บทที่ 4

การเลือกตำแหน่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในระบบหนึ่งๆที่เราสนใจนั้น มีรูปแบบการเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดเป็นจำนวนมากและในการเลือกชุดตำแหน่งที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้ชุดคำตอบของค่าของตัวแปรสถานะ ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งหมายความว่าในการประมาณค่าแต่ละครั้ง หากเราเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมก็ย่อมทำให้ได้ค่าของตัวแปรสถานะที่เราทำการประมาณมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงด้วย และในทางกลับกันหากเราทำการเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดที่ไม่เหมาะสมก็ย่อมทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณมีความคลาดเคลื่อนเช่นกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอกฎเกณฑ์บางประการเพื่อที่จะลดจำนวนรูปแบบของการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ไม่มีประสิทธิภาพออกไปจากการพิจารณา และเพื่อให้เราทราบถึงตำแหน่งที่มีความสำคัญต่อการประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อให้ได้การประมาณค่าที่แม่นยำอีกด้วย โดยรายละเอียดของกฎเกณฑ์ดังกล่าวมีดังนี้

4.1 กฎเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัด

4.1.1 จำนวนเครื่องวัดอย่างน้อยที่ต้องมีในระบบ

หลักการพื้นฐานอย่างหนึ่งในกระบวนการแก้สมการเพื่อหาคำตอบหนึ่งเดียว (Unique solution) ของระบบสมการ ก็คือ จะต้องมีสมการที่เป็นอิสระต่อกันเท่ากับจำนวนตัวแปรที่เราไม่ทราบค่า และด้วยหลักการนี้เองทำให้เราสามารถสร้างกฎพื้นฐานข้อหนึ่งในการกำหนดจำนวนเครื่องมือวัดเพื่อใช้ในการประมาณค่าสถานะของระบบได้ดังนี้

$$N_{mea} \geq \frac{n - N_{config}}{N_{func}} \tag{4.1}$$

โดยที่ N_{mea} คือ จำนวนเครื่องมือวัดที่จำเป็นในการติดตั้ง

n คือ จำนวนตัวแปรสถานะที่เราจะทำการประมาณค่า

N_{config} คือ จำนวนสมการที่เราได้จากข้อมูลโครงสร้างของระบบ

N_{func} คือ จำนวนข้อมูลสูงสุดที่เราสามารถได้จากเครื่องมือวัด 1 เครื่อง

เราสามารถอธิบายความหมายทางกายภาพของตัวแปรต่างๆใน (4.1) ได้ดังนี้

N_{config} คือ จำนวนข้อมูลที่เราสามารถทราบได้จากโครงสร้างของระบบ เช่น บัสที่เป็นบัสเชื่อมต่อ (Connector bus) ในระบบเราก็จะทราบได้ทันทีว่าตำแหน่งนั้นมีค่าโหลดกำลังจริง และ โหลดรีแอคทีฟเป็นศูนย์ หรือในบัสที่มีเพียงแค่อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟ (Var Compensator device) นั้นก็แปลว่าที่บัสนั้นๆ มีค่าโหลดกำลังจริงเป็นศูนย์ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ก็สามารถนำมาสร้างสมการสำหรับการประมาณค่าได้โดยไม่ต้องทำการติดตั้งเครื่องมือวัด

n คือ จำนวนตัวแปรสถานะที่เราไม่ทราบค่า โดยปรกติแล้วจะเป็นจำนวนของขนาดของแรงดันของโหลดบัส เพราะเป็นส่วนที่เราไม่ทราบค่า กับจำนวนของมุมของแรงดันของทุกๆบัสในระบบยกเว้นบัสอ้างอิง เนื่องจากเรากำหนดมุมของบัสอ้างอิงให้เป็นศูนย์เสมอ

N_{func} คือ เป็นจำนวนของข้อมูลที่เราได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัด 1 เครื่อง โดย ในงานวิจัยนี้เรากำหนดให้การติดตั้งเครื่องมือวัด 1 ตำแหน่งทำให้เราทราบข้อมูล 3 ค่าดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2

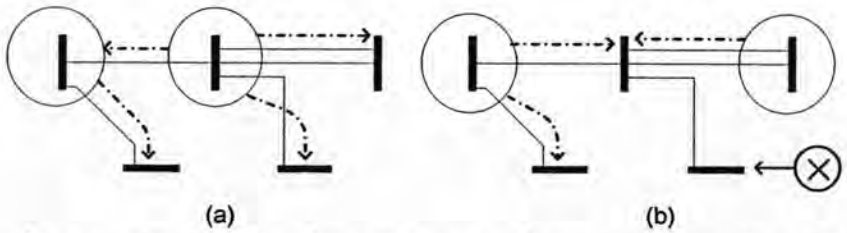
N_{mea} คือ เป็นจำนวนของเครื่องมือวัดที่จำเป็นในการติดตั้งในระบบ โดยจะต้องเป็นไปตาม (4.1) เพื่อให้เรามีข้อมูลเพียงพอที่จะทำการคำนวณ

อย่างไรก็ดีในการคำนวณตาม (4.1) นั้นเป็นเพียงจำนวนการติดตั้งเครื่องมือวัดที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้เท่านั้น เนื่องจากในการคำนวณดังกล่าวนั้นเราพิจารณาเสมือนว่าแต่ละจุดที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดเราจะได้รับข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าได้เท่ากับ N_{func} แต่ในความเป็นจริงแล้วเราจะได้จำนวนข้อมูลเท่ากับ N_{func} เฉพาะในกรณีที่จุดที่ทำการติดตั้งนั้นเป็นโหลดบัสเท่านั้น ส่วนในกรณีที่เราทำการติดตั้งเครื่องมือวัด ณ ตำแหน่งที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ด้วยนั้น เราจะไม่สามารถนำข้อมูลส่วนของกำลังรีแอคทีฟมาใช้ได้เนื่องจากเราไม่ได้ทำการวัดค่ากำลังรีแอคทีฟที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ

4.1.2 ความครอบคลุมของข้อมูล

นอกจากการคำนึงถึงเรื่องจำนวนของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อทำการประมาณค่าแล้ว สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการประมาณค่าตัวแปรสถานะนั่นก็คือ ความ

ครอบคลุมของตัวแปรสถานะของระบบจากชุดของตำแหน่งเครื่องมือวัดที่เราเลือกติดตั้ง โดยชุดตำแหน่งที่เราเลือกที่จะติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องครอบคลุมข้อมูลได้ครบทุกจุด (Observable) [5],[8],[14] หรือในอีกนัยหนึ่งคือ ครบทุกๆบัสในระบบที่เรากำลังพิจารณา ซึ่งสามารถอธิบายให้ชัดเจนขึ้นโดยอาศัยรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัด (a) แบบที่สามารถครอบคลุมข้อมูลได้ทุกจุด (b) แบบที่ไม่สามารถครอบคลุมข้อมูลได้ทุกจุดในระบบ

รูปที่ 4.1 นั้นเป็นระบบตัวอย่างประกอบไปด้วย 5 บัสในระบบ โดยเครื่องหมาย ○ นั้นหมายถึงตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด ในรูปที่ 4.1 (a) นั้นจะเห็นได้ว่าเราติดตั้งเครื่องมือวัดเพียง 2 ตำแหน่งก็สามารถครอบคลุมข้อมูลได้ครบทุกตำแหน่งในระบบ (เครื่องหมาย ----▶ แสดงถึงการเชื่อมโยงข้อมูลในระบบ) ส่วนในรูปที่ 4.1 (b) นั้นจะเห็นได้ว่ามีการติดตั้งเครื่องมือวัด 2 ตำแหน่งเท่ากับรูปที่ 4.1 (a) แต่ไม่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลไปถึง บัส ⊗ ได้

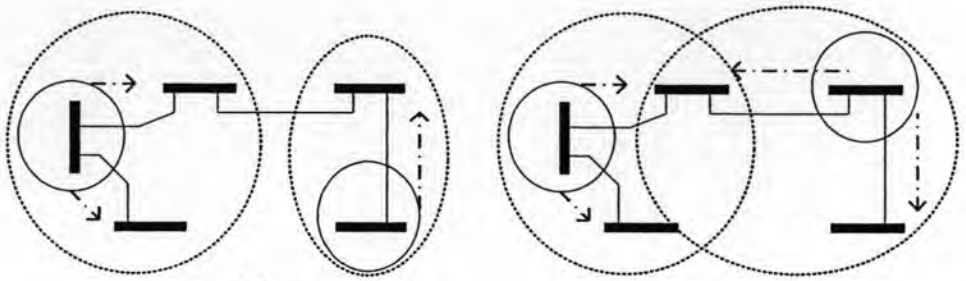
ความสำคัญสำหรับความครอบคลุมของข้อมูลนั้นสามารถอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ได้ เนื่องจากการคำนวณหาค่า $\nabla^2 J(\mathbf{x})$ นั้นเป็นการหาค่าอนุพันธ์ย่อยเมื่อเทียบกับตัวแปรที่เราสนใจ แต่หากตัวแปรที่เราสนใจนั้นไม่ได้มีการเชื่อมโยงกับชุดข้อมูลที่เราวัดมาจะทำให้บางคอลัมน์ในเมตริกซ์ $\nabla^2 J(\mathbf{x})$ มีค่าเท่ากับศูนย์ทุกๆตำแหน่ง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการหาอินเวอร์สเพื่อทำการหาเวคเตอร์ทิศทาง ($\mathbf{p}_k$) นั่นเอง

4.1.3 การเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล

ในการเลือกตำแหน่งของเครื่องมือวัดนั้นนอกจากเราจะต้องคำนึงถึงเรื่องความครอบคลุมของข้อมูลแล้ว อีกสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อการประมาณค่าตัวแปรสถานะนั่นคือ การเชื่อมโยงของข้อมูล โดยที่เราจะเรียกว่าระบบของเรามีการเชื่อมโยงของข้อมูลได้ก็ต่อเมื่อการวางตำแหน่งของเครื่องมือวัดของเราไม่ทำให้เกิดการแยกส่วนของข้อมูล (Isolation) โดยแสดงได้ดัง รูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 นั้นเป็นระบบตัวอย่าง 5 บัส และได้ทำการเลือกตำแหน่งในการติดตั้ง 2 ตำแหน่งในรูปที่ 4.2 (a) นั้นเราจะเห็นได้ว่าการเลือกตำแหน่งของเครื่องมือวัดแบบนี้แม้ว่าจะครอบคลุมข้อมูลไปทุกจุดในระบบได้แล้วแต่เราจะพบว่าการครอบคลุมข้อมูลของเครื่องมือวัดทั้ง

สองตำแหน่งนั้นไม่ได้มีจุดร่วมกันนั่นคือเราจะเรียกว่าการวางตำแหน่งเครื่องมือวัดแบบนี้ไม่มีการเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล ส่วนในรูปที่ 4.2 (b) จะเห็นได้ว่าแม้ว่าเราเลือกเพียง 2 ตำแหน่งเช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 (a) แต่มีจุดต่อร่วมของการเชื่อมโยงข้อมูล นั่นคือการวางตำแหน่งเครื่องมือวัดแบบนี้มีการเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล



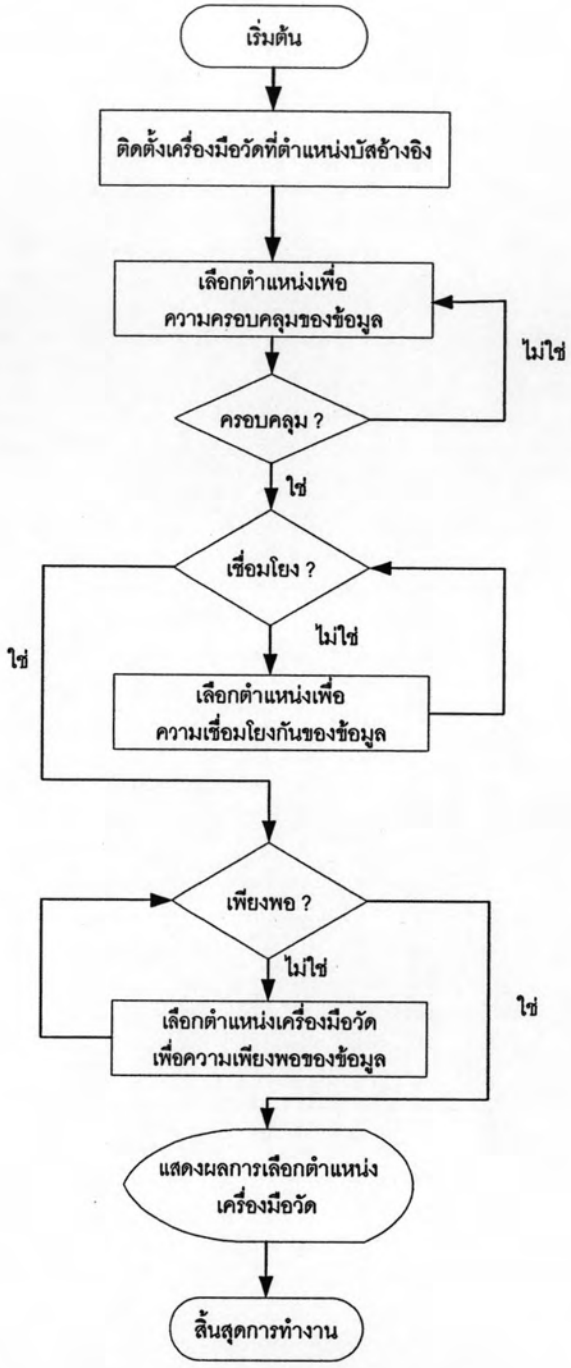
รูปที่ 4.2 การเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล (a) การเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดที่ไม่มีการเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล (b) ระบบที่มีการเชื่อมถึงกันของข้อมูลจากเครื่องมือวัด

4.2 วิธีการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดที่นำเสนอ

จากกฎเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกการวางตำแหน่งเครื่องมือวัดที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมาในการพิจารณาระบบหนึ่งๆนั้นแม้ว่าจะทำให้สามารถลดรูปแบบของการวัดที่ไม่มีประสิทธิภาพออกไปได้ แต่อย่างไรก็ดีจากกฎเกณฑ์เบื้องต้นย่อมมีรูปแบบการวางตำแหน่งอีกเป็นจำนวนมากที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดรูปแบบหนึ่ง โดยรูปแบบดังกล่าวได้พัฒนาการเลือกตำแหน่งในการวัดมาจากกฎเกณฑ์พื้นฐานกับความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนของคำตอบจากการประมาณค่าตัวแปรสถานะ โดยในหัวข้อนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงดัชนีต่างๆที่เราใช้ในการเลือกตำแหน่งของเครื่องมือวัด ส่วนในส่วนถัดมาจะเป็นลำดับวิธีการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดที่นำเสนอ

4.2.1 ขั้นตอนการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดโดยอาศัยดัชนีในการพิจารณาการเลือกตำแหน่งในการติดตั้งบัสจากหัวข้อ 4.1 โดยมีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลำดับขั้นตอนการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึง 4 ขั้นตอนหลักในการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดที่นำเสนอ โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

4.2.1.1 การเลือกตำแหน่งบัสอ้างอิง

เนื่องจากในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเราจะทำการกำหนดบัสอ้างอิงจุดหนึ่งในระบบที่เราพิจารณา และกำหนดให้มุมของแรงดันที่บัสนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อเป็นค่าอ้างอิงให้กับมุมของแรงดันที่บัสอื่นๆ ดังนั้นในการคำนวณหารูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่นำเสนอนั้นเราจะทำการเลือกตำแหน่งแรกในการติดตั้งเครื่องมือวัดเป็นตำแหน่งของบัสอ้างอิง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากที่สุดของบัสอ้างอิงเพื่อใช้ในการอ้างอิงข้อมูลกับบัสอื่นๆในระบบต่อไป

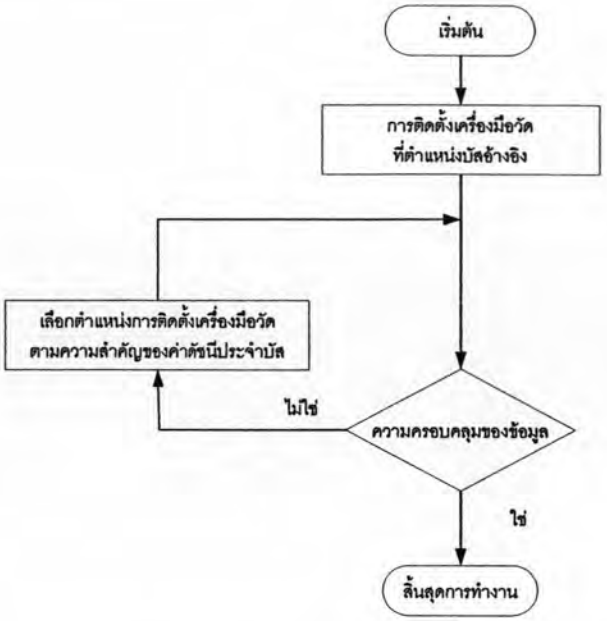
4.2.1.2 การเลือกตำแหน่งเพื่อความครอบคลุมของข้อมูล

ในขั้นตอนแรกของการเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดเราจะเริ่มทำการเลือกตำแหน่งที่บัสอ้างอิงเป็นตำแหน่งแรก จากนั้นจะทำการเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ตำแหน่งที่มีค่าการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดที่มากที่สุด หากมีตำแหน่งบัสมากกว่าหนึ่งตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุด โปรแกรมจะทำการพิจารณาจากค่าต่างๆประจำบัสโดยให้ความสำคัญในการพิจารณาจากมากไปน้อยดังนี้

1) การเชื่อมต่อกับบัสที่ยังไม่มีข้อมูลครอบคลุมไปถึงของบัสที่พิจารณา
2) การเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆของบัสที่พิจารณา
3) ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของสายส่งที่ต่อจากบัสที่พิจารณาไปยังบัสที่ยังไม่มีข้อมูลครอบคลุมไปถึง
4) ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของสายส่งที่ต่อจากบัสที่พิจารณาไปยังบัสอื่นๆ และ
5) จำนวนสายส่งที่ต่อกับบัสนั้นๆ

อย่างไรก็ดีหากทำการพิจารณาตามค่าต่างๆที่ได้กล่าวไปแล้วพบว่าจำนวนบัสที่อยู่ในการพิจารณายังมีมากกว่า 1 ตำแหน่ง โปรแกรมจะทำการเลือกติดตั้งเครื่องมือวัดที่ตำแหน่งบัสที่ตรวจพบก่อนโดยอัตโนมัติ

ในแต่ละรอบของการเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด เราจะทำการตรวจสอบความครอบคลุมของข้อมูลทุกๆครั้ง หากชุดการวางตำแหน่งเครื่องมือวัดที่ได้ทำการเลือกติดตั้งไปครอบคลุมข้อมูลทุกๆจุดของระบบแล้ว โปรแกรมจะหยุดการเลือกตำแหน่งเพื่อความครอบคลุมของข้อมูลและกระทำการขั้นต่อไป ลำดับขั้นตอนการเลือกตำแหน่งเพื่อความครอบคลุมของข้อมูลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 (รายละเอียดการตรวจสอบความครอบคลุมของข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ค)

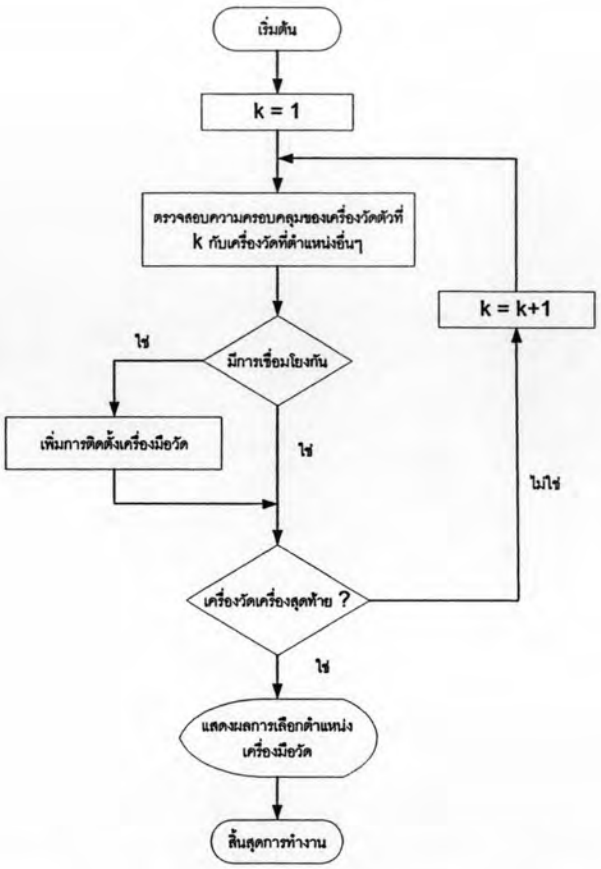


รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการเลือกตำแหน่งเพื่อความครอบคลุมของข้อมูล

4.2.1.3 การตรวจสอบการเชื่อมโยงกันของข้อมูล

เมื่อเราได้ชุดตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดจากหัวข้อที่ 4.2.1.2 แล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่เราจะทำการพิจารณา คือ การเชื่อมโยงกันของข้อมูล โดยในการตรวจสอบการเชื่อมโยงกันของข้อมูลนั้นมีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเราจะทำการตรวจสอบการเชื่อมโยงกันของข้อมูลทั้งหมดเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนของเครื่องมือวัดทั้งหมดที่เราได้ทำการเลือกตำแหน่งที่ติดตั้งไว้ โดยในแต่ละเครื่องมือวัดที่แต่ละตำแหน่งจะถูกตรวจสอบว่าความครอบคลุมของข้อมูลของเครื่องวัดที่พิจารณากับความครอบคลุมของข้อมูลของเครื่องวัดตัวอื่นๆรวมถึงข้อมูลจากโครงสร้างของระบบมีตำแหน่งที่เหมือนกันอยู่อย่างน้อยหนึ่งตำแหน่งหรือไม่ ถ้ามีหมายความว่าเครื่องมือวัดตำแหน่งนั้นมีการเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล แต่หากไม่มีแสดงว่าไม่มีการเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูล (รายละเอียดการตรวจสอบการเชื่อมโยงกันของข้อมูลแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค) ในกรณีนี้เราจะทำการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงถึงกันของข้อมูลจากการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบ และเราจะทำการตรวจสอบจนถึงเครื่องมือวัดตำแหน่งสุดท้ายที่ได้ทำการเลือกติดตั้งไว้



รูปที่ 4.5 การตรวจสอบการเชื่อมโยงกันของการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัด

4.2.1.4 การเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดเพื่อความเพียงพอของข้อมูล

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.1.1 ในเรื่องความเพียงพอของข้อมูลเพื่อทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะ ในการคำนวณเราควรจะมีจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะอย่างน้อยเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะที่เราจะทำการประมาณ แต่จะเห็นได้ว่าการเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดในหัวข้อ 4.2.1.2 และหัวข้อ 4.2.1.3 นั้นจะเป็นการเลือกตำแหน่งโดยไม่ได้คำนึงถึงเงื่อนไขนี้

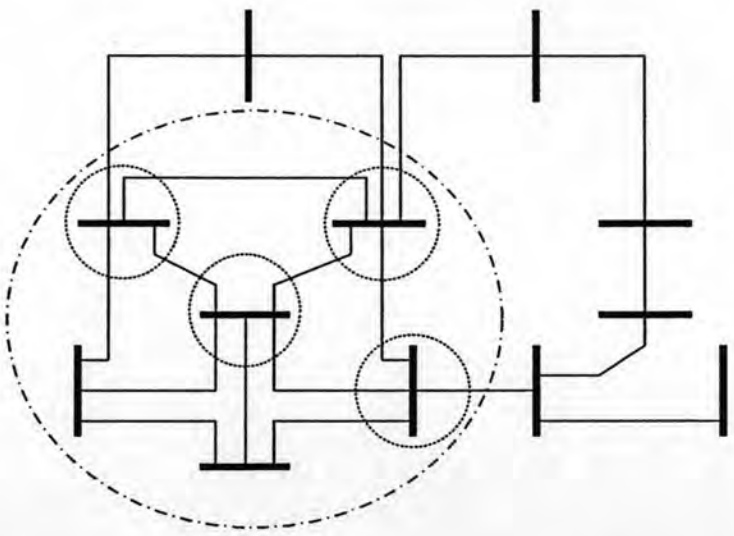
ดังนั้นหลังจากที่เราได้รูปแบบการวางตำแหน่งเครื่องมือวัดในขั้นตอนที่ผ่านมาแล้วเราจะทำการตรวจสอบจำนวนข้อมูลที่ได้จากตำแหน่งที่เราได้เลือกติดตั้งเครื่องมือวัดไว้ว่ามีความเพียงพอของข้อมูล หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดที่สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่านั้นมีจำนวนเท่ากับหรือมากกว่าจำนวนตัวแปรสถานะที่เราจะทำการประมาณค่าหรือไม่ หากยังไม่เพียงพอเราจะทำการพิจารณาเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดเพิ่ม โดยเราจะทำการพิจารณาจากค่าดัชนีประจำบัสโดยให้ความสำคัญกับค่าดัชนีต่างๆจากมากไปหาน้อยดังนี้

1) **อัตราส่วนของจำนวนบัสที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด**

ในการเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้น เราควรพิจารณาความสำคัญจากข้อมูลที่เราจะได้รับจากการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ตำแหน่งนั้นๆ นั่นคือหากตำแหน่งที่เราเลือกติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่นๆเป็นจำนวนมาก หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งว่าข้อมูลที่บัสดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับตัวแปรสถานะที่เราพิจารณาอยู่มากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ข้อมูลดังกล่าวย่อมมีแนวโน้มที่จะเป็นประโยชน์ต่อการประมาณค่าตัวแปรสถานะมากเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ดี หากพิจารณาเพียงแค่จำนวนบัสที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่พิจารณานั้นอาจจะก่อให้เกิดปัญหาการไม่กระจายตัวของข้อมูลได้ โดยปัญหาการกระจายตัวของข้อมูลนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งบัสที่มีวงกลมเส้นประล้อมรอบเป็นตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆมาก หากเราพิจารณาการเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยดัชนีการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆนั้น การเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดก็จะอยู่ในบริเวณเส้นประเพียงเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดแบบนี้จะเกิดการคับคั่งของข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด

ปัญหาที่จะเกิดขึ้น คือ การพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดแบบนี้จะทำให้ขาดข้อมูลของระบบจากบริเวณอื่นๆนอกเหนือจากบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด กล่าวคือไม่มีการกระจายตัวของข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการประมาณค่าตัวแปรสถานะนั้นมีโอกาสผิดเพี้ยนไปจากค่าจริงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.6 ระบบที่เกิดปัญหาการเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆ

เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอดัชนีหนึ่งขึ้นมาเพื่อให้แก้ปัญหาการไม่กระจายตัวของการเลือกตำแหน่งของเครื่องมือวัดนั่นคือ ดัชนีอัตราส่วนของจำนวนบัสที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด (Non-Metering Ratio; NMR) โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$NMR_i = \frac{N_{non-metering,i}}{N_{connect,i}} \tag{4.2}$$

โดย NMR_i คือ อัตราส่วนของจำนวนบัสที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด

$N_{non-metering,i}$ คือ จำนวนบัสที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณา

$N_{connect,i}$ คือ จำนวนบัสทั้งหมดที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณา

จาก (4.2) จะพบว่าดัชนี NMR เป็นค่าอัตราส่วนของบัสที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณาต่อบัสทั้งหมดที่ต่ออยู่กับบัสนั้น ข้อดีของการเลือกใช้ค่าอัตราส่วนแทนจำนวนของบัสที่ต่ออยู่โดยตรง คือ จะทำให้ปัญหาการไม่กระจายตัวของการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดลดลง เนื่องจากบริเวณใดที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอยู่เป็นจำนวนมากจะมีค่า NMR ต่ำกว่าบริเวณที่ยังไม่มีเครื่องมือวัดติดตั้งอยู่โดยไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนบัสที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณาโดยตรง

2) การเชื่อมต่อกับบัสที่ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด

จากการพิจารณาด้วยดัชนี NMR หากยังมีบัสที่อยู่ในการพิจารณามากกว่า 1 ตำแหน่ง เราจะทำการพิจารณาด้วยดัชนีการเชื่อมต่อกับบัสที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด (Non-Metering Connected; NMC) โดยที่ NMC นั้นคือจำนวนบัสที่ยังไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสที่เราพิจารณา ทั้งนี้เพื่อให้การติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งถัดไปนั้นให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับการประมาณค่าตัวแปรสถานะในบริเวณที่ยังไม่มีข้อมูลให้มากที่สุด

3) การเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆ

ดัชนีการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆ (Connected Bus; CB) มีค่าเท่ากับจำนวนบัสทั้งหมดที่บัสที่พิจารณาเชื่อมต่ออยู่ ทั้งนี้เพื่อให้ข้อมูลที่จะได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นให้ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรสถานะให้มากที่สุด

4) ค่าแอดมิตแตนซ์รวมที่ต่อไปยังบัสที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด

เนื่องด้วยในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้น นอกจากค่าตัวแปรสถานะแล้วตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีผลกับการคำนวณนั่นคือ ค่าแอดมิตแตนซ์ ดังนั้นเราจึงได้นำเอาค่าแอดมิตแตนซ์มาเป็นดัชนีหนึ่งที่แสดงถึงความสำคัญของข้อมูลที่บัสนั้นๆ โดยที่เราจะทำการพิจารณาค่าแอดมิตแตนซ์รวมจากบัสที่พิจารณาไปยังบัสที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดก่อน เพื่อให้ความสำคัญกับบัสที่ยังไม่ได้ถูกติดตั้งเครื่องมือวัดมากกว่าบัสที่ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดแล้ว

ดัชนีค่าแอดมิตแตนซ์รวมที่ต่อไปยังบัสที่ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด (Total Admittance to Non-Metering; $TANM$) นั้นจะถูกนำมาพิจารณาหากพิจารณาด้วยดัชนีทั้ง 3 ข้างต้นแล้วยังพบว่ามีบัสที่อยู่ในการพิจารณามากกว่า 1 บัส โดยที่ดัชนี $TANM$ นั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$TANM_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \in metered,\, j \neq i}}^{N_{bus}} |Y_{ij}| \tag{4.3}$$

5) ค่าแอดมิตแตนซ์รวมที่ต่อไปยังบัสอื่นๆ

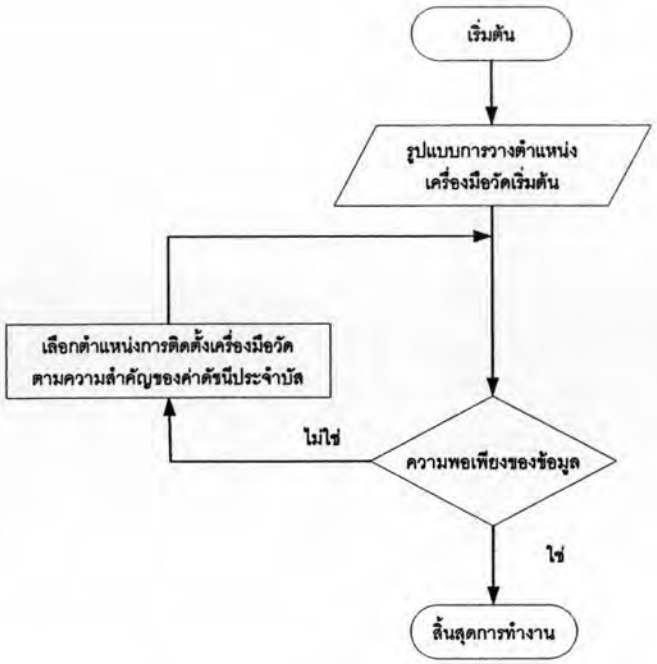
ค่าแอดมิตแตนซ์รวมที่ต่อไปยังบัสอื่นๆ (Total Admittance; TA) นั้นจะมีลักษณะคล้ายกับดัชนี $TANM$ กล่าวคือจะนำผลรวมขนาดของแอดมิตแตนซ์มาพิจารณาความสำคัญ แต่ดัชนี TA นั้นจะทำการรวมค่าแอดมิตแตนซ์ทั้งหมดที่ต่ออยู่กับบัสที่เราพิจารณา โดยดัชนี TA นั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$TA_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{bus}} |Y_{ij}| \tag{4.4}$$

6) จำนวนสายส่งที่ต่อกับบัสที่พิจารณา

ดัชนีสุดท้ายที่เราจะนำมาพิจารณาหากการพิจารณาด้วยดัชนีข้างต้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีบัสที่อยู่ในการพิจารณามากกว่า 1 บัส คือจำนวนสายส่งที่ต่อกับบัสที่พิจารณา

จากดัชนีทั้ง 6 ข้างต้นทำให้เราสามารถที่จะเลือกบัสเพื่อให้เกิดความพอเพียงของข้อมูลได้ และขั้นตอนของการเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อให้เกิดความเพียงพอของข้อมูลนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลำดับขั้นตอนการเลือกตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อความเพียงพอของข้อมูล

4.3 การเลือกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดเพิ่มเติม

นอกจากการเลือกรูปแบบในการติดตั้งเครื่องมือวัดที่นำเสนอแล้ว ยังมีอีกปัญหาหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกตำแหน่งเครื่องมือวัดนั่นคือ หากเราต้องการติดตั้งเครื่องมือวัดเพิ่มเติมจากรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เรามีอยู่ นั้นเราควรทำการเลือกตำแหน่งใดในการติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อให้ผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังระบบหนึ่งที่เราทราบค่ากำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่ฉีดเข้าระบบทุกๆบัสในระบบ หากเราทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยอาศัยเครื่องมือวัดเพียงบางตำแหน่งในระบบและทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดนั้น เราพบว่าค่าของตัวแปรสถานะซึ่งประกอบไปด้วย ขนาดของแรงดัน และมุมของแรงดันที่ทุกๆตำแหน่งในระบบนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงที่คำนวณจากการไหลของกำลังไฟฟ้ามากน้อยต่างกันไป ผลก็คือความคลาดเคลื่อนจากตัวแปรสถานะเหล่านี้ก็ย่อมทำให้เราคำนวณตัวแปรอื่นๆคลาดเคลื่อนไปด้วย เช่น ค่าโหลดกำลังจริง และ รีแอคทีฟที่แต่ละตำแหน่งในระบบ หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนแบบนี้อาจกล่าวได้ว่าคำตอบที่ได้มีความผิดพลาดไปจากค่าจริง แต่หากพิจารณาในทางกลับกัน นั่นคือหากพิจารณาว่าค่าโหลดกำลังจริงและรีแอคทีฟที่ได้จากการคำนวณด้วยตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่านั้นเป็นค่าโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบนั่นแปลว่าคำตอบที่ได้จากการประมาณค่าตัวแปรสถานะของเรามีความแม่นยำมากเช่นเดียวกัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วอาจจะกล่าวได้ว่าในการที่เราจะทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะในระบบใดๆระบบหนึ่งนั้น ค่าตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่านั้นอาจจะมีค่าใกล้เคียงหรือแตกต่างกับค่าจริงก็เป็นได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของโหลดจริงที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งนั่นหมายถึงในระบบหนึ่งๆนั้นเราไม่สามารถกำหนดรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่จะให้ผลแม่นยำและรองรับผลกับทุกรูปแบบของโหลดได้

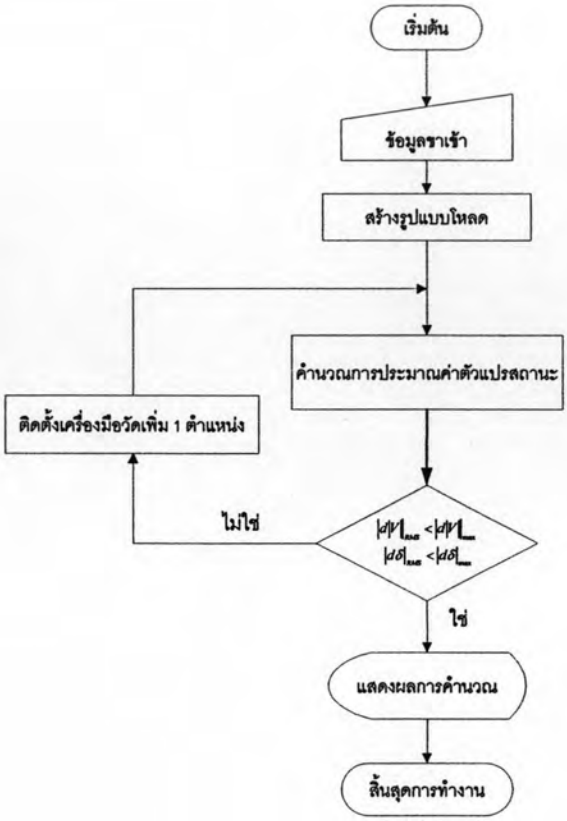
อาจกล่าวได้ในอีกนัยหนึ่งว่าเราไม่สามารถกำหนดรูปแบบของการติดตั้งเครื่องมือวัดได้โดยการพิจารณาเพียงแค่ข้อมูลจากโครงสร้างของระบบ แต่เราจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเพิ่มเติมบางอย่างเพื่อให้สามารถสร้างรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมได้

แนวทางหนึ่งที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้และนำเสนอคือการเลือกข้อมูลของความคลาดเคลื่อนของโหลดกำลังจริงมาใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมในการสร้างรูปแบบเครื่องมือวัดที่เหมาะสม และเนื่องด้วยเราได้เลือกใช้ความคลาดเคลื่อนของโหลดกำลังจริงมาเป็นตัวพิจารณาในการกำหนดตำแหน่งเครื่องมือวัดตำแหน่งต่อไป เราจึงจำเป็นต้องสร้างรูปแบบโหลดขึ้นมาจากนั้นทำการทดสอบรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับที่เรายอมรับได้หรือไม่ หากยอมรับได้จะถือว่ารูปแบบนั้นจะเป็นรูปแบบการวางตำแหน่งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับรูปแบบโหลดดังกล่าว หากความผิดพลาดไม่อยู่ในระดับที่เรายอมรับได้เราจะทำการเพิ่มเครื่องมือวัดไปในตำแหน่งที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของโหลดกำลังจริงมากที่สุด ขั้นตอนการสร้างรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมเป็นดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 ขั้นตอนต่างๆในการเลือกรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมนั้นมีรายละเอียดดังนี้

1) **ข้อมูลขาเข้า**

ข้อมูลขาเข้าในที่นี้นั้นนอกจากจะประกอบไปด้วยข้อมูลของบัส ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลของสายส่งในระบบ และข้อมูลของกำลังไฟฟ้าฐานแล้วยังมีข้อมูลในส่วนของขนาดของความคลาดเคลื่อนของแรงดัน ($\|d|V|\|_{max}$) และขนาดของความคลาดเคลื่อนของมุมของแรงดัน ($|d\delta|_{max}$) ที่มากที่สุดที่เรายอมรับได้และข้อมูลจำนวนของรูปแบบโหลดที่เราจะทดสอบอีกด้วย

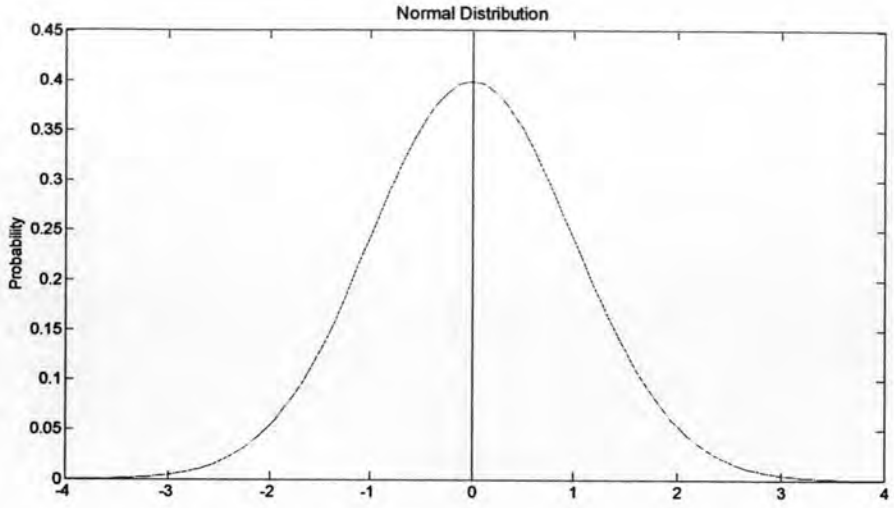


รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการเลือกรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เพิ่มเติม

2) การสร้างรูปแบบโหลด

ในการสร้างรูปแบบโหลดเราจะเริ่มต้นโดยการประมาณค่ากลาง หรือค่าเฉลี่ยของโหลดที่แต่ละตำแหน่งในการติดตั้ง จากนั้นโปรแกรมจะทำการสุ่มค่าโหลดโดยอาศัยการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(σ)มีค่าเท่ากับ 10% ของค่ากลางที่ทุกๆ ตำแหน่งในระบบ และจะทำกระบวนการนี้ไปจนได้จำนวนรูปแบบโหลดตามที่ได้กำหนดไว้ในส่วนของข้อมูลขาเข้า

รูปแบบตัวอย่างของการกระจายแบบปกติมาตรฐานซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 แสดงดังในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การกระจายแบบปกติมาตรฐานซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1

3) การประมาณค่าตัวแปรสถานะ

ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรสถานะโปรแกรมจะทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยอาศัยข้อมูลจากตำแหน่งที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด จากนั้นจะนำค่าตัวแปรสถานะอันประกอบไปด้วยขนาดของแรงดัน และมุมของแรงดันที่ทุกๆตำแหน่งในระบบมาคำนวณค่าโหลดกำลังจริง และโหลดกำลังรีแอคทีฟที่ทุกๆจุดในระบบ และจะกระทำกระบวนการนี้จนครบทุกรูปแบบโหลดที่ได้สร้างขึ้นในขั้นตอนการสร้างรูปแบบโหลด

4) การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน

เมื่อโปรแกรมได้ทำการคำนวณในขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรสถานะจนครบทุกรูปแบบโหลดที่ได้ทำการสร้างขึ้นแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงดัน และมุมของแรงดันโดยคำนวณได้ (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ

$$\left|d|V|\right|_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{LC}} (d|V|_{RMS,LC_i})^2}{N_{LC}}} \qquad (4.5)$$

โดยที่ $d|V|_{RMS,LC_i}$ คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของขนาดของแรงดันจากรูปแบบโหลดที่ i

N_{LC} คือ จำนวนของรูปแบบโหลดทั้งหมดที่เรานำมาคำนวณ

$$|d\delta|_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{LC}} (d\delta_{RMS,LC_i})^2}{N_{LC}}} \qquad (4.6)$$

โดยที่ $d\delta_{RMS,LC_i}$ คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของขนาดของแรงดันจากรูปแบบโหลดที่ i

โดยโปรแกรมจะนำค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จาก (4.5) และ (4.6) ไปเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เรายอมรับได้ หากค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้นั้นมีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เรายอมรับได้จะถือว่ารูปแบบของการติดตั้งเครื่องมือวัดในรอบนั้นๆเป็นรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับระบบทดสอบนี้ หากมีค่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดจะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดเพิ่มเติมอีก 1 ตำแหน่งและกระทำขั้นตอนการประมาณค่า และการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจนกระทั่งความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

5) **การติดตั้งเครื่องมือวัดเพิ่มเติม**

ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการหาตำแหน่งที่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของโหลดกำลังจริงสูงที่สุดของการประมาณค่าตัวแปรสถานะแต่ละรูปแบบโหลด หากตำแหน่งใดในระบบที่เกิดความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเป็นจำนวนมากที่สุด โปรแกรมจะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดที่จุดนั้นๆ ในกรณีที่มีตำแหน่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุดมากกว่า 1 ตำแหน่งระบบจะทำการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของมุมของแรงดันและขนาดของแรงดันในทำนองเดียวกันตามลำดับ หากพิจารณาด้วยค่าทั้งสามแล้วยังมีตำแหน่งบัสที่อยู่ในการพิจารณามากกว่า 1 ตำแหน่ง โปรแกรมจะทำการพิจารณาจากค่าดัชนีประจำบัสต่างๆ โดยให้ความสำคัญจากมากไปน้อย ดังนี้

1) ค่า Non-Metering Ratio (NMR)
2) จำนวนบัสที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณา (CB)
3) ค่าแอดมิตแตนซ์รวมของสายส่งที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณา (TA)
4) จำนวนสายส่งที่ต่ออยู่กับบัสที่พิจารณา

หากพิจารณาค่าต่างๆทั้งหมดแล้วยังพบว่ามีบัสที่พิจารณามากกว่า 1 ตำแหน่งโปรแกรมจะทำการเลือกตำแหน่งบัสที่พบก่อนที่ยังอยู่ในการพิจารณา