

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล โดยใช้หม้อแปลงชนิดต่าง ๆ สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟ Comparative Study of Effectiveness in Unbalance Voltage Factor Reduction by Using Different Transformers for Railway Electrification System

ดลมนรกรณ์ สันติยานนท์ ศิวพล ศรีสนพันธุ์ และ คมสันต์ หงษ์สมบัติ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email: donmanat.santiyanon@gmail.com, fengspsr@ku.ac.th, fengksh@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบรถไฟที่ใช้ไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตสังคมในเมือง อุปกรณ์สำคัญในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ คือ หม้อแปลงไฟฟ้า ในอดีตหม้อแปลงหนึ่งเฟสนิยมใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟ อย่างไรก็ตามการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะสร้างปัญหาแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่ได้ดุลในโครงข่ายของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ การแก้ไขปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเหล่านี้สามารถทำได้โดยการใช้หม้อแปลงชนิดพิเศษ ได้แก่ หม้อแปลงสก๊อต (Scott Transformer) และหม้อแปลงเลอบลอง (Le-Blanc Transformer) สำหรับการจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟ บทความนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงชนิดพิเศษ สำหรับใช้ในโปรแกรม DlgSILENT PowerFactory โดยหม้อแปลงที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปทดสอบกับระบบการเดินรถไฟอย่างง่าย เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดค่าแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลที่ได้จากการใช้หม้อแปลงทั้งสามชนิด นอกจากนี้แบบจำลองหม้อแปลงชนิดพิเศษที่ถูกพัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้

คำสำคัญ:



หม้อแปลงสก๊อต หม้อแปลงเลอบลอง ระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟ คุณภาพกำลังไฟฟ้า



Abstract

Nowadays, railway system becomes a part of life in the urban city. The most important equipment for railway electrification system is a transformer. In the past, single-phase transformer was widely used to supply the electrical energy to the train. However, single-phase transformer is the cause of voltage and current unbalances in the power system network that the railway

electrification system is connected. In order to solve these issues, special transformers, i.e. Scott transformer and Le-Blanc transformer, have been proposed to be used in railway electrification systems. This paper focuses on developing the special transformer models using DigSILENT PowerFactory software. The developed models have been verified with a simple train system and the effectiveness of reduction of voltage unbalance factors by using each type of transformers are compared. In addition, the developed special transformer models can be applied in a large-scale power system network for power quality analysis.



Keyword:

Scott Transformer, Le-Blanc Transformer, railway electrification system, power quality

1. คำนำ

ในอดีตหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสนิยมใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟ ซึ่งระบบรถไฟกระแสสลับนั้นจะทำให้เกิดปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของรถไฟเข้ากับโครงข่ายของระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล (Voltage Unbalance Factor: VUF) และกระแสลำดับลบ (Negative Sequence Current) โดยสาเหตุเกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายรถไฟเป็นระบบหนึ่งเฟส เมื่อเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของรถไฟเข้ากับโครงข่ายของระบบไฟฟ้าที่เป็นสามเฟส จึงทำให้เกิดการดึงกำลังไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งมากเกินไป ปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมายได้ศึกษาหม้อแปลงพิเศษชนิดต่างๆ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งได้แก่ หม้อแปลงสก๊อต (Scott transformer) และหม้อแปลงเลอบลอง (Le-Blanc transformer) [1-5] อย่างไรก็ตามการศึกษาผลกระทบของระบบ

ไฟฟ้าสำหรับรถไฟต่อโครงข่ายของระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น DigSILENT PowerFactory ยังไม่เป็นที่แพร่หลายสาเหตุหนึ่งที่สำคัญก็คือ หม้อแปลงชนิดพิเศษเหล่านี้ไม่ได้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในโปรแกรมวิเคราะห์

บทความนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองของหม้อแปลงชนิดพิเศษ ซึ่งได้แก่ หม้อแปลงสก๊อต (Scott transformer) และหม้อแปลงเลอบลอง (Le-Blanc transformer) โดยใช้โปรแกรม DigSILENT PowerFactory โดยแบบจำลองหม้อแปลงชนิดพิเศษนี้ได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า ในการศึกษาได้ติดตั้งหม้อแปลงชนิดพิเศษเหล่านี้ในแต่ละสถานีไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟ ผลการศึกษาพบว่าค่าแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าไม่ได้ดุลระหว่างเฟสสูงสุด ($\text{Max}[|P_{ab}|, |P_{bc}|, |P_{ca}|]$) และประสิทธิภาพในการลดค่าแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลของหม้อแปลง

