ การที่ใช้แพนโทกราฟหลายชุดจะทำให้การรับกระแสไฟฟ้าจากสายจ่ายไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้าสู่ขบวนรถไฟมีประสิทธิภาพน้อยลง และยังอ้างว่า มีการบำรุงรักษาที่ซับซ้อน แต่ต่อมาใน ณ ปัจจุบันปัญหาดังกล่าวได้รับการพิสูจน์แล้วว่าไม่เป็นความจริงทำให้ระบบรากจูงแบบแยกส่วนได้รับความนิยมใช้งาน และได้ตั้งเป็นระบบมาตรฐานที่ใช้สำหรับรถไฟความเร็วสูงในปัจจุบัน ทำให้ประเทศในแถบทวีปยุโรปได้ยอมรับการใช้งานระบบรากจูงแบบแยกส่วนมากขึ้น รวมถึงระบบรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิประเทศไทย

ปัญหาที่รถไฟความเร็วสูงในขณะวิ่งเข้าทางโค้งจะต้องเกิดขึ้น คือ ความไม่สะดวกสบายของผู้โดยสารในขณะที่รถไฟวิ่งด้วยความเร็วสูง ทำให้ผู้โดยสารรู้สึกถึงแรงเหวี่ยงที่มากระทำแรงเหวี่ยงดังกล่าวมาจากการกระแทกแรงสู่ศูนย์กลาง (Centripetal Force) บนขบวนรถไฟความเร็วสูง เป็นเหตุผลทำให้มีการออกแบบรถไฟที่ปรับเอียงได้ในขณะเข้าโค้ง (Tilting Train) ขึ้นมา ดังรูปที่ 3.39 นอกจากการลดผลกระทบดังกล่าวแล้ว ยังช่วยให้เพิ่มความเร็วในขณะเข้าโค้งได้อีกด้วย ดังนั้นระบบรถไฟความเร็วสูงจึงพิจารณาการปรับเอียงได้ในขณะเข้าโค้งของรถไฟความเร็วสูงด้วยไม่ว่าจะเป็นรถไฟฟ้าในประเทศญี่ปุ่น Japanese National Railway (JNR) หรือรถไฟฟ้าของประเทศสหรัฐอเมริกา Acela Express ดังแสดงในรูปที่ 3.40 เป็นต้น



รูปที่ 3.39 รถไฟที่ปรับเอียงได้ในขณะเข้าโค้ง

ที่มาของภาพ : <https://anmolkarnik.files.wordpress.com/2012/10/1-s2-0-s0361923098000975-gr2.gif>



รูปที่ 3.40 รถไฟฟ้าความเร็วสูง Acela Express ของประเทศสหรัฐอเมริกา

ที่มาของภาพ : https://en.wikipedia.org/wiki/Acela_Express#/media/File:Acela_old_saybrook_ct_summer_2011.jpg

3.5.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ลากจูง

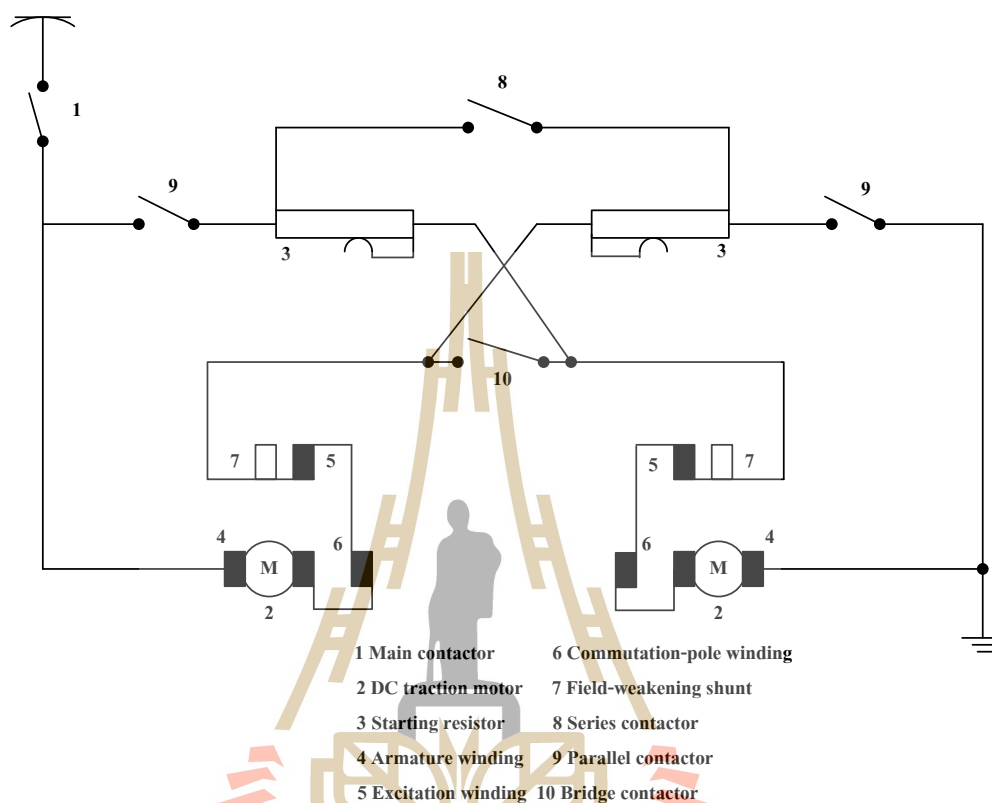
ถ้าจะกล่าวถึงระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าสิ่งที่ไม่ได้ คือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ลากจูงไฟฟ้า ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์ลากจูงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปได้ ดังนั้นการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามาใช้งานเพื่อสร้างแรงจูงไปขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้ทำการพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบรถไฟฟ้ามาโดยตลอด เช่น มอเตอร์กระแสตรง (DC traction motor) มอเตอร์คอมมิวเตเตอร์กระแสสลับ (AC commutator motor) หรือเรียกอีกอย่างว่า มอเตอร์ยูนิเวอร์แซล (universal motor) มอเตอร์ซิงโครนัส (synchronous traction motor) และมอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction traction motor) ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนรถไฟนั้นเริ่มต้นจากการใช้เครื่องยนต์ดีเซลมาใช้งานในการแปลงพลังงานจากพลังงานเชื้อเพลิงน้ำมันเป็นพลังงานไฟฟ้า การใช้งานแบบเครื่องยนต์ดีเซลยังไม่ใช้งานระบบไฟฟ้าโดยสมบูรณ์ ทำให้ต่อมามีการพัฒนาการใช้งานแบตเตอรี่ไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแทนที่จะเป็นเชื้อเพลิงแบบน้ำมันได้มีการเริ่มทดลองขึ้นใช้งานครั้งแรกที่เมืองเดเวนพอร์ต (Davenport) มลรัฐแมสซาชูเซต สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1837 แต่การใช้งานแบตเตอรี่ไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีข้อเสียในการชาร์จแบตเตอรี่ไปจนถึงการเปลี่ยนแบตเตอรี่ไฟฟ้ามีความยุ่งยาก และใช้เวลานานกว่าจะทำให้รถไฟฟ้ามาวิ่งได้อีกครั้ง จึงเป็นเหตุผลให้มีการพัฒนาระบบลากจูงที่จ่ายไฟผ่านสายไฟฟ้ามาใช้งานในระบบรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นจากการทดสอบกับรถรางแตรม (tram) ในประเทศเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1881

หลังจากนั้นเป็นต้นมาระบบลากจูงที่จ่ายไฟผ่านสายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าได้รับความนิยม และถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประวัติของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า

การใช้งานระบบลากจูงที่จ่ายไฟผ่านสายไฟฟ้าในตอนต้นตามที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ทั้งหมดใช้มอเตอร์กระแสตรงรับไฟฟ้าจากสายจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟฟ้า ข้อดีของการใช้มอเตอร์กระแสตรงรูปแบบนี้ คือ ความง่ายในการควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวต้านทาน โดยการควบคุมผ่านตัวต้านทานต่อแบบอนุกรม เพื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้า ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบสูง หรือต่ำ ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ไฟฟ้าจากปรับตัวต้านทาน ดังรูปที่ 3.41 หน้าสัมพัทธ์หมายเลข 8 9 และ 10 เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมตอนเริ่มขับเคลื่อนมอเตอร์ และพอมอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มหมุนด้วยความเร็วประมาณครึ่งหนึ่งของพิกัดความเร็วรอบ จากนั้นหน้าสัมผัสการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองตัวจะเชื่อมต่อกันแบบขนาน และนอกจากนี้ตัวต้านทานเริ่มเดินเครื่องยังสามารถใช้ลดความเร็วหรือเบรกมอเตอร์ได้อีกด้วย แต่วิธีการควบคุมผ่านตัวต้านทานนี้ยังมีข้อเสียอยู่ คือ ทำให้แรงจุดที่เกิดขึ้นใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ มีกำลังงานสูญเสียในตัวต้านทานสูงทำให้เกิดความร้อนในตัวต้านทาน ทำให้ในปัจจุบันไม่มีการนำวิธีนี้มาใช้งานในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

ต่อมาการให้บริการรถไฟฟ้าในระยะทางไกลขึ้นทำให้เกิดข้อจำกัดของการใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรง โดยถ้าระยะทางไกลขึ้นการใช้งานระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีต้นทุนการสร้างสูงกว่าการใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับมาก และระบบไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำลงจะทำให้มีกำลังงานสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้ระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเหมาะกับรถไฟฟ้าระยะทางไกล โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าส่งจ่ายโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยหลักการการทำงานของมอเตอร์คอมมิวเตเตอร์ ที่สามารถทำงานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้ แต่ต้องเป็นมอเตอร์ที่มีการต่อขดลวดแบบอนุกรมเท่านั้น (series-wound winding connection) มอเตอร์ที่ใช้งานกับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่นิยมใช้อีกแบบหนึ่ง คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่วนใหญ่จะใช้กับการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยจ่ายไฟผ่านสายตัวนำ 3 เฟส 3 สายแบบแคทีนารีพาดอากาศ แต่มีข้อเสียอยู่ว่าการจ่ายไฟผ่านสายตัวนำ 3 เฟส 3 สายมีราคาสูง จึงเปลี่ยนมาใช้แบบการจ่ายไฟผ่านตัวนำ 1 เฟสเพียงเส้นเดียว ระบบการจ่ายไฟผ่านตัวนำ 1 เฟส 1 สายที่ใช้งานควบคู่กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นระบบที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ใช้งานในการให้บริการในปัจจุบัน และ

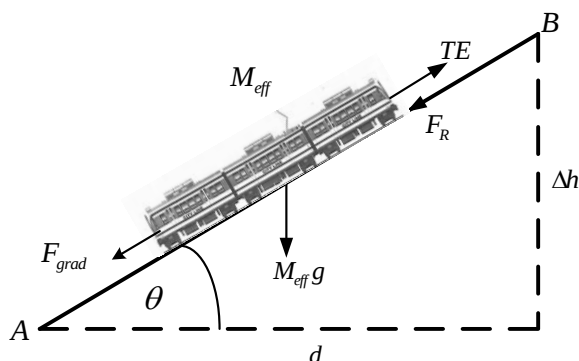
นอกจากนี้ยังมีมอเตอร์ลากจูงซึ่งโครนส์ใช้ในการใช้งานกับระบบรถไฟฟ้าอีกด้วย (ชนิดชัย กุลวรรวานิชพงษ์, 2557)



รูปที่ 3.41 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวต้านทานอนุกรมสำหรับรถไฟฟ้า

3.5.2 ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

ระบบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าใช้การพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้การพิจารณามอเตอร์แบบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานกับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ การสร้างแบบจำลองเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าตามกฎการเคลื่อนที่ ข้อที่สองของนิวตัน ตามสมการที่ (3.10) กล่าวคือ แรงที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ได้แก่ แรงลากจูง แรงโน้มถ่วง และแรงเสียดทาน จากรูปที่ 3.42 แสดงแผนภาพแรงอิสระ (free body diagram) ของรถไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นทางลาดชัน (Mingpruk, 2016)



รูปที่ 3.42 แผนภาพแรงอิสระของรถไฟที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นทางลาดชัน

$$F = TE - F_{grad} - F_R = M_{eff} a \quad (3.10)$$

โดยที่ TE คือ แรงดูดขบวนรถไฟฟ้า (นิวตัน (N))

F_{grad} คือ แรงเกรเดียนต์ (นิวตัน (N))

F_R คือ แรงเสียดทานของรถไฟฟ้า (นิวตัน (N))

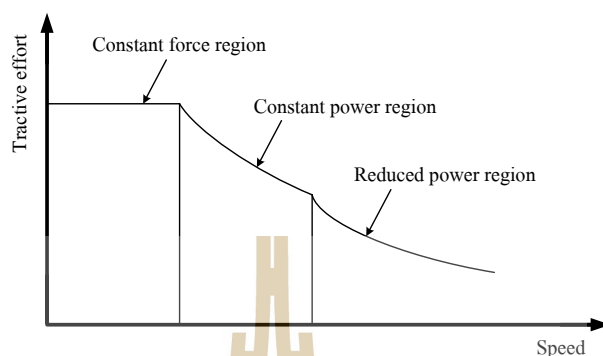
M_{eff} คือ ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟฟ้า (กิโลกรัม (kg))

a คือ ความเร่งของรถไฟฟ้า (m/s^2)

1) แรงดูดขบวนรถไฟฟ้า (Tractive Force) : รถไฟฟ้าติดตั้งมอเตอร์ลากจูงเพื่อขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้านั้นก่อนเริ่มขับเคลื่อนจำเป็นต้องใช้แรงดูดขนาดใหญ่ในการทำให้รถไฟฟ้าขับเคลื่อนออกไปได้ ดังนั้นการจำลองลักษณะสมบัติของแรงดูดขบวนรถไฟฟ้าใช้สมบัติเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ (Torque Speed Curve) ของมอเตอร์มาใช้งาน แรงดูดเกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ส่งกำลังผ่านระบบเฟืองทดเพื่อไปขับเคลื่อนล้อของรถไฟฟ้า ทำให้ง่ายที่จะนำไปใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า จึงได้ผลลัพธ์ของแรงดูด และแกนนอนจะถูกแปลงเป็นความเร็วเชิงเส้น ทำให้ได้เส้นกราฟแรงดูดขบวนรถไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 3.43

2) แรงเกรเดียนต์ (Gradient Force): เป็นแรงที่น้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้ากระทำต่อแรงโน้มถ่วงที่เอียงทำมุมกับพื้น ดังรูปที่ 3.42 เป็นผลมาจากน้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งบนรางที่เอียงทำมุมกับพื้น ทำให้เกิดแรงที่มากระทำกับขบวนรถไฟฟ้า ถ้าขบวนรถไฟฟ้าทำมุมในทิศทางลงจะทำให้มีทิศทางเสริมการเคลื่อนที่ แต่ในทางตรงกันข้ามกันถ้าขบวนรถไฟฟ้าทำมุมในทิศทางขึ้น

จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้น ตามสมการที่ (3.11) โดยที่ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักขบวนรถไฟสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.12)



รูปที่ 3.43 แรงกุดการขับเคลื่อนรถไฟ

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta \quad (3.11)$$

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) \quad (3.12)$$

โดยที่ M_t คือ น้ำหนักเปล่า (Tare Weight)

λ_w คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร (Passenger Mass Factor)

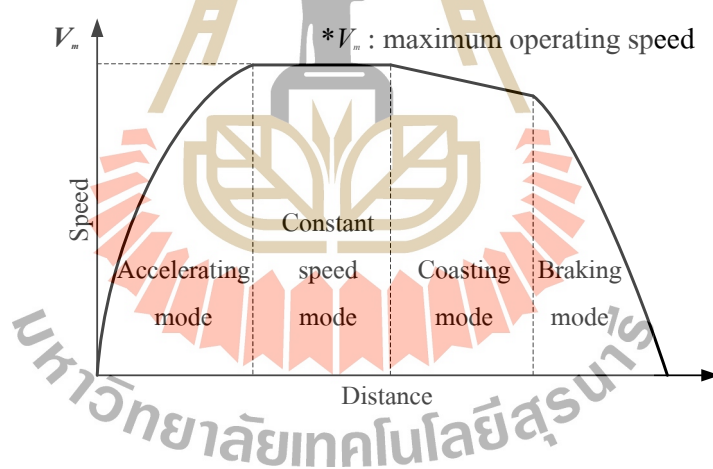
g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, $9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$

3) แรงเสียดทานของรถไฟ (Train Resistance): การเคลื่อนที่ของรถไฟจะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับราง และแรงต้านอากาศ เรียกโดยรวมว่า แรงต้านทาน (Resistive Force) แรงเสียดทานทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการของ Davis ตามสมการที่ (3.13) การคำนวณแรงเสียดทานในการศึกษานี้จะใช้เพียงแรงเสียดทานที่คำนวณจากสมการของ Davis เท่านั้น

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3.13)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h) และสัมประสิทธิ์ของ Davis (ค่าคงที่) ประกอบด้วย A (kN), B (kNh/km) และ C (kNh²/km²)

การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟในการจอดรับส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสาร นั้น มีรูปแบบการเคลื่อนที่ตามลักษณะสมบัติเส้นโค้งความเร็วกับเวลา (Train's Speed-Time Curve) มีโหมดการทำงานพื้นฐานการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงาน ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (Accelerating Mode) โหมดความเร็วคงที่ (Constant-Speed Mode) โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย (Coasting Mode) และโหมดการเบรก (Braking Mode) ดังแสดงในรูปที่ 3.44 โดยที่การทำงานของรถไฟเมื่อเวลาเริ่มออกจากสถานีจำเป็นต้องทำความเร็วให้สูงเพื่อเอาชนะแรงฉุดของขบวนรถไฟ จึงจำเป็นต้องใช้โหมดเร่งความเร็ว จากนั้นเมื่อความเร็วรถไฟถึงความเร็วพิกัดจำเป็นต้องหยุดโหมดเร่งความเร็ว แล้วใช้งานในโหมดความเร็วคงที่แทน เมื่อตำแหน่งของขบวนรถไฟใกล้จะถึงสถานีผู้โดยสารจำเป็นต้องลดความเร็วลง โดยใช้โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย และสุดท้ายเมื่อขบวนรถไฟต้องการลดความเร็วสูงสุดต้องใช้งานในโหมดการเบรก จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนโหมดการทำงานมีความสำคัญต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟเป็นอย่างมาก ดังนั้นควรเลือกโหมดการทำงานให้เหมาะสม



รูปที่ 3.44 โหมดการทำงานของรถไฟ

สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟ ขึ้นอยู่กับแรงฉุดขบวนรถไฟ ความเร็วของรถไฟ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟที่ใช้งาน สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (3.14)

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} + P_{aux} \quad (3.14)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (kW)

η คือ ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

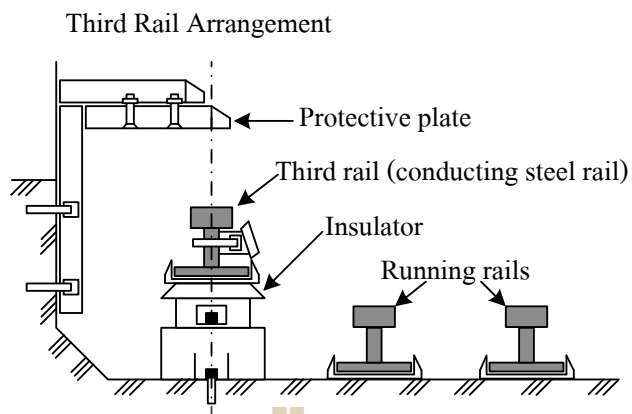
P_{aux} คือ โหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้า (kW)

3.6 ระบบรางรถไฟฟ้า

ระบบรถไฟฟ้าที่ใช้ระบบการจ่ายไฟผ่านตัวนำ 1 เฟส 1 สายที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตรেলลิงก์ใช้งาน จำเป็นต้องมีตัวนำกระแสย้อนกลับ ซึ่งเป็นหน้าที่ของระบบรางรถไฟฟ้านั่นเอง และนอกจากระบบรางที่มีความสำคัญแล้ว ยังมีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางรถไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า ระบบรางจ่ายไฟที่ใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าสามารถแยกออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบรางจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง (DC electric railway system) และระบบรางจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ (AC electric railway system)

3.6.1 ระบบรางจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในเมืองขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่จำกัดระดับเมืองหลวงของแต่ละประเทศไม่ว่าจะเป็น กรุงลอนดอน กรุงโตเกียว หรือแม้กระทั่งกรุงเทพมหานครมีการให้บริการขนส่งมวลชนผู้โดยสารจำนวนมากในช่วงชั่วโมงเร่งรีบ จำเป็นต้องใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่มีจำนวนผู้โดยสารเป็นจำนวนมากในขบวนรถไฟฟ้าทำให้น้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้ามีน้ำหนักมากเช่นกัน โหลดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนส่วนใหญ่เกิดจากการดึงกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าไปใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่รับกำลังงานไฟฟ้าผ่านระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากรางที่สาม (The 3rd rail) แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สามนิยมใช้แรงดันไฟฟ้าเป็น 600 V หรือ 750 V ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานยกตัวอย่าง เช่น รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง (urban metros) ใช้ระดับแรงดัน 1500 V และรถไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างเมืองใช้ระดับแรงดัน 3000 V การจ่ายไฟผ่านรางที่สามจะมีองค์ประกอบโครงสร้าง ดังในรูปที่ 3.45 ใช้งานในกรณีของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีแรงดัน 750 V และมีความเร็วในการให้บริการไม่สูง ในประเทศไทยระบบรถไฟฟ้าที่ใช้ระบบการจ่ายไฟฟ้าผ่านรางที่สาม คือ ระบบรถไฟฟ้า BTS และ MRT ดังรูปที่ 3.46 สำหรับระบบรถไฟฟ้า BTS และ MRT ใช้ระดับแรงดันปานกลางที่ 24 kV รับไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง การใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าผ่านรางที่สาม มีข้อเสียเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างตัวนำของรางที่สามกับรางวิ่งที่ใกล้กันอาจจะทำให้เกิดปัญหาด้านฉนวนไฟฟ้าได้ การจ่ายไฟฟ้าผ่านรางที่สามเหมาะสำหรับระบบที่มีพื้นที่จำกัดแบบ BTS และ MRT



รูปที่ 3.45 โครงสร้างการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สาม

ที่มาของภาพ: <http://3.bp.blogspot.com/bxINp6xpPvs/VbrHjMQqL4I/AAAAAAAAAD7c/92QJGDHSBt0/s1600/Insulator-1.jpg>



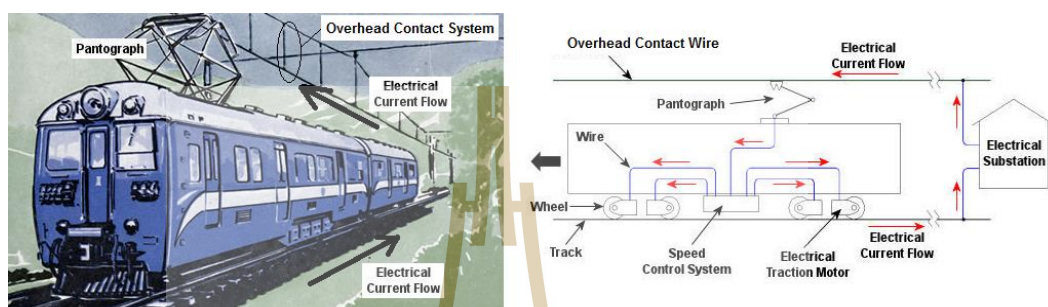
รูปที่ 3.46 รถไฟฟ้ามหานคร MRT

ที่มาของภาพ: <http://www.siamintelligence.com/wp-content/uploads/2011/07/Sightseeing-MRT.jpg>

3.6.2 ระบบรางจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบรางจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นการจ่ายไฟฟ้าผ่านสายเหนือตัวรถไฟฟ้า หรือแบบสายจ่ายไฟตัวนำแบบพาดอากาศ (overhead feeding conductor) การจ่ายไฟฟ้าให้ระบบรางที่ใช้สายจ่ายตัวนำแบบพาดอากาศ เริ่มต้นกระแสไฟฟ้าจะไหลจากสถานีไฟฟ้ามาสู่ขบวน

รถไฟฟ้าผ่านระบบสายตัวนำ 1 เฟส 1 เส้นเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าบนขบวนรถไฟฟ้า จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าโดยไหลผ่านราง ดังแสดงในรูปที่ 3.47 ตัวอย่างในระบบกรณีศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์มีการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบสายจ่ายไฟฟ้าตัวนำแบบพาดอากาศนิยมใช้งานกับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่มีระยะทางให้บริการไกล

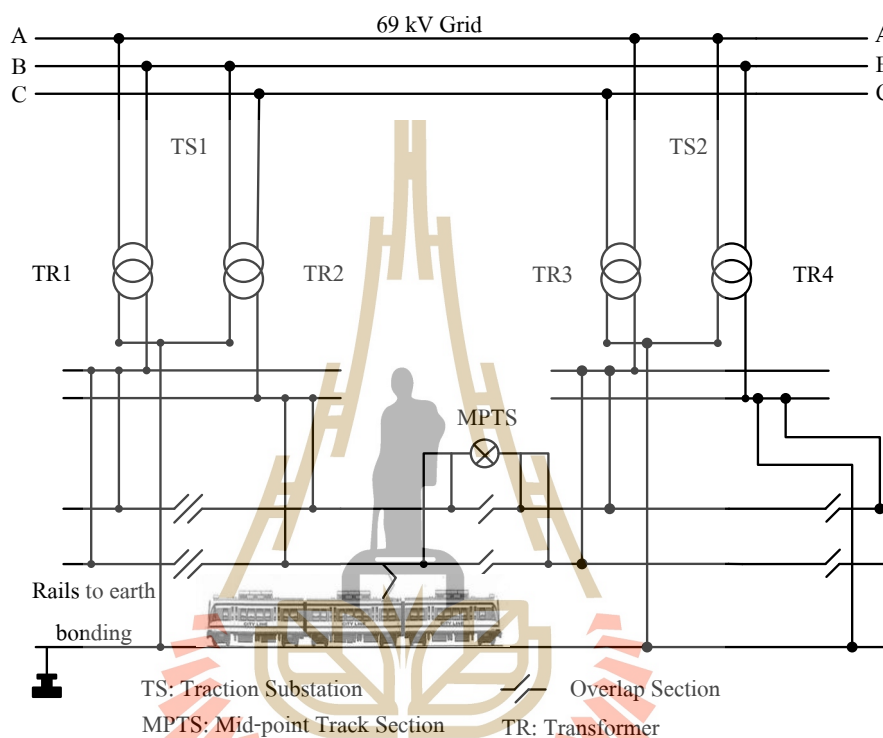


รูปที่ 3.47 การไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าให้ขบวนรถไฟฟ้า

การจ่ายไฟของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์เป็นการจ่ายไฟแบบมาตรฐานความถี่กระแสสลับ การจ่ายไฟมาตรฐานความถี่กระแสสลับเริ่มต้นจากการใช้ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้า 20 kV ต่อมาถูกเปลี่ยนมาใช้ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้า 25 kV เป็นมาตรฐานความถี่กระแสสลับและใช้ความถี่ที่ 50 Hz ส่วนสำคัญของการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากโรงไฟฟ้า หรือการไฟฟ้า ฯ โดยทั่วไปในประเทศไทยจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 115 kV และ 69 kV ถูกแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง เพื่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในแต่ละรุ่นได้ แรงดันไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ระบบ 25 kV, 50 Hz หรือ 60 Hz ขึ้นอยู่กับการจ่ายไฟฟ้าของแต่ละประเทศ

โดยปกติแล้วในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับจะเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยการแปลงแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ยกตัวอย่างระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 2 สถานี คือ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่ 1 (TS1) ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ลูก ได้แก่ TR1 และ TR2 สถานีจ่ายไฟถัดไป คือ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่ 2 (TS2) ติดตั้งหม้อแปลงจำนวนไฟฟ้า 2 ลูก เช่นกัน คือ TR3 และ TR4 หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 ลูก มีหน้าที่จ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้าถ้าเกิดรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากด้านซ้ายไปทางด้านขวาตามรูปที่ 3.48 การจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงเข้าไปที่ระบบรางจ่ายไฟ

จะถูกดึงจาก TR3, TR2, TR1 และ TR4 ตามลำดับที่ตำแหน่งรถไฟอยู่ เพื่อให้การดึงกระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 69 kV มีความสมดุล ดังนั้นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 ลูก จะเป็นการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบสลับคู่เฟส คือ A-B, B-C และ C-A สลับคู่เฟสกันไป ดังแสดงในรูปที่ 3.48 (न्छชัย กุลรวานิชพงษ์, 2557)



รูปที่ 3.48 การจ่ายไฟกระแสสลับเข้าระบบ 69 kV ผ่านสายไฟเหนือตัวรถไฟ

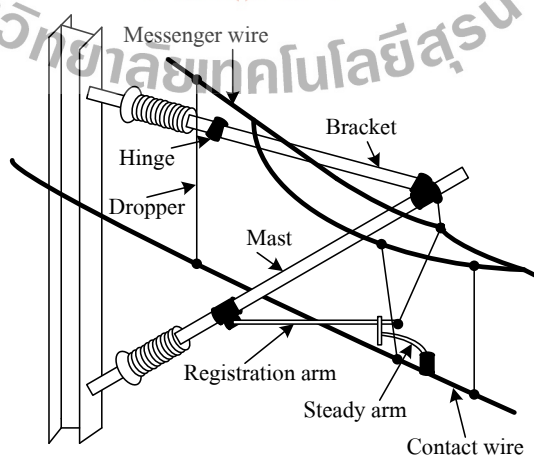
อุปกรณ์ที่มีความสำคัญในระบบรับกระแสไฟฟ้าของรถไฟที่ขาดไม่ได้ คือ แพนโทกราฟ (pantograph) ดังรูปที่ 3.49 แพนโทกราฟจะทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากสายป้อนสัมผัสผ่านตัวสัมผัสเคลื่อนที่ (sliding contact) ซึ่งทำจากแกรไฟต์ (graphite) ซึ่งแกรไฟต์เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าได้ดี จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะเข้าสู่ขบวนรถไฟ และจะไหลครบวงจรผ่านรางวิ่ง แพนโทกราฟถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการรับพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ขบวนรถไฟเป็นอย่างมาก เพราะเป็นจุดที่รถไฟกับระบบจ่ายไฟมาสัมผัสกัน โดยปกติการยกแพนโทกราฟขึ้นลงจะถูกควบคุมจากการอัดลมแรงดันสูง การควบคุมให้แพนโทกราฟเคลื่อนเข้าสัมผัสสายส่ง และแยกออกจากสายส่งต้องมีขบวนการที่รวดเร็วมาก เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟที่ทำให้สายส่งและแปรงถ่านสึกหรอเสียหายเร็วขึ้น



