

ระบบการปลดโหลดอันชาญฉลาดที่ได้รับการพัฒนา สำหรับเหตุการณ์ที่สูญเสียแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้า

Improved Intelligent Load Shedding System against the Loss of Power Generation Unit

วัชร มงคลสถิตย์ และ สมชาติ จิรวิภากร
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง,
Email: watchara.mongkol@gmail.com, kjsomcha@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

สิ่งที่สำคัญของระบบการผลิตในอุตสาหกรรมแบบต่อเนื่องที่จะต้องคำนึงถึงหลักๆ นั้นก็คือความสามารถในการรักษาให้การจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความต่อเนื่อง สร้างเสถียรภาพทางกำลัง รวมถึงมีความเหมาะสมกับกำลังที่มีอยู่ หรือสามารถนำมาใช้งานได้ในการดำเนินการใดๆ แต่บ่อยครั้งสิ่งหนึ่งที่เป็นปัญหาที่ระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรมมักจะพบบ่อย คือ การสูญเสียแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ ไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดจากภายนอก หรือสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบเอง ซึ่งทั้งหมดล้วนส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางกำลังไฟฟ้า ดังนั้น ระบบจำเป็นต้องมีเครื่องมือสำหรับจัดการกับเหตุการณ์ต่างๆ เหล่านี้ ซึ่งการปลดโหลด (Load Shedding) ก็คือเครื่องมือหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อคืนสภาวะปกติในกรณีที่ให้ระบบ และใช้เพื่อจัดการด้านพลังงานให้เพียงพอ ส่วนรูปแบบวิธีการทำงานของ การปลดโหลดนั้นก็จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป และบางครั้งรูปแบบที่ได้เพื่อจะใช้การปลดโหลดจากวิธีต่างๆ เหล่านั้นก็อาจยังไม่ดีเพียงพอ หรือเหมาะสมนัก สืบเนื่องจากเหตุนี้เองทางผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบการปลดโหลด ซึ่งเรียกว่า ระบบการปลดโหลดอันชาญฉลาด (Improved Intelligent Load Shedding: IILS) IILS กำหนดให้หาคำตอบที่สร้างให้ระบบเกิดเสถียรภาพทางกำลังที่ดี และเหมาะสมกับกำลังที่มีอยู่/หรือกำลังที่สามารถนำมาใช้งานได้ จากการพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างกำลังที่สูญเสีย กับกำลังของกลุ่มโหลดที่จะเลือกปลดที่มีค่าน้อยที่สุด(หรือ กับ ผลรวมของกลุ่มโหลดกับกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันที) และนอกจากนั้น IILS จะพิจารณา ค่าผลรวมความสำคัญของกลุ่มโหลดนั้นเป็นลำดับถัดมา หากคำตอบของผลต่างกำลังที่น้อยที่สุดได้จากกลุ่มโหลดที่มากกว่าหนึ่ง ซึ่งคำตอบที่ได้นี้จะมีความหลากหลาย และยังได้แสดงผลของคำตอบต่างๆ ผ่านทางรูปแบบข้อมูลรูปภาพ (Graphic) เพื่อให้สะดวกต่อการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงาน และเปรียบเทียบผลจากรูปแบบอื่นๆ ซึ่งผลของการเลือกรูปแบบในการปลดโหลดที่ได้รับจากการพัฒนานี้จะสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพทางกำลัง และความถี่ให้แก่ระบบได้เป็นอย่างดีที่สุด และ/หรือ มีความเหมาะสมจากการพิจารณาจากกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันทีที่มีในอยู่ระบบ อันจะส่งผลให้เกิดความเชื่อมั่นในความต่อเนื่องของระบบจ่ายกำลัง และทางด้าน Economic ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ

การปลดโหลด เสถียรภาพทางระบบกำลัง ค่าความสำคัญที่ตั้งไว้ สมการสวิง

Abstract

The important thing for continuous process industry that we should consider, is the continuity to supply the power to loads, to ensure the good stability in system during disturbance, and to find out the suitable solution with regarding the available spinning reserve for load shedding. The disturbance that Industrial electrical system has found frequently, is the disturbance from loss of power generation units, such as loss of utility grid unit or on-site generator units, and these disturbances will affect to the system stability directly, so it will need the suitable tool for managing the available power in system. The Load Shedding is the useful tool and be usable to recover the system frequency, and power imbalance. In each of load shedding schemes have different methods, and their solution might be not good enough, or unsuitable for system. According to this cause, so the researcher has researched and improved the Load Shedding system, that's called "Improved Intelligent Load Shedding" (IILS), and IILS has the objectives to maintain the stability in power and/or selecting the good suitable solution with regarding the available spinning reserve, by considering the solutions/load group that give the lowest of different power. Furthermore, the IILS will consider the summation value of priority setting in each load group that has lowest different power value (when there're solutions that give the lowest imbalance of power, and greater than one), so the IILS will has various solutions. The IILS will show the solution on the graphic form, for simplicity of operator's decision, and comparison with the other solutions. The solution that we get from the IILS will maintain and help the system to have the best stability in power and frequency, and/or suitable from considering available spinning reserve in system, that will improve the reliability in power generation system, and economic.

Keywords

load shedding, power system stability, priority setting, swing equation

1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น หากเกิดความไม่สมดุลทางด้านกำลังไฟฟ้าขึ้นแล้ว ซึ่งอาจจะเกิดจากการผิดปกติของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าภายใน หรือเกิดขึ้นในระบบสายส่งกำลังทางฝั่งสาธารณูปโภค จนเป็นผลทำให้ค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนของความถี่จะมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับขนาดที่ไม่สมดุลทางกำลัง และถ้าหากว่าระบบยังไม่ได้รับการแก้ไขแล้ว ค่าความถี่ของระบบจะมีการเปลี่ยนที่ออกห่างไกลจากค่าต้องการอย่างต่อเนื่อง[1] ซึ่งการลดลงของค่าความถี่ในระบบอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันเริ่มทำงาน[2] สำหรับการสูญเสียหน่วยกำเนิดกำลังที่มีขนาดใหญ่ ความถี่ในระบบอาจจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าหากกำลังที่เหลืออยู่ไม่เพียงพอกับโหลด จนนำไปสู่สภาวะขาดเสถียรภาพ และล่มในที่สุด[3] ซึ่งกำลังรวมที่กำเนิดนั้นคือผลรวมกำลังของโหลด กับกำลังกำเนิดที่ได้สูญเสียในระบบ [4] และการปลดโหลดโดยรูปแบบที่มีการตรวจตราความถี่นั้นโดยปกติจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเสถียรภาพทางกำลัง [5] ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนารูปแบบการปลดโหลดต่างๆอย่างมากมายเพื่อนำมาใช้สร้างเสถียรภาพทางกำลังให้ระบบ แต่ในบางครั้งเมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากวิธีดังกล่าวอาจจะยังไม่ดีเท่าที่ควร หรือเหมาะสม สำหรับเพื่อใช้ในการกำหนดหรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ทางกำลัง