เลอบลองมีค่าสูงกว่าหม้อแปลงสก็อตและหม้อแปลงหนึ่งเฟส ตามลำดับ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปวิจัยต่อยอดเพื่อศึกษาผลกระทบของระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟต่อโครงข่ายไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้

2. ทฤษฎีและกระบวนการวิเคราะห์

2.1 การสร้างหม้อแปลง

บทความนี้จะใช้หม้อแปลง 3 ชนิดได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส หม้อแปลงสก็อต และหม้อแปลงเลอบลองในการวิเคราะห์ โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

k คือค่าคงที่

V_a คือแรงดันไฟฟ้าที่จุด a

V_b คือแรงดันไฟฟ้าที่จุด b

V_c คือแรงดันไฟฟ้าที่จุด c

V_{ab} คือค่าแรงดันระหว่างจุด a กับจุด b

V_{bc} คือค่าแรงดันระหว่างจุด b กับจุด c

V_{ca} คือค่าแรงดันระหว่างจุด c กับจุด a

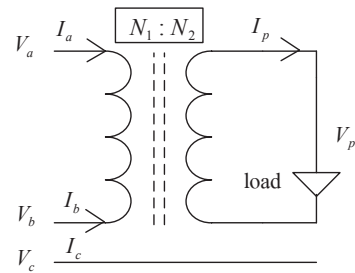
V_p คือแรงดันที่โหลด p

V_q คือแรงดันที่โหลด q

โดยกำหนดให้ค่าคงที่ $k = N_1 / N_2$

2.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส (Single-Phase Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสเป็นที่นิยมใช้ในระบบรถไฟฟ้า โดยจากภาพที่ 1 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [2]



ภาพที่ 1 การต่อของขดลวดหม้อแปลง 1 เฟส

$$V_{ab} = V_a - V_b = kV_p \quad (1)$$

$$I_a = I_p / k \quad (2)$$

2.1.2 หม้อแปลงสก็อต (Scott Transformer)

หม้อแปลงสก็อตสามารถแปลงจากไฟฟ้าสามเฟสเป็นไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองระบบได้ โดยหม้อแปลงสก็อตมีทฤษฎีการต่อของขดลวดดังภาพที่ 2 นำมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้ [2]

$$V_{ab} = V_a - V_b = \frac{k}{2}(\sqrt{3}V_p - V_q) \quad (3)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = kV_q \quad (4)$$

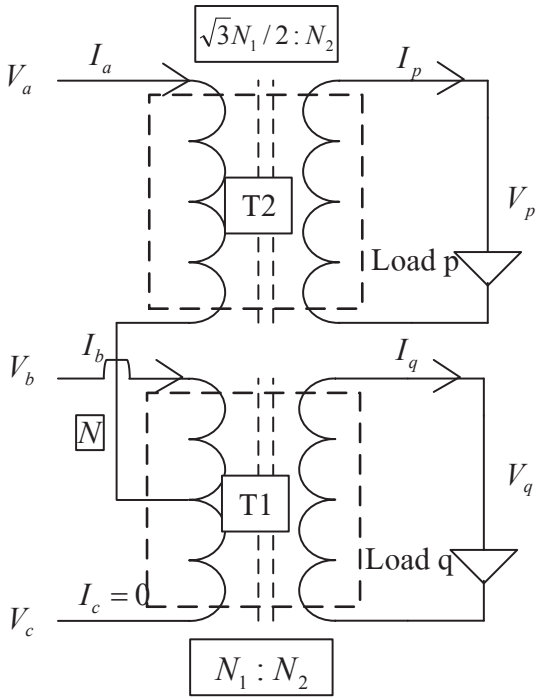
$$V_{ca} = V_c - V_a = -\frac{k}{2}(\sqrt{3}V_p + V_q) \quad (5)$$

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}k} I_T \quad (6)$$

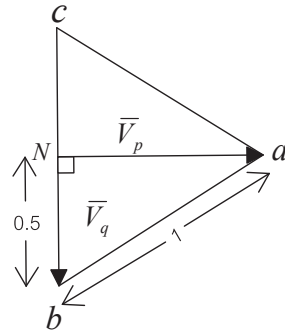
$$I_b = \left(I_q - \frac{1}{\sqrt{3}} I_p \right) / k \quad (7)$$

$$I_c = -\left(I_q + \frac{1}{\sqrt{3}} I_p \right) / k \quad (8)$$

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นการแทป (Tap) หม้อแปลงจากเฟส a มายังเฟส b ที่ 50% โดยที่ กำหนดสายนี้ให้เป็นสายนิวทรัล จากภาพที่ 3 พบว่า \bar{V}_q มีค่ามุมของเฟสเท่ากับ -90 องศา



ภาพที่ 2 การต่อขดลวดในหม้อแปลงสก็อต



ภาพที่ 3 เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดของ หม้อแปลงสก็อต

2.1.3 หม้อแปลงเลอบลอง (Le-Blanc Transformer)

หม้อแปลงเลอบลองสามารถเปลี่ยนการจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟสเป็นไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองระบบได้เหมือนกับหม้อแปลงสก็อต จากภาพที่ 4 สามารถนำมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสได้ดังนี้ [2]

$$V_{ab} = V_a - V_b = -k \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_p + \frac{3}{4} V_q \right) \quad (9)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = \frac{3}{2} k V_q \quad (10)$$

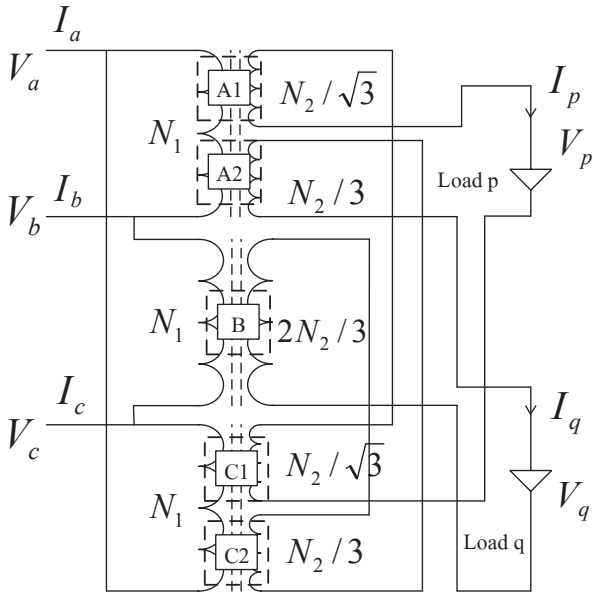
$$V_{ca} = V_c - V_a = k \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_p - \frac{3}{4} V_q \right) \quad (11)$$

$$I_a = -\frac{2}{\sqrt{3}k} I_T \quad (12)$$

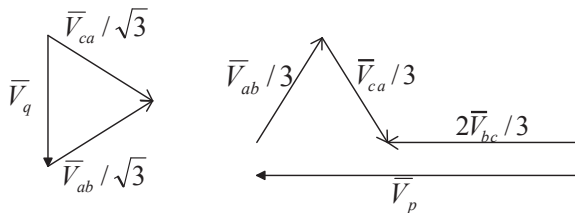
$$I_b = \left(I_q + \frac{1}{\sqrt{3}} I_p \right) / k \quad (13)$$

$$I_c = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_p - I_q \right) / k \quad (14)$$

จากภาพที่ 4 สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ได้ดังภาพที่ 5 ซึ่งพบว่า \bar{V}_q จะมีค่ามุมเฟสเท่ากับ -90 องศา และ \bar{V}_p มีค่ามุมเฟสเท่ากับ 180 องศา



ภาพที่ 4 การต่อของขดลวดในหม้อแปลงเลอบลอง



ภาพที่ 5 เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดของหม้อแปลงเลอบลอง

2.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

ในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก (Positive-Sequence Voltage)

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าลำดับลบ (Negative-Sequence Voltage)

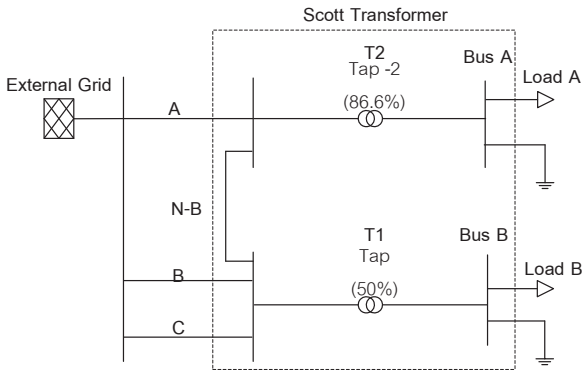
$$\%VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (15)$$

3. การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ในบทความนี้จะสร้างแบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory เพื่อทดสอบในการจ่ายเข้าระบบรถไฟไฟฟ้าต่อไปดังนี้

3.1. แบบจำลองหม้อแปลงสก็อต

จากภาพที่ 2 สามารถมองสี่เหลี่ยม T2 และ T1 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส และสามารถต่อวงจรได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 วงจรหม้อแปลงสก็อตในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

กำหนดให้หม้อแปลง T2 มีการแทปที่ 86.6% โดยคำนวณมาจากเวกเตอร์ในภาพที่ 3 ดังนี้

$$V_p = (\sqrt{1^2 - 0.5^2}) \times 100\% = 86.6\% \quad (16)$$

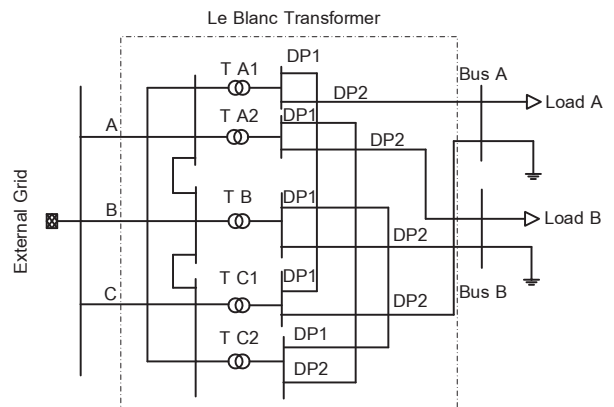
และหม้อแปลง T1 มีการแทปที่ 50%

3.2. แบบจำลองหม้อแปลงเลอบลอง

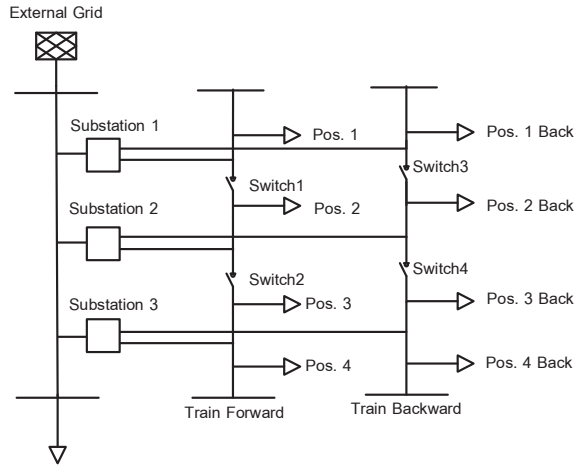
จากภาพที่ 4 ให้ A1, A2, B, C1, C2 ให้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส นำมาเขียนวงจรเป็นหม้อแปลงเลอบลองได้ตามภาพที่ 7 โหลด A จะมีค่ามุมเฟสที่ 180 องศา และโหลด B จะมีค่ามุมเฟสที่ -90 องศา ตามเวกเตอร์ในภาพที่ 5

