การเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
Reliability Improvement of Electrical System for Electric Mass Rapid Transit Train

นายศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล
Mr. Saran Laknapachuenkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2561

การเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
Reliability Improvement of Electrical System for Electric Mass Rapid Transit Train

นายศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล
Mr. Saran Laknapachuenkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
ชื่อ นามสกุล	ศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

.... ประธานกรรมการ
(ดร. สุวิทย์ อัจริยะเมต)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนศรี วรรณการ)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)

.... กรรมการและเลขานุการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

....รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(อาจารย์ ดร. ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

วันที่ 3 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
ชื่อ นามสกุล	นายศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล
รหัสนักศึกษา	055970402509-2
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอข้อมูลวิเคราะห์ของการเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของการจ่ายไฟฟ้า รวมถึงความไม่สมดุลของระบบการจ่ายไฟฟ้าว่ามีคุณภาพมากหรือน้อยเพียงใด

ระบบไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนั้น มีการพิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสของการไฟฟ้านครหลวงเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งภายในห้องสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ จำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลอง ว่าการเชื่อมต่อในรูปแบบใดจะมีผลทำให้เกิดความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้ามากที่สุด รวมถึงวิธีในการแก้ไขปัญหาเพื่อรองรับความไม่สมดุลของระบบการจ่ายไฟฟ้า

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น พบว่าการเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวทำให้เกิดค่าแรงดันไม่สมดุลมากที่สุด และการเชื่อมต่อแบบเลอบลองทำให้เกิดค่าแรงดันไม่สมดุลน้อยที่สุด ดังนั้นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองนี้ อาจลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและเพิ่มความน่าเชื่อถือให้แก่ผู้บริโภค และสามารถใช้บริการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ : ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า, ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า, รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

Thesis title	Reliability Improvement of Electrical System for Electric Mass Rapid Transit Train
Author	Mr. Saran Laknapachuenkul
Student ID	055970402509-2
Degree	Master of Engineering
Major program	Electrical Engineering
Thesis Advisor (s):	Assist. Prof. Dr. Sakhon Woothipatanapan
Academic Year	2018

ABSTRACT

The propose of this research present a comparative study of the Reliability Improvement of Electrical System for Electric Mass Rapid Transit Train which describes in term of the power supply efficiency including voltage imbalance that could indicate how much the electric power quality is being more or less.

The electrical system to be used in the Mass Rapid Transit system has 4 types of connection between three (3) phases of Metropolitan Electricity Authority (MEA) transformer and station transformer which is Single phase, V-Type, Scott and Le-Blanc to be considered for the different transformer connections type could be carried out and resulted in the most unbalanced in power supply as well as properly solution for power supply mitigation of voltage imbalance.

From foregoing, the data analyst was discovered that a single phase connection could cause the most unbalance voltage but on the other hand Le-Blanc connection is the least unbalance which could be reduced the impact on the Mass Transit Train and increase the credibility of consumers in order to continuity implement service usage.

Keywords: Reliability Improvement, Voltage Imbalance, Mass Transit Train, Transformer Connection

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สุวิทย์ อัจริยะเมต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนศรี วรรณการ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงวัสดุอุปกรณ์ต่างๆสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และรวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ ทีมงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ที่ให้กำลังใจและร่วมแรงใจในการปฏิบัติงานตลอดมา

ศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญ	
สารบัญภาพ	
สารบัญตาราง	
บทที่	
บทที่ 1. บทนำ	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์	14
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	14
บทที่ 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 ระบบการส่งและจ่ายแรงดันไฟฟ้า	16
2.2 เสถียรภาพทางไฟฟ้ากำลัง	19
2.3 หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
2.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า	21
2.5 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	22
2.6 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแอร์พอตลิงค์	25
2.7 ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า	27
2.8 ส่วนประกอบสมมาตรของระบบไฟฟ้า 3 เฟส	27
2.9 เปอร์เซ็นต์ตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	28
2.10 ผลกระทบจากการเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า	29
2.11 วิธีลดผลกระทบหรือความเสียงจากการเกิดความไม่สมดุลฯ	31
2.12 หม้อแปลงไฟฟ้าภายในห้อง Traction Substation	31
2.13 โปรแกรม Digsilent Power Factory	37
2.14 ปุ่มใช้งานพื้นฐานในหน้าต่าง Main tool bar	39
2.15 สรุป	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3. แบบจำลองการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 42
3.1 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว 42
3.2 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวี 43
3.3 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสกอตต์ 43
3.4 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับของสถานีขับเคลื่อน 44
บทที่ 4 การวิเคราะห์และผล 48
4.1 บทนำ 48
4.2 สรุป 51
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 52
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 52
5.2 ข้อเสนอแนะ 52
เอกสารอ้างอิง
ภาคผนวก
ประวัติผู้เขียน

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

1.1 ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า 13
1.2 การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 13
2.1 ลำดับขั้นตอนการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้า 16
2.2 แสดงสายส่งระบบเหนือศรีษะ 17
2.3 การเดินสายไฟฟ้าแบบ Duct bank 18
2.4 การเดินสายไฟฟ้าแบบ Direct Burial 18
2.5 การเดินสายไฟฟ้าแบบ EFLEX 19
2.6 การเกิดเสถียรภาพชั่วครู่ 20
2.7 การเกิดเสถียรภาพคงตัว 20
2.8 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 22
2.9 องค์ประกอบของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 23
2.10 ขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีม่วง 23
2.11หลักการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 24
2.12 Collector shoe ทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากรางที่สาม 24
2.13 รายละเอียดของรางที่สาม 25
2.14 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ 25
2.15 องค์ประกอบของขบวนรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ 26
2.16 แผนผังการจ่ายไฟฟ้าให้กับโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ 26
2.17 เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสแบบสมดุลและไม่สมดุล 27
2.18 Posiitive Sequence Component 27
2.19 Negative Sequence Component 28
2.20 Zero Sequence Component 28
2.21 Relationship between %imbalance and Temp rise 30
2.22 กราฟสมรรถนะของมอเตอร์ที่ลดลงเนื่องจากแรงดันไม่สมดุล 30
2.23 Single Phase Transformer 32
2.24 Three Phase Transformer 32
2.25 การเชื่อมต่อแบบเดลต้า 33
2.26 แรงดันไฟฟ้าที่ต่อในแต่ละขดลวดแบบเดลต้า 33

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

2.27 การเชื่อมต่อแบบสตาร์ 34

2.28 แรงดันไฟฟ้าที่ต่อในแต่ละขดลวดแบบสตาร์ 34

2.29 การต่อแบบเดลต้าเปิดหนึ่งด้าน – เดลต้าเปิดหนึ่งด้าน 36

2.30 การต่อแบบเดลต้า – เดลต้าเปิดหนึ่งด้าน 36

2.31 หน้าต่างของโปรแกรม Digsilent Power Factory 38

2.32 หน้าต่างของ Data manager ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลต่างๆ 38

2.33 ส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม 39

3.1 การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว 42

3.2 การเชื่อมต่อแบบวี 43

3.3 การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ 44

3.4 การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวจากโปรแกรม Digsilent Power Factory 45

3.5 การเชื่อมต่อแบบสกอตต์จากโปรแกรม Digsilent Power Factory 45

3.6 การเชื่อมต่อแบบวีจากโปรแกรม Digsilent power Factory 46

3.7 การเชื่อมต่อแบบเลอบลองจากโปรแกรม Digsilent Power Factory 47

4.1 แบบจำลองการติดตั้งหม้อแปลงในแต่ละสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 49

4.2 แผนผังแสดงการดำเนินงานทดลอง 49

4.3 กราฟแสดงระยะทาง – เวลา ที่รถไฟเคลื่อนที่ไปและกลับ 50

4.4 เปรียบเทียบผลของ %VUF จากการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ 50

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1.1 แสดงข้อกำหนดความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้า	17
2.1 แสดงรายละเอียดของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	22
2.2 ค่าตามมาตรฐาน IEEE 1159	29
2.3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส และการนำไปใช้งาน	35
2.4 มาตรฐานการต่อขดลวดในนหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	35
2.5 กำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านได้จากการเชื่อมต่อแบบเดลต้าเปิดหนนึ่งด้าน	36
4.1 ตารางค่า %VUF สูงสุดและต่ำสุด ตามแต่ละสถานีไฟฟ้า	51

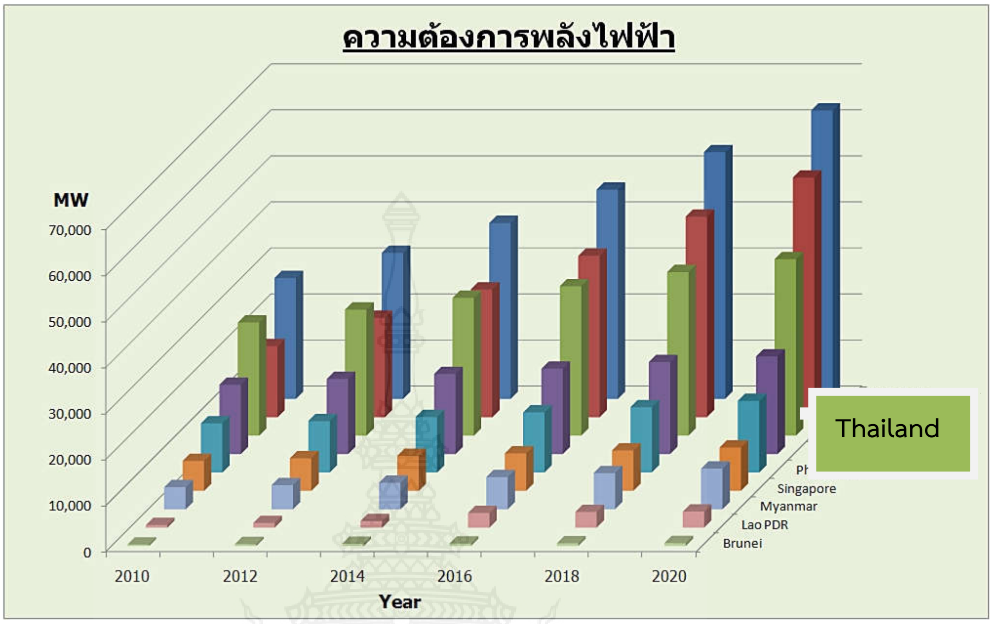
บทที่ 1
บทนำ

บทนำของวิทยานิพนธ์เรื่องการเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน มีเนื้อหาทั้งหมด 6 ส่วนด้วยกันคือ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา กรอบแนวความคิด และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดของเนื้อหาดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

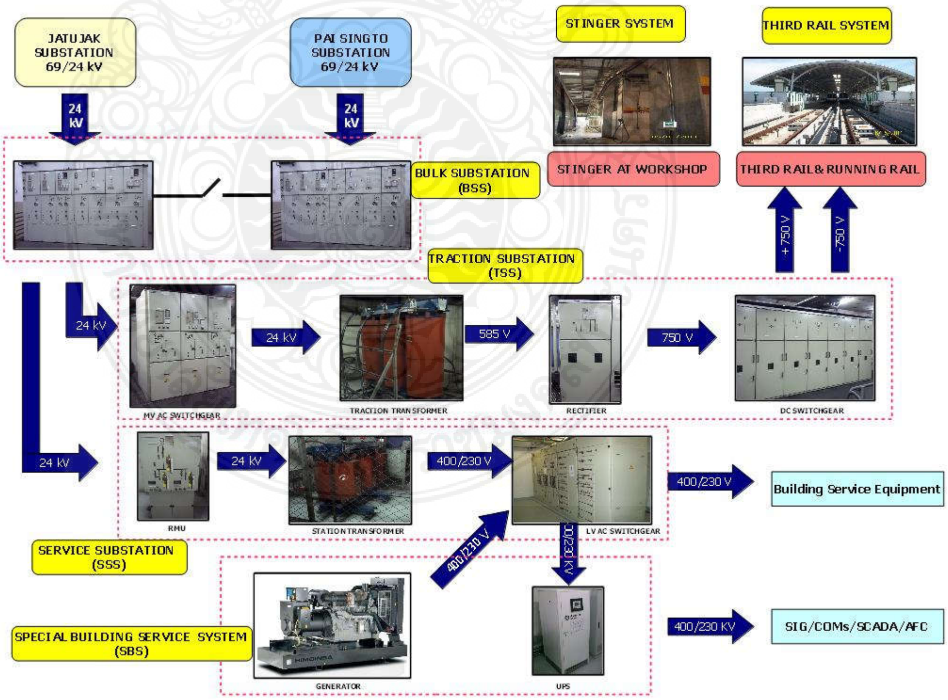
ในปัจจุบันนี้มีนวัตกรรมทางด้านเทคโนโลยีเกิดขึ้นหลายอย่างซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลดีต่อผู้บริโภค หนึ่งในนั้นคือด้านระบบไฟฟ้าที่มีการเจริญเติบโตและมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในด้านของผู้ผลิตไฟฟ้า และผู้ใช้บริการไฟฟ้า ซึ่งนอกจากการผลิตไฟฟ้าเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้นั้นต้องมีคุณภาพที่ดีแล้ว ระบบการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าก็มีส่วนเกี่ยวข้องรองมาเป็นอันดับที่สองเพราะหากระบบการส่งจ่ายไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ หรือเกิดปัญหาขึ้นภายในระบบเป็นเวลานานก็ย่อมที่ทำให้เกิดปัญหาตามมาอีกหลายประการไม่ว่าจะเป็นผลเสียต่อโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดย่อมไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ หรืออาจส่งผลกระทบต่อระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ระบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ๆต่อการเดินรถและการให้บริการต่อประชาชน และหากระบบการจ่ายไฟฟ้ามีปัญหาเป็นระยะเวลานานก็ย่อมที่จะส่งผลเสียมาสู่องค์กรได้และอาจจะทำให้ความน่าเชื่อถือในสายตาของผู้บริโภคต่อองค์กรนั้นลดน้อยลงไปได้มากเช่นกัน ปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท แบบแรก คือ การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่แรงดัน 750 VDC ที่ถูกแปลงแรงดันผ่านตัว Rectifier โดยถูกติดตั้งอยู่ที่ห้องสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนตลอดแนวเส้นทางการวิ่งของรถไฟฟ้าฯ การใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงนี้ไม่ค่อยเกิดปัญหาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าในระบบแต่จะมีปัญหากับระบบควบคุมการขับเคลื่อนของตัวรถและระบบอาณัติสัญญาณมากกว่า แบบที่สอง คือ การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบกระแสสลับโดยที่หม้อแปลงหนึ่งข้างรับกระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฯ ที่ระดับแรงดัน 69 kV ส่วนหม้อแปลงอีกด้านเชื่อมต่อกับระบบของรถไฟฟ้า และสถานีที่ให้บริการ ปัญหาอาจเกิดมาจากความไม่สมดุลของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า หรือการที่รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนั้นมีโหลดที่เพิ่มมากขึ้นทั้งจากประชาชนที่มาใช้บริการเป็นจำนวนมากทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าใช้แรงบิดที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงตอนออกตัวทำให้มีการใช้กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นในช่วงเวลานั้น โดยในช่วงนั้นอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขึ้นภายในระบบได้ ซึ่งถ้าหากเราสามารถแก้ไขปัญหาและวางแผนในส่วนนี้ได้เพื่อที่จะสามารถรองรับการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคตโดยไม่มีข้อบกพร่องก็จะเป็นผลดีต่อผู้ที่มาใช้บริการได้ โดยอาจพิจารณาจากข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทุกปี โดยคาดการณ์ว่าในปี

2020 จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 30,000 MW ซึ่งจากภาพที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อผู้บริโภคที่ในแต่ละปีก็จะยิ่งมีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น ดังแสดงใน ภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า

ที่มาของภาพ Asian Power Grid



ภาพที่ 1.2 การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ที่มาของภาพ http://engineerfreelance.blogspot.com/

อาคารไฟฟ้าประธาน (Bulk Sub-Station) สำหรับโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงส่วนใหญ่แล้วจะมีอยู่สองที่ด้วยกันเพื่อเป็นส่วนจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองในกรณีที่ส่วนจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลักเกิดการขัดข้องขึ้น โดยหากเกิดการขัดข้องจากทางการไฟฟ้าทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ทั้งสองอาคาร ก็ยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองจากเครื่องเจนเนอเรเตอร์เข้ามาช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ระบบไฟฟ้าภายในตัวสถานีรถไฟฟ้าฯอีกชั้นหนึ่ง โดยแสดงแผนภาพการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ดังภาพที่ 1.2

นอกเหนือจากระบบการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้านครหลวงจะมีส่วนที่สำคัญมากต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าโดยรวมแล้วนั้น การตรวจสอบและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบหาความผิดพลาดของตัวอุปกรณ์ก็มีส่วนที่สำคัญมากเช่นกันสำหรับการรักษาคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าเพราะหากอุปกรณ์เกิดการชำรุดเสียหายช่วงใดช่วงหนึ่งก็อาจทำให้ระบบการเดินรถไฟฟ้ามีปัญหาเกิดขึ้นได้และจะทำให้เกิดผลกระทบกับทั้งผู้ให้บริการรวมถึงด้านผู้ใช้บริการด้วย สำหรับปัญหาที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในระบบนี้อาจจะไม่ได้มาจากความผิดพลาดของบุคคลหรือเครื่องจักรอย่างเดียว แต่อาจจะได้รับผลกระทบมาจากภัยธรรมชาติก็มีความเป็นไปได้เช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเป็นการวิเคราะห์แนวทางการเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

1.2.2 เพื่อเป็นการวิเคราะห์ปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาผลกระทบของระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบโดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแอร์พอตลิงค์จากกรณีเกิดความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า

1.3.2 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบเฟสเดียว, แบบวี, แบบสกอตต์ และแบบเลอบลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความรู้ในเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับข้อมูลของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนว่ามีกี่ประเภทและแตกต่างกันอย่างไร

1.4.2 เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดขึ้นและอาจส่งผลต่อมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนได้

1.4.3 ได้แนวทางในการนำมาปรับปรุงหรือเพิ่มค่าของความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในระบบได้

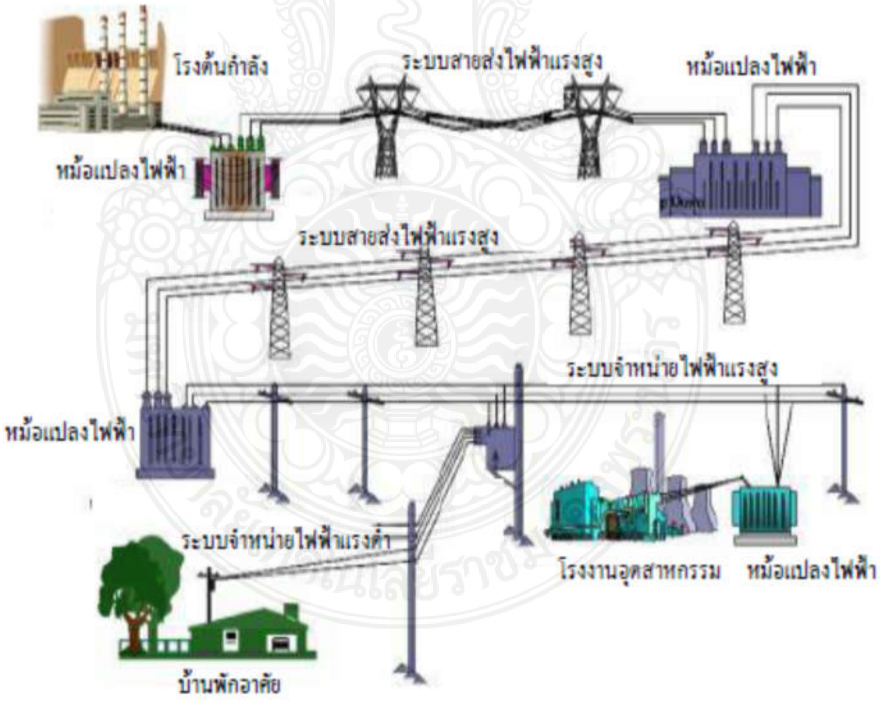
1.4.4 ได้ทดลองทำรูปแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับระบบสายส่งไฟฟ้าให้ตู้โดยสารขบวนรถไฟฟ้า และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้นมาได้ในอนาคต

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีเนื้อหาประกอบไปด้วยส่วนหลักๆได้แก่ ระบบการส่งและจ่ายแรงดันไฟฟ้า เสถียรภาพทางไฟฟ้ากำลัง การควบคุมและรักษาเสถียรภาพคงค่าแรงดันไฟฟ้า

2.1 ระบบการส่งและจ่ายแรงดันไฟฟ้า

(ทวี ไชยโครต, 2554) กล่าวว่า ระบบไฟฟ้าในประเทศไทยเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีความถี่ที่ 50 Hz ที่สามารถแบ่งได้แบบระบบ 1 เฟส ที่แรงดัน 220 VAC ใช้งานตามบ้านพักอาศัยทั่วไป แบบระบบ 3 เฟส ที่แรงดัน 380 VAC ใช้งานในระดับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 11 kV, 22kV, 33kV, 69kV, 115 kV, 230kV และ 500 kV ตามลำดับ โดยมีส่วนประกอบหลักๆได้แก่ โรงต้นกำลัง, สายส่ง, สถานีไฟฟ้าต้นทาง เป็นต้นดังแสดงในภาพ 2.1

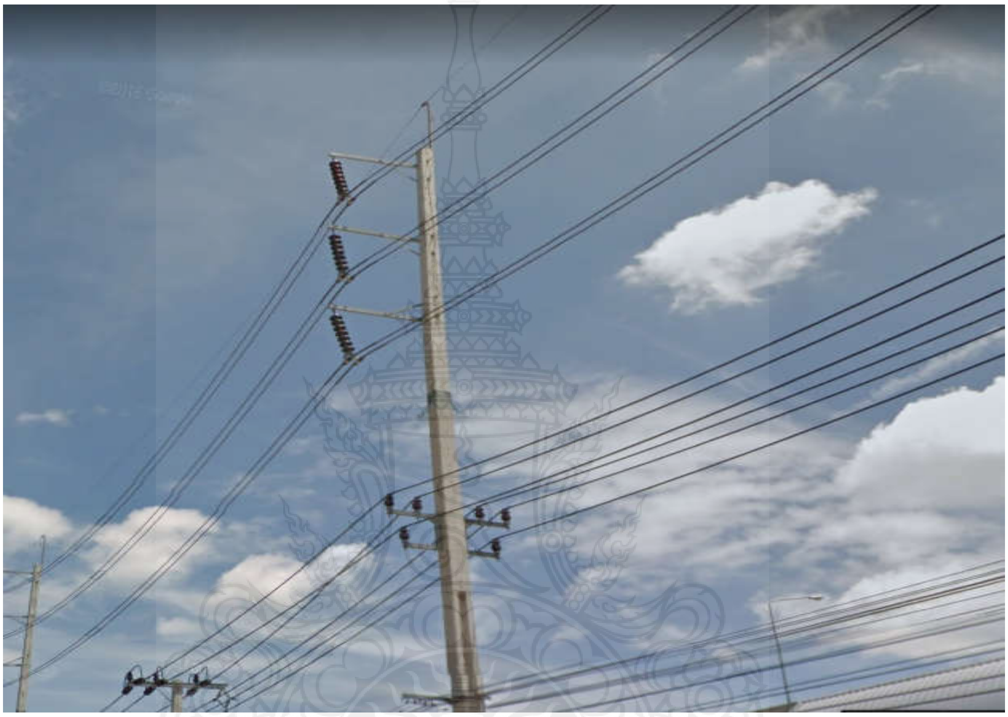


ภาพที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ที่มาของภาพ http://alcoholim.blogspot.com/

จากภาพที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตและรอส่ง แต่ในขั้นตอนการส่งไฟฟ้านั้นก็ต้องมีระบบสายส่งที่มีคุณภาพ ซึ่งระบบการส่งกำลังไฟฟ้าจะมีสายส่งที่ทำหน้าที่ส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าต่างๆ โดยสามารถแบ่งระบบการส่งกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

2.1.1) สายส่งระบบเหนือศีรษะ (Overhead line system) สายตัวนำจะอยู่บนเสาส่งไฟฟ้าผ่านที่โล่งแจ้งจากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง ซึ่งง่ายต่อการบำรุงรักษา ตรวจสอบข้อขัดข้องของระบบส่งกำลังไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงสายส่งระบบเหนือศีรษะ

ตารางที่ 1.1 แสดงข้อกำหนดความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้า

ขนาดของสายส่งไฟฟ้า	ระยะจากจุดกึ่งกลางด้านละ	ระยะรวมเขตเดินสายไฟฟ้า
69 kV	9 m	18 m
115 kV	12 m	24 m
230 kV	20 m	40 m
500 kV	40 m	80 m

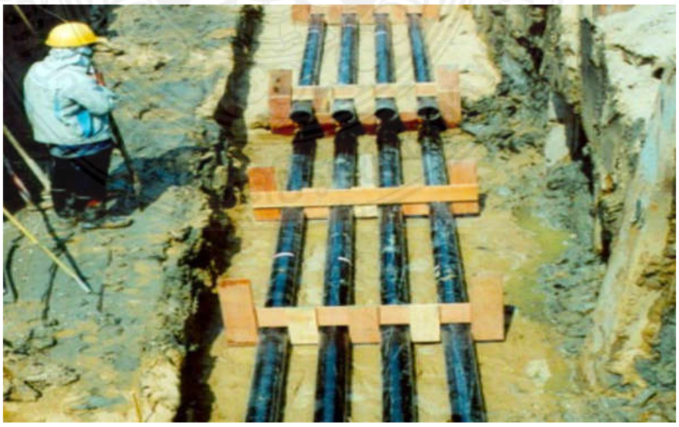
2.1.2) สายส่งระบบฝังใต้ดิน (Underground cable system) ระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบดังนี้

2.1.2.1 แบบเดินสายในท่อร้อยสายหุ้มด้วยคอนกรีต (Duct bank) ซึ่งการเดินสายในรูปแบบนี้จะต้องทำการขุดดินตามแนวสายไฟและทำการล้อมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กอีกชั้นหนึ่ง

2.1.2.2 แบบเดินสายฝังดินโดยตรง (Direct burial) เป็นการฝังไว้ใต้ดินโดยตรง การเดินสายไฟในร่องคอนกรีตใช้กับไฟฟ้าแรงดันต่ำ และการวางสายไฟบนรางวางสายจะใช้กับไฟฟ้าแรงดันสูง

2.1.2.3 แบบเดินสายฝังดินแบบลูกฟูก (EFLEX) เป็นการเดินสายไฟด้วยท่อ HDPE ซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ค่าการบำรุงรักษาสูง

ภาพที่ 2.3 การเดินสายไฟฟ้าแบบ Duct bank



ภาพที่ 2.4 การเดินสายไฟฟ้าแบบ Direct Burial

ที่มาของภาพ http://ftiebusiness.com/shop/product-detail.php?id=97707&uid=42939

ภาพที่ 2.5 การเดินสายไฟฟ้าแบบ EFLEX

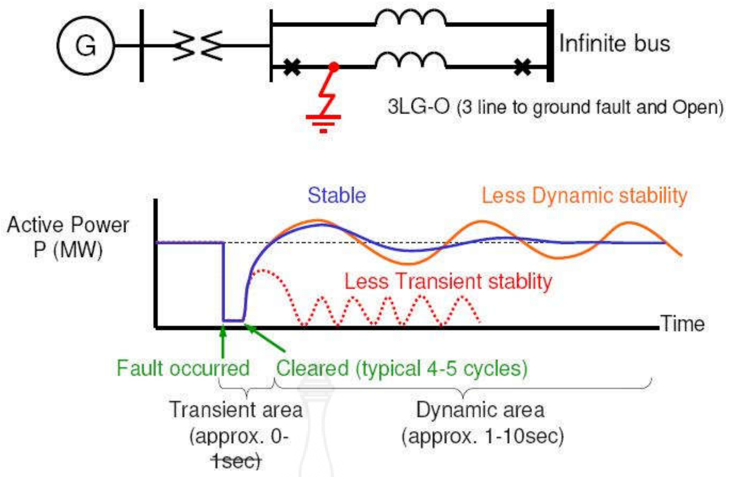
ที่มาของภาพ https://engfanatic.tumcivil.com/engfanatic/article/333

2.2 เสถียรภาพทางไฟฟ้ากำลัง

ระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้า ความเชื่อถือ และเสถียรภาพของระบบนั้นนับได้ว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าต้องประกอบด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าหลายๆประเภท เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม หรือโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นต้น โดยโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมบางแห่งเป็นตัวจ่ายเสริมให้กับในระบบ (Base load)

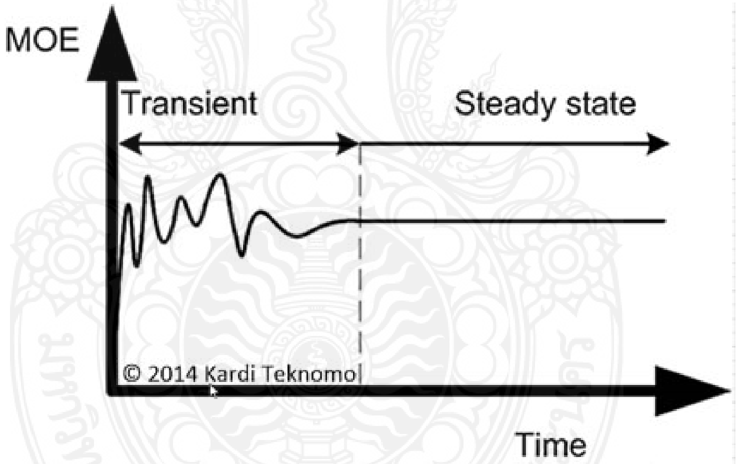
เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าคือ ความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ติดต่อกันโดยเมื่อโหลดมีลักษณะคงที่และค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปทีละน้อยจะเรียกว่าเสถียรภาพที่มีความสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในทันทีทันใดระหว่างการปฏิบัติงานอย่างสม่ำเสมอจะเรียกว่าเสถียรภาพชั่วคราวของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า โดยเสถียรภาพสามารถแบ่งระบบไฟฟ้าและขนาดของสิ่งรบกวนได้เป็น 3 รูปแบบได้แก่

2.2.1 เสถียรภาพชั่วครู่ (Transient Stability) เกิดจากมีสิ่งรบกวนขนาดใหญ่ เกิดการลัดวงจรขึ้นอย่างรวดเร็วฉับพลัน หรือมีการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากในระบบ หรือมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดขนาดใหญ่ โดยต้องพิจารณาว่าหลังเกิดเหตุการณ์สามารถแก้ไขให้กลับสู่เสถียรภาพได้หรือไม่



ภาพที่ 2.6 การเกิดเสถียรภาพชั่วครู่

2.2.2 เสถียรภาพคงตัว (Steady State Stability) เกิดจากมีสิ่งรบกวนมากระทำ และค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ



ภาพที่ 2.7 การเกิดเสถียรภาพคงตัว

2.2.3 เสถียรภาพพลวัต (Dynamic Stability) เกิดขึ้นจากสิ่งรบกวนขนาดเล็กๆ และเกิดขึ้นอย่างช้าๆจนอาจทำให้เกิดการแกว่ง ซึ่งมีผลต่อการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3 หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(N. Mithulananthan, A.sode-Yome, N.Acharya, S. Phichaisawat, 2005) ได้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย และการเพิ่มเสถียรภาพในระบบโดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ารีแอคทีพทั้งชุดตัวเก็บประจุและอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น โดยการวิเคราะห์จากค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดก่อนที่ระบบจะพังทลาย จากการวิจัยค้นพบว่าสถานีที่จังหวัดเชียงใหม่มีการเปลี่ยนของแรงดันมากที่สุดเมื่อมีการเพิ่มโหลดอย่างต่อเนื่อง หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นเข้าไปในระบบนี้สามารถเพิ่มเสถียรภาพไฟฟ้าภายในระบบได้ 20-30 %

(A. Sode-Yome, N. Mithulanathan, 2005) ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบมาตราของ IEEE 14 Bus โดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น 3 ชนิด คือตัวควบคุมแรงดัน Static Synchronous Compensator (STACOM), ตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทริสเตอร์ Thyristor Control Series Capacity (TCSC) และตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า Static Synchronous Series Compensator (SSSC) โดยใช้วิธีการ Communication Power Flow เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าจริง เพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย โดยจากการวิจัยพบว่าระบบ STACOM สามารถเพิ่มค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดได้มากกว่าแบบ TCSC และแบบ SSSC

สรุปแล้วเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าคือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ภายในระบบหลังจากเกิดปัญหาขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาความสมดุลระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานกับโหลด ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นของบัสอันเนื่องมากจากการสูญเสียที่สายส่ง

2.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆดังนี้

2.4.1 การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ การเกิดแรงดันพังทลายมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ด้วยส่วนหนึ่ง ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีพ และการตัดส่วนที่มีผลกระทบน้อยที่สุดของระบบออกไป

2.4.2 การเกิดข้อบกพร่องขึ้นในระบบ หากใช้เวลาในการตัดข้อบกพร่องนานเกิดไปอาจจะส่งผลกระทบให้แรงดันลดลง จนทำให้เกิดสภาวะการพังทลายได้ ดังนั้นในการออกแบบระบบต้องพิจารณาถึงส่วนสภาวะแรงดันพังทลายด้วย

2.4.3 ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีพ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีพจากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลดเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งในระหว่างการจ่ายกำลังไฟฟ้าเพราะฉะนั้นต้องขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีพซึ่งต้องมีปริมาณที่เพียงพอและอยู่ใกล้จุดที่เกิดแรงดันพังพลายด้วย

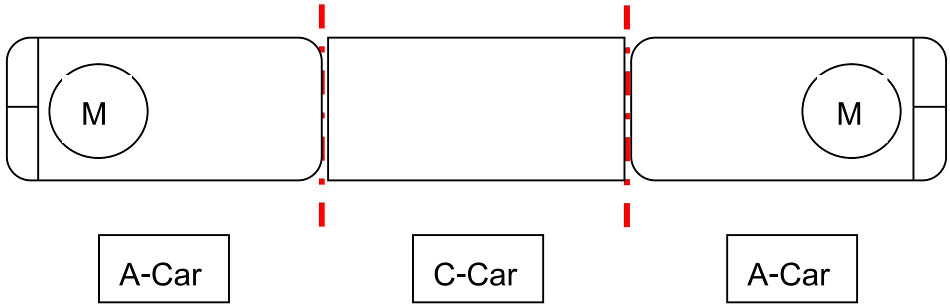
2.5 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

2.5.1 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง นำเข้ามาจากประเทศญี่ปุ่น ทำการผลิตโดยบริษัท J-Trec โดยมีรายละเอียดประกอบดังนี้

ภาพที่ 2.8 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปีที่ผลิต (คศ.)	2016
ความกว้างฐานล้อ	1435 มม.
ขนาดตัวรถไฟฟ้า	ยาว 21340 x กว้าง 2998 x สูง 3885 มม.
ความเร็วสูงสุด	80 กม/ ชม.
ขนาดแรงดันไฟฟ้า	750 VDC, รับไฟฟ้าจากรางที่สาม
ชนิดมอเตอร์	IGBT Inverter control, AC Traction motors



