

## การวิเคราะห์วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดสำหรับ ประยุกต์ใช้ในงานพลังงานทดแทน Analysis of Equivalent Circuit of Lead Acid Battery for Renewable Energy Applications

นพรุจ ฤทธานนท์<sup>1</sup> กฤษณชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์<sup>1</sup> บุญยัง ปลั่งกลาง<sup>1</sup> วารุณี อริยวิริยะนันท์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ถนนรังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 0-2549-3571 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ในช่วงพลวัต ที่มีใช้งานมากในอุตสาหกรรม และ พลังงานทดแทน ซึ่งมีปัญหาเรื่องอายุการใช้งาน การควบคุมการประจุ และคายประจุที่ไม่ดี มีผลกระทบทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด สั้นกว่าที่ควรเป็น ดังนั้น บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ โดยออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และ ใช้วงจรประกอบวงจรไฟฟ้าแทนที่เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพล ต่ออายุการใช้งาน โดยมีการกล่าวถึง สถานะการประจุ(State-of-Charge,SOC) และ การคายประจุ(State-of-Discharge,SOD) ซึ่งผลที่ได้จะสามารถนำไปพัฒนาหรือเป็นแนวทางในการพัฒนาแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด จากผลการจำลองและทดลองในห้องปฏิบัติการ จะทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างชัดเจน สามารถเป็นข้อมูลเพื่อเป็นประโยชน์ ในการพัฒนาแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในอนาคตได้ต่อไป

คำสำคัญ: แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด, สถานะการประจุ(SOC), สถานะการคายประจุ(SOD)

### 1. บทนำ

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมในด้านอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด หลายประเภท นิยมเรียกชื่อกันตามสารที่ใช้ผสมหรือคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งแต่ละชนิด แต่ละประเภท มีขอบเขตการใช้งาน ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของแต่ละชนิด ปัญหาหลักของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด คือ อายุการใช้งานที่สั้นกว่าควรเป็น หรือ ช่วง Lifetime ด้วยจากสาเหตุต่างๆ เช่น ผู้ใช้งานขาดทักษะในการใช้งาน แบตเตอรี่ขาดการบำรุงรักษาที่ดี หรือ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ไม่เหมาะกับงาน หรือ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ไม่ดีพอ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรานำแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดไปใช้งานด้านพลังงานทดแทนซึ่งต้องมีการฟ่วงต่ออุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ ยิ่งมีผลกระทบกับการทำงานในการอัดประจุและคายประจุ ปัญหาเหล่านี้ หากเรามีการจำลองวงจรโดยออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และ ใช้วงจรประกอบวงจรไฟฟ้าแทนที่เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งาน เราก็สามารถเอาผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการสร้าง และ พัฒนา แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เพื่อให้เหมาะสมกับงานด้านพลังงานทดแทนต่อไป

งานวิจัยที่[1] ได้นำเสนอเซลล์แบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็ก 1Ah, 2Ah, 2.5Ah เปรียบเทียบรูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ที่แตกต่างกันระหว่างรูปทรงกระบอกและรูปทรงเซลล์แผ่นตามมาตรฐาน IEC โดยใช้วงจรประกอบวงจรไฟฟ้าแทนที่เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ทำการหาค่าเพื่อเปรียบเทียบชนิดของเซลล์แบตเตอรี่ทั้งสองชนิดเพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าสถานะในการอัดประจุ (State-of-Charge, SOC) ของแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด (Valve Regulated Lead-Acid ,VRLA)โดยใช้ค่ากำหนดทาง

มาตรฐาน IEC61056 ด้วยเรื่องของขนาดและชนิดของเซลล์ งานวิจัยที่[2] ได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับการทำนายผลทางไฟฟ้าจากการจำลองวงจรแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นวงจรทางไฟฟ้า เพื่อหาค่า สถานะภาพการอัดประจุ (State-of-Charge, SOC) สถานะภาพของแบตเตอรี่ (State-of-health, SOH) และ สามารถตรวจสอบ ความสามารถทำนายอาการในระบบไฟฟ้าและระบบไฟฟารวมในยานพาหนะ เพื่อเป็นพื้นฐานรูปแบบแบตเตอรี่ที่ทำงานในช่วงพลวัต ของระบบผสมผสาน งานวิจัยที่[3] นำเสนอรูปแบบของแบตเตอรี่ที่ใช้งานในช่วงพลวัต เพื่อใช้ประโยชน์เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ภายในบ้าน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดให้เหมาะสมกับงานและนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานทดแทนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด แต่ผลกระทบในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด หรือ คุณสมบัติทางสมรรถนะของแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด ยังมีข้อเสีย ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน

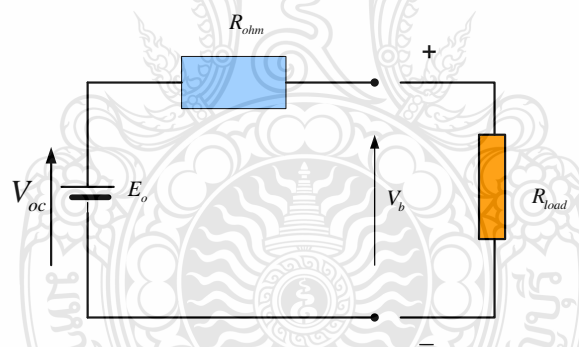
ดังนั้นบทความนี้แนะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ซึ่งทำงานในช่วงพลวัต

บทความนี้ประกอบด้วย 5 หัวข้อ หัวข้อที่ 1 ได้กล่าวถึงบทบาทของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด หัวข้อที่ 2 แนะนำแบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด หัวข้อที่ 3 การออกแบบวงจรทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด หัวข้อที่ 4 ผลการทดลองที่ห้องทดสอบและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด หัวข้อที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

## 2. แบบจำลองแบตเตอรี่

### 2.1 แบบจำลองพื้นฐานของแบตเตอรี่

จากรูปวงจรพื้นฐานนำมาเขียนให้เห็นในรูปวงจรทางไฟฟ้าให้ง่ายต่อการเห็นภาพจากรูป  $R_{ohm}$  คือ ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดซึ่งเกิดจากองค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด



รูปที่ 5 แบบจำลองพื้นฐานแบตเตอรี่

การประจุของรูปแบบแบตเตอรี่ค่าความต้านทาน  $R_{ohm}$  เป็นฟังก์ชันของการชาร์จ(SoC) มีรูปแบบดังรูปที่ 5 สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของวงจรได้จากสมการดังนี้

$$V_b = V_{oc} - I_b \cdot R_{ohm}$$

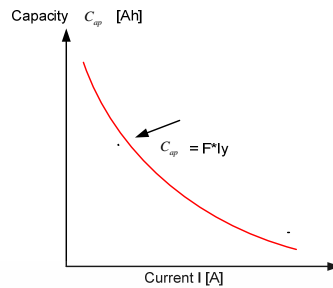
$$I_b = \frac{V_{oc}}{R_{ohm} + R_{load}} \quad (2)$$

$$R_{ohm} = \frac{R_o}{S^k} \quad (3)$$

$$S = 1 - \frac{Ah}{C_n} \quad (4)$$

เมื่อ S คือ ตัวแปรระหว่างประจุ และคายประจุ สามารถปรับค่าได้ ( 0 ถึง 1 ) ตามลำดับ , ( Ah ) A คือ กระแสที่คายประจุ h คือชั่วโมงที่คายประจุ, C คือ ขนาดของกระแสที่คายประจุ , n คือจำนวนชั่วโมงที่คายประจุ,  $V_{oc}$  คือ สถานะขณะ

สมมูลของวงจร,  $V_b$  คือ แรงดันขณะมีโหลด,  $I_b$  คือ กระแสขณะมีโหลด,  $R_{ohm}$  คือ ค่าความต้านทานในแต่ละช่วงของแรงดัน,  $R_o$  คือ ค่าความต้านทานในขณะที่แบตเตอรี่เต็ม,  $R_{load}$  คือ ค่าความต้านทานโหลด,  $S^k$  คือ ปรับค่าระดับในการประจุ(0-1) เมื่อประจุเต็ม(0),คายออก(1)



รูปที่ 6 ค่าความจุแบตเตอรี่กับการคายประจุออก

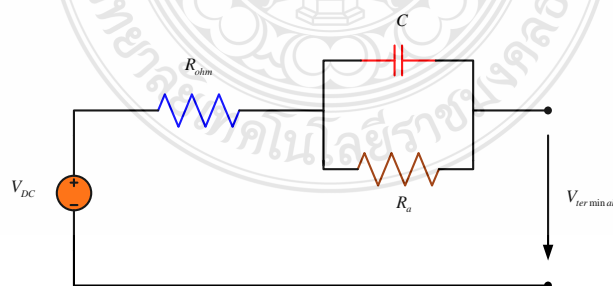
จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในการคายประจุเมื่อค่าความจุของคาปาซิเตอร์มากเมื่อคายประจุน้อยก็จะคายประจุได้นานตรงกันข้ามเมื่อคาปาซิเตอร์คายประจุมากก็จะมีระยะเวลาในการคายประจุน้อย จากแนวแกน x และ แนวแกน y มีค่าของความสัมพันธ์ของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง จากรูปค่าคาปาซิเตอร์ที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อชั่วโมงซึ่งทำหน้าที่เก็บประจุสามารถหาค่าความสัมพันธ์โดยมีกระแสคายประจุกับเวลาเป็นตัวแปรสามารถหาค่าคาปาซิเตอร์ได้จากสมการที่ 5

$$C_{ap} = F * I^y \quad (5)$$

เมื่อ  $C_{ap}$  คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)  $I$  คือ ค่ากระแสคายประจุ (A)  $F$  คือ คอนสแตนต์เฟคเตอร์ (h)

## 2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ตามสมการเทวินิน

พฤติกรรมของแบตเตอรี่เมื่อเราอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ถึงช่วงระยะเวลาหนึ่งเมื่อกระแสเต็มมันจะหยุดทำงานทันที แต่ก่อนที่กระแสจะหยุดทำงาน(Curren interruption) ซึ่งเราสามารถหาค่าความสัมพันธ์ คำนวณหาได้จากสมการเทวินิน ดังรูปที่ 7 จากรูปที่ 7 วงจรทางไฟฟ้าจากสมการเทวินินได้จำลองรูปแบบภายในแบตเตอรี่โดยมี  $R$  และ  $RC$  ขนาน สามารถเห็นภาพทางวงจรไฟฟ้า หาค่าความสัมพันธ์ของวงจรได้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองแบตเตอรี่ตามสมการเทวินิน

$$R_{Ohm} = \frac{\Delta V_{Ohm}}{I} \quad (6)$$

$$I = \frac{V_{DC} - V_C}{R_{ohm}} \quad (7)$$

$$R = \frac{\Delta V_a}{I} \quad (8)$$

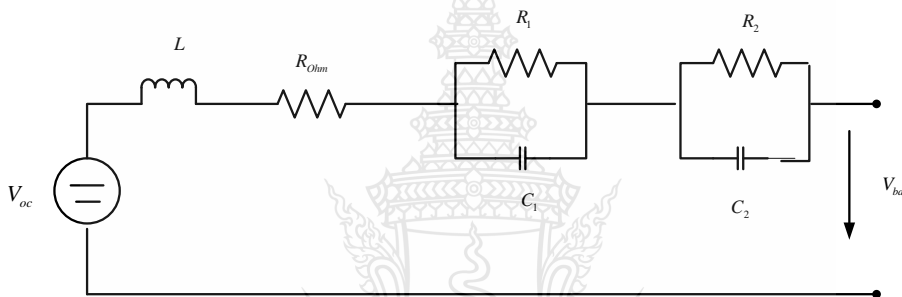
$$V_c = \int \frac{1}{C} \cdot (I - \frac{V_c}{R_a}) \cdot dt \quad (9)$$

$$C = \frac{\tau}{R} \quad (10)$$

$\Delta V_{ohm}$  คือ ค่า แรงดันในแต่ละช่วงของ, SOC คือ ค่า แรงดันส่วนต่างของแรงดันสูงสุด,  $R_{ohm}$  คือ ค่า คดท. ในแต่ละช่วงของ SOC,  $R_a$  คือ ค่าความต้านทานในขณะเปิดแบตเตอรี่เต็ม,  $I$  คือ ค่ากระแสในวงจร,  $C$  คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่,  $\tau$  คือ ช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

### 3. การออกแบบวงจรทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

คุณสมบัติในสภาวะการประจุแบตเตอรี่ อยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ไม่มีการประจุ หรือไม่มีการคายประจุ แรงดัน หรือเรียกช่วง (Voltage Open Circuit,  $V_{oc}$ ) จะขึ้นกับลักษณะการออกแบบแบตเตอรี่ ความถ่วงจำเพาะและอุณหภูมิ ( $V_{oc}$ ) สามารถหาค่าช่วงประจุ และ คายประจุจากวงจรสมมูลดังต่อไปนี้ รูปที่ 8 แบบจำลองวงจรสมมูลช่วงพลวัตไม่เชิงเส้นของแบบจำลองแบตเตอรี่ เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรสมมูลเทวินิน จะเห็นว่ามีส่วนตัวแปร อินดักแตนซ์  $C_2$  และ  $R_2$  เข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถหาค่า ความสัมพันธ์ของวงจรได้จากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 8 แบบจำลองวงจรแบตเตอรี่ขณะทำงานอยู่

$V_{oc}$  คือ สภาวะขณะสมดุลของวงจร,  $V_{bat}$  คือ แรงดันขณะมีโหลด,  $I_b$  คือ กระแสขณะมีโหลด,  $R_{ohm}$  คือ ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่,  $V_L$  คือ แรงดันตกคร่อมอินดักแตนซ์,  $V_{Rohm}$  คือ แรงดันตกคร่อม  $R_{ohm}$ , และ  $V_{C1}, V_{C2}$  คือ แรงดันตกคร่อม  $R_1, C_1$  และ  $R_2, C_2$  ตามลำดับ

$$V_{bat} = V_{oc} - V_L - V_{Rohm} - V_{C1} - V_{C2} \quad (11)$$

$$V_L = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

$$V_{Rohm} = R_{ohm} \cdot I \quad (13)$$

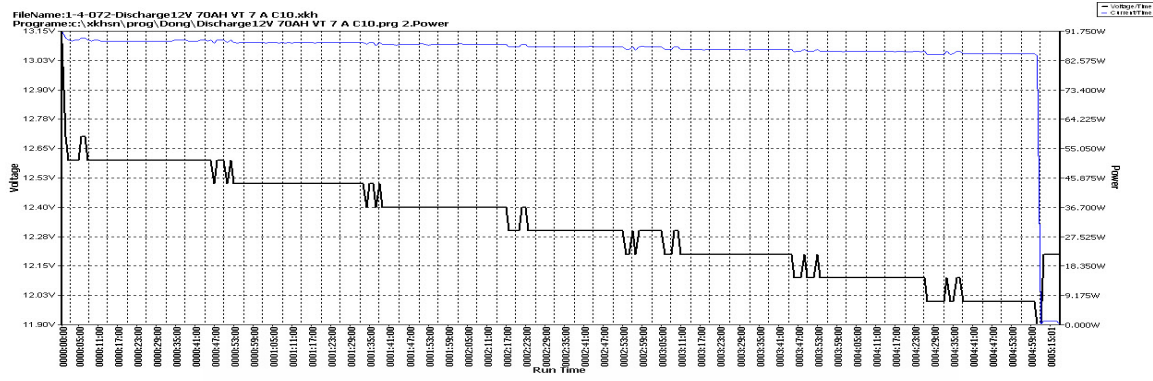
$$V_{C1} = \int \frac{1}{C_1} \cdot (I - \frac{V_{C1}}{R_1}) \cdot dt \quad (14)$$

$$V_{C2} = \int \frac{1}{C_2} \cdot (I - \frac{V_{C2}}{R_2}) \cdot dt \quad (15)$$

### 4. ผลการทดลอง

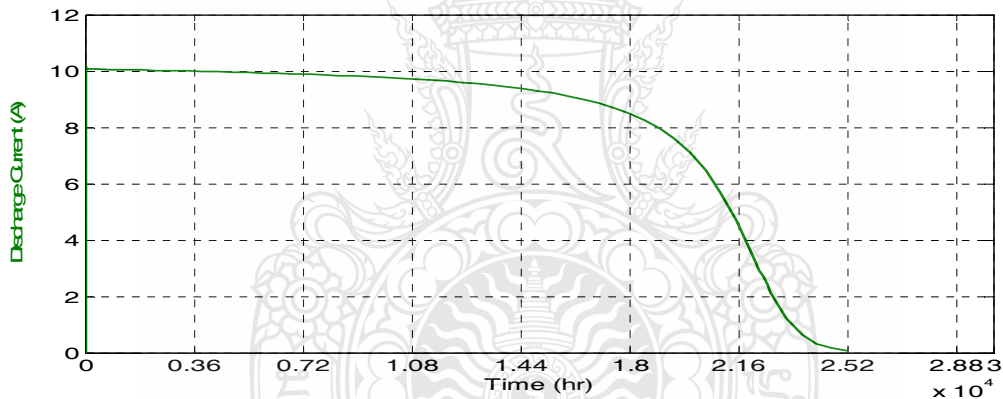
จำลองเหตุการณ์ขณะแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดทำงาน จ่ายให้กับโหลดขนาด 10AH. ในสถานะคายประจุ และ ทำการชาร์จกลับขณะที่โหลดหยุดทำงาน โดยทำการทดลองจากห้อง Lab และ ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก Matlab/Simulink ในขณะคายประจุที่ 10AH เป็นเวลา 7HR และ ทำการชาร์จกลับขณะที่ไม่มีโหลดและทำการเปรียบเทียบผลที่ได้

#### 4.1 การทดสอบคายประจุ



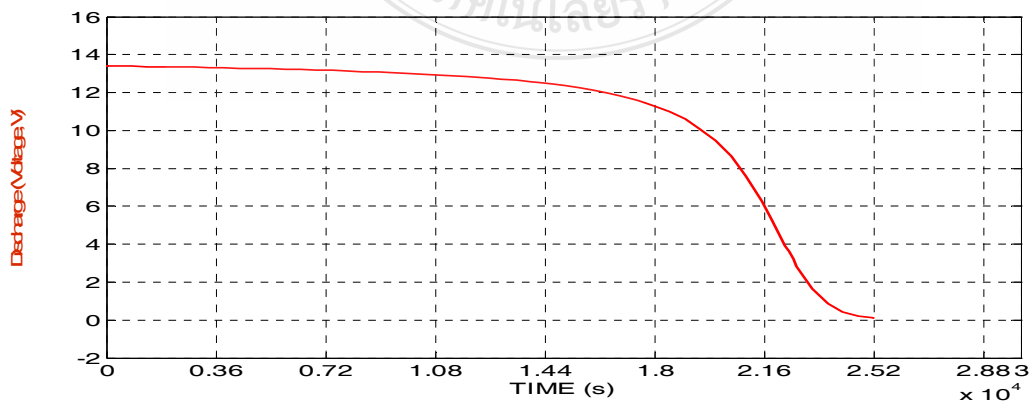
รูปที่ 9 การทดสอบคายประจุ

จากรูปที่ 9 เป็นการทดสอบการคายประจุที่ห้องทดสอบพลังงานชั้น6อาคาร9ชั้นที่มทร.คลองหกที่อุณหภูมิปกติที่ 25 องศาเซลเซียสจากรูปจะเห็นพฤติกรรมของลักษณะการคายประจุเมื่อถึงณ.เวลาใดๆ แรงดันจะค่อยๆตก เหมือนกับเส้นกระแสต้านรูปที่9 เมื่อแรงดันค่อยๆลด กระแสก็ลดตามด้วยจนถึงจุดๆหนึ่งที่แบตเตอรี่ยอมให้แรงดันต่ำสุดคงอยู่ กระแสก็จะตั้งลงจากรูป

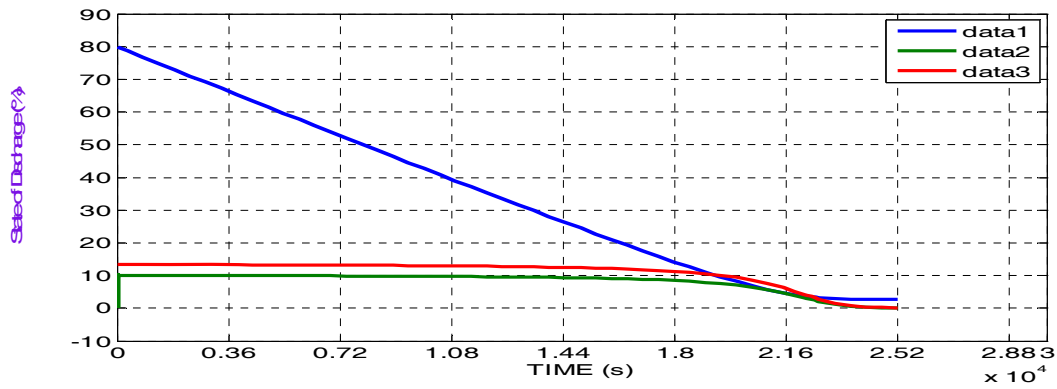


รูปที่ 10 รูปกระแสในสถานะคายประจุ

รูปที่ 10 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางวงจรไฟฟ้าของกระแส ที่ได้จากการคายประจุที่10AHเมื่อเทียบเวลา 1 ชั่วโมงเป็น วินาที



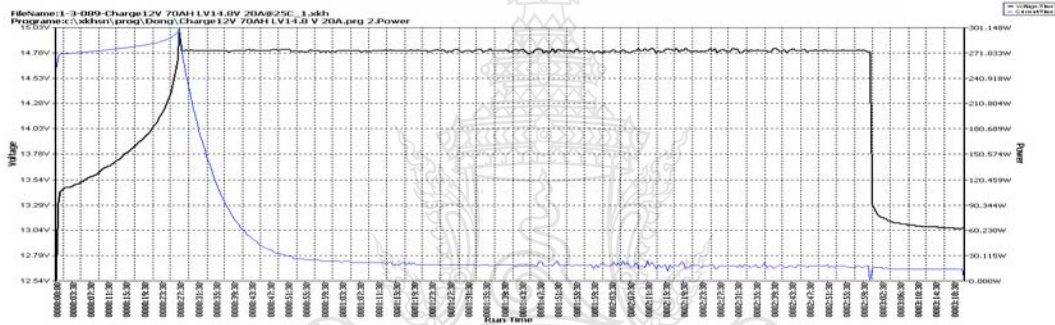
รูปที่ 11 ผลแรงดันขณะคายประจุที่แรงดัน 13.2 V<sub>DC</sub>



รูปที่ 12 State-of-Discharge (%)

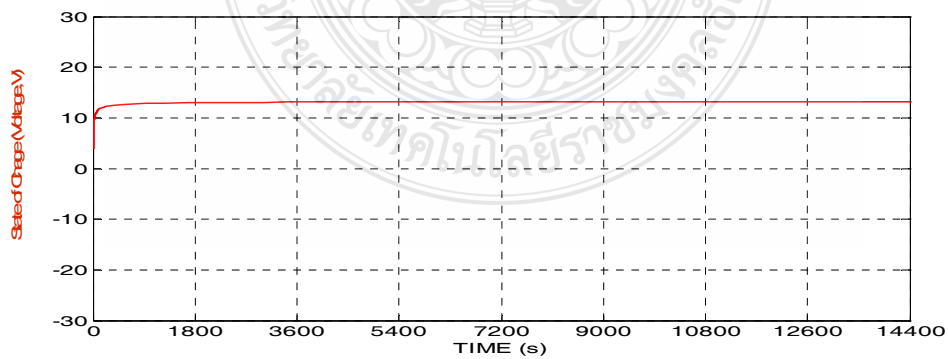
รูปที่ 12 ผลจากการคายประจุ data1คือค่าที่กำหนดค่า SOCที่80% data2 คือ ค่าของกระแสคายประจุ data3 คือ แรงดันขณะคายประจุที่แรงดันสูงสุดที่ 13.2V

#### 4.2 การทดสอบการประจุ



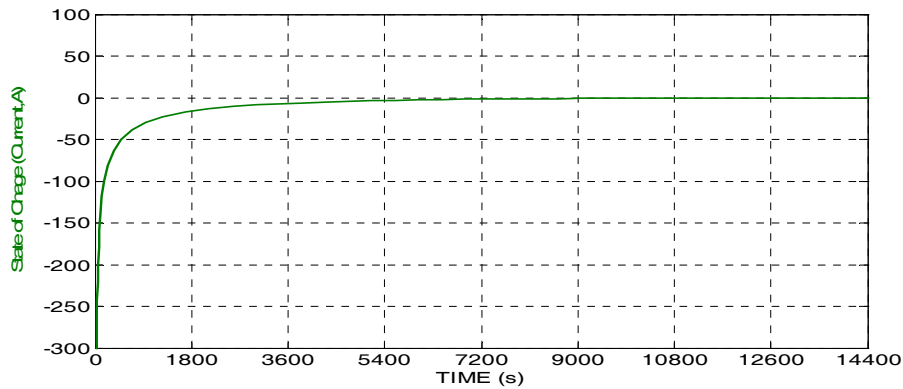
รูปที่ 13 การทดสอบการประจุ

จากรูปที่ 13 เป็นการทดสอบอัดประจุที่ 30% ของค่าคาปาซิที คือ 20A จะสังเกตเห็นเมื่อแรงดันถึงจุดๆที่ตั้งไว้ที่ เครื่องทดสอบช่วงที่แรงดันทำงานคงที่ กระแสก็จะดิ่งลง



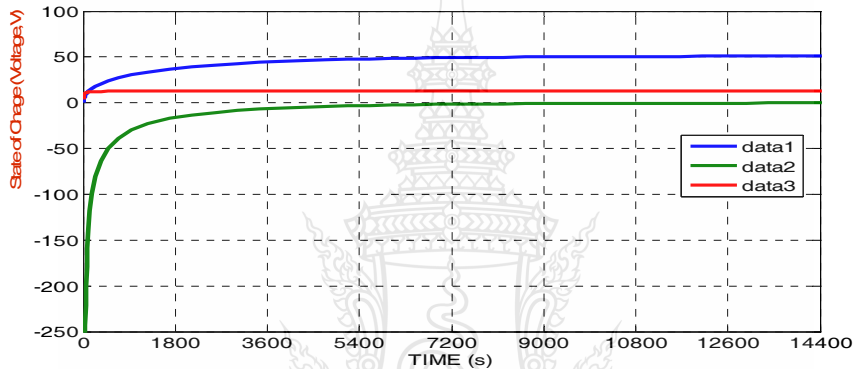
รูปที่ 14 ผลแรงดันขณะประจุที่แรงดัน 13.2

รูปที่ 14 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางวงจรไฟฟ้า เมื่อทำการประจุแรงดันที่ 13.2 V<sub>DC</sub> ในแกน Y ในแนวแกน X เทียบเวลา 1ชั่วโมงเป็น วินาที



รูปที่ 15 รูปกระแสในสถานะประจุ

รูปที่ 15 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางวงจรไฟฟ้าของกระแสขณะทำการประจุสถานะไม่มีโหลด  
ผลที่ได้จากการประจุเมื่อเทียบเวลา 1 ชั่วโมงเป็น วินาที



รูปที่ 16 State-of-Charge (%)

รูปที่ 16 ผลจากการประจุ data1 คือ ผลสถานะการประจุ (%SOC), data2 คือ ผลกระแสขณะประจุ, data3 คือ ผลแรงดันขณะประจุ 13.2V

## 5. สรุป

จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และ ใช้อ็กรประกอบวงจรไฟฟ้าแทนที่เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีลักษณะผลที่ได้สอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากห้องทดสอบ ถึงผลที่ได้ ยังคงไม่ดี แต่ผลที่ได้ออกมาเป็นตัวจุดประกายแนวทางที่หน้าจะเป็น และ เป็นไปได้ในการการจำลองวงจรทางไฟฟ้าเป็นวงจรภายในของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ซึ่งจะมีผลดี คือ สามารถทำนายผลอายุการทำงาน ( Lifetime ) ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดได้ ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ภายในได้ ยังคงต้องทดลองและทดสอบเพื่อให้ได้มาเพื่อพัฒนาแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดให้ดียิ่งๆขึ้นไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Salkind, T. Atwater, " Dynamic characterization of Small lead – acid cells" Journal of power Sources 96 (2001) 151-159.
- [2] H. Blanke, O.Bohlen, S.Buller, "Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electri vehicles" Journal of power Sources 144 (2005) 418-425

- [3] M.Durr, A.Crudon, "Dynamic model of a lead-acid battery for use in a domestic fuel cell system" Journal of power Sources 161(2006) 1400-1411.
- [4] Lucia Gauchia Babe, Javier Sanz Feito, "Nonlinear dynamic per-unit models for electrochemical energy systems. Application to a hardware-in-the-loop hybrid simulation", Universidad Carlos III de Madrid, Leganes 2009
- [5] Shalini Rodrigues, N. Munichandraiah, A.K. Shukla "A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements" Journal of power Sources 87(2000) 12-20
- [6] X.Yuan, J.Sun, M. Blanco, H.Wang J. Zhang, "AC impedance diagnosis of a 500 W PEM fuel cell stack. Part I: Stack impedance," Journal of Power Sources, vol.161, pp.920-928, October 2006.
- [7] P. Mauracher \*, E. Karden "Dynamic modeling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification" Aachen University of Technology, Institute for Power Electronics and Electrical Drives. Jägerstraße 17-19, 52066 Aachen, Germany Received 28 August 1996; accepted 16 December 1996

