

การศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงอัตโนมัติในระบบรถไฟ A Study of Voltage Regulation of Auto Transformer in Railway Electrification System

วีรภัทร ปัญญาทอม¹ ศิวพล ศรีสมพันธ์¹ คมสันต์ หงษ์สมบัติ¹ และ ตฤณภพ บุญเสียง²

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี¹

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี²

Email : weeraphat_eng@live.com¹, fengspsr@ku.ac.th¹, fengksh@ku.ac.th¹ and trin.bsb@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าโดยการนำหม้อแปลงอัตโนมัติเข้ามาเชื่อมต่อเพิ่มแบบขนานในแบบจำลองระบบรถไฟ เพื่อที่จะช่วยลดปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในสายส่งอันเนื่องมาจากสถานีจ่ายไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกล แบบจำลองระบบรถไฟจำลองในโปรแกรม DlgSILENT PowerFactory ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างระบบที่มีการเชื่อมต่อและไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ โดยมุ่งเน้นศึกษาปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก และปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล บทความนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ามาเชื่อมต่อกับระบบรถไฟเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองระบบรถไฟไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพในระบบรถไฟจริงได้ในอนาคต

คำสำคัญ :

แบบจำลองระบบรถไฟ หม้อแปลงอัตโนมัติ แรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

Abstract

This paper presents a study of voltage regulation. In modeling of railway electrification system, auto transformers are connected in parallel to reduce voltage quality problem in feeders due to remote substation. In this work, modeling of railway electrification system is simulated on DlgSILENT PowerFactory program. The results show the difference between ones with and without connected auto transformer for voltage drop and voltage unbalance aspects. This paper provides guidelines of transformer's connection for railway system to solve the voltage quality. Furthermore, the developed modeling of railway electrification system can be applied on studies of stability problems on railway electrification system in future.

Keywords :

modeling of railway electrification system, auto transformer, voltage drop, voltage unbalance

1. บทนำ

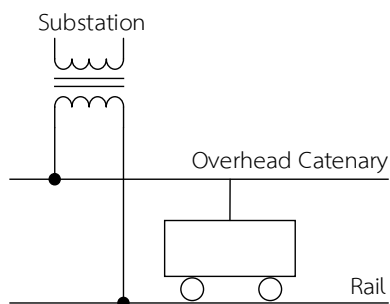
ด้วยสภาพการจราจรที่หนาแน่นและปริมาณรถที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งเกิดจากการขยายตัวของเมืองและประชากรอย่างรวดเร็ว การขนส่งโดยระบบรถไฟฟ้าจึงเป็นรูปแบบการขนส่งที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นการขนส่งที่มีความรวดเร็วในการเดินทาง สะดวกสบาย มีความปลอดภัย ประหยัดพลังงาน และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าให้มีความทันสมัยและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในอดีต เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ผู้ใช้บริการและรองรับระบบการขนส่งมวลชนในอนาคต ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบรถไฟฟ้า คือ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ให้เป็น 1 เฟส หรือ 2 เฟส [1] โดยส่วนมากระบบรถไฟฟ้าจะมีระยะทางการให้บริการที่มีความยาวหลายกิโลเมตรจึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกในสายส่ง เนื่องจากระยะทางที่ห่างไกลระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้ากับรถไฟฟ้า เช่นเดียวกับปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลซึ่งเกิดจากความต่างเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาวิเคราะห์คุณภาพระบบไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้ามีการทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เมื่อระบบทุกอย่างสมบูรณ์ ทำให้ระบบรถไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพมากที่สุด

บทความนี้มุ่งเน้นศึกษาปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้า โดยจำลองระบบรถไฟฟ้าในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

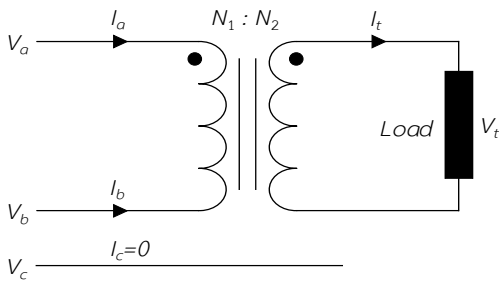
2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการจ่ายไฟฟ้ามาตรฐานไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้า [2, 3]