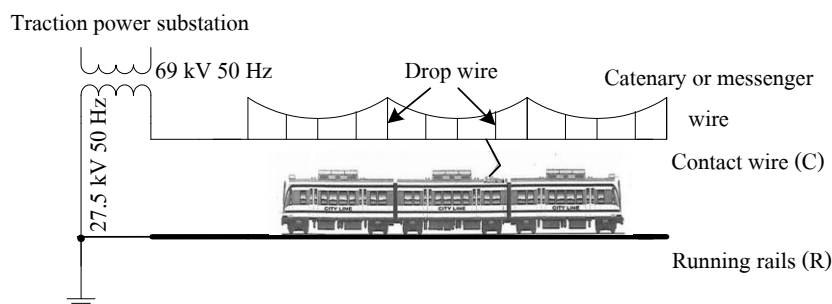
รูปที่ 3.49 แพนโทกราฟ

ที่มาของภาพ : http://4rail.taragany.fi/swe/swe_mtab_iore109_pantograph_1_150_kiruna_2011_600.jpg

สำหรับโครงสร้างของระบบสายป้อนรถไฟที่เป็นแบบสายจ่ายไฟตัวนำแบบพาดอากาศ ส่วนใหญ่จะเป็นระบบกระแสสลับ โดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วย ชุดสายจ่ายไฟเหนือศีรษะทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับรถไฟ ประกอบไปด้วยสายป้อนสัมผัส (Contact Wire) และสายเคทีนารี (Catenary) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สายเมสเซนเจอร์ (Messenger Wire) ทำหน้าที่ยึดตรึงสายป้อนสัมผัสให้มีความแกว่งน้อยที่สุด ดังรูปที่ 3.50 โดยสายทั้ง 2 เส้นนี้จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และถูกเชื่อมต่อกันด้วยสายตัวนำเชื่อมในแนวดิ่งที่เรียกว่า สายครีป (Drop Wire) โครงสร้างของระบบการจ่ายรางรถไฟกระแสสลับ แสดงในรูปที่ 3.51



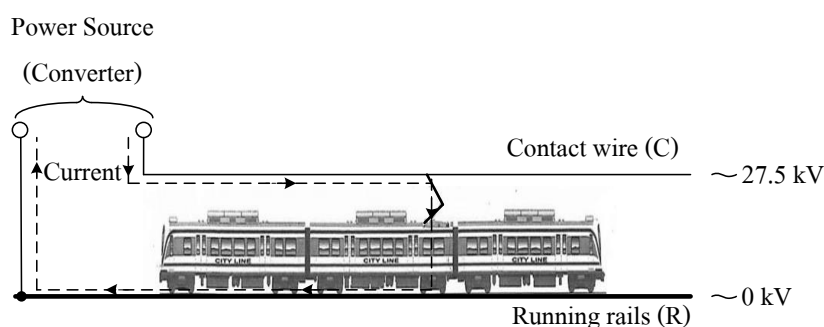
รูปที่ 3.50 โครงสร้างของระบบสายป้อนรถไฟ



รูปที่ 3.51 โครงสร้างของระบบการจ่ายรางรถไฟกระแสสลับ

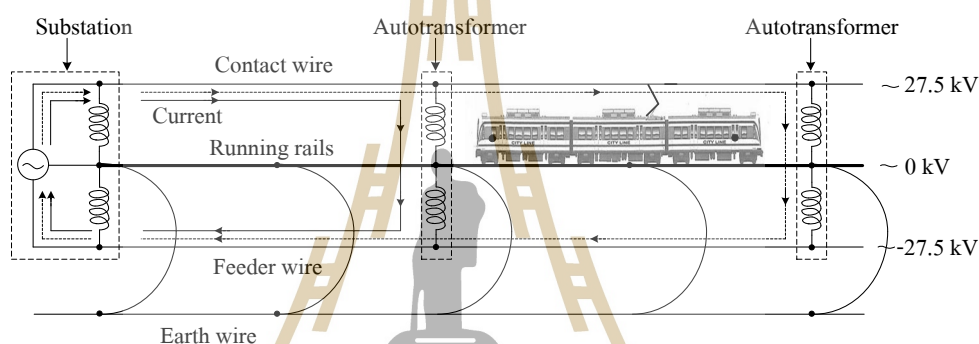
ระบบหม้อแปลงออโต เป็นระบบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และเป็นระบบจ่ายไฟมาตรฐานในปัจจุบัน ถึงแม้จะมีราคาแพงกว่าแบบอื่น แต่ข้อดีของการใช้งานระบบหม้อแปลงออโต คือ การลดแรงดันตกในระบบรถไฟได้เป็นอย่างดี ทำให้ระบบหม้อแปลงออโตถูกนำมาใช้งานมากขึ้น ส่วนใหญ่ระบบรถไฟที่มีระยะทางให้บริการระยะทางไกลจะใช้งานระบบหม้อแปลงออโต โดยทั่วไปการจ่ายไฟฟ้าให้กับรางรถไฟจะแบบเฟสคู่ ซึ่งการจ่ายไฟในรูปแบบเฟสคู่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 25 kV 50 Hz สำหรับระบบรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์ สามารถใช้งานกับระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบ ระบบการจ่ายไฟโดยตรง และระบบการจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงออโต

1) ระบบการจ่ายไฟโดยตรง: การเชื่อมต่อระบบเข้าโดยตรงถึงหม้อแปลงเพื่อใช้จ่ายไฟฟ้าให้กับรางรถไฟแต่ละสถานีย่อมมีข้อดี คือ มีราคาถูก ง่ายต่อการเชื่อมต่อ แต่มีข้อเสีย คือ เกิดแรงดันตกในระบบรถไฟเมื่อเป็นระบบรถไฟที่มีระยะทางให้บริการระยะทางไกล แต่ถ้าระบบเป็นระบบขนส่งระยะทางไกลอย่างเช่น ระบบรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์จะมีปัญหาด้านแรงดันตกค่อนข้างน้อย สำหรับระบบการจ่ายไฟบนรางรถไฟแบบโดยตรงแสดงในรูปที่ 3.52



รูปที่ 3.52 การจ่ายไฟบนระบบรางรถไฟแบบโดยตรง

2) ระบบจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงออโต: การใช้ระบบจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงออโตได้รับความนิยมมากกว่าระบบการจ่ายไฟโดยตรง เนื่องจากช่วยลดปัญหาเรื่องแรงดันตก ระบบจ่ายไฟให้รางรถไฟที่ใช้หม้อแปลงออโตจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าสู่รถขบวนไฟฟ้ามีค่าสูงในช่วงระหว่างหม้อแปลงออโตสองตัวที่มีรถไฟไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ กระแสไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าโดยผ่านสายฟีดเดอร์ ทำให้แรงดันตกในสายมีค่าลดลง และช่วยให้ระยะห่างระหว่างการวางตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้ระบบรางรถไฟเพิ่มขึ้นได้ประมาณ 50 - 60 กิโลเมตรเหมาะสำหรับระบบรถไฟที่มีระยะทางให้บริการระยะทางไกล สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าบนรางรถไฟที่ใช้หม้อแปลงออโตแสดงในรูปที่ 3.53 (ศุภชัย แก้วพวง, 2559)



รูปที่ 3.53 การจ่ายไฟบนระบบรางรถไฟที่ใช้หม้อแปลงออโต

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎี และหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งได้แก่ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ระบบลากจูงสำหรับรถไฟ และระบบรางรถไฟ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่นำมาใช้ หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไปทั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

4.1 บทนำ

การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง ระบบรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวีแบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตาเท่านั้น เพื่อหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ซึ่งพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ขึ้น โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงก์ สำหรับแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่ติดตั้งระบบหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่สร้างขึ้น มีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่มีการติดตั้งหม้อแปลงหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละแบบ ระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งขบวนรถไฟฟ้า รวมทั้งการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า มีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์ลักษณะค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา ดังนั้นในบทนี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และเงื่อนไขสำหรับการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

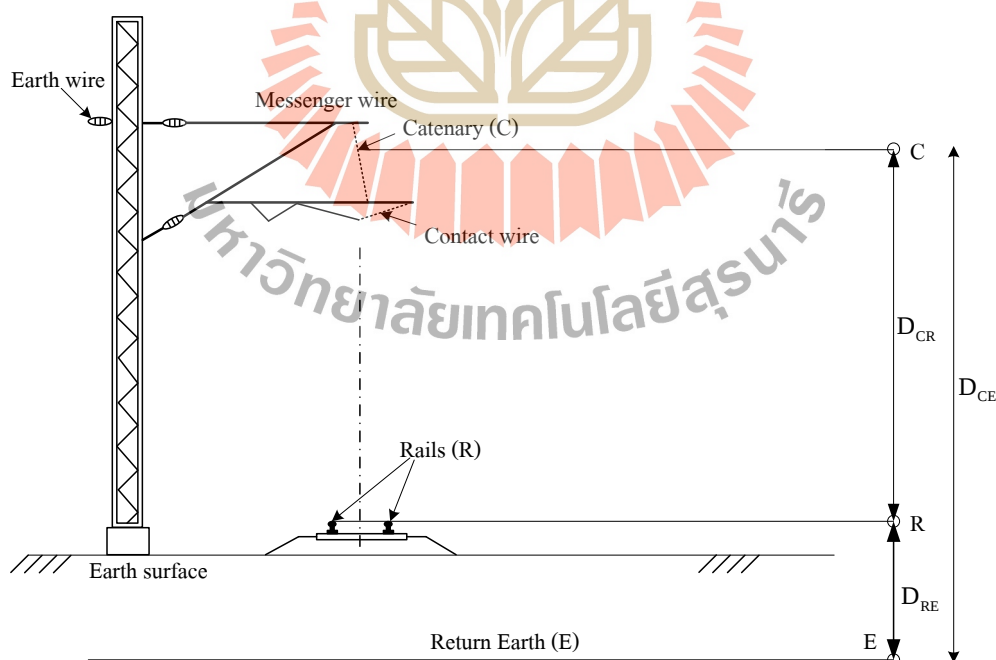
4.2 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

แบบจำลองของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่ติดตั้งระบบหม้อแปลงหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้ารวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ มีองค์ประกอบ 5 ส่วนหลัก ๆ คือ แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่ง แบบจำลองหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

แบบจำลองขบวนรถไฟ การคำนวณโหลดศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟ (Depot) และการปรับค่าความเร็วและตำแหน่งของรถไฟ (Speed and position update) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่ง

ระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศ และรางวิ่งในการทดลองนี้ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง เป็นรูปแบบที่ระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ให้บริการอยู่ และแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต เพิ่มในส่วนกลางของสายฟีดเดอร์ (Feeder) เพื่อใช้ทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเฟลดา แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง ที่ใช้งานในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้รถไฟฟ้านั้นมีความสำคัญมาก เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลในเรื่องของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นอย่างมาก การสร้างแบบจำลองของระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งนี้ พิจารณาจากความต้านทานของระบบตัวนำ ความเหนี่ยวนำของตัวนำ และระหว่างตัวนำ การจัดวางตำแหน่งของตัวนำที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความเหนี่ยวนำของสายจ่ายไฟฟ้า พิจารณาจากระบบทางวิ่งเดี่ยวตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง

ดัดแปลงจาก : Kulworawanichpong, 2003. (pp. Appendix : A-3)

จากรูปที่ 4.1 ระบบสายจ่ายเป็นแบบเฟสเดียวตัวนำจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นระบบชุดตัวนำ ประกอบด้วยสายตัวนำสัมผัส (Contact Wire) และสายเมสเซนเจอร์ (Messenger Wire) ระบบตัวนำนี้พิจารณาเป็นตัวนำสมมูลเพียงตัวเดียว คือ ค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิต (GMR: Geometric Mean Radius) เรียกตัวนำสมมูลนี้ว่า ตัวนำเคทีแนรี (C: Catenary)

รางวิ่ง (Running Rails) มี 2 รางรวมเป็น 1 ทางวิ่ง ทำหน้าที่รับกระแสไหลกลับ และนอกจากนี้ ทางวิ่งจะถูกวางบนโครงสร้างรองรับรางวิ่ง ปกติจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ด้วยความไม่สมบูรณ์ของวัสดุฉนวน จะเกิดกระแสรั่วไหลในปริมาณต่ำลงสู่พื้นดิน และโครงสร้างอาคารใกล้เคียง ในแบบจำลองใช้สมมติฐานให้กระแสรั่วไหลได้พื้นดินที่ระยะ D_E ในหน่วยเมตรโดยสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.1) และ (4.2) ค่าความต้านทานของสายตัวนำรางตัวนำ และรางวิ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (4.3) (ชนัดชัย กุลวรรณพงษ์, 2557)

$$D_E = 655 \sqrt{\frac{\rho_E}{f}} \quad (4.1)$$

$$\rho_E = 547f^{-0.434} \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ_E คือ สภาพต้านทานทางไฟฟ้าของดิน ($\Omega \cdot m$)

f คือ ความถี่ของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังที่ใช้งาน (Hz)

$$R_T = R_{20^\circ C} \{1 + \alpha(T - 20)\} \quad (4.3)$$

โดยที่ R_T คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T ใด ๆ

$R_{20^\circ C}$ คือ ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ $20^\circ C$

α คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ (3.8×10^{-3})

ค่าความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ตารางที่ 4.1 แสดงถึงความต้านทานของตัวนำในระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางตัวนำที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ และ $40^\circ C$ ทั้งในสภาพปกติ และสภาพของตัวนำที่มีการสึกกร่อน 20% และเมื่อพิจารณาตัวนำสมมูลที่เกิดจากสายตัวนำสัมผัสขนานกับสายเมสเซนเจอร์ได้ความต้านทานผลลัพธ์ สำหรับสาย

ตัวนำแคทีแนร์ดังตารางที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 20°C และ 40°C ทั้งในสภาพปกติ และสภาพของตัวนำที่มีการสึกกร่อน 20% ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานของรางวิ่งขนาดเกจต่าง ๆ ที่ใช้งานทั่วไป

ตารางที่ 4.1 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำใด ๆ ในหน่วย mΩ/km

conductor	A mm ²	R' at 20°C		R' at 40°C	
		new	20% worn	new	20% worn
Cu AC – 80	80	223	278	240	300
Cu AC – 100	100	179	223	193	240
Cu AC – 120	120	149	186	160	200
Cu AC – 150	150	119	149	128	160
Cu – 80	80	-	229	-	-
Cu – 100	100	-	183	-	-
Cu – 107	107	-	171	-	-
Cu – 120	120	-	153	-	-
Cu – 150	150	-	122	-	-
MW Cu	50 ¹⁾	360	-	390	-
MW Cu	70	271	-	292	-
MW Cu	95	191	-	206	-
MW Cu	120	153	-	165	-
MW Cu	150	121	-	131	-
MW Bz II	50 ¹⁾	561	-	605	-
MW Bz II	70	422	-	455	-
MW Bz II	95	298	-	321	-
MW Bz II	120	237	-	255	-
MW Bz II	150	189	-	204	-
Conductor rails					-
Soft iron	5.100	22.5	-	25.2	-
Soft iron	7.625	15.0	-	16.8	-
Composite ²⁾	5.100	6.8	-	7.3	-
Composite ²⁾	2.100	16.4	-	17.6	-
FL 243 – AL1	240	118	-	126	-
FL 625 – AL1	625	45	-	48	-
MW steel	50 ¹⁾	3 800	-	4 230	-

¹⁾ Seven – Strand

²⁾ Aluminum – Steel composite rail

AC contact wire, MW messenger wire and FL feeder line with reinforcing conductor

ตารางที่ 4.2 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำแคทีแนรีในหน่วย $m\Omega/km$

Overhead contact line configuration		Messenger wire cross – sectional area in mm^2									
Contact wire	Messenger wire	50		70		95		120		150	
		20 °C	40 °C	20 °C	40 °C	20 °C	40 °C	20 °C	40 °C	20 °C	40 °C
Cu AC - 100 ¹⁾	Bz II	136	147	126	135	112	121	102	110	92	99
Cu AC - 100 ¹⁾	Cu	119	129	108	116	92	100	82	89	72	78
Cu AC - 100 ²⁾	Bz II	160	172	146	157	128	137	115	124	102	110
Cu AC - 100 ²⁾	Cu	138	148	122	132	103	111	91	98	78	85
Cu AC - 120 ¹⁾	Bz II	118	127	110	119	99	107	91	99	83	90
Cu AC - 120 ¹⁾	Cu	105	114	96	104	84	90	75	81	67	72
Cu AC - 120 ²⁾	Bz II	140	151	129	139	115	123	104	112	94	101
Cu AC - 120 ²⁾	Cu	123	132	110	119	94	102	84	90	73	79
Cu AC - 150 ¹⁾	Bz II	98	106	93	100	85	92	79	85	73	79
Cu AC - 150 ¹⁾	Cu	89	96	83	89	73	79	67	72	60	65
Cu AC - 150 ²⁾	Bz II	118	127	110	118	99	107	92	98	83	90
Cu AC - 150 ²⁾	Cu	105	114	96	103	84	90	76	81	67	72
2Cu AC - 120 ¹⁾	Bz II	66	71	63	68	60	64	57	61	53	57
2Cu AC - 120 ¹⁾	Cu	62	67	68	63	54	58	50	54	46	50
2Cu AC - 120 ²⁾	Bz II	80	86	76	82	71	76	67	72	62	67
2Cu AC - 120 ²⁾	Cu	74	80	69	75	63	67	58	62	53	57
2Cu AC - 120 ¹⁾	2Bz II	59	63	55	59	50	54	46	49	42	45
2Cu AC - 120 ¹⁾	2Cu	53	57	48	52	42	45	38	41	33	36
2Cu AC - 120 ²⁾	2Bz II	70	75	65	70	57	62	52	56	47	51
2Cu AC - 120 ²⁾	2Cu	61	66	55	59	47	51	42	45	37	40

¹⁾ New contact wire

²⁾ Contact wire 20% worn

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งในหน่วย $m\Omega/km$

Rail type	m' (kg/m)	A (mm^2)	GMR (mm)	$R' m\Omega/km$	
				Wear 0%	Wear 15%
S 49	49.43	6297	44.77	35.7	42.0
R 50	50.50	6450	45.31	34.5	40.6
S 54	54.54	6948	47.03	32.0	37.6
UIC 54	54.40	6934	46.98	32.0	37.6
S 60	60.30	7650	49.35	28.9	34.0
UIC 60	60.34	7686	49.46	28.9	34.0
R 65	65.10	8288	51.36	25.2	29.9

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะมีผลของ ค่ารีแอคแตนซ์ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำด้วย ค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำจะขึ้นอยู่กับรูปแบบ และระยะห่างของการจัดวางตัวนำ ซึ่งมีค่าไม่แน่นอนจากรูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลเนรี และอิมพีแดนซ์ของรางวิ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_C = R'_C + j2\pi f \mu_0 \left(\frac{1}{8\pi} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D_{CE}}{GMR_C} \right) \quad (4.4)$$

$$Z_R = R'_R + j2\pi f \mu_0 \left(\frac{\mu_R}{8\pi} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{D_{RE}^2}{RG \times GMR_R} \right) \quad (4.5)$$

โดยที่ Z_C คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลเนรี (Ω/km)

Z_R คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของรางวิ่ง (Ω/km)

R'_C คือ ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำเคเบิลเนรี (ตารางที่ 4.1 หรือจากการคำนวณ)

R'_R คือ ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่ง (ตารางที่ 4.3 หรือจากการคำนวณ)

μ_0 คือ ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ

μ_R คือ ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กของรางวิ่ง

RG คือ ค่าระยะระหว่างราง

GMR_C คือ ค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิตของตัวนำเคเบิลเนรี

GMR_R คือ ค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิตของรางวิ่ง

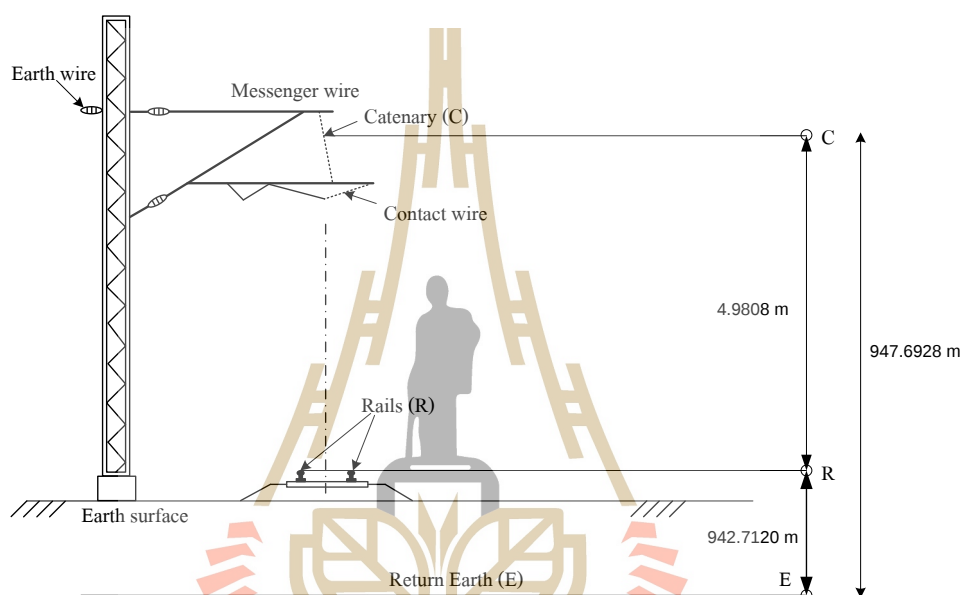
ข้อมูลระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่ใช้ในการคำนวณและทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

Contact wire: Cu 107mm² (20% abrasion)

Messenger wire: Bz 70mm²

Return Conductor: E-Al 120mm²

Rails: UIC 60, 15%



รูปที่ 4.2 ระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

จากข้อมูลระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง ของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่แสดงในรูปที่ 4.2 นำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคทีนรีจากสมการที่ (4.4) และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของค่าอิมพีแดนซ์ของรางวิ่ง จากสมการที่ (4.5) ดังวิธีการคำนวณต่อไปนี้

วิธีการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคทีนรี
ระบบไฟฟ้าในประเทศไทยมีความถี่ 50 Hz

$$\rho_E = 547f^{-0.434} = 100.145 \Omega\text{m}$$

$$D_E = 655 \sqrt{\frac{\rho_E}{f}} = 926.980 \text{ m}$$

คำนวณระยะ D_{RE} คือ ระยะระหว่าง D_E โครงสร้างทางยกระดับ หรือตอม่อ ไวอะดักท (Viaduct) และความสูงของราง

$$D_{RE} = 942.712 \text{ m}$$

คำนวณค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิตของตัวนำแคทีแนรี

$$\text{Contact wire: Cu } 107\text{mm}^2 \quad GMR_{C1} = 0.7788 \sqrt{\frac{107}{\pi}} = 4.540 \text{ mm}$$

$$\text{Messenger wire: Bz } 70\text{mm}^2 \quad GMR_{C2} = 0.7788 \sqrt{\frac{70}{\pi}} = 3.670 \text{ mm}$$

$$GMR_C = \sqrt[4]{GMR_{C1} \times D_{CM}^2 \times GMR_{C2}} = 80.800 \text{ mm}$$

ความสูงเฉลี่ยจากพื้นถึงตัวนำสมมูลแคทีแนรีจะเป็น 4.980 m

คำนวณระยะ D_{CE} คือ ระยะระหว่าง D_{RE} กับความสูงเฉลี่ยจากพื้นถึงตัวนำสมมูลแคทีแนรี
ดังนั้น $D_{CE} = 947.693 \text{ m}$

จากสมการที่ (4.4) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายแคทีแนรีดังตารางที่ 4.4

วิธีการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของรางวิ่ง

ค่าระยะระหว่างราง $RG = 1.435 \text{ m}$

คำนวณค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิตของรางวิ่ง

$$\text{Rails: UIC 60, 15\%} \quad GMR_{R1} = GMR_{R2} = 0.7788 \sqrt{\frac{7686}{\pi}} = 38.520 \text{ mm}$$

$$GMR_R = \sqrt[4]{GMR_{R1}^2 \times RG^2} = 0.235 \text{ m}$$

ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กของรางวิ่งเท่า 450

จากสมการที่ (4.5) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของรางวิ่งดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคทินารีและรางวิ่ง

Model parameter	
Catenary	$0.184 + j0.604 \ \Omega/\text{km}$
Running rails	$0.37 + j8.926 \ \Omega/\text{km}$

สำหรับแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต มีส่วนของสายฟีดเดอร์ เพื่อใช้ทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบวงจรบริดจ์ และแบบรูปคลื่นตา ดังรูปที่ 4.3 ส่วนโครงสร้างอื่น ๆ เช่น สายตัวนำสัมผัส สายเมสเซนเจอร์ รางวิ่ง และระยะห่างต่าง ๆ มีค่าเท่ากับแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรงของรถไฟฟ้า โดยแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต ได้เลือกสายฟีดเดอร์แบบ FL 243-AL1 ในตารางที่ตารางที่ 4.1 และระยะความสูงจากสายเมสเซนเจอร์ถึงสายฟีดเดอร์ออกแบบเป็นระยะความสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร (Junqi, 2014) โดยที่อิมพีแดนซ์ของสายฟีดเดอร์คำนวณได้จาก สมการต่อไปนี้

$$Z_F = R'_F + j2\pi f \mu_0 \left(\frac{1}{8\pi} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D_{FE}}{r_F} \right) \quad (4.6)$$

โดยที่ Z_F คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายฟีดเดอร์ (Ω/km)

R'_F คือ ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของสายฟีดเดอร์ (ตารางที่ 4.1)

μ_0 คือ ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ

r_F คือ ค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิตของสายฟีดเดอร์

วิธีการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของสายฟีดเดอร์

จากการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของสายเคทินารีและรางวิ่ง

จะได้

$$D_{RE} = 942.712 \text{ m}$$

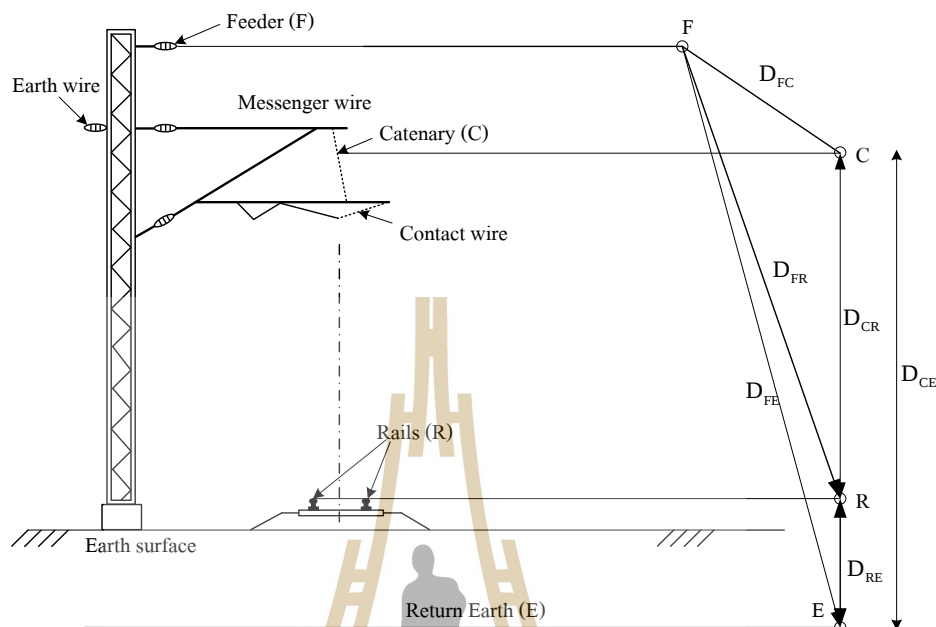
คำนวณหา ระยะห่างจากตำแหน่งสายฟีดเดอร์กับตำแหน่งกระแสรั่วไหลใต้พื้นดิน

$$D_{FE} = D_{FR} + D_{RE} = 949.412 \text{ m}$$

คำนวณค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิตของตัวนำเคทินารี โดยใช้สายฟีดเดอร์แบบ FL 243-AL1

$$\text{Feeder wire: FL 243-AL} \quad r_F = \sqrt{\frac{240}{\pi}} = 8.740 \text{ mm}$$

แทนค่าที่ได้มาลงในสมการที่ 4.6 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายฟีดเดอร์ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต

ดัดแปลงจาก : Kulworawanichpong, 2003. (pp. Appendix : A-3)

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลรางวิ่ง รางวิ่ง และสายฟีดเดอร์

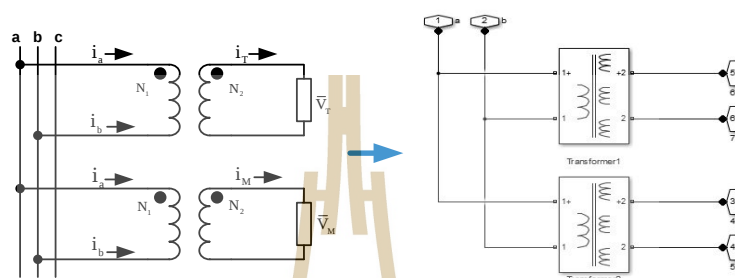
Model parameter	
Catenary	$0.184 + j0.604 \text{ } \Omega/\text{km}$
Running rails	$0.37 + j8.926 \text{ } \Omega/\text{km}$
Feeder	$0.126 + j0.744 \text{ } \Omega/\text{km}$

4.2.2 แบบจำลองหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัด

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้้นำแบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัดแบบต่าง ๆ คือ แบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา มาทดสอบกับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในขับเคลื่อนที่สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัด และความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า โดยแบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดลัดแบบต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิกมี โครงสร้างดังรูปต่อไปนี้

1) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบเฟสเดียว (Single-phase connection model)

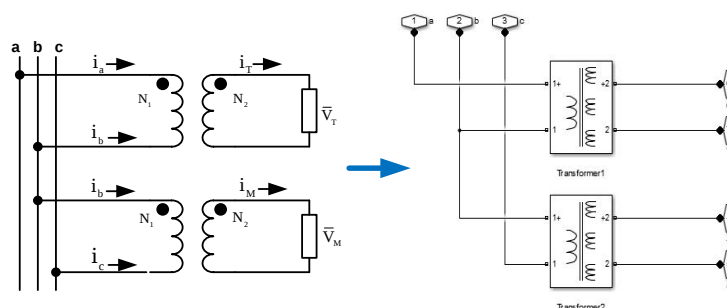
การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบเฟสเดียว คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ลูก แต่ละลูกมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อกับคู่เฟสเดียวกัน คือ คู่เฟส a-b ส่วน $\bar{V}_M$ คือ โหลดแรงดันฝั่ง Main และ $\bar{V}_T$ คือ โหลดแรงดันฝั่ง Teaser ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบเฟสเดียว
ในแมทแลปซิมมูลิก

2) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบสลับคู่เฟส (Cyclic winding connection model)

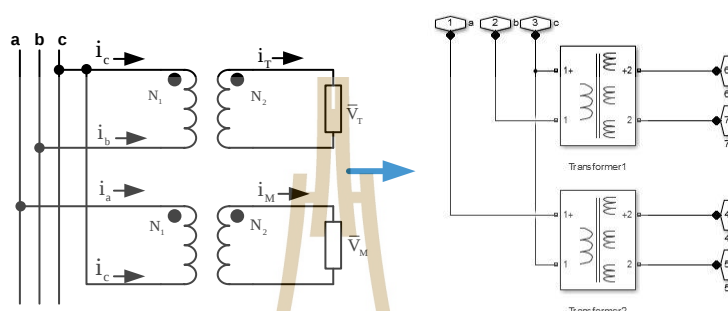
การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบสลับคู่เฟส คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ลูก แต่ละลูกมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อสลับคู่เฟสกัน คือ ลูกที่ 1 คู่เฟส a-b และลูกที่ 2 คู่เฟส b-c และในปัจจุบันระบบไฟฟ้าแอร์พอร์ตรেলลิงก์ ใช้การต่อหม้อแปลงแบบสลับคู่เฟสติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบสลับคู่เฟส
ในแมทแลปซิมมูลิก

3) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี (V – connection model)

การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ลูก แต่ละลูกมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อสลับคู่เฟสกันคือ ลูกที่ 1 คู่เฟส c-b และลูกที่ 2 คู่เฟส a-c หรือต่อแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน ดังรูปที่ 4.6



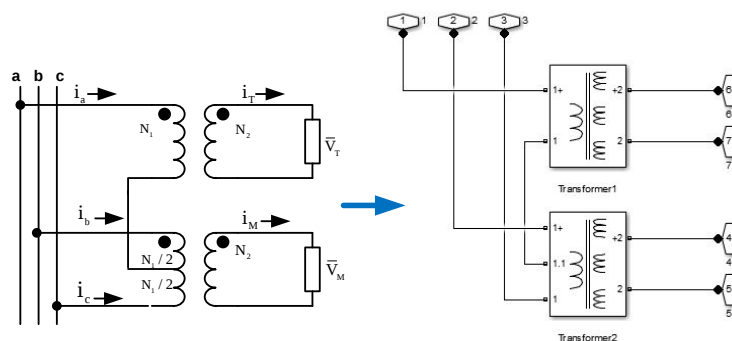
รูปที่ 4.6 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวี
ในเมทแลปซิมมูลิก

4) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ (Scott connection model)

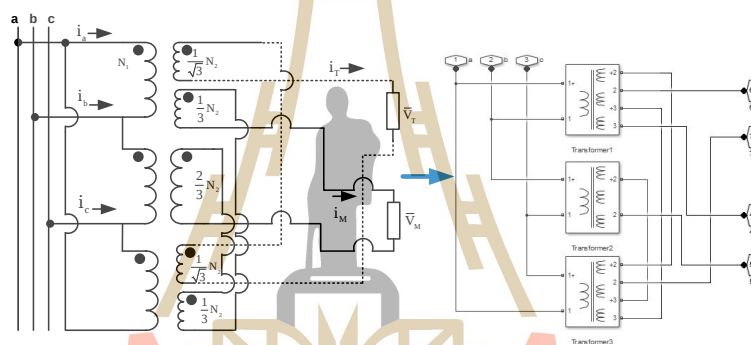
การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์ คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ลูก แต่ละลูกมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด แต่หม้อแปลงด้านปฐมภูมิฝั่งโหลดแรงดัน Main จะเป็นหม้อแปลงชนิดพิเศษแบบมีแท่งกลาง ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงลูกที่ 1 ต่อกับเฟส a และแท่งกลาง ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงลูกที่ 2 และด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงลูกที่ 2 ต่อกับคู่เฟส b-c ดังรูปที่ 4.7

5) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเลอบลองก์ (LeBlanc connection model)

การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเลอบลองก์ คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก แต่ละลูกจะมีจำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิไม่เท่ากัน ด้านปฐมภูมิต่อแบบเดลตา ส่วนด้านทุติยภูมิมีการเชื่อมต่อที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 4.8



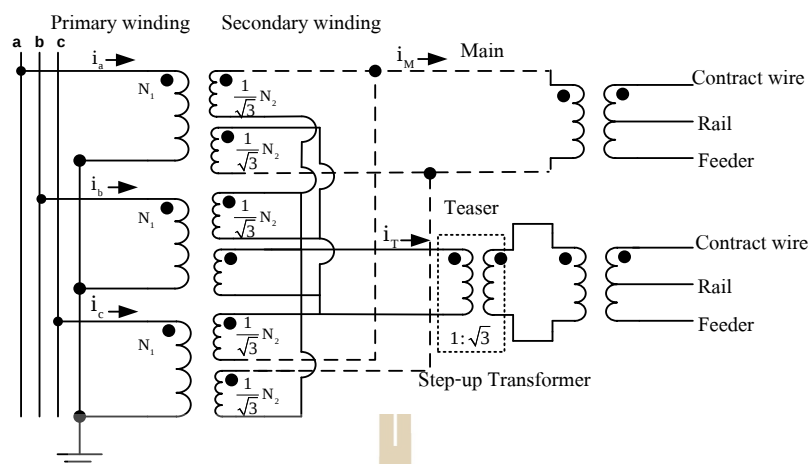
รูปที่ 4.7 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสกอตต์
ในแมทแลปซิมมูลิก



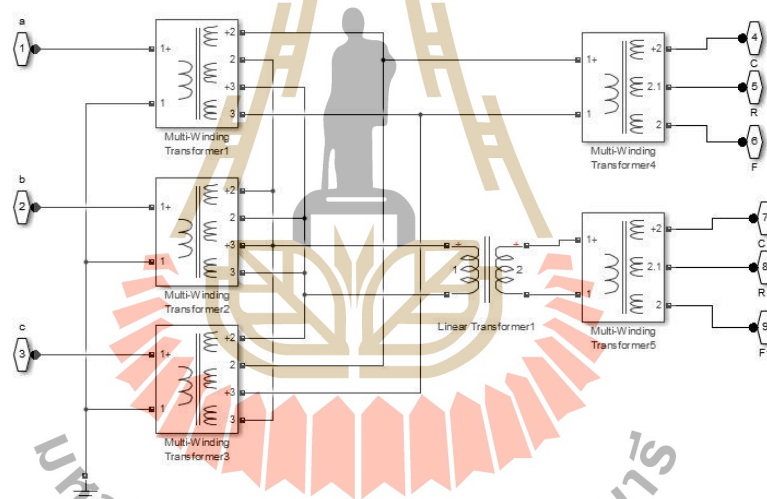
รูปที่ 4.8 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเลอบลองก์
ในแมทแลปซิมมูลิก

6) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์
(Modified Wood - bridge connection model)

การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก แต่ละลูกจะมีจำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติภูมิ 2 ขด ด้านปฐมภูมิต่อแบบวาย รับกำลังไฟฟ้าระดับไฟฟ้าแรงสูงเอกซ์ตรา (230 kV) และเชื่อมต่อจุดกลางลงกราวด์ (ground) ส่วน ด้านทุติภูมิมีการเชื่อมต่อแบบเดลตา แยกเป็นสองเฟส คือ Main และ Teaser โดยที่เฟส Teaser จะมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงที่ปรับระดับแรงดันขึ้น 1 ต่อ $\sqrt{3}$ และทั้งสองเฟสเชื่อมต่อกับหม้อแปลงออโต เพื่อจ่ายให้กับระบบรถไฟต่อไป ดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงแบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ในแมทแลปซิมมูลิก



รูปที่ 4.9 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์

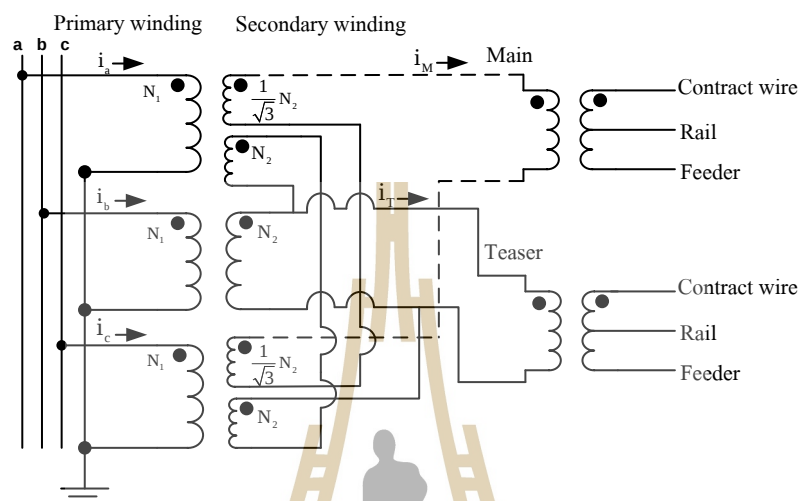


รูปที่ 4.10 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์
ในเมทแลปซิมมุลิงก์

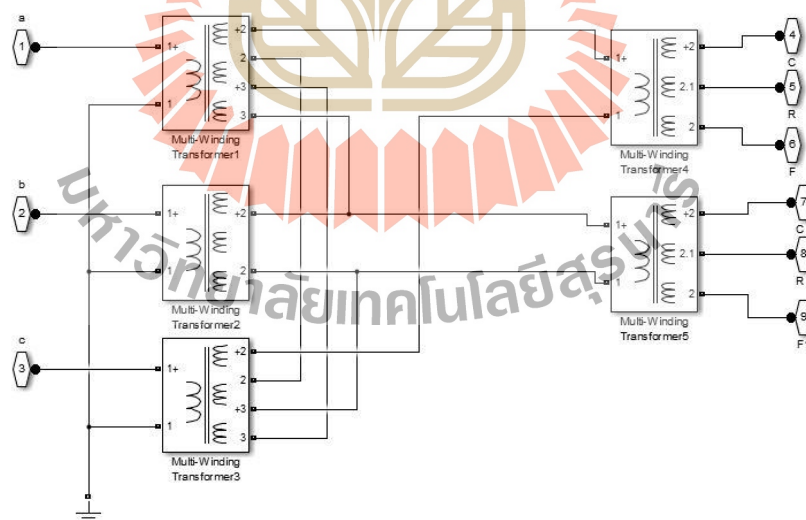
7) แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา (Roof - Delta connection model)

การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก โดย 2 ลูกจะมีจำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 2 ขด และปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อแบบวายรับกำลังไฟฟ้าระดับไฟฟ้าแรงสูงเอกซ์ตรา (230 kV) และเชื่อมต่อจุดกลางลงกราวด์ (ground) ส่วนด้านทุติยภูมิแยกเฟสออกเป็น 2 เฟส คือ Main และ Teaser

โดยที่เฟส Main มีการเชื่อมต่อขดลวดแบบวิกว่า หรือแบบหลังคาบ้าน และเฟส Teaser มีการเชื่อมต่อขดลวดแบบเดลตา ดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงแบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตาในเมทแลปซิมมูลิก



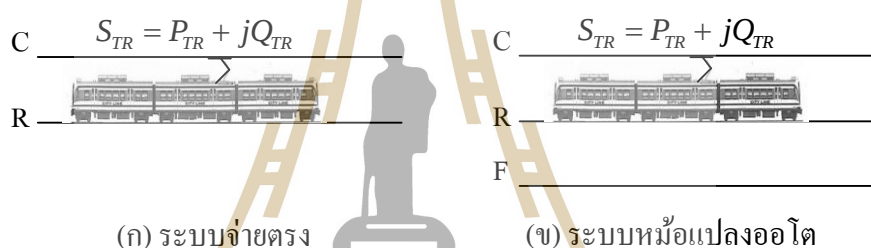
รูปที่ 4.11 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา



รูปที่ 4.12 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบรูปเดลตา
ในเมทแลปซิมมูลิก

4.2.3 แบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า

โครงสร้างแบบจำลองของขบวนรถไฟฟ้าได้ถูกนำมาวิเคราะห์ และพิจารณาในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบรางรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบระบบจ่ายตรง และระบบหม้อแปลงออตโต โครงสร้างแบบจำลองขบวนรถไฟฟ้าทั้งสองแบบสามารถดูได้ดังรูปที่ 4.13 โดยที่แบบจำลองขบวนรถไฟฟ้าคิดเป็นวงจรสมมูล โครงสร้างกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S: Apparent power) ได้จากผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง (P: Active power) กับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q: Reactive power) ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองระบบรางรถไฟฟ้าในโปรแกรมเมทแลปซิมมูลิงก์ และใช้ทดสอบระบบรางรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์แบบทางคู่ (สุภชัย แก้วพวง, 2559)



รูปที่ 4.13 วงจรสมมูลโครงสร้างกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

4.2.4 การคำนวณโหลดศูนย์ข้อมบารุงรถไฟฟ้า

การคำนวณโหลดของศูนย์ข้อมบารุงรถไฟฟ้าคำนวณจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ศูนย์ข้อมบารุงรถไฟฟ้าใช้ในเดือนกรกฎาคมจากข้อมูลเชิงสถิติและเปรียบเทียบหน่วยการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าในการเดินรถประจำปี พ.ศ. 2557 (Suvannabhumi Airport Rail Link, 2010) ได้ 215,000 kWh ในเดือนกรกฎาคมมี 31 วัน คิดเป็นชั่วโมงจะได้เท่ากับ 744 ชั่วโมง ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 289 kW จากนั้นทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏคิดเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) เป็น 0.85 จะได้กำลังไฟฟ้าปรากฏเท่ากับ 340 kVA สุดท้ายจะได้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 179 kVAR

4.2.5 การปรับค่าความเร็วและตำแหน่งของรถไฟ

การปรับค่าความเร็วและตำแหน่งของรถไฟเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ทราบว่ารไฟฟฟายู่ที่ตำแหน่งไหนของรางรถไฟ ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาการปรับค่าความเร็วและตำแหน่งของ

รถไฟในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจ่ายไฟให้กับรางรถไฟที่ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบต่าง ๆ เพื่อนำไปจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟในโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงก์ และใช้ในการทดสอบระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ สำหรับการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยการปรับความเร็วและตำแหน่งของรถไฟสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1) ใช้ค่าความเร็วของรถไฟ และความเร่งที่ตำแหน่งปัจจุบันมาคำนวณหาแรงจลน์ของรถไฟตามสมการที่ (3.10) และคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการขับเคลื่อนตามสมการที่ (3.14)

2) คำนวณหาค่าแรงเกรเดียนต์ตามสมการที่ (3.11) คำนวณหาแรงเสียดทานของรถไฟตามสมการที่ (3.13) และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของน้ำหนักรถไฟฟ้าตามสมการที่ (3.12)

3) จากนั้นคำนวณหาความเร็วและตำแหน่งของรถไฟในขั้นตอนต่อไป จะต้องทำการคำนวณใหม่ทุกรอบการทำงานของโปรแกรม ดังสมการที่ (4.7) และสมการที่ (4.8)

$$v_{i+1} = v_i + \alpha \Delta t \quad (4.7)$$

$$s_{i+1} = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (4.8)$$

โดยที่ v_{i+1} และ v_i คือ ความเร็วของรอบปัจจุบัน และความเร็วของรอบก่อนหน้า
 Δt คือ ระยะเวลาสำหรับการคำนวณหนึ่งรอบ (time step)
 s_{i+1} และ s_i คือ ตำแหน่งปัจจุบัน และตำแหน่งรอบก่อนหน้า

4.3 การพัฒนาโปรแกรมแมทแล็บสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

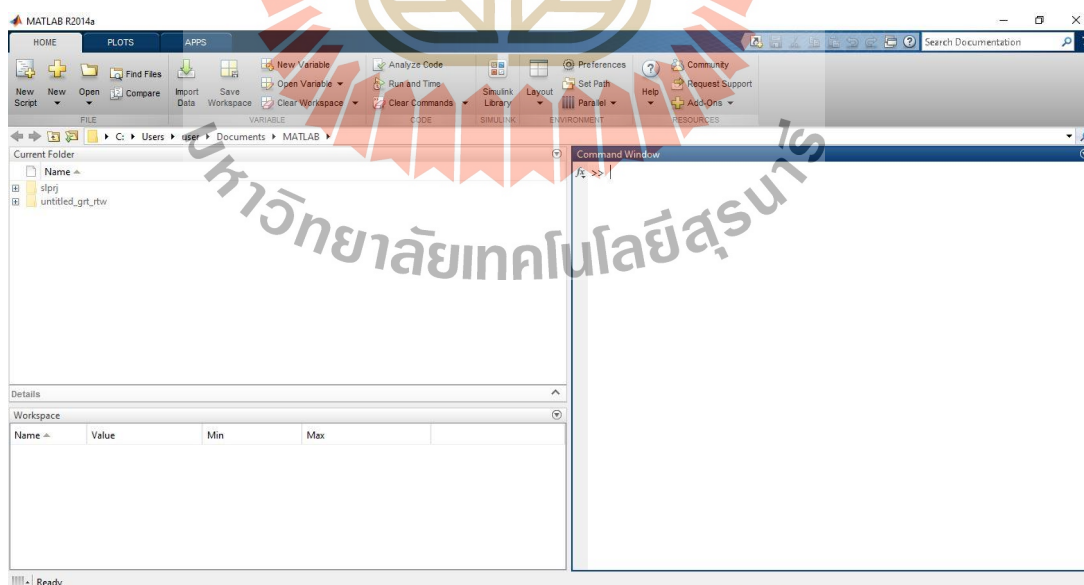
การพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ได้ พิจารณาการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับของระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงก์ในการสร้างแบบจำลองของระบบมีองค์ประกอบ 6 ส่วนหลัก ได้แก่ แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง แบบจำลองขบวนรถไฟ แบบจำลอง

ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า และการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ในการจำลองระบบ ใช้โปรแกรม MATLAB (MATLAB R2014a) และคอมพิวเตอร์ Intel CORE i5 inside, 2.8 GHz, 4 GB

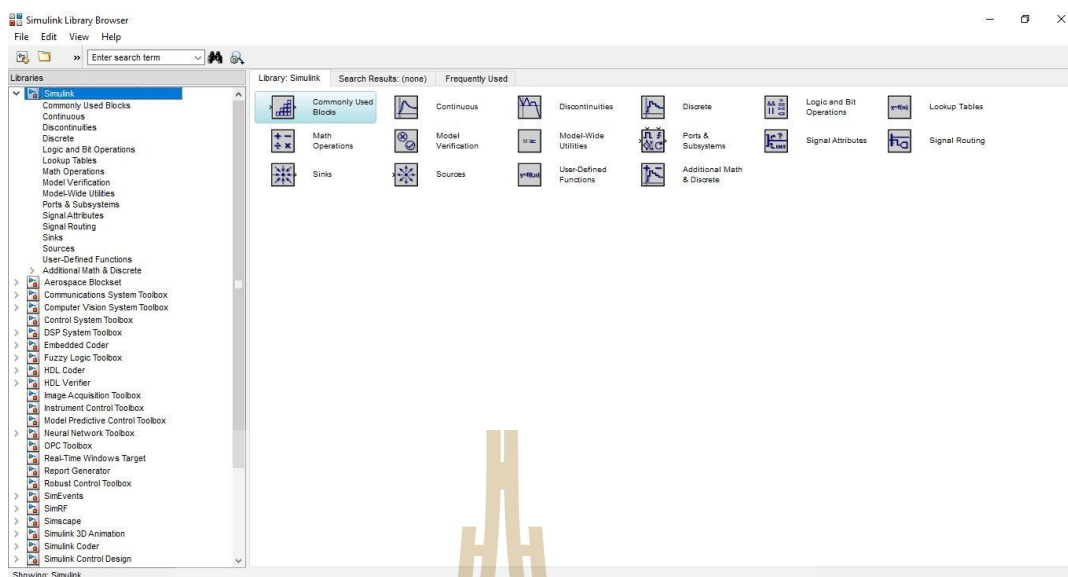
4.3.1 การพัฒนาโปรแกรมแม่แบบของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ

การพัฒนาโปรแกรมแม่แบบของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ เพื่อจำลองทำหน้าที่แทนระบบจ่าย กำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส 69 kV ดังแผนผังระบบ จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังรูปที่ 3.8 และติดตั้งในส่วน of เครื่องมือวัดค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า อีกด้วย ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมแม่แบบเชิงมูลติกร มีขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ ในการสร้าง แบบจำลอง ดังนี้

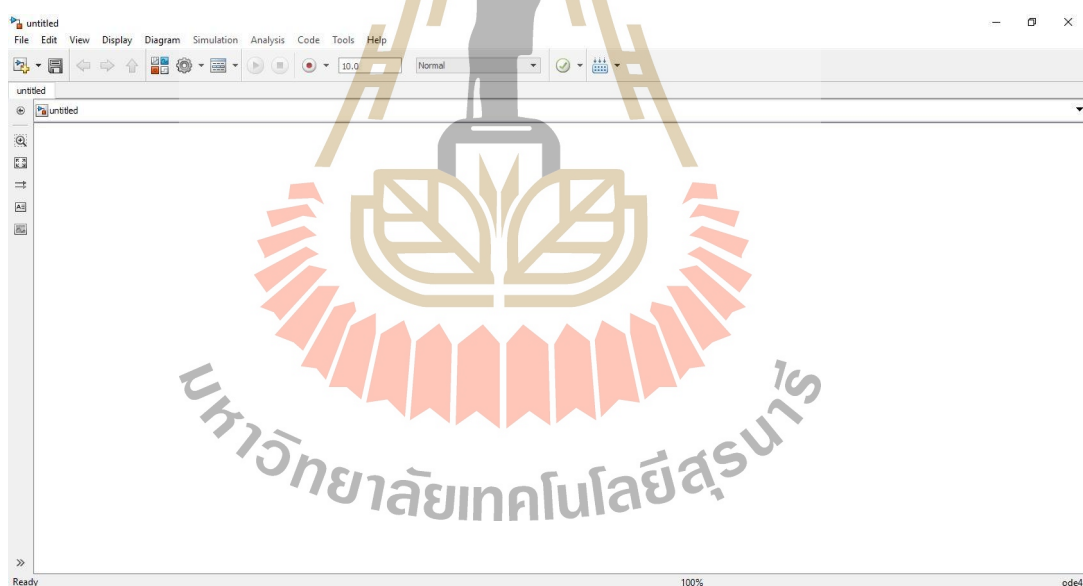
- 1) เปิดโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 4.14 หลังจากนั้นให้คลิกที่ Simulink Library เพื่อเรียกใช้ Simulink Library Browser แสดงในรูปที่ 4.15
- 2) ใน Simulink Library Browser เลือกเมนู File -> New -> Model หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + N) เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ลงใน untitled (สามารถเปลี่ยนชื่อได้) แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 โปรแกรม MATLAB

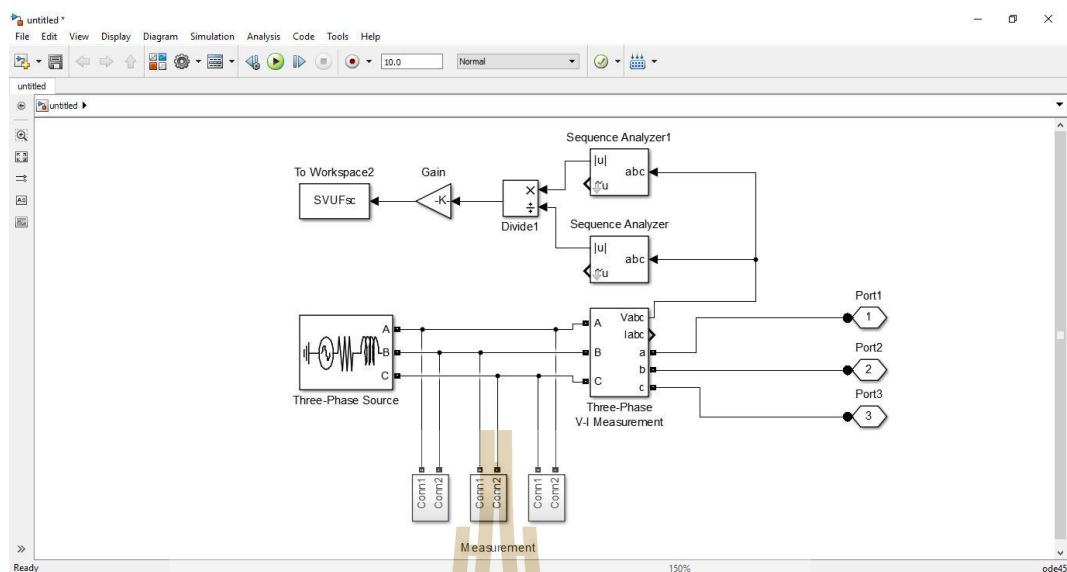


รูปที่ 4.15 Simulink Library Browser

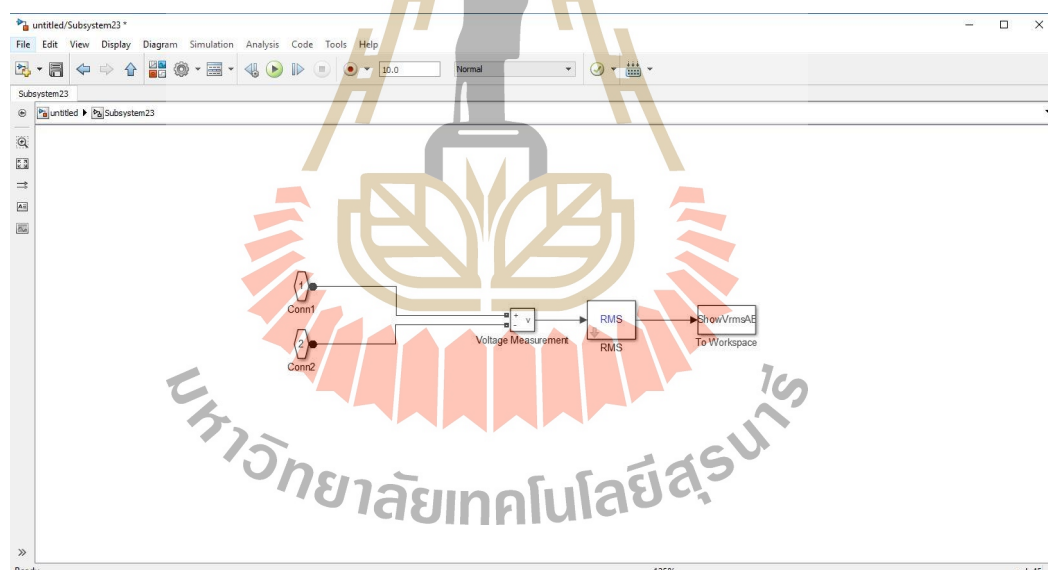


รูปที่ 4.16 untitled file

3) สร้างแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับลงใน untitled file แสดงในรูปที่ 4.17 โดยประกอบไปด้วยหลัก ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส และเครื่องมือวัดแสดงในรูปที่ 4.18 แบบจำลองนำมาจาก Simulink Library Browser แสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.17 แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในไฟล์ untitled



รูปที่ 4.18 แบบจำลองเครื่องมือวัดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 4.6 ส่วนประกอบของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

ส่วนประกอบของแบบจำลอง	Simulink Library Browser
Three-Phase Source	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Electrical Sources

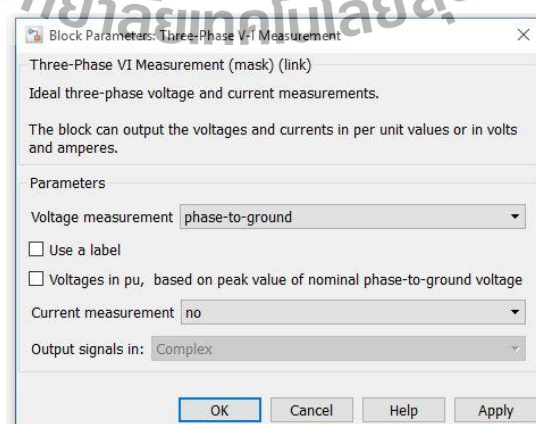
ตารางที่ 4.6 ส่วนประกอบของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ (ต่อ)

Three-Phase V-I Measurement and Voltage Measurement	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology-> Measurements
Sequence Analyzer and RMS	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Control and Measurements Library>Measurements
Divide	Simulink-> Math Operation
Gain	Simulink-> Commonly Used Blocks
To Workspace	Simulink-> Sinks
Port1, Port2, Port3 Conn1 and Conn2	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Elements->Connection Port

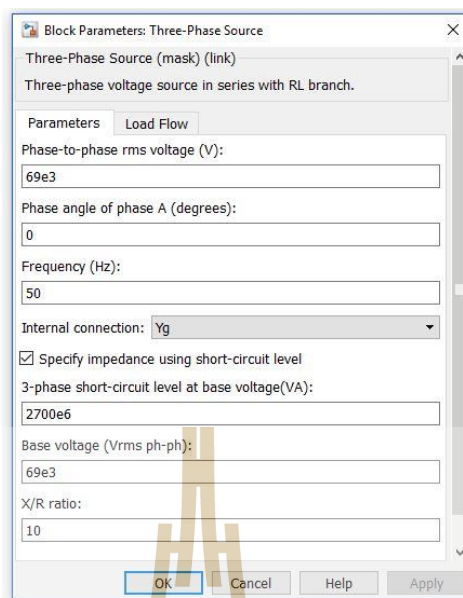
4) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของส่วนประกอบ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

- กำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของ Three-Phase Source โดยมีค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเท่ากับ 69 kV ความถี่ที่ใช้ คือ 50 Hz ตามระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ในหัวข้อที่ 3.2.3 แสดงในรูปที่ 4.20

- กำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของ Three-Phase V-I Measurement แสดงในรูปที่ 4.19 โดยกำหนด Voltage measurement ให้เป็น phase to ground และ Current measurement เป็น no

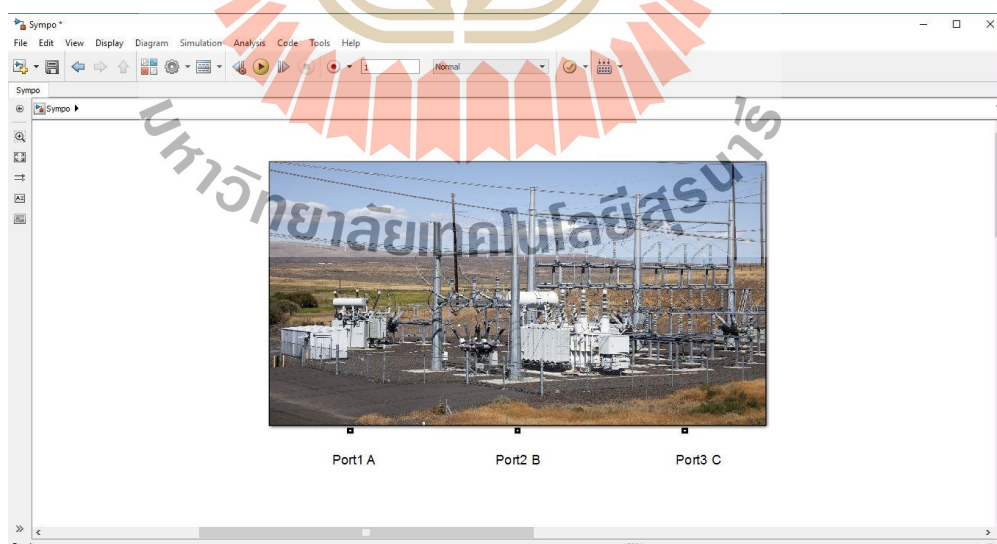


รูปที่ 4.19 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Three-Phase V-I Measurement



รูปที่ 4.20 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Three-Phase Source

5) Create Subsystem from Selection หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + G) เพื่อสร้างแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับจากนั้น Create Mask หรือจะใช้คำสั่ง (Ctrl + M) เพื่อแสดงภาพตัวอย่างแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในเมทแลปซิมมุลิงก์

4.3.2 การพัฒนาโปรแกรมเมทแลปของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า