ภาพที่ 2.9 องค์ประกอบของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

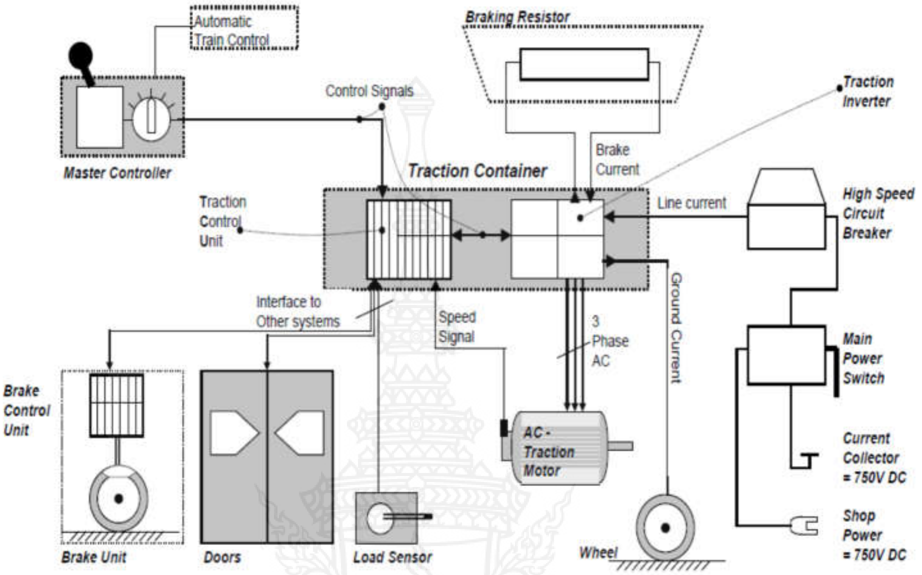
2.5.2 สำหรับขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงใน 1 ขบวน จะประกอบไปด้วย 3 ตู้โดยสาร มี 2 รูปแบบได้แก่ตู้แบบ A และตู้แบบ C มีรายละเอียดดังนี้

2.5.2.1 ตู้โดยสารแบบ A-Car จะมีด้วยกัน 2 ตู้โดยสารโดยจะอยู่ในตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของขบวนรถ โดยภายในตู้โดยสารแบบ A-car จะมีห้องคนขับรถไฟฟ้าและมอเตอร์ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ด้วย

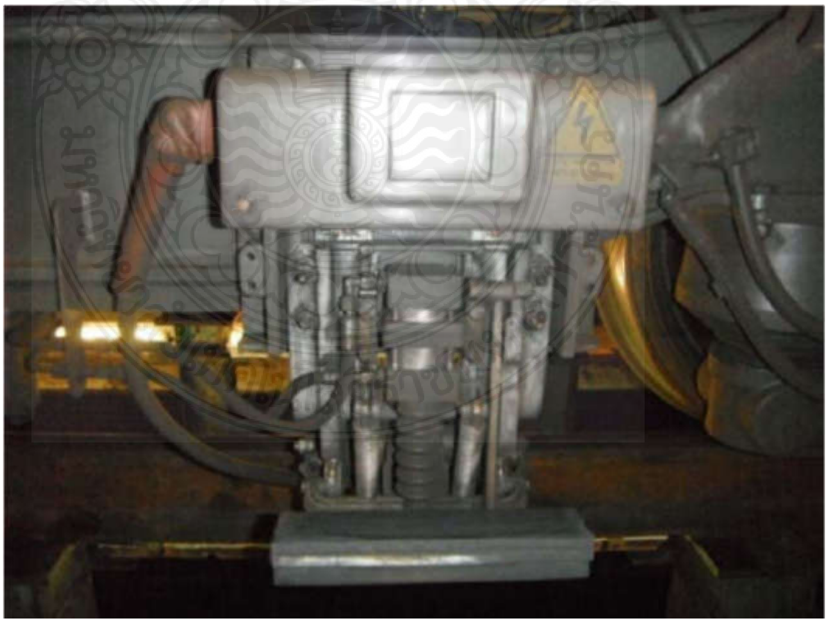
2.5.2.2 ตู้โดยสารแบบ C-Car ภายในนั้นจะไม่มีห้องคนขับและมอเตอร์ขับเคลื่อนแต่จะติดตั้งระบบแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และระบบปรับอากาศ และระบบแสงสว่าง

ภาพที่ 2.10 ขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง

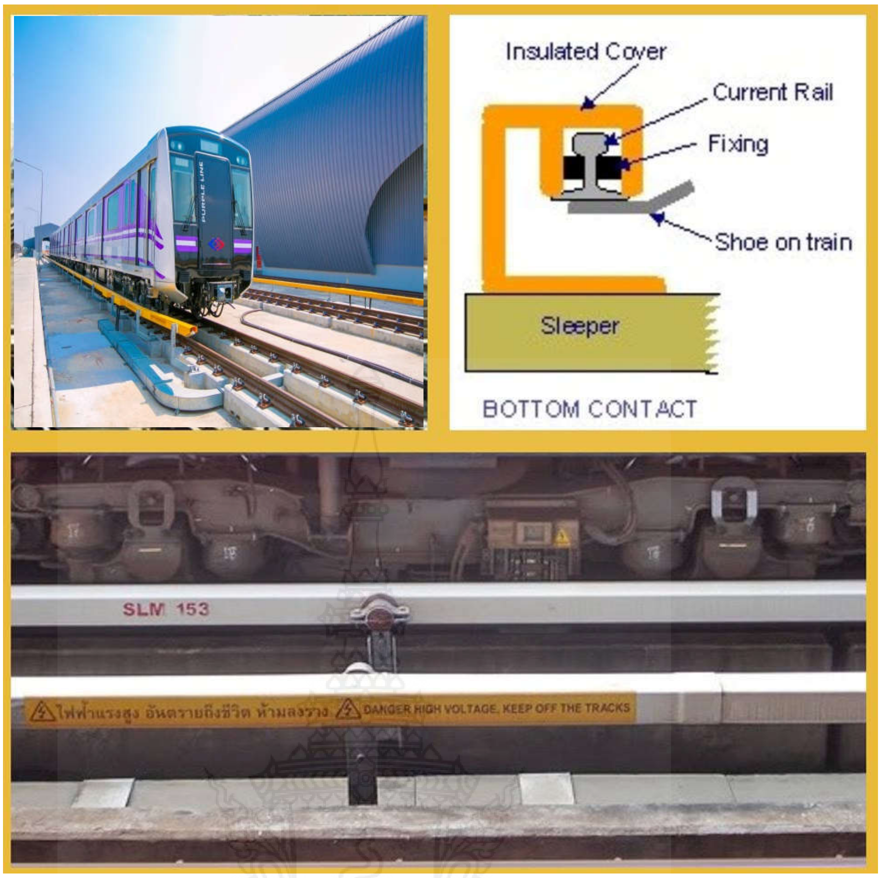
2.5.3 หลักการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 VDC เข้ามาที่ขบวนรถตู้ A ซึ่งจะอยู่ที่ด้านหัวและด้านท้ายของขบวนรถทั้งหมด จากนั้นทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสำหรับไปเลี้ยงตัวมอเตอร์ขับเคลื่อน และไปจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าภายในขบวนรถ เช่นแอร์และหลอดไฟ เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 หลักการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



ภาพที่ 2.12 Collector shoe ทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากรางที่สามมาที่ขบวนรถไฟฟ้าเพื่อใช้งานกับตัวมอเตอร์ขับเคลื่อนและใช้งานไฟฟ้าภายในขบวนรถ

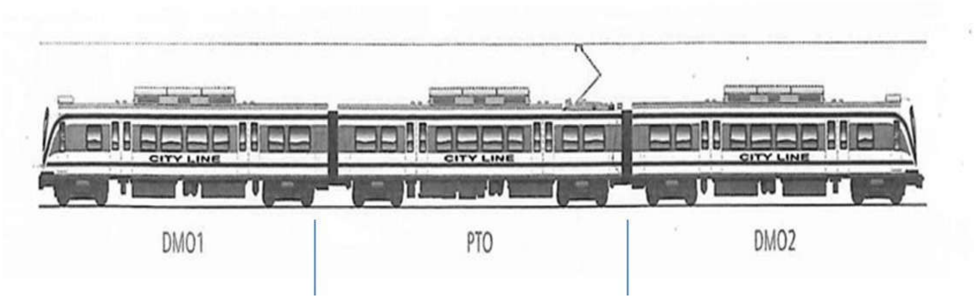


ภาพที่ 2.13 รายละเอียดของรางที่สาม

2.6 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแอร์พอตลิงค์

2.6.1 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบ City line มี 3 ตู้โดยสาร และแบบ Express line มี 3 ตู้โดยสารและ 1 ตู้สัมภาระ

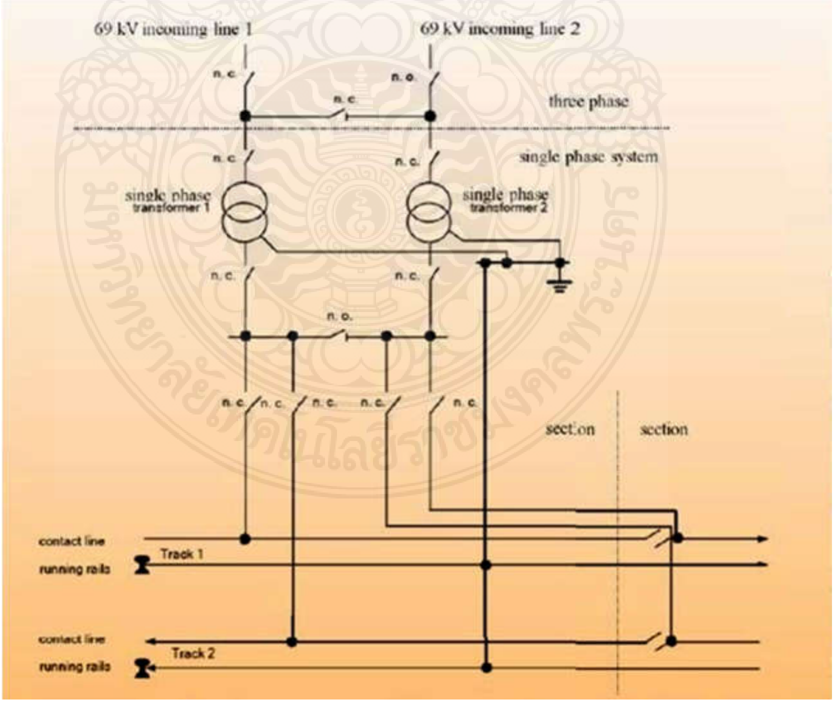
ภาพที่ 2.14 ตู้โดยสารรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์



ภาพที่ 2.15 องค์ประกอบของขบวนรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์

2.6.2 ขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ 1 ขบวน จะประกอบไปด้วย 3 ตู้โดยสารแบบ A และแบบ C คล้ายกับรูปแบบรถไฟฟ้ามหานคร คือตู้แรกและตู้สุดท้ายจะเป็นตู้ที่ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนไว้ส่วนตู้ตรงกลางจะติดตั้งก้านแพนโทกราฟทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนเส้นสายไฟด้านบนขบวนรถเพื่อนำมาใช้งานภายในขบวน

ระบบการจ่ายไฟฟ้าให้กับโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ รางที่ 3 จะรับไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 25 kV ผ่านตัวแพนโทกราฟเพื่อนำมาแปลงแรงดันและใช้งานภายในขบวนรถไฟฟ้า ดังแผนภาพที่ 2.14

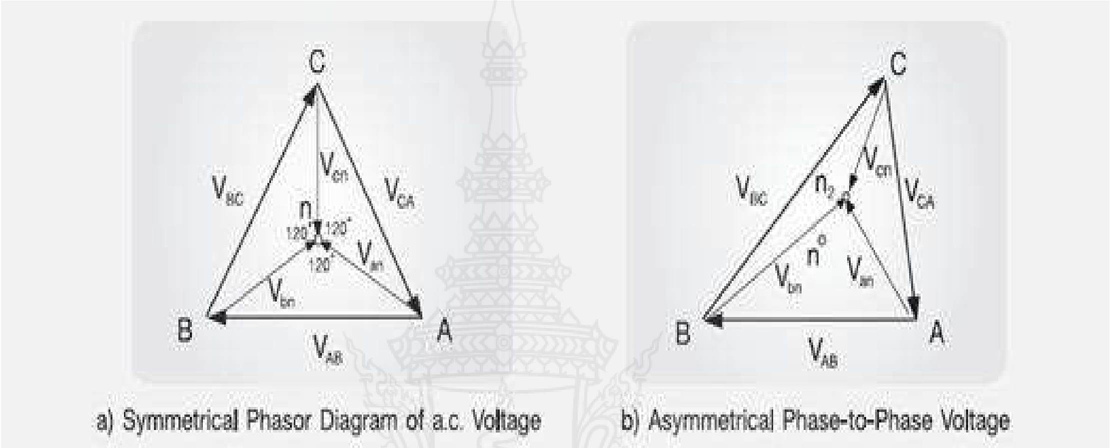


ภาพที่ 2.16 แผนผังการจ่ายไฟฟ้าให้โครงการรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์

ที่มาของภาพ http://lopeka-ee-room.blogspot.com/2014/10/bts-ac-25-kv-single-phase.html

2.7 ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า

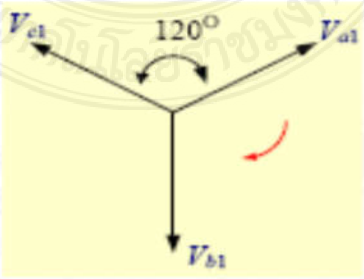
ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าเกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสของการไฟฟ้าแล้วจะมีขนาดและมุมแต่ละเฟสเท่ากัน โดยแต่ละเฟสจะทำมุมห่างกัน 120 องศา แต่ถ้าหากขนาดและมุมในแต่ละเฟสมีขนาดไม่เท่ากันจะหมายถึงความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลโดยตรงต่ออุปกรณ์ที่ใช้งาน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสภายในโรงงานเมื่อเกิดภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีกระแสลบไหลเข้ามอเตอร์เป็นจำนวนมากซึ่งจะไปต้านสนามแม่เหล็กส่งผลให้มอเตอร์ทำงานช้าลงและเกิดความร้อนสูง ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ได้รับความเสียหายได้



ภาพที่ 2.17 เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล
ที่มาของภาพ http://eelabb.blogspot.com/p/lab9.html

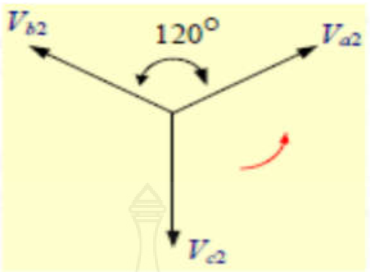
2.8 ส่วนประกอบสมมาตรของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

2.8.1 ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive – Sequence Component) หมายถึง ส่วนประกอบที่มีขนาดเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีมุมต่างกัน 120 องศา



ภาพที่ 2.18 Positive Sequence Component
ที่มาของภาพ http://eng.rtu.ac.th/files/EPSA/CH7.pdf

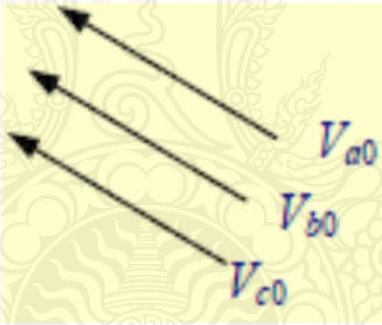
2.8.2 ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative – Sequence Component) หมายถึง ส่วนประกอบที่มีขนาดและมุมต่างกัน 3 เฟส และมีมุมต่างกัน 120 องศา



ภาพที่ 2.19 Negative Sequence Component

ที่มาของภาพ http://eng.rtu.ac.th/files/EPSA/CH7.pdf

2.8.3 ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero – Sequence Component) หมายถึง ส่วนประกอบที่มีขนาดเท่ากันทั้ง 3 เฟส มีและมีมุมต่างเฟสเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 2.20 Zero Sequence Component

ที่มาของภาพ http://eng.rtu.ac.th/files/EPSA/CH7.pdf

2.9 เปอร์เซ็นต์ตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (%VUF)

%VUF ย่อมาจาก Voltage Unbalance Factor ซึ่งถูกนิยามโดย IEC (International Electrotechnical Commission) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าลำดับลบ (Negative Sequence Voltage) กับแรงดันไฟฟ้าลำดับบวก (Positive Sequence Voltage) ตามลำดับ โดยสามารถคำนวณค่าได้จากสมการ

$$\%VUF = \frac{Vneg}{Vpos} x100 \qquad (3.1)$$

เมื่อ %VUF คือ ค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

V_{POS} คือ แรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสบวก

V_{NEG} คือ แรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสลบ

ตารางที่ 2.2 ค่าตามมาตรฐาน (IEEE 1159-2009)

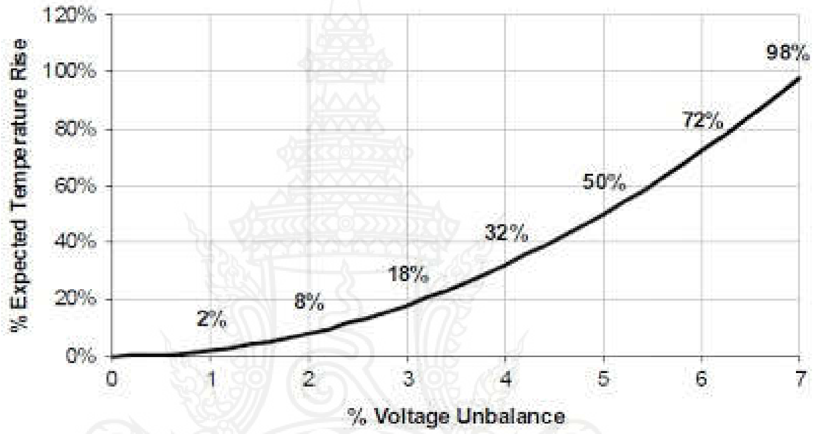
Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 μs rise	50 ns–1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu
1.2.2 Medium frequency	5–500 kHz	20 μs	0–8 pu
1.2.3 High frequency	0.5–5 MHz	5 μs	0–4 pu
2.0 Short duration 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
3.0 Long duration 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
4.0 Voltage imbalance		steady state	0.5–2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0–0.1%
5.2 Harmonics	0–100th H	steady state	0–20%
5.3 Interharmonics	0–6 kHz	steady state	0–2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broad-band	steady state	0–1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7%
7.0 Power frequency variations		< 10 s	

