การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ IEEE 5-Bus

รายงานฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ IEEE 5-bus ด้วยวิธี Newton-Raphson ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าขนาดแรงดัน มุมแรงดัน การไหลของกำลังในสายส่ง และกำลังสูญเสียของระบบภายใต้สภาวะคงตัว ข้อมูลตั้งต้นของระบบอ้างอิงจากบทความใน IEEE Xplore ซึ่งให้ bus data และ line data สำหรับระบบ IEEE 5-bus ส่วนงานวิจัยจาก ScienceDirect ถูกใช้เพื่อช่วยตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแนวโน้มผลลัพธ์และความถูกต้องของวิธีคำนวณ ผลการทดสอบพบว่าโปรแกรมสามารถลู่เข้าได้ภายใน 4 iterations โดยให้ค่าแรงดันของบัสอยู่ในช่วง 0.9716-1.0600 per-unit และมีกำลังสูญเสียจริงรวมของระบบเท่ากับ 6.15 MW ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมสามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาพื้นฐานด้าน Power Flow ได้อย่างเหมาะสม

1. บทนำ

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากช่วยให้ทราบสภาวะการทำงานของระบบในเชิงแรงดัน กำลังผลิต กำลังใช้โหลด และกำลังสูญเสียในสายส่ง ข้อมูลเหล่านี้มีบทบาทต่อการวางแผนระบบ การประเมินคุณภาพแรงดัน และการตัดสินใจด้านการเดินระบบ

หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการแก้ปัญหา Power Flow คือวิธี Newton-Raphson เพราะมีอัตราการลู่เข้าสูงและเหมาะกับระบบที่มีสมการไม่เชิงเส้นจำนวนมาก งานนี้จึงนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบ IEEE 5-bus ซึ่งเป็นระบบทดสอบมาตรฐานขนาดเล็กที่เหมาะสำหรับใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรม MATLAB สำหรับคำนวณ Power Flow ของระบบ IEEE 5-bus ด้วยวิธี Newton-Raphson
2. เพื่อหาค่าขนาดแรงดันและมุมแรงดันของแต่ละบัสหลังการลู่เข้า
3. เพื่อหาค่าการไหลของกำลังในสายส่งและกำลังสูญเสียของระบบ
4. เพื่อศึกษาแนวทางการใช้งานเอกสารอ้างอิงจาก IEEE Xplore และ ScienceDirect ในการจัดทำรายงานเชิงวิชาการ

3. ขอบเขตของงาน

การศึกษานี้มุ่งเน้นเฉพาะการวิเคราะห์ Power Flow แบบ steady-state ของระบบ IEEE 5-bus โดยมีขอบเขตดังนี้

- ใช้วิธี Newton-Raphson เป็นวิธีการคำนวณหลัก
- ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการพัฒนาและทดสอบ
- ใช้ข้อมูล bus data และ line data ตามชุดข้อมูลที่อ้างอิงจากบทความ IEEE Xplore

- ใช้บทความจาก ScienceDirect ในการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ในระดับแนวโน้ม
- ไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์ fault, transient stability หรือ optimal power flow

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง บัสของระบบแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

- Slack Bus เป็นบัสอ้างอิงของระบบ โดยกำหนดขนาดแรงดันและมุมแรงดันไว้ล่วงหน้า
- PV Bus เป็นบัสเครื่องกำเนิดที่กำหนดกำลังจริงและขนาดแรงดัน ส่วนกำลังรีแอกทีฟเป็นค่าที่คำนวณได้
- PQ Bus เป็นบัสโหลดที่กำหนดกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

วิธี Newton-Raphson อาศัยการแก้สมการไม่เชิงเส้นในรูปแบบเชิงซ้ำ โดยเริ่มจากค่าเดาเริ่มต้นของแรงดันและมุมแรงดัน แล้วคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ จากนั้นสร้าง Jacobian matrix เพื่อใช้หาค่าปรับแก้ของตัวแปรสถานะในแต่ละรอบ กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

5. แหล่งข้อมูลอ้างอิง

5.1 แหล่งข้อมูลโจทย์หลักจาก IEEE Xplore

ข้อมูลตั้งต้นของระบบในโปรเจคนี้อ้างอิงจากบทความ

- Ravi Shankar Tiwari, Anurag Priyadarshi, and Om Hari Gupta, "A Comparative Analysis of Numerical Iterative Methods for Power Flow Using IEEE 5-Bus Test System," 2021 International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing and Communication (AESPC), IEEE Xplore, DOI: 10.1109/AESPC52704.2021.9708525

ในบทความดังกล่าวมี Appendix A ซึ่งประกอบด้วย

- **Table A1** สำหรับข้อมูลบัส
- **Table A2** สำหรับข้อมูลสายส่ง
- **Table A3** สำหรับกำลังส่งสูงสุดของสายส่ง

บทความนี้จึงถูกใช้เป็นแหล่งข้อมูลตั้งต้นของระบบ

5.2 แหล่งตรวจสอบความสมเหตุสมผลจาก ScienceDirect

เพื่อใช้ตรวจสอบแนวโน้มของผลลัพธ์และความสมเหตุสมผลของวิธีคำนวณ ใช้งานวิจัยดังนี้

- E. O. Ezugwu et al., "Wind energy penetration impact on active power flow in developing grids," *Scientific African*, 2022, DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01422

บทความนี้มีภาคผนวกที่ให้ข้อมูลระบบ IEEE 5-bus และระบุผล base case บางส่วน จึงเหมาะสำหรับใช้ยืนยันว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับเอกสารวิชาการ

หมายเหตุเชิงวิชาการ:

- IEEE Xplore ถูกใช้เป็นแหล่งข้อมูลตั้งต้นของโจทย์
- ScienceDirect ถูกใช้เป็นแหล่งตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลคำนวณ
- ทั้งสองแหล่งไม่ได้ใช้ dataset รายละเอียดเหมือนกันทุกค่า จึงไม่ควรเปรียบเทียบผลแบบหนึ่งต่อหนึ่งโดยตรง

6. ข้อมูลระบบที่ใช้ในการคำนวณ

6.1 ค่าฐานของระบบ

- S_base = 100 MVA
- V_base = 230 kV
- f_base = 60 Hz

6.2 ข้อมูลบัส

Bus	Type	|V| เริ่มต้น (pu)	Pgen (pu)	Qgen (pu)	Pload (pu)	Qload (pu)
1	Slack	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00
2	PV	1.00	0.40	0.00	0.20	0.10
3	PQ	1.00	0.00	0.00	0.45	0.15
4	PQ	1.00	0.00	0.00	0.40	0.05
5	PQ	1.00	0.00	0.00	0.60	0.10

6.3 ข้อมูลสายส่ง

From	To	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)
1	2	0.02	0.06	0.000
1	3	0.08	0.24	0.025

From	To	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)
2	3	0.06	0.25	0.020
2	4	0.06	0.18	0.020
2	5	0.04	0.12	0.015
3	4	0.01	0.03	0.010
4	5	0.08	0.24	0.025

7. โครงสร้างและขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมหลักคือ ieee5bus_powerflow.m โดยมีขั้นตอนทำงานดังนี้

1. อ่านข้อมูลจาก BUS_DATA.m และ LINE_DATA.m
2. สร้างเมทริกซ์ Ybus
3. แบ่งประเภทบัสเป็น Slack, PV และ PQ
4. กำหนดตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า
5. คำนวณกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของแต่ละบัส
6. สร้าง mismatch vector
7. สร้าง Jacobian matrix
8. หาค่าปรับแก้ของตัวแปรสถานะด้วยสมการเชิงเส้น
9. ทำซ้ำจนกว่าระบบจะลู่เข้า
10. คำนวณ line flow และ line loss
11. รายงานผลลัพธ์ในรูปแบบตาราง กราฟ และเก็บไว้ในตัวแปร results

8. เกณฑ์การลู่เข้า

เกณฑ์การหยุดของโปรแกรมกำหนดเป็น

max(abs(mismatch)) < tolerance

โดยกำหนด

tolerance = 1e-6

นั่นคือ โปรแกรมจะหยุดการทำซ้ำเมื่อค่า mismatch สูงสุดน้อยกว่า 10^{-6}

9. วิธีดำเนินการทดลอง

การทดลองดำเนินการโดยรันโปรแกรมใน MATLAB ด้วยคำสั่ง ieee5bus_powerflow.m

จากนั้นตรวจสอบผลลัพธ์ที่แสดงใน Command Window และเปรียบเทียบกับแนวโน้มที่รายงานในเอกสารอ้างอิง

10. ผลการคำนวณ

10.1 การลู่เข้าของวิธี Newton-Raphson

โปรแกรมสามารถลู่เข้าได้ใน 4 iterations

Iteration	Max mismatch
1	6.000000e-01
2	2.122212e-02
3	8.231133e-05
4	1.150734e-09

10.2 ผลแรงดันของแต่ละบัส

Bus	Type	|V| (pu)	|V| (kV)	Angle (deg)
1	Slack	1.0600	243.80	0.0000
2	PV	1.0000	230.00	-2.0046
3	PQ	0.9871	227.02	-4.8642
4	PQ	0.9840	226.31	-5.1277
5	PQ	0.9716	223.46	-5.7837

10.3 ผลกำลังผลิต โหลด และกำลังสูญเสียรวม

รายการ	per-unit	หน่วยจริง
Total Generation P	1.7115 pu	171.15 MW
Total Generation Q	0.3595 pu	35.95 Mvar
Total Load P	1.6500 pu	165.00 MW
Total Load Q	0.4000 pu	40.00 Mvar
Total Loss P	0.0615 pu	6.15 MW
Total Loss Q	-0.0405 pu	-4.05 Mvar

10.4 ผลการไหลกำลังในสายส่ง

From	To	P_from (pu)	Q_from (pu)	P_loss (pu)	Q_loss (pu)
1	2	0.8774	0.7783	0.024487	0.073461
1	3	0.4341	0.1651	0.016072	-0.004232
2	3	0.1991	-0.0111	0.002384	-0.029554
2	4	0.2972	-0.0218	0.005301	-0.023462
2	5	0.5566	0.0539	0.012582	0.008585
3	4	0.1647	0.0378	0.000302	-0.018519
4	5	0.0563	0.0080	0.000348	-0.046760

11. อภิปรายผล

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแรงดันของบัสโหลดลดลงจากค่าเริ่มต้นตามที่คาดหมาย โดยเฉพาะ bus 5 ซึ่งอยู่ปลายระบบมีแรงดันต่ำสุดที่ 0.9716 pu สอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าซึ่งแรงดันจะลดลงเมื่อมีโหลดและระยะทางไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น

Slack bus ทำหน้าที่รักษาสมดุลของระบบจึงรับภาระกำลังส่วนที่เหลือทั้งหมด ส่วน PV bus สามารถรักษาขนาดแรงดันไว้ตามที่กำหนด ในขณะที่กำลังรีแอกทีฟจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของระบบ

กำลังสูญเสียจริงรวมของระบบเท่ากับ 6.15 MW ซึ่งอยู่ในระดับที่สมเหตุสมผลสำหรับระบบขนาดเล็กและสอดคล้องกับแนวคิดทางทฤษฎี การที่ค่า reactive loss รวมมีค่าเป็นลบสามารถอธิบายได้จากผลรวมของพฤติกรรมรีแอกทีฟของสายส่งและ line charging ตามแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม

แม้ว่าผลลัพธ์จากโปรแกรมจะไม่จำเป็นต้องตรงกับค่าทุกช่องในเอกสารอ้างอิงทั้งหมด เนื่องจากแต่ละบทความอาจใช้สมมติฐานหรือรายละเอียดข้อมูลระบบต่างกันบางส่วน แต่แนวโน้มของแรงดันและรูปแบบของการลู่เข้าแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสำหรับการใช้ศึกษาเชิงการเรียนการสอน

12. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าวิธี Newton-Raphson สามารถนำมาใช้คำนวณ Power Flow ของระบบ IEEE 5-bus ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใน MATLAB สามารถคำนวณแรงดันบัส มุมแรงดัน กำลังในสายส่ง และกำลังสูญเสียของระบบได้ครบถ้วน พร้อมทั้งลู่เข้าได้อย่างรวดเร็วภายใน 4 รอบการคำนวณ

งานนี้ยังแสดงให้เห็นถึงแนวทางการใช้งานเอกสารอ้างอิงอย่างเหมาะสม กล่าวคือ ใช้ IEEE Xplore เป็นแหล่งข้อมูลตั้งต้นของระบบ และใช้ ScienceDirect เป็นแหล่งช่วยตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการจัดทำรายงานทางวิชาการภายใต้ข้อจำกัดของแหล่งข้อมูลที่มี

เอกสารอ้างอิง

1. Ravi Shankar Tiwari, Anurag Priyadarshi, and Om Hari Gupta, "A Comparative Analysis of Numerical Iterative Methods for Power Flow Using IEEE 5-Bus Test System," 2021 International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing and Communication (AESPC), IEEE Xplore, 2021. DOI: 10.1109/AESPC52704.2021.9708525

2. E. O. Ezugwu et al., "Wind energy penetration impact on active power flow in developing grids," *Scientific African*, 2022. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01422

3. Hadi Saadat, *Power System Analysis*.

4. J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*.