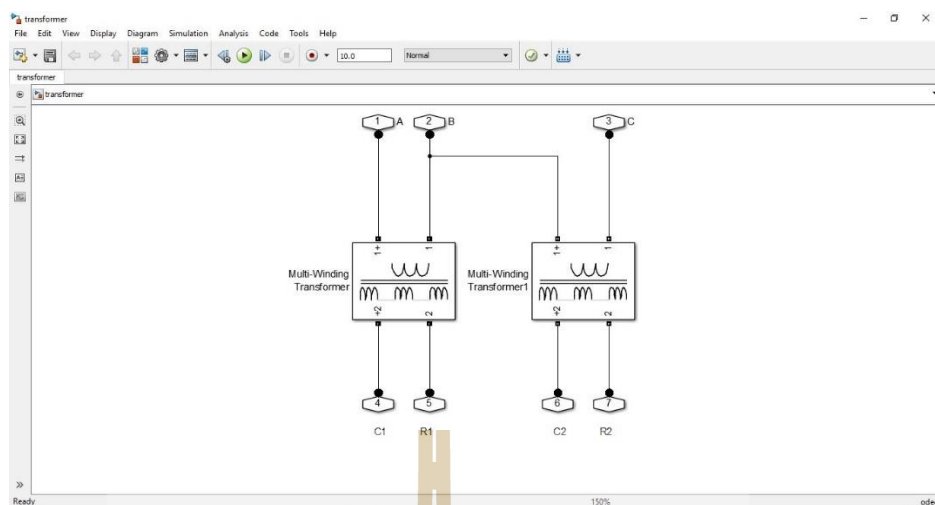
การพัฒนาโปรแกรมเมทแลปของ แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง (การพัฒนาโปรแกรมเมทแลปของแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในหัวข้อที่ 4.3.1) แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 69 kV เป็น 27.5 kV เพื่อจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้า และศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า โดยได้ทำการพัฒนาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ โดยใช้โปรแกรมเมทแลปซิมูลิงก์ในการจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดล ตามลักษณะโครงสร้างการเชื่อมต่อ สามารถดูได้จากแบบจำลองหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ หัวข้อที่ 4.2.2 ในการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในเมทแลปซิมูลิงก์มี ขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองดังนี้

1) เปิดโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 4.14 หลังจากนั้นให้คลิกที่ Simulink Library เพื่อเรียกใช้ Simulink Library Browser แสดงในรูปที่ 4.15

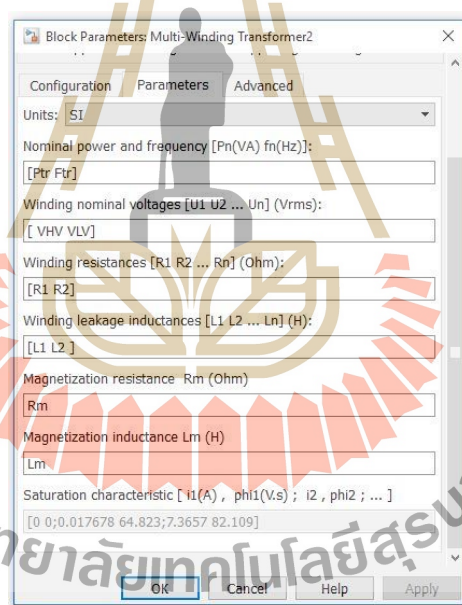
2) ใน Simulink Library Browser เลือกเมนู File -> New -> Model หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + N) เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ลงใน untitled (สามารถเปลี่ยนชื่อได้ในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เป็น transformer) แสดงในรูปที่ 4.16

3) สร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าใน transformer (New Model) แสดงในรูปที่ 4.22 โดยประกอบไปด้วยบล็อก Multi-Winding Transformer เชื่อมต่อในรูปแบบต่าง ๆ (หัวข้อที่ 4.2.2) ตามลำดับ

- สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส และแบบวี กำหนดอัตราส่วนของจำนวนขดลวดเป็น 1:1 โดยบล็อก Multi-Winding Transformer นำมาจาก Simulink Library Browser->Simscape->SimPowerSystem->Specialized Technology->Elements ตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.23 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.22 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าในไฟล์ transformer



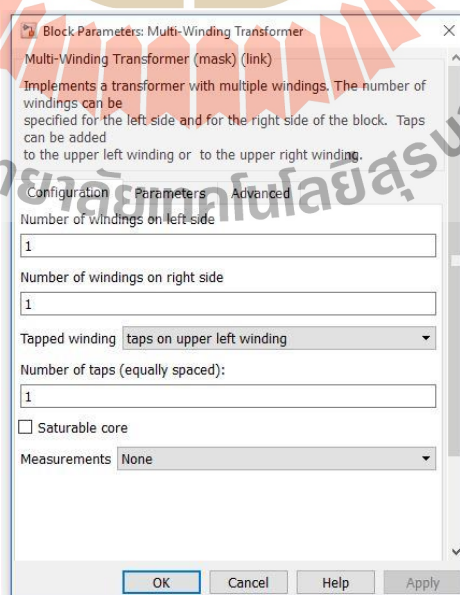
รูปที่ 4.23 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า

- สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสกอตต์ กำหนดอัตราส่วนของจำนวนขดลวดเป็น 1 : 1 แต่มีแท็ปกลางอยู่ในบล็อก Multi-Winding Transformer ตั้งแท็ปกลางที่ Tapped winding ให้เป็น taps on upper left winding ให้ Number of taps เป็น 1 ตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.24 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.7

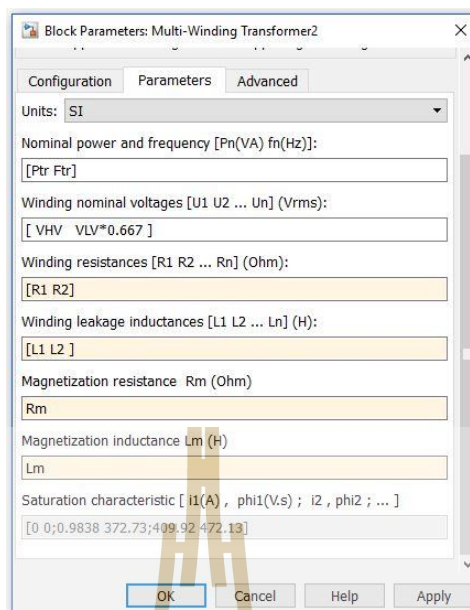
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า

ตัวแปรค่าพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
กำลังไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า (P_{tr})	20 MVA
ความถี่หม้อแปลงไฟฟ้า (F_{tr})	50 Hz
แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (VHV)	69 kV
แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (VLV)	27.5 kV
ความต้านทานหม้อแปลงไฟฟ้า 1 (R_1)	13.8 m Ω
ความต้านทานหม้อแปลงไฟฟ้า 2 (R_2)	0.1 m Ω
ความต้านทานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 (R_3)	0.1 m Ω
ความเหนี่ยวนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 (L_1)	90 mH
ความเหนี่ยวนำหม้อแปลงไฟฟ้า 2 (L_2)	14.4 mH
ความเหนี่ยวนำหม้อแปลงไฟฟ้า 3 (L_3)	14.4 mH

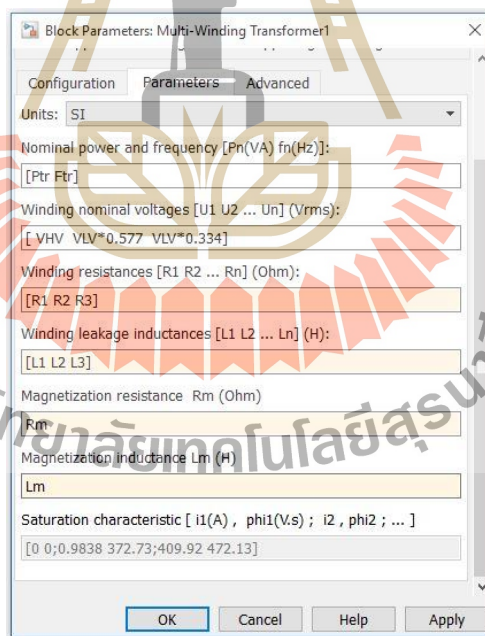
- สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองก์ ใช้บล็อก Multi-Winding Transformer สามบล็อก ให้มีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดเป็น 1 : 1 การตั้งค่าพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 4.25 อยู่หนึ่งบล็อก อีกสองบล็อกนั้นให้มีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดเป็น 1 : 2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.26 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.24 การตั้งแท็ปกลางของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า



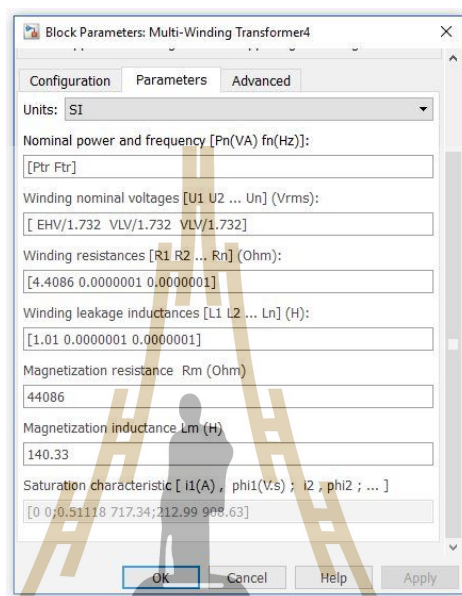
รูปที่ 4.25 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วนขดลวด 1 : 1



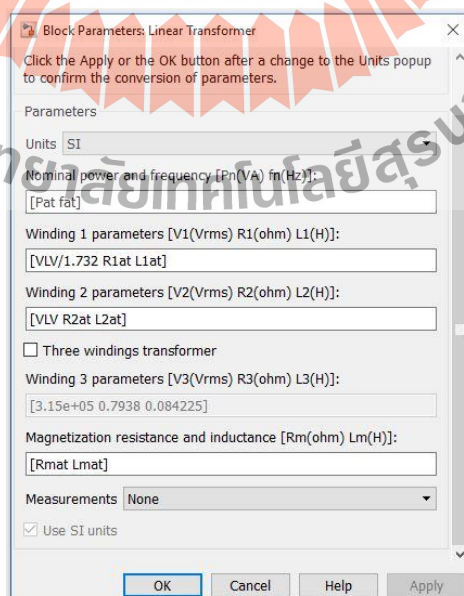
รูปที่ 4.26 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วนขดลวด 1 : 2

- สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบชุดบริดจ์ ใช้บล็อก Multi-Winding Transformer สามบล็อกมีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทั้ง 3 บล็อกเป็น 1 : 2 มีการตั้งค่าพารามิเตอร์

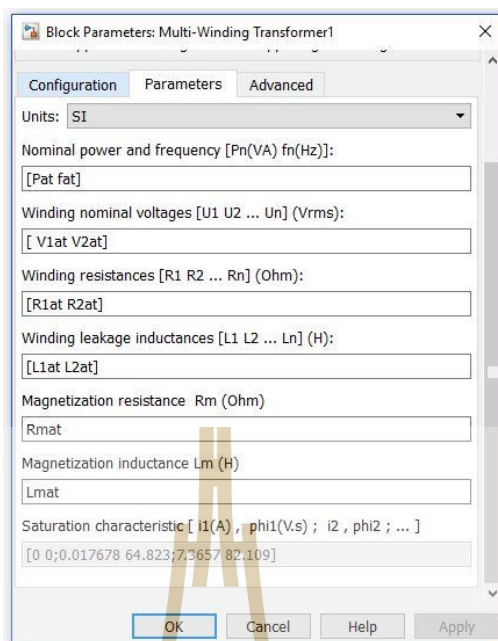
ดังแสดงในรูปที่ 4.27 มีบล็อก Linear Transformer ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้ามีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และมีบล็อก Multi-Winding Transformer สองบล็อกทำหน้าที่เป็นหม้อแปลงออโตมีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทั้ง 2 บล็อกเป็น 1 : 1 มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.27 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวงจร



รูปที่ 4.28 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันขึ้น

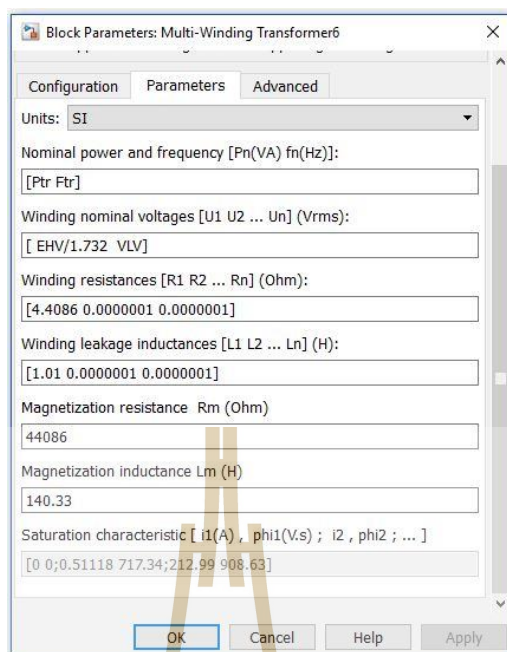


รูปที่ 4.29 การตั้งค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงออโต

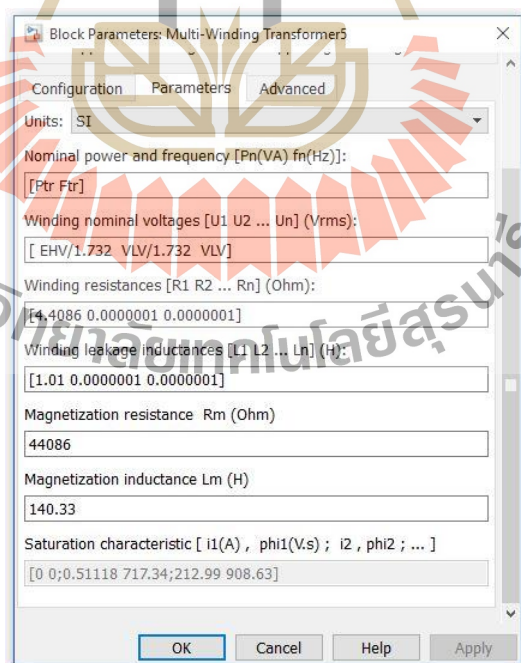
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวงจรบริจ และแบบรูปเดลตา

ตัวแปรค่าพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
กำลังไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าออโต (Pat)	10 MVA
ความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าออโต (Fat)	50 Hz
แรงดันไฟฟ้าสูงเอ็กตรา (EHV)	230 kV
แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (VLV)	55 kV
แรงดันไฟฟ้าหม้อแปลงออโต (V1at, V2at)	27.5 kV
ความต้านทานหม้อแปลงไฟฟ้าออโต (R1at, R2at)	0.156 Ω
ความเหนี่ยวนำหม้อแปลงไฟฟ้าออโต (L1at, L2at)	0.317 mH

- สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูปเดลตา ใช้บล็อก Multi-Winding Transformer สามบล็อก โดยมีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดเป็น 1 : 1 มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.30 อยู่บล็อกเดียวกันนอกนั้นมีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดเป็น 1 : 2 มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และมีบล็อก Multi-Winding Transformer สองบล็อกทำหน้าที่เป็นหม้อแปลงออโตมีอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทั้ง 2 บล็อกเป็น 1 : 1 มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.8

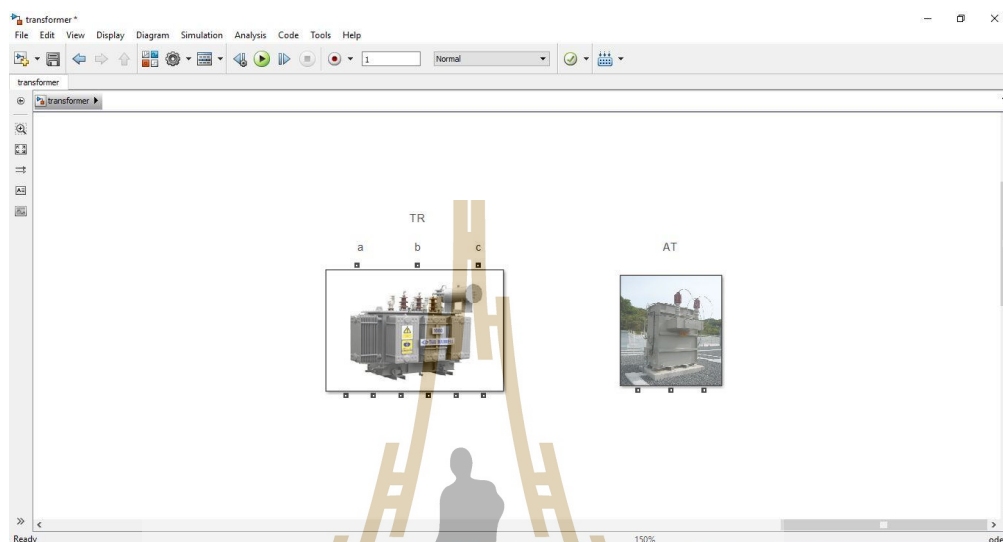


รูปที่ 4.30 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูปเดลตา
อัตราส่วนขดลวด 1 : 1



รูปที่ 4.31 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูปเดลตา
อัตราส่วนขดลวด 1 : 2

4) Create Subsystem from Selection หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + G) เพื่อสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า และหม้อแปลงออกโตจากนั้น Create Mask หรือจะใช้คำสั่ง (Ctrl + M) เพื่อแสดงภาพตัวอย่างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าในแมทแลปซิมมูลิงก์

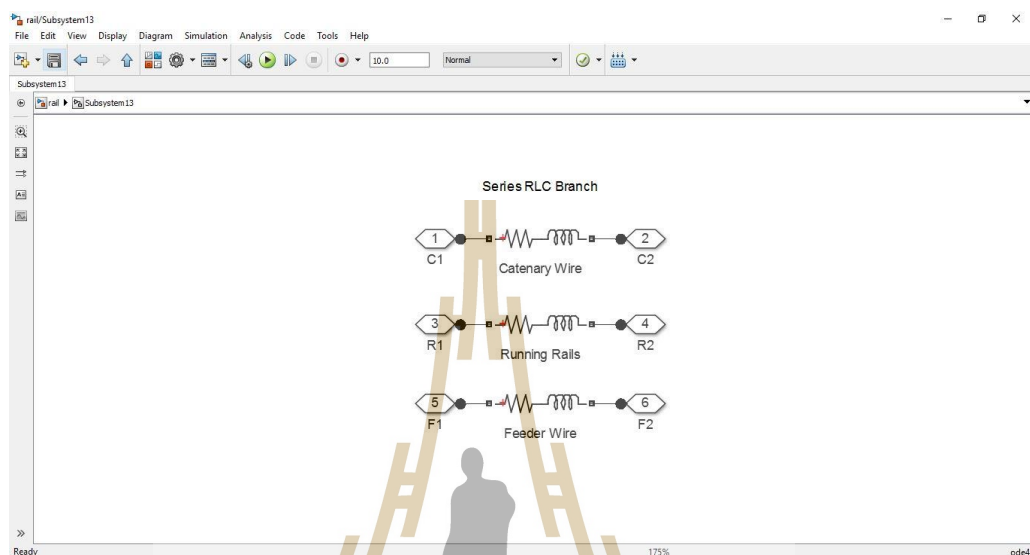
4.3.3 การพัฒนาโปรแกรมแมทแลปของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง

แบบจำลองของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง สำหรับระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ มีแบบจำลองของระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรงดังรูปที่ 4.1 และแบบจำลองของระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโตรูปที่ 4.3 นำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมแมทแลปซิมมูลิงก์ มีพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2.1 ใช้ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองระบบแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 มีขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองดังนี้

1) เปิดโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 4.14 หลังจากนั้นให้คลิกที่ Simulink Library เพื่อเรียกใช้ Simulink Library Browser แสดงในรูปที่ 4.15

2) ใน Simulink Library Browser เลือกเมนู File -> New -> Model หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + N) เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ลงใน untitled (สามารถเปลี่ยนชื่อได้ในส่วนของแบบจำลองของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งให้เป็น rail) แสดงในรูปที่ 4.16

3) สร้างแบบจำลองของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งใน rail file แสดงในรูปที่ 4.33 โดยส่วนประกอบของแบบจำลองนำมาจาก Simulink Library Browser แสดงในตารางที่ 4.9



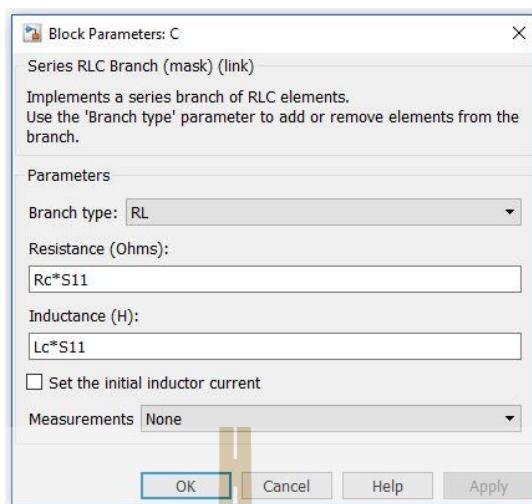
รูปที่ 4.33 แบบจำลองของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งใน rail file

ตารางที่ 4.9 ส่วนประกอบของแบบจำลองสายจ่ายไฟเหนือตัวรถไฟและรางวิ่ง

ส่วนประกอบของแบบจำลอง	Simulink Library Browser
Series RLC Branch	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Elements
C1, R1, F1, C2, R2 and F2	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Elements->Connection Port

4) กำหนดค่าพารามิเตอร์ในส่วนประกอบที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งในตารางที่ 4.9

- กำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของ Series RLC Branch แสดงในรูปที่ 4.34 โดยค่าพารามิเตอร์ R_c L_c R_r L_r R_f และ L_f แสดงในตารางที่ 4.10 และค่าพามิเตอร์ของ S11 จะกำหนดตามตำแหน่งที่รถไฟไฟฟ้าเคลื่อนที่มาทดสอบ



รูปที่ 4.34 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Series RLC Branch

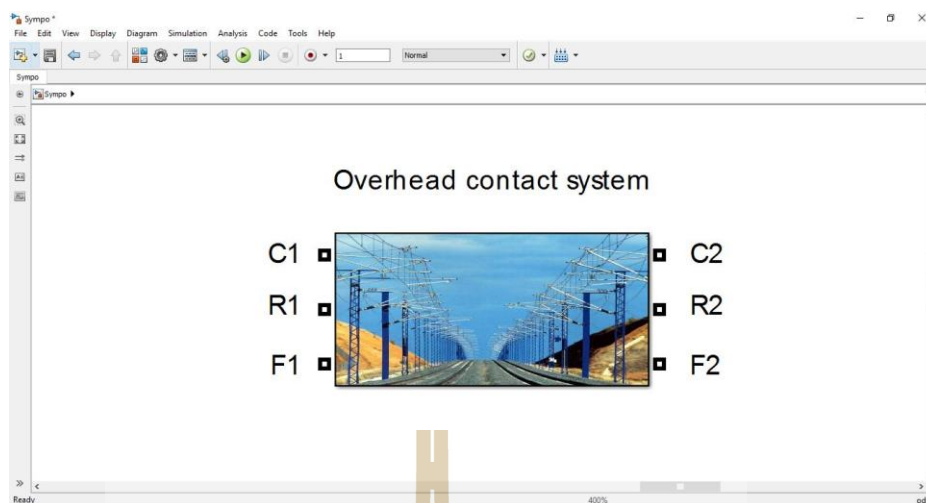
ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง

ตัวแปรค่าพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความต้านทานสายตัวนำสัมผัส (R_c)	0.184 Ω
ความต้านทานรางวิ่ง (R_r)	0.037 Ω
ความต้านทานสายฟีดเดอร์ (R_f)	0.126 Ω
ความเหนี่ยวนำสายตัวนำสัมผัส (L_c)	1.923 mH
ความเหนี่ยวนำรางวิ่ง (L_r)	28 mH
ความเหนี่ยวนำสายฟีดเดอร์ (L_f)	2,360 mH
แรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้า (V_{train})	25 kV
ความถี่ของรถไฟไฟฟ้า (V_{train})	50 Hz

5) Create Subsystem from Selection หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + G) เพื่อสร้างแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง จากนั้น Create Mask หรือจะใช้คำสั่ง (Ctrl + M) เพื่อแสดงภาพตัวอย่างแบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.35

4.3.4 การพัฒนาโปรแกรมแมทแลบของแบบจำลองขบวนรถไฟไฟฟ้า

แบบจำลองของขบวนรถไฟไฟฟ้า สำหรับระบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ดังรูปที่ 4.13 ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมแมทแลบซิมูลิงก์ มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ และมีขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองดังนี้

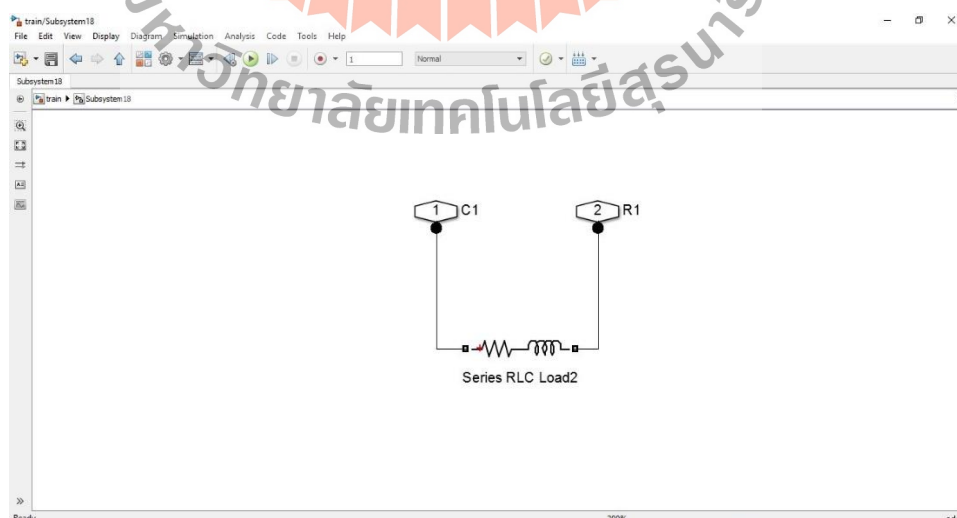


รูปที่ 4.35 แบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่งในแมทแลปซิมมูลิงก์

1) เปิดโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 4.14 หลังจากนั้นให้คลิกที่ Simulink Library เพื่อเรียกใช้ Simulink Library Browser แสดงในรูปที่ 4.15

2) ใน Simulink Library Browser เลือกเมนู File -> New -> Model หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + N) เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ลงใน untitled (สามารถเปลี่ยนชื่อได้ในส่วนของแบบจำลองของแบบจำลองขบวนรถไฟให้เป็น train) แสดงในรูปที่ 4.16

3) สร้างแบบจำลองของขบวนรถไฟใน train file แสดงในรูปที่ 4.36 โดยส่วนประกอบของแบบจำลองนำมาจาก Simulink Library Browser แสดงในตารางที่ 4.11



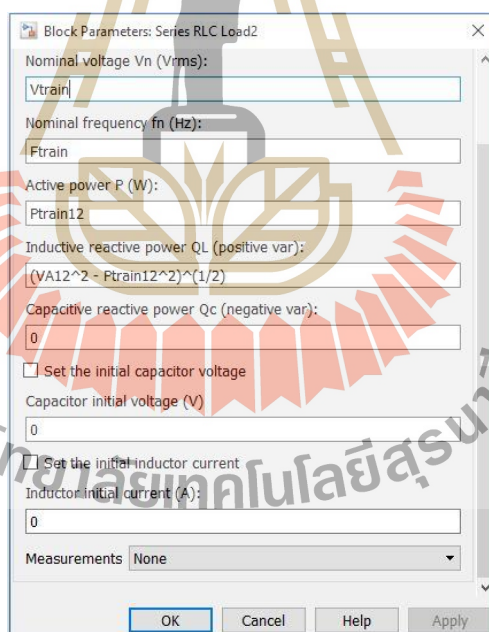
รูปที่ 4.36 แบบจำลองของขบวนรถไฟใน train file

ตารางที่ 4.11 ส่วนประกอบของแบบจำลองขบวนการไฟฟ้า

ส่วนประกอบของแบบจำลอง	Simulink Library Browser
Series RLC Load and Parallel RLC Load	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Electrical Sources
C1 and R1	Simscape->SimPowerSystem->Spacialized Technology->Elements->Connection Port

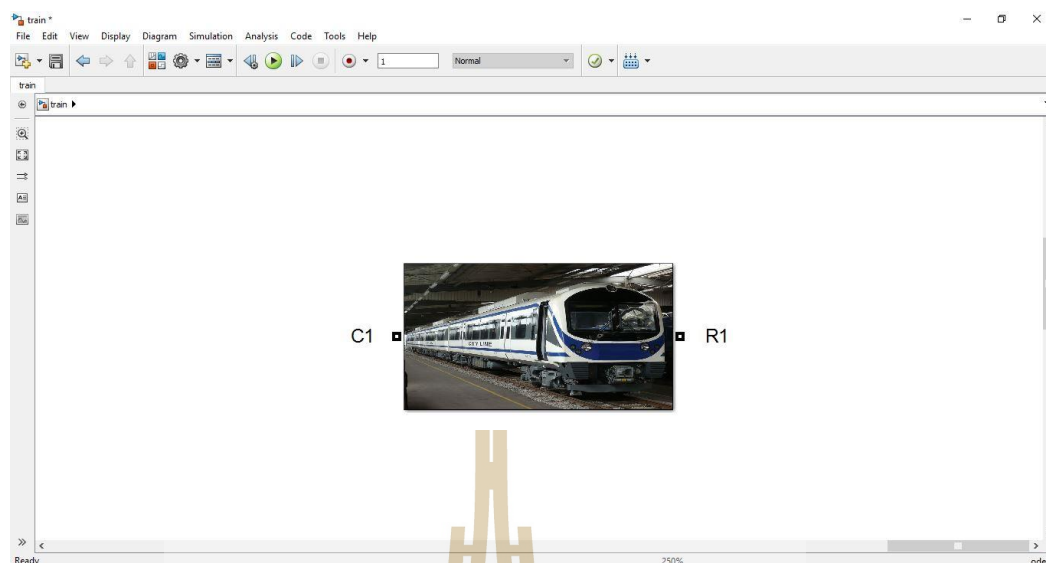
4) กำหนดค่าพารามิเตอร์ในส่วนประกอบที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของขบวนการไฟฟ้าในตารางที่ 4.11

- กำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของ Series RLC Load แสดงในรูปที่ 4.37 โดยค่าพารามิเตอร์ Vtrain และ Ftrain แสดงในตารางที่ 4.10 และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ VA12 กับ Ptrain12 จะขึ้นอยู่กับพิกัดโหนดของขบวนการไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบในขณะนั้น



รูปที่ 4.37 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Series RLC Load

5) Create Subsystem from Selection หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + G) เพื่อสร้างแบบจำลองของขบวนการไฟฟ้า จากนั้น Create Mask หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + M) เพื่อแสดงภาพตัวอย่างแบบจำลองของขบวนการไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 แบบจำลองของขบวนรถไฟในแมทแลปซิมมูลิงก์

