

การศึกษารูปแบบการปลดโหลดเมื่อใช้รีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลง  
ความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้า

THE STUDY OF LOAD SHEDDING SCHEME USING RATE OF CHANGE  
OF UNDER FREQUENCY RELAY IN POWER SYSTEM

นันทิยา ชัยบุตร

อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

9/1 หมู่ 5 ถนนพหลโยธิน จังหวัดปทุมธานี 12120, nuntiya.c@bu.ac.th

Nuntiya Chaiyabut

Lecturer, School of Engineering, Bangkok University,

9/1 Moo 5 Phahonyothin Road, Pathum Thani 12120, Thailand, nuntiya.c@bu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษารูปแบบการปลดโหลดเมื่อใช้รีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้าเพื่อศึกษาการตอบสนองทางความถี่และแรงดันไฟฟ้าภายหลังที่ระบบถูกรบกวนทั้งกรณีการรบกวนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยรูปแบบการปลดโหลดถูกสร้างขึ้นจากการสุ่มค่าร้อยละการปลดโหลดอย่างมีเงื่อนไข การทดสอบเพื่อศึกษากรณีศึกษาต่างๆ ดำเนินการผ่านระบบไฟฟ้าหนึ่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการปลดโหลดที่แตกต่างกันส่งผลต่อความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันและใช้เวลาในการกลับเข้าสู่ค่าที่ยอมรับได้แตกต่างกัน ซึ่งการศึกษารูปแบบการปลดโหลดนี้จะช่วยให้เห็นถึงความสำคัญของรูปแบบการปลดโหลดที่ส่งผลต่อการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

**คำสำคัญ:** อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่, ความถี่ต่ำ, การปลดโหลด

ABSTRACT

This article presents the study of load shedding scheme using the rate of change of under frequency relay in the power system for studying of frequency respond and voltage after a disturbance occurs in the power system in both cases of small and large disturbance. The load shedding scheme is generated by random the percentage of conditional load shedding. The testing for studying various case studies is implemented on the electrical system of the

Provincial Electricity Authority (PEA). The study shows that load shedding with different schemes affects different frequencies and voltages and takes different times to return to acceptable values. This study of this load shedding scheme will give an idea of the importance of load shedding scheme that affects the stability of the electrical system.

**KEYWORDS:** Rate of change of frequency, Under frequency, Load shedding

## 1. บทนำ

ความเชื่อถือได้และความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นเป้าหมายสำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า [1-3] เมื่อระบบถูกรบกวนซึ่งอาจเกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้าหรือความผิดปกติอื่น เช่น การเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างทันทีทันใด การสูญเสียการเชื่อมต่อของสายส่ง และความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า แล้วทำให้ความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ามีค่าลดลงจนกระทั่งไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ที่เลวร้ายที่สุดคือการเกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้างส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าววิธีการปลดโหลดจึงเป็นวิธีที่ช่วยรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และความต้องการไฟฟ้าในระบบให้สมดุลกัน [4-7]

งานวิจัยที่ได้กล่าวถึงรูปแบบการปลดโหลดโดยอาศัยการตรวจจับความถี่ต่ำ ประกอบด้วยการศึกษาการปลดโหลดโดยวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแอมเพียของแอมเพียที่ ซึ่งใช้วิธีการแอมเพียนี้ทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อการปลดโหลดแต่ไม่สามารถประเมินกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปได้ [8] การปลดโหลดโดยอาศัยการทำงาน 2 ส่วนทำงานพร้อมกันโดยอาศัยพื้นฐานของซิงโครเฟสเซอร์ (synchrophasor) ประกอบด้วย ส่วนการพัฒนาแบบจำลองการตอบสนองทางความถี่เพื่อหาปริมาณโหลดในการปลดทั้งแบบคงที่และแบบไดนามิก และส่วนการหาตำแหน่งการปลดโหลดที่ดีที่สุดจากการพิจารณาแรงดันไฟฟ้า [9] นอกจากนี้รูปแบบการปลดโหลดแบบใหม่ถูกนำเสนอผ่านการใช้สมการสวิงเพื่อค้นหาปริมาณโหลดที่น้อยที่สุดเพื่อใช้ในการปลดโหลดโดยยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าไว้ได้ซึ่งถือได้ว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ [10] สำหรับงานวิจัยของ Das et al. [11] ได้แสดงการออกแบบการปลดโหลดสำหรับรีเลย์ป้องกันความถี่ต่ำสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย โดยอาศัยการติดตั้งรีเลย์ทิศทาง การตรวจวัดค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเลือกสายป้อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัดวงจรออกจากระบบและสอดคล้องกับปริมาณโหลดที่ต้องการปลด Shekari et al. [12] นำเสนอรูปแบบการปลดโหลดแบบรวมศูนย์โดยอาศัยรูปแบบการจัดโหลดและกลยุทธ์หลังการปลดโหลดมาใช้กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด (real time) เพื่อหาปริมาณ

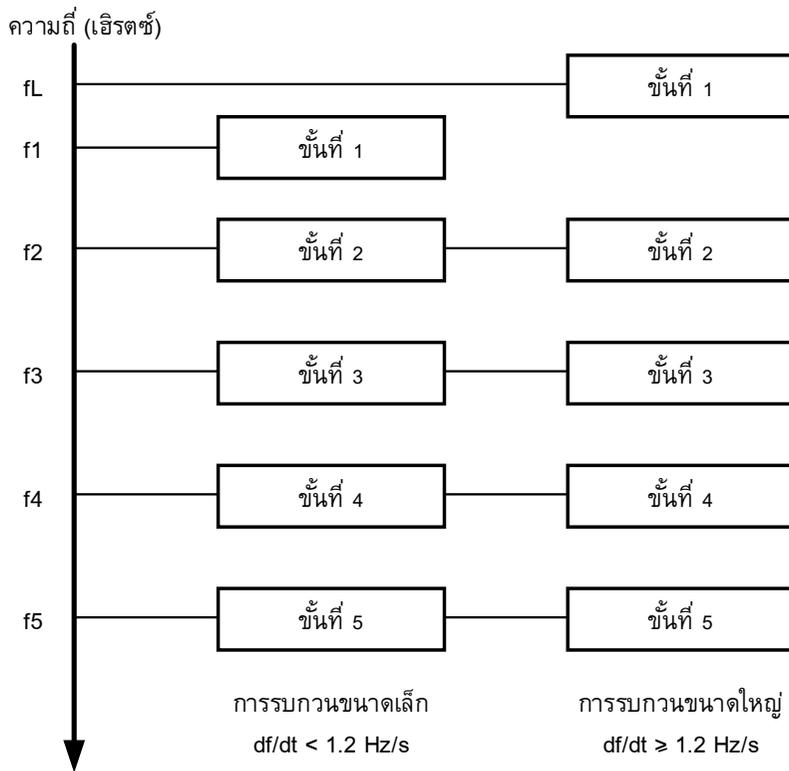
และตำแหน่งของการปลดโหลดโดยคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าและต้นทุนเนื่องจากการปลดโหลด Jianjun et al. [13] นำเสนอการปลดโหลดโดยพิจารณาทั้งเสถียรภาพทางความถี่และแรงดันไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน ซึ่งส่วนแรกพิจารณาขนาดและความรุนแรงที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าจากการรบกวนโดยพิจารณาจากความถี่ที่เกิดขึ้น และส่วนที่สองพิจารณาตำแหน่งและขนาดของโหลดที่ต้องการปลดโดยคำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อแรงดันไฟฟ้า Amraee et al. [14] นำเสนอสำหรับการปลดโหลดโดยใช้แบบจำลองการตอบสนองทางความถี่แบบไดนามิกโดยอาศัยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นแบบผสม (mixed-integer linear programming) เพื่อหาค่าต่ำสุดในการปลดโหลดในการประมาณการปรับตั้งค่าการปลดโหลดแบบหลายชั้น ซึ่งมีการพิจารณาพารามิเตอร์ของระบบในรูปแบบของความไม่แน่นอนร่วมด้วย

บทความนี้นำเสนอการศึกษารูปแบบการปลดโหลดเมื่อใช้รีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้า รูปแบบการปลดโหลดในแต่ละชั้นถูกสร้างขึ้นจากการสุ่มค่าร้อยละการปลดโหลดอย่างมีเงื่อนไข เมื่อรวมกับรูปแบบการปลดโหลดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแล้วจะทำให้เกิดรูปแบบการปลดโหลดทั้งสิ้น 7 รูปแบบ โดยแบบจำลองรีเลย์และการทดสอบเพื่อศึกษารูปแบบการปลดโหลดจะดำเนินการผ่านโปรแกรม DigSILENT Power Factory ซึ่งการศึกษารูปแบบการปลดโหลดนี้จะช่วยให้เห็นถึงความสำคัญของรูปแบบการปลดโหลดที่ส่งผลกระทบต่อตอบสนองทางความถี่และแรงดันไฟฟ้าเพื่อรักษาเสถียรภาพทางความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบ

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 รีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ

การทำงานของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำอาศัยการตรวจจับสัญญาณความถี่ของระบบ โดยเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการรบกวนขึ้นรีเลย์จะแยกความรุนแรงของการรบกวนจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งการแยกความรุนแรงของการรบกวนระบบจะช่วยให้รีเลย์ตัดสินใจทำงานได้อย่างทันท่วงทีเพื่อรักษาเสถียรภาพทางความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบไว้ โดยรีเลย์จะส่งสัญญาณเพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานในแต่ละชั้น (step) จากการตรวจสอบความถี่ของระบบ นั่นคือ ถ้าความถี่ของระบบต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดรีเลย์จะส่งสัญญาณไปยังเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อให้ปลดวงจรหรือปลดโหลดออกจากระบบเพื่อรักษาสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้กับโหลดทั้งหมดในระบบ รูปแบบการทำงานของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการทำงานของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ

รีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่จะแยกความรุนแรงของการรบกวนจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลา (df/dt) ขึ้น ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าจริงสามารถพิจารณาได้จากสมการสวิงในสมการที่ 1 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมและส่วนต่างระหว่างแรงบิดทางกลกับแรงบิดทางไฟฟ้า [15] จากสมการที่ 1 สามารถแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าจริงได้จากสมการที่ 2 ซึ่งการปลดโหลดในระบบไฟฟ้าเพื่อจำกัดความต้องการกำลังไฟฟ้าในระบบให้เพียงพอต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้าจะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในที่สุด

$$J\alpha_m(t) = T_m(t) - T_e(t) = T_a(t) \tag{1}$$

$$\frac{df(t)}{dt} = (P_{m,pu}(t) - P_{e,pu}(t)) \cdot \frac{f_{syn}}{2H} \tag{2}$$

เมื่อ  $J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย  $\alpha_m(t)$  คือ ความเร่งเชิงมุมของโรเตอร์ สำหรับ  $T_m(t)$ ,  $T_e(t)$  และ  $T_a(t)$  คือ แรงบิดทางกล แรงบิดทางไฟฟ้า และ แรงบิดเร่งสุทธิ ตามลำดับ สำหรับตัวแปร  $H$  คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (inertia constant),  $P_{m,pu}(t)$  และ  $P_{e,pu}(t)$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงทางกลและกำลังไฟฟ้าจริงทางไฟฟ้า ตามลำดับ

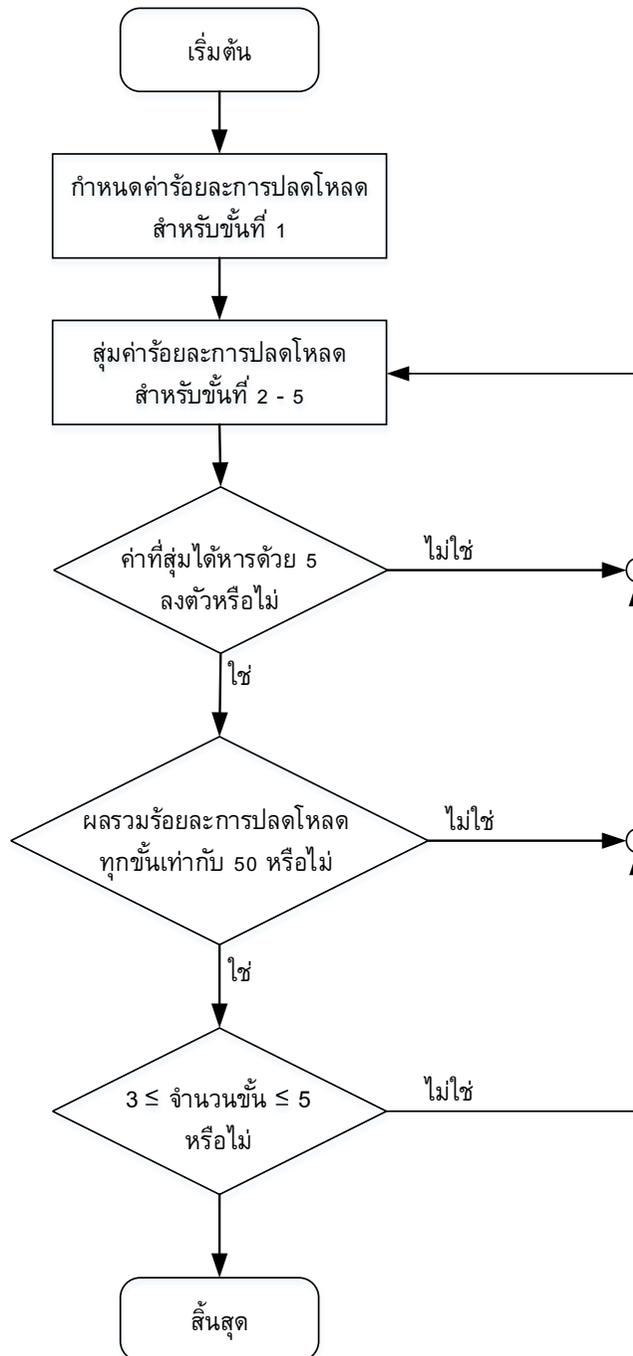
โดยในรูปที่ 1 จะพบว่า การรบกวนขนาดเล็กและขนาดใหญ่จะมีความถี่ของรีเลย์ในชั้นที่ 1 ที่แตกต่างกัน ซึ่งความถี่ fL คือ ความถี่ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้รีเลย์ทำงานปลดโหลดเฉพาะกรณีเกิดการรบกวนขนาดใหญ่เท่านั้น สำหรับความถี่ f1–f5 คือ ความถี่ในการทำงานปลดโหลดของรีเลย์ความถี่ต่ำที่นิยมตั้งไว้ที่ 5 ชั้น โดยการตั้งค่าของรีเลย์ป้องกันความถี่ต่ำทั้ง 5 ชั้นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยความถี่ เวลาหน่วง และ ปริมาณโหลดที่ถูกปลดในแต่ละชั้น

ตารางที่ 1 การปลดโหลดสำหรับรีเลย์ความถี่ต่ำ

ชั้น	ความถี่ (Hz)	เวลาหน่วง (วินาที)	โหลดที่ถูกปลด (% ของโหลดทั้งหมด)
1	49.00	0.15	10
2	48.80	0.15	10
3	48.60	0.15	10
4	48.30	0.15	10
5	47.90	0.15	10

## 2.2 วิธีการศึกษา

กระบวนการศึกษาการปลดโหลดที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้รีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำอาศัยหลักการในการสุ่มตัวเลขร้อยละของโหลดที่ถูกปลดในแต่ละชั้น โดยร้อยละของโหลดที่สามารถปลดได้สูงสุดในทุกชั้นรวมกันมีค่าไม่เกินร้อยละ 50 ของโหลดทั้งหมดในระบบ ซึ่งพิจารณาจากค่าผลรวมของการปลดโหลดทุกชั้นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในตารางที่ 1 และ ร้อยละของโหลดที่สามารถปลดโหลดได้สูงสุดในแต่ละชั้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 30 ของโหลดทั้งหมดในระบบ ซึ่งพิจารณาให้มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของร้อยละการปลดโหลดที่เกิดขึ้นจริงขององค์กรหรือคณะกรรมการต่างๆ ที่ดูแลเกี่ยวกับการไฟฟ้า [16] สำหรับขั้นตอนที่จะได้มาซึ่งรูปแบบร้อยละของโหลดที่ถูกปลดในแต่ละชั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการสุ่มค่าธรรมเนียมของโหนดที่ถูกปลด

โดยกำหนดให้ค่าธรรมเนียมการปลดโหนดที่ใช้ในชั้นที่ 1 ประกอบด้วย 6 ค่า คือ 15, 15, 20, 20, 25 และ 30 เพื่อเน้นการศึกษาให้ครอบคลุมทุกค่าที่สามารถเป็นไปได้และไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้

ไฟฟ้าเป็นบริเวณกว้างในชั้นที่ 1 ในขณะที่ค่าร้อยละการปลดโหลดในการสุ่มสำหรับชั้นตอนที่ 2-5 คือ จำนวนที่หารด้วย 5 ลงตัว เพื่อให้ง่ายต่อการตั้งค่าเมื่อนำไปประยุกต์ต่อการใช้งานจริง

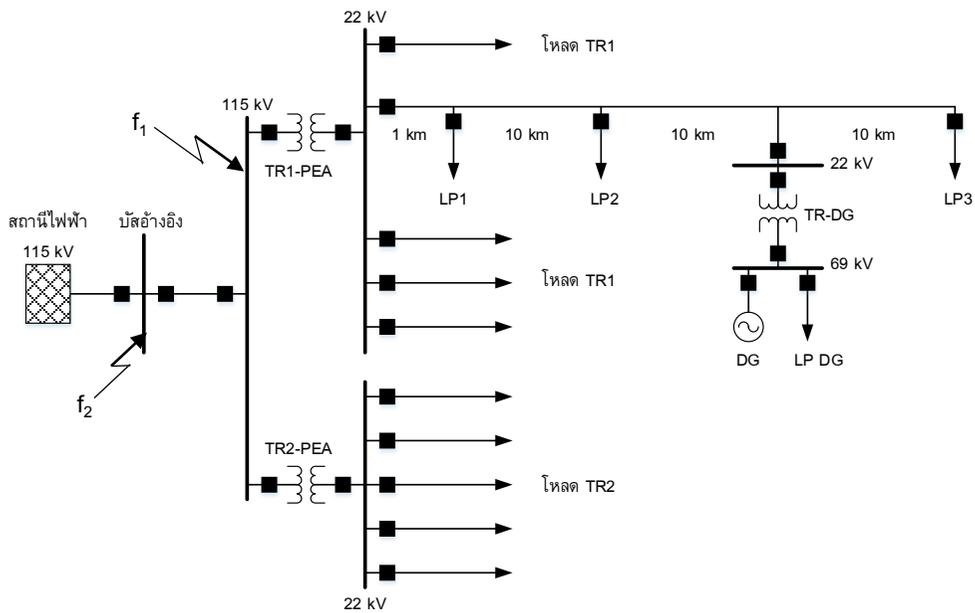
จากวิธีการในการหาค่าสำหรับการปลดโหลดข้างต้นสามารถนำมาเขียนการปรับเปลี่ยนการปลดโหลดที่เกิดขึ้นทั้ง 7 รูปแบบ โดยรวมรูปแบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเข้าไปพิจารณาด้วย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งในแต่ละรูปแบบของการปลดโหลด กำหนดให้ค่าความถี่ในการพิจารณาและเวลาหน่วงในแต่ละชั้นมีค่าเช่นเดียวกับตารางที่ 1

## ตารางที่ 2 รายละเอียดรูปแบบการปลดโหลด

รูปแบบการปลดโหลด	ปริมาณโหลดที่ถูกปลด (ร้อยละของโหลดทั้งหมด)				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5
แบบที่ 1	10	10	10	10	10
แบบที่ 2	15	10	15	10	-
แบบที่ 3	15	15	10	10	-
แบบที่ 4	20	10	10	10	-
แบบที่ 5	20	20	10	-	-
แบบที่ 6	25	15	5	5	-
แบบที่ 7	30	10	10	-	-

### 2.3 กรณีศึกษา

ระบบไฟฟ้านำมาการศึกษาในบทความนี้แสดงดังรูปที่ 3 โดยระบบที่นำมาศึกษาดังกล่าวเป็นระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ณ สถานีไฟฟ้าแห่งหนึ่งที่ย้ายโหลดทั้งหมดของระบบขนาด 15 เมกะวัตต์ ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 2 เครื่อง คือ TR1 – PEA และ TR2 – PEA ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากระดับ 115 กิโลโวลต์เป็น 22 กิโลโวลต์ ทั้งนี้มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generator: DG) ในสายป้อนย่อยหนึ่งของหม้อแปลง TR1 – PEA ซึ่งมีขนาด 7.2 เมกะโวลต์แอมป์ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.98 ล้าหลัง โดยติดตั้งผ่านหม้อแปลง TR – DG ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากระดับ 22 กิโลโวลต์เป็น 69 กิโลโวลต์



รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้าสำหรับทดสอบ

การทดสอบเพื่อแสดงการตอบสนองทางด้านความถี่และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าของรูปแบบการปลดโหลดในแบบต่าง ๆ สามารถดำเนินการได้โดยการจำลองการเกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้าทั้งในกรณีการรบกวนขนาดเล็ก (small disturbance) และขนาดใหญ่ (large disturbance) ซึ่งการรบกวนทั้ง 2 กรณีทำให้เกิดความรุนแรงต่อระบบในระดับที่แตกต่างกัน โดยในบทความนี้กำหนดให้การเกิดการรบกวนขนาดใหญ่หรือเกิดความรุนแรงมากเมื่อการรบกวนนั้นทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลามีค่าตั้งแต่ 1.2 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที ในทางตรงกันข้ามถ้าการรบกวนทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลามีค่าน้อยกว่า 1.2 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที ถือได้ว่าเป็นการรบกวนขนาดเล็กหรือไม่ก่อให้เกิดความรุนแรงต่อระบบไฟฟ้ามาก

การจำลองการเกิดการรบกวนขนาดเล็กสามารถทำได้โดยกำหนดให้เกิดความผิดปกติ (fault:  $f_1$ ) ที่บัส 115 กิโลโวลต์ ในขณะที่การเกิดการรบกวนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติ ( $f_2$ ) ที่บัสอ้างอิง ซึ่งการเกิดความผิดปกติในทั้ง 2 กรณีจะเกิดขึ้นที่เวลา 5 วินาที ภายหลังจากเกิดความผิดปกติดังกล่าวทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดโหลดทั้งหมดของระบบไฟฟ้าออกจากบัสหรือสถานีไฟฟ้า โดยกรณีที่เกิดการรบกวนขนาดเล็ก เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันสายส่ง 115 กิโลโวลต์จะปลดหม้อแปลง TR1 – PEA และ TR2 – PEA ออกจากระบบซึ่งทำให้โหลดของหม้อแปลงทั้ง 2 แยกออกจากกัน ในขณะที่เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บัสอ้างอิง

จะปลดสถานีไฟฟ้าออกจากระบบไฟฟ้า โดยโหลดของหม้อแปลง TR1 – PEA และ TR2 – PEA ยังคงเชื่อมต่อกันผ่านสายส่ง 115 กิโลโวลต์

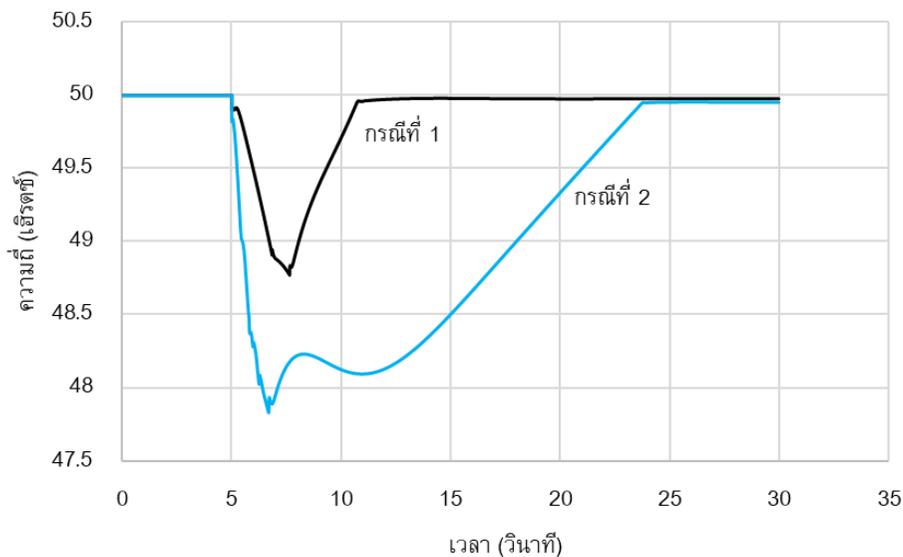
กรณีศึกษาสำหรับการปลดโหลดของบทความนี้แบ่งออกเป็น 8 กรณีศึกษา ตามวิธีการที่นำเสนอข้างต้น จะได้

- กรณีที่ 1 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดเล็ก และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 1
- กรณีที่ 2 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 1
- กรณีที่ 3 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 2
- กรณีที่ 4 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 3
- กรณีที่ 5 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 4
- กรณีที่ 6 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 5
- กรณีที่ 7 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 6
- กรณีที่ 8 เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ และมีรูปแบบการปลดโหลดแบบที่ 7

### 3. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบการปลดโหลดของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำเพื่อรักษาระดับความถี่และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้าสามารถแสดงออกในรูปแบบของการตอบสนองทางความถี่ต่อเวลาและความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งรูปที่ 4 แสดงการตอบสนองทางความถี่สำหรับกรณีที่ระบบไฟฟ้าเกิดความรุนแรงเนื่องจากการรบกวนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยมีลักษณะการปลดโหลดที่เหมือนกันคือรูปแบบการปลดโหลดที่ 1 จะพบว่า ลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะมีการลดลงในทั้ง 2 กรณี แต่จะมีระดับการลดลงหรือความชันที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากความรุนแรงของการถูกรบกวนของระบบไฟฟ้า โดยกรณีที่เกิดการรบกวนขนาดเล็กมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลา คือ 0.55 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที ในขณะที่กรณีที่เกิดการรบกวนขนาดใหญ่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลาเท่ากับ 1.92 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที

ความถี่ต่ำสุดเนื่องจากการรบกวนทั้ง 2 กรณีมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากความรุนแรงที่เกิดขึ้นต่อระบบ โดยกรณีที่การรบกวนขนาดใหญ่จะมีความถี่ต่ำสุดต่ำกว่ากรณีการรบกวนขนาดเล็กประมาณ 0.94 เฮิร์ตซ์ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า รีเลย์ทำงานปลดโหลดในขั้นที่ 2 สำหรับการเกิดการรบกวนขนาดเล็ก ในขณะที่รีเลย์มีการทำงานปลดโหลดในขั้นที่ 5 สำหรับการเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการรบกวนขนาดเล็กระบบจะสามารถกลับเข้าสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ได้รวดเร็วกว่ากรณีที่ระบบไฟฟ้าเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ ซึ่งในการทดสอบนี้ระบบไฟฟ้าใช้เวลาในการกลับเข้าสู่ความถี่ที่ยอมรับได้เมื่อเกิดการรบกวนขนาดเล็กเร็วกว่ากรณีที่เกิดการรบกวนขนาดใหญ่ 12.63 วินาที



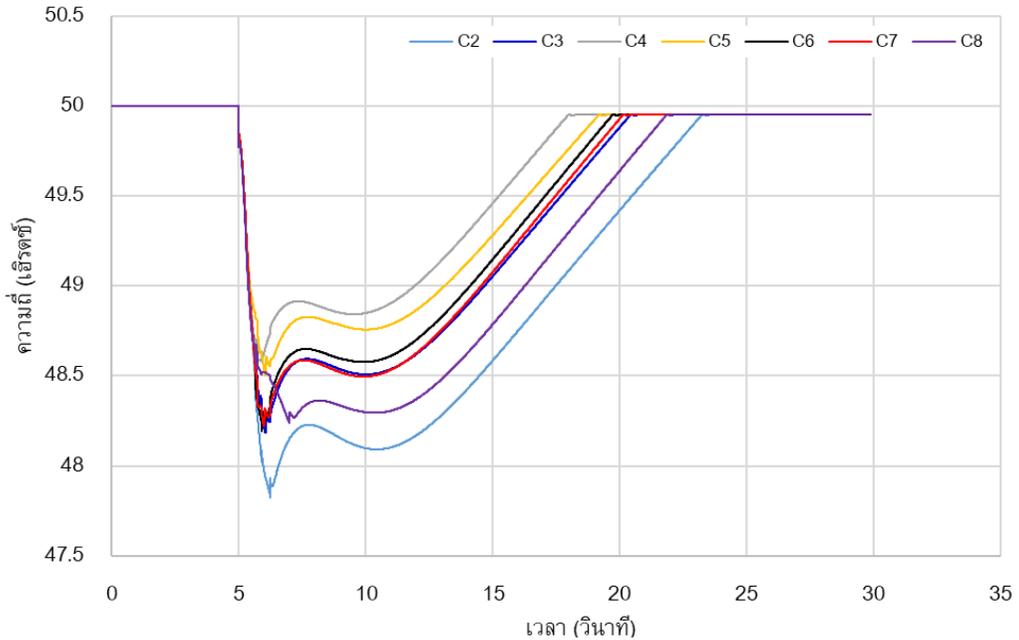
รูปที่ 4 การตอบสนองทางความถี่ของกรณีศึกษาที่ 1 และ 2

การเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ต่อเวลาเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการรบกวนขนาดใหญ่และมีรูปแบบการปลดโหลดที่แตกต่างกันตามกรณีศึกษาที่ 2-8 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะพบว่า ความชันหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ลดลงในช่วง 5.00-5.40 วินาทีของทุกกรณีมีค่าเท่ากันเนื่องจากเกิดจากการรบกวนประเภทเดียวกันซึ่งมีค่าสูงกว่า 1.2 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที คือมีค่า 1.92 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที

ลักษณะของกราฟภายหลังจากการลดลงของความถี่ในช่วงแรกจะมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นกับการปลดโหลดในแต่ละรูปแบบ ส่งผลให้ความถี่ต่ำสุดและระยะเวลาในการกลับสู่ความถี่ที่ยอมรับได้มีค่าแตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ 2 ซึ่งมีรูปแบบการปลดโหลดเหมือนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคความถี่ต่ำสุดเกิดขึ้นที่ค่า 47.83 เฮิร์ตซ์ และใช้ระยะเวลา 4.33 วินาที ในการกลับสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ภายหลังจากเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ในขณะที่กรณีที่ 6 มีรูปแบบการปลดโหลดเหลือเพียง 3 ชั้น เกิดความถี่ต่ำสุดเกิดขึ้นที่ค่า 47.83 เฮิร์ตซ์ และใช้ระยะเวลาในการกลับสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ภายหลังจากเกิดการรบกวน 16 วินาที

เมื่อพิจารณาการเรียงลำดับค่าความถี่ต่ำที่สุดของกรณีศึกษาที่ 2-8 โดยเรียงลำดับจากกรณีที่มีค่าต่ำที่สุดไปยังกรณีที่มีค่าสูงที่สุด คือ กรณีที่ 2, กรณีที่ 3, กรณีที่ 6, กรณีที่ 7, กรณีที่ 8, กรณีที่ 5 และ กรณีที่ 4 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการเรียงลำดับระยะเวลาที่ใช้ในการกลับสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ภายหลังจากเกิดการรบกวน โดยเรียงลำดับจากกรณีที่ใช้เวลานานไปยังกรณีที่ใช้เวลาน้อย คือ กรณีที่ 2, กรณีที่ 8, กรณีที่ 3, กรณีที่ 7, กรณีที่ 6, กรณีที่ 5 และ กรณีที่ 4 ตามลำดับ

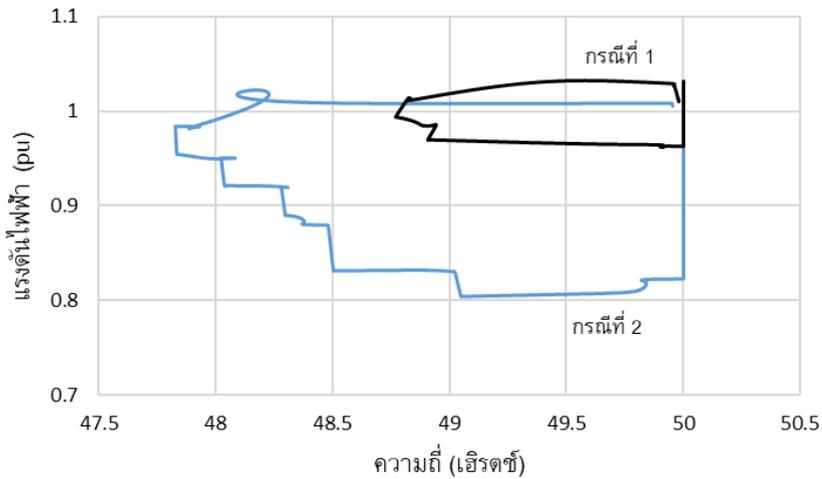
จากข้อมูลก่อนหน้าข้างต้นจะพบว่า กรณีที่ 2 คือกรณีที่ความถี่ตกต่ำที่สุดและใช้เวลาในการกลับเข้าสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ได้นานที่สุด ซึ่งกรณีที่ 2 คือกรณีที่มีการปลดโหลดทั้ง 5 ขั้นตอน เหมือนกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นสำหรับระบบไฟฟ้านี้การปลดโหลดในลักษณะอื่นจะช่วยให้ความถี่ต่ำสุดมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ 2 และใช้เวลาในการกลับเข้าสู่ความถี่ที่ยอมรับได้น้อยกว่าในกรณีที่ 2



รูปที่ 5 การตอบสนองทางความถี่ของกรณีศึกษาที่ 2-8

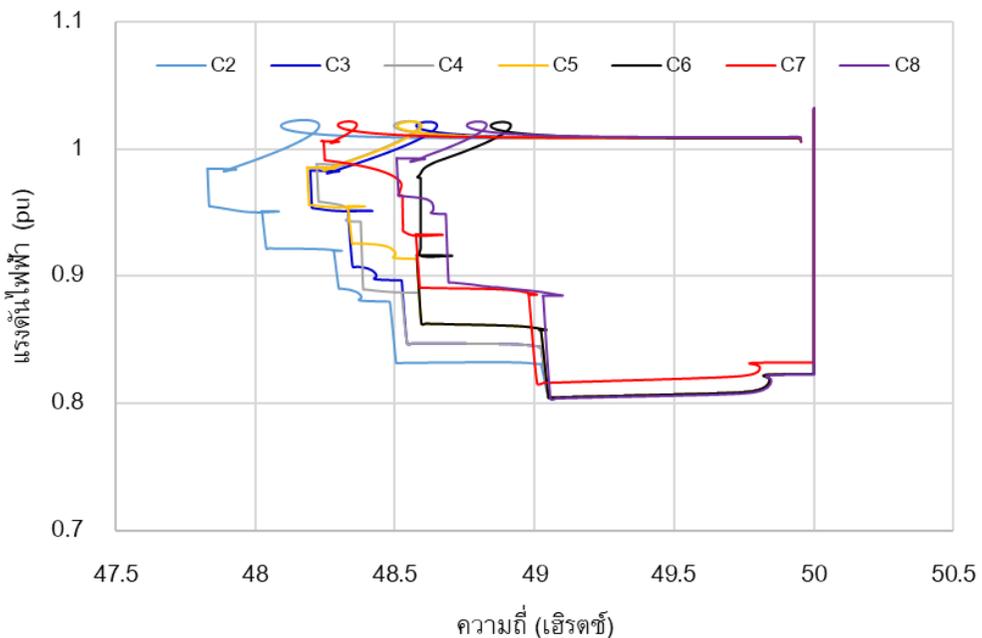
การแสดงผลการทดสอบในอีกมุมมองหนึ่งคือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ 1 และ 2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวกรณีที่ระบบไฟฟ้าเกิดการรบกวนขนาดเล็กและขนาดใหญ่และมีรูปแบบการปลดโหลดที่เหมือนกัน และส่วนที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบของกรณีที่ 2-8 เพื่อแสดงลักษณะของความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่และมีรูปแบบการปลดโหลดที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าของกรณีที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ในขณะที่กรณีที่ 2-8 แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและความถี่ของกรณีศึกษาที่ 1 และ 2

จากรูปที่ 6 จะสังเกตเห็นว่า การเกิดการรบกวนทั้ง 2 กรณีมีลักษณะของกราฟเป็นวงปิดเหมือนกันแต่มีขนาดของรูปทรงปิดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในกรณีที่ 1 ความถี่และแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 48.77-50.00 เฮิรตซ์ และ 0.96-1.03 pu ตามลำดับ ในขณะที่กรณีที่ 2 ความถี่และแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 47.83-50 เฮิรตซ์ และ 0.81-1.03 pu ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและความถี่ของกรณีศึกษาที่ 2-8

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 7 พบว่า ทุกกรณีมีลักษณะของกราฟความสัมพันธ์เป็นวงปิดคล้ายกันเนื่องจากความถี่และแรงดันไฟฟ้าทุกกรณีสามารถกลับเข้าสู่ค่าที่ยอมรับได้ แต่ในระหว่างการกลับเข้าสู่ค่าที่ยอมรับได้ การเปลี่ยนแปลงของความถี่และแรงดันไฟฟ้าจะมีความแตกต่างกันไปตามรูปแบบการปลดโหลดในแต่ละกรณี ซึ่งกรณีที่มีการปลดโหลดมาก ระดับแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่มีการปลดโหลดน้อย

เมื่อพิจารณากรณีศึกษาที่มีรายละเอียดการปลดโหลดในขั้นตอนที่ 1 ที่เท่ากัน สำหรับกรณี 3 และกรณี 4 มีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกันมาก แต่สำหรับกรณี 5 และ กรณีที่ 6 มีลักษณะกราฟที่แตกต่างกัน เนื่องจากกรณี 3 และ กรณีที่ 4 มีจำนวนขั้นในการปลดโหลดเท่ากัน ในขณะที่กรณีที่ 5 มีจำนวนขั้นในการปลดโหลดมากกว่ากรณีที่ 6

#### 4. สรุป

การศึกษารูปแบบการปลดโหลดที่แตกต่างกันสำหรับการปลดโหลดของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงให้เห็นถึงการปลดโหลดที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันและใช้เวลาในการกลับเข้าสู่ค่าที่ยอมรับได้แตกต่างกัน ซึ่งการปลดโหลดที่มีปริมาณมากในขั้นแรกไม่ได้เป็นการยืนยันได้ว่าจะสามารถนำความถี่และแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ค่าที่ยอมรับได้รวดเร็วที่สุด นอกจากนี้จำนวนขั้นของการปลดโหลดมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าโดยตรงแต่ไม่ได้ส่งผลต่อเวลาในการนำความถี่กลับเข้าสู่ค่าที่ยอมรับได้ทราบใดที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อโหลดทั้งหมดในระบบไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบการปลดโหลดแบบเดียวไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดกับทุกระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นในระบบไฟฟ้าหนึ่งย่อมมีรูปแบบการปลดโหลดที่เหมาะสมกับระบบนั้น

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ โปรแกรม DigSILENT Power Factory ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

#### References

- [1] Pinceti P. Emergency load-shedding algorithm for large industrial plants. Control Engineering Practice 2002;10:175-81.
- [2] Shafiullah M, Rahman H, Ahsan MQ. Study of impacts on operation of island and frequency based auto load shedding to improve service reliability using CYME PSAF. In: Saha P K, editor. 7th International Conference on Electrical and Computer

- Engineering; 20-22 Dec. 2012; Dhaka, the Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2012. p. 583-6.
- [3] Zhang J, Guan L, Wang X. Impacts of island load shedding and restoration strategies on reliability of microgrid in distribution system. In: Wang X, editor. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC); 25-28 Oct. 2016; Xi'an, Xi'an Jiaotong University; 2016. p. 1594-8.
- [4] Bevrani H, Tikdari AG, Hiyama T. Power system load shedding: key issues and new perspectives. *World Academy of Science Engineering and Technology* 2010;4:886-91.
- [5] Kaewmanee J, Sirisumrannukul M, Menaneanatra TD. Optimal load shedding in power system using fuzzy decision algorithm. *AORC-CIGRE Technical Meeting* 2013:43-51.
- [6] Aziz AA. Topsis method for load shedding scheme in johore system [Master's thesis]. Parit Raja, Malaysia: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia; 2014.
- [7] Tofis Y, Yiasemi Y, Kyriakides E. A plug-and-play selective load shedding scheme for power systems. *IEEE Systems Journal* 2017;11:2864-71.
- [8] Rudez U, Mihalic R. Analysis of underfrequency load shedding using a frequency gradient. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011;26:565-75.
- [9] Shekari T, Aminifar F, Sanaye-Pasand M. An analytical adaptive load shedding scheme against severe combinational disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems* 2016; 31:4135-43.
- [10] Tofis Y, Timotheou S, Kyriakides E. Minimal load shedding using the swing equation. *IEEE Transactions on Power Systems* 2017;32:2466-67.
- [11] Das K, Nitsas A, Altin M, Hansen AD, Sørensen P E. Improved load-shedding scheme considering distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2017;32:515-24.
- [12] Shekari T, Gholami A, Aminifar F, Sanaye-Pasand M. An adaptive wide-area load shedding scheme incorporating power system real-time limitations. *IEEE Systems Journal* 2018;12:759-67.
- [13] Jianjun Z, Dongyu S, Dong Z, Yang G. Load shedding control strategy for power system based on the system frequency and voltage stability. In 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED); 17-19 Sept. 2018; Tianjin, Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2018. p. 1352-5.

- [14] Amraee T, Darebaghi MG, Soroudi A, Keane A. Probabilistic under frequency load shedding considering RoCoF relays of distributed generators. IEEE Transactions on Power Systems 2018; 33:3587-98.
- [15] Glover JD, Overbye T, Sarma MS. Power system analysis and design. 6th Edition. Boston: Cengage Learning; 2017.
- [16] IEEE Power Engineering Society. IEEE STd. C37.117-2007 IEEE guide for the application of protection relays used for abnormal frequency load shedding and restoration. NY, USA: IEEE; 2007.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



นันทิยา ชัยบุตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ 9/1 หมู่ 5 ถนนพหลโยธิน จังหวัดปทุมธานี 12120, nuntiya.c@bu.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง และพลังงานทดแทน

---

#### Article History:

Received: June 7, 2019

Revised: August 1, 2019

Accepted: August 14, 2019