ที่มา http://www.powerqualityworld.com/2011/03/power-quality-problems.html

2.10 ผลกระทบจากการเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

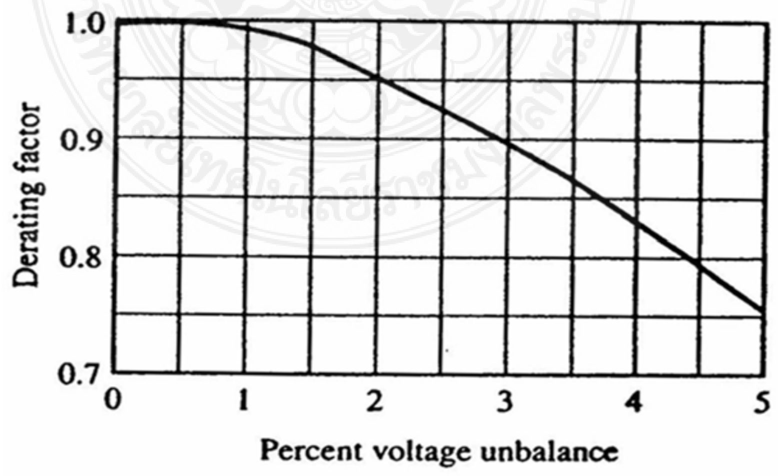
ตามมาตรฐาน IEEE 1159-2009 มีการกำหนดเปอร์เซ็นต์ค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลว่ามีค่าระหว่าง 0.5% ขึ้นไปแต่มีค่าไม่เกิน 2% โดยสามารถดูได้ที่ ตารางที่ 2.2 ตามหลักแล้วจะมีการกำหนดข้อมูลไว้ว่าหากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีเกิดขึ้นเกิน 2% ขึ้นไปนั้นผู้ใช้งานจะต้องลดขนาดพิกัด

มอเตอร์ลง ยกตัวอย่างเช่น หากเกิดแรงดันไม่สมดุล 1% สามารถใช้งานมอเตอร์ได้ตามปกติ แต่หากแรงดันไม่สมดุลเพิ่มขึ้นเป็น 3% จะต้องลดขนาดพิกัดของมอเตอร์ลงเหลือ 90% ของขนาดพิกัดปกติ แต่ถ้าแรงดันไม่สมดุลเพิ่มขึ้นเป็น 5% ก็จะต้องทำการลดพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสลงมาอีก ซึ่งโดยปกติแล้วไม่ควรใช้งานมอเตอร์ต่อถ้าหากแรงดันไม่สมดุลอยู่ที่ 5% เนื่องจากอาจจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเกิดความเสียหายได้ เพราะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีผลกระทบต่อตัวมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน โดยเป็นผลมาจาก Negative Sequence Current ไหลเข้าตัวมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเพราะมีสนามแม่เหล็กมาตัดผ่านต้านการทำงานปกติ หากปล่อยไปเรื่อยๆก็อาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าที่นำมาใช้งานได้ ดังแสดงในกราฟภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.21 Relationship between %Imbalance and Temperature rise

ที่มาของภาพ http://www.powerqualityworld.com/voltage-unbalance-power-quality-basics.html



ภาพที่ 2.22 กราฟสมรรถนะของมอเตอร์ที่ลดลงเนื่องจากแรงดันไม่สมดุล

2.11 วิธีลดผลกระทบหรือความเสี่ยงจากการเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

2.11.1 ควรจัดการอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสให้สมดุลกันทั้งสามเฟส

2.11.2 พิจารณาดูโหลดชนิดหนึ่งเฟสที่มีขนาดใหญ่มาใช้เป็นสามเฟสแทน

2.11.3 ตรวจสอบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีความสัมพันธ์กันทั้งสามเฟส

2.11.4 หมั่นเช็คบริเวณขั้วหรือจุดเชื่อมต่อไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้มีความแน่นหนา และอยู่ในสภาพดีอยู่เสมอ

2.12 หม้อแปลงไฟฟ้าภายในห้อง Traction Substation

หม้อแปลงไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนถือเป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะเป็นส่วนหนึ่งที่จำเป็นต่อการให้บริการในการเดินรถไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสประกอบไปด้วยสองด้านคือด้านปฐมภูมิที่ทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงเข้ามาก่อนทำการลดแรงดันลงเป็นแรงดันต่ำในด้านทุติยภูมิ ในขณะเดียวกันหม้อแปลงก็อาจจะทำหน้าที่เพิ่มแรงดันได้ด้วยเช่นกันโดยกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำเข้ามาทางด้านปฐมภูมิและเพิ่มแรงดันออกมาทางด้านทุติยภูมิ

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบไปด้วยสิ่งสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

1) Core หรือแกน มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆถูกเคลือบด้วยฉนวนเรียงต่อๆกันเรียกว่าแผ่นลามิเนต

2) ขดลวดตัวนำ (Wingding) ลักษณะเป็นขดลวดทองแดงหรืออลูมิเนียมถูกหุ้มด้วยฉนวนไว้ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยขดลวด 2 ชนิดได้แก่ ขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary winding) และขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary winding)

3) ฉนวน (Insulation) มีหน้าที่สำคัญคือป้องกันไม่ให้ขดลวดของหม้อแปลงสัมผัสถูกส่วนที่เป็นแกนเหล็ก และป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละด้านสัมผัสถึงกันได้

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการใช้งานในประเทศไทยตอนนี้แบ่งออกได้เป็น 2 อย่างได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส (Single Phase Transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส (Three Phase Transformer)

1) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ประกอบไปด้วยขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ชุด และขดลวดด้านทุติยภูมิ 3 ชุด ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ดังภาพที่ 2.21

ภาพที่ 2.23 Single Phase Transformer

ที่มาของภาพ https://sites.google.com/site/pranget58/home/chnwn/chnid-khxng-hmxpaelngfi-fa

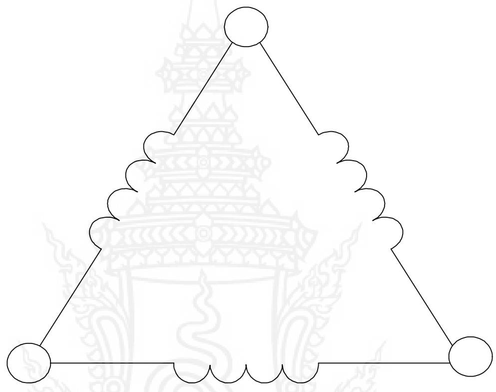
2) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ประกอบไปด้วยขดลวดด้านปฐมภูมิจำนวน 3 ชุด และขดลวดด้านทุติยภูมิจำนวน 3 ชุด โดยระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะถูกนำมาใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรมหรือตามสถานประกอบการที่ต้องการกำลังไฟที่มีความเสถียรสูง ดังภาพที่ 2.22

ภาพที่ 2.24 Three Phase Transformer

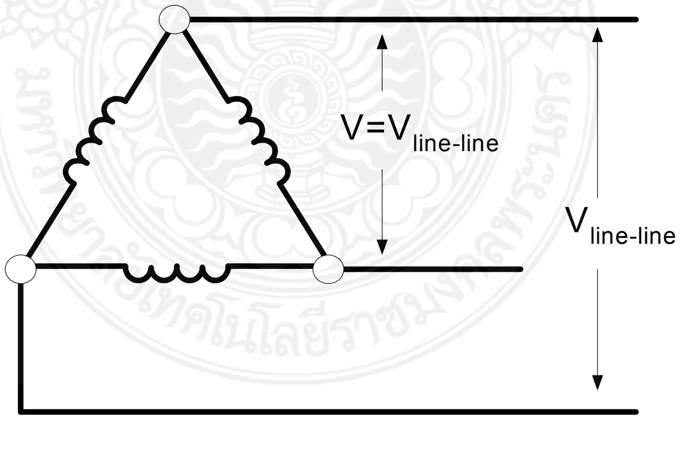
ที่มาของภาพ https://sites.google.com/site/pranget58/home/chnwn/chnid-khxng-hmxpaelngfi-fa

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส จะมีวิธีการเข้าขดลวดในด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การต่อแบบวายหรือสตาร์ (Wye or Star connection) หรือการต่อแบบเดลต้า (Delta connection)

1) การต่อแบบเดลต้า (Delta Connection) ขดลวดจะต่อเข้าด้วยกันเป็นแบบอนุกรมวงจรปิด โดยต่อขั้วด้านปลายของหม้อแปลงตัวที่ 1 เข้าที่ขั้วด้านต้นของหม้อแปลงตัวที่ 2, จากนั้นต่อขั้วด้านปลายของหม้อแปลงตัวที่ 2 เข้าที่ขั้วด้านต้นของหม้อแปลงตัวที่ 3, ต่อขั้วด้านปลายของหม้อแปลงตัวที่สามเข้ากับขั้วด้านต้นของหม้อแปลงตัวที่ 1 โดยจุดต่อร่วมทั้ง 3 จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ การต่อขดลวดแบบเดลต้าแสดงดังภาพที่ 2.23



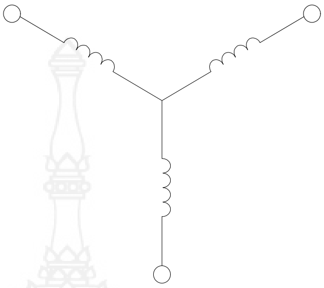
ภาพที่ 2.25 การเชื่อมต่อแบบเดลต้า



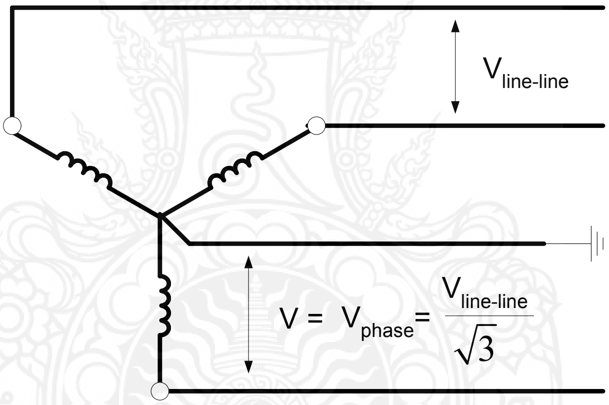
ภาพที่ 2.26 แรงดันไฟฟ้าที่ต่อในแต่ละขดลวดแบบเดลต้า

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลต้า ควรทำการตรวจสอบขั้ว Polarity ของขดลวดแต่ละเฟสก่อนการนำไปใช้งาน เนื่องจากถ้าลำดับขั้วเฟสใดเฟสหนึ่งมีการต่อไม่ถูกต้องก็จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านที่ขั้วนั้นสูง

2) การต่อแบบวายหรือสตาร์ (Wye or Star Connection) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขดขวดทั้งสองเส้น (Vline-line) จะมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าในระบบสามเฟส ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขดลวดแต่ละเส้นกับสายนิวทรอลจะมีขนาดเท่ากับเศษหนึ่งส่วนรากที่สองของสามของแรงดันระหว่างขดลวดสองเส้น การต่อแบบสตาร์แสดงดังรูปที่ 2.25 และแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่อในแต่ละขดลวดดังรูปที่ 2.26



ภาพที่ 2.27 การเชื่อมต่อแบบสตาร์



ภาพที่ 2.28 แรงดันไฟฟ้าที่ต่อในแต่ละขดลวดแบบสตาร์

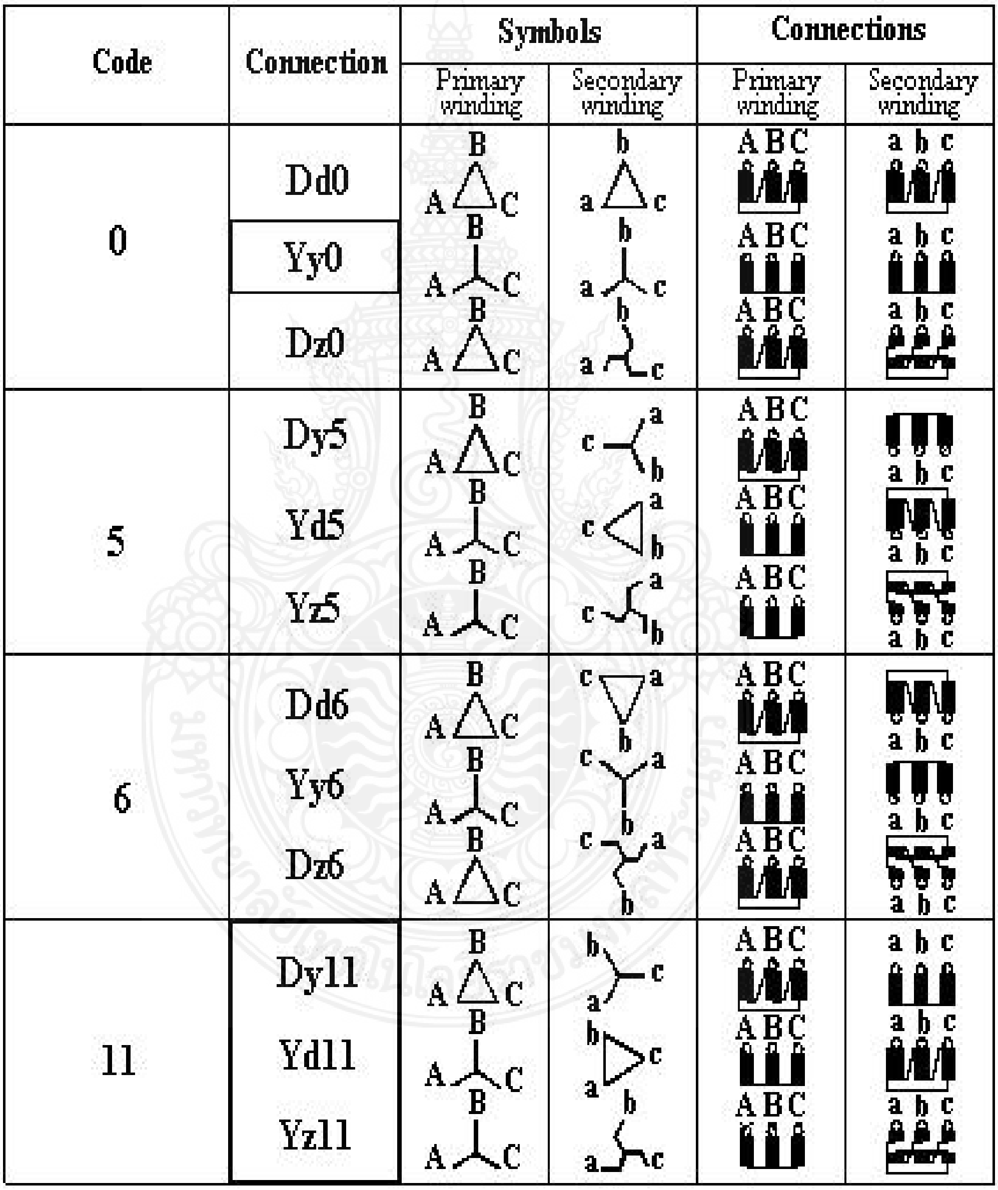
การรับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากการไฟฟ้าเพื่อมาใช้งานภายในโครงการฯ ไฟฟ้าแรงสูงที่มีการใช้งานทั่วไปอยู่ในประเทศไทย ได้แก่แรงดัน 115kV และแรงดัน 69kV สำหรับสถานีไฟฟ้าที่มีการติดตั้งหม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันเรียกว่า อาคารไฟฟ้าประธาน มีหน้าที่รับแรงดัน 69 kV จากการไฟฟ้าก่อนจะถูกนำมาลดแรงดันลงเหลือ 25kV ความถี่ 50 Hz และนำไปใช้งานในระบบสายส่งของรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ต่อไป

ชนิดการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส จะมีวิธีการต่อหม้อแปลงเพื่อใช้งานในวิธีที่แตกต่างกัน และให้คุณสมบัติที่ต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ดังตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ยังมีรหัสมาตรฐานการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส และการนำไปใช้งาน

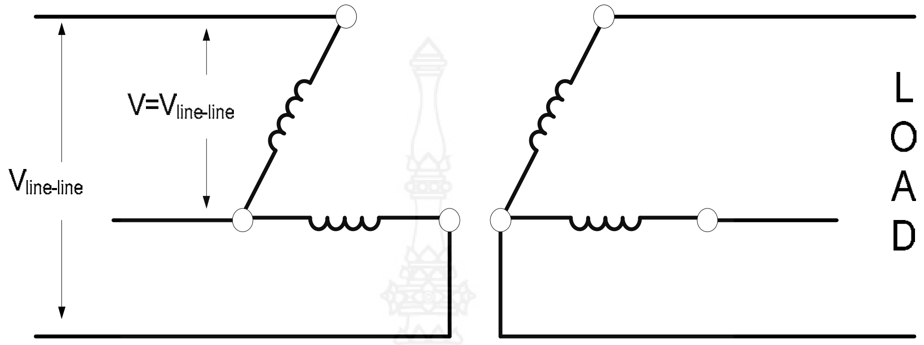
ข้อที่	ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ	การนำไปใช้งาน
1	เดลต้า	เดลต้า	ใช้ในงานอุตสาหกรรม
2	เดลต้า	สตาร์	ใช้งานทั่วไป และใช้ในงานอุตสาหกรรม
3	สตาร์	เดลต้า	ใช้ในระบบสายส่งแรงสูง
4	สตาร์	สตาร์	มีการใช้งานน้อย เนื่องจากปัญหาฮาโมนิกส์

