บทที่ 4
แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วและ การคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วเป็นแบบจำลอง เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงมีหลายขนาดและหลายชนิดให้เลือกได้ตรงกับความต้องการ มีความทนทานและไม่ต้องการบำรุงรักษามาก ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วที่ใช้ในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ และในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงขั้นตอนในการคำนวณหาค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

4.1 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุซ้ำได้ชนิดแรกที่ทำออกมาเพื่อการค้า และในปัจจุบันยังมีการใช้งานกันอยู่อย่างแพร่หลาย โดยมักจะทำเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูงๆ ที่จ่ายกระแสได้มาก เนื่องจากมีต้นทุนในการเก็บพลังงานถูกกว่าแบตเตอรี่อัดประจุซ้ำได้ชนิดอื่น ๆ [18]

แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วนี้สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ ได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบตเตอรี่แบบแห้งและแบตเตอรี่แบบน้ำ (Flooded Type หรือ Wet Type) แต่การใช้งานแบตเตอรี่แบบน้ำนั้นไม่สะดวก จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม ในที่นี้จะกล่าวถึงแบตเตอรี่แบบแห้งเท่านั้น

แบตเตอรี่แบบแห้งยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบตเตอรี่แบบเจล (Gel Cell) ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้เจลเป็นวัสดุดูดซับกรด และแบตเตอรี่ AGM (Absorbed Glass Mat Battery) ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้แผ่นซิลิกาไฟเบอร์เป็นตัวดูดซับกรด

ความแตกต่างของแบตเตอรี่แบบเจลและแบบ AGM คือ ถ้าเปลือกนอกของแบตเตอรี่แบบเจลแตก จะไม่มีน้ำกรดซึมออกมา แต่ถ้าเปลือกนอกของแบตเตอรี่แบบ AGM แตก จะมีน้ำกรดไหลซึมออกมา เนื่องจากแบตเตอรี่แบบเจลสามารถดูดซับน้ำกรดได้ดีกว่า แต่แบตเตอรี่แบบเจลนั้น เมื่ออยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง เจลจะเกิดการละลาย และถ้ามีการอัดประจุมากเกินไป (overcharge) เจลจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปวอยด์ (void) ซึ่งจะไปเกาะติดอยู่ที่แผ่นขั้วไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง ดั้งนั้นในปัจจุบัน จึงนิยมใช้แบตเตอรี่ชนิด AGM มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดเจล

แบตเตอรี่ทั้ง 2 ประเภท คือ แบบเจลและแบบ AGM สามารถแบ่งออกได้เป็น แบตเตอรี่กรดตะกั่วแบบปิดผนึก (Sealed Lead Acid; SLA) และแบบปิดผนึกที่มีวาล์วระบายแรงดัน

(Valve Regulator Lead Acid; VRLA) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดหลังนี้จะมีการติดตั้งเซฟตี้วาล์ว (Safety Valve) เพื่อระบายแก๊สในกรณีที่ความดันในเซลล์สูงเกินไป

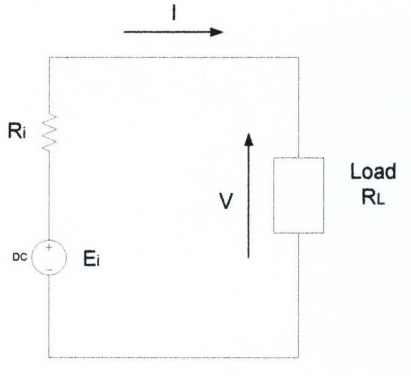
การอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ทั้งแบบ SLA และ VRLA จะต้องไม่อัดประจุเร็วหรือมากเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สภายในที่สูงเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณอิเล็กทรอไลต์ และส่งผลให้แบตเตอรี่สูญเสียความสามารถในการเก็บพลังงาน ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่หลังการอัดประจุไม่สูงเท่าที่ควรจะเป็น และถ้าเกิดเหตุการณ์แบบนี้ซ้ำบ่อยๆ จะทำให้แบตเตอรี่ใช้งานไม่ได้อีกต่อไป

4.2 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีความพยายามในการจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่รวมถึงการหาค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ เพื่อให้แบบจำลองนั้นมีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริง เพื่อที่จะสามารถนำแบบจำลองแบตเตอรี่ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นต่อไป ซึ่งแบบจำลองของแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมีหลากหลายรูปแบบ ในที่นี้จะยกตัวอย่างแบบจำลองแบตเตอรี่ที่เป็นที่รู้จักเพียง 5 แบบ

4.2.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย

แบบจำลองแบบนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย โดยในวงจรสมมูลนี้ประกอบด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทานภายใน 1 ตัว ดังรูปที่ 4.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_i และความต้านทานภายใน R_i นี้ จะมีค่าแปรผันโดยตรงกับประจุของแบตเตอรี่ที่คายออกไป ดังสมการ (4.1) - (4.2) [17-18]



รูปที่ 4.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย

$$E_i = E_0 - K_1 Q_d \tag{4.1}$$

$$R_i = R_0 + K_2 Q_d \tag{4.2}$$

โดยที่

E_0 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะที่ถูกอัดประจุเต็ม

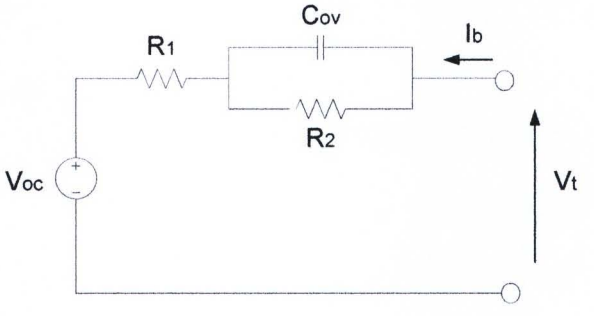
R_0 คือ ความต้านทานภายในเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะที่ถูกอัดประจุเต็ม

K_1, K_2 คือ ค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากการประมาณกราฟจากข้อมูลการทดสอบแบตเตอรี่

ข้อดีของแบบจำลองแบบนี้ คือ เป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการคำนวณ แต่ข้อเสียคือ ค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่าเหล่านี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสถานะการอัด/คายประจุ (State of charge; SOC) ความเข้มข้นของสารละลายเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิการใช้งาน เป็นต้น แบบจำลองนี้จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงและนำไปใช้ได้เฉพาะกรณีที่สมมติว่าพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายออกมีค่าไม่จำกัด และไม่คำนึงถึงสถานะการอัด/คายประจุ

4.2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน

แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin equivalent circuit) ดังรูปที่ 4.2 ในวงจรสมมูลเทวินินจะประกอบด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด V_{oc} ความต้านทานภายใน R_1 และส่วนประกอบที่แทนแรงดันเกิน (overvoltage) นั่นคือ ตัวเก็บประจุ C ที่ต่อขนานอยู่กับความต้านทาน R_2 [22-23]

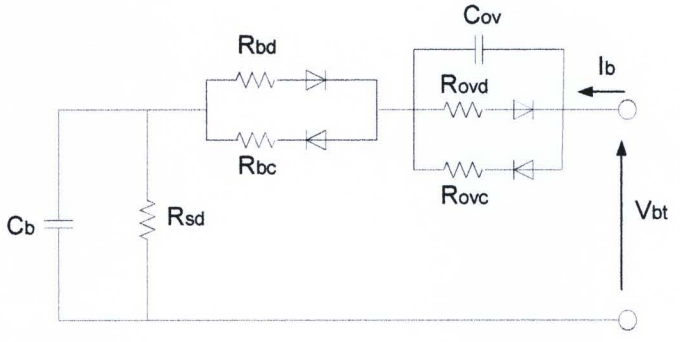


รูปที่ 4.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน

ข้อดีของแบบจำลองชนิดนี้คือ เป็นแบบจำลองที่เข้าใจง่าย และมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย แต่ข้อเสียคือ ค่าตัวแปรต่างๆ ในวงจรยังคงมีค่าคงที่ ซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริงที่ว่าตัวแปรมีค่าขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ ภายในแบตเตอรี่

4.2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเชิงเส้น

ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองแบตเตอรี่จากวงจรสมมูลเทวินินให้เป็นวงจรสมมูลแบบเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.3 วงจรสมมูลเชิงเส้นนี้ประกอบด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่หาได้จากแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_{oc} ความต้านทาน R_{sd} ซึ่งแทนการสูญเสียจากการคายประจุด้วยตัวเอง ความต้านทาน R_{bc} และ R_{ovc} ซึ่งแทนความต้านทานจากการสูญเสียเมื่อมีกระแสไหลและความต้านทานที่เกิดจากแรงดันเกินเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ และส่วนประกอบสุดท้าย คือ ความต้านทาน R_{bd} และ R_{ovd} ซึ่งแทนความต้านทานจากการสูญเสียเมื่อมีกระแสไหลและความต้านทานที่เกิดจากแรงดันเกินเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุ [22]

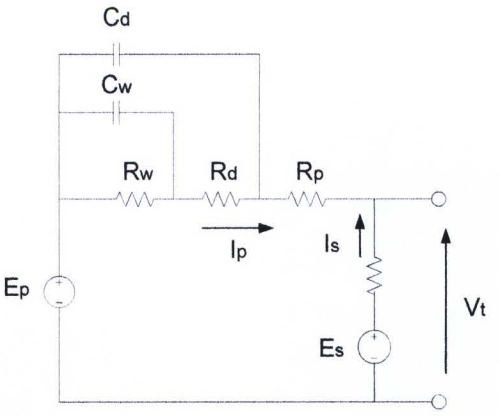


รูปที่ 4.3 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเชิงเส้น

ข้อดีของแบบจำลองแบบนี้คือ เป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองไม่ได้มีค่าคงที่แต่จะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า แต่ข้อเสียของแบบจำลองแบบนี้ คือ การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะต้องใช้เทคนิคการประมาณกราฟซึ่งเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก และบางครั้งข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตอาจไม่เพียงพอที่จะสามารถสร้างสมการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ นอกจากนี้แบบจำลองนี้ยังไม่สะท้อนถึงอัตราการอัดประจุหรือคายประจุของแบตเตอรี่อีกด้วย

4.2.4 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบวงจรพลวัตลำดับที่สี่ (Forth Order Dynamic Model)

แบบจำลองแบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ในแบบจำลองนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่กระแส I_p ไหลผ่าน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์ R_p ความต้านทาน R_d และตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดการรั่วไหล C_d และ C_w และความต้านทานรั่วไหล R_w ส่วนที่สอง คือ ส่วนที่กระแส I_s ไหลผ่าน ได้แก่ ความต้านทานของการคายประจุด้วยตัวเอง R_s [23]

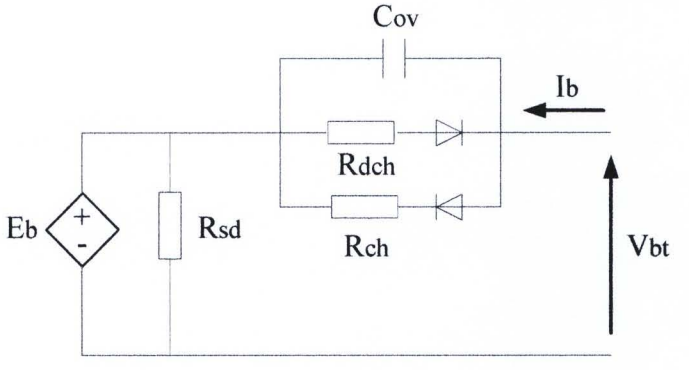


รูปที่ 4.4 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบวงจรพลวัตลำดับที่สี่

ถึงแม้ว่าแบบจำลองแบบนี้จะค่อนข้างมีความถูกต้อง แต่ก็ยังมีข้อเสียเปรียบบางประการ เช่น การคำนวณที่ยุ่งยาก และอาจจะต้องใช้เวลามากในการคำนวณ เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ลำดับที่สี่ และขั้นตอนของการสร้างสมการก็ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากจะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากที่ได้จากการทดสอบแบตเตอรี่ เป็นต้น

4.2.5 แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบบจำลองของแบตเตอรี่ให้มีความถูกต้องมากขึ้น คือ แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการเข้าใจและมีลักษณะที่ตรงกับความต้องการที่ต้องมีในแบตเตอรี่ที่ดี [23-25]



รูปที่ 4.5 แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่

ในแบบจำลองนี้ ค่าต่างๆ ภายในแบตเตอรี่จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีค่าขึ้นอยู่กับ SOC และลักษณะดังกล่าวสามารถแสดงได้ทั้งในช่วงที่มีการอัดประจุและคายประจุ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. **ความต้านทานคายประจุด้วยตัวเอง**, R_{sd} เป็นความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของน้ำที่แรงดันสูง และยังเกี่ยวข้องกับการรั่วไหลอย่างช้าๆ ข้ามขั้วแบตเตอรี่ที่แรงดันต่ำ ความต้านทานคายประจุด้วยตัวเองนี้เป็นฟังก์ชั่นของแรงดันเปิดวงจร
2. **ความต้านทานในช่วงการอัดประจุและคายประจุ**, R_{ch} **และ** R_{dch} เป็นความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งความต้านทานนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปในช่วงอัดประจุและคายประจุ
3. **ค่าความจุไฟฟ้า**, C_{ov} เมื่อแบตเตอรี่รับหรือจ่ายพลังงาน แบตเตอรี่จะประพฤติตัวเหมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้านี้จะเกี่ยวข้องกับเวลาในการตอบสนองของแรงดันเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุหรือคายประจุ
4. **แรงเคลื่อนไฟฟ้า**, E_b เป็นแหล่งจ่ายไม่อิสระมีค่าแปรผันแบบเชิงเส้นตามค่า SOC

จะเห็นว่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองชนิดนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า SOC ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับค่า SOC นี้ สามารถหาได้จากข้อมูลการวัดของผู้ผลิต ดังนั้นแบบจำลองแบบนี้จะมีความถูกต้องสูง และเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วร่วมกับแบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่ที่กล่าวในหัวข้อ 4.2.5 [24] ในส่วนนี้จะนำเสนอ สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดนี้ โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลของแบตเตอรี่ Yuasa NP4-12 เป็นต้นแบบ ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีค่าความจุขนาดที่กำหนด 4 แอมแปร์-ชั่วโมงและใช้กับค่าแรงดันที่กำหนด 12 โวลต์ อย่างไรก็ดี หากในการใช้งานจริง มีการเลือกใช้แบตเตอรี่ที่มีค่าความจุแตกต่างไปจากแบตเตอรี่ต้นแบบ หรือมียี่ห้อต่างกัน ก็จะมีวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ซึ่งจะอธิบายต่อไป

ค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองจะมีค่าขึ้นกับค่า SOC ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$SOC = SOC_0 - \left(\frac{1}{C_n}\int_0^t I_b d\tau\right) \times 100 \tag{4.3}$$

โดยที่

SOC คือ ค่า SOCมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

SOC_0 คือ ค่าเริ่มต้นของ SOC

C_n คือ ค่าความจุที่กำหนด มีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง

I_b คือ กระแสแบตเตอรี่ โดยจะมีค่าเป็นบวกในช่วงคายประจุ และจะมีค่าเป็นลบ ในช่วงเก็บประจุ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

โดย SOC คือ ค่าประจุที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่เทียบกับขนาดพิกัดของแบตเตอรี่ ค่านี้จะชี้วัดว่าแบตเตอรี่จะสามารถจ่ายพลังงานได้เท่าไรก่อนที่ประจุจะหมด หรือสามารถรับพลังงานได้อีกเท่าไรก่อนที่แบตเตอรี่จะเต็ม ค่า SOC จะมีค่าอยู่ในช่วง [0,100]

การสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในแบบจำลองพลวัตกับค่า SOC จะอาศัยการประมาณกราฟของข้อมูลการทดสอบแบตเตอรี่จากผู้ผลิต ในสมการ (4.4) - (4.11) จะแสดงสมการของตัวแปรต่างๆ ในแบตเตอรี่ที่ได้จากการประมาณกราฟของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว Yuasa NP4-12

1. **แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่**

$$E_b = 0.01375(SOC) + 11.5 \tag{4.4}$$

2. **ตัวต้านทานการคายประจุด้วยตัวเอง**

$$R_{sd} = -0.039(SOC)^2 + 4.27(SOC) - 19.23 \tag{4.5}$$

3. **ตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุ**

$$R_{dch} = R_{bdi} + R_{bd} \tag{4.6}$$

ซึ่ง

$$R_{bdi} = 1.01 \cdot exp(-2.21 \cdot |I_b|) + 0.24 \cdot exp\,(-0.06 \cdot |I_b|) \tag{4.7}$$

$$R_{bd} = 2.926 \cdot \exp\,(-0.042 \cdot SOC) \tag{4.8}$$

โดยที่

R_{bdi} คือ ความต้านทานที่ทำให้ค่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งค่านี้จะมีค่าขึ้นกับกระแสคายประจุ

R_{bd} คือ ความต้านทานที่แทนการเปลี่ยนแปลงของ R_{dch} ตามค่า SOC

4. **ตัวเก็บประจุ**

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ค่า $C_{OV} = 40\ F$

5. **ตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ**

$$R_{ch} = R_{bci} + R_{bc} \tag{4.9}$$

ซึ่ง

$$R_{bci} = 1.5\ \Omega \tag{4.10}$$

$$R_{bc} = 9.32 \times 10^{-5} \cdot (SOC)^2 + 0.01 \cdot (SOC) + 0.028 \tag{4.11}$$

โดยที่

R_{bci} คือ ความต้านทานที่ทำให้ค่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งค่านี้จะมีค่าขึ้นกับกระแสอัดประจุ

R_{bc} คือ ความต้านทานที่แทนการเปลี่ยนแปลงของ R_{ch} ตามค่า SOC

6. **แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่** (Terminal Voltage)

เมื่อทราบค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองแล้ว เราสามารถคำนวณค่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ได้ โดยสมการของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่สามารถพิสูจน์ได้จากแบบจำลองพลวัตที่ใช้

ช่วงการคายประจุ:

$$V_{bt} = E_b - I_b R_{dch}[1 - \exp(\frac{-\Delta t}{R_{dch} C_{ov}})] \tag{4.12}$$

ช่วงการเก็บประจุ:

$$V_{bt} = E_b + I_b R_{ch}[1 - \exp(\frac{-\Delta t}{R_{ch} C_{ov}})] \tag{4.13}$$

โดยที่

Δt คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา

ถ้าความจุของแบตเตอรี่มีค่าแตกต่างไปจากความจุที่ใช้ในการหาสมการของตัวแปรต่างๆข้างต้น จะต้องมีการปรับค่าตัวแปรให้สอดคล้องกับความจุของแบตเตอรี่ต้องการ ซึ่งแบตเตอรี่ดังกล่าวจะต้องมีลักษณะการคายประจุเหมือนกับแบตเตอรี่ต้นแบบ จึงจะสามารถประมาณค่า

ความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุเป็นอัตราส่วนกับค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุของแบตเตอรี่ต้นแบบได้ดังสมการ (4.14) – (4.15)

$$[R\ at\ C_{n2}] = \frac{C_{n1}}{C_{n2}} \cdot [R\ at\ C_{n1}] \tag{4.14}$$

$$[C_{ov}\ at\ C_{n2}] = \frac{C_{n2}}{C_{n1}} \cdot [C_{ov}\ at\ C_{n1}] \tag{4.15}$$

โดยที่

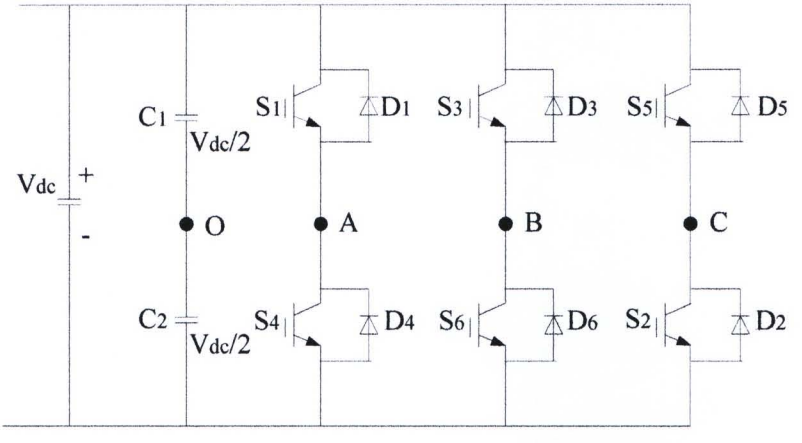
R คือ R_{sd} , R_{dch} , R_{ch}

C_{n1} คือ ค่าความจุที่กำหนดของแบตเตอรี่ต้นแบบ ในที่นี้ คือ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง

C_{n2} คือ ค่าความจุที่กำหนดของแบตเตอรี่ที่ต้องการใช้

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของ AC-DC คอนเวอร์เตอร์และ DC-AC อินเวอร์เตอร์เป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 6 พัลส์ (3 phase 6 step voltage source converter และ voltage source inverter) [20-21] ซึ่งแบบจำลองของทั้งคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จะเหมือนกันและสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันชนิด 3 เฟส 6 พัลส์

สมการของแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$\hat{V}_{AO} = \hat{V}_{BO} = \hat{V}_{CO} = \frac{4V_{DC}}{2\pi} \tag{4.16}$$

หรือ

$$\hat{V}_{AB} = \frac{2\sqrt{3}V_{DC}}{\pi} \tag{4.17}$$

หรือ

$$V_{AB,rms} = \frac{2\sqrt{3}V_{DC}}{\sqrt{2}\pi} \tag{4.18}$$

โดยที่

$\hat{V}_{A0}, \hat{V}_{B0}, \hat{V}_{C0}$	คือ	ขนาดแรงดันสายถึงเฟส (line to neutral)
$\hat{V}_{AB}$	คือ	ขนาดแรงดันสายถึงสาย (line to line)
$V_{AB,rms}$	คือ	แรงดัน rms ของแรงดันสายถึงสาย
V_{DC}	คือ	แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

4.5 การหาความจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

จุดประสงค์ของการติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ก็เพื่อที่จะช่วยแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้า ความถี่ และแรงดันที่เข้าสู่ระบบ โดยแบตเตอรี่จะพยายามชดเชยให้ระบบผลิตสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด และช่วยลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากเทียบเท่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิง

เพื่อที่จะให้การติดตั้งแบตเตอรี่ช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกความจุของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เนื่องจากถ้าเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ติดตั้งน้อยเกินไป อาจทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถเก็บหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่ถ้าเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่สูงเกินไป ก็อาจจะส่งผลถึงค่าลงทุนที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดของแบตเตอรี่เพื่อใช้ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมให้มีความเหมาะสม

4.5.1 การปรับค่าตัวแปรให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่ที่เลือกใช้

หากแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีกราฟลักษณะการอัด/คายประจุเหมือนกับแบตเตอรี่ต้นแบบซึ่งในที่นี้คือ Yuasa NP4-12 ก็ไม่ต้องทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในสมการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรของแบตเตอรี่ แต่ถ้าแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ของผู้ผลิตคนละรายกับแบตเตอรี่ต้นแบบซึ่งอาจจะมีลักษณะการอัด/คายประจุไม่เหมือนกัน จะต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆอีกครั้งโดยคงรูปแบบของสมการไว้ ค่าตัวแปรที่จะต้องปรับค่า ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าและตัวต้านทานเมื่อ

แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ และคายประจุ ส่วนค่าตัวเก็บประจุจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นอัตราส่วนกับค่าตัวเก็บประจุในแบตเตอรี่ต้นแบบ

1. **แรงเคลื่อนไฟฟ้า**

$$E_b = \alpha_e(SOC) + \beta_e \tag{4.19}$$

2. **ความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ**

$$R_{dch} = \alpha_{dch} + \beta_{dch} \cdot (SOC) + \gamma_{dch} \cdot (SOC)^2 \tag{4.20}$$

3. **ความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุ**

$$R_{ch} = \alpha_{ch} \cdot \exp(a \cdot |I_b|) + \beta_{ch} \cdot \exp(b \cdot |I_b|) + \gamma_{dch} \cdot \exp(c \cdot SOC) \tag{4.21}$$

4. **ค่าตัวเก็บประจุ**

$$C_{ov} = \frac{C_{n2}}{4} \cdot 40 = 10 \cdot C_{n2} \tag{4.22}$$

โดยที่

α_e , β_e	คือ	ค่าคงที่ในสมการแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้
α_{dch} , β_{dch} , γ_{dch}	คือ	ค่าคงที่ในสมการความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้
α_{ch} , β_{ch} , γ_{ch} , a , b , c	คือ	ค่าคงที่ในสมการความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้

ถึงแม้ค่าสัมประสิทธิ์ของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้จะเปลี่ยนแปลงไป แต่สมการหาแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ยังเป็นสมการเดิม เนื่องจากเป็นสมการที่พิสูจน์มาจากแบบจำลอง ซึ่งถ้าเราทราบค่าข้อมูลแรงดันและกระแสในขณะที่อัดประจุหรือคายประจุที่แต่ละช่วงเวลาได้ ก็จะสามารถใช้วิธีการเชิงเลขในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ (4.19) - (4.22) ได้ และถ้าความจุของแบตเตอรี่มีค่าไม่เท่ากับ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ก็จะต้องมีการปรับค่าความต้านทานเหมือนในสมการที่ (4.14)

4.5.2 กำลังไฟฟ้าที่ผ่านคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์มีกำลังสูญเสียร้อยละ 2 ของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าคอนเวอร์เตอร์และเข้าสู่แบตเตอรี่นั้น จะเป็นกำลังไฟฟ้าที่อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากแบตเตอรี่ออกสู่อินเวอร์เตอร์และเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะเป็นกำลังไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าจริงอัดประจุเมื่อผ่านคอนเวอร์เตอร์, $P_{con,ch}$ จะมีค่าดังสมการ (4.23)

$$P_{con,ch} = 0.98 \cdot P_{dc,ch} \tag{4.23}$$

และกำลังไฟฟ้าจริงคายประจุเมื่อผ่านอินเวอร์เตอร์, $P_{inv,dch}$ จะมีค่าดังสมการ (4.24)

$$P_{inv,dch} = 0.98 \cdot P_{b,dch} \tag{4.24}$$

โดยที่

$P_{dc,ch}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อผ่านหม้อแปลงแปลงแรงดันลงแล้ว

$P_{b,dch}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากแบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่คายประจุ

เมื่อทราบความต้องการของระบบไฟฟ้าหรือโหลด (P_{set}) กำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่จะรับหรือจ่าย (P_b) จะแยกคำนวณออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่แบตเตอรี่อัดประจุและช่วงที่แบตเตอรี่คายประจุ โดยกำลังไฟฟ้าจริงที่อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.25)

$$P_{b,ch} = P_{set} - P_{con,ch} \tag{4.25}$$

และกำลังไฟฟ้าจริงแบตเตอรี่คายประจุ เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.26)

$$P_{b,dch} = P_{set} - P_{con,dch} \tag{4.26}$$

โดย $P_{b,dch}$ จะมีค่าเป็นบวก นั่นคือ แบตเตอรี่กำลังคายประจุและจ่ายกระแสออกสู่ระบบไฟฟ้า (Discharge) และค่า $P_{b,ch}$ จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึง แบตเตอรี่กำลังรับกระแสเข้าแบตเตอรี่และแบตเตอรี่จะอยู่ในสภาวะอัดประจุ (Charge)

4.5.3 การคำนวณความจุของแบตเตอรี่

จากสมการของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ในสมการที่ (4.12) - (4.13) เมื่อคูณกระแสอัดประจุหรือคายประจุตลอดทั้งสมการ จะได้ว่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่คูณกับกระแสอัดประจุหรือคายประจุจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่รับหรือจ่ายออก ดังแสดงในสมการ (4.27) - (4.28)

ช่วงการเก็บประจุ:

$$P_{b,ch} = V_{bt}I_b = E_b + I_b^2 R_{ch}[1 - \exp(\frac{-\Delta t}{R_{ch}C_{ov}})] \tag{4.27}$$

ช่วงการคายประจุ:

$$P_{b,dch} = V_{bt}I_b = E_b - I_b^2 R_{dch}[1 - exp(\frac{-\Delta t}{R_{dch}C_{ov}})] \tag{4.28}$$

จากสมการดังกล่าว เราสามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของความจุของแบตเตอรี่ (C_n) ในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่อัดประจุจะกำหนดให้ค่า $SOC = 100$ และในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่คายประจุจะกำหนดให้ค่า $SOC = 0$ การกำหนดค่า SOC ในลักษณะนี้ก็เพื่อที่จะหาค่าสูงสุดของความจุของแบตเตอรี่ที่แบตเตอรี่จะสามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างเต็มที่ในแต่ละช่วงเวลา

เมื่อแทนค่า SOC ที่กำหนดไว้ในสมการ (4.3) แล้ว จะสามารถจัดรูปกระแสอัดประจุหรือคายประจุให้อยู่ในรูปความจุของแบตเตอรี่ได้ และเมื่อแทนค่ากระแสอัดประจุนี้ในสมการที่ (4.27) - (4.28) ก็จะได้สมการของกำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่รับหรือจ่ายออก ที่เป็นฟังก์ชั่นของความจุของแบตเตอรี่ สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ในสมการ (4.29) - (4.30)

ช่วงการเก็บประจุ:

กำหนด $SOC = 100$

จะได้ $I_b = \dfrac{-(100 - SOC_0) \cdot C_n}{100}$

$$P_{b,ch} = E_b + \left(\frac{-(100 - SOC_0) \cdot C_n}{100}\right)^2 R_{ch}[1 - exp(\frac{-\Delta t}{R_{ch}C_{ov}})] \tag{4.29}$$

ช่วงการคายประจุ:

กำหนด $SOC = 0$

จะได้ $I_b = \frac{SOC_0 \cdot C_n}{100}$

$$P_{b,dch} = E_b - \left(\frac{SOC_0 \cdot C_n}{100}\right)^2 R_{dch}[1 - exp\,(\frac{-\Delta t}{R_{dch}C_{ov}})] \tag{4.30}$$

เมื่อแทนค่า SOC และกระแสอัดประจุหรือคายประจุดังกล่าวในสมการของตัวแปรต่างๆ ภายในแบตเตอรี่ จะพบว่าสมการ (4.29) - (4.30) จะมีเพียงค่าเดียวที่ไม่รู้ค่าคือค่าความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะต้องแก้สมการเพื่อหาค่าความจุของแบตเตอรี่ แต่เนื่องจากสมการข้างต้นเป็นสมการไม่เชิงเส้น จึงต้องใช้วิธีการเชิงเลขในการแก้ปัญหา ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธีเชิงเลขนิวตัน-ราฟสัน ในการแก้สมการหาค่าความจุของแบตเตอรี่

ถ้าแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีความจุของแบตเตอรี่ไม่เท่ากับความจุของแบตเตอรี่ต้นแบบ จะต้องมีการปรับค่าตัวเก็บประจุและความต้านทานดังในสมการ (4.14) - (4.15)

ช่วงการเก็บประจุ:

$$f_{ch} = E_b + \frac{C_{n1}}{C_{n2}} \cdot \left(\frac{-(100 - SOC_0) \cdot C_{n2}}{100}\right)^2 \cdot R_{ch,b}\left[1 - exp\left(\frac{-\Delta t}{40R_{ch,b}}\right)\right] - P_{b,ch} \tag{4.31}$$

$$\frac{\partial f_{ch}}{\partial C_n} = 0$$

ช่วงการคายประจุ:

$$f_{dch} = E_b - \frac{C_{n1}}{C_{n2}} \cdot \left(\frac{SOC_0 \cdot C_n}{100}\right)^2 R_{dch,b} \cdot \left[1 - exp\left(\frac{-\Delta t}{40R_{dch,b}}\right)\right] - P_{b,dch} \tag{4.32}$$

$$\frac{\partial f_{dch}}{\partial C_n} = 0$$

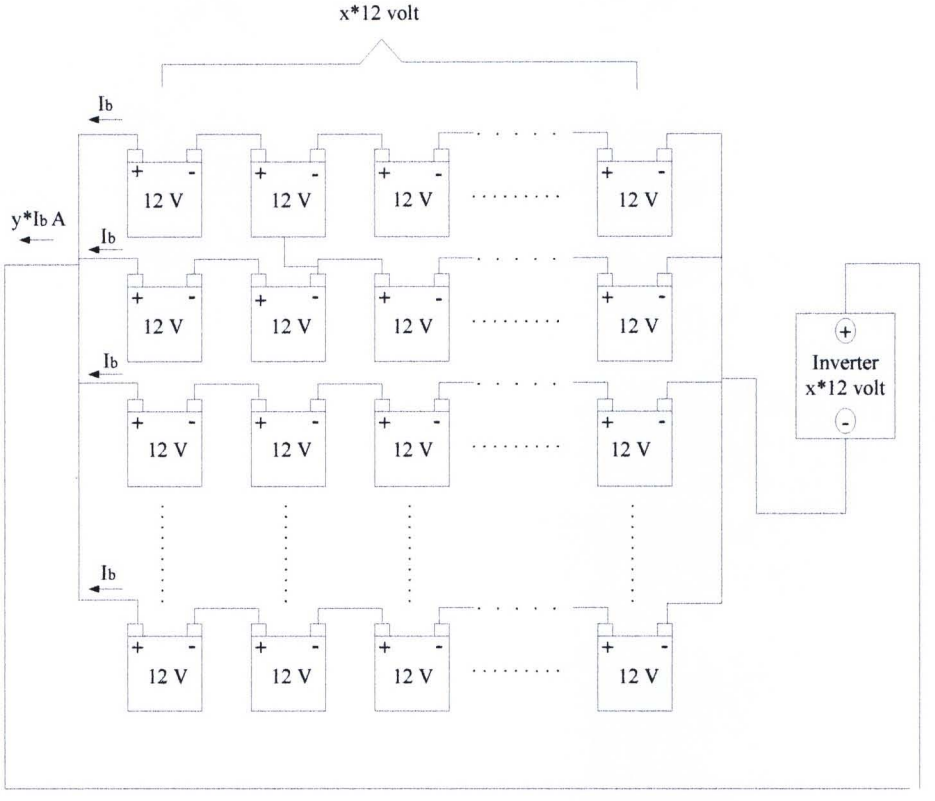
โดยที่

$R_{ch,b}$ คือ ความต้านทานของแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุ 4 แอมแปร์- ชั่วโมง ในช่วงที่แบตเตอรี่อัดประจุ

$R_{dch,b}$ คือ ความต้านทานของแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุ 4 แอมแปร์- ชั่วโมง ในช่วงที่แบตเตอรี่คายประจุ

เมื่อคำนวณขนาดความจุของแบตเตอรี่ที่ทุกช่วงเวลาได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะนำขนาดแบตเตอรี่นั้นมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ โดยขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมควรมีขนาดใหญ่พอที่จะรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด หลังจากได้ขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมแล้ว ขนาดแบตเตอรี่ดังกล่าวอาจมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดแบตเตอรี่ที่มีในท้องตลาดได้ ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงการต่อแบตเตอรี่หลายลูกเข้าด้วยกันเป็นชุดแบตเตอรี่ด้วย

ในทางปฏิบัติ เราจะทราบความจุของแบตเตอรี่ 1 ตัว ซึ่งสามารถเลือกได้จากข้อมูลของผู้ผลิต แต่เพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความจุแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ จึงต้องมีการนำแบตเตอรี่หลายๆ ตัวมาต่อแบบอนุกรมผสมขนานเป็นชุดแบตเตอรี่ เพื่อต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม



รูปที่ 4.7 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน

จากรูปจะพบว่าจะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน x คอลัมน์ต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันที่ต้องการ และใช้แบตเตอรี่จำนวน y แถว ต่อแบบขนานเพื่อให้ได้ความจุของแบตเตอรี่ตามต้องการ ซึ่งเราสามารถรู้ค่า x ได้จากแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงและขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่

เลือกใช้ และทราบค่า y โดยการนำความจุแบตเตอรี่ที่ได้จากคำนวณหารด้วยความจุแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ดังสมการ

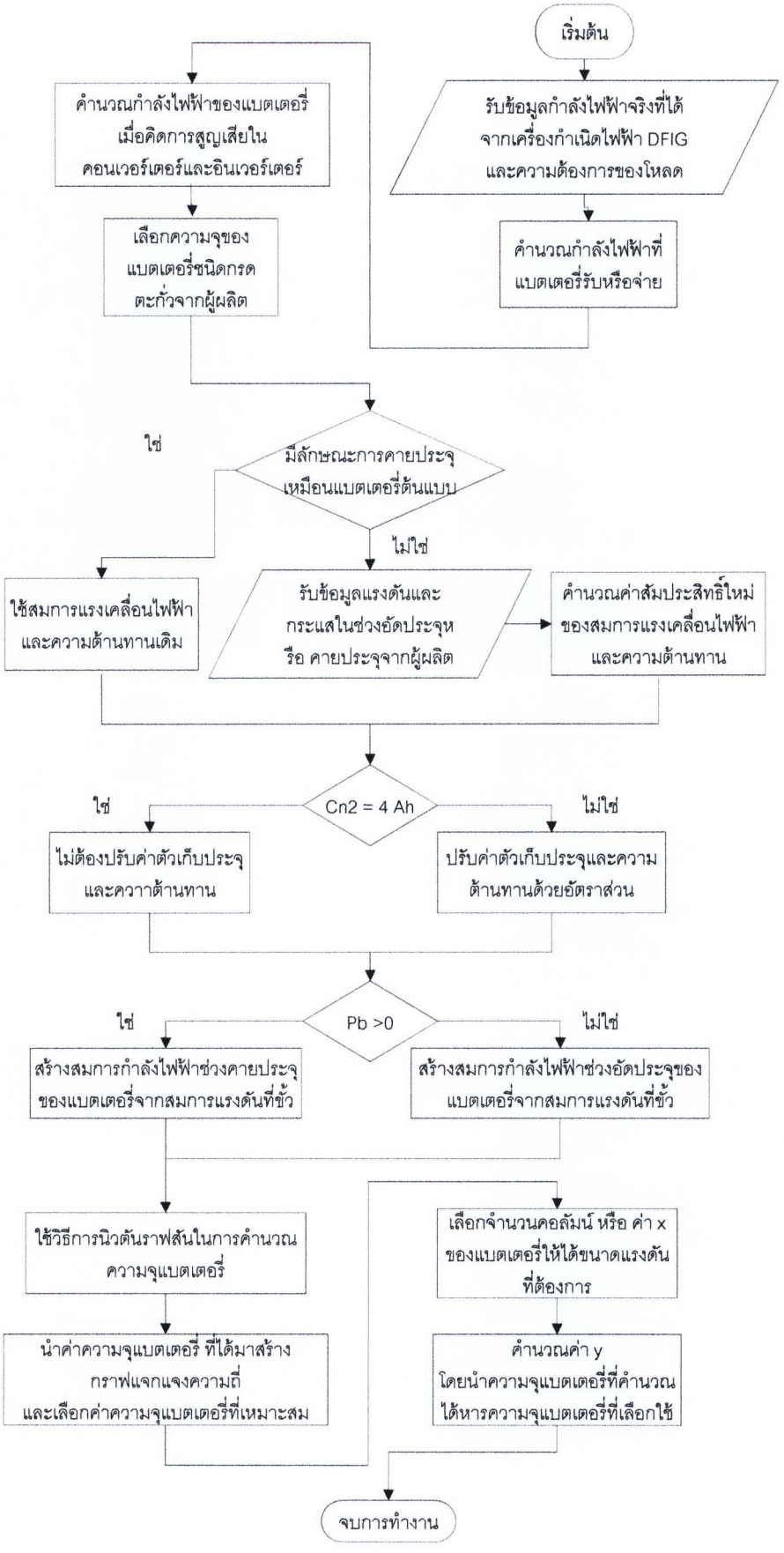
$$y = \frac{C_{n2}}{C_{ns}} \tag{4.33}$$

โดยที่

C_{n2} คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่ได้จากการคำนวณ (Ah)

C_{ns} คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ (Ah)

ขั้นตอนในการคำนวณค่าความจุของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมนี้ สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาค่าความจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสม