บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

การป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน: กรณีเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแบบสก๊อต

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

ศรัณย์ ลัคณาพาชื่นกุล สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร e-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการตรวจสอบสายไฟต่างๆในตัวรถไฟฟ้า การตรวจสอบตัวเก็บประจุของชุดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและชุดฟิวส์ของมันให้อยู่ในสภาพดีเสมอ เนื่องจากถ้าอุปกรณ์เหล่านี้ชำรุด จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุล และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขั้วลบขึ้นที่ตัวมอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นเรื่อยๆกับตัวมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ ผลจากการป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ได้แสดงไว้ในตอนท้ายของบทความด้วย

คำสำคัญ: แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, การเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบสก๊อต

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 of primary transformer 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, electric mass rapid transit train, Scott-Connection

1. บทนำ

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

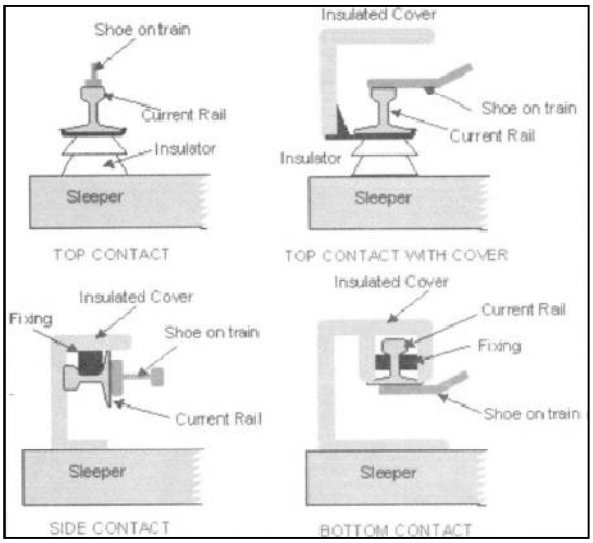
การศึกษาวิจัยด้านแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้จะช่วยให้เกิดการพัฒนาและหาแนวทางป้องกันสำหรับตัวโครงการรถไฟฟ้าเพื่อลดการเกิดผลกระทบกับผู้ใช้บริการกรณีเกิดปัญหาขึ้นซึ่งมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่เสถียรและตัวรถไฟฟ้าต้องหยุดให้บริการชั่วคราว ส่งผลให้ผู้ใช้บริการไม่ได้รับความสะดวกสบาย และอาจทำให้ความน่าเชื่อถือเกี่ยวกับประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าลดลง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

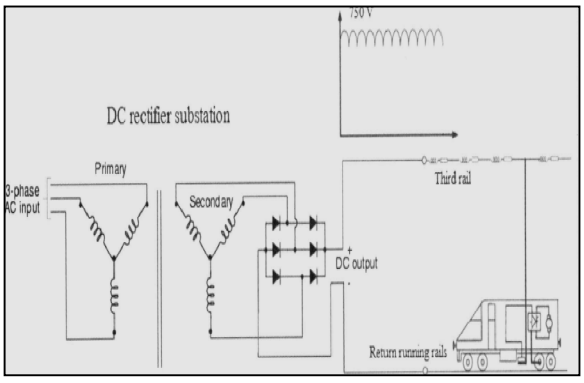
ในปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าที่มีการก่อสร้างขึ้น จะใช้ระบบกระแสไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภทหลัก ดังนี้

- ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 750 VDC โดยไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนทางราง (Traction Substation) ที่มีการติดตั้งเป็นระยะๆตามตัวสถานีบนแนววิ่งรถไฟฟ้าซึ่งจะมีการเดินสายไฟฟ้าผ่านช่องเดินสาย (Cable Trough) ไปตามแนวด้านข้างของทางวิ่งรถไฟฟ้าและจะมีการจั้มสายไฟขึ้นไปที่จุดเชื่อมต่อเพื่อป้อนให้กับรางที่สาม และตัวรถไฟฟ้าจะรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากรางที่สามนี้ไปใช้งานผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Collector shoe
- ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 25 กิโลโวลต์ โดยจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้าด้วยสายไฟฟ้าแรงสูงที่แขวนอยู่เหนือด้านบนของตัวรถไฟฟ้า ส่วนตัวรถไฟฟ้าก็จะมีก้านซึ่งจะยื่นขึ้นไปเพื่อให้ตัวเชื่อมต่อสัมผัสกับตัวสายไฟฟ้า และเนื่องจากรถไฟฟ้าประเภทนี้มีการเดินทางในระยะทางที่ค่อนข้างไกลโดยเป็นเส้นทางวิ่งจากด้านในตัวเมืองออกไปที่ด้านนอกเมืองจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าในระดับแรงดันที่สูงเพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการเดินรถไฟฟ้า



