

# การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่ สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย พิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่ สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้\*

ธีรยุทธ เสงี่ยมศักดิ์<sup>1)</sup> และ ประภาส ไพรสุวรรณ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

<sup>2)</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

Email : teerayus@amec.ina.melco.co.jp

## บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ผลกระทบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลโดยพิจารณาจากมุมเฟสของตัวประกอบเชิงซ้อนของความไม่สมดุลแรงดัน ที่นำเสนอนี้มีหัวใจสำคัญอยู่ที่ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex voltage unbalance factor (CVUF) ซึ่งเป็นค่าเชิงซ้อนประกอบด้วยขนาดและมุมเฟส ซึ่งในการวิเคราะห์ผลที่มีต่อกระแสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลโดยพิจารณาจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากการศึกษาและทดลองพบว่ามุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล รวมไปถึงสามารถนิยามเป็นสูตรต่าง ๆ อีกด้วย ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

**คำสำคัญ :** มอเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล กระแสเตเตอร์ มุมเฟสของค่าตัวประกอบ ความไม่สมดุลของแรงดัน

---

\* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2548 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2549

# Analysis of Unbalanced Voltage and its Effects on the Stator Currents of an Induction Motor using the Phase Angle of Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) as an Indicator<sup>\*</sup>

Teerayut Sa-ngiamsak<sup>1)</sup> and Prapas Prisuwan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Student of master degree, Department of electrical engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

<sup>2)</sup> Assoc. Professor, Department of electrical engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Email : teerayus@amec.ina.melco.co.jp

## ABSTRACT

An analysis of the steady-state currents of an induction motor supplied by unbalanced three-phase voltages is presented. The index of voltage unbalance used in this paper is the complex voltage unbalance factor (CVUF) that consists of the magnitude and phase angle. In addition to formulation and discussion of the motor operating characteristics under voltage unbalance, special emphasis is placed on the effect of the phase angle of CVUF on the motor currents. It is found that the phase angle of the CVUF is an important factor that determines the variation of currents and the level of current unbalance.

**Keywords :** motor, induction motor, unbalanced voltage, stator currents, phase angle of complex voltage unbalance factor

---

\* Original manuscript submitted: October 12, 2005 and Final manuscript received: January 11, 2006

## บทนำ

ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการทางไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านพักอาศัยเป็นระบบ 1 เฟส ส่วนการทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นระบบ 3 เฟส การต่อเข้าและปลดออกของการทางไฟฟ้า 1 เฟส ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากันด้วย จึงเป็นสาเหตุของความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสขึ้น ซึ่งการทางไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ฉะนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุล ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความเร็วรอบลดลง กระแสไม่สมดุล ทอร์คกระเพื่อม ประสิทธิภาพต่ำ อายุการใช้งานสั้นลง ฯลฯ

วิธีการที่จะหาค่าระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. The Percent Voltage Unbalance (PVU) ซึ่งถูกนิยามโดย NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ค่า PVU นี้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้งสามเฟส
2. The Voltage Unbalance Factor (VUF) ซึ่งถูกนิยามโดย IEC (International Electrotechnical Commission) ค่า VUF นี้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage กับ Positive-sequence voltage ตามลำดับ

ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ก็ต่างมุ่งเน้นและแสดงให้เห็นถึงระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล ต่างกันก็ตรงที่ PVU จะแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเพียงแค่นาฬิกานี้ซึ่งเป็นการสะดวกในการวัดในภาคสนาม ส่วน VUF จะแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการยากในการวัดในภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามค่า VUF จะบ่งบอกคุณลักษณะของระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ครบถ้วนและดีกว่าค่า PVU

ส่วนขยายของ VUF คือ ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) ซึ่งสามารถนิยามได้จาก อัตราส่วนระหว่าง Negative-sequence voltage phasor กับ Positive-sequence voltage phasor. ค่า CVUF นี้เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยขนาดและมุมทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากในการวิเคราะห์และทำนายผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

บทความฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลโดยเน้นพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีขนาดของ CVUF ที่เท่ากัน แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลไม่เท่ากันนั่นเอง