การจ่ายไฟฟ้าให้ระบบรถไฟฟ้าที่นิยมใช้กันมาก ดังภาพที่ 1 กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงจากโรงไฟฟ้าส่งจ่ายมาตามสายส่งแรงดันสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาด 69 กิโลโวลต์ หรือ 115 กิโลโวลต์ ผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้า (Substation) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาด 25 กิโลโวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ กระแสสลับ โดยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ดังภาพที่ 2 แรงดันและกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ รถไฟฟ้าจะรับไฟจากสายส่งเหนือหัว (Overhead Catenary) ไปยังอุปกรณ์ควบคุมบนตัวรถ เพื่อสั่งการให้มอเตอร์ทำหน้าที่ขับเคลื่อนขบวนรถ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์จะไหลจากล้อลงสู่ราง (Rail) เพื่อให้ระบบครบวงจร ระบบการจ่ายไฟรถไฟฟ้ากระแสสลับนี้ มีข้อดี คือ การติดตั้งสถานีจ่ายไฟฟ้าที่น้อยกว่าระบบการจ่ายไฟรถไฟฟ้ากระแสตรง จึงเหมาะสำหรับระบบรถไฟฟ้าที่มีระยะทางไกล อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อเสีย คือ เมื่อสายส่งที่มีระยะทางไกลมากๆ จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง



ภาพที่ 1 ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า



ภาพที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

$$V_{ab} = V_a - V_b = (N_1 / N_2)V_t \quad (1)$$

โดยที่ V_a คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส a (โวลต์)

V_b คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส b (โวลต์)

V_t คือ แรงดันไฟฟ้าโหลด (โวลต์)

$$I_a = I_t / (N_1 / N_2) \quad (2)$$

โดยที่ I_a คือ กระแสไฟฟ้าเฟส a (แอมแปร์)

I_t คือ กระแสไฟฟ้าโหลด (แอมแปร์)

2.2 คุณภาพแรงดันไฟฟ้า

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตเพื่ออำนวยความสะดวกในหลากหลายด้านของมนุษย์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบสำคัญส่วนหนึ่งในระบบไฟฟ้าที่ต้องมีการคำนึงถึงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าเนื่องจาก มีความสำคัญต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้าที่ดีจะต้องเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด เพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนหนึ่งของปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าคือ ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก ซึ่งมีสาเหตุมาจากระยะทางที่ห่างไกลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต้นทางและจากอิมพีแดนซ์ในสายส่ง อีกหนึ่งปัญหาที่สำคัญ คือ ปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งมีสาเหตุมาจากการต่อโหลด

ที่มีเฟสไม่เท่ากัน หรือแตกต่างจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ทำให้ความแตกต่างระหว่างมุมเฟสไม่เท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า [4] ปัญหาทั้งสองนี้สามารถแก้ไขได้โดยการนำหม้อแปลงชนิดพิเศษเข้ามาเชื่อมต่อเพิ่มในระบบไฟฟ้า

ระบบรถไฟเป็นระบบที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่รถไฟเพียงเฟสเดียว แต่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มี 3 เฟส และมีสถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทางที่อยู่ห่างไกล ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้เกิดปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าปัญหาที่นำมาพิจารณาประกอบด้วยปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก และปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$VD = 2IL(R\cos\theta + X\sin\theta) \quad (3)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

L คือ ความยาวของสาย (เมตร)

R คือ ความต้านทานของสาย (โอห์ม/เมตร)

X คือ รีแอกแตนซ์ของสาย (โอห์ม/เมตร)

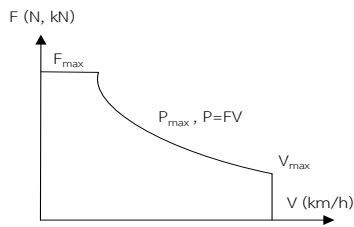
θ คือ มุมกำลัง (องศา)

$$\%VUF = \frac{V_n}{V_p} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ V_n คือ แรงดันลำดับลบ (โวลต์)

V_p คือ แรงดันลำดับบวก (โวลต์)

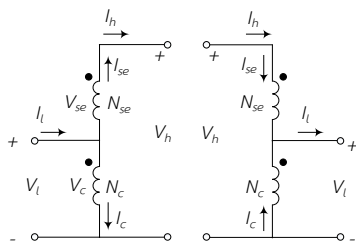
การใช้กำลังไฟฟ้าของขบวนรถไฟจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความเร่งในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งมีคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงจุด (Traction Effort Characteristics Curve) ดังภาพที่ 3 [5]



ภาพที่ 3 คุณลักษณะของเส้นโค้งแรงฉุด

2.3 หม้อแปลงออโต้ (Auto Transformer)

หม้อแปลงออโต้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่สำคัญชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาติดตั้งในระบบไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้า โครงสร้างประกอบด้วยขดลวดเพียงชุดเดียว แต่สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ดังภาพที่ 4 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้ากับอัตราส่วนขดลวด ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ [6] ในระบบรถไฟไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้ขนานเพิ่มเข้าไปในระบบ ส่วนใหญ่จะใช้หม้อแปลงออโต้ที่มีค่าพิกัดแรงดัน 50 กิโลโวลต์ มีอัตราส่วนการผันขดลวดของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ 1 : 1 ซึ่งก็คือแรงดันระหว่างสายส่งเหนือหัวต่อรางรถไฟ และแรงดันระหว่างรางรถไฟต่อสายป้อนจะมีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปนิยมนำหม้อแปลงออโต้มาเชื่อมต่อขนานในทุกๆ ระยะทาง 10-30 กิโลเมตรกับระบบที่มีสถานีจ่ายไฟฟ้าที่ห่างไกลกัน [7] เนื่องจากหม้อแปลงออโต้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในสายส่งที่มีระยะไกลได้



ภาพที่ 4 หม้อแปลงออโต้ชนิดแปลงแรงดันขึ้นและแปลงแรงดันลง

$$V_t / V_h = N_c / (N_{se} + N_c) \quad (5)$$

โดยที่ V_t คือ แรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ (โวลต์)

V_h คือ แรงดันไฟฟ้าแรงสูง (โวลต์)

N_c คือ ขดลวดคอมมอน (รอบ)

N_{se} คือ ขดลวดอนุกรม (รอบ)

$$I_l / I_h = (N_{se} + N_c) / N_c \quad (6)$$

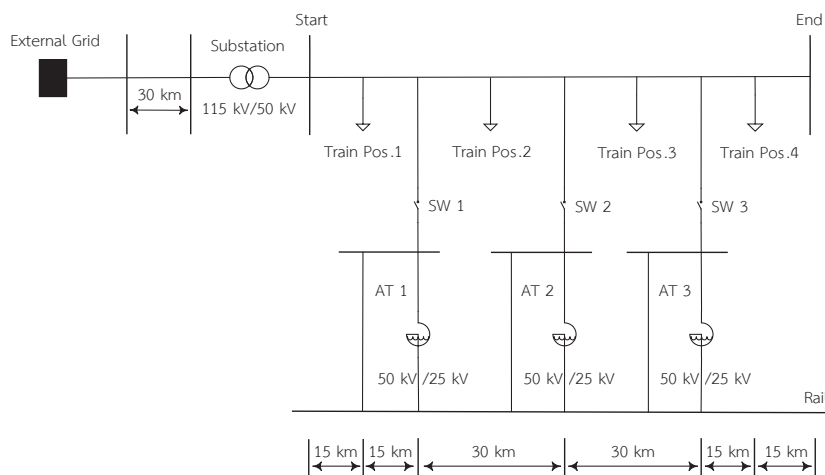
โดยที่ I_l คือ กระแสไฟฟ้าแรงต่ำ (แอมแปร์)

I_h คือ กระแสไฟฟ้าแรงสูง (แอมแปร์)

3. แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้า

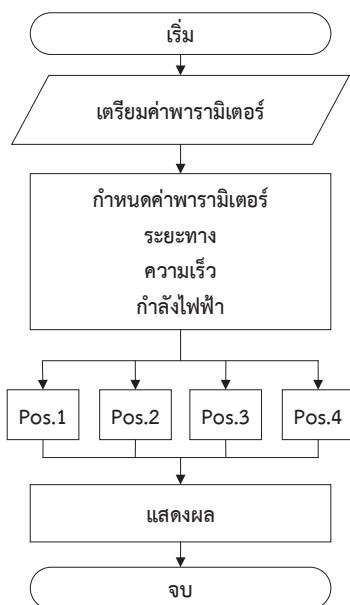
แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้าที่แสดงดังภาพที่ 5 [8] ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกกระแสสลับ 3 เฟส (External Grid) หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส (Single Phase Transformer) ทำหน้าที่เป็นสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation) หม้อแปลงออโต้ (Auto Transformer) และโหลด (Load) ซึ่งใช้แทนขบวนรถไฟไฟฟ้า โดยจำลองในโปรแกรม DigSILENT Power Factory และกำหนดรูปแบบการทำงานโดยอัตโนมัติใน DigSILENT Programming Language (DPL) [9]

การทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้า มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกกระแสสลับ 3 เฟส จ่ายไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยจะมีการเลือกรับไฟฟ้าเพียง 2 เฟส เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงออโต้ที่เชื่อมต่อขนานอยู่กับรางรถไฟ จากนั้นโหลดซึ่งเป็นโหลดชนิดกระแสสลับ 1 เฟส จะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟไฟฟ้า โดยจำลองโหลดทั้งหมดเป็นโหลดที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเคลื่อนที่เสมือนกับขบวนรถไฟไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปตามรางในระยะเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 5 แบบจำลองระบบรถไฟ

DlgSILENT Programming Language (DPL) เป็นฟังก์ชันในโปรแกรม DlgSILENT Power Factory ที่สามารถเขียนโปรแกรมกำหนดการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟให้มีความทำงานโดยอัตโนมัติ ดังภาพที่ 6 โดยสั่งการให้รถไฟไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ในระยะทางที่กำหนด และแสดงผลการคำนวณได้ตามต้องการ



ภาพที่ 6 แผนภาพการทำงานของ DPL

บทความนี้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี ดังนี้
กรณีที่ 1 แบบจำลองระบบรถไฟกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

กรณีที่ 2 แบบจำลองระบบรถไฟกรณีที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ โดยเชื่อมต่อในทุกๆ ระยะทาง 30 กิโลเมตร

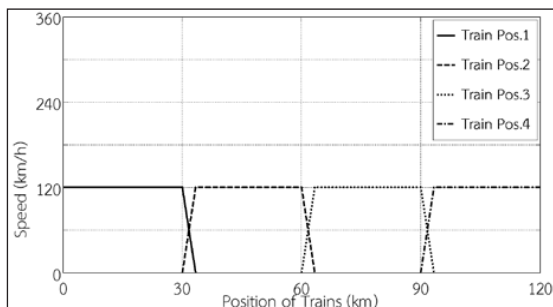
ทั้ง 2 กรณีศึกษาจะพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเพื่อคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตกและค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในแบบจำลองระบบรถไฟ โดยมีค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
External Grid	40 เมกะโวลต์ แอมป์
Single Phase Transformer	115/50 กิโลโวลต์
Auto Transformer	50/25 กิโลโวลต์
Load	5 เมกะวัตต์
Line Resistance and Reactance	0.153, 0.11 โอห์ม/กิโลเมตร

4. ผลการศึกษา

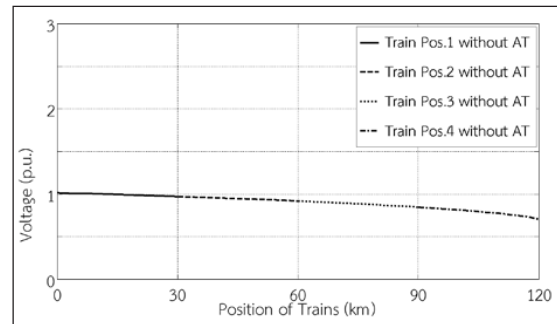
จากการจำลองระบบรถไฟไฟฟ้าในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory และกำหนดให้มีการทำงานโดยอัตโนมัติใน DigSILENT Programming Language (DPL) เพื่อสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้า ผลการศึกษาได้แสดงดังนี้