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานการต่อขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

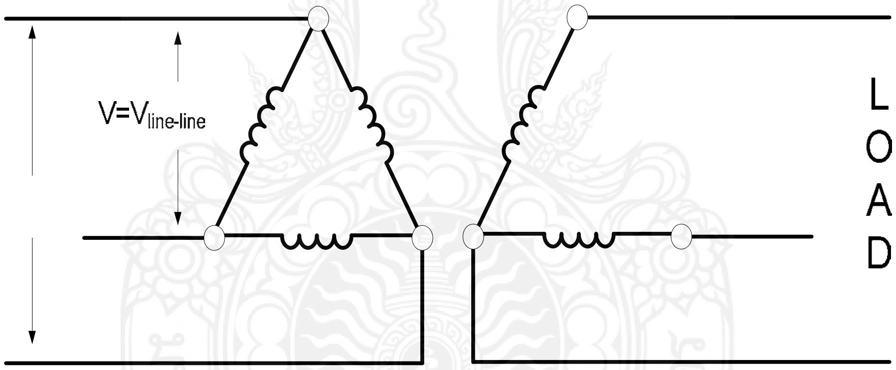


Code	Connection	Symbols: Primary winding	Symbols: Secondary winding	Connections: Primary winding	Connections: Secondary winding
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

นอกจากนี้ยังมีการต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า – เดลต้าเปิดหนึ่งด้าน และแบบเดลต้าเปิดหนึ่งด้าน – เดลต้าเปิดหนึ่งด้าน ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับระบบที่มีการจ่ายโหลดไฟฟ้าลดลง เช่น โหลดในระบบมีปริมาณลดลงอันเนื่องมาจากการถอดอุปกรณ์ไฟฟ้าออกบางตัว หรือการใช้หม้อแปลงขนาดเท่าเดิมจะส่งผลในเรื่องกำลังสูญเสียที่มากเกินไปก็อาจลดขนาดของหม้อแปลงก็อาจต่อหม้อแปลงแบบเดลต้าเปิดหนึ่งด้านทำให้ลดการสูญเสียกำลังที่ขดลวดได้



ภาพที่ 2.29 การต่อแบบเดลต้าเปิดหนึ่งด้าน – เดลต้าเปิดหนึ่งด้าน



ภาพที่ 2.30 การต่อแบบเดลต้า – เดลต้าเปิดหนึ่งด้าน

ตารางที่ 2.5 กำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านได้จากการเชื่อมต่อแบบเดลต้าเปิดหนึ่งด้าน

ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ	กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านได้
เดลต้าเปิด 1 ด้าน	เดลต้าเปิด 1 ด้าน	87 % ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ชุดที่นำมาต่อ
เดลต้า	เดลต้าเปิด 1 ด้าน	58 % ของพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า 3 ชุดที่นำมาต่อ

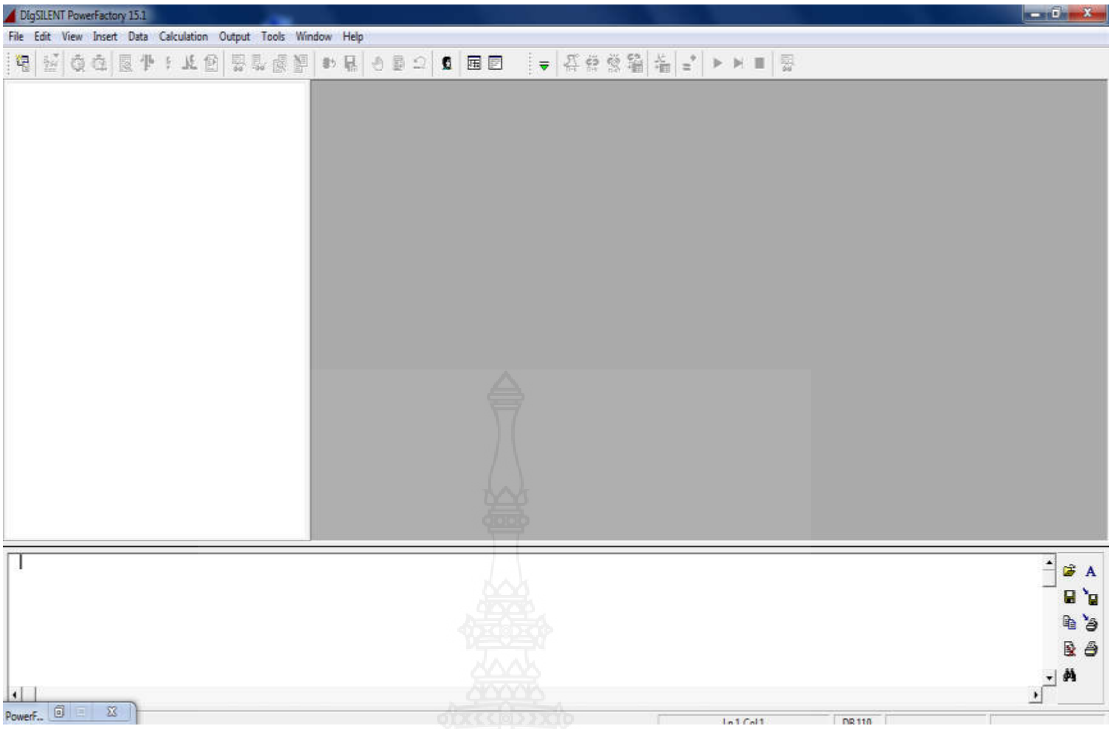
2.13 โปรแกรม Digsilent Power Factory

โปรแกรม Digsilent Power Facroty เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจสอบและประเมินค่าในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถป้อนข้อมูลเข้าไปได้ด้วยรูปภาพและ Text File นอกจากนี้ตัวโปรแกรมยังสามารถใช้ศึกษาได้ทั้งระบบการผลิต ระบบสายส่ง หรือระบบการจำหน่าย สำหรับภาคอุตสาหกรรมได้ โปรแกรม Digsilent Power Factory มีส่วนประกอบดังนี้

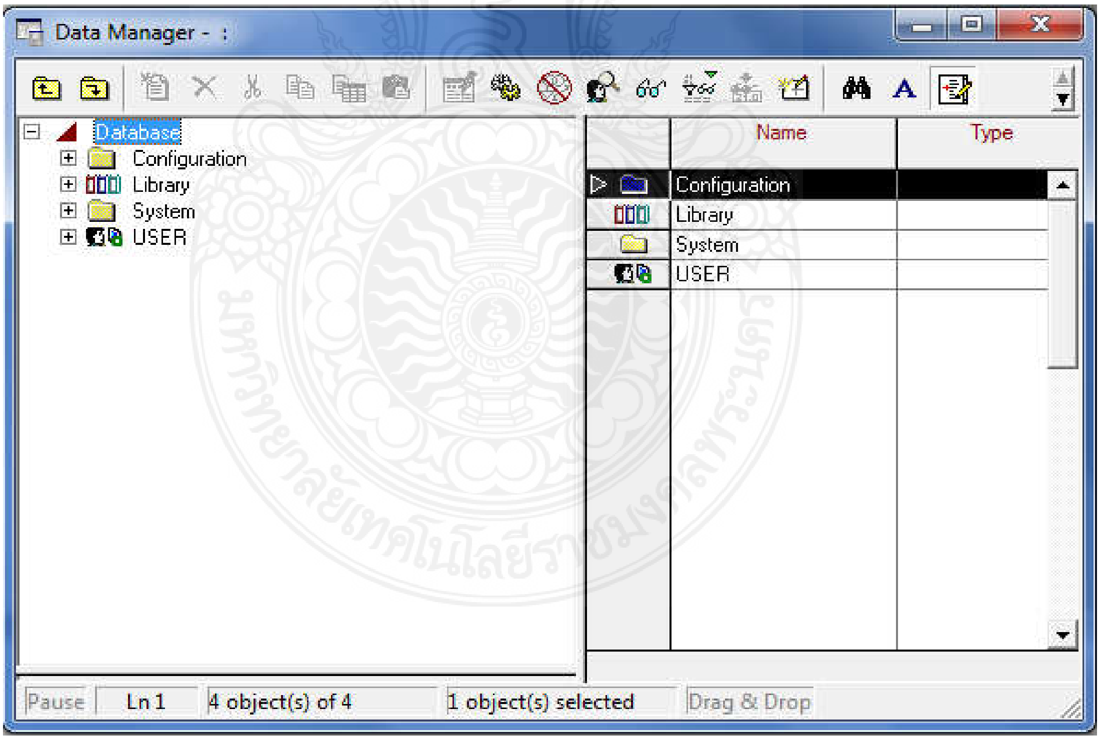
2.13.1 ความสามารถของโปรแกรม Digsilent Power Factory

- Load Flow and Fault Analysis of complete AC/ DC network representation, meshed & mixed 1, 2 and 3 phase AC and/or DC networks
- Low Voltage Network Analysis
- Distribution Network Optimization
- IEC Cable Sizing
- Dynamic Simulation
- EMT Simulation
- Eigen value Analysis
- System Identification
- Protection Analysis
- Harmonic Analysis
- Reliability
- Production Planning
- Voltage Stability Analysis
- Contingency Analysis
- Power Electronic Device Modeling
- DPL User Script
- A/D Interfacing
- DOLE Interface for SCADA/GIS
- PSS/E & PSS/U Compatibility
- Multi-User Database
- Virtual Instruments

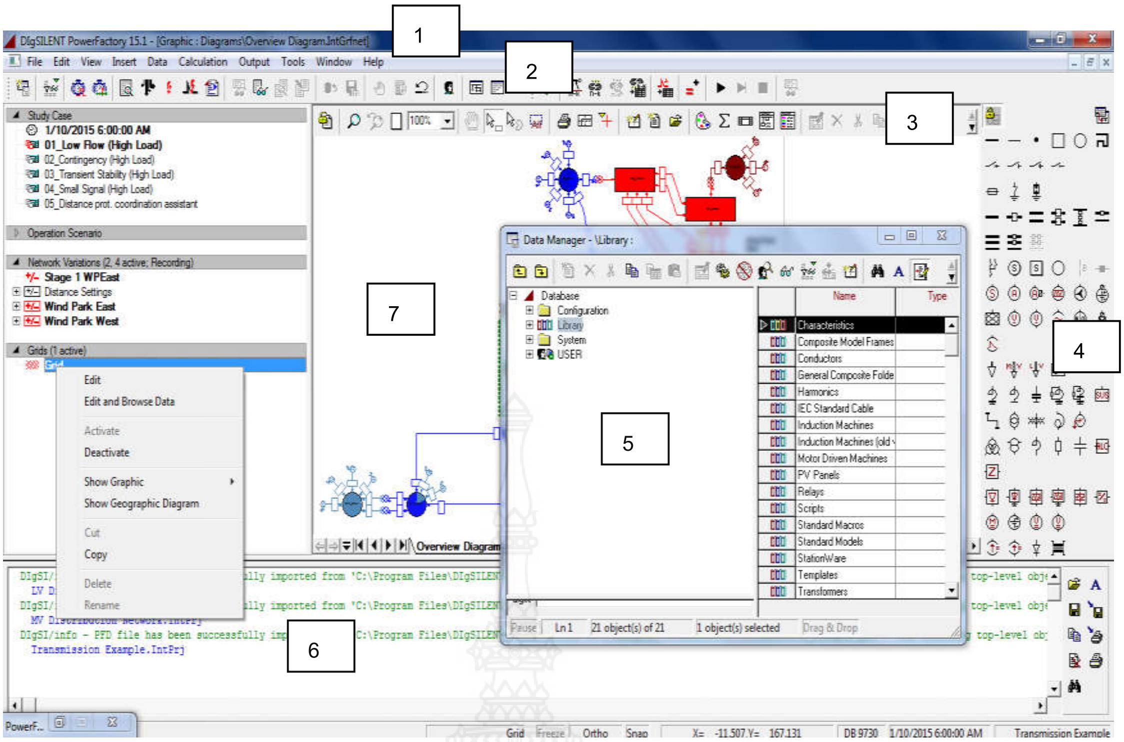
โปรแกรมนี้แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการวิเคราะห์ประเมินสภาวะของระบบไฟฟ้าทั้งแบบคงตัวและแบบชั่วครู่ได้ โดยตัวโปรแกรม Digsilent Power Factory มีรูปแบบหน้าต่างการแสดงผลดังนี้



ภาพที่ 2.31 หน้าต่างของโปรแกรม Digsilent Power Factory



ภาพที่ 2.32 หน้าต่างของ Data Manager ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลต่างๆ



ภาพที่ 2.33 ส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม

2.13.2 ส่วนประกอบต่างๆในโปรแกรม Digsilent Power Factory มีดังนี้

1) Title bar

2) Menu bar

3) Main tool bar

4) Drawing tool bar

5) Data Manager Library

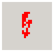
6) Output window

7) Workspace

2.14 ปุ่มใช้งานพื้นฐานในหน้าต่าง Main tool bar ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

New Database Manager เปิดหน้าต่าง Data Manager

Calculate Load-Flow คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบตามที่มีอยู่ใน Study Case

 **Calculate Short-Circuit** คำนวณกระแสลัดวงจรในระบบตามที่มีอยู่ใน Study Case

Output Calculation Analysis สำหรับเลือกรูปแบบการแสดงรายงานผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

Documentation of Device Data แสดงข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่มีในระบบ

Update database เมื่อต้องการให้นำค่าการ Set ของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการคำนวณไป Update ลงในฐานข้อมูล

Reset Calculation Reset ค่าที่ตั้งไว้สำหรับการคำนวณหลังจากการคำนวณครั้งล่าสุด

Select ToolBar เลือก Toolbar Group ที่ใช้รัน Stability, Data Acquisition, Harmonics, Optimal Capacitor Placement

Freeze Mode ตรึงหน้าจอการวาดกราฟฟิกไว้หลังจากวาดอุปกรณ์ต่างๆ แล้วเสร็จซึ่งจะทำให้ไม่สามารถแก้ไขรูปได้

Graphic Options สำหรับจัดการกับหน้าจอที่ใช้วาดกราฟฟิก เช่น แสดง/ไม่แสดง จุดกริด, Snap or Not, วาดเส้นตั้งฉากหรือไม่

Show layer... สำหรับเลือกชั้นข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการให้แสดงบนหน้าจอกราฟฟิก เช่น Result, Object Name เป็นต้น

Mark All Elements เลือก (Select) อุปกรณ์ทุกตัวที่อยู่บนหน้าจอกราฟฟิก เช่น ต้องการ Move ทั้งระบบไปบริเวณอื่น เป็นต้น

Edit and Browse Data แสดงข้อมูลที่ถูกเลือก (Selected) ในหน้าจอกราฟฟิกเพื่อให้ทำการแก้ไขข้อมูล

Color Representation เลือก Option ในการให้แสดงเฉดสีต่างๆ บนหน้าจอกราฟฟิก เช่น แสดงสีบริเวณที่ไม่มีการจ่ายไฟไปถึง

110 kV **Default voltage levels for Terminals and Busbars** เมื่อสร้างจุดโนด หรือบัสในกราฟฟิก โปรแกรมจะนำค่าที่อยู่ใน Box นี้ไปเป็นค่าแรงดันของบัสนั้น

ABC **Default Phase Technologies for Terminals** เมื่อสร้างจุดโนด หรือบัสในกราฟฟิก โปรแกรมจะนำค่าที่อยู่ใน Box นี้ไปเป็นค่าเฟสของบัสนั้น

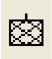
● Drawing Toolbar ปุ่มอุปกรณ์พื้นฐานซึ่งใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้ามีดังนี้ (ดูเพิ่มเติมได้จาก Help)

 Terminal ใช้สร้างจุดโนดซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น Bus ที่สถานีไฟฟ้า

 Short Terminal ใช้สร้างจุดโนดซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น Bus ที่สถานีไฟฟ้า

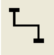
 Point Terminal ใช้สร้างจุดโนดซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในกรณีนี้มักใช้บริเวณที่เป็นทางแยก

Disconnector ใช้สร้างสวิตช์ในสถานีไฟฟ้า หรือในระบบส่ง ระบบจำหน่าย

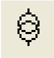
 External Grid ใช้สร้างแหล่งจ่ายไฟของระบบ ได้แก่ Source จาก EGAT หรือจากสถานีไฟฟ้าของ PEA

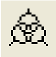
General Load ใช้สร้างโหลดของระบบ

Shunt/Filter C ใช้สร้างคาปาซิเตอร์แบบต่อขนานระบบ

 Line ใช้สร้างสายส่ง หรือสายจำหน่าย

Fuse ใช้สร้างฟิวส์ เช่น ฟิวส์ที่ต่ออยู่บริเวณ Line แยกของระบบจำหน่าย

 2-Winding Transformer ใช้สร้างหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้า และหม้อแปลงจำหน่าย 22,33/0.4 kV

 3-Winding Transformer ใช้สร้างหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวดซึ่งมีอยู่ในบางพื้นที่

Auto Transformer ใช้สร้าง AVR หรือ Auto Voltage Regulator ในระบบจำหน่าย

2.15 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอในส่วนของเนื้อหาต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องในเรื่องของโครงการรถไฟฟ้า ทั้งโครงการรถไฟฟ้าที่ใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง และโครงการรถไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เสถียรภาพทางไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลจากการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆว่าแบบใดที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลสูงสุด รวมถึงการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาทดลองใช้สร้างวงจรทางไฟฟ้าขึ้นมาใช้งาน

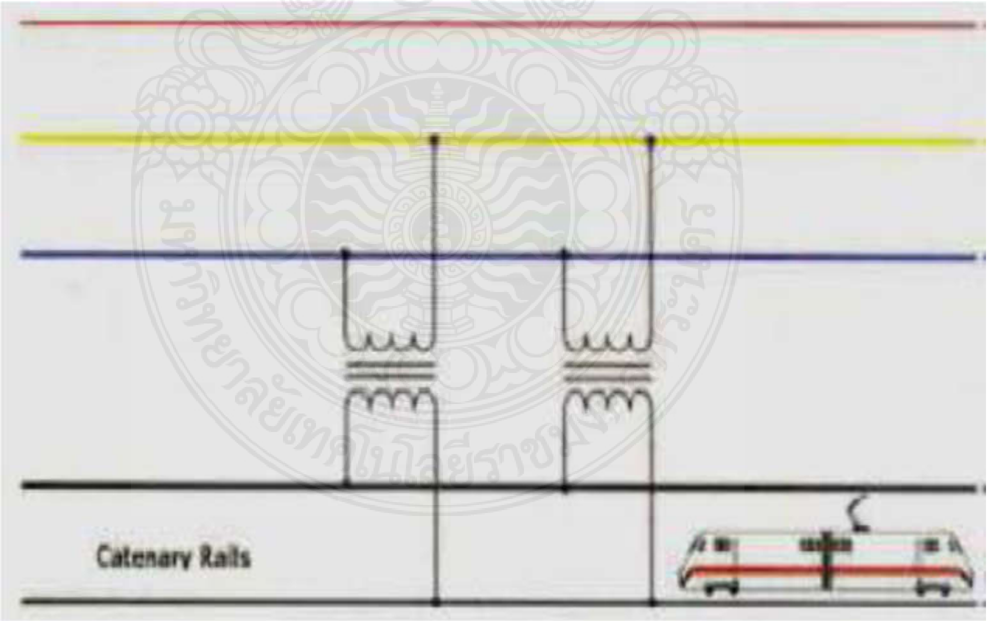
บทที่ 3
แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทนี้จะนำเสนอการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้เชื่อมต่อที่ห้องหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 3 รูปแบบ ได้แก่การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว (Single - Phase Connection) การเชื่อมต่อแบบวี (V - Connection) การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ (Scott – Connection) หรือการเชื่อมต่อแบบเลอบลอง (Leblanc – connection) มาใช้เพื่อทดสอบกับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ เพื่อศึกษาค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่างๆผ่านค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า และการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม Digsilent

การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอตลิงค์ แสดงได้ตามหัวข้อดังนี้

3.1 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว (Single – Phase Connection)

การเชื่อมต่อประเภทนี้ใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าของการไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส แต่นำมาใช้งานแค่ 2 เฟส ซึ่งเป็นการใช้งานในเฟสเดียวกัน เช่น เฟส bc และ bc เป็นต้น

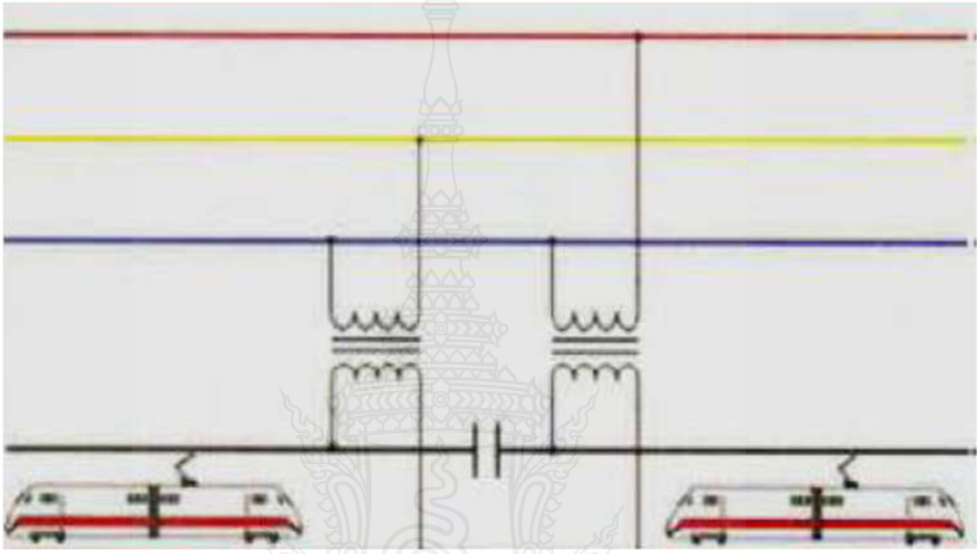


ภาพที่ 3.1 การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว

ที่มาของภาพ http://www02.abb.com/PQ+Vol.23.pdf

3.2 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวี (V – Connection)

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับแบบวีจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ลูกมาต่อเข้ากับเฟสที่ต่างกัน เช่น เฟส ac กับเฟส cb เป็นต้น ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีความสมดุลเพิ่มมากขึ้น แต่กรณีถ้าเกิดปัญหากับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งในสองลูกนี้ก็จะมีผลให้หม้อแปลงอีกลูกต้องมาทำการจ่ายไฟฟ้าแทนในอีกส่วน และเมื่อเหลือหม้อแปลงอยู่เพียงหนึ่งลูกปัญหาก็จะกลับไปเหมือนหม้อแปลงเฟสเดียวซึ่งอาจจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขึ้นได้

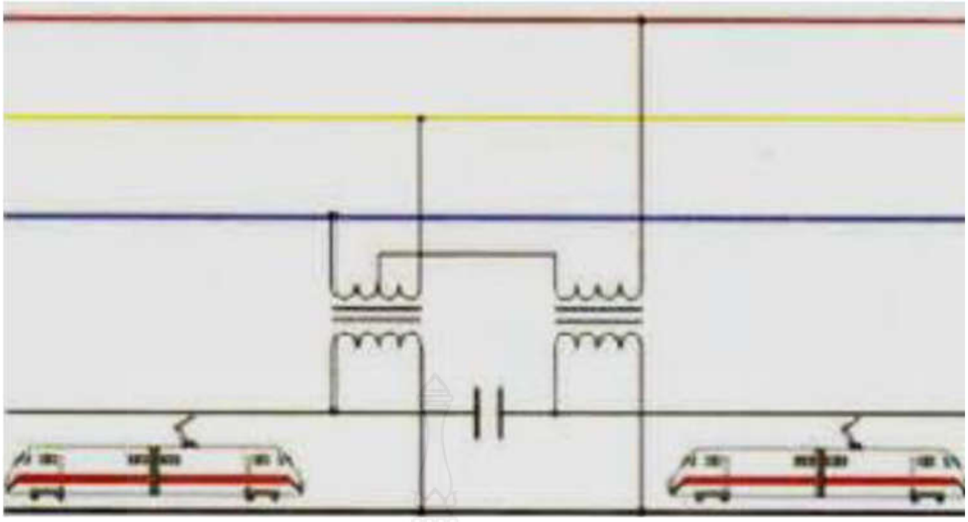


ภาพที่ 3.2 การเชื่อมต่อแบบวี

ที่มาของภาพ http://www02.abb.com/PQ+Vol.23.pdf

3.3 การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ (Scott - Connection)

การเชื่อมต่อรูปแบบนี้จะใช้หม้อแปลงจำนวน 2 ลูก โดยด้านปฐมภูมิจะถูกต่อกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสของการไฟฟ้า และต่อเข้าหม้อแปลงหลักตัวที่หนึ่ง ส่วนหม้อแปลงตัวที่สองเป็นหม้อแปลงชนิดพิเศษขดลวดด้านปฐมภูมิหนึ่งด้านจะทำการแทปเข้ากับหม้อแปลงลูกที่หนึ่ง และอีกด้านต่อเข้ากับเฟสหนึ่งของการไฟฟ้า



ภาพที่ 3.3 การเชื่อมต่อแบบสกอตต์

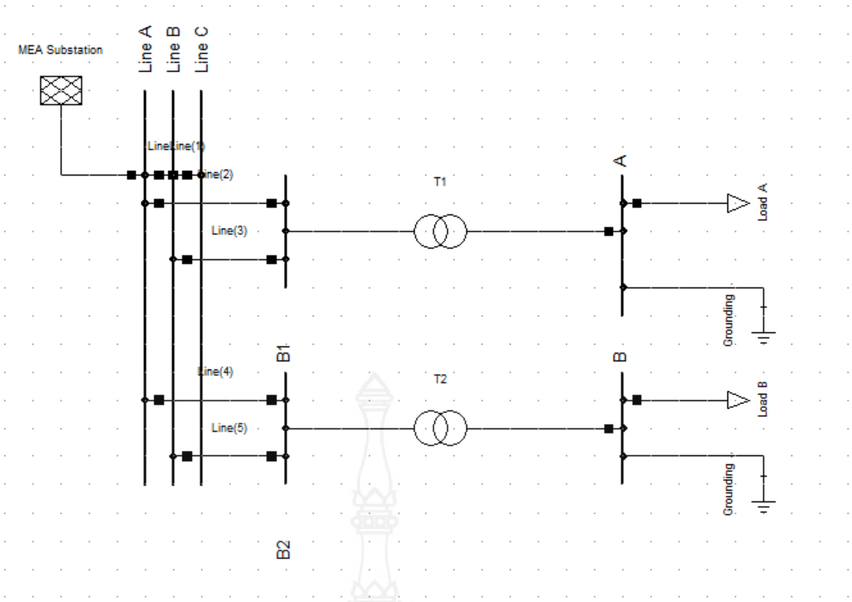
ที่มาของภาพ http://www02.abb.com/PQ+Vol.23.pdf

3.4 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับของสถานีขับเคลื่อน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำแบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมาแสดงจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว (Single – phase connection) การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวี (V – connection) การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสกอตต์ (Scott – connection) และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลอง เพื่อนำมาประเมินว่าการเชื่อมต่อรูปแบบใดที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงที่สุด และวิเคราะห์โครงสร้างของวงจรโดยใช้โปรแกรม Digsilent Power Factory

1) แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว (Single – phase connection)

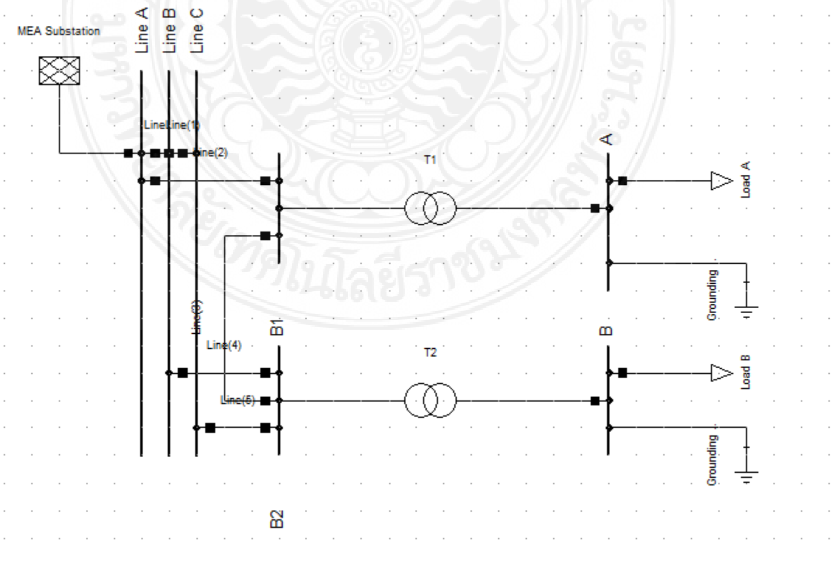
การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว ประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จำนวน 2 ลูก หม้อแปลงลูกที่หนึ่งและลูกที่สองประกอบไปด้วยด้าน Primary ที่ต่อกับแหล่งจ่ายของการไฟฟ้าในเฟสเดียวกัน และด้าน Secondary เชื่อมต่อกับโหลด



ภาพที่ 3.4 การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวจากโปรแกรม Digsilent Power Factory

2) แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบสกอตต์ (Scott – Connection)

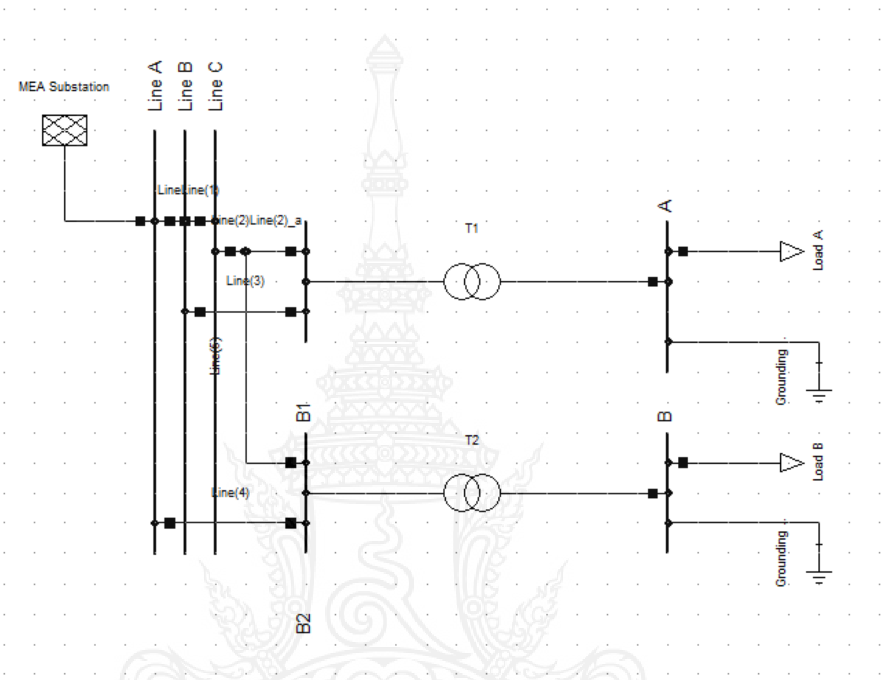
การต่อหม้อแปลงแบบสกอตต์ ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จำนวน 2 ลูก ในแต่ละลูกจะมีขดลวดด้าน Primary และ Secondary อย่างละ 1 ขด แต่หม้อแปลงลูกที่สองเป็นหม้อแปลงชนิดมีแทปกลาง ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงลูกที่หนึ่งเชื่อมต่อกับเฟส a และด้านแทปกลาง ส่วนหม้อแปลงลูกที่สองเชื่อมต่อกับเฟส b-c



ภาพที่ 3.5 การเชื่อมต่อแบบสกอตต์จากโปรแกรม Digsilent Power Factory

3) แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวี (V – connection)

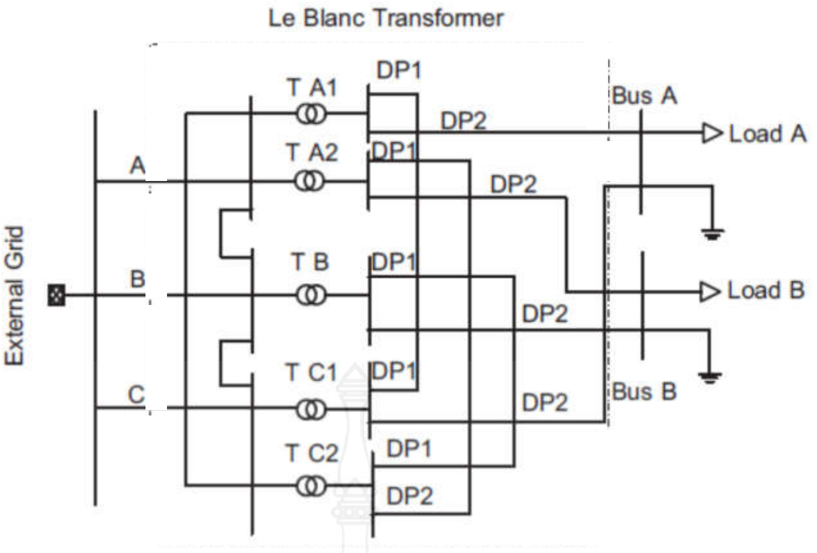
การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวีถูกพัฒนาขึ้นมาจากการเชื่อมต่อหม้อแปลงชนิดหนึ่งเฟส การเชื่อมต่อแบบวีประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จำนวน 2 ลูก ในหม้อแปลงแต่ละลูกจะมีขดลวดด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิอย่างละ 1 ขด หม้อแปลงลูกที่ 1 จะต่อคู่เฟส c-b ส่วนหม้อแปลงลูกที่ 2 จะต่อคู่เฟส a-c หรือเรียกว่าการต่อกันแบบเดลต้าเปิด 1 ด้าน



ภาพที่ 3.6 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวีจากโปรแกรม Digsilent Power Factory

4) แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเลอบลอง (Leblanc – connection)

การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบเลอบลอง จะมีหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสอยู่ 3 ลูก แต่ละลูกจะมีขดลวดด้าน Primary และด้าน Secondary ที่ไม่เท่ากัน โดยในด้านปฐมภูมิมีการเชื่อมต่อกับเฟส a-b-c ส่วนด้านทุติยภูมิมีการเชื่อมต่อที่ค่อนข้างซับซ้อน

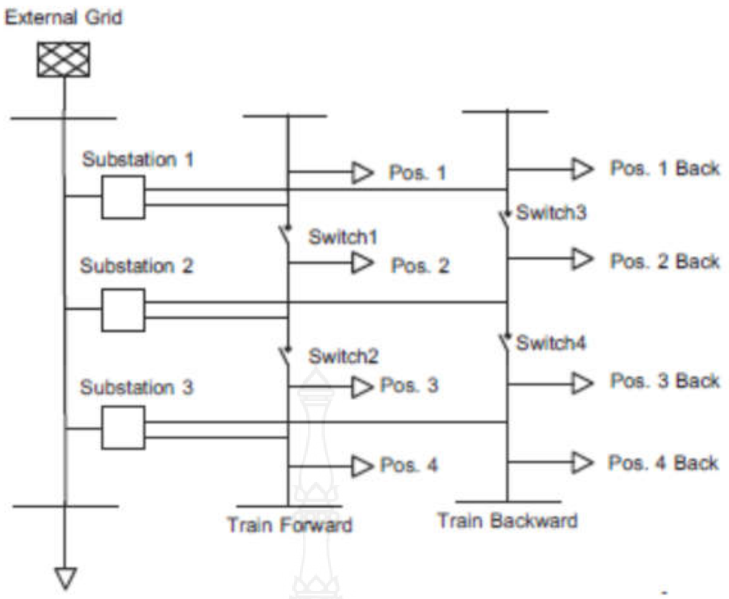


ภาพที่ 3.7 การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองจากโปรแกรม Digsilent Power Factory

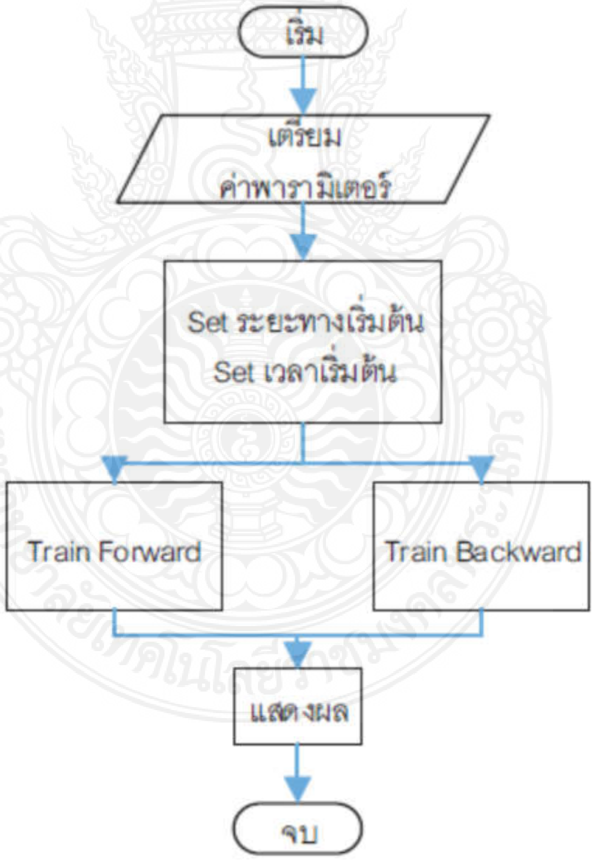
บทที่ 4
การวิเคราะห์และผล

4.1 บทนำ

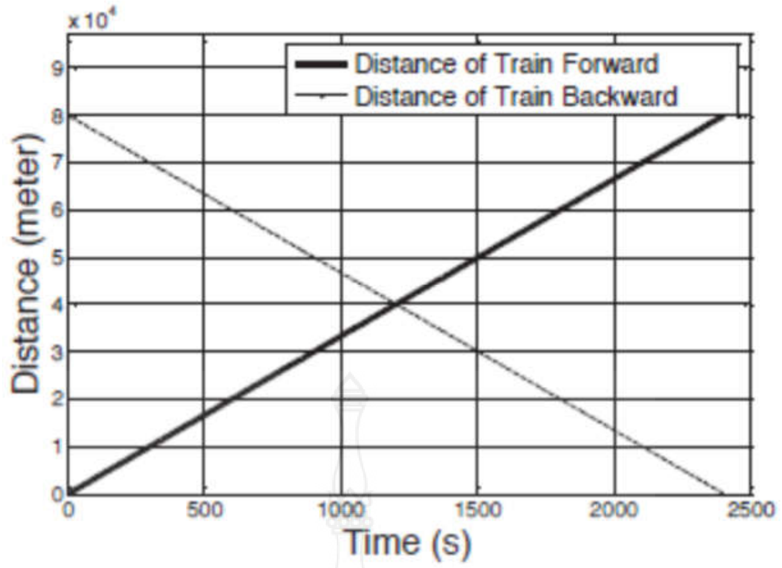
ในบทที่แล้วได้อธิบายในส่วนของทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับโครงการรถไฟฟ้าที่ใช้แรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรง และกระแสสลับ รวมถึงหัวข้ออื่นๆที่เป็นกรณีศึกษาสำหรับความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และแบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากับทางการไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วย การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสจำนวน 2 ลูกเชื่อมต่อในคู่เฟสเดียวกันกับสายส่งของการไฟฟ้า การเชื่อมต่อแบบวีที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสจำนวน 2 ลูก มีวิธีการต่อแบบเดลต้าเปิดหนึ่งด้าน การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสจำนวน 2 ลูก โดยมีหม้อแปลงหนึ่งลูกเป็นแบบชนิดพิเศษคือมีแทปกลางไปเชื่อมต่อกับหม้อแปลงลูกที่สอง และการเชื่อมต่อแบบเลอบลอง ประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสจำนวน 3 ลูก ซึ่งจะมีความพิเศษตรงที่หม้อแปลงแต่ละลูกนั้นมีขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิที่ไม่เท่ากัน สำหรับกรณีศึกษาการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน มุ่งเน้นไปที่การศึกษาถึงแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า งานวิจัยนี้จะทดลองให้ขบวนรถไฟฟ้าวิ่งสวนทางกันด้วยความเร็วคงที่ (a=0) โดยจะแทนค่าพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าด้วยโหลดขนาด 1 MW และมีระยะห่างระหว่างสถานีเท่ากับ 20 Km จะทำการพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 รูปแบบด้วยการติดตั้งในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงและแรงต่ำเป็น 20 kV และ 10 kV ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงค่าแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล



ภาพที่ 4.1 แบบจำลองการติดตั้งหม้อแปลงในแต่ละสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

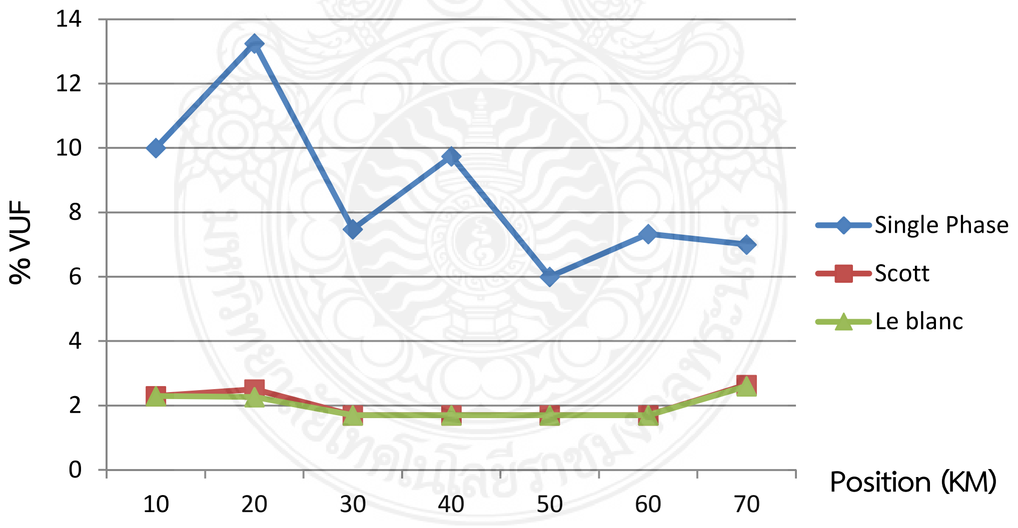


ภาพที่ 4.2 แผนผังแสดงการดำเนินงานทดลอง



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงระยะทาง – เวลา ที่รถไฟเคลื่อนที่ไปและกลับ

ผลการวิเคราะห์แบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ได้แก่ แบบหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว แบบหม้อแปลงไฟฟ้าสกอตต์ และแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเลอบลอง โดยแสดงผลการทดลองออกมาเป็นกราฟที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างตำแหน่งและค่าแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบผลของแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ตารางค่า %VUF สูงสุดและต่ำสุด ที่สถานีไฟฟ้าย่อย

การเชื่อมต่อ	สถานีไฟฟ้าย่อย	
	Max	Min
แบบเฟสเดียว	13.25	7.48
แบบสกอตต์	2.64	1.36
แบบเลอบลอง	2.52	0.19

4.2 สรุป

จากผลของการจำลองระบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ และการเชื่อมต่อแบบเลอบลอง ทำให้เห็นค่าเปอร์เซ็นต์แฟกเตอร์ของความไม่สมดุลทางระบบไฟฟ้าในรูปแบบเฟสเดียวมีขนาดความไม่สมดุลสูงที่สุด รองลงมาคือแบบสกอตต์และแบบเลอบลองตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหากใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลง 1 เฟส และเชื่อมต่อกันในคู่เฟสเดียวกันก็จะมีผลให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นในระบบไฟฟ้าและอาจส่งผลถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังสังเกตุได้ว่าเปอร์เซ็นความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้นอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆที่มากระทำกับขบวนรถไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่นตอนที่ขบวนรถไฟฟ้ามีการออกตัวเพราะต้องใช้แรงบิดของมอเตอร์จำนวนมากเพื่อให้ชนะแรงเสียดทานของตัวรถ พอขบวนรถไฟฟ้าวิ่งที่ความเร็วคงที่ไม่มีความเร่งทำให้เปอร์เซ็นความไม่สมดุลก็มีค่าลดลง เป็นต้น หมายถึงว่าโหลดของระบบก็อาจส่งผลถึงค่าความไม่สมดุลด้วยเช่นกัน ดังนั้นควรเลือกใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบเลอบลองเพราะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำสุด

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาวิเคราะห์ในเรื่องของการเพิ่มความเชื่อถือได้ หรือคุณภาพของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ โดยพิจารณาจากองค์ประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องทั้งในเรื่องของอุปกรณ์ทางระบบไฟฟ้า ระบบสายส่ง โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เช่น MRT, BTS ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 750 โวลต์ผ่านตัวเครื่อง Rectifier ที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 24 kV และโครงการรถไฟฟ้าที่ใช้กระแสสลับ 24 kV เช่น ARL โดยศึกษาที่การเชื่อมต่อหม้อแปลงของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ใน 4 รูปแบบ ได้แก่การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวี การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสกอตต์ และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลอง นำมาวิเคราะห์ผลของค่าแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งการเชื่อมต่อแบบสกอตต์และแบบเลอบลองให้ค่าเปอร์เซ็นความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันต่างจากการเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวที่ให้ค่าเปอร์เซ็นความไม่สมดุลที่ค่อนข้างสูง และมีค่าเกินมาตรฐานของ IEEE ที่ระบุว่าการเกิดแรงดันไม่สมดุลควรมีค่าระหว่าง 0.5% ขึ้นไปแต่ไม่ควรมีค่าเกิน 2% เพราะอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆได้ เช่นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 3 เฟส หากเกิดความไม่สมดุลของแรงดันขึ้นประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลงเนื่องจากมีกระแสไหลเข้าไปในขั้วลบมากขึ้นส่งผลให้สนามแม่เหล็กวิ่งตัดกัน และหากเกิดขึ้นเป็นเวลานานก็จะทำให้มอเตอร์ได้รับความร้อนสูงจนอาจเสียหายได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาและพัฒนาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในรูปแบบอื่นๆ เพื่อลดค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าน้อยที่สุด

5.2.2 ศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการลดโหลดที่เพิ่มขึ้นในระบบซึ่งส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้

เอกสารอ้างอิง

IEEE recommended practice for monitoring electric motor quality (2009). IEEE std 1159-2009

IEC 60850 (2007), Railway applications, Supply voltage of Traction Systems Third Edition.

Firat, G., Yang, G. and Al-Ali, H.A.H. (2015). A comparative Study of Different of the Transformer connection for Railway Poower System mitigation of Voltage unbalance. IEEE, Proceeding of APSCOM, 2015.

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. Electric Power Systems Research, Vol 47, (P.153-163)

Hsu C., Huang H.M., Cheng T.J. and Tsai L.J.. 2013. “Impact of Light Rail Tram on the Voltage and Unbalance of Distribution System”, Mathematical of the Problems in Engineering, Vol.2013

Kalantari M., Sadeghi M.J., Fazel S.S. and Farshad S.. 2010. “Investigation of Power Factor Behavior in AC Railway System Based on Special Traction Substation Transformer”. Journal of Electromagnetic Analysis and Application, 2(11): 618-216

ณัฐพงษ์ มิ่งพฤกษ์, “การศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2559

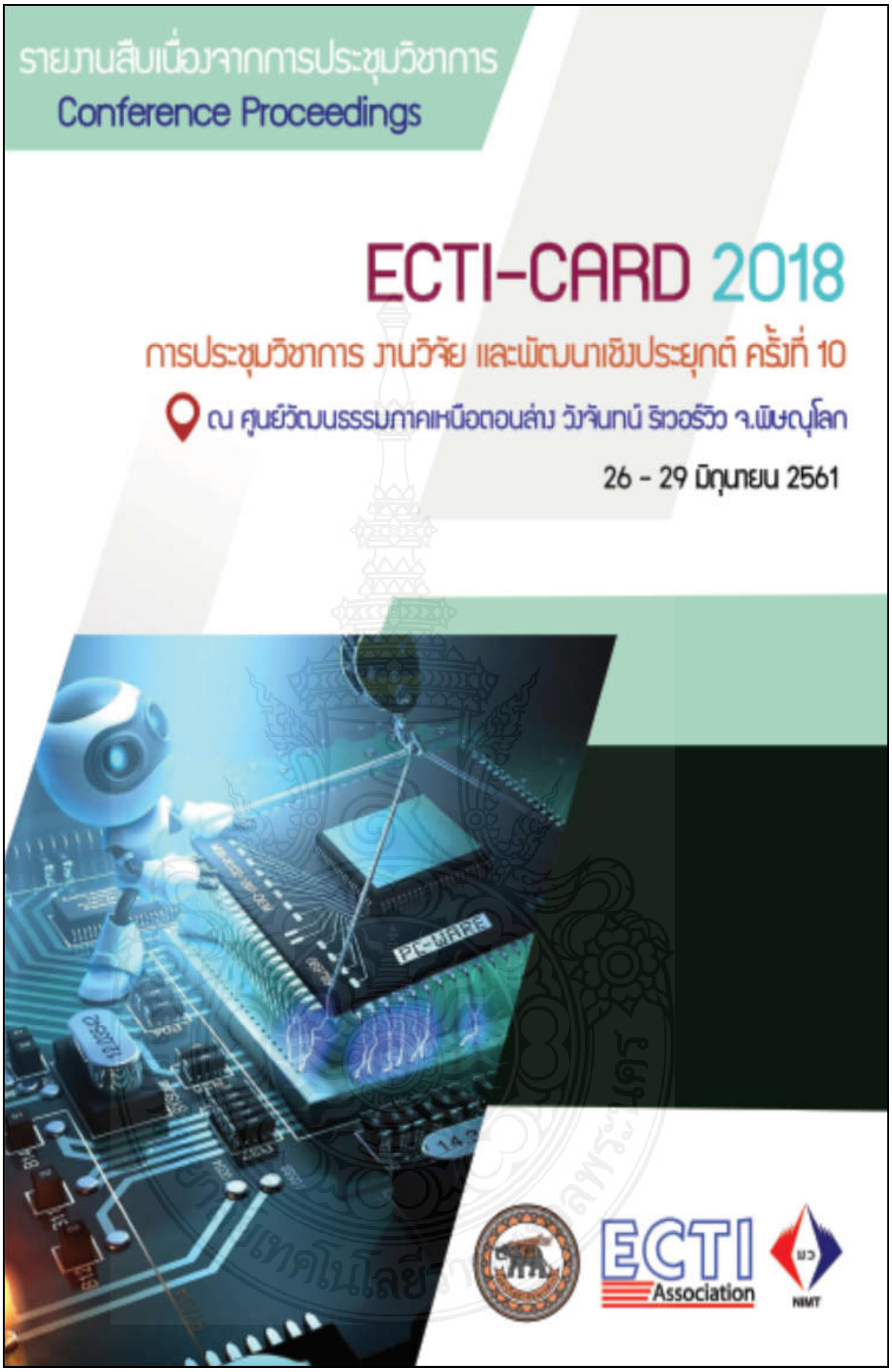
ดลมนรรจน์ สันติยานนท์, “การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลโดยใช้หม้อแปลงชนิดต่างๆ สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

N.Mithulanan, A.Sode-Yome, N.Acharya, S.Phichaisawat, “Application of FACTS Controller in Thailand Power System,” RTG Budget-Joint Research Project, Fiscal-Year 2008, January 2005

A.Sode-Yome, N.Mithulanan, K.Y.Lee, “Static Voltage Stability margin enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC,” IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Dalian, China, 2005

ภาคผนวก

ภาคผนวก
เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา


รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
Conference Proceedings
ECTI-CARD 2018
การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10
ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วังจันทน์ ริเวอร์วิว จ.พิษณุโลก
26 - 29 มิถุนายน 2561
ECTI
Association

ECTI-CARD 2018

การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10

การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีเพื่อตอบสนองนโยบายประเทศไทย 4.0

วันที่ 26-29 มิถุนายน 2561
ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วังจันทน์ริเวอร์วิว
จังหวัดพิษณุโลก

จัดโดย

สมาคมวิชาการ ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยนเรศวร
สถาบันมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย

PID	เรื่อง/ผู้แต่ง	หน้า
1263	กระดานหมากรุกอิเล็กทรอนิกส์	770
1264	วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าควบคุมแบบอัตถิติฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์	774
1265	การพัฒนาการสอบเทียบที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C โดยวิธีลวดเกลียวของแพลเลเดียม	777
1266	การพัฒนาระบบรวมศูนย์ภาพกล้องวงจรปิดบนทางพิเศษตามแนวทาง Write Once, Run Anywhere	781
1267	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและการบาดเจ็บเมื่อเกิดอุบัติเหตุบนทางพิเศษ โดยใช้การถดถอยโลจิสติกส์	785
1268	การพัฒนาเพื่อค้นหาจุดต้นทางและจุดปลายทางของการเดินทางบนทางพิเศษ โดยใช้ข้อมูล Easy Pass	789
1269	การพัฒนาการแสดงตำแหน่งของโทรศัพท์มือถือสำหรับ Mobile Application บนทางพิเศษ	793
1270	ระบบอัตโนมัติสำหรับเก็บค่าความนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด–ด่างและค่าอุณหภูมิในการปลูกพืชไฮโดรพอนิกส์	797
1271	พฤติกรรมของผู้ใช้แอปพลิเคชัน "EXAT Traffic" เพื่อการตรวจสอบสภาพจราจรบนทางพิเศษ	801
1272	อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะในศีรษะจำลอง และอัตราดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่จากโทรศัพท์เคลื่อนที่	805
1273	การป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน: กรณีเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบเฟสเดียว	809
1275	โปรโตคอลสำหรับเพิ่มอัตราการสร้างกุญแจระดับกายภาพจากค่าความแรงสัญญาณโดยใช้การเข้ารหัสเครือข่ายแบบปลอดภัย	813
1276	การปรับปรุงขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งภายในอาคารจากจุดเซ็นทรอยด์บนแผนที่ฟิงเกอร์ปริ้นท์	817

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10
10th ECTI-CARD 2018, Phitsanulok Thailand

การป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน: กรณีเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบเฟสเดียว

Unbalance Voltage Protection for Electric Mass Rapid Transit Train: Single Phase-Connection

ศรัณย์ ลัคนาทรงรื่นกุล อาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และณัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์ 02-836300 E-mail: Saran.lakn@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรณีเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบเฟสเดียว ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการตรวจสอบสายไฟในตัวรถไฟฟ้า การตรวจสอบตัวเก็บประจุและฟิวส์ป้องกันชุดตัวเก็บประจุจะเป็นให้อยู่ในสภาพดีเสมอ เนื่องจากถ้าอุปกรณ์เหล่านี้ชำรุด จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุล และส่งผลให้สายมีวกระแสไฟไหลและอาจทำให้ตัวมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ ผลจากการป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ได้แสดงไว้ในตอนท้ายของบทความด้วย

คำสำคัญ: แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว

Abstract

This paper presents unbalance voltage protection for electric mass rapid transit train in case of single phase connection. This can be done by checking the power cord, the capacitors and its fuse are always in good condition. If these devices are damaged, this will cause the voltage of the train system to be unbalanced. As a result, the current surges in the drive motor. The effect of unbalanced voltage protection with this proposed method is shown at the end of the article.

Keywords: unbalance voltage, mass rapid transit train, single-phase connection

1. บทนำ

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในเมืองขนาดใหญ่หลายๆแห่ง ได้แก่ มหานครโตเกียว, มหานครนิวยอร์ก, มหานครลอนดอน แม้กระทั่งกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเปิดให้บริการอยู่ เช่น รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพ (MRT) และรถไฟฟ้าบีทีเอส เป็นต้น โดยทางคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความต้องการใช้พลังงานทางไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้ระบบรถไฟฟ้าซึ่งในแต่ละวันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงซึ่งอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในระบบได้

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้เป็นโหลดที่ไม่ต่อเนื่องกัน โดยจะมีการดึงกระแสไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงเริ่มๆสำหรับการเคลื่อนตัวออกของตัวรถไฟฟ้าขณะที่มีความเร็วคงที่ โดยทั่วไปแล้วปัญหาของสถานีจ่ายระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับคือ ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าและแรงดันตกที่ตัวสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ [1]

การศึกษาวิจัยด้านแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้จะช่วยให้เกิดการพัฒนาและหาแนวทางป้องกันสำหรับตัวโครงการรถไฟฟ้าเพื่อลดการเกิดผลกระทบกับผู้ใช้บริการกรณีเกิดปัญหาขึ้นซึ่งมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่เสถียรและตัวรถไฟฟ้าอาจต้องหยุดให้บริการชั่วคราวในบางกรณี ส่งผลให้ผู้ใช้บริการไม่ได้รับความสะดวกสบาย และอาจทำให้ความน่าเชื่อถือเกี่ยวกับประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าลดลง

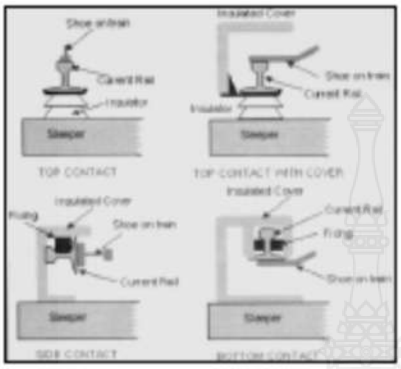
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ในปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าที่มีการก่อสร้างขึ้น จะใช้ระบบกระแสไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภทหลัก ดังนี้

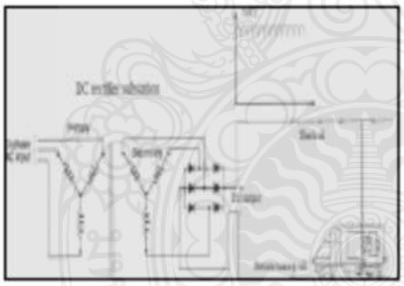
- ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 750 โวลต์ โดยการไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 115 กิโลโวลต์และทำการแปลงให้เป็นแรงดันต่ำที่อาคาร BSS ก่อนส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 24 กิโลโวลต์มาใช้งานบน Mainline ผ่านช่องเดินสายไฟฟ้า (Cable Trough) จากนั้นไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านทางห้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนทางราง (Traction Substation) ที่มีการติดตั้งเป็นระยะๆตามแนวรางรถไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับรางที่สาม และตัวรถไฟฟ้าจะรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากรางที่สามนี้ไปใช้งานผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Collector shoe ที่อยู่ด้านซ้ายและด้านขวาของตัวรถไฟฟ้า
- ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 25 กิโลโวลต์ ซึ่งในปัจจุบันจะมีการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบสลับชนิดสลับคู่เฟส และจะมีการรับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้าไปใช้งานผ่าน

ขาก้านที่ยื่นขึ้นไปด้านบนตัวรถ (Pantograph arm) โดยตัวก้านนี้จะสัมผัสกับสายไฟฟ้าแรงดันสูงชนิดสัมผัสที่แขวนอยู่เหนือตัวรถ



รูปที่ 1 การรับไฟฟ้ากระแสตรงผ่านทางรางที่สาม

จำนวนพัลส์ของวงจรเรียงกระแสจะมีผลต่อความเรียบของระดับแรงดันกระแสตรงเอาท์พุต และขนาดของตัวกรองกระแสระลอก ซึ่งจะส่งผลต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าบนขบวนรถ และผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านกระแสสลับที่เกิดขึ้น การออกแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนทางรางที่เป็นที่นิยมสำหรับระบบไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้ไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 750 โวลต์นั้นจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์



รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรง

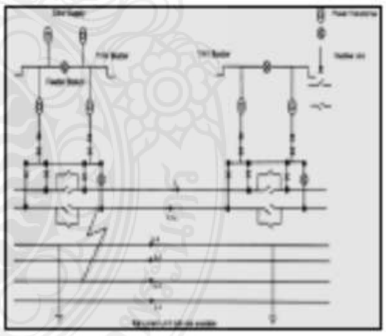
การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนตามมาตรฐาน EN50163 ระดับแรงดันปกติของระบบการจ่ายไฟให้รถไฟฟ้านั้นต้องมีอยู่ในช่วง Umin1 ถึง Umax2 โดยมีข้อกำหนดของการทำงานที่ระดับแรงดัน Umax1 ถึง Umax2 จะต้องมีค่าไม่เกิน 5 นาที และระหว่างแรงดันช่วง Umin1 ถึง Umin2 ต้องมีค่าไม่เกิน 2 นาที

Electrification system	Lowest non-permanent voltage U_{min2} V	Lowest permanent voltage U_{min1} V	Nominal voltage U_n V	Highest permanent voltage U_{max1} V	Highest non-permanent voltage U_{max2} V
d.c. (mean values)	400	400	600 [a]	720	800
	500 [b]	500	750	900 [c]	1 000
	1 000	1 000	1 500	1 800 [c]	1 950
	2 000	2 000	3 000	3 600	3 900 [d]
a.c. (r.m.s. values)	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000
	17 500 [e]	19 000 [f]	25 000	27 500 [g]	29 000

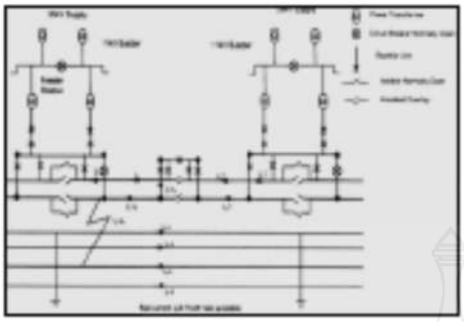
รูปที่ 3 แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน BS EN 50163

การจัดรูปแบบการจ่ายไฟให้กับตัวนำของรางที่สามเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนทางราง เนื่องจากการใช้ Track section และการเชื่อมต่อรางวี ของระบบรถไฟฟ้าทางคู่ขึ้นหรือไม่นั้นจะทำให้ทางเดินของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป อาจส่งผลต่อพิกัดการตัดวงจรของระบบไฟฟ้า

การจ่ายไฟระหว่างสถานีเรียงกระแสสองสถานีติดกันโดยมีการติดตั้ง Track section switchgear ทำให้ระหว่างสถานีมีการเชื่อมต่อกันของตัวนำระบบไฟฟ้าของรางที่สาม ส่งผลให้ตัวนำระบบการจ่ายไฟสำหรับรางที่สามทั้งทิศทางขาไปและทิศทางขากลับถูกเชื่อมต่อกันที่ระยะกึ่งกลางระหว่างสถานี

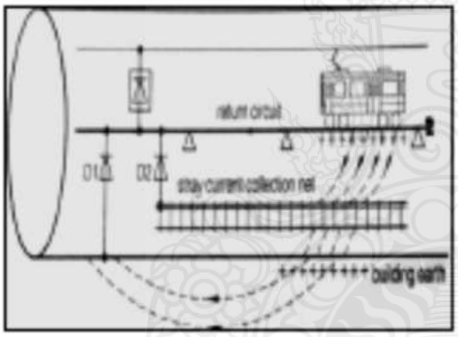


รูปที่ 4 วงจรระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่ใช้ Track section



รูปที่ 5 วงจรระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ Track section

ระบบตัวนำกระแสย้อนกลับ หรือระบบกราวด์ของระบบรถไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากระแสตรง ได้แก่แบบ Stray Current Collection Net System (SCCNS) เป็นระบบที่นำมาใช้กับรถไฟฟ้าที่วิ่งบนทางยกระดับหรือวิ่งในอุโมงค์ โดยมีการติดตั้งตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลภายในโครงสร้างของตัวคอนกรีต เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในส่วนที่เป็นโลหะ

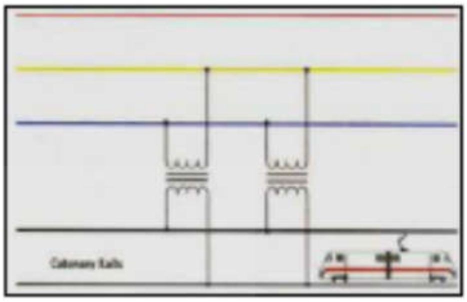


รูปที่ 6 ระบบ SCCN

2.2 ประเภทของการเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับระบบของการไฟฟ้า

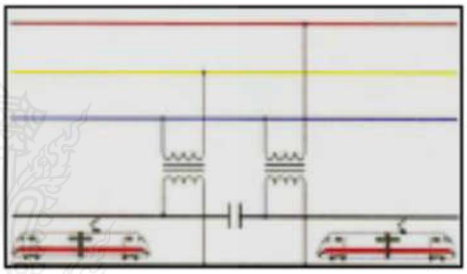
การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าในระบบ AC จะผ่านมาจากห้องที่เรียกว่า Traction Substation แต่ตัวรถไฟฟ้ามีการใช้งานกระแสไฟฟ้าแบบเฟสเดียว เพราะฉะนั้นการเชื่อมต่อสถานีไฟฟ้าเข้ากับระบบของทางการไฟฟ้านั้นจะมีความแตกต่างจากวิธีการทั่วไป โดยจะมีการเชื่อมต่อ 3 รูปแบบดังนี้

2.2.1 การเชื่อมต่อแบบ Single phase



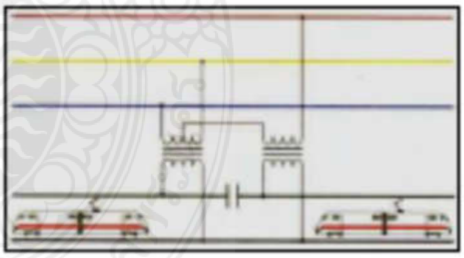
รูปที่ 7 การเชื่อมต่อแบบ Single phase

2.2.2 การเชื่อมต่อแบบ V



รูปที่ 8 การเชื่อมต่อแบบ V

2.2.3 การเชื่อมต่อแบบ Scott



รูปที่ 9 การเชื่อมต่อแบบ Scott

2.3 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากรถไฟฟ้า

2.3.1 การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว

$$d_v = \frac{S_L}{S_{sc}+S_L} \quad (1)$$

2.3.2 การแบบเชื่อมต่อแบบ *V*

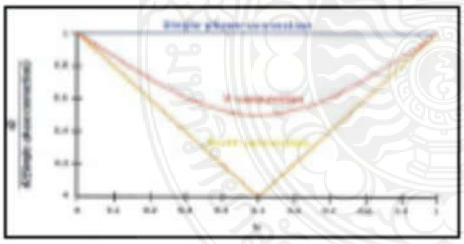
$$d_v = \frac{S_L}{S_{sc}+S_L}\sqrt{3k^2-3k+1} \quad (2)$$

2.3.3 การเชื่อมต่อแบบ Scott

$$d_v = \frac{S_L\,|2k-1|}{S_{sc}+S_L} \quad (3)$$

โดยที่ d_v คือ ค่าแรงดันไม่สมดุล
S_L คือ ค่าโหลดรถไฟฟ้าทั้งหมด
S_{sc} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ
k คือ ค่าอัตราส่วน S_{L1}/S_L

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่ทำให้แรงดันไม่สมดุลจะเกิดขึ้นมีค่ามากหรือมีค่าน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดโหลดของรถไฟฟ้า ขนาดของโหลดด้านซ้ายและโหลดด้านขวาของสถานีจ่ายไฟ และกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ เมื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของแต่ละรูปแบบจะเห็นว่าการเชื่อมต่อแบบ *Scott* จะทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลต่ำสุดโดยเฉพาะเมื่อโหลดด้านซ้ายและโหลดด้านขวาของสถานีจ่ายไฟฟ้าเท่ากัน จะได้แรงดันไม่สมดุลเท่ากับศูนย์ ส่วนการเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวจะทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลสูงสุดและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่า *k* ซึ่งค่าแรงดันไม่สมดุลของการเชื่อมต่อทั้งสามแบบสามารถคำนวณแล้วนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแรงดันไม่สมดุลจากการต่อแบบต่างๆ

3. การตรวจสอบอุปกรณ์เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

3.1 การตรวจสอบสายไฟ

การตรวจสอบสายไฟฟ้าในส่วนของตัวรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนควรทำการตรวจสอบจุดเชื่อมต่อทุกๆเส้นให้ขั้วมีความแน่นหนา และทำการดูสภาพของสายไฟฟ้าตรงบริเวณต่างๆของตัวรถว่ามีตรงช่วงไหนที่ฉนวนหุ้มสายมีการขาดหรือมีการชำรุดหรือไม่ เพราะหากมีจุดที่ชำรุดตรงๆก็อาจทำให้ขั้วสายไฟตรงนั้นเกิดความร้อนและสร้างความเสียหายได้

3.2 การตรวจสอบชุดฟิวส์ของตัวเก็บประจุ

ชุดฟิวส์ของตัวเก็บประจุจะมีการติดตั้งทั้งสองด้านของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับในด้านปฐมภูมินั้นจะมีการติดตั้งชุดฟิวส์เพื่อควบคุมค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ และสำหรับด้านทุติยภูมิจะมีการติดตั้งชุดฟิวส์สำหรับตัวเก็บประจุไว้เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในสายป้อน หรือตัววงจรย่อย ดังนั้นชุดตัวเก็บประจุนี้จึงมีความสำคัญต่อการรักษาค่าระดับพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในปริมาณที่มีระดับคงที่

4. สรุป

การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวจะทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลสูงสุดจากหลายรูปแบบ ดังนั้นการใช้งานเชื่อมต่อหม้อแปลงรูปแบบนี้ก็อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นมาได้จากระบบไฟฟ้าขัดข้อง จึงต้องหมั่นตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้งานให้มีความสมบูรณ์พร้อมใช้งานอยู่เสมอ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร บริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด และการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสนับสนุนข้อมูลในการทำบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Tsai-Hsiang Chen,Criteria to Estimate the Voltage Unbalance due to High Speed Railway demand IEEE Transactions on Power System, Vol.9, 1994, No.3
[2] รศ.ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้าและระบบขนส่งมวลชน, 2557
[3] EN 50122: Railway application - Fixed installations - Electrical safety, Earthing and the return circuit
[4] Suvarnabhumi Airport Rail Link, 2016. Available from: http://www.srtet.co.th [Accessed 22 Sep 2016].

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล
รหัสประจำตัวนักศึกษา	055970402509-2
วัน เดือน ปี ที่เกิด	19 พฤศจิกายน 2533
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเลกทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน)
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรภาคสนาม