

## กรณีศึกษา - CASE STUDY

## แรงดันไม่สมดุลจากระบบรถไฟฟ้ามวลชน

## VOLTAGE UNBALANCE CAUSED BY MASS TRANSIT TRAIN SYSTEM

## ABSTRACT

A MASS TRANSIT TRAIN SYSTEM WITH DEMAND OF 20 MVA HAD USED 25KV SINGLE PHASE AC SUPPLYING TO ELECTRICITY TRAINS. SINCE IT CONNECTED TO THE THREE PHASE POWER SYSTEM BUT RECEIVED POWER FROM ONLY ONE PAIR OF PHASES, THERE MIGHT BE VOLTAGE UNBALANCE EFFECTING TO OTHER CUSTOMERS. WHEN LOAD CURRENT IN THREE PHASES WAS NOT BALANCED AND THIS CURRENT FLEW THROUGH SYSTEM IMPEDANCE, IT COULD CAUSE VOLTAGE UNBALANCE IN THE POWER SYSTEM. THE SOLUTION COULD BE DIVIDED INTO 2 PARTS. THE FIRST ONE WAS TO REDUCE SYSTEM IMPEDANCE AT THE POINT OF COMMON COUPLING (PCC) OF THE MASS TRANSIT TRAIN SYSTEM. AND THE SECOND ONE WAS TO REDUCE DEGREE OF UNBALANCED LOAD CURRENT BY USING SPECIAL TRANSFORMERS OR COMPENSATING DEVICES. EACH SOLUTION HAD DIFFERENT TECHNICAL LIMITATIONS AND COST WHICH REQUIRED MORE ANALYSIS TO FIND THE MOST OPTIMAL SOLUTION.

