

โปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง DC Generator Design Program

ศิริชัย วัฒนาโสภณ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

E-mail: sirichai@eng.src.ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอโปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนามาจากโปรแกรม Visual C# โดยโปรแกรมนี้มีทั้งหมด 16 หน้าต่าง ซึ่งในแต่ละหน้าต่างจะเป็นการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไปที่ละส่วน เช่น อาร์เมเจอร์ ขดลวดสนาม แปรรงถ่าน เป็นต้น จากนั้นหน้าต่างสุดท้ายจะแสดงผลลัพธ์ คือ รายละเอียดต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกแบบไว้ ซึ่งสามารถสั่งพิมพ์หรือจัดเก็บข้อมูลเป็นไฟล์ Excel ได้ การทดสอบโปรแกรมสามารถทำได้โดยออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขนาดพิกัด 2400 W 220V 11 A 1450 rpm ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นและนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับรายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเดียวกันที่ใช้งานอยู่ในห้องปฏิบัติการ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 20% นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อีก 3 ตัวที่มีค่าตรงกัน คือ Brush thickness, Brush width และ Brush height ในขณะที่ Losses from friction มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมากที่สุด คือ 58.17%

คำสำคัญ: ออกแบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ABSTRACT

This paper presents the DC generator design program, developed using Visual C# program. This program has 16 windows and each window is a design data of each component of DC generator such as armature, field windings, brush, etc. The final window shows the results, details of the DC generator, which can be printed or saved as an excel file. This program was tested by designing the shunt DC generator rated 2400 W 220V 11 A 1450 rpm, and then the results were compared with the data of the generator with the same size used in laboratory. The results from the comparisons found that most parameters have the error less than 20%. In addition, there are 3 parameters, which have no error, i.e. brush thickness, brush width, and brush height while the friction loss has the maximum error at 58.17%.

Keyword: Design, DC generator

1. บทนำ

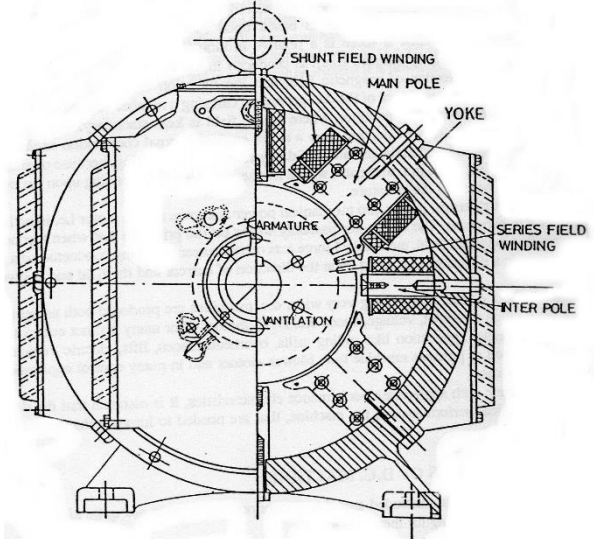
ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งที่มีประโยชน์ในการใช้งานมาก ดังจะเห็นได้จาก

การนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไปใช้ในงานต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าในรถ เรือ เครื่องบิน เป็นต้น อีกทั้งในวงการวิชาการยังคงมีการพัฒนารูปแบบและการนำเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าไปใช้งานกันอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากบทความวิชาการ [1] – [7] ซึ่งได้มีการนำเสนอถึงการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไว้ตั้งแต่ในอดีต ค.ศ. 1926 C. C. Nelson [1] ได้มีการนำเสนอการพันขดลวดอาร์เมเจอร์แบบหลายวงปิด (multiplex) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องใหม่มากในสมัยนั้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1944 M. I. Beers และ J. H. Karr [2] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะทำให้ช่วยลดเวลาในการออกแบบและมีประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการออกแบบ นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่นำไปใช้ในอากาศยานยังได้รับการพัฒนาและศึกษาให้เหมาะสมกับการใช้งานดังที่ I. O. Hockmeyer [3] ได้นำเสนอไว้ สมัยต่อมาเมื่อคอมพิวเตอร์เริ่มมีการนำมาใช้งาน ในปี ค.ศ. 1963 L. E. Welch [4] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ และหลังจากนั้นก็ได้มีการใช้งานคอมพิวเตอร์มากขึ้นเรื่อยมา โดย R. L. White และคณะ [5] ได้นำเอาวิธีการหาค่าเหมาะสมมาใช้ในการออกแบบประสิทธิภาพของสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จนถึงปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงกับพลังงานลมเพื่อนำไปผลิตไฟฟ้าดังที่ G. Yang และ H. Li [6] ได้นำเสนอโดยจะออกแบบให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีขึ้น และ A. Mahmoudi และคณะ [7] จะนำเสนอในส่วนของารออกแบบช่องสลอตให้เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Finite Element Analysis) และขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ คือ อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อมีขดลวดตัวนำหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดตัวนำ โดยขดลวดตัวนำที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นนี้ เรียกว่า ขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ เรียกว่า ขดลวดสนาม นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงยังมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน โดยอุปกรณ์ทั้งสองอย่างนี้มีหน้าที่แปลงแรงดัน

เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งเป็นแรงดันกระแสสลับให้ออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ [8]



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางครึ่งท่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง [8]

1.1 อาร์เมเจอร์ (Armature) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกหมุนอยู่ในช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก ประกอบด้วย สลิต แกนเหล็ก และขดลวด

1.2 ขั้วแม่เหล็กหลัก (Main Pole) เป็นส่วนที่ตั้งอยู่กับที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วย ขั้วแม่เหล็กและขดลวดสนาม มีหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.3 ขั้วแม่เหล็กแทรก (Inter Pole) เป็นขั้วแม่เหล็กที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กหลัก มีหน้าที่ลดการเกิด สปาร์ก ระหว่างแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ขณะมีโหลด

1.4 โยค (Yoke) เป็นส่วนโครงเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้เป็นเส้นทางเดินสำหรับฟลักซ์แม่เหล็ก

1.5 คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เป็นเหล็กซี่ๆ ที่ต่อกับขดลวดอาร์เมเจอร์ มีหน้าที่จัดเรียงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ ตั้งอยู่บนปลายโรเตอร์

1.6 แปรงถ่าน (Brushes) เป็นแท่งตัวนำส่วนใหญ่ทำมาจากกราไฟท์ มีหน้าที่นำกระแสจากอาร์เมเจอร์ไปสู่โพล

1.7 ขອງใส่แปรงถ่าน (Brushes holders) สำหรับใส่แปรงถ่านเป็นส่วนที่อยู่กับที่

1.8 แบริ่ง (Bearing) สำหรับลดแรงเสียดทานและช่วยให้ส่วนที่มีการหมุนหมุนได้เรียบขึ้น

1.9 เครื่องห่อหุ้ม (Enclosure) สำหรับป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสิ่งกระทบภายนอก

จากส่วนประกอบต่างๆ นี้ ผู้ออกแบบจะต้องสามารถออกแบบรายละเอียดในส่วนต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับนำไปผลิตได้ ซึ่งข้อมูลต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ส่วนหลัก [9] ดังนี้

- 1) ขนาดโครงสร้างอาร์เมเจอร์
- 2) รายละเอียดของขดลวดอาร์เมเจอร์
- 3) ขนาดของระบบสนามแม่เหล็ก
- 4) รายละเอียดของขดลวดสนาม
- 5) รายละเอียดของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน
- 6) รายละเอียดของขั้วแทรกและขดลวด
- 7) คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก กำลังสูญเสียในขดลวด ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอโปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม Visual C# สำหรับใช้ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทุกประเภท (ขนาน อนุกรม และผสม) ที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 1kW ขึ้นไป ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการออกแบบให้กับผู้ใช้งาน [4] อีกทั้งยังทำให้ใช้งานได้ง่ายเนื่องจากมีหน้าต่างแสดงช่องสำหรับกรอกข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็น ดังจะแสดงอยู่ในส่วนที่ 3 ของบทความ ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงโปรแกรมออกแบบที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับส่วนที่ 2 และ 4 จะแสดงถึงทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและผลการทดสอบโปรแกรมเรียงตามลำดับ จากนั้นส่วนของสรุปบทความจะแสดงอยู่ในส่วนที่ 5

2. ทฤษฎีการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง [8]

ก่อนที่จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จำเป็นต้องกล่าวถึงสมการและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยสรุปได้ ดังนี้

2.1 ส่วนของโครงสร้างและขดลวดอาร์เมเจอร์

สมการ (1) ใช้คำนวณหาขนาดของอาร์เมเจอร์กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังนี้

$$D^2 L = \frac{P_a}{NC_0} \quad (1)$$

C_0 คือ $0.164B_{av} \cdot q \cdot 10^{-3}$

B_{av} คือ สนามแม่เหล็ก (T)

q คือ โหลดไฟฟ้า (A/m)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอาร์เมเจอร์ (m)

L คือ ความยาวอาร์เมเจอร์ (m)

P_a คือ กำลังไฟฟ้าขาออก (kW)

N คือ ความเร็วรอบ (r.p.m.)

จากสมการ (1) จะเห็นว่าถ้าต้องการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเล็กจะต้องออกแบบให้ทำงานที่ความเร็วรอบสูงขึ้นหรือทำให้ค่า C_0 เพิ่มขึ้น

นอกจากขนาดของอาร์เมเจอร์แล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ ที่ต้องคำนึงถึงอีก ดังนี้

$$L = \frac{(0.68 \text{ to } 0.7) \times \pi \cdot D}{P} \quad (2)$$

$$P = \frac{120f}{N} \quad (3)$$

$$Z = \frac{60 \cdot E \times A}{P \cdot \phi \cdot N} \quad (4)$$

$$a_c = \frac{I_a'}{\delta_a} \quad (5)$$

$$r_1 = \frac{\rho \cdot l_a \cdot Z}{a_c \cdot A^2} \quad (6)$$

$$l_a = L + 0.01 \cdot l_f \quad (7)$$

$$l_f = 14 + 1.15 \tau_p \quad (8)$$

$$A_c = \frac{\phi_c}{B_c} \quad (9)$$

$$L_i = (L - n_v b_v) k_i \quad (10)$$

$$d_c = \frac{A_c}{L_i} \quad (11)$$

$$D_i = D - 2 \cdot h_s - 2 \cdot d_c \quad (12)$$

- L คือ ความยาวอาร์เมเจอร์ (m)
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (poles)
 f คือ ความถี่ (Hz)
 Z คือ จำนวนตัวนำบนอาร์เมเจอร์
 ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก (Wb)
 A คือ จำนวนวงจรรขนาในขดลวดอาร์เมเจอร์
 E คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)
 a_c คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำอาร์เมเจอร์ (mm²)
 I'_a คือ กระแสที่ไหลอยู่ในตัวนำอาร์เมเจอร์ (A)
 δ_a คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm²)
 r_1 คือ ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)
 ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของทองแดงที่อุณหภูมิทำงาน (ohm-m)
 l_a คือ ความยาวของตัวนำอาร์เมเจอร์ (m)
 l_f คือ ความยาวอิสระต่อตัวนำ (cm)
 τ_p คือ ระยะห่างของขั้วแม่เหล็ก
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m²)
 ϕ_c คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านในแกนเหล็ก (wb), ($\phi_c = \phi/2$)
 B_c คือ สนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (1.1 – 1.4 T)
 L_i คือ ความยาวของแกนเหล็ก (m)
 n_v คือ จำนวนท่อระบายอากาศ (duct)
 b_v คือ ความกว้างของท่อระบายอากาศ (mm)
 k_i คือ ตัวประกอบเหล็ก ($\approx 0.88 - 0.92$)
 d_c คือ ความลึกของแกนเหล็ก (m)
 D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในอาร์เมเจอร์ (m)
 h_s คือ ความลึกของช่องสลีต (m)

$$l_p = 1 \text{ to } 1.5 \text{ cm} \quad (13)$$

$$\phi_p = (1.15 - 1.2) \cdot \phi \quad (14)$$

$$A_p = \frac{\phi_p}{B_p} \quad (15)$$

$$b_p = \frac{A_p}{k_i \cdot l_p} \quad (16)$$

$$h_f = \frac{AT_f}{AT'_f} \quad (17)$$

โดย

$$AT_f = (1.1 - 1.3) \left(\frac{I_a Z}{2P} \right), \text{ กรณีที่ไม่มีขั้วแทรก}$$

$$AT_f = (0.7 - 1.0) \left(\frac{I_a Z}{2P} \right), \text{ กรณีที่มีขั้วแทรก}$$

$$\text{และ } AT'_f = \sqrt{\rho_f s_f d_f} \times 10^4$$

$$\phi_y = 0.5 \cdot \phi_p \quad (18)$$

$$A_y = \frac{\phi_y}{B_y} \quad (19)$$

$$d_y = \frac{A_y}{1.5 \cdot L} \quad (20)$$

$$D_{my} = D + 2 \cdot h_f + d_y \quad (21)$$

$$l_y = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi \times D_{my}}{P} \right] \quad (22)$$

$$a_{sh} = \frac{\rho \cdot l_{mf} \cdot (I_{sh} \cdot T_{sh})}{V_{sh}} \quad (23)$$

- l_p คือ ความยาวของขั้วแม่เหล็ก (cm)
 ϕ_p คือ ฟลักซ์ในขั้วแม่เหล็ก (Wb)
 A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็ก (m²)
 b_p คือ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก (m)
 h_f คือ ความสูงของขั้วแม่เหล็ก (m)
 d_f คือ ความลึกของขดลวดสนาม (m)
 ρ_f คือ กำลังสูญเสียในการระบายความร้อนต่อพื้นที่หน้าตัด (W/m²)
 s_f คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของทองแดงกับ

2.2 ส่วนของระบบและขดลวดสนามแม่เหล็ก

สมการ (13) – (23) ใช้สำหรับออกแบบในส่วน
ของระบบสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