ภาพที่ 7 ความเร็วที่ใช้ของรถไฟ

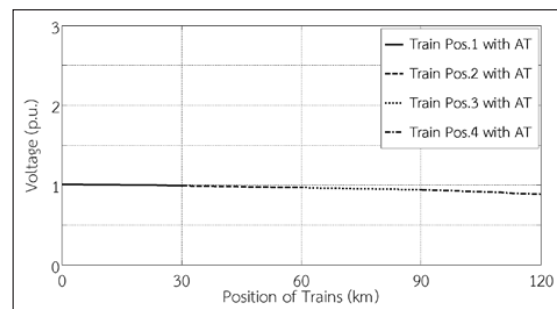
การใช้ความเร็วของรถไฟดังภาพที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟในทั้ง 2 กรณีศึกษา คือ เมื่อไม่มีการเชื่อมต่อ และมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ โดยขบวนรถไฟเริ่มต้นเคลื่อนที่จากบัส B ไปยังบัส C ดังภาพที่ 5 ใช้ระยะทางทั้งหมด 120 กิโลเมตร ด้วยความเร็วสูงสุด 120 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยแบ่งการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟเป็น 4 ช่วง จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่า ทุกๆ ระยะทาง 30 กิโลเมตร ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลด กำลังไฟฟ้าจากโหลดที่ใช้แทนขบวนรถไฟในช่วง 30 กิโลเมตรแรกจะเริ่มลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดในตำแหน่งถัดไปเริ่มทำงาน

โดยที่โหลดทั้ง 4 ช่วงจะมีการใช้โหลดที่เท่ากัน คือ 5 เมกะวัตต์ การทำงานจะสิ้นสุดเมื่อครบระยะทาง 120 กิโลเมตร ตามที่กำหนด



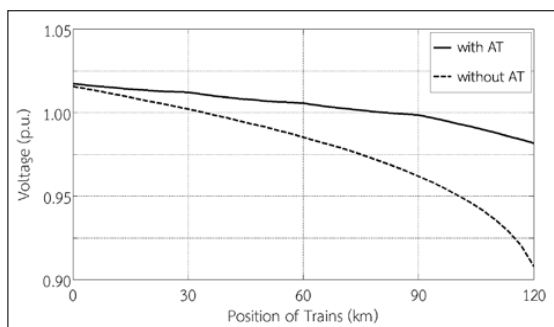
ภาพที่ 8 แรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟ
กรณีไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

แรงดันไฟฟ้าของโหลด ดังภาพที่ 8 แสดงให้เห็นถึงการทำงานของโหลดในแต่ละช่วงตามที่กล่าวมา จากภาพที่ 7 เมื่อไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลงในตลอดระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ต้นทางเพียงจุดเดียวจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกที่ปลายทาง



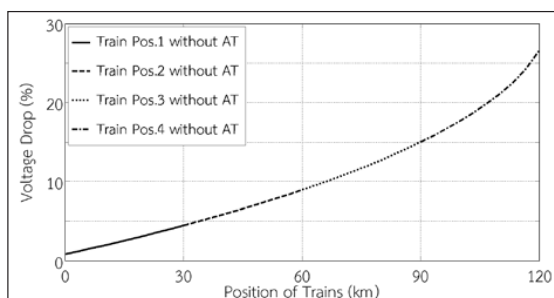
ภาพที่ 9 แรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟ
กรณีมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

เมื่อมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติเพิ่มเข้าไป ในแบบจำลองระบบรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของโหลด ดังภาพที่ 9 จะมีแนวโน้มที่ลดลงในจุดที่มีการใช้โหลด และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงระยะทาง 30, 60 และ 90 กิโลเมตร ซึ่งเป็นจุดที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางมีค่ามากขึ้น



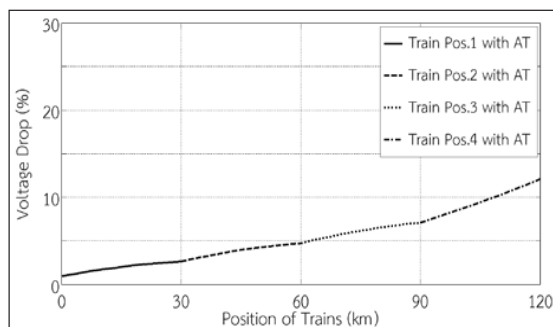
ภาพที่ 10 แรงดันไฟฟ้ารวมของระบบรถไฟฟ้า กรณีไม่มีการเชื่อมต่อและเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

แรงดันไฟฟ้ารวมต้นทางที่บัส B ดังภาพที่ 10 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ ดังภาพที่ 8 แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆ จากต้นทางถึงปลายทาง และเมื่อมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติในตำแหน่งที่กล่าวมา จากภาพที่ 9 แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางมีค่ามากขึ้น