รูปที่ 1 การรับไฟฟ้ากระแสตรงผ่านทางรางที่สาม

จำนวนพัลส์ของวงจรเรียงกระแสจะมีผลต่อความเรียบของระดับแรงดันกระแสตรงเอาท์พุต และขนาดของตัวกระแสกระเพื่อม ซึ่งจะส่งผลต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าบนขบวนรถ และผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านกระแสสลับที่เกิดขึ้น การออกแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนทางรางที่เป็นที่นิยมสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้ไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 750 โวลต์นั้นจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์



รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง

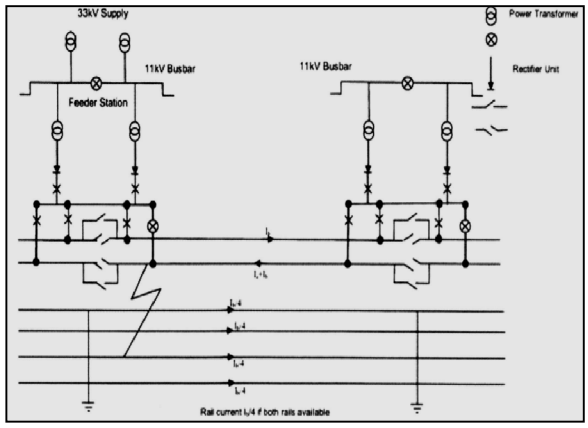
การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนตามมาตรฐาน EN50163 ระดับแรงดันปกติของระบบการจ่ายไฟให้รถไฟฟ้านั้นต้องมีอยู่ในช่วง Umin1 ถึง Umax2 โดยมีข้อกำหนดของการทำงานที่ระดับแรงดัน Umax1 ถึง Umax2 จะต้องมีค่าไม่เกิน 5 นาที และระหว่างแรงดันช่วง Umin1 ถึง Umin2 ต้องมีค่าไม่เกิน 2 นาที

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

รูปที่ 3 แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน BS EN 50163

การจัดรูปแบบการจ่ายไฟให้กับตัวนำของรางที่สามเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนทางราง เนื่องจากการใช้ Track section และการเชื่อมต่อรางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าทางคู่ถึงกันหรือไม่นั้นจะทำให้ทางเดินของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป อาจส่งผลต่อพิกัดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้า

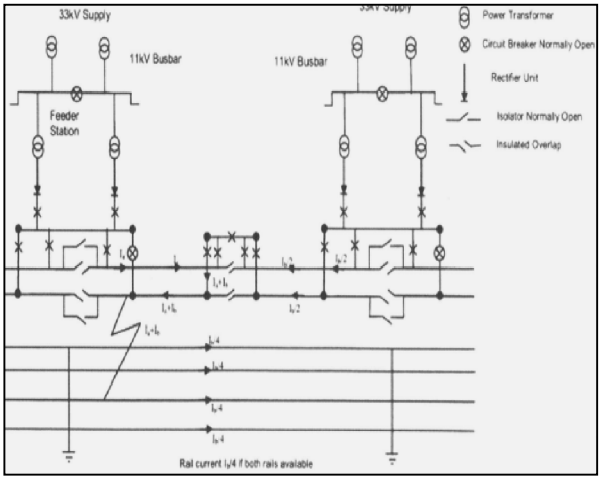
การจ่ายไฟระหว่างสถานีเรียงกระแสสองสถานีติดกันโดยไม่มีการติดตั้ง Track section switchgear ทำให้ระหว่างสถานีไม่มีการเชื่อมต่อกันของตัวนำระบบไฟฟ้าของรางที่สาม ส่งผลให้ตัวนำระบบการจ่ายไฟสำหรับรางที่สามทั้งทิศทางขาไปและทิศทางขากลับไม่ถูกเชื่อมต่อกันที่ระยะกึ่งกลางระหว่างสถานี



รูปที่ 4 วงจรระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่ใช้ Track section

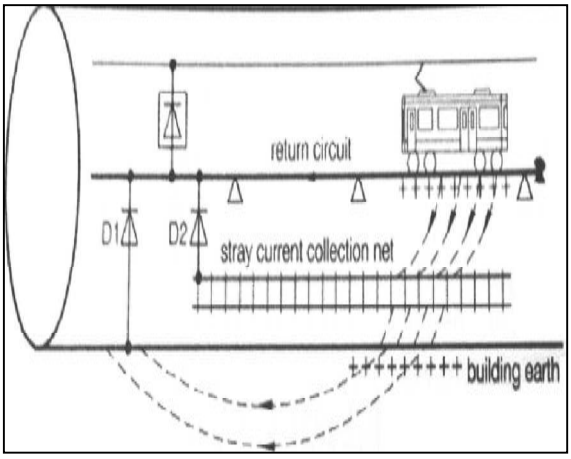
การจ่ายไฟระหว่างสถานีเรียงกระแส (Traction Substation) สองสถานีติดกันโดยมีการติดตั้ง Track section switchgear ทำให้ระหว่าง

สถานีมีการเชื่อมต่อกันของตัวนำระบบไฟฟ้าของรางที่สาม ส่งผลให้ตัวนำระบบการจ่ายไฟสำหรับรางที่สามทั้งทิศทางขาไปและทิศทางขากลับถูกเชื่อมต่อกันที่ระยะกึ่งกลางระหว่างสถานี



รูปที่ 5 วงจรระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ Track section

ระบบตัวนำกระแสย้อนกลับหรือระบบกราวด์ของระบบรถไฟฟ้ามีที่ใช้งานอยู่หลายระบบด้วยกัน แต่ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากระแสตรงและมีความเหมาะสมที่สุด ได้แก่แบบ Stray Current Collection Net System (SCCNS) เป็นระบบที่นำมาใช้กับรถไฟฟ้าที่วิ่งบนทางยกระดับหรือวิ่งในอุโมงค์โดยมีการติดตั้งตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลภายในโครงสร้างของตัวคอนกรีต เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในส่วนที่เป็นโลหะ และได้ใช้ตัวไดโอดเพื่อช่วยทำให้กระแสที่รั่วไหลไหลกลับเข้าสู่ตัวสถานี

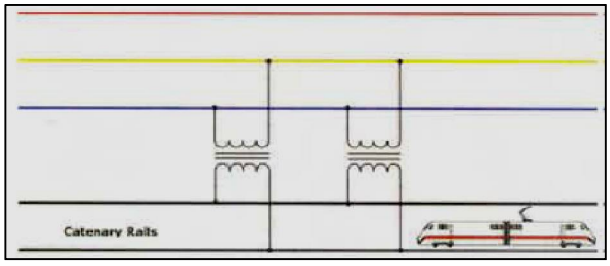


รูปที่ 6 ระบบ SCCN

2.2 ประเภทการเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับระบบรถไฟฟ้า

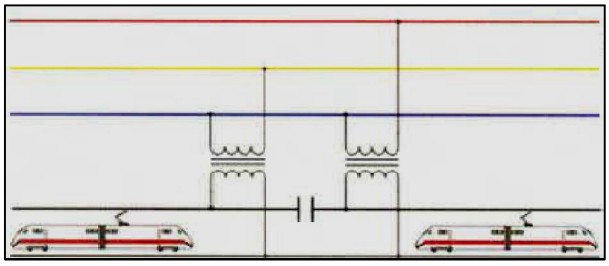
การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าในระบบ AC จะผ่านมาจากห้องที่เรียกว่า Traction Substation แต่ด้วยตัวรถไฟฟ้ามีการใช้งานกระแสไฟฟ้าแบบเฟสเดียว เพราะฉะนั้นการเชื่อมต่อสถานีไฟฟ้าเข้ากับระบบของทางการไฟฟ้านั้นจะมีความแตกต่างจากวิธีการอื่นทั่วไป โดยจะมีการเชื่อมต่อ 3 รูปแบบดังนี้