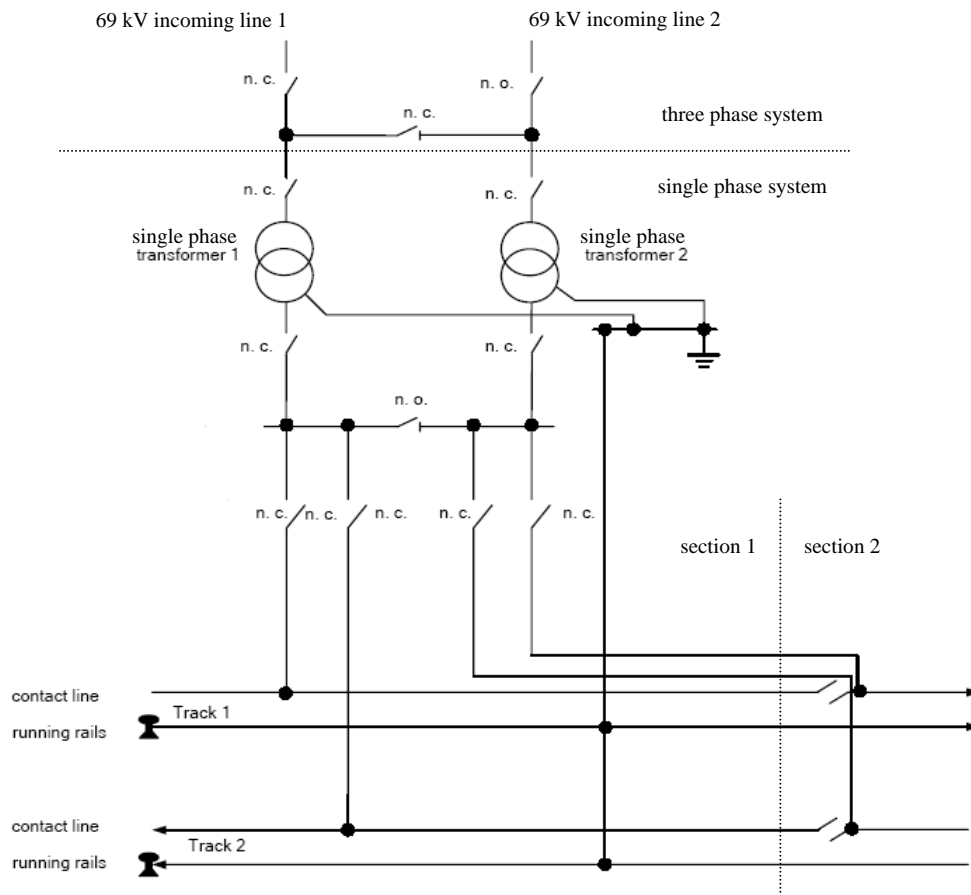
## บทคัดย่อ

ระบบรถไฟฟ้ามวลชนซึ่งมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าประมาณ 20 MVA และใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 25 kV ชนิดเฟสเดียวในการขับเคลื่อนขบวนรถ เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟสก่อให้เกิดปัญหาแรงดันไม่สมดุลส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆได้ สาเหตุของปัญหาเกิดจากการที่โหลดระบบรถไฟฟ้ามวลชนเชื่อมกับระบบไฟฟ้าสามเฟส แต่ดึงกระแสไฟฟ้าไปใช้เพียงคู่เฟสเดียว นั่นคือกระแสโหลดในสามเฟสไม่สมดุลกัน เมื่อกระแสนี้ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบส่งผลให้เกิดแรงดันไม่สมดุลขึ้นในระบบไฟฟ้า แนวทางการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการจำกัดปริมาณกระแสโหลดที่ไม่สมดุลโดยใช้หม้อแปลงจ่ายไฟชนิดพิเศษหรืออุปกรณ์ชดเชยกระแสไม่สมดุล แต่ละแนวทางมีข้อจำกัดทางเทคนิคและใช้เงินลงทุนแตกต่างกัน ซึ่งต้องวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหามากที่สุด

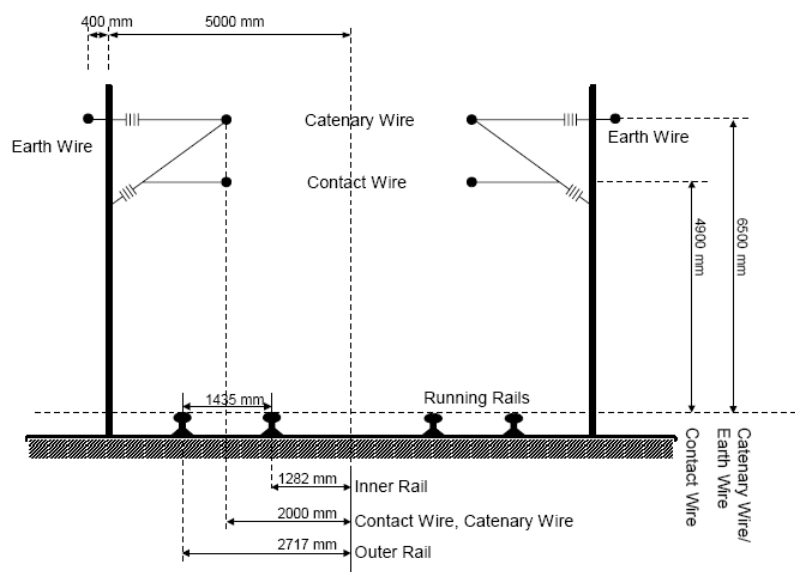
## 1. ข้อมูลเบื้องต้น

ระบบรถไฟฟ้ามวลชนรับไฟจากสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวงจำนวน 2 สายส่ง โดยโหลดทั้งหมดของระบบรถไฟฟ้ามวลชนใช้ไฟจากสายส่งเพียงเส้นเดียว สายส่งอีกเส้นทำหน้าที่เป็นสายส่งสำรองเพื่อจ่ายไฟในกรณีที่สายส่งหลักเกิดขัดข้อง เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ (Reliability) ในการจ่ายไฟ ขบวนรถไฟฟ้ามวลชนใช้ไฟฟ้า

กระแสสลับแรงดัน 25 kV ชนิดเฟสเดียวในการขับเคลื่อน โดยรับไฟจาก Overhead Catenary System ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับระบบรถไฟฟ้ายานยนต์เพิ่มเติมพิักัดแล้วจะมีความต้องการใช้ไฟฟ้ารวม 20 MVA