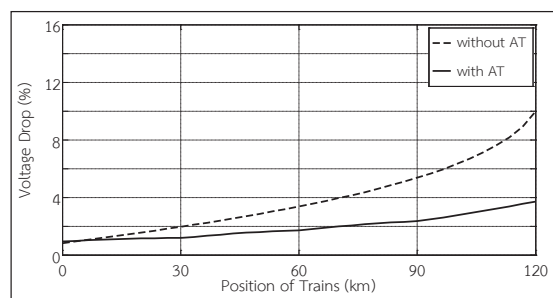
ภาพที่ 11 แรงดันไฟฟ้าตกของระบบรถไฟฟ้า กรณีไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

แรงดันไฟฟ้าตก ดังภาพที่ 11 แสดงให้เห็นถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าตกที่เพิ่มขึ้นในตลอดระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่เกินมาตรฐานซึ่งปกติค่ามาตรฐานของแรงดันไฟฟ้าตกในสายส่งจะมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ [10]



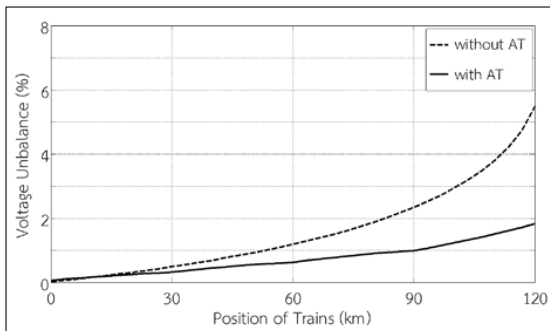
ภาพที่ 12 แรงดันไฟฟ้าตกของระบบรถไฟฟ้า กรณีมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

เมื่อมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติเพิ่มเข้าไป ในแบบจำลองระบบรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตก ดังภาพที่ 12 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง โดยจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าตกมีค่าลดลงในตำแหน่งที่มีการติดตั้งหม้อแปลงอัตโนมัติตามที่กล่าวมา จากภาพที่ 9 ในตลอดระยะทางที่ขบวนรถไฟเคลื่อนที่ และมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน



ภาพที่ 13 แรงดันไฟฟ้าตกของระบบรถไฟฟ้า กรณีไม่มีการเชื่อมต่อและเชื่อมต่อหม้อแปลงอัตโนมัติ

จากภาพที่ 11 และภาพที่ 12 แรงดันไฟฟ้าตก รวมของทั้งระบบรถไฟสามารถแสดงได้ดังภาพ ที่ 13 เมื่อไม่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้แรงดัน ไฟฟ้าตกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในตลอดระยะทางที่ รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ และมีแนวโน้มลดลงในตำแหน่งที่ มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้



ภาพที่ 14 แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของระบบรถไฟฟากรณีไม่มีการเชื่อมต่อและเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่บัส A ดังภาพที่ 14 แสดงให้เห็นถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ในกรณีที่ไม่มี การเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้ เนื่องจาก แหล่งจ่ายไฟฟ้าต้นทางมีการจ่ายไฟฟ้าให้ระบบรถไฟฟา 3 เฟส แต่หม้อแปลงออโต้มีการเลือกรับไฟฟ้า 2 เฟส โดยมีค่าที่เกินมาตรฐาน ซึ่งปกติจะมีค่าไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ [11] และในกรณีที่มีการเชื่อมต่อ หม้อแปลงออโต้ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีค่าเปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง ส่งผลทำให้ระบบรถไฟฟาโดยรวมมีค่าเปอร์เซ็นต์ ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเป็นไปตามมาตรฐาน