2.2.1 การเชื่อมต่อแบบ Single phase



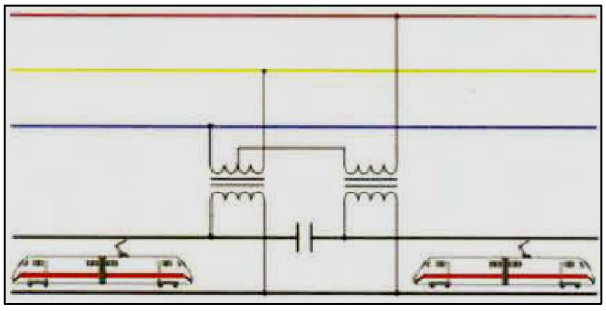
รูปที่ 7 การเชื่อมต่อแบบเฟสเดียว

2.2.2 การเชื่อมต่อแบบ V



รูปที่ 8 การเชื่อมต่อแบบ V

2.2.3 การเชื่อมต่อแบบ Scott



รูปที่ 9 การเชื่อมต่อแบบ Scott

2.3 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากรถไฟฟ้า

2.3.1 การเชื่อมต่อแบบ Scott

$$d_2 = \frac{S_L\,[2k-1]}{S_S + S_L} \qquad (1)$$

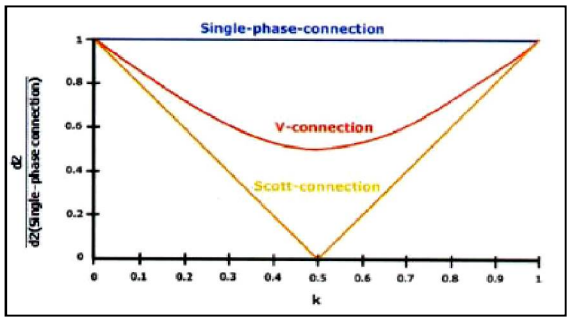
โดยที่ d_2 คือ ค่าแรงดันไม่สมดุล

S_L คือ ค่าโหลดรถไฟฟ้าทั้งหมด

S_S คือ ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ

k คือ ค่าอัตราส่วน S_{L1} / S_L

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่ทำให้แรงดันไม่สมดุลจะเกิดขึ้นมีค่ามากหรือมีค่าน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดโหลดของรถไฟฟ้า, ขนาดของโหลดด้านซ้ายและโหลดด้านขวาของสถานีจ่ายไฟและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ เมื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของแต่ละรูปแบบจะเห็นว่าการเชื่อมต่อแบบ Scott จะทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลต่ำสุดโดยเฉพาะเมื่อโหลดด้านซ้ายและโหลดด้านขวาของสถานีจ่ายไฟฟ้าเท่ากัน จะได้แรงดันไม่สมดุลเท่ากับศูนย์ ส่วนการเชื่อมต่อแบบเฟสเดียวจะทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลสูงสุดและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่า *k* ซึ่งค่าแรงดันไม่สมดุลของการเชื่อมต่อทั้งสามแบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) แล้วนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแรงดันไม่สมดุลจากการต่อแบบต่างๆ

3. การตรวจสอบอุปกรณ์เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

3.1 การตรวจสอบสายไฟ

การตรวจสอบสายไฟฟ้าในส่วนของตัวรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนควรทำการตรวจสอบจุดเชื่อมต่อทุกๆเส้นให้ขั้วมีความแน่นหนา และทำการดูคุณภาพของสายไฟฟ้าตรงบริเวณต่างๆของตัวรถว่ามีตรงช่วงไหนที่ฉนวนหุ้มสายฉีกขาดหรือมีการชำรุดหรือไม่ เพราะหากมีจุดที่ชำรุดเยอะๆก็อาจทำให้ขั้วสายไฟตรงนั้นเกิดความร้อนและสร้างความเสียหายได้

3.2 การตรวจสอบตัวเก็บประจุและฟิวส์ของมัน

ชุดฟิวส์ของตัวเก็บประจุจะมีการติดตั้งทั้งสองด้านของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับในด้านปฐมภูมินั้นจะมีการติดตั้งชุดฟิวส์เพื่อควบคุมค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ และสำหรับด้านทุติยภูมิจะมีการติดตั้งชุดฟิวส์สำหรับตัวเก็บประจุไว้เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในสายป้อน หรือตัววงจรย่อย ดังนั้นชุดตัวเก็บประจุนี้จึงมีความสำคัญต่อการรักษาค่าระดับพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในปริมาณที่มีระดับคงที่ซึ่งหากอุปกรณ์ชุดนี้เกิดความเสียหายก็อาจจะส่งผลต่อตัวหม้อแปลงไฟฟ้า และอาจส่งผลต่อการจ่ายไฟฟ้าไปสู่รางที่สามในเส้นทางการเดินรถฝั่งนั้นๆได้

4. สรุป

การเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้ารูปแบบ *Scott* นั้นจะมีความเสถียรภาพสูงที่สุดจากจำนวนอื่นอีกหลายๆแบบ ซึ่งเป็นการป้องกันและลดในส่วนของความไม่สมดุลทางไฟฟ้า และควรหมั่นตรวจสอบสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ตัวเก็บประจุและชุดฟิวส์ให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์และพร้อมใช้งานเสมอ

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] ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน, 2557

[3] R.J. Hill, Electric railway traction: Part 3 Traction power supplies, Power Engineering Journal, December 1994, pp. 275-286

[4] Saadat H. (2004), Power System Analysis. McGraw-Hill International editions

[5] Suvarnabhumi Airport Rail Link, 2016. Available from: http://www.srtet.co.th [Accessed 22 Sep 2016].

[6] Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE std 1159-2009 (Revision of IEEE std 1159 – 1995). Ieee recommended practice for monitoring electric power quality, 2009

[7] EN 50122: Railway application - Fixed installations - Electrical safety, Earthing and the return circuit