4. ฟังการเดินรถและแบบจำลองรถไฟ

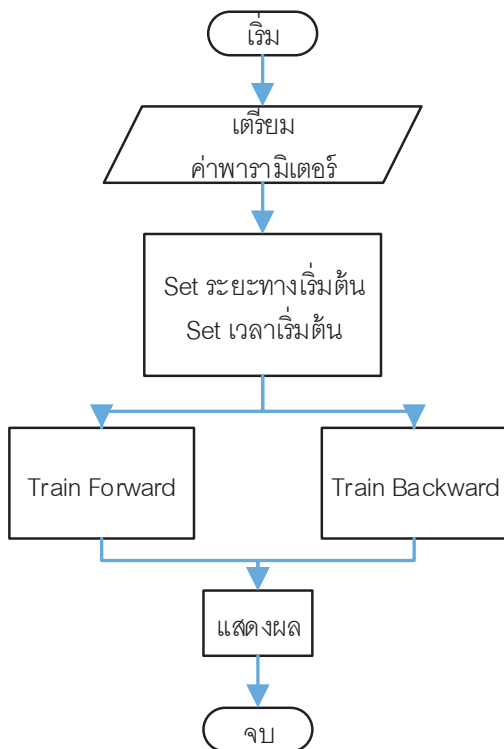
งานวิจัยนี้ได้จำลองรถไฟสองขบวนวิ่งสวนทางกันด้วยความเร็วคงที่ที่ แทนรถไฟด้วยโหลดขนาด 1 MW โดยมีระยะห่างระหว่างสถานีเท่ากับ 20 km เท่ากัน พิจารณาหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิดด้วยการติดตั้งในแต่ละสถานี ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงและแรงต่ำเป็น 20 kV และ 10 kV ตามลำดับ เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบแพคเกจเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดูแลสามารถจำลองระบบรถไฟได้ด้วย DPL สคริปต์โดยมีฟังการทำงานโปรแกรมตามภาพที่ 9



ภาพที่ 7 การต่อหม้อแปลงเลอบลองในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

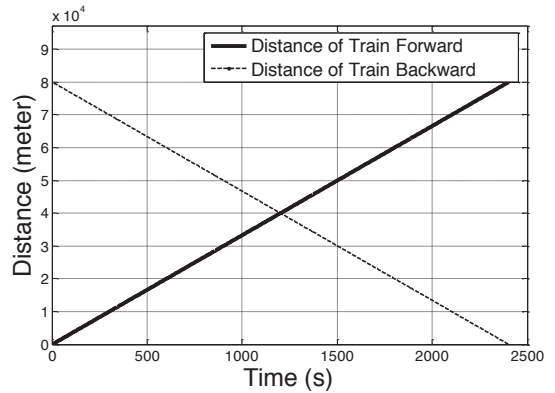


ภาพที่ 8 หม้อแปลงสวิตหรือเลอบลองติดตั้งในแต่ละสถานีไฟฟ้า



ภาพที่ 9 ผังการทำงานของ DPL สคริปต์เพื่อควบคุมการเดินทางรถไฟ

5. ผลการทดลอง

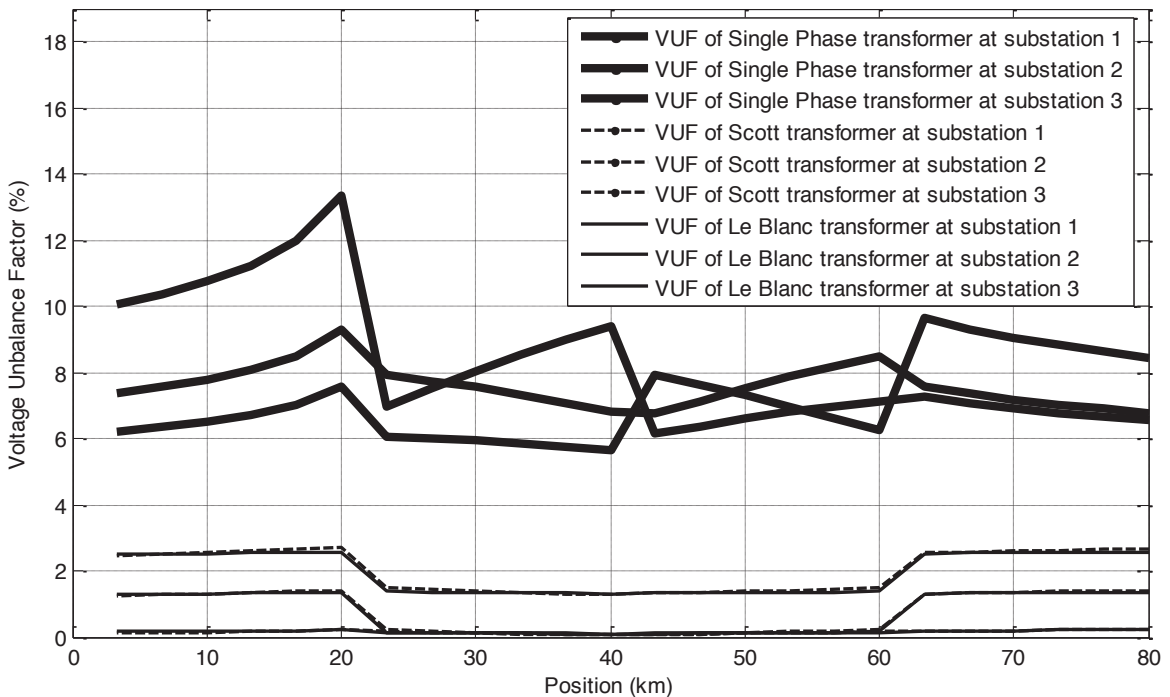


ภาพที่ 10 กราฟระยะทาง-เวลา ที่รถไฟเคลื่อนที่

ภาพที่ 10 แสดงกราฟระยะทางและเวลาที่รถไฟเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 120 km/hr ภาพที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในแต่ละสถานีไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นสามกรณีดังนี้คือ กรณี 1 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณี 2 หม้อแปลงสวิต และกรณี 3 หม้อแปลงเลอบลอง ซึ่งได้เปรียบเทียบค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลไว้ในตารางที่ 1 และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และค่ากำลังไฟฟ้าไม่สมดุลระหว่างเฟสสูงสุด ($\text{Max}[|P_{ab}|, |P_{bc}|, |P_{ca}|]$) ในแต่ละสถานีไฟฟ้างานที่ 12 ภาพที่ 13 และภาพที่ 14 จากภาพที่ 13-15 ให้ภาพ (ก) และภาพ(ข) แสดงค่ากำลังไฟฟ้าไม่สมดุลระหว่างเฟสสูงสุด และค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลตามลำดับ จากการวิเคราะห์ผลเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าไม่สมดุลระหว่างเฟสสูงสุดของแต่ละชนิดหม้อแปลงมาหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Factor) ในแต่ละสถานีไฟฟ้า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส หม้อแปลงสก๊อต และ หม้อแปลงเลอบลองมีค่าสัมพันธ์เฉลี่ยเท่ากับ 99.98% , 99.70% และ 99.94 % ตามลำดับ

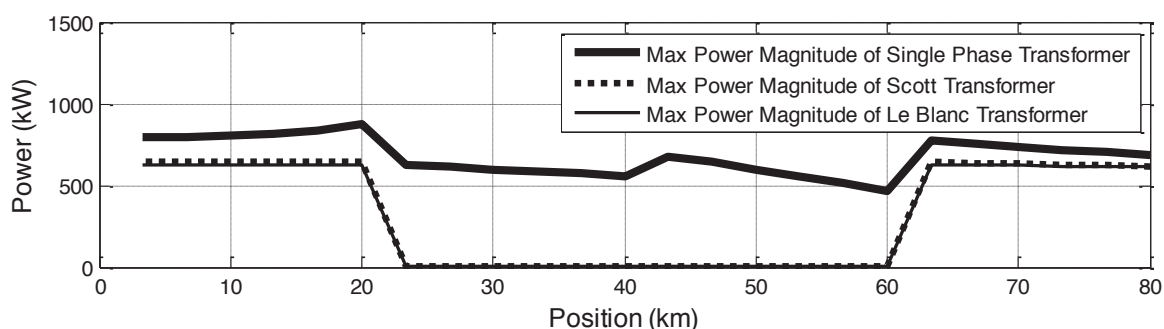
จากตารางที่ 2 พบว่าหม้อแปลงเลอบลองมีประสิทธิภาพในการลดแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดูล ได้ดีกว่าหม้อแปลงสก๊อตและหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ตามลำดับ สาเหตุเพราะทั้งหม้อแปลงสก๊อต และหม้อแปลงเลอบลองสามารถใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสได้อย่างสมดุลกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส



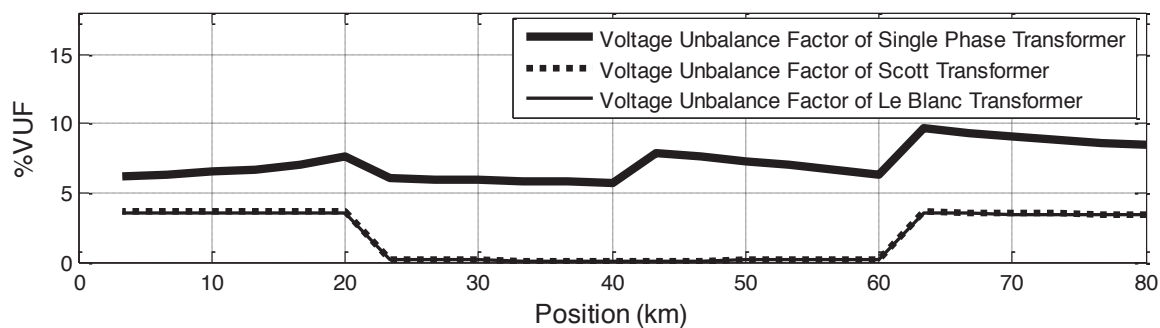
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบผลของแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลในแต่ละสถานีไฟฟ้าจากหม้อแปลงชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเพื่อเปรียบเทียบในแต่ละสถานีของหม้อแปลงทั้งสามชนิด

ชนิดหม้อแปลง	สถานีไฟฟ้า 1			สถานีไฟฟ้า 2			สถานีไฟฟ้า 3		
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg
Single-Phase	13.37	7.58	10.48	9.40	5.66	7.53	8.48	6.26	7.37
Scott	2.70	1.42	2.06	1.27	0.51	0.89	1.47	0.17	0.82
Le-Blanc	2.57	0.21	1.39	1.31	0.09	0.7	1.38	0.13	0.76

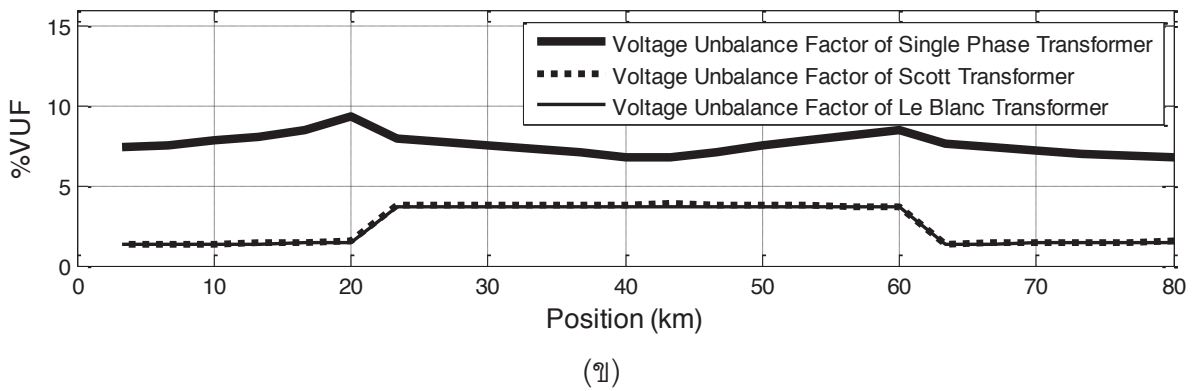
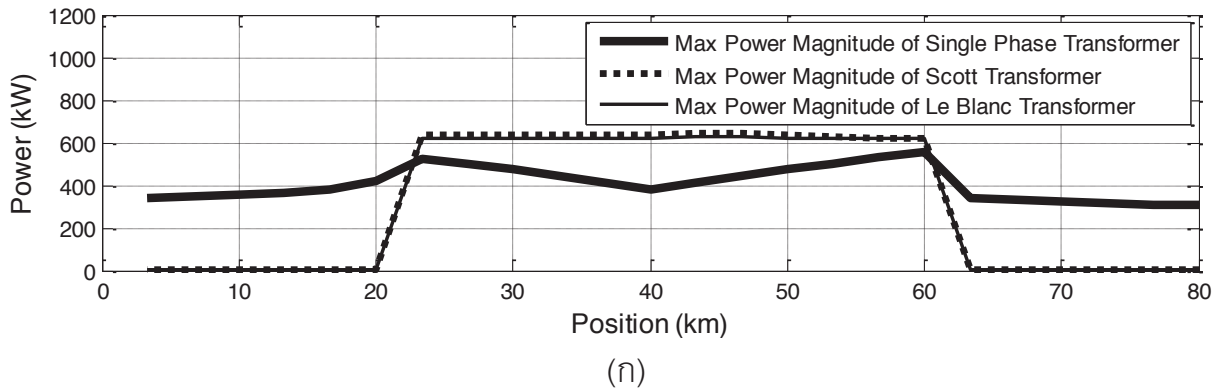


(ก)