	พื้นที่หน้าตัดของขดลวดสนาม
ϕ_y	คือ ฟลักซ์แม่เหล็กในโยค (Wb)
A_y	คือ พื้นที่หน้าตัดของโยค (m^2)
d_y	คือ ความลึกของโยค (m)
D_{my}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโยค (m)
l_y	คือ เส้นทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กในโยค (m)
a_{sh}	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดสนาม (m^2)
l_{mf}	คือ ความยาวเฉลี่ยต่อรอบขดลวดสนาม (m)
V_{sh}	คือ แรงดันตกคร่อมขดลวดสนาม (V)
$I_{sh} \cdot T_{sh}$	คือ แอมแปร์เทิร์นของขดลวดสนาม ตอนไม่มีโหลด (AT_{f0})

2.3 คอมมิวเตเตอร์

จำนวนซี่ของคอมมิวเตเตอร์ = จำนวนขดลวดอาร์
เมเจอร์ (24)

$$\text{ระยะห่างของซี่คอมมิวเตเตอร์ (m)} = \frac{\pi \times D_c}{\text{Number of commutator segments}} \quad (25)$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของคอมมิวเตเตอร์} = (0.65 - 0.80) \cdot D, m \quad (26)$$

D_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก (m)

2.4 แปรรงถ่าน

$$\text{ระยะห่างระหว่างแปรรงถ่าน} = \frac{\pi \times D_c}{P}, m \quad (27)$$

ความหนาสูงสุดของแปรรงถ่าน = (3-4) x ระยะห่างของ
ซี่คอมมิวเตเตอร์ (28)

$$\text{จำนวนของแปรรงถ่าน } N_b = \frac{A'_b}{A_b} \quad (29)$$

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของแปรรงถ่าน (m^2)

A'_b คือ พื้นที่หน้าตัดสูงสุดของแปรรงถ่านที่
สามารถรองรับกระแสอาร์เมเจอร์ได้ (m^2)

2.5 ขั้วแทรก

$$b_{cp} = \beta_x \times \frac{D_A}{D_c} \quad (30)$$

$$L_{cp} = (0.5 - 0.7)L \quad (31)$$

$$l_{gc} = (1.5 - 1.75) \text{ (ช่องว่างอากาศใต้
ขั้วแม่เหล็ก)} \quad (32)$$

$$h_{cp} = \frac{D_{yi} - D}{2} - l_{gc} \quad (33)$$

$$AT_{cp} = AT_a + 0.796B_{cp}K_{gcp}l_{gc} \times 10^6 \quad (34)$$

$$r_{cp} = \frac{\rho \cdot l_{mcp} T_{cp}}{a_{cp}} \quad (35)$$

b_{cp} คือ ความกว้างฐานของขั้วแทรก (m)

β_x คือ ระยะทางที่เคลื่อนไปตามพื้นผิวของคอม
มิวเตเตอร์ (m)

L_{cp} คือ ความยาวตามแนวแกนของขั้วแทรก (m)

l_{gc} คือ ช่องว่างอากาศใต้ขั้วแทรก

h_{cp} คือ ความสูงของขั้วแทรก (m)

D_{yi} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโยค (m)

AT_{cp} คือ ขดลวดพันของขั้วแทรก

AT_a คือ แอมแปร์เทิร์นต่อขั้วแม่เหล็กอาร์เมเจอร์

K_{gcp} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ช่องว่างอากาศ

r_{cp} คือ ความต้านทานขดลวดพันของขั้วแทรก

T_{cp} คือ จำนวนรอบขดลวดที่พันขั้วแทรกทั้งหมด

a_{cp} คือ พื้นที่หน้าตัดขดลวดพันขั้วแทรก (mm^2)

2.6 สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กำลังสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
แบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ

- 1) กำลังสูญเสียที่มีค่าคงที่ (W_c) ได้แก่ กำลัง
สูญเสียในแกนเหล็ก กำลังสูญเสียทางกล
- 2) กำลังสูญเสียที่แปรผันตามโหลด (W_v) ได้แก่
กำลังสูญเสียในขดลวด กำลังสูญเสียในแปรรงถ่าน

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{Output}}{\text{Output} + \text{total losses}} \quad (36)$$

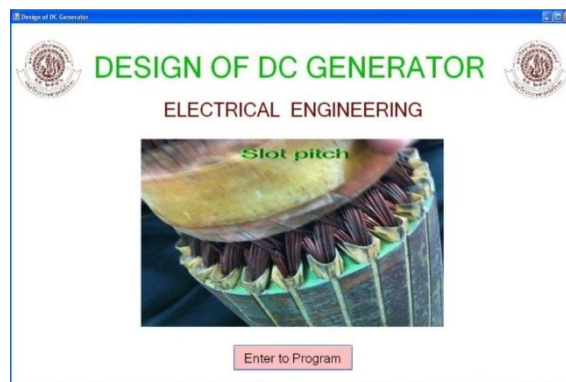
ตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้น เป็น
รายละเอียดเพียงบางส่วนที่ใช้ในการออกแบบเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [8]

3. โปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

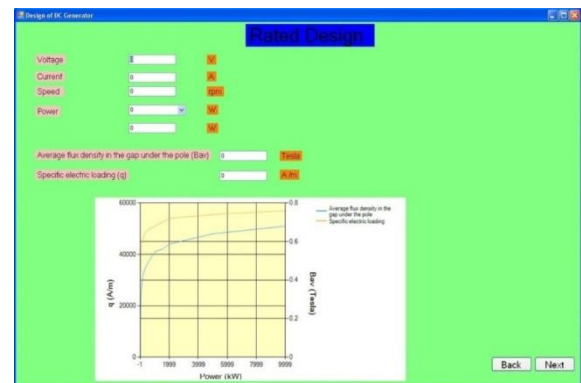
โปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสร้างขึ้นจากภาษา C# ในโปรแกรม Visual Studio 2010 ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งาน ดังนี้

1) เมื่อเริ่มเปิดโปรแกรม จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 2 จากนั้นกดปุ่ม Enter to program เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง Rated Design



รูปที่ 2 หน้าแรกของโปรแกรม

2) ในหน้าต่างนี้จะเป็นการกำหนดค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการออกแบบ อันประกอบด้วย ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบ นอกจากนี้ยังต้องกำหนดค่าสนามแม่เหล็ก (B_{av}) และโหลดไฟฟ้า (q) ให้เหมาะสมกับพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย โดยโปรแกรมจะแสดงกราฟ B_{av} และ q ที่เหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้าไว้ให้เป็นแนวทางสำหรับผู้ใช้งานได้เลือกใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3



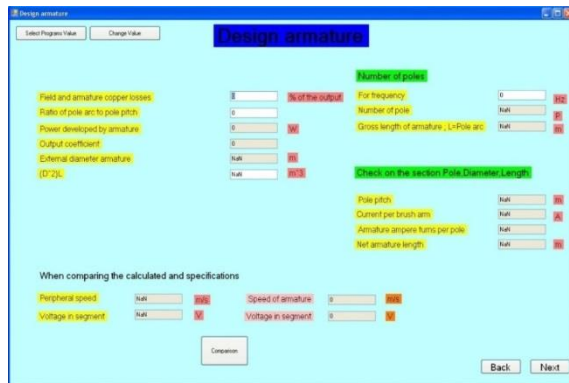
รูปที่ 3 Rated Design

3) เมื่อกำหนดค่าพิกัดต่างๆ เรียบร้อยแล้ว จากนั้นเมื่อกดปุ่ม Next จะเข้าสู่หน้าต่าง Permissible limit ในหน้าต่างนี้จะเป็นการกำหนดขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อันได้แก่ ความเร็วเชิงเส้นของอาร์เมเจอร์ แรงดันระหว่างขั้วของคอมมิวเตเตอร์ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก กำลังสูญเสียขณะจ่ายโหลดพิกัดและอุณหภูมิขณะใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 Permissible limit

4) เมื่อกดปุ่ม Next อีกครั้งโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่าง Design armature ซึ่งจะเป็นการเริ่มต้นออกแบบในส่วนของอาร์เมเจอร์ ค่าตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณจะถูกส่งมาในหน้านี้และเก็บค่าที่คำนวณได้เข้าสู่คลาส ค่าตัวแปรที่แสดงในโปรแกรมมี 2 ประเภท คือ ตัวแปรที่สามารถแก้ไขได้และตัวแปรที่ไม่สามารถแก้ไขได้ ซึ่งหากเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถแก้ไขได้ โปรแกรมจะทำให้ช่องที่แสดงค่าเป็นสีเทาและผู้ใช้จะไม่สามารถแก้ไขได้ดังแสดงในรูปที่ 5



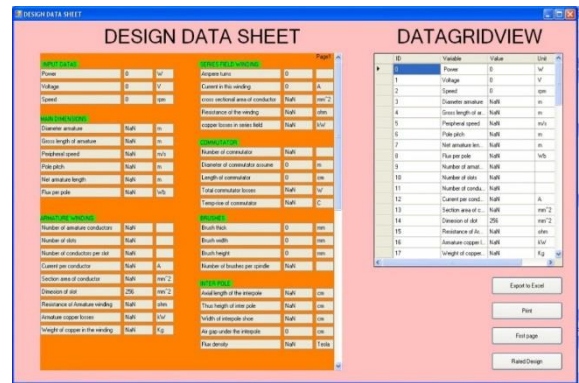
รูปที่ 5 Design armature

5) หลังจากนั้นจะเป็นการออกแบบระบบสนามแม่เหล็กของเครื่องจักร ซึ่งจะอยู่ในหน้า Design of field system จะเป็นการออกแบบขนาดของขั้วแม่เหล็ก โยค รายละเอียดต่างๆ ของสนามแม่เหล็ก และ หน้า Design of the field winding จะออกแบบขดลวดสนามทั้งหมด

6) เมื่อออกแบบระบบและขดลวดสนามแม่เหล็กแล้ว ต่อไปจะเข้าสู่หน้า Design of commutator and brushes เพื่อหาขนาดและจำนวนของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน และหน้า Design of interpole สำหรับออกแบบขั้วแม่เหล็กแทรก

7) จากนั้นจะเป็นหน้า Design of inter pole winding and Over all performance ซึ่งจะเป็นการออกแบบหน้าสุดท้าย ในหน้านี้เป็นการหาขนาดและจำนวนตัวนำของขดลวดที่ใช้ในขั้วแทรกและแสดงถึงกำลังสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ออกแบบขึ้นด้วย

8) หน้าสุดท้ายจะเป็นหน้า DESIGN DATA SHEET ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะแสดงตารางรายละเอียดทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ออกแบบไว้ ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 76 ตัว ผู้ใช้งานสามารถพิมพ์ข้อมูลออกมาโดยการสั่ง Print หรือเลือก Export to Excel หากต้องการข้อมูลเป็นไฟล์ excel โดยโปรแกรมจะทำการบันทึกไว้ในไฟล์ชื่อ Design_of_DC_Generator



รูปที่ 6 Design Data Sheet

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังที่กล่าวในข้างต้น สามารถแสดงแผนผังได้ดังรูปที่ 7

4. ผลการทดสอบโปรแกรม

โปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะถูกทดสอบโดยการนำไปใช้ออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานที่มีขนาดพิกัดเท่ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีใช้งานอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งขนาดพิกัดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



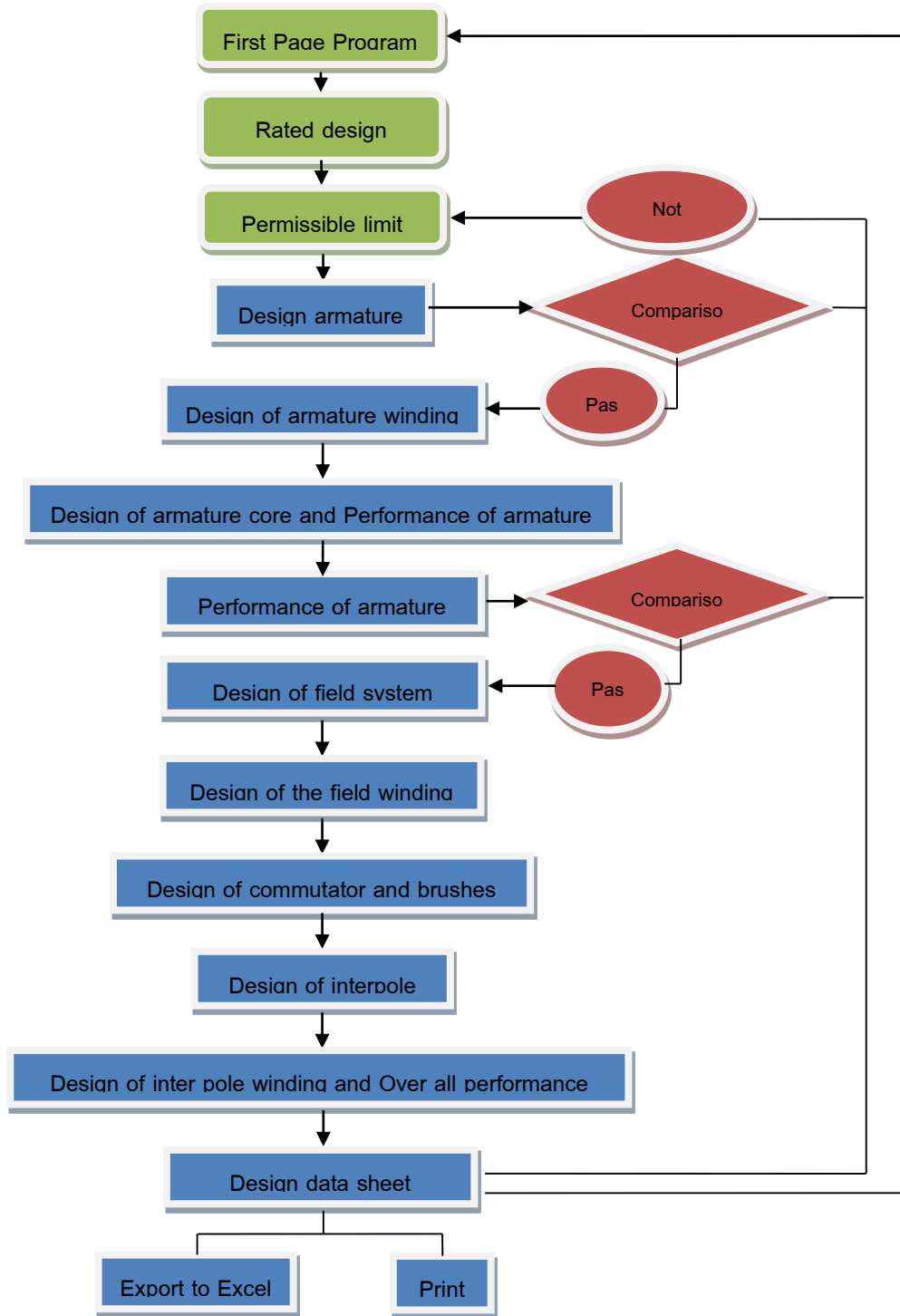
รูปที่ 8 Nameplate เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 8 ค่าพิกัดต่างๆ ที่แสดงใน Nameplate จะถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรมที่หน้า Rated Design (รูปที่ 3) เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ดังนี้