5. วิจารณ์ผลการศึกษา

ในระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟามี แหล่งจ่ายไฟฟ้าต้นทางที่ห่างไกล และมีการเลือกใช้ เฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากผลการ ศึกษาในทุกกรณีศึกษาพบว่า การกำหนดโหลดซึ่งใช้ แทนขบวนรถไฟฟาให้มีการเคลื่อนที่จากต้นทางถึง ปลายทาง แรงดันไฟฟ้ามีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ในตลอดระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปัจจัย หลายอย่าง เช่น ความต่างเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับ หม้อแปลงไฟฟ้า ความต้านทานในสายส่ง ดังที่กล่าว มาข้างต้น เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการนำหม้อแปลงออโต้เข้ามาเชื่อมต่อเพิ่ม เมื่อ เชื่อมต่อแล้วพบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าในทุกจุดที่มีการ เชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้มีค่าเพิ่มขึ้น และยังคงรักษา ระดับให้ลดลงอย่างน้อยที่สุดเพื่อให้มีค่าที่มากที่สุด ในตำแหน่งสิ้นสุดระยะทางที่กำหนด ถึงแม้ว่าจะไม่มี การเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้ แต่แรงดันไฟฟ้าก็มีค่าที่ ไม่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเนื่องจากการชดเชยแรงดัน ไฟฟ้าของหม้อแปลงออโต้ ส่งผลให้ระดับแรงดัน ไฟฟ้าโดยรวมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

บทความนี้ได้นำเสนอการเชื่อมต่อหม้อแปลง ออโต้เพียงชนิดเดียว แต่อย่างไรก็ตามระบบรถไฟฟา ในประเทศไทยยังไม่มี การเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้ เนื่องจากระบบรถไฟฟาที่ให้บริการมีระยะทางที่ไม่ ไกลมาก และยังมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปตาม

มาตรฐาน ทั้งนี้สามารถนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างระบบรถไฟในอนาคต โดยเพิ่มเติม หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติช่วยลดแรงดันไฟฟ้าตก และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในสายส่งได้ เช่น หม้อแปลงบูสเตอร์ เป็นต้น

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า โดยการนำหม้อแปลงออโต้เข้ามาเชื่อมต่อเพิ่มแบบขนานในแบบจำลองระบบรถไฟ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าระดับแรงดันไฟฟ้า ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองระบบรถไฟที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงออโต้มีประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของหม้อแปลงออโต้ ที่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าตก และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ไม่เกินมาตรฐาน อย่างไรก็ตามการติดตั้งหม้อแปลงออโต้ต้องใช้การลงทุนสูง ดังนั้นการศึกษาและวิจัยในอนาคตควรจะศึกษาเพิ่มเติมถึงความเหมาะสมในตำแหน่งที่มีการติดตั้งเพื่อให้ได้ระบบไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพของค่าระดับแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] ดลมนรรัตน์ สันติยานนท์ ศิวพล ศรีสนพันธุ์ และ คมสันต์ หงษ์สมบัติ (2560). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดแพกเตอร์แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุลโดยใช้หม้อแปลงชนิดต่างๆ สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟ. วิศวกรรมสาร มก., ปีที่ 30, ฉบับที่ 101 : 69-80.
- [2] Kulworawanichpong T. (2003). Optimising AC Electric Railway Power Flows with Power Electronic Control. PhD Thesis, Department of Electronic, Electrical and Computer Engineering, University of Birmingham, UK.
- [3] Kalantari M, Sadeghi MJ, Fazel SS, and Farshad S (2010). Investigation of Power Factor Behavior in AC Railway System Based on Special Traction Transformers. J. Electromagnetic Analysis & Applications, 2 : 618-626.
- [4] Firat G, Yang G, Al-Ali. H.A.H. (2015). A Comparative Study of Different Transformer Connections for Railway Power Supply-Mitigation of Voltage Unbalance. In: Proceedings of APSCOM 2015, IEEE.

- [5] Boonseng T. (2015). Modeling and Simulation of Railway Electrification System for Studying on Voltage Unbalance Using DIgSILENT PowerFactory. Thesis Master of Engineering, Department of Electrical Engineering, Kasetsart University, Thailand.
- [6] Chafin B. (2014). Energy Conversion One (Course 25741) Chapter Two Transformers continued. In: SlidePlayer. Available via DIALOG. <http://slideplayer.com/slide/1457922>
- [7] Hill RJ. and Cevik IH. (1993). On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 3, August 1993.
- [8] Shahnian F. and Esmailzadeh R. (2005). Voltage Unbalance Problems and Solution for Electrified Railway Systems. East Azarbayjan Electric Power Distribution Company, Tabriz, Iran.
- [9] DIgSILENT PowerFactory 15 (2014). User Manual. Gomaringen, Germany.
- [10] Conductors-Minimum Ampacity and Size (2014). NEC Standard 210.19(A).
- [11] Susceptibility to unbalanced supply voltage (1991). IEC Standard 146.