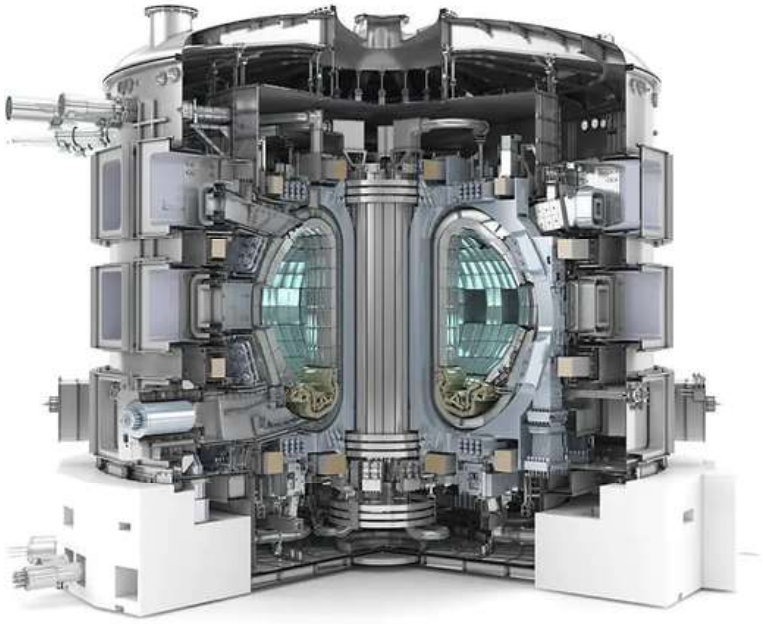
รายงานผลสัมฤทธิ์ภายใต้โครงการ

ITER RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM 2025

หัวข้อ

ANALYSIS AND SIMULATIONS WITH MATLAB/SIMULINK FOR RPC&HF STAGE 2 SYSTEM





นางสาวจุฬารัตน์ บุญมาธรรม

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศ

1 เมษายน – 31 พฤษภาคม 2569

ITER Organization

ประเทศฝรั่งเศส

ITER Research Exchange Program 2026

รายงานผลการเข้าร่วมโครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ITER

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 31 พฤษภาคม 2569



จุฬารัตน์ บุญมาธรรม
วิศวกรระดับ 4 แผนกบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง 2
กองบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ข้าพเจ้า นางสาวจุฬารัตน์ บุญมาธรรม ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า แผนกบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง 2 กองบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สายงานระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ขอขอบพระคุณมูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ได้มอบโอกาสอันทรงคุณค่าให้ข้าพเจ้าได้เข้าร่วมโครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ITER และได้เรียนรู้และแลกเปลี่ยนองค์ความรู้กับผู้เชี่ยวชาญในระดับนานาชาติ

ขอขอบพระคุณหน่วยบริหารจัดการทุนด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมแห่งอนาคต (บพค.) และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทน. ในฐานะหน่วยงานสนับสนุนและประสานการดำเนินโครงการ ที่ส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาศักยภาพบุคลากรไทยผ่านการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และประสบการณ์กับหน่วยงานวิจัยและผู้เชี่ยวชาญในต่างประเทศ

ขอขอบพระคุณองค์การ ITER (ITER Organization) โดยเฉพาะหน่วยงาน IO/DG/CP/ESP/ECPS (Ex-Vessel Coil Power Supply Project) ที่เปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้าศึกษาและปฏิบัติงาน รวมทั้งสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลและเอกสารทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับระบบวิศวกรรมไฟฟ้า และขอขอบพระคุณ Mr. Tenor Roldan Miguel Andres ในฐานะ Supervisor ที่ได้ให้คำแนะนำ ถ่ายทอดองค์ความรู้ และให้คำปรึกษาในการปฏิบัติงานตลอดระยะเวลา 2 เดือน

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในฐานะหน่วยงานต้นสังกัด และขอขอบพระคุณผู้บังคับบัญชาตามสายงานทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและพิจารณาอนุมัติการเข้าร่วมโครงการ ได้แก่ รองผู้ว่าการระบบส่ง (รวส.) ผู้อำนวยการฝ่ายปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (อปอ.) หัวหน้ากองบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง และหัวหน้าแผนกบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง 2 รวมทั้งเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและช่วยอำนวยความสะดวกในการบริหารจัดการภาระงานตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าเข้าร่วมโครงการ

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกหน่วยงานและทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องและให้การสนับสนุนการเข้าร่วมโครงการครั้งนี้ ซึ่งนับเป็นโอกาสอันมีคุณค่าในการเพิ่มพูนความรู้ ประสบการณ์ และมุมมองทางวิศวกรรมตลอดจนการสร้างเครือข่ายความร่วมมือกับผู้เชี่ยวชาญในระดับนานาชาติ ข้าพเจ้าจะนำองค์ความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับกลับมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงาน ถ่ายทอดและแลกเปลี่ยนกับบุคลากรที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อหน่วยงานและการพัฒนาศักยภาพบุคลากรไทยต่อไป

นางสาวจุฬารัตน์ บุญมาธรรม

วิศวกรไฟฟ้า หถอ2-ส. กถอ-ส. อปอ. กฟผ

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
สารบัญ	**ข**
สารบัญตาราง	**ง**
สารบัญรูปภาพ	**จ**
คำย่อและสัญลักษณ์	**ฉ**
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการปฏิบัติการ	2
1.3 ขอบเขตของการปฏิบัติงานวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาและสถานที่ปฏิบัติงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ข้อมูลภาพรวมขององค์กร ITER และหน่วยงานที่เข้าปฏิบัติงาน	**3**
2.1 ข้อมูลทั่วไปของ ITER Organization	3
2.2 โครงสร้างหน่วยงานที่เข้าปฏิบัติงาน	3
2.3 ระบบไฟฟ้าและระบบที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาภายใต้ ECPS	4
บทที่ 3 ทฤษฎีและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง	**8**
3.1 ระบบไฟฟ้าสำหรับโหลดกำลังสูงและลักษณะการใช้กำลังไฟฟ้า	8
3.2 โหลด Non-linear และผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์	9
3.3 การควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วย Reactive Power Compensation และ Harmonic Filter	11
3.4 การจำลองระบบไฟฟ้าด้วย Phasor Model	13
3.5 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT)	17
3.6 โครงสร้างและระบบฉนวนของ Oil-immersed CT	18
3.7 กลไกการเสื่อมสภาพและตัวชี้วัดสภาพ CT	21
3.8 แนวคิดการบำรุงรักษา CT ตามสภาพและสภาวะการใช้งาน	24
บทที่ 4 การดำเนินงานและกิจกรรมภายใต้โครงการวิจัยแลกเปลี่ยน	**26**
4.1 ภาพรวมการดำเนินงาน	26

4.2 การศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า PPEN และ CPS 26
4.3 การศึกษาแนวทางการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF 27
4.4 การแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และประสบการณ์ 27
บทที่ 5 ผลลัพธ์จากการศึกษา 29
5.1 ผลลัพธ์ด้านการปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟ 29
5.2 ผลลัพธ์ด้านการยกระดับการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF 30
5.3 ข้อจำกัดของแนวทาง 32
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้ความรู้และประโยชน์ที่ได้รับ 33
6.1 การประยุกต์ใช้ด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 33
6.2 การประยุกต์ใช้ด้านการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า 33
6.3 การพัฒนาศักยภาพบุคลากร 33
6.4 ประโยชน์ต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านพลังงานในประเทศไทย 34
บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 35
7.1 สรุปผลการดำเนินงาน 35
7.2 ข้อเสนอแนะ 35
เอกสารอ้างอิง 37

สารบัญตาราง

เนื้อหา **หน้า**

ตารางที่ 1 กลุ่มระบบและลักษณะทางไฟฟ้าของโหลดหลักที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา 5
ตารางที่ 2 ตัวชี้วัดการเสื่อมสภาพของ CT 23

สารบัญรูปภาพ

เนื้อหา **หน้า**

รูปที่ 2.1 ระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบพัลส์ของ ITER (ITER Pulsed AC Distribution) 4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์หลักของระบบ RPC&HF จำนวน 3 ชุด 6
รูปที่ 2.3 รายละเอียดองค์ประกอบของระบบ RPC&HF จำนวน 1 ชุด 6
รูปที่ 3.1 โครงสร้างโครงข่าย PPEN และตำแหน่ง Node สำหรับการคำนวณ Admittance Matrix 16
รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT) 18
รูปที่ 3.3 โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของหม้อแปลงวัดกระแสแบบ Oil-immersed 19
รูปที่ 5.1 ผลการตรวจสอบ/ปรับปรุงข้อมูล ICH ใน master_inputs.m 29
รูปที่ 5.2 4-Step InitializationWorkflow และ Classification Matrix 30
รูปที่ 5.3 แนวทางการทดสอบ Ratio Error และ Phase Displacement 30
รูปที่ 5.4 แนวทางการเก็บตัวอย่างน้ำมันสำหรับ DGA 31
รูปที่ 5.5 แนวคิด Asset Stress Profiling สำหรับ CT 31

คำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย/คำอธิบาย
CBM	Condition-Based Maintenance	การบำรุงรักษาตามสภาพ
CPS	Coil Power Supplies	ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับคอยล์แม่เหล็ก
CT	Current Transformer	หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า
DGA	Dissolved Gas Analysis	การวิเคราะห์ก๊าซที่ละลายในน้ำมันฉนวน
ECPS	Ex-Vessel Coil Power Supplies Project	โครงการระบบจ่ายกำลังคอยล์ภายนอก
ECH	Electron Cyclotron Heating	ระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นอิเล็กตรอน
H&CD	Heating and Current Drive	ระบบทำความร้อนและขับกระแสพลาสม่า
ICH	Ion Cyclotron Heating	ระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไอออน
IO	ITER Organization	องค์กร ITER
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor	โครงการวิจัยพลังงานฟิวชันนานาชาติ
NBI	Neutral Beam Injection	ระบบฉีดลำอนุภาคเป็นกลาง
PD	Partial Discharge	การคายประจุบางส่วน
PF	Poloidal Field	สนามแม่เหล็กโพลอยดัล
PM	Preventive Maintenance	การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
PPEN	Pulsed Power Electrical Network	ระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับโหลดแบบพัลส์
RPC&HF	Reactive Power Compensation and Harmonic Filter	ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาและกรองฮาร์มอนิก
STATCOM	Static Synchronous Compensator	อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา
TCR	Thyristor Controlled Reactor	รีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทริสเตอร์
THD	Total Harmonic Distortion	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม
VS3	Vertical Stabilisation 3	ระบบรักษาเสถียรภาพในแนวตั้งของพลาสม่า
DP	Degree of Polymerization	ระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชันของฉนวนกระดาษ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย/คำอธิบาย
Mvar	Megavolt-ampere reactive	หน่วยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา
MW	Megawatt	หน่วยกำลังไฟฟ้าจริง
kV	Kilovolt	หน่วยแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ITER Organization เป็นองค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศที่ดำเนินโครงการวิจัยและพัฒนาด้านพลังงานฟิวชัน โดยมีเป้าหมายในการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตพลังงานจากปฏิกิริยาฟิวชัน โครงการ ITER มีระบบไฟฟ้าและระบบจ่ายกำลังที่มีความซับซ้อน เพื่อรองรับการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงและมีลักษณะการใช้งานแบบเป็นจังหวะ (Pulsed Loads) ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมกำลังไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้า และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

โครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ITER จัดขึ้นภายใต้ความร่วมมือของมูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ ฯ บพค. สทน. และ กฟผ. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาศักยภาพบุคลากรและส่งเสริมการถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีขั้นสูง ผ่านการปฏิบัติงานและแลกเปลี่ยนประสบการณ์กับผู้เชี่ยวชาญของ ITER Organization ซึ่งเป็นโอกาสในการเรียนรู้ทั้งด้านเทคนิคและแนวทางการทำงานในโครงการวิจัยขนาดใหญ่ระดับนานาชาติ

ในการเข้าร่วมโครงการ ผู้จัดทำได้ปฏิบัติงานในหน่วยงาน Ex-Vessel Coil Power Supplies Project (ECPS) ภายใต้ Electrical Systems Program (ESP) โดยมุ่งศึกษาและดำเนินงานใน 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ การตรวจสอบและปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า PPEN และ CPS เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) และการศึกษาแนวทางปรับปรุงกลยุทธ์การบำรุงรักษา Current Transformer (CT) ในระบบ Reactive Power Compensation and Harmonic Filter (RPC&HF)

การดำเนินงานดังกล่าวเป็นการนำความรู้ด้านวิศวกรรมระบบไฟฟ้าแรงสูงและการบำรุงรักษามาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าของ ITER พร้อมทั้งเปิดโอกาสให้ผู้จัดทำได้เรียนรู้แนวทางการออกแบบ การวิเคราะห์ และการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าจากประสบการณ์จริงของผู้เชี่ยวชาญในระดับนานาชาติ รายงานฉบับนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อรวบรวมผลการดำเนินงาน องค์ความรู้ และประสบการณ์ที่ได้รับจากการเข้าร่วมโครงการ รวมถึงแนวทางการนำความรู้ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้และถ่ายทอดต่อในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการปฏิบัติการ

1. เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเพิ่มประสิทธิภาพสคริปต์คำสั่งของแบบจำลองระบบจ่ายไฟโครงข่าย PPEN และ CPS Phasor Model Version 2 ในการจำลองพฤติกรรมกำลังไฟฟ้า (P, Q) ด้วย MATLAB simulink
2. เพื่อวิเคราะห์ช่องว่าง (Gap Analysis) และจัดทำข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรมในการยกระดับกลยุทธ์การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) สำหรับหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (CT) ในระบบ RPC&HF ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของการปฏิบัติงานวิจัย

1. ศึกษาและตรวจสอบแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า PPEN และ CPS รวมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรม P และ Q
2. ศึกษาแนวทางการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF วิเคราะห์ช่องว่างของแนวทางปัจจุบัน และจัดทำข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุง

1.4 ระยะเวลาและสถานที่ปฏิบัติงาน

1. ระยะเวลาการปฏิบัติงาน: ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2569 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2569 (รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 2 เดือน)
2. สถานที่ปฏิบัติงาน: องค์การ ITER (ITER Organization) ณ เมืองแซ็ง-ปอล-เล-ดูร็องส์ (Saint-Paul-lez-Durance) ประเทศฝรั่งเศส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ด้านระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและการวิเคราะห์ P และ Q ของระบบไฟฟ้าภายใน ITER
2. ได้แนวทางและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงการบำรุงรักษา CT
3. ได้ประสบการณ์การทำงานและแลกเปลี่ยนองค์ความรู้กับผู้เชี่ยวชาญในระดับนานาชาติ
4. สามารถนำองค์ความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้และถ่ายทอดต่อในประเทศไทย

บทที่ 2
ข้อมูลภาพรวมขององค์กร ITER และหน่วยงานที่เข้าปฏิบัติงาน

2. ข้อมูลภาพรวมขององค์กร ITER และหน่วยงานที่เข้าปฏิบัติงาน

2.1 ข้อมูลทั่วไปของ ITER Organization

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) เป็นโครงการความร่วมมือระหว่างประเทศด้านการวิจัยและพัฒนาพลังงานฟิวชัน ตั้งอยู่ที่เมือง Saint-Paul-lez-Durance สาธารณรัฐฝรั่งเศส โดยมีประเทศสมาชิกและกลุ่มประเทศที่เข้าร่วมโครงการจากหลายภูมิภาคทั่วโลก [1]

โครงการ ITER มีเป้าหมายในการศึกษาการผลิตพลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Tokamak ซึ่งอาศัยสนามแม่เหล็กในการควบคุมพลาสมาให้มีอุณหภูมิและสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน การดำเนินงานของโครงการจึงต้องอาศัยระบบวิศวกรรมหลายสาขาที่ทำงานร่วมกัน ทั้งระบบแม่เหล็ก ระบบไฟฟ้า ระบบควบคุม ระบบสุญญากาศ และระบบสนับสนุนอื่น ๆ

ระบบไฟฟ้าเป็นหนึ่งในระบบสำคัญของ ITER เนื่องจากต้องจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ขนาดใหญ่และรองรับโหลดที่มีลักษณะเฉพาะของการทดลองฟิวชัน ดังนั้น การออกแบบ การควบคุมคุณภาพไฟฟ้า และการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าจึงมีความสำคัญต่อความพร้อมใช้งานและความปลอดภัยของระบบโดยรวม

2.2 โครงสร้างหน่วยงานที่เข้าปฏิบัติงาน

ในการเข้าร่วมโครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ผู้จัดทำได้ปฏิบัติงานในสายงาน IO/DG/CP/ESP/ECPS ของ ITER Organization โดยมีรายละเอียดดังนี้

- DG (Director-General) เป็นระดับบริหารของ ITER Organization
- CP (Central Projects) เป็นส่วนงานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารและดำเนินโครงการ
- ESP (Electrical Systems Program) รับผิดชอบงานด้านระบบไฟฟ้าของโครงการ
- ECPS (Ex-Vessel Coil Power Supplies Project) รับผิดชอบงานด้านระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับขดลวดแม่เหล็กภายนอก Vessel

ผู้จัดทำเข้าปฏิบัติงานในตำแหน่ง Visiting Researcher ภายใต้การดูแลของ Mr. Tenor Roldan Miguel Andres เป็นระยะเวลา 2 เดือน ระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 31 พฤษภาคม 2569

2.3 ระบบไฟฟ้าและระบบที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาภายใต้ ECPS

การปฏิบัติงานภายใต้ Ex-Vessel Coil Power Supplies Project (ECPS) เกี่ยวข้องกับการศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าสำหรับจ่ายกำลังให้แก่โหลดกำลังสูงของ ITER ซึ่งมีลักษณะการใช้งานกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างจากระบบไฟฟ้าทั่วไป ทั้งในด้านระดับกำลัง การเปลี่ยนแปลงของโหลด และผลกระทบจากอุปกรณ์ Power Electronics ดังนั้น การทำความเข้าใจโครงสร้างระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องจึงเป็นพื้นฐานสำคัญของการศึกษาในครั้งนี้

2.3.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและโหลดที่เกี่ยวข้อง

ระบบไฟฟ้าของ ITER รับกำลังไฟฟ้าจากระบบส่งภายนอกที่ระดับแรงดัน 400 kV และกระจายกำลังเข้าสู่ระบบไฟฟ้าภายในผ่านระบบ Pulsed Power Electrical Network (PPEN) [1], [2] โดยมีระบบไฟฟ้าระดับ 66 kV และ 22 kV เป็นส่วนสำคัญในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

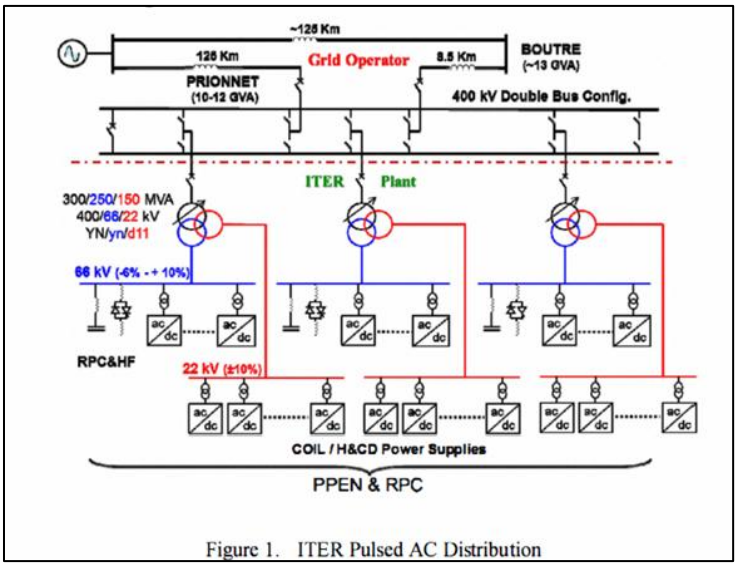


Figure 1. ITER Pulsed AC Distribution

รูปที่ 2.1 ระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบพัลส์ของ ITER (ITER Pulsed AC Distribution)

โหลดที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของ ITER มีลักษณะทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านระดับกำลัง การเปลี่ยนแปลงของโหลด และลักษณะกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ Power Electronics โดยระบบที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลุ่มระบบและลักษณะทางไฟฟ้าของโหลดหลักที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

กลุ่มระบบ	**ตัวอย่างโหลด**	**ลักษณะสำคัญ**
ระบบจ่ายกำลังคอยล์แม่เหล็ก (Coil Power Supply: CPS)	CS และ PF Coils	โหลดกำลังไฟฟ้าแบบพัลส์และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว
ระบบทำความร้อนและควบคุมกระแสพลาสม่า (Heating & Current Drive: H&CD)	ECH, ICH	โหลดกำลังสูงและมีการใช้อุปกรณ์ Power Electronics
ระบบ Neutral Beam Injection (NBI)	NBI	มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบ Step Load
ระบบที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมและรักษาเสถียรภาพของพลาสม่า	ELM, VS3	มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดตามสภาวะการทำงานของพลาสม่า

ลักษณะของโหลดดังกล่าวทำให้ระบบไฟฟ้าของ ITER มีความซับซ้อนและมีความต้องการด้านการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าสูงกว่าระบบไฟฟ้าที่มีโหลดทั่วไป เนื่องจากมีทั้งโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โหลดที่มีลักษณะ Non-linear และโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาในระดับสูง จึงจำเป็นต้องมีระบบสำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาและลดผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์

2.3.2 ระบบ Reactive Power Compensation and Harmonic Filter (RPC&HF)

ระบบ Reactive Power Compensation and Harmonic Filter (RPC&HF) เป็นระบบสำคัญที่ใช้สนับสนุนการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าของระบบ ITER โดยมีหน้าที่หลักในการชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา (Reactive Power) และลดผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดกำลังสูงและอุปกรณ์ Power Electronics [3]

ระบบ RPC&HF เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าระดับ 66 kV และติดตั้งจำนวน 3 ชุด โดยมีพิกัดกำลังรวม 750 Mvar หรือประมาณ 250 Mvar ต่อชุด แต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก ตลอดจนระบบควบคุมและป้องกันที่เกี่ยวข้อง [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

	Component(s)	Main function	Qty.	Type	Section
1	66kV Thyristor Controlled Reactor (TCR)	To generate the inductive reactive power	6 x 3	SPV	10.1
2	66kV RPC Filter Reactors (FR)	To provide harmonic filtering branch through reactor	18 x 3	SPV	10.2
3	66kV RPC Filter Capacitors (FC)	To provide harmonic filtering branch through capacitor	18 x 3	SPV	10.3
4	66kV Isolation Switches (IS) and Earthing Switches (ES)	To isolate power when performing maintenance	21	SPV	10.4
5	66kV RPC Current Transformers (CT)	To separate the protection and metering devices from high voltages and to transform the line current to be measured to the current level suitable for measuring and protective devices	117[5]	SPV	10.5
6	66kV RPC Surge Arrestors	To protect surge overvoltage	21 x 3	CC	10.6
7	66kV RPC Filter Resistors	To provide harmonic filtering branch through resistor	6 x 3	SPV	10.7
8	66kV Thyristor Valves (TV)	To control the reactive current of RPC	3 x 3	SPV[6]	10.8
	I&C Control & Protection System	To provide local control for the system. To provide monitoring and protection.	Various	SPV	TBC
	Cooling water instrumentation	To provide measurement of inlet conductivity, cooling water pressure and temperature.		NC	10.8
	Cooling water components	To supply cooling water for (Thyristor) valves	Various	NC	N/A

Table 2 - Critical Component Assessment - Preliminary Summary

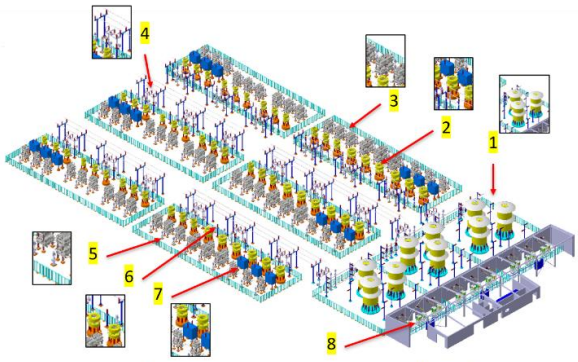
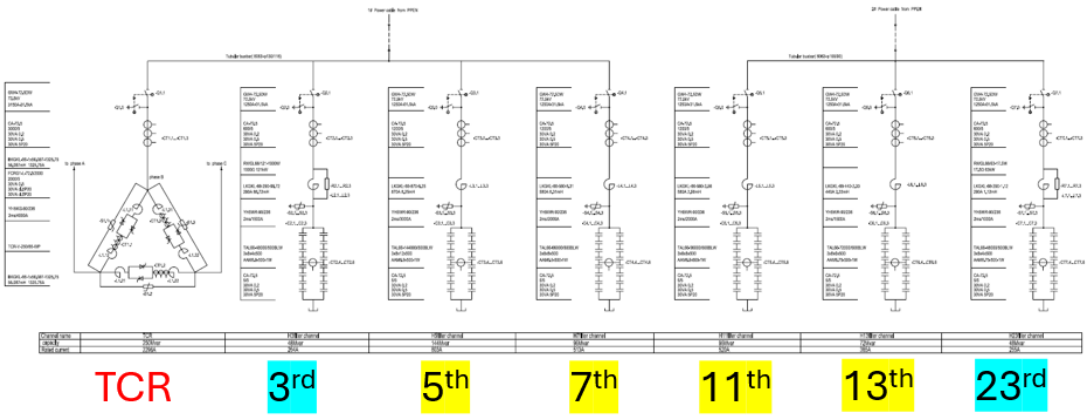


Figure 2 Site layout diagram of three sets of RPC&HF

รูปที่ 2.2 โครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์หลักของระบบ RPC&HF จำนวน 3 ชุด

อุปกรณ์หลักของระบบ RPC&HF ประกอบด้วย Thyristor Controlled Reactor (TCR), RPC Filter Reactors, RPC Filter Capacitors, Filter Resistors, Thyristor Valves, Surge Arresters และ Isolation and Earthing Switches รวมถึงระบบควบคุมและป้องกัน โดยอุปกรณ์แต่ละประเภททำหน้าที่แตกต่างกันและทำงานร่วมกันเพื่อรองรับการชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาและการกรองฮาร์มอนิกของระบบ [10]

ในระดับของแต่ละชุด RPC&HF สามารถแบ่งองค์ประกอบหลักออกเป็นส่วนของ TCR และ Passive Harmonic Filter โดย TCR ใช้สำหรับควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยากับระบบ ขณะที่ Passive Harmonic Filter ทำหน้าที่เป็นทางผ่านที่เหมาะสมสำหรับกระแสฮาร์มอนิก เพื่อลดผลกระทบของฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [10]



รูปที่ 2.3 รายละเอียดองค์ประกอบของระบบ RPC&HF จำนวน 1 ชุด

จากโครงสร้างดังกล่าว ระบบ RPC&HF จึงประกอบด้วยทั้งส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา และส่วนที่ทำหน้าที่ลดผลกระทบจากฮาร์มอนิก ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อรองรับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังสูงของ ITER

2.3.3 Current Transformer ในระบบ RPC&HF

นอกจากอุปกรณ์หลักสำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้าและกรองฮาร์มอนิกแล้ว ระบบ RPC&HF ยังประกอบด้วยอุปกรณ์วัดและป้องกัน ได้แก่ หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer: CT) ซึ่งจากการประเมินองค์ประกอบของระบบพบว่ามี CT จำนวน 117 ตัว ในระบบ RPC&HF ทั้ง 3 ชุด

CT ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าในระบบแรงดันสูงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์วัดและป้องกัน พร้อมทั้งทำหน้าที่แยกวงจรวัดและวงจรป้องกันออกจากระบบแรงดันสูง [4] ดังนั้นสภาพและความถูกต้องของ CT จึงมีความเกี่ยวข้องกับความน่าเชื่อถือของระบบวัดและป้องกันของ RPC&HF

จากความสำคัญดังกล่าว CT จำนวน 117 [10] ตัวในระบบ RPC&HF จึงเป็นกลุ่มอุปกรณ์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ โดยมุ่งเน้นการทบทวนแนวทางการบำรุงรักษา การประเมินสภาพ และการพิจารณาสภาวะการใช้งานของ CT เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงกลยุทธ์การบำรุงรักษาให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของระบบ

บทที่ 3
ทฤษฎีและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานภายใต้โครงการ ITER Research Exchange Program ครอบคลุมทั้งการตรวจสอบและปรับปรุงแบบจำลองระบบไฟฟ้า PPEN และ CPS และการศึกษาแนวทางการบำรุงรักษาหม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT) ในระบบ RPC&HF ดังนั้น หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ หลักการด้านระบบไฟฟ้าและการจำลองระบบสำหรับโหลดกำลังสูง และ หลักการด้าน CT การประเมินสภาพ และการบำรุงรักษาตามสภาวะการใช้งาน

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงลักษณะของโหลดกำลังสูง การใช้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา ผลกระทบจากโหลด Non-linear และฮาร์มอนิก ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา ระบบกรองฮาร์มอนิก และหลักการจำลองระบบไฟฟ้าด้วย Phasor Model ซึ่งเป็นพื้นฐานของการดำเนินงานด้าน PPEN และ CPS

ส่วนที่สองจะกล่าวถึงหลักการทำงานและโครงสร้างของ CT ระบบฉนวนและกลไกการเสื่อมสภาพ ตลอดจนแนวทางการประเมินสภาพและการนำข้อมูลจากการใช้งานมาประเมิน Thermal Stress เพื่อสนับสนุนการวางแผนบำรุงรักษา

3.1 ระบบไฟฟ้าสำหรับโหลดกำลังสูงและลักษณะการใช้กำลังไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าของ ITER ต้องรองรับโหลดไฟฟ้าหลายประเภทที่มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงและมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน โดยเฉพาะระบบ Coil Power Supplies (CPS) และระบบ Heating and Current Drive (H&CD) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ Power Electronics และมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าตามสภาวะการทำงานของระบบ การวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power: P) และกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา (Reactive Power: Q) [1], [8]

ในแบบจำลอง PPEN และ CPS Phasor Model Version 2 โหลดต่าง ๆ ถูกแทนด้วยปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ Pและ Q [10] โดยแบบจำลองจะใช้ข้อมูลดังกล่าวร่วมกับแรงดันของระบบเพื่อคำนวณสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้า เอกสารแบบจำลองระบุว่าแต่ละโหลดที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าภายในจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา และผลลัพธ์จากการจำลองสามารถนำไปใช้วิเคราะห์แรงดัน กำลังไฟฟ้า และกระแสของระบบได้

กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) สามารถแสดงในรูปกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนได้ดังสมการ

$$\underline{S} = P + jQ$$

โดยที่

Pคือ กำลังไฟฟ้าจริง (W)

Qคือ กำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา (var)

$\underline{S}$คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏในรูปจำนวนเชิงซ้อน (VA)

ขนาดของกำลังไฟฟ้าปรากฏสามารถคำนวณได้จาก

$$| S | = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส หากกำหนดแรงดันระหว่างสายเป็น V_{LL} กระแสของโหลดสามารถประมาณได้จาก

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}V_{LL}}$$

จากสมการจะเห็นว่า เมื่อ Pหรือ Qเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระดับแรงดันคงที่ กำลังไฟฟ้าปรากฏและกระแสที่ไหลในระบบจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลต่อการสูญเสียในระบบ พิกัดของอุปกรณ์ และพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น การพิจารณา Pและ Qจึงเป็นพื้นฐานสำคัญของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังสูง

อย่างไรก็ตาม การแทนโหลดด้วย Pและ Qเพียงอย่างเดียวเป็นการอธิบายพฤติกรรมของโหลดในองค์ประกอบพื้นฐานของระบบไฟฟ้า และยังไม่สามารถแสดงผลกระทบจากโหลดที่มีลักษณะ Non-linear ซึ่งทำให้รูปคลื่นกระแสไม่เป็นไซน์ได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะโหลดที่มีอุปกรณ์ Power Electronics ดังนั้น การวิเคราะห์ระบบ PPEN และ CPS จึงต้องพิจารณาองค์ประกอบฮาร์มอนิกร่วมด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 โหลด Non-linear และผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์

โหลดเชิงเส้น (Linear Load) โดยทั่วไปมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สามารถอธิบายได้ด้วยอิมพีแดนซ์คงที่หรือมีพฤติกรรมเชิงเส้น ส่งผลให้เมื่อแรงดันมีรูปคลื่นไซน์ กระแสที่เกิดขึ้นจะมีรูปคลื่นในลักษณะเดียวกัน ส่วนโหลด Non-linear มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้แม้แรงดันของ

ระบบจะมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ กระแสที่โหลดดึงจากระบบอาจมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนและประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่หลายลำดับ [7], [8]

อุปกรณ์ Power Electronics เช่น Converter, Thyristor และ IGBT เป็นตัวอย่างของอุปกรณ์ที่สามารถก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากกระแสที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับกระบวนการ Switching หรือการควบคุมการนำกระแสของอุปกรณ์ โดยในระบบ PPEN และ CPS มีทั้งระบบ CPS, TCR และระบบ H&CD ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินฮาร์มอนิก เอกสาร Phasor Model Version 2 ระบุว่าการคำนวณฮาร์มอนิกของแต่ละโหลดใช้ผลจาก Load Flow เป็นข้อมูลพื้นฐาน และนำไปคำนวณแรงดันของแต่ละ Node ของโครงข่าย PPEN ต่อไป [1], [3], [10]

ในทางคณิตศาสตร์ กระแสที่มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนสามารถแสดงเป็นผลรวมขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานและฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ได้ในรูป