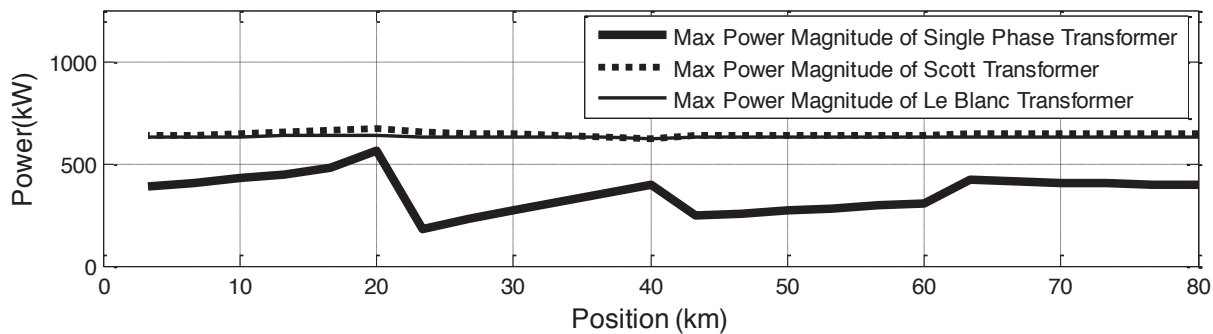


(ข)

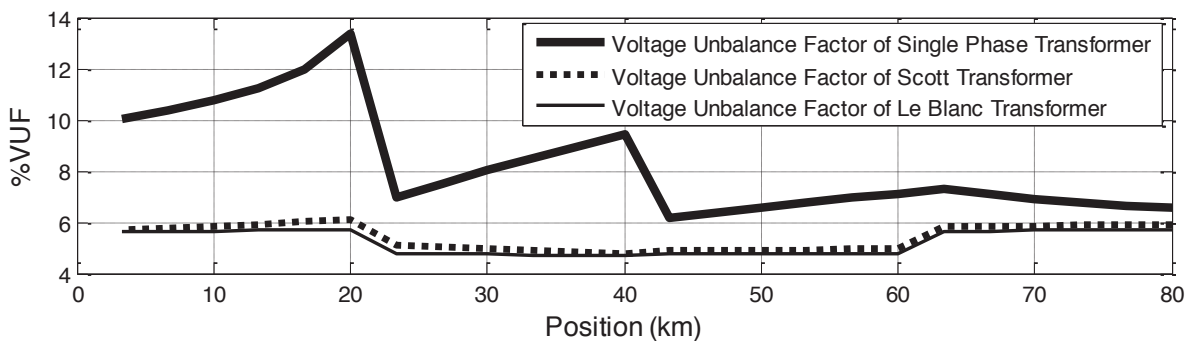
ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของสถานีไฟฟ้าที่ 1



ภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแฟกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลของสถานีไฟฟ้าที่ 2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของสถานีไฟฟ้าที่ 3

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองค่าสัมพัทธ์ที่ได้ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าไม่ได้ดุลระหว่างเฟสสูงสุดกับค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล พบว่าค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าไม่ได้ดุลระหว่างเฟสสูงสุด ประสิทธิภาพในการลดค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลของหม้อแปลงเลอบลองมีค่าสูงกว่าหม้อแปลงสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ตามลำดับ ข้อสรุปนี้ทำให้สามารถคาดการณ์ค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลได้จากการสังเกตค่ากำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างเฟสสูงสุด นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาค่าแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล โดยสามารถทำได้ด้วยการใช้หม้อแปลงสก็อตหรือหม้อแปลงเลอบลองในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟ หรือมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสให้สมดุลด้วยอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hsu C., Huang H.M., Cheng T.J. and Tsai L.J.. 2013. "Impact of Light Rail Transit Tram on the Voltage and Unbalance of Distribution System", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013
- [2] 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 Transformers", *Journal of Electromagnetic Analysis and Application*, 2(11): 618-626.
- [3] Pillay P. and Manyage P.. 2001. "Definitions of Voltage Unbalance", *IEEE Power Engineering Review*.
- [4] Chan Y.H. and Wu C.J.. 2010. "Power quality assessment of specially connected transformers", *Proceedings of the 9th WSEAS international conference on Instrumentation, measurement, circuits and systems*, pp. 157-161.
- [5] Ching-Yin L. 1999. "Effects on Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 2.