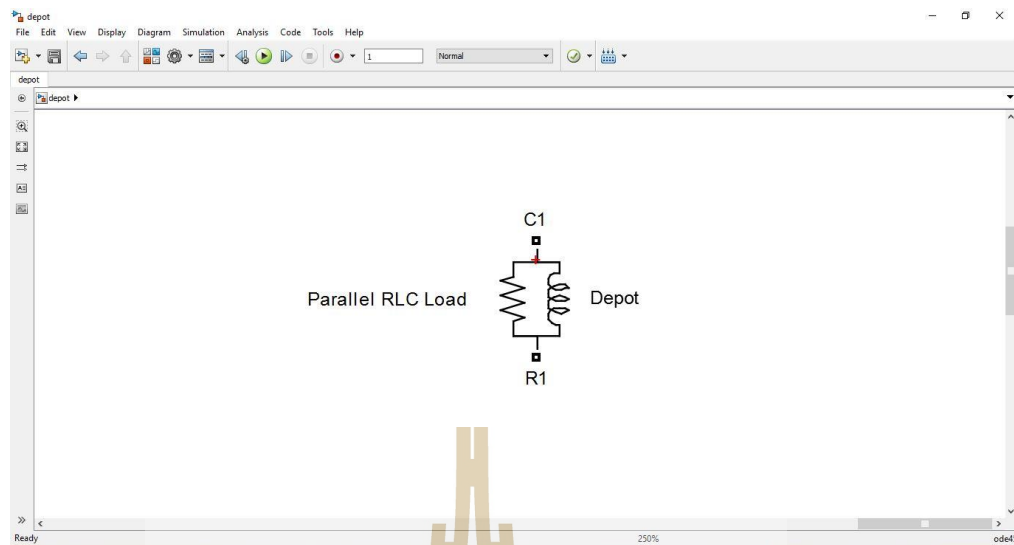
4.3.5 การพัฒนาโปรแกรมแมทแลปของแบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟ

แบบจำลองของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟ สำหรับระบบรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ใช้เป็นโหลดไฟฟ้าคงที่ โดยพิจารณาจากการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในรอบเดือน ของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมแมทแลปซิมมูลิงก์ มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ และมีขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองดังนี้

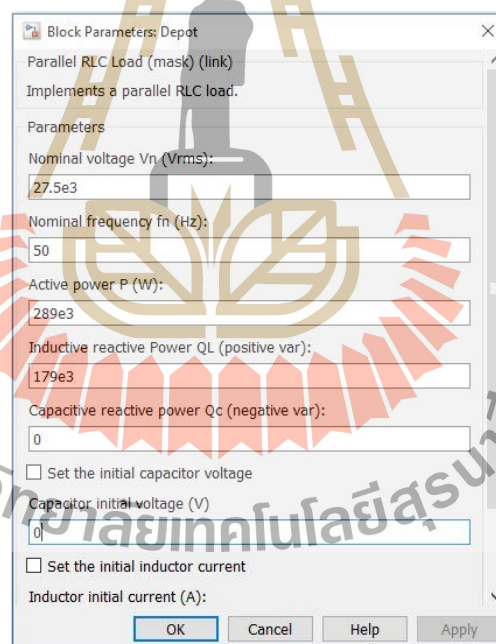
1) เปิดโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 4.14 หลังจากนั้นให้คลิกที่ Simulink Library เพื่อเรียกใช้ Simulink Library Browser แสดงในรูปที่ 4.15

2) ใน Simulink Library Browser เลือกเมนู File -> New -> Model หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + N) เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ลงใน untitled (สามารถเปลี่ยนชื่อได้ในส่วนของแบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟให้เป็น depot) แสดงในรูปที่ 4.16

3) สร้างแบบจำลองของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟใน depot file แสดงในรูปที่ 4.39 โดยส่วนประกอบของแบบจำลองนำมาจาก Simulink Library Browser แสดงในตารางที่ 4.11 และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของ Parallel RLC Load แสดงในรูปที่ 4.40 ค่ากำลังไฟฟ้ามาจากการคำนวณหาลำโพงไฟฟ้าสูงสุดที่ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟใช้ในหัวข้อที่ 4.2.4

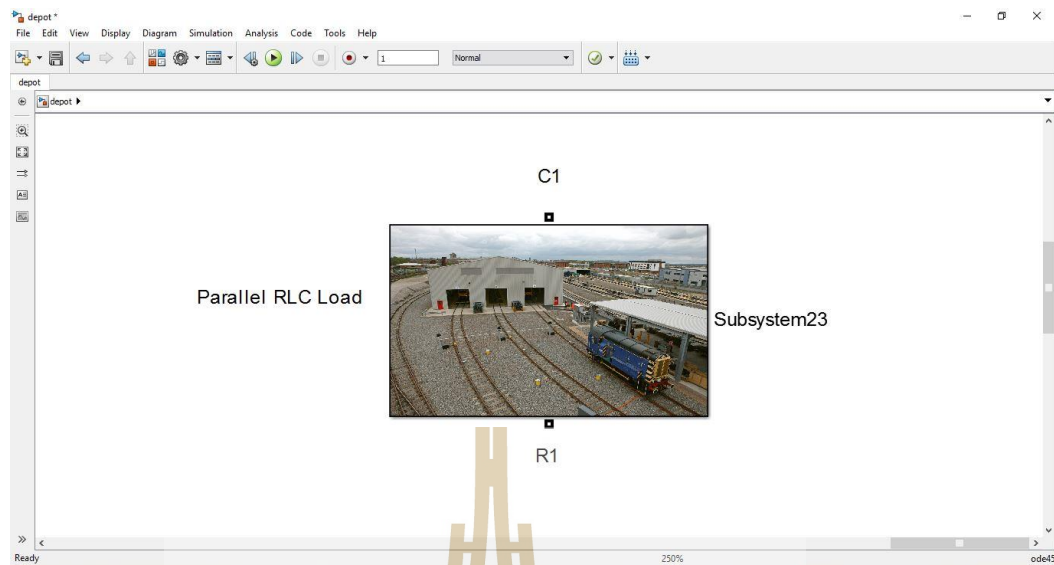


รูปที่ 4.39 แบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าใน depot file



รูปที่ 4.40 การกำหนดค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง Parallel RLC Load

4) Create Subsystem from Selection หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + G) เพื่อสร้างแบบจำลองของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า จากนั้น Create Mask หรือใช้คำสั่ง (Ctrl + M) เพื่อแสดงภาพตัวอย่างแบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 แบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟในแมทแลปซิมูลิงก์

4.3.6 การพัฒนาโปรแกรมแมทแลปในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การเคลื่อนที่ของรถไฟ สำหรับระบบรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมแมทแลป โดยได้ทำการทดสอบกับระบบรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่มีขนาดรถไฟที่ต่างกัน คือ รถไฟฟ้า 3 คันต่อ 1 ขบวน (3 Car train) กับรถไฟฟ้า 7 คันต่อ 1 ขบวน (7 Car train) มีรายละเอียดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.12 และขั้นตอนการจำลองระบบทดสอบการเคลื่อนที่ของรถไฟเริ่มต้นจากการกำหนดจำนวนรถไฟ ระยะทางในการเคลื่อนที่ และตำแหน่งของแต่ละสถานีผู้โดยสาร ต่อมาทำการใส่ข้อมูลพื้นฐานของรถไฟ คือ น้ำหนักโดยรวมของขบวนรถไฟ ความเร็วในการเคลื่อนที่รถไฟ ช่วงเวลาการเดินทางรถไฟ และกำลังไฟฟ้าเสริมที่รถไฟใช้ พอได้ข้อมูลครบจากนั้นจะทำการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ แสดงขั้นตอนการดำเนินงานในดังรูปที่ 4.42

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงก์

3-car train	7-car train
Tare weight: 131 tons	Tare weight: 299 tons
Rotary portion of tare weight: 6%	Rotary portion of tare weight: 6%
Maximum payload: 44.9 tons	Maximum payload: 105.7 tons
Maximum design speed: 160 km/h	Maximum design speed: 160 km/h

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (ต่อ)

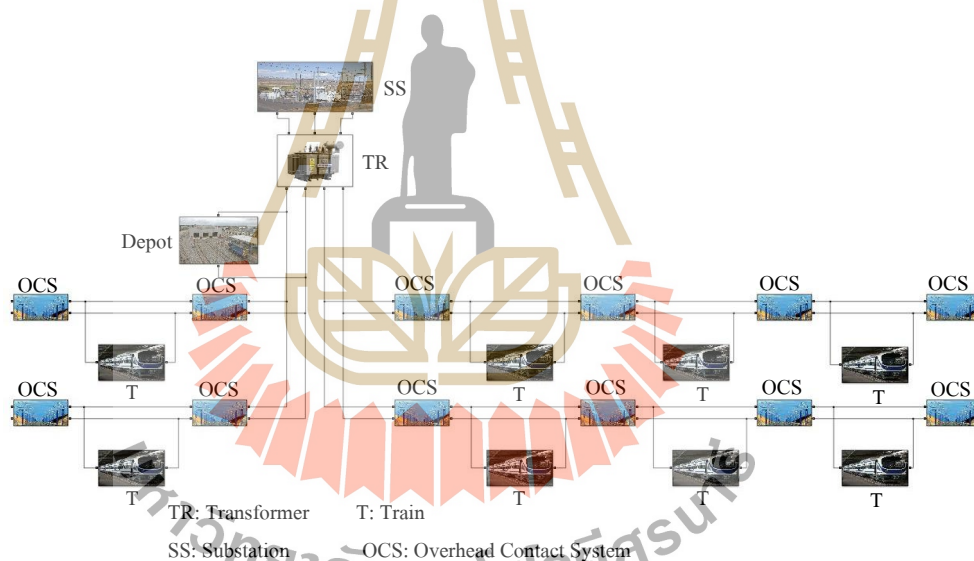
Maximum acceleration: 1 m/s ²	Maximum acceleration: 1 m/s ²
Maximum deceleration: 0.88 m/s ²	Maximum deceleration: 0.88 m/s ²
Gear/Motor/converter efficiency: 82%	Gear/Motor/converter efficiency: 82%
Maximum auxiliary power: 200 kVA	Maximum auxiliary power: 450 kVA
Maximum tractive effort: 200 kN	Maximum tractive effort: 400 kN
Train resistance formula: จากสมการที่ (3.11) A = 2.1222 B = 0.00618 C = 0.3197	Train resistance formula: จากสมการที่ (3.11) A = 4.8438 B = 0.01412 C = 0.53287



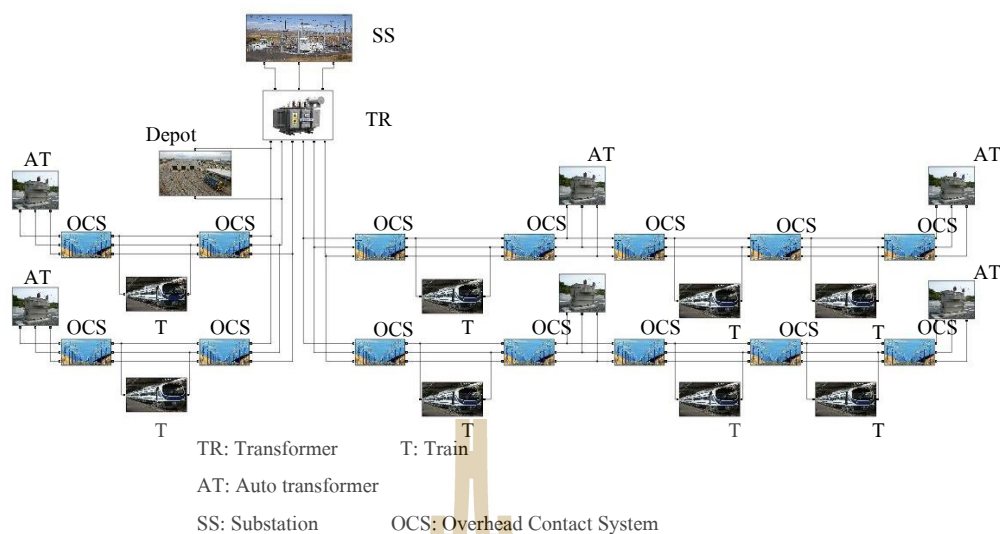
รูปที่ 4.42 ขั้นตอนการดำเนินงานจำลองผลระบบการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

4.4 ขั้นตอนการจำลองระบบทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

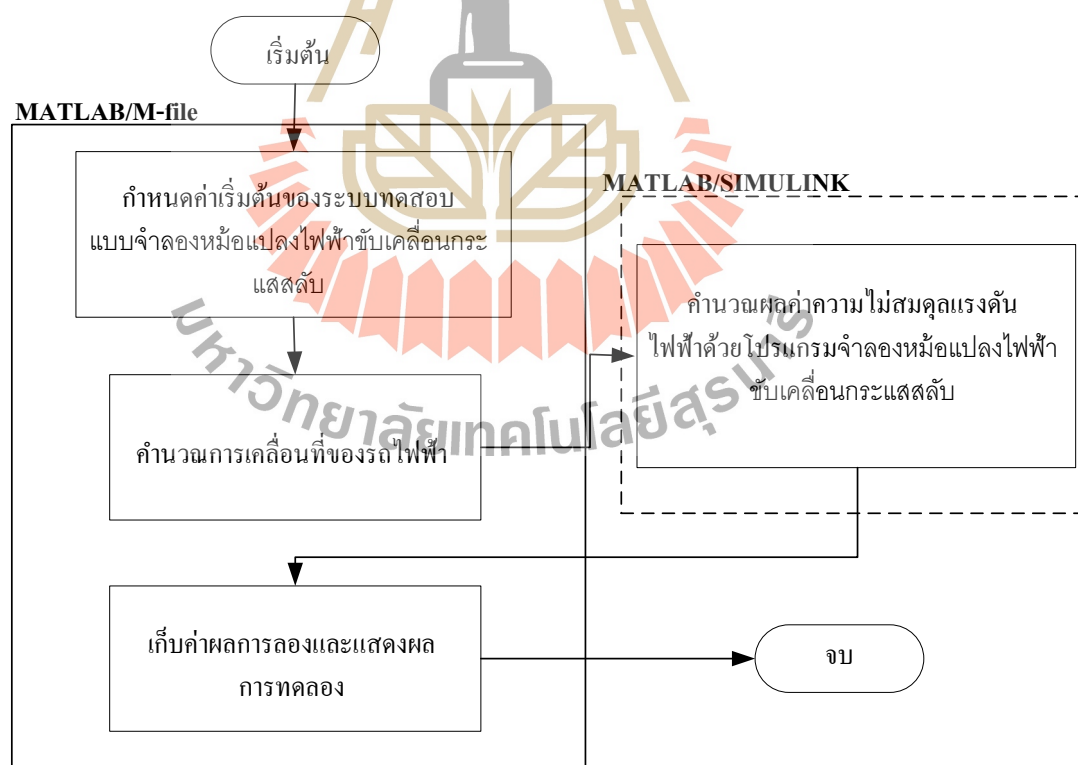
ในการทดสอบระบบทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ เพื่อหาค่าความไม่สมดุลไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ โดยทำการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟสแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ ทำการทดลองในแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง มีภาพรวมดังรูปที่ 4.43 แบบวงจรบริดจ์ และแบบรูปเฟลดาทำการทดลองในแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต มีภาพรวมดังรูปที่ 4.44 ซึ่งพัฒนาแบบจำลองระบบขึ้นโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงก์ โดยขั้นตอนการจำลองระบบทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดแสดงขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.43 ภาพรวมการทดลองในแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบจ่ายตรง



รูปที่ 4.44 ภาพรวมการทดลองในแบบจำลองระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศและรางวิ่งแบบระบบหม้อแปลงออโต



รูปที่ 4.45 ขั้นตอนการดำเนินงานจำลองผลระบบการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับสำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

จากรูปที่ 4.45 เริ่มต้นจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบ ซึ่งได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับ ค่าพารามิเตอร์ของระบบสายตัวนำ ลัมพิสแบบพาดอากาศและรางวิ่ง ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ของ ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า และค่าพารามิเตอร์ของขบวนรถไฟฟ้า จากนั้นทำการคำนวณการเคลื่อนที่ ของรถไฟฟ้า จากนั้นทำการส่งค่ากำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการขับเคลื่อน และตำแหน่งที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่ ไปทดสอบกับแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับในโปรแกรมแมทแลป ซิมมูลิงก์ เพื่อคำนวณค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบ จากนั้น โปรแกรมจะส่งผลการ ทดลองมาเก็บไว้ในแมทแลป และแสดงผลการทดลอง

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับ สำหรับระบบ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ โดยแสดงโครงสร้างของระบบรถไฟฟ้ารวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์ พอร์ตเรลลิงก์ และการพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับ สำหรับระบบ รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ โดยพิจารณาการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า ขับเคลื่อน ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมแมทแลปซิมมูลิงก์ในการสร้างแบบจำลองของระบบมี องค์ประกอบ 6 ส่วนหลัก ได้แก่ แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับ แบบจำลอง หม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง แบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า แบบจำลอง ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า และการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า มีวิธีการขั้นตอนในการสร้าง แบบจำลอง และการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยละเอียด

บทที่ 5

ระบบทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

ในบทที่ผ่าน ๆ มาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ตลอดจนวิธีการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ สำหรับในบทที่ 5 นี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อจำลองระบบทดสอบและวิเคราะห์ผลของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟสแบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเตตราเท่านั้น โดยใช้โปรแกรมเมทแลปซิมมูลิงก์ จากบทที่ผ่านมาได้อธิบายผลการทดสอบในกรอบความรู้ที่ศึกษาจากงานวิจัยที่เคยมีผู้ได้ศึกษาก่อนหน้านี้ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ แบ่งการจำลองระบบการทดสอบออกเป็น 4 กรณีโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาการเดินรถไฟฟ้า และน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ตามตารางที่ 5.1 นอกจากนี้ยังหาสถานการณ์เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าโดยการเพิ่มโหลดศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

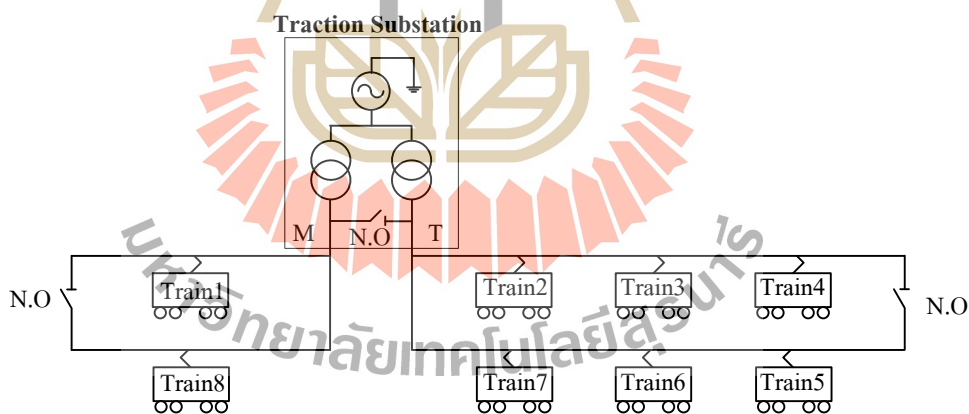
ตารางที่ 5.1 รูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์

Scenario	Headway (min)	Train configuration	Total weight (ton)	Auxiliaries power (kW)
S1	15	3 car train	183.76	200
S2	12	3 car train	183.76	200
S3	12	7 car train	422.64	450
S4	10	7 car train	422.64	450

5.2 ระบบทดสอบโดยรวม

แบบจำลองความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของ การต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรมเมทแลปซิมมูลิงก์

ประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก ได้แก่ แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองหม้อแปลงออโต แบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง แบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า และแบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46 ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ เป็นแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเคลตา ตามหัวข้อที่ 3.4.2 (การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ) ผลที่ได้จากการทดสอบของขบวนรถไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ อ้างอิงจากหัวข้อ 3.5.2 โดยที่ปริมาณ ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ประเมินความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า มีระยะทางให้บริการของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ มีระยะทางรวมทั้งหมด 28.298 km ตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับอยู่ที่ 8.078 km จากสถานีพญาไท การทดสอบสถานการณ์กำหนดให้รถไฟฟ้าขบวนที่ 1 (Train 1) และรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 (Train 5) ขับเคลื่อนพร้อมกันในทิศทางตรงกันข้ามกัน เมื่อถึงช่วงระยะเวลาระหว่างรถไฟฟ้าสองขบวนที่วิ่งไปในทิศทางเดียวกันบนรางเดียวกัน (headway) รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 (Train 2) กับรถไฟฟ้าขบวนที่ 6 (Train 6) จะขับเคลื่อนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.1

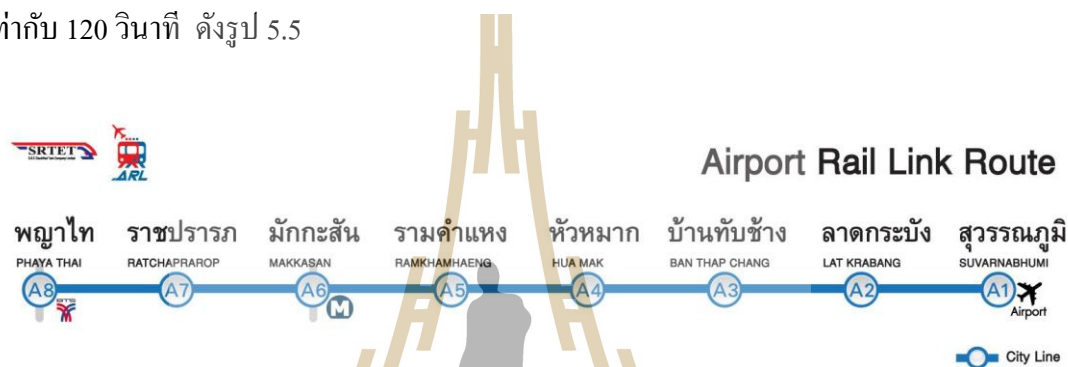


รูปที่ 5.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบรถไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ

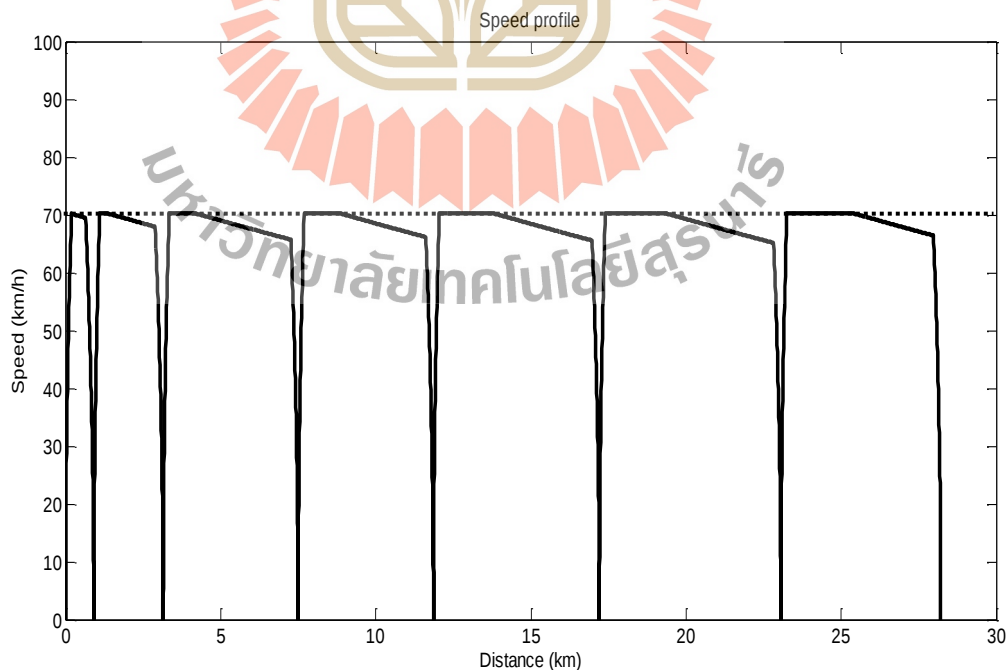
5.3 ระบบทดสอบกรณี S1

การทดสอบจะใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเคลตา คำนวณหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (City Line) มีสถานีผู้โดยสารทั้งหมด 8 สถานี ได้แก่ สุวรรณภูมิ ลาดกระบัง

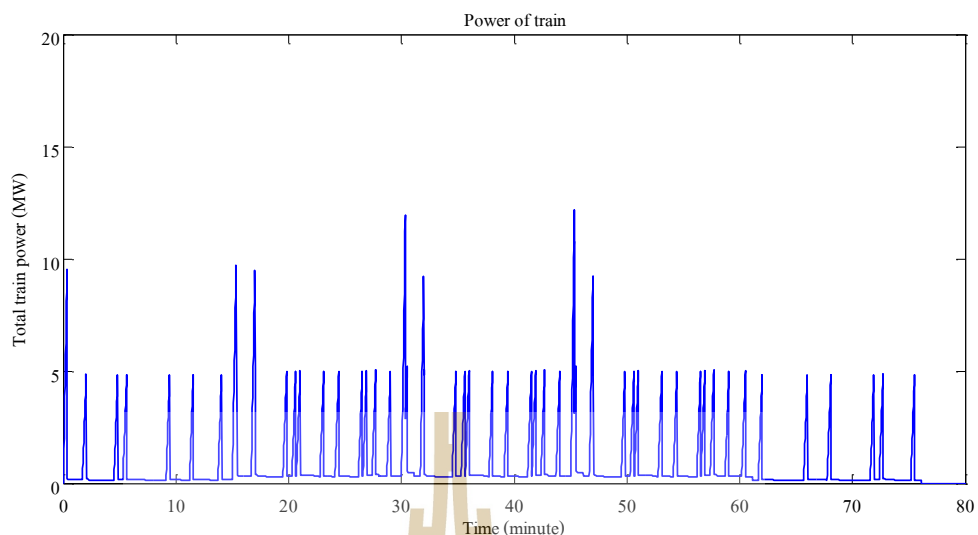
บ้านทับช้าง หัวหมาก รามคำแหง มักกะสัน ราชปรารภ และพญาไท ดังรูปที่ 5.2 รูปแบบเงื่อนไขการทดสอบนำเสนอใน ตารางที่ 5.1 (กรณี S1) โดยที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนมีความเร็วสูงสุด 70 km/h ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 5.3 มีลักษณะการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปแบบการเดินรถของ headway 15 นาที (15 min) จะมีรถไฟฟ้าบริการจากขาออกจากพญาไท – สุวรรณภูมิ และขาเข้าจาก สุวรรณภูมิ – พญาไท ขาละ 4 ขบวน รวมเป็น 8 ขบวน สำหรับ headway 15 นาที จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 76 นาที ช่วงเวลาจอด (dwell time) ที่ทุก ๆ สถานีเท่ากับ 30 วินาที ยกเว้นสถานีหัวหมากจะเท่ากับ 120 วินาที ดังรูป 5.5



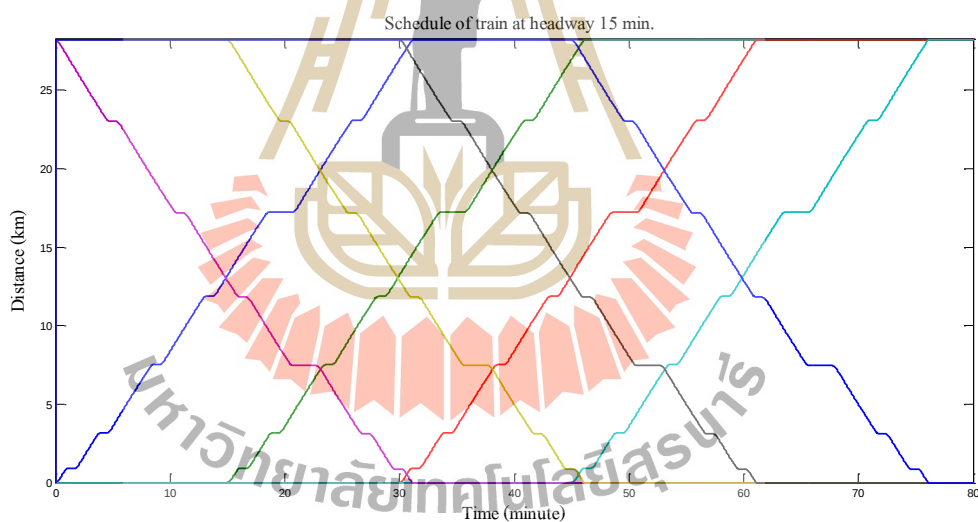
รูปที่ 5.2 แผนที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (City Line)



รูปที่ 5.3 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน

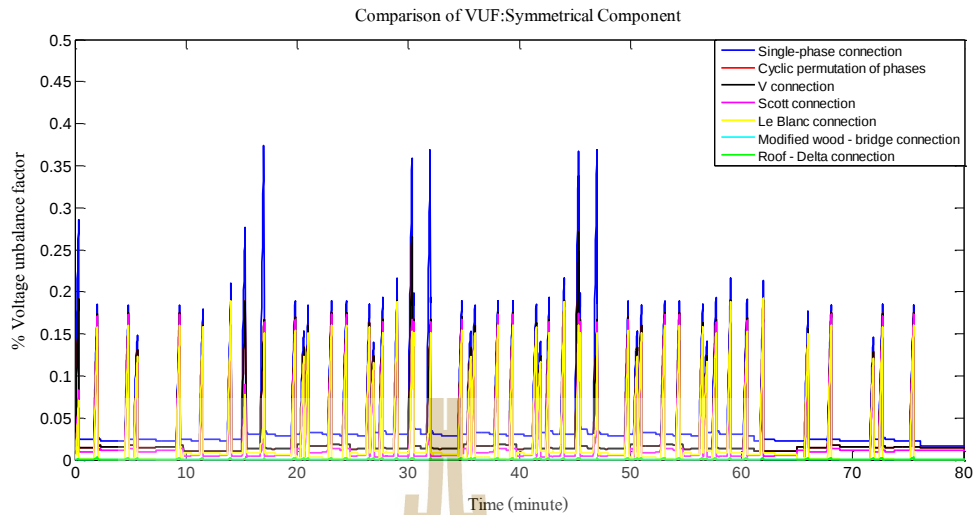


รูปที่ 5.4 การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S1

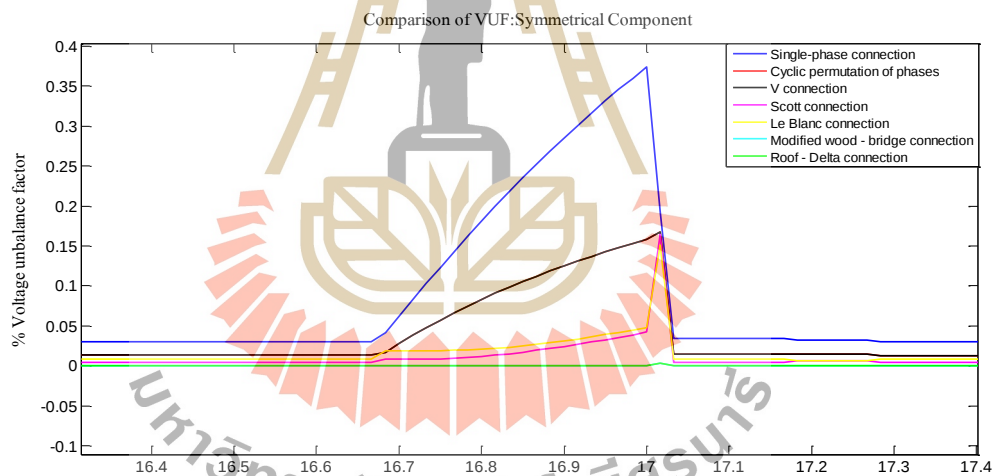


รูปที่ 5.5 รูปแบบการเดินรถของ headway 15 นาทีในกรณี S1

จากการทดสอบ และการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรลลิงก์ โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ใช้วิธีการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าส่วนประกอบสมมาตรคำนวณเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (%VUF) ตามรูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้ากรณี S1 ตลอดช่วงตารางการเดินรถไฟฟ้า นำเสนอ ดังรูปที่ 5.6 และที่ตำแหน่งค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S1



รูปที่ 5.7 ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S1

จากรูปที่ 5.6 ทำการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบต่าง ๆ คือ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว (สีน้ำเงิน) แบบสลับคู่เฟส (สีแดง) แบบวี (สีดำ) แบบสกอตต์ (สีชมพู) แบบเลอบลองก์ (สีเหลือง) แบบวูดบริดจ์ (สีฟ้า) และแบบรูปเดลตา (สีเขียว) จากรูปจะสังเกตได้ ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา มีค่าต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสลับแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี

แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังสังเกตได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในรูปที่ 5.4 และในกรณีที่เปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด เป็นผลเนื่องจากช่วงเวลานั้น ๆ มีรถไฟฟ้าให้บริการเป็นจำนวนมาก และรถไฟฟ้าอยู่ในช่วงการเร่งความเร็ว และจากผลการทดสอบในรูปที่ 5.6 เปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S1 และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 5.2

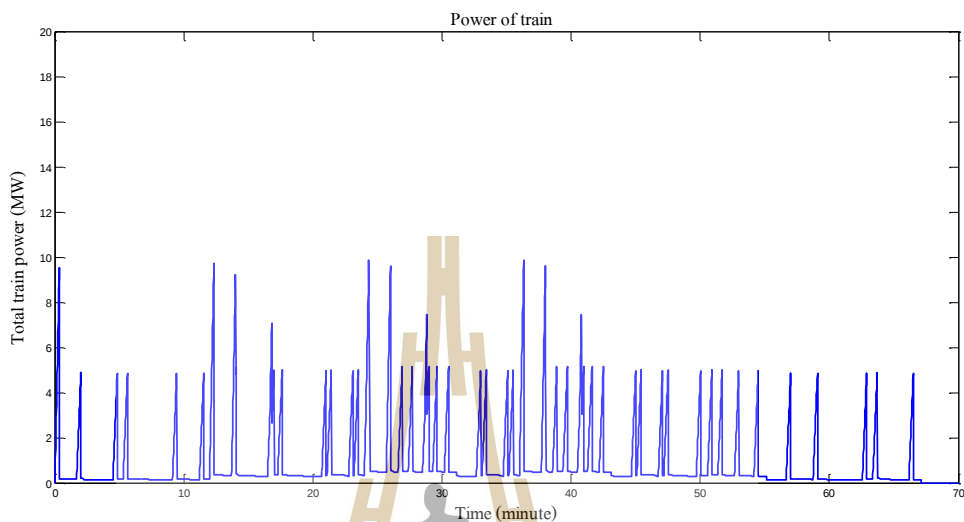
ตารางที่ 5.2 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S1

Connection type	%VUF	
	Min.	Max.
Single-phase connection	0.0165	0.3740
Cyclic permutation of phases	0.0103	0.2717
V connection	0.0103	0.2717
Scott connection	0.0029	0.1817
LeBlanc connection	1.9071×10^{-7}	0.1920
Modified wood - bridge connection	5.1319×10^{-5}	0.0031
Roof - Delta connection	5.2921×10^{-5}	0.0031

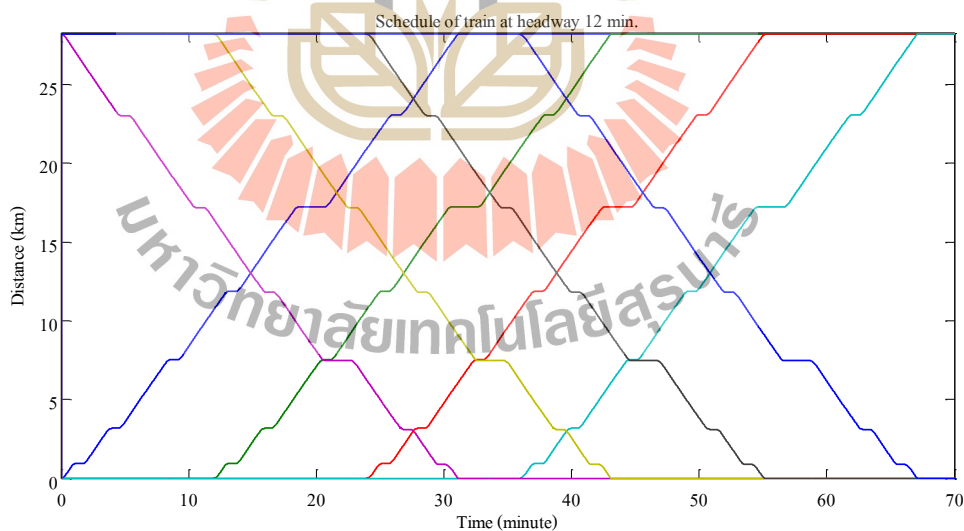
5.4 ระบบทดสอบกรณี S2

การทดสอบจะใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเดลตา คำนวณหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (City Line) มีสถานีผู้โดยสารทั้งหมด 8 สถานี ได้แก่ สุวรรณภูมิ ลาดกระบัง บ้านทับช้าง หัวหมาก รามคำแหง มักกะสัน ราชปรารภ และพญาไท ดังรูปที่ 5.2 รูปแบบเงื่อนไขการทดสอบนำเสนอใน ตารางที่ 5.1 (กรณี S2) โดยที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนมีความเร็วสูงสุด 70 km/h ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 5.3 มีลักษณะการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปแบบการเดินรถของ headway 12 นาที จะมีรถไฟฟ้าบริการจากขาออกจากพญาไท – สุวรรณภูมิ และขาเข้าจากสุวรรณภูมิ – พญาไท ขาดละ 4

ขบวน รวมเป็น 8 ขบวน สำหรับ headway 12 นาที จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 67 นาที ช่วงเวลาจอด ที่ ทุก ๆ สถานีเท่ากับ 30 วินาที ยกเว้นสถานีหัวหมากจะเท่ากับ 120 วินาที ดังรูป 5.9



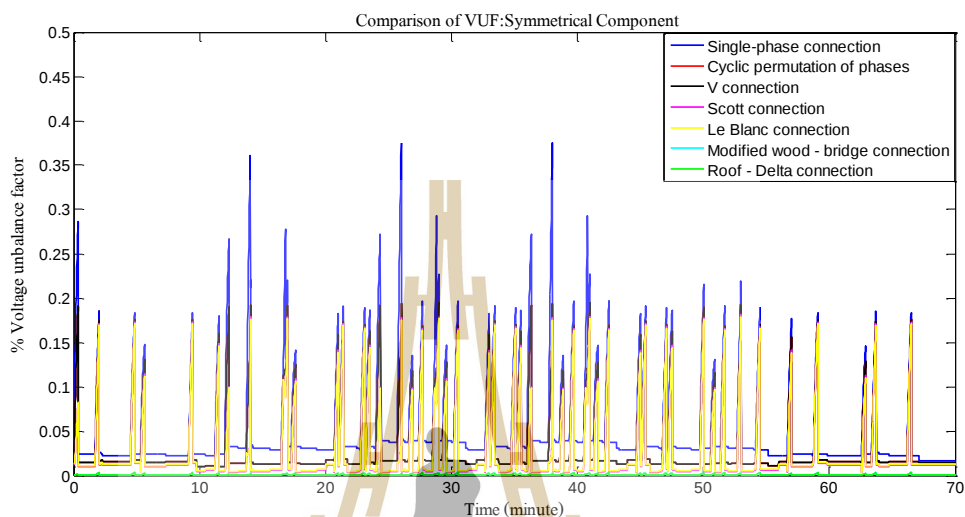
รูปที่ 5.8 การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S2



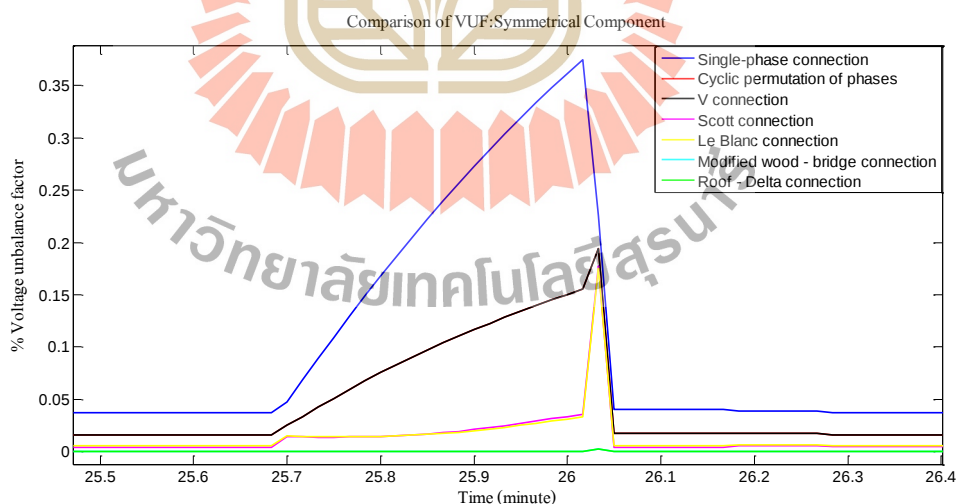
รูปที่ 5.9 รูปแบบการเดินรถของ headway 12 นาทีในกรณี S2

จากการทดสอบ และการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรลลิงก์ โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ใช้วิธีการคำนวณความไม่สมดุล

แรงดันไฟฟ้าส่วนประกอบสมมาตรคำนวณเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ตามรูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้ากรณี S2 ตลอดช่วงตารางการเดินรถไฟฟ้า นำเสนอ ดังรูปที่ 5.10 และที่ตำแหน่งค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S2



รูปที่ 5.11 ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S2

จากรูปที่ 5.10 ทำการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบต่าง ๆ คือ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์

แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเดลตา จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเดลตา มีค่าต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังสังเกตได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในรูปที่ 5.8 และในกรณีที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด เป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลานั้น ๆ มีรถไฟไฟฟ้าให้บริการเป็นจำนวนมาก และรถไฟฟ้ายู่ในช่วงการเร่งความเร็ว และจากผลการทดสอบในรูปที่ 5.10 ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ายกรณีส2 และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 5.3

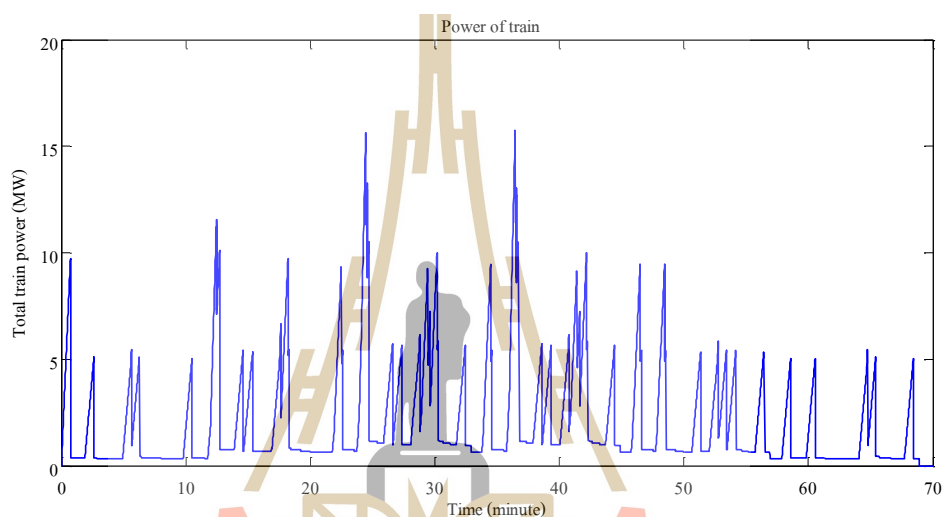
ตารางที่ 5.3 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ายกรณีส2

Connection type	%VUF	
	Min.	Max.
Single-phase connection	0.0165	0.3745
Cyclic permutation of phases	0.0103	0.1946
V connection	0.0103	0.1946
Scott connection	0.0029	0.1814
LeBlanc connection	0.0036	0.1792
Modified wood - bridge connection	5.1319×10^{-5}	0.0031
Roof - Delta connection	5.2921×10^{-5}	0.0031

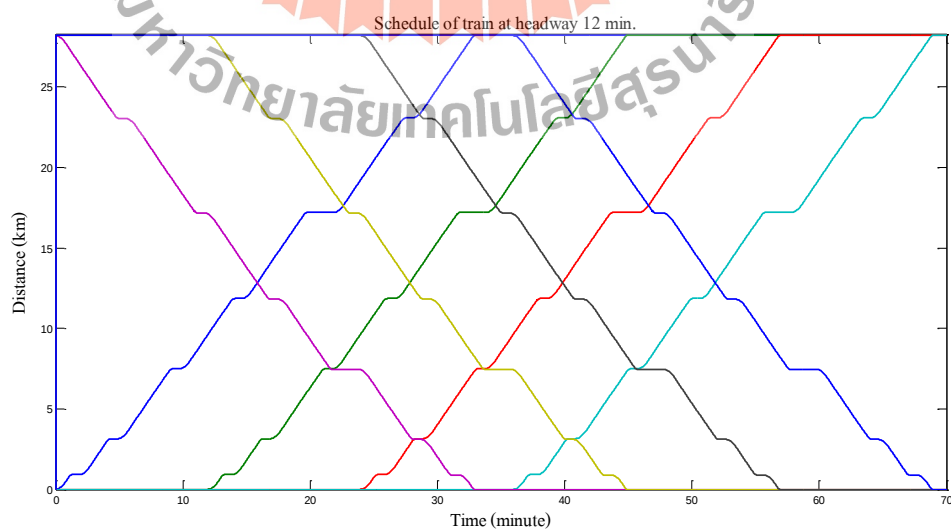
5.5 ระบบทดสอบกรณีส3

การทดสอบจะใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเดลตา คำนวณหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ายกรณีส3 (City Line) มีสถานีผู้โดยสารทั้งหมด 8 สถานี ได้แก่ สุวรรณภูมิ ลาดกระบัง บ้านทับช้าง หัวหมาก รามคำแหง มักกะสัน ราชปรารภ และพญาไท ดังรูปที่ 5.2 รูปแบบเงื่อนไขการทดสอบนำเสนอใน ตารางที่ 5.1 (กรณีส3) โดยที่รถไฟฟ้ายกรณีส3มีความเร็วสูงสุด 70 km/h ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้ายกรณีส3ขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 5.3 มีลักษณะการใช้

กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5.12 และรูปแบบการเดินรถของ headway 12 นาที จะมีรถไฟฟ้าบริการจากขาออกจากพญาไท – สุวรรณภูมิ และขาเข้าจากสุวรรณภูมิ – พญาไท ขาดละ 4 ขบวน รวมเป็น 8 ขบวน สำหรับ headway 12 นาที จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 69 นาที ช่วงเวลาจอด ที่ทุก ๆ สถานีเท่ากับ 30 วินาที ยกเว้นสถานีหัวหมากจะเท่ากับ 120 วินาที ดังรูป 5.13 ซึ่งเท่ากันกับกรณี S2 แต่จะต่างกันตรงที่น้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าโดยที่กรณี S3 เป็นขบวนรถ 7 Car มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้ามากกว่า

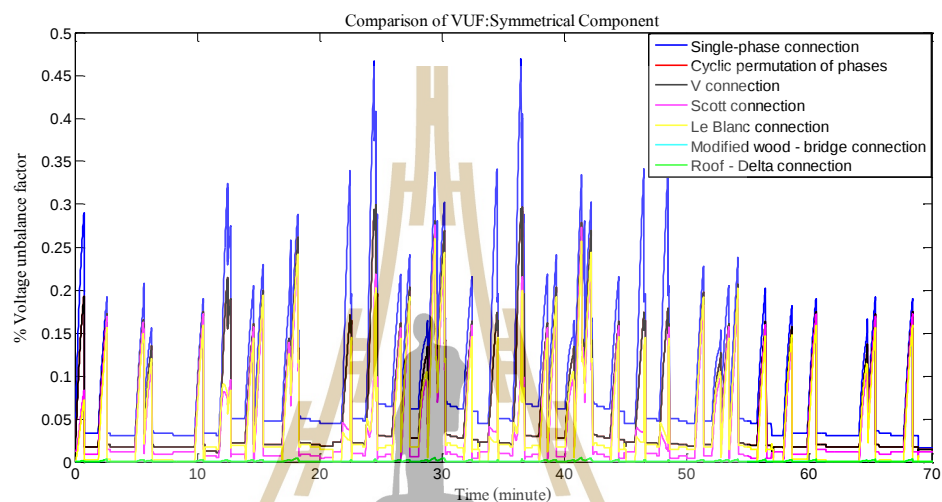


รูปที่ 5.12 การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S3

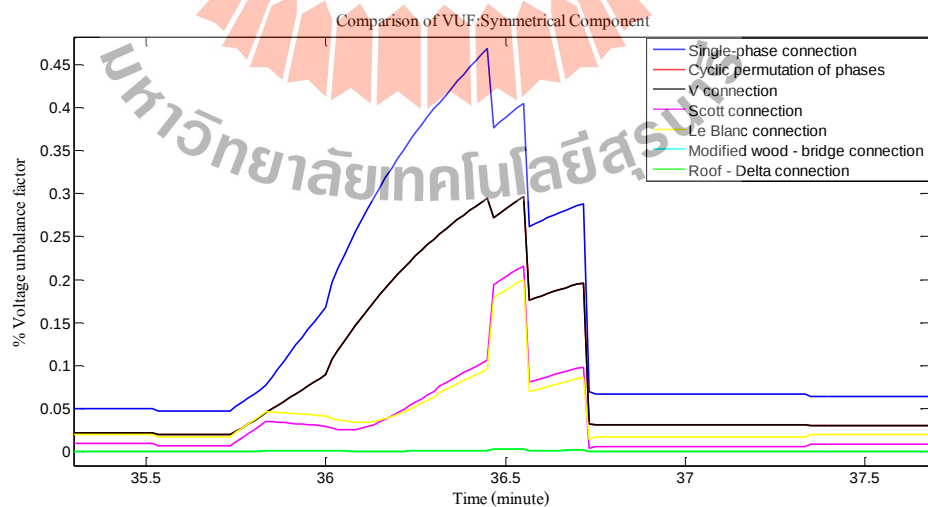


รูปที่ 5.13 รูปแบบการเดินรถของ headway 12 นาทีในกรณี S3

จากการทดสอบ และการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ใช้วิธีการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าส่วนประกอบสมมาตรคำนวณเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ตามรูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้ากรณี S3 ตลอดช่วงตารางการเดินรถไฟฟ้า นำเสนอ ดังรูปที่ 5.14 และที่ตำแหน่งค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ดังรูปที่ 5.15

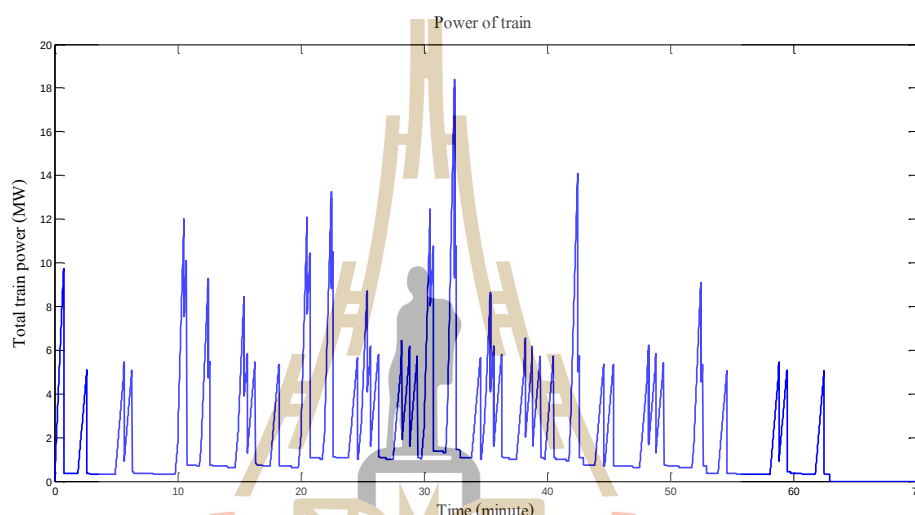


รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S3

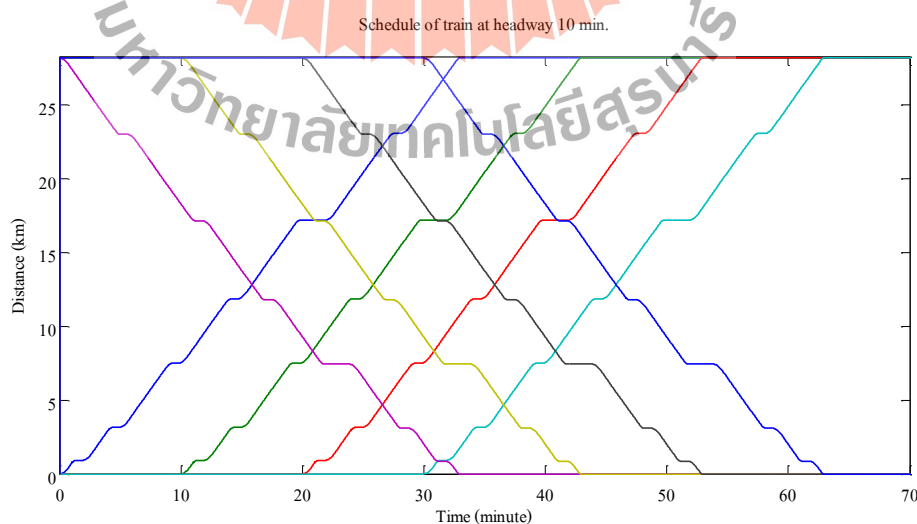


รูปที่ 5.15 ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S3

การทดสอบนำเสนอนี้ใน ตารางที่ 5.1 (กรณี S4) โดยที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนมีความเร็วสูงสุด 70 km/h ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 5.3 มีลักษณะการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5.16 และรูปแบบการเดินรถของ headway 10 นาที จะมีรถไฟฟ้าบริการจากขาออกจากพญาไท – สุวรรณภูมิ และขาเข้าจากสุวรรณภูมิ – พญาไท ขาดละ 4 ขบวน รวมเป็น 8 ขบวน สำหรับ headway 10 นาที จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 63 นาที ช่วงเวลาจอด ที่ทุก ๆ สถานีเท่ากับ 30 วินาที ยกเว้นสถานีหัวหมากจะเท่ากับ 120 วินาที ดังรูป 5.17

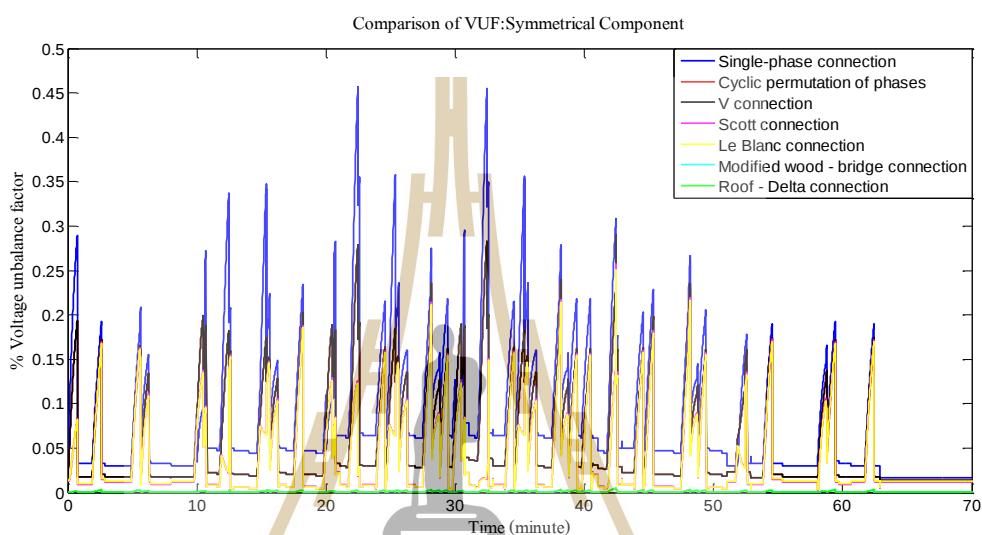


รูปที่ 5.16 การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในกรณี S4

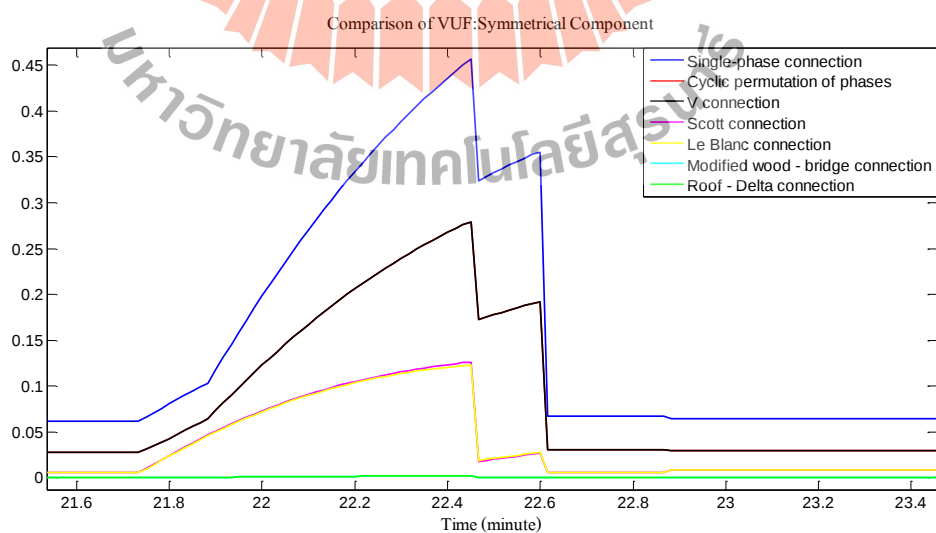


รูปที่ 5.17 รูปแบบการเดินรถของ headway 10 นาทีในกรณี S4

จากการทดสอบ และการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตรেলลิงก์ โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ใช้วิธีการคำนวณความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าส่วนประกอบสมมาตรคำนวณเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ตามรูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้ากรณี S4 ตลอดช่วงตารางการเดินรถไฟฟ้า นำเสนอ ดังรูปที่ 5.18 และที่ตำแหน่งค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่า %VUF ในกรณี S4



รูปที่ 5.19 ตำแหน่งค่า %VUF สูงสุดในกรณี S4

จากรูปที่ 5.18 ทำการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบต่าง ๆ คือ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเดลตา จากรูปจะสังเกตได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเดลตา มีค่าต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ นอกจากนี้จากการทดสอบยังสังเกตได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในทุก ๆ ช่วงเวลาในรูปที่ 5.16 และในกรณีที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด เป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลานั้น ๆ มีรถไฟฟ้าให้บริการเป็นจำนวนมาก และรถไฟฟ้าอยู่ในช่วงการเร่งความเร็ว และจากการผลการทดสอบในรูปที่ 5.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S4 และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 %VUF สูงสุดและต่ำสุดในรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้ากรณี S4

Connection type	%VUF	
	Min.	Max.
Single-phase connection	0.0165	0.4564
Cyclic permutation of phases	0.0108	0.2906
V connection	0.0108	0.2906
Scott connection	0.0026	0.2569
LeBlanc connection	0.0030	0.2504
Modified wood - bridge connection	4.8913×10^{-5}	0.0049
Roof - Delta connection	5.1444×10^{-5}	0.0049

5.7 ระบบทดสอบสถานการณ์เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

ระบบทดสอบสถานการณ์เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้านี้ จำลองสถานการณ์โดยการเพิ่มขนาดโหลดศูนย์ข้อมบารุงรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ดังตารางที่ 5.6 พิจารณาเพิ่มโหลดศูนย์ข้อมบารุงรถไฟฟ้าให้มากขึ้นจนกระทั่งทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าเกินมาตรฐานที่กำหนด (2 เปอร์เซ็นต์) ระบบทดสอบใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟสตามที่ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ใช้งานในปัจจุบัน

ตารางที่ 5.6 %VUF ของการเพิ่มขนาดโหลดศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

ขนาดโหลด	%VUF	
	Min.	Max.
20 MW	0.6401	0.9435
40 MW	1.0977	1.3558
60 MW	1.3976	1.6291
80 MW	1.6017	1.8221
100 MW	1.7510	1.9704
120 MW	1.8649	2.0845

จากผลการทดสอบสถานการณ์เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อโหลดของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าเท่ากับ 120 MW ทำให้เกิดปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (2.0845 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าถ้ามีการใช้สูงก็จะส่งผลด้านความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าได้เช่นกัน

5.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบ ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ากรณี S1 กับ S2 ในรูปที่ 5.6 กับรูปที่ 5.10 มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า และ โหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าเท่ากัน (3 Car train) แต่มี headway ที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบจะสังเกตเห็นว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของกรณี S1 ที่มี headway 15 นาที มีค่าสูงกว่ากรณี S2 ที่มี headway 12 นาที เนื่องจาก headway ที่ใช้เวลานั้นกว่า จะมีโอกาส และช่วงเวลาที่จำนวนขบวนรถไฟฟ้าในส่วนหม้อแปลงฝั่งซ้ายมือ และขวามือดังรูปที่ 5.1 เท่ากันมากกว่า headway ที่ใช้เวลายาวนานกว่า ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเดินรถไฟฟ้าที่ headway สั้น จะมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าน้อยกว่าการเดินรถไฟฟ้าที่ headway ยาวกว่า เช่นเดียวกันกับผลการทดสอบกรณี S3 ที่มี headway 12 นาทีในตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบกับกรณี S4 ที่มี headway 10 นาทีในตารางที่ 5.5

พิจารณากรณี headway เท่ากัน คือ 12 นาที แต่มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า และ โหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าแตกต่างกันในกรณี S2 (3 Car train) มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า และ โหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าน้อยกว่ากรณี S3 (7 Car train) จากรูปที่ 5.10 กับรูปที่ 5.14 จะ

สังเกตได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของกรณี S2 มีค่าน้อยกว่ากรณี S3 เนื่องจากน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้ามักขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามักขึ้นตามไปด้วยตามสมการ (3.7) แรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อรถไฟฟ้ากับสายตัวนำเหนือศีรษะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น และการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบอื่น ๆ

จากการเปรียบเทียบพบว่าที่ช่วงเวลา headway เท่ากัน แต่น้ำหนักของรถไฟฟ้า และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้ามักขึ้น จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และที่น้ำหนักสุทธิ และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าเท่ากัน แต่ช่วงเวลา headway ที่มากขึ้น จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังสังเกตได้ว่า ในทุกกรณีที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด เป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลานั้น ๆ มีรถไฟฟ้าให้บริการเป็นจำนวนมาก และรถไฟฟ้าอยู่ในช่วงการเร่งความเร็ว

5.9 สรุป

จากผลการทดสอบการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในบทที่ 5 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองระบบทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตาเท่านั้น โดยใช้โปรแกรมเมทแลปซิมูลิงก์ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการจำลองระบบการทดสอบออกเป็น 4 กรณีโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาการเดินรถไฟฟ้า และน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ตามตารางที่ 5.1 ในการทดสอบพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา ทุก ๆ กรณีตามรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟฟ้าในตารางที่ 5.1 มีค่าต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังสังเกตได้ว่า กรณีที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดเป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลานั้น ๆ มีรถไฟฟ้าให้บริการเป็นจำนวนมาก และรถไฟฟ้าอยู่ในช่วงการเร่งความเร็ว

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง ระบบรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวีแบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูฟเคลตา โดยใช้โปรแกรมเมทแลปซิมมูลิงก์ มีเป้าหมาย เพื่อวิเคราะห์ผลของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่สร้างขึ้น มีองค์ประกอบ 6 ส่วนหลัก ได้แก่ แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองหม้อแปลงออโต แบบจำลองสายส่งพาดอากาศและรางวิ่ง แบบจำลองขบวนรถไฟฟ้า และแบบจำลองศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า ระบบทดสอบที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ แบ่งออกเป็น 4 กรณี โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาการเดินทางรถไฟฟ้า และน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ ตามตารางที่ 5.1 ใช้ทดสอบในระยะทาง 28.298 กิโลเมตร ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ 25 kV, 50 Hz

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อาศัยรากฐานจากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ ซึ่งบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอบทปรัทัศน์วรรณกรรมเหล่านั้น พร้อมทั้งศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ซึ่งต้องพึ่งพาทฤษฎี และหลักการต่าง ๆ ที่ใช้พัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ เพื่อทดสอบระบบการดำเนินงาน ในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ และคำนวณค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ทำให้ต้องพึ่งพาข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ รวมถึงการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมเมทแลปในการทดสอบ และการทดสอบของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ สำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 ซึ่งผลที่ปรากฏจึงสรุปได้ว่า ในการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการต่อหม้อแปลงสถานี

ไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับด้วยโปรแกรมเมทแลปซิมมูลิก โดยทำการประเมินจากค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า เมื่อพิจารณาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับ 7 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวีแบบสกอตต์ แบบเลอบลองก์ แบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา ในกรณีเปลี่ยนช่วงเวลา headway น้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้า สรุปได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และช่วงเวลา headway ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบวูดบริดจ์ และแบบรูปเดลตา มีค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ในทุก ๆ กรณีรูปแบบเงื่อนไขการเดินทางรถไฟฟ้าตามตารางที่ 5.1 และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าไม่เกินมาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 ดังนั้นระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบันนี้ไม่มีปัญหาด้านความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า แต่สำหรับแผนการขยายเส้นทาง เพิ่มระยะทาง และเพิ่มจำนวนรถไฟฟ้า ควรเลือกใช้งานการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ หรือแบบรูปเดลตา เพื่อลดปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. พัฒนางานวิจัย ในการจำลองระบบรถไฟฟ้าที่มีระยะทางให้บริการไกลขึ้น เพื่อหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าระยะทางไกล
2. พัฒนางานวิจัย เพื่อสร้างแบบจำลองหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับในโปรแกรมอื่น
3. พัฒนางานวิจัย ในการจำลองระบบรถไฟฟ้าที่มีจำนวนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับหลายสถานี เพื่อหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

รายการอ้างอิง

- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). แบบจำลองและการจำลองผลระบบการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าหลายขบวน. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรางรถไฟสายหลัก. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). หัวรถจักรไฟฟ้าและการขับเคลื่อนมอเตอร์ลากจูง. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศุภชัย แก้วพวง. (2559). แบบจำลองแหล่งจ่ายรางรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่ใช้ระบบหม้อแปลงออโตโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิก. วิทยานิพนธ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Applications of Mathematics (2004). Tractive effort, acceleration and braking. **The Mathematical Association** (www.m-a.org.uk).
- Bin, K.C. and Bing, S.G. (1996). Three phase models of specially connected transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**.
- British Standards Institution. (2012). BS EN 50149:2012. Railway applications-Fixed installations Electric traction Copper and copper alloy grooved contact wires. **London: BIS**, (pp. 12-14).
- Ching, Y.L (1999). Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 14, No. 2, June 1999.
- Ching, Y.L., Bin, K.C., Wei, J. L. and Yen, F.H. (1997). Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. **Electric Power Systems Research**, Vol 47, (P.153–163).

- Ciccarelli, F., Fantauzzi, M., Lauria, D. and Rizzo, R. (2014). Special Transformers Arrangement for AC Railway Systems. Department of Electrical Engineering, **University of Naples Federico II**, Naples (Italy).
- EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission (1992). VDEW.
- EN 50163 (2007). Railway applications, Supply voltages of traction systems.
- Firat, G., Yang, G. and Al-Ali, H.A.H. (2015). **A comparative study of different transformer connections for railway power supply mitigation of voltage unbalance**. IEEE, Proceeding of APSCOM, 2015.
- Fukala, B. and Palecek, J. (2014). **Comparison of Schemes of Traction Transformer Stations in Terms of Their Impact on the Asymmetry in the Power Supply System**. Ostrava, Czech Republic.
- Goodman C.J., (1997). Train performance and simulation. **Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, IEE Power Division**.
- Golovanov, N., Lazaroiu, G.C., Rosia, M. and Zeninelli, D. (2005). Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power Systems Supplying High Speed Railway. **IEEE**, 2005.
- Horiguchi, A., Morimoto, H. and Suzuki, A. (2012). New type feeding transformer for ac traction. **East Japan Railway Company, Railway Technical Research Institute**, Tokyo, Japan,
- IEC 60850 (2007). Railway applications, Supply voltages of traction systems -Third edition
- IEEE recommended practice for monitoring electric power quality (2009). **IEEE std 1159 – 2009 Revision of IEEE std 1159 - 1995**, (pp. c1 – 81).
- Junqi, Z. and Wu M. (2014). Method for OCS Current Capacity Calculation in AC Railways. **ITEC Asia-Pacific 2014**.
- Kalantari, M.H., Sadeghi, M. J., Farshad, S.M. and Saeed, S.Y. (2011). Modeling and Comparison of Traction Transformer Based on the Utilization Factor Definitions. **International Review on Modelling and Simulations**, Vol. 4 ,N.1.
- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. and Schneider, E. (2009). Contact Lines for Electric Railways. **2nd revised and enlarged edition** (pp. 664 – 666).

- Kulworawanichpong, T. (2003). Optimising AC electric railway power flows with power electronic control. **PhD Thesis, University of Birmingham.**
- Lu, S. (2011). Optimising power management strategies for railway traction. **PhD Thesis, University of Birmingham, UK.**
- Mingpruk, N., Leeton, U., and Kulworawanichpong T. (2016). Modeling and simulation of voltage unbalance in AC electric railway systems using MATLAB/ Simulink. **IEEE/SICE International Symposium on System Integration.** (pp. 13–18.).
- Rochard, B.P. and Schmid, F. (2000). A review of methods to measure and calculate train resistances. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, Vol. 214, No. 4, (p. 185–199).
- Rodriguez, A.D., Fuentes, F.M. and Matta, A. J. (2015). Comparative analysis between voltage unbalance definition. **IEEE**, 2015.
- Suvarnabhumi Airport Rail Link, Airport Link (2010). (www.srtet.co.th).
- Tang, J.X.T. and Bin, N. (2011). **Optimization of speed profile for delayed train entering station.** Beijing Jiaotong University Beijing, China, 2011 IEEE , (p. 428).
- Working Group WG2 (1998). Guide to quality of electrical supply for industrial installations, Part 4: Voltage unbalance. **UIE.**
- Working Group on system and equipment consideration for traction: utility interconnection issues **IEEE**, (1999).
- Yao, H.C. and Chi, J .W. (2010). Power Quality Assessment of Specially Connected Transformers. **Proceedings of the 9th WSEAS Int. Conference on INSTRUMENTATION, MEASUREMENT, CIRCUITS and SYSTEM.**



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการเขียนโค้ดโปรแกรมแมทแลป

```

run('run_trainmove')
tic;

.....Rated TR.....

Ptr = 20e6;
Ftr = 50;
VHV = 69e3;
VLV = 27.5e3;
R1 = 0;
R2 = 0;
L1 = 0.0909;
L2 = 0.0144;
Rm = inf;
Lm = 0;

.....Railway.....

Rc = 0.184;
Lc = 1.923e-3;

Rr = 0.037;
Lr = 0.028;

.....Train.....

Vtrain = 25e3;
Ftrain = 50;

treal=1; % time

z = 1;

while treal<5002 %5002
    Mid = 8078; % Substation position m
    Last = 28193; % Last position m
    a=0; % declare a for counting the number of trains on the left
    in up-track
    b=0; % declare b for counting the number of trains on the right
    in up-track
    c=0; % declare c for counting the number of trains on the left
    in down-track
    d=0; % declare d for counting the number of trains on the right
    in down-track

    dx=1; % Line distance to avoid zero
    Ptrain11 = 1;
    Ptrain12 = 1;
    Ptrain13 = 1;
    Ptrain14 = 1;
    Ptrain21 = 1;
    Ptrain22 = 1;
    Ptrain23 = 1;
    Ptrain24 = 1;
    VA11 = 1;
    VA12 = 1;
    VA13 = 1;
    VA14 = 1;

```

```

        VA21 = 1;
        VA22 = 1;
        VA23 = 1;
        VA24 = 1;

% Counting trains on the left and right
%*****
% UP-track
for i=4:-1:1
    if (S(i,treal)<=Mid) && (S(i,treal)~=0)
        a=a+1;
        UP(1)=i;
    elseif (S(i,treal)>Mid) && (S(i,treal)~=Last)
        b=b+1;
        UP(1+b)=i;
    else
        end
end
%*****
% Down-track
for i=5:8
    if (S(i,treal)<=Mid) && (S(i,treal)~=0)
        c=c+1;
        DOWN(1)=i;
    elseif (S(i,treal)>Mid) && (S(i,treal)~=Last)
        d=d+1;
        DOWN(1+d)=i;
    else
        end
end
%*****
% UP-track
% There is one train on the left
if a==1
    sw11 = 1; % 1 = close
    S11 = (S(UP(1),treal))/1000;
    S12 = (Mid-S11)/1000;
    Ptrain11 = P(UP(1),treal);
    VA11 = VA(UP(1),treal);
else
%There is no train on the left
    sw11 = 0; % 1 = open
    S11 = dx/1000;
    S12 = (Mid-S11)/1000;
end

%There is no train on the right
if b==0
    sw12 = 0;
    sw13 = 0;
    sw14 = 0;
    S13 = dx/1000;
    S14 = dx/1000;
    S15 = dx/1000;
    S16 = (Last-Mid-S13-S14-S15)/1000;
elseif b==1
    %There is 1 train on the right

```

```

    sw12 = 1;
    sw13 = 0;
    sw14 = 0;
    S13 = (S(UP(2),treal)-Mid)/1000;
    S14 = dx/1000;
    S15 = dx/1000;
    S16 = (Last-Mid-S13-S14-S15)/1000;
    Ptrain12 = P(UP(2),treal);
    VA12 = VA(UP(2),treal);
elseif b==2
    %There are 2 trains on the right
    sw12 = 1;
    sw13 = 1;
    sw14 = 0;
    S13 = (S(UP(2),treal)-Mid)/1000;
    S14 = (S(UP(3),treal)-Mid-S13)/1000;
    S15 = dx/1000;
    S16 = (Last-Mid-S13-S14-S15)/1000;
    Ptrain12= P(UP(2),treal);
    Ptrain13= P(UP(3),treal);
    VA12 = VA(UP(2),treal);
    VA13 = VA(UP(3),treal);
elseif b==3
    %There are 3 trains on the right
    sw12 = 1;
    sw13 = 1;
    sw14 = 1;
    S13 = (S(UP(2),treal)-Mid)/1000;
    S14 = (S(UP(3),treal)-Mid-S13)/1000;
    S15 = (S(UP(4),treal)-Mid-S13-S14)/1000;
    S16 = (Last-Mid-S13-S14-S15)/1000;
    Ptrain12 = P(UP(2),treal);
    Ptrain13 = P(UP(3),treal);
    Ptrain14 = P(UP(4),treal);

    VA12 = VA(UP(2),treal);
    VA13 = VA(UP(3),treal);
    VA14 = VA(UP(4),treal);
end
%*****
% DOWN-track
%There is one train on the left
if c==1
    sw21 = 1; % 1 = close
    S21 = (S(DOWN(1),treal))/1000;
    S22 = (Mid-S21)/1000;
    Ptrain21= P(DOWN(1),treal);
    VA21 = VA(DOWN(1),treal);
else
    %There is no train on the left
    sw21 = 0; % 1 = open
    S21 = dx/1000;
    S22 = (Mid-S21)/1000;
end

%There is no train on the right

```

```

if d==0
    sw22 = 0;
    sw23 = 0;
    sw24 = 0;
    S23 = dx/1000;
    S24 = dx/1000;
    S25 = dx/1000;
    S26 = (Last-Mid-S23-S24-S25)/1000;
elseif d==1
    %There is 1 train on the right
    sw22 = 1;
    sw23 = 0;
    sw24 = 0;
    S23 = (S(DOWN(2),treal)-Mid)/1000;
    S24 = dx/1000;
    S25 = dx/1000;
    S26 = (Last-Mid-S23-S24-S25)/1000;
    Ptrain22= P(DOWN(2),treal);
    VA22 = VA(DOWN(2),treal);
elseif d==2
    %There are 2 trains on the right
    sw22 = 1;
    sw23 = 1;
    sw24 = 0;
    S23 = (S(DOWN(2),treal)-Mid)/1000;
    S24 = (S(DOWN(3),treal)-Mid-S23)/1000;
    S25 = dx/1000;
    S26 = (Last-Mid-S23-S24-S25)/1000;
    Ptrain22= P(DOWN(2),treal);
    Ptrain23= P(DOWN(3),treal);
    VA22 = VA(DOWN(2),treal);
    VA23 = VA(DOWN(3),treal);
elseif d==3
    %There are 3 trains on the right
    sw22 = 1;
    sw23 = 1;
    sw24 = 1;
    S23 = (S(DOWN(2),treal)-Mid)/1000;
    S24 = (S(DOWN(3),treal)-Mid-S23)/1000;
    S25 = (S(DOWN(4),treal)-Mid-S23-S24)/1000;
    S26 = (Last-Mid-S23-S24-S25)/1000;
    Ptrain22 = P(DOWN(2),treal);
    Ptrain23 = P(DOWN(3),treal);
    Ptrain24 = P(DOWN(4),treal);
    VA22 = VA(DOWN(2),treal);
    VA23 = VA(DOWN(3),treal);
    VA24 = VA(DOWN(4),treal);
end

sim('T1')

.....Display.....

[ShowVrmsAB(end) ShowVtrain0(end) ShowVtrain1(end)]

VSSab(z) = ShowVrmsAB(end);
VSSbc(z) = ShowVrmsBC(end);
VSSac(z) = ShowVrmsCA(end);
VSS1(z) = ShowVtrain0(end);

```

```

VSS2(z) = ShowVtrain1(end);

.....calculation VUF.....

VUFsc(z) = SVUFsc(end);

% VUF RMS
B(z) =
((ShowVrmsAB(end)^4)+(ShowVrmsBC(end)^4)+(ShowVrmsCA(end)^4))/((ShowV
rmsAB(end)^2)+(ShowVrmsBC(end)^2)+(ShowVrmsCA(end)^2))^2;
VUFrms(z) = (((1-(3-6*B(z)))^0.5)/(1+(3-6*B(z))^0.5))^0.5*100;

% VUF Max.Voltage deviation

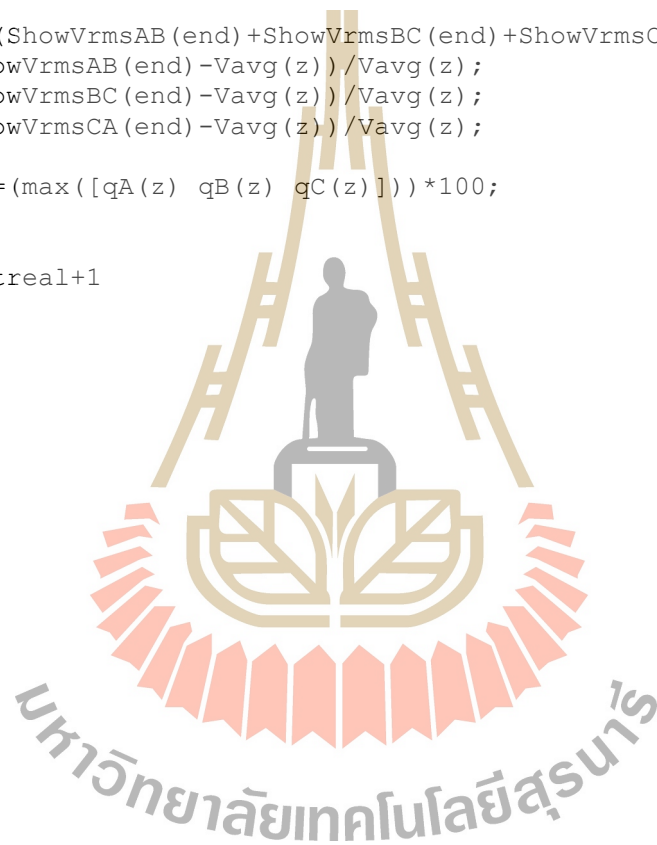
Vavg(z) = (ShowVrmsAB(end)+ShowVrmsBC(end)+ShowVrmsCA(end))/3;
qA(z) = (ShowVrmsAB(end)-Vavg(z))/Vavg(z);
qB(z) = (ShowVrmsBC(end)-Vavg(z))/Vavg(z);
qC(z) = (ShowVrmsCA(end)-Vavg(z))/Vavg(z);

VUFmax(z) = (max([qA(z) qB(z) qC(z)]))*100;

z = z+1;
treal = treal+1

end
toc;

```



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Mingpruk, N., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T. (2016). **Modeling and simulation of voltage unbalance in AC electric railway systems using MATLAB/ Simulink.** IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 13-18.

Kulworawanichpong, T., Mingpruk, N. and Ratniyomchai, T. (2017). **Estimation of voltage unbalance at an AC traction substation with different train operational scenarios.** Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, Vol. 2, No. 3 :pp. 1086-1091.



Modeling and Simulation of Voltage Unbalance in AC Electric Railway Systems using MATLAB/Simulink

Nattapong Mingpruk, Uthen Leeton and Thanatchai Kulworawanichpong

Abstract—this paper presents the modeling and simulation of voltage unbalance for AC electric railway systems. The development is based on MATLAB/Simulink program to determine voltages at the substation. The voltage unbalance factor (VUF) is used for this evaluation. Suvarnabhumi Airport Rail Link (ARL) in Bangkok, Thailand, is chosen for test. This test system is supplied by a cyclic winding connection of two single-phase traction transformers in which its primary side connected to the 69-kV transmission system of MEA (Metropolitan Electric Authority) power grid. The AC railway power feeding is a direct feeding scheme via 25-kV overhead catenary system. The total service distance of the ARL is 28.298 km with 8 passenger stations. The multi-train movement simulation is developed and embedded into the MATLAB program. The simulation results show that the operating voltage and the VUF during the train service can be obtained.

I. INTRODUCTION

In urban rail systems with high dense traffic, it has an impact on following train's speed profile when the preceding train is delayed at station. The impact is that the following train will decelerate, even to stop, to wait until the station area is clear [1]. Asymmetric loading of the three-phase power supply system is one of the most relevant influences of single-phase AC electric railways operation. The rate of voltage unbalance in the three-phase system can theoretically be caused by all the elements involved in the production, transmission and power consumption. In the operation practically the only reason is one or two-phase load. As the primary source of voltage unbalance or load must be considered. The voltage unbalance on the system impedances, which in turn affects other consumers of electricity [2].

This paper shows how to model the AC railway power supply system for Suvarnabhumi Airport Rail Link by using multi-train simulation program instructed in MATLAB/Simulink. This paper is divided into six sections. Section two explains a basic of multi-train simulation. Section three is a review of AC railway power supply and VUF. The simulation of the AC railway power supply system is presented in Section four. Section five gives simulation results and discussions. Lastly, the conclusion is Section six.

II. MULTI-TRAIN SIMULATION

Train movement calculations are based on the Newton's laws of motion, taking into account of gradients, speed

restriction, modes of operation, etc. [3]. The net force applied to accelerate a train is $F = M_{eff} \alpha$, where F is the net force, M_{eff} is the effective mass and α is the train acceleration. In this section, the basic modules within the multi-train simulation are briefly reviewed.

A. Train movement calculation

The train motion is opposed by various forces, e.g. train resistance, track gradient force, etc. By applying Newton's second law, the train movement equation is expressed in (1).

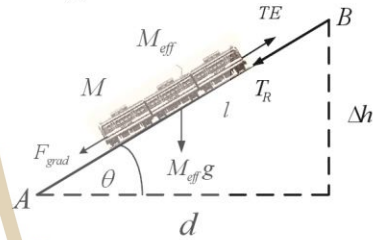


Figure 1. Resolution of mass force on a gradient

$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

Where TE is the tractive effort (N), F_{grad} is the gradient force (N), T_R is the train resistance (N), M_{eff} is the effective mass (kg) and α is the train acceleration (m/s^2) which will be positive for uphill running, negative for downhill running and zero for flat track running.

- **Tractive effort (TE):** The force which a locomotive can exert when pulling a train is called tractive effort [5]. In order to use this information easily in calculations of acceleration and deceleration, it is helpful to develop an approximation which covers the speed range of interest.

- **Gradient force (F_{grad}):** To push a heavy train up slopes requires substantial force. Gradients on railways are small, see Figure 1. And usually expressed in the form of $\Delta h/l$ where Δh is the vertical distance, l is the slope length or horizontal distance from point A to B, see Figure 1. With a small arbitrary angle θ the gradient force can be approximated by using (2).

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g \Delta h}{l} \quad (2)$$

N. Mingpruk, U. Leeton and T. Kulworawanichpong are with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand. (Corresponding author e-mail: thanatchai@gmail.com).

• Train resistance (T_R): The motion of the train is opposed by a number of resistive forces. The overall resistance on level track can be formulated as follows [6]:

$$T_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

Where v is the vehicle speed (km/h) and the coefficients A (kN), B (kN/h/km) and C (kN/h²/km²) are all constants, referred as the Davis coefficients [7].

• Effective mass (M_{eff}): The rotational inertia of the rotating components on the train must be taken into account in order to properly calculate the acceleration of the train. This is usually done by adding a rotary allowance term to the mass of the train. This is expressed as a fraction of the tare mass of the train which is the mass of train without loads or passengers [6].

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) + M_f \quad (4)$$

Where M_t is the tare mass, λ_w is the rotary allowance and M_f is the freight or passenger load.

B. Power consumed by a train

The power consumed by a train corresponding to tractive effort TE and instantaneous speed v is given by the following expression [4].

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (5)$$

Where η denotes the efficiency of conversion of electrical input power to the mechanical output power at the wheels.

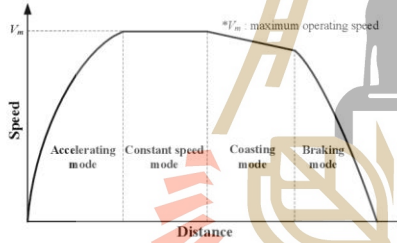


Figure 2. Operating modes for the train

C. Speed and position update

Once the train acceleration is obtained, speed and position of the train is calculated by the following equations,

$$v_i = v_t + a \Delta t \quad (6)$$

$$s_i = s_t + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (7)$$

where v_i and v_t are the terminal and initial speed, Δt is the time step, 0.1 s in this paper, s_i and s_t are the position after and before updated.

D. Summary of train movement calculation

The train movement calculation can be summarized as follows:

- Use the speed from the previous time update to evaluate the tractive effort and thus the power consumption (Equation (5)).
- Determine the gradient force, train resistance, etc. and then compute the train acceleration (Equations (1) - (4)).
- Update the train speed and position (Equations (6) - (7)).

III. AC RAILWAY POWER SUPPLY AND VUF

A. AC railway power supply

Normally, the electric locomotives are powered by AC three-phase power supply system from the national grid and step-down transformer. ARL power supply system uses two 20 MVA transformers connecting each other by means of cyclic permutation of phases as shown in Figure 3 to step down the voltage level of 69 kV to 27 kV, see Figure 4.

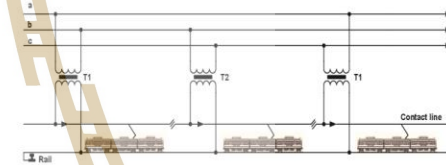


Figure 3. Connection by cyclic permutation of phases

The connection by cyclic connection of phases (Figure 3.) can be considered for the advantages in disposition and easier operation of substation, whereas the three - phase short - circuit power in the primary network is remarkably high if compared with single - phase load power. In this arrangement the single transformer is fed with two phase and obviously each of the different phases of the primary three - phase network can be balanced by systematically distributing the phase connection base on the traction loads [8].

The entire line of "ARL Bangkok" is fed by one TPS (traction power substation) with 2x20 MVA transformers, located at km - 8.078 near the passenger station of Ramkham Haeng. Minimum short circuit power at the point of common coupling BAT 6912: SSC = 2.7 GVA. Characteristic transformer data: $U_r = 69/27.5$ kV $S_r = 20$ MVA ONAN $u_{kr} = 12\%$ as shown in Figure 4.

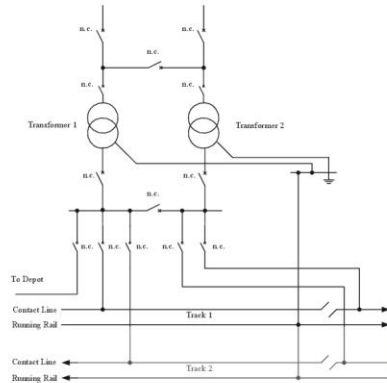


Figure 4. The substation infeed with two transformers

B. VUF (Voltage Unbalance Factor)

Three-phase power system should be balanced both voltage and current. Practically, three-phase power systems used in engineering applications or industries are normally imbalanced which causes the impact on power system in factories such as copper loss in wires with greater amount of current, less life expectancy and efficiency. There are 3 equations to calculate VUF: Sequence Component, RMS line – voltage, and Max. voltage deviation.

Imbalance (sometimes called unbalance) in a three-phase system is defined as the ratio of the magnitude of the negative sequence component to the magnitude of the positive sequence component, expressed as a percentage. This definition can be applied for either voltage or current. The current imbalance can be considerably higher, especially when single-phase loads are present. Mathematically, the voltage imbalance is represented by equation (8).

$$VUF[\%] = \frac{|V'_{neg}|}{|V'_{pos}|} \times 100\% \quad (8)$$

Where VUF is the voltage unbalance factor, V'_{neg} is of the magnitude of the negative sequence component voltage and V'_{pos} is the magnitude of the positive sequence component voltage

One of the main problems presented in field is the inability to determine the sequence components when you have only the RMS meters, however, the voltage unbalance factor can be calculated using only the RMS values of the phase – to – phase voltage without angle as shown in equation (9) and (10).

$$VUF[\%] = \frac{(1 - \sqrt{3 - 6\beta})}{(1 + \sqrt{3 - 6\beta})} \times 100\% \quad (9)$$

$$\beta = \frac{(V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4)}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (10)$$

where V_{AB} , V_{BC} and V_{CA} are the RMS line – to – line voltages.

The values of the voltage unbalance index depend on the voltage level to which the load is connected. In many countries of the European Union the following compatibility level on LV and the planning limit on MV and HV are adopted: for LV $VUF \leq 2\%$, for MV $VUF \leq 2\%$ and for HV $VUF \leq 1\%$. In standard adopted in other countries, like United Kingdom, the above values are: for LV $VUF \leq 2\%$, for MV $VUF \leq 2\%$ and for HV $VUF \leq 2\%$ [9, 10].

In France, for the case of high speed trains new values have been proposed: $VUF \leq 1\%$ for periods higher or equal to 15 min and $VUF \leq 1.5\%$ for periods less than 15 min.

In some countries, voltage unbalance level is defined as the maximum phase voltage deviation from the average value of the three phase voltages, reported to this average value. In this case, for the three phase voltages it is computed an average value V_{avg} and the deviation δ_A , δ_B and δ_C [11].

$$V_{avg} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}$$

$$\delta_A = \frac{V_A - V_{avg}}{V_{avg}} \quad (11)$$

$$\delta_B = \frac{V_B - V_{avg}}{V_{avg}}$$

$$\delta_C = \frac{V_C - V_{avg}}{V_{avg}}$$

The voltage unbalance is established by

$$VUF[\%] = \text{Max}(|\delta_k|) \times 100\%, k = A, B, C \quad (12)$$

IV. THE SIMULATION OF AC POWER SUPPLY SYSTEM FOR ARL

The model of AC railway power supply system for double-track ARL is a 25 kV 50 Hz system receiving power from the 69kV MEA utility grid and stepping down to 27.5 kV. The total service distance is 28 298 km with the traction substation located at 8.078 km away from the first passenger station (Phaya Thai Station). The train operation is that the first trains on each track (Train1 from Phaya Thai Station and Train5 from Suvarnabhumi Airport Station) start to run simultaneously but in opposite direction. Then, it operated with the headway of 15 minutes. The arrangement of the trains and diagram of the model of the power supply system for ARL are shown in Figure 5.

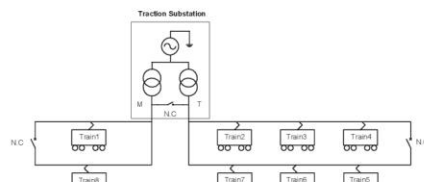


Figure 5. the model of power supply system for ARL

The train operation is simulated in MATLAB/Simulink creating block diagram illustrated in Figure 6 to determine voltage and VUF profile of traction power supply system for ARL.

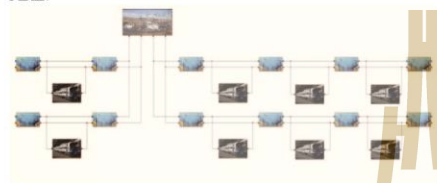


Figure 6. Block diagram of traction power supply system in MATLAB/Simulink

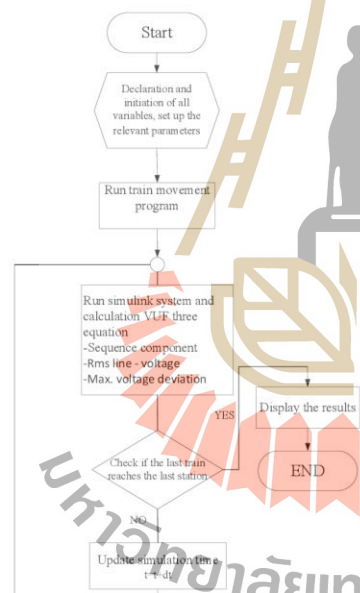


Figure 7. Flowchart or algorithm of AC power supply study for Suvarnabhumi Airport Rail Link

The algorithm of the simulation for ARL is firstly declaration and initiation of all variables, set up the relevant parameters. Next, execute train movement program with MATLAB/M-File for calculating power of trains, speed profile and train positions. Next, run block diagram model with MATLAB/Simulink to obtain voltage of the main transformer (M) with the teaser transformer (T) at every time step and calculate VUF in three different equations: i) Sequence component, ii) RMS line voltage, and iii) Maximum voltage deviation at every time step. Next, check whether the last train reaches the last station or not, if not, then update simulation time and run block diagram model in MATLAB/Simulink again, if yes, display the results as shown in Figure 7.