## ค่าตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF)

เมื่อ  $V_a, V_b, V_c$  คือแรงดันไฟฟ้า Line-to-Neutral ค่า Zero-sequence voltage ( $V_0$ ), Positive-sequence voltage ( $V_p$ ) และ Negative-sequence voltage ( $V_n$ ) สามารถหาได้จาก Symmetrical component [1] ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ  $a = \exp(j2\pi/3) = 1 \angle 120^\circ$  ซึ่งคือค่าของ Fortescue [2] ค่า VUF นี้ นิยามโดย IEC สามารถหาได้จาก

$$VUF = |V_n / V_p| \times 100\% \quad (2)$$

ในขณะที่ CVUF สามารถหาค่าได้จาก [3]

$$k_v = V_n / V_p = k_v \cdot \exp(j\theta_v) = k_v \angle \theta_v \quad (3)$$

เมื่อ  $k_v$  คือขนาด และ  $\theta_v$  คือ มุม ของ CVUF

สำหรับ Symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ก็สามารถหาได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่อให้  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย จะสามารถหาค่า ( $U_0, U_p, U_n$ ) ได้ดังนี้ [1]

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_p \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (4)$$

สำหรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย จะมีผลรวมของเฟสเซอร์ในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นศูนย์เสมอ ดังนั้น Zero-sequence จะไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ( $U_0 = 0$ ) นั่นคือ Positive และ Negative-sequence เท่านั้นที่มีผลต่อ Symmetrical component ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายโดยสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ [1]

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_p \\ U_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากนิยามสามารถหาค่า CVUF ได้จาก

$$k_u = U_n / U_p = k_u \cdot \exp(j\theta_u) = k_u \angle \theta_u \quad (6)$$

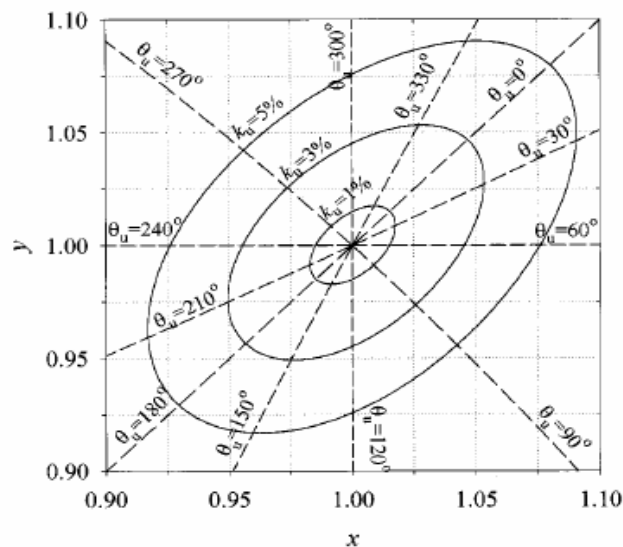
และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_v$  และ  $k_u$  ได้ดังนี้

$$k_u = k_v \cdot \exp(-j60^\circ) \quad (7)$$

เราพบว่าเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส เมื่อนำมาเรียงต่อกันจะเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังนั้นเมื่อให้ขนาดของด้านใดด้านหนึ่งเป็นค่าอ้างอิง ในที่นี้ให้  $U_{bc}$  จะได้อัตราส่วนของแรงดันแต่ละด้านต่อค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงดังต่อไปนี้

$$U_{bc} : U_{ab} : U_{ca} = 1 : x : y \quad (8)$$

เมื่อ  $x = U_{ab} / U_{bc}$  และ  $y = U_{ca} / U_{bc}$  ค่า  $(k_u, \theta_u)$  และค่า  $(x, y)$  จะมีความสัมพันธ์กันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง นั่นคือถ้าทราบค่า  $(k_u, \theta_u)$  ก็จะสามารถหาค่า  $(x, y)$  ได้จากสมการที่ (5), (6) และ (8) และในทำนองเดียวกันถ้าทราบค่า  $(x, y)$  ก็จะสามารถใช้กฎของ Cosine หามุมแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมได้ ซึ่งก็หมายความว่าสามารถหาค่า  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  ได้ และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (4) และ (6) ก็จะสามารถหาค่า  $(k_u, \theta_u)$  ได้ วิธีของจุดของค่าคงที่  $k_u$  และ  $\theta_u$  ในกราฟแกน  $x$  และแกน  $y$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.

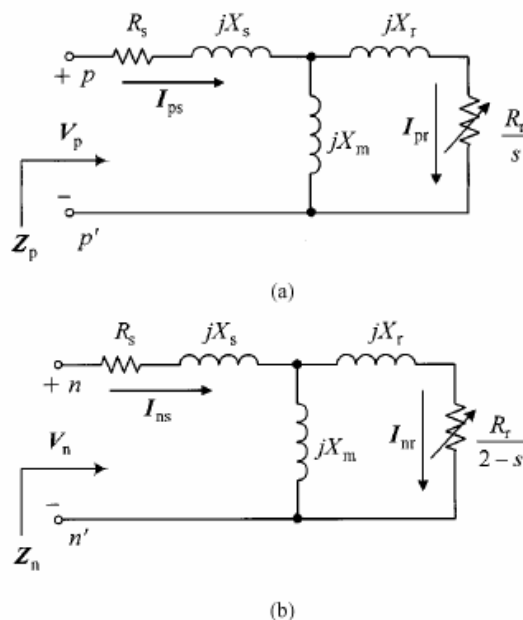


รูปที่ 1 วิธีของจุดของค่าคงที่  $k_u$  และ  $\theta_u$  ในกราฟแกน  $x$  และแกน  $y$

จากรูปที่ 1 พบว่าวิถีของจุดของค่าคงที่  $k_u$  จะมีลักษณะคล้ายวงรี ในขณะที่ค่าคงที่  $\theta_u$  มีวิถีของจุดใกล้เคียงกับเส้นตรง ที่ตำแหน่ง  $(x, y) = (1, 1)$  คือตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสสมดุลซึ่งจะมีค่า  $k_u = 0$  และสำหรับค่า  $k_u$  ที่มีค่ามากขึ้นจะมีระยะทางออกห่างจากตำแหน่ง  $(1, 1)$  ตามลำดับถ้าพิจารณาค่า  $k_u$  ค่าหนึ่งจะพบว่าสามารถประกอบด้วยค่า  $x$  และ  $y$  ที่มีค่าหลายค่าไม่สิ้นสุด ซึ่งจะพบว่าค่า  $\theta_u$  มีความสำคัญมากในการแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนระหว่าง  $U_{bc} : U_{ab} : U_{ca} = 1 : x : y$  โดยมีค่าอ้างอิงคือค่า  $U_{bc}$

จากรูปที่ 1 พบว่าสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในการวัดในภาคสนาม ที่สามารถบอกค่าของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ทั้งขนาดและมุม ซึ่งสามารถยกตัวอย่างง่าย ๆ ได้ดังนี้ ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้า  $U_{bc} = 380\text{V}$ ,  $U_{ab} = 351.5\text{V}$ ,  $U_{ca} = 380\text{V}$  สามารถหาค่า  $x$  และ  $y$  ได้ดังนี้  $x = U_{ab} / U_{bc} = 351.5 / 380 = 0.925$  และ  $y = U_{ca} / U_{bc} = 380 / 380 = 1.0$  เราสามารถหาค่า VUF จากรูปที่ 1 ได้เท่ากับ 5% และมุม  $\theta_u = 240^\circ$  เมื่อ  $k_u$  มีค่าคงที่จะพบว่าค่า  $\theta_u$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $360^\circ$  ซึ่งจะพบว่าค่า  $x$  และค่า  $y$  จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างมาก ยกตัวอย่างเช่น สำหรับค่าคงที่  $k_u = 3\%$  ค่า  $x$  และค่า  $y$  จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 1.053 ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถบอกเป็นนัยได้ถึงความสำคัญของ  $\theta_u$  ในการบอกค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของมอเตอร์ (a) วงจร Positive-sequence, (b) วงจร Negative-sequence

จากรูปที่ 2 แสดงวงจร Positive-sequence และ Negative-sequence ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณาเพียงเฟสเดียว เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ จึงสมมติให้ค่าตัวแปรต่างๆที่อยู่ในวงจรรูปที่ 2(a) และ 2(b) มีค่าคงที่ และค่าความสูญเสียทางกลซึ่งประกอบด้วยแรงเสียดทานและค่าความสูญเสียจาก ลมไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วย

## การวิเคราะห์ในสภาวะ STEADY-STATE

### กระแส และ Current Unbalance Factor

เมื่อแรงดันไฟฟ้า Positive-sequence  $V_p$  ถูกเขียนให้อยู่ในรูป Polar form.

$$V_p = V_p \angle \beta \quad (9)$$

และเมื่อพิจารณานิยามของ CVUF เราสามารถหา Negative-sequence voltage  $V_n$  ได้ดังนี้

$$V_n = k_v V_p \angle (\beta + \theta_v) \quad (10)$$

Symmetrical component ของ กระแสของขดลวด Stator สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_{ps} = V_p / Z_p = (V_p / Z_p) \angle (\beta - \phi_p) \quad (11)$$

$$I_{ns} = V_n / Z_n = (k_v V_p / Z_n) \angle (\beta + \theta_v - \phi_n) \quad (12)$$

เมื่อ  $\phi_p$  และ  $\phi_n$  คือ มุมของ  $Z_p$  และ  $Z_n$  ตามลำดับ และกระแสของขดลวด stator สามารถหาได้ดังนี้

$$I_a = I_{ps} + I_{ns} \quad (13)$$

$$I_b = a^2 I_{ps} + a I_{ns} \quad (14)$$

$$I_c = a I_{ps} + a^2 I_{ns} \quad (15)$$

ระดับของความไม่สมดุลของกระแส Stator สามารถหาค่าได้โดยใช้ Current Unbalance Factor (CUF) ซึ่งก็มีนิยามที่คล้ายคลึงกับ VUF ดังนี้

$$CUF = k_c = |I_{ns} / I_{ps}| = \frac{V_n / Z_n}{V_p / Z_p} = (Z_p / Z_n) \cdot k_v \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k_c$  และ  $k_v$  ค่าตัวประกอบกระแสไฟฟ้าไม่สมดุล Complex Current Unbalance Factor (CCUF) สามารถหาได้จากสมการที่ (9) – (12)

$$\text{CCUF} = k_c = k_c \angle \theta_c = \frac{\mathbf{I}_{ns}}{\mathbf{I}_{ps}} = \frac{Z_p}{Z_n} \cdot k_v \angle (\theta_v + \varphi_p - \varphi_n) \quad (17)$$

เมื่อ

$$\theta_c = \theta_v + \varphi_p - \varphi_n \quad (18)$$

สามารถเขียนขนาดของกระแสของมอเตอร์ในสมการที่ (13) – (15) ให้อยู่ในเทอมของ  $k_c$  และ  $\theta_c$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_a &= |\mathbf{I}_{ps} + \mathbf{I}_{ns}| = |\mathbf{I}_{ps} + k_c \mathbf{I}_{ps}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos \theta_c} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} I_b &= |\mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{ps} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{ns}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos(\theta_c - 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} I_c &= |\mathbf{a} \mathbf{I}_{ps} + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{ns}| \\ &= I_{ps} \sqrt{1 + k_c^2 + 2k_c \cos(\theta_c + 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (21)$$

ค่ากระแส Stator เปลี่ยนแปลงสูงสุดในช่วง  $k_v$  คงที่ ( $\Delta I_{max}$ )

เรานิยามให้  $I_{max}$  คือ กระแส Stator สูงสุด

$$I_{max} = \max(I_a, I_b, I_c) \quad (22)$$

จากสมการที่ (19) – (21) สามารถหาค่าสูงสุดของ  $I_{max}$  ได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $I_{ps}(1+k_c)$  เมื่อ  $\theta_c$  มีค่าเท่ากับ 0,  $2\pi/3$  และ  $4\pi/3$  จากสมการที่ (18) สามารถหาค่า  $\theta_v$  ในที่นี้ให้มามีค่าเท่ากับ  $\hat{\theta}_v$  ซึ่งก็คือค่า  $\theta_v$  ที่กระแส  $I_{max}$  สูงที่สุดได้ดังนี้

$$\hat{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \quad (23)$$

เมื่อ  $n = 0, 1$  และ  $2$  ซึ่งจะทำให้ได้ค่า  $I_{max}$  ที่เกิดขึ้นที่เฟส a, b และ c ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเรา

สามารถหาค่าต่ำสุดของ  $I_{max}$  ได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $I_{ps} \sqrt{1+k_c+k_c^2}$  เมื่อ  $\theta_c = \pi, -\pi/3$  และ  $\pi/3$  ในที่นี้สามารถหาค่า  $\bar{\theta}_v$  ซึ่งก็คือค่า  $\theta_v$  ในสภาวะ  $I_{max}$  ต่ำสุดดังนี้

$$\bar{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \pm \pi/3 \quad (24)$$

เมื่อ  $n = 0, 1$  และ  $2$  ซึ่งจะทำให้ได้ค่า  $I_{max}$  ที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นที่เฟส a, b และ c ตามลำดับ ซึ่งขอบเขตของ  $I_{max}$  สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$I_{ps} \sqrt{1+k_c+k_c^2} \leq I_{max} \leq I_{ps} (1+k_c) \quad (25)$$

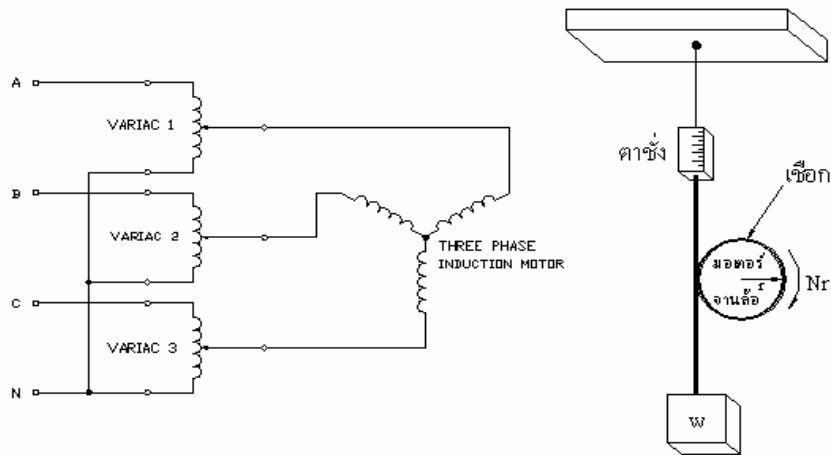
และช่วงของการเปลี่ยนแปลงของ  $I_{max}$  สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta I_{max} &= I_{ps} \left( 1+k_c - \sqrt{1+k_c+k_c^2} \right) \\ &= \frac{V_p}{Z_p} \left[ 1+k_v \frac{Z_p}{Z_n} - \sqrt{1+k_v \frac{Z_p}{Z_n} + \left( k_v \frac{Z_p}{Z_n} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

### การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยพิจารณาจากมุมของตัวประกอบแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล CVUF โดยที่มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็น มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า Frame No. 80M, IP 22, Insulation class B พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380V ความถี่ 50 Hz กระแส 1.9A ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที โรเตอร์เป็นแบบ Squirrel Cage ในการทดสอบ ต่อมอเตอร์แบบ Star isolated neutral โดยมี Single phase variac ขนาด 1 kVA จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 4A สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ 0 - 250V จำนวน 3 ตัว ต่อกันแบบ Star ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าต่างๆ จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยที่ภาระทางกลของมอเตอร์คือตุ้มน้ำหนักที่ผูกติดกับเชือกที่นำมาคล้อง Pulley ของมอเตอร์โดยมีทิศทางการนำหนักที่ถ่วงตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ เพื่อถ่วงมอเตอร์ ทำให้เกิดค่า Slip ขึ้นโดยมี Tachometer ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ และมีตาชั่งสปริงดึงเชือกอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 3 ในแต่ละครั้งของการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิห้องเท่ากัน

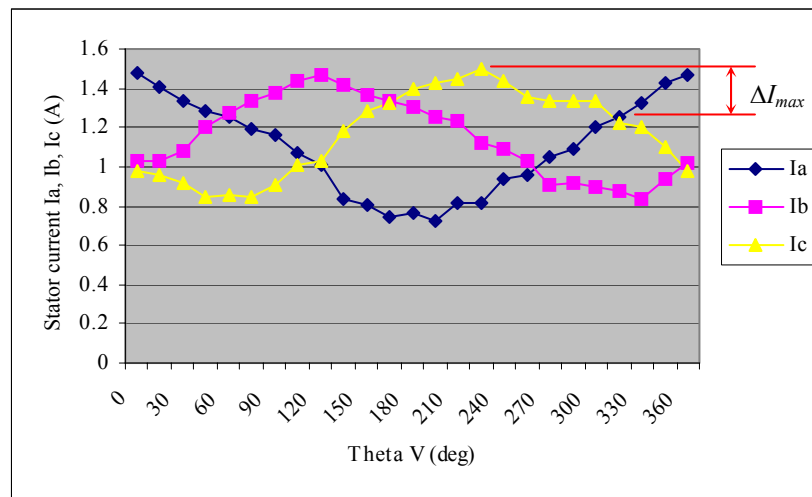
จากการทดสอบ No load test, Block rotor test และ VI method สามารถหา Impedance ของมอเตอร์หน่วยเป็นโอห์มได้ดังนี้ คือ  $R_s = 8.87$ ,  $R_r = 12.26$ ,  $X_s = 9.89$ ,  $X_r = 9.89$ ,  $X_m = 251$



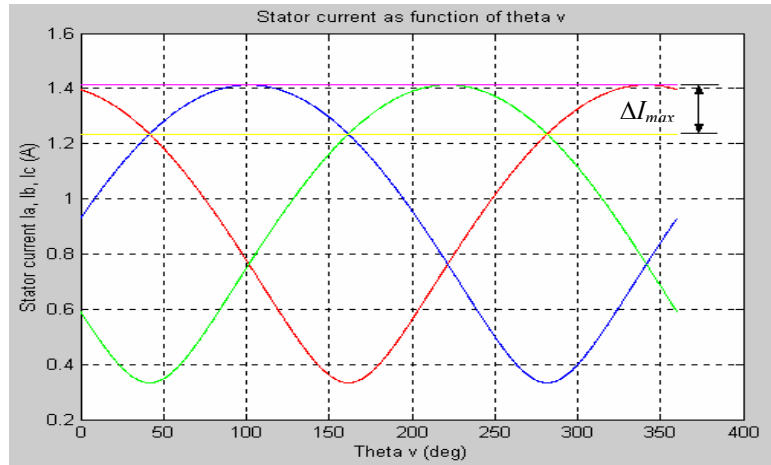
รูปที่ 3 แสดงรูปแบบการทดสอบมอเตอร์

อิทธิพลของ  $\theta_v$  ที่มีต่อกระแสของมอเตอร์

วิธีการทดสอบคือปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่า  $k_v = 6\%$  โดยให้  $\theta_v$  เปลี่ยนแปลงตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $360^\circ$  แล้ววัดค่ากระแสของเฟส A, B, C ในขณะที่มอเตอร์มีค่า Slip 0.015



รูปที่ 4 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $\theta_v$  โดยที่  $\theta_v$  เปลี่ยนแปลงตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $360^\circ$  สำหรับค่า  $k_v = 6\%$  และ ค่า Slip = 0.015

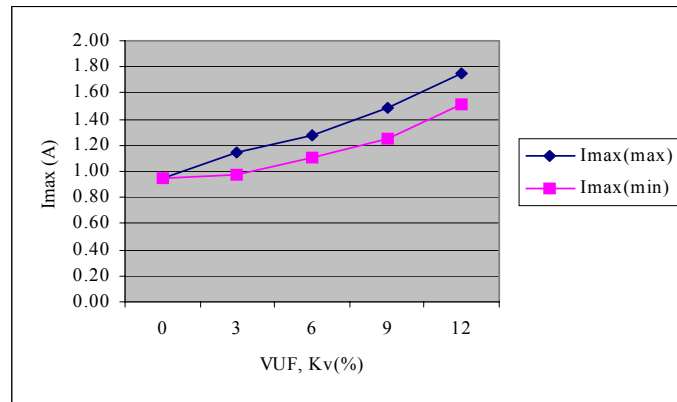


รูปที่ 5 กระแส Stator ของเฟส A, B, C ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $\theta_v$  โดยที่  $\theta_v$  เปลี่ยนแปลงตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $360^\circ$   
สำหรับค่า  $k_v = 6\%$  และ ค่า Slip = 0.015 เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการที่(19)-(21)

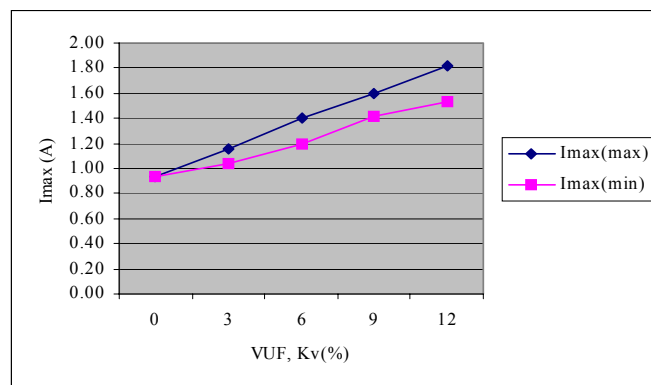
จากผลการทดลองพบว่ากระแสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสอดคล้องกับสมการที่ (19) - (21) และจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ  $\theta_v$  โดยจะมีค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุดของ  $I_{max}$  ที่มุมของ  $\theta_v$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (23) และ (24) ตามลำดับ ดังเช่นผลการทดสอบจากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 5.

#### ช่วงของกระแส Stator เปลี่ยนแปลงสูงสุด $\Delta I_{max}$

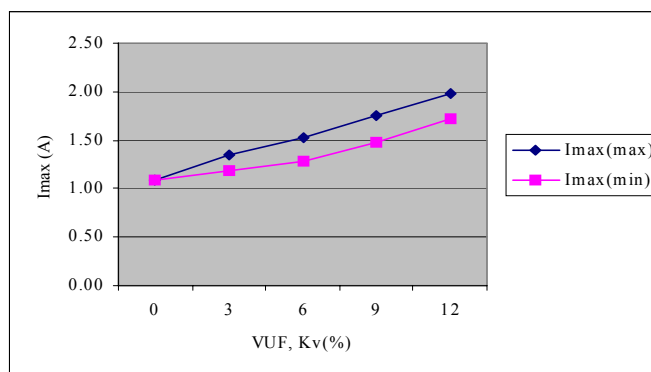
การทดสอบในขั้นตอนนี้ จะทำการทดสอบมอเตอร์ที่ค่า  $k_v = 0, 3, 6, 9, 12\%$  และที่  $\theta_v = \hat{\theta}_v$  และ  $\bar{\theta}_v$  ตามลำดับ แล้วทำการวัดค่ากระแส Stator ที่เกิดขึ้นที่เฟส A โดยในที่นี้จะขอเรียกกระแส Stator ที่เกิดขึ้นที่มุม  $\theta_v = \hat{\theta}_v$  ว่า  $I_{max}(max)$  และเรียกกระแส Stator ที่เกิดขึ้นที่มุม  $\theta_v = \bar{\theta}_v$  ว่า  $I_{max}(min)$  โดยจะทำการทดสอบที่ค่า Slip = 0.001, 0.015, 0.03 ตามลำดับ ผลการทดสอบสามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 6 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.001

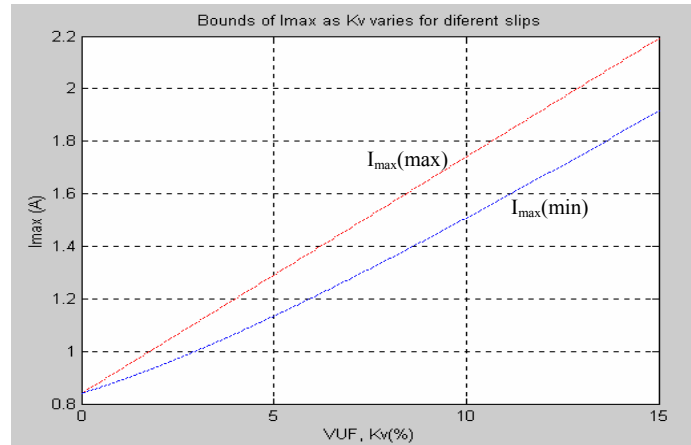


รูปที่ 7 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.015

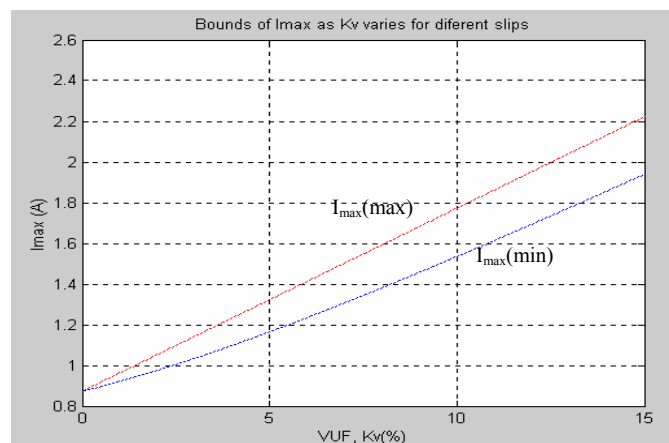


รูปที่ 8 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.03

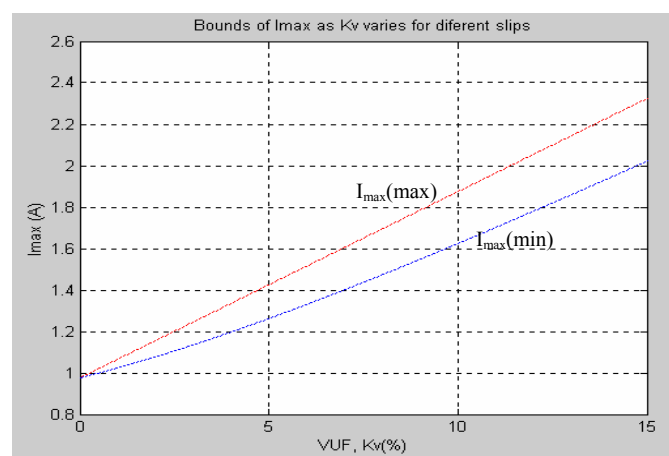
การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลต่อกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 153  
โดยพิจารณาจากมุมเฟสของค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของแรงดันเป็นตัวบ่งชี้



รูปที่ 9 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.001เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 10 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.015เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 11 กระแส Stator ของ Phase A ที่ Slip 0.03เมื่อทำการพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB

จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าคงที่  $k_v$  ค่าหนึ่งจะมีค่า  $I_{max}$  ได้หลายค่าระหว่างขอบเขตสูงสุดและขอบเขตต่ำสุด  $\Delta I_{max}$  ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากอิทธิพลของ  $\theta_v$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (25) และ (26) ดังเช่นผลการทดสอบจากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 9 - 11 ซึ่งค่า  $\theta_v$  นี้จะมีค่าไม่ค่อยแน่นอนขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สำหรับการออกแบบพิกัดของมอเตอร์ หรือออกแบบระบบป้องกัน จะต้องพิจารณากรณีที่กระแส Stator มีค่าเท่ากับ  $I_{max}(\max)$  ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกว่า กรณีที่เลวร้ายที่สุด

## บทสรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของกระแสที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล CVUF ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ  $k_v$  และ  $\theta_v$  ที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล บทความฉบับนี้จะเน้นพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของ  $\theta_v$  ซึ่งไม่ค่อยมีการพูดถึงมากนักในการนำเสนอบทความ ค่าสูงสุดของกระแสสเตเตอร์ ( $I_{max}$ ) จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับค่าของ  $k_v$  และ  $\theta_v$  สำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุดจะถูกพิจารณาเพื่อป้องกันมอเตอร์มีความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจะพบว่าค่า  $k_v$  และ  $\theta_v$  จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท MITSUBISHI ELEVATOR ASIA CO., LTD โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผนก QA คุณบุญเลิศ เต็กสงวน, คุณชัยพร มาลาจำปี และเพื่อนพนักงานทุกคนที่ห้อง Calibration ที่ช่วยเหลือ และเอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทดลองครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ดร.สิริลลิตพิทย์ สิ้นธุสนธิชาติ ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

- William D. Stevenson, Jr. 1982. "Element of Power System Analysis". 4<sup>th</sup> Edition. McGraw- Hill. pp.278-279
- IEEE Guide for AC Motor Protection. 1988. IEEE Standards Board. ANSI/IEEE C37.96-1988
- Y. J. Wang. 2000. "An analytical study on steady-state performance of an induction motor connected to unbalanced three-phase voltage". IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore.
- รัชต์ มั่งมีชัย 2543 "การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง