

บทที่ 4 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Generator Characteristics)

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกได้หลายแบบ และเครื่องกำเนิดแต่ละแบบก็มีคุณลักษณะในการทำงานแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบใดแบบหนึ่งไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ก็จะต้องทราบถึงคุณลักษณะหรือลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละแบบเสียก่อน

4.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (Characteristics of D.C. generator)

คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแสดงด้วยเส้นกราฟคุณลักษณะ (Characteristic curve) ดังต่อไปนี้

4.1.1 เส้นกราฟคุณลักษณะอิ่มตัวขณะไร้โหลด

(No-load saturation characteristics, E_o/I_f , (V_f/I_f))

เรียกกันโดยทั่วไปว่าคุณลักษณะทางแม่เหล็ก (magnetic characteristics) หรือ คุณลักษณะในสภาวะวงจรเปิด (open-circuit characteristics or O.C.C.) ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์ขณะไร้โหลด (E_o) (V_f) และกระแสฟิลด์ (I_f) เมื่อความเร็วรอบคงที่ ในทางปฏิบัติเส้นกราฟนี้จะมี รูปร่างเหมือนกัน ไม่ว่าเครื่องกำเนิดนั้นจะเป็นแบบแยกวงจรกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก (separately excited) หรือแบบกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กด้วยตัวเอง (self excited)

4.1.2 เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกหรือคุณลักษณะเมื่อจ่ายโหลด

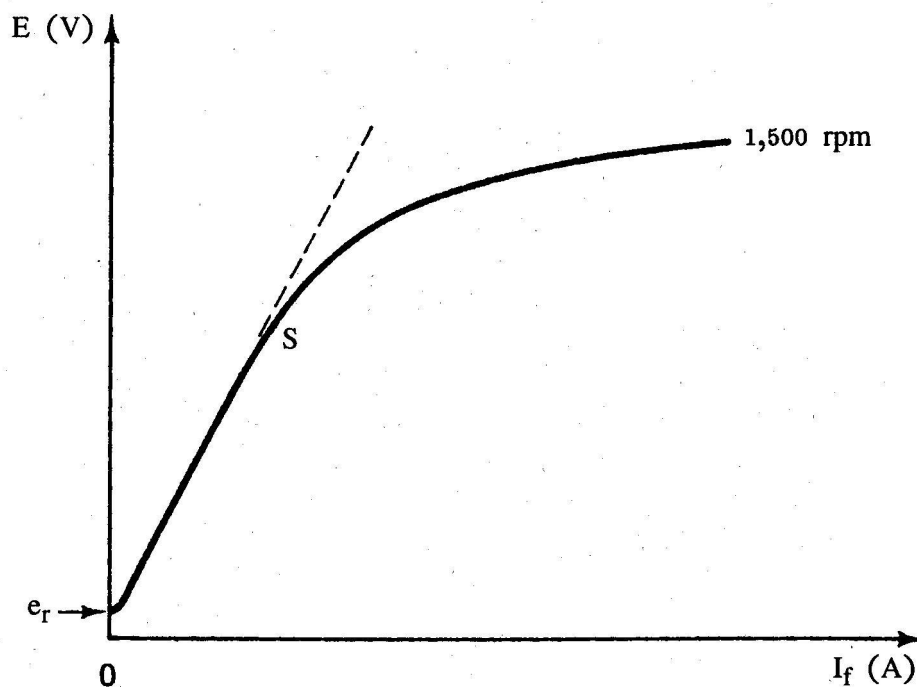
(External characteristic, V_f/I_L)

เป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_f) กับกระแสที่จ่ายให้โหลด (I_L) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “คุณลักษณะสมรรถนะ” (performance characteristic)

4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกวงจรกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก (*Separately excited generator*)

4.2.1 เส้นกราฟคุณลักษณะอิ่มตัวขณะไร้โหลด (E_o/I_f)

คือเส้นกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์มเจอร์ขณะไร้โหลด โดยการปรับค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟตรงจากภายนอก เมื่อกำหนดให้อาร์มเจอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ความเร็วเต็มพิกัด (*rated speed*)



รูปที่ 4-1 เส้นกราฟคุณลักษณะอิ่มตัวขณะไร้โหลด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับกระแสฟิลด์ เมื่อความเร็วรอบคงที่

รูปที่ 4-1 แสดงเส้นกราฟคุณลักษณะอิ่มตัวขณะไร้โหลด (*no-load saturation curve*) เมื่อเครื่องกำเนิดหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ $1,500 \text{ rpm}$ จะสังเกตเห็นว่าที่กระแสฟิลด์เป็นศูนย์ จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นจำนวนเล็กน้อย คือ e_r ทั้งนี้เนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (*residual flux*) อยู่ในแกนเหล็ก ที่กระแสฟิลด์น้อยๆ กราฟจะเป็นเส้นตรง และกราฟจะเริ่มโค้งงอที่จุด S เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว (*saturation point*)

จากสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$E_g = \frac{Z\phi PN}{60a}$$

$$E_g = \left[\frac{ZP}{60a} \right] \times \phi N$$

หรือ

$$E_g = K\phi N$$

$$K = \text{ค่าคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า}$$

ดังนั้น $E_g = K\phi N$ โวลต์

เมื่อความเร็วรอบ (N) คงที่

ดังนั้นจะได้ $E_g = K\phi$

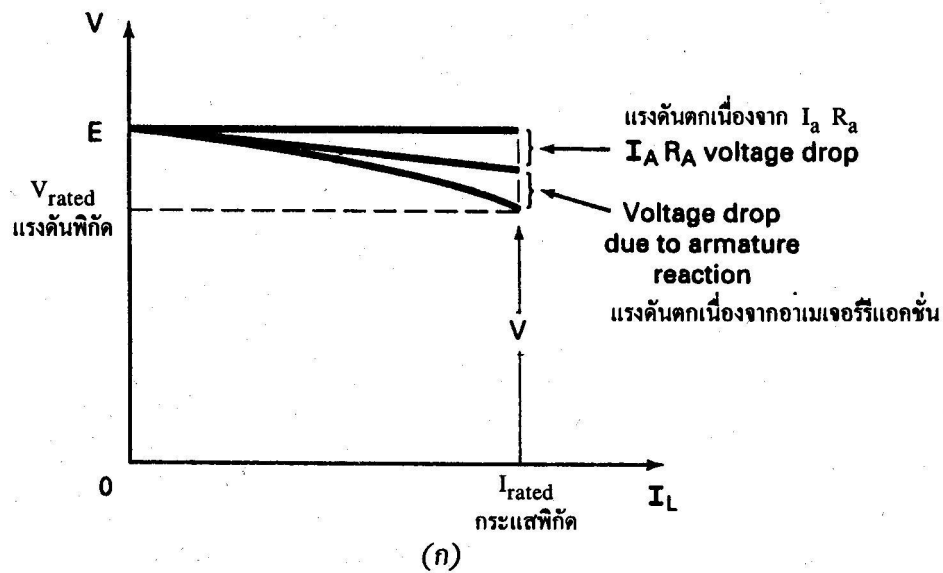
หรือ $E_g = KI_f$ (เพราะ ϕ ถูกสร้างด้วยกระแส I_f)

เมื่อ ϕ แปรผันโดยตรงกับ I_f หรือ $\phi \propto I_f$ (ก่อนที่แกนของขั้วแม่เหล็กจะถึงจุดอิ่มตัว)

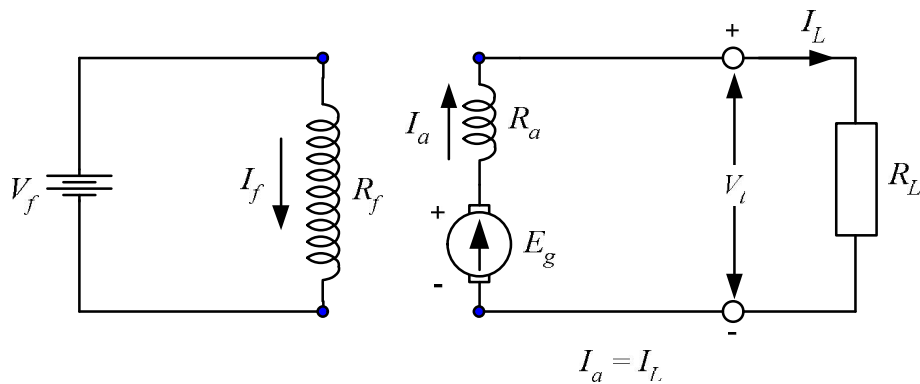
4.2.2 เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกหรือคุณลักษณะเมื่อจ่าย โหลด

(External or load characteristic, V_t / I_L)

การทดลองหาเส้นกราฟนี้ทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 4-2 แล้วขับอาร์เมเจอร์ให้หมุนด้วยความเร็วรอบเต็มพิกัด ปรับกระแสฟลด์ให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเต็มพิกัด หลังจากนั้นให้คงค่ากระแสฟลด์นั้นไว้ตลอดการทดลอง เมื่อเพิ่มโหลดไปเรื่อยๆ (เพิ่มกระแสโหลด) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะเปลี่ยนแปลงไปดังเส้นกราฟ ดังรูปที่ 4-2 ทุกครั้งที่เพิ่มโหลดต้องปรับความเร็วรอบให้คงที่



รูปที่ 4-2 (ก) เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดแบบแยกวงจรกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4-2 (ข) วงจรการต่อเพื่อหาเส้นกราฟคุณลักษณะภายนอก

การทดลองหาเส้นกราฟนี้ทำได้โดยต่อวงจร ดังรูปที่ 4-2 (ข) แล้วขับอาร์เมเจอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเต็มพิกัด ปรับกระแสฟีดเพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเต็มพิกัด หลังจากนั้นให้ค่าคงที่กระแสฟีดนั้นไว้ตลอดการทดลอง หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มโหลดไปเรื่อยๆ (เพิ่มกระแสโหลด) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จาก E เป็น V_t ดังรูปที่ 4-2 (ก) ทุกครั้งที่มีการเพิ่มโหลดความเร็วรอบของอาร์เมเจอร์จะลดลง ต้องปรับความเร็วรอบให้คงที่ทุกระดับของกระแสโหลดตลอดการทดลอง

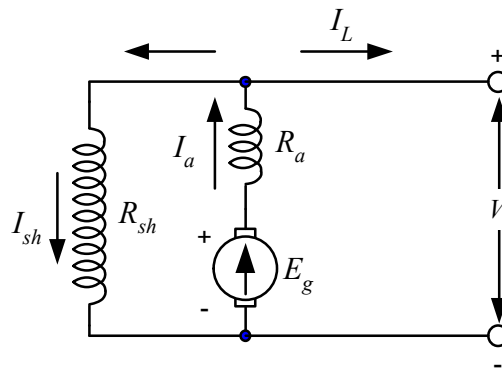
ผลที่ได้จากการทดลอง จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดจะลดลง เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ

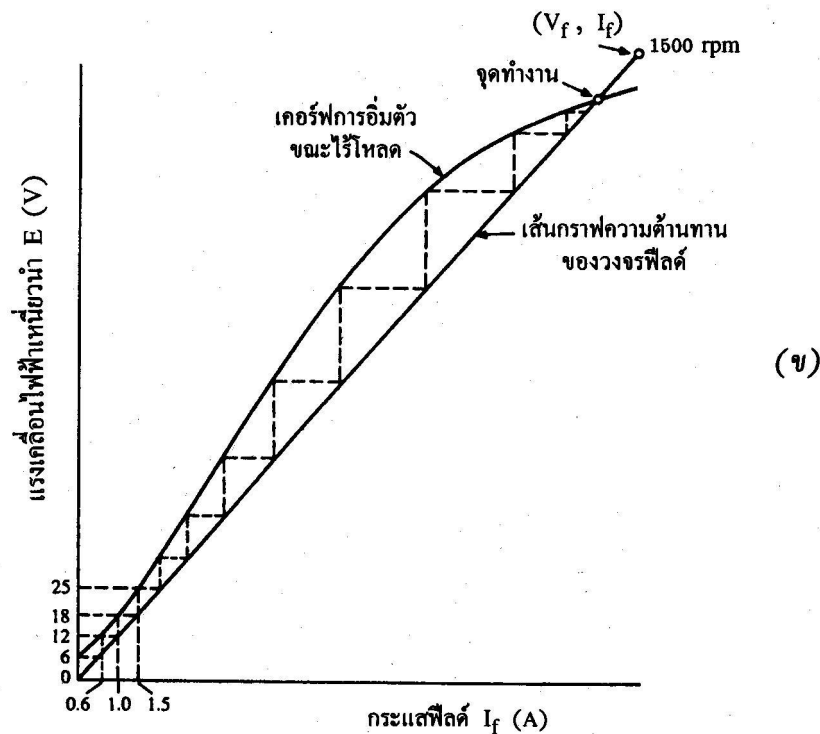
- ก. แรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานอาร์เมเจอร์ ($I_a R_a$ voltage drop)
- ข. แรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากผลของอาร์เมเจอร์รีแอคชั่น