รูปที่ 1 หม้อแปลงและระบบจ่ายไฟของระบบรถไฟฟ้ายานส่งมวลชน



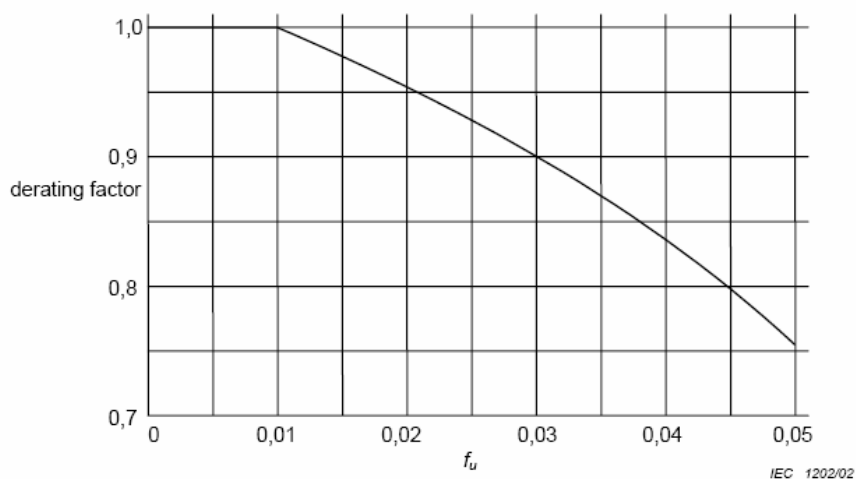
รูปที่ 2 Overhead Catenary System สำหรับจ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้ายาน

เนื่องจากระบบสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวงเป็นชนิด 3 เฟส แต่ขบวนรถใช้ไฟฟ้า 25 kV ชนิดเฟสเดียว ระบบรถไฟฟ้างจึงได้ติดตั้งหม้อแปลงเฟสเดียวพิกัด 69/25 kV จำนวน 2 ลูก สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าลงมาให้ขบวนรถ โดยขดลวดด้าน Primary ของหม้อแปลงทั้งสองต่อเชื่อมกับเฟส A และ B ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสของการไฟฟ้านครหลวง (ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสของการไฟฟ้านครหลวงประกอบไปด้วยเฟส A, B และ C)

ระบบรถไฟฟ้างมีราง 2 ชุดคือ รางสำหรับขบวนรถที่วิ่งไปและกลับ (Track 1 และ Track 2 ในรูปที่ 1) นอกจากนี้ยังแบ่งระบบรางออกเป็น 2 Section แต่ละ Section แยกจ่ายไฟจากหม้อแปลงคนละลูกกัน ตัวขบวนรถรับไฟจาก Contact Line ที่อยู่เหนือหัว และกระแสไหลคของขบวนรถสามารถไหลกลับไปที่หม้อแปลงผ่านรางรถ (Running Rails)

## 2. ปัญหาและผลกระทบ

โหลดระบบรถไฟฟ้างซึ่งเป็นโหลดชนิดเฟสเดียว เมื่อต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้าสามเฟสจะดึงกระแสไหลคไปใช้เพียงคู่เฟสเดียว นั่นคือกระแสไหลคในสามเฟสมีความไม่สมดุลกัน เมื่อกระแสนี้ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบส่งทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลขึ้นในระบบไฟฟ้า แรงดันไม่สมดุลนี้หากมีค่าสูงเกินไปจะส่งผลเสียต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส เช่น ทำให้เกิดความร้อนเกิน เกิดการสั้นสะเทือน และลดแรงบิดมอเตอร์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์ 3 เฟสไม่ควรทำงานเต็มพิกัดหากแรงดันไม่สมดุลมีค่าเกินกว่า 1% แต่หากจำเป็นต้องใช้งานมอเตอร์ในสถานะที่มีแรงดันไม่สมดุลเกินกว่า 1% ควรลดพิกัดโหลดของมอเตอร์ลง (Derating) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3 เช่นหากมอเตอร์ 3 เฟสต้องทำงานในสถานะที่มีแรงดันไม่สมดุล 3% ( $f_u = 0.03$ ) มอเตอร์นี้ไม่ควรทำงานเกิน 90% (0.9 pu.) ของพิกัดโหลดสูงสุด



รูปที่ 3 Derating Factor สำหรับมอเตอร์ 3 เฟสที่ต้องทำงานในสถานะที่มีแรงดันไม่สมดุลสูง

## 3. มูลค่าความเสียหาย

เนื่องจากแรงดันไม่สมดุลส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ดังนั้นมูลค่าความเสียหายจากแรงดันไม่สมดุลจึงขึ้นอยู่กับ จำนวนมอเตอร์ที่ได้รับผลกระทบ และความสำคัญของระบบที่มอเตอร์

นั้นขับเคลื่อนอยู่ เช่น หากสายส่งที่จ่ายไฟให้กับระบบรถไฟฟ้าย้ายไฟให้กับโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ด้วย และโรงงานเหล่านี้มีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสจำนวนมากในกระบวนการผลิต หากแรงดันไม่สมดุลที่เกิดจากระบบรถไฟฟ้ายามีค่าสูงเกินไปจนทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าในโรงงานเหล่านี้ไม่สามารถทำงานได้หรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักหรือเสียหาย มูลค่าความเสียหายก็อาจสูงถึงหลักหลายแสนบาทถึงนับล้านบาท ขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของอุตสาหกรรมที่ได้รับผลกระทบ

#### 4. สาเหตุของปัญหา

กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลใดๆในระบบไฟฟ้าสามเฟส สามารถวิเคราะห์แยกออกได้เป็นองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ Positive Sequence Component, Negative Sequence Component และ Zero Sequence Component โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_0 \\ \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_A \\ \hat{V}_B \\ \hat{V}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ  $\hat{I}_0$  และ  $\hat{V}_0$  = Zero Sequence Component ของกระแสและแรงดันตามลำดับ

$\hat{I}_1$  และ  $\hat{V}_1$  = Positive Sequence Component ของกระแสและแรงดันตามลำดับ

$\hat{I}_2$  และ  $\hat{V}_2$  = Negative Sequence Component ของกระแสและแรงดันตามลำดับ

$\hat{I}_A$  และ  $\hat{V}_A$  = เวกเตอร์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ตามลำดับ

$\hat{I}_B$  และ  $\hat{V}_B$  = เวกเตอร์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟส B ตามลำดับ

$\hat{I}_C$  และ  $\hat{V}_C$  = เวกเตอร์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟส C ตามลำดับ

$a$  = เวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1 และมีมุม 120 องศา

กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลจะมีแต่ Positive Sequence Component เท่านั้น แต่กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีทั้ง Positive, Negative และ Zero Sequence Component นอกจากนี้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายที่ไม่มีนิวทรัล กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมี Positive และ Negative Sequence Component แต่ไม่มี Zero Sequence Component

ตามนิยามในมาตรฐานสากล IEC ระดับแรงดันไม่สมดุล คืออัตราส่วนระหว่างขนาดของ Negative Sequence Component และ Positive Sequence Component ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$VU (\%) = \frac{|\hat{V}_2|}{|\hat{V}_1|} \times 100 \quad (3)$$

ในระบบไฟฟ้าทั่วไป  $\hat{V}_1$  มีค่าค่อนข้างคงที่และมีขนาดใกล้เคียงกับแรงดัน Line to Ground ของระบบ ดังนั้นระดับแรงดันไม่สมดุล (VU) ในระบบไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับขนาดของ  $\hat{V}_2$  เป็นหลัก นอกจากนี้  $\hat{V}_2$  เป็นผลมาจากกระแส  $\hat{I}_2$  ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ระบบ (System Impedance -  $Z_{sys}$ ) ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (4)

$$\hat{V}_2 = \hat{I}_2 \times \hat{Z}_{sys} \quad (4)$$

จากสมการที่ (1) หากกระแสไหลใน 3 เฟส ( $\hat{I}_A$ ,  $\hat{I}_B$  และ  $\hat{I}_C$ ) มีความสมดุลกัน จะมีแต่กระแส  $\hat{I}_1$  ไหลในระบบไฟฟ้าเท่านั้น แต่หากกระแสไหล 3 เฟสมีความไม่สมดุลกันจะมีกระแส  $\hat{I}_2$  ไหลในระบบไฟฟ้าด้วย ยิ่งกระแสไหลมีความไม่สมดุลเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแส  $\hat{I}_2$  ที่ไหลในระบบไฟฟ้าก็เพิ่มสูงขึ้นตามเช่นกัน

โหลดระบบรถไฟฟ้าเป็นโหลดชนิดเฟสเดียว ซึ่งจะดึงกระแสเพียงคู่เฟสเดียวจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ส่วนอีกเฟสที่เหลือจะไม่มีกระแสไหลอยู่เลย นั่นคือกระแสไหลของระบบรถไฟฟ้ามีความไม่สมดุลสูงมาก ซึ่งทำให้มีกระแส  $\hat{I}_2$  ปริมาณมากไหลในระบบไฟฟ้าส่งผลให้ระดับแรงดันไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

## 5. การวิเคราะห์ปัญหา

ระดับแรงดันไม่สมดุลที่จุดเชื่อมต่อของระบบรถไฟฟ้าเป็นผลรวมของ แรงดันไม่สมดุลที่มีอยู่เดิมในระบบ (Background Voltage Unbalance - ซึ่งเกิดจากโหลดไม่สมดุลที่มีอยู่เดิมในระบบและ/หรือความไม่สมดุลของอิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้าเอง) และแรงดันไม่สมดุลซึ่งเกิดจากโหลดที่จะมาเชื่อมต่อใหม่ เนื่องจากแรงดันไม่สมดุลเป็นปริมาณเวกเตอร์ คือปริมาณที่มีทั้งขนาดและมุม การรวมกันจึงต้องรวมกันทางเวกเตอร์ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในกรณีเลวร้ายที่สุดซึ่งแรงดันไม่สมดุลแต่ละส่วนมีมุมตรงกัน กรณีนี้สามารถคำนวณหาผลรวมของแรงดันไม่สมดุลได้จากการบวกกันของขนาดแรงดันไม่สมดุลโดยตรง นั่นคือ

$$VU_T = VU_B + VU_{NL} \quad (5)$$

เมื่อ  $VU_T$  = ขนาดแรงดันไม่สมดุลรวมที่จุดเชื่อมต่อ (%)

$VU_B$  = ขนาดแรงดันไม่สมดุลที่มีอยู่เดิมในระบบ (%)

$VU_{NL}$  = ขนาดแรงดันไม่สมดุลซึ่งเกิดจากโหลดที่จะมาเชื่อมต่อใหม่ (%)

เพื่อควบคุมไม่ให้ระดับแรงดันไม่สมดุลรวมในระบบไฟฟ้ามีค่าสูงเกินไปจนส่งผลเสียต่อการทำงานของมอเตอร์ 3 เฟส การไฟฟ้านครหลวงจึงกำหนดไว้ว่าแรงดันไม่สมดุลรวมที่จุดเชื่อมต่อของระบบรถไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกิน 1% และจากการตรวจวัดขนาดแรงดันไม่สมดุลที่มีอยู่เดิมในระบบพบว่า มีค่า 0.4% ดังนั้นจากสมการที่ (5) ระดับแรงดันไม่สมดุลอันเกิดจากโหลดของระบบรถไฟฟ้าต้องมีค่าไม่เกิน 1.0% - 0.4% = 0.6%

ขนาดของแรงดันไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า 3 เฟสอันเนื่องจากการจ่ายไฟให้กับโหลดชนิดเฟสเดียวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ดังนี้

$$VU = \frac{S_{1P}}{S_{SC} + S_{1P}} \times 100 \tag{6}$$

เมื่อ  $VU$  = ขนาดแรงดันไม่สมดุลเนื่องจากโหลดเฟสเดียว (%)

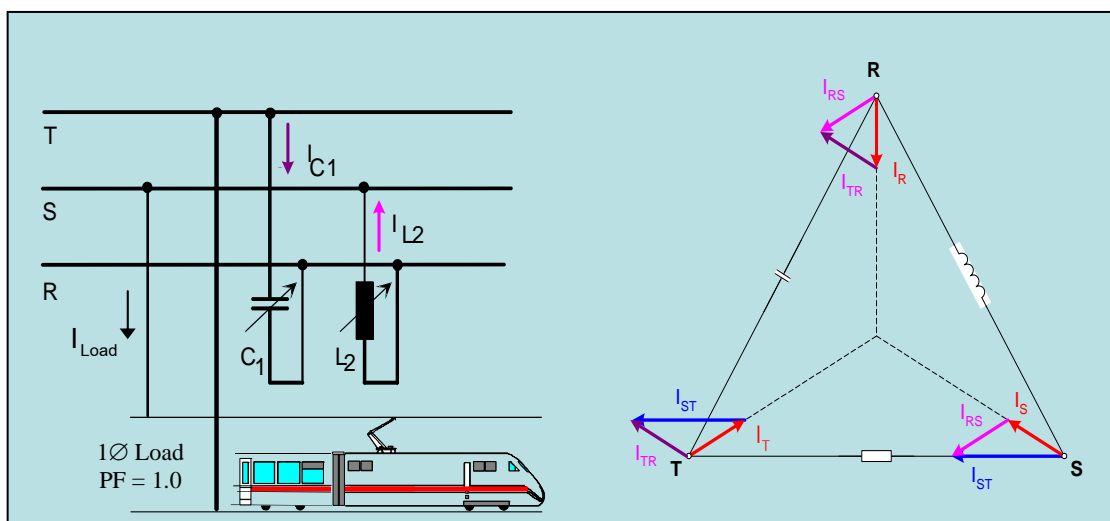
$S_{1P}$  = ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดเฟสเดียว (MVA)