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \phi_h)$$

โดยที่

I_1 คือขนาดของกระแสที่ความถี่พื้นฐาน

I_h คือขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h

ω คือความถี่เชิงมุมของระบบ

ϕ_h คือเฟสขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ h

องค์ประกอบฮาร์มอนิกแต่ละลำดับมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีความถี่เป็น 5 เท่าของความถี่พื้นฐาน เป็นต้น เมื่อกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบ จะทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งสามารถส่งผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่

ตัวชี้วัดที่ใช้กันทั่วไปในการประเมินระดับความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือ Total Harmonic Distortion (THD) สำหรับแรงดันสามารถเขียนได้เป็น

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

โดย V_1 คือแรงดันที่ความถี่พื้นฐาน และ V_h คือแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h

สำหรับแบบจำลอง PPEN และ CPS Version 2 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกดำเนินการในลักษณะ Post-processing จากผลการจำลอง Phasor Model โดยอาศัยผล Load Flow เพื่อคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลด และใช้ Admittance Matrix ของโครงข่ายเพื่อคำนวณแรงดันที่แต่ละ Node

ทั้งนี้ วิธีการดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์ในลักษณะ Phasor/Quasi-steady-state จึงไม่ได้รวมฮาร์มอนิกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว และแบบจำลองดังกล่าวพิจารณาฮาร์มอนิกตามลำดับที่กำหนดไว้ในวิธีการคำนวณ โดยไม่ได้ครอบคลุมฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 และ 3

ดังนั้น การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในงานนี้ไม่ได้มีเป้าหมายเพียงเพื่อหาปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดเท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาว่า **กระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวส่งผลต่อแรงดันในแต่ละตำแหน่งของโครงข่ายอย่างไร** ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาและระบบกรองฮาร์มอนิกในหัวข้อถัดไป

3.3 การควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วย Reactive Power Compensation และ Harmonic Filter

เมื่อระบบไฟฟ้าต้องรองรับโหลดกำลังสูงและโหลด Non-linear ปริมาณกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาและกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุม ระบบ Reactive Power Compensation และ Harmonic Filter จึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยควบคุมพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งาน [8]

3.3.1 Reactive Power Compensation

กำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบหนึ่งของกำลังไฟฟ้าปรากฏ โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้จาก

$$| S | = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

สำหรับระบบสามเฟส กำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ในรูป

$$Q = \sqrt{3} V_{LL} I \sin \phi$$

เมื่อระบบมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา ปริมาณ Reactive Power สุทธิที่ระบบต้องจ่ายสามารถพิจารณาในเชิงแนวคิดได้เป็น

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{load}} - Q_{\text{comp}}$$

โดย Q_{load}คือ Reactive Power ที่เกิดจากโหลด และ Q_{comp}คือ Reactive Power ที่ระบบชดเชยให้กับระบบไฟฟ้า

ในระบบ PPEN แบบจำลอง Version 2 มีการจำลองระบบ Reactive Power Compensation รวมถึง STATCOM เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าภายใต้สภาวะการใช้งานต่าง ๆ

การชดเชย Reactive Power มีความเกี่ยวข้องกับกระแสที่ไหลในระบบ เนื่องจากการลดองค์ประกอบ Qที่ระบบต้องจ่ายสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าปรากฏและกระแสที่เกี่ยวข้องกับการส่งกำลังไฟฟ้าได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม Reactive Power Compensation ไม่ได้ทำหน้าที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมด จึงจำเป็นต้องพิจารณาระบบกรองฮาร์มอนิกเพิ่มเติม [3], [10]

3.3.2 Harmonic Filter

ระบบกรองฮาร์มอนิกทำหน้าที่เป็นเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์เหมาะสมสำหรับกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เป้าหมาย เพื่อลดผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อแรงดันของระบบ โดยเฉพาะ Passive Harmonic Filter ซึ่งอาศัยคุณสมบัติทางความถี่ขององค์ประกอบ Inductor และ Capacitor [7]

สำหรับวงจร LC ความถี่เรโซแนนซ์สามารถเขียนได้เป็น

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ดังนั้น การออกแบบและประเมินประสิทธิผลของตัวกรองไม่ได้พิจารณาเฉพาะค่าของ Lและ Cเท่านั้น แต่ต้องพิจารณาร่วมกับอิมพีแดนซ์ของระบบและสภาวะการทำงานจริงด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ System Impedance สามารถส่งผลต่อการกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกในระบบได้

ในเอกสารของ Phasor Model Version 2 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกระบุถึงความไม่แน่นอนของ Grid Impedance รวมถึงข้อจำกัดของพารามิเตอร์ของระบบ PPEN และ Harmonic Filter ที่ใช้ในแบบจำลอง เช่น

การไม่รวม Stray Capacitance และ Frequency Dependency ของพารามิเตอร์บางส่วน จึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ของระบบได้ดังนี้

Harmonic Source → Harmonic Filter → System Impedance → Harmonic Response

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว การประเมินผลกระทบของฮาร์มอนิกจึงจำเป็นต้องทราบทั้งลักษณะของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก คุณสมบัติของระบบกรอง และโครงสร้างของโครงข่ายไฟฟ้า รวมถึงตำแหน่งของจุดที่ต้องการประเมิน ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ต้องใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้าในการวิเคราะห์ และนำไปสู่หลักการของ Phasor Model ในหัวข้อถัดไป

3.4 การจำลองระบบไฟฟ้าด้วย Phasor Model

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังสูงและมีอุปกรณ์ Power Electronics จำเป็นต้องพิจารณาพฤติกรรมของโหลดและโครงข่ายร่วมกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและกระแสของโหลดสามารถส่งผลต่อแรงดันและคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบได้ [7] ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้าแบบ **Phasor Model** ซึ่งพัฒนาบน MATLAB/Simulink เพื่อจำลองพฤติกรรมของระบบ PPEN และ CPS ในลักษณะ Phasor/RMS และนำผลการจำลองไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในขั้นตอนถัดไป

เอกสาร PPEN and CPS Phasor Model Version 2 ระบุว่าแบบจำลองดังกล่าวเป็นการปรับปรุงแบบจำลองเดิมของระบบ CPS และ PPEN โดยครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญของระบบ เช่น Converter, Reactive Power Compensation, ระบบไฟฟ้าระดับ 400 kV และระบบ H&CD รวมถึงการเชื่อมต่อกับระบบส่งภายนอก [10]

3.4.1 การแทนระบบไฟฟ้าด้วย Phasor Model

Phasor Model ใช้การแทนปริมาณทางไฟฟ้าด้วยค่า RMS และเฟสของแรงดันและกระแส แทนการจำลองรูปคลื่นแรงดันและกระแสแบบ Instantaneous ในทุกช่วงเวลาของคาบความถี่พื้นฐาน จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบไฟฟ้าในลักษณะ Quasi-steady-state และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับระบบไฟฟ้าในระดับระบบ [8]

ในแบบจำลอง PPEN/CPS โหลดแต่ละประเภทถูกแทนด้วยพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา โดยผลการจำลองสามารถนำไปใช้พิจารณาค่าแรงดัน กำลังไฟฟ้า และกระแสของระบบได้ ดังนั้น กระบวนการวิเคราะห์ในระดับพื้นฐานสามารถแสดงได้เป็น

$$\boxed{\text{Load \& Network Parameters} \rightarrow \text{Phasor Simulation} \rightarrow P, Q, V, I}$$

ผลลัพธ์ P, Q, V, I จากการจำลองมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เนื่องจากผล Load Flow จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลดในขั้นตอน Post-processing

3.4.2 การวิเคราะห์ Load Flow และแรงดันของระบบ

การวิเคราะห์ Load Flow มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขของโหลดและโครงข่ายที่กำหนด โดยผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา แรงดัน และกระแสของแต่ละส่วนของระบบ

ในบริบทของแบบจำลอง PPEN/CPS ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้ใช้เฉพาะเพื่อดูการใช้กำลังไฟฟ้าของโหลดเท่านั้น แต่ยังเป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของโหลดแต่ละประเภทด้วย โดยเอกสารแบบจำลองระบุขั้นตอนว่า ผลของ Load Flow ถูกนำไปใช้คำนวณฮาร์มอนิกของแต่ละโหลด จากนั้นจึงคำนวณแรงดันของแต่ละ Node โดยใช้ Admittance Matrix ของโครงข่าย PPEN จึงสามารถแสดงลำดับการคำนวณได้ดังนี้

$$\boxed{\text{Load} \rightarrow \text{Load Flow} \rightarrow P, Q, V, I \rightarrow \text{Harmonic Current}}$$

3.4.3 การคำนวณแรงดันด้วย Admittance Matrix

เมื่อทราบกระแสฮาร์มอนิกของโหลดแล้ว จำเป็นต้องพิจารณาว่ากระแสดังกล่าวส่งผลต่อแรงดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงข่ายอย่างไร วิธีที่ใช้ในแบบจำลองคือการสร้าง Admittance Matrix ที่เป็นตัวแทนของโครงข่าย PPEN และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของระบบในการคำนวณแรงดันของแต่ละ Node

ความสัมพันธ์พื้นฐานของระบบสามารถเขียนได้เป็น

$$I = YV$$

ดังนั้น หากทราบกระแสและ Admittance Matrix แรงดันของระบบสามารถคำนวณได้จาก

$$V = Y^{-1}I$$

โดย

- I คือเวกเตอร์กระแสของระบบ
- V คือเวกเตอร์แรงดันของระบบ
- Y คือ Admittance Matrix ของโครงข่าย

สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก จะพิจารณาแยกตามลำดับฮาร์มอนิก h ดังนี้

$$I_h = Y_h V_h$$

และ

$$V_h = Y_h^{-1} I_h$$

ดังนั้น แรงดันฮาร์มอนิกที่แต่ละ Node ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโครงข่าย ณ ความถี่นั้นด้วย

3.4.4 ตำแหน่ง Node และการประเมินผลกระทบของฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ในงานนี้จึงต้องพิจารณา ตำแหน่งของ Node ที่กระแสฮาร์มอนิกถูกฉีดเข้าสู่ระบบและตำแหน่งที่ต้องการประเมินแรงดัน โดยในโครงสร้าง Admittance Matrix ของแบบจำลอง PPEN มีการแทนโครงข่ายตั้งแต่จุดเชื่อมต่อกับระบบภายนอกไปจนถึงระดับแรงดัน 66 kV และ 22 kV

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างโครงข่ายและตำแหน่ง Node ที่ใช้ในการสร้าง Admittance Matrix

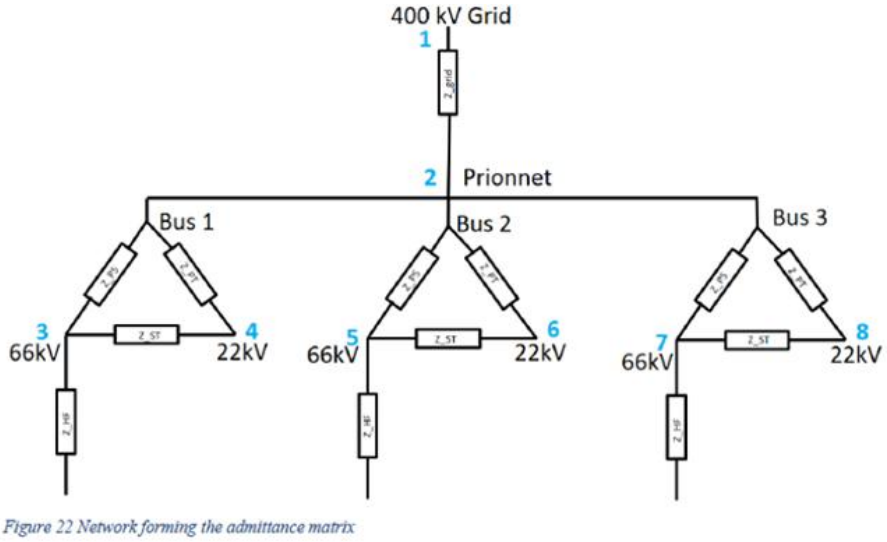


Figure 22 Network forming the admittance matrix

รูปที่ 3.1 โครงสร้างโครงข่าย PPEN และตำแหน่ง Node สำหรับการคำนวณ Admittance Matrix

จากโครงสร้างดังกล่าว สามารถมองภาพการวิเคราะห์ได้ว่า จุดเชื่อมต่อกับระบบภายนอกทำหน้าที่เป็นจุดอ้างอิงของระบบ ขณะที่ Node ที่เกี่ยวข้องกับโหลดและ Bus ระดับต่าง ๆ จะถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณแรงดันและกระแสของระบบ

ประเด็นนี้มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดหนึ่งไม่ได้ส่งผลเฉพาะบริเวณที่โหลดนั้นเชื่อมต่ออยู่ แต่สามารถแพร่ผ่านโครงข่ายตามคุณสมบัติของระบบและส่งผลต่อแรงดันที่ Node อื่นได้ ดังนั้น การประเมินคุณภาพกำลังไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาทั้ง แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ตำแหน่งของโหลด และคุณสมบัติของโครงข่าย

3.4.5 ลำดับการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

จากหลักการข้างต้น สามารถสรุปลำดับการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับงานศึกษาได้ดังนี้

Load → Phasor Model → Load Flow → Harmonic Current → Admittance Matrix → Node Voltage → THD Assessment

โดยผลลัพธ์จากขั้นตอน Load Flow จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลด ขณะที่ Admittance Matrix ใช้เชื่อมโยงกระแสฮาร์มอนิกกับแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละ Node ตามวิธีการที่ระบุในเอกสารแบบจำลอง

สำหรับแบบจำลอง Version 2 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเป็นการคำนวณแบบ **Phasor/Quasi-steady-state** และเป็นการวิเคราะห์ในขั้นตอน Post-processing ดังนั้นผลที่ได้จึงเหมาะสำหรับการประเมินพฤติกรรม

ฮาร์มอนิกในสภาวะที่แบบจำลองครอบคลุม แต่ไม่ควรตีความว่าเป็นการจำลองรูปคลื่นแบบ Instantaneous หรือการตอบสนองต่อ Transient ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

หลักการดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการดำเนินงานในบทถัดไป ซึ่งผู้เขียนได้นำแบบจำลอง PPEN และ CPS มาใช้ตรวจสอบโครงสร้างข้อมูล การกำหนดโหลด และการทำงานของแบบจำลอง ก่อนนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และปรับปรุงในประเด็นที่เกี่ยวข้อง

3.5 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT)

จากการศึกษาระบบไฟฟ้าและแบบจำลอง PPEN/CPS ในระดับระบบ พบว่าการวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดและฮาร์มอนิกไม่ได้เกี่ยวข้องเฉพาะกับการประเมินสภาวะของระบบไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์วัดและป้องกันที่ต้องทำงานภายใต้สภาวะการใช้งานดังกล่าวด้วย หนึ่งในอุปกรณ์สำคัญคือ หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT) ซึ่งมีหน้าที่ลดระดับกระแสในระบบไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับระบบวัดและระบบป้องกัน [4]

หลักการทำงานของ CT อาศัยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยกระแสด้านปฐมภูมิจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในแกน และทำให้เกิดกระแสด้านทุติยภูมิที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด ในกรณีอุดมคติความสัมพันธ์สามารถเขียนได้โดยประมาณเป็น

$$\frac{I_p}{I_s} \approx \frac{N_s}{N_p}$$

หรือกำหนดอัตราส่วนการแปลงกระแส (Current Transformer Ratio: CTR) เป็น

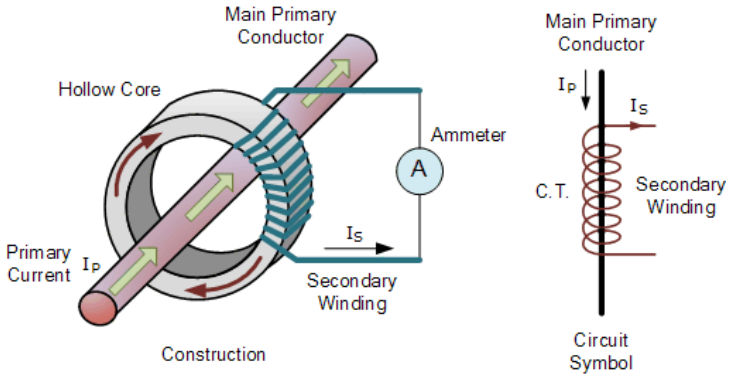
$$CTR = \frac{I_p}{I_s} \approx \frac{N_s}{N_p}$$

โดย

- I_p คือกระแสด้านปฐมภูมิ
- I_s คือกระแสด้านทุติยภูมิ
- N_p คือจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

- N_S คือจำนวนรอบด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.2 แสดงหลักการทำงานของ CT ตั้งแต่กระแสด้านปฐมภูมิ การสร้างสนามแม่เหล็กในแกน ไปจนถึงกระแสด้านทุติยภูมิที่ถูกนำไปใช้ในระบบวัดหรือระบบป้องกัน



รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT)

อย่างไรก็ตาม CT ในการใช้งานจริงไม่ได้มีพฤติกรรมเป็นอุดมคติ เนื่องจากมีปัจจัยต่าง ๆ เช่น Excitation Current คุณสมบัติของแกนแม่เหล็ก และ Burden ของวงจรทุติยภูมิ ส่งผลให้กระแสทุติยภูมิที่ได้อาจแตกต่างจากค่าที่ควรเป็นตามอัตราส่วนอุดมคติ ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ทั้งในรูปของ Ratio Error และ Phase Displacement

นอกจากนี้ เมื่อ CT ต้องรองรับกระแสที่มีค่าสูง โดยเฉพาะกระแสจากสภาวะผิดพร่อง อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแม่เหล็กในแกนและนำไปสู่ Saturation ซึ่งทำให้รูปคลื่นกระแสทุติยภูมิผิดเพี้ยน และอาจส่งผลต่อความถูกต้องของระบบวัดและระบบป้องกัน [4]

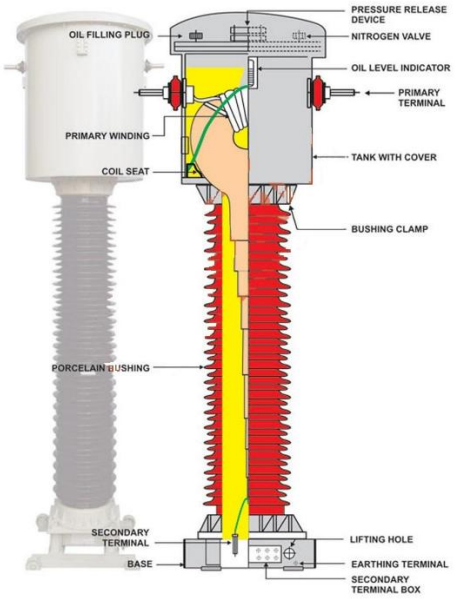
ดังนั้น การประเมินสภาพ CT จึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะอัตราส่วนการแปลงกระแสเท่านั้น แต่ควรพิจารณาทั้ง สมรรถนะทางไฟฟ้า สภาพระบบฉนวน และประวัติสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์ ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาโครงสร้างและระบบฉนวนของ CT ในหัวข้อถัดไป

3.6 โครงสร้างและระบบฉนวนของ Oil-immersed CT

จากหลักการทำงานของ Current Transformer (CT) ในหัวข้อ 3.5 การประเมินสภาพของ CT ไม่ได้พิจารณาเฉพาะความสามารถในการแปลงกระแสเท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณา โครงสร้างทางกายภาพและระบบฉนวน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ โดยเฉพาะ CT แบบใช้น้ำมันเป็นฉนวน (Oil-

immersed CT) ที่ต้องทำงานภายใต้ทั้ง Electrical Stress, Thermal Stress และ Environmental Stress ตลอดอายุการใช้งาน

โครงสร้างหลักของ CT ประกอบด้วยส่วนของวงจรปฐมภูมิ (Primary Circuit) แกนแม่เหล็กและขดลวดทุติยภูมิ (Magnetic Core and Secondary Winding) ระบบฉนวน และส่วนประกอบสำหรับการเชื่อมต่อและรองรับทางกล ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของหม้อแปลงวัดกระแสแบบ Oil-immersed

3.6.1 โครงสร้างหลักของ CT

ส่วนประกอบภายนอกที่สำคัญของ CT ได้แก่

- **Primary Terminal (P1/P2)** เป็นจุดเชื่อมต่อกับวงจรปฐมภูมิ ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าของระบบไหลผ่าน
- **Transformer Head** เป็นส่วนที่บรรจุองค์ประกอบสำคัญของ CT เช่น Magnetic Core, Secondary Winding และระบบฉนวน
- **Insulator** ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้ากับโครงสร้างภายนอก รวมถึงช่วยเพิ่มระยะ Creepage และ Clearance ให้เหมาะสมกับระดับแรงดันของระบบ

- **Secondary Terminal** เป็นจุดเชื่อมต่อสัญญาณกระแสจากขดลวดทุติยภูมิไปยังอุปกรณ์วัดและระบบป้องกัน
- **Bellow / Expansion System** ทำหน้าที่รองรับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำมันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการใช้งาน

ดังนั้น โครงสร้างของ CT จึงไม่ได้ทำหน้าที่เพียงแปลงระดับกระแสเท่านั้น แต่ต้องสามารถรักษา **Electrical Insulation, Mechanical Integrity และ Measurement Performance** ให้คงอยู่ตลอดช่วงการใช้งาน

3.6.2 ระบบฉนวน Oil–Paper

สำหรับ Oil-immersed CT ระบบฉนวนประกอบด้วย **น้ำมันฉนวน (Insulating Oil)** และ **ฉนวนแข็งประเภทกระดาษ (Paper Insulation)** ซึ่งทำงานร่วมกันเป็นระบบฉนวน Oil–Paper

น้ำมันฉนวนมีหน้าที่สำคัญทั้งในด้านการเป็นฉนวนไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณที่เกิดการสูญเสียภายในอุปกรณ์ ขณะที่ฉนวนกระดาษทำหน้าที่เป็นฉนวนแข็งสำหรับแยกส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันภายใน CT [5], [9]

ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานทางไฟฟ้าและความร้อนมีความสำคัญต่อการประเมินสภาพของ CT เนื่องจากการไหลของกระแสผ่านตัวนำทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่งสามารถอธิบายเบื้องต้นได้จาก

$$P_{\text{loss}} = I^2 R$$

โดยที่

P_{loss} คือ กำลังสูญเสียจากความต้านทาน

I คือ กระแสไฟฟ้า

R คือ ความต้านทานของตัวนำ

จากสมการดังกล่าว เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น การสูญเสียที่สัมพันธ์กับกระแสจะเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแส ส่งผลให้เกิดความร้อนภายในอุปกรณ์ ดังนั้น **ระดับกระแสและระยะเวลาที่ CT ทำงานภายใต้กระแสดังกล่าว** จึงเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมิน Thermal Stress

อย่างไรก็ตาม สมการ I^2R เป็นเพียงพื้นฐานสำหรับอธิบายแหล่งกำเนิดความร้อนเท่านั้น อุณหภูมิจริงของ CT ยังขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น ความต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ลักษณะการถ่ายเทความร้อน สภาวะแวดล้อม และโครงสร้างของอุปกรณ์

3.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับการเสื่อมของระบบฉนวน

ระบบฉนวน Oil–Paper มีความไวต่ออุณหภูมิ ความชื้น ออกซิเจน และ Electrical Stress การทำงานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานสามารถเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษและน้ำมันได้

ในกรณีของฉนวนกระดาษ การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเซลลูโลสจะส่งผลต่อค่า **Degree of Polymerization (DP)** ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดระดับการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนได้ในเชิงวิศวกรรม ดังนั้น ความสัมพันธ์ของกระบวนการจึงสามารถสรุปได้เป็น

Operating Current → Electrical Loss → Heat Generation → Temperature Rise → Insulation Aging

ประเด็นสำคัญคือ **กระแสที่สูงไม่ได้หมายความว่า CT เสื่อมสภาพโดยตรง** แต่กระแสเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สามารถสร้าง Thermal Stress ให้กับอุปกรณ์ และ Thermal Stress ดังกล่าวจึงอาจมีส่วนเร่งการเสื่อมของระบบฉนวนเมื่อเกิดขึ้นในระดับสูงหรือเป็นเวลานาน

แนวคิดนี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการนำ **Operating Current และ Harmonic Current** มาวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลการใช้งานของ CT เข้ากับการประเมินสภาพและแนวทางการบำรุงรักษา

3.7 กลไกการเสื่อมสภาพและตัวชี้วัดสภาพ CT

จากหัวข้อ 3.6 จะเห็นได้ว่า CT ต้องเผชิญกับความเครียดจากการใช้งานหลายรูปแบบ และความเครียดดังกล่าวสามารถนำไปสู่กลไกการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้น การประเมินสภาพ CT จึงควรพิจารณาความสัมพันธ์ตั้งแต่ **สภาวะการใช้งาน ⟶ ความเครียด ⟶ กลไกการเสื่อม ⟶ ตัวชี้วัดสภาพ** กรอบแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

Operating Stress → Degradation Mechanism → Condition Indicator

3.7.1 Thermal Stress

Thermal Stress เกิดจากการสูญเสียภายในอุปกรณ์ที่สัมพันธ์กับกระแส โดยเฉพาะการสูญเสียจากตัวนำ ซึ่งมีความสัมพันธ์เบื้องต้นกับ I^2R เมื่อ CT ทำงานภายใต้กระแสสูงหรือมีองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกส์ การสูญเสียรวมอาจเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นภายในอุปกรณ์ หากเกิดซ้ำหรือเกิดเป็นระยะเวลานาน อาจเพิ่มอัตราการเสื่อมของระบบฉนวน Oil–Paper

อย่างไรก็ตาม Current History เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับการประเมิน Remaining Life ของ CT เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงยังขึ้นกับระยะเวลาการรับโหลด สภาวะแวดล้อม คุณสมบัติทางความร้อน และโครงสร้างของ CT ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ข้อมูลกระแสเป็น Stress Indicator หรือข้อมูลสำหรับ Stress Profiling มากกว่าการใช้เป็นตัวแทนโดยตรงของอายุคงเหลือของ CT

3.7.2 Mechanical and Electromagnetic Stress

เมื่อ CT รับกระแสสูง โดยเฉพาะในช่วง Fault Current จะเกิดแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างตัวนำและส่วนประกอบที่มีกระแสไหลผ่าน แรงดังกล่าวอาจทำให้เกิด Mechanical Stress ต่อขดลวด จุดยึด และโครงสร้างภายใน

ดังนั้น Fault Current History จึงมีประโยชน์ในฐานะข้อมูลประวัติการรับ **Electromagnetic Stress** ของอุปกรณ์ และสามารถนำมาประกอบการประเมินร่วมกับผลการตรวจสอบสภาพทางกายภาพและผลการทดสอบอื่นได้

3.7.3 Electrical Stress

นอกจาก Thermal และ Mechanical Stress แล้ว ระบบฉนวนของ CT ยังต้องรองรับ Electrical Stress จากระดับแรงดัน การกระจายสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ และความผิดปกติภายในระบบฉนวน หากระบบฉนวนมีความบกพร่องร่วมกับสภาวะ Electrical Stress อาจนำไปสู่ Partial Discharge (PD) และการเสื่อมสภาพของฉนวนเพิ่มเติม ดังนั้น PD และค่าที่เกี่ยวข้องกับสภาพฉนวนจึงสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินสภาพของ CT ได้

3.7.4 Chemical and Environmental Stress

ระบบฉนวน Oil–Paper ยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยทางเคมีและสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น ออกซิเจน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันและกระดาษฉนวน

การวิเคราะห์ **Dissolved Gas Analysis (DGA)** สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการติดตามก๊าซที่เกิดขึ้นและใช้ประกอบการวิเคราะห์ความผิดปกติภายในหม้อแปลงวัดกระแส ทั้งนี้ การแปลผล DGA ควรพิจารณาร่วมกับประวัติการใช้งานและผลการตรวจสอบอื่น ไม่ควรใช้ผลจากตัวชี้วัดเพียงรายการเดียวในการสรุปสภาพอุปกรณ์ [5], [6]

3.7.5 ตัวชี้วัดสำหรับการประเมินสภาพ CT

จากกลไกการเสื่อมที่กล่าวข้างต้น ตัวชี้วัดที่สามารถนำมาใช้ประกอบการประเมิน CT ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวชี้วัดการเสื่อมสภาพของ CT

กลุ่ม	**ตัวชี้วัด/ข้อมูล**	**สิ่งที่สะท้อน**
Electrical Performance	Ratio Error	ความถูกต้องของอัตราส่วนการแปลงกระแส
Electrical Performance	Phase Displacement	ความคลาดเคลื่อนทางเฟสของกระแสทุติยภูมิ
Insulation	DGA	ข้อมูลความผิดปกติ/กระบวนการเสื่อมภายใน
Insulation	Moisture	ระดับความชื้นในระบบฉนวน
Insulation	PD	ความผิดปกติของระบบฉนวนจากการคายประจุบางส่วน
Insulation	Power Factor / Tan δ	สภาพของระบบฉนวน
Operating Stress	Current History	ประวัติการรับกระแสและ Thermal Stress
Operating Stress	Fault Current History	ประวัติการรับกระแสผิดพร่องและ Electromagnetic Stress

จุดสำคัญของแนวทางนี้คือ ไม่มีตัวชี้วัดใดตัวหนึ่งที่สามารถอธิบายสภาพของ CT ได้ครบถ้วน การประเมินจึงควรพิจารณาร่วมกันระหว่างผลการทดสอบสภาพอุปกรณ์ ประวัติการใช้งาน และระดับความสำคัญของอุปกรณ์ต่อระบบกล่าวโดยสรุป แนวคิดที่ใช้ในการศึกษาสามารถเขียนเป็น

Operating History → Stress Profile → Condition Tests → Condition Assessment

กรอบแนวคิดดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงแนวทางการบำรุงรักษา CT จากการพิจารณาตามระยะเวลาหรือรอบการบำรุงรักษาเพียงอย่างเดียว ไปสู่การพิจารณาร่วมกันระหว่าง Condition และ Operating Stress เพื่อให้การประเมินสภาพและการจัดลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษาสอดคล้องกับสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.8

3.8 แนวคิดการบำรุงรักษา CT ตามสภาพและสภาวะการใช้งาน

จากหลักการทำงาน โครงสร้าง ระบบฉนวน และกลไกการเสื่อมสภาพของ CT ที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า จะเห็นได้ว่าสภาพของ CT ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากระดับและลักษณะการใช้งาน รวมถึงความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า และสภาพของระบบฉนวน ดังนั้น แนวทางการบำรุงรักษาจึงควรพิจารณาข้อมูลหลายด้านประกอบกัน

โดยทั่วไป การบำรุงรักษา CT สามารถพิจารณาได้ทั้ง การบำรุงรักษาตามระยะเวลา (Time-Based Preventive Maintenance) และ การบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition-Based Maintenance: CBM) การบำรุงรักษาตามระยะเวลาเป็นการกำหนดรอบการตรวจสอบหรือทดสอบไว้ล่วงหน้า ขณะที่ CBM ใช้ข้อมูลสภาพจริงของอุปกรณ์ร่วมกับประวัติการใช้งานเพื่อสนับสนุนการกำหนดกิจกรรมและช่วงเวลาการบำรุงรักษา [9]

สำหรับ CT ข้อมูลที่ใช้ประกอบการประเมินสภาพสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ (1) Condition Indicators เช่น Ratio Error, Phase Displacement, DGA และผลการทดสอบระบบฉนวน (2) Operating Stress เช่น Current History และ Fault Current History และ (3) Asset Criticality ซึ่งสะท้อนความสำคัญของอุปกรณ์และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นหากอุปกรณ์ขัดข้อง

การนำข้อมูลทั้งสามกลุ่มมาพิจารณาร่วมกันช่วยให้สามารถแยกความแตกต่างระหว่าง CT ที่มีอายุการใช้งานใกล้เคียงกันแต่ได้รับสภาวะการใช้งานแตกต่างกันได้ เช่น CT ที่มีประวัติการรับกระแสสูงหรือผ่านเหตุการณ์ Fault Current หลายครั้ง อาจมีระดับ Operating Stress แตกต่างจาก CT ที่ทำงานภายใต้สภาวะปกติ แม้ว่าจะมีอายุการใช้งานเท่ากันก็ตาม [4], [9]

สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังสูงและอุปกรณ์ Power Electronics ข้อมูล Operating Current และ Harmonic Current สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมิน Thermal Stress ได้ เนื่องจากองค์ประกอบของกระแสมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียและความร้อนภายในอุปกรณ์ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลกระแสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้สรุปสภาพหรือ Remaining Life ของ CT ได้โดยตรง เนื่องจากการเสื่อมของระบบฉนวนยังขึ้นกับอุณหภูมิ ระยะเวลาการรับ Stress สภาพแวดล้อม และปัจจัยทางเคมีและไฟฟ้าอื่น ๆ

ดังนั้น แนวคิดการบำรุงรักษาที่นำมาใช้ในการศึกษาจึงมุ่งเน้นการ นำข้อมูล Condition และ Operating Stress มาพิจารณาร่วมกัน เพื่อสนับสนุนการประเมินสภาพและการจัดลำดับความสำคัญของงานบำรุงรักษา โดยเฉพาะการนำข้อมูลกระแสและฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ามาใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมิน Thermal Stress ของ CT แนวคิดดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการทำ Gap Analysis และพัฒนาแนวทางการปรับปรุงกลยุทธ์การบำรุงรักษา CT ในการศึกษาครั้งนี้

บทที่ 4
การดำเนินงานและกิจกรรมภายใต้โครงการวิจัยแลกเปลี่ยน

4.1 ภาพรวมการดำเนินงาน

การเข้าร่วมโครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ITER ดำเนินการระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 31 พฤษภาคม 2569 ณ ITER Organization สาธารณรัฐฝรั่งเศส ในตำแหน่ง Visiting Researcher ภายใต้หน่วยงาน IO/DG/CP/ESP/ECPS โดยมีการปฏิบัติงานร่วมกับผู้เชี่ยวชาญของ ITER และศึกษาแนวทางการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าและการบำรุงรักษาอุปกรณ์

การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ได้แก่

1. การศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า PPEN และ CPS
2. การศึกษาแนวทางการบำรุงรักษา Current Transformer (CT) ในระบบ RPC&HF

นอกจากนี้ ได้มีการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ด้านวิศวกรรมระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์ระบบ และแนวทางการบำรุงรักษากับผู้เชี่ยวชาญของ ITER ตลอดระยะเวลาการเข้าร่วมโครงการ

4.2 การศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า PPEN และ CPS

การดำเนินงานส่วนแรกมุ่งศึกษาแบบจำลองระบบไฟฟ้าของ **Pulsed Power Electrical Network (PPEN)** และ **Coil Power Supplies (CPS)** ซึ่งเป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์สำคัญของ ITER

ผู้จัดทำได้ศึกษาโครงสร้างของแบบจำลอง **Phasor Model Version 2** ที่พัฒนาด้วย MATLAB Simulink รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคำสั่งที่ใช้ในแบบจำลองกับผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานประกอบด้วย

1. ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของแบบจำลอง PPEN และ CPS
2. ตรวจสอบ Command Script และคำสั่งที่ใช้ในการกำหนดค่าของแบบจำลอง
3. ทดสอบการทำงานของแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด
4. ตรวจสอบผลการจำลองและพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q)

5. ปรับปรุงคำสั่งหรือส่วนที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองให้มีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการใช้งาน
6. แลกเปลี่ยนข้อคิดเห็นและตรวจสอบแนวทางการดำเนินงานร่วมกับผู้เชี่ยวชาญของ ITER

การดำเนินงานดังกล่าวช่วยให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการจำลองระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากโหลดที่เกี่ยวข้องกับระบบฟิวชัน

4.3 การศึกษาแนวทางการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF

การดำเนินงานส่วนที่สองมุ่งศึกษาการบำรุงรักษา **Current Transformer (CT)** ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบ **Reactive Power Compensation and Harmonic Filter (RPC&HF)** โดยเน้นการทบทวนแนวทางการบำรุงรักษาที่มีอยู่และวิเคราะห์ช่องว่างของแนวทางดังกล่าว

การดำเนินงานประกอบด้วย

1. ศึกษาหน้าที่และความสำคัญของ CT ภายในระบบ RPC&HF
2. ศึกษาแนวทางและกิจกรรมการบำรุงรักษาที่ดำเนินการอยู่
3. รวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพและความเสื่อมของ CT
4. วิเคราะห์ช่องว่าง (Gap Analysis) ระหว่างแนวทางการบำรุงรักษาปัจจุบันกับแนวทางที่ควรดำเนินการ
5. พิจารณาแนวทางการตรวจสอบและติดตามสภาพอุปกรณ์ที่เหมาะสม
6. จัดทำข้อเสนอแนะเพื่อสนับสนุนการปรับปรุง Preventive Maintenance (PM) ของ CT
7. แลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้เชี่ยวชาญของ ITER เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์

แนวทางดังกล่าวมุ่งเน้นการพัฒนาการบำรุงรักษาจากการดำเนินการตามรอบเวลาเพียงอย่างเดียว ไปสู่การพิจารณาข้อมูลสภาพอุปกรณ์และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสื่อม เพื่อสนับสนุนการวางแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

4.4 การแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และประสบการณ์

นอกเหนือจากงานที่ได้รับมอบหมาย ผู้จัดทำได้เรียนรู้แนวทางการทำงานของวิศวกรในโครงการ ITER ผ่านการประชุม การหารือทางเทคนิค และการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้เชี่ยวชาญในหน่วยงาน

ประเด็นการเรียนรู้ครอบคลุมทั้งการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า การใช้แบบจำลองเพื่อสนับสนุนงานวิศวกรรม การจัดการข้อมูลทางเทคนิค และแนวทางการบำรุงรักษาอุปกรณ์สำคัญ โดยเน้นการเชื่อมโยงระหว่างการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกับการนำไปใช้งานจริง

องค์ความรู้และประสบการณ์จากการดำเนินงานดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้รับ ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 4 และบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5
ผลลัพธ์จากการศึกษา

จากการดำเนินงานตามขอบเขตของโครงการ สามารถสรุปผลลัพธ์สำคัญได้ 2 ด้าน ได้แก่ ผลการปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟ และผลการศึกษาเพื่อยกระดับแนวทางการบำรุงรักษา Current Transformer (CT) ในระบบ Reactive Power Compensation and Harmonic Filter (RPC&HF)

5.1 ผลลัพธ์ด้านการปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟ

จากการตรวจสอบแบบจำลอง พบประเด็นสำคัญในส่วนของ Ion Cyclotron Heating (ICH) ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของการกำหนด Unit ID, Logical Bus และค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของโหลด จึงได้ดำเนินการปรับปรุงข้อมูลในสคริปต์ master_inputs.m ให้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

นอกจากนี้ ยังพบความแตกต่างของจำนวนหน่วย ICH ในช่วง DT-1 ระหว่างเอกสารอ้างอิงสองแหล่ง จึงได้แจ้งประเด็นดังกล่าวให้ทีมที่เกี่ยวข้องตรวจสอบและยืนยันข้อมูลก่อนนำไปใช้ในการจำลอง เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์

ในด้านกระบวนการทำงาน ได้จัดทำ 4-Step Initialization Workflow เพื่อกำหนดลำดับขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองให้มีความชัดเจนและสามารถตรวจสอบได้ง่ายขึ้น รวมถึงจัดทำ Classification Matrix สำหรับจำแนกพารามิเตอร์ตามสถานการณ์ (Scenario-Specific Parameters) ออกจากค่าคงที่ทางฟิสิกส์ (Static Constants) เพื่อช่วยลดความเสี่ยงจากการแก้ไขข้อมูลที่ไม่เหมาะสม และสนับสนุนการปรับปรุงแบบจำลองในอนาคต

Prioritized Enhancement Matrix

Priority	Item	Researcher's Rationale	Action
High	ICH Busbar Correction	Corrects loading on Main Buses 1, 2, and 3.	Update input value per Section 3.1.
High	ICH Power Correction	Essential for valid total power results.	Update input value to 6.5 MW.
High	DT-1 Unit Baseline	Critical for long-pulse load studies.	Unify count with stakeholders.
Medium	Workflow Guide	Reduces learning curve for team members.	Add 4-step guide to Section 6.4.

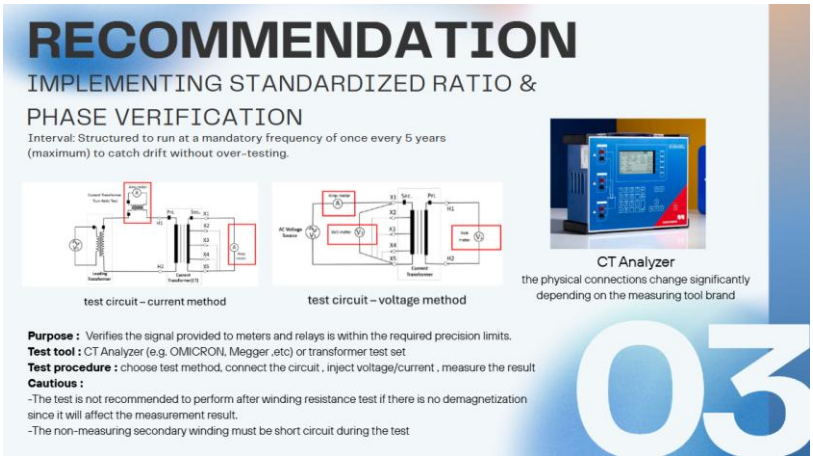
รูปที่ 5.1 ผลการตรวจสอบ/ปรับปรุงข้อมูล ICH ใน master_inputs.m

Step	Description
1	Open the master_inputs.m script and update the information based on the scenario: common time parameters, correction coils, ECH, ICH, HNB/DNB, grid parameters, converter busbar resistances, IVC parameters, H&CD power factor, ELM parameters (Set H_mode start and end time to a very high value to ensure ELM will not operate. Always respect H_mode_end>H_mode_start).
2	Run the script master_execute.m
3	When prompted, select the SCOD excel file that contains the plasma scenario coil voltages and currents.
4	Ensure that the generated excel file "plasma_input.xlsx" contains the sheets Info, Correction_Coils, Magnet_PS_and_VS3, ECH, ICH and NBI

รูปที่ 5.2 4-Step Initialization Workflow และ Classification Matrix

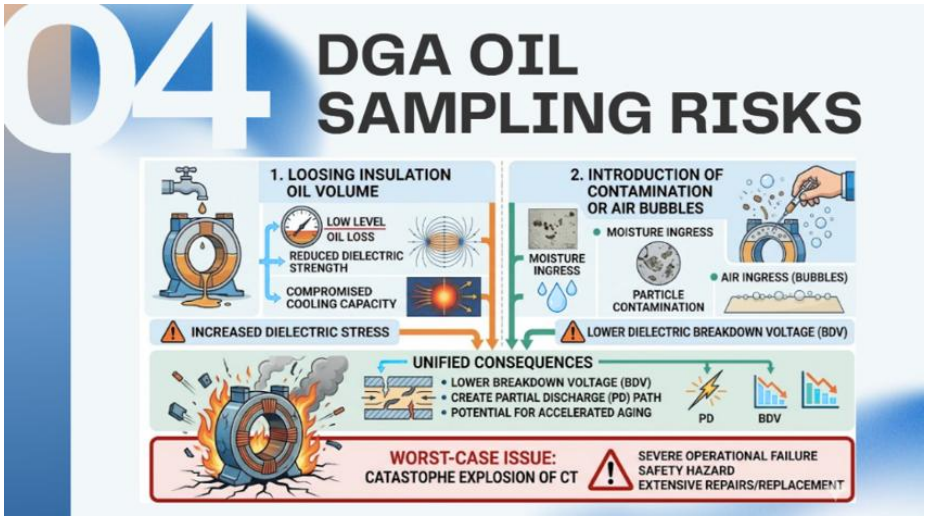
5.2 ผลลัพธ์ด้านการยกระดับการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF

จากการวิเคราะห์แนวทางการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF พบประเด็นที่สามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้ โดยเฉพาะการทดสอบ Ratio Error และ Phase Displacement ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินความถูกต้องของ CT สำหรับการใช้งานด้านระบบวัดและระบบป้องกัน



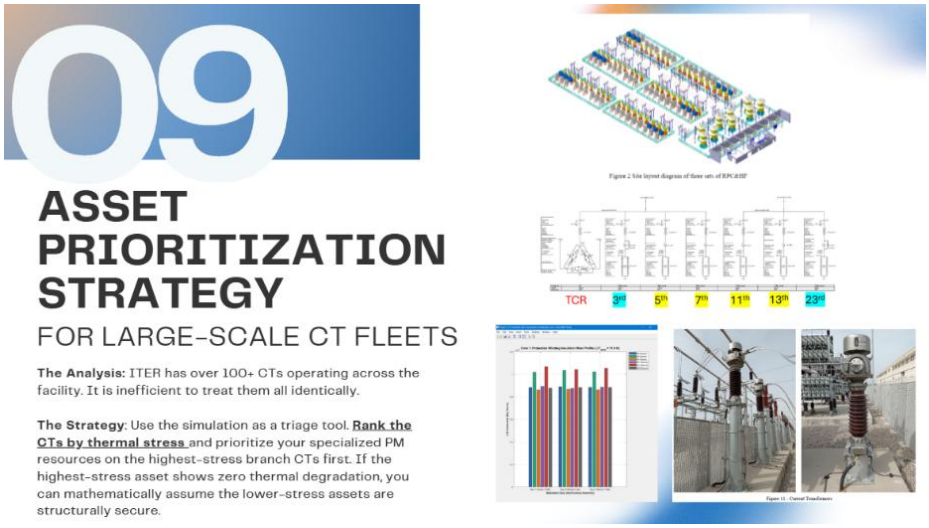
รูปที่ 5.3 แนวทางการทดสอบ Ratio Error และ Phase Displacement

ในด้านการตรวจสอบน้ำมันฉนวน ได้มีการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการเก็บตัวอย่างน้ำมันสำหรับการวิเคราะห์ Dissolved Gas Analysis (DGA) และเสนอให้พิจารณาวิธีการเก็บตัวอย่างให้สอดคล้องกับมาตรฐานและลักษณะของอุปกรณ์ เนื่องจาก CT ที่มีปริมาตรน้ำมันไม่มากจำเป็นต้องควบคุมกระบวนการเก็บตัวอย่างอย่างเหมาะสม เพื่อให้ตัวอย่างมีความถูกต้องและเป็นตัวแทนของสภาพอุปกรณ์



รูปที่ 5.4 แนวทางการเก็บตัวอย่างน้ำมันสำหรับ DGA

นอกจากนี้ ได้เสนอแนวคิด Asset Stress Profiling โดยนำข้อมูลกระแสไฟฟ้าและองค์ประกอบฮาร์มอนิกจากการจำลองระบบไฟฟ้ามาใช้เป็นข้อมูลนำเข้า เพื่อประเมิน Thermal Stress ที่อาจเกิดขึ้นกับ CT และใช้เป็นข้อมูลประกอบการจัดลำดับความสำคัญของงานบำรุงรักษา โดยเป็นการพิจารณาร่วมกับข้อมูลสภาพอุปกรณ์ แทนการพิจารณาจากระยะเวลาเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5.5 แนวคิด Asset Stress Profiling สำหรับ CT

5.3 ข้อจำกัดของแนวทาง

แนวทางการประเมิน Asset Stress Profiling ที่นำเสนอในงานนี้ยังมุ่งเน้นการประเมินความเครียดจากข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นหลัก และยังไม่ได้ครอบคลุมปัจจัยการเสื่อมสภาพเชิงเคมีของน้ำมันและระบบฉนวนทั้งหมด ดังนั้น การนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จริงควรพิจารณาร่วมกับผลการตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ ผลการทดสอบทางไฟฟ้า และข้อมูลการบำรุงรักษาอื่น ๆ เพื่อให้สามารถประเมินสภาพอุปกรณ์ได้อย่างรอบด้านแนวทางการประเมิน Asset Stress Profiling ที่นำเสนอในงานนี้ยังมุ่งเน้นการประเมินความเครียดจากข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นหลัก และยังไม่ได้ครอบคลุมปัจจัยการเสื่อมสภาพเชิงเคมีของน้ำมันและระบบฉนวนทั้งหมด ดังนั้น การนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จริงควรพิจารณาร่วมกับผลการตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ ผลการทดสอบทางไฟฟ้าและข้อมูลการบำรุงรักษาอื่น ๆ เพื่อให้สามารถประเมินสภาพอุปกรณ์ได้อย่างรอบด้าน

บทที่ 6
การประยุกต์ใช้ความรู้และประโยชน์ที่ได้รับ

องค์ความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับจากการเข้าร่วมโครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ITER สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการพัฒนาศักยภาพบุคลากร โดยมีแนวทางสำคัญดังนี้

6.1 การประยุกต์ใช้ด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

ความรู้จากการศึกษา PPEN และ CPS Phasor Model รวมถึงการตรวจสอบข้อมูลและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดขนาดใหญ่และมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะแนวทางการตรวจสอบข้อมูลก่อนการจำลอง การจัดกลุ่มพารามิเตอร์ตามลักษณะการใช้งาน และการจัดทำขั้นตอน Initialization ที่ชัดเจน สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและตรวจสอบแบบจำลองระบบไฟฟ้าอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการจำลอง

6.2 การประยุกต์ใช้ด้านการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า

แนวคิดจากการศึกษาแนวทางการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการพัฒนางานบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะการเปลี่ยนจากการพิจารณาระยะเวลาการบำรุงรักษาเพียงอย่างเดียว ไปสู่การพิจารณาข้อมูลสภาพอุปกรณ์และปัจจัยความเครียดที่อุปกรณ์ได้รับประกอบกัน

แนวคิด Asset Stress Profiling สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาต่อ โดยใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้า ลักษณะโหลด และองค์ประกอบฮาร์มอนิก ร่วมกับข้อมูลจากการตรวจสอบและทดสอบอุปกรณ์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินความเสี่ยงและจัดลำดับความสำคัญของงานบำรุงรักษา ทั้งนี้การนำแนวคิดดังกล่าวไปใช้งานจริงควรพัฒนาร่วมกับข้อมูลสภาพอุปกรณ์และผลการทดสอบที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การประเมินมีความเหมาะสมกับอุปกรณ์และสภาพการใช้งานแต่ละประเภท

6.3 การพัฒนาศักยภาพบุคลากร

การปฏิบัติงานร่วมกับผู้เชี่ยวชาญของ ITER ช่วยเพิ่มพูนความรู้และประสบการณ์ด้านระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในโครงการขนาดใหญ่ระดับนานาชาติ รวมถึงทักษะด้านการสื่อสารและการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางเทคนิค

องค์ความรู้ดังกล่าวสามารถนำมาถ่ายทอดให้แก่บุคลากรที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย ผ่านการแลกเปลี่ยนความรู้ การนำเสนอผลการศึกษา และการประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อสนับสนุนการพัฒนาบุคลากรด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง

6.4 ประโยชน์ต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านพลังงานในประเทศไทย

การเข้าร่วมโครงการทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการระบบไฟฟ้าสำหรับโครงการพลังงานฟิวชัน ซึ่งต้องพิจารณาทั้งระบบจ่ายกำลัง คุณภาพไฟฟ้า การควบคุมโหลด และการบำรุงรักษาอุปกรณ์อย่างเป็นระบบ

ประสบการณ์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ระหว่างหน่วยงานด้านพลังงาน สถาบันวิจัย และบุคลากรด้านวิศวกรรมในประเทศไทย รวมถึงสนับสนุนการเตรียมความพร้อมของบุคลากรสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูงในอนาคต

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การเข้าร่วมโครงการวิจัยแลกเปลี่ยน ITER ระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 31 พฤษภาคม 2569 ณ ITER Organization สาธารณรัฐฝรั่งเศส ในตำแหน่ง Visiting Researcher ภายใต้หน่วยงาน IO/DG/CP/ESP/ECPS ทำให้ผู้จัดทำได้ปฏิบัติงานและแลกเปลี่ยนองค์ความรู้กับผู้เชี่ยวชาญด้านระบบไฟฟ้าและการบำรุงรักษาในโครงการ ITER

การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ การตรวจสอบและปรับปรุงแบบจำลองระบบจ่ายไฟ PPEN และ CPS และการศึกษาแนวทางยกระดับการบำรุงรักษา CT ในระบบ RPC&HF

ในส่วนของแบบจำลองระบบจ่ายไฟ สามารถตรวจพบและแก้ไขความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ICH ใน master_inputs.m รวมถึงตรวจพบความแตกต่างของข้อมูลจำนวนหน่วยในช่วง DT-1 และจัดทำแนวทางสำหรับการเตรียมและจัดการพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เพื่อสนับสนุนการใช้งานและการปรับปรุงแบบจำลองในอนาคต

ในส่วนของการบำรุงรักษา CT ได้ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการบำรุงรักษาที่มีอยู่ และเสนอแนวทางเพิ่มเติม ได้แก่ การทดสอบ Ratio Error และ Phase Displacement การปรับปรุงกระบวนการเก็บตัวอย่างน้ำมันสำหรับ DGA และแนวคิด Asset Stress Profiling ซึ่งสามารถนำไปศึกษาและพัฒนาต่อเพื่อสนับสนุนการบำรุงรักษาตามสภาพและความเสี่ยงของอุปกรณ์

โดยรวมการเข้าร่วมโครงการครั้งนี้ช่วยเพิ่มพูนองค์ความรู้ด้านระบบไฟฟ้า การจำลองระบบ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการทำงานร่วมกับผู้เชี่ยวชาญในระดับนานาชาติ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้และถ่ายทอดต่อในประเทศไทยได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

ด้านแบบจำลองระบบไฟฟ้า ควรมีการทบทวนและตรวจสอบฐานข้อมูลของแบบจำลองอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงการดำเนินงานของโครงการ เพื่อให้ผลการจำลองสะท้อนข้อมูลของระบบที่เป็นปัจจุบัน

ด้านการบำรุงรักษา CT ควรศึกษาและพัฒนาแนวทางการประเมินสภาพ CT โดยพิจารณาข้อมูลจากหลายด้านร่วมกัน ทั้งผลการทดสอบทางไฟฟ้า ข้อมูลน้ำมันฉนวน ประวัติการใช้งาน และภาระทางไฟฟ้าที่อุปกรณ์ได้รับ

ด้าน Asset Stress Profiling ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ฮาร์มอนิก Thermal Stress และความเสื่อมของ CT รวมถึงตรวจสอบความเหมาะสมของแนวทางกับข้อมูลจากอุปกรณ์จริงก่อนนำไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษา

ด้านการถ่ายทอดองค์ความรู้ควรมีการถ่ายทอดองค์ความรู้และประสบการณ์จากโครงการให้แก่บุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อขยายผลจากการแลกเปลี่ยนระดับบุคคลไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ขององค์กรและบุคลากรในประเทศไทย

ด้านความร่วมมือในอนาคตควรส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และความร่วมมือทางวิชาการกับ ITER และหน่วยงานวิจัยหรือสถาบันการศึกษาที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่อง เพื่อสนับสนุนการพัฒนาบุคลากรและองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] ITER Organization, *ITER Electrical Design Handbook*, ITR-20-007, ITER Organization, Saint-Paul-lez-Durance, France.

[2] ITER Organization, “The Balance of Power,” ITER Organization, Saint-Paul-lez-Durance, France.

[3] ITER Organization, “Experts Gather in China to Review Key Power Supply Components,” ITER Organization, Saint-Paul-lez-Durance, France, 2014.

[4] International Electrotechnical Commission, *IEC 61869-2:2012, Instrument Transformers – Part 2: Additional Requirements for Current Transformers*, Geneva, Switzerland: IEC, 2012.

[5] International Electrotechnical Commission, *IEC 60599:2022, Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service – Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*, Geneva, Switzerland: IEC, 2022.

[6] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Std C57.104-2019, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*, New York, NY, USA: IEEE, 2019.

[7] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2003.

[8] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Jr., *Power System Analysis*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[9] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, Nov./Dec. 2002, doi: 10.1109/MEI.2002.1161455.

[10] ITER Organization, *PPEN/CPS Phasor Model Version 2 – Technical Documentation*, internal document, ITER Organization, Saint-Paul-lez-Durance, France, 2026, private communication.