

## การจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์ Simulation of a Solar Energy System

เผด็จ เผ่าละออ<sup>1</sup> สราวุฒิ สุจิตจร<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ผู้ช่วยวิจัย <sup>2</sup>รองศาสตราจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ABSTRACT** – This article reports our developed simulation program for a solar energy system. The mathematical models of various components are described. These include solar cells, batteries, motor, and helical pump. The motor and pump is a coupled load. Solar cells are weather dependent sources. Batteries act in two modes of either sources or loads. Due to the component's nonlinearity and insolation characteristic, the simulation program is necessary and useful for energy studies in such a system.

**KEY WORDS** – solar energy, photovoltaic, simulation

**บทคัดย่อ** – บทความนี้นำเสนอการจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พร้อมรายละเอียดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกับแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงาน จ่ายให้มอเตอร์และปั๊มพหุหอยโข่งที่เป็นโหลดของระบบ แบตเตอรี่บางขณะเป็นแหล่งพลังงานบางขณะเป็นโหลด แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของส่วนประกอบต่างๆ รวมจนถึงความเข้มแสงอาทิตย์ การมีโปรแกรมจำลองผลจึงจำเป็นและจะมีประโยชน์ต่อการศึกษาด้านพลังงานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

**คำสำคัญ** – พลังงานแสงอาทิตย์, โฟโตโวลตาอิก, การจำลองผล

### 1. บทนำ

ประเทศไทยอยู่ในภูมิภาคที่ได้รับแสงอาทิตย์ค่อนข้างคงที่ ตลอดทั้งปี นับว่าคืออย่างยิ่งที่จะนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดมาใช้ประโยชน์ การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้า อาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีลักษณะการใช้งานไม่ยุ่งยาก เพราะให้อายุที่ทนทานไม่เป็นเชิงเส้น ผันแปรไปตามโหลด ปริมาณแสงที่กระทบและอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม นอกจากนั้น ยังมีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง แต่เนื่องจากในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเพียงทางเลือกเดียว สำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์ การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องให้ได้คุ้มค่าต่อการลงทุน

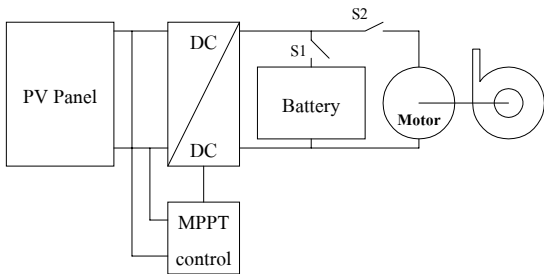
งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ สนใจระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปฏิบัติงานในพื้นที่ทุรกันดารที่จำเป็น เช่น สถานพยาบาล สถานีอนามัย ที่อาจมีเหตุการณ์ฉุกเฉิน หรือแม้กระทั่งแหล่งท่องเที่ยวตามอุทยานต่างๆ การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีแหล่งพลังงานสำรองให้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาถึงความ

ต้องการระบบดังกล่าวสำหรับประเทศกำลังพัฒนา แหล่งพลังงานที่นำเชื้อเพลิงและราคาถูก คงเป็นแบตเตอรี่รถยนต์ ซึ่งก็ต้องยอมรับในความยุ่งยากด้านการบำรุงรักษา และลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากของแบตเตอรี่ การจะทำความเข้าใจให้ได้ถึงพลวัตของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นนี้ คงต้องอาศัยความรู้ด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการจำลองผล บทความนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อกันดังรูปที่ 1 และอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลตลอดจนแสดงผลที่ได้จากการใช้งานโปรแกรม ซึ่งพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB<sup>TM</sup>

### 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

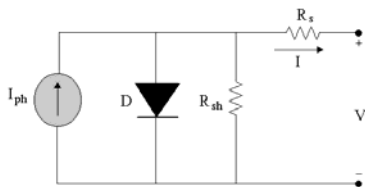
ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีองค์ประกอบดังรูปที่ 1 มอเตอร์ขนาด 2.5 hp พร้อมปั๊มพหุหอยโข่งเป็นโหลดที่ต้องใช้งานทั้งช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืน โดยสมมติให้ใช้งานในช่วงเวลากลางวันที่มีแสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00น.) และใช้งานในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มี

แสงอีก 6 ชั่วโมง ซึ่งต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจำนวนมาก เป็นแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดซึ่งใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองในช่วงเวลากลางคืน และกลางวันไฟฟ้าเปิด ในบางโอกาสแบตเตอรี่เหล่านี้ก็จะเป็นโหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วยถ้าอยู่ในช่วงชาร์จ แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักที่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ พร้อมทั้งจ่ายให้แก่มอเตอร์ภายในช่วงระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง ส่วนช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง ก็เป็นหน้าที่ของแบตเตอรี่ที่ต้องดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ โดยแบตเตอรี่จะต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงทั้ง 6 ชั่วโมงนี้ด้วย จากการพิจารณาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ จึงประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 96 โมดูล ต่อเป็นแผงขนานกัน 12 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีเซลล์แสงอาทิตย์ 8 โมดูลต่ออนุกรมกันอยู่ และประกอบด้วยแบตเตอรี่จำนวนทั้งหมด 20 ลูก ต่อเป็นแผงขนานกัน 2 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีแบตเตอรี่ 10 ลูกต่ออนุกรมกันอยู่ การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่าต้องพึ่งพาชุดควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT control) และ ดีซีดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าออกมาสูงสุด องค์ประกอบต่างๆ ของระบบมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1. ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2. วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมายถึง อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก ที่ได้รับการสร้างประกอบขึ้นเป็นแผง วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [1] แสดงได้ดังรูปที่ 2 ปกติความต้านทานขนาน

รอยต่อ p-n ( $R_{sh}$ ) มีขนาดใหญ่มาก และความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และจุดเชื่อมต่อ ( $R_s$ ) มีค่าน้อยมาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเขียนแสดงได้ดังนี้

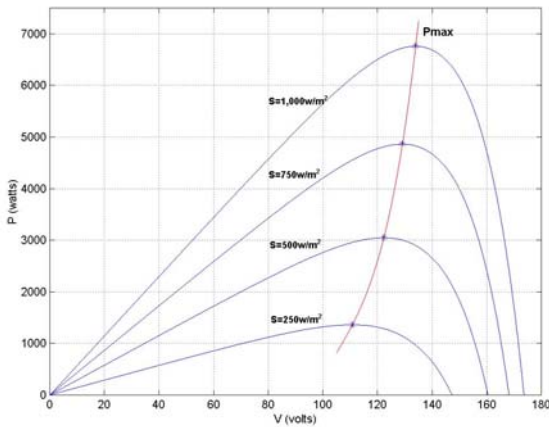
$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

- ซึ่ง
- $I_{ph}$  คือ กระแสโฟโต (A)
  - $I_{rs}$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
  - $n_p$  คือ จำนวนโมดูลที่ต่อขนานกัน
  - $n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน
  - $q$  คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)
  - $k$  คือ ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)
  - $A$  คือ ค่าคงที่ตัวประกอบของรอยต่อ p-n
  - $T$  คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

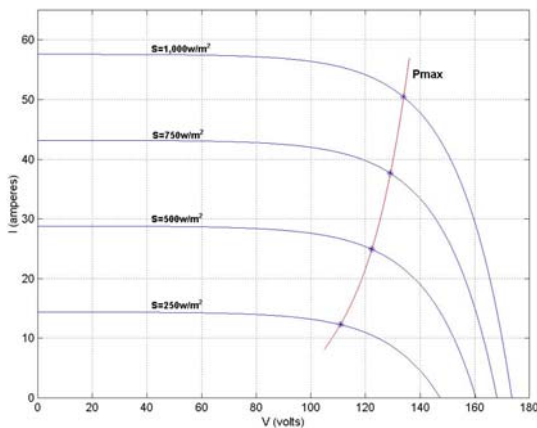
ข้อมูลในการจำลองผล ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของซีเมนส์ SP-75W [2] โมดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 36 เซลล์ต่ออนุกรมกัน มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  (peak power)
- อุณหภูมิ  $38^\circ\text{C}$  (311 K)
- $A=2.46$  (มีค่าอยู่ระหว่าง 1-5) [1]
- กำลังไฟฟ้าพิคก 75 W; กระแสพิคก 4.4 A
- แรงดันพิคก 14–17 V;  $I_{ph}=4.8$  A
- แรงดันขณะเปิดวงจร 21.7 V;  $R_s \approx 0 \Omega$

กรณีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SP-75W นี้ ค่า  $n_s=36$  ขณะที่  $n_p=1$  จากสมการที่ (1) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีโหลด คำนวณได้ว่า  $I_{rs}=5.1768 \times 10^{-4}$  A โดยสมมติให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ตลอด ในการใช้งานให้บรรลุตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ จะต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 96 โมดูล โดยแบ่งเป็นจำนวนโมดูลที่อนุกรมในแต่ละแผงเท่ากับ 8 ( $n_s=8 \times 36$ ) และจำนวนโมดูลที่ต่อขนานกันของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 12 ( $n_p=12$ )



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค้นแปรไปตามความเข้มแสงอาทิตย์ การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่า อาศัยกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุดหรือ MPPT โดยหลักการแล้วอุปกรณ์ MPPT จะจัดการให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ระดับสูงสุดสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ (S) ในขณะนั้น ในทางปฏิบัติตัวควบคุม MPPT ทำงานควบคู่ไปกับ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องทำงานด้วยอัตราส่วนการแปลง D (transformation ratio) ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของแหล่งพลังงานและโหลด

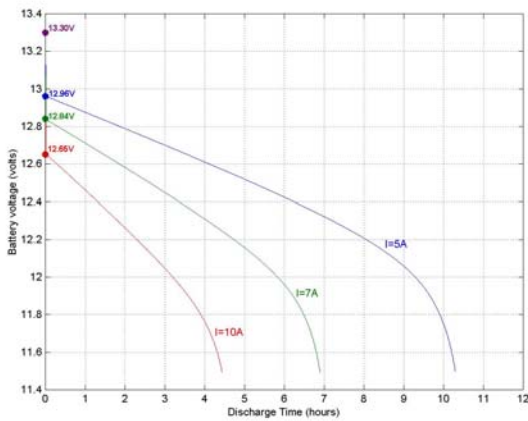
## 2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแม้ว่าจะมีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ แต่ก็ยังมีลักษณะสมบัติการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากทั้งในขณะชาร์จและคายประจุ สมการที่ (2) อธิบายกระบวนการชาร์จและคายประจุ [3] รูปสมการที่ปรากฏขณะใช้สำหรับช่วงการคายประจุ สำหรับช่วงชาร์จเครื่องหมายลบทางขวาของสมการที่ (2) จะเปลี่ยนเป็นบวกทั้งหมด

$$V_b = V_0 - (R_{tot} \cdot I) - \left[ K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t - \left[ \frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2)$$

- ซึ่ง
- $V_b$  คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V)
  - $V_0$  คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)
  - $R_{tot}$  คือ ความต้านทานภายในรวม ( $\Omega$ )
  - $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ (A)
  - $C$  คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
  - $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการคายประจุ (ชาร์จ) แบตเตอรี่ (h)
  - $n$  คือ Peukert's exponent
  - $K1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก Peukert's equation
  - $K2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตก (เพิ่ม) กระทั่งหมดเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ (ชาร์จ) ใกล้เคียง (เต็ม)

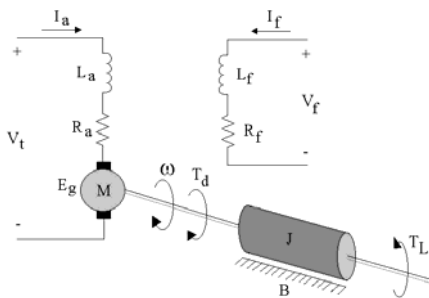
จากสมการที่ (2) จะพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัวเท่านั้น ซึ่งสภาวะชั่วคราวเกิดขึ้นได้ในจังหวะที่แบตเตอรี่เปลี่ยนการทำงานจากสภาวะชาร์จเป็นคายประจุ และกลับไปมาด้วยช่วงเวลาสั้นมากคิดเป็นเพียงมิลลิวินาที จึงไม่คำนึงถึงในที่นี้ ดังนั้น จึงพิจารณาวัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่เป็น 3 ช่วง [4] กล่าวคือ ช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่หรือ CCC (constant current charge) ช่วงชาร์จด้วยแรงดันคงที่หรือ CVC (constant voltage charge) และช่วงคายประจุด้วยกระแสคงที่หรือ CCD (constant current discharge) ข้อมูลในการจำลองผล ใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของ CELTIC [5] แรงดันปกติ 12 V ค่าความจุที่ 70 Ah ค่า  $R_{tot}$  ขณะคายประจุและชาร์จเท่ากับ  $6.15 \cdot 10^{-2} \Omega$  และ  $6.56 \cdot 10^{-2} \Omega$  ตามลำดับ ค่า  $K1$  และ  $K2$  ขณะคายประจุและชาร์จมีค่าเท่ากันเท่ากับ 0.90 และ 2.2 ตามลำดับ และค่า  $n$  ขณะคายประจุและชาร์จเท่ากับ 1.16 และ 1.00 ตามลำดับ ส่วนค่าช่วงแรงดันขณะคายประจุมีค่าแรงดันสูงสุด 13.3 V และแรงดันต่ำสุด 11.5 V และค่าช่วงแรงดันขณะชาร์จมีค่าแรงดันต่ำสุด 11.8 V และแรงดันสูงสุด 14.1 V นำค่าข้อมูลขณะคายประจุแทนค่าในสมการที่ (2) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุเทียบกับเวลา เมื่อพิจารณาอัตราการคายประจุคงที่ที่ 5, 7 และ 10 A ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งอาจสังเกตเห็นว่า ขณะเริ่มคายประจุแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะตกลงอย่างรวดเร็วจากแรงดันสูงสุด ซึ่งมีสาเหตุจากค่าความต้านทานภายในรวมของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะตกลงอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายในรวม



รูปที่ 5. แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะคิซหารัจ

### 2.3 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและปัมป์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณาในงานนี้เป็นแบบกระตุ้นฟิลด์แยก ส่วน โดยมีวงจรมูลดังรูปที่ 6 [6] เมื่อใช้งานมอเตอร์ด้วยการปรับแรงดันอาร์เมเจอร์โดยมีความเข้มสนามเต็มพิกัด สามารถอธิบายการทำงานของมอเตอร์ด้วยแบบจำลองดังสมการที่ (3)



รูปที่ 6. วงจรมูลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

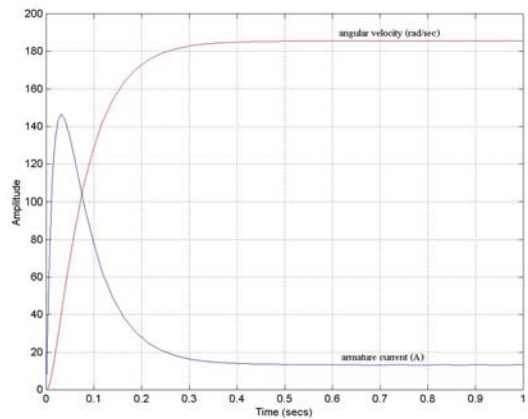
$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & -k_b \\ L_a & L_a \\ k_t & -B \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

- เมื่อ  $V_t$  คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านอาร์เมเจอร์ (V)  
 $I_a$  คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)  
 $L_a$  คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)  
 $R_a$  คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ ( $\Omega$ )  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)  
 $J$  คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์ ( $\text{Kg.m}^2$ )  
 $B$  คือ วิสคอสฟริกชันของมอเตอร์ ( $\text{N.m/rad/sec}$ )  
 $E_g$  คือ แรงดันย้อนกลับ:  $k_b\omega$  (V)  
 $T_L$  คือ แรงบิดของโหลด (N.m)

ข้อมูลในการจำลองผลของมอเตอร์ [7] มีดังนี้

- ขนาดพิกัด 110 V, 20 A, 2.5 hp , 1800 rpm , 9.89 N-m
- $R_a = 0.6 \Omega$ ,  $L_a = 8 \text{ mH}$
- $J = 0.0465 \text{ kg-m}^2$ ,  $B = 0.004 \text{ N-m.sec/rad}$
- $k_t$  (N-m/A) =  $k_b$  (V/rad/sec) = 0.55 N-m/A

โหลดที่มอเตอร์ขับในที่นี้คือปัมป์หอยโข่ง (helical pump) ซึ่งมีแรงบิดขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ กล่าวคือ  $T_L = k\omega^2$  ซึ่ง  $k$  คือค่าคงที่ของปัมป์ มีค่าเท่ากับ  $1.898 \times 10^{-4} \text{ N-m/(rad/sec)}^2$  [8] เมื่อนำข้อมูลในการจำลองผลของปัมป์และมอเตอร์แทนค่าในสมการที่ (3) เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า  $I_a$  และ  $\omega$  เทียบกับเวลา โดยป้อนแรงดันที่ค่าพิกัด  $V_t = 110 \text{ V}$  ซึ่งกำหนดให้ที่เวลาเป็นศูนย์ ค่า  $I_a$  และ  $\omega$  มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7

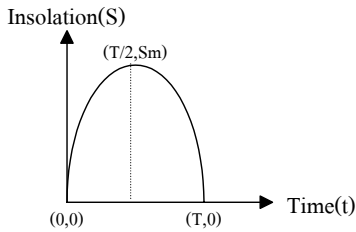


รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 7 จะสังเกตเห็นว่ากระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง จากนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 13.25 A ส่วนความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 185.56 rad/sec หากพิจารณาการมินิไมซ์กำลังสูญเสียในมอเตอร์ กระแสอาร์เมเจอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 12.49 A เท่านั้น

### 2.4 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์

จากข้อมูลดาวเทียม GMS 4 และ GMS 5 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2536 ถึง ธันวาคม 2541 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation, S) ทั่วประเทศไทยจากทุกพื้นที่จะมีค่าเท่ากับ  $18.2 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$  [9] หรือโดยประมาณเท่ากับ  $5 \text{ kw.hr/m}^2/\text{day}$  โดยงานวิจัย [10] ได้เสนอค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ ดังรูปที่ 8 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่สอดคล้องกับความเป็นจริงในวันที่ฟ้าเปิด (sunny day)



รูปที่ 8. ลักษณะของรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ

เมื่อ A คือพื้นที่ใต้กราฟของรูป และ p คือระยะจากจุดยอดไปตามแกนพาราโบลา จะได้ว่า

$$A = \int_0^T S dt = \int_0^T S_m dt - \frac{1}{4p} \int_0^T \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 = S_m T - \frac{T^3}{48p} \quad (4)$$

จะได้ค่าความเข้มแสง S สัมพันธ์กับเวลา t ดังสมการที่ (5)

$$S = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T}\right) - \frac{6A}{T^3} \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 \quad (5)$$

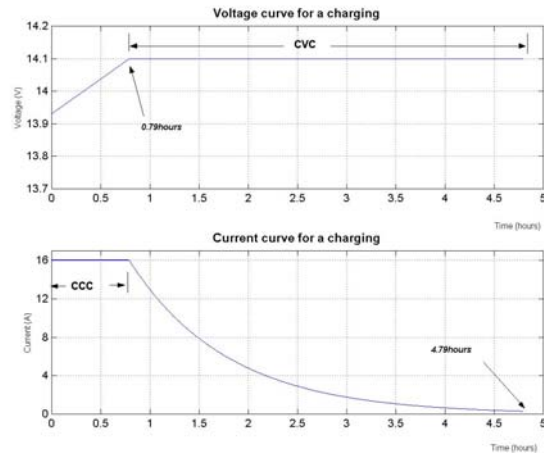
โดยพื้นที่ใต้กราฟ A เท่ากับ 5,000 w.hr/m<sup>2</sup>/day และใน 1 วัน จะกำหนดให้มีแสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) ดังนั้น T = 8 hr. ซึ่งจากสมการที่ (5) จึงได้

$$S = 937.5 - 58.59(t - 4)^2 \quad (6)$$

### 3. การชาร์จแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ทั้ง 20 ลูก ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ต่อเป็นแผงขนานกัน 2 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่ การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละแผง อาจแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ CCC และ CVC ดังรูปที่ 9 โดยช่วง CCC เป็นการชาร์จด้วยอัตรากระแสคงที่ 16 A นาน 0.79 ชั่วโมง [11] ในช่วงนี้ค่าแรงดันแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าแรงดันสูงสุด จากนั้นก็ดำเนินการชาร์จในช่วง CVC ต่อทันที ก่อนที่จะเกิดแรงดันเกินในแบตเตอรี่ ในช่วง CVC ต้องทำการลดปริมาณกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจนเกือบเป็นศูนย์เพื่อรักษาแรงดันในช่วง CVC ให้คงที่อยู่ที่ระดับสูงสุดประมาณ 4 ชั่วโมง จึงจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับการชาร์จอย่างสมบูรณ์ [11] ในช่วงที่สองนี้ อัตราการชาร์จจึงอธิบายได้ด้วยฟังก์ชัน  $16 \cdot \exp(-t)$  การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละแผงจึงต้องการเวลา 4.79 ชั่วโมง แบตเตอรี่ทั้งสองแผงจะเริ่มชาร์จไม่

พร้อมกัน โดยจะเริ่มชาร์จเป็นลำดับที่ละแผงตามค่าความเข้มแสงที่พอเพียงต่อแบตเตอรี่แผงนั้นๆ

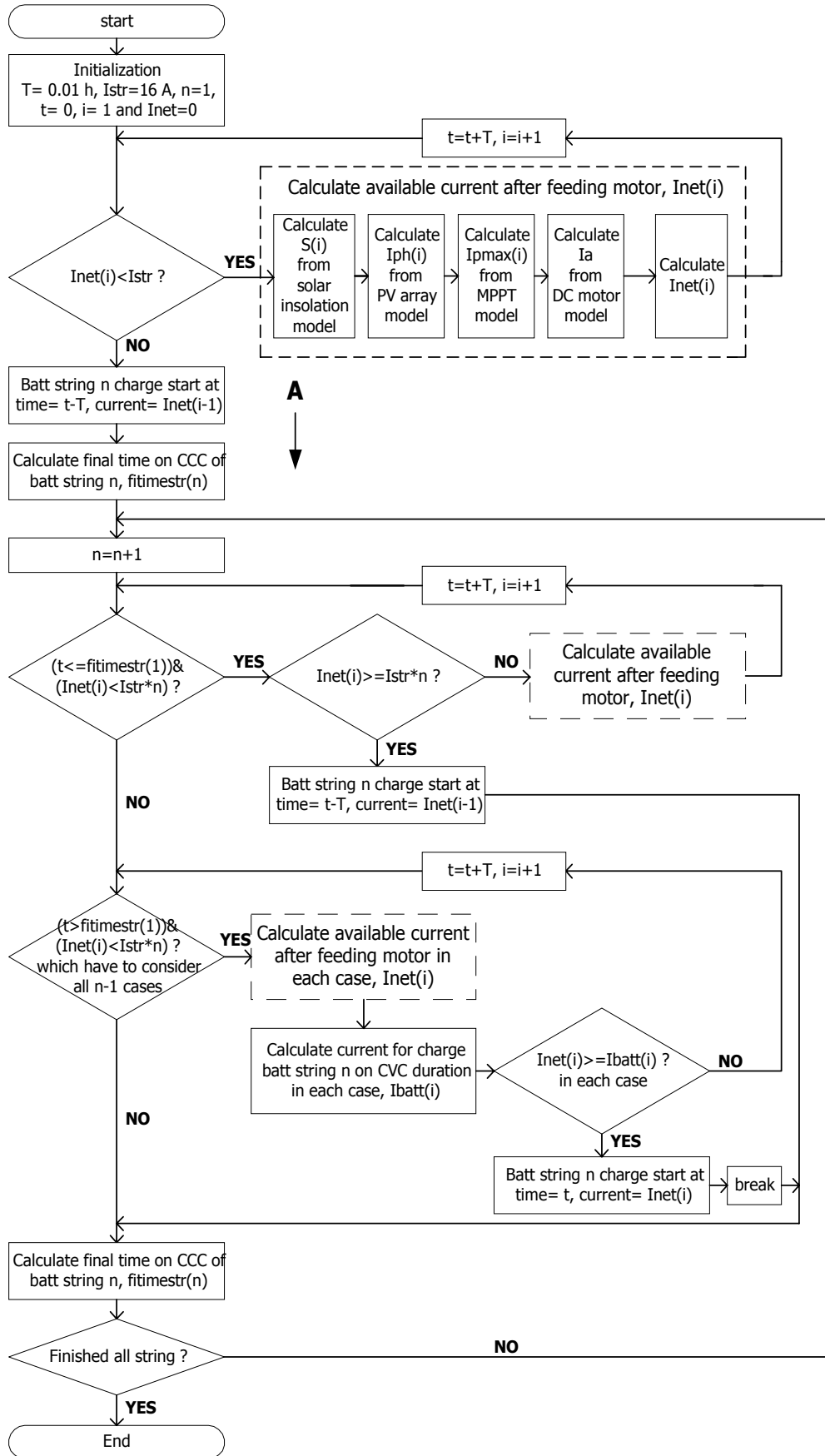


รูปที่ 9. ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

### 4. การจำลองผลระบบ

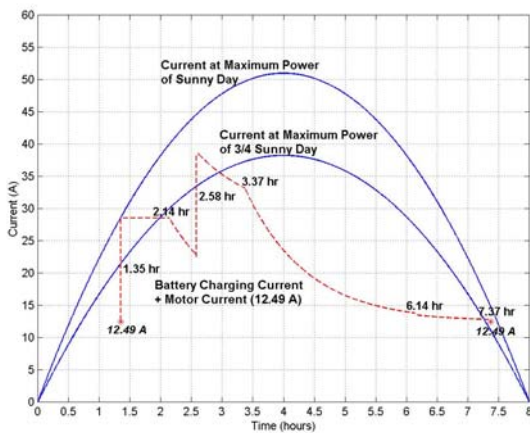
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ได้รับการบูรณาการขึ้นเป็นชุดโปรแกรมจำลองผล ที่มีโครงสร้างผังแผนภูมิในรูปที่ 10 ส่วนหนึ่งของโปรแกรมจำลองผล ดำเนินการเกี่ยวกับโหมดการชาร์จแบตเตอรี่ ดำเนินการเริ่มที่ตำแหน่ง A ในแผนภูมิลงไปจนถึงสิ้นสุด

ตัวอย่างหนึ่งของการใช้โปรแกรมจำลองผลนี้ เพื่อศึกษาการใช้พลังงานในระบบแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งให้รายละเอียดการดึงกระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เส้นโค้งรูปพาราโบลาเส้นบนแสดงปริมาณกระแสซึ่งให้กำลังงานสูงสุดที่จะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วง 8 ชั่วโมงในเวลากลางวัน (08.00-16.00น.) ของวันที่ฟ้าเปิด (ความเข้มแสงอาทิตย์ 5 kw.hr/m<sup>2</sup>/day) เป็นกรณีที่ดีที่สุดซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จริงในประเทศไทย ช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว เส้นโค้งรูปพาราโบลาเส้นล่างแสดงสิ่งเดียวกัน ในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 3/4 ของวันที่ฟ้าเปิดเพื่อเปรียบเทียบเส้นประแสดงปริมาณกระแสที่จ่ายมอเตอร์ 12.49 A ยืนยันพร้อมกันกระแสที่อาจดึงไปเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ ผลดังที่แสดงให้ความหมายว่า การชาร์จแบตเตอรี่ทั้งสองแผงจะทำได้ภายในช่วงเวลากลางวันใน 1 วันนั้นก็เฉพาะกรณีวันที่ฟ้าเปิดเท่านั้น หากเหตุการณ์ไม่เป็นดังนั้นอย่างเช่นความเข้มแสงอาทิตย์อ่อนลงเป็น 3/4 ของวันที่ฟ้าเปิด ก็จะไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ให้เสร็จสิ้นได้ภายใน 1 วัน ในความเป็นจริงความเข้มแสงอาทิตย์ตลอดวันนั้นอาจไม่สม่ำเสมอ เราก็สามารถสร้างโครงรูปของกราฟความเข้มแสงใดๆ และป้อนเป็นข้อมูลให้โปรแกรมจำลองผลนำไปใช้งานได้ไม่ยาก

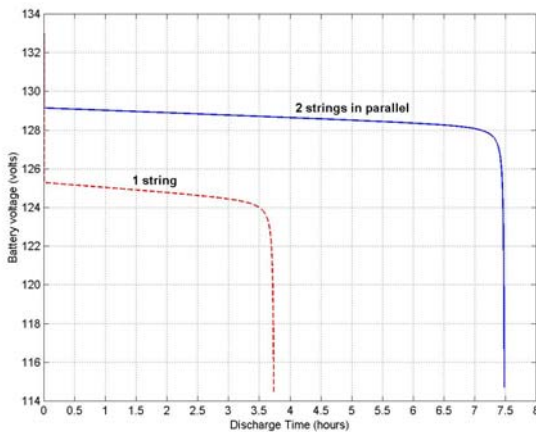


รูปที่ 10. แผนภูมิแสดง โครงสร้างของ โปรแกรมจำลองผล

อีกตัวอย่างหนึ่งที่จะสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นและประโยชน์ของการมีโปรแกรมจำลองผลก็ดังเช่น การวินิจฉัยว่าแบตเตอรี่จะทำงานได้นานกี่ชั่วโมง ในทางปฏิบัติที่คุ้นเคยกัน เราอาจคำนวณคร่าวๆ เช่น แบตเตอรี่ความจุ 70 Ah ดังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ หากต้องจ่ายกระแส 12.49 A แก่มอเตอร์ จะทำงานได้ประมาณ 5.6 ชั่วโมง แต่หากพิจารณาจำนวนโดยใช้แบบจำลองที่แม่นยำดังที่ปรากฏในงานนี้ จะพิจารณาได้โดยละเอียดถึงลักษณะสมบัติจริงของแบตเตอรี่และของโหลด ดังที่แสดงในรูปที่ 11 เราพบว่าหากมีแบตเตอรี่แผงเดียว การป้อนไฟฟ้าแก่มอเตอร์โดยตรงทำได้เพียง 3.7 ชั่วโมงเท่านั้น หากใช้แบตเตอรี่ 2 แผง การขับมอเตอร์อาจทำได้ถึง 7.5 ชั่วโมง มิใช่ 11.2 ชั่วโมง



รูปที่ 11. ผลการจำลองระบบแสดงการดึงกระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 12. การดิสชาร์จของแบตเตอรี่ 1 แผง และ 2 แผง

## 5. บทสรุป

การใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีความซับซ้อน เนื่องจากลักษณะสมบัติอันไม่เป็นเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ ประกอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ จำนวนแบตเตอรี่ที่ใช้สำรองพลังงานขึ้นกับความต้องการ

ในการประกันการทำงานของระบบว่าจะให้ใช้งานได้เมื่อแดดอ่อนนานเป็นเวลาเท่าใด ความต้องการในการชาร์จแบตเตอรี่อย่างพอเพียง จึงทวีความซับซ้อนต่อการใช้งานระบบดังกล่าว การทำความเข้าใจพลวัตของระบบจึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบ ดังที่บทความนี้ได้นำเสนอในรายละเอียด โปรแกรมการจำลองผลด้วย MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการศึกษาการใช้พลังงานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., and Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking : An algorithm for rapidly changing atmospheric condition. *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.* 142 (1): 59-64.
- [2] Pan, C., Chen, J., Chu, C., and Huang, Y. (1999). A fast power point tracker for photovoltaic power system. *Industrial Electronics Society, 1999. IECON'99 Proceedings.* 1: 390-393.
- [3] Rynkiewicz, R. (1999). Discharge and charge modeling of lead acid batteries, *Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE.* 2: 707-710.
- [4] Salameh, Z.M., Casacca, M.A., and Lynch, W.A. (1992). A mathematical model for lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 7 (1): 93-97.
- [5] Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J. (1994). Battery state of voltage modelling and an algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. *Solar Energy.* 53 (6): 517-527.
- [6] Ramamurthi, V.P. and Subrahmanyam, V. (1991). Performance of a separately excited dc motor fed from a multiphase chopper. *TENCON'91. 1991 IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems.* 1: 238-241.
- [7] Sousa, C.D. and Bose, K. (1994). A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter dc machine drive. *IEEE Transactions on Industry Application.* 30 (1): 34-44.

- [8] Yao, Y. and Ramshaw, R.S. (1995). Optimized dc motor output in a photovoltaic system. *Can.J.Elect. & Comp.Eng.* 20 (2): 79-84.
- [9] มหาวิทยาลัยศิลปากร และ กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (ม.ป.ป.). แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (Solar Radiation Map of Thailand) [ซีดี]. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [10] Harrington, S., Corporation, K., and Dunlop, J. (1992). Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems. *IEEE AES MAGAZINE*: 15-21.
- [11] Casacca, M.A., Capobianco, M.R., and Salameh, Z.M. (1996). Lead acid battery storage configuration for improved available capacity. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 11(1): 139-145.



**เพด็จ เผ่าละออ** สำเร็จปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2540 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 1 ปี ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทและเป็นผู้ช่วยวิจัยที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีโดยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2543 ทางด้านการอนุรักษ์พลังงานจากทางมหาวิทยาลัย



**นาวาอากาศโท สราวุฒิ สุจิตจร** สำเร็จปริญญาตรีและปริญญาเอกในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากโรงเรียนนายเรืออากาศ และมหาวิทยาลัยเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อ พ.ศ.2527 และ 2530 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ และหัวหน้า

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยทางด้านระบบควบคุมเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การคำนวณกระบวนการทางสัญญาณ การอนุรักษ์พลังงาน และการประยุกต์เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ อาจารย์สราวุฒิเป็นสมาชิกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ สมาคมเทคโนโลยีที่เหมาะสม และ IEEE อีกทั้งได้รับการจารึกชื่อไว้ใน Who's Who in the World และ Who's Who in Science and Engineering