4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กด้วยตัวเอง (Self excited generator)

4.3.1 การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Building of shunt generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะเป็นแบบกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กด้วยตัวเอง กล่าวคือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กจะได้จากอาร์เมเจอร์เมื่อขั้วอาร์เมเจอร์ให้หมุนด้วยความเร็วเต็มพิกัด จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยเกิดขึ้นที่ขั้วอาร์เมเจอร์ แม้ว่าจะเปิดวงจรขดลวดสนามแม่เหล็กออกก็ตาม ทั้งนี้เพราะว่าขดลวดอาร์เมเจอร์จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (*residual flux*) ดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงเริ่มมีกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งต่อขนานกับขดลวดอาร์เมเจอร์ และกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กนี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาจำนวนหนึ่ง โดยมีทิศทางเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างให้มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น และกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปอีก นั่นคือทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสฟลักซ์จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า” (*building up*) ดังรูปที่ 4-3





รูปที่ 4-3

(ก) วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั้นที่

(ข) การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Building up) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั้นที่

จากรูปที่ 4-3 พิจารณาเส้นกราฟการอิ่มตัวขณะไร้โหลด หรือเส้นกราฟแมกเนโตเซชัน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั้นที่ (หาได้ด้วยวิธีการเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยก) กับเส้นกราฟความต้านทานของวงจรฟิวด์ ซึ่งเส้นกราฟนี้เปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับตั้งค่าความต้านทานของรีโอสตัทซึ่งต่ออนุกรมกับขดลวดชั้นที่ฟิวด์ หากความต้านทานมากเส้นกราฟจะชันมากขึ้น พิจารณาจากกราฟรูปที่ 4-4

เมื่อนำเส้นกราฟทั้งสองมาเขียนลงบนแกนเดียวกันให้แกน X เป็นกระแสฟิวด์ และแกน Y เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อเริ่มต้นเดินเครื่องจนกระทั่งอาร์เมเจอร์หมุนด้วยความเร็วเต็มพิกัดคือ 1500 rpm หากพิจารณาตำแหน่งที่กระแสฟิวด์ $I_f = 0$ จะพบว่ามีความเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น 6 โวลต์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 6 โวลต์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ทำให้มีกระแสประมาณ 0.6 แอมแปร์ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง เมื่ออาร์เมเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากขึ้น จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 12 โวลต์และมีกระแสไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก 1.0 แอมแปร์ นั้นหมายความว่า

กระแสฟิวด์ 1.0 แอมแปร์ให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 18 โวลต์

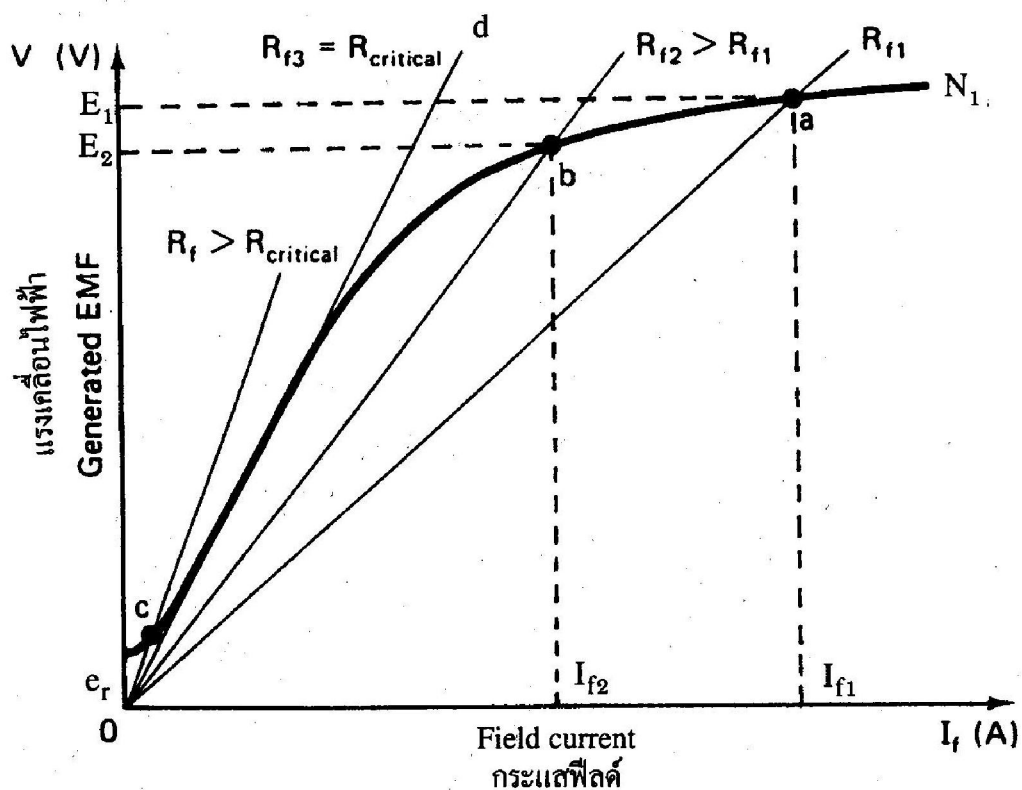
แรงเคลื่อนไฟฟ้า 18 โวลต์ ทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 แอมแปร์

กระแสฟลักซ์ 1.5 แอมแปร์ให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 25 โวลท์

การเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และกระแสฟลักซ์จะไปถึงจุด ณ จุดตัดกันของเส้นกราฟ ทั้งสอง คือ จุดทำงาน (Operating point) ของเครื่อง เป็นการสิ้นสุดกระบวนการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด

4.3.2 เส้นกราฟความต้านทานของวงจรถดลวดสนามแม่เหล็ก (Field resistance line)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกขดลวดสนามแม่เหล็กด้วยตัวเอง การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะสิ้นสุดลง ณ จุดตัดระหว่างเส้นกราฟอิมิตัวขณะไร้โหลด (*no-load saturation curve*) และเส้นกราฟความต้านทานของวงจรถดลวดสนามแม่เหล็ก (*field resistance line*) จะพิจารณาต่อไปว่าถ้าความต้านทานในวงจรถดลวดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปจะเกิดผลอย่างไรบ้างกับคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4-4 เส้นกราฟความต้านทานขนาดต่างๆ กันของวงจรถดลวดสนามแม่เหล็ก

ในรูปที่ 4-4 เป็นเส้นกราฟการอิมิตัวขณะไร้โหลด หรือเส้นกราฟแมกเนโตเซชัน ซึ่งมีจุดเริ่มต้นคือ E_r ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง เส้นกราฟเส้นตรงอีก 4 เส้น เป็นเส้นกราฟความต้านทานของวงจรถดลวดสนามแม่เหล็กที่มีค่าความต้านทานขนาดต่างๆ กัน โดยมีเส้นกราฟ oa , ob และ oc ที่มีค่า

ความต้านทานของวงจรฟิลด์ที่มีค่าเรียงเป็นลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามากขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของรีโอสตาทที่ต่ออนุกรมกับขดลวดฟิลด์ นั่นหมายความว่าค่าความต้านทานของขดลวดฟิลด์จะมีค่าต่ำสุด เมื่อลดค่าความต้านทานของรีโอสตาทไว้ในตำแหน่งต่ำสุด

พิจารณาจากรูปที่ 4-4 จะพบว่าเส้นกราฟที่มีค่าความต้านทานสูงที่สุด คือเส้นกราฟที่มีความชัน (Slope) มากที่สุดคือเส้นกราฟ oc ซึ่งมีค่าความต้านทานเป็น R_f ถัดลงมาคือ od , ob และ oa ซึ่งความต้านทานเป็น R_{f3} , R_{f2} , R_{f1} ตามลำดับ หากเครื่องกำเนิดถูกขับให้หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ คือ N_1 และปรับค่าความต้านทานของวงจรฟิลด์มีค่าเป็น R_{f1} (เส้นกราฟ oa) จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดฟิลด์เป็น I_{f1} จะได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็น E_1 เมื่อเพิ่มความต้านทานของวงจรฟิลด์โดยปรับค่าความต้านทานของรีโอสตาทให้เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งมีค่าเป็น R_{f2} (เส้นกราฟ ob) กระแสในวงจรขดลวดฟิลด์จะลดลง เป็น I_{f2} เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กลดลงจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อไรโหลดต่ำลงเป็น E_2 ถ้าเพิ่มค่าความต้านทานของรีโอสตาทต่อไปอีกจนกระทั่งวงจรฟิลด์มีค่าความต้านทานเป็น R_{f3} (เส้นกราฟ oc) ซึ่งเป็นเส้นความต้านทานของวงจรฟิลด์ที่สัมผัสกับเส้นกราฟอิมิตัวขณะไรโหลด เราเรียกเส้นกราฟ R_{f3} นี้ว่า “ความต้านทานวิกฤตของวงจรฟิลด์” (*critical field resistance*) หรือ $R_{critical}$, R_c ซึ่งหมายถึง ค่าความต้านทานสูงสุดของวงจรฟิลด์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า (*building up*) ขึ้นได้พอดี ถ้าหากความต้านทานของวงจรฟิลด์สูงกว่าค่าความต้านทานวิกฤตดังเส้นกราฟ oc เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เกิดขึ้นได้ แต่จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ e_r เท่านั้น

4.3.3 สาเหตุที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Failure to build up)

การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า ในที่นี้อาจหมายถึง เครื่องกำเนิดสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าแต่ไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ อาจมีสาเหตุขัดข้องอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทุกอย่างดังนี้

ก. ต่อขดลวดขั้วที่ฟิลด์กลับขั้ว (*polarity*) ทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดขั้วที่ฟิลด์สร้างเส้นแรงแม่เหล็กต่อต้าน (หักล้าง) กับเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง กลับลดลง ด้วยเหตุดังกล่าวเครื่องกำเนิดจึงไม่สามารถสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ การแก้ไขคือ กลับขั้วขดลวดขั้วที่ฟิลด์เสียใหม่

ข. ความต้านทานในวงจรฟิลด์มีค่าสูงเกินไป คือสูงกว่าค่าความต้านทานวิกฤต (*Critical resistance*) การแก้ไขทำได้โดยลดค่าความต้านทานของรีโอสตาทลงจนกระทั่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น

ค. หน้าสัมผัสระหว่างแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ไม่แนบสนิทอย่างแท้จริง สาเหตุเนื่องจากสปริงกดแปรงถ่านไม่แน่น แปรงถ่านไม่เรียบหรือสึกหรอไปมาก คอมมิวเตเตอร์สกปรกมีออกไซด์จับมากทำให้ความต้านทานที่หน้าสัมผัสมากเกินไป ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านขดลวดฟิลด์จึงน้อยมาก ไม่เพียงพอที่จะทำให้อินแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จึงทำให้เครื่องกำเนิดไม่สามารถสร้างเคลื่อนไฟฟ้าได้ การแก้ไขตรวจสอบสปริงที่กด

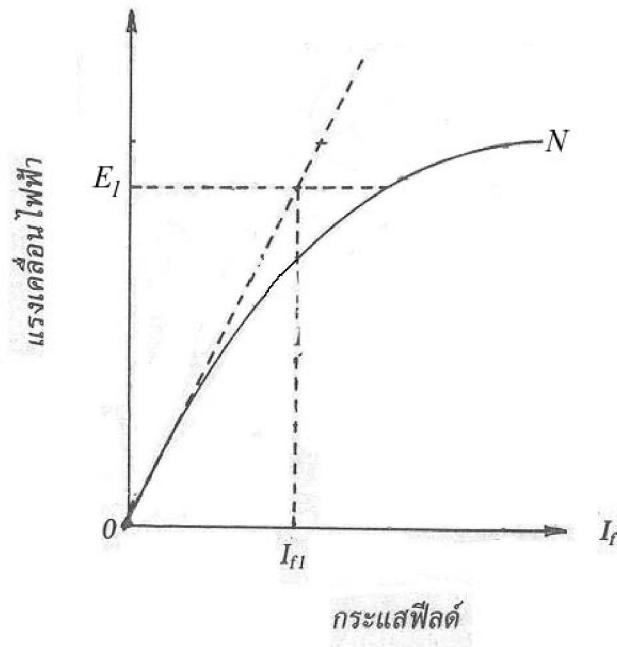
แปรงถ่าน ถ้าแรงกดไม่แน่นเนื่องจากแปรงถ่านสึกกร่อนไปมากให้เปลี่ยนแปรงถ่านใหม่ และทำความสะอาดผิวหน้าของคอมมิวเตเตอร์

ค. ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (*residual flux*) เหลืออยู่เลย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากทั้งเครื่องกำเนิดไว้โดยไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน หรือในกรณีที่เครื่องกำเนิดเพิ่งถูกสร้างขึ้นมาใหม่จะไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ดังนั้นเครื่องกำเนิดจึงไม่สามารถสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า แก๊สเหตุดังกล่าวได้โดยนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากที่อื่นมากระตุ้นขดลวดฟิลด์ วิธีนี้เรียกว่า “*Flashing the field*” ใช้เวลาสั้นๆ เพียง 2-3 วินาทีก็จะมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

ง. ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดต่ำกว่า “ความเร็ววิกฤต” (*Critical speed*) เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแปรผันโดยตรงกับความเร็วรอบและจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบต่ำเกินไป แม้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างก็ตาม เครื่องกำเนิดจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นน้อยเกินไป ทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดฟิลด์น้อยมากไม่เพียงพอที่จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่ม การแก้ไขคือ ต้องเร่งความเร็วรอบของเครื่องต้นกำลัง (*prime mover*) ที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สูงถึงความเร็วเต็มพิกัด (*rated speed*)

4.3.4 การหาค่าความต้านทานวิกฤต (How to find critical resistance or R_c)

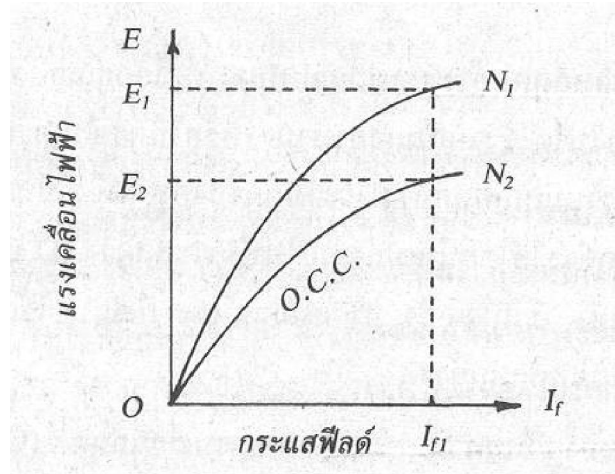
ก่อนอื่นต้องเขียนเส้นกราฟ *Open Circuit characteristics* , *O.C.C.* หรือเส้นกราฟอิมิตัวขณะไร้อโหลด (*no-load saturation curve*) โดยใช้ตารางข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หลังจากนั้นให้ลากเส้นตรงจากจุดเริ่มต้น (จุด O ในรูปที่ 4-4) โดยให้เส้นตรงดังกล่าวสัมผัสกับเส้นโค้ง *O.C.C.* ความชัน (*slope*) ของเส้นตรงที่สัมผัสกับเส้นโค้ง คือเส้นกราฟความต้านทานวิกฤต หรือ R_c ดังนั้น จึงหา R_c ได้จาก



$$R_c = \frac{E_1}{I_{f1}}$$

4.3.5 การเขียนเส้นโค้ง O.C.C. ที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน (How to draw O.C.C. at different speeds)

ถ้าเรามีตารางข้อมูลของเส้นโค้ง *O.C.C.* ที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบคงที่ N_1 เราอาจเขียนเส้นโค้ง *O.C.C.* ที่ความเร็วรอบ N_2 ได้ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 การเขียน O.C.C. ที่ความเร็วรอบ N_2 เมื่อทราบข้อมูล O.C.C. ที่ความเร็วรอบ N_1

เมื่ออาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกขับให้หมุนด้วยความเร็วรอบ N_1 แล้วปรับกระแสฟลักซ์เป็น I_{f1} จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ E_1 ถ้าเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของอาร์เมเจอร์เป็น N_2 แต่กระแสฟลักซ์ยังคงเท่าเดิม จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น E_2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเดิม ทั้งนี้เพราะว่าความเร็วรอบลดลง แม้ว่าค่าของ $K\phi$ จะคงที่ (เนื่องจาก I_f มีค่าคงที่) เราสามารถหาค่าของ E_2 ได้เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเป็น N_2 คือ

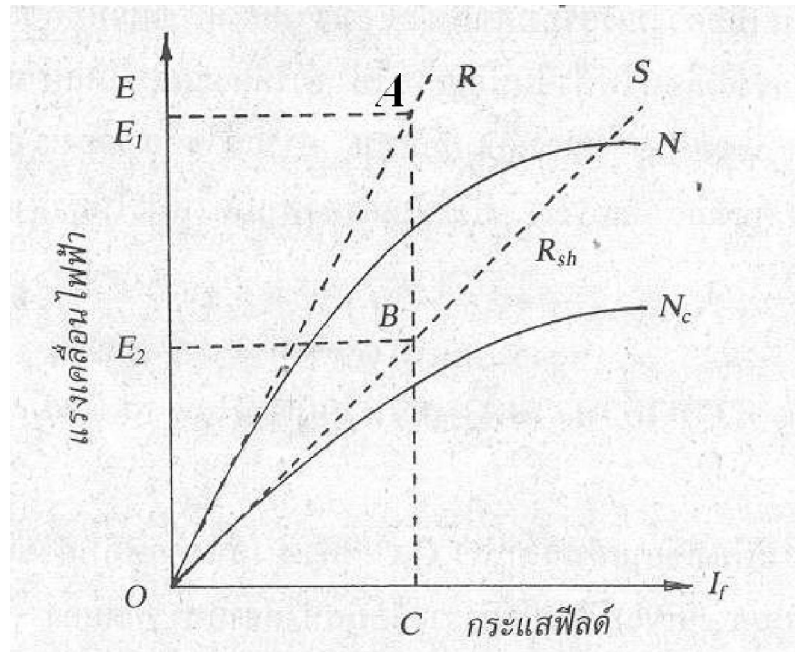
จากสมการ $E = K\phi N$ เมื่อ I_f คงที่จะได้ ϕ คงที่ด้วย

ดังนั้นจะได้ $E_1 \propto N_1$ และ $E_2 \propto N_2$

นั่นคือ
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{หรือ} \quad E_2 = E_1 \times \frac{N_1}{N_2} \quad \dots 4.1$$

4.3.6 ความเร็ววิกฤต (Critical speed , N_c)

ความเร็ววิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วที่ เป็นความเร็วซึ่งความต้านทานของชั้นที่ฟิล์มเท่ากับค่าความต้านทานวิกฤต (R_c) ของมัน ดังรูปที่ 4-6 เส้นกราฟ 1 เป็นเส้นโค้งการอิ่มตัวขณะไร้โหลดที่ความเร็วรอบ N เส้นตรง OR เป็นเส้นความต้านทานวิกฤตของเส้นกราฟ 1 เส้นตรง OS คือเส้นความต้านทานของชั้นที่ฟิล์ม (R_{sh}) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานวิกฤตของเส้นกราฟ 2 หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวขณะไร้โหลดที่ความเร็ววิกฤต N_c จากรูปที่ 4-6 ลากเส้นจากระดับแรงเคลื่อน E_1 ขนานกับแนวแกนนอน I_f ตัดเส้นตรง OR ที่จุด A ลากเส้นจากระดับแรงเคลื่อน E_2 ขนานกับแนวแกนนอน I_f ตัดเส้นตรง OS และลากเส้นตั้งฉากลงไปที่ตัดแกน I_f ที่จุด C จะได้



รูปที่ 4-6 การหาค่าความเร็ววิกฤต (Critical speed) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\frac{BC}{AC} = \frac{N_c}{N}$$

$$\therefore N_c = N \times \frac{BC}{AC}$$

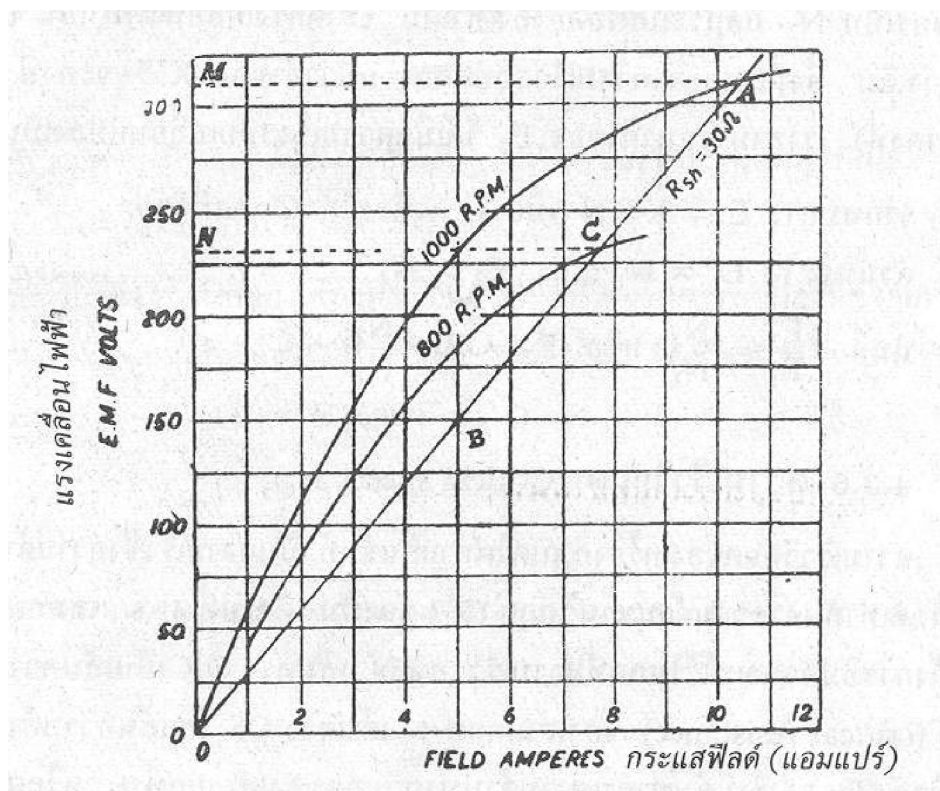
..4.2

เมื่อ N_c = ความเร็ววิกฤต (critical speed) เป็น rpm.
 N = ความเร็วเต็มพิกัด (full speed) เป็น rpm.
 BC = ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 เป็น V
 AC = ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 เป็น V

ตัวอย่างที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วหนึ่งเมื่อถูกขับให้หมุนด้วยความเร็ว $1,000 \text{ rpm}$ มีข้อมูลจากการทดสอบขณะไร้โหลด หรือ O.C.C. ดังนี้

E (V)	52.5	107.5	155	196.5	231	256.5	275	287.5
I _f (A)	1	2	3	4	5	6	7	8

จงหาค่าโดยประมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่ความเร็ว 800 rpm เมื่อความต้านทานของวงจรฟิลด์เป็น 30Ω



รูปที่ 4-7 เส้นกราฟ O.C.C. ที่ความเร็ว $1,000$ และ 800 rpm ของตัวอย่างที่ 4.1

วิธีทำ เขียนเส้นโค้ง O.C.C. ที่ความเร็วรอบ $1,000 \text{ rpm}$ ลงในกระดาษกราฟดังรูปที่ 4-6 แล้วลากเส้นความต้านทานของวงจรขั้วฟิลด์ $OA = 30\Omega$ ดังนี้

สมมุติให้กระแสฟิลด์เป็น 5 A คู่กับ $R_{sh} = 30\Omega$ จะได้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วฟิลด์เป็น 150V ดังนั้นจะได้จุด B ($I_f = 5\text{A}$, $E = 150\text{V}$)

ลากเส้นตรงจากจุดเริ่มต้น (จุด 0) ผ่านจุด B จะได้เส้นความต้านทานของวงจรฟิลด์ 30Ω ตัดผ่านเส้นโค้ง O.C.C. ที่จุด A

ลากเส้นในแนวระดับจากจุด A ตัดแกน Y ที่จุด M จะได้

OM เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างขึ้นได้ โดยมีความต้านทานของชั้นที่ฟิลด์เป็น 30Ω และหมุนด้วยความเร็วรอบ $1,000 \text{ rpm}$

จากสเกลของแรงเคลื่อนไฟฟ้า จะพบว่า $OM = 310V$

เราสามารถหาค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็ว 800 rpm ได้โดยใช้สูตร $E_2 = E_1 \times \frac{N_2}{N_1}$

เช่น ที่ $E_1 = 52.5V$, $E_2 = 52.5 \times \frac{800}{1000} = 42V$

ดังนั้นจึงหาค่า E_2 ที่ความเร็วรอบ 800 rpm ได้ดังนี้

E (V)	42	86	124	157.2	184.8	205.2	220	230
I _f (A)	1	2	3	4	5	6	7	8

เขียนเส้นโค้ง $O.C.C.$ ที่ความเร็วรอบ 800 rpm ลงในกระดาษกราฟดังรูปที่ 4-6

จะพบว่าเส้น $R_{sh} = 30\Omega$ จะตัดกับ $O.C.C.$ ที่จุด C

ลากเส้นในแนวระดับจากจุด C ตัดกับแกน Y ที่จุด N

จากสเกลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะได้ $ON = 230V$

ตัวอย่างที่ 4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วหนึ่ง ถูกขับด้วยความเร็ว 300 rpm มีข้อมูลจากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิดดังนี้

I _f (A)	0	2	3	4	5	6	7
E (V)	7.5	92	132	162	183	190	212

จงเขียนเส้นโค้ง $O.C.C.$ ที่ความเร็ว 375 rpm แล้วหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นวงจรฟิลด์ที่มีความต้านทาน 40Ω

- อยากทราบว่าต้องเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรฟิลด์อีกเท่าไร แรงเคลื่อนไฟฟ้าจึงจะลดลงเหลือ $200V$ ที่ความเร็วรอบ 375 rpm
- ถ้าไม่มีการเพิ่มความต้านทานดังข้อ ก. จงหากระแสไหลของเครื่องกำเนิดเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว $200V$ และมีความต้านทานของอาร์เมเจอร์ 0.4 โอห์ม ไม่คำนึงถึงอาร์เมเจอร์รีแอคชั่น สมมติว่าความเร็วรอบคงที่

วิธีทำ หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 375 rpm ได้จากสูตร

$$E_2 = E_1 \times \frac{N_2}{N_1}$$

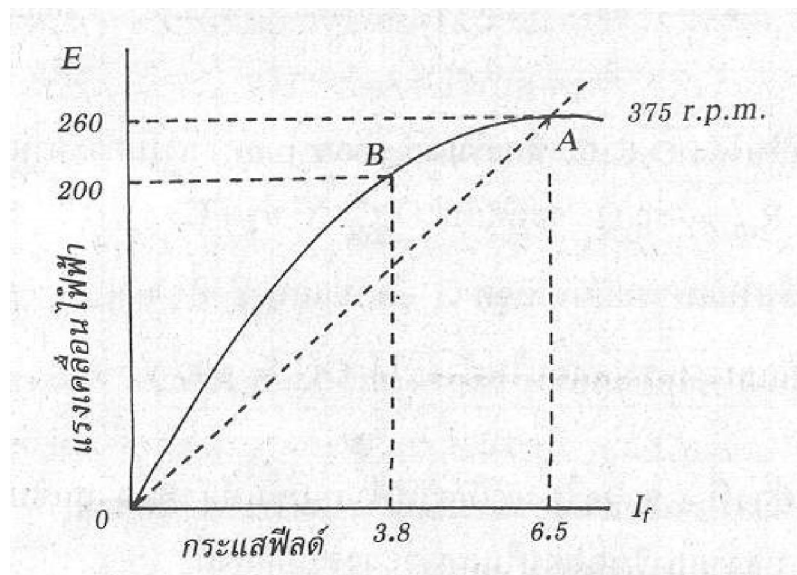
หรือ
$$E_2 = E_1 \times \frac{375}{300}$$

ดังนั้นจะได้ค่า E_2 แต่ละค่าที่ความเร็วรอบ 375 rpm ดังนี้

I_f (A)	0	2	3	4	5	6	7
E (V)	9.4	115	165	202.5	228.8	237.5	265

เขียนเส้นโค้ง O.C.C. ที่ความเร็ว 375 rpm ได้ดังรูปที่ 4-7 โดยเส้นตรง OA เป็นเส้นตรงความต้านทานของชั้นที่ฟิลด์ $R_{sh} = 40\Omega$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตรงกับจุด A คือ 260V เป็นขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นความต้านทานของชั้นที่ฟิลด์ 40Ω



รูปที่ 4-7 เส้นกราฟของตัวอย่างที่ 4.2

- จากรูปที่ 4-7 จะสังเกตเห็นว่าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 200V ตรงกับจุด B บนเส้นโค้ง O.C.C. จะต้องใช้กระแสกระตุ้นฟิลด์ 3.8A

$$\therefore \text{ความต้านทานของชั้นที่ฟิลด์} = \frac{200}{3.8} = 52.6 \Omega$$

$$\therefore \text{จะต้องเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรฟิลด์} = 52.6 - 40 = 12.6 \Omega$$

- ในกรณีนี้ถือว่าชั้นที่ฟิลด์มีความต้านทาน = 40Ω
 โจทย์กำหนดให้ มีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว = 200V

$$\text{และความต้านทานของอาร์เมเจอร์} = 0.4\Omega$$

$$\therefore \text{กระแสฟลักซ์} = \frac{200}{40} = 5A$$

จากตาราง *O.C.C.* ที่ความเร็ว 375 rpm เมื่อใช้กระแสกระตุ้นฟลักซ์ $5A$ จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $228.8V$

$$\text{จากสูตร} \quad E = V_t + I_a R_a$$

$$\therefore I_a R_a = E - V_t$$

$$0.4 I_a = 228.8 - 200$$

$$I_a = \frac{28.8}{0.4} = 72A$$

$$\text{แต่} \quad I_{sh} = 5A$$

$$\therefore \text{กระแสโหลด } I = 72 - 5 = 67A \quad \text{ตอบ}$$

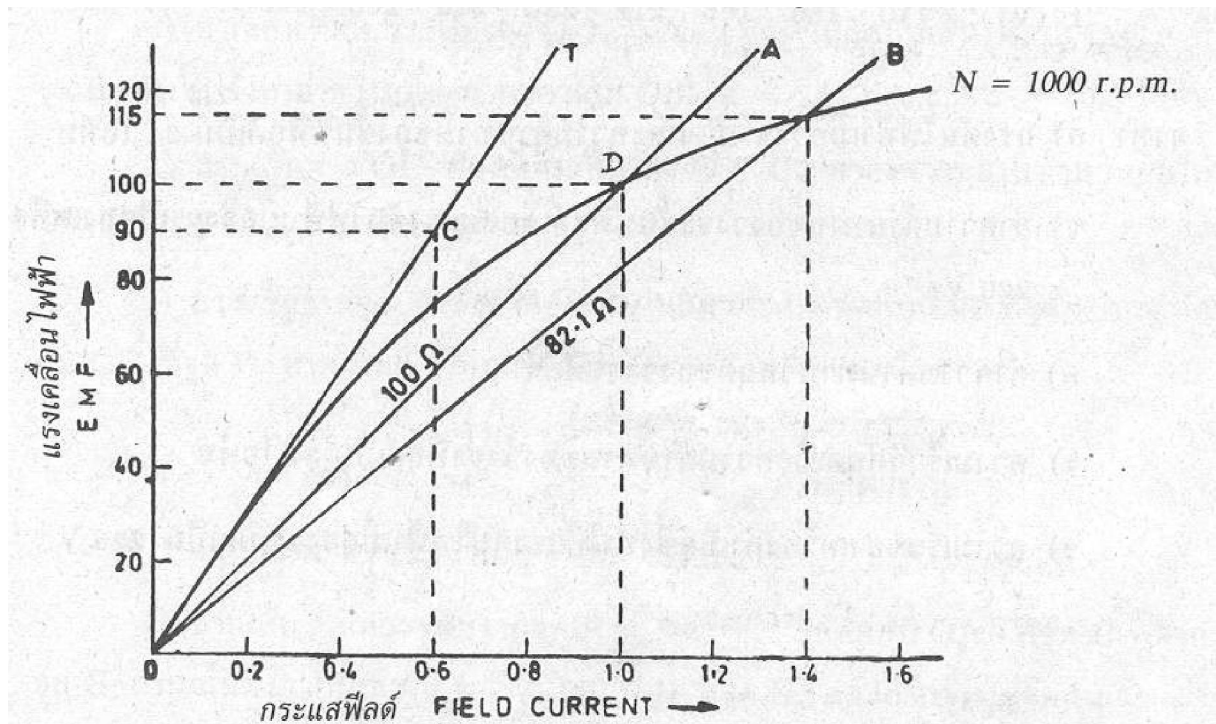
ตัวอย่างที่ 4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกวงจรกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก ตัวหนึ่งถูกขับด้วยความเร็ว 1000 rpm มีคุณลักษณะในสภาวะวงจรเปิด (*open circuit characteristic*) ดังนี้

$I_f (A)$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$E (V)$	30	55	75	90	100	110	115	120

ถ้าเครื่องกำเนิดดังกล่าวถูกต่อวงจรเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั้้นท์และถูกขับด้วยความเร็ว 1000 rpm มีความต้านทานของขดลวดวงจรฟลักซ์ 100 โอห์ม จงหา

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดและกระแสกระตุ้นฟลักซ์
- ความต้านทานวิกฤต
- ค่าความต้านทานของวงจรฟลักซ์ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $115V$ เมื่อวงจรเปิด

วิธีทำ เขียนเส้นโค้ง *O.C.C.* ลงในกระดาษกราฟ ดังรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 เส้นกราฟของตัวอย่างที่ 4.3

ลากเส้นความต้านทานของชั้นฟิลด์ OA ซึ่งมีค่า $R_{sh} = 100 \Omega$

- จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิด = $100V$ และกระแสกระตุ้นฟิลด์ = $1A$
- ลากเส้นตรง OT สัมผัสกับ $O.C.C.$ ซึ่งเส้นตรง OT นี้คือเส้นความต้านทานวิกฤต ถ้าพิจารณาจุด C บนเส้นตรง OT จะหาค่าความต้านทานวิกฤตได้ดังนี้

$$R_c = \frac{90V}{0.6A} = 150 \Omega$$

- เส้นความต้านทานของวงจรฟิลด์ OB ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิด = $115V$ โดยใช้กระแสกระตุ้นฟิลด์ = $1.4A$ ดังนั้น

$$R_{sh} = \frac{115V}{1.4A} = 82.1 \Omega$$

I _r (A)	2	3	4	5	6	7	8	9
E (V)	110	155	186	212	230	246	260	271

- แรงดันไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดและความต้านทานของชั้นที่ฟิลด์เป็น 34 โอห์ม
- ค่าความต้านทานของวงจรชั้นที่ฟิลด์เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดลงเหลือ 220V
- ค่าความต้านทานวิกฤตของวงจรฟิลด์
- ความเร็ววิกฤตเมื่อความต้านทานของวงจรฟิลด์เป็น 34 โอห์ม
- ความเร็วของเครื่องกำเนิดซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดเป็น 225V

Figure 10 is a graph showing the relationship between E.M.F. (Y-axis, 0 to 300) and FIELD CURRENT (X-axis, 0 to 9) for a generator at 400 r.p.m. The graph illustrates the effect of load on the generator's performance. Three curves are shown: A (no load), B (100% load), and C (200% load). Key points include M (no load at 250V), P (100% load at 220V), N (no load at 220V), F (200% load at 220V), B (100% load at 220V), G (200% load at 220V), D (no load at 0V), E (100% load at 0V), and K (200% load at 0V).

- แรงดันไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดจากกราฟ คือ $OM = 255\Omega$
- ลากเส้นในแนวระดับจากจุด $N = 220V$ ไปตัดกับเส้นโค้ง $O.C.C.$ ที่จุด B ดังนั้น จึงหาค่าความต้านทานของเส้น OB ได้ $= \frac{220V}{5.4A} = 40.7\Omega$

- ลากเส้นตรง OC สัมผัสกับเส้นโค้ง $O.C.C.$ หาค่าความต้านทานวิกฤตได้ $= \frac{140V}{2.25A} = 62.2\Omega$
- ลากเส้นจากจุด D ตั้งฉากกับเส้นในแนวระดับ ตัดกับ OA ที่จุด E และตัดกับ OC ที่จุด F หาความเร็ววิกฤตได้ดังนี้

$$\frac{N_C}{400} = \frac{DE}{DF} \quad \text{หรือ} \quad N_C = 400 \times \frac{110}{202}$$

- ลากเส้นในแนวระดับจากจุด $P = 225V$ ไปตัดกับ OA ที่จุด G จากจุด G ลากเส้นตั้งฉากกับแกน I_f ตัดกับแกน I_f ที่จุด K แล้วลากขึ้นไปตัดกับเส้นโค้ง $O.C.C.$ ที่จุด H

ถ้าสมมติให้ N' เป็นความเร็วซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดเป็น $225V$ และความต้านทานของชั้นฟิล์มเป็น 34 โอห์ม จะได้

$$\frac{N'}{400} = \frac{GK}{HK} \quad \text{หรือ} \quad N' = 400 \times \frac{225}{241}$$

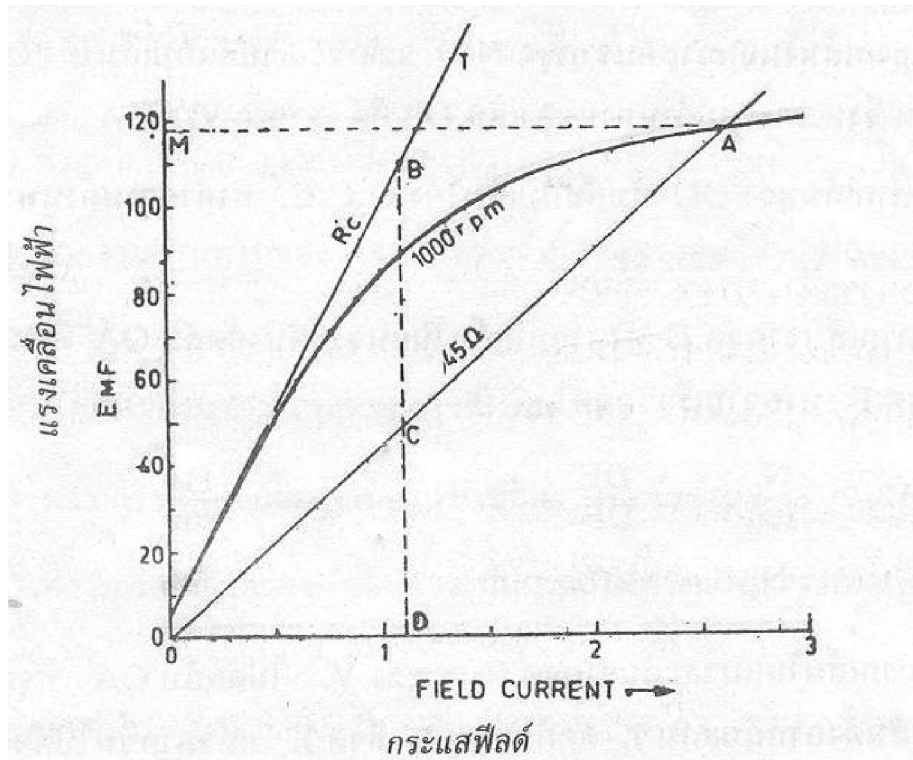
ตัวอย่างที่ 4.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วหนึ่งตัวหนึ่ง มี 4-pole , $110V$., $1,000 \text{ rpm}$ มีข้อมูลจากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิดดังนี้

$I_f(A)$	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
$E(V)$	5	50	85	102	112	116	120

อาร์เมเจอร์ถูกพันขดลวดแบบ Lap มีตัวนำ 114 ตัว ความต้านทานของฟิล์ม 45 โอห์ม จงหา

- แรงดันไฟฟ้าเมื่อไรโหลด
- ความต้านทานวิกฤต
- ความเร็ววิกฤต
- จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างต่อหนึ่งขั้ว

วิธีทำ เขียนเส้นโค้ง $O.C.C.$ ลงในกระดาษกราฟดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 เส้นกราฟต่างๆ ของตัวอย่างที่ 4.5

ลากเส้นความต้านทานของฟีลด์ $OA = 45\Omega$

- แรงดันไฟฟ้าเมื่อไรโหลด คือ $OM = 118V$
- ลากเส้น OT สัมผัสกับ $O.C.C.$ จากจุด B บนเส้น OT จะตรงกับค่า $E = 110V$ และตรงกับค่า $I_f = 1.1A$ ดังนั้น

$$R_c = \frac{110V}{1.1A} = 100\Omega$$

- จากจุด B บนเส้นตรง OT ลากเส้นตรงลงมาตั้งฉากกับแกน X ตัดกับเส้น OA ที่จุด C ดังนั้นจึงหาความเร็ววิกฤตได้ดังนี้

$$\frac{N_c}{1000} = \frac{CB}{BD} \quad \text{หรือ} \quad N_c = 1000 \times \frac{49}{110} = 445 \text{ rpm}$$

- จากข้อมูลในตารางที่โจทย์กำหนด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (เมื่อกระแสฟีลด์ $I_f = 0$) คือ $5V$

$$\therefore \text{จากสูตร} \quad E_g = \frac{Z\Phi NP}{60a} \quad \text{หรือ}$$

$$5 = \frac{144 \times \Phi \times 1000 \times 4}{60 \times 4}$$

$$\therefore \Phi = \frac{5 \times 60}{1000 \times 144} = 2.08 \text{ mWb}$$

ตัวอย่างที่ 4.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วหนึ่ง มีข้อมูลจากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิด (*O.C.C. Test*) ที่ความเร็ว 800rpm ดังนี้

I_f (A)	1	2	3	4	6	8	10
E (V)	90	185	251	290	324	345	360

ถ้าความต้านทานของชั้นฟิล์มเป็น 50Ω และมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว $300V$ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์เป็น 0.1Ω เมื่อจ่ายโหลดสมมติว่าเส้นแรงแม่เหล็กลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์แอคชั่น 5% จงหากำลังเอาต์พุตที่เครื่องกำเนิดจ่ายโหลด

วิธีทำ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเป็น $300V$ และ $R_{sh} = 50\Omega$

ดังนั้นเราหากระแสชั้นฟิล์มได้ดังนี้

$$I_{sh} = \frac{300V}{50\Omega} = 6A$$

จากตารางข้อมูลที่โจทย์กำหนด กระแสชั้นฟิล์ม $6A$ ตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า $324A$

เมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลด ทำให้เกิดอาร์เมเจอร์แอคชั่น มีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง 5% จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง 5% ด้วย

$$\text{ดังนั้นเมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลด แรงเคลื่อนไฟฟ้า} = 0.95 \times 324 = 307.8V$$

หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานของอาร์เมเจอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_a R_a &= E - V \\ &= 307.8 - 300 = 7.8V \end{aligned}$$

$$\text{แต่ } R_a = 0.1\Omega$$

$$\text{ดังนั้น } I_a = \frac{7.8V}{0.1\Omega} = 78A$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{กระแสโหลด } I_L &= I_a - I_{sh} \\ &= 78 - 6 = 72A \end{aligned}$$

$$\text{กำลังเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด} = 300 \times \frac{72}{1000} = 21.6 \text{ kW}$$

ตัวอย่างที่ 4.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบลونغซันท์คอมเปานด์ขนาด $250kW$, $500V$ ตัวหนึ่งหมุนด้วยความเร็ว $1000 rpm$ มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น $480V$ เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดความเร็วลดลงเป็น $975 rpm$ และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเพิ่มขึ้นเป็น $500V$ ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น 15% จากไร้โหลดถึงโหลดเต็มพิกัด จงหาความต้านทานของอาร์เมเจอร์ เมื่อชั๊รีฟฟิลด์มีความต้านทาน 0.2Ω และ 100Ω ตามลำดับสมมติให้มีแรงดันไฟฟ้าตกที่แปรงถ่านข้างละ $1V$

วิธีทำ แรงดันไฟฟ้าเมื่อไร้โหลด ที่ความเร็ว $1000 rpm = 480V$

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น 15% จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 15% ด้วย แต่ความเร็วรอบลดลงเป็น $975 rpm$ ดังนั้น จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโหลดเต็มพิกัดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E &= 480 \times \frac{975}{1000} \times 1.15 \\ &= 538.2V \end{aligned}$$

โจทย์กำหนด แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อโหลดเต็มพิกัด คือ $V = 500V$

$$\text{กระแสโหลดเต็มพิกัด } I_L = \frac{250 \times 10^3}{500} = 500A$$

$$\text{กระแสชั๊นฟิลด์ } I_{sh} = \frac{500}{100} = 5A$$

$$\text{กระแสอาร์เมเจอร์ } I_a = 500 + 5 = 505A$$

$$\text{แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชั๊รีฟฟิลด์} = 505 \times 0.02 = 10.1V$$

$$\text{แรงดันไฟฟ้าตกที่แปรงถ่าน} = 2 \times 1 = 2V$$

$$\text{แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานของอาร์เมเจอร์} = 505 R_a$$

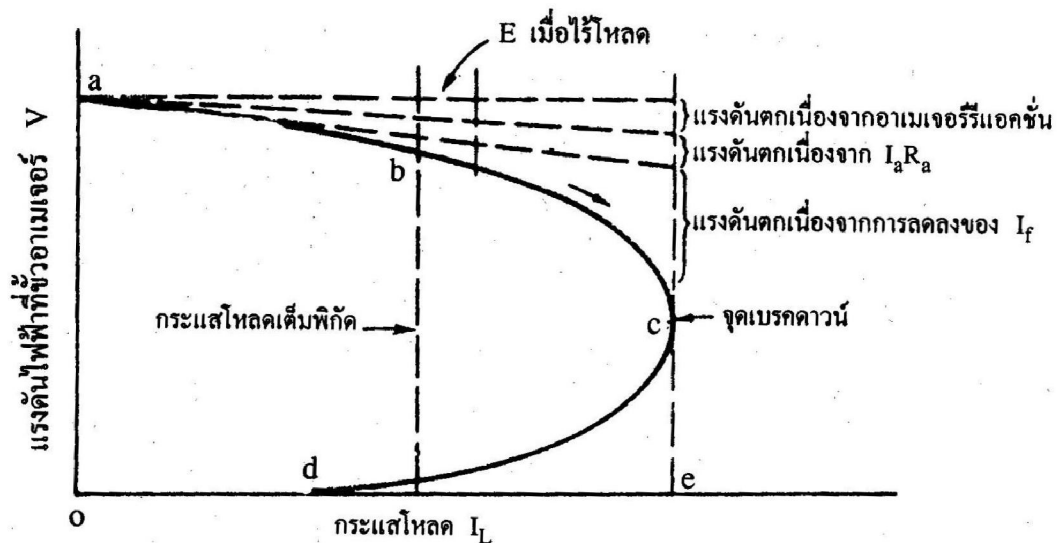
$$\begin{aligned} \text{แรงดันไฟฟ้าตกทั้งหมดในวงจรของอาร์เมเจอร์} &= E_g - V_t \\ &= 538.1 - 500 \\ &= 38.1V \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad 10.1 + 2 + 505 R_a = 38.1$$

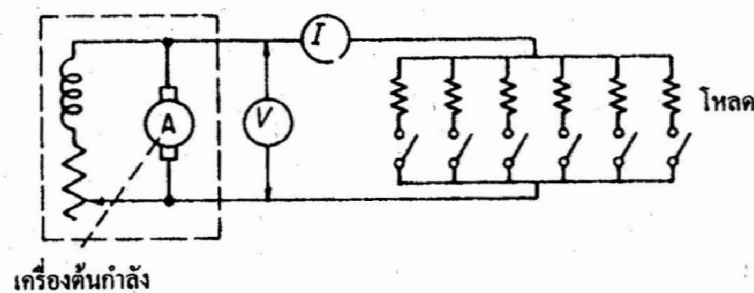
$$\text{หรือ} \quad 505 R_a = 26$$

$$\begin{aligned} \therefore R_a &= \frac{26}{505} \\ &= 0.0515\Omega \end{aligned}$$

4.3.7 คุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั๊นท์ (External characteristics of shunt generator)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-11 เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั๊นท์

หลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า (*build up*) ขณะไร้โหลดเรียบร้อยแล้ว เมื่อต่อโหลดเข้าไปที่ขั้วของเครื่องกำเนิดโดยมีโวลท์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และแอมป์มิเตอร์วัดกระแสที่ไหลผ่านโหลด ดังรูปที่ 4-11 (ข) ค่อยๆ เพิ่มโหลดทีละค่าโดยรักษาความเร็วรอบให้คงที่ไว้ ณ ความเร็วเต็มพิกัด (*rated speed*) จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลงเรื่อยๆ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น การลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเนื่องจากสาเหตุ 3 ประการคือ

- ลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอคชั่น
- แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ ($I_a R_a$ drop)
- กระแสฟิลด์ลดลงเนื่องจากผลของข้อ ก. และ ข.

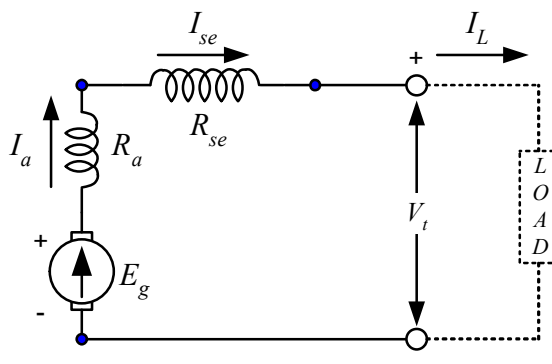
ในรูปที่ 4-11 (ก) $a b c d$ เป็นเส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้ว จะสังเกตเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง เมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น และจะลดลงมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกอีกด้วย จุด b เป็นจุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสโหลดเต็มพิกัด เมื่อเพิ่มกระแสโหลดต่อไปจนกระทั่งถึงจุด C ซึ่งเรียกว่าจุดเบรกดาว์น (*breakdown point*) แม้ว่าลดค่าความต้านทานของโหลดต่อไปอีกกระแสโหลดจะไม่เพิ่มอีกต่อไป แต่จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังช่วงเส้นกราฟ cd ดังนั้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วที่กระแสโหลดจะมีค่าจำกัดค่าหนึ่งเสมอ คือกระแส oe ในรูปที่ 4-11 (ก) เมื่อลดค่าความต้านทานของโหลดจนมีค่าเป็นศูนย์ (จุด d) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสฟลักซ์จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย

ในทางปฏิบัติมักจะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วทำงานอยู่ในช่วงเส้นกราฟ ab เท่านั้นส่วนในย่านที่เหลือคือ bc นั้นเป็นย่านที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานจ่ายโหลดเกินพิกัดและย่านที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากในขณะที่กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วค่อนข้างคงที่ในสภาพที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่บ่อยๆ

4.3.8 คุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์ (*External characteristics of series generator*)

4.3.8.1 การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์แตกต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอื่น คือ ขดลวดอาร์เมเจอร์ ขดลวดสนามแม่เหล็กหรือขดลวดซีรีย์ฟิลด์ และโหลดต่ออนุกรมกันดังวงจรในรูปที่ 4-12 ถ้าไม่มีโหลดต่ออยู่ที่ขั้ววงจรของเครื่องกำเนิดจะเป็นวงจรเปิด (*open circuit*) ไม่มีกระแสผ่านทั้งอาร์เมเจอร์และขดลวดซีรีย์ ดังนั้นในสภาวะไร้โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ แต่จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยเกิดขึ้นเนื่องจากอาร์เมเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเท่านั้น



รูปที่ 4-12 วงจรการต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์จะทำให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าก็ต่อเมื่อมีโหลดมาต่อที่ขั้วของเครื่อง เพื่อให้วงจรของเครื่องกำเนิดเป็นวงจรปิด (*Closed circuit*) แรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยซึ่งเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ทำให้มีกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลออกจากขั้วบวกของอาร์เมเจอร์ ไหลผ่านขดลวดฟิลด์และไหลผ่านโหลด เครื่องกำเนิดจะให้ออกแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หากต่อโหลดเพิ่มเข้าไปที่ขั้ว (ลดความต้านทานของโหลดลง) กระแสที่ไหลผ่านขดลวดซีรีส์ฟิลด์จะยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ออกแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตามขนาดฟลักซ์แรงดันของเครื่อง กระบวนการดังกล่าวที่กล่าวมาข้างต้นเรียกว่า “การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า” (*building up*)

4.3.8.2 คุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์

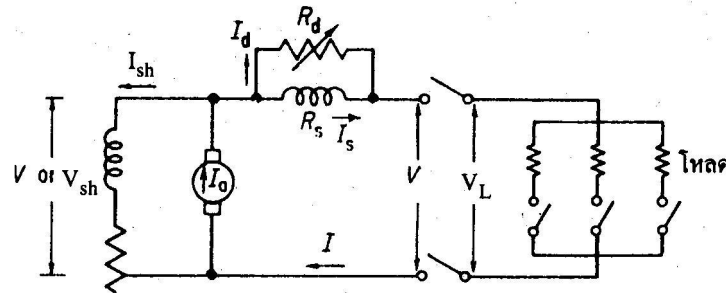
คุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์แสดงด้วยเส้นกราฟ b ในรูปที่ 4-13 สำหรับเส้นกราฟ a ในรูปคือ เส้นกราฟการอิ่มตัวของโร้โหลด หรือเป็นเส้นกราฟแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์ซึ่งได้มาจากการต่อวงจรทดลองเป็นแบบกระตุ้นแยก

เส้นกราฟ b เป็นคุณลักษณะเมื่อจ่ายโหลด หรือคุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์ หรือเส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิด ความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการ คือ

- ลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอคชัน
- ลดลงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานของอาร์เมเจอร์และขดลวดฟิลด์ $I_a(R_a + R_{se})$

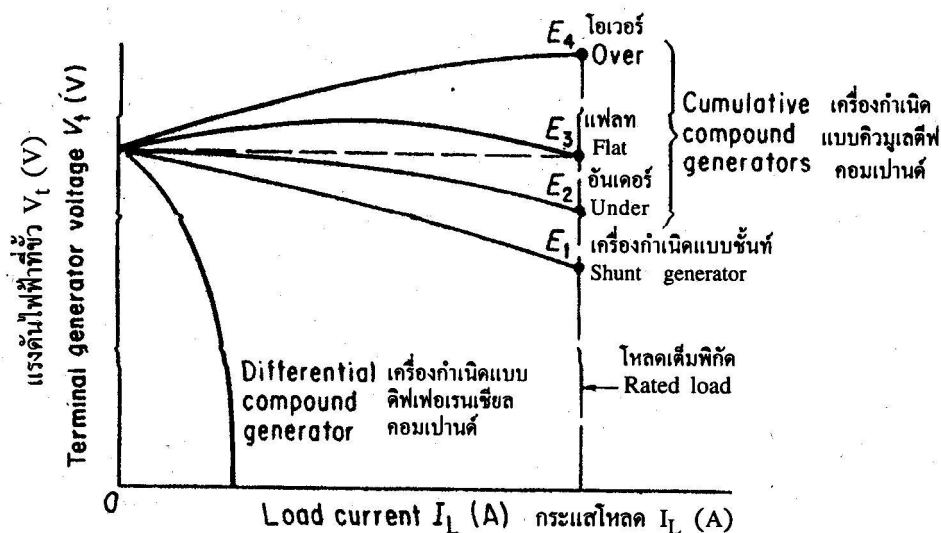
จากเส้นกราฟ b จะสังเกตเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์ จะเปลี่ยนแปลงมากตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด กล่าวคือถ้าลดความต้านทานของโหลดลงเล็กน้อยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะเพิ่มขึ้นมาก และในทางกลับกันถ้าเพิ่มความต้านทานของโหลดเพียงเล็กน้อย แรงดันไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ด้วยสาเหตุดังกล่าวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่

4.3.9 คุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ (External characteristics of compound generator)



รูปที่ 4-13 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่รวมเอาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั๊นท์และแบบซีรียส์ไว้ในตัวเดียวกัน เราเคยทราบมาแล้วว่าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั๊นท์เมื่อเพิ่มกระแสโหลดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะลดลง แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรียส์ เมื่อเพิ่มกระแสโหลด แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะเพิ่มขึ้น (ก่อนที่แกนของขั้วแม่เหล็กจะถึงจุดอิ่มตัว) ถ้านำเอาคุณลักษณะทั้งสองแบบดังกล่าวมารวมไว้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวเดียวกัน แล้วปรับกระแสของขดลวดซีรียส์ฟิลด์ให้เหมาะสม ก็จะสามารถขจัดปัญหาเรื่องการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 4-14 เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ที่จะกล่าวต่อไป คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ “คิวมูเลทีฟ คอมเปานด์” (cumulative compound) ซึ่งแอมแปร์-เทินส์ของขดลวดชั๊นท์ฟิลด์และซีรียส์ฟิลด์จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกัน คุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดแบบนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ

ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวดซีรีย์ฟิลด์มีปริมาณเพียงพอที่จะชดเชยการลดลงของแรงดันไฟฟ้า (*Voltage drop*) ของเครื่องกำเนิดแบบขั้นที่ได้ ก็จะกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ที่มีคุณลักษณะดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า “แฟลท คอมเปานด์” (*Flat compound*) ดังเส้นกราฟในรูปที่ 4-14

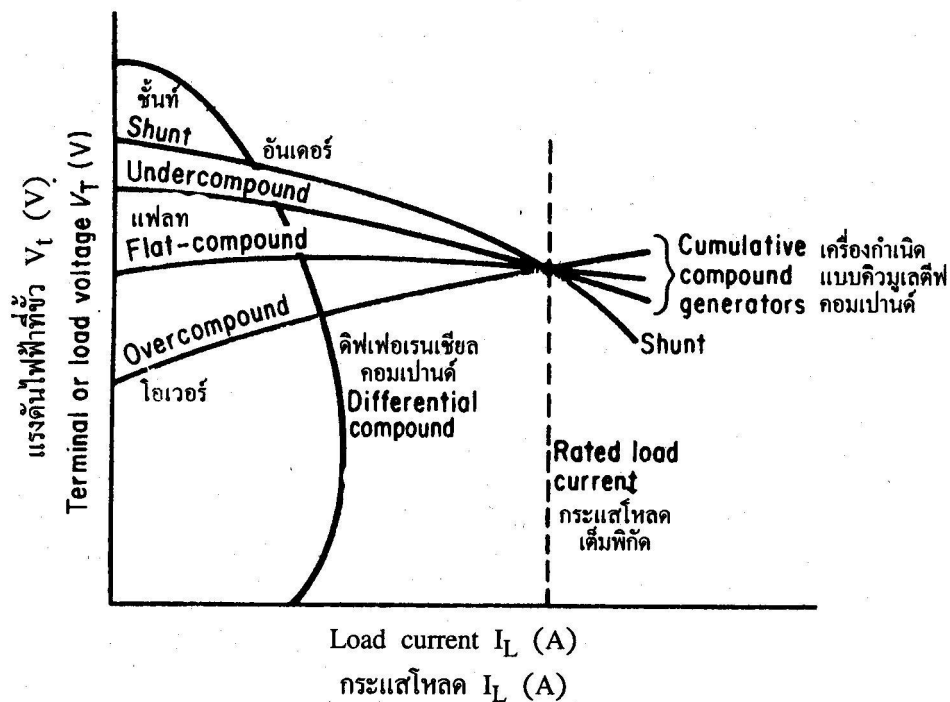
แต่ถ้าเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดซีรีย์ฟิลด์ให้มากขึ้น ก็จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากเกินไปพอที่จะชดเชยการลดลงของแรงดันไฟฟ้า (*voltage drop*) ของเครื่องกำเนิด จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อโหลดเต็มพิกัดมีขนาดสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อไร้โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ที่มีคุณลักษณะดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า “โอเวอร์ คอมเปานด์” (*Over compound*) ดังเส้นกราฟในรูปที่ 4-14

แต่ถ้าเพิ่มจำนวนจำนวนรอบของขดลวดซีรีย์ฟิลด์ให้มากขึ้น ก็จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากเกินไปพอที่จะชดเชยการลดลงของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อโหลดเต็มพิกัดมีขนาดสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อไร้โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ที่มีคุณลักษณะดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า “โอเวอร์ คอมเปานด์” (*Over compound*) ดังเส้นกราฟในรูปที่ 4-14

ในทางตรงกันข้ามถ้าลดจำนวนรอบของขดลวดซีรีย์ฟิลด์ให้น้อยลง ก็จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยเกินไป ไม่เพียงพอที่จะชดเชยการลดลงของแรงดันไฟฟ้างกล่าว จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อโหลดเต็มพิกัดมีขนาดต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อไร้โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ที่มีคุณลักษณะดังกล่าว มีชื่อเรียกว่า “อันเดอร์ คอมเปานด์” (*Under compound*) ดังเส้นกราฟในรูปที่ 4-14

ในการปรับเพื่อให้ได้คุณลักษณะต่างๆ กันทั้ง 3 ลักษณะดังกล่าวข้างต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคิวมูลेटีฟ ยังสามารถทำได้โดยใช้ “ไดเวอร์เตอร์เตอร์” (*diverter*) คือ รีโอสตาทชนิดความต้านทานต่ำ (*low resistance*) ต่อขนานกับขดลวดซีรีย์ฟิลด์ก็ได้ ซึ่งไดเวอร์เตอร์เตอร์จะทำหน้าที่แบ่งกระแสจากขดลวดซีรีย์ฟิลด์ หมายถึงจะปรับกระแสที่ไหลผ่านซีรีย์ฟิลด์ได้มากหรือน้อยตามต้องการ

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ “ดิฟเฟอเรนเชียล คอมเปานด์” (*differential compound*) ซึ่งแอมแปร์-เทินส์ของขดลวดซีรีย์ฟิลด์จะมีทิศทางต่อต้าน (หักล้าง) กับแอมแปร์-เทินส์ของขดลวดชั้นฟิลด์นั้น แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะตกลงอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น ดังเส้นกราฟในรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-15 กราฟคุณลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดแบบคอมพาวนด์
เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคงที่ เมื่อกระแสโหลดไหลเต็มที่

4.3.10 โวลต์เตจ เรกกูเรชั่น (Voltage regulation)

โวลต์เตจ เรกกูเรชั่น หมายถึง ความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าเมื่อไร้โหลด (no load voltage) กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเต็มพิกัด (full load voltage) โดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเต็มพิกัด ดังนั้นค่าของเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจ เรกกูเรชั่นยิ่งต่ำ คุณลักษณะในการทำงาน (performance characteristic) ของเครื่องยิ่งดี เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\% \text{โวลต์เตจ เรกกูเรชั่น} = \frac{V_{no-load} - V_{full-load}}{V_{full-load}} \times 100 \quad \dots 4.3$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } V_{no-load} &= \text{แรงดันไฟฟ้าเมื่อไร้โหลด} \\ V_{full-load} &= \text{แรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเต็มพิกัด} \end{aligned}$$

หมายเหตุ : โวลต์เตจเรกกูเรชั่น ยิ่งมีค่าต่ำ คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดยิ่งดี

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันทจะมีค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่นประมาณ 5-15% เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกจะมีค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่นต่ำกว่าแบบชันท กรณีของแฟลทคอมพาวนด์จะมีค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่นเป็นศูนย์ และกรณีของโอเวอร์คอมพาวนด์จะมีค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่นติดลบ ประมาณ -5 ถึง -15%

แต่ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรี่ย์นั้น เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลง จึงไม่มีการพิจารณาค่าของโวลท์เตจเรกกูเลชัน

ตัวอย่างที่ 4.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้นที่ตัวหนึ่งมีคุณลักษณะทางแม่เหล็ก (*magnetic characteristic*) ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm ดังนี้

I_f (A)	1	2	4	6	8	10
E (V)	192	312	468	566	626	660

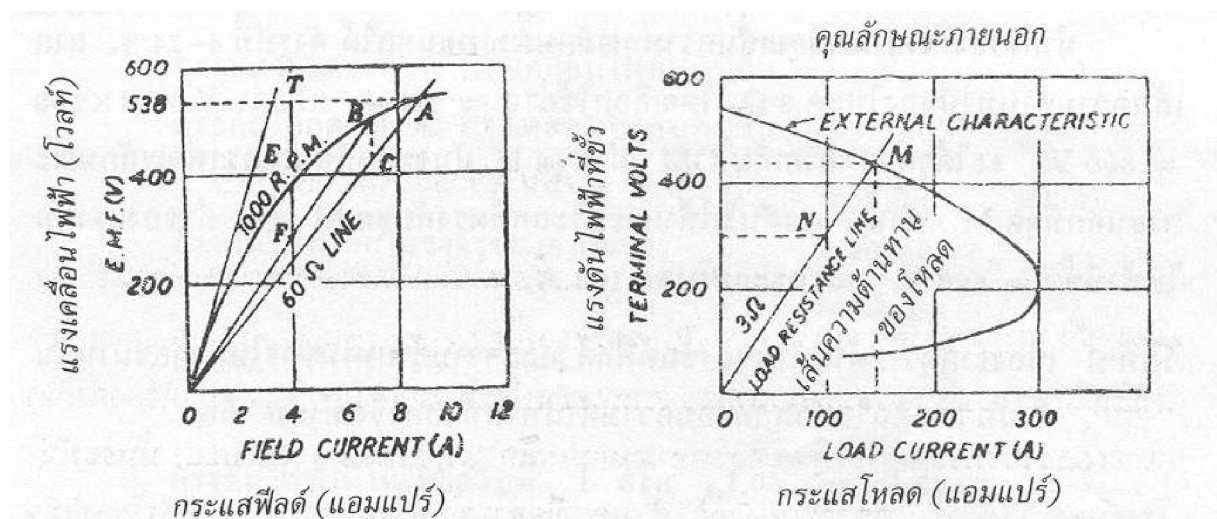
ถ้าเครื่องกำเนิดหมุนด้วยความเร็ว 1000 rpm จงหา

- แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อวงจรเปิด
- ค่าโดยประมาณของความต้านทานวิกฤตของวงจรฟิลด์
- แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสโหลด เมื่อความต้านทานของโหลดเป็น 3Ω ความต้านทานของฟิลด์และอาร์เมเจอร์เป็น 60Ω และ 0.5Ω ตามลำดับ

วิธีทำ เขียนตาราง O.C.C. ที่ความเร็ว 1000 rpm

$$\begin{aligned} \text{ได้โดยใช้สูตร} \quad E_2 &= E_1 \times \frac{N_2}{N_1} \\ E_2 &= E_1 \times \frac{1000}{1200} \end{aligned}$$

I_f (A)	1	2	4	6	8	10
E (V)	160	260	390	472	522	550



รูปที่ 4-14 ก.เส้นกราฟคุณลักษณะเมื่อไร้โหลด รูปที่ 4-14 ข. เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอก

เขียนเส้นโค้ง $O.C.C.$ ที่ความเร็ว 1000 rpm ได้ดังรูปที่ 4-14 ก. แล้วลากเส้นความต้านทานของขั้วฟิลด์ $OA = 60\Omega$

- จุดตัดระหว่างเส้นความต้านทานของขั้วฟิลด์ และเส้นโค้ง $O.C.C.$ คือ จุด A จะได้แรงดันไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิด $= 528V$
- หาค่าความต้านทานวิกฤตได้โดยลากเส้น OT จากจุดเริ่มต้นให้สัมผัสกับเส้นโค้ง $O.C.C.$ ความชันของเส้น OT จะได้ค่าความต้านทานวิกฤตดังนี้ กำหนดจุด E บนเส้น OT ซึ่งจะตรงกับกระแสฟิลด์ $= 2.5A$ และตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า $400V$ ดังนั้น $R_c = \frac{400}{2.5} = 160\Omega$
- การหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสโหลดเมื่อทราบความต้านทานของโหลดจะต้องเขียนเส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกและเส้นความต้านทานของโหลดจุดตัดระหว่างเส้นกราฟทั้งสองคือค่าที่เราต้องการ

เราสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ของคุณลักษณะภายนอกได้จากตารางต่อไปนี้

กระแสขั้วฟิลด์ I_{sh}	1	2	4	6	8	10
แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_g	160	260	390	472	522	550
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว $V_t = 60 I_{sh}$	60	120	240	360	480	600
$I_a R_a = E_g - V_t$	100	140	150	112	42	-
กระแสอาร์เมเจอร์ $= I_a R_a / 0.5$	200	280	300	224	84	-
กระแสโหลด $I_L = I_a - I_{sh}$	199	278	296	218	76	-

นำค่าของ V/I มาเขียนเส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกได้ ดังรูปที่ 4-14 ข. ลากเส้นความต้านทานของโหลด 3Ω โดยเลือกใช้ค่า $I = 100A$ และค่า $V = 3 \times 100 = 300V$ จะได้จุด N ลากเส้น OM ผ่านจุด N มันจะตัดกับเส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกที่จุด M ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ตรงกับจุด M คือค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว $= 426V$ และกระแสโหลด $143A$

วิธีที่ 2 เนื่องจากความต้านทานของขั้วฟิลด์ ละความต้านทานของโหลดต่อขนานกันดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานทั้งสองจึงเท่ากัน คือ

$$\begin{aligned}
 3I_L &= 60 I_{sh} \quad \text{หรือ} \quad I_L = 20 I_{sh} \\
 I_a &= I_L + I_{sh} \\
 &= 20I_{sh} + I_{sh} = 21 I_{sh} \\
 V_t &= E_g - I_a R_a = E_g - 21I_{sh}R_a \\
 \text{แต่ } V_t &= 3 I_L = 60I_{sh} \\
 \text{ดังนั้น } 60 I_{sh} &= E_g - 21 I_{sh} \times 0.5 \\
 \therefore E_g &= 60 I_{sh} + 10.5 I_{sh} = 70.5 I_{sh}
 \end{aligned}$$

ถ้าสมมติให้ $I_{sh} = 4A$, $E = 70.5 \times 4 = 282V$ จะตรงกับจุด F ในรูปที่ 4-14 ก. เมื่อลากเส้นตรงจากจุด O ผ่านจุด F จะได้เส้นตรง OB ตัดกับเส้นโค้ง $O.C.C.$ ที่จุด B หาค่าของ E ได้จากจุด B และหาค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่ตรงกับจุดกระแสชั้วที่ฟิลด์ได้โดยลากเส้น BC ลงมาในแนวดิ่ง ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และกระแสฟิลด์จะอยู่ตรงกับจุด C คือ จะได้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว $= 426V$ และกระแสชั้วที่ฟิลด์ $I_{sh} = 7.01A$

ดังนั้นจะได้กระแสโหลด $I = 20 \times 7.01 = 142A$

ตัวอย่างที่ 4.8 ในระบบจ่ายไฟ $220V$ ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์ทำหน้าที่เป็นบูสเตอร์ โดยทำงานอยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรงของเส้นกราฟคุณลักษณะทางแม่เหล็กคือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น $1V$ ทุกครั้งที่กระแสไหลเพิ่มขึ้น $6 A$ ถ้าความต้านทานทั้งหมดในวงจรอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น 0.02Ω สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านแหล่งจ่ายไฟคงที่ จงหาแรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้รับเมื่อกระแสไหลเป็น $96 A$ และคำนวณหา กำลังเอาต์พุตของบูสเตอร์

วิธีทำ

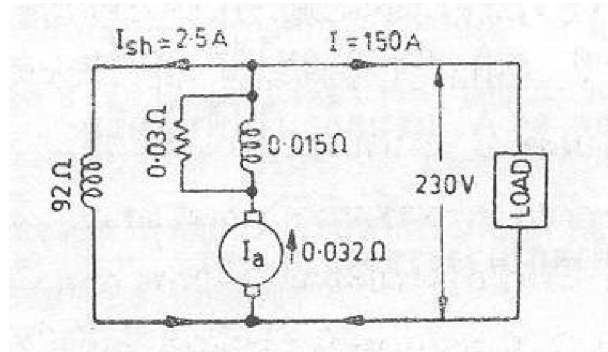
$$\begin{aligned}
 & \text{กระแสไหล } 6A \text{ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น} & = & 1V \\
 \therefore & \text{กระแสไหล } 96A \text{ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น} & = & \frac{96}{6} \\
 & & = & 16V \\
 & \text{แรงดันไฟฟ้าตกในวงจรของอาร์เมเจอร์} & = & 96 \times 0.02 \\
 & & = & 1.9V \\
 & \text{แรงดันไฟฟ้าสุทธิของบูสเตอร์} & = & 16 - 1.9 \\
 & & = & 14.1V \\
 \therefore & \text{แรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้รับ} & = & 14.1 \times 96 \\
 & & = & 1354W \\
 & & = & 1.354kW
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์ตัวหนึ่งมีเส้นกราฟคุณลักษณะภายนอกเป็นเส้นตรงจาก 0 ถึง $50V$ ที่กระแส $200A$ เมื่อทำงานเป็นบูสเตอร์โดยต่ออยู่ระหว่างบัสบาร์ของสถานีต้นกำลังกับสายป้อนที่มีความต้านทาน 0.3Ω จงหาความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างปลายสายป้อนและบัสบาร์ ถ้ากระแสเป็น ก) $160A$ ข) $50A$

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 \text{ก) } & \text{แรงดันไฟฟ้าตกในสายป้อน} & = & 160 \times 0.3 & = & 48V \\
 & \text{แรงดันไฟฟ้าของบูสเตอร์} & = & 50 \times \frac{160}{200} & = & 40V \\
 \therefore & \text{แรงดันไฟฟ้าสุทธิจะลดลง} & = & 48 - 40 & = & 8V \\
 \text{ข) } & \text{แรงดันไฟฟ้าตกในสายป้อน} & = & 50 \times 0.3 & = & 15V \\
 & \text{แรงดันไฟฟ้าของบูสเตอร์} & = & 50 \times \frac{50}{200} & = & 12.5V \\
 \therefore & \text{แรงดันไฟฟ้าสุทธิจะลดลง} & = & 15 - 12.5 & = & 2.5V
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบลองชั๊นท์คอมเปานด์ (*long shunt compound generator*) ตัวหนึ่ง เมื่อจ่ายกระแสโหลด $150A$ มีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว $230V$ จงหา ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ข) กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ในอาร์เมเจอร์ และ ค) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วฟิลด์ ซีรีย์ฟิลด์ ไดโวลทเตอร์ และอาร์เมเจอร์ ซึ่งแต่ละส่วนมีความต้านทาน 92Ω , 0.015Ω , 0.03Ω และ 0.032Ω ตามลำดับ



รูปที่ 4-15 วงจรของตัวอย่างที่ 4.10

วิธีทำ $I_{sh} = \frac{230}{92} = 2.5A$

$I_a = 150 + 2.5 = 152.5A$

เนื่องจากซีรีย์ฟิลด์และไดโวลทเตอร์ต่อขนานกัน ดังรูปที่ 4-15 จึงหาความต้านทานรวมได้ดังนี้

$$\frac{R_{se} \times R_d}{R_{se} + R_d} = \frac{0.015 \times 0.03}{0.015 + 0.03} = 0.01\Omega$$

ความต้านทานรวมในวงจรของอาร์เมเจอร์

$$= 0.032 + 0.01 = 0.042\Omega$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวงจรของอาร์เมเจอร์

$$= 152.5 \times 0.042 = 6.405V$$

•แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$E_g = 230 + 6.405 = 236.405V$$

•กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ในอาร์เมเจอร์

$$E_g \times I_a = 236.405 \times 152.5 = 36051W$$

•กำลังสูญเสียในอาร์เมเจอร์

$$I_a^2 R_a = (152.5)^2 \times 0.032 = 744W$$

กำลังสูญเสียในซีรีย์ฟิลด์และไดโวลทเตอร์

$$= (152.5)^2 \times 0.01 = 232W$$

กำลังสูญเสียในขดลวดฟิลด์

$$V I_{sh} = 230 \times 2.5 = 575W$$

กำลังที่จ่ายโหลด

$$V \times I = 230 \times 150 = 34,500W$$

$$\text{รวมกำลังไฟฟ้าทั้งหมด} = 36,051W$$

ตัวอย่างที่ 4.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมเปานด์ตัวหนึ่งจ่ายโหลด $100A$ ด้วยแรงดันไฟฟ้า $220V$ อาร์เมเจอร์ชั้นที่ฟิลด์และซีรีย์ฟิลด์มีความต้านทาน 0.1Ω , 50Ω และ 0.06Ω ตามลำดับ จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสอาร์เมเจอร์เมื่อเครื่องกำเนิดต่อวงจรแบบ ก) *short shunt* ข) *long shunt* ค) แอมแปร์-เทินส์ของซีรีย์ฟิลด์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรในข้อ ข. ถ้ามีไดเวอร์เตอร์ ขนาด 0.14Ω มาต่อขนานกับซีรีย์ฟิลด์ ไม่คำนึงถึงอาร์เมเจอร์รีแอคชั่นและแรงดันไฟฟ้าตกที่แปรงถ่าน

วิธีทำ ก) เมื่อเครื่องกำเนิดต่อวงจรแบบ *short shunt* ดังรูปที่ 4-16 ก.

$$\begin{aligned} \text{แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมซีรีย์ฟิลด์} &= 100 \times 0.06 = 6V \\ I_{sh} &= \frac{226}{50} = 4.52A \\ \therefore I_a &= 100 + 4.52 = 104.52A \\ I_a R_a &= 104.52 \times 0.1 = 10.452V \\ \therefore E_g &= 220 + 6 + 10.452 \\ &= 236.452V \end{aligned}$$

ข) เมื่อเครื่องกำเนิดต่อวงจรแบบ *long shunt* ดังรูปที่ 4-16 ข.

$$\begin{aligned} I_{sh} &= \frac{220}{50} = 4.4A \\ \therefore I_a &= 100 + 4.4 = 104.4A \end{aligned}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอาร์เมเจอร์และซีรีย์ฟิลด์

$$\begin{aligned} &= 104.4 \times 0.16 = 16.7V \\ \therefore E_g &= 220 + 16.7 = 236.7V \end{aligned}$$

ค) เมื่อมีไดเวอร์เตอร์ขนาด 0.14Ω ต่อขนานกับซีรีย์ฟิลด์ ดังรูปที่ 4-16 ค. จำนวนแอมแปร์-เทินส์ของซีรีย์ฟิลด์เมื่อไม่มีไดเวอร์เตอร์

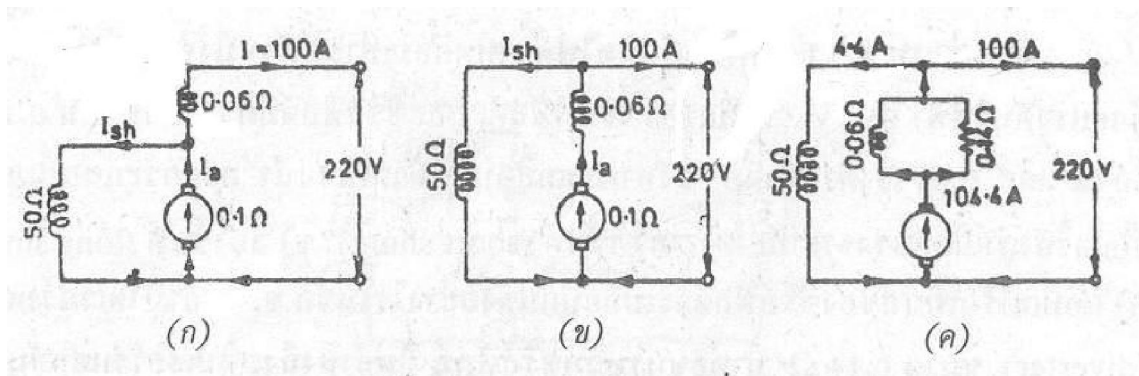
$$= n \times 104.4 = 104.4n$$

เมื่อต่อไดเวอร์เตอร์ขนานกับซีรีย์ฟิลด์ หากกระแสที่ไหลผ่านซีรีย์ฟิลด์ได้ดังนี้คือ

$$= \frac{104.4 \times 0.14}{0.14 + 0.06} = 73.1A$$

$$\therefore \text{จำนวนแอมแปร์-เทินส์ของซีรีย์ฟิลด์ลดลงเหลือ} = 73.1 \times n$$

$$\text{ดังนั้นแอมแปร์-เทินส์ของซีรีย์ฟิลด์ลดลงเหลือ} = \frac{73.1n}{104.4n} \times 100 = 70\%$$



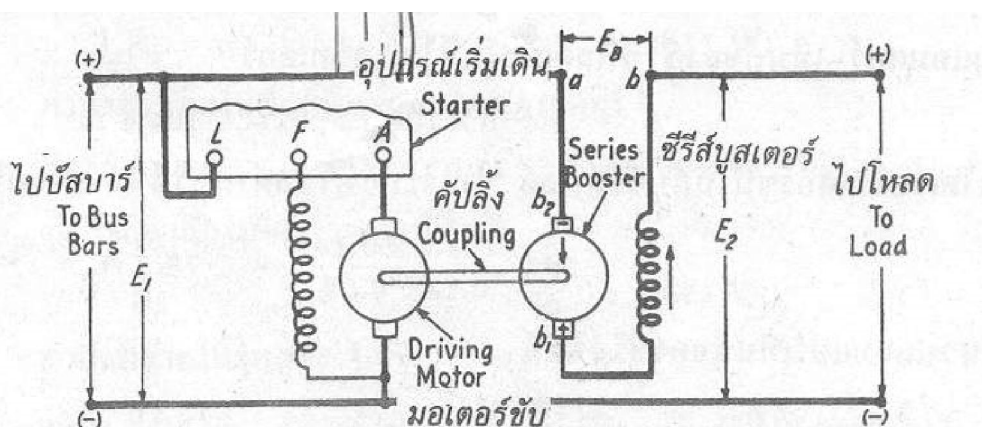
รูปที่ 4-16 วงจรของตัวอย่างที่ 4.11

4.4 ลักษณะการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (*Application of D.C. generator*)

4.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกวงจรกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก (*Separately excited generator*) เป็นเครื่องกำเนิดที่ต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแยกต่างหากเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดฟิลด์โดยเฉพาะ ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานที่ต้องการความแน่นอน เช่น ใช้ในระบบวาร์ดเลียวนาร์ด (*Ward Leonard System*) ซึ่งเป็นระบบการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั๊นท์ (*Shunt generator*) เหมาะสมงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่ นิยมใช้เป็นเอ็กไซเตเตอร์ (ตัวกระตุ้น) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ หรือใช้หรือใช้เป็นเอ็กไซเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส เป็นต้น

4.4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์ (*Series generator*) ใช้ทำหน้าที่เป็นซีรีย์ บูสเตอร์ (*series booster*) ในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง โดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์อนุกรมกับสายส่งดังรูปที่ 4-17 โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อชดเชยแรงดันตกเนื่องจากความต้านทานของสาย



รูปที่ 4-17 การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีย์ ทำหน้าที่เป็นซีรีย์บูสเตอร์เพื่อชดเชยแรงดันตกในสาย

จากรูปที่ 4-17 เมื่อ E_1 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย E_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่โหลด และ E_b เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากซีรียัสเตอร์

$$E_2 = E_1 + E_b$$

ถ้าปรับค่า E_b ให้เท่ากับแรงดันตกในสาย จะได้แรงดันไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย

4.4.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคิวมูเลตีฟ คอมเปานด์ (*cumulative compound*) เครื่องกำเนิดแบบนี้มีคุณลักษณะภายนอกแบ่งออกได้ 3 ลักษณะคือ

- 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแฟลท คอมเปานด์ (*flat compound*) นิยมใช้ในงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่ และใช้ในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความยาวไม่มากนัก
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโอเวอร์ คอมเปาวด์ (*over compound*) นิยมใช้เป็นเครื่องกำเนิดในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระยะทางห่างไกลจากโหลดมาก เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าส่วนที่เพิ่มขึ้นชดเชยกับแรงดันตกในสาย
- 3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอันเดอร์ คอมเปานด์ (*under compound*) ไม่นิยมใช้กันเนื่องจากให้คุณลักษณะภายนอกใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้นที่ ดังรูปที่ 4-13

4.4.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดิฟเฟอเรนเชียล คอมเปานด์ (*differential compound*) ใช้งานเชื่อมโลหะ (*arc welding*) ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

แบบฝึกหัดบทที่ 4

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้วหนึ่ง มีความเร็ว 1000 r.p.m. มีข้อมูลจากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิดดังตารางข้างล่าง

$I_f(\text{A})$	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
$E(\text{V})$	102	150	188	215	232	245

ขั้วที่ฟิลด์มีความต้านทาน 37Ω จงหาความเร็วที่คาดว่าจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นได้ ถ้าอาร์เมเจอร์มีความต้านทาน 0.04Ω ไม่คำนึงถึงแรงดันตกที่แปรงถ่านและอาร์เมเจอร์รีแอคชั่น จงหาค่าโดยประมาณของแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 1000 r.p.m. เมื่อกระแสอาร์เมเจอร์เป็น 100A. ($725 \text{ r.p.m.}, 231\text{V.}$)

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้วหนึ่ง มีความเร็ว 850 r.p.m. มีข้อมูลจากการทดสอบเมื่อวงจรเปิดดังตาราง

$I_f(\text{A})$	0	0.5	1	2	3	4	5
$E(\text{V})$	10	60	120	199	232	248	258

ถ้าขั้วที่ฟิลด์มีความต้านทาน 50Ω จงหาความต้านทานที่ใช้ต่อเข้าไปในวงจรฟิลด์เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 240V. ที่ความเร็ว 1000 r.p.m. (64.3Ω)

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้วหนึ่งหมุนด้วยความเร็ว 700 r.p.m. เมื่อต่อวงจรแบบแยกวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็ก มีตารางข้อมูลเมื่อวงจรเปิดดังนี้

$I_f(\text{A})$	20	40	50	60	75
$E(\text{V})$	190	360	410	450	480

จงหากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะที่เครื่องต่อวงจรแบบกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยตัวเอง และหมุนด้วยความเร็ว 600 r.p.m. โดยมีโหลดขนาด 6Ω ต่ออยู่ที่ขั้วของเครื่องกำเนิด ถ้าความต้านทานของอาร์เมเจอร์และขั้วฟิลด์เป็น 0.3Ω ไม่คำนึงถึงผลของอาร์เมเจอร์รีแอคชั่น ($61.5\text{A.}, 369\text{V.}$)