

แบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำสำหรับการแยกระดับความรุนแรง ของการรบกวนในระบบไฟฟ้า

Modeling of Rate of Change of Under Frequency Relay for Identification of Severity of Disturbance in The Power System

นันทิยา ชัยบุตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

9/1 หมู่ 5 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

E-mail: nuntiya.c@bu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ แบบจำลองของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำถูกพัฒนาขึ้นจากรีเลย์ความถี่ต่ำโดยอาศัยลอจิกเกตสำหรับตรวจสอบและการแยกระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแบบจำลองรีเลย์นี้ออกแบบมาเพื่อรักษาระดับความถี่และแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ผลการศึกษาผ่านกรณีศึกษาโดยใช้ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถพิสูจน์ได้ว่า แบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำสามารถตรวจสอบและแยกระดับความรุนแรงของสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าและปลดโหลดในแต่ละขั้นตามการตั้งค่าการป้องกันของรีเลย์ ซึ่งป้องกันการสูญเสียเสถียรภาพด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the rate of change of under frequency (RoCoUF) relay modeling. The modeling of RoCoUF relay is developed

from under frequency relay which applied the logic gate for inspection and identification of severity of disturbance in the power system. This relay modeling is designed to maintain the system frequency and voltage in the acceptable range. The study results through case studies using the Provincial Electricity Authority's electrical system can prove that the RoCoUF can inspection and identification of severity of disturbance in the power system and shed load at each step according to the relay protection setting so that preventing frequency and voltage instability in the power system.

1. บทนำ

การเกิดการรบกวน (disturbance) ในระบบไฟฟ้าไม่ว่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้าเองหรือจากการรบกวนภายนอกย่อมส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบไฟฟ้า ซึ่งความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยถ้าเกิดความรุนแรงขนาดใหญ่ (large disturbance) จะ

ส่งผลให้เกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้างได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดไฟดับดังกล่าว การปลดโหลดหรือลดจำนวนความต้องการไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าลง เพื่อจำกัดการตกลงของความถี่ในระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และปริมาณความต้องการไฟฟ้าในระบบขึ้น [1] – [3]

รูปแบบของการปลดโหลดโดยอาศัยการตรวจจับสนามความถี่ต่ำ (under frequency load shedding) ซึ่งมีงานวิจัยได้กล่าวถึงรูปแบบการปลดโหลดด้วยวิธีการที่แตกต่างกันใน [4] – [7] กล่าวคือการศึกษาการปลดโหลดเนื่องจากความถี่ต่ำโดยใช้แกร์เดียนความถี่ ซึ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแกร์เดียนและทำให้พบว่า แกร์เดียนความถี่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถประเมินค่ากำลังไฟฟ้าที่หายไปได้ แต่สำหรับกระบวนการในการปลดโหลดถือได้ว่ามีประโยชน์เป็นอย่างมาก [4] สำหรับใน [5] นำเสนอรูปแบบการปลดโหลดที่มีการปรับบนพื้นฐานของซิงโครเฟสเซอร์ (synchrophasor) โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนทำงานขนานกันไป ส่วนแรกคือการพัฒนาแบบจำลองการตอบสนองด้านความถี่เพื่อประมาณจำนวนโหลดที่จะปลดออกจากระบบทั้งโหลดแบบคงที่และโหลดแบบไดนามิกทำให้ข้อผิดพลาดในการคำนวณลดลง ส่วนที่สองคือการหาตำแหน่งของโหลดที่จะถูกปลดที่ดีที่สุดโดยพิจารณาเกณฑ์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้รูปแบบการปลดโหลดที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการปลดโหลดแบบดั้งเดิมโดยอาศัยสมการสวิงในการพิจารณาจำนวนโหลดที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องปลดออกจากระบบเพื่อรักษาความถี่ให้มีเสถียรภาพถูกนำเสนอโดย [6] และ รูปแบบการปลดโหลดแบบรวมศูนย์ซึ่งมีการ

ดำเนินการหาปริมาณและตำแหน่งในการปลดโหลดโดยคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าและต้นทุนเนื่องจากการปลดโหลดที่เกิดขึ้น โดยมีการนำรูปแบบการจัดโหลดที่กำหนดไว้และกลยุทธ์หลังการปลดโหลดมาใช้กับเหตุการณ์ที่ถูกระบุขึ้นแบบทันทีทันใด (real time) [7]

อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลาได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อทำการปลดโหลดเนื่องจากความถี่ต่ำซึ่งพิจารณาความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ควบคู่กัน ซึ่งประมาณการจากอัลกอริทึมนิวตัน-โทปป์แบบไม่ทำซ้ำ โดยอาศัยสมการสวิง และการประเมินขนาดของสิ่งรบกวนระบบ ทำให้รูปแบบการปลดโหลดที่วางแผนไว้ถูกปรับให้เข้ากับขนาดของสิ่งรบกวนส่งผลให้การปลดโหลดมีประสิทธิภาพมากขึ้นภายใต้เงื่อนไขภาวะฉุกเฉิน [8] และมีการพิจารณาผลกระทบต่อรูปแบบการปลดโหลดเมื่อมีพลังงานทดแทนเข้ามาในระบบไฟฟ้า [9] สำหรับการปลดโหลดด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในเชิงจำนวนเต็มแบบผสม (mix-integer linear programming optimization) เพื่อหาปริมาณโหลดที่น้อยที่สุดเพื่อปลดออกจากระบบ เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า ร่วมกับการพิจารณารีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (distributed generator) แสดงใน [10] ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการปลดโหลดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความผิดพลาดในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดและปริมาณการกระจายตัวของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบกระจาย

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำที่พัฒนาขึ้นจากรีเลย์

ความถี่ต่ำโดยอาศัยลอจิกเกิดในการตรวจสอบและแยกแยะระดับความรุนแรงของการรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT Power Factory ความสามารถในการตรวจสอบและแยกความรุนแรงของรีเลย์ต่อสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยให้รีเลย์สามารถส่งสัญญาณในการปลดโหลดเพื่อรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบ

2. แบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ

2.1 แนวคิดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่

การทำงานของรีเลย์ความถี่ต่ำ (under frequency relay) โดยทั่วไปจะทำการตรวจสอบความถี่ของระบบไฟฟ้าว่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ กรณีที่ความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ตรวจสอบได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด รีเลย์ความถี่ต่ำจะส่งสัญญาณไปยังเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ทำการตัดวงจรเพื่อปลดโหลดในระบบส่วนหนึ่งออกจากระบบไฟฟ้าทันที ทำให้ความถี่ของระบบกลับมายังระดับที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ หรือกล่าวได้ว่าเพื่อรักษาความสมดุลระหว่างโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบทั้งหมดกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบ ซึ่งถ้าความถี่ของระบบยังคงต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ขั้นตอนของการปลดโหลดข้างต้นจะยังคงดำเนินต่อไปอีกครั้งจนกว่าความถี่ของระบบจะกลับสู่ค่าปกติ

สำหรับกรณีที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแล้วทำให้ความถี่ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจทำให้การทำงานของรีเลย์ความถี่ต่ำนั้นไม่เพียงพอต่อการป้องกันเหตุการณ์ที่

เกิดขึ้น ดังนั้นรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำจึงถูกนำมาใช้เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดได้ โดยการทำงานของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำจะตรวจสอบจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ (df/dt) แทนความถี่ ทำให้ความเร็วในการทำงานเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการปลดโหลดที่รวดเร็วขึ้น ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าจริงสามารถพิจารณาได้จากสมการสวิง (1) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมและส่วนต่างระหว่างแรงบิดทางกลกับแรงบิดทางไฟฟ้า [11]

$$J\alpha_m(t) = T_m(t) - T_e(t) = T_a(t) \quad (1)$$

เมื่อ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

$\alpha_m(t)$ คือ ความเร่งเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s^2)

$T_m(t)$ คือ แรงบิดทางกล (N-m)

$T_e(t)$ คือ แรงบิดทางไฟฟ้า (N-m)

$T_a(t)$ คือ แรงบิดเร่งสุทธิ (N-m)

ความสัมพันธ์ของความเร่งเชิงมุมของโรเตอร์กับความเร่งเชิงมุมทางกล ($\omega_m(t)$) ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลและทางไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าจริงทางกล ($P_m(t)$) และทางไฟฟ้า ($P_e(t)$) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2) – (4)

$$\alpha_m(t) = \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad (2)$$

$$T_m(t) = \frac{P_m(t)}{\omega_m(t)} \quad (3)$$

$$T_e(t) = \frac{P_e(t)}{\omega_m(t)} \quad (4)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการที่ (2) – (4) ลงในสมการที่ (1) จะได้สมการสวิงในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงดังสมการที่ (5)

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{P_m(t)}{\omega_m(t)} - \frac{P_e(t)}{\omega_m(t)} \quad (5)$$

โดยปกติจะใช้ค่าคงที่ความเฉื่อย (inertia constant, H) ซึ่งนิยามได้ดังสมการที่ (6)

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J\omega_{msyn}^2}{s_{rated}} \quad (6)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (6) ลงใน (5) พร้อมทำให้เป็นค่าต่อหน่วยและในทางปฏิบัติความเร็วของโรเตอร์ไม่แตกต่างจากค่าความเร็วเชิงโคโรนสมากนักทำให้สามารถพิจารณาค่าความเร็วเชิงมุมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ดังสมการที่ (7)

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = P_{m,pu}(t) - P_{e,pu}(t) \quad (7)$$

ดังนั้น สามารถพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าจริงจากสมการที่ (8)

$$\frac{df(t)}{dt} = (P_{m,pu}(t) - P_{e,pu}(t)) \cdot \frac{f_{syn}}{2H} \quad (8)$$

2.2 แบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ

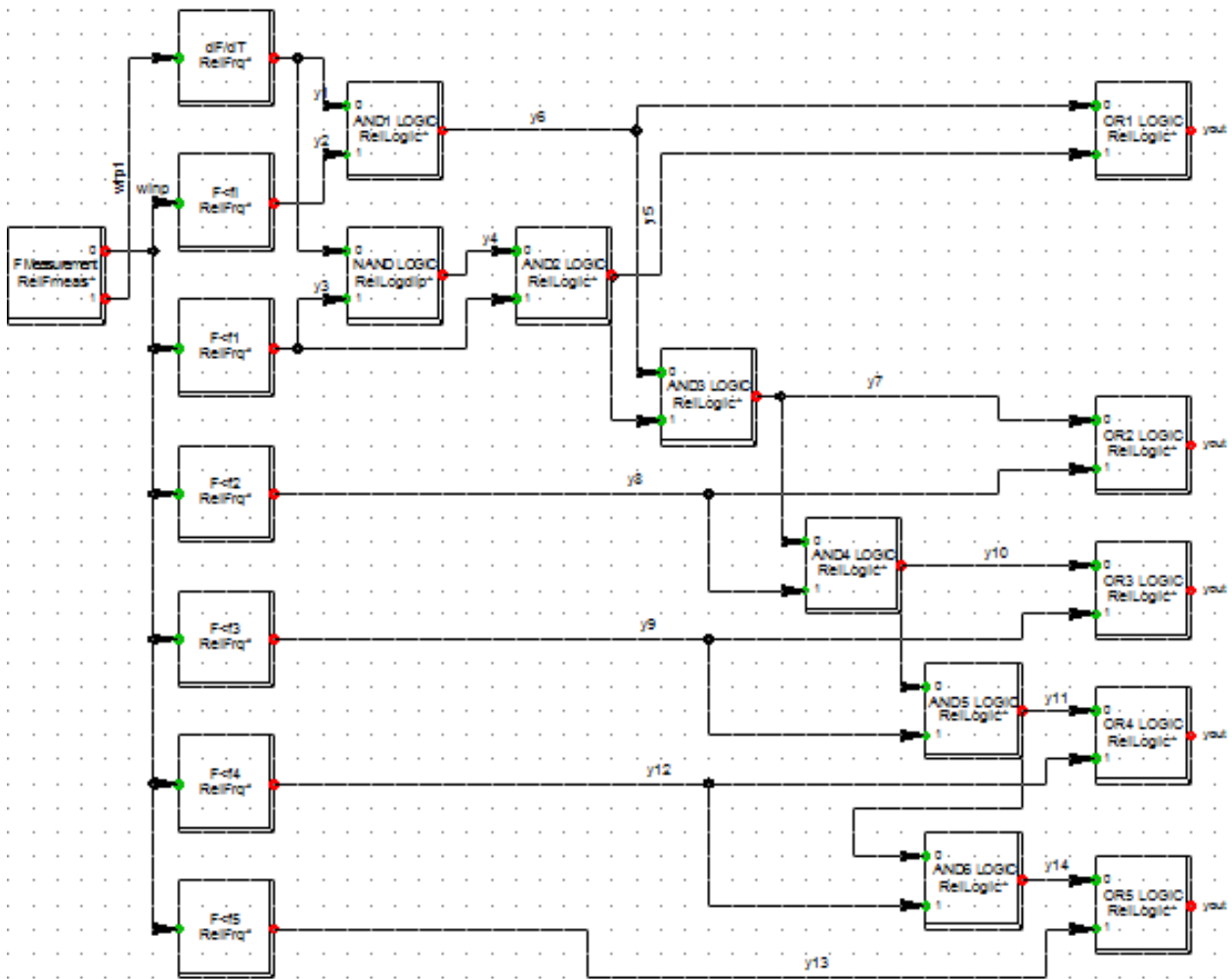
วัตถุประสงค์หลักในการทำงานของรีเลย์ความถี่ต่ำ คือ การพยายามรักษาสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการและกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ สำหรับการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ความถี่ต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยการตั้งค่าความถี่ การหน่วงเวลา และปริมาณในการปลดโหลดของแต่ละชั้น

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 |

การปลดโหลดประกอบด้วย 5 ชั้น โดยรีเลย์ความถี่ต่ำเริ่มทำงานเมื่อความถี่ของระบบไฟฟ้าต่ำกว่า 49.00 เฮิรตซ์ ซึ่งจะมีการหน่วงเวลาออกไป 0.15 วินาที จากนั้นโหลดจะถูกปลดออกจากระบบจำนวนร้อยละ 10 ของปริมาณโหลดทั้งหมด ซึ่งรีเลย์ความถี่ต่ำยังคงตรวจจับความถี่ของระบบอย่างต่อเนื่องและดำเนินการปลดโหลดตามขั้น (step) ทั้ง 5 ชั้น ตามตารางที่ 1 ทั้งนี้รีเลย์ความถี่ต่ำจะหยุดการทำงานรวมถึงการปลดโหลดเมื่อความถี่ของระบบไฟฟ้ากลับมาอยู่ในระดับปกติ อย่างไรก็ตามข้อเสียที่น่าสนใจของการใช้รีเลย์ความถี่ต่ำเพียงอย่างเดียวในการตรวจจับความถี่ของระบบไฟฟ้า คือ ข้อจำกัดในการตรวจจับความรุนแรงของความผิดปกติที่รบกวนระบบไฟฟ้า

สำหรับในบทความนี้นำเสนอ แบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำเพื่อให้สามารถตรวจจับความรุนแรงของสิ่งรบกวนระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาจากการตรวจจับความถี่ และ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่คำนวณโปรแกรม DigSILENT Power Factory

แบบจำลองรีเลย์ตามรูปที่ 1 ข้างต้น ถูกปรับปรุงจากแบบจำลองรีเลย์ตรวจจับความถี่ต่ำ โดยการเพิ่มลอจิกเกตเข้าในแบบจำลองเพื่อช่วยในการตัดสินใจ ประกอบด้วย แอนด์-เกต (AND gate) ออร์เกต (OR gate) และ แนนด์เกต (NAND gate) ซึ่งลอจิกเกตเหล่านี้เป็นส่วนที่ช่วยให้สามารถแยกระดับความรุนแรงของสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยในบทความนี้กำหนดให้กรณีที่ระบบไฟฟ้าถูกรบกวนแบบรุนแรงจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลา (df/dt) ของระบบไฟฟ้ามามีค่าตั้งแต่ 1.2 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที [12]

การทำงานของแบบจำลองนี้ประกอบด้วย อินพุต 2 อินพุต คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลา และ ความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยมีการตรวจวัดค่าทั้ง 2 ค่าข้างต้นเพื่อใช้เป็นอินพุตของลอจิกเกตในลำดับถัดไป ซึ่งกำหนดให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลามีค่าเป็น 1 เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนในระดับรุนแรง (การรบกวนขนาดใหญ่) และมีค่าเป็น 0 เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนในระดับไม่รุนแรง (การรบกวนขนาดเล็ก) ในขณะที่การตรวจวัดความถี่จะมีค่าเป็น 1 เมื่อความถี่ที่วัดได้มีค่าอยู่ในย่านที่กำหนดประกอบด้วยความถี่ต่ำกว่าความถี่ตั้งต้น คือ 49.50

เฮิร์ตซ์ และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ในแต่ละชั้นที่แสดงในตารางที่ 1 สำหรับเอาต์พุตของแบบจำลองมีทั้งหมด 5 เอาต์พุต คือ สัญญาณตรรกะที่ถูกส่งไปเพื่อกำหนดการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

การทำงานในทุกกรณีของแบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตรรกะการทำงานของแบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ

| df/dt | f1 | f1 | f2 | f3 | f4 | f5 | เอาต์พุต |
|-------|----|----|----|----|----|----|----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CR1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | CR1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | CR2 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | CR3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | CR4 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | CR5 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | CR1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | CR2 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | CR3 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | CR4 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | CR5 |

โดยกำหนดให้

df/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลา

f1 คือ ความถี่ตั้งต้น 49.50 เฮิร์ตซ์

f1 คือ ความถี่ 49.50 เฮิร์ตซ์

f2 คือ ความถี่ 48.80 เฮิร์ตซ์

f3 คือ ความถี่ 48.60 เฮิร์ตซ์

f4 คือ ความถี่ 48.30 เฮิร์ตซ์

f5 คือ ความถี่ 47.90 เฮิร์ตซ์

CR1 คือ โหลดชั้นที่ 1 ถูกปลด

CR2 คือ โหลดชั้นที่ 2 ถูกปลด

CR3 คือ โหลดชั้นที่ 3 ถูกปลด

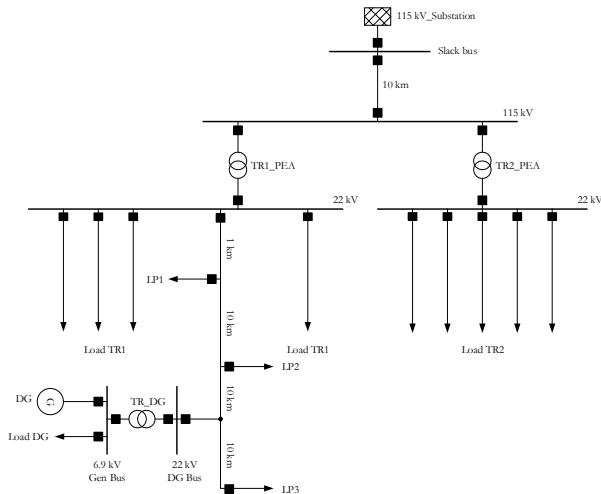
CR4 คือ โหลดชั้นที่ 4 ถูกปลด

CR5 คือ โหลดชั้นที่ 5 ถูกปลด

จากตารางตรรกะการทำงานของแบบจำลองรีเลย์ ๔ ข้างต้น จะพบว่า เมื่อระบบไฟฟ้าถูกรบกวนแบบรุนแรง (df/dt = 1) แบบจำลองมีการพิจารณาความถี่ของระบบไฟฟ้าต่อเนื่อง ถ้าความถี่มีค่าต่ำกว่า 49.5 เฮิร์ตซ์ โหลดที่กำหนดไว้ในชั้นที่ 1 จะถูกปลดออกจากระบบ และถ้าความถี่ยังคงลดลงต่อเนื่อง โหลดในแต่ละชั้นที่กำหนดไว้จะถูกปลดตามความถี่ของระบบที่เกิดขึ้น สำหรับกรณีที่ระบบถูกรบกวนแบบไม่รุนแรง (df/dt = 0) แบบจำลองจะทำงานเหมือนกับรีเลย์ตรวจจับความถี่ต่ำ

3. กรณีศึกษา

ระบบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษาในบทความนี้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งประกอบด้วยบัสอ้างอิงที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 115 เป็น 22 กิโลโวลต์ จำนวน 2 ตัว โดยมีสายป้อนหลักจากหม้อแปลงทั้ง 2 เพื่อจ่ายไปยังโหลดของระบบ ซึ่งโหลดทั้งหมดของระบบมีค่า 15 เมกะวัตต์



รูปที่ 2 ระบบทดสอบ

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generator: DG) ขนาด 7.2 เมกะวัตต์แอมป์ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.98 ล้าหลัง มีค่าคงที่ความเฉื่อย 2.896 วินาที ติดตั้งที่สายป้อนย่อยหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า TR1_PEA ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 22 เป็น 69 กิโลโวลต์

การทดสอบเพื่อแสดงประสิทธิภาพการทำงานของรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำที่ถูกติดตั้งในระบบทดสอบจะดำเนินการผ่านกรณีศึกษาต่าง ๆ ซึ่งทุกกรณีศึกษาในบทความนี้มุ่งเน้นไปยังการตอบสนองทางความถี่และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยการรบกวนระบบไฟฟ้าจะถูกจำลองแยกตามระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งในบทความนี้ใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลาเป็นดัชนีชี้วัดความรุนแรงดังกล่าว ซึ่งกำหนดให้ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลาตั้งแต่ 1.2 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที คือ การรบกวนขนาดใหญ่ (large disturbance) และ อัตราการเปลี่ยนแปลง

ความถี่ต่อเวลาน้อยกว่า 1.2 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที คือ การรบกวนขนาดเล็ก (small disturbance)

การรบกวนขนาดใหญ่ ถูกจำลองให้เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า (fault) บริเวณบัสข้างอิง ที่เวลา 5 วินาที ส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้นทางปลดระบบทั้งหมดออกจาก กริดหรือสถานีไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ สำหรับกรณีของการจำลองการเกิดการรบกวนขนาดเล็ก ความผิดปกติทางไฟฟ้า (fault) เกิดขึ้นที่บัส 115 กิโลโวลต์ ที่เวลา 5 วินาที ส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดระบบไฟฟ้าทั้งหมดออกจากกริดเช่นกัน แต่ในกรณีนี้หม้อแปลง TR1_PEA และ TR2_PEA จะถูกปลดการเชื่อมโยงออกจากกัน

กรณีศึกษาสำหรับบทความนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 กรณีเกิดการรบกวนระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก และไม่มีการติดตั้งรีเลย์

กรณีที่ 2 กรณีเกิดการรบกวนขนาดเล็กและมีการติดตั้งรีเลย์

กรณีที่ 3 กรณีเกิดการรบกวนระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ และไม่มีการติดตั้งรีเลย์

กรณีที่ 4 กรณีเกิดการรบกวนขนาดใหญ่และมีการติดตั้งรีเลย์

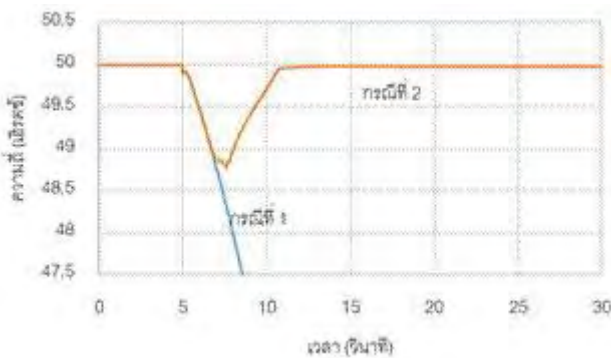
4. ผลการทดลอง

ผลของการนำแบบจำลองรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำมาใช้กับระบบทดสอบของกริดไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะแสดงในหัวข้อนี้ โดยผลการทดสอบที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาการตอบสนองทางความถี่ของระบบไฟฟ้า และ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงได้รูปที่ 3 - 8

4.1 การศึกษาการตอบสนองทางความถี่ของระบบไฟฟ้า

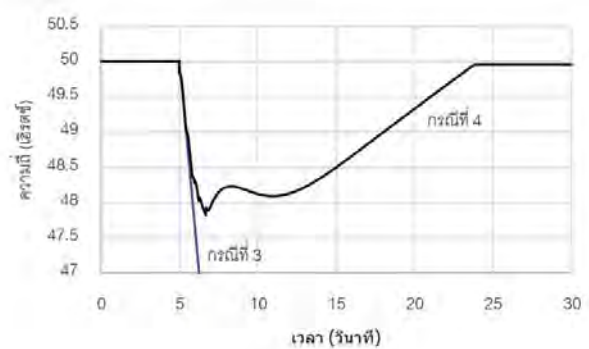
เมื่อระบบไฟฟ้าที่ถูกจำลองให้เกิดการรบกวนขนาดเล็กขึ้น ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ จะพบว่า ความถี่ของระบบจะลดลงอย่างต่อเนื่องและไม่สามารถกลับสู่ความถี่ปกติได้ สำหรับกรณีที่ระบบมีการติดตั้งรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ พบว่าความถี่ลดลงในช่วงแรกด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลาเท่ากับ 0.55 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที ระหว่างช่วงเวลา 5.01 ถึง 6.82 วินาที โดยเกิดค่าต่ำสุดที่ระดับ 48.77 เฮิร์ตซ์ ที่เวลา 7.64 วินาที และกลับสู่ระดับปกติที่ 49.50 เฮิร์ตซ์ ที่เวลา 9.33 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการกลับสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ 1.69 วินาที (พิจารณาเริ่มจากความถี่ต่ำสุด)



รูปที่ 3 การตอบสนองทางความถี่สำหรับกรณีที่ 1 และ 2

สำหรับกรณีที่เกิดการรบกวนขนาดใหญ่ขึ้นในระบบไฟฟ้า ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ จะพบว่า ความถี่ของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วและไม่สามารถกลับสู่ความถี่ปกติได้ สำหรับกรณีที่ระบบมีการติดตั้งรีเลย์

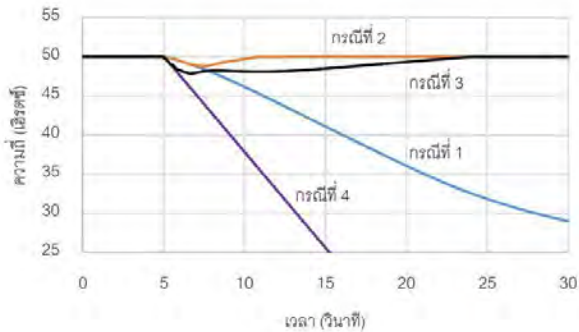
อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ พบว่า ความถี่ลดลงในช่วงแรกด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อเวลาเท่ากับ 1.92 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที ระหว่างช่วงเวลา 5.01 ถึง 5.42 วินาที โดยเกิดค่าต่ำสุดที่ระดับ 47.83 เฮิร์ตซ์ ที่เวลา 6.68 วินาที และกลับสู่ระดับปกติที่ 49.50 เฮิร์ตซ์ ที่เวลา 21.00 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการกลับสู่ความถี่ที่ยอมรับได้ 14.32 วินาที (พิจารณาเริ่มจากความถี่ต่ำสุด)



รูปที่ 4 การตอบสนองทางความถี่สำหรับกรณีที่ 3 และ 4

จากรูปที่ 5 พบว่า ระบบไฟฟ้าที่ไม่มีรีเลย์อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำติดตั้งอยู่ในระบบ เมื่อเกิดการรบกวนขึ้น จะทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยกรณีที่เกิดการรบกวนขนาดเล็กจะมีความชันของการลดลงน้อยกว่ากรณีเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ นั่นคือ การเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพทางความถี่ของระบบไฟฟ้าเร็วกว่าการเกิดการรบกวนขนาดเล็ก ในขณะที่กรณีที่ระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งรีเลย์ฯ เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า จะทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะลดลงกว่าค่าปกติแต่จะสามารถกลับสู่ความถี่ในสภาวะปกติได้จากการปลดโหลดเพื่อรักษาเสถียรภาพทางความถี่ โดยเมื่อเกิดการรบกวนขนาด

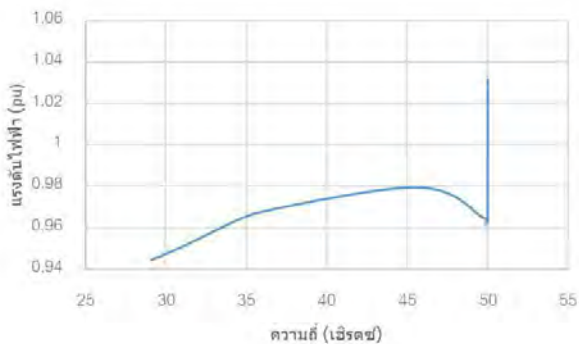
เล็ก ความถี่จะสามารถกลับสู่ความถี่ปกติได้เร็วกว่ากรณีการเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ 11.67 วินาที



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่สำหรับกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4

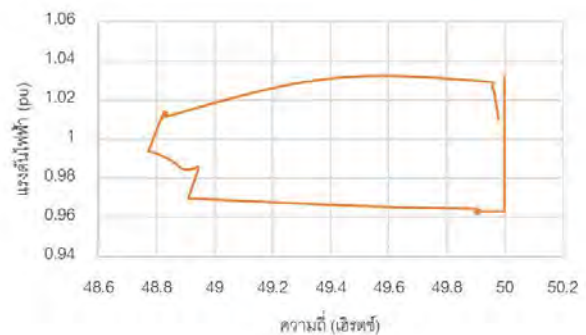
4.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้า

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ โดยกรณีที่ 1 และ 3 นั้น เป็นกรณีที่ไม่มี การติดตั้งรีเลย์ฯ ในระบบเช่นกัน จึงขอ ยกตัวอย่างเพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเฉพาะกรณีที่ 1 เท่านั้น ดังรูปที่ 6

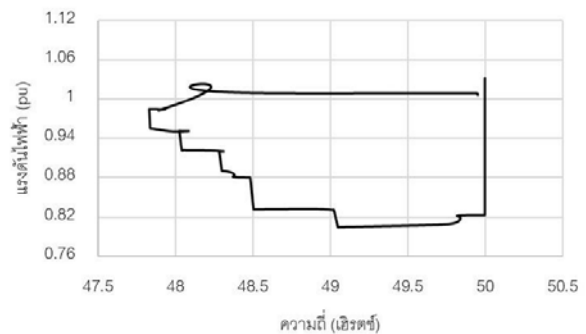


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าสำหรับกรณีที่ 1

จากรูปที่ 6 พบว่า ระบบไฟฟ้าที่ไม่มี การติดตั้งรีเลย์ฯ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ เมื่อเกิดการรบกวนต่อระบบไฟฟ้าความถี่มีค่าลดลงไม่สามารถกลับสู่ความถี่ปกติได้ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ามีการแกว่งและขนาดลดลงต่ำกว่าที่ระบบไฟฟ้าจะยอมรับได้ เนื่องจากไม่มีการปลดโหลดเพื่อรักษาสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการและกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถจ่ายได้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าสำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าสำหรับกรณีที่ 4

สำหรับกรณีที่ 2 และ 4 คือ กรณีที่มีการติดตั้งรีเลย์ฯ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำทั้ง 2 กรณี แสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8 เพื่อแสดงให้เห็นถึงการ

ทำงานของรีเลย์เนื่องจากความแตกต่างของความ
รุนแรงจากการรบกวนระบบไฟฟ้า

สำหรับกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีการติดตั้งรีเลย์
อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำ เมื่อเกิดการรบกวน
ต่อระบบไฟฟ้าทั้งกรณีการรบกวนขนาดเล็กและใหญ่
จะพบว่า ความถี่และแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงและ
สามารถกลับเข้าสู่ค่าปกติได้ เนื่องจากรีเลย์มีการปลด
โหลดเพื่อรักษาระดับความถี่และแรงดันไฟฟ้าไว้ โดย
จะสังเกตได้ว่าการเกิดการรบกวนขนาดเล็กมีการปลด
โหลดน้อยกว่ากรณีเกิดการรบกวนขนาดใหญ่

5. สรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองรีเลย์
อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่จากการปรับปรุงรีเลย์
ความถี่ต่ำ โดยพัฒนาการทำงานที่อาศัยตรรกะของ
ลอจิกเกตเพื่อช่วยในการแยกความรุนแรงของการ
รบกวนและปลดโหลดเมื่อเกิดการรบกวนในระบบ
ไฟฟ้า

ผลจากการศึกษาผ่านกรณีศึกษา จะพบว่า
เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ แบบจำลองรีเลย์ที่
ออกแบบไว้สามารถแยกความรุนแรงที่เกิดขึ้นได้ โดย
รีเลย์จะพิจารณาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อ
เวลาและความถี่ตั้งต้นเพื่อแยกความรุนแรงที่เกิดขึ้น
ซึ่งเมื่อเกิดการรบกวนขนาดเล็ก รีเลย์จะทำงาน
เหมือนกับรีเลย์ความถี่ต่ำ ในขณะที่เมื่อเกิดการ
รบกวนขนาดใหญ่ รีเลย์จะทำงานตั้งแต่ความถี่ของ
ระบบไฟฟ้าต่ำกว่าความถี่ตั้งต้น ผลจากการศึกษานี้
เป็นการพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองรีเลย์อัตราการ
เปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำที่ปรับปรุงขึ้นจากรีเลย์ความถี่
ต่ำโดยใช้ลอจิกเกตนี้ สามารถแยกความรุนแรง

เนื่องจากการรบกวนต่อระบบไฟฟ้าได้ และส่ง
สัญญาณให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดโหลดเพื่อรักษา
เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้า
ส่วนภูมิภาค และ โปรแกรม DigSILENT Power
Factory ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการ
ศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] "IEEE Guide for the Application of Protection Relays Used for Abnormal Frequency Load Shedding and Restoration", IEEE STd.C37.117 - 2007, pp. 1- 53.
- [2] K. Yamashita, J. Li, P. Zhang and C.C. Liu, "Analysis and control of Major Blackout Events" 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 15-18 March 2009, Seattle, WA, USA.
- [3] P. Lakra and M. Kirar, "Load Shedding Techniques for System with Cogeneration: A Review", Electrical and Electronics Engineering: An International Journal, Vol.4, No.3, August 2015, pp.83 - 96.
- [4] Urban Rudez and Rafael Mihalic, "Analysis of Underfrequency Load Shedding Using a Frequency Gradient", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, Issue 2, April 2011, pp. 565 - 575.

- [5] Tohid Shekari, Farrokh Aminifar and Majid Sanaye-Pasand, "An Analytical Adaptive Load Shedding Scheme Against Severe Combinational Disturbances", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, Issue 5, Sept. 2016, pp. 4135 - 4143.
- [6] Y. Tofis, S. Timotheou and E. Kyriakides, "Minimal Load Shedding Using the Swing Equation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, Issue 3, May 2017, pp. 2466 - 2467.
- [7] T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar and M. Sanaye-Pasand "An Adaptive Wide-Area Load Shedding Scheme Incorporating Power System Real-Time Limitations", IEEE Systems Journal, Vol. 12, Issue 1, March 2018, pp. 759 - 767.
- [8] V.V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, Issue 3, Aug. 2006, pp. 1260 - 1266.
- [9] H. Bevrani, G. Ledwich and J. J. Ford, "On the use of df/dt in power system emergency control", 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 15-18 March 2009, Seattle, WA, USA.
- [10] T. Amraee, Mohammad G. Darebaghi, A. Soroudi and A. Keane, "Probabilistic Under Frequency Load Shedding Considering RoCoF Relays of Distributed Generators" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, Issue 4, July 2018, pp. 3587 - 3598.
- [11] J. Duncan Glover, Thomas Overbye, Mulukutla S. Sarma, "Power System Analysis and Design", 6th Edition, Cengage Learning, 2017.
- [12] "Automatic Under-Frequency Load Shedding (AUFLS) Framework", Transpower New Zealand Ltd., pp. 1 - 19.