บทความนี้ได้นำเสนอระบบ กลยุทธ์ และวิธีการคำนวณหารูปแบบของการปลดโหลดที่ได้ปรับปรุงเพื่อนำมาใช้ในการปรับเปลี่ยน และกำหนดโครงสร้าง

ทางกำลังใหม่ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพทางกำลังที่ดี รวมถึงให้เหมาะสมกับกำลังที่มีอยู่(หรือกับกำลังสำรองที่พร้อมที่จะนำมาใช้ได้โดยทันทีซึ่งช่วยในการชดเชยกำลังให้กับระบบได้อย่างดีมาก สำหรับเหตุการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ระบบขาดกำลังที่อาจเกิดขึ้นแบบสุ่ม[6]) ภายหลังจากที่ระบบได้สูญเสียหน่วยกำเนิดกำลังไฟฟ้า หรือ กำลังไฟฟ้าจากระบบสายส่งกำลังจากฝั่งสาธารณูปโภค ออกไป โดยวิธีการหาคำตอบจากรูปแบบต่างๆที่จำลองขึ้นโดยระบบILS ซึ่งรูปแบบต่างๆเหล่านี้จะแปรเปลี่ยนไปตามโครงสร้างระบบที่เปลี่ยนแปลง ค่ากำลังของโหลดต่างๆ ค่ากำลังจากหน่วยกำเนิดกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังที่ได้จากระบบสายส่งกำลังจากฝั่งสาธารณูปโภค

2. การปลดโหลดอัจฉริยะ ILS (Intelligent Load Shedding) [7]

ILS เป็นการรวมกันของเทคโนโลยีขั้นสูงทางด้านระบบกำลังที่ถูกนำมาใช้สำหรับใช้ในการปลดโหลด ในกรณีที่เกิดการผิดปกติกับหน่วยกำเนิดกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

Knowledge Base ใช้ข้อมูลที่ส่งออกและรับเข้าในเงื่อนไขต่างๆ โดยยึดหลักจากการศึกษาและการจำลอง

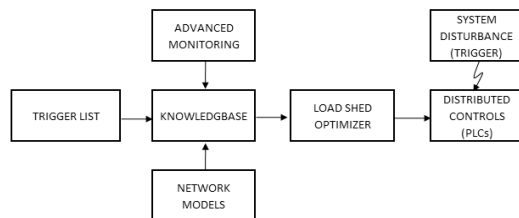
Advanced Monitoring ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขการทำงานในระบบ

Network Model ประกอบแบบโครงสร้างระบบ การเชื่อมต่อสารสนเทศ และคุณสมบัติไฟฟ้าของส่วนประกอบระบบ

Trigger List จะรวบรวมโดยยึดตามชนิดของ
สิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น (Disturbance)

Load Shed Optimizer คำนวณตารางของ
โหลดที่จะปลดตามการเปลี่ยนของระบบที่เกิดขึ้น

Distributed Controls ใช้ PLC ในการดำเนิน
การปลดโหลด โดยใช้บรรทัดฐานจากรูปแบบการ
เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากระบบ



ภาพที่ 1 แบบแผนผังการทำงานของ ILS [7]

3. หลักการของระบบการปลดโหลด อันชาญฉลาดที่ได้รับการพัฒนา (Improved Intelligent Load Shedding: ILS)

เนื่องจาก ILS ที่ได้ออกแบบมานั้น มีจุดประสงค์เพื่อ
สร้างเสถียรภาพให้แก่ระบบ และ/หรือเลือกรูปแบบ
การปลดโหลดให้เหมาะสมกับกำลังสำรองที่จัดสรรเอา
ไว้ ซึ่งแบ่งตามประเภทของระบบได้ดังนี้

1. กรณีที่ระบบมีเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่มี
ค่ากำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันทีที่เหลือน้อยค่าต่ำ/ไม่
เพียงพอ หรือไม่ได้นำมาพิจารณาในการปลดโหลด ซึ่ง
ถ้าหากระบบอยู่ในกรณีนี้ ระบบ ILS จะหารูปแบบ
คำตอบที่สร้างเสถียรภาพทางความถี่และกำลังที่ดี
ที่สุดให้แก่ระบบ จากการพิจารณากำลังจากหน่วย
กำเนิดกำลังที่ได้สูญเสียเท่านั้น ภายหลังจากเกิดการ

ผิดปกติที่หน่วยกำเนิดกำลังไฟฟ้าอื่น และ/หรือเกิด
กับระบบสายส่งกำลังจากฝั่งสาธารณูปโภค สืบเนื่อง
ด้วยการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของความเร็วใน
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือการเปลี่ยนแปลงความถี่[1] ดัง
นั้น Swing equation คือเครื่องมือที่เป็นประโยชน์
[8] ที่นำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพ และ
ประมาณความไม่สมดุลทางกำลัง[9] โดยที่ ILS นั้น
จะพิจารณาจาก ความไม่สมดุลกำลังโดยรวม ซึ่ง
คำนวณจาก N Swing Equations ดังนี้ [10]

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i = \frac{df_c}{dt} * \frac{2 \sum_{i=1}^n H_i}{f_n} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{2 \sum_{i=1}^n H_i}{f_n} \quad (2)$$

เมื่อ

f_c คือ ค่าเทียบเท่าศูนย์กลางความถี่ของระบบ

H_i คือ ค่าความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดกำลัง

ไฟฟ้า (Inertia of generator)

f_n คือ ค่าความถี่พิกัด (Rated frequency)

ΔP คือ ค่าความไม่สมดุลรวมทางกำลังโดยรวม

ΔP_i คือ ค่าปริมาณของการรบกวน

ξ คือ ค่าคงที่

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\min |\Delta P| \cong \min \left| \frac{df_c}{dt} \right| \quad (3)$$

ซึ่ง ΔP คือ ผลรวมของความไม่สมดุลของ
กำลังโดยรวมที่จำเป็นที่จะตัดออกจากระบบ เพื่อที่จะ
ทำให้ความถี่ของระบบกลับมาที่ความถี่พิกัด

โดยที่ ILS นั้นจะนำสมการที่ 3 มาใช้พิจารณา

เพื่อใช้ในการเลือกรูปแบบในการปลดโหลดจากการ
จำลองสถานการณ์ต่างๆ ของทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้น
ได้ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพทางความถี่มากที่สุด
นอกจากนี้แล้วในบางครั้ง อาจพบการคำนวณใน
แต่ละครั้งว่ามีค่าที่น้อยที่สุดที่ได้มีมากกว่าหนึ่งกลุ่ม
โหลด ดังนั้น ILS จะพิจารณาค่าความสำคัญของโหลด
รวมของรูปแบบต่างเหล่านั้นเป็นลำดับถัดมา โดย
เลือกกลุ่มที่ให้ผลรวมของค่าผลรวมความสำคัญของ
กลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด

2. กรณีที่ระบบมีเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่มี
ค่ากำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันทีที่ทราบค่าที่แน่นอน
โดยวิธีที่จะช่วยคืนสภาวะปกติความถี่ให้ระบบนั้น คือ
การนำกำลังของกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันทีมาใช้
[11] ซึ่งในกรณีเช่นนี้ ระบบ ILS จะพิจารณาเลือกรูป
แบบการปลดโหลด เพื่อให้เหมาะสมกับกำลังแบบ
พร้อมใช้ทันทีที่มีอยู่และสามารถใช้จ่ายกำลังได้ (ของ
เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่ไม่ได้เกิดการผิดพลาด) โดย
จะเลือกพิจารณารูปแบบที่ให้ผลต่างทางกำลังระหว่าง
กำลังที่ระบบได้สูญเสียไปกับผลรวมของกำลังรวมของ
โหลดกับกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันที ที่ให้ค่าที่ดี
ที่สุด และพิจารณาผลรวมค่าความสำคัญของโหลด
(Priority Setting) เป็นลำดับถัดมา โดยการเลือกรูป
แบบการปลดโหลดเช่นนี้ จะทำให้ระบบไม่มีการปลด
โหลดเกินโดยที่ไม่จำเป็น หรือไม่เหมาะสมกับกำลัง

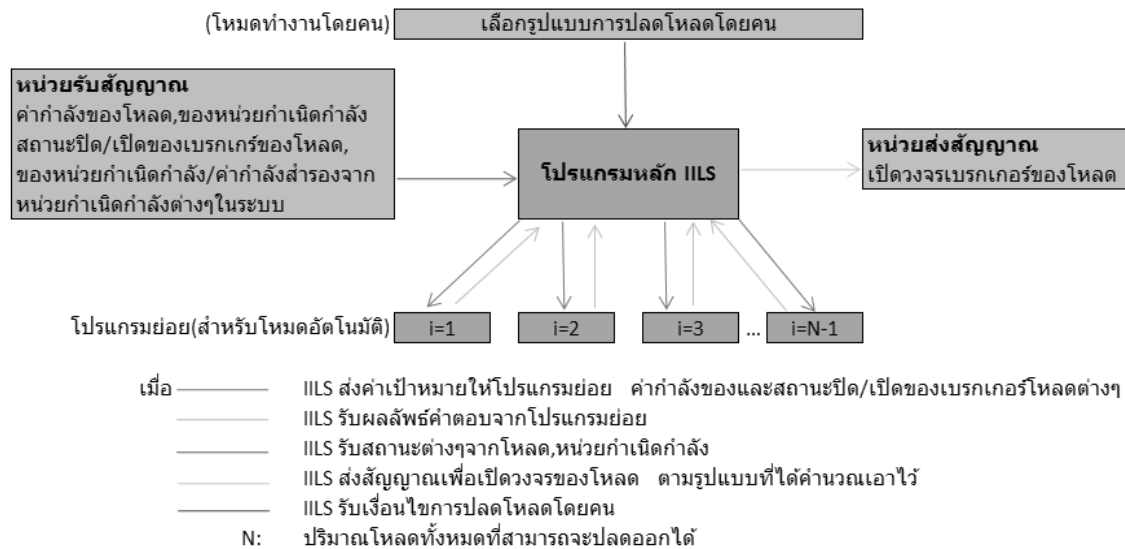
สำรองที่จัดสรรเอาไว้ และจากสมการที่ 3 ระบบ ILS
จะเลือกพิจารณาเฉพาะในกรณี

$$\frac{df_c}{dt} < 0 \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 ขนาดของ df_c/dt นั้นนำมาใช้
เพื่อประมาณความไม่สมดุลทางกำลัง[10]

4. โครงสร้างการทำงานของระบบ ILS

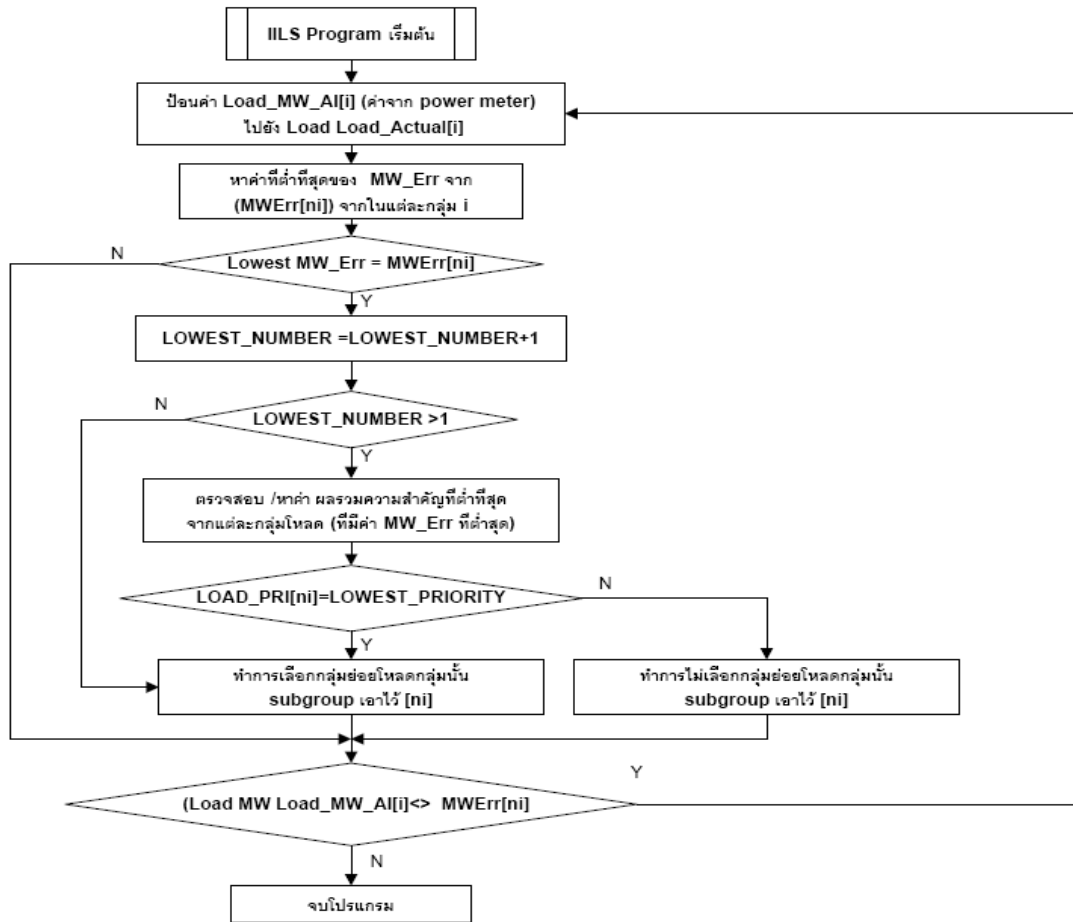
โดยเบื้องต้นระบบ ILS นั้นทำงานโดยการส่งค่า
กำลังเป้าหมายในการปลดโหลด (P_m) รวมถึงสถานะ
ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ค่ากำลังสำรองแบบพร้อมใช้
ทันทีของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังของ
โหลดไปยังโปรแกรมย่อยต่างๆ ซึ่งในแต่ละโปรแกรม
ย่อยจะจำลองรูปแบบต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้
ทั้งหมดของการเลือกปลดโหลดในแต่ละกลุ่ม ที่มี
จำนวนโหลดที่จะปลด ที่เท่ากับ 1, 2,...N-1 และหลังจาก
นั้นโปรแกรมย่อยในแต่ละรูปแบบจะส่งผลลัพธ์
กลับมายังโปรแกรมหลัก ILS ซึ่งประกอบไปด้วยค่า
ผลต่างทางกำลังที่ดีที่สุด ผลรวมค่าความสำคัญรวม
และรูปแบบในการเลือกปลดของแต่ละรูปแบบ โดย
ในภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างการติดต่อระหว่าง
โปรแกรมหลัก ILS กับหน่วยดำเนินการ และส่วนของ
โปรแกรมย่อยอื่นๆ



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างการติดต่อระหว่าง ILS กับหน่วยดำเนินการอื่นๆ

หลังจากที่โปรแกรมหลัก ILS ได้ผลลัพธ์โปรแกรมย่อยแต่ละรูปแบบแล้ว ILS จะนำเอารูปแบบต่างๆ ที่ได้เหล่านั้นมาพิจารณา เพื่อเลือกรูปแบบการปลดโหลด โดยเปรียบเทียบผลจากผลลัพธ์ที่ได้มาทั้งหมด เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับสร้างเสถียรภาพในระบบ และ/หรือ เลือกคำตอบที่เหมาะสมกับผลรวมกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันทีของหน่วยกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่ยังคงอยู่ในระบบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3 ซึ่งได้แสดงกระบวนการทำงานของโปรแกรม

หลัก ILS และภายหลังจากที่ ILS ได้รับสัญญาณการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของหน่วยกำเนิดกำลังไฟฟ้าภายใน และ/หรือของระบบสาธารณูปโภคภายนอก จากหน่วยรับสัญญาณแล้ว ILS ก็จะเริ่มส่งสัญญาณตามรูปแบบคำตอบที่ได้เลือกไว้ ไปยังหน่วยส่งสัญญาณ เพื่อเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของโหลดต่างๆ โดยเวลาที่ใช้เปิดวงจรโหลดจะสำเร็จภายใน 12 ไซเคิล [7] หลังจากที่ได้รับสัญญาณที่ ILS ได้พิจารณาและอยู่ในเงื่อนไขการทำงาน



ภาพที่ 3 แสดงกระบวนการทำงานของโปรแกรม ILS

ในภาพที่ 3 แสดงกระบวนการทำงานของ
โปรแกรม ILS และสามารถอธิบายด้วยสมการดังนี้

$$MWErr_i = \min \left| \left(P_m - \sum_{j=1}^n SP_j \right) - (P_{Loads})_{ni} \right| \quad (4)$$

$$LDpri_i = LOADpri_{ni} \quad (5)$$

เมื่อ

P_m คือ เป้าหมายค่ากำลังทางเชิงกลจากแหล่ง
ต้นกำเนิดกำลังที่จะสูญเสีย

SP_j คือ กำลังสำรองที่พร้อมใช้งานทันทีของ
หน่วยกำเนิด j ที่ยังอยู่ในระบบ

n คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ยังคงทำงาน
อยู่และต่อเข้ากับระบบ

$(P_{Loads})_{ni}$ คือ ผลรวมค่ากำลังของโหลด แต่ละ
โหลดในกลุ่มย่อย ni

$LOADpri_{ni}$ คือ ผลรวมค่าความสำคัญโหลด
ในกลุ่มย่อย ni

$MWErr_i$ คือ ค่าผลต่างกำลังระหว่างค่ากำลัง

จากแหล่งต้นกำเนิดกำลังที่จะสูญหายกับค่าผลรวมกำลังของโหลด (และผลรวมกำลังสำรองจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ที่ต่ำที่สุดในกลุ่มย่อย n_i

$LDpri_i$ คือ ค่าผลรวมค่าความสำคัญของแต่ละโหลดของแต่ละกลุ่มย่อย n_i ที่มีค่าผลต่างกำลังเท่ากับ $MWErr_i$ หลังจากได้ค่า $MWErr_i$ จากสมการที่ (4) แล้วระบบจะหาค่าที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับกลุ่มย่อยอื่นโดยที่

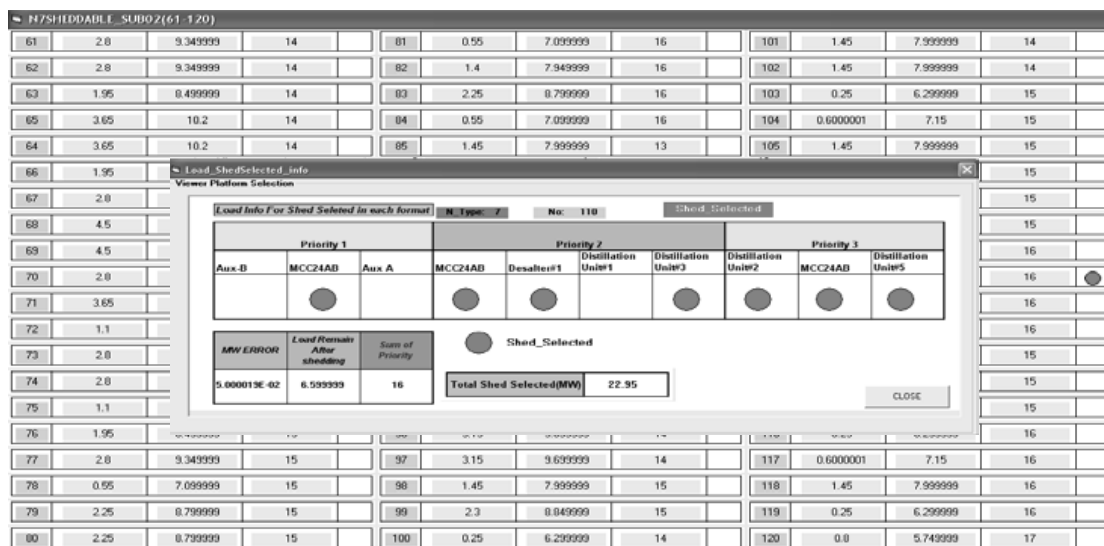
$$LowestMWErr = \min(MWErr_i) \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) หากระบบค้นพบว่า จำนวนค่า $MWErr_i$ ที่มีค่าเท่ากับ $LowestMWErr$ ที่ได้จากสมการที่ (4) มีมากกว่า 1 ค่า ระบบจะพิจารณาค่าความสำคัญรวมเป็นลำดับถัดมาตามสมการที่ (7)

$$Lowestpriority = \min(LDpri_i) \quad (7)$$

จากสมการ(6) ระบบจะได้ผลต่างทางกำลังที่ต่ำ

ที่สุด โดยจะพิจารณาค่านี้เป็นอันดับแรกเพื่อเลือกรูปแบบในการปลดโหลด ซึ่งจะส่งผลให้ได้รูปแบบที่รักษาเสถียรภาพทางความถี่ของระบบได้ดีที่สุด และ/หรือเพื่อให้เหมาะสมที่สุดกับกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันที และหลังจากนั้นระบบจะนำกลุ่มคำตอบที่ได้พิจารณาจากสมการ (6) แล้วมาพิจารณาโดยสมการ (7) เป็นลำดับถัดมา เพื่อเลือกรูปแบบคำตอบที่ให้ค่าผลรวมของค่าความสำคัญของกลุ่มที่ต่ำที่สุด เพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสมในเชิง economic โดยรวม เนื่องจาก ILS ที่ออกแบบมานี้เป็นการเลือกปลดโหลดไว้ก่อนที่เกิดเหตุการณ์สูญเสียแหล่งกำเนิดจากระบบ โดยที่ระบบจะตรวจจับสัญญาณของ Breaker ของแหล่งกำเนิด หากพบว่าสัญญาณนั้น Open ระบบจะปลดโหลดออกจากระบบตามที่ได้เลือกไว้โดยเร็วที่สุด และระบบ ILS นั้น ประกอบด้วยส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งพัฒนาด้วย Visual Basic ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 แสดงรายละเอียดของแต่ละกลุ่มที่เลือกโดย ILS ในการทดสอบกรณีที่ 1

ภาพที่ 5 แสดงรายละเอียดของแต่ละกลุ่มที่เลือกโดย ILS ในการทดสอบกรณีที่ 2

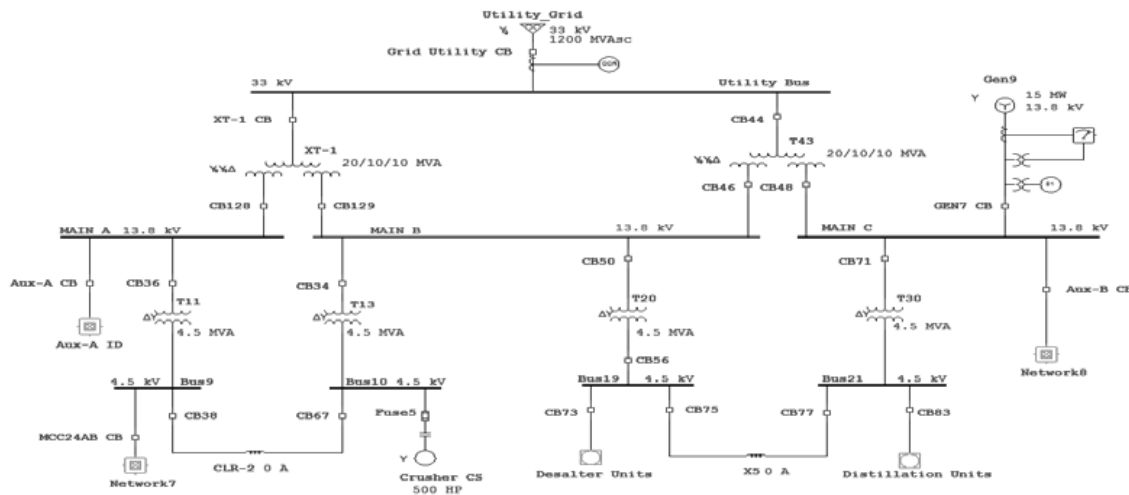
ภาพที่ 4 และ 5 แสดงรายละเอียดการเลือกปลดโหลดในแต่ละกลุ่มที่เลือกโดย ILS โดยระบุค่าความแตกต่างของกำลังของชุดโหลดกับแหล่งกำเนิดกำลังที่จะสูญเสียค่ากำลังที่เหลือหลังจากปลดโหลดกลุ่มนั้น ค่าผลรวมของค่าความสำคัญที่กำหนดไว้ และรวมไปถึงระบุ ชื่อโหลดที่จะถูกปลดหลังจากเกิดเหตุการณ์สูญเสียแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของการทดสอบในกรณีที่ 1 และ 2 ตามลำดับซึ่งจะกล่าวถัดไป

หลักการหารูปแบบในการปลดที่ได้ค่าผลต่างทางกำลังที่ดีที่สุด จากการสูญเสีย Utility Grid (23 MW) ไปจากระบบ จากภาพที่ 6 แสดง Simplified One-Line Diagram of an Oil Refining Facility ซึ่งประกอบไปด้วย generation และหน่วย distribution ในระบบนี้ ได้จ่ายโหลดโดยรวมทั้งหมด 45 MW ซึ่งประกอบไปด้วย หม้อแปลง แบบ three- winding 34.5/13.8 kV (20MVA) ค่ากำลังจาก (Genset C) มีค่าเท่ากับ 15 MW

5. รูปแบบการนำไปประยุกต์ใช้และการทดลอง กรณีที่ 1 การทดลองกับระบบ Oil Refinery with Cogeneration [7]

เป็นการเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง ILS กับระบบ ILS (โดยความถี่ระบบมีค่า 60 เฮิร์ตซ์)

เป้าหมายของ ILS/ ILS: รักษาเสถียรภาพทางความถี่และกลับสู่สภาวะปกติโดยเร็วที่สุด โดยยึด



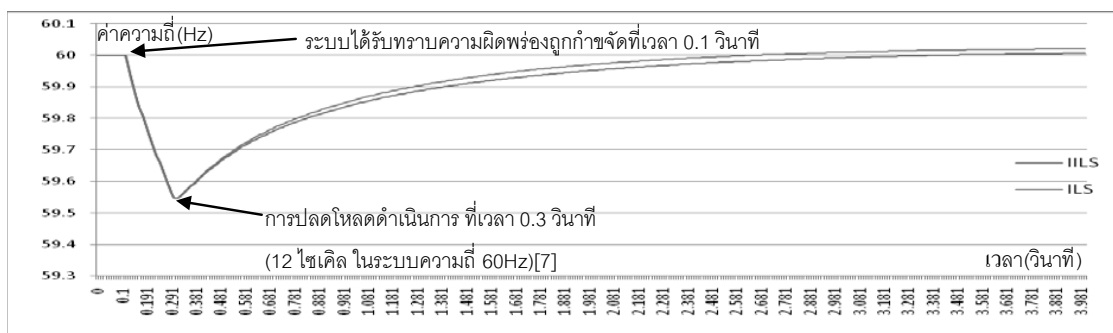
ภาพที่ 6 แสดง Simplified One-Line Diagram of an Oil Refining Facility สำหรับการทดลองกรณีที่ 1 [7]

ตารางที่ 1 แสดงรายการของโหลดที่ถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้ากำลังโดย ILS [7] และ ILS

ค่าความสำคัญ	โหลด ID	MW Shed	
		ILS	IIS
1	Aux-B (Pump)	1.20	คงไว้
	MCC24AB	2.55	2.55
	Aux A (Pump)	2.00	คงไว้
2	MCC24AB	2.55	2.55
	Desalter #1	4.25	4.25
	Distillation Unit #1	3.40	คงไว้
	Distillation Unit #3	2.55	2.55
3	Desalter #2	4.25	4.25
	MCC24AB	คงไว้	4.25
	Distillation Unit # 5	คงไว้	2.55
Total Load Shed		22.75	22.95

หลังจากได้รูปแบบของคำตอบที่จะใช้ในการปลด
โหลด (โดยที่ = 23 MW) จากการเลือกโดยระบบ ILS
แล้วนำผลของคำตอบที่ได้มาทดสอบผลการตอบสนอง
ของความถี่ เทียบกับ ILS โดยโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์
Transient Stability ระบบ โดย ETAP ซึ่งกำหนดการ
เปิดวงจรของโหลดตามที่แต่ละระบบได้เลือกไว้ที่เวลา 0.3
วินาที ในช่วงเวลาภายหลังจากระบบได้เปิดวงจรของ
เซอร์กิตเบรกเกอร์ของ Utility Grid เนื่องจากเกิด

ความผิดพลาดในสายส่งกำลังทางฝั่งสาธารณูปโภคที่
0.1 วินาที ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 7 และพบ
ว่าการตอบสนองทางความถี่จากการปลดโหลดโดย ILS
นั้นสามารถทำให้ค่าความถี่ของระบบกลับมาที่ 60
เฮิรตซ์ ได้เร็วกว่า ILS ประมาณ 0.7 วินาที โดยทั้ง ILS
และ ILS เริ่มดำเนินการ ณ เวลาเดียวกัน หลังความ
ผิดพลาดได้ถูกกำจัดไป



ภาพที่ 7 แสดงผลการตอบสนองของค่าความถี่จากการปลดโหลดของ ILS เทียบกับ ILS ในกรณีที่ 1

ตารางที่ 2 แสดงรายการของการเปรียบเทียบระหว่างปลดโหลดของ ILS และ ILS

รายการ	ระบบ ILS	ระบบ ILS (ตามลำดับเลือก)		
		N7 ($P_{Loads} \rangle_{110}$)	N8 ($P_{Loads} \rangle_1$)	N8 ($P_{Loads} \rangle_2$)
ค่า Error จากค่าเป้าหมาย (MW)	0.25	0.05	0.25	0.25
ผลรวมค่าความสำคัญของโหลดที่จะถูกปลด	14	16	14	14
จำนวนโหลดที่จะถูกปลดออก	8	7	8	8

จากตารางที่ 2 พบว่า ระบบ ILS นั้นเลือกรูปแบบที่ให้ค่าผลต่างจากค่าเป้าหมายที่ 0.05 MW (พิจารณาจาก $P_m = 23$ MW) ในคำตอบที่ 1 ที่เลือก เนื่องจากเป้าหมายคือรักษาให้ระบบมีเสถียรภาพทางความถี่ และทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบจำนวนโหลดที่ถูกปลดก็มีค่าน้อยกว่าด้วยเมื่อเทียบกับ ILS

กรณีที่ 2 การทดลองกับระบบ Islanded Oxygen Liquefaction Plant [7]

เปรียบเทียบการทำงาน ระหว่าง ILS กับ ระบบ ILS (โดยความถี่ระบบมีค่า 50 เฮิร์ตซ์)

เป้าหมายของ ILS/ ILS: การปลดโหลดที่มีค่าที่เหมาะสม โดยยึดหลักการหารูปแบบในการปลดที่ได้ค่าผลต่างทางกำลังที่ดีที่สุด จากการสูญเสีย GTG#1 (82 MW) ไปจากระบบ

จากภาพที่ 8 ระบบมีผลรวมกำลังที่ 160 MW ซึ่งถูกจ่ายให้โดย GTG#1 และ GTG#2 หม้อแปลง Step-up 90 MVA ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ละเครื่อง 2 Synchronous air compressor 2 induction motors ที่ขับเคลื่อนปั๊ม 1 และ 2 โหลดกลุ่มย่อย A, B และ C โดยในกลุ่มประกอบไปด้วยมอเตอร์ Low voltage และโหลดอื่นๆ ปั๊มสำหรับกวนในระบบ CW Pump A, B, โหลดที่ใช้ในการสนับสนุนอื่นๆ

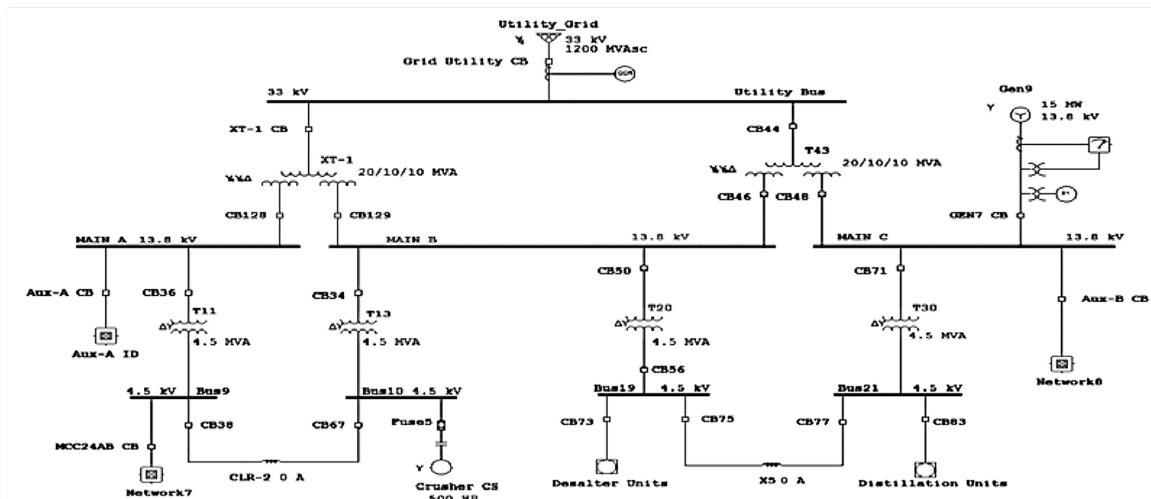
Aux Load A โดยที่มอเตอร์ของกระบวนการหลักจะประกอบไปด้วย A/C 1 และ A/C 2 การสูญเสียหน่วยคอมเพรสเซอร์ไปนั้นจะส่งผลกระทบต่อการผลิตที่น้อยลง

จากภาพที่ 8 ระบบมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่องเพื่อจ่ายให้โหลดที่ 125 MW หลังจากสูญเสีย GTG#1 ไปจากระบบ ซึ่ง (GTG#2) นั้นมีค่า Spinning Reserve เท่ากับ 30 MW ดังนั้น

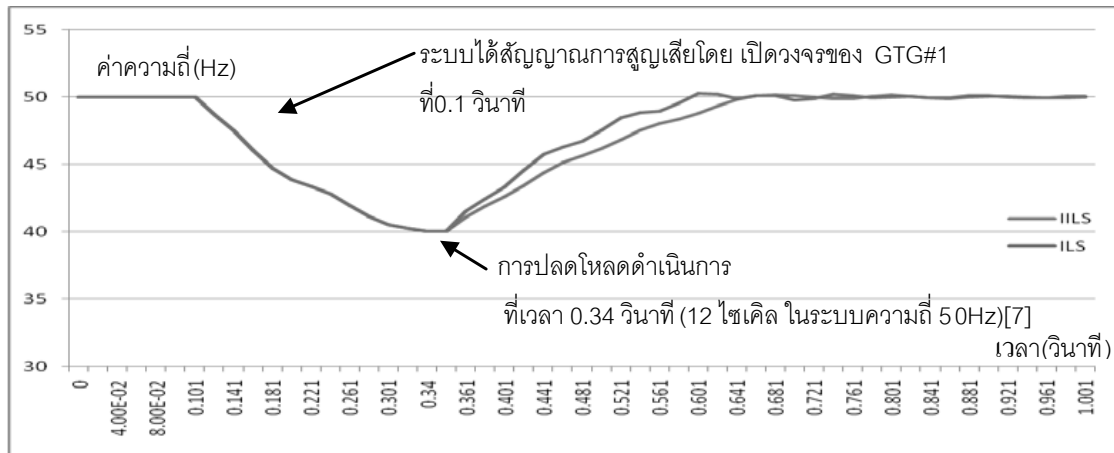
$P_m = 52$ MW ($82-30= 52$ MW, (ค่ากำลังที่ต้องการในการปลดโหลด)) และระบบได้รูปแบบของคำตอบที่จะใช้ในการปลดโหลดจากการเลือก โดย ILS ซึ่งนำผลของคำตอบที่ได้มาทดสอบผลการตอบสนองของความถี่เทียบกับ ILS ภายหลังจากระบบได้เปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ของ GTG#1 เนื่องจากเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.1 วินาที ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 9 และพบว่า การตอบสนองทางความถี่จากการปลดโหลดโดย ILS นั้นสามารถทำให้ค่าความถี่ของระบบกลับมาที่ 50 เฮิร์ตซ์ได้ช้ากว่า ILS ประมาณ 0.06 วินาที ซึ่งค่อนข้างจะน้อยมาก แต่เนื่องจากการปลดโหลดในกรณีนี้เป็นการเลือกที่เหมาะสม เพราะระบบนั้นมีค่ากำลังสำรองที่พร้อมใช้งานทันทีที่ทราบค่า แต่ก็พบว่า ILS สามารถรักษาโหลดได้เพิ่มอีก 2 MW

ตารางที่ 3 แสดงรายการเลือกปลดโหลดแบบ Optimal โดย ILS [7] และ ILS

ค่า ความ สำคัญ	กลุ่ม #	โหลด ID	MW Shed	
			ILS	IIS
1	1	Aux Load B	1.70	คงไว้
	1	CW Pump B	6.00	6.00
	1	Sub C	7.00	คงไว้
2	2	Sub B	7.65	คงไว้
	2	Sub D	5.00	คงไว้
	2	Sub A	7.65	คงไว้
3	3	A/C 1	คงไว้	27.00
	3	Pump 1	19.50	19.50
Total Load Shed			54.50	52.50



ภาพที่ 8 แสดง Simplified One-Line Diagram of an Oxygen Liquefaction Plant [7]



ภาพที่ 9 แสดงผลการตอบสนองของค่าความถี่จากการปลดโหลดของ ILS เทียบกับ ILS ในกรณีที่ 2

ตารางที่ 4 แสดงรายการของการเปรียบเทียบระหว่างปลดโหลดของ ILS ไว้ กับ ILS (กรณีที่ 2)

รายการ	ระบบ ILS	ระบบ ILS (ตามลำดับเลือก)				
		N3: (P_{Loads}) ₃₆	N5: (P_{Loads}) ₃₇	N5: (P_{Loads}) ₄₂	N6: (P_{Loads}) ₂₃	N7: (P_{Loads}) ₂
ค่า Error จากค่าเป้าหมาย (MW)	2.5	0.5	0.65	0.65	0.8	2.5
ผลรวมค่าความสำคัญของโหลดที่จะถูกปลด	12	7	9	9	11	12
จำนวนโหลดที่จะถูกปลด	7	3	5	5	6	7

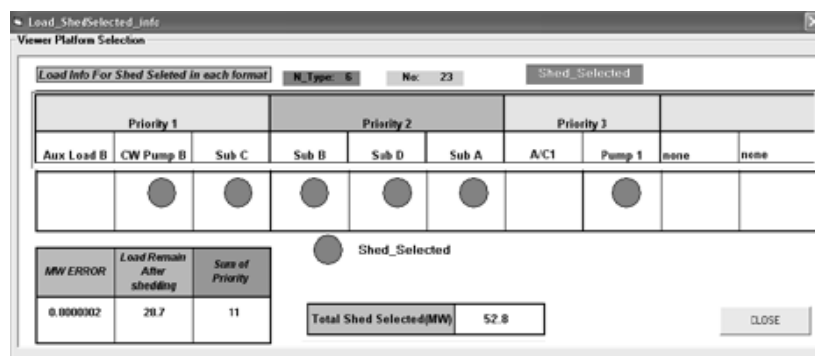
จากตารางที่ 4 พบว่า ILS นั้นเลือกรูปแบบที่ให้ค่า Error จากค่าเป้าหมายที่ดีกว่า และจำนวนโหลดที่ถูกปลดก็มีค่าน้อยกว่าด้วยเช่นกัน แต่หากจะพิจารณาความหมายของมาก หรือน้อยของค่าความสำคัญรวมนั้นมาจากการเลือกปริมาณจำนวนโหลดที่จะปลด หรือค่าที่มากหรือน้อยของค่าความสำคัญของโหลดที่เลือกปลด ซึ่งในการทดลองนี้ก็คือปริมาณนั่นเอง จากการทดลองในส่วนของ Oxygen Liquefaction Plant สังเกตได้ว่า ผลที่ได้จาก ILS

เป็นรูปแบบการเลือกที่ทำให้

ระบบมีความเหมาะสมกับกำลังสำรองที่เหลืออยู่ ซึ่งดีกว่า ILS แบบเดิม แต่ในคำตอบแรกที่เลือกโดย ILS นี้ ถ้าหากมองในแง่เชิง economy แล้วอาจจะเป็นรูปแบบของคำตอบที่อาจจะไม่ดีนัก แต่เมื่อพิจารณาในคำตอบ N6 รูปแบบที่ 23 (ดังแสดงในภาพที่ 10) พบว่าจะให้รูปแบบที่ดีกว่า ILS ทั้งด้าน economic และเหมาะสมกับกำลังสำรองแบบพร้อมใช้ทันทีที่ดีกว่า ทั้งยังมีจำนวนโหลดที่ถูกปลดที่น้อย

กว่า (เพราะไม่ได้ปลด Aux Load B) และที่สำคัญ คือ สามารถรักษา A/C1 ที่เป็นหัวใจสำคัญในการผลิตเอาไว้ได้ด้วย และนี่ก็ถือเป็นผลพลอยได้จากการจำลอง

รูปแบบการปลดโหลดต่างๆ เอาไว้และแสดงผลออกมาโดย ILS



ภาพที่ 10 แสดงรายละเอียดของแต่ละกลุ่มที่เลือกโดย ILS ในการทดสอบกรณีที่ 2 คำตอบ

บทสรุป

จากการทดลองพบว่า ระบบ ILS นั้นสามารถให้คำตอบ และทางเลือกที่หลากหลายแก่ผู้ปฏิบัติงานมากกว่า โดยในรูปแบบของคำตอบที่ได้จากการออกแบบ ระบบ ILS นั้นจะให้ผลลัพธ์อยู่ 3 ค่า คือ ค่า Error จากค่าเป้าหมาย ค่าผลรวมค่าความสำคัญของโหลด และจำนวนของโหลดที่จะถูกปลด ซึ่งเป็นทางเลือกหลากหลายที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่มีกระบวนการที่ซับซ้อน และในที่นี้เลือก ค่า Error จากค่าเป้าหมาย เป็นค่าที่มีความสำคัญสูงสุดแตกต่างจากระบบ ILS คือ ILS จะมองหาค่า Error จากค่าเป้าหมายที่น้อยที่สุด จากการตัดที่โหลดที่มีค่าความสำคัญที่น้อยที่สุด แล้วค่อยไล่ไปเรื่อยๆ หากลำดับที่พิจารณานั้นไม่เพียงพอ คำตอบที่ได้จาก ILS ก็เป็นหนึ่งในคำตอบของ ILS แต่ไม่ใช่คำตอบแรกๆ ที่เลือก

เนื่องจาก ILS เน้นการรักษาเสถียรภาพทางกำลังของระบบ และ/หรือเลือกรูปแบบในการปลดให้เหมาะสมกับกำลังสำรองที่พร้อมใช้ทันที ซึ่งหากว่าระบบมีความซับซ้อนมากๆ และมีค่าที่แตกต่างกันสูงในแต่ละกลุ่มโหลด ระบบที่ออกแบบมานั้นจะมีความหลากหลายและให้คำตอบที่ดี ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มตัวเลือกให้แก่ผู้ปฏิบัติงานในการตัดสินใจสำหรับป้องกันระบบ เมื่อเกิดเหตุการณ์สูญเสียหน่วยจ่ายกำลังจากระบบ ในแง่ของการนำไปใช้งานจริง ระบบ ILS ยังต้องพัฒนาในส่วนของการติดต่อกับอุปกรณ์จริง รวมถึงการเลือกรูปแบบโปรโตคอลในการติดต่อสื่อสารระหว่างตัวโปรแกรมกับอุปกรณ์จริง โดยที่ควรเลือกพิจารณาจากความเสถียรของสัญญาณ และความเร็วในการรับส่งข้อมูลอันเป็นสิ่งสำคัญ เพราะหากสามารถลดระยะเวลาในการรับ-ส่งข้อมูล/สัญญาณแล้ว จะส่งผลให้ระบบกลับมาจุดที่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dai J.J. , Castro H., Guo J., Khandelwal T., Shokooh S. and Shokooh F. 2009. Automatic Generation Control System for an Industrial Facility with Onsite Generation. Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09 IEEE/PES
- [2] “IEEE Guide for the Application of Protection Relays Used for Abnormal Frequency Load Shedding and restoration” IEEE Std C37.117-2007,2007
- [3] Berrani H., Ledwich G. and Ford J.J., “On the use of df/dt in Power System Emergency Control” IEEE, 2009
- [4] Kulkarni A. V., Gao W. and Ning J., “Study of Power System Load Shedding Scheme Based On Dynamic Simulation” Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES
- [5] Bronzeado H. S., Zimath S. L. and Cosser J. “Effect of Voltage Dips on Frequency Relays: Case Study of Power Quality Improvements in a Petrochemical Plant” Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2008. 13th International Conference on, 2008
- [6] Hou Z., Zhang H., “Influences of Spinning Reserve Capacity and Distribution on Dynamic Frequency Response” Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific
- [7] Shokooh S., Khandelwal T., Shokooh F., Tastet J., Dai J.J., “Intelligent Load Shedding Need for Fast and Optimal Solution” IEEE PCIC Europe 2005
- [8] Rudez U. and Mihalic R. “Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes” Power Systems, IEEE Transactions on (Volume:26 , Issue: 2) 2011
- [9] Mokhlis H., Karimi M., Shahriari A., Bakar A.H.A. and Laghari J.A., “A New Under-Frequency Load Shedding Scheme for Islanded Distribution Network ” Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES 2013
- [10] Terzijia V. V. and Koglin H. J., “Adaptive under frequency load shedding integrated with frequency estimation numerical algorithm” IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 149, No.6,pp. 713-718, Nov 2002
- [11] Petrichenko R., Chuvychin V. and Sauhats A.,” Coexistence of Different Load Shedding Algorithms Coexistence of Different Load Shedding Algorithms” Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 12th International Conference on, 2013