$S_{SC}$  = ขนาดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดเชื่อมต่อของโหลดเฟสเดียว (MVA)

ในกรณีของระบบรถไฟฟ้ายาน เนื่องจากหม้อแปลงเฟสเดียวทั้ง 2 ลูกต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสในคู่เฟสเดียวกันคือเฟส A และ B ดังนั้น โหลดของหม้อแปลงทั้ง 2 ลูกจึงพิจารณาได้ว่าเป็นโหลดเฟสเดียวขนาดใหญ่เพียงตัวเดียวซึ่งมีขนาดโหลดรวม 20 MVA และที่จุดเชื่อมต่อของระบบรถไฟฟ้ายานมีกำลังไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 2,366 MVA ดังนั้นจากสมการที่ (6) ระดับแรงดันไม่สมดุลที่เกิดจากระบบรถไฟฟ้ายานมีค่าเท่ากับ  $[20 / (2366 + 20)] \times 100 = 0.84\%$  ซึ่งเมื่อรวมกับระดับแรงดันไม่สมดุลที่มีอยู่เดิมในระบบ จะทำให้แรงดันไม่สมดุลรวมที่จุดเชื่อมต่อของระบบรถไฟฟ้ายานมีค่าเป็น  $0.4\% + 0.84\% = 1.24\%$  ซึ่งสูงเกินขีดจำกัดที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนดที่ 1.0%

### 6. แนวทางการแก้ปัญหา

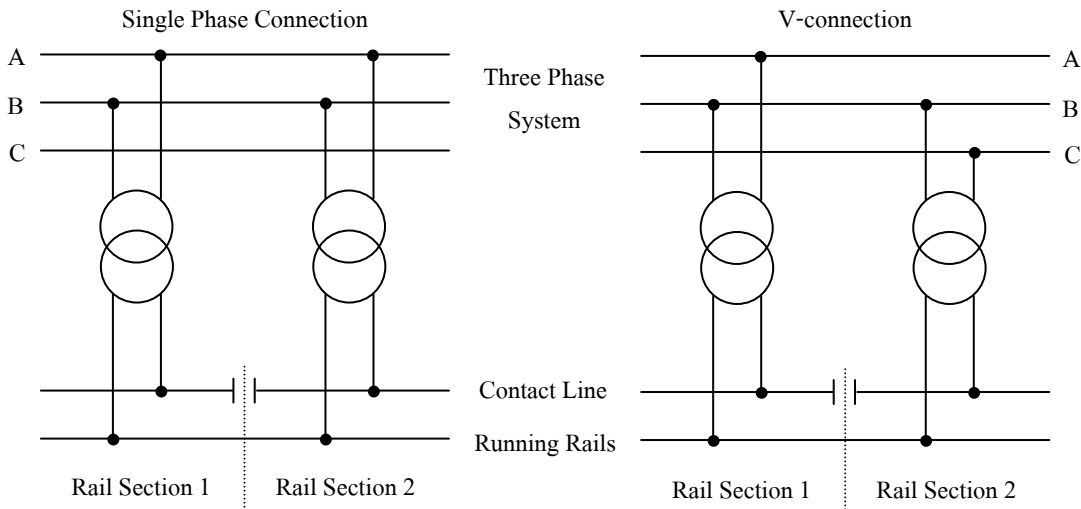
การแก้ปัญหากระแสโหลดไม่สมดุลเนื่องจากโหลดเฟสเดียวโดยสมบูรณ์นั้นสามารถทำได้โดยการติดตั้ง Static VAR Compensator (SVC) เพื่อทำหน้าที่ปรับกระแสโหลดทั้งสามเฟสให้มีความสมดุลกัน SVC มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วย Inductor และ Capacitor ชนิดปรับค่าได้ติดตั้งในคู่เฟสที่ไม่ได้ต่อเชื่อมโหลดเฟสเดียว โดยโหลดเฟสเดียวต้องทำการชดเชยค่า Reactive Power จนมีค่า Power Factor เป็น 1.0 หากสามารถปรับค่าของ Inductor และ Capacitor จนกระแสที่ไหลผ่าน Inductor และ Capacitor มีขนาดเป็น  $1/\sqrt{3}$  เท่าของกระแสโหลดเฟสเดียว (ที่ชดเชย Power Factor เป็น 1.0 แล้ว) กระแสรวมที่ไหลในระบบไฟฟ้าสามเฟสจะมีความสมดุลกัน



รูปที่ 4 Static VAR Compensator สำหรับแก้ปัญหากระแสไม่สมดุลจากโหลดเฟสเดียว

อย่างไรก็ตามกรณีโหลระบบรถไฟไฟฟ้า กระแสโหลจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการเร่งหรือเบรกขบวนรถ ดังนั้นจึงต้องปรับค่า Inductor และ Capacitor อยู่ตลอดให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของกระแสโหล ซึ่งจำเป็นต้องใช้ Solid State Switch ในการควบคุม ประกอบกับโหลรถไฟไฟฟ้าเป็นโหลขนาดใหญ่ซึ่งมีกระแสโหลหลายร้อยแอมแปร์ จึงต้องใช้ Inductor และ Capacitor ที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ทำให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาด้วยวิธีการติดตั้ง SVC มีมูลค่าสูงมาก

การแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่งทำได้โดยการใช้หม้อแปลงเฟสเดียวจำนวน 2 ลูกมาเชื่อมต่อในแบบ V-connection เพื่อลดระดับแรงดันไม่สมดุลที่เกิดจากโหลรถไฟไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การต่อหม้อแปลงแบบ Single Phase และ V-connection สำหรับจ่ายไฟระบบรถไฟไฟฟ้า

การต่อหม้อแปลงแบบ Single Phase Connection ในรูปที่ 5 เป็นรูปแบบที่ระบบรถไฟไฟฟ้าใช้งานอยู่เดิม ซึ่งได้แสดงให้เห็นไปแล้วว่าการต่อเชื่อมในรูปแบบนี้ทำให้ระดับแรงดันไม่สมดุลที่เกิดจากระบบรถไฟไฟฟ้ามีค่าเป็น 0.84% ซึ่งเมื่อรวมกับแรงดันไม่สมดุลที่มีอยู่เดิมในระบบ 0.4% จะทำแรงดันไม่สมดุลรวมมีค่าเกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ 1.0%

การต่อหม้อแปลงแบบ V-connection สามารถช่วยลดระดับแรงดันไม่สมดุลจากโหลระบบรถไฟไฟฟ้าฯลงได้ โดยการแยกโหลออกเป็น 2 Section หม้อแปลงแต่ละลูกจ่ายโหลแยกกันแต่ละ Section และด้าน Primary ของหม้อแปลงแต่ละลูกเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสามเฟสในกลุ่มเฟสที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5 ระดับแรงดันไม่สมดุลจากโหลที่เชื่อมต่อในแบบ V-connection พิจารณาได้จากสมการที่ (7)

$$VU = \frac{S_L \cdot \sqrt{3k^2 - 3k + 1}}{S_{sc} + S_L} \times 100 \quad (7)$$

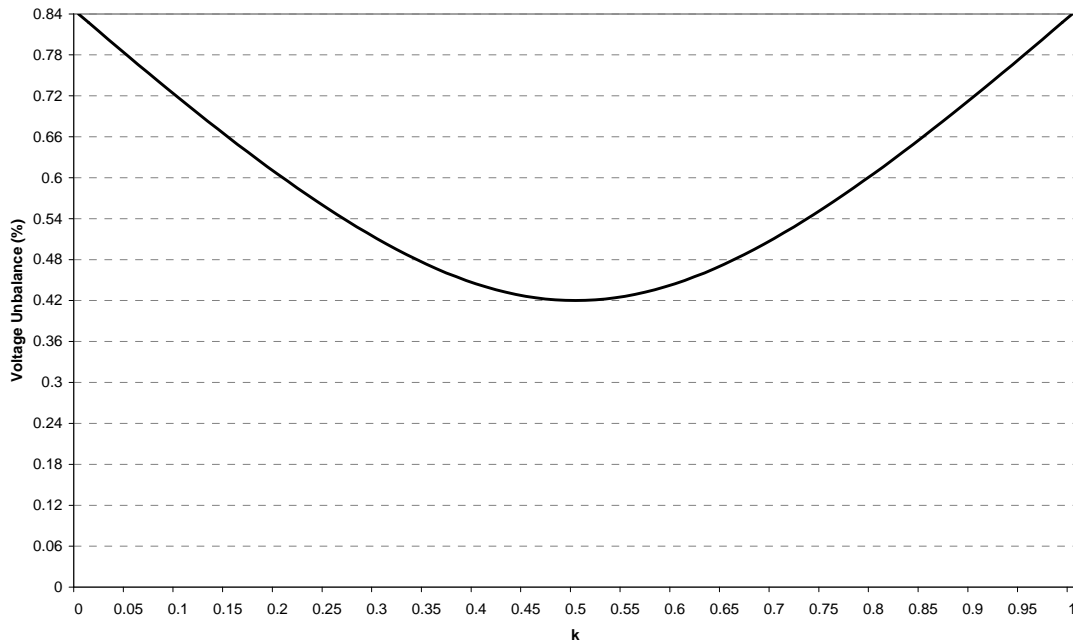
เมื่อ  $VU$  = ขนาดแรงดันไม่สมดุลเนื่องจากโหลที่เชื่อมต่อในแบบ V-connection (%)

$S_L$  = ขนาดโหลรวมของทั้ง Section 1 และ 2 (MVA)

$S_{sc}$  = ขนาดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดเชื่อมต่อ (MVA)

$k$  = อัตราส่วนของขนาดโหลใน Section 1 ต่อขนาดโหลรวมทั้ง 2 Section

คำนวณแรงดันไม่สมดุลจากการเชื่อมต่อโหลดแบบ V-connection โดยแทนค่า  $S_L = 20$  MVA  $S_{SC} = 2,366$  MVA ที่ค่า  $k$  ต่างๆ ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 6 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อ  $k = 0.5$  ซึ่งก็คือกรณีที่โหลดของทั้ง 2 Section มีค่าเท่ากัน แรงดันไม่สมดุลจะมีค่าต่ำสุดคือ 0.42% หรือมีค่าลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียวเมื่อเทียบกับกรณีกับเชื่อมต่อแบบ Single Phase Connection



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าแรงดันไม่สมดุลกรณีเชื่อมต่อ โหลดแบบ V-connection ที่ค่า  $k$  ต่างๆ

ดังนั้นหากรบบไฟฟ้าใช้การต่อหม้อแปลงในแบบ V-connection และสามารถควบคุมโหลดในแต่ละ Section ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน แรงดันไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพียง 0.42% และเมื่อรวมกับแรงดันไม่สมดุลเดิมที่มีอยู่ในระบบ 0.4% ยังคงมีค่ารวมเพียง 0.82% ซึ่งไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ 1.0%

## 7. ค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหา

การแก้ปัญหาโดยการติดตั้ง Static VAR Compensator (SVC) โดยทั่วไปแล้วมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เนื่องจากต้องใช้ Solid State Switch พิกัดแรงดันและกระแสสูงเป็นส่วนประกอบสำคัญ ค่าใช้จ่ายอาจสูงเป็นหลายสิบล้านบาทจนถึงหลายร้อยล้านบาทขึ้นอยู่กับปริมาณโหลดไม่สมดุลที่ต้องการชดเชย

การแก้ปัญหาโดยใช้หม้อแปลงเชื่อมต่อแบบ V-connection นั้นจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงแบบ Single Phase จำนวน 2 ลูกมาเชื่อมต่อกัน แต่เนื่องจากระบบบรดิไฟฟ้านี้ได้ติดตั้งหม้อแปลง Single Phase จำนวน 2 ลูกอยู่แล้ว เพื่อทำหน้าที่สำรองจ่ายไฟให้กันและกันกรณีหม้อแปลงลูกใดลูกหนึ่งเกิดชำรุดเสียหาย ดังนั้นสำหรับกรณีนี้การแก้ปัญหาโดยใช้หม้อแปลงเชื่อมต่อแบบ V-connection จึงแทบไม่มีค่าใช้จ่ายอะไรเพิ่มเติม

## 8. สรุป

แรงดันไม่สมดุลจากระบบบรดิไฟฟ้าขนส่งมวลชน มีสาเหตุมาจากโหลดของระบบบรดิไฟฟ้าซึ่งเป็นโหลดเฟสเดียวเมื่อถึงกระแสจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส กระแสโหลดจึงมีความไม่สมดุลสูงมาก เมื่อกระแสนี้

โหลดผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบจึงทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลขึ้นในระบบไฟฟ้า การแก้ปัญหาสามารถทำได้หลายแนวทาง เช่นการติดตั้ง Static VAR Compensator เพื่อชดเชยกระแสโหลดในทั้ง 3 เฟสให้สมดุลกัน ซึ่งวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์แต่ต้องใช้งบลงทุนสูงมาก การแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่งคือการจ่ายโหลดผ่านหม้อแปลงที่ต่อในแบบ V-connection วิธีการนี้ไม่ต้องลงทุนเพิ่ม แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้ก็ให้ผลอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และแทบไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม จึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหามากกว่า