

บทที่ 4

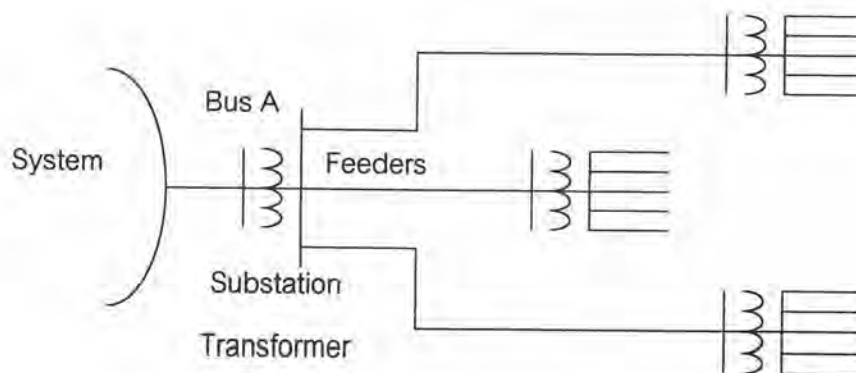
การพัฒนาแบบจำลองโหลด

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ลักษณะคุณสมบัติของโหลดและการแทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโหลดที่ต่างกันจะทำให้เสถียรภาพต่างกันออกไปด้วย ความหมายของโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังมีได้หลายความหมายด้วยกัน ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับมุมมองและจุดที่เราคิดว่าเป็นโหลดด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจจะอธิบายความหมายของโหลดได้ดังนี้ [9]

1. เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าและใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ
2. ปริมาณกำลังไฟฟ้าทั้งหมด (ทั้งกำลังจริงและกำลังเสมือน) ที่ใช้โดยอุปกรณ์ทุกตัวที่ต่ออยู่กับระบบ
3. จะเป็นส่วนหนึ่งของระบบ แต่จะไม่แยกออกอย่างเด่นชัดในแบบจำลองระบบ โดยจะเสมือนหนึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับบัสและใช้พลังงานไฟฟ้าจากบัส
4. กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโรงจักรไฟฟ้า

จากความหมายของโหลดข้างต้น เราสามารถใช้คำเฉพาะบางคำเช่น โหลดของระบบ (System Load) , บัสโหลด (Bus Load) เป็นต้น เพื่อใช้อธิบายความหมายเฉพาะอย่างเพิ่มเติมก็ได้ แต่ความหมายทั่วไปของโหลด ความหมายที่ 3 น่าจะเป็นความหมายที่อธิบายลักษณะของโหลดได้มากที่สุด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 [9]

จากรูปที่ 4.1 ถ้าให้บัส A เป็นโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากจะหมายถึงอุปกรณ์ไฟฟ้า (load devices) ต่างๆ จำนวนมากที่ต่ออยู่แล้ว ยังรวมไปถึง หม้อแปลงลงของสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation Step-Down Transformer) , สายบ่อนย่อย (Distribution Feeders) , หม้อแปลงแรงดันต่ำ (Distribution Transformers) , อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Voltage Regulators) เป็นต้นที่ต่ออยู่กับบัส A อีกด้วย ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส A จะหมายถึง ความต้องการกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ทุกตัวที่ต่ออยู่ในบัส A นั้นเอง



รูปที่ 4.1 แสดงความหมายของไหลดในระบบไฟฟ้า

4.1 วิธีการหาแบบจำลองไหลด

ในการพัฒนาแบบจำลองไหลดนั้น โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการหาแบบจำลองของไหลดอยู่ 2 วิธีใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ [9,15]

4.1.1. วิธีการวัดโดยตรง (Measurement Based Data)