แรงดันไฟฟ้า	220 V	แรงดันสนาม	190 V
กระแสไฟฟ้า	11 A	กระแสสนาม	1.25 A
กำลังไฟฟ้า	2.4 kW	ความเร็วรอบ	1450 rpm

ผลการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะแสดงถึงรายละเอียดทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 76 ค่า ดังที่กล่าวในข้างต้น

ผลจากการออกแบบในตารางที่ 1 จะมีพารามิเตอร์เพียง 22 ค่าเท่านั้นที่สามารถวัดหรือทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ได้ เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกัน ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 7 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ผลลัพธ์	หน่วย	พารามิเตอร์	ผลลัพธ์	หน่วย
Power	2400	W	Mean diameter of the yoke	0.266	m
Voltage	220	V	Total ampere turn for yoke	248.46	
Speed	1450	rpm	Total field ampere turns	1264.86	
Armature diameter	0.123	m	Cross sectional area of conductor	0.145	mm ²
Gross length of armature	0.132	m	Exciting current	0.217	A
Peripheral speed	9.334	m/s	Number of turns per exciting coil	5245.963	
Pole pitch	0.187	m	Number of layer	374.712	
Net armature length	0.083	m	Resistance of the winding	61.991	ohm
Flux per pole	0.01	Wb	Losses in shunt field winding	2.919	W
Total armature conductor	937.655		Ampere turns	-	
Number of slots	25.748		Current in series field winding	-	A
Conductors per slot	36.417		Cross sectional area of conductor	-	mm ²
Current per conductor	5.582	A	Resistance of the winding	-	ohm
Section area of conductor	1.396	mm ²	Copper losses in series field	-	W
Dimension of slot	171.68	mm ²	Number of commutator	468.828	
Resistance of Armature winding	1.528	ohm	Diameter of commutator assumed	0.0861	m
Armature copper losses	0.204	kW	Length of commutator	14	cm
Weight of copper in the winding	8.9	kg	Total commutator losses	23.801	W
Axial length of the main pole	11.7	cm	Temp-rise of commutator	4.575	°C
Width of the pole	0.068	m	Brush thickness	5	mm
Height of the pole	5.899	cm	Brush width	16	mm
Flux density in the gap	0.41	Tesla	Brush height	25	mm
Air gap coefficient	1.15		Number of brushes per spindle	2.215	
Air gap length	0.00012	m	Axial length of the interpole	8.448	cm
Air gap ampere turns	109.062		Height of interpole	7.224	cm
Flux density in armature core	1.3	Tesla	Width of interpole shoe	0.849	cm
Total ampere turns for the teeth	494.5		Air gap under the interpole	0.525	cm
Flux density in the pole	1.6	Tesla	Flux density	0.2476	Tesla
Total ampere turns for the pole	283.152		Armature turns	2403.33	
Flux density in the yoke	1.2	Tesla			

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

พารามิเตอร์	ผลลัพธ์	หน่วย	พารามิเตอร์	ผลลัพธ์	หน่วย
Turns on each interpole	208		Iron losses	0.03	kW
Sectional area of conductor	5.022	mm ²	Commutator brush contact loss	0.029	kW
Resistance of interpole winding	0.336	ohm	Commutator brush friction loss	0.022	kW
Losses in interpole winding	44.823	W	Bearing friction and windage loss	0.002	kW
Armature copper losses	0.204	kW	Constant losses	0.024	kW
Series field winding copper losses	-	kW	Variable losses	0.058	kW
Interpole winding copper losses	0.001	kW	Total losses at full load	0.272	kW
Copper losses shunt field winding	0.045	kW	Full load efficiency	87.912	%
			Load at max. efficiency	1.109	kW
			Max. efficiency	90.531	%

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวัดจริงกับผลลัพธ์จากโปรแกรม

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้จริง	ผลลัพธ์	หน่วย	% คลาดเคลื่อน
Armature diameter	11.2	12.3	cm	9.82
Gross length of armature	12.5	13.2	cm	5.60
Pole pitch	0.175	0.187	m	6.86
Flux per pole	0.009	0.01	Wb	11.11
Total armature conductor	1092	937.635		14.14
Number of slots	26	25.748		0.97
Conductors per slot	42	36.417		13.29
Section area of conductor	1.4	1.396	mm ²	0.29
Dimension of slot	140	171.68	mm ²	22.63
Resistance of armature winding	2.7735	1.528	ohm	44.91
Axial length of the main pole	11	11.7	cm	6.36
Height of pole	4.8	5.899	cm	22.90
Width of pole	0.08	0.068	m	15.00
Resistance of field winding	60	61.991	ohm	3.32
Diameter of commutator	8	8.61	cm	7.62
Brush thickness	5	5	mm	0.00
Brush width	16	16	mm	0.00
Brush height	25	25	mm	0.00
Armature copper losses	0.250	0.204	kW	18.40

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวัดจริงกับผลลัพธ์จากโปรแกรม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้จริง	ผลลัพธ์	หน่วย	% คลาดเคลื่อน
Iron losses	59.83	29	W	51.53
Losses from friction	62.15	26	W	58.17
Full load efficiency	75.18	87.91	%	16.93

ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่แสดงในตารางที่ 2 จะถูกคำนวณจากสมการ (37)

$$error(\%) = \frac{|value_{existing} - value_{software}|}{value_{existing}} \times 100 \quad (37)$$

ผลจากการเปรียบเทียบจะพบว่าค่าที่ได้โดยส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกัน เช่น Number of slot: คลาดเคลื่อนไป 0.97% เป็นต้น และผลลัพธ์บางตัวมีค่าเท่ากัน คือ Brush thickness, Brush width และ Brush height อย่างไรก็ตามยังมีผลลัพธ์บางตัวที่มีค่าคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งพารามิเตอร์ที่คลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ Losses from friction โดยคลาดเคลื่อนไปถึง 58.17% เมื่อดูจากค่าความคลาดเคลื่อนจะพบว่าเกิดขึ้นมากในกรณีของกำลังสูญเสีย ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากผลการวัดในขณะที่ทำการทดลองที่ไม่สามารถวัดค่ากำลังสูญเสียได้โดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองแล้วจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหา กำลังสูญเสียอีกครั้ง จึงอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดสะสมขึ้นในขั้นตอนต่างๆ ได้

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอโปรแกรมออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อลดเวลาและความซับซ้อนในขั้นตอนการออกแบบ อีกทั้งยังเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ใช้งานอีกด้วย โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้ทุกประเภทที่มีกำลังการผลิตตั้งแต่ 1kW ขึ้นไป ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็ยังมีบางค่าที่ยังมีความคลาดเคลื่อนมาก

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. C. Nelson, "Multiplex windings for D.C. machines," *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 45, issue 11, pp. 1094–1097, November, 1926.
- [2] M. I. Beers and J. H. Karr, "A design method for D.C. machines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, issue 4, pp. 172–175, April, 1944.
- [3] I. O. Hockmeyer, "The generation and regulation of electric power in aircraft: a survey of design features of generators and their control," *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*, vol. 93, issue 31, February, 1946.
- [4] L. E. Welch, "Design of small D.C. machines with a digital computer," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 82, issue 69, pp. 1099–1106, December, 1963.
- [5] R. L. White, A. W. Scott, and R. H. Hartley, "Optimum design and performance calculations of highly magnetically saturated D.C. machines for large-scale production," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 116, issue 11, pp. 1891–1899, November, 1969.
- [6] G. Yang and H. Li. "Design and analysis of a newly brushless DC wind generator". *Automation Congress*. 28/September/2008. USA : 1-5, (2008).

- [7] A. Mahmoudi, N. A. Rahim, and H. W. Ping, "Genetic algorithm and finite element analysis for optimum design of slotted torus axial-flux permanent-magnet brushless DC motor," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 33, pp. 383-407, 2011.
- [8] Mittle, V. N. and Mittal, A., "Design of Electrical Machines," *Standard publishers distributor*, 4th Ed., 1996.