V. SIMULATION AND RESULTS

In this section, The Suvarnabhumi Airport Rail Link system was modeled for the simulation tests [12]. The Suvarnabhumi Airport Rail Link was the first electric mass transit railway overhead catenary system or overhead contact system to commence operations in Thailand. The Suvarnabhumi Airport Rail Link is composed of 8 stations and 1 traction substations as shown in Figure 8. Parameters's setting for this simulation can be found in Appendix I.



Figure 8. Suvarnabhumi Airport Rail Link map

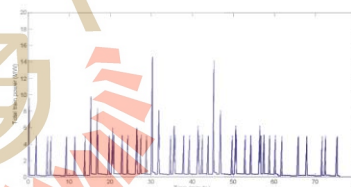


Figure 9. Total train power

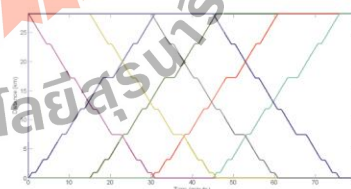


Figure 10. Multi-train position

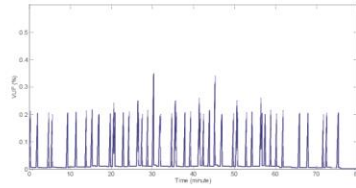


Figure 11. VUF: Sequence component

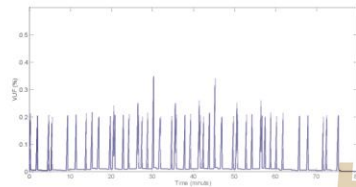


Figure 12. VUF: RMS line voltage

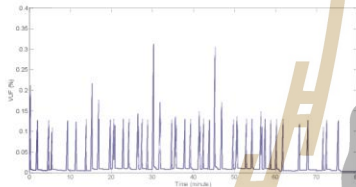


Figure 13. VUF: Maximum voltage deviation

Figure 9 shows the total train power against time and Figure 10. shows that multi-train position. It is observed that the voltages of a certain substation are changed when the train moves close to, passes by, and beyond that substation. Figure 11 shows VUF obtained by sequence component from equation (8). Figure 12 shows obtained by equation (9). Figure 13 shows VUF obtained by equation (12).

TABLE I. RESULTS OF VOLTAGE UNBALANCE FACTOR

Type of VUF	Maximum value (%)	Minimum value (%)
Sequence component	0.3478	0.0020
RMS line - voltage	0.3478	0.0020
Max. voltage deviation	0.3122	0.0018

The simulation results reveal that the voltage profile of substation depends on the speed profile. For the teaser transformer, the maximum voltage is 27.446 kV and minimum voltage is 26.825 kV and for the main transformer, maximum voltage is 27.444 kV and minimum voltage is 27.048 kV. According to the results of voltage unbalance factor, voltage unbalance factor has non-smooth profiles

since the train has been switched between braking and accelerating mode frequently depending on whether the current speed is greater or less than the command speed and voltage of train at every time step. It is observed that VUF depends on two factor: the amount of consumed power in each phases (M and T) and the differences of consumed power between phase-M and phase-T. The former means VUF is likely to be high if the transformer take a large amount of loads in either phase and for the latter, the more differences between phase-T and phase-M loads, the more imbalance in three-phase system. Two points in simulation are selected to compare the load conditions giving high and low VUF. At the simulation time of 30.35 min., phase M and phase T feed the train load of 9.5356 MW and 5.0183 MW, respectively, so the difference is 4.5174 MW resulting in the maximum VUF. In contrast, at 29 min., there are loads of 0.07 MW and 0.2504 MW in phase-M and phase-T, respectively, which are much less than those at 30.35 min. then the difference is 0.1804 MW leading to the low value of VUF.

VI. CONCLUSION

This paper presents the model of AC railway power supply system for Suvarnabhumi Airport Rail Link. The purpose of this work is to study train movement, The simulation of AC power supply system and determination of VUF by i) sequence component, ii) RMS line voltage, and iii) maximum voltage deviation. The test system has the service distance of 28.298-km and is fed through the overhead contact wire. To verify the correctness, the proposed model is simulated with the same situation as in literature [paper Power Quality Assessment of Specially Connected Transformers]. The results are compared and correspond to each other. Also, the results show that VUFs obtained by sequence component are similar to those obtained by RMS line voltage. And, the least values of VUF are attributed to the maximum voltage deviation. All results are compliant with the IEEE Standard 1159-2009: voltage imbalance [13].

REFERENCES

- [1] Jing Xun, Tao Tang and Bin Ning, "Optimization of speed profile for delayed train entering station", Beijing Jiaotong University Beijing, China, 2011 IEEE, p. 428
- [2] Bogdan FUKALA and Josef PALECEK, "Comparison of Schemes of Traction Transformer Stations in Terms of Their Impact on the Asymmetry in the Power Supply System", Ostrava, Czech Republic, 2014 IEEE
- [3] C.J. Goodman, "Train performance and simulation", Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, IEE Power Division, April (1997)
- [4] T. Kulworawanichpong, "Optimising AC electric railway power flows with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November (2003).
- [5] Applications of Mathematics, "Tractive effort, acceleration and braking", The Mathematical Association (2004) (www.m-a.org.uk).
- [6] S. Lu, "Optimising power management strategies for railway traction", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, October (2011).

- [7] B. P. Rochard and F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 214, No. 4 (2000), p. 185-199.
- [8] F. Ciccarelli, M. Fantauzzi, D. Lauria, and R. Rizzo, "Special Transformers Arrangement for AC Railway Systems," Department of Electrical Engineering – University of Naples Federico II, Naples (Italy), 2014 IEEE.
- [9] Working Group WG2, "Guide to quality of electrical supply for industrial installations, Part 4: Voltage unbalance", UIE, 1998.
- [10] EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission, VDEW, 1992
- [11] Working Group on system and equipment consideration for traction: utility interconnection issues, IEEE, 1999.
- [12] Suvarnabhumi Airport Rail Link, Airport Link (2010), (www.srtet.co.th).
- [13] "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality," IEEE std 1159 – 2009 (Revision of IEEE std 1159 - 1995), pp. c1 – 81, June 2009.

APPENDIX I

Overhead catenary system for ARL:

- Contact wire: Cu 107mm² (20% abrasion)
- Messenger wire: Bz 70mm²
- Return Conductor: E-Al 120mm²
- Rails: UIC 60, 15%

Traction power substation for ARL:

- 2x20 MVA transformers (cyclic connection)
69/27.5 kV, 12% impedance, ONAN
- Short-circuit power of the substation is 2.7 GVA

3-car train set (City Line) for ARL:

- Tare weight: 131 tons
- Rotary portion of tare weight: 6%
- Maximum payload: 44.9 tons
- Maximum design speed: 160 km/h
- Maximum acceleration: 1 m/s²
- Maximum deceleration: 0.88 m/s²
- Gear/Motor/converter efficiency: 82%
- Maximum auxiliary power: 200 kVA
- Maximum tractive effort: 200 kN
- Train resistance formula:

$$F_{w,3-car train} = 0.0162 \cdot \frac{N}{kg} \cdot m_{train} + 0.00017 \cdot \frac{1}{s} \cdot v \cdot m_{train} + 4.144 \cdot \frac{kg}{m} \cdot f_{wheel} \cdot v^2$$

With F in [N]
 m_{train} in [kg]
 v in [m/s]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Estimation of voltage unbalance at an AC traction substation with different train operational scenarios

Thanatchai Kulworawanichpong*, Nattapong Mingpruk, Tosaphol Ratniyomchai

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 April, 2017

Accepted: 24 June, 2017

Online: 16 July, 2017

Keywords:

Voltage unbalance factor

AC electric railway

Cyclic permutation of phases connection

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation of the voltage unbalance in the power supply system of an AC electrified railway. The operating voltage at the traction substation is obtained by MATLAB/SIMULINK program and the voltage unbalance is evaluated by considering the voltage unbalance factor (VUF). Suvarnabhumi Airport Rail Link (ARL), in Bangkok, Thailand, is chosen to be a case study. The ARL is supplied by two single-phase traction transformers connected as a cyclic permutation of phases. According to the extension plan of the ARL, four service scenarios with different headways, auxiliary loads and total weights of the trains were simulated to study how the different scenarios influence the VUF at the three-phase side. It can be summarized that at the same headway, the VUF was increased when the train weight and auxiliary power load were increased. In case of different headways, the longer the headway, the more voltage unbalance. The extension plan of the ARL in the near future can be achieved with the voltage unbalance level under the maximum allowable value.

1. Introduction

This paper is an extension of work originally presented in IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2016) [1]. However, the additional experimental pieces proposed in this paper is that the voltage unbalance at an AC traction substation is effected by the three factors of the train operation, including train headway, number of train and additional auxiliary power. This consideration is evaluated for the extension plan of the ARL in the near future. The results would be verified and discussed as follows:

There are presently various forms of ground transportation that help the passengers, particularly the international tourists, to make a decision. The mass rapid transit system is one of the most favorite ground transportation systems and currently vital to developing countries, especially regarding the fundamental economy and society. In Thailand, the tourism industry grows quickly. Therefore, the number of the international tourists at the Suvarnabhumi airport also increased. The cheapest cost and shortest time to travel from the Suvarnabhumi airport to Bangkok city center and other mass rapid transit lines is traveling by the Suvarnabhumi airport rail link (ARL).

The power feeding system of the ARL is the 25 kVrms overhead catenary system receiving electric power from the three-phase AC transmission system. The traction substation transformers are connected as a cyclic permutation of phases, i.e. an alternate phase connection such as A-B, B-C, and C-A. In practical, the voltage unbalance and voltage drop are frequently occurred at the point of common coupling depending on the train operations. In additions, the State Railway of Thailand has planned to extend the service from Suvarnabhumi airport to Don Muang airport in the near future. Therefore, the energy consumption by trains at the traction substation will definitely increase. Obviously, the voltage unbalance at the three-phase side of the traction substation is likely to increase too. To assess the feasibility of the extension plan, four expected train operational scenarios have been simulated by using MATLAB/SIMULINK to evaluate the voltage unbalance and to study the effects of the headways, train weight, and auxiliary power on the voltage unbalance.

This paper presents the study of the voltage unbalance at the traction substation of the ARL in four different scenarios. The contents are divided into six sections. Section 1 is an introduction. Section 2 describes a train movement, power consumption, and voltage unbalance factor (VUF) calculation. Section 3 describes the ARL power supply system and parameters calculation. Section 4 presents the modelling in MATAB/SIMULINK and simulation

*Corresponding Author: Thanatchai Kulworawanichpong, 111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand | Email: thanatchai@gmail.com

www.astesj.com

procedure. Simulation results and discussion are described in section 5. Lastly, a conclusion is in section 6.

2. Train Movement and Voltage Unbalance Calculation

A train motion is calculated by the Newton's second law of motion taking account of gradients, speed limitation, modes of operation, etc. In order to obtain the required power, speed, and position of the train, it is indispensable to simulate a train movement. In this section, the basic modules within the train simulation are briefly reviewed [1]. In addition, the definition of the voltage unbalance factor is proposed.

2.1. Train movement calculation

A train motion is resisted by several resistive forces, e.g. train resistance, track gradient force, etc. The free body diagram of all forces acted upon the train on an inclined plane is shown in Figure 1. By applying Newton's second law, the train movement equation is expressed in (1):

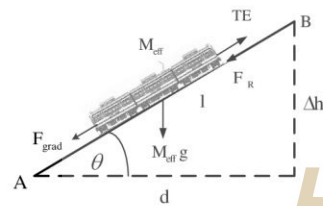


Figure 1. Free body diagram of a train on an inclined plane [1].

$$F = TE - F_{grad} - F_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

where TE denotes the tractive effort (N), F_{grad} denotes the gradient force (N), F_R denotes the train resistive force (N), M_{eff} denotes the effective mass (kg) and α denotes the train acceleration (m/s^2)

- Tractive effort (TE): the force generated by a locomotive to pull a train [2].
- Gradient force (F_{grad}): the weight of a train opposes the train movement when a train is on a positive slope and helps accelerate when it is on a negative slope. The gradient force is usually expressed in the form of $\Delta h/l$, where Δh is the vertical distance, l is the slope length or horizontal distance from point A to B, see Figure 1. With a small arbitrary angle θ the gradient force can be approximated by using (2), where g is the acceleration rate due to gravity of the earth.

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g \Delta h}{l} \quad (2)$$

- Train resistive force (F_R): the motion of the train is opposed by a number of resistive forces. The overall resistance can be formulated as follows [3]:

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

where v is the vehicle speed (km/h) and the coefficients A (kN), B (kN/h/km) and C ($kN \cdot h^2/km^2$) are all constants called the Davis coefficients [4].

- Effective mass (M_{eff}): it is the sum of tare mass (mass of train without loads or passengers) and rotational inertia of the rotating components on the train which is expressed as follows [3]:

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) + M_l \quad (4)$$

where M_t is the tare mass, λ_w is the rotary allowance and M_l is the freight or passenger load.

The modes of train motion considered in this study include accelerating, constant speed, coasting, and braking modes. The speed-distance curve describing each mode of motion is illustrated in Figure 2.

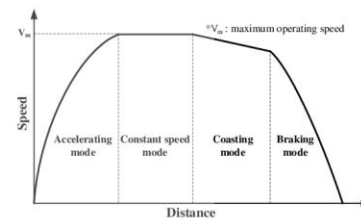


Figure 2. Train operating modes [1].

2.2. Train Power Consumption

The power required by a train P is given by the following expression [5]:

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} + P_{aux} \quad (5)$$

where η denotes the efficiency of conversion of the electrical power to the mechanical power, TE denotes the tractive effort, v denotes the instantaneous speed and P_{aux} denotes auxiliary power.

2.3. Voltage Unbalance Factor

The voltages of a three-phase power supply are ideally equal in magnitudes and phase angles of 120° apart from each other. The three-phase system with those conditions are called a balanced three-phase system and its phasor diagram is shown in Figure 3-A. If the three-phase voltage unbalance occurs, both magnitudes and phases are altered, see Figure 3-B. It can be seen that the neutral point (n) will move to the position of n_2 . The effects of voltage unbalance, for example, are: the reduction of three-phase induction motor operating lifetime, performance or even failure, etc.

According to IEEE 1159 – 2009, unbalance in a three-phase system is defined as the ratio of the magnitude of the negative sequence component to the magnitude of the positive sequence component, expressed as a percentage. This definition can be applied for either voltage or current. Typically, the voltage

unbalance of a three-phase service is less than 2%, especially when a single-phase load is presented. Mathematically, the voltage imbalance is represented as follows [7]:

$$\%VUF = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} \times 100\% \quad (6)$$

where %VUF is the percentage of the voltage unbalance factor, V_{pos} is the positive sequence component and V_{neg} is the negative sequence component.

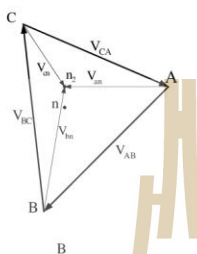
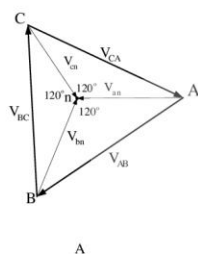


Figure 3. A) Phasor diagram of a three-phase voltage balance and B) Phasor diagram of a three-phase voltage unbalance (modified from [6]).

3. ARL System Description and Parameters Calculation

To obtain the voltage solutions of the three-phase power supply and the voltage unbalance factor at the point of common coupling of the ARL traction substation. The parameters calculation and structure of an AC traction power supply, a transformer connection, and an overhead contact system are briefly proposed as follows:

3.1. Cyclic permutation of phases connection

The connection by cyclic connection of phases as shown in Figure 4 can be considered for the advantages in disposition and easier operation of substations, whereas the three-phase short-circuit power in the primary network is remarkably high if compared with single-phase load power. In this arrangement, the single transformer is fed with two phases and the primary three-phase network can be balanced by systematically distributing the phase connection based on the traction loads [8].

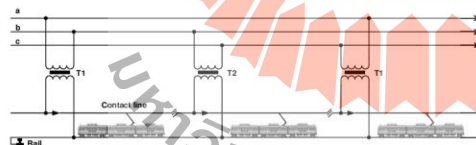


Figure 4. AC traction substation with cyclic permutation of phase

3.2. Structure of the ARL Traction Power Supply

The entire line of the ARL is supplied by a traction power substation (TPS) with 2x20 MVA transformers, located at 8.078 km near Ramkham Haeng station. A minimum short circuit

www.astesj.com

capacity of the utility grid is 2.7 GVA. Transformer's characteristics data are: $U_r = 69/27.5$ kV, $S_r = 20$ MVA, Oil Natural Air Natural, Ukr.= 12 %. The single-line diagram of the substation is illustrated in Figure 5.

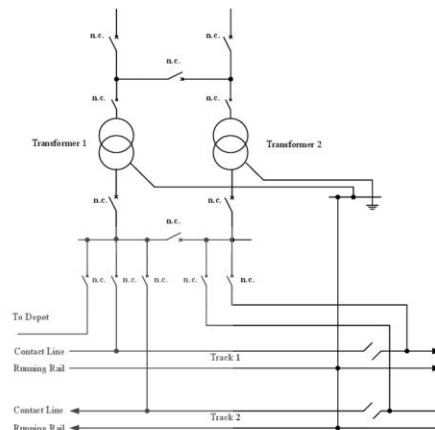


Figure 5. The substation infixed with two transformers [1].

3.3. Overhead Contact System

The overhead contact system in Figure 6 consists of catenary (C), rails (R), and earth (E) described as follows: the catenary (C) is formed by a contact wire and one or two messenger wires. They share the current and are always at the same potential. To reduce the system complexity, their impedances are combined all together to form a single conductor. There are two rails (R) in the same track, which are treated as a single cylindrical conductor. There is a wire called "earth wire" that is used for safety reasons and it normally carries no current. It is assumed that the leakage current from the rails flows underneath the track with a depth of D_E through a virtual conductor called the return earth by (7) and an earth resistivity can be calculated by (8):

$$D_E = 655 \sqrt{\frac{\rho_E}{f}} \quad (7)$$

$$\rho_E = 5471 e^{-0.434} \quad (8)$$

where f is an operating frequency (Hz) and ρ_E is the earth resistivity ($\Omega \cdot m$).

A reactance caused by electrical induction play an important role in a transmission system for an AC railway power supply. The value of conductor's reactance in the system is dependent on the conductor arrangement and the distance between conductors, see Figure 6. Impedance per unit length of the catenary and running rail is expressed in (9) and (10).[9]:

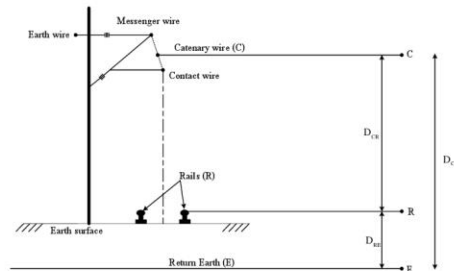


Figure 6. Overhead contact system configuration [9].

$$Z_c = R'_c + j2\pi f \mu_0 \left(\frac{1}{8\pi} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D_{CE}}{GMR_c} \right) \quad (9)$$

$$Z_r = R'_r + j2\pi f \mu_0 \left(\frac{\mu_r}{8\pi} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{D_{RE}^2}{RG \times GMR_r} \right) \quad (10)$$

where

Z_c is catenary's impedance per unit length (Ω/km)

Z_r is rail's impedance per unit length (Ω/km)

R'_c is catenary's resistance per unit length

R'_r is rail's resistance per unit length

μ_0 is magnetic permeability of air

μ_r is magnetic permeability of rails

GMR_c is catenary's geometric mean radius

GMR_r is rail's geometric mean radius

RG is a distance between rails in the same track

D_{CE} is a distance between catenary and earth

D_{RE} is a distance between rail and earth

4. Modelling and Simulation Procedure

The model of the traction transformer, catenary, rails and train of the ARL are modelled by using the built-in blocks in MATLAB/SIMULINK. The configuration of the ARL power supply system is briefly mentioned. Lastly, the evaluation of the VUF at the traction substation of the ARL with different scenarios of the train operations is discussed as follows:

4.1. The model of the transformer in the traction substation

The two traction transformers in the ARL traction substation are alternately connected to different pairs of phases. To estimate the operational voltage and voltage unbalance at the traction substation, the transformer model is formed by using the multi-

winding transformer built-in block in MATLAB/SIMULINK program described as follows:

This connection has the same configuration as the single-phase connection except it connects to different pairs of phases. For example, the first transformer is connected to phase AB and the second transformer is connected to phase BC as shown in Figure 7.

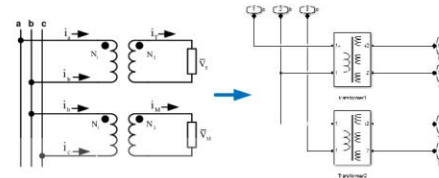


Figure 7. Cyclic permutation of phase connection in MATLAB/SIMULINK.

4.2. ARL traction power supply modelling in MATLAB/SIMULINK

The AC traction power supply modelling is developed in the block models in MATLAB/SIMULINK. The model consists of 4 main parts: (i) AC traction substation, (ii) transformers, (iii) overhead catenary system, and (iv) electric trains as shown in Figure 8. The 69 kV three-phase AC transmission system is represented by the three-phase source built-in block. The transformers will step down the voltage from 69 kV to 27.5 kV using the multi-winding built-in block connected as a cyclic permutation of phases. The overhead catenary and running rails have the impedances obtained from the textbook [9] and BS EN 50149:2012 standard. The series RLC branch built-in block is used to model this transmission and return circuit system. Lastly, the electric trains are modelled as a series RLC load.

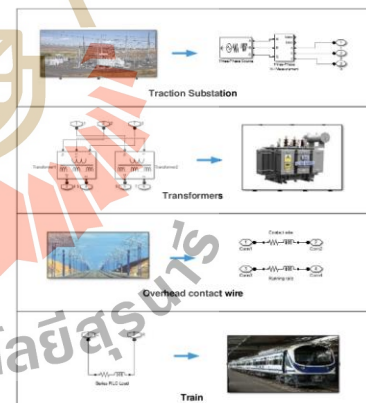


Figure 8. The power feeding components' models in MATLAB/SIMULINK.

The ARL system was modelled for the simulation tests in this paper. The ARL was the first electric mass transit railway operated with overhead catenary system or overhead contact system to commence operations in Thailand. The ARL is composed of 8 passenger stations and one traction substation as shown in Figure 9. Parameters' setting for this simulation can be found in Appendix.



Figure 9. Suvarnabhumi Airport Rail Link map [1].

The AC traction substation of the ARL draws the electrical energy with the voltage level of 69 kV from the metropolitan electricity authority (MEA). The traction substation transformers with an alternate phase connection transform the grid voltage into the train's nominal voltage of 27.5 kV. The total service distance is 28.298 km and the traction substation's position is at 8.078 km. In the simulation, the trains depart from both tracks at the same time with the same headway throughout the service, e.g. the first and fifth trains start the operation at the same time, also the second and the sixth trains and so on as shown in Figure 10.

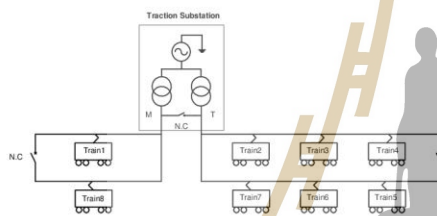


Figure 10. The schematic diagram of the ARL traction power supply system [1].

4.3. Simulator structure

The simulator has 2 major parts: main program (script M-file) and the power network solver (SIMULINK). The main program performs the multi-train movement, performance calculation, and the network capture, i.e. sorting trains on service, setting the distances between the components in the system and the train data. Then, the trains' positions and powers together with the distances recently mentioned are transferred into the SIMULINK block model to solve the voltage solution (primary and secondary voltages of the substation) and VUF. Finally, those values are returned to the main program to be stored and display the graphical illustration. The operating diagram is shown in Figure 11.

5. Simulation Results and Discussion

The results showed the VUFs at the point of common coupling of the ARL traction substation with four different scenarios as shown in Figure 12. The operational conditions, i.e. headways and the train configurations, are given in Table 1. Each train has the

maximum speed of 70 km/h and the speed profile is shown in Figure 13.

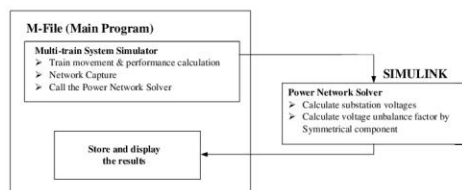


Figure 11. Diagram of the simulation program.

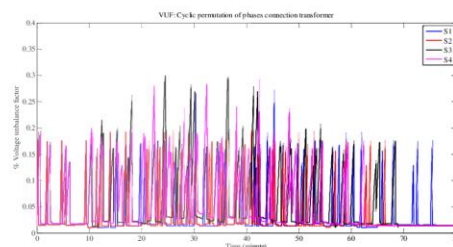


Figure 12. Percentage of VUFs in each scenario

Table 1: Operational conditions of Suvarnabhumi Airport Rail Link.

Scenario	Headway	Train configuration	Total weight	Auxiliary power
S1	15 min	3 car train	183.67 t	200 kVA
S2	12 min	3 car train	183.67 t	200 kVA
S3	12 min	4+3 car train	422.64 t	450 kVA
S4	10 min	4+3 car train	422.64 t	450 kVA

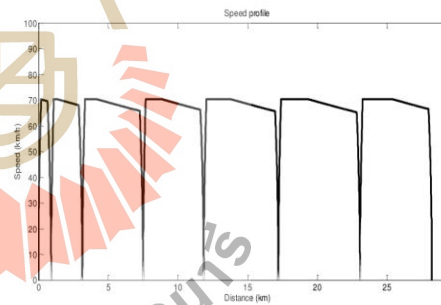


Figure 13. Speed profile.

Considering scenario S1 and S2 in Figure 12, the VUF obtained from S2 was found to be lower than that from S1 because the total weight and auxiliary power of S1 and S2 are equal to each other but the headway of S1 is longer than that of S2. It can be noted that when the headway is shorter, the number of trains appear

in the system, so the total loads on the left and the right of the substation were more likely to have the same values leading to less voltage unbalance. To study the effect of different total weight and auxiliary power of the train on the voltage unbalance, scenario S2 and S3 were compared. As the total weight and auxiliary power load of S3 were greater than those of S2, more power would be consumed in S3, and there was more possibility of different amount of consumed power between the left and right side of the traction substation. Thus, the voltage unbalance of S3 was more than that of S2. In addition, the comparison between S3 and S4 gave the same result as the S1-S2 comparative result. However, due to more weight and auxiliary power load in S3 and S4 compared to S1 and S2, the voltage unbalance in S3 and S4 was more than that of S1 and S2, respectively and the voltage unbalance of S3 was more than that of S4 because the headway of S3 was longer. In the viewpoint of the maximum %VUF for each scenario as shown in Table 2, it helped confirm the above explanation since the results seen from Figure 12 were consistent with the results from Table 2.

From the results, it could be concluded that the longer the headway, the more voltage unbalance. That meant the voltage unbalance was more reduced when the trains were released more frequently. The total weight and auxiliary power also affected the voltage unbalance. According to IEEE 1159 –2009 standard, the %VUF must not exceed 2%. Therefore, the service extension of the ARL can be carried out without any violation of voltage unbalance based on this simulation results.

Table 2: The Maximum %VUF

Scenario	%VUF Max	Comparison with IEEE 1159 –2009 standard (2%)
S1	0.2717	Less than 2% (passed)
S2	0.1946	Less than 2% (passed)
S3	0.2993	Less than 2% (passed)
S4	0.2906	Less than 2% (passed)

6. Conclusion

This paper presents the study of voltage unbalance caused by the AC railway power supply system using MATLAB/Simulink. The VUF was the key factor in this consideration. The test system was the ARL linking Suvarnabhumi airport to the Bangkok city center. The traction transformer connection type was the cyclic permutation of phases. The VUF was estimated in four scenarios of the train operations. The results showed that at the same headway, the VUF was increased when the train weight and auxiliary power load were increased due to the increase in energy drawn by the trains. For different headways, the longer the headway, the more voltage unbalance. However, the increased VUF was still within the limit of 2% imposed by IEEE 1159 – 2009 in every scenario. Accordingly, the extension plan of the ARL by increasing routes, service distance, and the number of trains in the future will slightly affect the voltage unbalance. However the VUF is limited within the acceptable value.

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to Suranaree University of Technology for financially supporting this research.

Appendix

Overhead catenary system for ARL:

- Contact wire: Cu 107mm² (20% abrasion)
- Messenger wire: Bz 70mm²
- Return Conductor: E-Al 120mm²
- Rails: UTC 60, 15%

Traction power substation for ARL:

- 2x20 MVA transformers (cyclic connection)
- 69/27.5 kV, 12% impedance, ONAN
- Short-circuit power of the substation is 2.7 GVA

Train resistance parameters:

3-car train	4+3-car train
Tare weight: 131 tons	Tare weight: 299 tons
Rotary portion of tare weight: 6%	Rotary portion of tare weight: 6%
Maximum payload: 44.9 tons	Maximum payload: 105.7 tons
Maximum design speed: 160 km/h	Maximum design speed: 160 km/h
Maximum acceleration: 1 m/s ²	Maximum acceleration: 1 m/s ²
Maximum deceleration: 0.88 m/s ²	Maximum deceleration: 0.88 m/s ²
Gear/Motor/converter efficiency: 82%	Gear/Motor/converter efficiency: 82%
Maximum auxiliary power: 200 kVA	Maximum auxiliary power: 450 kVA
Maximum tractive effort: 200 kN	Maximum tractive effort: 400 kN
Train resistance formula: A = 2.1222 B = 0.00618 C = 0.3197	Train resistance formula: A = 4.8438 B = 0.01412 C = 0.53287

References

- [1] N. Mingguk, U. Leetonand, T. Kulworawanichpong, "Modeling and simulation of voltage unbalance in AC electric railway systems using MATLAB/Simulink". IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2016.
- [2] Applications of Mathematics, "Tractive effort, acceleration and braking", The Mathematical Association, 2004.
- [3] S. Lu, "Optimising power management strategies for railway traction". PhD Thesis, University of Birmingham, UK, October 2011.
- [4] BP. Rochard, F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 214, No. 4, p. 185–199, 2000.
- [5] T. Kulworawanichpong, "Optimising AC electric railway power flows with power electronic control". PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [6] M. Kalantari, M. J. Sadeghi, S. Farshad, S. S. Fazel, "Modeling and Comparison of Traction Transformers Based on the Utilization Factor Definitions", International Review on Modelling and Simulation (I.R.E.M.O.S.), Vol. 4, N. 1, pp. 342–351, February 2011.
- [7] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, IEEE std 1159 – 2009 (Revision of IEEE std 1159 - 1995), pp. c1 – 81, June 2009.
- [8] F. Ciocarelli, M. Fantauzzi, D. Lauria, R. Rizzo, "Special Transformers Arrangement for AC Railway Systems," Department of Electrical Engineering – University of Naples Federico II, Naples (Italy), 2014.
- [9] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider, Contact Lines for Electric Railways, 2nd revised and enlarged edition, pp. 664 – 666, 2009.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพงษ์ มิ่งพฤกษ์ เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน พ.ศ.2535 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดอำนาจเจริญ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2558 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2558 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข

