

โครงการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้า

Impact Study of Train-load to Power System

ณัฐวุฒิ พนมการ¹, บัณฑิต ยงบรรทม², ธรรมวฤทธิ์ สิงห์ลิขัย¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

22/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล นครปฐม 73170 โทรศัพท์: 0-2889-2138 ต่อ 6557

E-mail: nattawut.pa@hotmail.co.th, thamvarit.sin@mahidol.ac.th

² แผนกวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน)

อาคารบีทีเอส1000 ถนนพหลโยธิน แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์: 0-2617-7300 E-mail: bandity1980@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้า จัดทำขึ้นมาเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้า ที่มีต่อระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จากการศึกษาอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ขั้วเคลื่อน ผู้วิจัยได้อธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากชุดเรียงกระแส โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาส่วนของอุปกรณ์ 12 Pulse Rectifier (ชุดเรียงกระแส จากกระแสสลับเป็นกระแสตรง) จากการศึกษาพบว่า 12 Pulse Rectifier ก่อให้เกิดปัญหา Harmonic และ Harmonic ที่เกิดขึ้นมาส่งผลต่อการเกิดกำลังงานสูญเสียหรือ loss ในสายส่งแรงสูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน Peak Time และ Off-Peak Time ของแต่ละวัน กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 7.61 เท่า

คำสำคัญ : 12 Pulse Rectifier, Harmonic, กำลังงานสูญเสีย, ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขั้วเคลื่อน

Abstract¹

Analysis of the train affects to traction substation is the project that study and analyze about the effects of energy used by train that impacts the system in different periods by studying the equipments used in traction substation. Researchers have picked up the topic from the effects that affects the electrolytic. This research focused on the studying of 12 pulse rectifier. From the study, the 12 pulse rectifier causes the Harmonic problems. This problem also affects to the loss of transmission line. By study the different periods of Peak time and Off-peak Time, the loss can increase to 7.61 times

Keyword: 12 Pulse Rectifier, Harmonic, Power loss, Traction

substation

1. บทนำ

การใช้ไฟฟ้าของรถไฟฟ้าบีทีเอส (BTS) มีความซับซ้อนเนื่องจากรถไฟฟ้าเป็นภาระแบบไม่คงที่ ในช่วงออกตัวจากสถานี จะต้องการกระแสไฟฟ้าสูงมาก และลดลงเมื่อรถเริ่มวิ่ง จากนั้นจะต้องการกระแสมากขึ้นอีกครั้งเมื่อรถกำลังจะจอด นอกจากนี้ระบบจ่ายไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนยังประกอบไปด้วย

อุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย รวมถึงอุปกรณ์ที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น อุปกรณ์เรียงกระแส

แม้ว่าระบบไฟฟ้าทั้งหมดข้างต้นนี้ได้ออกแบบด้วยทีมวิศวกรผู้เชี่ยวชาญ จนทำให้ยังไม่มีปัญหาเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดก็ตาม แต่ว่าหากพิจารณาจากการเติบโตของระบบรถไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการขยายสถานี การเพิ่มเที่ยวรถ รวมถึงการเพิ่มของผู้โดยสารที่จะทำให้มีการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น อาจทำให้การใช้ไฟฟ้าในอนาคตของรถไฟฟ้าเกิดปัญหาคើขึ้น

ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ทำการศึกษา ผลกระทบของการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้า ในจังหวะเวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ว่าจะมีผลกระทบแบบใดและมีมากน้อยแค่ไหน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพทางไฟฟ้า

ค้นหางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพทางไฟฟ้า และศึกษาว่างานวิจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขั้วเคลื่อน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์ข้อมูล

2.2 ศึกษาการส่งจ่ายไฟฟ้าในส่วนระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขั้วเคลื่อน (Traction Substation)

ศึกษาระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขั้วเคลื่อน จากภาพรวมของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของบีทีเอส (Overview Power Supply) ว่ามีหลักการทำงานอย่างไร และมีอุปกรณ์ใดอยู่ในระบบบ้าง เพื่อเลือกอุปกรณ์ที่มีโอกาสก่อให้เกิดปัญหาที่มีสัมพันธ์เนื่องกับงานวิจัยที่สืบค้น

¹ เป็นผลงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการส่งเสริมการศึกษาและวิจัยร่วมระบบขนส่งทางราง

มาเบื้องต้น

2.3 เลือกอุปกรณ์ที่มีโอกาสก่อให้เกิดปัญหา

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมีอุปกรณ์ที่ใช้อยู่หลายประเภท แต่ที่ผู้วิจัยให้ความสนใจเนื่องจากมีความสัมพันธ์กับงานวิจัยที่ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับคุณภาพทางไฟฟ้า คือ ชุดเรียงกระแส หรือ 12-Pulse Rectifier ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

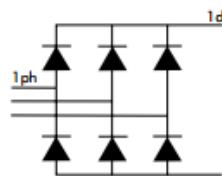
2.4 ศึกษาทฤษฎีของ 12-Pulse Rectifier ที่เกี่ยวกับการเกิด Harmonic

จากงานวิจัยที่ได้ค้นคว้าพบว่า Rectifier ทำให้เกิด Harmonic ซึ่งปัญหา Harmonic นั้นคือหัวข้อหนึ่งของปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า เพราะเมื่อเกิด Harmonic จำนวนมาก ทำให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งานลดลง เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่ง เป็นต้น ในส่วนประกอบกระแส Harmonic ของ 12-Pulse Rectifier เทียบกับ 6-Pulse Rectifier ได้จากสมการ

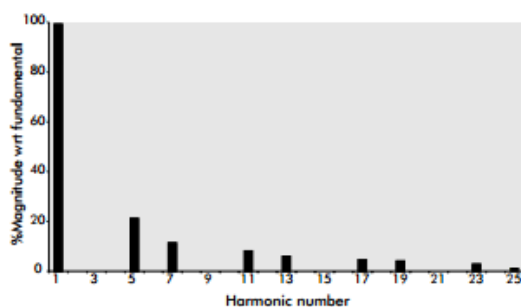
$$h = (np \pm 1) \quad (1)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ และ $p = \text{pulse number}$

สำหรับ 6-Pulse Rectifier มีส่วนประกอบกระแส Harmonic คือ Harmonic ลำดับที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 อื่นๆ

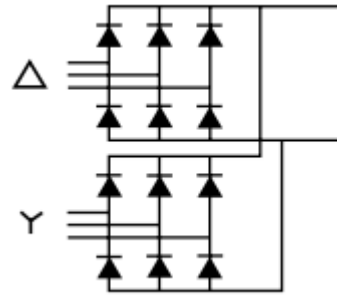


รูปที่ 1 6-Pulse Bridge Rectifier

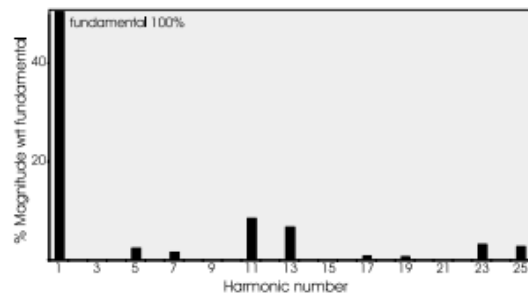


รูปที่ 2 Harmonic spectrum ของ 6-Pulse Bridge Rectifier

สำหรับ 12-Pulse Rectifier มีส่วนประกอบกระแส Harmonic คือ Harmonic ลำดับที่ 11, 13, 23, 25, 35, 37 และ อื่นๆ



รูปที่ 3 12-Pulse Bridge Rectifier parallel



รูปที่ 4 Harmonic spectrum ของ 12-Pulse Rectifier Bridge

จากสมการ (1) ส่วนประกอบกระแส Harmonic และ Harmonic spectrum บ่งบอกได้ว่า 12-Pulse Bridge Rectifier เกิด harmonic น้อยกว่า 6-Pulse Bridge Rectifier ถึงแม้จะมีน้อยกว่าแต่ใน Harmonic ลำดับสูงยังมีและเป็นส่วนที่ไม่น้อยเมื่อเทียบกับกระแสที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำ ส่วนประกอบกระแส Harmonic ลำดับสูง มาวิเคราะห์ว่าจะส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหรือไม่ อย่างไร

2.5 ติดตั้งเครื่องมือวัด HIOKI ในห้อง Traction

Substation ที่สถานีรถไฟฟ้ามหานคร

วัดกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสตรงและชนิดกระแสสลับ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ต่อไป