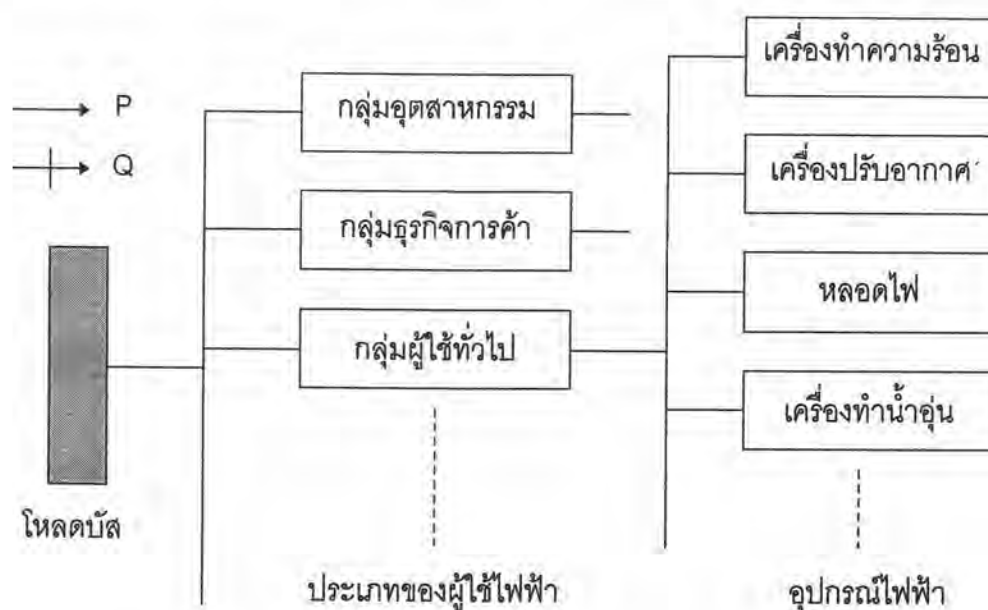
วิธีนี้จะสามารถหาคุณสมบัติของไหลดที่ต้องการได้โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ตาม สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) และ สายป้อน (Feeders) ต่างๆ ที่ต้องการ เพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของไหลด ตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ โดยการตรวจวัดจะต้องคอยตรวจวัดค่าอยู่ตลอดเวลาในแต่ละวันและจะต้องวัดความเปลี่ยนแปลงของแต่ละจุดด้วยเช่นกัน เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการแล้วก็นำมาทำการวิเคราะห์ หาค่าเฉลี่ยและพัฒนาเป็นแบบจำลองไหลดขึ้นมาสำหรับระบบนั้นๆ ต่อไป

ข้อดีของวิธีนี้คือเราจะได้แบบจำลองไหลดที่มีความถูกต้องมาก ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะสามารถหาได้อย่างละเอียด แต่ข้อเสียของวิธีนี้ก็คือสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และค่าอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นจำนวนมาก ใช้ระยะเวลานานกว่าจะได้ค่าที่สมบูรณ์และยังใช้ได้เฉพาะกับไหลดบัลและสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) เฉพาะที่ทำการตรวจวัดเท่านั้น

4.1.2. วิธีการนับประเภทอุปกรณ์ (Component Based Data)

วิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยสถาบัน Electric Power Research Institute (EPRI) ของสหรัฐอเมริกา โดยวิธีนี้จะทำการพัฒนาแบบจำลองไหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดขึ้นมาก่อน

โดยแบ่งออกเป็นประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า (Load Class) , ชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Load Components) และจัดกลุ่มชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าตามลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการแบ่งประเภทของโหลด

จากรูปจะเห็นได้ว่าประเภทของผู้ใช้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มอุตสาหกรรม (Industrial) , กลุ่มธุรกิจการค้า (Commercial) , กลุ่มที่อยู่อาศัย (Residential) การพัฒนาแบบจำลองโหลดในระบบสามารถทำได้โดย สืบหาปริมาณของอุปกรณ์ไฟฟ้าและสัดส่วนการใช้ตามประเภทของผู้ใช้ จากนั้นแทนแบบจำลองโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วตามสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้า (%) ที่สำรวจมาได้ก็จะได้แบบจำลองโหลดรวมขึ้นมา

ข้อดีของแบบจำลองโหลดแบบนี้คือไม่ต้องเสียค่าอุปกรณ์ตรวจวัด และสามารถใช้กับโหลดบัลอื่นๆ ได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ตามที่ใช้จริง ของโหลดบัลนั้นๆ แต่ข้อเสียของระบบนี้คือ เราไม่สามารถสำรวจจำนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมด ว่าจำนวนที่แท้จริงมีเท่าไร และช่วงเวลาการใช้พลังงานไฟฟ้ายังแตกต่างกันไปตามช่วงเวลาอีกด้วย แบบจำลองโหลดที่ได้จึงยังมีความถูกต้องไม่มากนัก

ในการนำแบบจำลองโหลดไปใช้ในการคำนวณเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า มักนิยมใช้แบบจำลองโหลดที่ได้จากวิธีการนับประเภทอุปกรณ์มากกว่าวิธีการวัดโดยตรง ดังข้อดีข้อเสียดัง

กล่าวข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามความถูกต้องของแบบจำลองโหลดที่ได้จากทั้งสองวิธีก็ยังไม่ถูกต้องที่สุด เนื่องจากความถูกต้องของแบบจำลองโหลดยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น

1. มีจำนวนโหลดจำนวนมากที่มีลักษณะแตกต่างกัน
2. ตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะการติดตั้งของโหลด
3. การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลดไปตาม อุณหภูมิ และสภาพอากาศ
4. จำนวนโหลดที่ใช้งานในขณะเวลานั้นๆ
5. ความไม่แน่นอนของตัวโหลดที่เปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้าและความถี่

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองโหลดโดยวิธีการนับประเภทอุปกรณ์ ในการศึกษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า โดยแบบจำลองโหลดที่ใช้จะมีสมมติฐานดังนี้

1. โหลด (Load Components) ทุกตัวในระบบต่อขนานโดยตรงกับบัส
2. โหลดแบบ 1 เฟสจะปรับเป็นโหลดสมดุลแบบ 3 เฟส
3. โหลดที่ต่ออยู่กับระบบ จะต่อกับระบบตลอดช่วงเวลาของการศึกษา

การแบ่งประเภทของแบบจำลองโหลด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบจำลองโหลดในสภาวะอยู่ตัว และแบบจำลองโหลดในสภาวะพลวัต สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2 แบบจำลองโหลดในสภาวะอยู่ตัว (Static Load Models)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายคุณสมบัติของโหลดในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง โดยอธิบายอยู่ในรูปของฟังก์ชันพีชคณิต และแยกคิดสมการของกำลังจริงและกำลังเสมือนออกจากกัน ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) และสมการโพลีโนเมียล (Polynomial) ที่กำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า หรือความถี่ได้ดังนี้

1. สมการเอ็กโปเนนเชียล

สามารถเขียนกำลังไฟฟ้าในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียล เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าตอนเริ่มต้น (Initial Condition) ได้ดังนี้

$$P = P_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{P_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{P_f} \quad (4.1)$$

$$Q = Q_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{Q_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{Q_f} \quad (4.2)$$

โดย P, Q เป็นกำลังไฟฟ้า ณ แรงดันและความถี่นั้นๆ

V, f เป็นแรงดันไฟฟ้า และความถี่

P_0, Q_0 เป็นกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น ณ แรงดันและความถี่เริ่มต้น

V_0, f_0 เป็นแรงดันไฟฟ้า และความถี่เริ่มต้น

P_v, P_f, Q_v, Q_f เป็นพารามิเตอร์ของโหลดแต่ละชนิด

2. สมการโพลีโนเมียล

เป็นสมการที่รวมผลของแบบจำลองโหลดทั้งสามแบบด้วยกันคือ แบบ "ZIP" Models (แบบอิมพีแดนซ์คงที่ (Z) , กระแสคงที่ (I) , กำลังคงที่ (P)) ตามอัตราส่วนของโหลดแต่ละชนิด โดยเขียนสมการในรูปของโพลีโนเมียลได้ดังนี้

$$P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right] \quad (4.3)$$

$$Q = Q_0 \left[a_4 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_5 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_6 \right] \quad (4.4)$$

โดย P, Q เป็นกำลังไฟฟ้า ณ แรงดันไฟฟ้านั้นๆ

V เป็นแรงดันไฟฟ้า

P_0, Q_0 เป็นกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น ณ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น

V_0 เป็นแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น

a_1, a_4 เป็นสัดส่วนของโหลดแบบ Constant Impedance

a_2, a_5 เป็นสัดส่วนของโหลดแบบ Constant Current

a_3, a_6 เป็นสัดส่วนของโหลดแบบ Constant Power

ถ้าแบบจำลองโหลดนี้ กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนเปลี่ยนแปลงตามความถี่ด้วย เราก็สามารถเพิ่มพจน์การเปลี่ยนแปลงความถี่นี้เข้าไปได้ โดยนำพจน์นี้ไปคูณกับสมการของโพลีโนเมียล ก็จะได้แบบจำลองโหลดที่ขึ้นอยู่กับแรงดันและความถี่ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\left[1 + a_f (f - f_0) \right] \quad (4.5)$$

โดย a_f เป็นพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงตามความถี่
 f, f_0 เป็นความถี่ และความถี่เริ่มต้น ตามลำดับ

แบบจำลองโหลดที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า จะมีอยู่สามแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียลที่มีพารามิเตอร์ต่างๆ กันได้ดังนี้

4.2.1 แบบกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power)

เป็นแบบจำลองโหลดที่ถือว่าโหลดมีความต้องการกำลังไฟฟ้าคงที่ตลอดช่วงของแรงดันไฟฟ้า สามารถแทนได้ด้วยสมการเอ็กโปเนนเชียลที่ (4.1) และ (4.2) โดยมีค่าของ $P_v = P_r = 0$ และ $Q_v = Q_r = 0$ โหลดที่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น มอเตอร์ และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น แต่ถ้าค่าแรงดันตกลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ (ประมาณ 80 - 90 %) โหลดอาจจะเปลี่ยนไปเป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่หรือถูกตัดออกไปเนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันทำงานก็ได้ ตามลักษณะของโหลดนั้นๆ

4.2.2 แบบกระแสคงที่ (Constant Current)

เป็นแบบจำลองโหลดที่ถือว่าโหลดมีความต้องการกระแสไฟฟ้าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าและความถี่ จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะแทนได้โดยให้ค่า $P_v = 1, P_r = 0$ และ $Q_v = 1, Q_r = 0$

4.2.3 แบบอิมพีแดนซ์คงที่ (Constant Impedance)

เป็นแบบจำลองโหลดที่กำลังไฟฟ้าของโหลด จะแปรผันไปตามกำลังสองของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็คือ ค่า $P_v = 2, P_r = 0$ และ $Q_v = 2, Q_r = 0$ นั่นเอง ในบางครั้งเราอาจจะเรียกโหลดประเภทนี้ว่า เป็นแบบแอดมิตแตนซ์คงที่ (Constant Admittance Load Model) ก็ได้

4.2.4 แบบโหลดผสม (Composite Load)

เป็นแบบจำลองโหลดเฉพาะของอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด ซึ่งได้มีการพัฒนาเป็นแบบจำลองโหลดขึ้นมาเพื่อศึกษาถึงลักษณะของโหลดแต่ละชนิด สามารถแสดงพารามิเตอร์ของโหลดแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้ [1]

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของโหลดแต่ละชนิด

อุปกรณ์ไฟฟ้า	Power Factor	P_v	P_f	Q_v	Q_f
1. เครื่องทำน้ำอุ่น	1.00	2.0	0.0	0.0	0.0
2. เครื่องล้างจาน	0.99	1.8	0.0	3.5	-1.4
3. เครื่องซักผ้า	0.65	0.08	2.9	1.6	1.8
4. หลอดไฟแบบไส้	1.00	1.54	0.0	0.0	0.0
5. หลอดฟลูออเรสเซนต์	0.90	1.0	1.0	3.0	-2.8
6. ตู้เย็น	0.84	0.8	0.5	2.5	-1.4
7. มอเตอร์ขนาดเล็ก	0.83	0.1	2.9	0.6	-1.8
8. มอเตอร์ขนาดใหญ่	0.89	0.05	1.9	0.5	1.2
9. เครื่องปรับอากาศแบบรวม	0.81	0.2	0.9	2.2	-2.7
10. เครื่องปรับอากาศ	0.75	0.5	0.6	2.5	-2.8
11. เต้าหอลอม	0.72	2.3	-1.0	1.61	-1.0
12. บั้มการเกษตร	0.85	1.4	5.6	1.4	4.2
13. เครื่องทำความร้อน	1.00	2.0	0.0	0.0	0.0
14. บั้มเครื่องทำความร้อน	0.84	0.2	0.9	2.5	-1.3
15. เครื่องอบผ้า	0.99	2.0	0.0	3.3	-2.6
16. โทรทัศน์สี	0.77	2.0	0.0	5.2	-4.6
17. พัดลมของเต้าหอลอม	0.73	0.08	2.9	1.6	1.8
18. บั้มเครื่องทำความร้อน อุตสาหกรรม	0.84	0.1	1.0	2.5	-1.3
19. แอร์อุตสาหกรรมแบบรวม	0.75	0.1	1.0	2.5	-1.3
20. แอร์คอนดิชันอุตสาหกรรม	0.75	0.5	0.6	2.5	-2.8

นอกจากนี้ถ้าแบบจำลองโหลดที่ใช้ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายๆ ชนิดรวมกันในสัดส่วนต่างๆ ต่อรวมอยู่ภายในโหลดบัสเดียวกัน การที่จะแยกคิดกำลังไฟฟ้าตามพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันจะยุ่งยากและเสียเวลา เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์รวมสำหรับโหลดบัสนั้นๆ ได้โดยอาศัยสมการดังนี้ [12] ถ้าให้โหลดบัสนั้นมีอุปกรณ์ต่ออยู่ k ตัว จะสามารถหาพารามิเตอร์รวมของโหลดบัสได้ดังนี้

$$P_v = \sum_{i=1}^k \frac{P_{vi} * P_i}{P_0} \quad (4.6)$$

$$P_f = \sum_{i=1}^k \frac{P_{fi} * P_i}{P_0} \quad (4.7)$$

$$Q_v = \sum_{i=1}^k \frac{Q_{vi} * Q_i}{Q_0} \quad (4.8)$$

$$Q_f = \sum_{i=1}^k \frac{Q_{fi} * Q_i}{Q_0} \quad (4.9)$$

$$P_0 = \sum_{i=1}^k P_i \quad (4.10)$$

$$Q_0 = \sum_{i=1}^k Q_i \quad (4.11)$$

ตัวอย่างที่ 4.1 ถ้าโหลดบัสมีอุปกรณ์ไฟฟ้างดตารางที่ 4.2 จะสามารถหาค่า P_v , P_f , Q_v และ Q_f ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Load Components	P	Q	P_v	P_f	Q_v	Q_f
1. เครื่องทำน้ำอุ่น	0.20	0.18	2.0	0.0	0.0	0.0
2. เครื่องซักผ้า	0.15	0.20	0.08	2.9	1.6	1.8
3. หลอดฟลูออเรสเซนต์	0.35	0.24	1.0	1.0	3.0	-2.8
4. เครื่องปรับอากาศแบบรวม	0.55	0.40	0.2	0.9	2.2	-2.7
5. เต้าหอลอม	0.47	0.35	2.3	-1.0	1.61	-1.0

จะสามารถหากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้จาก (4.10) และ (4.11)

$$P_0 = 0.2 + 0.15 + 0.35 + 0.55 + 0.47$$

$$= 1.72$$

$$Q_0 = 0.18 + 0.20 + 0.24 + 0.40 + 0.35$$

$$= 1.37$$

พารามิเตอร์อื่นหาได้จากสมการ (4.6) ถึงสมการที่ (4.9) ดังนี้

$$P_v = \frac{\left[(0.2 \cdot 2) + (0.15 \cdot 0.08) + (0.35 \cdot 1) \right] + (0.55 \cdot 0.2) + (0.47 \cdot 2.3)}{1.72}$$

$$= 1.1354$$

$$P_f = 0.4709$$

$$Q_v = 1.8127$$

$$Q_f = -1.2715$$

ตัวอย่างที่ 4.2 ถ้าโหลดบัสประกอบด้วยแบบจำลองโหลดประเภทต่างๆ ดังตารางที่ 4.3 จะสามารถหาค่า P_v , P_f , Q_v และ Q_f ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองโหลด

Load Components	P	Q	P_v	P_f	Q_v	Q_f
1. แบบอิมพีแดนซ์คงที่	0.72	0.35	2.0	0.0	2.0	0.0
2. แบบกระแสคงที่	0.40	0.25	1.0	0.0	1.0	0.0
3. แบบกำลังไฟฟ้าคงที่	0.15	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0

จะสามารถหากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้จาก (4.10) และ (4.11)

$$P_0 = 0.72 + 0.40 + 0.15$$

$$= 1.27$$

$$Q_0 = 0.35 + 0.25 + 0.10$$

$$= 0.7$$

พารามิเตอร์อื่นหาได้จากสมการ (4.6) ถึงสมการที่ (4.9) ดังนี้

$$P_v = [(0.72 * 2) + (0.40 * 1) + (0.15 * 0)] / 1.27$$

$$= 1.4488$$

$$P_f = 0$$

$$Q_v = 1.3571$$

$$Q_f = 0$$

4.3 แบบจำลองโหลดในสภาวะพลวัต (Dynamic Load Models)

ในบางครั้งการตอบสนองของโหลดผสม (Composite Load) ประเภทต่างๆ ต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่จะรวดเร็วมากและจะกลับสู่สภาวะอยู่ตัวภายในเวลาอันสั้น โหลดประเภทนี้โดยส่วนใหญ่มักจะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำอยู่ด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า ถ้าต้องการคำนวณค่าที่ละเอียดถูกต้องมากขึ้น จะต้องคำนึงถึงสภาวะทางพลวัตของโหลดประเภทนี้ด้วยเช่นกัน เนื่องจากการใช้พลังงาน 60-70% ของพลังงานทั้งหมดจะเป็น มอเตอร์เหนี่ยวนำ นั่นเอง สมการของแบบจำลองโหลดแบบนี้มักจะเป็นสมการแบบดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับช่วงเวลา เพื่อแทนสภาวะของโหลดในแต่ละช่วงเวลา โหลดที่มีลักษณะเป็นแบบพลวัต (Dynamic) ในกรณีที่สำคัญต่อการศึกษาระบบเสถียรภาพ สามารถแสดงได้ดังนี้

4.3.1 โหลดที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Thermostatically Controlled Loads)

โหลดประเภทนี้มักจะเป็นอุปกรณ์จำพวก เครื่องทำความร้อน (Space Heaters), เครื่องทำน้ำอุ่น และตู้เย็น (Refrigerators) เป็นต้น โหลดประเภทนี้มักจะถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิ (Thermostats) ดังนั้นโหลดประเภทนี้จึงเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power) โหลดจะมีช่วงเวลาการทำงาน โดยจะเปิดและปิดตามค่าที่ตั้งไว้กับตัวควบคุมอุณหภูมิ แต่เมื่อใดที่แรงดันไฟฟ้าตกลง ตัวควบคุมอุณหภูมิจะทำให้โหลดนี้ทำงานนานขึ้นเพื่อให้ได้ค่าที่ตั้งไว้ซึ่งจะเป็นแบบกำลังคงที่ ส่วนแบบจำลองโหลดของโหลดชนิดนี้จะเป็นแบบสมการดิฟเฟอเรนเชียลดังนี้

$$K \frac{d\tau_H}{dt} = P_H - P_L \quad (4.12)$$

โดย P_H กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำความร้อน (Heater) ; $P_H = K_H G V^2$

P_L กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (Heat Loss) ; $P_L = K_A (\tau_H - \tau_A)$

τ_H เป็นอุณหภูมิของบริเวณที่ทำความร้อน (Heated Area)

τ_A เป็นอุณหภูมิห้อง (Ambient Temperature)

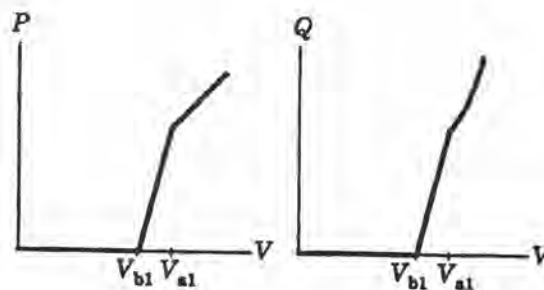
G ค่าคอนดักแตนซ์ของโหลด (Load Conductance)

V แรงดันไฟฟ้า

K, K_H, K_A ค่าคงที่

4.3.2 โหลดไฟประเภทดิสชาร์จ (Discharge Lighting Loads)

เป็นโหลดแสงสว่างจำพวกหลอด HID โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลอดฟลูออเรสเซนต์ , หลอดโซเดียม (Sodium Vapor) และ หลอดไอปรอท (Mercury Vapor) เป็นต้น โหลดประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับแรงดันเป็นอย่างมาก ดังนั้นเมื่อแรงดันตกลงถึงค่าๆ หนึ่ง กำลังไฟฟ้าที่โหลดประเภทนี้ใช้จะลดลงเรื่อยๆ และเมื่อแรงดันตกลงไปถึงค่าประมาณ 0.65 - 0.7 ค่ากำลังไฟฟ้าจะตกลงเป็นศูนย์ทันที หลอดประเภทนี้จะให้แสงสว่างได้ก็ต่อเมื่อ แรงดันสูงกว่าแรงดันขั้นต่ำสุดเท่านั้น และหลอดประเภทนี้จะเริ่มให้แสงสว่างอีกครั้งได้ก็ต้องมีช่วงระยะเวลาหน่วงเวลาค่าหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดด้วยเช่นกัน ส่วนค่ากำลังเสมือนของโหลดประเภทนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกำลังจริง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 [11]



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของหลอดดิสชาร์จ

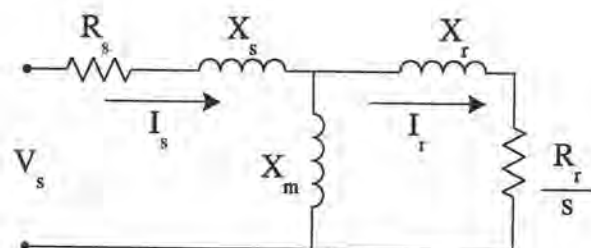
4.3.3 หม้อแปลงที่เปลี่ยนแทปภายใต้โหลดได้

(Under Load Tap Changing Transformer (ULTC))

ในการศึกษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้านั้น แบบจำลองโหลดของหม้อแปลงที่เปลี่ยนแทปภายใต้โหลดได้มักจะมีผลไม่มากนัก ดังนั้นจะรวมให้กลายเป็นส่วนหนึ่งของโหลดได้โดยปกติแล้วหลังจากเกิดการรบกวนเกิดขึ้น ULTC จะเริ่มทำงานหลังจากการหน่วงเวลาประมาณ 30-120 วินาที เพื่อรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามเดิมแต่ในบางครั้งที่บัสที่เป็นบัสที่อยู่ในสภาวะไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Weakest) มากๆ การปล่อยให้ ULTC ทำงานต่อไปก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบตกลง จนไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้จึงต้องตัดการทำงานของ ULTC ออกไป

4.3.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

เป็นโหลดที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 50 - 60% ของปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในการศึกษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะพลวัต จึงจำเป็นต้องคำนึงผลของถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้เป็นอย่างมาก โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถเขียนวงจรมุมลในสภาวะอยู่ตัวได้ดังรูปที่ 4.4



- โดย V_s แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลของสเตเตอร์
 I_s, I_r กระแสของสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
 R_s, R_r ความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
 X_s, X_r ค่ารีแอกแตนซ์ที่รั่วไหลของสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
 X_m ค่ารีแอกแตนซ์กระตุ้นของมอเตอร์ (Magnetizing Reactance)
 s ค่าสลลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.4 วงจรมุมลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการแทนแบบจำลองโพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องตัดผลของสเตเตอร์ทรานเซียนส์ออกไป เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนที่เป็นกระแสตรง (DC Component) ของกระแสทรานเซียนส์ในสเตเตอร์ (Transient Stator Current) โดยสมการแรงดันไฟฟ้าของทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถเขียนได้ดังนี้

สมการแรงดันไฟฟ้าของสเตเตอร์

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + v'_d \quad (4.13)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - X'_s i_{ds} + v'_q \quad (4.14)$$

โดย v_{ds}, v_{qs} แรงดันไฟฟ้าของสเตเตอร์ในแนวแกน d - q axis ตามลำดับ

i_{ds}, i_{qs} กระแสของสเตเตอร์ในแนวแกน d - q axis ตามลำดับ

R_s ความต้านทานของสเตเตอร์

X'_s ค่าทรานเซียนส์รีแอคแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$v'_d = -\frac{\omega_s L_m}{L_\pi} \psi_{qr}$$

$$v'_q = \frac{\omega_s L_m}{L_\pi} \psi_{dr}$$

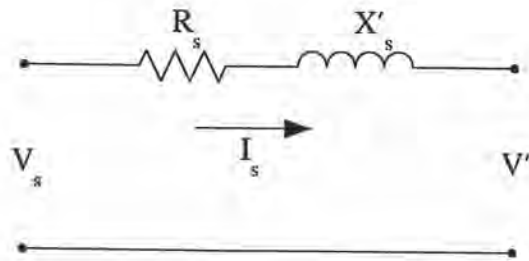
ψ_{dr}, ψ_{qr} เป็นฟลักซ์เกี่ยวค้ำของโรเตอร์ในแนวแกน d-q axis ตามลำดับ

สมการแรงดันไฟฟ้าของสเตเตอร์สามารถเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$(v_{ds} + jv_{qs}) = (R_s + jX'_s)(i_{ds} + ji_{qs}) + (v'_d + jv'_q) \quad (4.15)$$

$$\tilde{V}_s = (R_s + jX'_s)\tilde{I}_s + V' \quad (4.16)$$

จากสมการ (4.16) สามารถแทนมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นวงจรสมมูลในสภาวะทรานเซียนส์ (Transient Equivalent Circuit) ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าหลังค่าความต้านทานและทรานเซียนส์รีแอคแตนซ์ ได้ดังรูปที่ 4.5



โดย V_s แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลของสเตเตอร์ (Stator Terminal Voltage)

V' แรงดันไฟฟ้าหลังทรานเซียนส์รีแอคแตนซ์

R_s ความต้านทานของสเตเตอร์

X'_s ค่าทรานเซียนส์รีแอคแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะทรานเซียนส์

ส่วนสมการของโรเตอร์สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของ v'_d และ v'_q ได้ดังสมการที่ (4.17) และ (4.18)

$$p(v'_d) = -\frac{1}{T'_0} \left[v'_d + (X_s - X'_s) i_{qs} \right] + p\theta_r v'_q \quad (4.17)$$

$$p(v'_q) = -\frac{1}{T'_0} \left[v'_q - (X_s - X'_s) i_{ds} \right] + p\theta_r v'_d \quad (4.18)$$

$$p\theta_r = s\omega_s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (4.19)$$

โดย $p(\) = \frac{d}{dt}$

T'_0 ค่าคงที่ทางเวลา (Transient Open Circuit Time Constant)

X_s ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ (Stator Leakage Reactance)

X'_s ค่าทรานเซียนส์รีแอคแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$p\theta_r$ ความเร็วเชิงมุมของสลลิป (Slip Angular Velocity)

ส่วนสมการความเร่ง (Acceleration Equation) จะหาได้จาก

$$p(\bar{\omega}_r) = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (4.20)$$

$$T_e = v'_d i_{ds} + v'_{qs} i_{qs} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} T_m &= T_0 (\bar{\omega}_r)^n \\ &= T_0 [A \bar{\omega}_r^2 + B \bar{\omega}_r + C] \end{aligned} \quad (4.22)$$

โดย $\bar{\omega}_r$ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (Rotor Angular Velocity)

H ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant)

T_e แรงบิดทางไฟฟ้า (Electromagnetic Torque)

T_m แรงบิดของโหลด (Load Torque)

T_0 ค่าคงที่ของแรงบิดของโหลด (Load Torque)

n, A, B, C ค่าคงที่

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพบางครั้งเราอาจใช้เพียงแบบจำลองโหลดแบบง่าย ๆ เช่น แบบจำลองในสภาวะอยู่ตัวก็เพียงพอ แต่ถ้าในมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่แบบจำลองโหลดก็จะมี ความซับซ้อนมากขึ้นด้วยจึงต้องคำนึงถึงผลของความเฉื่อย (Inertia Effect) และผลของฟลักซ์ในโร เตอร์ (Rotor Flux Transient) ด้วย แต่การใช้แบบจำลองโหลดแบบใดก็ขึ้นอยู่กับความละเอียดใน การวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน

พารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะแตกต่างกันไปตามขนาดของมอเตอร์ และผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกัน ตารางที่ 4.4 จะแสดงค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้ [12]

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาด
กำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 0.25 - 400 kW

kW	R_s	X_s	R_r	X_r	X_m	H
0.25	0.2512	0.1341	0.0443	0.1341	0.8338	0.0221
0.37	0.2048	0.1150	0.0658	0.1150	1.2480	0.0212
0.75	0.2004	0.1039	0.0424	0.1039	1.2640	0.0403
1.1	0.1865	0.1015	0.0457	0.1015	1.4174	0.0529
1.5	0.1785	0.0909	0.0401	0.0909	1.5686	0.0734
2.2	0.1498	0.0925	0.0410	0.0925	1.5799	0.0373
3.0	0.1432	0.0914	0.0473	0.0914	1.6270	0.0680
4.0	0.1087	0.0792	0.0449	0.0792	1.8496	0.0541
5.5	0.0971	0.0815	0.0351	0.0815	1.8671	0.1241
7.5	0.0895	0.0762	0.0369	0.0762	1.8321	0.0723
11.0	0.0905	0.0806	0.0334	0.0806	1.7705	0.1199
15.0	0.0803	0.0757	0.0319	0.0757	1.9066	0.0933
18.5	0.0725	0.0756	0.0259	0.0756	1.9825	0.1099
22.0	0.0727	0.0768	0.0219	0.0768	1.9351	0.1411
30.0	0.0706	0.0721	0.0172	0.0721	2.1211	0.1734
37.0	0.0609	0.0767	0.0206	0.0767	1.9988	0.1537
45.0	0.0613	0.0793	0.0221	0.0793	2.0032	0.1362
55.0	0.0531	0.0744	0.0205	0.0744	2.0013	0.2735
75.0	0.0511	0.0726	0.0169	0.0726	2.0709	0.3638
90.0	0.0505	0.0701	0.0160	0.0701	2.1968	0.3614
110.0	0.0507	0.0807	0.0164	0.0807	2.1394	0.5057
132.0	0.0468	0.0740	0.0155	0.0740	2.1577	0.4978
160.0	0.0440	0.0737	0.0130	0.0737	2.1837	0.4683
200.0	0.0421	0.0791	0.0126	0.0791	2.2672	0.5116
250.0	0.0425	0.0783	0.0141	0.0783	2.1797	0.4382
280.0	0.0376	0.0729	0.0124	0.0729	2.4205	0.5240
315.0	0.0343	0.0739	0.0118	0.0739	2.2506	0.3915
355.0	0.0330	0.0729	0.0104	0.0729	2.2189	0.5196
400.0	0.0344	0.0764	0.0115	0.0764	2.1806	0.4286