

**ผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่มีต่อชั้นที่คาปาซิเตอร์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
กรณีศึกษา: ระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 kV ภาคใต้ เขต 1 จังหวัดเพชรบุรี
IMPACTS OF HARMONIC CURRENT ON SHUNT CAPACITOR IN
A DISTRIBUTION SYSTEM CASE STUDY: THE 22 KV DISTRIBUTION
SYSTEM SOUTHERN REGION AREA 1 PHETCHABURI PROVINCE**

**ชรัณิศวรร วัตอักษร วิชากร เสงศรีวัช พศวีร์ ศรีโหมด และ เดิมพงษ์ ศรีเทศ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
2410/2 ถ.พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. 0-2579-1111 ต่อ 2272
E-mail: vichchakorn.he@spu.ac.th**

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของชั้นที่คาปาซิเตอร์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 18-2012 และ IEC 60871-3 กระแสฮาร์มอนิกถูกจำลองจากโรงงานเหล็กที่มีการใช้งานเตาหลอมไฟฟ้าและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าจริงแห่งหนึ่ง ผลการทดสอบหลายกรณีด้วยโปรแกรม DigSilent Power Factory แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อการทำงานของคาปาซิเตอร์จากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลสนับสนุนกันอยู่ในระบบ โดยแนวโน้มความรุนแรงสามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกรวม ซึ่งมีปัจจัยมาจากขนาดกำลังงานและตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ดังนั้นผลการศึกษานี้อาจถูกใช้ประกอบเพื่อการวางแผนป้องกันด้วยการกำหนดขนาดกำลังงานผลิต รวมถึงการประเมินตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบต่อคาปาซิเตอร์ในระบบได้

คำสำคัญ: ชั้นที่คาปาซิเตอร์, กระแสฮาร์มอนิก, ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

ABSTRACT

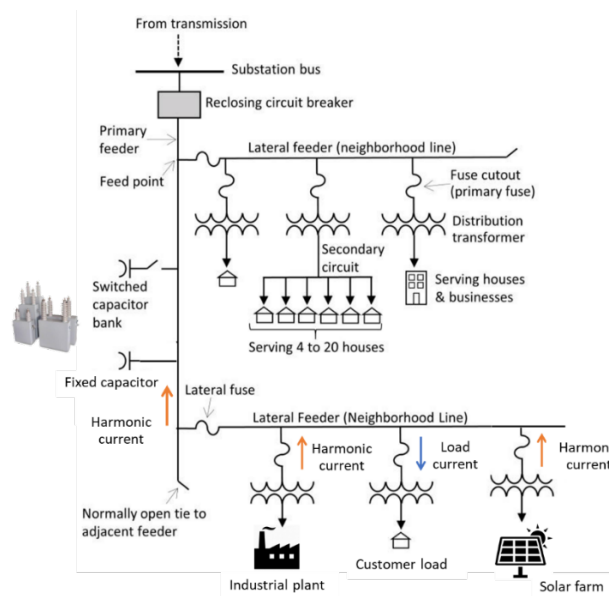
This article presents the impacts of harmonic currents on the performance of shunt capacitors in power distribution systems comply with IEEE 18-2012 and IEC 60871-3 Standards. Harmonic currents are modeled from steel mills that use electric furnaces and photovoltaic system in a real distribution system. The simulation results with DigSilent Power Factory show the effect on the capacitor operation from the harmonic currents that are contributed in the system. The trend of severity can be considered from the total harmonic distortion of current and voltage. Which is influenced by the size, power, and location of the harmonic current source. Therefore, the results of this study may be used to prevent planning by determining the size of PV-system and to evaluate the appropriate location to reduce the impact on the capacitors in the system.

Keywords : Shunt Capacitor, Harmonic Current, Photovoltaic System

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ดำเนินการจ่ายพลังงานไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 KV ให้กับผู้ใช้ไฟซึ่งมีหลายรูปแบบ อาทิ โรงงานอุตสาหกรรม ที่พักอาศัย และอื่นๆ ซึ่งบางครั้งความต้องการใช้พลังงานที่มากขึ้นอาจทำให้เกิดปัญหาแรงดันตก (Voltage Drop) ในระบบจำหน่ายโดยเฉพาะบริเวณปลายสายป้อนซึ่งอยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง (Substation) วิธีการแก้ปัญหาแบบหนึ่งคือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมักนำมาใช้คือการต่อตัวเก็บประจุขนานเข้ากับระบบหรือที่เรียกว่าชั้้นท์คาปาซิเตอร์ (Shunt Capacitor) เพื่อทำหน้าที่เพิ่มขนาดแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อรวมถึงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีทั้งแบบต่องที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 300 kVar และแบบสับเข้า-ปลดออก (Switched Capacitor) ขนาด 1800 kVar ตามภาพที่ 1

อย่างไรก็ตาม ในสภาวะการทำงานจริงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าบางระบบ มักพบปัญหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชั้้นท์คาปาซิเตอร์ หรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันชั้้นท์คาปาซิเตอร์ เช่น ครอบเอาต์ฟิวส์ (Dropout Fuse) มีการตัดวงจร แสดงให้เห็นว่ากระแสปริมาณมากกำลังไหลเข้าชั้้นท์คาปาซิเตอร์ ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานของโหลดยังคงเป็นปกติ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่มีคุณภาพเท่าที่ควร ข้อสมมติฐานหนึ่งที่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาคือ การเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) หรือโรงงานรีดเหล็กที่มีการใช้เตาหลอมไฟฟ้า (Electric Furnace) รวมถึงโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการใช้อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด (Grid Connected Inverter) ด้วยคุณลักษณะของโหลดจำพวกนี้จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current) ไหลสนับสนุนกันอยู่ในระบบ เป็นเหตุให้ปริมาณกระแสรวมมีค่าสูงเกินกว่าปกติจนทำให้เกิดความเสียหายกับชั้้นท์คาปาซิเตอร์ได้ ซึ่งทางผู้บริหารของ กฟภ. ในฐานะที่เป็นผู้ดูแลระบบเห็นว่าเหตุการณ์นี้เป็นปัญหาที่สำคัญมาก จึงมีแนวคิดในการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ตามคุณลักษณะของโหลด ว่ามีผลกระทบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าและชั้้นท์คาปาซิเตอร์มากน้อยเพียงใด เพื่อหาแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหานี้ โดยยังคงรักษาคุณภาพไฟฟ้าของระบบไว้ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

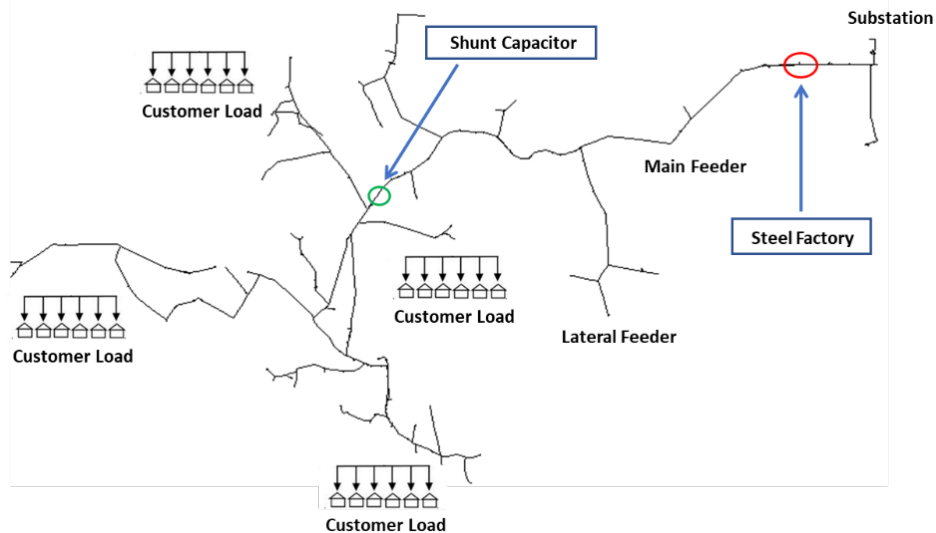


ภาพที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2. แบบจำลองของระบบ (Simulation System Modeling)

2.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System Model)

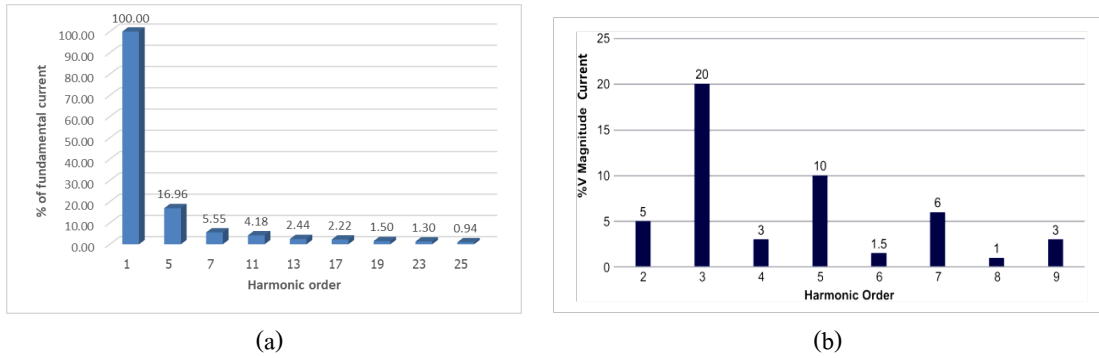
การศึกษามลกระทบจากกระแสฮาร์โมนิกที่มีต่อชั้นที่คาปาซิเตอร์ในบทความนี้ ใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจริงระดับแรงดัน 22 kV ภาคใต้ เขต 1 จังหวัดเพชรบุรี เป็นกรณีศึกษา ร่วมกับการใช้โปรแกรม DigSILENT PowerFactory ในการจำลองและประเมินผลตามกรณีศึกษาต่างๆ ตามภาพที่ 2 โดยมีการใช้งานของโหลดในระบบรวม 11.1 MW , 4.7 MVar รวมถึงมีโรงงานเหล็กขนาดกำลังงาน 3.4 MW ตั้งอยู่ที่บริเวณต้นทางและมีชั้นที่คาปาซิเตอร์แบบคงที่ขนาด 300 kVar ติดตั้งอยู่บริเวณกลางทางของระบบจำหน่าย



ภาพที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV ภาคใต้ เขต 1 จังหวัดเพชรบุรี

2.2 แบบจำลองของโรงงานเหล็ก (Steel Factory Model)

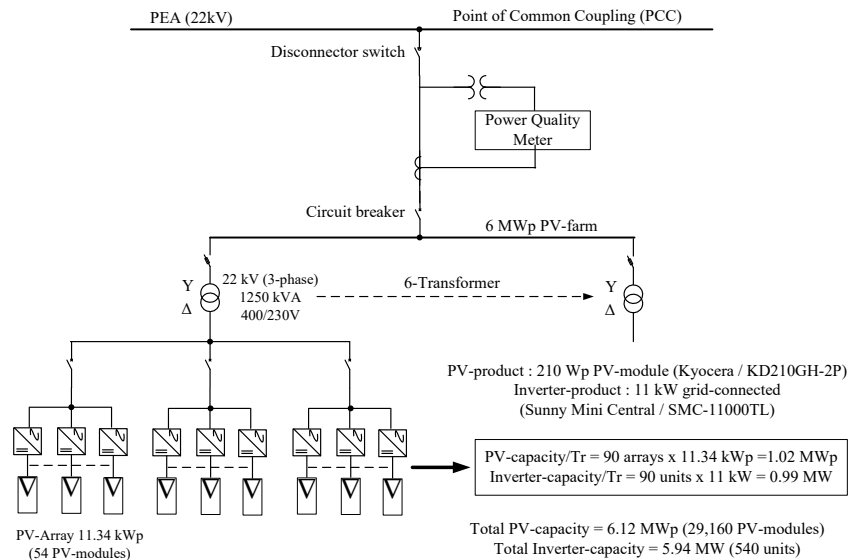
ลักษณะของโรงงานผลิตเหล็กในระบบจำหน่ายตามภาพที่ 2 มีทั้งส่วนของการรีดและหลอมโลหะเพื่อจำหน่าย โดยมีเตาหลอมแบบที่ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่เป็นส่วนการทำงานหลัก ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) และเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการทำงาน of เตาหลอมดังกล่าวเป็นโหลดในระบบไฟฟ้าก็จะพบว่าเตาหลอมอยู่ในกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกที่มีนัยสำคัญในด้านส่งผลกระทบต่อการทำงานของชั้นที่คาปาซิเตอร์ โดยการศึกษาในบทความนี้ จะใช้คุณลักษณะของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากเตาหลอมเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็ก ซึ่งมี SCR แบบ 6 พัลส์ เป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแส ตามภาพที่ 3(a) [1] รวมถึงคุณลักษณะของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากเตาหลอมแบบอาร์คที่มีการสร้างกระแสฮาร์โมนิกลำดับคู่ด้วย ตามภาพที่ 3(b) [2]



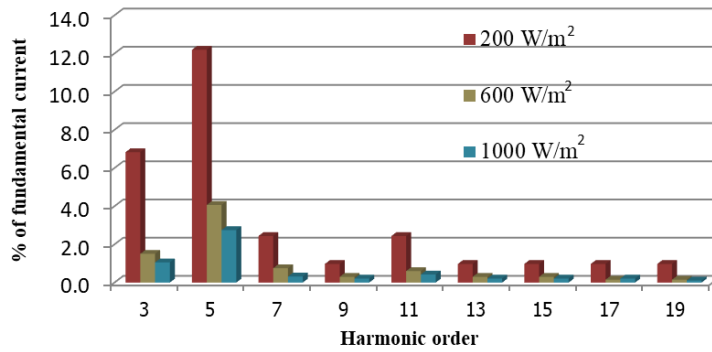
ภาพที่ 3 (a) คุณลักษณะกระแสฮาร์มอนิกของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ
(b) คุณลักษณะกระแสฮาร์มอนิกของเตาหลอมแบบอาร์ค

2.3 แบบจำลองของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ (PV System Model)

ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จะถูกพิจารณาเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกที่มีความสัมพันธ์กับระดับแสงอาทิตย์ ซึ่งได้จากการวัดที่ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ขนาด 6 MWp แห่งหนึ่งในประเทศไทย (ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจาก กฟภ.) ตามภาพที่ 4 ค่าตัวอย่างกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่ระดับแสงต่างๆ แสดงไว้ตามภาพที่ 5 [3] ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่ระดับแสงต่ำๆ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกจะมีค่าสูงในทุกลำดับความถี่ ทั้งนี้เกิดจากการทำงานต่ำกว่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ในบทความนี้จะใช้ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกที่สัมพันธ์กับระดับแสง 600 W/m^2 ซึ่งถือเป็นค่าเฉลี่ยของกำลังงานจากแสงสำหรับประเทศไทย



ภาพที่ 4 ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์แห่งหนึ่งในประเทศไทย



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ระดับแสงต่างๆ

3. การประเมินความเสียหายของตัวเก็บประจุต่อขานาน (Shunt Capacitor Assessment)

การประเมินความเสียหายของขั้วคาปาซิเตอร์จะพิจารณาตามมาตรฐาน IEEE 18-2012 [4] และมาตรฐาน IEC 60871-3 (2015) [5] ซึ่งได้แนะนำและกำหนดคุณลักษณะการใช้งานของขั้วคาปาซิเตอร์ โดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ตามขีดจำกัดของค่าแรงดันและกระแสที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 ทั้งนี้หากดัชนีตัวในตัวหนึ่งมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ก็จะได้ว่าขั้วคาปาซิเตอร์มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายได้หากไม่มีการทำงานต่อไป

ตารางที่ 1 ขีดจำกัดการทำงานของขั้วคาปาซิเตอร์ตามมาตรฐาน

Item	IEEE Limit	IEC Limit
1. Percent of rated rms voltage ($\%V_c^{rms}$)	110	110
2. Percent of rated rms current ($\%I_c^{rms}$)	135	130
3. Percent of peak voltage ($\%V_c^{peak}$)	120	120
4. Percent of nameplate kVar ($\%kVar$)	135	N/A

โดยที่
$$\%V_c^{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} |V_c^h|^2} \times 100 \quad (1)$$

$$\%I_c^{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} |I_c^h|^2} \times 100 \quad (2)$$

$$\%V_c^{peak} = \sum_{h=1}^{25} V_c^h \times 100 \quad (3)$$

$$\%kVar = \sqrt{3} \times I_c^{rms} \times V_c^{rms} \times 100 \quad (4)$$

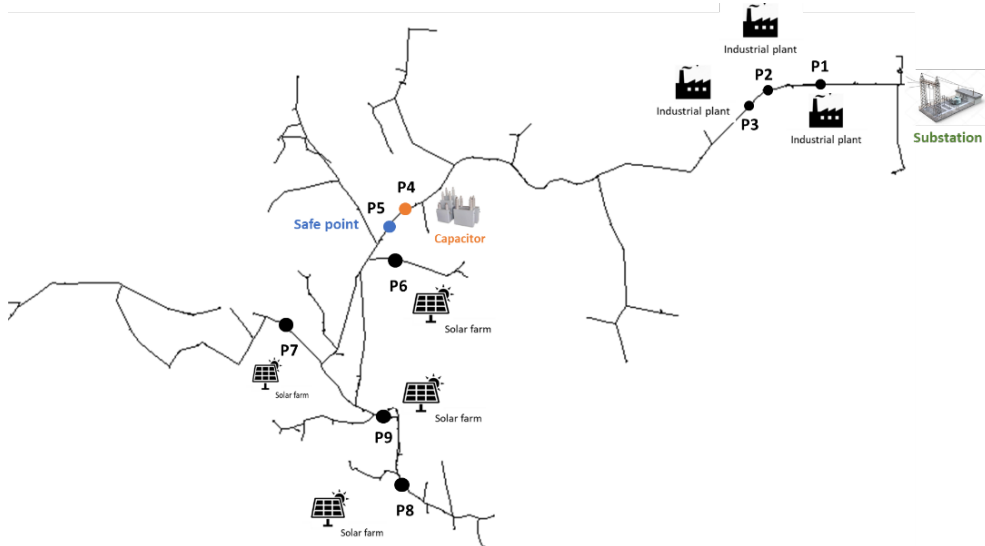
เมื่อ V_c^{rms}, I_c^{rms} คือแรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอสของตัวเก็บประจุ

V_c^h, I_c^h คือแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของตัวเก็บประจุ

V_c^{peak} คือแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุ

4. แผนการจำลอง (Simulation Scenarios)

การทดสอบเพื่อประเมินผลความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นที่คาปาซิเตอร์จากกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายจะแบ่งออกเป็น 5 กรณี ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบจากตำแหน่งติดตั้งและกำลังงานในการทำงานของทั้งโรงงานเหล็กและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ตามภาพที่ 6 โดยมีระยะห่างของแต่ละจุดรวมถึงประเภทโหลดและกำลังงานแสดงไว้ตามตารางที่ 2



ภาพที่ 6 ตำแหน่งติดตั้งของโรงงานเหล็กและระบบผลิตกำลังงานด้วยแสงอาทิตย์ตามแผนการจำลอง

ตารางที่ 2 ระยะห่างและประเภทของโหลดในแต่ละจุด

From point	To point	Distance (km)	Load Type at End Point	Power
Substation	P1	3.78	Steel Factory	3.4 MW
P1	P2	2.389	Steel Factory	3.4 MW
P2	P3	0.278	Steel Factory	3.4 MW
P3	P4	11.36	Fixed Shunt Capacitor	300 kVar
P4	P5	0.66	N/A	N/A
P5	P6	0.127	Solar Farm	1 MW
P6	P7	4.999	Solar Farm	1 MW
P7	P8	7.164	Solar Farm	1 MW
P7	P9	4.033	Solar Farm	1 MW

Case A : หมายถึงกรณีฐานซึ่งใช้ข้อมูลการทำงานของระบบจริงในปัจจุบันที่มีโหลดรวมขนาด 11.1 MW, 4.7 MVar (P.F. = 0.92) รวมถึงมีโรงงานเหล็กขนาดกำลังงาน 3.4 MW (30.6% Load) ตั้งอยู่ในตำแหน่ง P1 และมีชั้นที่คาปาซิเตอร์ขนาด 300 kVar ตั้งอยู่ในตำแหน่ง P4 การประเมินผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกจะจำลองให้โรงงานเหล็กมีการใช้งานเดาหลอม 2 แบบคือ

- Case A1 : เป็นเดาหลอมแบบเหนียวน้ำ (พิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกลำดับคี่)
- Case A2 : เป็นเดาหลอมแบบอาร์ค (พิจารณาฮาร์มอนิกลำดับคี่และลำดับคู่)

Case B: หมายถึงกรณี que แสดงให้เห็นผลกระทบ เมื่อระยะห่างของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกจากโรงงานหลัก อยู่ใกล้คาปาซิเตอร์มากขึ้น โดยพิจารณาเฉพาะการทำงานแบบเตาหลอมเหนี่ยวนำ ซึ่งแบ่งออกเป็นกรณีย่อยดังนี้

- Case B1 : โรงงานหลักตั้งอยู่ในตำแหน่ง P2 , คาปาซิเตอร์ตั้งอยู่ในตำแหน่ง P4
- Case B2 : โรงงานหลักตั้งอยู่ในตำแหน่ง P3 , คาปาซิเตอร์ตั้งอยู่ในตำแหน่ง P4
- Case B3 : โรงงานหลักตั้งอยู่ในตำแหน่ง P3 , คาปาซิเตอร์ตั้งอยู่ในตำแหน่ง P5 (ย้ายคาปาซิเตอร์)

Case C: หมายถึงกรณีที่ต้องการประเมินผลกระทบจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ โดยการพิจารณา จาก Case A1 (โรงงานหลักอยู่ที่ P1, คาปาซิเตอร์อยู่ที่ P4) ว่าหากในอนาคตมีผู้ขออนุญาตติดตั้งระบบผลิต กำลังไฟฟ้าดังกล่าวในบริเวณปลายสายป้อนตำแหน่ง P8 และ P9 ด้วยขนาดกำลังผลิตรวม 2 MW (18% Load) แล้วจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของชั้นที่คาปาซิเตอร์หรือไม่อย่างไร

Case D: หมายถึงกรณีที่พิจารณาให้มีระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์เพิ่มเติมจาก Case C ในตำแหน่ง P6 และ P7 (ครอบคลุมบริเวณกลางสายป้อน) ด้วยขนาดกำลังผลิต 2 MW (18% Load) ซึ่งหากพิจารณากำลังการผลิต จากแสงอาทิตย์รวมทั้งหมดทั้ง Case C และ D จะมีค่าเป็น 4 MW (36% Load)

Case E: หมายถึงกรณีปรับเปลี่ยนขนาดกำลังผลิต ไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์โดยรวมที่ค่า 8 MW (72% Load) ซึ่งเป็น ค่าสูงสุดตามเกณฑ์ที่การไฟฟ้าขอมให้มีการติดตั้งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ในสายป้อนได้ โดยพิจารณาให้มีการทำงานของโรงงานหลักและชั้นที่คาปาซิเตอร์ตามกรณี Case A1 และ ให้มีระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ติดตั้งตามกรณี Case D ซึ่งจะพิจารณาให้มีกำลังผลิตเท่ากันทุกตำแหน่ง ติดตั้ง (ตำแหน่งละ 2 MW)

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ (Simulation Results and Analysis)

จากแบบจำลองกระแสฮาร์โมนิกของ โรงงานหลักที่มีการใช้งานเตาหลอมไฟฟ้าขนาด 3.4 MW ทั้งแบบ เหนี่ยวนำและแบบอาร์คตามหัวข้อที่ 2.2 รวมถึงแบบจำลองของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ขนาด 1 MWp ตามหัวข้อที่ 2.3 สามารถแสดงค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency: $h=1$) และที่ ความถี่ลำดับต่างๆ ดังตารางที่ 3

ผลการประเมินสมรรถภาพการทำงานของชั้นที่คาปาซิเตอร์ทุกกรณีแสดงไว้ในตารางที่ 4 รวมถึงค่า ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion Current: THDi) ณ ตำแหน่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มซึ่งเป็นผลกระทบอันเกิดจากกระแสฮาร์โมนิก นอกเหนือจากการพิจารณาตามค่าดัชนี ของมาตรฐาน

ตารางที่ 3 ค่ากระแสฮาร์โมนิกตามแบบจำลองของโรงงานและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

Order (h)	Harmonic current (A)		
	Induction Furnace (3.4 MW)	Arc Furnace (3.4 MW)	Solar Farm (1 MW)
1	94.12	94.12	18.37
2	-	4.586	-
3	-	18.3428	-
4	-	2.7514	-
5	14.44	9.172	0.73
6	-	1.375	-
7	4.92	5.5	0.138
8	-	0.917	-
9	-	2.751	-
11	3.82	-	0.11
13	2.18	-	0.046
15	-	-	0.041
17	2.01	-	0.036
19	1.33	-	0.036
23	1.17	-	0.092
25	0.85	-	0.073

ตารางที่ 4 ผลการประเมินสมรรถภาพการทำงานของชั้นที่คาปาซิเตอร์ตามมาตรฐานกรณีต่างๆ

Item	IEEE	IEC	Case A		Case B			Case C	Case D	Case E
			A1	A2	B1	B2	B3			
1.	110	110	97.51	97.41	97.02	96.94	97.09	104.17	106.25	104.62
2.	135	130	115.21	97.92	129.28	131.01	125.69	127.18	133.18	139.02
3.	120	120	106.97	101.2	109.98	110.36	109.81	109	112	118
4.	135	N/A	112.32	95.40	125.42	127.16	122.05	114.24	120.36	196.86
% THDi at Capacitor			50.11	9.66	70.32	72.6	67.01	46.97	50.92	92.818

อย่างไรก็ตาม การจำลองให้มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกมากขึ้นในระบบ ไม่ว่าจะเป็นโรงงานเหล็กหรือระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ก็ดี ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าเกี่ยวกับขีดจำกัดในการขอมให้มีกระแสฮาร์โมนิกไหลเข้าสู่ระบบจะพิจารณาจากค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion Voltage: THDv) ณ จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) ซึ่งไม่ควรเกิน 5% ดังนั้นในตารางที่ 5 จึงได้แสดงให้เห็นค่า %THDv ณ จุดต่อร่วมของทั้งโรงงานเหล็กและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์เพื่อใช้ดูแนวโน้มความรุนแรงจากกระแสฮาร์โมนิก

ตารางที่ 5 ผลความผิดพลาดแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THDv) ณ จุดต่อร่วม (PCC)

Type	Point	Case A		Case B			Case C	Case D	Case E
		A1	A2	B1	B2	B3			
Factory	P1	2.2	1.4	-	-	-	1,798	2.03	3.598
Factory	P2	-	-	3.65	-	-	-	-	-
Factory	P3	-	-	-	3.83	3.65	-	-	-
Solar Farm	P6	-	-	-	-	-	-	4.19	5.154
Solar Farm	P7	-	-	-	-	-	-	4.023	7.452
Solar Farm	P8	-	-	-	-	-	3.815	4.145	7.551
Solar Farm	P9	-	-	-	-	-	3.659	4.172	6.875

การวิเคราะห์ผลในกรณี Case A ตามตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าคาปาซิเตอร์ยังคงสามารถทำงานได้ตามปกติ โดยมีค่าดัชนีทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้ง IEEE และ IEC ในกรณีการใช้งานทั้งเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (A1) และแบบอาร์ค (A2) อย่างไรก็ตาม ค่า THDi บ่งบอกว่าผลกระทบด้านกระแสฮาร์มอนิกของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (50.11%) จะมากกว่าแบบอาร์ค (9.66%) สำหรับค่า THDv ในตารางที่ 5 พบว่ามีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดทั้งหมด (< 5%) ทั้งนี้การทดสอบด้วยการลงขั้วตำแหน่งที่ตั้งโรงงานให้เข้าใกล้คาปาซิเตอร์มากขึ้น ในกรณี Case B พบว่าผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากค่า THDi ของกรณี B1(70.32%) และ B2(72.6%) นอกจากนี้หากพิจารณาค่าดัชนีตัวที่ 2 (131%) ในกรณี B2 จะเห็นว่าสูงกว่า 130% ตามที่ IEC กำหนด หมายความว่าคาปาซิเตอร์มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการย้ายตำแหน่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ให้ไกลออกไป ซึ่งผลการย้ายคาปาซิเตอร์ไปยังจุด P5 (0.66 km จากจุดเดิม) ในกรณี B3 แสดงให้เห็นว่าคาปาซิเตอร์มีความปลอดภัยในการทำงานและมีค่า THDi ที่ลดลง (67%) โดยโรงงานยังคงมีค่า THDv ต่ำกว่าข้อกำหนดทุกกรณีคือ B1(3.65%), B2(3.83%) และ B3(3.65%)

ผลกระทบฮาร์มอนิกที่ไหลสนับสนุนจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ใน Case C (2 MW) แสดงให้เห็นว่าขนาดกำลังผลิตที่ไม่สูงมากและมีตำแหน่งติดตั้งที่บริเวณปลายสายป้อน คาปาซิเตอร์ยังคงสามารถทำงานได้ดีโดยไม่ได้รับผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกและมีค่า THDi ที่ไม่สูงมากนัก (46.97%) อย่างไรก็ตามเมื่อจำลองให้มีตำแหน่งติดตั้งและกำลังผลิตรวมมากขึ้นใน Case D (4 MW) ซึ่งครอบคลุมถึงบริเวณกลางสายป้อน พบว่าค่า THDi สูงขึ้นเล็กน้อย (50.92%) แต่ยังไม่ส่งผลกระทบต่อคาปาซิเตอร์ ข้อสังเกตจากการมีกระแสฮาร์มอนิกไหลสนับสนุนในระบบมากขึ้นคือจะทำให้ค่า THDv สูงขึ้นซึ่งอาจเปรียบเทียบได้จากกรณี Case C และ Case D ที่ตำแหน่งเดิมของทั้งโรงงานและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ตามตารางที่ 5

ในส่วนท้ายของการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าถ้ากำลังการผลิตรวมของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์สูงถึง 8 MW ใน Case E ที่ตำแหน่งติดตั้งเดิม จะส่งผลให้คาปาซิเตอร์มีสมรรถนะในการทำงานไม่ผ่านเกณฑ์ 2 ข้อทั้งมาตรฐาน IEEE และ IEC (ตามตารางที่ 4) นอกจากนี้ยังมีค่า THDi (92.82%) และ THDv ที่ค่อนข้างสูงด้วย โดยเฉพาะค่า THDv ณ ตำแหน่งติดตั้งของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ทุกจุด (ตามตารางที่ 5) มีค่าเกินข้อกำหนดทั้งหมด หมายความว่าสำหรับระบบจำหน่ายนี้ไม่สามารถยอมให้มีกำลังผลิตสูงถึง

8 MW ตามเกณฑ์ข้อกำหนดของ กฟภ.ได้ เนื่องจากขนาดกำลังผลิตดังกล่าวคิดเป็นค่า 72% ของโหลดในระบบซึ่งอาจมีค่าสูงมากเกินไป

6. สรุปผลการทดสอบ

จากการจำลองผลในหลายกรณีศึกษาสามารถกล่าวได้ว่า การมีกระแสฮาร์โมนิกในระบบจำหน่ายที่มีปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อในด้านสมรรถนะการทำงานของคาปาซิเตอร์ ทั้งนี้ระยะห่างของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกก็นับเป็นปัจจัยสำคัญที่จะเห็นได้จากกรณี B2 ว่าหากจำลองให้โรงงานขยับเข้าใกล้คาปาซิเตอร์มากขึ้นด้วยระยะประมาณ 2.67 km จากจุดเดิม (P1) ไปยังจุด P3 คาปาซิเตอร์ก็เริ่มมีความเสี่ยงในการทำงาน นอกจากนี้ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลสนับสนุนมาจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ก็ส่งผลกระทบต่อที่รุนแรงขึ้นซึ่งสังเกตได้จากค่า THDi ที่คาปาซิเตอร์และค่า THDv ของโรงงานและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นตามลำดับในกรณี Case C, D และ E โดยเฉพาะกรณี Case E แสดงให้เห็นว่าคาปาซิเตอร์ไม่สามารถทำงานต่อไปได้ทั้งมีค่าดัชนีไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและมีค่า THDv ที่สูงกว่าข้อกำหนด อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองทั้งหมดนี้อาจถูกใช้ประกอบในการศึกษาเพื่อวางแผนป้องกัน ปรับปรุงหรือแก้ไขด้วยการกำหนดขนาดกำลังผลิตรวมถึงการประเมินตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบต่อชั้นที่คาปาซิเตอร์ได้

7. เอกสารอ้างอิง

มนชนก ศรีสารคาม และ เกียรติยุทธ กวีญาณ. 2558. แบบจำลองเตาหลอมไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ฮาร์โมนิกของโรงกลายเหล็ก. วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 28, ตุลาคม-ธันวาคม 2558.

วิชาการ เสงศรีวัช และ ธวัชชัย เตชะสอนันต์. 2557. ผลกระทบจากบริเวณติดตั้งของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่มีต่อชั้นที่คาปาซิเตอร์และคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่าย. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37). 19 – 21 พฤศจิกายน 2557, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

IEEE 18-2012. **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.**

IEC 60871-3. 2015. **Shunt capacitors for AC power systems having a rated voltage above 1000V-Part 3: Protection of shunt capacitors and shunt capacitor banks.**

IEEE Standard 3002.8-2018. **Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems.**