3. ผลการทดลอง

3.1 จากกราฟ Harmonic spectrum ของ 12-Pulse Rectifier ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_1 = I_{50\text{Hz}} = 100\% \times I_{50\text{Hz}} \quad (2)$$

$$I_{11} = I_{550\text{Hz}} = 9\% \times I_{50\text{Hz}} \quad (3)$$

$$I_{13} = I_{650\text{Hz}} = 7\% \times I_{50\text{Hz}} \quad (4)$$

$$I_{23} = I_{1150\text{Hz}} = 3\% \times I_{50\text{Hz}} \quad (5)$$

$$I_{25} = I_{1250\text{Hz}} = 2.5\% \times I_{50\text{Hz}} \quad (6)$$

3.2 ผลการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากโหลดรวมไฟฟ้าในวันที่ 9, 10 และ 11 พฤษภาคม 2556 กราฟของวันพฤหัสบดีที่ 9 และวันศุกร์ที่ 10 พฤษภาคม 2556 มีลักษณะการใช้ไฟฟ้าที่คล้ายคลึงกัน โดยมีการใช้ไฟฟ้ามากในช่วงเวลาเช้า (7.00 – 10.00 น.) และช่วงหัวค่ำ (17.00 – 21.00 น.) ส่วนช่วงกลางวันมีการใช้ไฟฟ้าน้อย ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้สูงสุดที่วัดได้ คือ 106.93 A ในเวลา 19.00 น. และ 76.885 A ในเวลา 21.00 น. ตามลำดับ ในส่วนของกราฟวันเสาร์ที่ 11 พฤษภาคม 2556 มีลักษณะการใช้ไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้งวัน ตั้งแต่ 8.00 – 21.00 น. มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้สูงสุดที่วัดได้ คือ 75.06 A ในเวลา 19.00 น. ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละวันมีดังนี้

09/5/2556 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าตลอดทั้งวัน คือ 60.590 A

10/5/2556 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าตลอดทั้งวัน คือ 58.023 A

11/5/2556 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าตลอดทั้งวัน คือ 61.436 A

หมายเหตุ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้วิเคราะห์เป็นชนิดกระแสสลับ

3.3 วิเคราะห์สัดส่วนระหว่าง Power loss (Harmonic)

ต่อ Power loss (No Harmonic)

สามารถคำนวณจากพารามิเตอร์ต่างๆตามสมการดังนี้

สมการหากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (50Hz)

$$I_{measure} = \sqrt{I_1^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2 + \dots} \quad (7)$$

เมื่อ $I_{measure}$ = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด

$I_1, I_{11}, I_{13}, I_{23}, I_{25}$ = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ลำดับ Harmonic ต่างๆ

สมการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีกระแส Harmonic

$$P_{loss(Harmonic)} = 3 \times I_{measure}^2 \times R \quad (8)$$

สมการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไม่มีกระแส Harmonic

$$P_{loss(No Harmonic)} = 3 \times I_1^2 \times R \quad (9)$$

สมการหาความต้านทานในสายไฟ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (10)$$

เมื่อ ρ = ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ωm)

l = ความยาวสายไฟฟ้า (m)

A = พื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า (mm^2)

ตัวอย่างการคำนวณ กรณี $I_{measure} = 106.93$ A

Step1 หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน 50Hz

$$106.93 = \sqrt{I_1^2 + (9\% \times I_1)^2 + (7\% \times I_1)^2 + (3\% \times I_1)^2 + (2.5\% \times I_1)^2}$$

$$I_1 = 106.162 \text{ A}$$

Step 2 หาค่ากำลังสูญเสียในสภาวะที่ไม่มีกระแส Harmonic

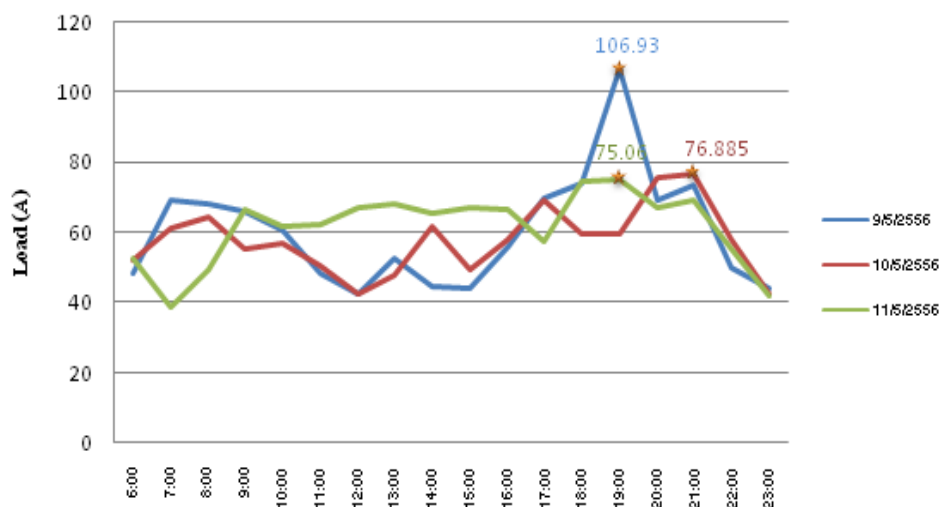
$$P_{loss(No Harmonic)} = 3 \times 106.162^2 \times R$$

$$P_{loss(No Harmonic)} = 33,810.97 \text{ W}$$

Step 3 หาค่ากำลังสูญเสียในสภาวะที่มีกระแส Harmonic

$$P_{loss(Harmonic)} = 3 \times 106.93^2 \times R$$

$$P_{loss(Harmonic)} = 34,302.07 \text{ W}$$



รูปที่ 5 การใช้ไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ของวันที่ 9, 10 และ 11 พฤษภาคม 2556

Step 4 หาอัตราส่วนระหว่าง

$$= \frac{P_{\text{loss (Harmonic)}}}{P_{\text{loss (No Harmonic)}}} = \frac{34,302.07\text{R}}{33,810.97\text{R}} = 1.0145$$

Step 5 หา % Harmonic loss

$$(1.0145 - 1) \times 100 = 1.45\%$$

ตารางที่ 1 คำนวณหา $P_{\text{loss (Harmonic)}}/P_{\text{loss (No Harmonic)}}$ จากชุดข้อมูล

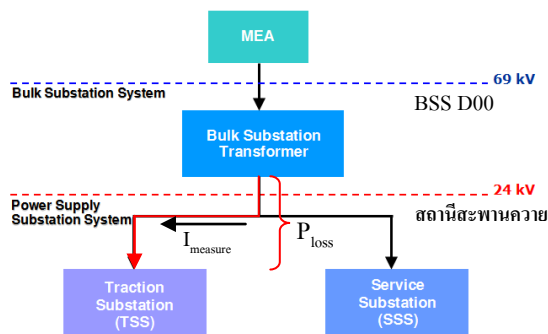
ตัวอย่าง

I_{measure}	I_1	P_{loss} (No Harmonic)	P_{loss} (Harmonic)	P_{loss} (Harmonic)/ P_{loss} (No Harmonic)	% Harmonic loss
38.76	38.48	4,442.49R	4,507.01R	1.0145	1.45%
58.02	57.61	9,955.23R	10,099.83R	1.0145	1.45%
60.59	60.15	10,855.96R	11,013.65R	1.0145	1.45%
61.44	60.99	11,161.07R	11,323.19R	1.0145	1.45%
66.28	65.81	12,992.39R	13,181.10R	1.0145	1.45%
76.88	76.33	17,480.01R	17,733.91R	1.0145	1.45%
75.06	74.52	16,660.02R	16,902.01R	1.0145	1.45%
90.00	89.35	23,952.10R	24,300.00R	1.0145	1.45%
106.93	106.16	33,810.97R	34,302.07R	1.0145	1.45%

จากตาราง %Harmonic loss ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันในทุกๆค่า กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.45% หมายความว่า $P_{\text{loss (Harmonic)}}$ ที่คำนวณได้จากสูตร คิดเป็น 101.45% โดยค่าของ Harmonic loss จะคิดเป็น 1.45% ของ $P_{\text{loss (Harmonic)}}$ ที่คำนวณได้จากสูตร ซึ่งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ (วัดได้) และค่าความต้านทานของสายไฟฟ้า

3.4 แสดงตัวอย่างการคำนวณหา Harmonic loss

หาค่าความต้านทานของสายไฟฟ้าที่ลากจาก BSS D00 (หน้าตึก BTS) ไปยังสถานีสะพานควาย มีระยะทางทั้งสิ้น 2,275 เมตร ใช้สาย Cable Type N2XSXY, Cu/400mm², $\rho = 0.0169\Omega\text{m}$



รูปที่ระบบไฟฟ้าสถานีสะพานควาย

$$R = 0.0169 \times \frac{2,275}{400} = 0.096 \Omega$$

$$\text{ตัวอย่างที่ 1 } I_{\text{measure}} = 106.93 \text{ A, } R = 0.096 \Omega$$

$$P_{\text{loss (Harmonic)}} = 3 \times 106.93^2 \times 0.096$$

$$= 3,297.07 \text{ w}$$

ดังนั้น 101.45 % คิดเป็น 3,297.07 w

1.45% คิดเป็น

$$\frac{3,297.07 \times 1.45}{101.45} = 47.20 \text{ w}$$

Harmonic loss มีค่าเท่ากับ 47.20 w

หรือผลต่างระหว่าง $P_{\text{loss (Harmonic)}}$ กับ $P_{\text{loss (No Harmonic)}}$ = 47.20 w

ตารางที่ 2 คำนวณหา Harmonic loss จากชุดข้อมูลตัวอย่าง

I_{measure}	I_1	$P_{\text{loss (No Harmonic)}}$	$P_{\text{loss (Harmonic)}}$	% Harmonic loss	Harmonic loss(w)
38.76	38.48	427.01	433.21	1.45%	6.20
58.02	57.61	956.88	970.78	1.45%	13.90
60.59	60.15	1,043.46	1,058.62	1.45%	15.16
61.44	60.99	1,072.79	1,088.37	1.45%	15.58
66.28	65.81	1,248.81	1,266.95	1.45%	18.14
76.88	76.33	1,680.16	1,704.56	1.45%	24.40
75.06	74.52	1,601.34	1,624.60	1.45%	23.26
90.00	89.35	2,302.25	2,335.69	1.45%	33.44
106.93	106.16	3,249.87	3,297.07	1.45%	47.20

Harmonic loss ที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจาก กระแส Harmonic ลำดับสูงที่เกิดจาก 12 Pulse Rectifier ซึ่งแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้และความต้านทานในสายไฟฟ้า แต่เนื่องจากความต้านทานมีค่าเท่ากัน ทำให้ Harmonic loss เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งการใช้ไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอจึงมีผลต่อกำลังสูญเสียในสายส่ง

จากข้อมูลที่ได้บันทึกไว้ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่บันทึกได้เท่ากับ 38.76 A ณ 7.00 น. ของวันเสาร์ที่ 11 พฤษภาคม 2556 มี Harmonic loss เท่ากับ 6.20 w ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่บันทึกได้เท่ากับ 106.93 A ณ 19.00 น.ของวันพฤหัสบดีที่ 9 พฤษภาคม 2556 มีHarmonic loss เท่ากับ 47.20 w ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลค่า Harmonic loss สูงสุดมีขนาดเป็น 7.61 เท่า ของ Harmonic loss ต่ำสุด

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

12-Pulse Rectifier สามารถให้ผลลัพธ์รูปคลื่นสัญญาณที่มีค่า THD เป็นที่น่าพอใจ แต่ยังมีกระแส Harmonic ลำดับสูงเกิดขึ้นอยู่ด้วย ถึงแม้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน แต่ Harmonic ที่เกิดขึ้นนี้จะกระทบกับการสูญเสียในสายส่ง ซึ่งจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ช่วง Peak Time จะมีการใช้กระแสไหลมากกว่า Off Peak Time หรือ ช่วงวันธรรมดา กับ วันหยุด ที่มีลักษณะการใช้ไฟฟ้าที่ไม่เหมือนกัน เป็นต้น ฉะนั้นในอนาคต การศึกษาเชิงลึกเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพื่อนำไปสู่การใช้ไฟฟ้าอย่างคุ้มค่า

with unbalanced input line voltages”.

5. สรุปปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดลอง ผลการคำนวณจากชุดข้อมูลตัวอย่าง ทำให้เห็นว่า ชุดเรียงกระแสชนิด 12 Pulse นั้นก่อให้เกิดกระแส Harmonic ลำดับสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 24kV ถึงแม้จากการคำนวณพบว่า กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นมีไม่มากนัก เมื่อพิจารณาช่วงของเวลาการเก็บข้อมูลทั้งหมด พบว่ากำลังสูญเสียที่กระแสสูงสุดมีค่าเป็น 7.61 เท่าของกำลังสูญเสียที่กระแสต่ำสุด โดยสามารถเพิ่มหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ หากไม่มีการใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะส่งผลทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นไปด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

หากโครงการวิเคราะห์นี้ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของโอกาสที่จะเกิดกำลังสูญเสียที่มากขึ้นในอนาคต ควรในผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านประเมินในเชิงลึกต่อไป เนื่องจากงานวิจัยนี้ดำเนินการแบบคร่าวๆ ได้ลบลายละเอียดไปในหลายๆส่วน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการส่งเสริมการศึกษาและวิจัยร่วมระบบขนส่งทางราง ที่มอบโอกาสและทุนให้แก่ข้าพเจ้า และ บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด(มหาชน) ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ฝึกงานและสถานที่ทำโครงการงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] David Chapman, “Harmonics Causes and Effects”, Power Quality Application Guide, Version 0b, November 2001.
- [2] PowerCET Corporation, “Problems, Analysis & Solutions”, Introduction to Power Quality, pp. 53-70.
- [3] Karl M. Hink, “Harmonic mitigation of 12-Pulse drives