

แบบจำลองเตาหลอมไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ในย่านความถี่ฮาร์มอนิกของโรงกลั่น

Model of Induction Furnace in Harmonic Region of the Royal Thai Mint

มนชนก ศรีสารคาม และ เกียรติยุทธ กัญญาณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: ktnuvo@hotmail.com, fengkyk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาแบบจำลองทั่วไปของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำในย่านฮาร์มอนิก โดยศึกษาารูปแบบกระแสและแรงดันของเตาหลอม 3 เตา ขนาด 450, 225 และ 70 กิโลวัตต์ พบว่า กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานสามารถเขียนออกมาเป็นความสัมพันธ์ในรูปสมการพหุนามอันดับ 2 แบบจำลองเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าในอนาคตได้ นอกจากนี้แบบจำลองเตาหลอมดังกล่าวยังสามารถนำไปแก้ไขหรือลดปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

คำสำคัญ

เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ ความถี่ฮาร์มอนิก แบบจำลองของเตาหลอมไฟฟ้า โรงกลั่น

Abstract

This research is to determine a general model of the induction furnace in harmonic region. The current and voltage measurement data of the furnaces are studied. From this research, the harmonic current pattern of all induction furnaces when compare with the fundamental current is second order polynomial equation. The induction furnace models from this research can be used for analyzing the harmonic in the power system. The harmonic results from the induction furnaces in both cases of already installed and new installation in the future. And also to solve or reduce harmonic in power system for improving power quality.

Keyword

induction, furnace harmonic frequency, model of the induction furnace, The Royal Thai Mint

1. คำนำ

ปัจจุบันระบบเงินตราของประเทศไทยประกอบด้วย เหรียญกษาปณ์และธนบัตร โดยเหรียญกษาปณ์ถือเป็นวัตถุที่สำคัญสำหรับใช้หมุนเวียน แลกเปลี่ยนในระบบเศรษฐกิจ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบหมุนเวียนและแบบที่ระลึก โรงกษาปณ์เป็นหน่วยงานที่ผลิตเหรียญกษาปณ์แบบหมุนเวียนที่ใช้ในชีวิตประจำวันเพียงแห่งเดียวในประเทศไทย การผลิตเหรียญกษาปณ์แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ 1. การทำแม่แบบ 2. การผลิตดวงตรา 3. การผลิตเหรียญตัวเปล่า และ 4. การตีตราเหรียญสำเร็จ ในขั้นตอนการผลิตเหรียญตัวเปล่าจะมีอุปกรณ์ซึ่งมีความสำคัญ คือ เตาลอมโลหะ ในปัจจุบันเตาลอมที่ใช้อยู่สามารถแบ่งได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับรูปแบบการให้ความร้อน โดยรูปแบบการให้ความร้อนของเตาลอมโลหะนั้นมีอยู่ 2 ประเภท คือ ใช้เชื้อเพลิงและใช้กระแสไฟฟ้าในการทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นมา เตาลอมที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ในปัจจุบัน ได้แก่ เตาลอมแบบที่ใช้กระแสไฟฟ้า เนื่องจากเตาลอมดังกล่าวสามารถควบคุมได้ง่ายแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เตาลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) และเตาลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) เมื่อพิจารณาเตาลอมไฟฟ้าเป็นโหลดในระบบไฟฟ้า กำลัง พบว่าเตาลอมไฟฟ้างกล่าวเป็นโหลดไม่เชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดประเภทนี้มีลักษณะเด่นเฉพาะ คือ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Harmonics) คือ คลื่นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) สัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณความถี่มูลฐานกับสัญญาณฮาร์มอนิกจะมีรูปร่างผิดเพี้ยน [1-2] โดยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นดังกล่าวถือเป็นมลภาวะที่สำคัญประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง[3] การศึกษาฮาร์มอนิกของเตาลอมไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

จะทำให้ทราบรูปแบบการกระจายของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆของเตาลอมไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานวิจัยที่ผ่านมา แบบจำลองเตาลอมแบบเหนี่ยวนำในย่านฮาร์มอนิก[4] มีรูปแบบความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆที่ทุกพิกัดเตาลอมดังนี้ เตาลอมแบบไม่มีแกนเหล็ก

$$I_h / I_1 = 1/h \text{ เมื่อ } h = 6k \pm 1 \text{ โดยที่ } k = 1, 2, 3, \dots$$

เตาลอมแบบมีแกนเหล็ก

$$I_h / I_1 = (0.058P - 3.194)e^{-0.396(h-3)}$$

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาแบบจำลองเตาลอมแบบเหนี่ยวนำในย่านฮาร์มอนิกที่ใช้ในโรงกษาปณ์เพื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเตาลอมแบบเหนี่ยวนำเดิม ซึ่งแบบจำลองเตาลอมที่ได้ดังกล่าวนั้นสามารถนำมาเป็นข้อมูลสำหรับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังตลอดจนหาทางแก้ไขหรือลดปัญหาฮาร์มอนิกของเตาลอมแบบเหนี่ยวนำและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วย

2. ทฤษฎีทางไฟฟ้าของเตาลอมไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

เตาลอมแบบเหนี่ยวนำเป็นเตาลอมที่ให้ความร้อนกับโลหะภายในเตาลอมโดยวิธีการทางไฟฟ้าเพื่อให้โลหะหลอมละลาย โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในโลหะที่จะหลอม สามารถแบ่งตามลักษณะการหลอมออกเป็น 2 แบบ คือ มีแกนเหล็กและไม่มีแกนเหล็ก [5]

2.1 เตาลอมแบบมีแกนเหล็ก (Core Induction Furnace)

เตาลอมชนิดนี้อาศัยหลักการความร้อนที่เกิดจากกระแสจำนวนมากไหลผ่านตัวนำที่เป็นโลหะที่จะหลอม ซึ่งเตาลอมแบบนี้มีลักษณะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ในสภาพลัดวงจร (Short Circuit) และใช้งานได้เฉพาะที่ความถี่ต่ำเท่านั้น

2.2 เตาลอมแบบไม่มีแกนเหล็ก (Coreless Induction Furnace)



เมื่อพิจารณาเตาหลอมชนิดนี้พบว่าอาศัยหลัก การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในโลหะที่จะหลอม ซึ่งหลักการดังกล่าวทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจาก ฮีสเตอร์ซิสและการสูญเสียเนื่องจากกระแสนวนการสูญเสีย ของพลังงานของสนามแม่เหล็กนั้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ ในรูปพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนดังกล่าว จะมีอุณหภูมิถึงจุดใดนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

ในปัจจุบันเตาหลอมชนิดนี้มีใช้งานอยู่ 2 ประเภทโดยขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานของแหล่ง จ่าย คือ แบบความถี่ต่ำมีขนาด 50 ถึง 60 เฮิร์ต และแบบความถี่สูงมีขนาด 960 เฮิร์ตถึง 1,000 กิโลเฮิร์ต เมื่อพิจารณาเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำพบว่าเป็นโหลด ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดประเภทนี้มี ลักษณะเด่นเฉพาะ คือ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกใน ระบบไฟฟ้า

3. วิธีดำเนินการ

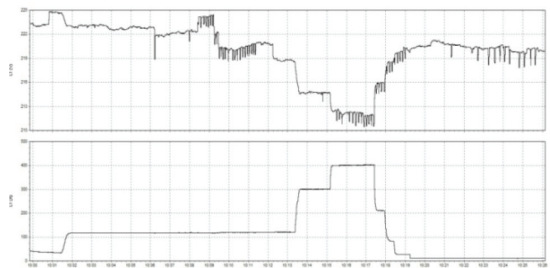
สำหรับการหาแบบจำลองเตาหลอมไฟฟ้าแบบ เหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยวิธีวัดและบันทึก ค่ากระแสและแรงดันของเตาหลอมในขณะที่เตาหลอม ทำงานเป็นระยะเวลามากกว่า 1 รอบของการ หลอม เพื่อให้ข้อมูลที่ได้เพียงพอต่อการวิเคราะห์ หลังจากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ด้วยเครื่องมือบันทึก สัญญาณแรงดันและกระแส (Power Logger) เพื่อหา องค์ประกอบของสัญญาณที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ การหา แบบจำลองกระแสฮาร์มอนิกนั้นดำเนินการโดยนำข้อมูล องค์ประกอบของสัญญาณกระแสที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ วัดได้มาวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมของเตาหลอม แบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ฮาร์มอนิก โดยใช้วิธีการทาง คณิตศาสตร์แบบโพลีโนเมียลกำลังสองน้อยที่สุด (Least-Squares Polynomial Curve Fitting) และนำแบบ

จำลองเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำที่ได้ในงานวิจัยนี้ไป เปรียบเทียบกับแบบจำลองเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำเดิม

4. ผลการทดสอบ

เตาหลอมเหนี่ยวนำภายในโรงชาปณ์จำนวน 3 เตาที่ใช้ทดสอบเป็นเตาหลอมเหนี่ยวนำแบบไม่มี แกนเหล็กมี SCR แบบ 6 พัลส์เป็นอุปกรณ์ควบคุม กระแส โดยใช้หลอมโลหะทั่วไปซึ่งได้แก่ ทองแดง บรอนซ์ ขนาดความจุของเตาเท่ากับ 350 กิโลกรัมใช้เตาหลอม (crucible) ชนิดเอียงเทได้มีจำนวน 2 เตา คือ เตาหลอม INDUCTOTHERM ขนาด 450 กิโลวัตต์ และเตาหลอม PILLAR ขนาด 225 กิโลวัตต์ ส่วนเตาหลอมที่ใช้หลอมโลหะมีค่าซึ่งได้แก่ ทองคำ เงิน ขนาดความจุของเตาเท่ากับ 35 กิโลกรัมใช้เตา หลอมเช่นเดียวกับเตาหลอมโลหะทั่วไป แต่เป็นชนิด Lift Swing มีจำนวน 1 เตา คือ เตาหลอม PILLAR ขนาด 70 กิโลวัตต์

เมื่อวัดค่าแรงดันและกระแสที่ฮาร์มอนิกลำดับ ต่างๆ ในขณะที่เตาหลอมทั้ง 3 เตาทำงานพบว่าค่า แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าเฟส A ของเตาหลอม แบบไม่มีแกนเหล็ก INDUCTOTHERM ขนาดพิกัด 450 กิโลวัตต์ขณะหลอมดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กราฟแรงดันและกระแสไฟฟ้าขณะหลอม ของ เตาหลอม INDUCTOTHERM ขนาด 450 กิโลวัตต์เฟส A

ตารางที่ 1 แสดงค่ากระแสที่ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ของเตาหลอม INDUCTOTHERM ขนาด 450 กิโลวัตต์เตาหลอม PILLAR ขนาด 225 กิโลวัตต์ และเตาหลอม PILLAR ขนาด 70 กิโลวัตต์

ลำดับฮาร์โมนิก	กระแส (แอมป์)								
	เตาหลอม INDUCTOTHERM ขนาด 450 kW			เตาหลอม PILLAR ขนาด 225 kW			เตาหลอม PILLAR ขนาด 70 kW		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	165.0803	163.1395	169.0629	213.6027	226.7836	226.3446	71.9880	71.2370	76.4650
5	27.9998	29.2288	26.7728	31.0201	28.7422	27.9033	22.7850	26.0480	23.7900
7	9.1702	10.1401	8.7810	9.7321	9.3928	9.8512	10.5840	11.5060	9.8135
11	6.9079	6.9382	6.4578	7.6554	6.8767	6.5998	8.0395	8.6720	7.3792
13	4.0230	4.6348	4.0654	3.7321	3.7453	3.9711	5.4277	5.9410	5.2944
17	3.6708	3.5459	3.2759	3.7369	3.2940	3.0786	4.6010	5.0678	4.2546
19	2.4838	2.8558	2.5301	1.8885	2.0497	2.2010	3.5580	3.9081	3.5804
23	2.1429	1.9721	1.8389	2.2489	1.9725	1.8077	3.3437	3.6996	3.0204
25	1.5558	1.8495	1.6794	1.1061	1.2548	1.3830	2.7549	2.9937	2.8477

จากค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ตามตารางที่ 1 สามารถนำมาเขียนแบบจำลองด้วยความสัมพันธ์

$$I_h = I_1 = a \cdot (h-3)^b \quad [4]$$

โดยที่ a, b ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของเตาหลอมขนาดพิกัดต่างๆ

เตาหลอม	P(MW)	a	b
INDUCTOTHERM 450 kW	0.450	56.3119	-1.1076
PILLAR 225 kW	0.225	67.9516	-1.2230
PILLAR 70 kW	0.070	40.5695	-0.8449

แบบจำลองเตาหลอม INDUCTOTHERM ขนาด 450

กิโลวัตต์คือ $I_h/I_1 = 56.3119 \cdot (h-3)^{-1.1076}$

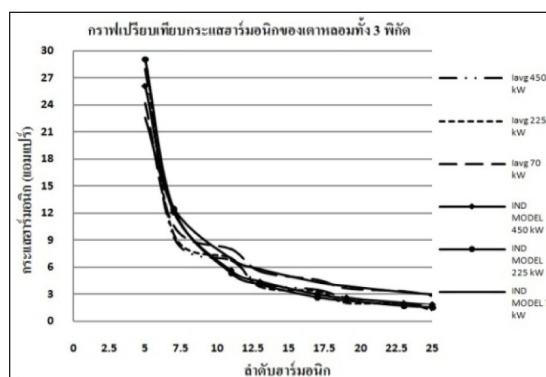
แบบจำลองเตาหลอม PILLAR ขนาด 225 กิโลวัตต์ คือ

$I_h/I_1 = 67.9516 \cdot (h-3)^{-1.2230}$

แบบจำลองเตาหลอม PILLAR ขนาด 70 กิโลวัตต์

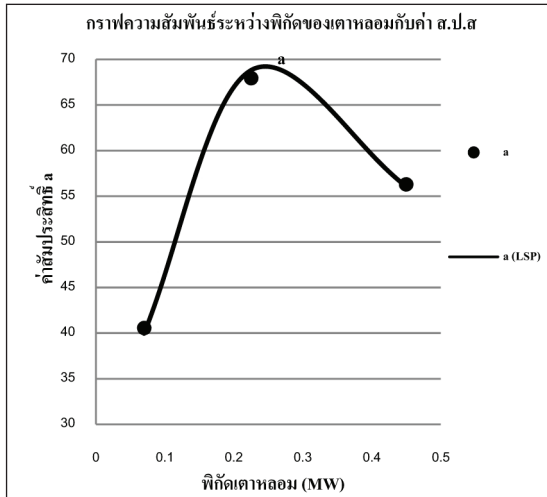
คือ $I_h/I_1 = 40.5695 \cdot (h-3)^{-0.8449}$

หลังจากนั้นนำค่ากระแสฮาร์โมนิกที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 2

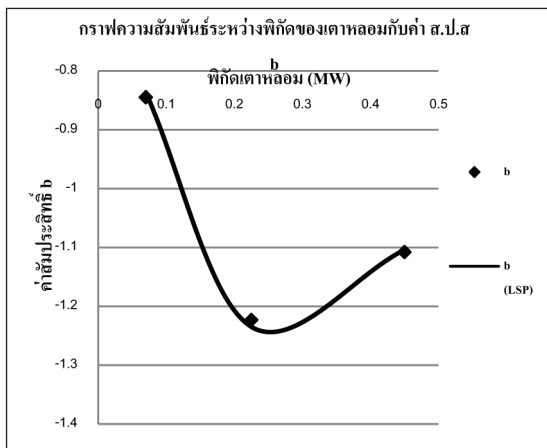


ภาพที่ 2 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ได้จากการวัดกับการคำนวณที่ฮาร์โมนิกลำดับคี่ต่างๆ ของเตาหลอมทั้ง 3 พิกัด

จากภาพที่ 2 พบว่ากราฟทั้ง 3 ขนาดของเตาหลอมมีลักษณะคล้ายกันและเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ a และ b จากตารางที่ 2 มาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับขนาดพิกัดของเตาหลอมจะได้กราฟดังในภาพที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของเตาหลอมกับค่า ส.ป.ส a



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของเตาหลอมกับค่า ส.ป.ส b

จากภาพที่ 3 และ 4 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพิกัดของเตาหลอม (P) กับค่าสัมประสิทธิ์ a และ b โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์แบบโพลิโนเมียลกำลังสองน้อยที่สุด [4] ความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลกำลังสอง (Second order polynomial) $y = c_1 + c_2x + c_3x^2$ [4] จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า P และค่า a ดังนี้ คือ $a = c_1 + c_2P + c_3P^2$ (1) และสามารถหาค่า c_1 , c_2 และ c_3 ของสมการ (1) ได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n P_i^2 \\ \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n P_i^2 & \sum_{i=1}^n P_i^3 \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 & \sum_{i=1}^n P_i^3 & \sum_{i=1}^n P_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_i \\ \sum_{i=1}^n P_i \cdot a_i \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot a_i \end{bmatrix}$$

(2)

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n P_i^2 \\ \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n P_i^2 & \sum_{i=1}^n P_i^3 \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 & \sum_{i=1}^n P_i^3 & \sum_{i=1}^n P_i^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_i \\ \sum_{i=1}^n P_i \cdot a_i \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot a_i \end{bmatrix}$$

(3)

ค่า $c_1 = 16.8544$, $c_2 = 374.6709$, $c_3 = -638.9926$

ดังนั้น $a = 16.8544 + 374.6709P - 638.9926P^2$

และจากภาพที่ 4 พบว่ากราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b กับขนาดพิกัดของเตาหลอม (P) มีลักษณะแนวโน้มเหมือนกับค่าสัมประสิทธิ์ a ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ b ได้ดังนี้ $b = -0.5261 - 5.0155P + 8.2918P^2$

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ที่อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของขนาดพิกัดของเตาหลอม (P) มาแทนลงในแบบจำลองค่ากระแสฮาร์มอนิกของเตาหลอมเหนี่ยวนำจะได้

$$\frac{I_h}{I_1} = (16.8544 + 374.6709P - 638.9926P^2) \cdot (h - 3)^{(-0.5261 - 5.0155P + 8.2918P^2)}$$

5. สรุป

จากผลการวัดกระแสและแรงดันของเตาหลอมเหนี่ยวนำในโรงกลั่นดังกล่าว พบว่าเตาหลอมทั้ง 3 เตาซึ่งเป็นเตาหลอมเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็กนั้นใช้หลักการหลอมแบบลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยมีน้ำโลหะทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิและผนังเตาทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างน้ำโลหะกับขดลวดปฐมภูมิ เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรที่ตัวขดลวดปฐมภูมิกระแสฮาร์มอนิกของเตาหลอมเหนี่ยวนำทั้ง

3 นี้มีรูปแบบเป็นไปตามพิคัดกำลัง (P) ของแต่ละเตา โดยมีความสัมพันธ์ทั่วไปในรูปสมการโพลิโนเมียลอันดับ 2 ดังสรุปในหัวข้อที่ 4 แบบจำลองเตาหลอมเหนียวนำแบบไม่มีแกนเหล็กที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้กับเตาหลอมเหนียวชนิดเดียวกันในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก รวมทั้งนำไปแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบให้ดีขึ้นด้วย นอกจากนี้เพื่อให้แบบจำลองเตาหลอมเหนียวชนิดนี้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นควรทดสอบเตาหลอมเหนียวนำอื่นๆ เพิ่มเติม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Grady, W. M. (2000). Understanding Power System Harmonics. Lecture note University of Texas at Austin
- [2] Pacific Gas and Electric Company. (1993). Power System Harmonics.
- [3] วีระพงศ์ แยมสระโส. (2552). ศึกษาและวิเคราะห์แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกของอาคารในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน).วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] เกียรติยุทธ กวีญาณ. (2546). แบบจำลองเตาหลอมแบบเหนียวนำในย่านฮาร์มอนิก. วิศวกรรมสารมก. ประจำปี 2546 ฉบับที่ 4: 11-21
- [5] วิโรจน์ หัตถเสรีพงษ์. (2544). แบบจำลองเตาหลอมแบบเหนียวนำในย่านฮาร์มอนิก. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [6] Chapra C. and Canale.P. (1989). Numerical Methods for Engineerings. McGraw-Hill Book Company.USA.