

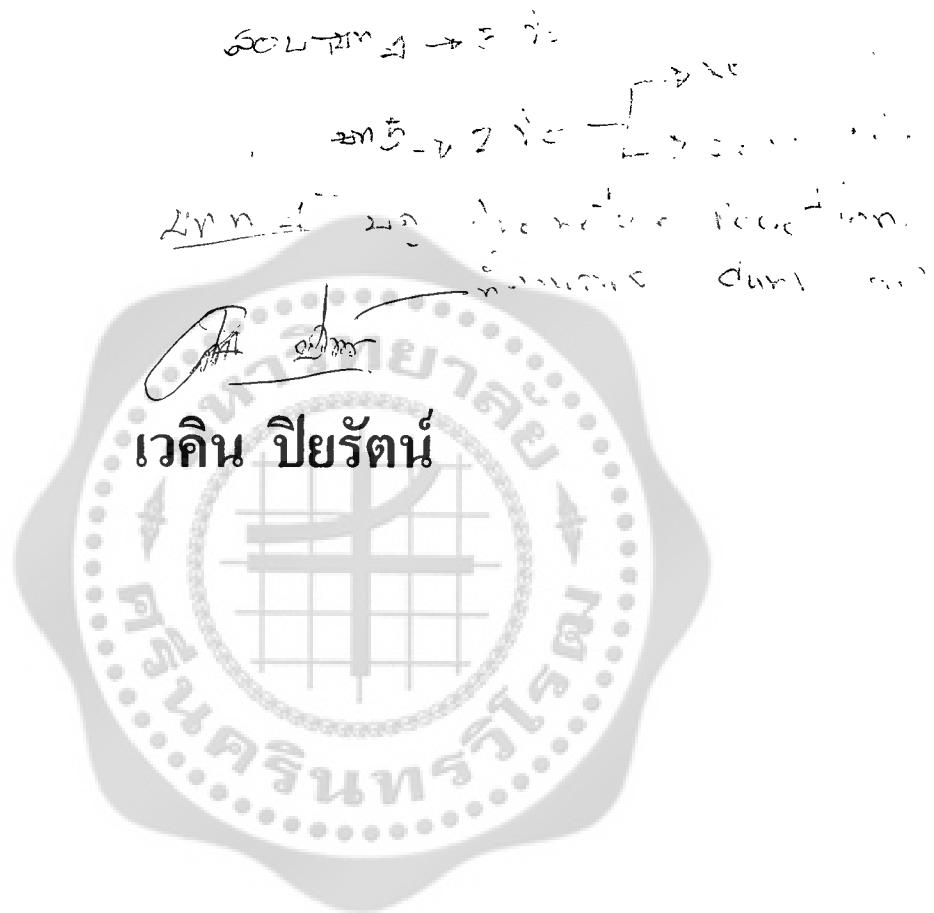
TK ๖๖๖

๑๔๙๖

๑๗๑๗

เครื่องจักรกลไฟฟ้า ๑

Electrical Machine I



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ชื่อหนังสือ : เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1

ชื่อผู้แต่ง : เวคิน ปิยรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

พิมพ์ครั้งที่ : 1
พฤษภาคม 2542
ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เเพรินดิ้ง ถนนกำแพงเพชร กรุงเทพมหานคร
โทร.272-4916-7

จำนวน : 500 เล่ม



อาจารย์เวคิน ปิยรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทร์ องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นนทบุรี 26120 โทร. (037) 322-605

คำนำ

สำหรับหนังสือเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 นี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนสำหรับนิสิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ในรายวิชา EE 245 Direct Eenergy conversion และ ET 155 Electromechanical Conversion ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตและหลักสูตรอุดสาಹกรรมศาสตรบัณฑิต นอกจากนี้ยังเหมาะสมสำหรับผู้สนใจทั่ว ๆ ไปที่ใช้ประกอบการเรียนรู้เพื่อศึกษาเครื่องจักรกลกระแสตรง หม้อแปลงไฟฟ้า และขบวนการแปลงสภาพพลังงาน เป็นต้น โดยแบ่งเนื้อหาไว้ออกเป็น 5 บทด้วยกัน ดังนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของวงจรแม่เหล็ก เพื่อเป็นพื้นฐานในศึกษาและวิเคราะห์ในบทอื่น ๆ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและการวิเคราะห์หม้อแปลงห้องทางอุดมคติและห้องปฏิบัติ โดยหลักการและทฤษฎีสามารถนำไปใช้ช่วยวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุนต่อไป

บทที่ 3 กล่าวถึงขบวนการแปลงสภาพพลังงานที่สำคัญเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน เป็นอุปกรณ์หลักสำหรับขบวนการดังกล่าว

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์เครื่องจักรกลกระแสตรงภายใต้เงื่อนไขในสภาวะคงตัว ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลกระแสตรง การควบคุมความเร็วรอบและแรงบิด

บทที่ 5 กล่าวถึงการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้า ในขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะทางไดนามิกส์

ท้ายสุดนี้การเขียนและเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้จะดำเนินไปตามลำดับขั้นตอน ไม่ได้ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย อันได้แก่ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ซึ่งเป็นผู้ชุดประการให้แก่ผู้เขียน ทำให้เกิดหนังสือเล่มนี้ขึ้นมาได้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณเพ็ญศิริ หนูใจคง คุณฉลอง โสดานัน คุณสมเกียรติ แก้วมีศรี และคุณสุรศักดิ์ ปิติวิโรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำต้นฉบับ และขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ที่ได้ใช้กำลังใจมาโดยตลอด หากมีข้อผิดพลาดประการใดเกิดขึ้นในหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนต้องขออภัยและจะปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้มีคุณภาพทางวิชาการที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

เวศิน ปิยรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

“ บุณยุกต อันเกิดจากการเรียนหนังสือเล่มนี้ ขอมอบให้แด่ คุณพ่อสำราญ และ คุณแม่อัมพา ปิยรัตน์
รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน ”



สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits)

1.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)	1
1.2 ไฮสเตอริซีส (Hysteresis)	16
1.3 การกระตุ้นด้วยไซนุซoidal อยดอัลลี่ (Sinusoidal Excitation)	23
1.4 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)	28
แบบฝึกหัด	34

บทที่ 2 หม้อแปลง (Transformers)

2.1 หม้อแปลงทางอุดมคติ (Ideal Transformer)	37
2.2 การพิจารณาคุณลักษณะสมบัติที่แท้จริงของหม้อแปลง(Practical Transformer)	42
2.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ (Determination of Equivalent Circuit Parameters)	45
2.4 การเบี่ยงเบนของศักดิ์ไฟฟ้า (Voltage Regulation)	50
2.5 ประสิทธิภาพ (Efficiency)	54
2.6 หม้อแปลงแบบออโต้ (Auto transformer)	59
2.7 หม้อแปลง 3 - เฟส (Three-Phase Transformers)	61
แบบฝึกหัด	69

บทที่ 3 การแปลงสภาพพลังงานกลไฟฟ้า (Electromechanical Energy Conversion)

3.1 ขบวนการแปลงสภาพพลังงาน (Energy Conversion Process)	72
3.2 พลังงานสนาม (Field Energy)	73
3.3 แรงทางกลในระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Mechanical Force in the Electromagnetic System)	79
3.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้านิดหมุน (Rotating Machines)	87
3.5 เครื่องจักรกลนิดหมุนทรงกระบอก (Cylindrical rotating machine)	89
แบบฝึกหัด	94

บทที่ 4 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง(DC Machines)	
4.1 การแปลงสภาพพลังงานกลไฟฟ้า (Electromagnetic Conversion)	97
4.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC. Machine)	101
4.3 ชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (Classification of DC. Machine)	128
4.4 คุณลักษณะ แรงบิด – ความเร็ว(Torque – Speed Characteristic)	155
แบบฝึกหัด	165

บทที่ 5 ภาวะชั่วคราวและภาวะทางไอนามิกส์(Transient and Dynamics)	
5.1 เครื่องกำนันดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น (Separately Excite DC Generator)	169
5.2 ภาวะทางไอนามิกส์ของมอเตอร์กระแสตรง(DC Motor Dynamics)	176
แบบฝึกหัด	184

บรรณานุกรม



บทที่ 1

วงจรแม่เหล็ก

(Magnetic Circuits)

หนังสือเล่มนี้กล่าวถึงเนื้อหาและหลักการเบื้องต้นเพื่อศึกษาอุปกรณ์การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานก่อ หรือการเปลี่ยนพลังงานก่อเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งขวนการดังกล่าวอาศัยเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุน เช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรกลชนิดเหนี่ยววนและเครื่องจักรกลแบบชิงโกรนัส เป็นต้น นอกจากนี้ ขวนการแปรรูปพลังงานยังสามารถทำได้โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (linear motion) โดยการกระตุนซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยววนของเส้นแรงแม่เหล็ก เช่น Solenoids และ Relay สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้านั้นไม่สามารถใช้เป็นอุปกรณ์แปลงสภาพพลังงานได้ แต่ก็มีเกณฑ์และทฤษฎีของหม้อแปลงจะนำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ขวนการแปรรูปพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงวัสดุแม่เหล็ก(magnetic materials) ที่ใช้เป็นตัวกลางของการแปรสภาพพลังงาน โดยการพิจารณาลักษณะรูปร่างและทิศทางสนามแม่เหล็ก ข้อดีของการนำวัสดุแม่เหล็กมาใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น ส่งผลให้ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าสูง นอกจากนี้การใช้วัสดุแม่เหล็กยังทำให้ เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีขนาดเด็กลงอีกด้วย

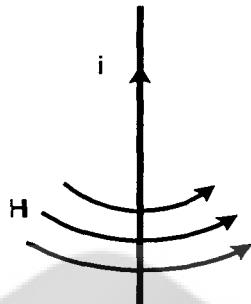
อย่างไรก็ตามแท้จริงแล้วนั้นวัสดุแม่เหล็กก็ได้ไว้เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็ก และวิธีการวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กก็อีกได้ไว้เป็นเรื่องสำคัญในบทนี้

1.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

การวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงพิจารณาจากวัสดุพาก ferromagnetic material ส่วนเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน เช่นเดียวกันพิจารณาจากวัสดุ ferromagnetic material ที่มีความสามารถเป็นตัวกลาง ซึ่ง เครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนใหญ่ยกเว้นแบบแม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังชุด漉คที่พันอยู่บนวัสดุ ferromagnetic materials

1.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส (i) และ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)

การพิจารณากระแสที่ไหลผ่านขดลวด(Coil) ที่สัมพันธ์กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งทิศทางของทางเดินเส้นแรง (flux lines) หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) (magnetic field intensity) สามารถคำนวณตามกฎหัวมือขวา โดยที่นิวตัน 4 ของมือขวา กำรอุบตัวนำ แทนทิศทางความเข้มสนามแม่เหล็ก และนิวตันแม่มือแทนทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ



รูปที่ 1.1 สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎของแอมเปร (Ampere's law) ดังรูปที่ 1.2 โดยที่ความเข้มสนามแม่เหล็กคำนวณได้ตามสมการ (1.1)

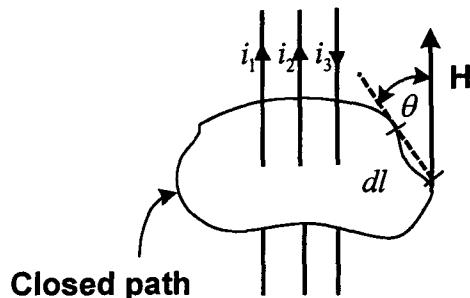
$$\oint H dl = \sum i = i_1 + i_2 - i_3 \quad (1.1)$$

เมื่อ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดบนเส้นรอบวง

dl คือ ความยาวของสนามแม่เหล็ก

ถ้ากำหนดให้ θ คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ H และ dl ดังนี้

$$\oint H dl \cos\theta = \sum i \quad (1.2)$$

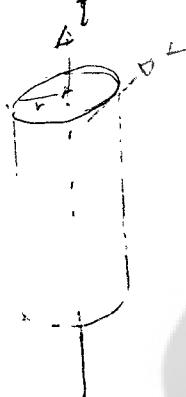


รูปที่ 1.2 อธิบายกฎของแอมเปร (Ampere's circuit law)

เมื่อพิจารณากระแส (i) ที่ไหลผ่านตัวนำดังรูปที่ 1.3 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่รัศมี r ของตัวนำวงกลม ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และ dl ทุกๆ จุดบนเส้นวงกลมนี้ทิศทางเดียวกันนั้นคือ $\theta = 0$ เนื่องจากวงกลมสมมาตรกัน ซึ่งมีผลทำให้ (H) มีค่าเท่ากันทุกๆ จุดบนเส้นวงกลมนี้ คือ จากสมการ (1.2) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\int H dl = i \quad H 2\pi r = i \quad H = \frac{i}{2\pi r} \quad (1.3)$$

$H = \text{Magnetic Field Intensity}$



รูปที่ 1.3 การพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่กำหนดให้กระแสซึ่งไหลผ่านตัวนำ

1.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเข้มสนามแม่เหล็ก ($B - H$)

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ทำให้เกิดความหนาแน่นเส้นเร่ง B ทุกๆ จุดที่มีค่า H สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ตามสมการ (1.4) และ (1.5) คือ

$$B = \mu H \quad Wb/m^2 \text{ หรือ } T \quad (1.4)$$

เมื่อ $\mu = \mu_r \mu_0$ ดังนั้นสมการ (1.4) เขียนใหม่ได้ คือ

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad Wb/m^2 \text{ หรือ } T \quad (1.5)$$

เมื่อ μ คือ คุณลักษณะของตัวกลาง เรียกว่า permeability ของตัวกลาง

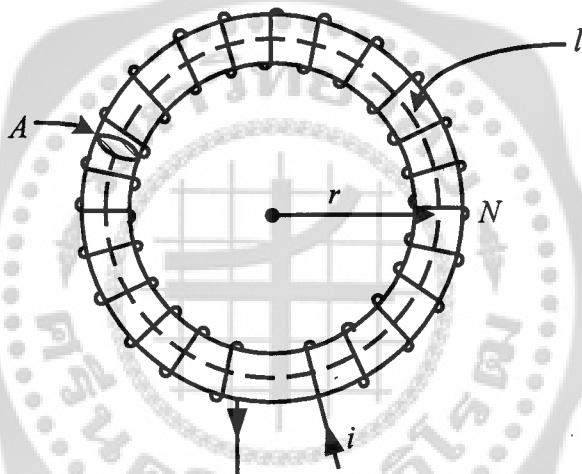
μ_0 คือ permeability ของ free space $(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$

μ_r คือ relative permeability ของตัวกลาง

สำหรับใน free space จำนวนหรือตัวนำไฟฟ้า เช่น อลูมิเนียม, ทองแดง มีค่า $\mu_r = 1$ อย่างไรก็ตาม วัสดุพาก ferromagnetic เช่น iron, cobalt และ nickel ค่า μ_r มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงหนึ่งร้อยถึงหลาย ๆ พัน ซึ่งวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า μ_r เป็นล้านแปลงในช่วง 2000 ถึง 6000 (ถ้า μ_r มีค่าสูงทำให้กระแสต่ำ ส่งผลให้ความหนาแน่นเส้นแรงในเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีค่าน้อย)

1.1.3 วงจรแม่เหล็กสมมูลย์ (Magnetic Equivalent Circuit)

วงจรแม่เหล็กอย่างง่ายดังรูปที่ 1.4 มีลักษณะของแกนเป็นรูปป่วงแหวน เรียกว่า toroid และมีขดลวดพันอยู่รอบ ๆ เมื่อกระแส (i) ไหลผ่านขดลวดที่พัน N รอบ ส่งผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) บนแกนภายใน toroid สำหรับเส้นแรงส่วนหนึ่งที่ผ่านออกมาร้านอก toroid เเรียกว่าเส้นแรงรั่ว (leakage flux) โดยทั่วไปมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้



รูปที่ 1.4 วงจรแม่เหล็กของ toroid

การพิจารณาทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กที่รัศมี r ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) คำนวณได้จากกฎของแอมเปอร์ นั่นคือ

กฎแอมเปอร์

$$l = 2\pi r$$

$$\oint H dl = Ni \quad \text{ก้าวสุดท้าย}$$

$$\boxed{Hl = Ni} \quad (1.6)$$

$$\boxed{H = \frac{Ni}{2\pi r}} \quad (1.7)$$

โดยที่ผลคูณระหว่างจำนวนรอบกับกระแส (N_i) เรียกว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force : mmf) เมื่อแทนด้วย F มีหน่วยเป็น แอมเปอร์ - รอบ (ampere - turn) นั้นคือ

$$F = Hl = Ni \quad At/m \quad (1.8)$$

$$H = \frac{Ni}{l} \quad At/m \quad \text{L' = Magnetic field intensity} \quad (1.9)$$

ดังนั้นจากสมการ (1.4) และ (1.9) เวียนความสัมพันธ์เพื่อหาค่า B ใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$B = \frac{\mu Ni}{l} \quad T \quad = \quad B = \frac{\mu Ni}{2\pi r} \quad (1.10)$$

ถ้าสมมุติว่าเส้นแรงทั้งหมดมีทางเดินภายใน toroid และไม่คิดผลของเส้นแรงรั่ว (magnetic leakage) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กตัดขวาง (flux crossing) บนพื้นที่หน้าตัด toroid จำนวนใด้ดังนี้ คือ

$$\Phi = \int B dA = BA \quad Wb \quad (1.11)$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงเฉลี่ยในแกน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของ toroid

ถ้าพิจารณาค่าความหนาแน่นเส้นแรงเฉลี่ยซึ่งสัมพันธ์กับทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กที่รัศมีเฉลี่ยของ toroid โดยที่ H คือ ความเข้มสนาม-แม่เหล็กของทางเดินนี้ ดังนั้นจากสมการ (1.10) และ (1.11) เวียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้ คือ

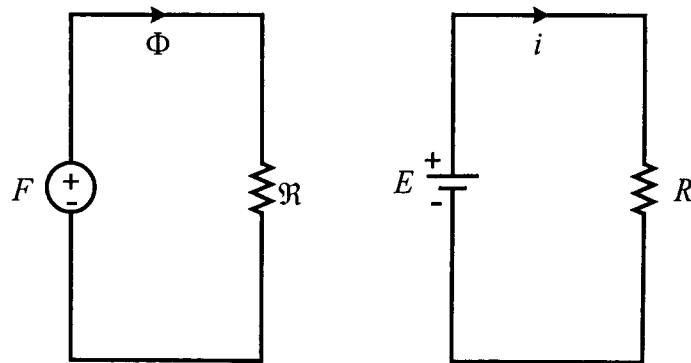
$$\Phi = \frac{\mu Ni}{l} A = \frac{Ni}{l/\mu A} \quad (1.12)$$

ถ้ากำหนดให้ $\mathfrak{R} = l/\mu A$ ดังนั้น

$$\Phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}} = \frac{F}{\mathfrak{R}} \quad \therefore \frac{F}{\mathfrak{R}} = \frac{H L}{\mathfrak{R}} = \frac{(V)}{\mathfrak{R}} \quad (1.13)$$

ความต้านทาน R หน่วย ohm = Ω

ความนำ = $\frac{1}{R}$ $\rightarrow G$ หน่วย Siemens = Ω^{-1}



(ก) วงจรแม่เหล็ก

(ข) วงจรไฟฟ้า

รูปที่ 1.5 เมริยบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{1}{P} \quad (1.14)$$

โดยที่

 \mathcal{R} คือ ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance of magnetic) P คือ ความนำแม่เหล็ก (Permeance of magnetic)

โดยสมการ (1.13) เป็นสมการที่พิจารณาเพื่อหาค่า Φ ซึ่งกำหนดให้แรงดึงแม่เหล็ก $F = Ni$ และสำหรับวงจรแม่เหล็กของ toroid สามารถแทนด้วยวงจรเสมือนดังรูปที่ 1.5(ก) สำหรับการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า สามารถพิจารณาในทออมของสมการต่าง ๆ ได้ตามตารางที่ 1.1

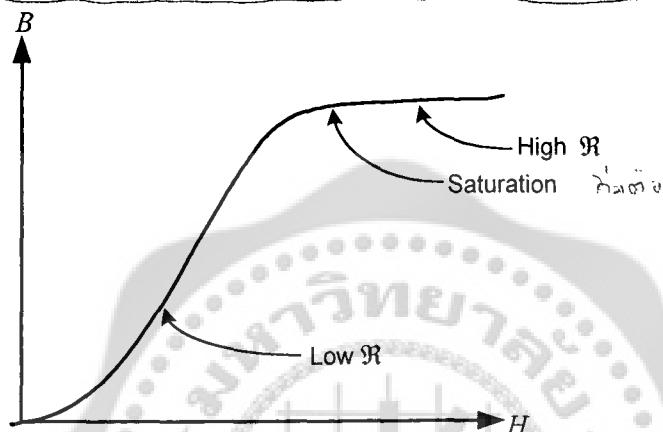
ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
แรงดันเหนี่ยวนำ (E)	แรงดึงแม่เหล็ก (F)
กระแส $(i = E/R)$	เส้นแรง $(\Phi = F/\mathcal{R})$
ความต้านทาน $(R = l/\sigma A)$	ความต้านทานแม่เหล็ก $(\mathcal{R} = l/\mu A)$

1.1.4 เส้นโค้งการทำแม่เหล็ก (Magnetization Curve)

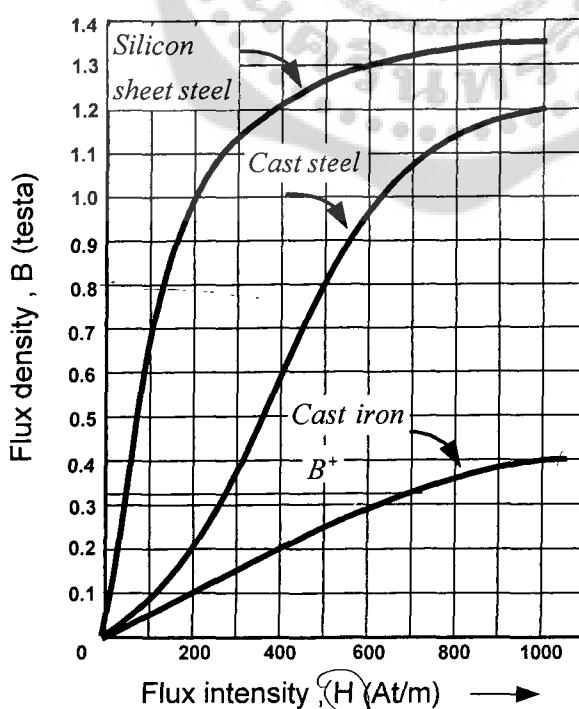
เมื่อพิจารณาค่าความเข้มเส้นแม่เหล็กที่ในแกนดังรูปที่ 1.4 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มปริมาณกระแสจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงในแกนเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 1.6 จะเห็นว่าความหนาแน่นเส้นแรง

B เพิ่มขึ้นอย่างเป็นชั้งเส้น ในช่วงความเข้มเส้นแรงมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามที่ค่าความเข้มเส้นแรง H สูง การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเส้นแรง B ไม่เป็นแบบชั้งเส้น เนื่องจากวัสดุแม่เหล็ก(magnetic material) ถึงจุดอิมตัว(saturation) สำหรับเส้นโค้ง $B-H$ ดังรูปที่ 1.6 เรียกว่าเส้นโค้งการทำแม่เหล็ก (magnetization curve) สำหรับความต้านทานแม่เหล็กของทางเดินแม่เหล็ก (magnetic path) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเส้นแรง (ถ้า H จะมีค่าต่ำถ้า B ต่ำและ H มีค่าสูงเมื่อ B สูง) ด้วยเหตุผลนี้ดังนั้นวงจรแม่เหล็กจะมีความแตกต่างจากการไฟฟ้าคือ วงจรไฟฟ้าความต้านทานไม่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลในวงจร ขณะที่ความต้านทานแม่เหล็กขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเส้นแรงในวงจรแม่เหล็ก



รูปที่ 1.6 คุณลักษณะเส้นโค้งทำแม่เหล็ก $B - H$

สำหรับรูปที่ 1.7 เป็นการพิจารณาคุณลักษณะสมบัติเส้นโค้งคุณลักษณะ $B - H$ ของแกนแม่เหล็ก (magnetic cores) สามชนิด ได้แก่ cast iron, cast steel และ silicon sheet steel



รูปที่ 1.7 เส้นโค้งการทำแม่เหล็ก

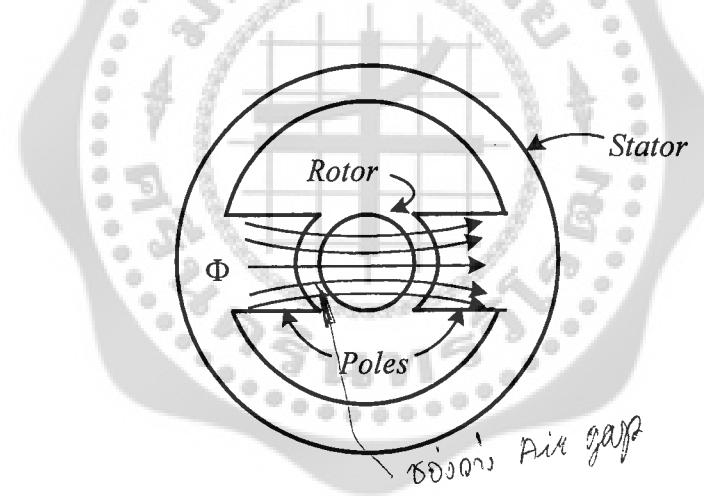
1.1.5 การพิจารณาผลของช่องอากาศในวงจรแม่เหล็ก

(Magnetic Circuit with Air gap)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนของ โรเตอร์ถูกแยกออกจากสเตเตอร์ โดยช่องอากาศ (air gap) ดังรูปที่ 1.8 โดยแท้จริงแล้วนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ขึ้นแม่เหล็กและช่องอากาศนั้นเหมือนการรักษาค่าความหนาแน่น เส้นแรงในช่องอากาศเพื่อให้ได้ค่า mmf มากกว่าในแกนเป็นลิ่งที่ต้องการ ถ้าความหนาแน่นเส้นแรงมีค่าสูง สัดส่วนแกนของวงจรแม่เหล็กสามารถที่จะอธิบายได้โดยผลจากการอิ่มตัว อย่างไรก็ตามในช่องอากาศไม่ต้องการให้เกิดการอิ่มตัว ดังนั้นเส้นโค้งคุณลักษณะ $B-H$ สำหรับตัวกลางอากาศจึงเป็นเชิงเส้น ($\mu = \text{คงที่}$)

วงจรแม่เหล็กอาจมีสองชั้นหรือมากกว่านั้นในตัวกลาง เช่น แกนแม่เหล็ก (magnetic core) และ ช่องอากาศรูปที่ 1.8 ซึ่งมีโครงสร้างแบบผสม (composite structure) สำหรับจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ วงจรแม่เหล็กเราสามารถแยกโครงสร้างแบบผสมออกมาได้

เมื่อพิจารณาวงจรแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบผสมอย่างง่ายของรูปที่ 1.9 (ก) แรงที่เกิดขึ้นในวงจร แม่เหล็กคือ ค่าแรงคดีอนแม่เหล็ก mmf ($F = Ni$) สำหรับ core medium และ air gap medium สามารถแทน ด้วยความสัมพันธ์ในรูปของความต้านทานแม่เหล็ก อธิบายใหม่ทั้งหมดโดยพิจารณาจากสมการ (1.15) ถึง (1.20)



รูปที่ 1.8 เครื่องจักรกลชนิดหมุน

ดังนั้นจากการวิเคราะห์เปลี่ยนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad \text{และ} \quad \mu_g = \mu_0 \mu_r^l \quad (1.14)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad \therefore \quad \mu_g = \mu_0 \quad (1.15)$$

$$R = R_c + R_g \quad \Phi = \frac{Ni}{R_c + R_g} \Rightarrow \frac{F}{R} \Rightarrow \frac{Fl}{R} \quad (1.16)$$

$$\therefore \Phi = \frac{Fl}{R} \quad \therefore H = \frac{\Phi}{R}$$

$$F = Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (1.17)$$

เมื่อ

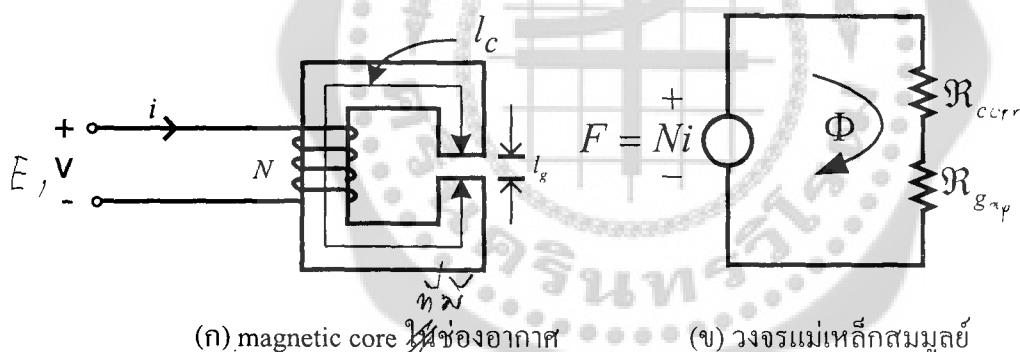
 l_c คือ ความยาวเหลี่ยมของแกน l_g คือ ความยาวของช่องอากาศ*(corr.)**l gap* ระยะห่าง

และความหนาแน่นเส้นแรงดึงดูดตามสมการ (1.18) และ (1.19)

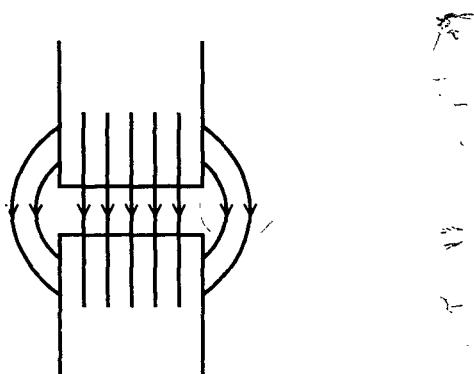
$$B_c = \frac{\Phi_c}{A_c} \quad (1.18)$$

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} \quad (1.19)$$

สำหรับเส้นแรงดึงดูดที่มีทางเดินบีนออกมายابนอกดังรูปที่ 1.10 เรียกว่า fringing flux



รูปที่ 1.9 โครงสร้างแบบผสาน

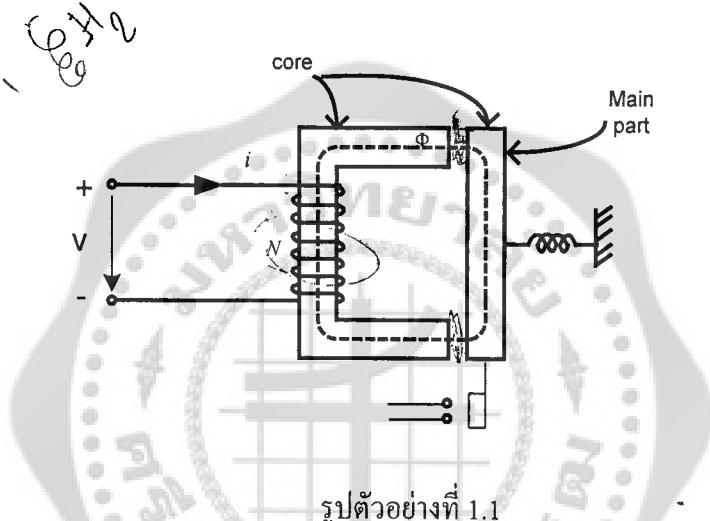


รูปที่ 1.10 Fringing flux

ในกรณีพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อ fringing flux ช่องอากาศที่แคบ ๆ จะไม่คิดผลของ fringing flux และถ้าไม่คิดผลของ fringing flux พื้นที่หน้าตัดของแกนและช่องอากาศนั้นมีเท่ากัน $A_g = A_c$ ดังนี้

$$\boxed{B_g = B_c = \frac{\Phi}{A_c}}$$

ตัวอย่างที่ 1.1 วงจรแม่เหล็กของรีเลียดังรูปตัวอย่างที่ 1.1 มีขดลวดพัน 500 รอบ และความยาวแกนเฉลี่ย $l_g = 360 \text{ mm}$ เมื่อความยาวช่องอากาศ l_g แต่ละส่วนเท่ากับ 1.5 mm ค่าความหนาแน่นเส้นแรง B_c และ $B_g = 0.8 \text{ T}$ กำหนดให้แกนเป็นชนิด cast steel จงคำนวณ



รูปตัวอย่างที่ 1.1

ก) กระแสในขดลวด

$$i = \frac{E}{R} \rightarrow F = F_c + F_g \quad \left| \begin{array}{l} F_c = H_c l_c \\ F_g = 2H_g l_g = \frac{2B_g l_g}{\mu_0} \end{array} \right.$$

ข) สภาพความซึมซาบ (permeability) และสภาพความซึมซาบสัมพันธ์ของแกน (relative permeability)

ค) ถ้าช่องอากาศมีความยาวเป็นศูนย์ จงหากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงในแกนเท่ากับ 0.8 T

วิธีทำ (ก) ไม่คิดผลของ fringing flux ดังนั้นความหนาแน่นเส้นแรงที่แกนจึงเท่ากับช่องอากาศ และจากเส้นโค้งคุณลักษณะ $B - H$ รูปที่ 1.1 กรณีแกนเป็นชนิด cast steel จะได้

$$L_c = 360 \text{ mm}$$

$$B_c = 0.8 \text{ T}$$

$$\boxed{H_c = 510 \text{ At/m}}$$

$$= 36 \text{ cm}$$

$$F_c = H_c l_c = 510 \times 0.36$$

$$= \dots$$

$$= 184 \text{ At}$$

$$F_g = 2H_g l_g$$

$$B_g = \mu_0 + l_g$$

$$\therefore H_g = \frac{B_g}{\mu_0}$$

$$\begin{aligned} & H_c l_c \\ & F_c + F_g \\ & \beta = \frac{1}{\mu_0} \\ & P = \frac{1}{\mu_0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & F^2 H_g / g \\
 & g = H_g / g - 2H_g / 20 \\
 & \downarrow \\
 & = 2 \frac{B_g}{\mu_0} I_g = 2 \frac{0.8}{4\pi \times 10^{-7}} \times 1.5 \times 10^{-3} \\
 & = 1910 \text{ At}
 \end{aligned}$$

ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$F = F_c + F_g = 184 + 1910 = 2094 \text{ At}$$

และจากสมการที่(1.7)

$$F = NI$$

$$i = \frac{F}{N} = \frac{2094}{500} = 4.19 A$$

$$i = \frac{F}{2}$$

ข้อสังเกต แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ซ่องอากาศจะมีค่ามากกว่าที่แกน ($F_g > F_c$)

(๔) ความซึมซาบของแกน (Permeability of core)

$$\mu_c = \frac{B_c}{H_c} = \frac{0.8}{510} = 1.57 \times 10^{-3}$$

สภาพความซึมซาบสัมพันธ์ของแกน (Relative permeability of core)

$$\mu_r = \frac{\mu_c}{\mu_0} = \frac{1.57 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7}} = 1250$$

(๕) จากสมการ $F = F_c + F_g$ และ $F_g = 0 \therefore F = F_c$

$$\text{หมาย } F = NI \quad F = H_c I_c = 510 \times 0.36 = 184 \text{ At}$$

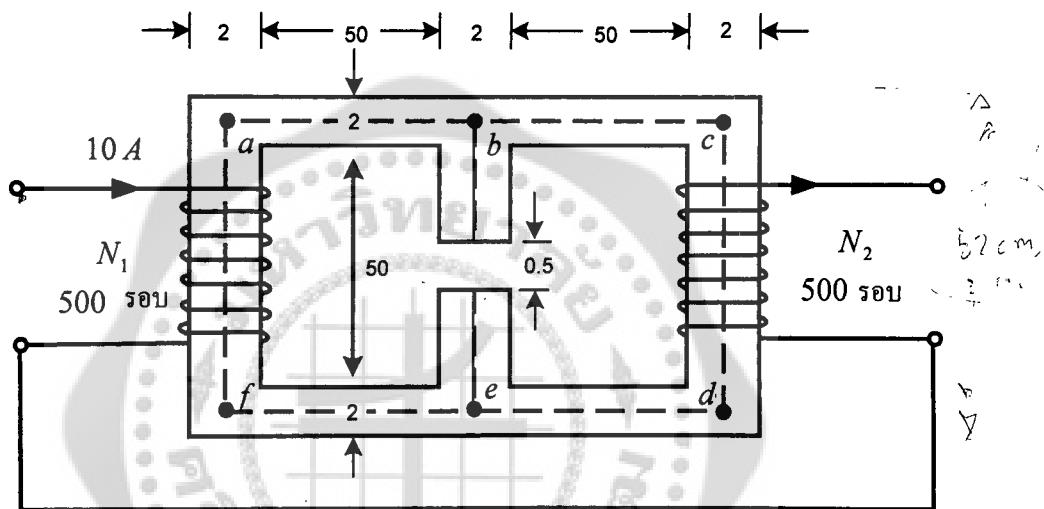
$$\therefore i = \frac{F}{N} \Rightarrow i = \frac{184}{500} = 0.368 \text{ A}$$

ตอบ

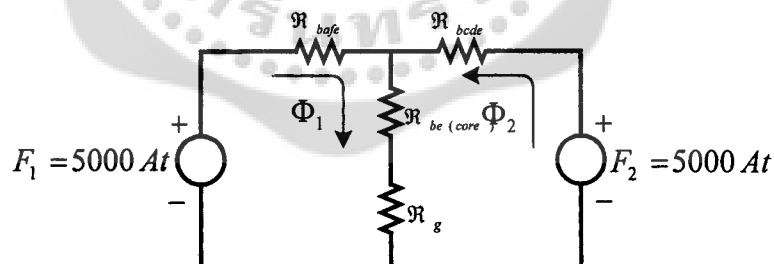
12

ตัวอย่างที่ 1.2 วงจรแม่เหล็กดังรูปตัวอย่างที่ 1.2(ก) ถ้ากำหนดให้ความซึมซาบสัมพันธ์ของวัสดุ ferromagnetic เท่ากับ 1,200 เมื่อไม่มีคิดผลของการรั่วทางแม่เหล็ก magnetic leakage และ fringing flux (พื้นที่ทั้งหมดคำนวณในหน่วยเซนติเมตร และ material มีพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม) จงคำนวณ เส้นเร่ง, ความหนาแน่น และความเข้มสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ

วิธีทำ ส่วนของเส้นเร่งแม่เหล็กเฉลี่ยแสดงโดยเส้นประดังรูปตัวอย่างที่ 1.2(ก) และวงจรแม่เหล็กแสดงไว้ดังรูปตัวอย่างที่ 1.2(ข)



(ก)



(ข)

รูปตัวอย่างที่ 1.2

Mcr = 1200

$$F_1 = N_1 I_1 = 500 \times 10 = 5000 \text{ At}$$

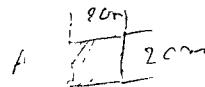
$$F_2 = N_2 I_2 = 500 \times 10 = 5000 \text{ At}$$

$$\mu_c = 1200 \quad \mu_0 = 1200 \times 4\pi \times 10^{-7}$$

$$R_{bafe} = \frac{l_{bafe}}{\mu_c A_c}$$

$$= \frac{3 \times 52 \times 10^{-2}}{1,200 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} A_C$$

$$= 2.58 \times 10^6 At/Wb$$



$$A_C = 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} = 13$$

$$\approx 2 \times 10^{-2} \times 2 \times 10^{-2}$$

$$= 1 \times 10^{-4}$$

จากรูปตัวอย่างที่ 1.2 เนื่องจากเกณฑ์ลักษณะสมมาตรดังนี้

$$\mathfrak{R}_{bcde} = \mathfrak{R}_{base}$$

$$C_E \text{ cm} = 5 \text{ cm}$$

$$C_E \text{ cm} = 5 \times 10^{-2}$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{5 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2 \times 2 \times 10^{-4}} \text{ At/cm} = \frac{(2 \times 10^{-2}) \times (2 \times 10^{-2})}{1 \times 10^{-4}} =$$

$$= 9.94 \times 10^6 At/Wb$$

$$\mu_C = \mu_r \times \mu_0$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\mu_r = 1200$$

$$\mathfrak{R}_{be(\text{core})} = \frac{l_{be(\text{core})}}{\mu_c A_c} = \frac{51.5 \times 10^{-2}}{1200 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}}$$

$$= 820 \times 10^3 At/Wb$$

และเมื่อพิจารณาจากรูปตัวอย่างที่ 1.3 สามารถเขียนสมการลูปได้ดังนี้ คือ

$$F_1 = \Phi_1 (\underbrace{\mathfrak{R}_{base} + \mathfrak{R}_{be}}_{\text{สองแคน}} + \mathfrak{R}_g) + \Phi_2 (\mathfrak{R}_{be} + \mathfrak{R}_g)$$

$$F_2 = \Phi_1 (\mathfrak{R}_{be} + \mathfrak{R}_g) + \Phi_2 (\mathfrak{R}_{bcde} + \mathfrak{R}_{be} + \mathfrak{R}_g)$$

แทนค่าความต้านทานแม่เหล็กลงในสมการ F_1 และ F_2 ดังนี้

$$5000 = \Phi_1 (13.34 \times 10^6) + \Phi_2 (10.76 \times 10^6)$$

$$5000 = \Phi_1 (10.76 \times 10^6) + \Phi_2 (13.34 \times 10^6)$$

$$\therefore \Phi_1 = \Phi_2 = 0.2067 mWb$$

ดังนั้นเส้นแรงในช่องอากาศคือ

$$\Phi_g = \Phi_1 + \Phi_2 = 0.4134 mWb$$

และความหนาแน่นเส้นแรงคือ

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} = \frac{0.4134 \times 10^{-3}}{0.4 \times 10^{-3}} = 1.034 T$$

$$F \sim r \quad R = \frac{1}{\mu_0}$$

14

สำหรับความเข้มเส้นแรงในช่องอากาศ หาได้ดังนี้ คือ

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.034}{4\pi \times 10^{-7}} = 0.822 \times 10^6 \text{ At/m} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$

.....

1.1.6 ความเหนี่ยวแน่น (Inductance)

ขดลวดที่พันอยู่บนแกนแม่เหล็กดังรูปที่ 1.11 (ก) ซึ่งลักษณะการพันที่ส่วนใหญ่ใช้กันในวงจรไฟฟ้า ขดลวดนี้อาจแทนด้วยของค่าประกอบของในอุดมคติ เรียกว่า ความเหนี่ยวแน่น (Inductance) โดยที่กำหนดให้ เส้นแรงเชื่อมโยง (flux linkage) ขดลวดต่อแอมเปอร์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน คือ

$$\lambda = N\Phi \quad (1.22)$$

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (1.23)$$

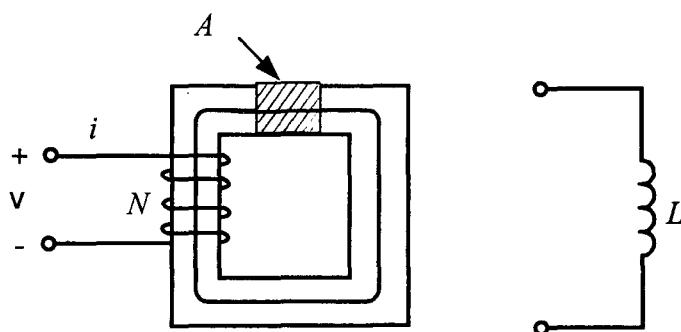
เมื่อ λ คือ เส้นแรงเชื่อมโยง
 L คือ ความเหนี่ยวแน่น

จากความสัมพันธ์ของสมการ (1.22) และ (1.23) จะได้

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (1.24)$$

หรือจากสมการ (1.11), (1.13), (1.14) ค่าความเหนี่ยวแน่นหาได้ดังนี้ คือ

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (1.25)$$



(ก) กลุ่มขดลวด - แกน

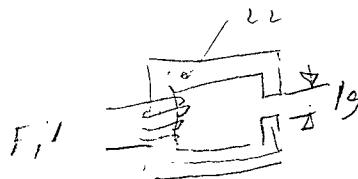
(ข) วงจรสมมูลย์ของค่าความเหนี่ยวแน่น

รูปที่ 1.11 ความเหนี่ยวแน่นของกลุ่มขดลวด-แกน

ข้อ演ที่ 1.3 วงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 1.9 กำหนดให้จำนวน $N = 400$ รอบ ความยาวแกนเฉลี่ย $l_c = 500 \text{ mm}$ ความยาวช่องอากาศเฉลี่ย $l_g = 1.0 \text{ mm}$ พื้นที่หน้าตัด $A_c = A_g = 15 \text{ cm}^2$ ความซึมซาบสัมพันธ์ของแกน $\mu_r = 3,000$ และกระแส $i = 1.0 \text{ A}$

คำนวณ (ก) เส้นแรงและความหนาแน่นเส้นแรงในช่องอากาศ

(ข) ความหนึ่งปานกลาง



วิธีทำ

$$(ก) \quad \mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} = \frac{50 \times 10^{-2}}{3,000 \times 4\pi 10^{-7} \times 15 \times 10^{-4}} \text{ At/Wb}$$

$$= 88.42 \times 10^3 \text{ At/Wb}$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{1 \times 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \times 15 \times 10^{-4}} \text{ At/Wb}$$

$$= 530.515 \times 10^3 \text{ At/Wb}$$

$$\Phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g} = \frac{400 \times 1.0}{(88.42 + 530.515) \times 10^{-3}} = 0.6463 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$B = \frac{\Phi}{A_g} = \frac{0.6463 \times 10^{-3}}{15 \times 10^{-4}} = 0.4309 \text{ T}$$

$$(ข) \quad L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g} = \frac{(400)^2}{(88.42 + 530.515) \times 10^3}$$

$$= 258.52 \times 10^{-3} \text{ H}$$

หรือ $L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{400 \times 0.6463 \times 10^{-3}}{1.0}$

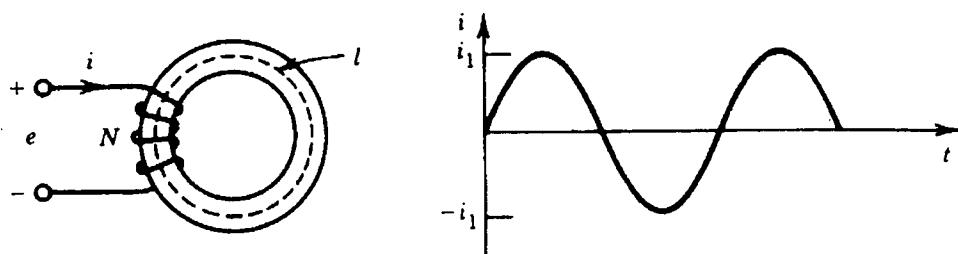
$$= 258.52 \times 10^{-3} \text{ H}$$

ตอบ

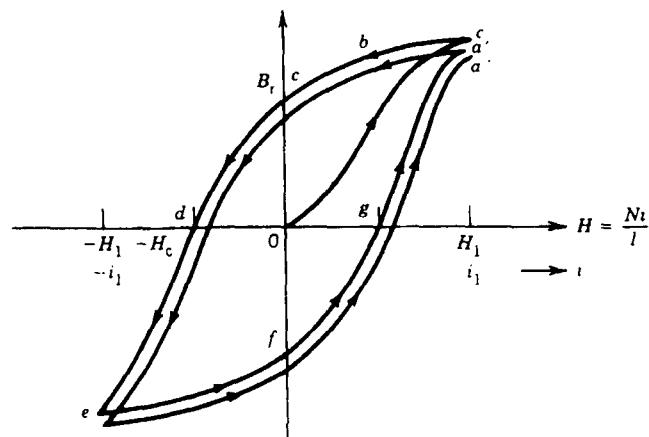
1.2 ไฮสเตอริซีส (Hysteresis)

เมื่อพิจารณาถุ่มคลัวด - แกน รูปที่ 1.12 (ก) โดยกำหนดให้ช่วงเริ่มต้นของแกนไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Unmagnetized) และเมื่อเพิ่มกระแสเข้าที่ขดลวดอย่างช้า ๆ จะส่งผลให้ความเข้มและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่ม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงได้จากเส้นโค้ง oa ดังรูป 1.12(ข) ที่จุด a ได้ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก H , ซึ่งสัมพันธ์กับกระแส i , และจากรูปที่ 1.12(ข) นั้นถ้าลดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก H , (ตามทางเดิน abc) ให้เป็นศูนย์ดังนั้นที่จุด c ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก $H = 0$ แต่ความหนาแน่นเส้นแรง $B \neq 0$ เนื่องจากมีเส้นแรงตกค้าง B_r ในแกน

จากรูปที่ 1.12(ข) ถ้ากลับทิศทางการไหลของกระแส แล้วป้อนเข้าขดลวด (โดยเริ่มต้นขบวนการที่จุด c) จะส่งผลให้เส้นแรงในแคนลดลงและความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก H มีทิศทางตรงข้ามไปจากเดิมซึ่งที่จุด d ความหนาแน่นเส้นแรง $L = 0$ แต่ความเข้มเส้นแรงเท่ากับ $-H_c$ โดยค่าความเข้มเส้นแรง $-H_c$ นั้นเรียกว่าแรงคืนตัวของแกนแม่เหล็ก (coercive force of magnetic core) และถ้าเพิ่มค่า H ตามทางเดิน de ที่จุด e จะได้ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ $-H_c$ ที่สัมพันธ์และกระแส $-i$, จากนั้นลดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก H ให้เป็นศูนย์อีกรั้ง ตามทางเดิน -ef แล้วเพิ่มค่า H จนกระทั่งถึงจุด a' (H_1) ตามทางเดิน fga' ซึ่งถ้าทำตามขบวนการดังกล่าวข้างต้น ซึ่งในไซเคิลต่อมากจะได้จุดทำงานจุดท้ายที่ "a''" และจะรวมจุดทำงาน a , a' และ a'' เข้าด้วยกัน จะทำให้เกิดลูป เรียกว่า ไฮสเตอริซีสลูป ดังรูปที่ 1.12 (ค) โดยดังกล่าวนั้นเกิดจากความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรง B และกับความหนาแน่นเส้นแรง H สำหรับไฮสเตอริซีสลูป เล็ก ๆ ได้จากการลดค่า แอนเพลจูด ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก H ซึ่งไฮสเตอริซีสลูป ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเห็นได้จากรูปที่ 1.12(ค) และเส้นประ ภายใน ไฮสเตอริซีสลูป เรียกว่าเส้นโค้งการทำแม่เหล็ก (magnetization curve) ถ้าเหล็กถูกทำให้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (magnetized) จากเงื่อนไขเริ่มต้น(ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก) ความหนาแน่นเส้นแรง B จะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้งการทำแม่เหล็ก สำหรับแกนทำแม่เหล็กบางชนิด ไฮสเตอริซีสลูป เปลี่ยนแปลงในช่วงแคบ ๆ ถ้าไม่คิด ไฮสเตอริซีสของแกน คุณลักษณะ $B-H$ สามารถแทนโดยเส้นโค้งการทำแม่เหล็ก



(ก) ถุ่มแกน - ขดลวดและวงจรกระแสตู้น

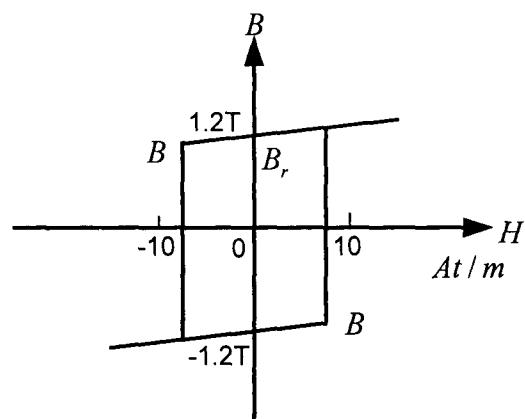


(บ) ชีสเตอริชีส



(ค) ชีสเตอริชีสลูป

รูปที่ 1.12 การทำแม่เหล็กและชีสเตอริชีสลูป

Deltamax Cores

รูปที่ 1.13 B – H loop สำหรับ deltamax core (50%Fe และ 50%Ni)

Ferromagnetic alloys แบบพิเศษบางครั้งได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้กับงานที่มีคุณสมบัติเฉพาะ โดยที่ชีสเตอร์ริชีส ของ alloys เหล่านี้มีรูปร่างที่แตกต่างไป จากรูปที่ 1.12 ซึ่ง alloys ดังกล่าวนี้ประกอบด้วย iron 50% และ nickel 50% โดยมีลูป $B - H$ ดังรูปที่ 1.13 ซึ่งแทนที่ทำจาก alloys ชนิดนี้มีลูป $B - H$ เป็นรูปสี่เหลี่ยมเรียกว่า deltamax cores

ข้อสังเกต ขณะที่ความหนาแน่นเส้นแรง B น้อยกว่าความหนาแน่นเส้นแรงตกค้าง B_r ($B < B_r$) ความเข้มเส้นแรงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ถ้า B มีค่ามากกว่า B_r ($B > B_r$) ความเข้มแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน

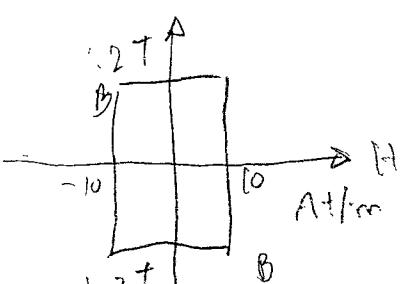
1.2.1 การสูญเสียเนื่องจากชีสเตอร์ริชีส (Hysteresis Loss)

ชีสเตอร์ริชีสลูปในรูปที่ 1.12(ค) ได้จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จ่ายให้แก่ชุดดาวดอย่างช้า ๆ (มากกว่า 1 ไซเคิล) เมื่อกระแส i เปลี่ยนแปลงไปแต่ละไซเคิล ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงจะมีพลังงานส่วนหนึ่งพลังงานจะไหลจากแหล่งจ่ายไปยังกลุ่มชุดดาว - แกน และระหว่างช่วงเวลาอื่นๆ พลังงานจะไหลกลับสู่แหล่งจ่าย ดังนั้นระหว่าง 1 ไซเคิล ของกระแส i ที่เปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งหมดจะไหลจากแหล่งจ่ายไปยังกลุ่มชุดดาว-แกน ทำให้เกิดพลังงานที่สูญเสียที่แทนในรูปความร้อน การสูญเสียของกำลังในแกน กำหนดจากผลของชีสเตอร์ริชีส เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากชีสเตอร์ริชีสขนาดของชีสเตอร์ริชีสลูปเป็นสัดส่วนกับการสูญเสียเนื่องจากชีสเตอร์ริชีส

สมมุติว่าชุดดาวรูปที่ 1.12 (ก) ไม่คิดผลของความต้านทานและกำหนดให้ Φ ที่เส้นแรงแม่เหล็กในแกนดังนี้จาก Faraday's law แรงดันต่อกำลังชุดดาวคือ

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.26)$$


การถ่ายพลังงานระหว่างช่วงเวลา t_1 ไปยัง t_2 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$W = pdt = \int_{t_1}^{t_2} e i dt \quad (1.27)$$


แทนค่าสมการ (1.26) ลงใน (1.27) จะได้

$$W = \int N \frac{d\Phi}{dt} i dt = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} Ni d\Phi \quad (1.28)$$

$$\Phi = BA \quad \text{และ} \quad i = \frac{Hl}{N}$$

ดังนั้น

$$W = \int_{B_1}^{B_2} N \cdot \frac{Hl}{N} A dB = lA \int_{B_1}^{B_2} H dB$$

เมื่อกำหนดให้ $V_{core} = lA$

$$\therefore W = V_{core} \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (1.29)$$

โดยที่ $V_{core} = lA$ แทนปริมาตรของแกน และเทอมของอินทิกรัลดังสมการ (1.29) แทนพื้นที่ดังรูปที่ 1.14 ดังนั้นการถ่ายโอนพลังงานเกินกว่า 1 ไซเคิลที่มีของการเปลี่ยนแปลง คือ

$$\begin{aligned} W|_{cycle} &= V_{core} \oint H dB = V_{core} \times \text{area of the } B-H \text{ loop} \\ &= V_{core} \times W_h \end{aligned}$$

เมื่อ $W_h = \oint H dB$ คือ ความหนาแน่นพลังงานในแกน (เท่ากับพื้นที่ของ $B-H$ loop) พลังงานสูญเสียในแกนกำหนดได้จาก hysteresis effect คือ

$$P_h = V_{core} W_h f \quad (1.31)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของกระแส i ที่เปลี่ยนแปลง

การประมาณพื้นที่ของ hysteresis loop นั้นทำได้ยากเนื่องจากคุณลักษณะ $B-H$ ไม่เป็นแบบเชิงเส้น และมีหลายค่า นอกจากนี้ไม่ง่ายนักที่จะใช้หลักคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์เพื่อพิจารณา loop และจาก การทดลอง Charles Steinmetz พบว่าสำหรับสารแม่เหล็กที่ใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\boxed{\text{พื้นที่ของลูป } B-H = KB_{\max}^n} \quad (1.32)$$

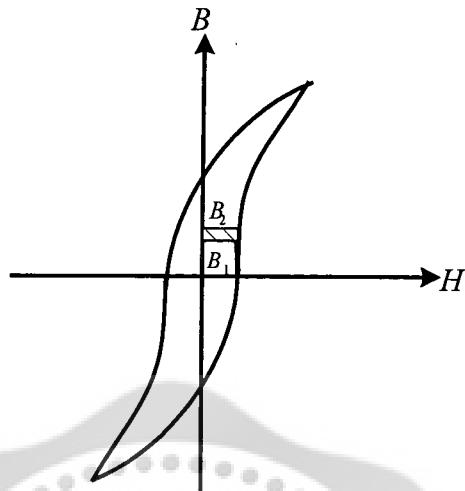
โดยที่ B_{\max} คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงสูงสุดและค่า n จะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5

K_B คือ ค่าคงที่

สำหรับค่าคงที่ n และ K คำนวณได้ตามสมการ (1.31) และ (1.32) และ การสูญเสียฮีสเตรเซส คือ

$$P_h = KB_{\max}^n f \quad (1.33)$$

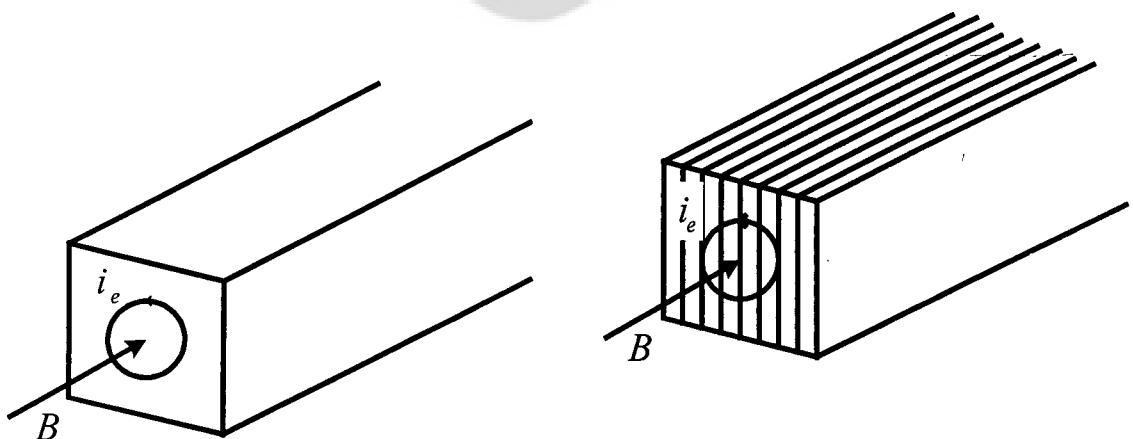
เมื่อ K_h คือ ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับสารแม่เหล็ก ferromagnetic และ ปริมาตรของแกน



รูปที่ 1.14 การสูญเสียเนื่องจากชีสเตอริซิตี้

1.2.2 การสูญเสียนี้องจากกระแสไฟลุน (Eddy Current Loss)

การสูญเสียอิกอ่ายหันนั่ง ที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็กขณะที่การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเส้นแรงในแกนเป็นไปอย่างรวดเร็วซึ่ง รูปที่ 1.15 (ก) แสดง B ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การพิจารณาทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กพื้นที่หน้าตัดของแกนดังกล่าวนั้น พนวณว่าแรงดันจะเห็นได้ในส่วนทางเดินเนื่องจากเส้นแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งถูกล้อมโดยทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนั้นกระแส i_e ที่เรียกว่า กระแสไฟลุน (eddy current) จะไหลรอบ ๆ ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก เพราะว่า core material มีค่าความด้านทานสำหรับกำลังสูญเสีย $i^2 R$ เกิดขึ้นโดยกระแสไฟลุนและปรากฏในรูปของความร้อนที่แกน



(ก) แกนเหล็กแข็ง (Solid iron core)

(ข) แกนเหล็กอัดชั้อน (laminated core)

รูปที่ 1.15 กระแสไฟลุนในแกนแม่เหล็ก

การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟลุวนทำได้ 2 วิธีคือ

- ใช้แกนที่มีคุณสมบัติ high - resistivity core material โดยเพิ่มส่วน silicon เข้าไป 2 - 3% ที่เหล็ก (iron) ซึ่งจะเป็นการเพิ่ม resistivity (สภาพด้านทาน)
- ใช้แกนแบบอัดซ้อนโดยที่แผ่นอัดซ้อนบางจะหุ้มด้วยฉนวน สำหรับในหม้อแปลงและเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนของแกนกับส่วนซึ่งทำให้เกิดเส้นแรงทำมาหากันแผ่นอัดซ้อน ซึ่งโครงสร้างของแกนแบบแผ่นอัดซ้อนแสดงดังรูปที่ 1.15 (ๆ)

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟลุวนในแกนเหล็ก ที่เส้นแรงแปรตามเวลา เกี่ยนเป็นความสัมพันธ์ ในทอมคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ คือ

$$P_e = K_e B_{\max}^n f^2 \quad (1.34)$$

เมื่อ K_e คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และความหนาของมัน โดยที่ความหนาของแผ่นอัดซ้อนอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 5 mm สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าและอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.5 mm ในอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำงานที่ความถี่สูง

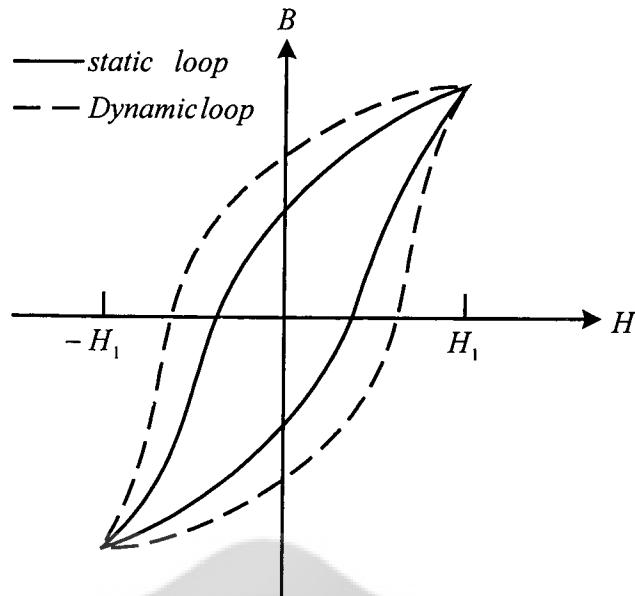
1.2.3 การสูญเสียที่แกน (Core Loss)

การสูญเสียเนื่องจากไฮสเตอริซิสม์รวมกับกระแสไฟลุวน คือ ผลของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกน (core loss: P_c) ของกลุ่มขดลวด - แกน นั้นคือ

$$P_c = P_h + P_e \quad (1.35)$$

ถ้ากระแสที่ไฟลุนขดลวดดังรูปที่ 1.12 (ก) เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ กระแสไฟลุวนที่เหนี่ยวแน่นในแกน แกนจะมีค่าต่ำสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นลูปของ $B-H$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กอย่างช้า ๆ เรียกว่า ไฮสเตอริซิสลูป หรือสเตติกลูป อย่างไรก็ตามถ้ากระแสที่ไฟลุนผ่านขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วลูป $B-H$ จะขยายกว้างออกไปเนื่องจากผลของการกระแสไฟลุวนเหนี่ยวแน่นในแกน การขยายของลูปดังกล่าวนี้ เรียกว่า hysteresis-eddy current loop หรือ dynamic loop ดังรูปที่ 1.16

ในขณะที่กระแสไฟลุนผ่านขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเกิดกระแสไฟลุวนในแกนเหล็ก



รูปที่ 1.16 Static and dynamic loops

กระแสไฟลุนทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ซึ่งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงและการรักษาค่าเส้นแรงทำได้โดยการเพิ่มค่ากระแสที่ไฟลุนขึ้นคลอดเพื่อให้มีค่ามากกว่าค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟลุน ดังนั้นจุด a บน สเตติกลูปจะถูกแทนที่โดยจุด a' บน ไอนามิคลูปที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ static loop ขยายกว้างออกไป

การสูญเสียที่แกน (core loss) สามารถคำนวณได้จากฮีสเตอริชีส และ การสูญเสียนื้องจากกระแสไฟลุนดังสมการ (1.33), (1.34) และ (1.35) นอกจากนี้ ยังสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ของ dynamic $B-H$ loop อีกด้วย

$$P_c = V_{core} f \phi_{dynamic\ loop} H dB \quad (1.36)$$

$$= (\text{volume of core}) (\text{frequency}) (\text{area of dynamic loop})$$

สำหรับการหาค่าการสูญเสียในแกนยังสามารถใช้วัตต์มิติเมตรรัดหาค่าได้ อย่างไรก็ตาม ไม่จ่ายนักที่จะหาค่าการสูญเสียนื้องจาก ฮีสเตอริชีส และ กระแสไฟลุน สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า แกนแม่เหล็กและเส้นแรงที่แปรตามเวลา มีผลทำให้เกิดการสูญเสียในแกนและการสูญเสียดังกล่าวนี้จะปรากฏในรูปความร้อนซึ่งจำเป็นต้องนำมาพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกล

1.3 การกระตุ้นด้วยสัญญาณไซนัสoidal อยดอล์ย (Sinusoidal Excitation)

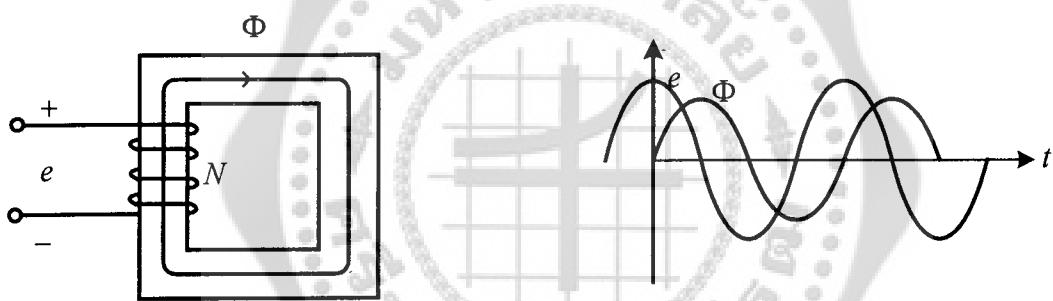
เมื่อพิจารณาเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นการกระตุ้นด้วยสัญญาณไซนัสoidal อยดอล์ยถูกนำมาใช้โดยที่แรงดัน และกระแสจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณไซนัสoidal คือ Φ ที่เปรียบเท่ากับมูลค่าของแม่เหล็กที่เก็บได้ในแม่เหล็ก-แกน ดังรูปที่ 1.17 (ก) ถ้าสมมุติว่าเส้นแรงที่แกน (core flux) Φ เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณไซนัสoidal ที่เปรียบเท่ากับดังนี้

$$\Phi(t) = \Phi_{\max} \sin \omega t \quad (1.37)$$

เมื่อ Φ_{\max} คือ ค่า amplitude ของเส้นแรงที่แกน

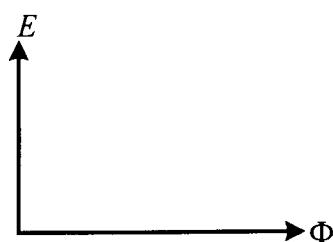
ω คือ ความถี่เริงมุน $= 2\pi f$

f คือ ความถี่



(ก) กลุ่มขดลวด - แกน

(ข) รูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็ก



(ค) แผนภาพเพลสเซอร์

รูปที่ 1.17 การกระตุ้นด้วยไซนัสoidal ของแกน

จาก Faraday's law แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวด N รอบ คำนวณได้ดังนี้คือ

$$e(t) = N \frac{d\Phi}{dt} = N\Phi_{\max} \omega \cos \omega t \quad (1.36)$$

$$= E_{\max} \cos \omega t \quad (1.39)$$

ข้อสังเกต ถ้าเส้นแรงเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณไซนุซอยดอล์บีดังสมการ (1.37) แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณโคไซนุซอยดอล์บี (cosinusoidally) ดังสมการ (1.39) สำหรับรูปคลื่น e และ Φ แสดงได้ดังรูปที่ 1.17(ข) และรูปที่ 1.17(ค) แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ ดังนั้นค่า root-mean square (rms) ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำคำนวณได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} E_{rms} &= \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\Phi_{\max}}{\sqrt{2}} \\ &= 4.44 Nf \Phi_{\max} \end{aligned} \quad (1.40)$$

ตัวอย่างที่ 1.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1-เฟส 120 โวลท์ 60 เฮิตรัช ต่ออยู่กับขดลวดดังรูปที่ 1.17 โดยที่ขดลวดพัน 200 รอบ และกำหนดพารามิเตอร์ของแกนดังนี้ คือ

ความยาวแกน (Length of core)	$L_r = 100 \text{ cm}$
พื้นที่หน้าตัดของแกน	$A_c = 20 \text{ cm}^2$
ความซึมซาบสัมพันธ์	$\mu_r = 2500$

- จงหา (ก) ความหนาแน่นเส้นแรง B ในแกน
 (ข) กระแส i ที่ไหลในขดลวด

วิธีทำ จากสมการ (1.40)

$$(ก) \quad E_{rms} = 4.44 Nf \Phi_{\max}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\max} &= \frac{E_{rms}}{4.44 Nf} \\ &= \frac{120}{4.44 \times 200 \times 60} = 0.002253 \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$B_{\max} = \frac{0.002253}{20 \times 10^{-4}} = 1.1265 T$$

$$B = 1.1265 \sin 2\pi 60t$$

(๑) จาก $H = \frac{B}{\mu}$

$$H_{\max} = \frac{B_{\max}}{\mu_0 \mu_r} = \frac{1.1265}{2500 \times 4\pi \times 10^{-7}}$$

$$= 358.575 \text{ At/Wb}$$

$$i_{\max} = \frac{Hl}{N}$$

$$= \frac{358.575 \times 100 \times 10^{-2}}{200} = 1.79328 \text{ A}$$

$$i = 1.7928 \sin 2\pi 60t$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.6 รูปคลื่นแรงดันแบบสี่เหลี่ยมมี amplitude $E = 100 V$ และความถี่ $60 Hz$ จ่ายให้กับขดลวดที่พื้นบนแกนเหล็กปิด (closed iron core) ขดลวดพัน 500 รอบและพื้นที่หน้าตัดของแกนเท่ากับ $0.001 m^2$ สมมุติว่าขดลวดไม่มีความต้านทาน

จงหา (ก) เส้นแรงสูงสุดและเขียนรูปคลื่นของแรงดันและเส้นแรงในฟังก์ชันเวลา

(ข) แรงดัน E สูงสุดถ้าความหนาแน่นเส้นแรงสูงสุดไม่เกิน $1.2 T$

วิธีทำ จากรูปที่ 1.16(ก)

(ก) $e(t) = N \frac{d\Phi}{dt}$

$$N \cdot d\Phi = edt \quad (1.41)$$

$$N \cdot \Delta\Phi = E \cdot \Delta t \quad (1.42)$$

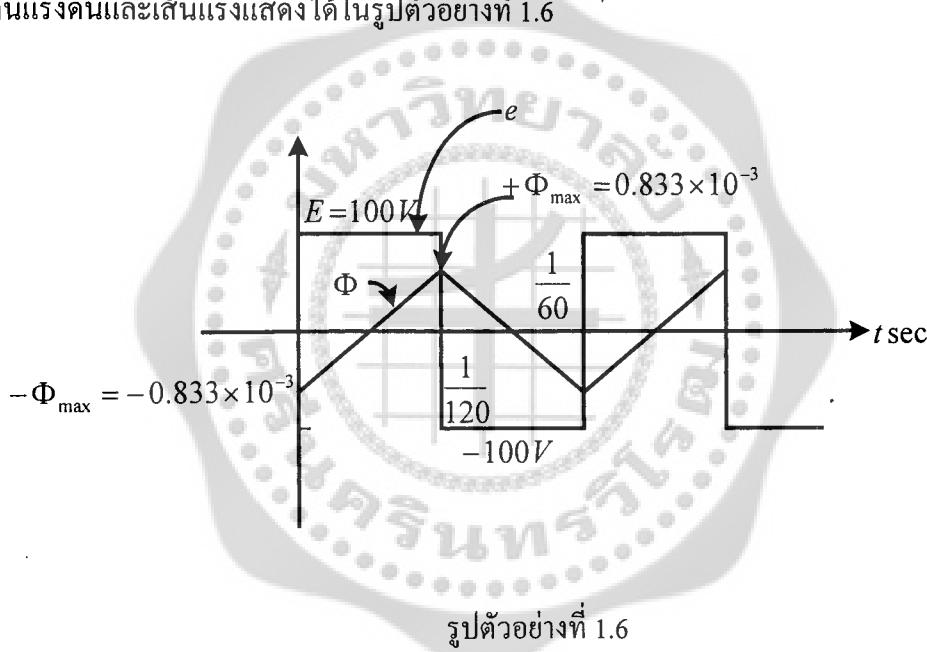
ข้อสังเกต เส้นแรงจะเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดทางด้านลบ ($-\Phi_{\max}$) ไปเป็นเส้นแรงสูงสุดทางด้านบวก ($+\Phi_{\max}$) ดังนั้นผลรวมของเส้นแรงที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ $2\Phi_{\max}$

$$500(2\Phi_{\max}) = E \times \frac{1}{120}$$

$$\therefore \Phi_{\max} = \frac{100}{1000 \times 120} \quad Wb$$

$$= 0.833 \times 10^{-3} \quad / \quad Wb$$

รูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแสดง ได้ในรูปตัวอย่างที่ 1.6



$$(๑) \quad B_{\max} = 1.2 \quad T$$

$$\Phi_{\max} = B_{\max} \times A$$

$$= 1.2 \times 0.001 = 1.2 \times 10^{-3} \quad Wb$$

$$N(2\Phi_{\max}) = E \times \frac{1}{120}$$

$$E = 120 \times 500 \times 2 \times 1.2 \times 10^{-3}$$

$$= 144 \quad V$$

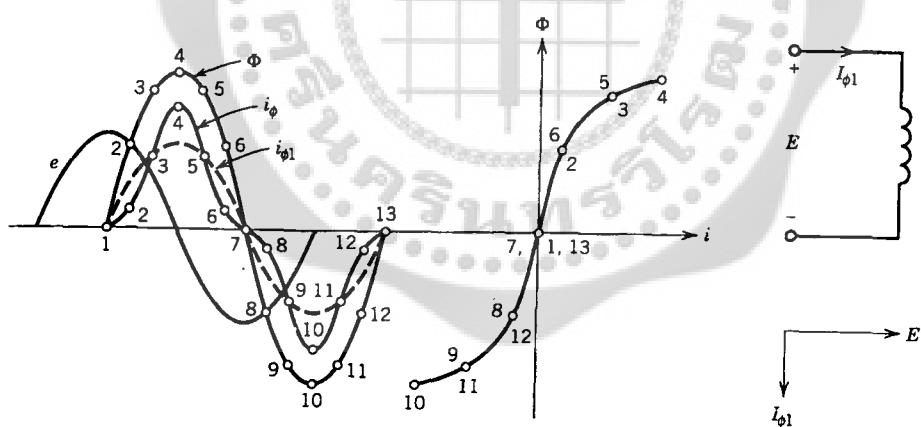
ตอบ

1.3.1 กระแสกระแสตุ้น (Exciting Current)

ถ้าขดลวดดังรูปที่ 1.17 (ก) ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันแบบไขนูซอยดอล์ยกระแสที่ไหลในขดลวดจะสร้างเส้นแรงเป็นรูปไขนูซอยดอล์ยขึ้นในแกนกระแสเรียกว่า กระแสกระแสตุ้น (exciting current, i_Φ) และถ้าคุณลักษณะ $B - H$ ของแกน ferromagnetic มีลักษณะคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น ส่งผลให้กระแสกระแสตุ้นไม่เป็นไขนูซอยดอล์ย

เมื่อไม่พิจารณาเอสเตอริชิส (No Hysteresis)

ข้อกำหนดคุณลักษณะ $B - H$ อันดับแรกที่ต้องพิจารณาคือ คุณสมบัติที่ไม่เป็น ฮีสเตอริชิสสูปโดยที่เส้นโค้งคุณลักษณะ $B - H$ จะสามารถเรียกว่า เส้นโค้ง $\Phi - i_\Phi$ ($\Phi = BA, i_\Phi = HI/N$) สำหรับแกนดังแสดงในรูปที่ 1.18 (ก) จากรูปเส้นแรงไขนูซอยด์และเส้นโค้ง $\Phi - i_\Phi$ รูปคลื่นกระแสกระแสตุ้นที่เกิดขึ้นแสดงไว้ในรูป 1.18 (ก) ถ้ากระแสกระแสตุ้น i_Φ ไม่เป็นรูปไขนูซอยดอล์ย แต่มันมีเฟสเดียวกัน (inphase) กับรูปคลื่นเส้นแรงและสมมาตร เมื่อเทียบกับรูปคลื่นแรงดัน องค์ประกอบพื้นฐาน i_Φ ของกระแสกระแสตุ้นจะล้าหลังแรงดัน E เป็นมุม 90° ดังนั้นจึงไม่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสกระแสตุ้นคือ กระแสที่ล้าหลังแรงดันซึ่งเรียกว่า purely lagging loop และขดลวดกระแสตุ้นสามารถแทนด้วยเฟียวินดักแทนซึ่งดังรูปที่ 1.18 (ๆ) แผนภาพเฟสเซอร์ สำหรับกระแส พื้นฐานและแรงดันที่จ่าย แสดงดังรูปที่ 1.18 (ค)

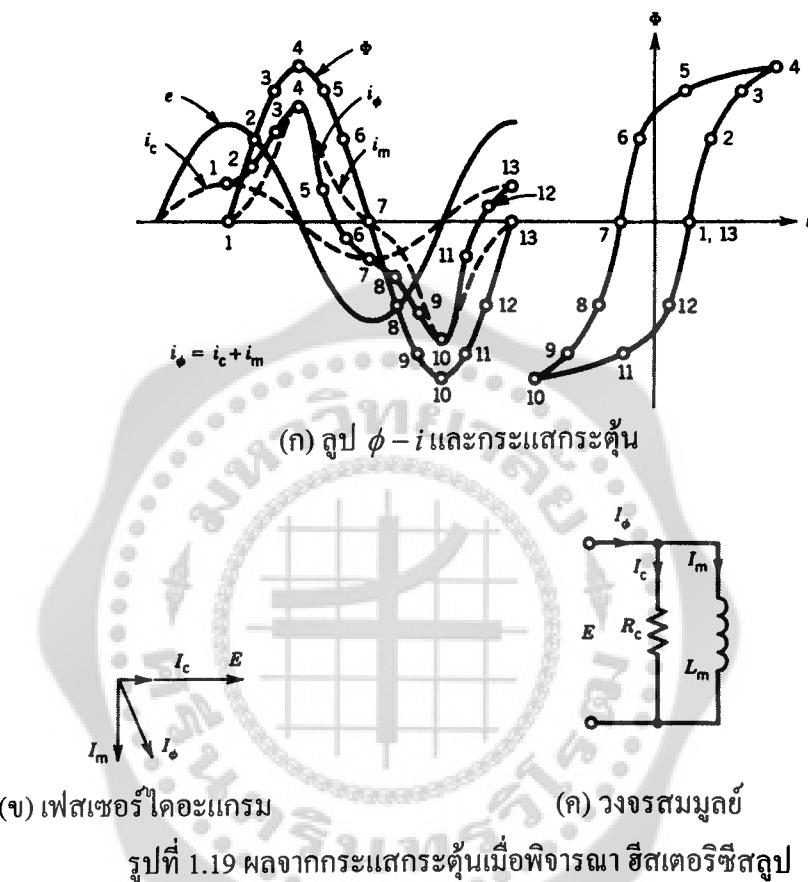


(ก) คุณลักษณะสมบัติ $\Phi - i$ และกระแสกระแสตุ้น (ข) วงจรสมมูล์และเฟสเซอร์โดยวงแหวน
รูปที่ 1.18 ผลจากการกระแสตุ้นเมื่อไม่พิจารณาเอสเตอริชิส

การพิจารณาเอสเตอริชิส

เมื่อเราพิจารณา ฮีสเตอริชิสสูปของแกนดังรูปที่ 1.19 (ก) รูปคลื่นกระแสกระแสตุ้น i_Φ ที่ได้จากรูปคลื่นเส้นแรงไขนูซอยดอล์ยและคุณลักษณะ $\Phi - i$ ของแกนกระแสกระแสตุ้นจะไม่เป็นไขนูซอยดอล์ย จะไม่สมมาตรเมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดัน กระแสกระแสตุ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 องค์ประกอบได้แก่ i_c ที่มีเฟสเดียวกับแรงดัน e ซึ่งมีผลต่อการสูญเสียในแกนและ i_m ที่มีเฟสเดียวกับ Φ และสมมาตรเมื่อเทียบกับ แรงดัน E ซึ่งมีผลต่อการทำแม่เหล็ก i_m ดังกล่าวนี้เหมือนกับกระแสตุ้นถ้าไม่คิด

ชีสเตอร์วิชีสลูป แผนภาพเฟสเซอร์แสดงในรูปที่ 1.19 (ข) องค์ประกอบของกระแสตู้นในคลาวด์ i_c และ i_m สัมพันธ์กับ ความต้านทาน R_c ที่มีผลต่อการสูญเสียในแกน อินดักเต้นซ์ทำแม่เหล็ก L_m แสดงถึง การทำแม่เหล็กของแกนดังรูปที่ 1.19(ค) การพิจารณาองค์ประกอบพื้นฐานของกระแสทำแม่เหล็กจะ พิจารณาโดยแผนภาพเฟสเซอร์เท่านั้น



รูปที่ 1.19 ผลจากกระแสตู้นเมื่อพิจารณาชีสเตอร์วิชีสลูป

1.4 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)

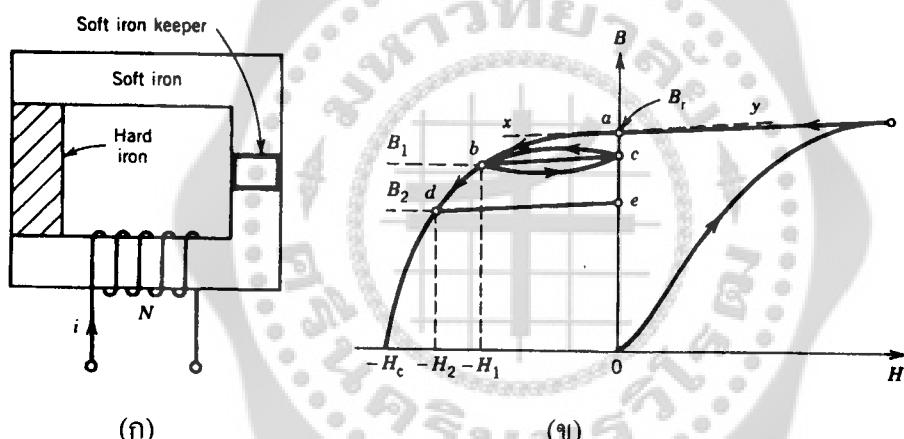
แม่เหล็กถาวรสามารถสร้างสนามแม่เหล็กโดยไม่ต้องมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กกระแสตู้นตัวมัน แม่เหล็กถาวรปกติทำจาก alloys ของ iron nickel และ cobalt คุณลักษณะ $B - H$ loop คือมีค่า retentivity สูง (ค่า B_r สูง) และ high coercive force (ค่า H_c สูง) alloys ทั้งหมดสามารถบรรบายน้ำร้อนได้ดี แม่เหล็กถาวรที่พิจารณาได้แก่จำพวก hard iron และรวมทั้งสารวัสดุแม่เหล็กชนิดอื่น ๆ เช่น soft iron

1.4.1 การทำแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร (Magnetization of Permanent Magnets)

เมื่อพิจารณาวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 1.20(ก) ถ้าสมมุติว่าสภาวะเริ่มต้นไม่ได้ทำแม่เหล็กให้กับ สารแม่เหล็ก และจ่ายแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้กับวัสดุแม่เหล็กจำนวนมากแล้วลดความหนาแน่นเส้นแรงบัน ตัวมันให้หมดไปอย่างไรก็ตามจะคงยังเหลือความหนาแน่นเส้นแรงคงค้าง B_r บนเส้นโค้งทำแม่เหล็กที่จุด a

จุดทำงานเคลื่อนไปบังจุด ๖ ถ้า H_1 ถูกทำให้หมดไปโดยการจ่ายความเข้มสนามแม่เหล็กกลับทางตำแหน่งของเส้นโค้งคุณลักษณะ $B-H$ จะอยู่ใน loop เล็กดังรูปที่ 1.20 (ข) ส่วน loop เล็กแสดงทิศทางโดยลูกศรและสำหรับในทางปฏิบัติสามารถแทนด้วยเส้นตรง bc ซึ่งเรียกว่า recoil line เส้นตรงดังกล่าวจะมีจุดงานกับเส้นสัมผัส xay ตามเส้นโค้งการลดความเป็นแม่เหล็กที่จุด a สำหรับความชันของ recoil line เรียกว่า recoil permeability μ_{rec} สำหรับ alnico magnets จะอยู่ในช่วง $3-5 \mu_o$ ในขณะที่ ferrite magnets จะต่ำกว่า คือ $1.2 \mu_o$

ในทางกลับกันถ้าความเข้มสนามแม่เหล็ก H_1 มีค่าต่ำจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อความเป็นแม่เหล็กการของแม่เหล็ก ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นจากจุด H_1 ไปยัง H_2 ทางด้านลบจะทำให้ความหนาแน่นของแม่เหล็กการลดลงไปที่จุด B_2 ถ้า H_2 ถูกตัดออกไปจุดทำงานจะเปลี่ยนใหม่ที่ recoil line de



รูปที่ 1.20 ระบบแม่เหล็กการและตำแหน่ง $B-H$

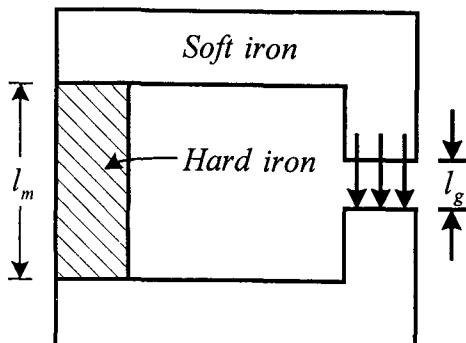
1.4.2 การออกแบบแม่เหล็กการโดยการประมาณ

(Approximate Design of Permanent Magnets)

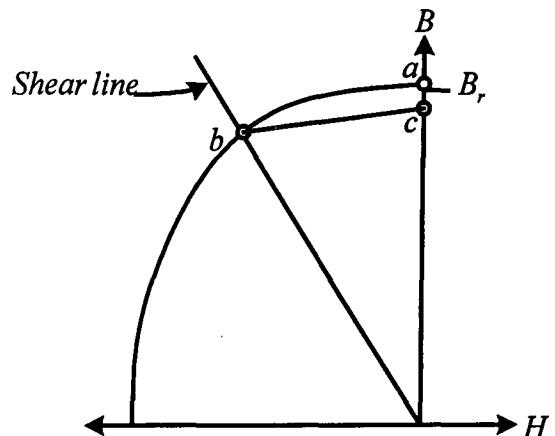
รูปที่ 1.20(ก) แสดงการทำแม่เหล็กให้กับวัสดุแม่เหล็กจากนั้นทำการลดความเป็นแม่เหล็กลง ซึ่งจะเห็นว่าในรูปที่ 1.20(ก) ยังมีความหนาแน่นเส้นแรงตกค้าง B_r ที่จุด a ถ้า soft iron ส่วนเล็ก ดังรูปที่ 1.20(ก) ถูกตัดออกไปจะทำให้เกิดช่องอากาศ (air gap) ดังรูปที่ 1.21(ก) โดยที่ช่องอากาศจะทำให้เกิดการแยกตัว (active region) ของเส้นแม่เหล็ก

สำหรับการคำนวณผลของการลดความหนาแน่นในแม่เหล็กและในช่องอากาศทำได้โดยสมมุติให้

1. ไม่เกิดการรั่วซึมของเส้นแรงหรือเส้นแรงที่เคลื่อนออกจากแนวการเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ซึ่ง fringing flux
2. ต้องไม่เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) สำหรับ soft iron



(ก) เมื่อตัดส่วน soft iron ออกไป



(ข) ตำแหน่งเส้นโถงคุณลักษณะ B - H

จาก Ampere's Circuit law

รูปที่ 1.21 การทำแม่เหล็กด้วย

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \quad (1.43)$$

$$H_m = -\frac{l_g}{l_m} H_g \quad (1.44)$$

โดย

$$\Phi = B_m A_m = B_g A_g \quad (1.45)$$

ดังนั้น

$$B_g = \mu_0 H_g \quad (1.46)$$

จากสมการ (1.43), (1.45) และ (1.46)

$$B_m = \mu_0 \frac{A_g}{A_m} \frac{l_m}{l_g} H_m \quad (1.47)$$

สมการ (1.47) แสดงเส้นตรงที่ลากจากจุดกำเนิด เรียกว่า shear line (รูปที่ 1.21ข) จุดตัดของเส้น shear line กับจุดที่เกิดการลดความเป็นแม่เหล็กอยู่ที่จุด b ซึ่งค่า B และ H ของวัสดุ hard iron เนื่องจากการตัด soft iron ออกไปคำนวณได้จากจุดทำงานดังกล่าว ถ้าส่วน soft iron ไม่ถูกตัดออกไปจุดทำงานก็จะเคลื่อนไปตามแนวเส้นตรง bc ซึ่งเรียกว่า recoil line การวิเคราะห์ดังกล่าวมานั้นเป็นการแสดงจุดทำงานของแม่เหล็กด้วยน้ำหนักอากาศ ซึ่งคำนวณได้โดยสัดส่วนการลดความเป็นแม่เหล็กของ B-H loop และเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กกับช่องอากาศ

จากสมการ (1.43) , (1.45) และ (1.46) ปริมาตรของวัสดุแม่เหล็กถาวร คือ

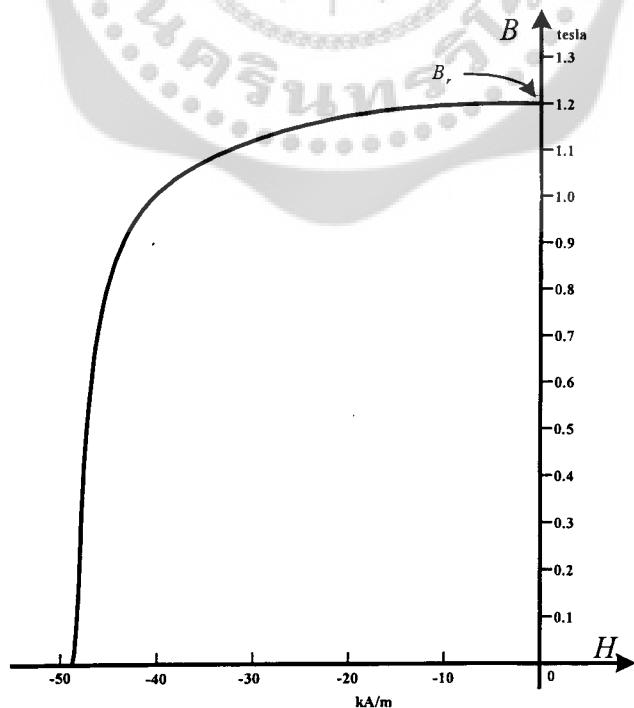
$$\begin{aligned}
 V_m &= A_m l_m \\
 &= \frac{B_g A_g}{B_m} \times \frac{H_g l_g}{H_m} \\
 &= \frac{B_g^2 V_g}{\mu_0 B_m H_m}
 \end{aligned} \tag{1.48}$$

โดยที่ $V_g = A_g l_g$ คือ ปริมาตรของช่องอากาศ

ดังนั้น B_g คือ ความหนาแน่นเส้นแรงในช่องอากาศของ ปริมาตรต่ำที่สุดของ hard iron เป็น สิ่งที่ต้องการทำให้เกิดขึ้น ถ้าจุดทำงานสุดท้ายคือ ที่ตำแหน่งซึ่งทำให้เกิดค่า $B_m H_m$ สูงสุดปริมาณ $B_m H_m$ ดังกล่าวเรียกว่า energy product ของ hard iron

1.4.3 วัสดุแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnetic Materials)

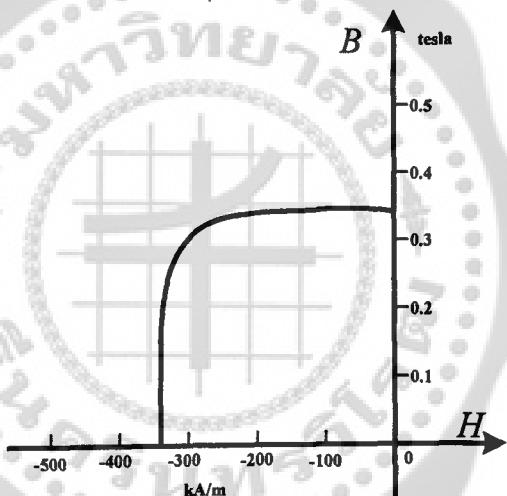
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นกู้มของ alloys ทั้งหมด(aluminum - nickel - cobalt) เรียกว่า alnico ซึ่งในสำหรับแม่เหล็กถาวรมีใช้มาตั้งแต่ 1930 s Alnico มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงตกค้างสูงคงแสดงในรูปที่ 1.22



รูปที่ 1.22 เส้นโค้งการลดความเป็นแม่เหล็กสำหรับ alnico

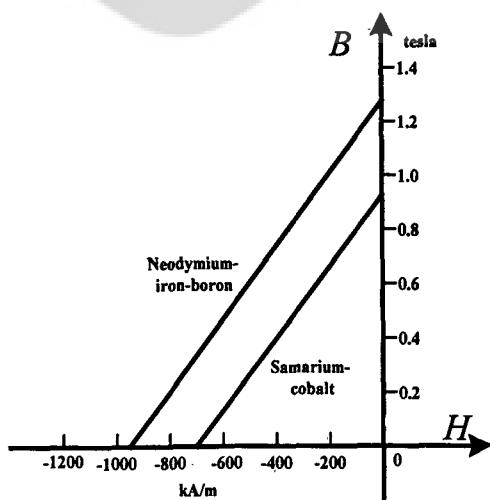
Ferrite permanent magnet materials นิใช้กันมาตั้งแต่ปี 1950 โดยที่ Ferrite ดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงตอกค้างต่ำมากแต่ coercive force สูงมาก ในรูปที่ 1.23 แสดงเส้นโค้งการลดความเป็นแม่เหล็กสำหรับ Ferrite D ซึ่งเป็น strontium ferrite

ตั้งแต่ปี 1960 ได้มีการพัฒนาแม่เหล็กดาวรุนนิคใหม่ขึ้นมาเรียกว่า rare-earth permanent magnets โดยที่ rare - earth permanent magnet materials ได้รวมลักษณะความหนาแน่นเส้นแรงตอกค้างที่มีค่าสูงของวัสดุชนิด alnico ได้แก่ iron , nickel และ cobalt เข้าด้วยกันที่มีองค์ประกอบ rare-earth หนึ่งส่วนหรือมากกว่านี้ การรวมโดยใช้การ combination ของ samarium - cobalt เส้นโค้งการลดความเป็นแม่เหล็กสำหรับวัสดุดังกล่าวจะแสดงในรูปที่ 1.24 สำหรับวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ทำ rare-earth magnet material ซึ่งก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเมื่อไม่นานมานี้ได้แก่ neodymium - iron - boron สำหรับเส้นโค้งการลดความเป็นแม่เหล็กของ alloy แสดงได้ดังรูปที่ 1.24 จะเห็นว่าความหนาแน่นเส้นแรงตอกค้างและ coercivity ทั้งสองมากกว่า samarium - cobalt อย่างไรก็ตาม neodymium - iron - boron ค่อนข้างจะมีราคาแพง



รูปที่ 1.23 เส้นโค้งการลดความเป็นแม่เหล็กสำหรับ ferite D magnet

$$\beta_{g2} = \frac{\phi_2}{A_{g2}} = \frac{0.127 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{6.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.315 \text{ Wb/m}^2$$



รูปที่ 1.24 เส้นโค้งลดความเป็นแม่เหล็กสำหรับ

samarium - cobalt magnet และ neodymium - iron - boron magnet

ตัวอย่างที่ 1.7 แม่เหล็กถาวรดังรูปที่ 1.21 ทำจาก alnico 5 โดยกำหนดเด็นโคล์ดความเป็นแม่เหล็กในรูป 1.22 ความหนาแน่น剩磁แรง $0.8 T$ ในช่องอากาศเมื่อตัด keeper ออกไป ช่องอากาศมีพื้นที่ $A_g = 2.5 \text{ cm}^2$ ความยาว $L_g = 0.4 \text{ cm}$ จุดทำงานบน剩磁โคล์ดความเป็นแม่เหล็กสัมพันธ์กับจุดที่ทำให้เกิด $B_m H_m$ มีค่า สูงสุด และจุดทำงานนี้คือ $B_m = 0.95 T$ $H_m = -42 \text{ kA/m}$ งบประมาณ พื้นที่และความยาวของแม่เหล็ก

วิธีทำ จากสมการ (1.43) และ (1.46)

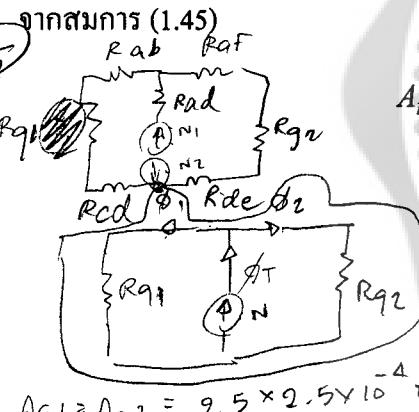
$$I_m = \frac{l_g}{H_m} H_g = \frac{l_g B_g}{H_m \mu_0}$$

$$= \frac{0.4 \times 10^{-2} \times 0.8}{42 \times 10^3 \times 4\pi \times 10^{-7}}$$

$$= 0.0606 \text{ m} = 6.06 \text{ cm} \quad E_{rms} = \frac{n \phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}}$$

$$A_m = \frac{B_g A_g}{B_m}$$

$$= \frac{0.8 \times 2.5 \times 10^{-4}}{0.95}$$



$$A_{g1} = A_{g2} = 2.5 \times 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_{g1} = \frac{l_{g1}}{M_0 A_{g1}} = \frac{0.05 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 6.25 \times 10^{-4}} \text{ m}^2$$

$$R_{g2} = \frac{l_{g2}}{M_0 A_{g2}} = \frac{0.1 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 6.25 \times 10^{-4}} \text{ m}^2$$

$$N = (N_1 - N_2) = (700 - 200) = 500$$

$$\phi_1 = N_1 / R_{g1} = \frac{500 \times 0.5}{0.696 \times 10^6} = 0.392 \times 10^{-3} \text{ wb}$$

$$\phi_2 = N_2 / R_{g2} = \frac{500 \times 0.5}{0.27 \times 10^6} = 0.196 \times 10^{-3} \text{ wb}$$

$$\phi_r: \phi_1 + \phi_2 = 0.588 \times 10^{-3} \text{ wb}$$

$$B_{g1} = \frac{\phi_1}{A_{g1}} = \frac{0.392 \times 10^{-3} \text{ wb}}{6.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.624 \text{ wb/m}^2$$

$$\text{A) } V = 100 \text{ V } 50 \text{ Hz}$$

$$V = 110 \text{ V } 60 \text{ Hz}$$

$$E_f = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t$$

$$\phi_t = N \frac{d\phi}{dt} \max \sin \omega t$$

$$= N \omega \phi_{max} \cos \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$e_t = N \phi_{max} 2\pi f \cdot C \cos \omega t$$

$$= 0.0606 \text{ m} = 6.06 \text{ cm} \quad E_{rms} = \frac{n \phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}}$$

$$= 4.44 N \phi_{max} f$$

$$\phi_{max} = B_{max} \times A$$

$$E_{rms} = 4.44 N \times B_{max} \times A \times f$$

$$B_{max} = \frac{E_{rms}}{4.44 N A f}$$

$$Imu \text{ } n = 2$$

$$\therefore P_h = \frac{\left(\frac{E_{rms}}{4.44 N A f} \right)^2 f}{4 \left(\frac{E_{rms}}{4.44 N A f} \right)^2 f} \text{ am}$$

$$\geq \frac{\left(\frac{E_{rms}}{f} \right)^2}{\left(\frac{E_{rms}}{f} \right)^2} \text{ am}$$

$$P_h = \frac{\left(\frac{110}{60} \right)^2 60}{\left(\frac{110}{50} \right)^2 50} = 1.0083 \text{ W}$$

$$P_e = K_B n \max f^2$$

$$P_e = \frac{\left(\frac{110}{60} \right)^2 \times 60}{\left(\frac{110}{50} \right)^2 \times 50} = 1.21$$

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. วงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 1-1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

$$\text{ความลึก} = 10 \text{ cm}$$

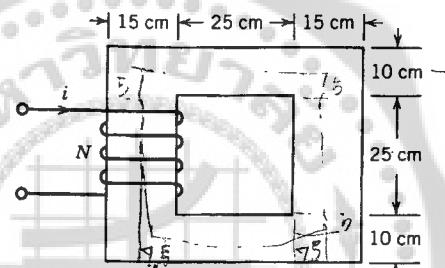
$$\mu_r = 2000$$

$$N = 300 \text{ t}$$

และกำหนดกระแส i ไหลผ่าน coils 1 A จงคำนวณ

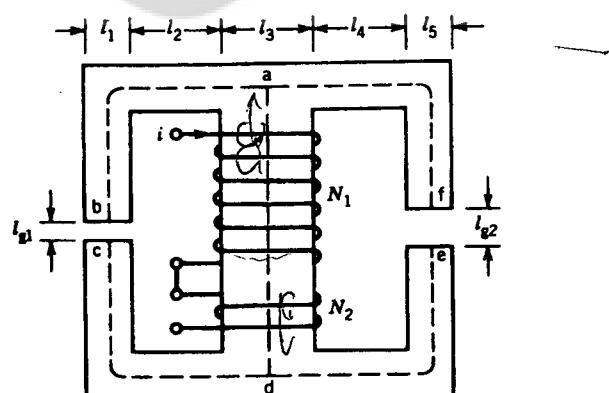
(ก) เส้นแรงแม่เหล็กในแกน

(ข) ความหนาแน่นของเส้นแรงในแกน



รูปที่ 1-1

2. จากโจทย์ในข้อ 1 จงคำนวณกระแส i ที่ไหลผ่าน coils ซึ่งทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi = 0.012 \text{ Wb}$
3. วงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 1-2 กำหนดให้ $N_1 = 700 \text{ t}$, $N_2 = 200 \text{ t}$ และมีกระแสไฟ流ผ่าน 0.5 A ถ้าไม่คำนึงถึง leakage flux และ reluctance ของแกนเหล็กรวมทั้ง fringing ที่ช่องอากาศ จงคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) และความหนาแน่นของเส้นแรง (B) ในช่องอากาศ



$$l_{g1} = 0.05 \text{ cm}, l_{g2} = 0.1 \text{ cm}$$

$$l_1 = l_2 = l_4 = l_5 = 2.5 \text{ cm}$$

$$l_3 = 5 \text{ cm}$$

$$\text{depth of core} = 2.5 \text{ cm}$$

รูปที่ 1-2

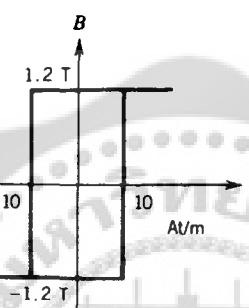
4. ถ้าพันดัดลวดบนแกนแม่เหล็กซึ่งกำหนดการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดันดังนี้ คือ

$$(ก) 100 V, 50 Hz$$

$$(ข) 110 V, 60 Hz$$

จะเปรียบเทียบการสูญเสียเนื่องจาก ฮีสเตอเรซิสและ กระแสไฟловนจากการกระตุ้นแหล่งจ่ายทั้งสอง
(สำหรับการสูญเสียเนื่องจาก ฮีสเตอเรซิส กำหนดให้ $n = 2$)

5. แกน toroidal มีความยาวเฉลี่ย $5 cm$ พื้นที่หน้าตัด $10 cm^2$ มีการพันดัดลวด 300 รอบกระจายส่วนเท่าๆ กัน
โดยกำหนดคุณลักษณะ $B - H$ ของแกนดังรูปที่ 1 - 3 ถ้าต่อแหล่งจ่ายขนาด $100 V$ ความถี่ $400 Hz$
เข้ากับคอมพ์ จงคำนวณการสูญเสียเนื่องจาก ฮีสเตอเรซิสในแกน



รูปที่ 1 - 3

1021 #

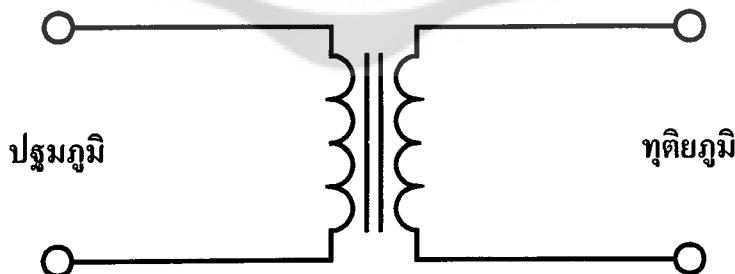
บทที่ 2

หม้อแปลง

(Transformers)

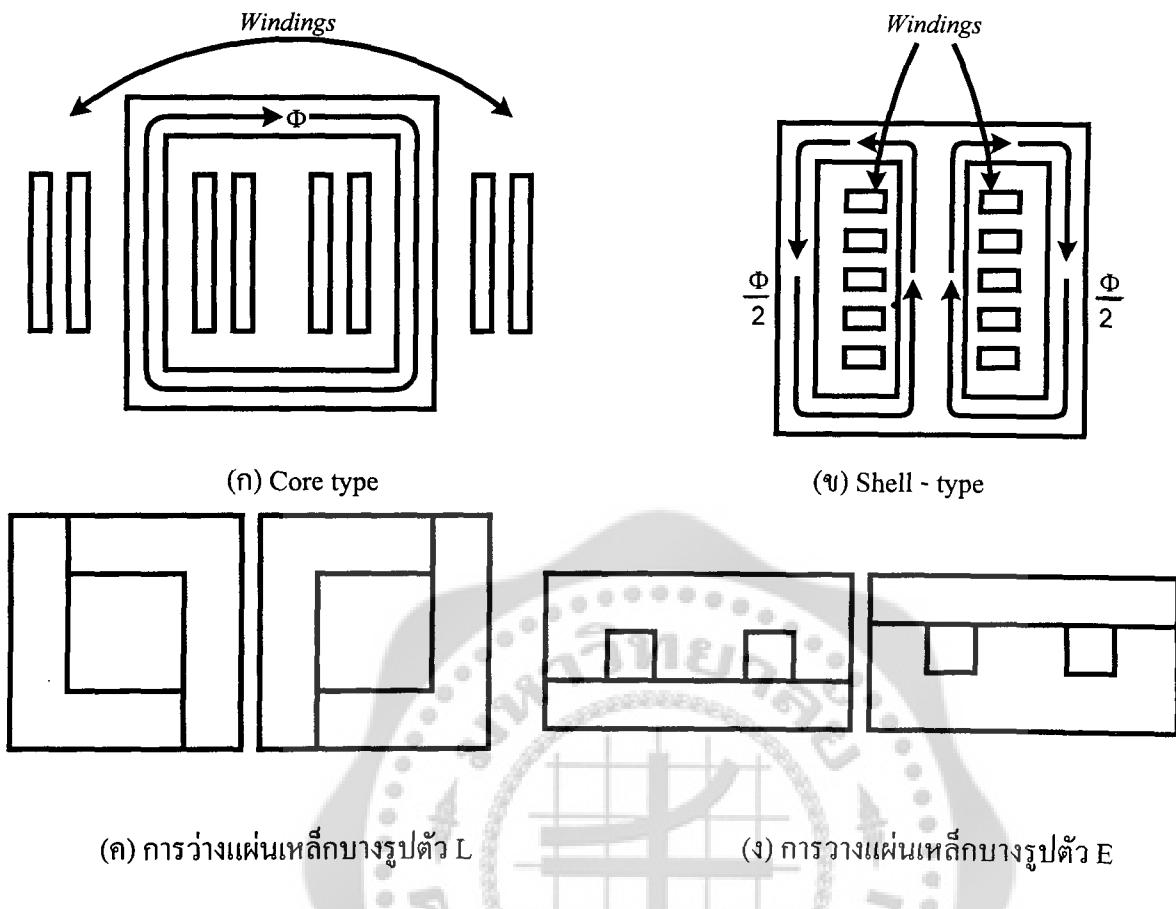
บทนี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานเพื่อวิเคราะห์หม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงนั้นถือว่าเป็นเครื่องจักรกลชนิดอยู่กับที่ (Static machine) และไม่สามารถใช้อุปกรณ์ในขบวนการแปรรูปพลังงานได้ แต่เราจะนำกฎเกณฑ์และหลักการพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์หม้อแปลงไปใช้พิจารณาเพื่อวิเคราะห์เครื่องจักรชนิดหมุน

ในรูปที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของหม้อแปลงที่ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด เชื่อมต่อโดยสนามแม่เหล็กหนึ่งช่วง (Mutual magnetic field) สำหรับหม้อแปลงที่แกนเป็นชนิด Ferromagnetic นั้นมีการเชื่อมต่อของสนามแม่เหล็กที่หนาแน่นและความหนาแน่นของเต้นแรงมีค่าสูง ซึ่งเรียกหม้อแปลงชนิดนี้ว่า หม้อแปลงแกนเหล็ก (Iron core transformers) ส่วนหม้อแปลงซึ่งมีการเชื่อมต่อของสนามแม่เหล็กที่เบาเรียกหม้อแปลงชนิดนี้ว่า หม้อแปลงแกนอากาศ(Air core transformers) แต่สำหรับหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเฉพาะหม้อแปลงแกนเหล็กเท่านั้น



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงที่ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของแกนหม้อแปลงที่ทำมาจากแผ่นอัดซ้อน (Laminate) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ core type และ shell type ดังรูปที่ 2.2 (ก) และ (ง) สำหรับรูปที่ 2.2 (ก) และ(ง) แสดงลักษณะการประกอบแผ่นอันซ้อนเป็นแกน หม้อแปลง รูปตัว L และ E ตามลำดับ



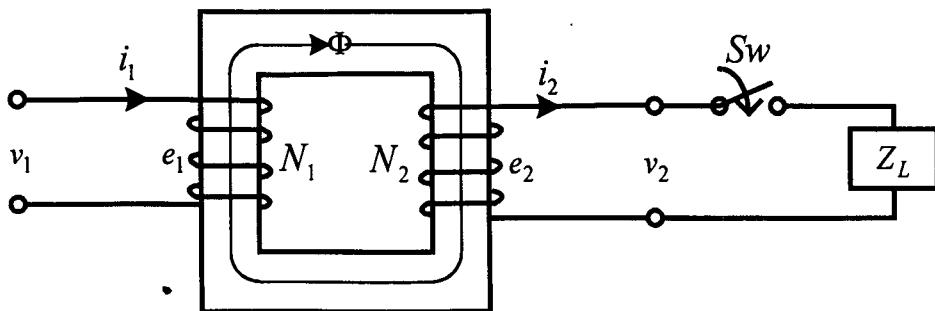
รูปที่ 2.2 ลักษณะการพัฒนาด้วยแบบแกนหน้าแปลงและการวางแพ่นเหล็กบางอัดช้อนเป็นแกน

2.1 หม้อแปลงทางอุดมคติ (Ideal Transformer)

การวิเคราะห์หม้อแปลงทางอุดมคติรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยขั้วคลาวด์ 2 ชุด ได้แก่ ขดลวดด้านปฐมภูมิ (primary winding) N_1 และขดลวดด้านทุติยภูมิ (secondary winding) N_2 นั้นมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้ คือ

- ไม่คิดผลเนื่องจากความต้านทานของขดลวด
- จำกัดผลของเส้นแรงทั้งหมดให้เกิดขึ้นที่แกนและขดลวดทั้งสองมีการเชื่อมโยงกันโดยไม่คิดผลของ เส้นแรงรั่ว (Leakage flux) นอกจากนี้ยังไม่คิดผลของการสูญเสียที่แกน (core losses)
- สมมุติให้ความซึมซาบที่แกนเป็นอนันต์ ($\mu \rightarrow \infty$) ดังนั้นจึงไม่คิดผลของกระแสกระตุ้นเพื่อ ทำให้เกิดเส้นแรงที่แกน โดยที่ผลรวมของแรงคลื่อนแม่เหล็กในแกนเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} E_1 &= \text{แรงดันลับ} \\ E_2 &= \end{aligned}$$



รูปที่ 2.3 หน้าแปลงอุดมคติ

เมื่อจุดลวดค้านปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันที่เปลี่ยนแปลง随เวลา v_1 ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก Φ ในแกน ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงความต้านทานของชุดลวดแรงดันเหนี่ยวนำในชุดลวด e_1 จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย คือ

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{สมการที่ 1} \quad (2.1)$$

เส้นแรงแม่เหล็กในแกนที่เรื่องไปทางค้านทุติยภูมิซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ e_2 มีค่าเท่ากับแรงดันที่ข้าว v_2 และกำหนดได้ตามสมการ(2.2) คือ

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{สมการที่ 2} \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.1) และ (2.2) เมื่อนำมาพิจารณาอัตราส่วนระหว่างปริมาณทางค้านปฐมภูมิต่อทุติยภูมินี้สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad \Rightarrow \text{สมการ exact} \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้ a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบ (turns ratio)

จากรูปที่ 2.3 เมื่อสวิตซ์ปิดโหลดจะถูกต่อเข้าทางค้านทุติยภูมิ ส่งผลให้มีกระแส i_2 ไหลผ่านชุดลวดค้านทุติยภูมิ และเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นในแกน $F_2 = N_2 i_2$ ทำองเดียวกับผลของการเคลื่อนแม่เหล็กทางค้านปฐมภูมิ $F_1 = N_1 i_1$ เนื่องจากกระแส i_1 ไหลผ่านชุดลวด โดยที่ทิศทางการไหลของกระแสนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตรงข้ามกัน

จากเงื่อนไขข้อที่ 3 หนึ่งอัปพลิเคชันคือความต้องการรวมของแรงคดีอนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$F = N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (2.4)$$

$$\therefore \boxed{N_1 i_1 = N_2 i_2} \Rightarrow \text{สมบัติ } (2.5)$$

จากสมการ (2.5) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของอัตราส่วนจำนวนรอบ (a) ได้ดังนี้ คือ

$$\boxed{a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1}} \Rightarrow \text{สมบัติ } (2.6)$$

และเมื่อพิจารณาสมการ (2.3) และ (2.6) นั้นสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณทางด้านปัจุจุน และทุติยภูมิตามสมการ (2.7) คือ

$$\boxed{v_1 i_1 = v_2 i_2} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะทางด้านเข้ามีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าชั่วขณะทางด้านออก $P_{input} = P_{output}$ (เนื่องจากไม่คิดกำลังสูญเสียของหนึ่งอัปพลิเคชัน) และถ้ากำหนดให้รูปคลื่นแรงดัน v_1 เป็นสัญญาณไซน์ ดังนั้นสมการ (2.3), (2.6) และ (2.7) สามารถเขียนในเทอมค่า rms ได้ดังนี้ คือ

$$\boxed{\star \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2}} \quad (2.8)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.9)$$

ดังนั้น อินพุตในหน่วย VA = เอาท์พุตในหน่วย VA นั้นคือ

$$\boxed{V_1 I_1 = V_2 I_2} \Rightarrow \text{รูปคลื่นเดียวกัน 2 คลื่น ในหน่วยเดียวกัน} \quad (2.10)$$

2.1.1 การถ่ายโอนอิมพีเดนซ์ (Impedance Transfer)

เมื่อพิจารณากรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณไซน์และ Z_2 คืออิมพีเดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้น Z_2 หาได้ดังนี้คือ

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

และ Z_1 คืออิมพีเดนซ์ทางด้านเข้าซึ่งกำหนดได้ดังนี้คือ

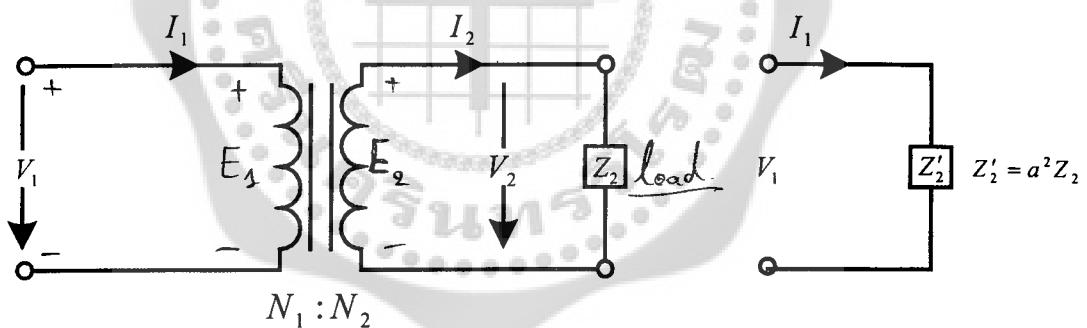
$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2 \quad (2.11)$$

ดังนั้นถ้ากำหนดให้ $Z'_2 = Z_1$ นั้นคือ

$$\cancel{Z'_2 = a^2 Z_2 - Z_1} \Rightarrow Z'_1 = \frac{Z_1}{a^2} \quad (2.12)$$

จากสมการข้างต้นนี้เห็นได้ว่าอิมพีเดนซ์ Z_2 ถูกต่อทางด้านทุติกวาม แต่อิมพีเดนซ์ Z'_2 ปรากฏอยู่ทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นวงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.7 b นอกจากนี้อิมพีเดนซ์สามารถถ่ายโอนจากด้านทุติกวามไปทางด้านปฐมภูมิ โดยผ่านอัตราส่วนจำนวนรอบยกกำลัง สูง (a^2) นั้นคือ

$$Z_2 = Z'_1 = \frac{1}{a^2} Z_1 \quad (2.13)$$



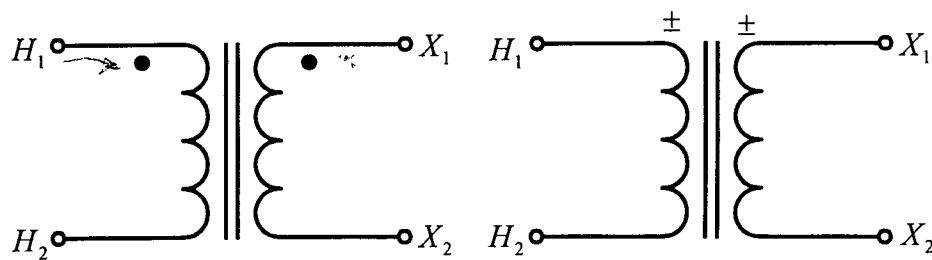
(ก) วงจรสมมูลย์

(ข) การถ่ายโอนอิมพีเดนซ์

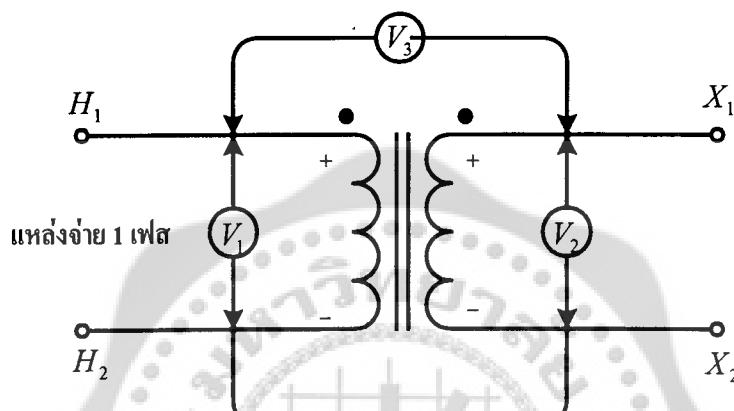
รูปที่ 2.4 การถ่ายโอนอิมพีเดนซ์สำหรับหม้อแปลงทางอุคณศิ

2.1.2 การกำหนดขั้ว (Polarity)

การกำหนดขั้วของหม้อแปลงนั้นถือเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประโยชน์ต่อการกำหนดทิศทางของกระแส และการขยายหน้มือแปลง โดยทั่วไปเราจะกำหนดสัญลักษณ์ของขั้วเป็นจุด (Dot) หรือ ± ดังรูปที่ 2.8 (ก) โดยที่ขั้วของขด漉ด้านแรงสูงแทนด้วย H_1 และ H_2 ส่วนขั้วของขด漉ด้านแรงต่ำแทนด้วย X_1 และ X_2



(ก) สัญลักษณ์การกำหนดขั้ว

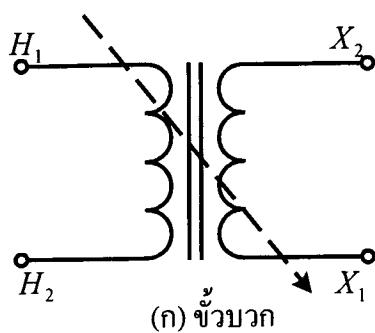


(ข) วิธีการหาขั้วหน้าแปลง

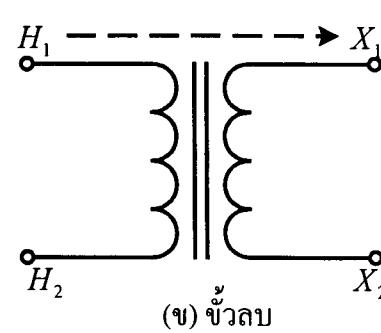
รูปที่ 2.5 การกำหนดขั้วของหน้าแปลง

สำหรับวิธีการหาขั้วของหน้าแปลงแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยต่อขั้ว H_1 และ H_2 เข้ากับแหล่งจ่ายที่พิกัด จากนั้นใช้โอลท์มิตอเรอร์วัดค่าแรงดันต่อกัน V_1 , V_2 และ V_3 แล้วคำนวณหาขั้วหน้าแปลงดังนี้ คือ

- ถ้าวัดแรงดัน V_3 ได้ค่ามากกว่าแรงดันอินพุต V_1 ($V_3 = V_1 + V_2$) จะได้ขั้วบวก (addition polarity) นั่นคือขั้ว H_1 ตรงข้ามกับ X_1 ดังรูปที่ 2.6(ก)
- ถ้าวัดแรงดัน V_3 ได้น้อยกว่าแรงดันอินพุต V_1 ($V_3 = V_1 - V_2$) จะได้ขั้วลบ (subtractive polarity) นั่นคือขั้ว H_1 อยู่ในแนวเดียวกัน X_1 ดังรูปที่ 2.6(ข)

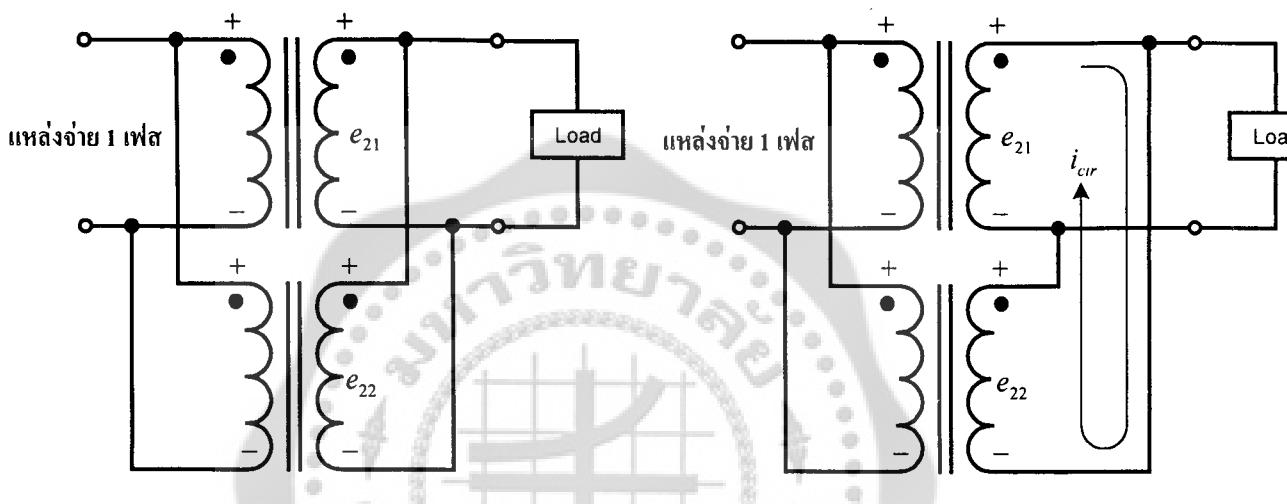


รูปที่ 2.6 การกำหนดขั้วหน้าแปลง



รูปที่ 2.6 การกำหนดขั้วหน้าแปลง

จากที่กล่าวข้างต้นนี้การหาข้อแม้มอแปลงนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานโดยเฉพาะการบานาน หม้อแปลงเข้าด้วยกันเพื่อร่วมกันจ่ายกำลังให้กับโหลด สำหรับรูปที่ 2.7 (ก) เป็นการต่อขานหม้อแปลง 1-เฟส 2 ตัว ซึ่งลักษณะการต่อข้อมือแปลงที่ถูกต้องดังรูปที่ 2.7(ก) เนื่องจากแรงดันด้านทุติยกูมิ e_{21} และ e_{22} มีขั้วตรงข้ามกันภายใน และรูปที่ 2.7(ข) แสดงลักษณะการต่อขึ้ที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากแรงดัน e_{21} และ e_{22} มีขั้วเสริมกันภายในซึ่งมีผลทำให้กระแสไฟล์ผ่านชุดลวด i_{cir} มีค่าสูง เป็นเหตุให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายได้



(ก) วิธีการที่ถูกต้อง

(ข) วิธีการที่ผิด

รูปที่ 2.7 การบานานหม้อแปลง 1-เฟสเข้าด้วยกัน

2.2 การพิจารณาคุณลักษณะสมบัติที่แท้จริงของหม้อแปลง

(Practical Transformer)

สำหรับหัวข้อ 2.1 นั้นเป็นการพิจารณาหม้อแปลงในทางอุดมคติ ซึ่งโดยแท้จริงแล้วนั้นคุณลักษณะสมบัติของหม้อแปลงจำเป็นต้องพิจารณาผลของค่าความต้านทานของชุดลวดด้วย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงและเส้นแรงแม่เหล็กร่วดด้วยซึ่งในการวิเคราะห์หม้อแปลงตามคุณลักษณะที่แท้จริง มีด้วยกัน 2 วิธีการดังนี้ คือ

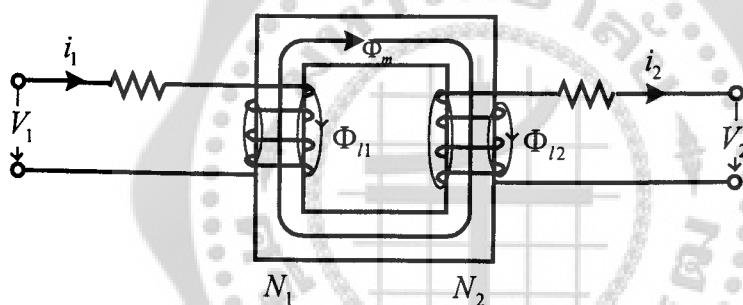
1. วิเคราะห์จากแบบจำลองวงจรสมมูลย์บนพื้นฐานจากเหตุผลทางกายภาพ
2. วิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานตามทฤษฎีที่เรียกว่า classical theory of magnetically coupled circuit

การวิเคราะห์หม้อแปลงทั้ง 2 วิธีนี้ แสดงคุณลักษณะสมบัติสำหรับการพิจารณาหม้อแปลงที่แท้จริงได้เหมือนกัน แต่วิธีการวิเคราะห์จากการสมมูลย์ สามารถอธิบายและให้ความเข้าใจพฤติกรรมทางกายภาพที่ยุ่งยากซับซ้อนได้ดีกว่า ซึ่งในบทนี้เราจะวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงจากวงจรสมมูลย์

สำหรับการพิจารณาคุณสมบัติที่แท้จริงของหม้อแปลงนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงความต้านทานของขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (Leakage flux) เส้นแรงแม่เหล็กร่วม (mutual flux) และการสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2.8 เมื่อมีกระแส i_1 ไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดเส้นแรงร่วม Φ_m เรียกว่า resultant mutual flux ที่มีทางเดินภายในแกน อย่างไรก็ตามจะมีเส้นแรงส่วนหนึ่งรั่วออกจากทางเดินเรียกว่า เส้นแรงรั่ว (leakeage flux: Φ_e) ซึ่งเส้นแรงที่รั่ว Φ_e สามารถอธิบายจากอินดักเต้นซ์ เรียกว่า leakage inductance

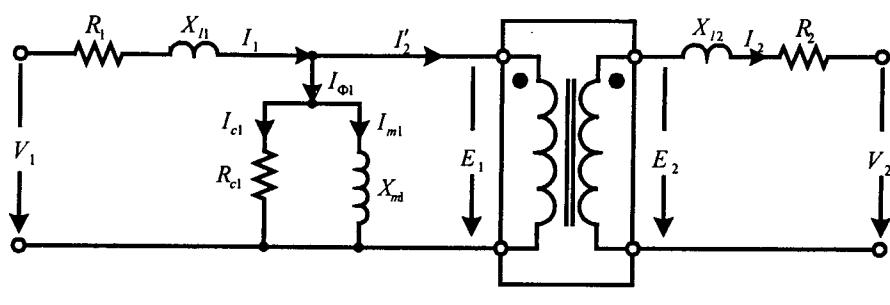
$$L_{l1} = \frac{N_1 \Phi_{l1}}{i_1} = \text{ค่าความเหนี่ยวนำรั่วชีมของขดลวดที่ } 1$$

$$L_{l2} = \frac{N_2 \Phi_{l2}}{i_2} = \text{ค่าความเหนี่ยวนำรั่วชีมของขดลวดที่ } 2$$

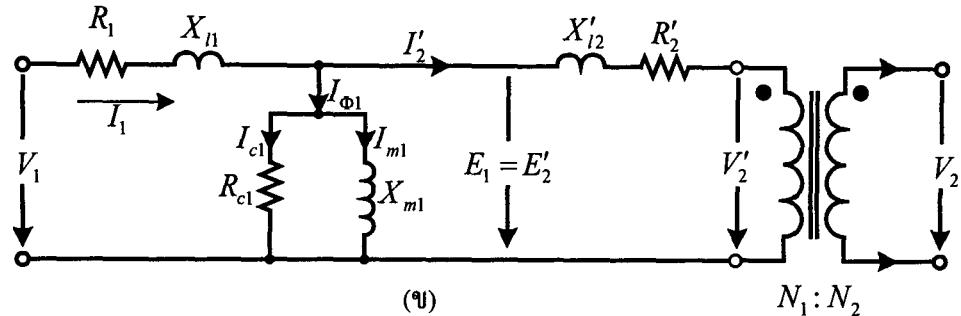


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหม้อแปลงซึ่งพิจารณาตามคุณสมบัติที่แท้จริง

และจากรูปที่ 2.8 ค่าความต้านทานของขดลวดทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแทนด้วย R_1 กับ R_2 ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 2.9 แสดงค่ารีแอคเต้นซ์รั่ว $X_l = 2\pi f L_l$ และส่วนขยายที่เรียกว่า Short branch ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน R_c ซึ่งแทนการสูญเสียที่แกนส่วนเทอนของอินดักเต้นซ์นำแม่เหล็ก (magnetizing inductance: L_m) ที่เป็นผลเนื่องจากการทำแม่เหล็ก (magnetizing current: I_m) เจียนแทนด้วย รีแอคเต้นซ์การทำแม่เหล็ก X_m



(ก)



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์หม้อแปลงที่พิจารณาตามคุณสมบัติที่แท้จริง

2.2.1 การโอนข่ายวงจรสมมูลย์ (Referred Equivalent Circuits)

การโอนข่ายค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลย์หม้อแปลงนี้สามารถโอนข่ายไปทางด้านปัจจุบันทึ้งหมดหรือโอนข่ายจากทางด้านปัจจุบันก้มไม้งด้านทุติก้ม เมื่อพิจารณาหม้อแปลงรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเราสามารถที่จะโอนข่ายปริมาณต่าง ๆ ทางด้านทุติก้มมาไว้ทางด้านปัจจุบันทึ้งหมดดังรูปที่ 2.10 โดยการโอนข่ายต้องผ่านอัตราส่วนจำนวนรอบซึ่ง การคำนวณแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E'_1}{E'_2} = \frac{I_2}{I_1} = a$$

$$E'_1 = E'_2 = aE_2$$

$$V'_2 = aV_2$$

$$I'_2 = I_2/a$$

$$X'_{l2} = a^2 X_{l2}$$

$$R'_2 = a^2 R_2$$

$$I_1 = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = 100 \text{ A}$$

$$a = \frac{100}{10} = 10$$

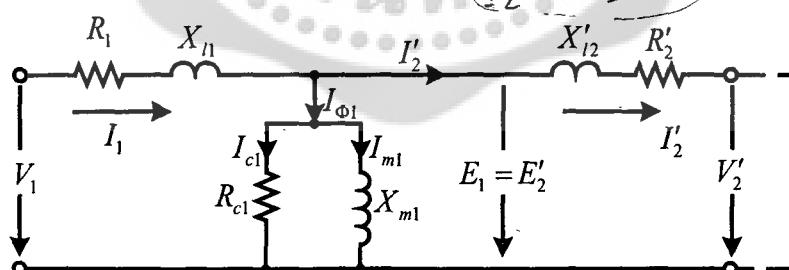
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$V_1 I_1 = I_2 V_2$$

$$I_2 = \frac{V_1}{V_2} I_1$$

$$I_2 = a I_1$$

$$(I'_2 = \frac{I_2}{a})$$



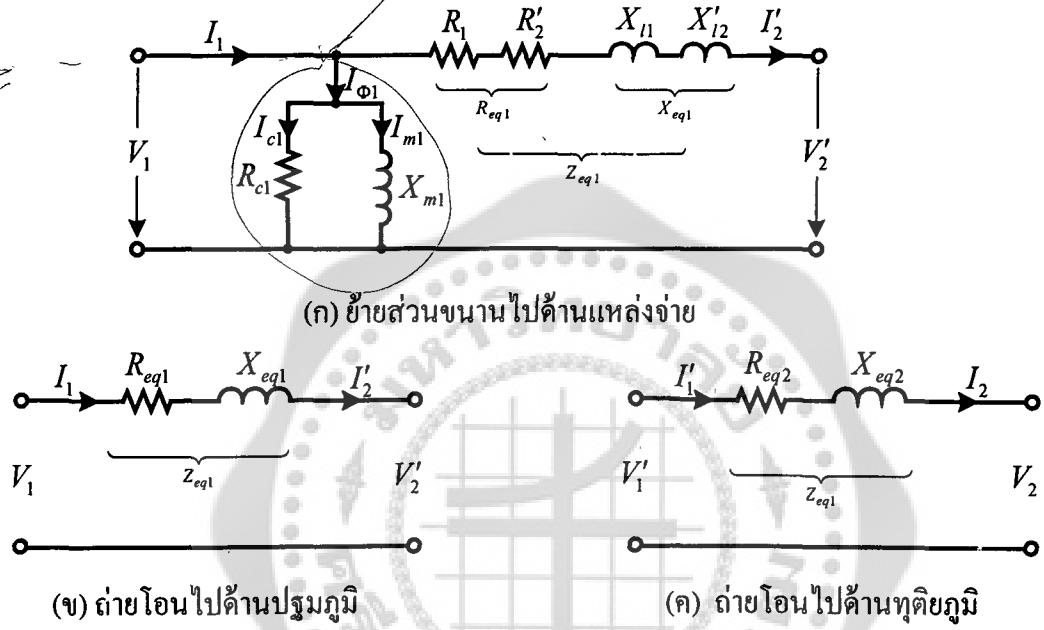
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลย์ที่โอนข่ายไปด้านปัจจุบัน

วงจรสมมูลย์โดยประมาณ (Approximate Equivalent Circuit)

จากรูปที่ 2.10 นั้นตามปกติแรงดันตกคร่อน $I_1 R_1$ และ $I_1 X_{l1}$ ตามปกตินี้ปริมาณน้อยมากและ $|E_1| \approx |V_1|$ ดังนั้นสามารถข้ายส่วนบน (ประกอบด้วย R_{cl} และ X_{m1}) ไปวางที่ตำแหน่งข้างต่อของแหล่งจ่ายดังรูปที่ 2.11 (ก) ทำให้สามารถคำนวณหาค่ากระแสได้ง่ายขึ้น เนื่องจากอิมพีเดนซ์ของส่วนกระแสตื้นและอิมพีเดนซ์ของโหลดต่อคร่อนแหล่งจ่ายโดยตรงและรวมค่าความต้านทานของลวดและ

รีแอคเคนซ์เต่ลส่วนเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.11 (ข) ทำให้สามารถคำนวณคุณลักษณะสมรรถนะของหม้อแปลงได้ง่ายขึ้น

ในหม้อแปลงกระแสกระแสตู้น I_Φ มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับกระแสเพิ่กัดของหม้อแปลง (น้อยกว่า 5%) ยิ่งไปกว่านั้นวงจรสมมูล์โดยประมาณสามารถตัดส่วนกระแสตู้นออกไปได้ดังรูปที่ 2.11 (ข) และรูปที่ 2.11 (ค) ซึ่งเป็นวงจรสมมูล์โดยประมาณที่โอนเข้าไปทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ



2.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล์

(Determination of Equivalent Circuit Parameters)

แบบจำลองวงจรเสมือนรูปที่ 2.11 เป็นการพิจารณาคุณสมบัติที่แท้จริงของหม้อแปลง (actual transformer) ซึ่งใช้ในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของหม้อแปลง โดยจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ R_1 , X_{11} , R_{cl} , X_{m1} , R_2 , X_{12} และ a เพื่อใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลการออกแบบหม้อแปลงจะหาได้จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยการคำนวณจากขนาดความกว้างความยาว และหนา รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ความด้านทานของคลัว R_1 , R_2 คำนวณได้จากสภาพด้านทานของสายทองแดง ค่าความหนืดวาน้ำแม่เหล็ก L_m คำนวณได้จากจำนวนรอบของคลัวและความด้านทานแม่เหล็กของทางเดินแม่เหล็ก การคำนวณความหนืดวาน้ำร้าว L_t แต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยาก ตัววิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนั้นสามารถหาได้โดยตรงและการคำนวณทำให้ง่าย ซึ่งสามารถใช้วิธีการเพื่อทดสอบสมรรถนะของหม้อแปลงด้วยกัน 2 วิธี คือ การทดสอบขณะไฟฟ้า หรือเรียกว่าการทดสอบโดยเปิดวงจรและการทดสอบโดยล็อกวงจร เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล์

หรือเรียกว่าการทดสอบโดยเปิดวงจรและการทดสอบโดยลัดวงจร เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์

2.3.1 พิกัดหม้อแปลง (Transformer Rating)

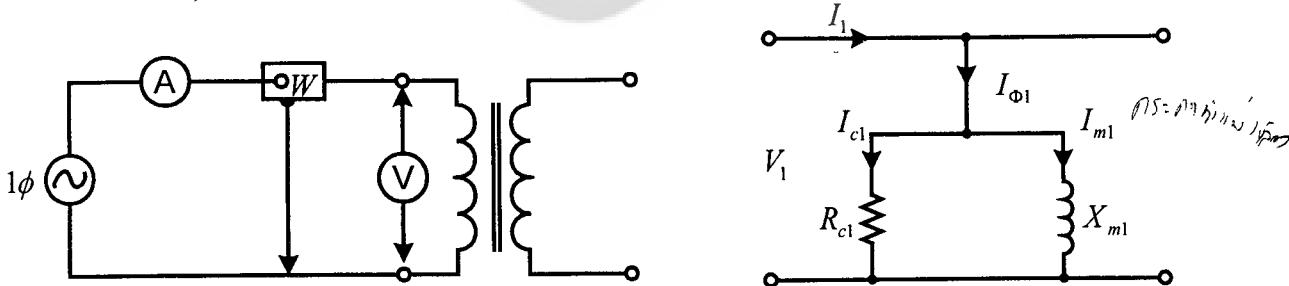
การกำหนดพิกัดของหม้อแปลงส่วนมากกำหนดในหน่วยของกิโลโวลท์แอมป์ (kVA) ซึ่งแผ่นป้าย (name plate) จะบอกให้ทราบถึงขนาดกิโลโวลท์แอมป์และพิกัดแรงดันของหม้อแปลง เช่น $20 kVA$, $1100 V/110 V$ หมายความว่าหม้อแปลงตัวนี้มีขนาด $20 kVA$ และพิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิ $1100 V$ และแรงดันด้านที่二 $110 V$ คันนี้อัตราส่วนจำนวนรอบ $a = 1100/110 = 10$ กระแสค้านปฐมภูมิและที่สองภูมิที่พิกัดมีค่าเท่ากับ $18.18 A$ และ $181.81 A$ ตามลำดับ

2.3.2 การทดสอบขณะไร้โหลดหรือการทดสอบขณะเปิดวงจร

(No-Load or open - Circuit Test)

การทดสอบแบบนี้สามารถจ่ายแรงดันเข้าทางด้านแรงสูงหรือแรงต่ำได้ขึ้นอยู่กับความสะดวกและความปลอดภัย เช่น ถ้าหม้อแปลง $1100 V/110 V$ เราสามารถจ่ายแรงดันเข้าทางด้านแรงต่ำได้ทั้งนี้เนื่องจากแรงดัน $110 V$ หาได้ง่ายกว่าแหล่งจ่ายขนาด $1100 V$

แผนภาพการต่อวงจรสำหรับการทดสอบขณะเปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 2.12 (ก) โดยเปิดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำ ดังนั้นมีการทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขขณะเปิดวงจรสามารถเรียบง่ายได้ดังรูปที่ 2.12 (ข) สำหรับกระแสค้านปฐมภูมิ I_1 คือ กระแสการตู้น $I_{\Phi 1}$ และค่าการสูญเสียหาได้จากการวัดโดยวัตต์มิเตอร์ซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกนนั่นเองสำหรับค่าพารามิเตอร์ R_c และ X_m คำนวณได้ตามค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์ และวัตต์มิเตอร์



(ก) แผนภาพการต่อขณะทดสอบเปิดวงจร

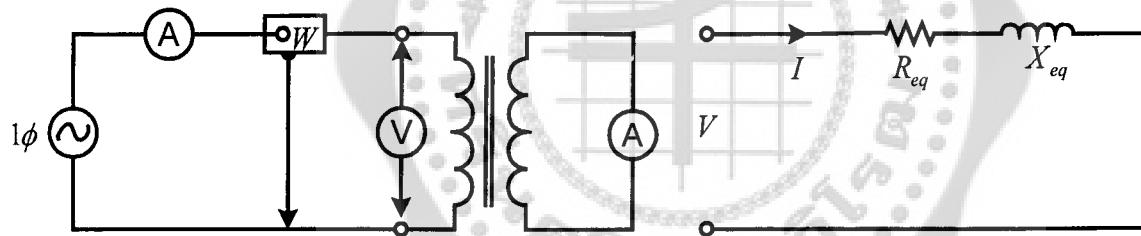
(ข) วงจรเมื่อนยกไฟต่ำเพื่อ測量ขณะทดสอบตอนเปิดวงจร

รูปที่ 2.12 ทดสอบขณะเปิดวงจร

ข้อสังเกต การสูญเสียที่เกนไม่ว่าจะจ่ายแรงดัน $110 V$ เข้าที่ขดลวดด้านแรงต่ำหรือจ่ายแรงดัน $1100 V$ เข้าทางด้านแรงสูงก็ตามจะให้ค่าเท่ากันและ การสูญเสียที่เกนนั่นขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นสื้นแรงสูงสุดในเกน ซึ่งมีค่าเท่ากันทั้ง 2 กรณีดังกล่าวโดยสามารถอธิบายได้ตามสมการ (1.40)

2.3.3 การทดสอบขณะลัดวงจร (Short-Circuit test)

การทดสอบแบบนี้ทำได้โดยการลัดวงจรคลาวด์ค้านหนึ่งและจ่ายกระแสที่พิกัดเข้าที่ขดลวดอีกค้านที่เหลือดังรูปที่ 2.13 (ก) แสดงวงการทดสอบขณะลัดวงจรของหม้อแปลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าอิมพีเดนซ์จากการทดสอบเปิดวงรั้งกับการทดสอบโดยการลัดวงจรนั้นจะเห็นได้ว่า อิมพีเดนซ์ของส่วนบนน่านที่เรียกว่า excitation branch ที่ประกอบด้วย R_c และ X_m จากการทดลองเปิดวงจรเมื่อนำมาให้กลุ่มกว่าอิมพีเดนซ์ของส่วนบนนุกรม (Series branch) ซึ่งประกอบด้วย R_{eq} และ X_{eq} จากการทดสอบแบบลัดวงจรถ้าขั้วต่อค้านทุกตัวมีลักษณะเหมือนกันทำให้อิมพีเดนซ์ของส่วนบนน่านมีค่าสูงดังนั้นสามารถตัดทิ้งได้และสำหรับวงจรเสมือนขณะทดสอบลัดวงจรค้านทุกตัวมีเสถียรภาพ ใจรูปที่ 2.13 (ข) จะเห็นว่าอิมพีเดนซ์ $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ มีค่าต่ำ วิธีการทดสอบแบบนี้สะดวกที่จะทำการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันเข้าทางค้านขดลวดแรงสูง สำหรับค่าพารามิเตอร์ R_{eq} กับ X_{eq} สามารถคำนวณได้จากค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องวัด ในส่วนของการสูญเสียที่ได้จากการทดสอบ ตามเงื่อนไขขณะลัดวงจรนั้นสามารถลดลงได้ เนื่องจากแรงดันที่ป้อนมีค่าต่ำ ดังนั้นการทดสอบแบบนี้จะให้เราทราบค่าการสูญเสียที่ขดลวด ทองแดง (Copper losses) โดยแทนด้วย R_{eq}



(ก) แผนภาพแสดงการต่อวงจรทดสอบ
ขณะลัดวงจร

(ข) วงจรสมมูลย์ภายในการทดสอบ
ขณะลัดวงจร

รูปที่ 2.13 การทดสอบขณะลัดวงจร

ทั้งอย่างที่ 2.1 หม้อแปลง 1-Φ ขนาด 10 kVA, 2200/220V 60Hz นำมาทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยมีผลการทดสอบดังนี้ คือ

ทดสอบขณะเปิดวงจร	ทดสอบขณะลัดวงจร
(เปิดวงจรค้านแรงสูง) ดังห้องค้นไป	(ลัดวงจรค้านแรงต่ำ) ห้องค้นห้อง
โวล์ตมิเตอร์	220 V
แอมป์มิเตอร์	2.5 A
วัตต์มิเตอร์	100 W
	150 V
	4.55 A
	215 W

(ก) จงคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมิอันโดยประมาณที่โอนไปด้านแรงดันต่ำและแรงดันสูงตามลำดับ

(ข) จงแสดงค่าเบอร์เซ็นต์กระแสกระแสตู้นเมื่อเทียบกับกระแสที่พิกัด

(ค) จงคำนวณตัวประกอนกำลังเมื่อทำการทดสอบขณะไร้โหลดและขณะลัดวงจร

วิธีทำ

$$1) kVA \frac{12200}{220} v$$

$$\delta = P + jQ$$

$$V_A = \omega \cdot \frac{1}{M_H}$$

$$V_{H(rated)} = 2200V$$

$$V_{L(rated)} = 220V$$

$$V_{H(rated)} = 2200V$$

$$I_{H(rated)} = \frac{10,000}{2,200} = 4.55A$$

$$V_{L(rated)} = 220V$$

$$I_{L(rated)} = \frac{10,000}{200} = 50A$$

$$S_H = V_H I_H$$

$$V_H I_H |_{rated} = V_L I_L |_{rated} = 10kVA$$

$$\therefore I_4(rated) = \frac{S_H}{V_H}$$

$$a = \frac{2200}{220} = 10$$

กำลังไฟฟ้าจากการทดสอบวงจรคือ

$$กำลังไฟ = 100W$$

$$P = I^2 R$$

$$P_{oc} = \frac{V_L^2}{R_{cl}}$$

$$P = V I$$

$$\therefore R_{cl} = \frac{(220)^2}{100} = 484\Omega$$

$$= \frac{V^2}{R}$$

$$I_{cl} = \frac{V_L}{R_{cl}} = \frac{220}{484} = 0.45A$$

$$I_L^2 = I_{cl}^2 + I_{mL}^2$$

$$I_{mL} = \sqrt{I_L^2 - I_{cl}^2} = \sqrt{(2.5)^2 - (0.45)^2} = 2.46A$$

$$X_{mL} = \frac{V_L}{I_{mL}} = \frac{220}{2.46} = 89.4\Omega$$

กรณีถ้า 1) ร้อนดัน 2) ขาดสาย

2) กรณีเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการได้ แต่ไม่สามารถต่อสายได้ กรณีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทางด้านแรงดันสูงกำหนดให้ดังนี้คือ

$$V_H I_H = V_L I_L$$

$$R_{ch} = a^2 R_{cl} = 10^2 \times 484 = 48,400\Omega$$

$$I_H^2 R_{ch} = I_L^2 R_{cl}$$

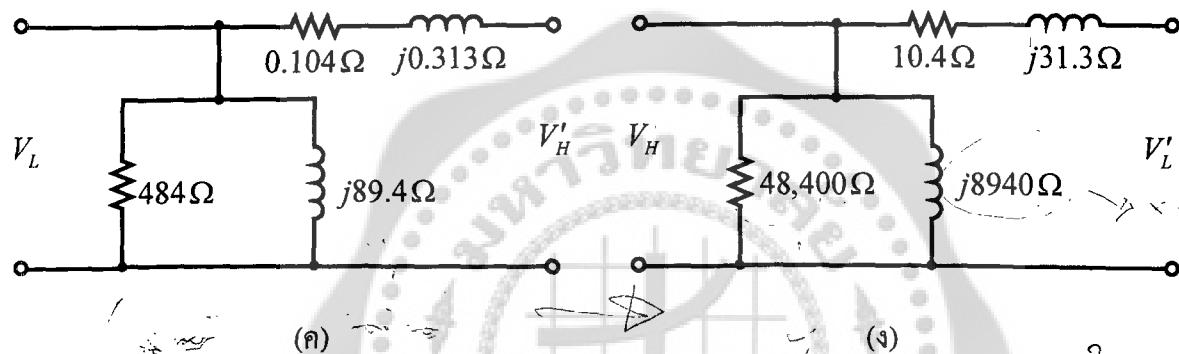
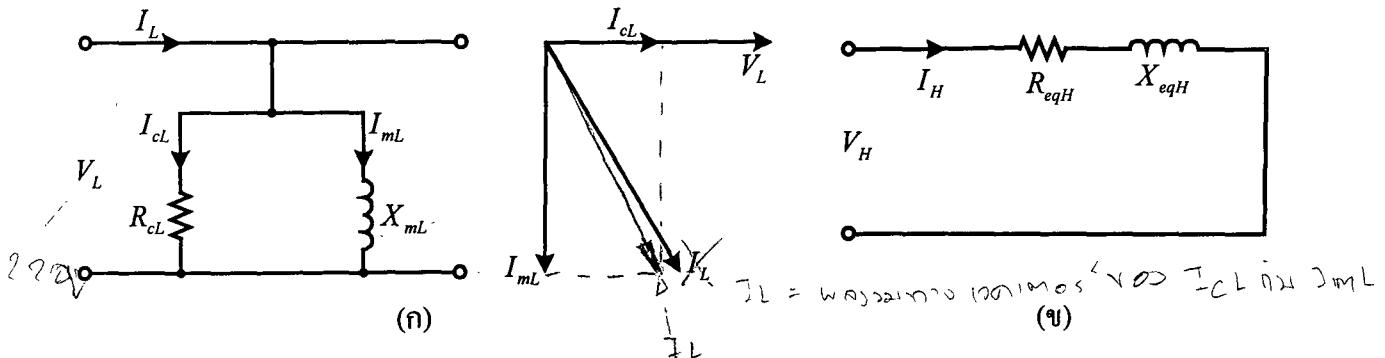
$$X_{mH} = a^2 X_{mL} = 10^2 \times 89.4 = 8,940\Omega$$

$$R_H = \frac{I_L^2}{I_H^2} R_L$$

$$V_I = V_L I_L$$

$$P = V I$$

วงจรเรโนนเนื่องจากการลัดวงจรด้านแรงดันแสดงดังรูปตัวอย่างที่ 2.1 (ง)



รูปตัวอย่างที่ 2.1

กำลังไฟจากการทดสอบลัดวงจรคือ

ไฟฟ้าในตู้ที่
150 V
4.55 A
 2.5 W

$$P_{sc} = I_H^2 R_{eqH}$$

$$\therefore R_{eqH} = \frac{P_{sc}}{I_H^2} = \frac{215}{(4.55)^2} = 10.4\Omega$$

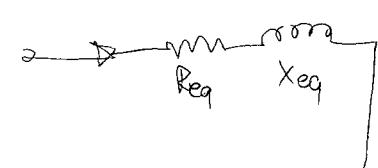
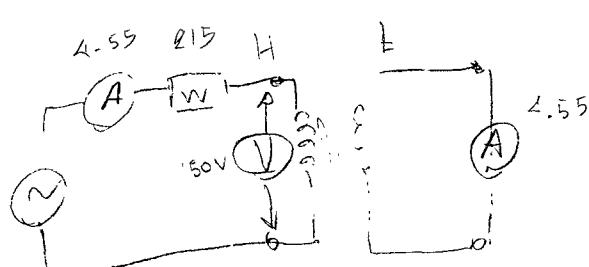
$$Z_{eqH} = \frac{V_H}{I_H} = \frac{150}{4.55} = 32.97\Omega$$

$$X_{eqH} = \sqrt{(Z_{eqH}^2 - R_{eqH}^2)}$$

$$= \sqrt{(32.97^2 - 10.4^2)} = 31.3\Omega$$

ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ด้านแรงดันด้านสำหรับได้ดังนี้คือ

$$R_{eqL} = \frac{R_{eqH}}{a^2} = \frac{10.4}{(10)^2} = 0.104\Omega$$



$$X_L = \frac{X_H}{a^2}$$

$$X_{eq} = \frac{X_{eqH}}{a^2} = \frac{31.3}{(10)^2} = 0.313\Omega$$

(ข) จากการทดสอบขณะไร้โหลดกระแสสัมภ์ตู้นจากการจ่ายแรงดันที่พิกัดเข้าทางด้านขดลวดแรงดันคำคือ

$$I_\Phi = 2.5 A$$

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์กระแสสัมภ์ตู้นมีค่าเท่ากัน

$$\frac{I_\Phi}{I_{max}} \times 100\% = \frac{2.5}{43.5} \times 100\% = 5.5\% \text{ ของพิกัดกระแสที่ขดลวด}$$

45.5

(ค) ตัวประกอบกำลังขณะไร้โหลด ($P.F_{NO-LOAD}$) = $\frac{P}{VA}$

$$= \frac{100}{220 \times 2.5} = 0.182$$

100
550

ตัวประกอบกำลังขณะลัดวงจร ($P.F_{short-circuit}$) = $\frac{215}{150 \times 4.55} = 0.315$

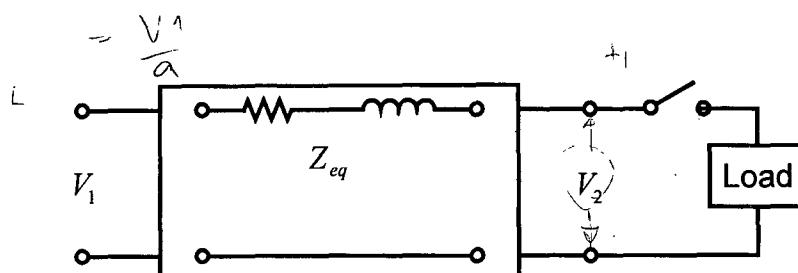
ตอบ

2.4 การเบี่ยงเบนของศักดิ์ไฟฟ้า (Voltage Regulation)

การออกแบบหม้อแปลงเมื่อต่อโหลดเข้าทางด้านหุติภูมิเราต้องการให้ค่าแรงดันคงที่ อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงจะถูกดึงกระแสไปที่โหลดดังนี้ แรงดันที่ขึ้นต่อโหลดจะเปลี่ยนไปเนื่องจากมีแรงดันตกคร่อม อิมพีเดนซ์ภายในหม้อแปลง Z_{eq} ดังรูปที่ 2.15 (ก) โดยที่ถ้าไม่ต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงจะเห็นว่าแรงดันที่ขึ้นสามารถกำหนดดังนี้คือ

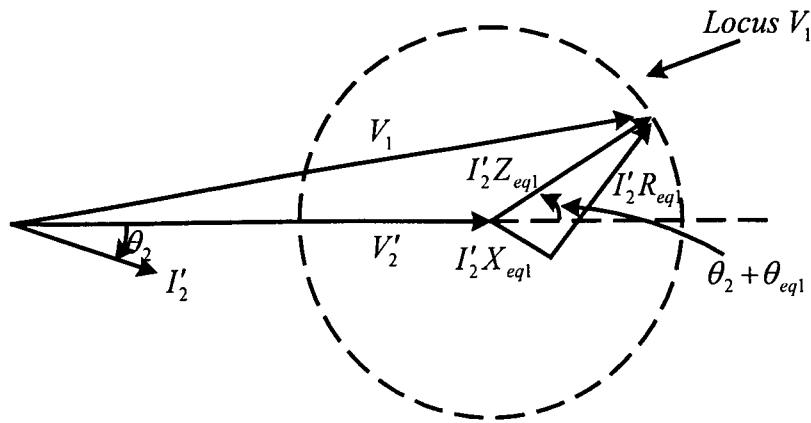
$$V_2 |_{NL} = \frac{V_1 |_{NL}}{\alpha} \quad (2.14)$$

$$V_2 = V_1 \frac{|_{NL}}{\alpha}$$



(ก)

$$f \times V_1 = 10 \text{ } \text{v}, \text{ ดังนั้น } V_2 |_{NL} = \frac{V_1}{\alpha} = \frac{10}{10} = 1 \text{ } \text{v}.$$



(x) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

รูปที่ 2.14 การเบี่ยงเบนของศักดิ์ไฟฟ้า

ถ้าปิดสวิตช์โหลดจะถูกต่อเข้ากับหม้อแปลงด้านทุคิญมิดังนั้นแรงดันที่ข้าวโหลดกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$V_2|_L = V_2|_{NL} \pm \Delta V_2 \quad (2.15)$$

แรงดันที่ข้าวโหลดสูงขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโหลด การเปลี่ยนแปลงของแรงดันดังกล่าว กำหนดโดยแรงดันต่อกรอมอินพีเดนซ์ภายนอกในหม้อแปลง ZI การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เกิดขึ้นดังกล่าว นั้น เรียกว่า การเบี่ยงเบนของศักดิ์ไฟฟ้า (Voltage regulation) การแสดงคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า แรงดันเนื่องจากการต่อโหลด (loading) กำหนดได้ดังสมการ (2.16)

$$\text{Voltage regulation} = \frac{|V_2|_{NL} - |V_2|_L}{|V_2|_L} \quad (2.16)$$

แรงดันในสมการ (2.16) สามารถคำนวณได้จากการสมมูลย์ที่ข้างไปทางด้านปฐมภูมิหรือทุคิญมิและเมื่อ พิจารณาจากสมมูลย์ที่ข้างไปทางด้านปฐมภูมิตามรูปที่ 2.11 (x) ดังนั้นสมการ (2.16) เขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\text{Voltage regulation} = \frac{|V_2|_{NL} - |V_2|_L}{|V_2|_L} \quad (2.17)$$

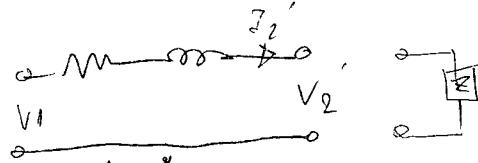
แรงดันโหลดตามปกติจะไม่เกินพิกัดแรงดัน ดังนี้

$$|V_2|_L = |V_2|_{rated} \quad (2.18)$$

และจากรูปที่ 2.11(x)

$$V_1 = |V_2| + I_2' R_{eq1} + j I_2' X_{eq1} \quad (2.19)$$

$$V_2' + I_2' (R_{eq1} + j X_{eq1})$$



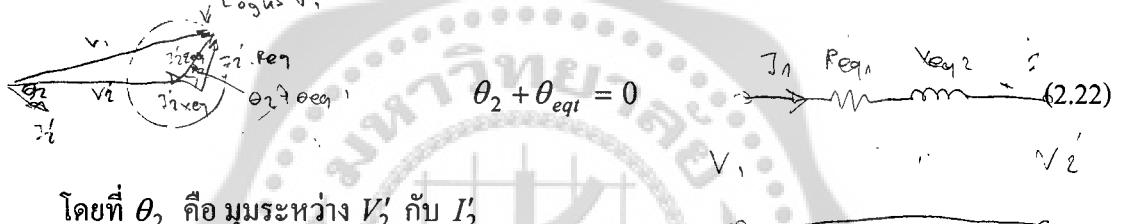
ถ้าโหลดถูกปลดออก แรงดัน V_1 จะมีค่าเท่ากับ V'_2 ดังนี้

$$|V'_2|_{NL} = |V_1| \quad (2.20)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.17), (2.18), และ (2.20) การคำนวณค่า % Voltage regulation หาได้ดังนี้คือ

$$\% \text{ Voltage regulation} = \frac{|V_1| - |V'_2|_{\text{rated}}}{|V'_2|_{\text{rated}}} \times 100\% \quad (2.21)$$

การเบี่ยงเบนของศักดาไฟฟ้านี้ ขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบกำลังของโหลดดังแสดงในแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 2.14(ข) ที่พิจารณาบนพื้นฐานตามสมการ (2.19) และรูปที่ 2.11(ข) แสดงโหลดคงที่ของ V_1 ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ $|I'_2 Z_{eq}|$ และขนาดของ V_1 มีค่าสูงสุดเมื่อเฟสเซอร์ $I'_2 Z_{eq}$ มีเฟสเดียวกับ V'_2 ดังนี้



โดยที่ θ_2 คือ มุมระหว่าง V'_2 กับ I'_2

θ_{eqt} คือ มุมของ Z_{eqt}

$$V_1 = |V'_2| + I'_2 \times \theta_{eqt} + I'_2 R_{eqt}$$

ข้อสังเกต ถ้าพิจารณาสมการ (2.22) จะเห็นว่าการเบี่ยงเบนของศักดาไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ $\theta_2 = -\theta_{eqt}$

ตัวอย่างที่ 2.3 จากข้อมูลหน้าแปลงไฟฟ้าดังตัวอย่างที่ 2.2 จงคำนวณเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนศักดาไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่อไปนี้ $10 \text{ kVA}, 220 \text{ V}, 60 \text{ Hz}$

(ก) 75% ของโหลดเต็มพิกัด และตัวประกอบกำลัง 0.6 ล้าหลัง

(ข) 75% ของโหลดเต็มพิกัด และตัวประกอบกำลัง 0.6 นำหน้า

(ค) คาดแผนภาพเฟสเซอร์ตามเงื่อนไขในข้อ (ก) และ (ข)

วิธีทำ พิจารณาจากสมมุติที่ ข่ายไปทางด้านแรงดันสูงดังรูปด้านขวา ตัวอย่างที่ 2.3 ถ้าสมมุติให้แรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าตามพิกัดดังนี้เงื่อนไข 75% ของโหลดเต็มพิกัดนั้นคือ กระแส I_H จะมีค่าเป็น $0.75 \times I_{rate}$

ดังนั้น $V = 220 \text{ V}$

Open circuit $I = 2.5 \text{ A}$

$$I_H = I'_L = 0.75 \times 4.55 = 3.41 \text{ A}$$

(จาก High Volt) $R \approx 100 \text{ m}\Omega$

$$PF = \cos \theta_2 = 0.6$$

$$\therefore \theta_2 = \pm 53.13^\circ$$

(ก) สำหรับตัวประกอบล้าหลัง $\theta_2 = -53.13^\circ$

$$\text{Short test}$$

$$V = 150 \text{ V}$$

$$I = 4.55 \text{ A}$$

$$\Rightarrow P = 215 \text{ W}$$

$$\text{close Low Volt}$$



$$I_H = 3.14 \angle -53.13^\circ A$$

$$V_H = V'_L + I'_L Z_{eqH} \rightarrow (R_{eq} + jX_{eq})$$

$$= 2200 \angle 0^\circ + 3.14 \angle -53.13^\circ (10.4 + j31.3)$$

$$= (2200 + j0) + (106.66 + j35.67)$$

$$= 2306.94 \angle 0.88^\circ$$

$$\% \text{Voltage regulation} = \frac{|2306.94 - 2200|}{2200} \times 100\%$$

$$= 4.86\%$$

$$\% \text{Voltage regulation} = \frac{2297.26 - 2200}{2200} \times 100\%$$

$$= 4.42\%$$

ค่าเบี่ยงเบนศักดาไฟฟ้า 4.86% หมายถึง ถ้าโหลดถูกปลดออกแรงดันที่ขึ้นจะเพิ่มขึ้นจาก 220 ถึง 230.69 V ขณะเดียวกันตามเงื่อนไข 75% ของโหลดเต็มพิกัดที่ $PF = 0.6$ ล้าหลังหมายความว่าถ้าโหลดต่อเข้าขึ้นของหม้อแปลงจะทำให้แรงดันลดลงจาก 230.69 V ถึง 220 V

(v) สำหรับตัวประกอบกำลังนำหน้า $\theta_2 = +53.13$

$$V_H = 2200 \angle 0^\circ + 3.14 \angle 53.13^\circ (10.4 + j31.3)$$

$$= (2200 + j0) + (-64.10 + j92.40)$$

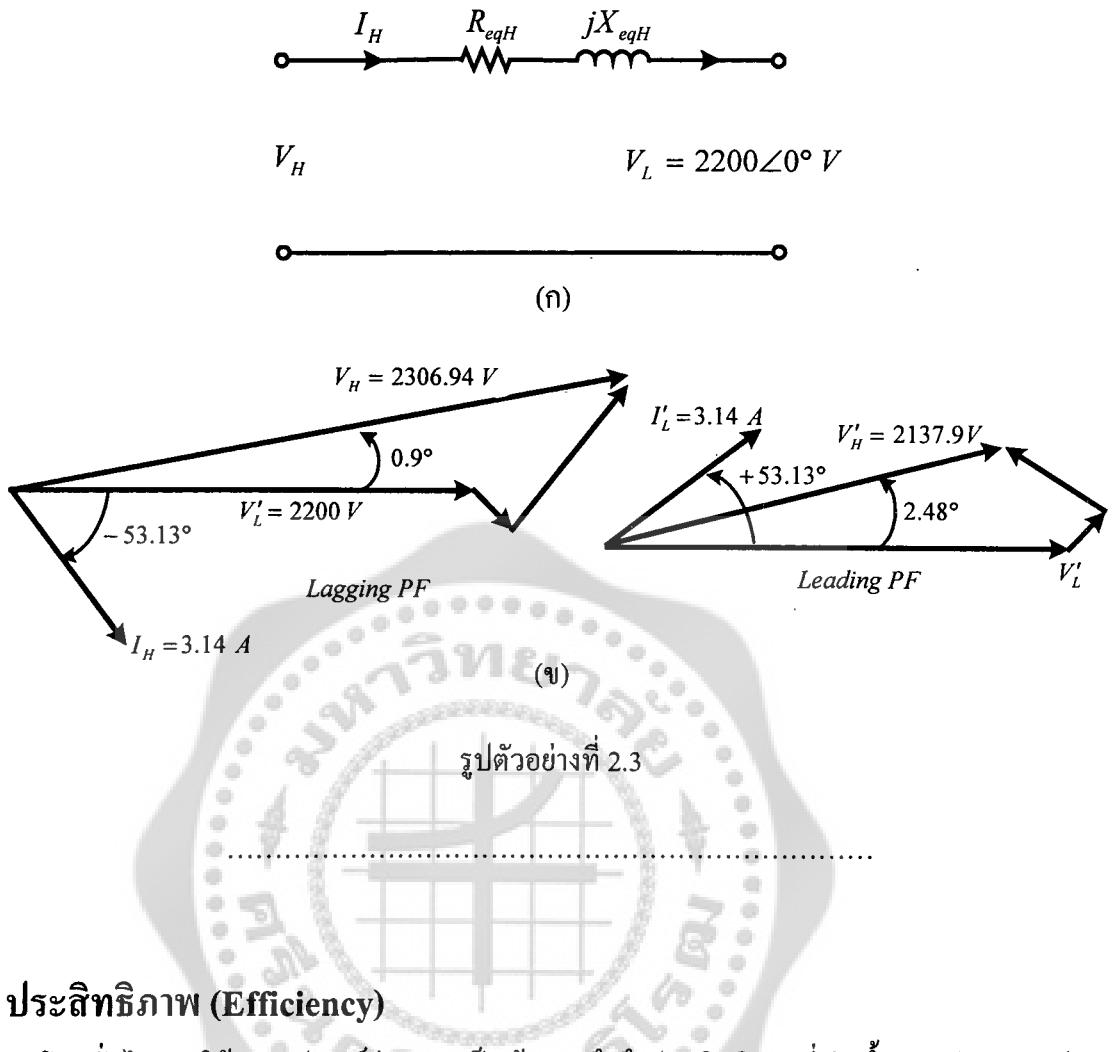
$$= 2137.89 \angle 2.48^\circ V$$

$$\% \text{Voltage regulation} = \frac{|2137.89 - 2200|}{2200} \times 100\%$$

$$= -2.82\%$$

ค่าการเบี่ยงเบนศักดาไฟฟ้าสำหรับกรณีตัวประกอบกำลังนำหน้ามีค่าเป็นลบนั้นหมายความว่าถ้าโหลดถูกปลดออกแรงดันที่ขึ้นจะลดลงจาก 220 V ถึง 213.79 V และในทางตรงข้ามกันถ้าต่อโหลดเข้าไปแรงดันที่ขึ้นจะเพิ่มขึ้นจาก 213.79 V ถึง 220 V

(c) แผนภาพเฟสเซอร์สำหรับทั้งสองกรณีแสดงไว้ดังรูปต่อไปย่างที่ 2.3(ข)



2.5 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

โดยทั่วไปการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น เช่นเดียวกัน หน้าแปลงไฟฟ้านี้ก็มีการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการใช้งานซึ่งตามปกติแล้วนั้น ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพเกิดขึ้น มีค่าสูงจะต้องออกแบบให้การสูญเสียมีค่าต่ำ สำหรับสมการที่พิจารณาประสิทธิภาพกำหนดดังนี้ คือ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.24)$$

$$= \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{losses}} \quad (2.25)$$

สำหรับการสูญเสียของหน้าแปลงประกอบด้วย การสูญเสียที่แกน (core loss : P_c) และการสูญเสียนៃองจากทองแดง (copper loss : P_{cu}) ดังนั้น สมการ (2.25) เจ็บนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + P_{cu}} \quad (2.26)$$

และการสูญเสียเนื่องจากทองแดงคำนวณได้ตามสมการ (2.27)

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.27)$$

หรือ

$$P_{cu} = I_1^2 R_{eq1} = I_2^2 R_{eq2} \quad (2.28)$$

การสูญเสียเนื่องจากทองแดงนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเด็นแรงสูงสุด ในแกนที่เป็นผลมาจากการแรงดัน ซึ่งจ่ายให้กับหม้อแปลงดังนั้นการต่อหม้อแปลงเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่นั้นการสูญเสียที่แกนทั้งหมดจะคงที่ด้วยและสามารถหาค่าการสูญเสียดังกล่าวได้จากการทดสอบหม้อแปลงขณะไฟโหลด ซึ่งจะทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์และสามารถนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ (2.28)

ดังนั้น

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq2}} \quad (2.29)$$

โดยที่

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos \theta_2$$

ตามปกติแรงดันไฟโหลดจะคงที่ดังนั้นประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับกระแสไฟโหลด I_2 และตัวประกอบกำลังที่โหลด $\cos \theta_2$

2.5.1 ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Efficiency)

ถ้าพิจารณาแรงดัน V_2 ซึ่งมีค่าคงที่กับมุม θ_2 ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 \quad (2.30)$$

โดยกำหนด P_c ตามสมการ (2.31)

$$P_c = I_2^2 R_{eq2} \quad (2.31)$$

และถ้าการสูญเสียที่แกน = การสูญเสียเนื่องจากทองแดง ตามเงื่อนไขขณะไฟโหลดเต็มพิกัดดังนี้

$$P_{cu,FL} = I_{2,FL}^2 R_{eq2} \quad (2.32)$$

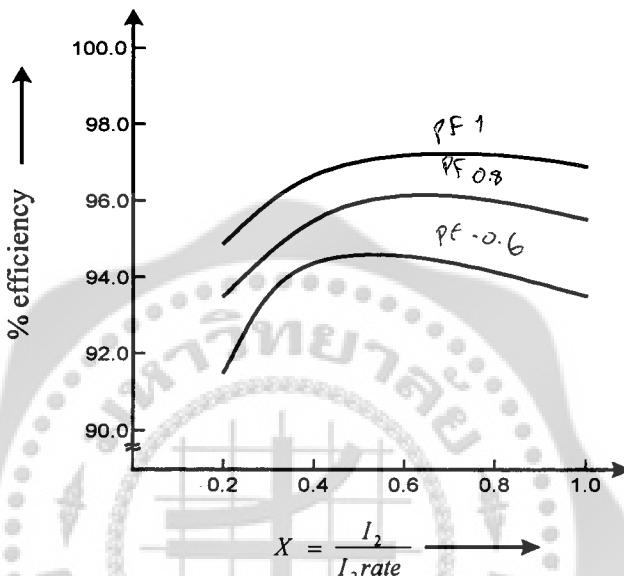
ถ้ากำหนดให้ $X = \frac{I_2}{I_{2,FL}}$

ดังนั้นจากสมการ (2.31) และ (2.32) การสูญเสียที่เกนคือ

$$P_c = X^2 P_{cu,FL} \quad (2.33)$$

สำหรับกรณีที่พิจารณาแรงดัน V_2 ซึ่งมีค่าคงที่กับกระแสโหลด I_2

$$\frac{d\eta}{d\theta_2} = 0 \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลง

ถ้าเงื่อนไขที่ใช้กับสมการ (2.28) เป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด นั่นคือ

$$\theta_2 = 0 \quad (2.33)$$

$$\cos\theta_2 = 1 \quad (2.33a)$$

$$PF = 1 \quad (2.33b)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) สำหรับหม้อแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อ $PF = 1$ (นั่นคือ โหลดเป็นชนิดความต้านทาน) และ $P_{cu} = P_c$ โดยที่ประสิทธิภาพจะเปลี่ยนแปลงตามกระแสโหลด I_2 และ PF ของโหลดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15

2.5.2 ประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน (All - Day Efficiency : η_{AD})

การหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ใช้งานตลอดทั้งวัน จะพิจารณาจากหม้อแปลงซึ่งถูกต่อเข้ากับระบบกำลังตลดลงเวลาสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้บริโภค โดยเรียกหม้อแปลงลักษณะนี้ว่าหม้อแปลงจำหน่าย (distribution transformer) ดังนั้น ประสิทธิภาพของการทำงานตลอดทั้งวันกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned}
 \eta_{AD} &= \frac{\text{พลังงานด้านเข้าต่อ 24 ชั่วโมง}}{\text{พลังงานด้านออกต่อ 24 ชั่วโมง}} \\
 &= \frac{\text{พลังงานด้านเข้าต่อ 24 ชั่วโมง}}{\text{พลังงานด้านออกต่อ 24 ชั่วโมง} + \text{การสูญเสียต่อ 24 ชั่วโมง}} \quad (2.34)
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.4 เมื่อพิจารณาหม้อแปลงดังตัวอย่างที่ 2.2 งดคำนวนหาค่า

- (ก) ประสิทธิภาพที่ 75% ของพิกัดด้านทางออก ($PF = 0.6$)
- (ข) กำลังด้านทางออกที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและค่าประสิทธิภาพสูงสุด
- (ค) ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นที่กี่เบอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด

วิธีทำ (ก)

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= V_2 I_2 \cos \theta_2 \\
 &= 0.75 \times 10,000 \times 0.6 = 4500 \text{ W}
 \end{aligned}$$

จากตัวอย่างที่ 2.2

$$\begin{aligned}
 P_c &= 100 \text{ W} \\
 P_{cu} &= I_H^2 R_{eqH} \\
 &= (0.75 \times 4.55)^2 \times 10.4 = 211 \text{ W} \\
 \eta &= \frac{4500}{4500+100+121} \times 100\% \\
 &= 95.32\%
 \end{aligned}$$

(ข) η_{max} จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$P_{core} = P_{cu} \quad \text{และ} \quad PF = \cos \theta = 1$$

นั่นคือ

$$P_{core} = 100 \text{ W} = I_2^2 R_{eq2} = P_{cu}$$

$$I_2 = \left(\frac{100}{0.104} \right)^{\frac{1}{2}} = 31 \text{ A}$$

$$P_{out}|_{\eta_{max}} = V_2 I_2 \cos \theta_2$$

$$= 220 \times 31 \times 1$$

$$= 6820 \text{ W}$$

$$\eta_{\max} = \frac{6820}{6820+100+100} \times 100\% \\ = 97.15\%$$

(ก) kVA (ด้านทางออก) = 6.82

kVA (ที่พิกัด) = 10

ดังนั้น η_{\max} เกิดขึ้นที่ 6.82% ของโหลดเต็มพิกัด
68.2%

ตอบ

ตัวอย่างที่ 2.5 หม้อแปลงขนาด $50 kVA$ $2400/240 V$ มีการสูญเสียที่แกน $P_c = 200 W$ ที่พิกัดแรงดัน และการสูญเสียนี้ออกจากห้องแดง $P_{cu} = 500 W$ ที่โหลดเต็มพิกัด ซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

% โหลด	0.0 %	50 %	75 %	100 %	110 %
ตัวประกอบกำลัง		1		0.8 lag	0.9 lag
จำนวนชั่วโมง	6	6	6	3	3

งคำนวณประสิทธิภาพของหม้อแปลงจากการทำงานตลอดทั้งวัน

วิธีทำ

$$\text{พลังงานด้านทางออกตลอด 24 ชั่วโมง} = 630 kWh$$

$$\text{พลังงานสูญเสียตลอด 24 ชั่วโมง} = (0.5 \times 50 \times 6) + (0.75 \times 50 \times 0.8 \times 6)$$

$$+ (1 \times 50 \times 0.9 \times 3) + (1.1 \times 50 \times 1 \times 3 kWh)$$

$$= 630 kWh$$

$$\text{การสูญเสียที่แกน} (P_c) = 0.2 \times 24 = 4.8 kWh$$

$$\begin{aligned} \text{การสูญเสียเนื่องจากทองแดง} (P_{cu}) &= (0.5^2 \times 0.5 \times 6) + (0.75^2 \times 0.5 \times 6) \\ &\quad + (1^2 \times 0.5 \times 3) + (1.1^2 \times 0.5 \times 3) \\ &= 5.76 \text{ kWh} \end{aligned}$$

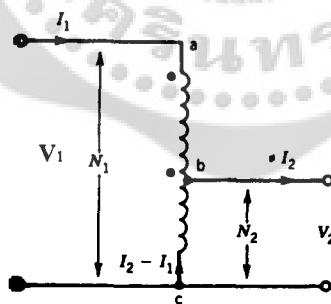
$$\text{พลังงานสูญเสียทั้งหมด} = 4.8 + 5.76 = 10.56 \text{ kWh}$$

$$\therefore \eta_{AD} = \frac{630}{630+10.56} \times 100\% \\ = 98.35\%$$

ตอบ

2.6 หม้อแปลงแบบอโต้ (Auto Transformer)

หม้อแปลงแบบอโต้นี้มีการต่อขดลวดแบบพิเศษ ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าลับทางด้านทุกด้านได้ ลักษณะการต่อขดลวดแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 การต่อขดลวดแบบนี้เรียกว่า common winding โดยที่ขดลวด N_1 และ N_2 มีจำนวนรอบที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามหม้อแปลงแบบอโต้นี้ยังสามารถป้อนไฟฟ้าเข้าทางด้าน V_2 ได้เช่นกันซึ่งอยู่กับความต้องการใช้งานและหลักการพื้นฐานของการทำงานก็เหมือนกับหม้อแปลงโดยทั่วๆ ไปที่มีขดลวด 2 ชุด



รูปที่ 2.16 หม้อแปลงแบบอโต้

สำหรับความสัมพันธ์ของอัตราส่วนจำนวนรอบกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.36)$$

ถ้าขดลวดทางด้านทุกด้านมีการเทปปอกไปโดยสามารถปรับเลื่อนได้ การเปลี่ยนแปลงแรงดันทางด้านออกจะอยู่ในช่วง $0 < V_2 < V_1$

สำหรับขดลวดครึ่งบนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอัตราส่วนจำนวนรอบ กำหนดได้โดย

$$F_U = (N_1 - N_2)I_1 = \left(1 - \frac{1}{a}\right)N_1 I_1 \quad (2.37)$$

และในส่วนของความต่างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแก้กับอัตราส่วนจำนวนรอบ กำหนดได้โดย

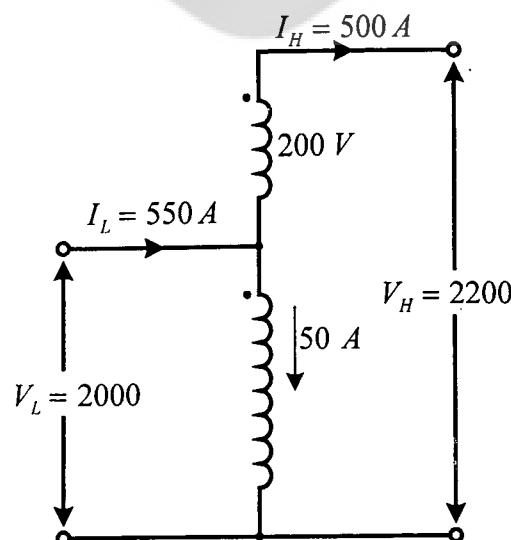
$$F_L = N_2(I_2 - I_1) = \frac{N_1}{a}(I_2 - I_1) \quad (2.38)$$

จากสมการ (2.36) และ (2.37) หากความสัมพันธ์ของกระแสแก้กับอัตราส่วนจำนวนรอบ ได้ตามสมการ (2.38)

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{1}{a}\right)N_1 I &= \frac{N_1}{a}(I_2 - I_1) \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{1}{a} \end{aligned} \quad (2.39)$$

จากสมการ (2.36) และ (2.37) เห็นว่าได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสสัมพันธ์กัน โดยอัตราส่วนจำนวนรอบ เช่นเดียวกับหม้อแปลงแบบขดลวด 2 ชุด สำหรับข้อดีของหม้อแปลงแบบอโต้ คือ ค่ารีแอคเคนซ์ร้าว การสูญเสียที่เกิดขึ้นและกระแสแก่จะต่ำมาก การเพิ่มน้ำหนักพิกัด kVA (ดังตัวอย่าง 2.6) และแรงดันทางด้านออกทำได้โดยการปรับเปลี่ยนทางด้านทุติยภูมิ

ตัวอย่างที่ 2.6 หม้อแปลงแบบขดลวด 2 ชุด ขนาด 1-เฟส $100 kVA$ $2000/200 V$ ถูกนำมาต่อให้เป็นหม้อแปลงแบบอโต้ดังรูปดังตัวอย่างที่ 2.6 ซึ่งมีแรงดันด้านทุติยภูมิมากกว่า $2000 V$ สัดส่วนของขดลวด ab ที่แรงดัน $200 V$ และสัดส่วนของขดลวด bc ที่แรงดัน $2000 V$ จึงคำนวณพิกัด kVA ของหม้อแปลงแบบอโต้



รูปตัวอย่างที่ 2.6

วิธีคำนวณค่ากระแสของขั้ว A คือ

$$I_{ab} = \frac{100,000}{200} A = 500 A$$

$$I_{bc} = \frac{100,000}{2000} A = 50 A$$

ดังนั้นสำหรับการทำงานที่โหลดเต็มพิกัดของหม้อแปลงแบบออโต้โดยที่กระแสที่ขั้ว C คือ

$$I_H = 500 A$$

$$I_L = 500 + 50 = 550 A$$

ขณะที่ $V_L = 2000 V$ ดังนั้น

$$V_H = 2000 + 200 = 2200 \text{ } \checkmark$$

และ

$$kWA|_L = \frac{2000 \times 550}{1000} = 1100 \quad \frac{V_L I}{1000}$$

$$kWA|_H = \frac{2200 \times 500}{1000} = 1100 \quad \frac{V_H \times 500}{1000}$$

ตอบ

ข้อสังเกต หม้อแปลงเฟสเดียวขนาด 100 kVA มีขั้ว 2 ชุด ที่แยกจากกันเมื่อนำมาต่อเป็นหม้อแปลงแบบออโต้สามารถแบ่งพิกัด kVA ทั้งสองด้าน ได้เท่ากันและมีค่าสูงกว่าพิกัด kVA จากการต่อแบบเก่า

2.7 หม้อแปลง 3 - เฟส (Three-Phase Transformers)

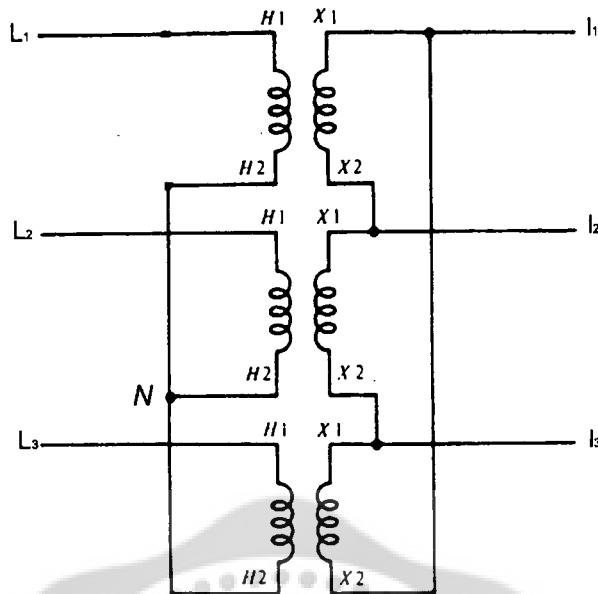
การสร้างหม้อแปลง 3-เฟส สามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ การนำหม้อแปลง 1-เฟส 3 ตัวมาต่อขนานกันเป็นหม้อแปลง 3-เฟส (Bank of Three Single-Phase Transformers) หรือการสร้างหม้อแปลง 3-เฟส ที่มีโครงสร้างทางแม่เหล็กเดียวกัน เรียกว่า Three - Phase Unit Transformers ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการนำหม้อแปลง 1-เฟส มาบานานเป็นหม้อแปลง 3-เฟส เท่านั้น

การขยายหม้อแปลง 1-เฟส 3 ตัว เป็นหม้อแปลง 3 - เฟส

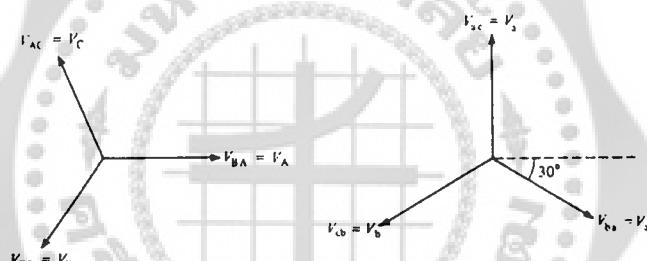
(Bank of Three Single-Phase Transformers)

การขยายหม้อแปลง 1-เฟส 3 ตัว เป็นหม้อแปลง 3 - เฟส นั้นสามารถกระทำได้โดยการต่อขั้ว 2 ชุด ทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นแบบ Y หรือ Δ ซึ่งแบ่งได้ 4 กลุ่มดังนี้ คือ Y - Δ , Δ - Y , Δ - Δ และ Y - Y สำหรับการต่อทั้ง 4 แบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 – 2.21

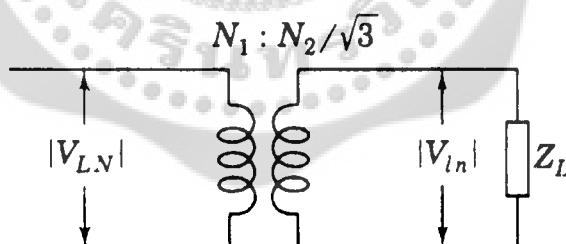
1. การต่อแบบ Y – Δ ตามปกติใช้หนึ่งมอเตอร์ step down โดยจุด neutral อยู่ทางด้านแรงดันสูง



(ก) การต่อหม้อแปลง



(ข) เพศเซอร์ที่โดย大概รุ่นของแรงดันและกระแส



(ค) วงจรสมมูลย์หม้อแปลงเพศเดียว

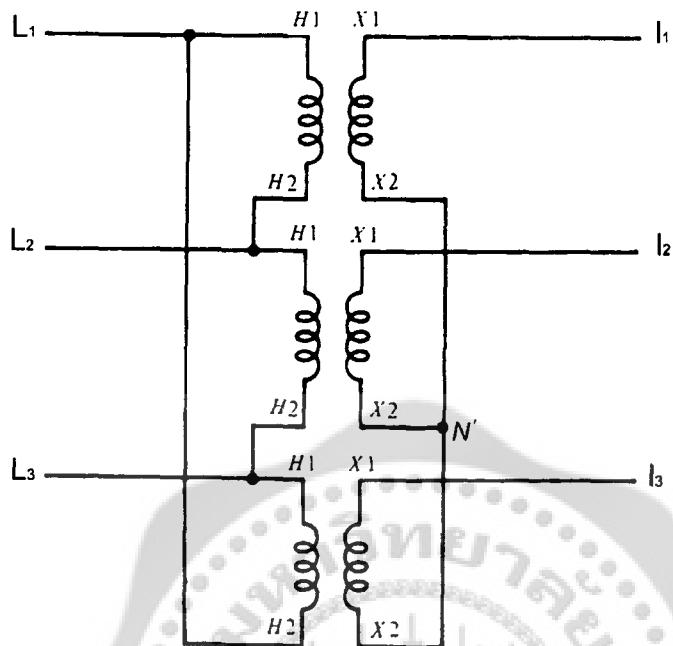
รูปที่ 2.17 การต่อแบบ Y – Δ

สำหรับการแสดงความสัมพันธ์จากการต่อแบบ Y – Δ เวียนได้ดังนี้ คือ

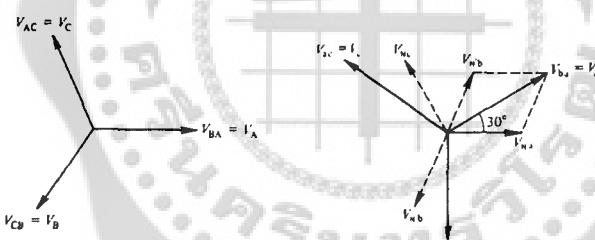
$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2}; \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.40)$$

$$Z_N = \left(\frac{N_1}{N_2 / \sqrt{3}} \right)^2 Z_L = \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right|^2 = Z_L \quad (2.41)$$

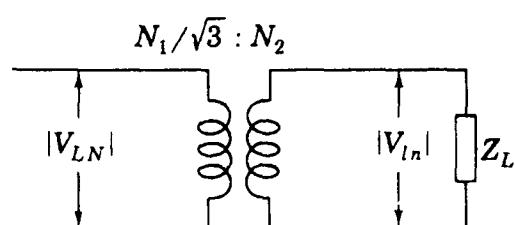
2. การต่อแบบ $\Delta - Y$ การต่อในลักษณะนี้ส่วนใหญ่ให้เป็นหม้อแปลง step up โดยขาด neutral อยู่ทางด้านแรงดันต่ำ



(ก) การต่อหม้อแปลง $\Delta - Y$



(ข) เพสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันและกระแส



(ค) วงจรสมมูล์หม้อแปลงเพสเดียว

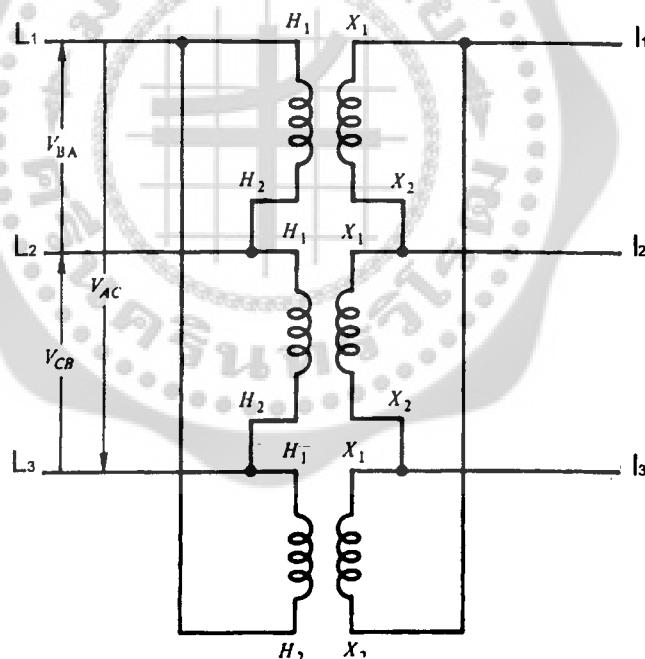
รูปที่ 2.18 การต่อแบบ $\Delta - Y$

สำหรับการแสดงความสัมพันธ์จากการต่อแบบ $\Delta - Y$ เวียนได้ดังนี้ คือ

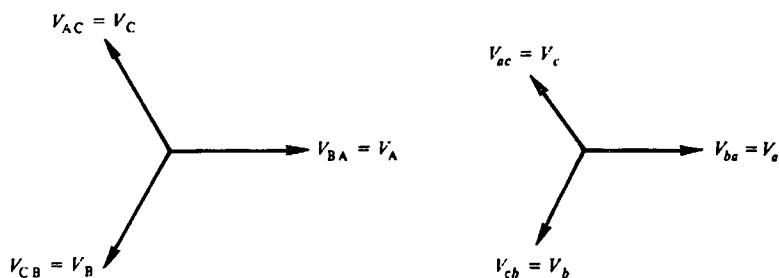
$$\left| \frac{V_{LL}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2}; \left| \frac{V_{LL}}{V_H} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.42)$$

$$Z_N = \left(\frac{N_1 / \sqrt{3}}{N_2} \right)^2 Z_L = \left| \frac{V_{LL}}{V_H} \right|^2 = Z_L \quad (2.43)$$

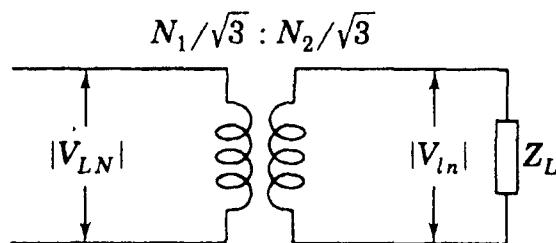
3. การต่อแบบ $\Delta - \Delta$ การต่อแบบนี้ข้อดี คือกรณีที่หม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งเกิดความเสียหาย หม้อแปลงที่เหลืออีกสองตัวยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า ให้แก่ระบบได้แต่พิกลดความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า จนลดลงเหลือ 58 เปอร์เซ็นต์ จากพิกัดเดิม ซึ่งลักษณะนี้ เรียกว่าการต่อแบบ open delta หรือการต่อแบบ V เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.19 แสดงได้ดังนี้คือ



(ก) การต่อหม้อแปลง $\Delta - \Delta$



(ข) เพศเชอร์ไคอะแกรนของแรงดันกระแสแสง



(ก) วงจรสามเฟสที่มีอัปพลิเคชันเพลิงฟีสเดียว

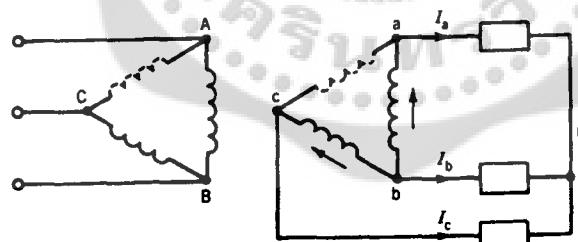
รูปที่ 2.19 การต่อแบบ $\Delta - \Delta$

สำหรับการทดสอบความถ้วนพันธ์จากการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ เนื่องจากได้ดังนี้ คือ

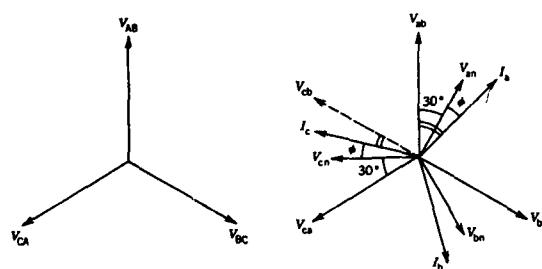
$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1/\sqrt{3}}{N_2/\sqrt{3}}; \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.42)$$

$$Z_H = \left(\frac{N_1/\sqrt{3}}{N_2/\sqrt{3}} \right)^2 Z_L = \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right|^2 = Z_L \quad (2.43)$$

จากที่กล่าวมาในตอนต้นนี้ การต่อแบบ $\Delta - \Delta$ นั้น ถ้าหากเพสหนึ่งเกิดความเสียหายหมายความเปลี่ยนไปนี้ คือที่เหลืออีกสองตัวยังทำงานที่จ่ายกำลังให้แก่ระบบได้ ดังรูปที่ 2.20 โดยเนื่องเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ คือ



(ก)



(ก)

รูปที่ 2.20 การต่อแบบ V

$$P_{ab} = V_{ab} I_a \cos(30 + \Phi) \quad (2.46)$$

$$P_{bc} = V_{bc} I_c \cos(30 - \Phi) \quad (2.47)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\begin{aligned} |V_{ab}| &= |V_{bc}| = V && \text{คือ พิกัดแรงดันของหม้อแปลงด้านทุกทิศทวน} \\ |I_a| &= |I_c| = I && \text{คือ พิกัดกระแสของหม้อแปลงด้านทุกทิศทวน} \end{aligned}$$

สำหรับกรณีโหลดความต้านทานมนุษย์ $\Phi = 0$ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดจากการต่อแบบ V (P_v) คือ คำนวณได้ตามสมการ (2.48)

$$\begin{aligned} P_v &= P_{ab} + P_{bc} \\ &= V_{ab} I_a \cos 30^\circ + V_{cb} I_c \cos 30^\circ \\ &= 2VI \cos 30^\circ \end{aligned} \quad (2.48)$$

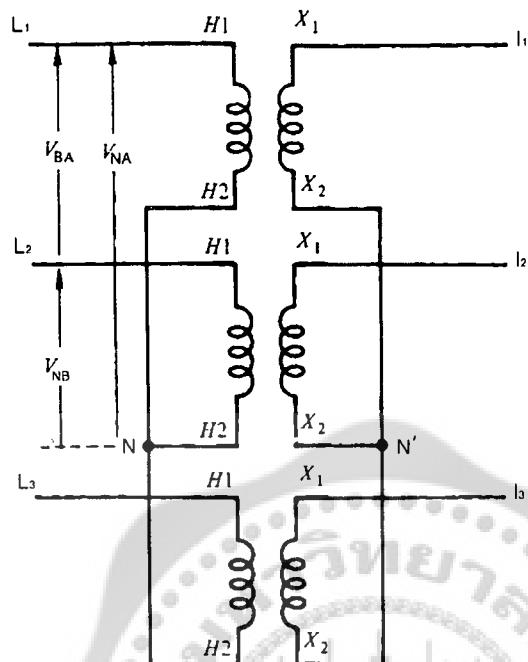
และกำลังไฟฟ้าจากการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ กำหนดได้ตามสมการ (2.49)

$$P_\Delta = 3VI \quad (2.49)$$

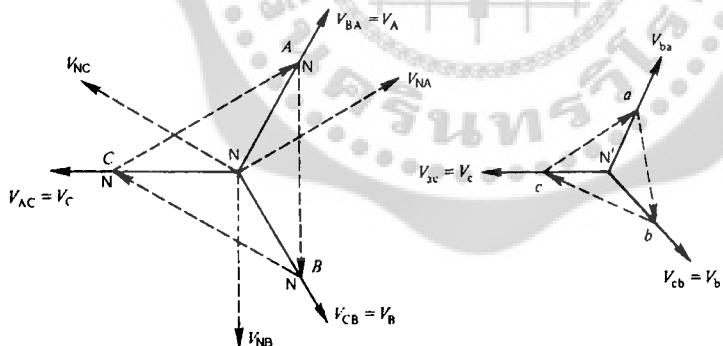
ดังนั้นในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ open delta กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดคำนวณได้ดังนี้ คือ

$$\frac{P_v}{P_\Delta} = \frac{2 \cos 30^\circ}{3} = 0.58 \quad (2.50)$$

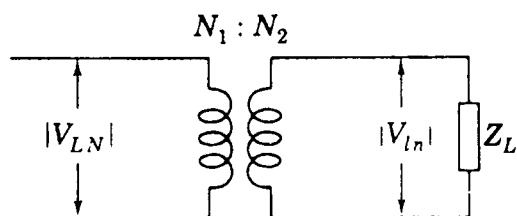
4. การต่อแบบ Y - Y ไม่นิยมกันมากนัก เนื่องจากอาจเกิดปัญหากระแสสกัดซึ่งแรงดันเห็นได้ชัดเจน



(ก) การต่อหม้อแปลง Y - Y



(ข) เพศเซอร์วิสของแกรมของแรงดันและกระแสสกัด



(ค) วงจรสมมูลย์หม้อแปลงเพสเดียว

รูปที่ 2.21 การต่อแบบ Y-Y

สำหรับการแสดงความสัมพันธ์จากการต่อแบบ Y - Y เจี๊ยนได้ดังนี้ คือ

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2}; \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.51)$$

$$Z_H = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_L = \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right|^2 = Z_L \quad (2.52)$$



แบบฝึกหัดบทที่ 2

1. จงอธิบายหลักการและทฤษฎีของหม้อแปลงทางอุตสาหกรรมและหม้อแปลงที่ใช้งานในทางปฏิบัติโดยสังเขป
2. จงอธิบายวิธีการขนาดหม้อแปลง 1 – เฟส เป็นหม้อแปลง 3 – เฟส แต่ละแบบพร้อมทั้งเขียนรูปแสดงการขนาดด้วย
3. หม้อแปลง 1 – เฟส ประกอบด้วยชุดคลัวด์ 2 ชุด มีชุดคลัวด้านปฐมภูมิ 1000 รอบ และชุดคลัวด้านที่二ภูมิ 500 รอบ ถ้าต่อแหล่งจ่าย 220 V เข้ากับชุดคลัวด้านปฐมภูมิ ส่วนชุดคลัวด้านที่二ภูมิต่อ กับ โหลดขนาด 5 kVA (กำหนดให้การพิจารณาหม้อแปลงเป็นทางอุตสาหกรรม)
 - (ก) จงคำนวณแรงดันที่โหลด
 - (ข) จงคำนวณอิมพิเดนซ์โหลด
 - (ค) จงคำนวณอิมพิเดนซ์โหลดที่จ่ายถ่ายโอนไปทางด้านปฐมภูมิ
4. หม้อแปลง 1 - เฟส ขนาด 10 kVA , 220/110 V , 60 Hz ต่ออยู่กับแหล่งจ่าย 220 V ที่พิกัดกระแสตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า (กำหนดให้การพิจารณาหม้อแปลงเป็นทางอุตสาหกรรม)
 - (ก) จงคำนวณพิกัด kVA ของโหลด
 - (ข) จงคำนวณอิมพิเดนซ์ของโหลด
5. หม้อแปลง 1 - เฟส ขนาด 25 kVA , 220/440 V , 60 Hz กำหนดผลการทดสอบหม้อแปลงดังนี้

ทดสอบขณะเปิดวงจร (ด้าน 440 V) : 220 V, 9.5 A, 650 W

ทดสอบขณะลัดวงจร (ด้าน 220 V) : 37.5 V, 55 A, 950 W

 - (ก) จงเขียนวงจรสมมูลย์แบบประมาณในระบบต่อหน่วย
 - (ข) จงคำนวณค่าเบี่ยงเบนของศักดิ์ค่าไฟฟ้าที่พิกัดโหลด โดยประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า
 - (ค) จงหาดเฟสเซอร์ไซด์แกรนตามเงื่อนไขในข้อ (ข)
6. หม้อแปลง 1 - เฟส ขนาด 100 kVA , 2300/460 V , 60 Hz 3 ตัว ต่อขนาดกัน (transformer bank) เป็นหม้อแปลง 3-เฟส 2300/460 V โดยที่อิมพิเดนซ์ของหม้อแปลงแต่ละตัวเมื่อย้ายไปทางด้านแรงดันต่ำมีค่า $0.045 + j0.16$ หม้อแปลงต้องกล่าวว่าถูกต่อเข้ากันแหล่งจ่าย 3-เฟส โดยผ่านสายป้อน (feeders) 3-เฟส ซึ่งอิมพิเดนซ์ของสายป้อนแต่ละเส้นเท่ากับ $0.5 + j1.5$ ถ้าหม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัด 460 V และตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง จงหา
 - ก) จงหาดโครงสร้างการต่อหม้อแปลง
 - ข) จงคำนวณแรงดันที่ปลายสายของแหล่งจ่าย 1-เฟส
 - ค) จงคำนวณแรงดันที่ปลายสายของแหล่งจ่าย 3-เฟส
 - ง) จงคำนวณกระแสที่ผ่านชุดคลัวด้านในหม้อแปลง

7. หม้อแปลง 1 - เฟส ขนาด 200 kVA , 2100/210 V , 60 Hz มีคุณลักษณะดังนี้ อิมพีเดนซ์ทางค้านแรงสูง $0.25 + j1.5$ เมื่อลักษณะทางค้านแรงดันต่ำ ค่าแออดมิตтанซ์ (admittance) ของขดลวดด้านต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ 0.025 - j0.075 จงหา
- ถ้ากำหนดค่าฐานที่พิกัด งค่านวนหาค่า $V_{base}, I_{base}, VA_{base}$ และ Z_{base} ทั้งทางค้านแรงสูง และ ค้านแรงต่ำ
 - งค่านวนค่า R และ X ของหม้อแปลงในระบบต่อหน่วย
 - ค่านวน I_m ที่พิกัดแรงดันในระบบต่อหน่วย
 - ค่านวนกำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงภายใต้เงื่อนไขของโหลดเต็มพิกัดด้านทางออกในระบบ ต่อหน่วย
8. หม้อแปลง 1 - เฟส ขนาด 250 kVA , 11 kV/2.0 kV มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ

$$R_{HV} = 1.3 \quad X_{HV} = 4.5$$

$$R_{LV} = 0.05 \quad X_{LV} = 0.16$$

$$R_{C(LV)} = 1.3 \quad X_{H(LV)} = 4.5$$

- งค่านวนวงจรสมมูลโดยประมาณ (กำหนดให้ในส่วนการทำแม่เหล็ก (magnetizing branch) R_c และ X_m ต่ออยู่ที่ขั้วทางค้านแหล่งจ่าย) ที่ข้ายไปทางค้านแรงสูงและแสดงค่าพารามิเตอร์ลงในวงจรด้วย
 - งค่านวนกระแสขณะไฟฟ้าโหลดทางค้านแรงสูงในระบบต่อหน่วย
 - ถ้าขั้วทางค้านแรงต่ำถูกกลัดวงจร จงหา
 - แรงดันของแหล่งจ่ายเพื่อทำให้กระแสที่พิกัดไฟฟ้าผ่านบนจะลดลง
 - การสูญเสียในหม้อแปลง
 - ขดลวดทางค้านแรงสูงของหม้อแปลงถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่าย 11 kV และโหลด $Z_L = 15 < -90^\circ$ ต่อ อยู่กับขดลวดด้านแรงต่ำ จงหา
 - แรงดันที่โหลด
 - % Voltage regulation
9. หม้อแปลง 1-เฟส ขนาด 10 kVA , 7500/250 V, 60 Hz มีค่า $Z_{eq} = 0.015 + j0.06 \text{ pu}$, $R_c = 60 \text{ pu}$ และ $X_m = 20 \text{ pu}$ จงหา
- งค่านวนวงจรสมมูลที่ข้ายไปทางค้านแรงต่ำในหน่วยโอม
 - ถ้าขดลวดด้านแรงสูงถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่าย 7500 V และโหลด $5 < 90^\circ$ ต่ออยู่ทางค้านแรงต่ำ งค่านวนแรงดันและกระแสที่โหลด พร้อมทั้งค่านวน % VR ด้วย
10. หม้อแปลง 1-เฟส ขนาด 3 kVA , 240/120 V , 60 Hz ทำการต่อขดลวดใหม่เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟ กับโหลด 330 V จากแหล่งจ่าย 110 V

- ก) จงแสดงการต่อขดลวดหนึ่งแบบดังกล่าว
- ข) จงคำนวณค่า kVA สูงสุดสำหรับการต่อขดลวดใหม่เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังให้แก่荷ลดได้



การแปลงสภาพพลังงานกลไฟฟ้า

(Electromechanical Energy Conversion)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือในทางกลับกันเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ามีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกໄไปขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน สำหรับบทนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานได้แก่ มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนตัวกลางที่ใช้แปลงสภาพพลังงานคือ สนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการเกิดแรงในระบบการแปลงสภาพพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 ขบวนการแปลงสภาพพลังงาน (Energy Conversion Process)

วิธีการคำนวณการเกิดแรง (force) หรือแรงบิด (torque) สำหรับอุปกรณ์แปลงสภาพพลังงานมีหลายวิธีด้วยกัน ในที่นี้ใช้พื้นฐานของหลักการคงค่าพลังงาน (conservation of energy) สำหรับองค์ประกอบของระบบการแปลงสภาพพลังงานกลไฟฟ้ามีด้วยกัน 3 ส่วน คือ

1. ระบบไฟฟ้า
2. ระบบทางกล
3. สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าและระบบทางกลดังรูปที่ 3.1 และสมการการถ่ายโอนพลังงานกำหนดตามสมการ (3.1)

$$W_e = W_m + W_f + W_{loss} \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้

W_e = พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า

W_m = พลังงานทางกลด้านออก

W_f = พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก

W_{loss} = พลังงานสูญเสีย

การสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าเป็นการสูญเสียทางความร้อนกำหนดโดยกระแสที่ไหลผ่านชุดวงจรที่มีค่าเท่ากับ $i^2 R$ และการสูญเสียของสนามเป็นการสูญเสียที่เก็นกำหนดจากสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก ส่วนการสูญเสียทางกลคือ การสูญเสียนี้ของจากแรงเสียดทานและลมต้านกำหนดได้จากการคำนวณ

การเคลื่อนที่ ซึ่งการสูญเสียดังกล่าวมาทั้งหมดจะเปลี่ยนไปในรูปความร้อน ดังนั้นสมการ (3.1) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$W_e - \text{Electric loss} = W_m + \text{Mechanical loss} + W_f + \text{Core loss} \quad (3.2)$$

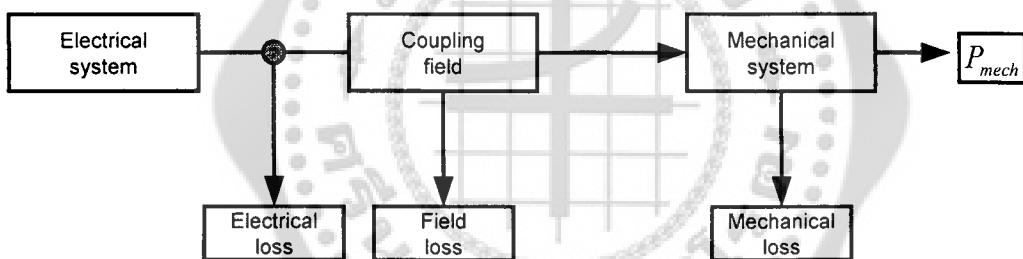
จากสมการ (3.2) เขียนในเทอมคณิตศาสตร์ โดยอนุพันธ์สมการดังกล่าวเทียบกับเวลา dt ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้ากำหนดได้ดังนี้

$$dW_e = dW_m + dW_f \quad (3.3)$$

เมื่อกำหนดให้ dW_e คือ พลังงานไฟฟ้า

dW_m คือ พลังงานกลที่ได้จากการเปลี่ยนรูปพลังงาน

dW_f คือ พลังงานที่จ่ายให้กับสนาม (field)



รูปที่ 3.1 ระบบการเปลี่ยนพลังงาน

สำหรับการสูญเสียที่เก็นเหล็ก (Core losses) ตามปกติมีค่าต่ำสามารถลดทิ้งได้ดังนี้ dW_f แสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามสะสม เช่นเดียวกันถ้าไม่คิดผลของแรงเสียดทานและแรงลมด้าน dW_m แทนค่าพลังงานกลที่จ่ายออกทั้งหมด

3.2 พลังงานสนาม (Field Energy)

เมื่อพิจารณาระบบแม่เหล็กรูปที่ 3.2 ส่วนเคลื่อนที่ (movable part) สามารถทำให้อยู่ในสภาพแวดล้อมโดยใช้สปริงเป็นตัวยึด ถ้าสมมุติให้ส่วนเคลื่อนที่อยู่นิ่งและเพิ่มกระระยะห่าง i จะมีผลให้เกิดเต้นแรงเห็นได้ชัดเจนในระบบแม่เหล็ก ดังนี้.

$$dW_m = 0 \quad (3.4)$$

นั้นคือจากสมการ (3.3) และ (3.4) จะได้

$$dW_e = dW_f \quad (3.5)$$

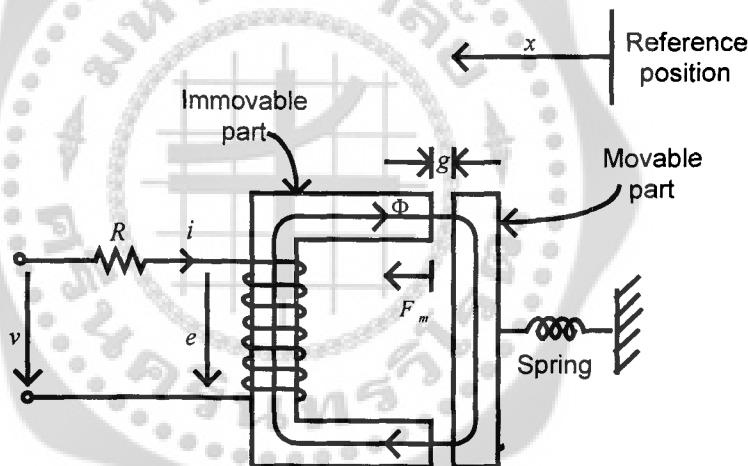
ถ้าการสูญเสียที่เกนไม่คิด ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นการเพิ่มพลังงานสนาม สะสมนั้นเอง สำหรับแรงดันเหนี่ยวนำกำหนดได้ตามสมการ(3.6)

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.6)$$

$$dW_e = eidt \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.5) , (3.6) และ (3.7)

$$dW_f = id\lambda \quad (3.8)$$



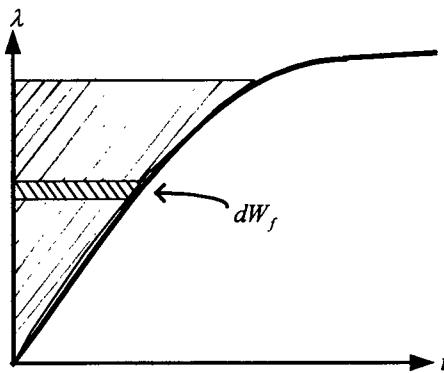
รูปที่ 3.2 ระบบทางกล - ไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงเรื่อง โ豫ที่ขัดลาด และกระแส i ที่ความยาวช่องอากาศดังรูปที่ 3.3 นั้น การเพิ่มขึ้นของพลังงานสนาม dW_f แสดงในส่วนพื้นที่แรงงานที่เส้นแรงเรื่อง โ豫เพิ่มขึ้นจากศูนย์ ถึง λ โดยที่พลังงานสะสมในสนาม คือ

$$W_f = \int_0^\lambda id\lambda \quad (3.9)$$

$$e^{-\frac{d\lambda}{dt}} \quad e^{i\omega t + j\frac{d\lambda}{dt}}$$

75



$$\lambda = N\int \cdot NAB$$

รูปที่ 3.3 คุณลักษณะ $\lambda - i$ สำหรับระบบทางกล - ไฟฟ้า

เมื่อกำหนดให้

H_c = ความเข้มแม่เหล็กในแกนแม่เหล็ก

H_g = ความหนาแน่นในอากาศ

I_c = ความยาวแกนแม่เหล็ก

I_g = ความยาวช่องอากาศ

ดังนั้น

$$Ni = H_c I_c + H_g I_g \quad (3.10)$$

$$\lambda = N\Phi = NAB \quad (3.11)$$

โดยที่

A คือ พื้นที่หน้าตัดของทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก

B คือ ความหนาแน่นเส้นแรง (สมมุติว่าเท่ากันโดยตลอด)

จากสมการ (3.9), (3.10) และ (3.11)

$$W_f = \int \left(\frac{H_c I_c + H_g I_g}{N} \right) N A d\lambda \quad (3.12)$$

$$\text{และที่ซ่องอากาศความเข้ม } H_g = \frac{B}{\mu_o} \quad (3.13)$$

นั้นคือจากสมการ (3.12) และ (3.13) พลังงานสะสม W_f ยังคำนวณได้ตามสมการ (3.14)

$$W_f = \int (H_c I_c + \frac{B}{\mu_o} I_g) A d\lambda$$

$$= \int (H_c dBA I_c + \frac{B}{\mu_o} dB I_g A)$$

$$\begin{aligned}
 W_f &= [\int H_C dB \times \text{ปริมาตรของวัสดุแม่เหล็ก}] + [\frac{B^2}{2\mu_0} \times \text{ปริมาตรของช่องอากาศ}] \\
 &= [w_{fc} \times V_c] + [w_{fg} \times V_g] \\
 &= W_{fc} + W_{fg}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

โดยที่ $w_{fc} = \int H_C dB_C$ คือ ความหนาแน่นพลังงานในวัสดุแม่เหล็ก

$$w_{fg} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad \text{คือ ความหนาแน่นพลังงานในช่องอากาศ}$$

V_c คือ ปริมาตรของวัสดุแม่เหล็ก

V_g คือ ปริมาตรของช่องอากาศ

W_{fc} คือ พลังงานในวัสดุแม่เหล็ก

W_{fg} คือ พลังงานในช่องอากาศ

ตามปกติพลังงานสะสมในช่องอากาศ (W_{fg}) มีค่ามากกว่าพลังงานสะสมในวัสดุแม่เหล็ก (W_{fc}) และกรณี W_{fc} มีค่าสูงสามารถตัดทิ้งได้ สำหรับระบบแม่เหล็กแบบเชิงเส้น กำหนด H_c ดังนี้ คือ

$$H_c = \frac{B_c}{\mu_c} \tag{3.15}$$

ดังนั้น

$$W_{fc} = \int \frac{B_c}{\mu_c} dB_C = \frac{B_c^2}{2\mu_c} \tag{3.16}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 ระบบกระตุ้นรูปที่ 3.2 มีขนาดความกว้าง ยาวและสูง ดังรูปตัวอย่าง 3.1 โดยที่แกนแม่เหล็กทำจาก cast steel สำหรับคุณลักษณะเส้นโลหะ $B - H$ ดังรูปที่ 1.7 พันดดาวมี 200 รอบและความด้านทานขดลวด 5 โอล์ฟ ที่ความยาวช่องอากาศ $g = 5 \text{ mm}$ คงที่ เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้ากับขดลวดทำให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรง 1.0 T ในช่องอากาศ

- (ก) จงหาค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง
- (ข) จงหาพลังงานสะสมในสถานะ

วิธีทำ (ก) จากรูปที่ 1.7 ความเข้มสนามแม่เหล็กในแกน (cast steel) ที่ความหนาแน่นเส้นแรง 1.0 T

$$H_c = 670 \text{ At/m}$$

ความยาวของทางเดินเส้นแรงในแกนคำนวณได้ดังนี้ กือ

$$l_c \cong 2(10+5) + 2(10+5) \text{ cm}$$

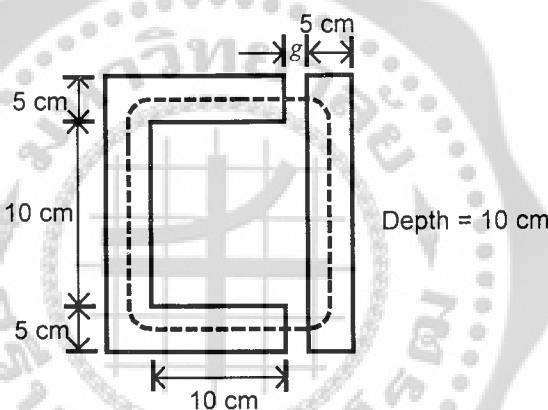
$$= 60 \text{ cm}$$

ความเข้มแม่เหล็กในช่องอากาศ กือ

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.0}{4\pi \times 10^{-7}} At/m$$

$B = 670 \text{ A/m}$

$$= 795.8 \times 10^3 \text{ At/m}$$



รูปตัวอย่างที่ 3.1

ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก กือ

$$Ni = (670 \times 0.6) + (795.8 \times 10^3) \times 2(5 \times 10^{-3}) At$$

$$= 402 + 7958$$

$$\therefore i = \frac{8360}{250} At$$

$$= 33.44 \text{ A}$$

แรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงกือ

$$V_{dc} = 33.44 \times 5 = 167.2 \text{ V}$$

(ข) ความหนาแน่นพลังงานในแกนกือ

$$w_{fc} = \int_0^{1.0} H dB$$

ความหนาแน่นของพลังงานนี้กำหนดโดยพื้นที่ส่วนปีระห่วงแกน B และคุณลักษณะ $B - H$ สำหรับ cast steel ในรูปที่ 1.7 พื้นที่นี้คือ

$$w_{fc} \cong \frac{1}{2} \times 1 \times 670 \\ = 335 \text{ J/m}^3$$

ปริมาตรของเหล็ก คือ

$$V_c = 2(0.05 \times 0.10 \times 0.20) + 2(0.05 \times 0.10 \times 0.10) = 0.003 \text{ m}^3$$

พลังงานสะสมในแกนคือ

$$W_{fc} = 335 \times 0.003 \text{ J} = 1.005 \text{ J}$$

ความหนาแน่นของพลังงานในช่องอากาศคือ

$$w_{fg} = \frac{1.0^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} \text{ J/m}^3 = 397.9 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

ปริมาตรของช่องอากาศ คือ

$$V_g = 2(0.05 \times 0.10 \times 0.005) \text{ m}^3 = 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

พลังงานสะสมในช่องอากาศ คือ

$$W_{fg} = 397.9 \times 10^3 \times 0.05 \times 10^{-3} = 19.895 \text{ J}$$

ผลรวมของพลังงานสนาน คือ

$$W_f = 1.005 + 19.895 \text{ J} = 20.9 \text{ J}$$

ตอบ

3.2.1 พลังงานและพลังงานเกี่ยบเคียง (Energy and Coenergy)

คุณลักษณะ $\lambda - i$ ของระบบแม่เหล็กไฟฟ้า รูปที่ 3.2 ขึ้นอยู่กับความยาวช่องอากาศและคุณลักษณะ $B - H$ ของวัสดุแม่เหล็กซึ่งคุณลักษณะ $\lambda - i$ แสดงรูปที่ 3.4 (ก) สำหรับกรณีช่องอากาศมีความยาวมากจะได้คุณลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่ถ้าความยาวช่องอากาศลดลงจะได้คุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น

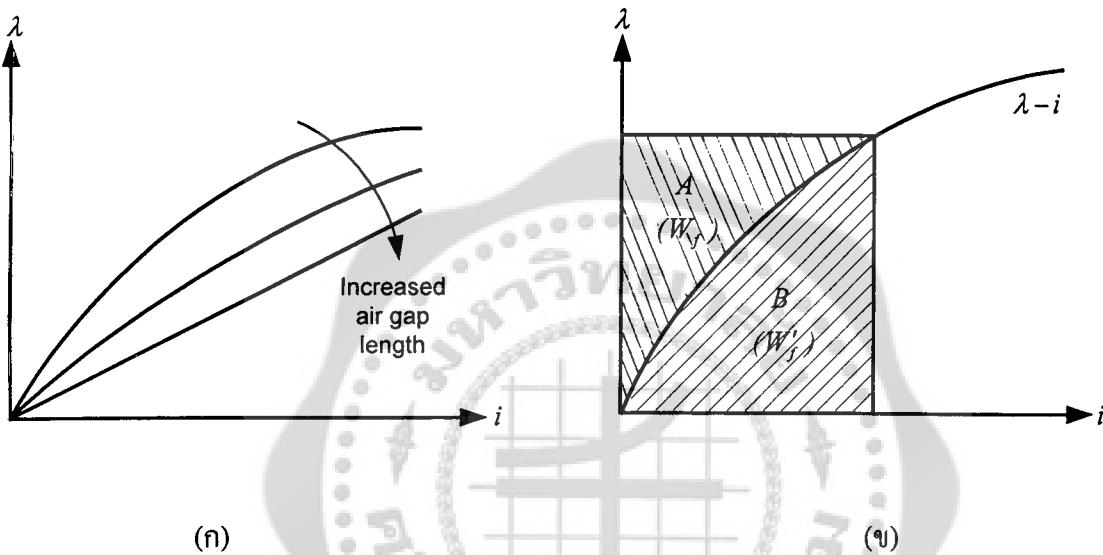
เมื่อพิจารณา_rupที่ 3.4 (ข) จะเห็นได้ว่าสามารถคำนวณหาค่าพลังงานและพลังงานเกี่ยบเคียงโดยอาศัยความสัมพันธ์ของพื้นที่ระหว่างแนวแกน λ กับเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะ $\lambda - i$ สำหรับการหาค่าพลังงาน และความสัมพันธ์ของพื้นที่ระหว่างแนวแกน i กับเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะ $\lambda - i$ สำหรับการหาค่าพลังงานเกี่ยบเคียง โดยที่พลังงานเกี่ยบเคียงกำหนดได้ตามสมการ (3.17)

$$W_f' = \int_0^i \lambda \, di \quad (3.17)$$

และจากรูปที่ 3.4 (ข) จะได้ว่า

$$W_f + W_f' = \lambda i \quad (3.18)$$

ข้อสังเกต นั้นคือ $W_f' > W_f$ ถ้าคุณลักษณะเส้นโค้ง $\lambda - i$ ไม่เป็นเชิงเส้น แต่ถ้า $W_f' = W_f$ จะมีคุณลักษณะเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.4 (ก) คุณลักษณะ $\lambda - i$ สำหรับความยาวของอากาศที่ต่างกัน
(ข) กราฟความสัมพันธ์ของพลังงานและพลังงานเทียบเคียง

3.3 แรงทางกลในระบบแม่เหล็กไฟฟ้า

(Mechanical Force in the Electromagnetic System)

เมื่อพิจารณาระบบดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้ส่วนเคลื่อนที่เดื่อนตามแน่นจากจุด X_1 ไปยังตำแหน่ง X_2 จะทำให้ความยาวของอากาศลดลง ซึ่งคุณลักษณะเส้นโค้ง $\lambda - i$ ของระบบที่ตำแหน่งทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยที่กระแส i มีค่าเท่ากันที่จุดทำงานทั้งสอง (a เมื่อ $X = X_1$ และ b เมื่อ $X = X_2$ ในสภาวะคงตัว ถ้าส่วนเคลื่อนที่มีการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ กระแสยังมีค่าคงที่ระหว่างการเคลื่อนที่ จุดทำงานจะสูงขึ้นไปจากจุด a ถึง b ดังรูปที่ 3.5 (ก) ดังนั้นระหว่างการเคลื่อนที่กำหนดเป็นสมการได้คือ

$$dW_e = \int e i dt = \int_{X_1}^{X_2} id\lambda = \text{พื้นที่ abcd} \quad (3.19)$$

$$dW_f = \text{พื้นที่ Obc - Oad} \quad (3.20)$$

$$dW_m = dW_e - dW_f$$

$$= \text{พื้นที่ } abcd + \text{พื้นที่ } Oad - \text{พื้นที่ } Obc \quad (3.21)$$

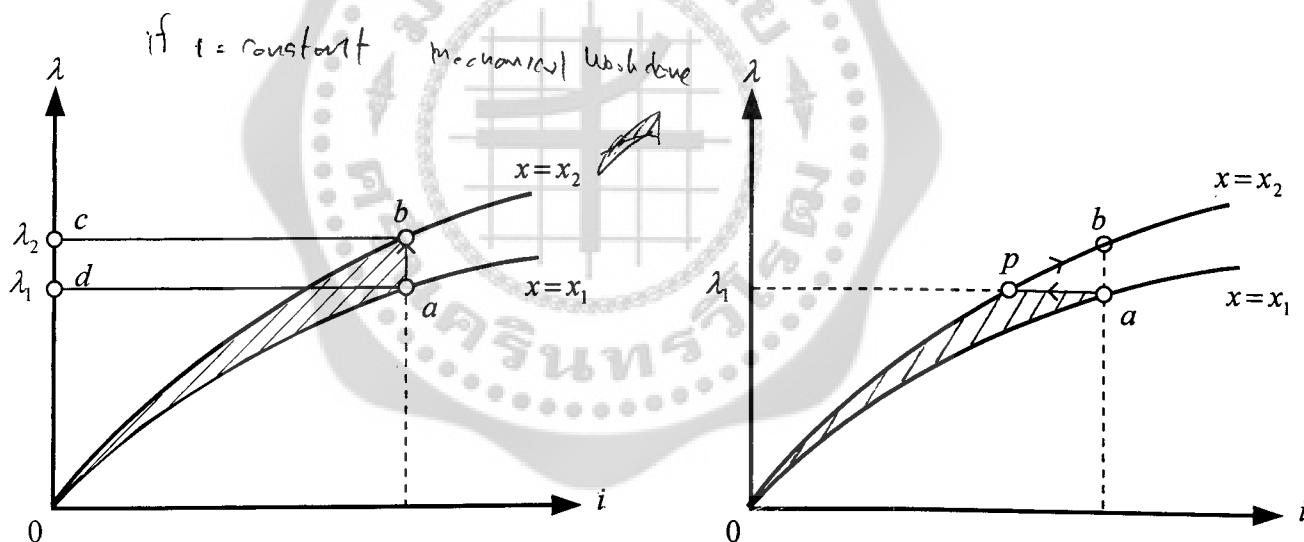
ถ้าการเคลื่อนที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขกระแสคงที่งานทางกลกำหนดได้จากพื้นที่ระหว่างจุด a และ b ดังรูปที่ 3.5 (ก) ซึ่งโดยแท้จริงแล้วนั้นพลังงานเทียบเคียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นดังนี้

$$dW_m = dW'_f$$

เมื่อกำหนดให้ f_m คือ แรงทางกลเนื่องจากการอนุพันธ์ระบบขัด dx ดังนี้

$$\begin{aligned} dW_e &= \boxed{\text{III}} \\ dW_f &= \boxed{\text{VII}} \\ dW_m &= \boxed{\text{VI}} \end{aligned} \quad f_m dx = dW_m = dW'_f \quad (3.22)$$

$$f_m = \frac{\partial W'_f(i,x)}{\partial x} \Big|_{i=\text{constant}}$$



(ก) เมื่อกระแสคงที่

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งของจุดทำงานสำหรับการเคลื่อนที่ในระบบรูปที่ 3.2

(ข) เมื่อเส้นแรงเชื่อมโยงคงที่

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยสมมุติว่า เส้นแรงเชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่คงที่ดังรูปที่ 3.5 (ข) ดังนั้นงานทางกลระหว่างเคลื่อนที่กำหนดได้จากพื้นที่ oap นั้นคือพลังงานสะสมมีค่าลดลง ดังนี้

$$f_m dx = dW_m = -dW_f$$

$$f_m = -\frac{\partial W_f(\lambda,x)}{\partial x} \Big|_{\lambda=\text{constant}} \quad (3.23)$$

ตัวอย่างที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda - i$ สำหรับระบบแม่เหล็กกำหนดโดย

$$i = \left(\frac{\lambda g}{0.09} \right)^2$$

ช่วงกระแสอยู่ในช่วง $0 < i < 4 A$ และความยาวช่องอากาศอยู่ในช่วง $3 < g < 10 cm$ ถ้ากระแส $i = 3 A$ และความยาวช่องอากาศ $g = 5 cm$ จงหาแรงทางกลบนส่วนเคลื่อนที่โดยใช้สมการพลังงานสนามแม่เหล็ก และพลังงานแม่เหล็กเทียบเคียง

วิธีที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda - i$ ที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากความสัมพันธ์ $\lambda - i$ จะได้

$$\lambda = \frac{0.09\sqrt{i}}{g}$$

พลังงานเทียบเคียงของระบบ คือ

$$W_f = \int_0^i \lambda di = \int_0^i \frac{0.09\sqrt{i}}{g} di$$

$$= \frac{0.09}{g} \times \frac{2}{3} i^{3/2}$$

$$f_m = \left. \frac{\partial W_f(i,g)}{\partial g} \right|_{i=constnt}$$

$$= -0.09 \times \frac{2}{3} i^{3/2} \left. \frac{1}{g^2} \right|_{i=constnt}$$

จากสมการ (3.23)

สำหรับ $g = 0.05 m$ และ $i = 3 A$

$$f_m = -0.09 \times \frac{2}{3} \times 3^{3/2} \frac{1}{0.05^2} = -124.7 N \cdot m$$

แรงงานของระบบ คือ

$$W_f = \int_0^\lambda i d\lambda = \int_0^\lambda \left(\frac{\lambda g}{0.09} \right)^2 d\lambda = \frac{g^2}{0.09^2} \frac{\lambda^3}{3}$$

จากสมการ (3.24)

$$f_m = \left. \frac{-\partial W_f(\lambda,g)}{\partial g} \right|_{\lambda=constnt} = -\frac{\lambda^3 2g}{3 \times 0.09^2}$$

สำหรับ $g = 0.05 m$ และ $i = 3 A$

$$\lambda = \frac{0.09 \times 3^{\frac{1}{2}}}{0.05} = 3.12 \quad Wb-turn$$

และ

$$f_m = -\frac{3.12^3 \times 2 \times 0.05}{3 \times 0.09^2}$$

$$= -124.7 \quad N \cdot m$$

ตอบ

3.3.1 ระบบเชิงเส้น (Linear System)

เมื่อพิจารณาระบบแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 3.2 ถ้าไม่คิดผลของความต้านทานแม่เหล็ก \mathfrak{H} ของแกน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนช่องอากาศ ดังนั้นความสัมพันธ์ของ $\lambda - i$ จะเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งการวิเคราะห์ระบบ เชิงเส้นกำหนดได้ตามสมการ (3.24)

$$\lambda = L(x)i \quad (3.24)$$

เมื่อกำหนดให้ $L(x)$ คือ ค่าความเหนี่ยวแน่นของชด漉ด (ขึ้นอยู่กับความยาวช่องอากาศ) สำหรับพลังงาน สนานหาได้ตามสมการ (3.25)

$$W_f = \int id\lambda \quad (3.25)$$

จากสมการ (3.24) จะได้ $i = \frac{\lambda}{L(x)}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.25) ค่าพลังงาน W_f เปลี่ยนใหม่ได้ดังนี้

คือ

$$W_f = \int_b^a \frac{\lambda}{L(x)} d\lambda = \frac{\lambda^2}{2L(x)} = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (3.26)$$

และเมื่อพิจารณาสมการ (3.23) โดยแทนค่าจากสมการ (3.26) ลงไปจะได้

$$f_m = -\frac{\partial}{\partial_x} \left(\frac{\lambda^2}{2L(x)} \right) \Big|_{\lambda=constant}$$

$$= \frac{\lambda^2}{2L^2(x)} \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dx} L(x) \quad (3.27)$$

ดังนั้นสำหรับระบบเชิงเส้นมีค่า $W_f = W'_f = \frac{1}{2} L(x) i^2$ (3.28)

และแรงทางกล f_m กำหนดได้ตามสมการ (3.29)

$$\begin{aligned}
 f_m &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} L(x) i^2 \right) \Big|_{i=constant} \\
 &= \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

สำหรับระบบดังรูปที่ 3.2 ถ้าไม่คิดความต้านทานแม่เหล็กของแกน \mathfrak{R}_c แรงเคลื่อนแม่เหล็กหาได้ดังนี้ คือ

$$F = Ni = 2H_g g = 2g \frac{B_g}{\mu_0} \tag{3.30}$$

จากสมการ (3.16) พลังงานสนามกำหนดตามสมการ (3.31)

$$\begin{aligned}
 W_f &= \frac{B_g^2}{2\mu_0} \times \text{ปริมาตรของช่องอากาศ} \\
 &= \frac{B_g^2}{2\mu_0} \times 2gA_g
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

โดยที่ A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศ ดังนั้น จากสมการ (3.23) และ (3.31) แรงทางกล f_m คือ

$$f_m = \frac{\partial}{\partial g} \left(\frac{B_g^2}{2\mu_0} \times A_g \times 2g \right) = \frac{B_g^2}{2\mu_0} (2A_g) N.m \tag{3.32}$$

ผลรวมของพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเท่ากับ $2Ag$ ดังนั้นแรงต่อหน่วยพื้นที่ของช่องอากาศ เรียกว่า แรงอัดทางแม่เหล็ก (magnetic pressure: f_m) ดังสมการ

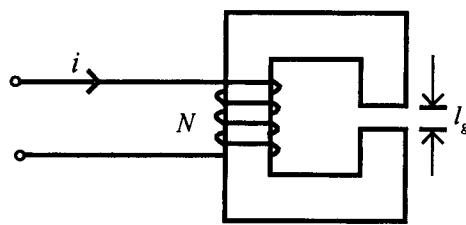
$$f_m = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \text{ N/m}^2 \tag{3.33}$$

ตัวอย่างที่ 3.3 ระบบแม่เหล็กดังรูปตัวอย่างที่ 3.3 มีพารามิเตอร์ $N = 500$ รอบ, $i = 2 A$, ความกว้างของช่องอากาศ = 2.0 cm , ความลึกของช่องอากาศ = 2.0 cm และความยาวของช่องอากาศ = 1.0 mm

ถ้าไม่คิดค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกน \mathfrak{R}_c , เส้นแรงรั่วและfringing flux จงหา

ก) แรงดึงระหว่างช่องอากาศ

ข) พลังงานสะสมในช่องอากาศ



รูปตัวอย่างที่ 3.3

วิธีทำ ก) จากสมการ $B_g = \frac{\mu_o N_i}{l_g}$

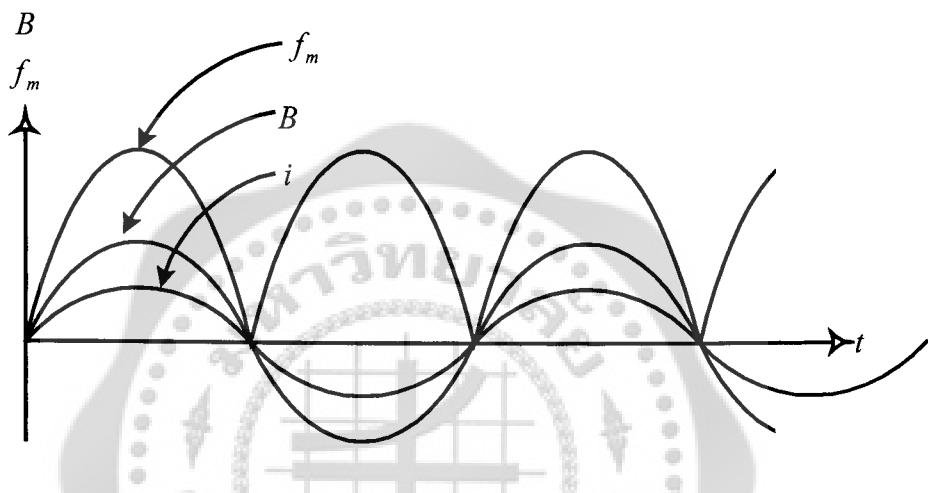
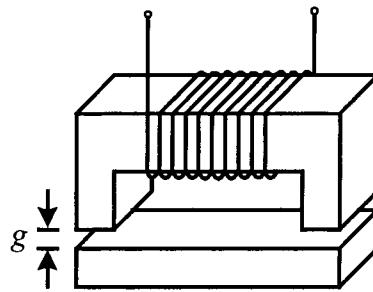
ดังนั้น $f_m = \frac{B_g^2}{2\mu_o} \times A_g = \frac{4\pi \times 10^{-7} (500 \times 2)^2}{2 \times 1 \times 1 \times 10^{-6}} \times 2.0 \times 2.0 \times 10^{-4}$
 $= 251.33 \text{ N}$

ข) ค่าพลังงาน $W_f = \frac{B_g^2}{2\mu_o} \times V_g = \frac{B_g^2}{2\mu_o} \times A_g \times l_g$
 $= 251.33 \times 10^{-3} \text{ J}$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 3.4 ระบบเครื่องยกที่อาศัยการทำงานทางแม่เหล็กดังรูปตัวอย่างที่ 3.4 มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม ขนาด $6 \times 6 \text{ cm}^2$, DUCT 300 รอบ และความต้านทาน 6Ω ถ้าไม่คำนึงถึงความต้านทานแม่เหล็กของแกน R_c และ field fringing ในช่องอากาศ จงคำนวณ

- ก) ถ้าระยะห่างช่องอากาศช่วงเริ่มต้นเท่ากับ 5 mm และต่อแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 120 V เข้ากับ DUCT คงหา พลังงานสนามแม่เหล็กสะสมและแรงทางกลสำหรับดึงขึ้น
- ข) ถ้าระยะห่างช่องอากาศอยู่นิ่งที่ 5 mm และต่อแหล่งจ่ายไฟสลับ 120 V (rms) ความถี่ 60 Hz เข้ากับ DUCT จงหาค่าเฉลี่ยของแรงทางกลสำหรับดึงขึ้น



รูปตัวอย่างที่ 3.4

วิธีทำ (ก) กระแสที่ไหลในขดลวดหาได้จาก $i = V/R$ ดังนั้น

$$i = \frac{120}{6} = 20 \text{ A}$$

เนื่องจากไม่คิดความด้านทานแม่เหล็กของแกน และค่าพลังงานในแกนสนามแม่เหล็ก ดังนั้น พลังงานสนามแม่เหล็กทั้งหมดเกิดขึ้นในช่องอากาศ ดังนั้น W_f สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\text{จากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็ก } F = Ni = H_g l_g = \frac{B_g}{\mu_0} l_g$$

$$B_g = \frac{\mu_o N_i}{2g} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 300 \times 20}{2 \times 5 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.754 \text{ T}$$

ดังนั้นพลังงานสนามคือ

$$W_f = \frac{B_g^2}{2\mu_o} \times \text{ปริมาตรของช่องอากาศ}$$

$$= \frac{(0.754)^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} \times 2 \times 6 \times 6 \times 5 \times 10^{-7}$$

$$= 8.1434 J$$

จากสมการ (3.37) lift force คือ

$$f_m = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \times \text{พื้นที่ช่องอากาศ}$$

$$= \frac{(0.754)^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} \times 2 \times 6 \times 6 \times 10^{-4}$$

$$= 1.6287 kN$$

ข) สำหรับการกระตุนด้วยไฟสลับค่าอิมพีเดนซ์ของคลื่นกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$Z = R + j\omega L$$

ค่าความหนาแน่นนำของคลื่น คือ

$$L = \frac{N^2}{R_g} = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g}$$

$$= \frac{300^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 6 \times 6 \times 10^{-4}}{2 \times 5 \times 10^{-3}} = 40.7 \times 10^{-3} H$$

$$\therefore Z = 6 + j377 \times 40.7 \times 10^{-3} \Omega$$

$$= 6 + j15.34 \Omega$$

กระแสที่ไหลในคลื่น คือ

$$I_{rms} = \frac{120}{\sqrt{(6^2 + 15.34^2)}} = 7.29 A$$

และความหนาแน่นเส้นแรง $B_g = \frac{\mu_0 N_i}{2g}$ คุณภาพความหนาแน่นเส้นแรงเป็นสัดส่วนกับกระแส และ

การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไซน์ขึ้นกับเวลา ดังรูปด้านล่างที่ 3.4 โดยที่ ความหนาแน่นเส้นแรง (rms) หาได้ดังนี้ คือ

$$B_{rms} = \frac{\mu_0 N I_{rms}}{2g} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 300 \times 7.29}{2 \times 5 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.2748 T$$

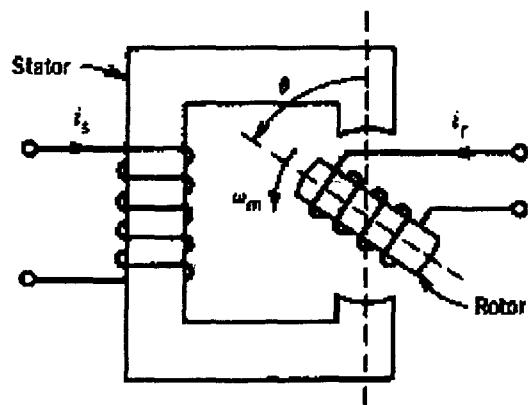
สำหรับ lift force $f_m = \frac{B_g^2}{2\mu_o} \times 2A_g$ โดยที่ f_m จะแปรผันตรงกับ B_g^2

ดังนั้น f_m เคลื่อนหายได้จาก

$$\begin{aligned} f_{m(\text{avg})} &= \frac{B_g^2}{2\mu_o} \times 2A_g \Big|_{\text{avg}} \times 2A_g \\ &= \frac{B_{\text{rms}}^2}{2\mu_o} \times 2A_g = \frac{B_{\text{rms}}^2}{2\mu_o} \times \text{พื้นที่ช่องอากาศ} \\ &= \frac{0.2748^2 \times 2 \times 6 \times 6 \times 10^{-4}}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 216.3 N \quad \underline{\text{ตอบ}} \end{aligned}$$

3.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้านิคหมุน (Rotating Machines)

สำหรับการแปรรูปพลังงานนั้นถือได้ว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ และทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของเครื่องจักรกล ซึ่งในหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้นนั้นเป็นการพิจารณาขบวน การเปลี่ยนรูปพลังงานที่เรียกว่า Translation motion ในระบบแม่เหล็ก ส่วนหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาขบวน การเปลี่ยนรูปพลังงานตาม หลักการเคลื่อนที่แบบ Rotational motion ซึ่งรูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างพื้นฐาน ของระบบแม่เหล็กนิคหมุน โดยเรียกส่วนอยู่นั่นว่า สเตเตอร์(stator) และส่วนเคลื่อนที่ว่า โรเตอร์(rotor) ในกรณีโดยทั่วๆ ไปจะมีผู้คนกระแสเข้าไปยังชุดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยที่กระแส ซึ่งป้อนเข้าสู่โรเตอร์ นั้นจะต้องป้อนผ่านแปรผังค่าและวงแหวนดีน



รูปที่ 3.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบแม่เหล็กนิคหมุน

ถ้ากำหนดให้ W_f เป็นค่าพลังงานสะสมในสนามและสามารถคำนวณโดยพิจารณาจากค่ากระแสที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ i_s และโรเตอร์ i_r ดังนี้

$$dW_f = e_s i_s dt + e_r i_r dt \quad (3.34)$$

เมื่อกำหนดให้ $d\lambda = edt$ ดังนั้นสมการ (3.34) เก็บไว้ได้ดังนี้คือ

$$dW_f = i_s d\lambda_s + i_r d\lambda_r \quad (3.35)$$

สำหรับระบบแม่เหล็กแบบเชิงเส้น เส้นแรงเรื่อมโยงของขดลวดสเตเตอร์ λ_s และเส้นแรงเรื่อมโยงของขดลวดโรเตอร์ λ_r สามารถแสดงได้ในเทอมของความหนี่บวน ซึ่งกำหนดจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์นั้น คือ

$$\begin{aligned} \lambda_s &= L_{ss} i_s + L_{sr} i_r \\ \lambda_r &= L_{rs} i_s + L_{rr} i_r \end{aligned} \quad (3.36)$$

โดยกำหนดให้

L_{ss} คือ ค่าหนี่บวนตัวเองของขดลวดสเตเตอร์

L_{rr} คือ ค่าหนี่บวนตัวเองของขดลวดโรเตอร์

L_{sr} และ L_{rs} คือ ค่าหนี่บวนร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์

และในระบบแม่เหล็กแบบเชิงเส้นค่า L_{sr} มีค่าเท่ากับ L_{rs} ดังสมการที่ (3.36) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{vmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{sr} & L_{rr} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_s \\ i_r \end{vmatrix} \quad (3.37)$$

ถ้าแทนสมการ (3.35) ลงในสมการ (3.36) ค่าพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก กำหนดใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} dW_f &= i_s d(L_{ss} i_s + L_{sr} i_r) + i_r d(L_{sr} i_s + L_{rr} i_r) \\ &= L_{ss} i_s di_s + L_{rr} i_r di_r + L_{sr} d(i_s i_r) \end{aligned} \quad (3.38)$$

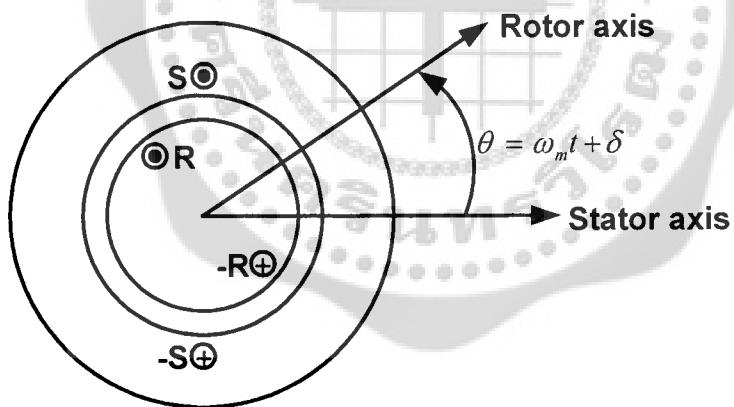
ดังนั้นพลังงานสนาม คือ

$$\begin{aligned}
 W_f &= L_{ss} \int_0^{i_s} i_s di_s + L_{rr} \int_0^{i_r} i_r di_r + L_{sr} \int_0^{i_s i_r} d(i_s i_r) \\
 &= \frac{1}{2} L_{ss} i_s^2 + \frac{1}{2} L_{rr} i_r^2 + L_{sr} i_s i_r
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

ถ้าพิจารณาสมการ (3.39) ส่องเทอມแรกทางด้านขวามือของสมการแทนแรงบิดที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนี้บานนำตัวของขณะโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นมุม θ ที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งเราเรียกองค์ประกอบของแรงบิดดังกล่าวว่า แรงบิดต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance torque) สำหรับเทอนที่สามนั้นแทนแรงบิดที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนี้บานนำร่วมระหว่างคลัวด สเตเตอร์และโรเตอร์

3.5 เครื่องจักรกลชนิดหมุนทรงกระบอก (Cylindrical Rotating Machine)

การวิเคราะห์หาค่าแรงบิดสำหรับเครื่องจักรกลชนิดหมุนทรงกระบอก โดยจะพิจารณาจากรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงรูปหน้าตัวของเครื่องจักรกลชนิดหมุนทรงกระบอกชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก โดยวงขดลวดกระเจยอยู่บนสล็อตทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์



รูปที่ 3.7 รูปหน้าตัดของเครื่องจักรกลชนิดหมุน
ทรงกระบอกชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก

สำหรับเงื่อนไขของการวิเคราะห์กำหนดได้ดังนี้ คือ

- ไม่คิดผลของขดลวดที่วางอยู่ในสล็อต
- ความต้านทานแม่เหล็กไม่เข้มอչุกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่มุม θ ค่าต่าง ๆ
- สมมุติว่าค่าความหนี้บานนำตัวของ L_{ss} และ L_{rr} มีค่าคงที่และไม่เกิดแรงบิดต้านทานแม่เหล็ก
- ค่าความหนี้บานร่วม L_{sr} ขึ้นอยู่กับมุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

ดังนั้นจากเงื่อนไขทั้ง 4 สามารถนำมาพิจารณาแรงบิดที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลชนิดหมุนทรงกระบอกได้ตามสมการ (3.40)

$$T = i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta} \quad (3.40)$$

เมื่อกำหนดให้ $L_{sr} = M \cos \theta$

$$\begin{aligned} i_s &= I_{sm} \cos \omega_s t \\ i_r &= I_{rm} \cos(\omega_r t + \alpha) \\ \theta &= \omega_m t + \delta \end{aligned}$$

M คือ ค่าความหนึ่งบันร่วม L_{sr} สูงสุด

θ คือ มุมระหว่างแกนแม่เหล็กของชุดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

δ คือ ตำแหน่งของโรเตอร์ที่เวลา $t = 0$

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

เมื่อกำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} L_{sr} &= M \cos \theta \\ i_s &= I_{sm} \cos \omega_s t \\ i_r &= I_{rm} \cos(\omega_r t + \alpha) \\ \theta &= \omega_m t + \delta \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

$$dM \cos(\omega_m t + \delta)$$

$$\frac{dM}{d\theta}$$

$$M \sin(\omega_m t + \delta)$$

เนื่องจากตามสมการ (3.40) เมื่อนำไปแทนลงในสมการ (3.41) จะได้สมการแรงบิดใหม่ดังนี้ คือ

$$T = -I_{sm} I_{rm} M \cos \omega_s t \cos(\omega_r t + \alpha) \sin(\omega_m t + \delta) \quad (3.42)$$

จากสมการ (3.42) จัดรูปใหม่ดังนี้ คือ

$$T = -\frac{I_{sm} I_{rm} M}{4} \left[\begin{aligned} &\sin\{(\omega_m + (\omega_s + \omega_r))t + \alpha + \delta\} \\ &+ \sin\{(\omega_m - (\omega_s + \omega_r))t - \alpha + \delta\} \\ &+ \sin\{(\omega_m + (\omega_s - \omega_r))t - \alpha + \delta\} \\ &+ \sin\{(\omega_m - (\omega_s - \omega_r))t + \alpha + \delta\} \end{aligned} \right] \quad (3.43)$$

กรณีการหาค่าแรงบิดเฉลี่ยที่เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย ในการคำนวณแรงบิดตามสมการ (3.43) นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ และกรณีที่เครื่องจักรกลทำงาน(หมุนไปในทางเดียว) ที่ความเร็วมีค่า

เท่ากับผลรวมหรือผลต่างของความเร็วเชิงมุม เนื่องจากกระแสสเตเตอร์และโรเตอร์ แรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นสามารถตามเงื่อนไข $|\omega_m| = |\omega_s \pm \omega_r|$ ดังนั้นการพิจารณาหาค่าแรงบิดเฉลี่ยจะแยกออกเป็น 2 กรณีดังนี้ คือ

1. ถ้า $\omega = 0, \alpha = 0, \omega_m = \omega_s$ โดยที่กระแสจ่ายเข้าโรเตอร์ I_R คือ กระแสไฟตรงและเครื่องจักรกลหมุนที่ความเร็วซึ่งโกรนัส ดังนั้นสำหรับกรณีเมื่อพิจารณาสมการ (3.43) แรงบิดที่เกิดขึ้นคือ

$$T = -\frac{I_{sm} I_R M}{2} \{\sin(2\omega_s t + \delta) + \sin \delta\} \quad (3.44)$$

และแรงบิดเฉลี่ยคำนวณได้ตามสมการ (3.45)

$$T_{avg} = -\frac{I_{sm} I_R M}{2} \sin \delta \quad (3.45)$$

2. ถ้า $\omega_m = \omega_s - \omega_r$ โดยที่ป้อนกระแสไฟลับเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งความเร็วที่มอเตอร์หมุนจะไปเท่ากับความเร็วซึ่งโกรนัส ($\omega_m \neq \omega_s$ และ $\omega_m \neq \omega_r$) ดังนั้นจากสมการ (3.43) แรงบิดที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้ คือ

$$T = -\frac{I_{sm} I_{rm} M}{4} \left[\begin{array}{l} \sin(2\omega_s t + \alpha + \delta) + \sin(-2\omega_r t - \alpha + \delta) \\ + \sin(2\omega_s t - 2\omega_r t - \alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \end{array} \right] \quad (3.46)$$

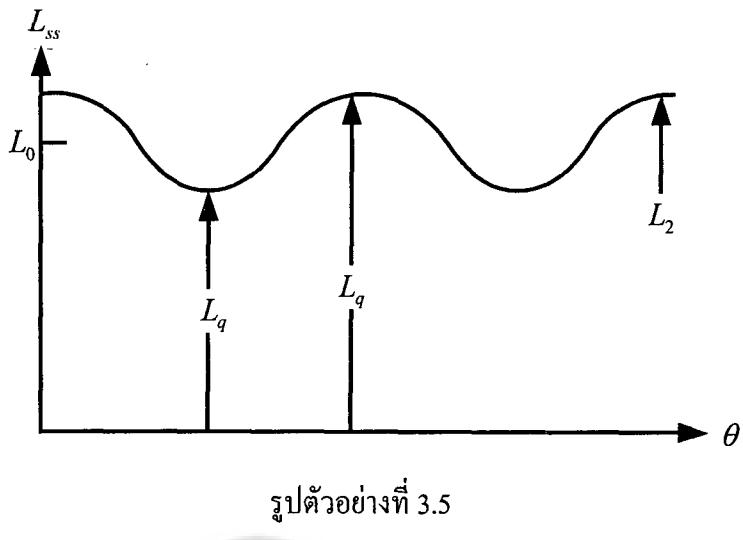
และแรงบิดเฉลี่ยกำหนดได้ตามสมการ (3.47)

$$T_{av} = -\frac{I_{sm} I_{rm} M}{4} \sin(\alpha + \delta) \quad (3.47)$$

ตัวอย่างที่ 3.5 ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6

กำหนดให้

1. ไม่มีขดลวดพันอยู่บนโรเตอร์
2. ค่าความหนึ่ยวนำของสเตเตอร์ซึ่งอยู่กับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ โดยที่ $L_{ss} = L_0 + L_2 \cos 2\theta$ ดังรูปตัวอย่างที่ 3.5
3. กระแสป้อนเข้าสเตเตอร์ $i_s = I_{sm} \sin \omega t$



(ก) กระแสสมการแรงบิดที่กระทำบน โรเตอร์

(ข) ถ้ากำหนดให้ $\theta = \omega_m t + \delta$ โดยที่

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของ โรเตอร์

δ คือ ตำแหน่งของ โรเตอร์ หมุนที่เวลา $t=0$

จงหา เสื่อน ไบที่ไม่ทำให้แรงบิดเฉลี่ยเป็นศูนย์ และแสดงสมการแรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น
วิธีทำ

(ก) จากสมการ (3.39) และตามเสื่อน ไบที่ โจทย์กำหนด $i_r = 0$

$$T = \frac{1}{2} i_s^2 \frac{dL_{ss}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_r^2 \frac{dL_{rr}}{d\theta} + i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta}$$

$$\therefore T = \frac{1}{2} i_s^2 \frac{dL_{ss}}{d\theta}$$

$$= \frac{1}{2} I_{sm}^2 \sin^2 \omega t \frac{d}{d\theta} (L_0 + L_2 \cos 2\theta)$$

$$= -I_{sm}^2 L_2 \sin 2\theta \sin^2 \omega t \quad N.m.$$

(ข) จากสมการแรงบิดในข้อ(ก) นำมาจัดรูปใหม่ แล้วแทนค่า θ ตามเสื่อน ไบของ โจทย์ จะได้สมการแรงบิดใหม่ดังนี้ คือ

$$T = -I_{sm}^2 L_2 \sin 2(\omega_m t + \delta) \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} I_{sm}^2 L_2 \left[\begin{array}{l} \sin 2(\omega_m t + \delta) - \frac{1}{2} \sin \{(\omega_m + \omega)t + \delta\} \\ + \sin \{(\omega_m - \omega)t + \delta\} \end{array} \right]$$

กรณีที่ 1 $\omega_m = 0$ สมการแรงบิดเคลื่อนที่ตามเงื่อนไขหาได้ดังนี้ คือ

$$T_{av} = -\frac{1}{2} I_{sm}^2 L_2 \sin 2\delta$$

$$\text{โดยที่} \text{จากรูป} \text{ค่าว่าย่าง} \text{ที่} 3.5 \quad L_2 = \frac{1}{2} (L_d - L_g)$$

$$\begin{aligned} T_{av} &= -\frac{1}{2} I_{sm}^2 \left[\frac{1}{2} (L_d - L_g) \right] \sin 2\delta \\ &= -\frac{1}{4} I_{sm}^2 (L_d - L_g) \sin 2\delta \end{aligned}$$

กรณีที่ 2 $\omega_m = \pm \omega$ จะได้สมการแรงบิดเฉลี่ยตามเงื่อนไขดังนี้ คือ

$$T_{av} = \frac{1}{4} I_{sm}^2 L_2 \sin 2\delta$$

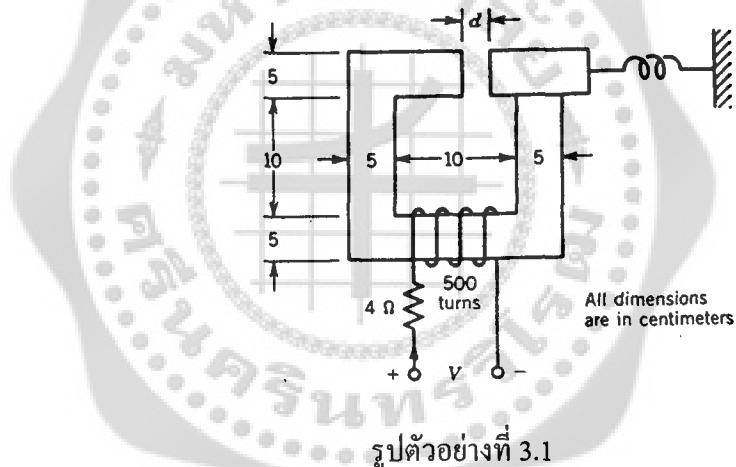
$$\text{และแทนค่า} \quad L_2 = \frac{1}{2} (L_d - L_g) \quad \text{จะได้}$$

$$= \frac{1}{8} I_{sm}^2 (L_d - L_g) \sin 2\delta$$

ตอบ

แบบฝึกหัดบทที่ 3

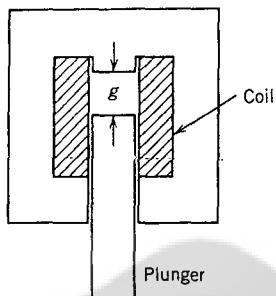
1. ความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda - i$ สำหรับระบบแม่เหล็กกำหนดได้ดังนี้ $\lambda = \frac{1.2i^{1/2}}{g}$
 $(g$ คือ ความยาวของช่องอากาศ) โดยที่ $i = 2A$ และ $g = 10 \text{ cm}$ จงคำนวณแรงทางกลบนส่วนเคลื่อนที่
 (ก) ใช้หลักการพลังงานของระบบ
 (ข) ใช้หลักการพลังงานเทียบเคียงของระบบ
2. ระบบกระตุ้นในรูปตัวอย่างที่ 3.1 ขนาด ความกว้าง, ยาว, สูง ทั้งหมดวัดในหน่วยเซนติเมตร วัสดุแม่เหล็กทำด้วย Caststeel โดยที่คุณลักษณะการทำแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 1.7 แกนแม่เหล็ก และช่องอากาศมีพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม จำนวนขดลวดพัน 500 รอบ และความต้านทาน 4.0Ω



รูปตัวอย่างที่ 3.1

- (ก) ช่องอากาศกว้าง 1 mm
- 1) จงคำนวณกระแสในขดลวดและแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย โดยที่ต้องการความหนาแน่นช่องอากาศ $0.5 T$
 - 2) จงคำนวณแรงพลังงานสะสมในระบบกระตุ้น
 - 3) จงคำนวณแรงทางกลที่สามารถดึงส่วนเคลื่อนที่ให้มามั่นผัสกับส่วนอยู่กับที่ของระบบกระตุ้น
 - 4) จงคำนวณค่าความเหนี่ยวแน่นของขดลวด
- (ข) ถ้าส่วนเคลื่อนที่เคลื่อนตัวไปบนระยะช่องอากาศเป็นสูนย์
- 1) สำหรับช่องอากาศเป็นสูนย์ จงหาความหนาแน่นเส้นแรงในแกน แรงทางกลของส่วนเคลื่อนที่ และพลังงานสะสมในระบบกระตุ้น
 - 2) จงคำนวณพลังงานถ่ายโอนระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและระบบกระตุ้น สมมติว่าส่วนเคลื่อนที่เคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ทิศทางการไหลของพลังงาน และ พลังงานทางกลที่เกิดขึ้น

3. พื้นที่หน้าตัดของระบบการกระตุ้นแม่เหล็กกรูปทรงกระบอกดังแสดงในรูปตัวอย่างที่ 3.2 plunger มีพื้นที่หน้าตัด 0.0016 m^2 ขดลวดมีจำนวน 2500 รอบ และความต้านทาน 10Ω แรงดันไฟฟ้า 15 A จ่ายให้กับระบบผ่านขั้วคลาวด์ สมมติว่าวัสดุแม่เหล็กมีคุณสมบัติทางอุดมคติ



รูปตัวอย่างที่ 3.2

- (ก) จงหาความยาวช่องอากาศ l_g ในหน่วย mm สำหรับกรณีความหนาแน่นเส้นแรงในช่องอากาศเท่ากับ 1.5 T และคำนวณพลังงานสะสมสำหรับเงื่อนไขดังกล่าวนี้
- (ข) จงแสดงค่าแรงทางกลซึ่งสามารถดึง plunger ในฟังก์ชันของความยาวช่องอากาศ g
- (ค) จงหาค่าแรงดึง plunger ตามเงื่อนไขในข้อ (ก)
- (ง) ถ้า plunger เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากระยะเริ่มต้นของความยาวช่องอากาศ 5 mm จนกระทั่งเป็นศูนย์การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของ plunger ดังกล่าวจะมีเส้นแรงเชื่อมโยง (flux linkage) ของขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (hardly) ระหว่างการเคลื่อนที่
- 1) จงคำนวณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่อยู่ในช่องอากาศ
 - 2) จงคำนวณพลังงานทางกลทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่
4. เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดต้านทานแม่เหล็กกรูปที่ 3.6 ไม่มีขดลวด โรเตอร์ ค่าอินดักเตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ คือ $L_{ss} = 0.1 - 0.3 \cos 2\theta - 0.2 \cos 4\theta \text{ H}$. กำหนดให้มีกระแส 10 A (rms) ที่ความถี่ 60 Hz ให้ผ่านขดลวดสเตเตอร์
- (ก) จงคำนวณค่าความเร็ว (ω_m) ของโรเตอร์ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดเฉลี่ยในเครื่องจักรกล
- (ข) จงคำนวณแรงบิดสูงสุด และกำลังทางกลสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วทั้งสอง
- (ค) จงคำนวณแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วเป็นศูนย์
5. เครื่องจักรกลชนิดหมุนดังรูปที่ 3.7 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

$$L_{ss} = 0.15 \text{ H} \quad L_{rr} = 0.06 \text{ H}$$

$$L_{sr} = 0.08 \cos \theta \text{ H}$$

- (ก) ถ้าโรเตอร์หมุนที่ 3600 rpm โดยกระแสไฟผ่านขดลวดสเตเตอร์ 5 A (rms) ที่ความถี่ 60 Hz จงคำนวณแรงดันชั้วขณะและแรงดันเหนี่ยวนำ (rms) ในขดลวดโรเตอร์
- (ข) จากเงื่อนไขในข้อ(ก) จงคำนวณความถี่ของแรงดันเหนี่ยวนำโรเตอร์

- (ค) ถ้าต่อขดลวดสเตเตอเรอนูกรมกับขดลวดโรเตอร์และมีกระแสไฟลผ่านขดลวดทั้งสอง $5\text{ A}(rms)$ ที่ความถี่ 60 Hz จะคำนวณความเร็วที่ทำให้เครื่องจักรกลสร้างแรงบิดเฉลี่ยขึ้นมาได้
(ง) จากเงื่อนไขในข้อ(ค) จงคำนวณแรงบิดสูงสุดที่เครื่องจักรกลสร้างขึ้นในแต่ละความเร็ว oben



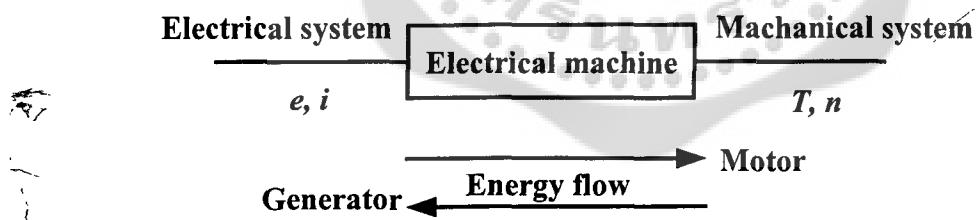
ก. กลยุทธ์
วันพุธที่ 10 พฤศจิกายน
บทที่ 4
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

(DC. Machines)

ยกที่ 4 ๓ %

บทที่ 5 ๒ %

บทที่ 4 นี้กล่าวถึงขั้นตอนการแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือทางกลับกัน การแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการแปลงพลังงานดังกล่าว เรียกว่าการแปรสภาพพลังงานกลไฟฟ้า (Electromechanical energy conversion) โดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในขั้นตอนการนี้ นั่นหมายความว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับการแปรสภาพพลังงานและถ้าพิจารณาระบบดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อป้อนอินพุตที่เป็นพลังงานไฟฟ้า (แรงดันและกระแส) ให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแล้ว ได้ออตพุตออกมานะเป็นพลังงานกลแสดงว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในกริยาเป็น นอเตอร์ไฟฟ้า และทางกลับกันถ้าป้อนอินพุตเป็นพลังกลแล้ว ได้ออตพุต ออกมานะเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำงานในกริยาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

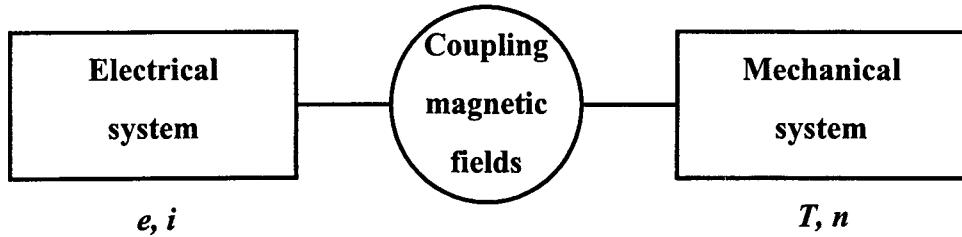


รูปที่ 4.1 แผนภาพการแปลงสภาพพลังงานกลไฟฟ้า

4.1 การแปลงสภาพทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Conversion)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการแปลงสภาพพลังงานนั้น มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ และเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบชิงโตรนัส สำหรับหลักการแปลงสภาพพลังงานที่อาศัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิดนั้น ประกอบด้วย 2 ประการหลักที่สำคัญ ดังนี้ คือ

1. เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (induced voltage)
2. เมื่อผ่านกระแสเข้าไปปั้งตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงทางกลขึ้นบนตัวนำ



รูปที่ 4.2 สนามแม่เหล็กเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าและระบบทางกล

จากหลักการทั้ง 2 ข้อดังกล่าวข้างต้นนั้นกรณีที่ผ่านกระแสเข้าไปปั้งตัวนำซึ่งวางในสนามแม่เหล็กเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำงานในกริยาเป็นมอเตอร์ และกรณีของการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวน้ำจากการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำงานในกริยาเป็นเครื่องกำเนิด

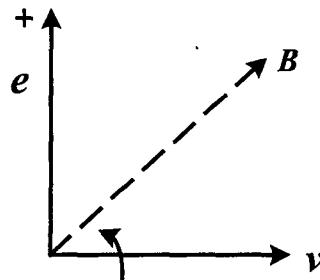
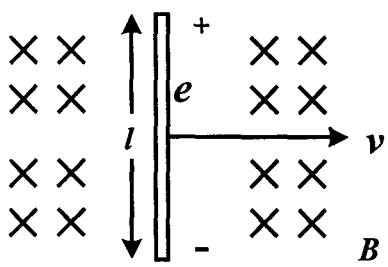
4.1.1 แรงดันจากการเคลื่อนที่ (Motional voltage : e)

เมื่อพิจารณาหลักการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำซึ่งเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.3 (ก) และถ้ากำหนดให้ l คือความยาวจากการเคลื่อนที่ของตัวนำที่ความเร็วเชิงเส้น v ในสนามแม่เหล็ก B ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนตัวนำตามสมการ (4.1)

$$e = Blv \quad (4.1)$$

โดยที่ B, l และ v ตั้งฉากซึ่งกันและกัน สำหรับข้อ (polarity) ของแรงดันเหนี่ยวนำคำนวณได้จากกฎมือขวาของการหมุนสกรู (right-hand screw rule)

ปริมาณ B, l และ v ทั้งสามดังรูปที่ 4.3 (ข) เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากซึ่งกัน เมื่อเวกเตอร์ v เคลื่อนที่หมุนเข้าหาเวกเตอร์ B และถ้าการเคลื่อนที่ดังกล่าวมีทิศทางเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของการหมุนสกรูตามกฎมือขวาจะได้แรงดันเหนี่ยวนำในทิศทางเป็นบวก



X แสดงทิศทางของ B ผู้เข้ากระดาย

(ก) ตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก

(ข) กฎมือขวาของการหมุนสกรู

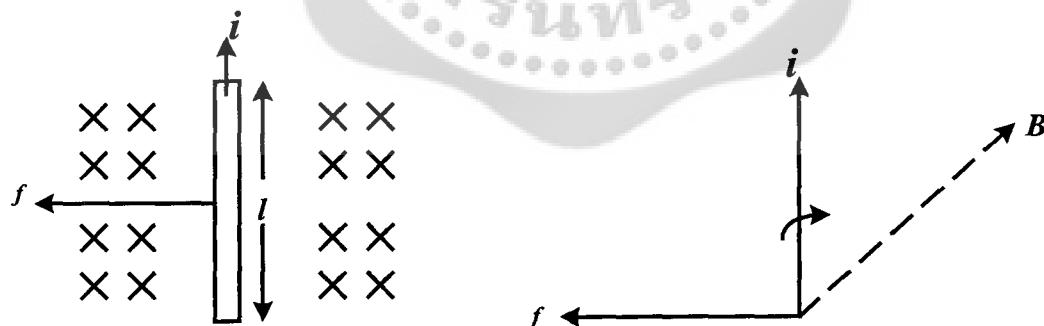
รูปที่ 4.3 แรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวนำ

4.1.2 แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force: f)

สำหรับกรณีของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำดังรูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งทำให้เกิดแรงบนตัวนำ (ตามกฎของ Lorentz force) แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (4.2) คือ

$$f = Bli \quad (4.2)$$

เมื่อ B, l และ i ตั้งฉากซึ่กันและกัน โดยที่ทิศทางของแรงคำนวณได้โดยกฎมือขวาของการหมุนสกรูดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ถ้าเวกเตอร์กระแส i หมุนเข้าหาเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ B และสกรูหมุนในทิศทางเดียวกัน นั่นหมายความว่าทิศทางที่สกรูเคลื่อนที่แสดงถึงทิศทางของแรง f



(ก) กระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำซึ่งเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก

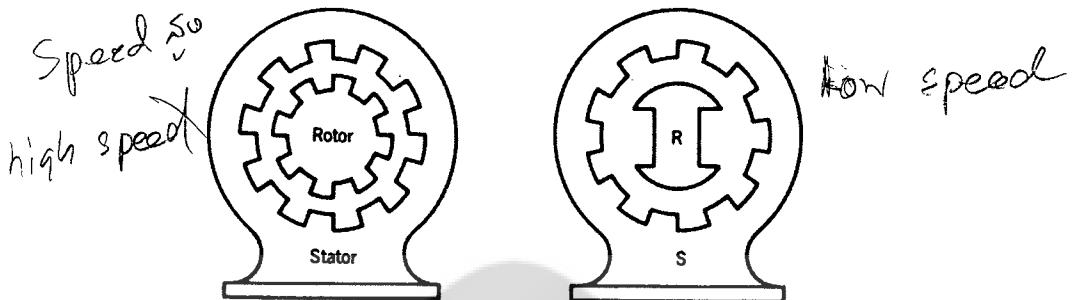
(ข) ทิศทางของแรง

รูปที่ 4.4 แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า

4.1.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

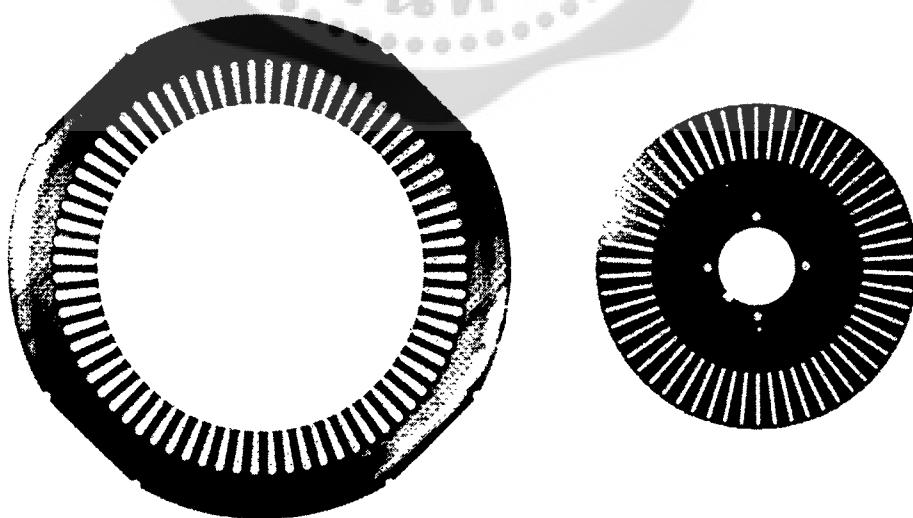
(Basic Structure Of Electric Machines)

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ สเตเตอร์ (stator) และ โรเตอร์ (rotor) และระยะห่างระหว่างทั้งสองส่วน เรียกว่าช่องอากาศ (air gap) ดังรูปที่ 4.5



(ก) เครื่องจักรกลไฟฟ้าโรเตอร์รูปทรงกระบอก (ข) เครื่องจักรกลไฟฟ้าโรเตอร์แบบขวัญ
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

โดยที่ สเตเตอร์ (stator) : คือส่วนที่อยู่กับที่ และ โรเตอร์ (rotor) : คือส่วนที่เคลื่อนที่ได้ทั้ง สเตเตอร์ และ โรเตอร์ ทำจาก ferromagnetic materials สำหรับร่องเล็ก ๆ ที่ถูกตัดแบ่งภายใต้ใน สเตเตอร์ และ ด้านนอกของ โรเตอร์ เรียกว่า สล็อต (slots) ซึ่งที่ด้านในห้องดูดถูกวางลงในร่องสล็อต สำหรับ แกนเหล็กของ เครื่องจักรกล ทำจากแผ่นเหล็กบาง (laminated) อัดซ้อนกันเป็นแกนเพื่อลดค่าการ ถูกเสียงเนื่องจากกระแสไฟฟ้า รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะแผ่นเหล็กบางที่นำมาทำเป็นแกนเหล็ก



(ก) สเตเตอร์

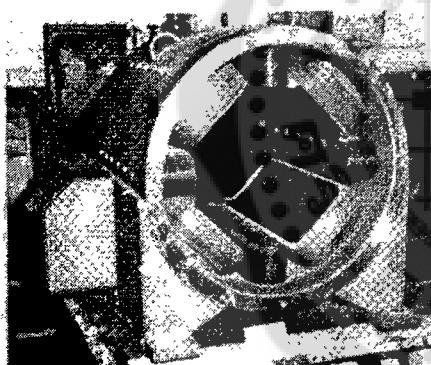
(ข) โรเตอร์

รูปที่ 4.6 แผ่นเหล็กบาง

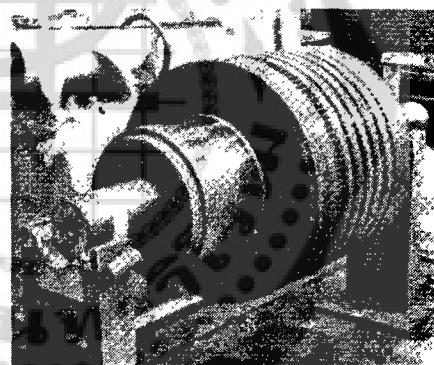
ตัวนำที่วางในสล็อตของสเตเตอเรอร์หรือโรเตอร์ถูกต่อเข้าด้วยกัน และเรียกตัวนำเหล่านั้นว่า ขดลวด (winding) โดยขดลวดที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ เรียกว่า ขดลวดอาร์เมจเจอร์ (armature winding) และขดลวดที่ผ่านกระแสเข้าไปแล้วทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า เรียกว่า ขดลวดสนาม (field winding) สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้านานัปการจะใช้แม่เหล็กถาวร เป็นส่วนหลักที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

4.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC. Machine)

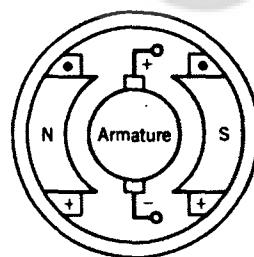
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ขดลวดสนามแม่เหล็กถูกวางอยู่บนสเตเตอเรอร์และขดลวด อาร์เมจเจอร์ถูกวางลงบนโรเตอร์ดังรูปที่ 4.7 จากโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังกล่าว เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปยังขดลวดสนามทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรกล และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดอาร์เมจเจอร์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง จำเป็นต้องมีชุดเรียงกระแสทางกลหรือชุดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จะทำให้ได้แรงดันที่ขึ้วาร์เมจเจอร์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง



(ก) สเตเตอเรอร์



(ข) โรเตอร์



(ค) ภาพตัดแสดงโครงสร้างของเครื่องจักรกลชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก

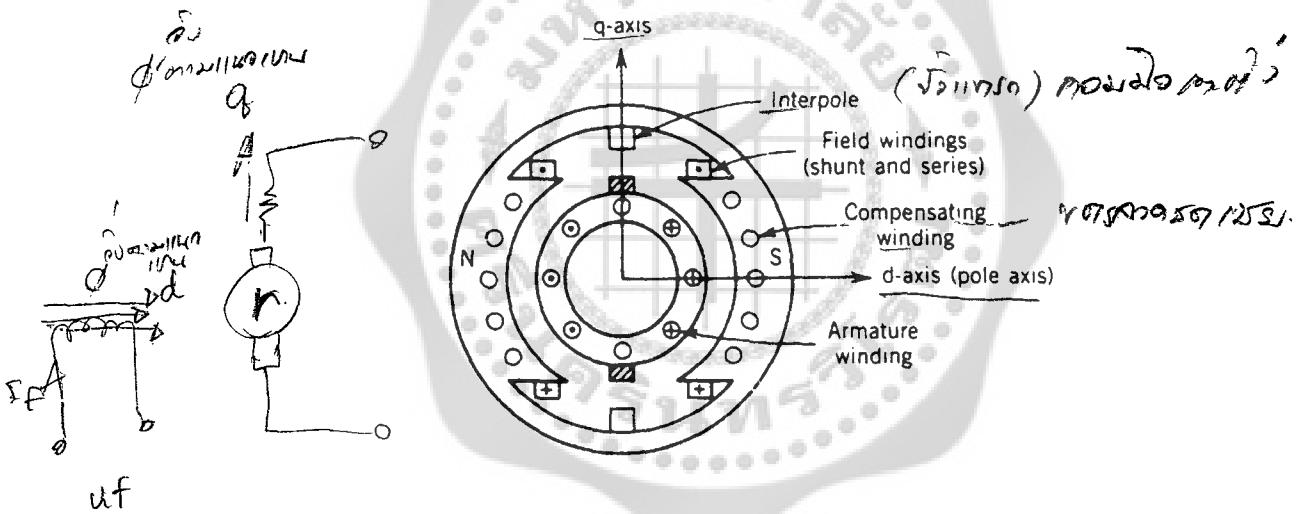
รูปที่ 4.7 เครื่องจักรกลกระแสตรง

4.2.1 ลักษณะโครงสร้าง (Construction)

สำหรับรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะที่สำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก โดยที่สเตเตอเรอร์เป็นแบบขั้วยื่น (salient pole) และมีขดลวดกระแสตื้นหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้น

เรียกชุดลวดดังกล่าวว่า ชุดลวดสนามขนาน (shunt field winding) และชุดลวดสนามอนุกรม (series field winding) ซึ่งชุดลวดสนามจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่กระหายอย่างสมมาตรตามแนวแกนข้อเหล็ก (pole axis) หรือที่เรียกว่า ตามแนวแกนตรง (direct or d-axis)

เมื่อพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำในชุดลวดอาร์เมจเจอร์ แรงดันที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าผลิตออกมานั้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกมากที่ข้ออาร์เมจเจอร์ จึงจำเป็นต้องมีชุดเรียงกระแสที่ประกอบด้วย คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) และแปรงถ่าน (brush) นอกจากนี้ยังทำให้ได้รูปคลื่น mmf ที่กำหนดจากกระแสอาร์เมจเจอร์คงที่ในช่องอากาศ (space) สำหรับตำแหน่งการวางแปรงถ่านนั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าขณะที่อาร์เมจเจอร์เคลื่อนที่ผ่านในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างข้อสนามทั้งสอง กระแสที่ผ่านตัวมันจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และถ้าพิจารณาตัวนำทั้งหมดภายในห้องแม่เหล็กมีการนำกระแสเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันตลอดด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้ mmf ที่กำหนดจากกระแสอาร์เมจเจอร์เกิดขึ้นตามแนวแกนกึ่งกลางระหว่างข้อแม่เหล็กซึ่งวางใกล้กัน เรียกว่า แกนตามขวา (quadrature or q-axis)



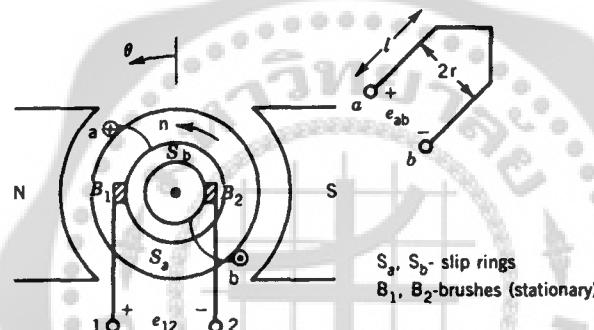
รูปที่ 4.8 แผนภาพโครงสร้างเครื่องจักรกลกระแสตรง

4.2.2 การพิจารณาแรงดันหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลกระแสตรง

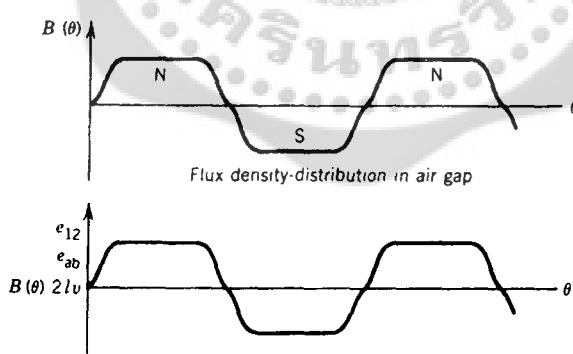
(Evaluation of DC Machines)

ถ้าพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 4.9 (ก) ความหนาแน่นเส้นแรงที่กระหายในช่องอากาศของข้อสนามแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 (ข) ตำแหน่งการวางชุดลวด a-b ในสล็อตบนโรเตอร์ โดยที่ข้อ a-b ของชุดลวดจะถูกต่อเข้ากับวงแหวนลื่น และมีแปรงถ่านประกนอยู่บนวงแหวนลื่น สำหรับแรงดันหนี่ยวนำในชุดลวด e_{ab} เกิดขึ้นตามหลักการตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก ดังสมการ (4.1) (แรงดัน e_{ab} จะมีค่าเท่ากับแรงดัน e_{12}) รูปคลื่นแรงดันหนี่ยวนำที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเหมือนกับรูปคลื่นของความหนาแน่นที่กระหายในอากาศ

เมื่อแทนตำแหน่งของวงแหวนด้วยชิ้นคอกมิวเตเตอร์ (Commutator segments) ซึ่งเป็นชิ้องเดงที่มีวัสดุเป็นชนวนกันแยกจากกัน ดังรูปที่ 4.10(ก) โดยที่ ชิ้นคอกมิวเตเตอร์ C_a ถูกต่อเข้ากับขั้วต่อ a ของชุดลวดและ C_b ถูกต่อเข้ากับขั้วต่อ b ของชุดลวด เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาขั้วต่อภายในจะข้ามแม่เหล็ก N และ S จะมีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ ดังนั้นขั้วแปรงถ่าน B_1 และ B_2 จะต่ออยู่กับปลายด้านบวกและลบของชุดลวดตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ แรงดันเหนี่ยวนำในชุดลวด e_{ab} เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนแรงดันที่ขั้วแปรงถ่าน e_{12} เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 4.10(ข) จะเห็นว่ารูปคลื่นที่ได้นั้นเกิดการกระเพื่อม (ripple) แต่โดยแท้จริงแล้วนั้นจะมีชุดลวดจำนวนหลายชุดและแต่ละชุดมีหลายตัววนนำพันอยู่ในสต็อตของโรเตอร์ โดยชุดลวดแต่ละชุดมีการต่ออนุกรมกันผ่านชิ้นคอกมิวเตเตอร์ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบขึ้นดังในรูปที่ 4.10 (ค)

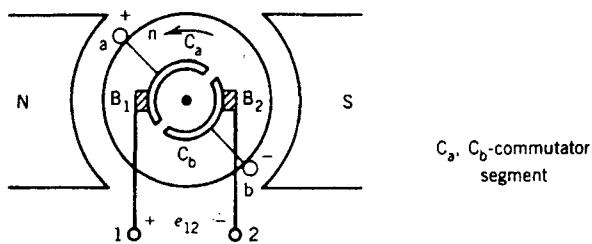


(ก) เครื่องจักรกลชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก

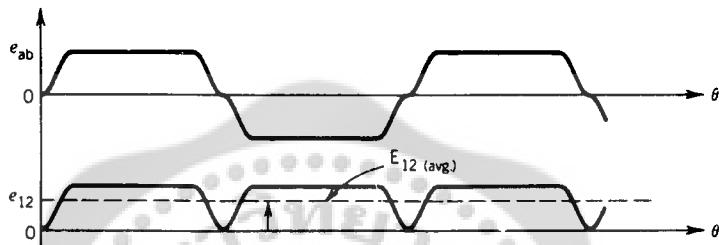


(ข) แรงดันเหนี่ยวนำในชุดลวด

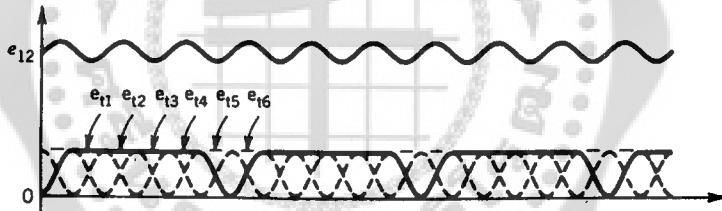
รูปที่ 4.9 แรงดันเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



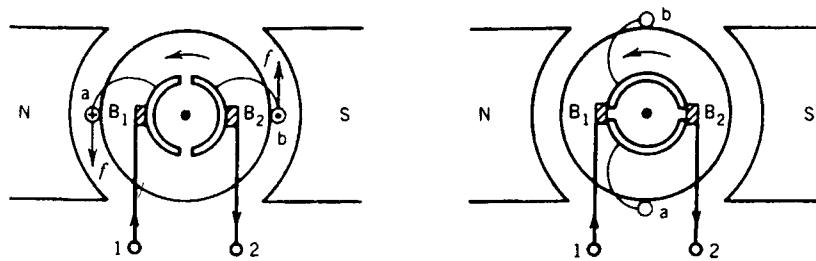
(ก) เครื่องจักรกลที่มีชิ้นค่อนมิวเตเตอร์



(ข) แรงดันของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่มีชิดลวดหนึ่งชุด

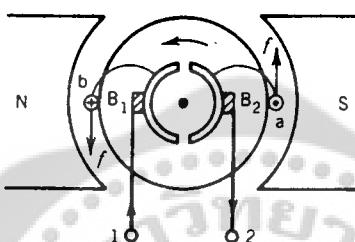
(ค) แรงดันของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยชิดลวดหลายชุด
รูปที่ 4.10 แรงดันที่ผ่านชุดเรียงกระแส ซึ่งประกอบด้วยค่อนมิวเตเตอร์และแบรงค่า

สำหรับกรณีการลัดวงจรของชิดลวด $a-b$ โดยแบรงค่า้นนี้ เกิดขึ้นขณะโรเตอร์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขั้ว指南ตามแนวแกน q ซึ่งกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกระแสจะถูกป้อนเข้าสู่อาร์เมเนเจอร์โดยผ่านแบรงค่า กระแสในชิดลวดดังกล่าวจะกลับทิศทางขณะชิดลวดผ่านช่วงที่เกิดการลัดวงจร ระหว่างแบรงค่ากับค่อนมิวเตเตอร์ เรียกว่า Interpolar region อธิบายได้ดังรูปที่ 4.11



(ก) การสัมผัสที่ปลายของแม่ปาร์กถ่าน B_1
โดยที่กระแสไฟลจาก a ไปยัง b

(ข) การดัดวงจรของขดลวด
ช่วง Interpolar region



(ค) การสัมผัสที่ปลายของแม่ปาร์กถ่าน B_2 โดยที่กระแสไฟลจาก b ไปยัง a

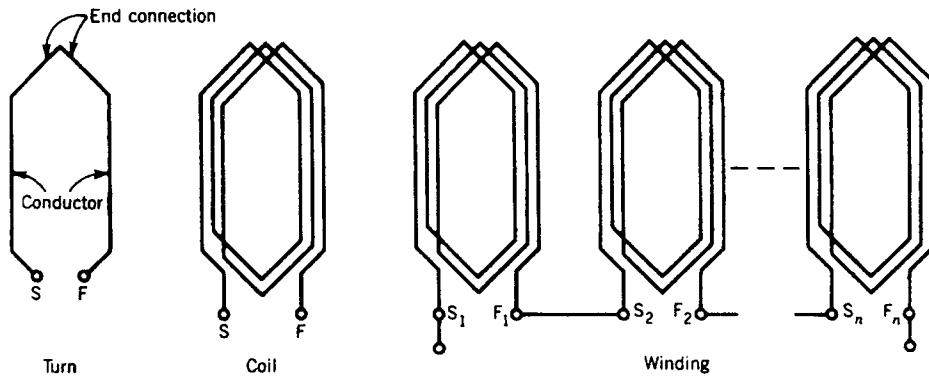
รูปที่ 4.11 การกลับทิศของกระแสในขดลวด โดยผ่านคอมมิวเตอเรแลบแม่ปาร์กถ่าน

4.2.3 ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature windings)

หัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงตำแหน่งการวางขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์รวมไปถึงชุดเรียงกระแสทางกล สำหรับส่วนนี้เป็นการกล่าวถึงรูปแบบและวิธีการพันขดลวดอาร์เมเจอร์โดยองค์ประกอบของขดลวดอาร์เมเจอร์กำหนดให้ดังนี้คือ

1. ขดลวดที่เรียกว่า turn ประกอบด้วย 2 ตัวนำที่ปลายด้านหนึ่งของตัวนำหันส่องต่อถึงกัน
2. ขดลวดที่เรียกว่า coil เกิดจากขดลวด (turn) 1 ชุดพันหลาย ๆ รอบในลักษณะอนุกรมกัน
3. ขดลวดที่เรียกว่า winding เกิดจากขดลวด (coil) หลาย ๆ ชุด ต่ออนุกรมกัน

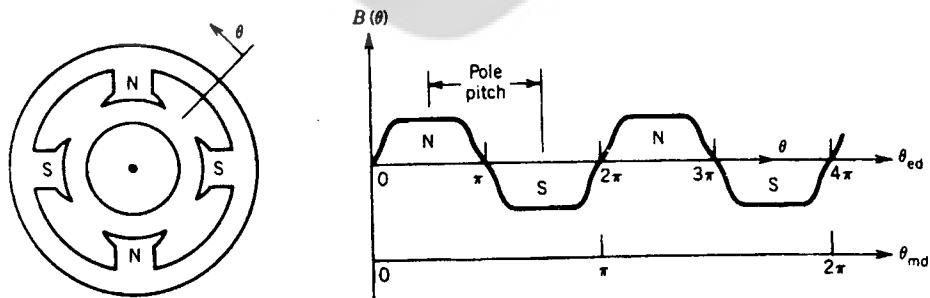
รูปที่ 4.12 แสดงขดลวดทั้ง 3 ลักษณะดังอธินายไว้ข้างต้น โดยต้นและปลายของขดลวดใช้สัญลักษณ์ S และ F ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ลักษณะของขดลวดตามนิยามข้างต้น

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก แต่โดยแท้แล้วนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถมีขั้วแม่เหล็กได้มากกว่าสองขั้วแม่เหล็ก รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด 4 ขั้วแม่เหล็กโดยรูปคลื่น ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายในช่วงอากาศกำหนดจากขั้วสเตเตอร์ (stator poles) แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13(ก) ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ของโรเตอร์รอบหนึ่งรอบทางกลสำหรับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด 4 ขั้วแม่เหล็ก จะทำให้ได้ความหนาแน่นเส้นแรงที่กระจายในช่องอากาศ 2 ไซเกล ถ้ากำหนดให้ θ_{md} คือ มุมทางกล และ θ_{ed} คือ มุมทางไฟฟ้า ดังนั้นกรณีเครื่องจักรกล ไฟฟ้ามีจำนวน p ขั้วแม่เหล็ก ความสัมพันธ์ของมุมทั้ง 2 กำหนดได้ตามสมการ (4.3)

$$\theta_{ed} = \frac{p}{2} \theta_{md} \quad (4.3)$$



(ก) เครื่องจักรกลชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก (ข) ความหนาแน่นของเส้นแรงที่กระจายในช่องอากาศ
รูปที่ 4.13 นุ่มทางไฟฟ้าและนุ่มทางกล

สำหรับระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วที่ใกล้กัน เรียกว่า Pole pitch (Y_p) หรือ Pole span และกำหนดเป็นความสัมพันธ์เชิงสมการได้ดังนี้ คือ

$$1 - \text{pole pitch} = 180^\circ_{ed} = \frac{360^\circ}{md} \quad (4.4)$$

และระยะห่างระหว่างชุดลวด (coil) ทั้งสองด้านที่วางในสลิ๊อตบนโรเตอร์ เรียกว่า coil pitch (Y_s) ถ้า coil pitch เท่ากับ 1-pole pitch เรียกว่า full-pitch coil แต่ถ้าห้องกว่าจะเรียกว่า Short pitch หรือ Fractional pitch coil ในเครื่องจักรกลกระแสตรงชุดลวดอาร์เมเจอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบ full-pitch coil เมื่อพิจารณาการพันชุดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องจักรกลกระแสตรงนี้จะแบ่งการพันชุดลวดอาร์เมเจอร์ออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ การพันแบบ Lap-winding และ Wave-winding นอกจากนี้ยังมีอีกแบบหนึ่งได้แก่ การพันแบบ Frog-leg winding ซึ่งได้รวมข้อดีของการพัน 2 แบบหลักเข้าด้วยกัน

* การพันแบบ Lap winding

High current Low Voltage

การพันแบบ Lap winding เป็นวิธีการที่ง่ายและใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สำหรับการพันชุดลวดของเครื่องจักรกลกระแสตรงนี้ วิธีการพันชุดลวดลักษณะนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็น Simplex lap และ Multiplex lap winding การพันแบบ Lap winding เป็นการพันชุดลวดในลักษณะที่ชุดลวดแต่ละชุดเรียงซ้อนต่อ ๆ กันไปดังรูปที่ 4.14 (ก) สำหรับรูปที่ 4.14 (ข) และ 4.14 (ค) แสดงการพันชุดลวดแบบ Progressive lap และ Retropgressive lap winding โดยลักษณะการลงชุดลวดแบบแรกซึ่งชุดลวดจะถูกต่อลงในสลิ๊อตตัดไปจากต้นชุดลวดซึ่งกำหนดให้ $Y_c = 1$ และการลงชุดลวดในลักษณะที่สองนี้จะถูกต่อลงในสลิ๊อตตัดไปจากต้นชุดลวดซึ่งกำหนดให้ $Y_c = -1$ และรูปที่ 4.14 (ง) แสดงการพันชุดลวดแบบ Simplex-lap ส่วนรูปที่ 4.14 (จ) แสดงวงจรสมมูลย์ของการพันแบบ Lap winding จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้วิธีการพันแบบ Lap-winding จำนวนทางเดินวงจรนาน (a) จะเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็ก (p) และจำนวนแปรผัน โดยที่ระยะห่างของ Y_c กำหนดได้ดังนี้ คือ

การพันแบบ m-plex lap winding

$$Y_c = \pm m \quad (4.5)$$

และจำนวนทางเดินวงจรนาน

$$a = mp \quad (4.6)$$

จำนวนชั้น

เมื่อ Y_c คือ ระยะห่างของปลายชุดลวดที่ต่ออยู่กับชื่อคอมมิเตเตอร์ (Commutator pitch)

a คือ จำนวนทางเดินวงจรนาน

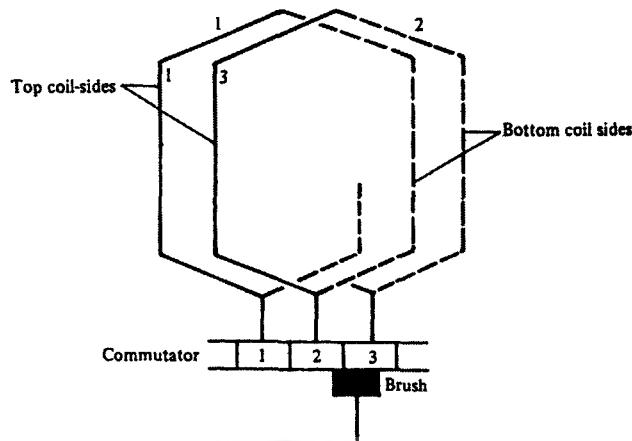
m คือ จำนวนชั้นของการพันชุดลวด

m = 1 Simplex lap ไม่ต่อ

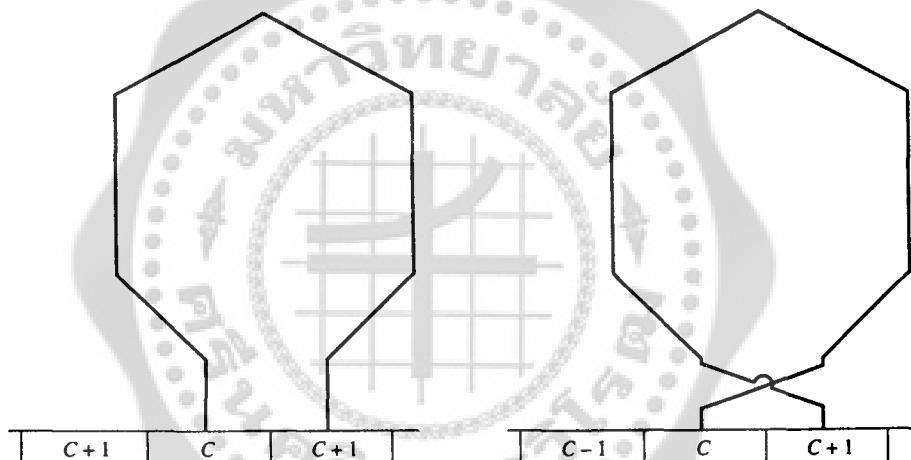
m = 2 Duplex " " "

m = 3 Triplex " " "

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

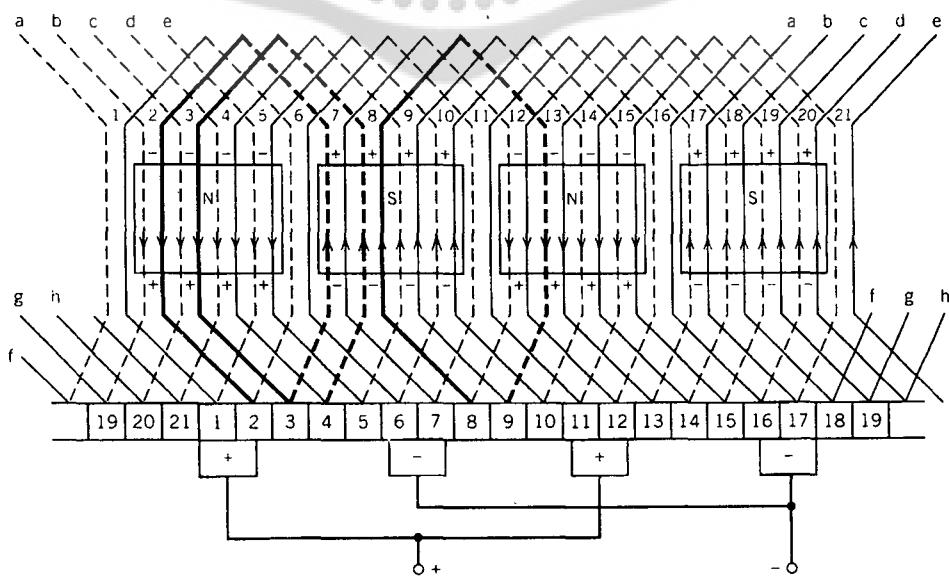


(ก) การลงขดลวดแบบ Lap winding

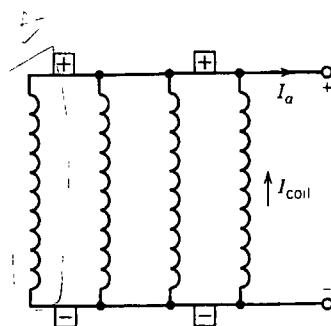


(ห) การพันแบบ Progressive lap winding

(ก) การพันแบบ Reprogressive lap winding



(ล) แผนภาพการพันแบบ Lap winding ของเครื่องจักรกลกระแสตรงชนิด 4 ขั้วแม่เหล็ก



(จ) วงจรสมมูลบวกการพันแบบ Lap winding

รูปที่ 4.14 การพันขดลวดแบบ Lap winding

๔ การพันแบบ Wave winding

high voltage low current

การพันแบบ Wave winding มีข้อแตกต่างไปจากการพันแบบ Lap winding ในส่วนของตัวแหน่งปลายขดลวดที่ต่อ กับชีค่อนนิวเตอเรอร์ โดยที่ ระยะห่างของ Y_c ประมาณ $360^\circ C$ แต่ไม่เท่ากับ $360^\circ C$ ซึ่งการพันที่เรียกว่า Wave winding นั้นเนื่องจากมีการเชื่อมต่อขดลวดจากขดลวดหนึ่งไปเรื่อยๆ ดังเช่น การเคลื่อนที่ของคลื่น

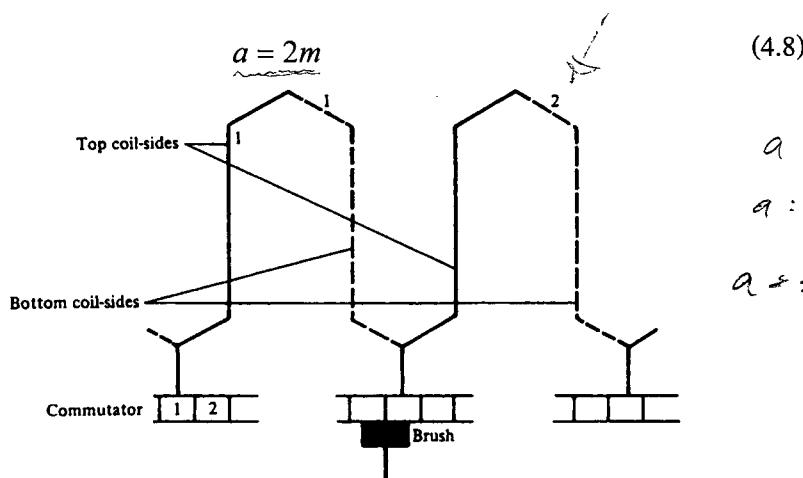
สำหรับสมการทั่วไปที่กำหนดระยะ Y_c ของการพันแบบ Simplex wave winding คือ

$$Y_c = \frac{2(c \pm 1)}{p} \quad (4.7)$$

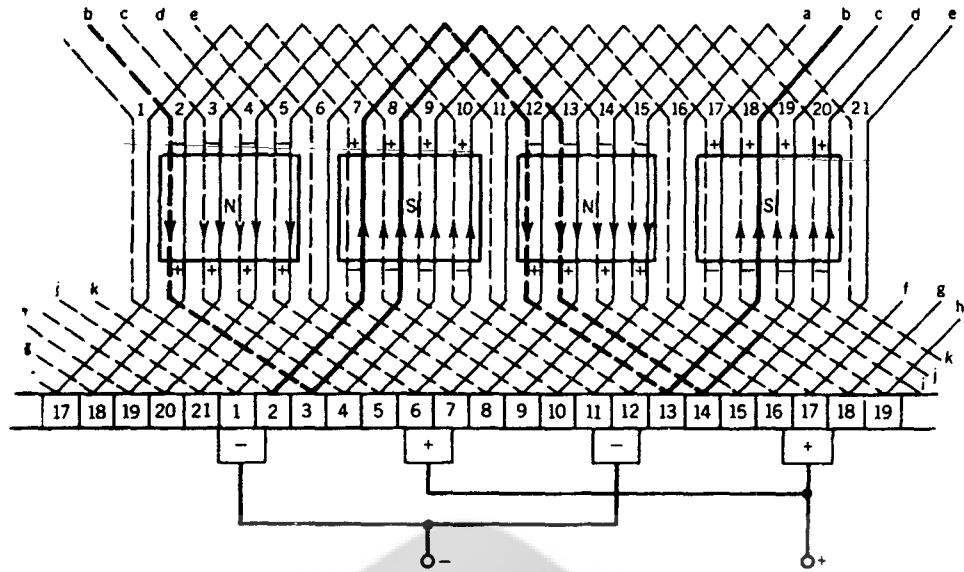
เมื่อ c คือ จำนวนขดลวดบนโรเตอเรอร์

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

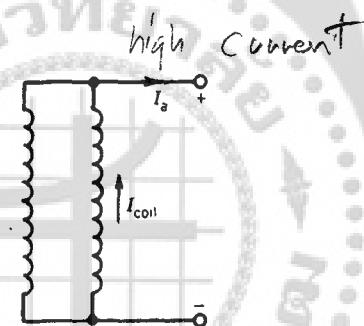
และการพันแบบหลายชั้น (Multiplex wave winding) กำหนดจำนวนทางเดินวงจรนานาได้ดังนี้ คือ



(ก) การลงขดลวดแบบ wave winding



(a) แผนภาพการพันขดลวดแบบ wave winding ของเครื่องจักรกลกระแสตรงชนิด 4 ขั้วแม่เหล็ก



(b) วงจรสมมูลย์การพัน winding แบบ wave

รูปที่ 4.15 การพัน winding แบบ Wave

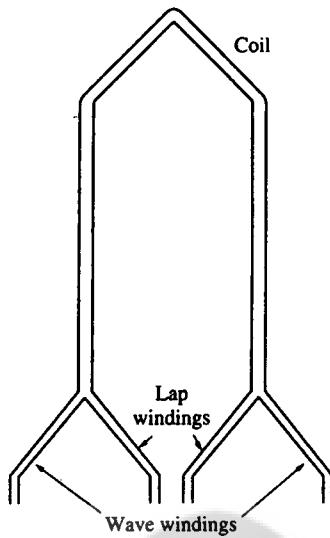
จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ วิธีการพันแบบ Wave winding นั้นสามารถสรุปได้ คือ การพันลักษณะดังกล่าวจะมีจำนวนทางเดินวงจรขนาด (a) เท่ากับจำนวนแปรรูปถ่าน นั่นคือ เท่ากับ 2 สำหรับกรณีพันแบบ Simplex wave winding และเท่ากับ $2m$ สำหรับแบบ Multiplex wave winding

การพันแบบ Frog-lag winding

การพันแบบ Frog-lag winding หรือ Self-equalizing winding มีรูปร่างของขดลวดดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นการรวมการพันแบบ Lap winding และ Wave winding เข้าด้วยกัน ดังนั้นจำนวนวงจรขนาดกำหนดได้ดังนี้คือ

$$a = 2pm_{(lap)} \quad (4.9)$$

โดยที่ p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก และ $m_{(lap)}$ คือ จำนวนชั้นของการพันแบบ Lap winding



รูปที่ 4.16 การพันขดลวดแบบ Frog-lag winding

4.2.4 แรงดันอาร์เมเจอร์ (Armature Voltage)

การพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวด(coil) กำหนดได้จากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงเชื่อมโยง(flux linkage) ตามกฎของ Faraday หรือโดยตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งทั้งสองวิธีการทำให้ได้แรงดันที่อาร์เมเจอร์เข่นเดียวกัน สำหรับรูปคลื่นของแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวด (turn) แสดงไว้ดังรูปที่ 4.9 (ข) และเนื่องจากขดลวดทำจาก 2 ตัวนำ ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำ a-b ที่คำนวณได้จากสมการ (4.1) กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$e_t = 2B(\theta)l\omega_m r \quad \text{ดูมโนที่ 4.9 ตอนที่ 2} \quad (4.10)$$

เมื่อ 1 คือ ความยาวของตัวนำในสล็อตของอาร์เมเจอร์ ดูมโนที่ 4.9

ω_m คือ ความเร็วทางกล

$\frac{\text{รอบ}}{\text{นาที}} = 2$

r คือ ระยะทางของตัวนำจากจุดศูนย์กลางของอาร์เมเจอร์ (รัศมีอาร์เมเจอร์)

ดังนั้น แรงดันเหนี่ยวนำเฉลี่ยของขดลวดตัวนำ (turn) คือ

$$\bar{e}_t = 2 \overline{B(\theta)} l \omega_m r \quad (4.11)$$

เมื่อ ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กต่อข้าว

$$A \quad \text{คือ พื้นที่หน้าตัดต่อข้าว} = \frac{2\pi rl}{p}$$

นั้นคือ

$$\overline{B(\theta)} = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi P}{2\pi rl} \quad (4.12)$$

จากสมการ (4.11) และ (4.12) แรงดันเหนี่ยวนำเฉลี่ยในขดลวดตัวนำ (turn) ใหม่ คือ

$$\bar{e}_t = \frac{\phi p}{\pi} \omega_m \quad (4.13)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันเฉลี่ยที่ข้าวาร์เมเจอร์ E_a ที่ได้จากแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ ทั้งหมด ซึ่งต่ออนุกรมกันสำหรับหนึ่งทางเดินวงจรขนาดที่วัดคร่อมข้าวแปรรูปถ่านกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$E_a = \frac{N}{a} \bar{e}_t \quad (4.14)$$

โดยที่ N คือ จำนวนตัวนำทั้งหมดในขดลวดอาร์เมเจอร์

a คือ จำนวนทางเดินวงจรขนาด

จากสมการ (4.13) และ (4.14) แรงดัน E_a คือ

$$K_a = \frac{Np}{\pi a}$$

$$E_a = \frac{Np}{\pi a} \phi \omega_m \quad \text{คงท}$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m$$
(4.15)

เมื่อ K_a คือ ค่าคงที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และถ้ากำหนดให้

$$E = 2 \text{ cm} \quad K_a = \frac{(2 \text{ cm}) P}{2 \pi a} \quad K_a = \frac{Np}{\pi a} \quad (4.16)$$

หรือ

$$K_a = \frac{Np}{\pi a} \quad K_a = \frac{Zp}{2\pi a} \quad (4.17)$$

โดยที่ Z คือ จำนวนตัวนำทั้งหมดในขดลวดอาร์เมเจอร์

สมการแรงดันเหนี่ยวนำข้างต้นนั้นสามารถใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้าโดยที่ในกรณีที่เครื่องจักรกลทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น เรียกว่าแรงดันที่สร้างขึ้น (generated voltage) และถ้าทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า เรียกว่า แรงดันต้านกลับ (back emf)

4.2.5 แรงบิดที่สร้างขึ้น หรือแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

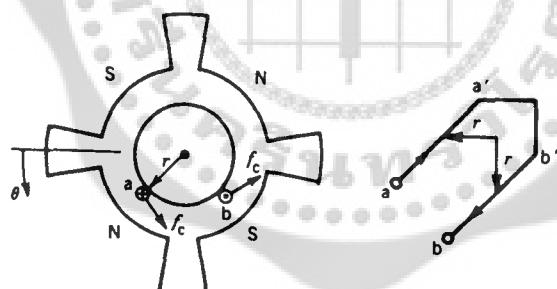
(Developed or Electromagnetic Torque)

สำหรับแรงบิดที่สร้างขึ้นในอาร์เมเจอร์ (จากหลักการผ่านกระแสเข้าไปยังชุดลวดอาร์เมเจอร์ที่วางในสนามแม่เหล็กซึ่งถูกสร้างขึ้นจากสเตเตอร์) สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธีด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการที่ง่ายที่สุดคือการวิเคราะห์ตามหลักการของ Lorentz force ดังสมการที่ (4.2) เมื่อพิจารณาชุดลวดตัวนำ (turn) aa' , bb' ตามรูปที่ 4.17 ตัวนำสองคือ aa' และ bb' ถูกวางภายใต้ข้อแม่เหล็กหักสองที่ใกล้กัน ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำคือ

$$f_c = B(\theta) i_c l \frac{I_a}{a} \quad (4.18)$$

เมื่อ i_c คือ กระแสในตัวนำของชุดลวดอาร์เมเจอร์

I_a คือ กระแสที่ข้าวอาร์เมเจอร์



รูปที่ 4.17 การเดินแรงบิดในเครื่องจักรกลกระแสตรง

โดยที่ แรงบิดที่เกิดขึ้นโดยตัวนำ กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$T_c = f_c r \quad (4.19)$$

และแรงบิดเฉลี่ยที่สร้างขึ้น คือ

$$\bar{T}_c = \overline{B(\theta)} l \frac{I_a}{a} r \quad (4.20)$$

จากสมการ (4.12) และ (4.20) แรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็ก T_e คือ

$$\bar{T}_c = \frac{\phi p I_a}{2\pi a} \quad (4.21)$$

โดยที่แรงบิดที่สร้างขึ้นจากตัวนำหั้งหมุดในคลัวอาร์เมเจอร์จะมีทิศทางเดียวกันทำให้ได้แรงบิดเฉลี่ยที่สร้างขึ้นโดยอาร์เมเจอร์ ดังนั้น ผลรวมของแรงบิดที่สร้างขึ้น กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$T_e = 2N\bar{T}_c \quad (4.22)$$

จากสมการ (4.21) และ (4.22) จะได้

กฎของ Torque

$$T_e = \frac{N\phi p}{\pi a} I_a = K_a \phi I_a \quad (4.23)$$

สำหรับกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในกริยามอเตอร์ กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต ($E_a I_a$) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับกำลังทางกล ($T_e \omega_m$) และเช่นเดียวกันถ้าเครื่องจักรกลทำงานในกริยาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังทางกลที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (4.15) และ (4.23) สรุปได้ว่า

กฎของ Power

$$E_a I_a = K_a \phi \omega_m I_a = T_e \omega_m \quad (4.24)$$

กฎของ Power

4.2.6 เส้นโค้งการทำแม่เหล็กของเครื่องจักรกลกระแสตรง

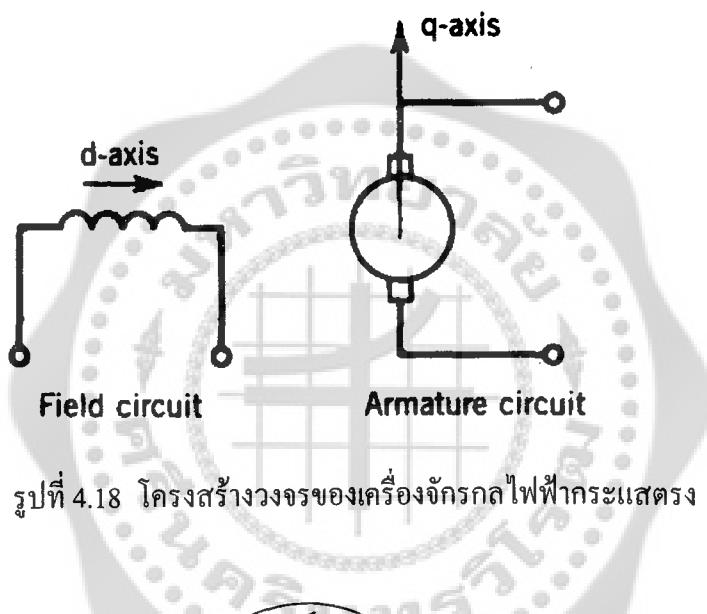
(Magnetization curve of a DC. Machine)

เครื่องจักรกลกระแสตรงมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ วงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ โดยที่ mmf ที่เกิดจากหั้งสองวงจรตั้งจากกัน สำหรับ mmf ที่เกิดจากวงจรสนามและ mmf ที่เกิดจากวงจรอาร์เมเจอร์จะเกิดขึ้นตามแนวแกน d และ q ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 สำหรับเส้นแรงแม่เหล็กต่อข้อของเครื่องจักรกลไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับค่า แอมเปอร์ - รอบ F_p ที่เกิดจากคลื่วสนามหนึ่งชุดหรือมากกว่าที่วงบนขึ้นแม่เหล็ก และค่าความต้านทานแม่เหล็ก ฉ สำหรับรูปที่ 4.19 (ก) แสดงวงจรแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 2 ขึ้นแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงเคลื่อนที่ผ่านขึ้นแม่เหล็ก \rightarrow ช่องอากาศ \rightarrow ชีวโรเตอร์ \rightarrow แกนโรเตอร์ \rightarrow ชีวโรเตอร์ \rightarrow ช่องอากาศ และ ขึ้นแม่เหล็ก ที่อยู่ตรงกันข้ามแล้วกลับมาซึ้งตำแหน่งเริ่มต้นโดยผ่านโครงสร้างเตตอเร่(yoke)ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และวงจรสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 4.19 (ข)

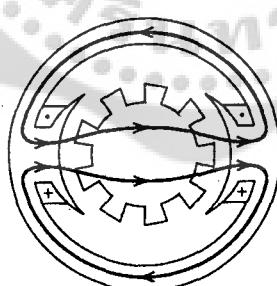
$P_h = T_{in} \omega_m \quad \rightarrow \quad P_{out} = T_{out} \omega_m$

เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ในช่องอากาศภายในขั้วแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก F_p (เกิดจากกระแสกระแสตุ้นคลอดวน) ของขดลวด (coil) แต่ละขั้วแม่เหล็ก จะมีที่เดินแรง ϕ มีค่าต่างนี้ความชាបซึ่งของสารแม่เหล็กอาจเป็นอนันต์ ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเป็นศูนย์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละขั้วกำหนดได้ดังนี้ คือ

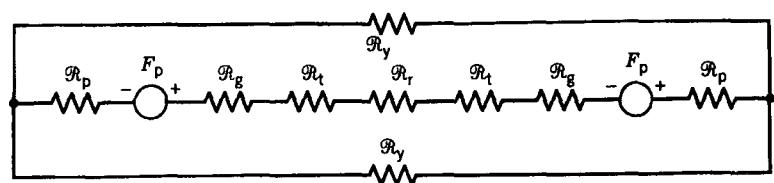
$$\begin{aligned} \tau_{sh} &= \frac{F_p}{R_g} \\ \phi &= \frac{2F_p}{2R_g} = \frac{F_p}{R_g} \end{aligned} \quad (4.25)$$



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



(ก) ภาพส่วนตัด

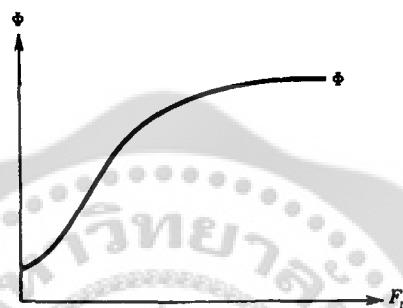


(ข) วงจรสมมูล

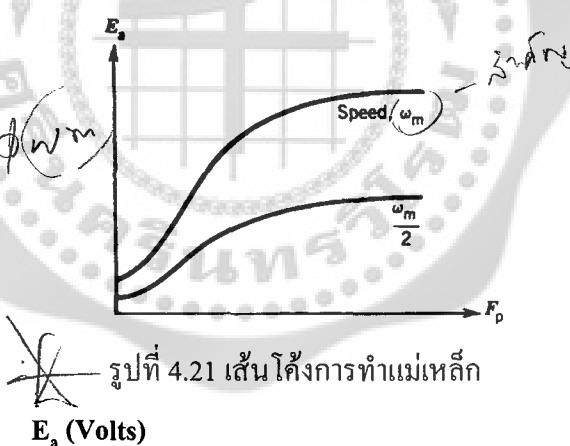
รูปที่ 4.19 วงจรแม่เหล็ก

R_y คือ ค่าของ R_y ตาม York (Phamee)

ถ้า F_p เพิ่มขึ้น ϕ จะเพิ่มขึ้นตามและเกิดการอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็กในส่วนซี่โรเตอร์ (rotor teeth) รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง F_p กับเส้นแรง ϕ และจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคงอยู่ (residual flux) และแรงดันเหนี่ยวนำในชุดลวดอาร์เมเจอร์เป็นสัดส่วนกับเส้นแรงที่ความเร็วคงที่ ดังสมการ (4.15) สำหรับรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง F_p กับ E_a ที่ความเร็วค่าต่างๆ และรูปที่ 4.22 คือเส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน E_a กับกระแส I_f โดยทดสอบที่ความเร็ว 1000 rpm

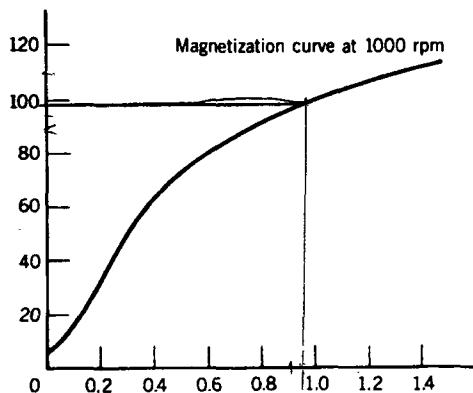


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรง และ mmf ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.21 เส้นโค้งการทำแม่เหล็ก

E_a (Volts)



I_f (amps)

รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบเส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่ความเร็ว 1000 rpm

4.2.7 ปัญหานี้ของจากการคอมมิวเตชันในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แท้จริง

(Problems with commutation in Real Machines)

การแก้ปัญหาขบวนการคอมมิวเตชั่น ในทางปฏิบัตินั้นจะทำได้ไม่ง่ายนัก ซึ่งผลกระทบของขบวนการคอมมิวเตชั่นเกิดจาก 2 ประการหลัก ๆ ด้วยกัน คือ

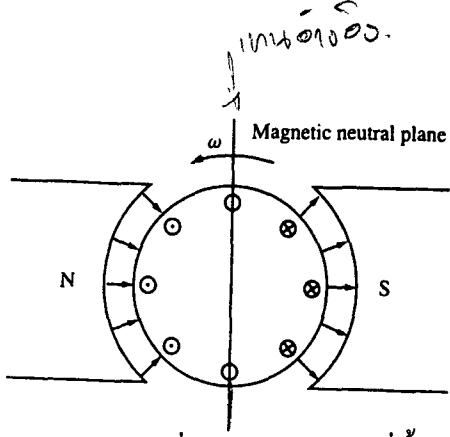
1. สนามแม่เหล็กstaticท้อนจากอาร์เมจเจอร์ (Armature reaction)
 2. ผลกระทบเพื่องจากแรงดัน $L \frac{di}{dt}$

ສານມາແມ່ເຫລືກສະຫວັນຈາກອາຮ່ເມເຈອ່

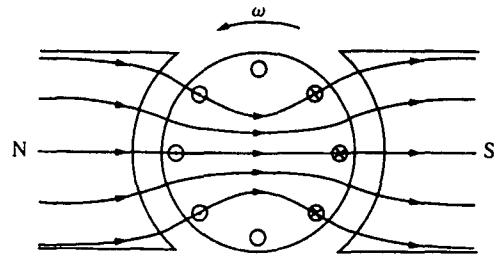
เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับบัดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรกลกระแสตรงและการหมุนของโรเตอร์เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังทางกลภายนอก ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำโรเตอร์ แรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวจะผ่านชุดเรียงกระแสทางกลทำให้ได้แรงดันເອົາພຸດ ถ้าต่อໂຫລດเข้ากับข้อของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำให้มีกระแสไฟ流ผ่านบัดลวดอาร์ເມເຈ່ອຮູ່້ซึ่งทำให้เกิดสร้างสนามแม่เหล็กในบัดลวดและสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไปปลดທອນ สนามแม่เหล็กหลักที่เกิดจากข้อแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้า การลดທອນของเด็นแรงแม่เหล็กดังกล่าว เรียกว่า สนามแม่เหล็กສະຫຼຸບທຸນຈາກອຣັມເຈ່ອຮູ່້ (are mature reaction)

สำหรับปัญหาแรกของการเกิดสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเนจอร์ ได้แก่ การเลื่อนของเส้นแรงแม่เหล็กไปจากแนวปกติ (magnetic neutral-plane shift) แนวปกติของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic neutral plane) กำหนดจากขอบเขตภายในเครื่องจักรกลบจะที่ตัวนำซึ่งวางบนโรเตอร์ข้างกับแนวการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux lines) ทำให้แรงดันหนึ่งยวนำของตัวนำภายในแนวดังกล่าวเท่ากับศูนย์ ดังแสดงรายละเอียดรูปที่ 4.23 ขณะเกิดการเลื่อนของเส้นแรงแม่เหล็กไปจากแนวปกตินั้น ทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างซี่คอมมิวเตอร์โดยแบ่งค่านี้เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ผ่าน ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมเท่ากับศูนย์

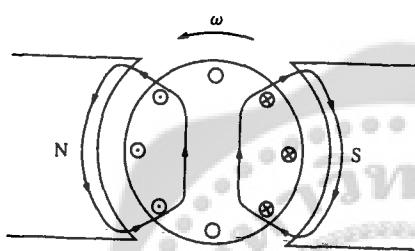
บทที่ ๑๐



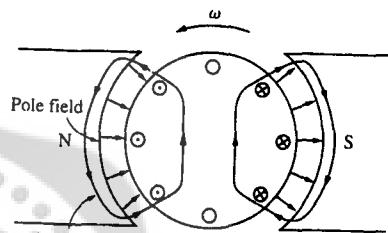
(ก) จุดเริ่มต้นของเส้นแรงที่ข้าว



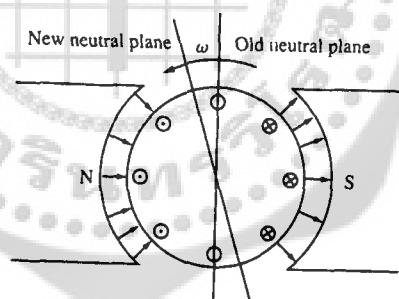
(ข) ผลกระทบของเส้นแรงที่กระหายในช่องอากาศ



(ค) ผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์ขณะต่อโหลด



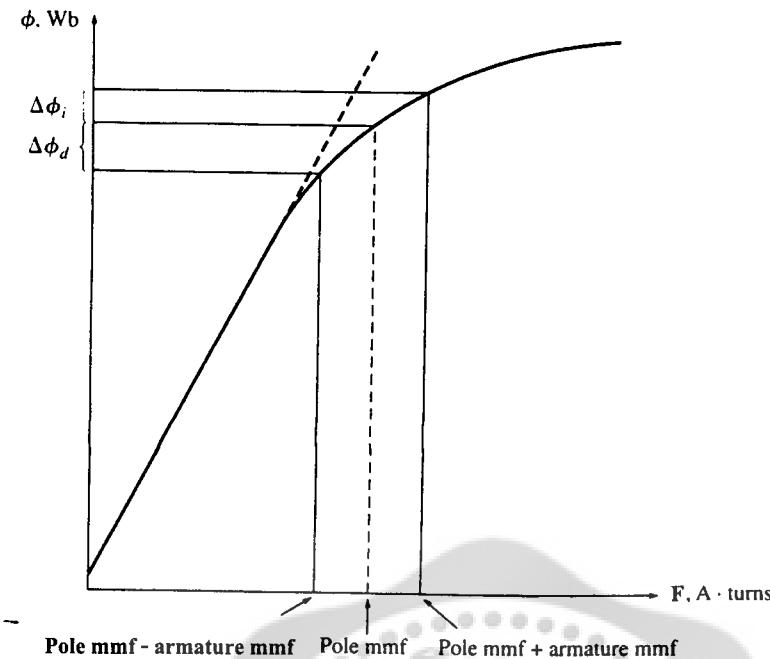
(ง) เส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์และข้าวแม่เหล็กประกอบด้วยส่วนที่เสริมและหักล้าง



(จ) ผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กภายใต้ข้าวแม่เหล็กหัก

รูปที่ 4.23 การเกิดสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์ในเครื่องจักรกลกระแสตรง

ปัญหาข้อที่ 2 เมื่อออกจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์ เกิดจาก flux weakening และพุ่ม flux weakening อธิบายได้ตามรูปที่ 4.24



$\Delta\phi_i$ คือ การเพิ่มขึ้นของเส้นแรงเนื่องจาก rotor mmf เสริมกับ pole mmf

$\Delta\phi_d$ คือ การลดลงของเส้นแรงเนื่องจาก rotor mmf หักด้านกับ pole mmf

รูปที่ 4.24 เส้นโค้งการทำแม่เหล็กจากผลกระทบของการอิ่มตัวนีองจากเส้นแรงแม่เหล็ก
ขณะ rotor mmf ของโรเตอร์และ pole mmf รวมกัน

สำหรับรูปที่ 4.24 สามารถแสดงความสัมพันธ์โดยการพิจารณาสมการ ได้ตามสมการ(4.26)
ในรูปกระแทกที่เป็นผลกระทบของสนามแม่เหล็กสะท้อนจากการเมืองเจอร์

$$I_f^* = I_{f(actual)} - I_{f(AR)}$$

(4.26)

↑ หมายเหตุ รูป 1/10 คูณ
↓ ดู

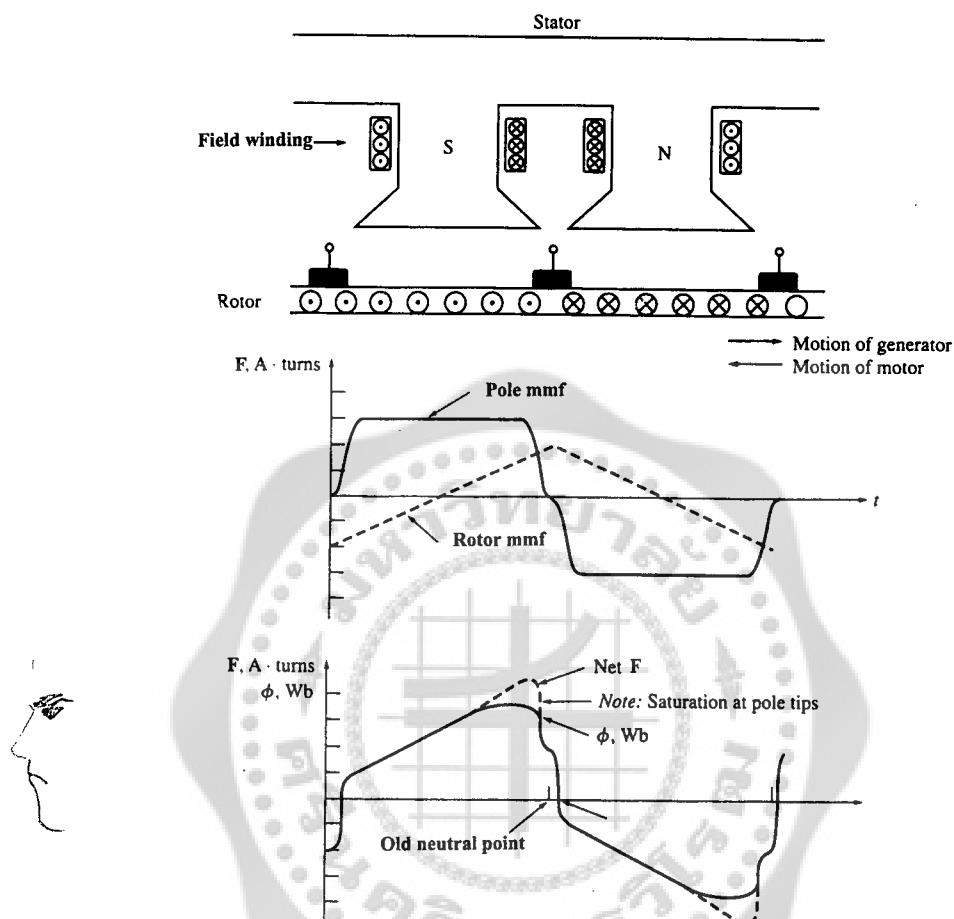
โดยที่ I_f^* คือ กระแสประสีทชิผล

$I_{f(actual)}$ คือ กระแสจริง

$I_{f(AR)}$ คือ กระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากการเมืองเจอร์

เมื่อกล่าวถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงาน ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงจะมีค่าใกล้
กับอิ่มตัว (saturation point) ดังนี้ ที่ตำแหน่งบนผิวน้ำขึ้นแม่เหล็กขณะ rotor mmf เสริมกับ pole
mmf ซึ่งทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ตำแหน่งบนผิวน้ำขึ้นแม่เหล็ก ขณะ

rotor mmf , ก้าวเดียว pole mmf ส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงอย่างมาก ดังนั้น ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กภายใต้ขั้วแม่เหล็กทั้งหมดลดลงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 เส้นแรงแม่เหล็กและค่า mmf ภายในเครื่องจักรกระแสตรง

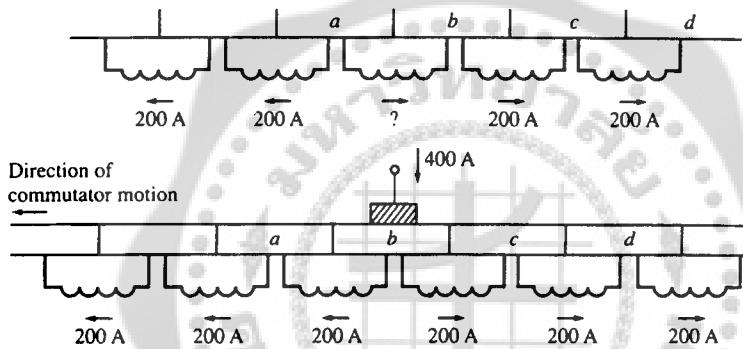
ผลกระทบเนื่องจากแรงดัน $L di/dt$

ปัญหาจากแรงดัน $L di/dt$ เกิดขึ้นขณะซึ่คอมมิวเตเตอร์เกิดการลัดวงจร โดยแบ่งถ่านบางครั้งเรียกว่า inductive kick สำหรับรูปที่ 4.26 เป็นการอธิบายปัญหาที่มีผลกระทบจากแรงดัน $L di/dt$ เมื่อสมมุติให้กระแสไฟลในแบ่งถ่าน 400 A และกระแสในแต่ละส่วนเท่ากัน 200 A ในขณะเกิดการลัดวงจรระหว่างซึคอมมิวเตเตอร์นี้ ส่งทำให้กระแสที่ไฟลผ่านซึคอมมิวเตเตอร์ไฟลกลับทิศทาง ถ้าสมมุติว่าเครื่องจักรกลหมุนที่ความเร็ว 8 rpm และจำนวนซึคอมมิวเตเตอร์ไฟล 50 โดยซึคอมมิวเตเตอร์ แต่ละส่วนเคลื่อนที่ภายใต้แรงดัน $I = 0.0015$ วินาที ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างช่วงเวลาดังกล่าวซึ่งเกิดการลัดวงจรคือ

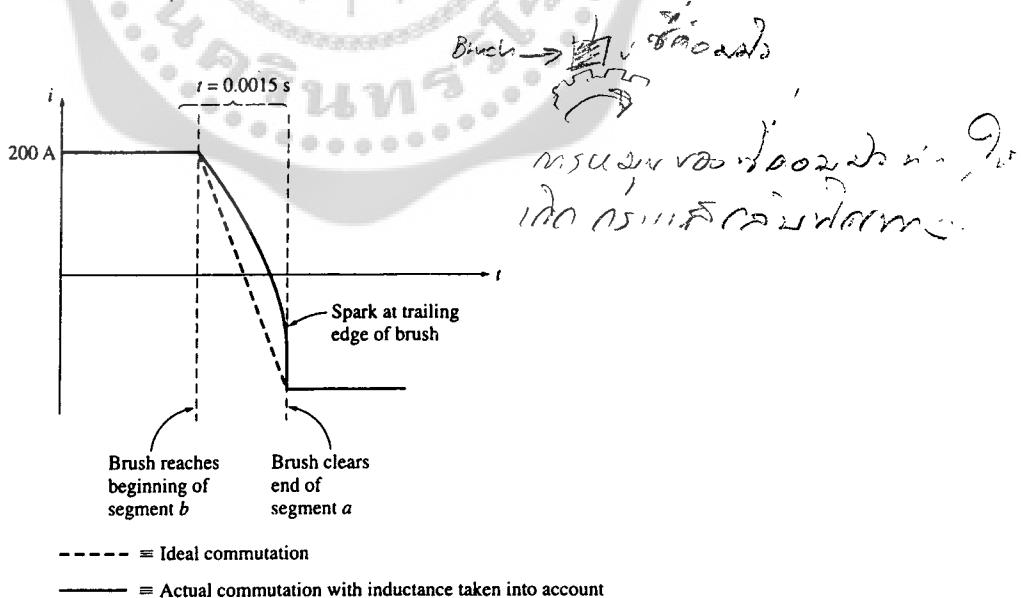
$$\frac{di}{dt} = \frac{400A}{0.00155} = 266,667 A/s$$

สำหรับ inductie voltage kick ($v = L di/dt$) นั้น จะเห็นว่านำเข้าและซึ่งคอมมิวเตเตอร์ลัควงจร ซึ่งแรงดันดังกล่าวมีค่าสูงและทำให้เกิดการสปาร์คที่แปลงถ่านของเครื่องจักรกลและจากรูปที่ 4.26 (ข)นั้นในทางอุดมคติการเปลี่ยนแปลงของกระแสสำหรับบนการคอมมิวเตชั่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเชิง เซ่น แต่โดยแท้จริงแล้วนั้นการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากสาเหตุสองประการ คือ เช่นเดียวกับการอาร์คเนื่องจากการเคลื่อนของเส้นเร่งไปจากแนวปกติ

1. ความหนึ่งเดียวของขดลวด (Coil inductance) ทำให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดการหน่วง
2. แรงดันรีแอคเตนซ์ (Reactaner voltage) ซึ่งหนึ่งเดียวในขดลวดมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดเกิดการหน่วง



(ก) การกลับทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวดภายใต้การคอมมิวเตชั่น



(ข) การกลับทิศของกระแสภายใต้การคอมมิวเตชั่นในฟังก์ชันเวลา

รูปที่ 4.26 ขบวนการคอมมิวเตชั่น

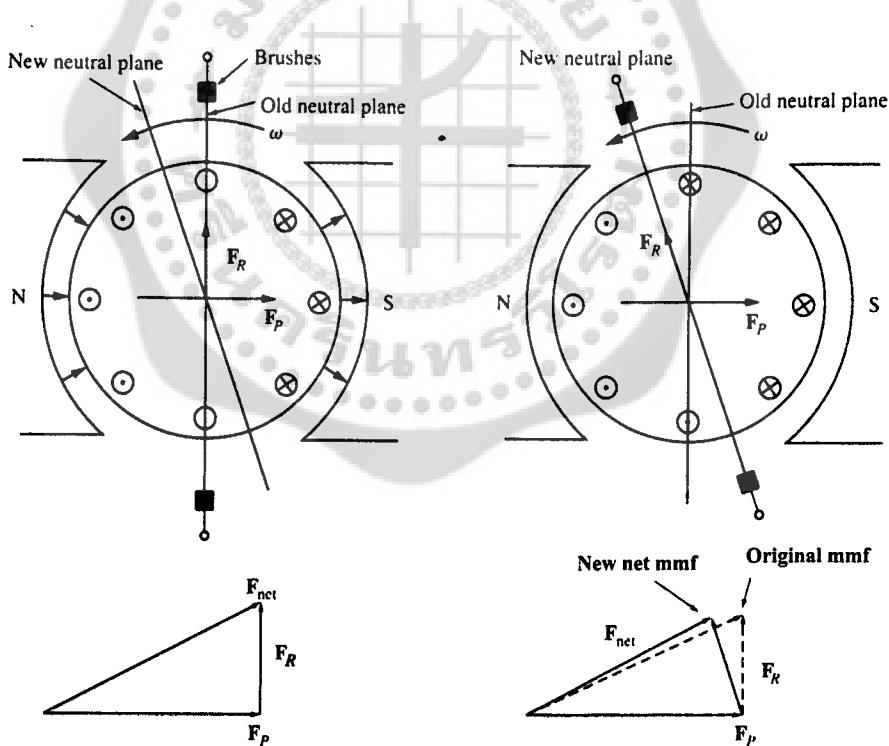
การแก้ปัญหานี้องจากสنانแม่เหล็กจะหันจากอาร์เมเจอร์และแรงดัน ($v = L di/dt$) ทำได้ดังนี้

1. การเลื่อนแปรงถ่าน (Brush shifting)
2. ใช้ขั้วคอมมิวเตเตอร์หรือขั้วแทรก (Commutating poles or interpoles)
3. ใช่ขดลวดชดเชย (Compensating windings)

การเลื่อนแปรงถ่าน

การเลื่อนแปรงถ่านเพื่อให้การสปรักหมุดไปเป็นการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการนี้ส่วนใหญ่ใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็ก เหตุผลของการแก้ปัญหาด้วยวิธีการนี้มีสองประการด้วยกัน คือ

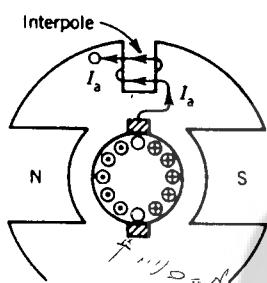
1. เพื่อให้ rotor mmf (F_R) มีองค์ประกอบทางเวคเตอร์ตรงข้ามกับ pole mmf (F_p) ที่เกิดขึ้นอยู่เดิม ดังรูปที่ 4.27
2. การเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์ทำให้เส้นแรงกระจายอย่างสม่ำเสมอของแม่เหล็ก



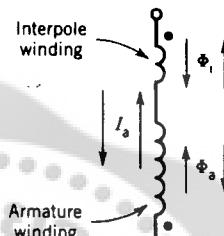
(ก) ผลรวมของ mmf ในเครื่องจักรกลกระแสตรง (ข) ผลรวมของ mmf ในเครื่องจักรกลกระแสตรง
ขณะแปรงถ่านอยู่ในแนวตรง ขณะมีการเลื่อนของแปรงถ่าน

รูปที่ 4.27 การเลื่อนของแปรงถ่าน

การปรับปรุงและแก้ไขปัญหานี้องจากขั้นตอนการคอมมิวเตชัน โดยการใส่ขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ เรียกว่าขั้วแทรกหรือขั้วคอมมิวเตอร์ดังรูปที่ 4.28 (ก) เมื่อกระแสอาร์เมเจอร์ไหลผ่านขดลวดตัวนำ ดังรูปที่ 4.28 (ก) จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดทั้งสองที่มีทิศทางตรงข้ามกัน สร้างผลทำให้ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์ และถ้ากระแสอาร์เมเจอร์กลับทิศทางกระแสที่ไหลงนั้น ขั้วแทรกจะกลับทิศทางด้วยเช่นกัน และทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองยังคงมี ทิศทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 4.28 (ข)



(ก) ตำแหน่งขั้วแทรก

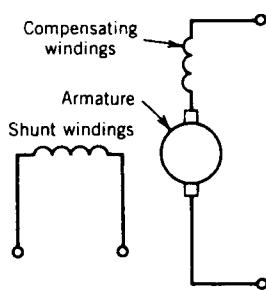


(ข) ทิศทางของเส้นแรงและกระแส

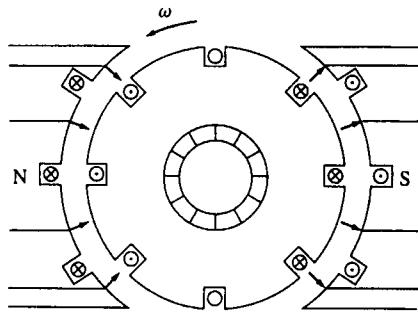
รูปที่ 4.28 การใส่ขั้วแทรกในเครื่องจักรกลกระแสตรง

ขดลวดชดเชย

การแก้ปัญหานามแเม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์อีกวิธีการหนึ่ง คือการใส่ขดลวดชดเชย อนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ มันทำให้เกิด mmf ที่เป็นสัดส่วนกับ mmf ที่อาร์เมเจอร์ ดังรูปที่ 4.29 (ก) และเมื่อมีกระแสไฟ流ผ่านขดลวดชดเชยจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งมี ทิศทางตรงข้ามกับ mmf เนื่องจากอาร์เมเจอร์ สำหรับรูปที่ 4.29(ข), 4.29(ค) และ 4.29(ง) แสดงผล ของการใส่ขดลวดชดเชยในเครื่องจักรกลกระแสตรงซึ่งรูปที่ 4.29(ข) แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่ข้า นี่องจากกระแสไฟ流ผ่านตัวมันเอง ส่วนรูปที่ 4.29(ค) แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์ และ นี่องจากขดลวดชดเชย และรูปที่ 4.29(ง) แสดงผลรวมของเส้นแรงทั้งหมด โดยเท่ากับเส้นแรงที่ข้า แม่เหล็กเดิมเนื่องจากตัวมันเอง

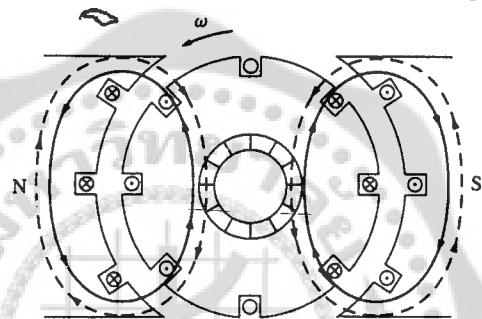


(ก) การต่อขดลวดชดเชย

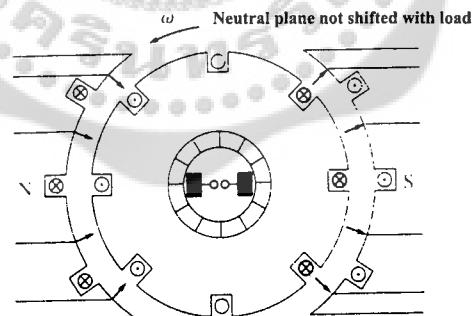


(บ) เส้นแรงแม่เหล็กที่ขึ้นในเครื่องจักรกล

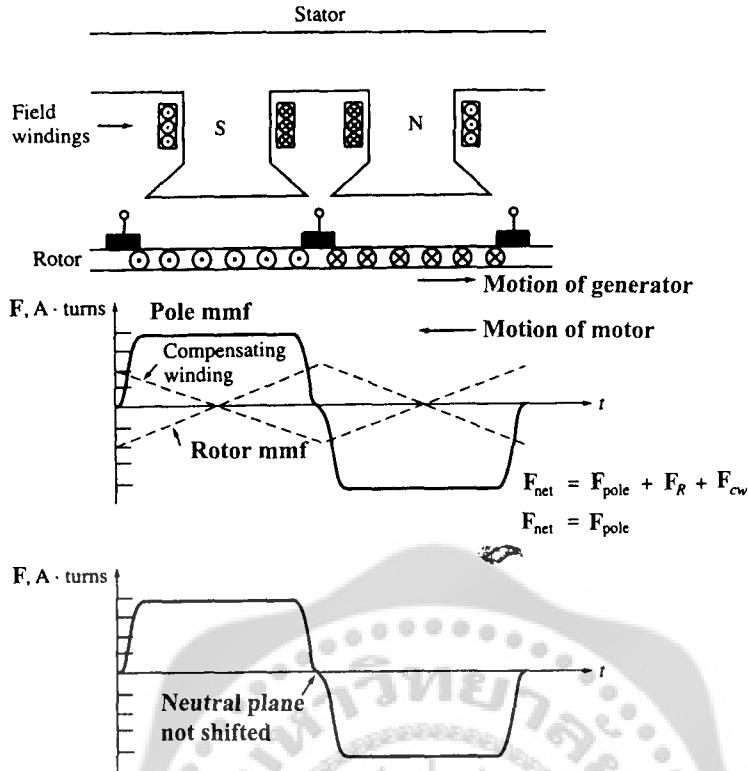
Rotor (armature) flux - - - Flux from compensating windings



— เส้นแรงจากโรเตอร์ - - - เส้นแรงจากขดลวดชดเชย
(ค) เส้นแรงแม่เหล็กจากอาร์เมเมเจอร์และขดลวดชดเชย



(ง) ผลกระทบของเส้นแรงในเครื่องจักรกลไฟฟ้า
รูปที่ 4.29 ผลลัพธ์จากการใส่ขดลวดชดเชย



รูปที่ 4.30 เส้นแรงแม่เหล็กและ mmf ของเครื่องจักรกลกระแสตรงเมื่อใช้ค่าคงเดช

4.2.8 กำลังการไฟและการสูญเสียในเครื่องจักรกลกระแสตรง (Power Flow and Losses in DC Machines)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ให้อาตพุตเป็นกำลังทางไฟฟ้าจากการป้อนอินพุตเป็นกำลังทางไฟฟ้า ทั้งสองกรณีนี้กำลังทางอินพุตที่ปรากฏทางด้านอาตพุตของเครื่องจักรกล ไม่เท่ากับอินพุตที่ป้อนเข้า เนื่องจากมีการสูญเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นการพิจารณาประสิทธิภาพของมอเตอร์กำหนดได้ตามสมการ (4.27)

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.27)$$

โดยที่ค่าความแตกต่างระหว่าง P_{in} กับ P_{out} คือ กำลังสูญเสีย (P_{loss}) ที่เกิดขึ้นภายในตัวมัน ดังนั้น

$$\% \eta = \frac{(P_{in} - P_{loss})}{P_{in}} \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \right) \times 100\% \quad (4.28)$$

สำหรับการสูญเสียในเครื่องจักรกลกระแสตรงแบ่งได้ 5 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

1. การสูญเสียเนื่องจากคลวตทองแดง (*Copper losses : $I^2 R$ losses*)
2. การสูญเสียที่แกนเหล็ก (*Core losses*)
3. การสูญเสียที่แบรงค์ต่าน (*Brush losses*)
4. การสูญเสียทางกล (*Mechanical losses*)
5. การสูญเสียเนื่องจากความไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (*Stray load losses*)

การสูญเสียเนื่องจากคลวตทองแดง

การสูญเสียชนิดนี้เกิดขึ้นในบุคลวตอาร์เมเจอร์และบุคลวตสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องขักรกล สามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\text{COPPER LOSS} = P_{Cu} \quad (4.29)$$

(4.29)

$P_a = I_a^2 R_a$

$$P_f = I_f^2 R_f \quad (4.30)$$

(4.30)

การสูญเสียที่แกนเหล็ก

การสูญเสียชนิดนี้เกิดขึ้นจากการสูญเสียเนื่องจากยิสเตอริชีส และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 1

การสูญเสียที่แบรงค์ต่าน

การสูญเสียชนิดนี้เกิดขึ้นจากการสูญเสียที่ต่อกรร่วมแบรงค์ต่านกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$P_{bd} = V_{bd} I_a \quad (4.31)$$

เมื่อ P_{bd} คือ การสูญเสียต่อกรร่วมแบรงค์ต่าน (*Brush drop losses*)

V_{bd} คือ แรงดันต่อกรร่วมแบรงค์ต่าน (*brush voltage losses*) ปกติประมาณ 2 V

การสูญเสียทางกล

การสูญเสียทางกลนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การสูญเสียนอกจากแรงเสียดทานและลมต้าน (Friction and windage losses) สำหรับการสูญเสียจากแรงเสียดทานเกิดจากลูกปืน (Bearing) ในเครื่องจักรกล ขณะที่การสูญเสียนอกจากลมต้านเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างส่วนเคลื่อนที่ (moving parts) ของเครื่องจักรกล กับอากาศด้านในของโครงมอเตอร์ โดยที่การสูญเสีย

ทั้งสองเปรียบความเร็วจากการหมุนเครื่องจักรกลยกกำลังสอง และตัวเปรียบผิวน้ำของตัว
อาร์เมเจอร์สต้าหรับสมการแรงดันที่ขึ้นของมอเตอร์กระแสของชนิดคลาวด์ร่างสานามแม่เหล็ก
ต้องสมกำหนดได้ตามสมการ (4.32)

$$V_f = E_a + I_a(R_a + R_s) \quad (4.32)$$

และความสัมพันธ์ของกระแสที่โหลดในมอเตอร์แสดงได้ดังนี้คือ

$$I_a = I_t - I_f \quad (4.33)$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad (4.34)$$

โดยที่ผลรวมของ mmf และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กประสิทธิผล กำหนดตามสมการ (4.35)

$$F_t = F_f \pm F_{sr} - F_{AR} \quad (4.35)$$

$$I_f^* = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_a - \frac{F_{AR}}{N_f} \quad (4.36)$$

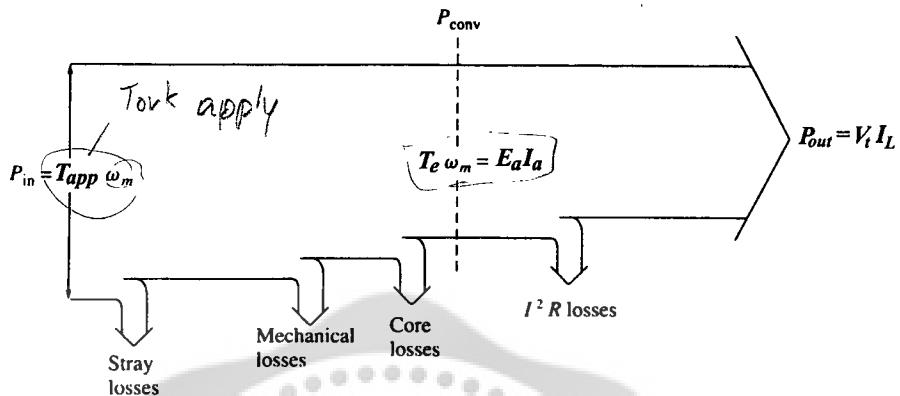
การสูญเสียนี้ของจากความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของ
กระแสไฟฟ้า

ผลกระทบกระแสในตัวอาร์เมเจอร์ จะทำให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B เพิ่มขึ้นที่
ปลายด้านหนึ่งของขั้วแม่เหล็ก และลดลงที่ปลายอีกด้านหนึ่งของขั้วแม่เหล็กพร้อมกันนี้ยังทำให้
ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตัวโรเตอร์ไม่สม่ำเสมอด้วย ดังนั้นค่าการสูญเสียของวงจรแม่เหล็ก
จะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการสูญเสียนิวจาร์แม่เหล็กที่เพิ่ม
ขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กจะเปรียบค่าของกระแสไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์ ซึ่งเป็น
เหตุทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง

ผลกระทบความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแท่งตัวนำของเครื่องจักรไม่สม่ำเสมอ กันอันเกิด
ขึ้นจากการกระแสไฟฟ้าจะเดือดในส่วนที่มีความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด ผลอนันจะทำให้เกิดการ
สูญเสียเพิ่มจาก $I^2 R$ ซึ่งค่าการสูญเสียนี้จะขึ้นกับโหลดอีกเช่นกัน

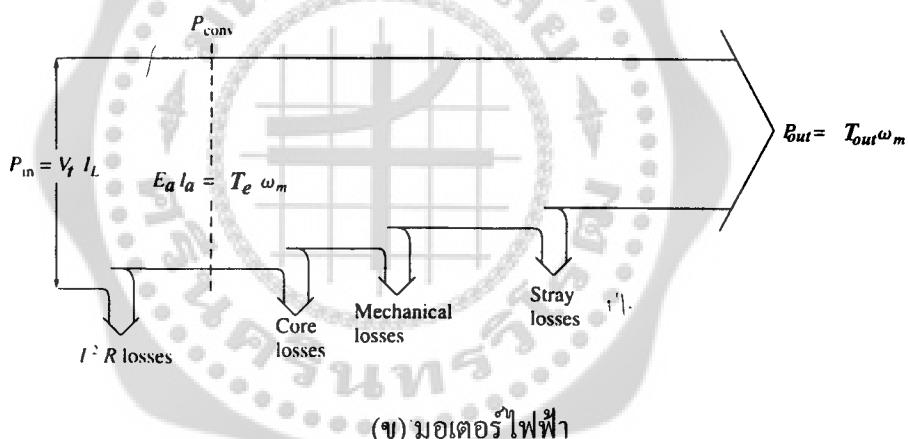
กำลังการไฟฟ้า

สำหรับกำลังของอินพุต กำลังสูญเสียส่วนต่างๆ และกำลังด้านเอาต์พุต ของเครื่องจักรกลทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเป็นมอเตอร์สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์โดยแผนภาพแสดงกำลังการไฟฟ้า ได้ตามรูปที่ 4.31



$\beta_{back} \text{ loss} \approx 9\%$

(ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

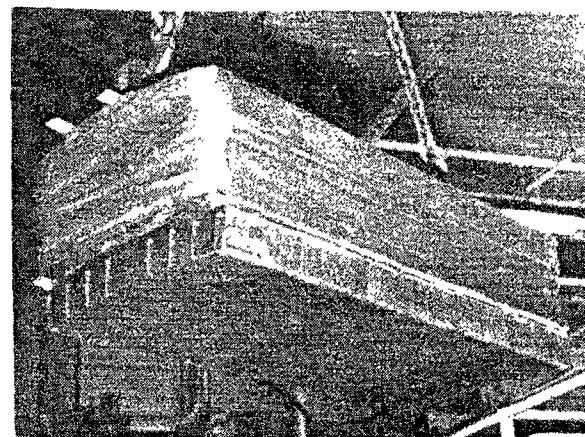


(ข) มอเตอร์ไฟฟ้า

รูปที่ 4.31 กำลังการไฟฟ้าของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.3 ชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (Classification of DC. Machine)

คุณลักษณะสำคัญ รวมถึงสมบัติ และสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อวงจรสนามและวงจราร์เมจเจอร์ การกระตุ้นขึ้นสนามทำได้โดยการต่อขดลวดสนามข้างหน้า (Shunt field winding) และขดลวดสนามอนุกรม (Series field winding) หรือต่อขดลวดทึ้งสองร่วมกัน สำหรับขดลวดสนามข้างหน้าจะมีจำนวนรอบมากทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสอาร์เมจเจอร์ ส่วนขดลวดสนามอนุกรมมีจำนวนรอบน้อยกระแสไฟฟ้าได้มาก



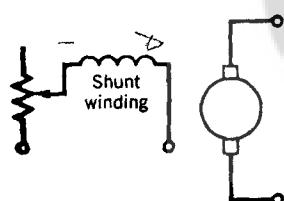
Separate Excit.
by machine

(ก) ชุด漉ดstanamxnan



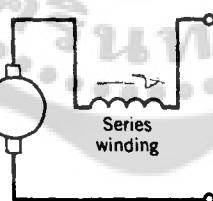
(ข) ชุด漉ดstanamonukromซึ่งพันอยู่ด้านบนของชุด漉ดstanamxnan

รูปที่ 4.32 ลักษณะชุด漉ดstanam

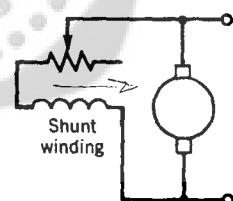


(ก) เครื่องจักรกลกระแสตรง

แบบชุด漉ดstanamแยกกระแสตื้น แบบอนุกรม

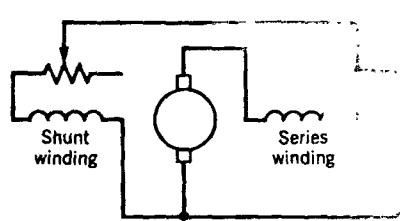
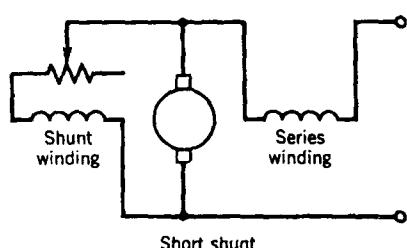


(ข) เครื่องจักรกลกระแสตรง



(ค) เครื่องจักรกลกระแสตรง

แบบชุด漉ดstanam



(ง) เครื่องจักรกลกระแสตรงแบบผสม

รูปที่ 4.33 การต่อชุด漉ดแบบต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลกระแสตรง

จากรูปที่ 4.33 สามารถแบ่งเครื่องจักรกลกระแสตรงตามลักษณะการต่อขดลวดสนามออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ เครื่องจักรกลกระแสตรงชนิดแยกกระแสตื้น และเครื่องจักรกลกระแสตรงชนิดกระแสตื้นด้วยตัวเอง (Self-excited) ที่มีการต่อขดลวดสนาม 3 แบบด้วยกัน ดังรูปที่ 4.33 (ข) (ค) และ (ง)

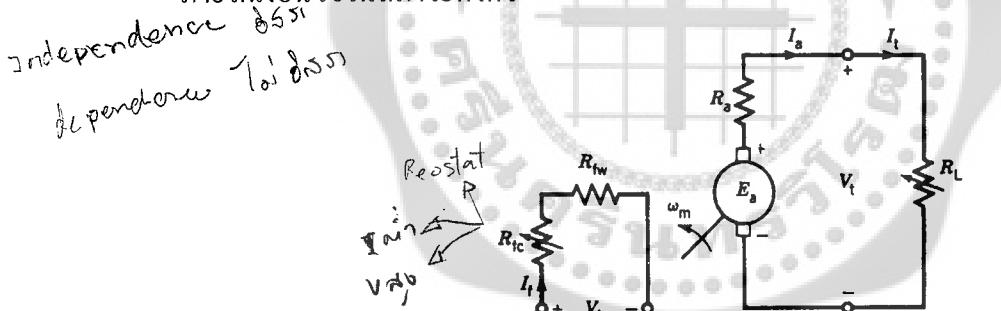
4.3.1 เครื่องกำเนิดกระแสตรง (DC Generators)

เครื่องจักรกลกระแสตรงกรณีทำงานเป็นเครื่องกำเนิดต้องมีตัวต้นกำลัง (prime mover) ขับเคลื่อน เพื่อให้ได้ความเร็วและแรงดันที่ข้อาร์เมเจอร์คงที่ขณะต่ออยู่กับโหลด และสำหรับชนิดของเครื่องกำเนิดนี้ แบ่งได้เป็น 4 ชนิดด้วยกัน คือ

1. เครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตื้น

(Separately Excited DC Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระแสตื้นนี้ ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กถูกต่อแยกออกจากแหล่งจ่ายไฟตรง สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าวนี้จะทำภายใต้เงื่อนไขในสภาวะคงตัว



$$E = JR$$

รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดแบบขดลวดสนามแยกกระแสตื้น

การวิเคราะห์ตามเงื่อนไขในสภาวะคงตัวนี้จะไม่คำนึงถึงผลความหนึ่งของขดลวดสนาม และขดลวดอาร์เมเจอร์ และจากรูปที่ 4.34 กำหนดให้

R_a คือ ความต้านทานวงจรอาร์เมเจอร์

$R_f = R_{fw} + R_{fc}$ คือ ผลรวมของความต้านทานขดลวดสนาม

R_{fw} คือ ความต้านทานขดลวดสนาม

R_{fc} คือ ความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้

R_L คือ ความต้านทานของโหลด

สำหรับการพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมเบรงถ่านนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้กำหนดไว้ให้มีค่าประมาณ $2V$ และสมการเพื่อวิเคราะห์เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระแสตู้นกำหนดได้ดังนี้ คือ

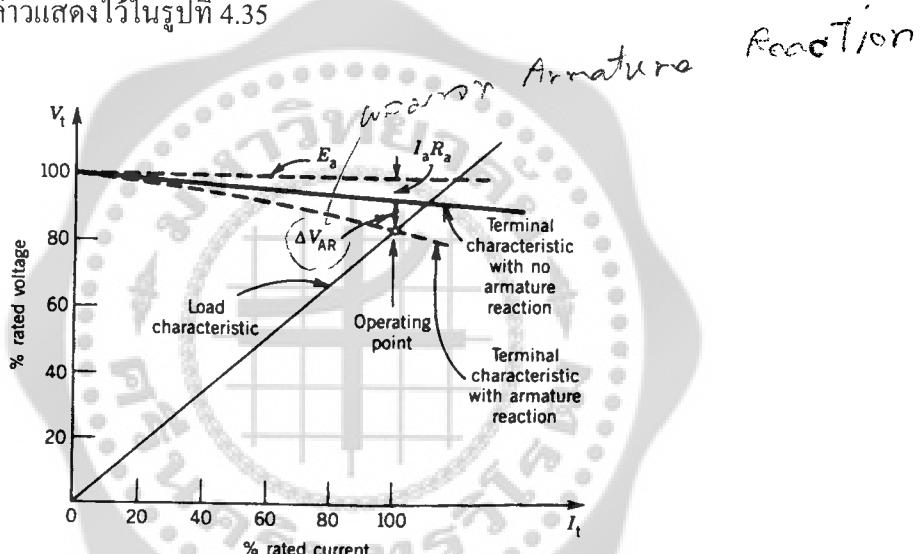
$$\boxed{E_a = V_t + I_a R_a = K_a \phi \omega_m} \quad \text{กันเดอร์ ใจตัวหนังสือ 4.37}$$

$$V_t = I_t R_L \quad (4.38)$$

$$I_a = I_t \quad (4.39)$$

$$V_f = R_f I_f \neq E_a \neq I_a R_a \quad (4.40)$$

สมการ (4.38) จะกำหนดคุณลักษณะที่ขึ้นของเครื่องกำเนิดแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้นโดยที่คุณลักษณะดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 คุณลักษณะที่ขึ้นของเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบแยกกระแสตู้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.35 จะเห็นว่าขณะที่ I_t มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดันที่ขึ้น V_t ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น (สมมุติว่าแรงดัน E_a คงที่) เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อม R_a อย่างไรก็ตามแรงดันตกคร่อม $I_a R_a$ นี้มีค่าไม่สูงมากนัก เพราะว่า R_a มีค่าต่ำ และจุดสำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระแสตู้นั้น คือ ต้องการให้แรงดันที่ขึ้น V_t มีค่าคงที่ในกรณีที่กระแสอาร์เมเจอร์ มีค่าสูงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ขึ้นเท่ากับ ΔV_{AR} นั้นเป็นผลมาจากการนามัยเมืองจากอาร์เมเจอร์ ผลดังกล่าวจะสามารถถabilize ได้ สำหรับกรณีที่กระแสอาร์เมเจอร์ต่ำกว่ากระแสที่พิกัด

จากสมการ (4.39) กำหนดคุณลักษณะเชิงโอลด์ ซึ่งรูปที่ 4.35 นั้นชุดที่มีการกระทำร่วมกันระหว่างคุณลักษณะที่ขึ้นของเครื่องกำเนิดและคุณลักษณะเชิงโอลด์ คำนวณได้จากจุดทำงาน (Operating point) ทำให้รู้ค่า V_t และ I_t

ตัวอย่างที่ 4.2 เครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบขาน ขนาด 12 kW แรงดัน 100 V ความเร็ว rotor 1000 rpm. มีค่าความต้านทาน $R_a = 0.1 \Omega$ $R_{fw} = 80 \Omega$ และ $N_f = 1200$ รอบต่อขั่ว และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่พิกัดเท่ากับ I_f คุณลักษณะเด่น โถงการทำแม่เหล็กที่ความเร็ว 1000 rpm แสดงดังรูปที่ 4.24 ถ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดกระแสตรงชนิดขาดลวดสนามแยกกระแสตื้น ความเร็วของการหมุน 1000 rpm ที่พิกัดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก คงค่านิวนัฒนา

- (ก) แรงดันที่ขั่วขณะโหลดเต็มพิกัดและไม่คิดผลของสนามแม่เหล็กจะห้อนจากอาร์เมเจอร์
 (ข) ถ้าคิดผลของสนามแม่เหล็กจากอาร์เมเจอร์ ขณะโหลดเต็มพิกัดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

$$I_f = 0.06 \text{ A} \text{ คงค่านิวนัฒนา}$$

(1) แรงดันที่ขั่วขณะขับโหลดเต็มพิกัด

$$\left. \begin{array}{l} E_a \\ V_t \end{array} \right\} \text{vt จ.ต.ง.นิตย.} \quad \text{(2) กระแส } I_f \text{ ที่ทำให้แรงดัน } V_t = 100 \text{ V } \text{ ภายใต้เงื่อนไขขณะขับโหลดเต็มพิกัด} \\ E_a = 100 \Omega$$

วิธีทำ จากโจทย์กำหนดข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังนี้ คือ

$$\text{พิกัดกำลังที่อาร์เมเจอร์} \quad P_a = 12 \text{ kW}$$

$$\text{พิกัดแรงดันที่อาร์เมเจอร์} \quad E_a = 100 \text{ V}$$

$$\text{พิกัดกระแสอาร์เมเจอร์} \quad I_a = 12 \times 10^3 / 100 \text{ A} = 120 \text{ A}$$

$$\text{พิกัดความเร็ว} \quad = 100 \text{ rpm}$$

$$\text{พิกัดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก} \quad I_f = 1 \text{ A}$$

(ก) จากสมการ (4.34) แรงดัน V_f หาได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} V_f &= E_a - (I_a R_a) \\ &= 100 - (120 \times 0.1) \\ &= 88 \text{ V} \end{aligned}$$

$$V_f = E_a - I_a R_a$$

(1) จากสมการ (4.26) กระแส I_f^* คงค่านิวนัฒนาได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} I_f^* &= I_f^{(\text{actual})} - I_f^{(\text{AR})} \\ &= 1 - 0.06 = 0.94 \text{ A} \end{aligned}$$

และจากรูปที่ 4.19 ที่ $I_f = 0.94 \text{ A} \rightarrow E_a = 98 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_f &= E_a - I_a R_a \\ &= 98 - (120 \times 0.1) = 86 \text{ V} \end{aligned}$$

(2) จากสมการ (4.37) แรงดัน E_a คำนวณได้ดังนี้ คือ

$$E_a = V_t + I_a R_a$$

$$= 100 + (120 \times 0.1) = 112 \text{ V}$$

จากรูปที่ 4.19 กระแส I_f^* คือ $100 + 12 = 112$

$$I_f^* = 1.4 \text{ A} \quad \text{โดยที่ } 112 \text{ ลง } \sqrt{4.22}$$

และจากสมการ (4.26) จะได้

$$I_{f(actual)} = 1.4 + 0.06$$

$$= 1.46 \text{ A}$$

$$\text{ทั้ง } I_f^* > I_{f(actual)} - I_f(CR)$$

$$\therefore I_{f(actual)} = I_f^* - I_f(CR)$$

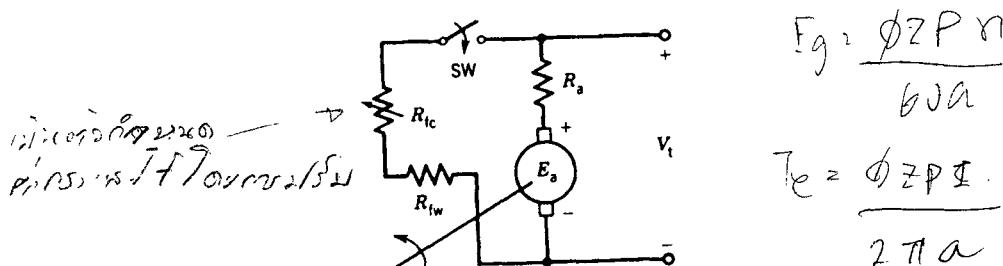
$$= 1.4 + 0.06$$

$$= 1.46 \text{ A}.$$

2. เครื่องกำเนิดกระแสตระหง่าน (Shunt DC Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตระหง่านนิคคลาดสนาณต่อขานานนี้ ต้องต่อขดคลาดสนาณคร่อมอาร์เมเจอร์ และแรงดันอาร์เมเจอร์ใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟกับขดคลาดสร้างสนาณแม่เหล็ก ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าวจะเป็นต้องพิจารณาการกำเนิดแรงดัน (build up) เพื่อให้ได้แรงดันที่ข้าว V_f ตามต้องการ

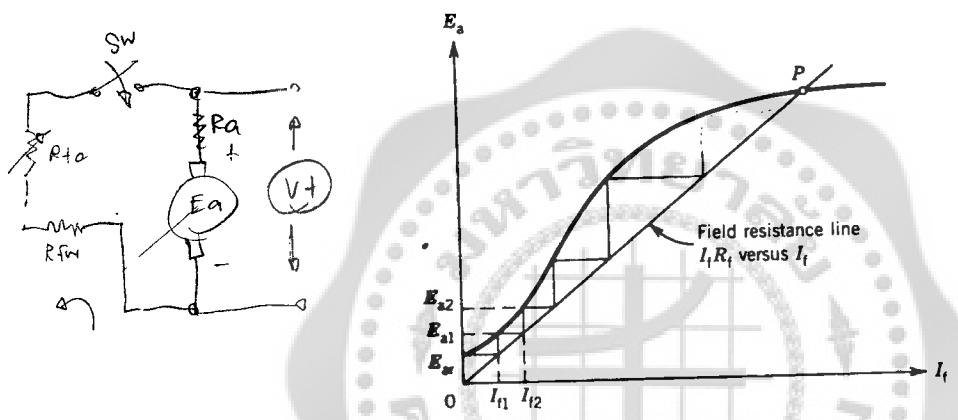
การวิเคราะห์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตระหง่านนิคคลาดสนาณต่อขานานภายใต้เงื่อนไขของสภาวะคงตัว จะนะ ไว้โหลดนี้อาศัยโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 4.36 ถ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกระแสตุ้นด้วยตัวเอง ต้องมีเส้นแรงแม่เหล็กตอกค้างในวงจร แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับรูปที่ 4.37 เส้นโลหะการทำแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตระหง่าน โดยรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นเส้นความด้านทานสนาณ ซึ่งพลัดจากความสัมพันธ์ของ $R_f I_f$ เทียบกับ I_f



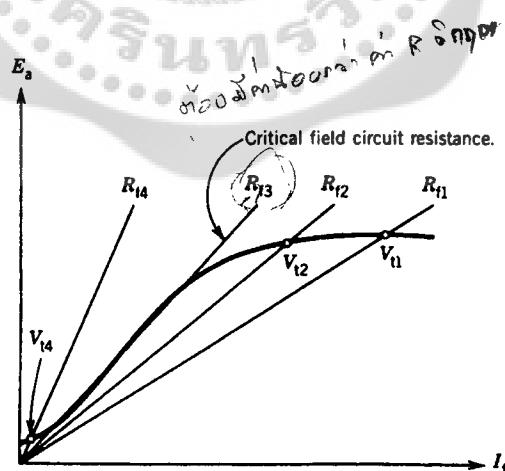
รูปที่ 4.36 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดกระแสตระหง่าน(แบบกระแสตุ้นด้วยตัวเอง)

สมมุติว่าเริ่มต้นวงจรสนาณไม่มีถูกต่อเข้ากับวงจรอาร์เมเจอร์ดังรูปที่ 4.36 ถ้าอาร์เมเจอร์หมุนที่ความเร็วคงที่แรงดัน E_{AR} จะปรากฏที่ข้าวาร์เมเจอร์เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กตอกค้างในเครื่อง

จักรกลไฟฟ้าดังรูปที่ 4.37 เมื่อสวิตช์ถูกปิดวงจรสนามจะถูกต่อเข้ากับวงจรอาร์เมเจอร์ทำให้มีกระแสไฟไหลเข้าสู่ขดลวดสนามและ mmf ของขดลวดสนามเนื่องจากกระแสเดังกล่าวจะเสริมเส้นแรงแม่เหล็กตอกค้าง ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่งผลให้มีกระแส I_{f1} ไหลเข้าวงจรสนาม ซึ่งการกำเนิดแรงดันเนื่องจากกระแสเดังกล่าวจะขึ้นอยู่ด้วยค่าเวลาคงตัวของวงจรสนาม และกระแส I_{f1} จะผลิตแรงดัน E_{a1} สำหรับแรงดัน V , จะเท่ากับ $I_{f1}R_f$ แต่จะน้อยกว่า E_{a1} การเพิ่มขึ้นของ E_{a1} จะทำให้มีกระแสไฟในวงจรสนามเพิ่มขึ้นเป็น I_{f2} ซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงดันอาร์เมเจอร์เพิ่มถึง E_{a2} ขบวนการกำเนิดแรงดันดังกล่าววนนั้น เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและถ้าไม่มีคิดแรงดันตกคร่อม R_a ($R_a \ll R_f$) แรงดันกำเนิดขึ้นจะมีค่าที่จุด p ดังรูปที่ 4.37 และจุดดังกล่าวนี้ $E_a = I_f R_f = V_t$



รูปที่ 4.37 แรงดันกำเนิดขึ้น (buildup) ในเครื่องกำเนิดแบบกระแสตื้นด้วยตัวเอง



รูปที่ 4.38 ผลของการเปลี่ยนค่าขดลวดสนาม

รูปที่ 4.39 แสดงการกำเนิดแรงดันในเครื่องกำเนิดกระแสตื้นตัวเอง ที่มีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานวงจรสนาม สำหรับเส้นความต้านทานที่ลากหักกับส่วนที่เป็นเชิงเส้นบนเส้นโค้งการทำแม่เหล็กพอดี เรียกว่า ค่าความต้านทานวิกฤต R_{f3} และถ้า

ความต้านทานน้อยกว่าค่าń ดังเช่น R_{f4} จะทำให้แรงดันที่เกิดขึ้น V_{t4} มีค่ากำา แต่ถ้าความต้านทาน
น้อยกว่าค่าń ได้แก่ R_{f1} หรือ R_{f2} เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะกำเนิดแรงดันได้สูง (V_{t1} และ V_{t2})

ดังนั้นเงื่อนไขของการกำเนิดแรงดัน สำหรับเครื่องกำเนิดแบบกระแสตื้นด้วยตัวเอง สรุปได้
3 ประการหลักด้วยกัน คือ

1. ต้องมีเส้นแรงแม่เหล็กติดค้างในวงจรสนาม
2. mmf ของวงจรสนามต้องเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กติดค้างในเครื่องจักรกล
3. ความต้านทานวงจรสนามต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานวิกฤตของวงจรสนาม

โดยที่การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสตื้นด้วยตัวเอง ขณะมีโหลดกำาหนด
ได้ดังนี้

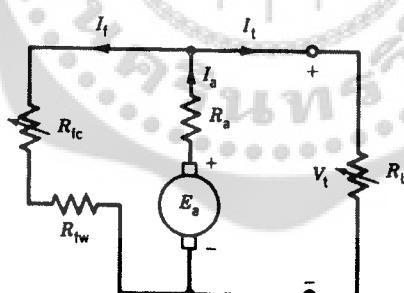
$$E_a = V_t + I_a R_a \quad (4.41)$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m \text{ (ขึ้นอยู่กับกระแส } I_f \text{)} \quad (4.42)$$

$$V_t = I_f R_f = I_f (R_{fw} + R_{fc}) \quad (4.43)$$

$$V_t = I_L R_L \quad (4.44)$$

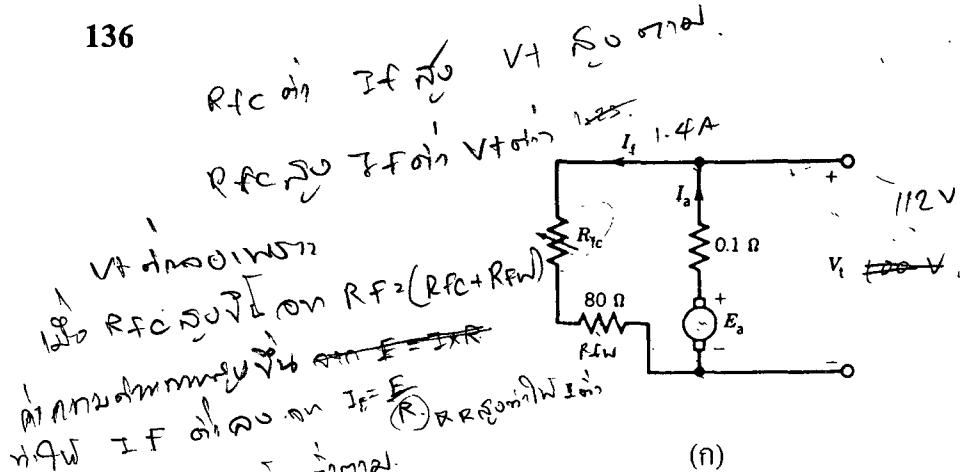
$$I_a = I_f + I_L \quad (4.45)$$



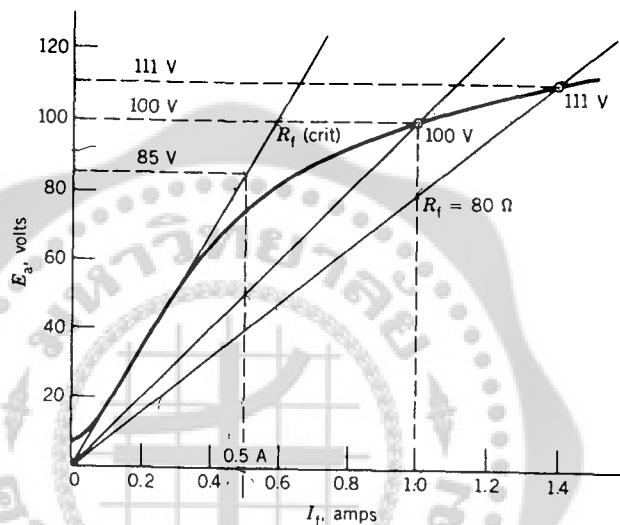
รูปที่ 4.39 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตื้นด้วยตัวเองขณะมีโหลด

ตัวอย่างที่ 4.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงตามตัวอย่างที่ 4.2 ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ
ขนาน (กระแสตื้นด้วยตัวเอง) ขณะไร้โหลด งคำนวน

- (ก) แรงดันสูงสุดที่เครื่องกำเนิดผลิตขึ้น
- (ข) ความต้านทาน R_f ที่ทำให้ได้แรงดัน V_t ที่พิกัด
- (ค) ค่าความต้านทานวิกฤตของวงจรสนาม



(f)



(g)

รูปด้านล่างที่ 4.3

วิธีทำ

- (ก) $E_a(\max)$ เกิดขึ้นเมื่อ $R_{fc} = 0$ และ $I_f = 1.4 A$ เมื่อ Lak เส้นความด้านท่านสนาน (ดังรูปด้านล่างที่ 4.3 ข) โดยที่ $R_f = R_{fw} = 80 \Omega$ จะได้

$$\begin{aligned}
 E_a(\max) &= 111 \text{ V} & V_t &= E_a - I_a R_a \approx E_a = \\
 100 &= 100 - 1.4 \times 0.1 & E_a &= 0.14 \\
 V_t &= E_a - I_a R_a & \approx E_a = 100 \text{ V}
 \end{aligned}$$

และ Lak เส้นความด้านท่านที่กระทำบนเส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่แรงดัน 100 V ในกรณี

$$I_f = 1 A$$

$$R_f = 100/1 = 100 \Omega = R_{fw} + R_{fc}$$

$$R_{fc} = 100 - 80 = 20 \Omega$$

(ค) ลากเส้นความต้านทานวิกฤตผ่านส่วนที่เป็นเชิงเส้นบนเส้นโค้งการทำแม่เหล็ก

$$I_f = 0.5 \quad E_a = 85 \text{ V}$$

$$R_{f(crit)} = 85/0.5 = 170 \Omega$$

$$R_{fc} = 170 - 80 = 90 \Omega$$

ตอบ

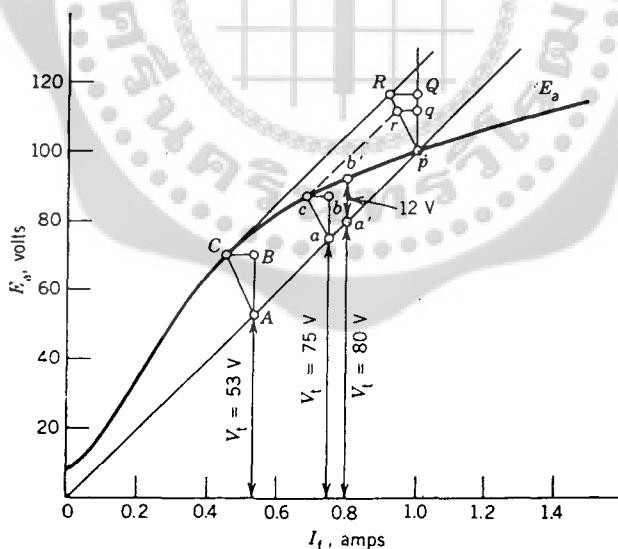
ตัวอย่างที่ 4.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้าดังตัวอย่างที่ 4.2 ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบานาน

(ก) ถ้าปรับแรงดันที่ข้อ $V_t = 100 \text{ V}$ ขณะไร้โหลดจะคำนวณแรงดันที่ขึ้นขณะโหลดเต็มพิกัด เมื่อไม่คิดผลของสนามแม่เหล็กstaticท่อนจากอาร์เมเจอร์ที่โหลดเต็มพิกัดโดยที่

(ข) จากข้อ (ก) สมมุติว่าคิดผลสนามแม่เหล็กstaticท่อนจากอาร์เมเจอร์ที่โหลดเต็มพิกัดโดยที่ $I_{f(AR)} = 0.06 \text{ A}$ จะคำนวณแรงดัน V_t ขณะโหลดเต็มพิกัด

(ค) คำนวณ $I_{a(max)}$ ที่เครื่องกำเนิดสามารถจ่ายออกมากได้และสัมพันธ์กับแรงดัน V_t สมมุติว่า $I_{f(AR)}$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_a

(ง) คำนวณกระแสตัวคงของเครื่องกำเนิด



รูปตัวอย่าง 4.4

วิธีทำ

(ก) จากเส้นความต้านทานสนาม O_p กระทำกับเส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่แรงดัน 100 V

(รูปตัวอย่างที่ 4.4)

$$I_{a(FL)} = 120 \text{ A}$$

$$I_a R_a = 120 \times 0.1 = 12 \text{ V} = pq$$

ตาม 4.2

กำหนดค่า $I_a R_a = 12 V = a'b'$ ให้มีค่าคงที่ระหว่างเส้นโถงการทำแม่เหล็กและเส้นความต้านทาน
สนาม (รูปตัวอย่างที่ 4.4)

$$V_t = 80 \text{ V}$$

(ข) สร้างสามเหลี่ยม pqr โดยที่ $pq = 12 V$ และ $qr = 0.06 A$ และกำหนดให้สามเหลี่ยม abc มี
ค่าคงที่ระหว่างเส้นโถงการทำแม่เหล็กและเส้นความต้านทานของสนามดังรูปตัวอย่างที่ 4.4

$$V_t = 75 \text{ V}$$

(ก) ลากเส้นสัมผัส CR บนานกับ O_p ขยายสามเหลี่ยม pqr โดยลากเส้นไปสัมผัสที่จุด R แล้ว
ลากเส้น AC บนานกับ pR ข้อสังเกตุ $pQ = AB$ แทนด้วย $I_a R_a$, $oR = BC$ แทนด้วย $I_f(AR)$
และสามเหลี่ยม ABC เป็นสามเหลี่ยมที่ใหญ่สุดที่อยู่ระหว่างเส้นโถงการทำแม่เหล็กกับเส้น
ความต้านทานสนาม

$$I_a R_a = AB = 17 \text{ V}$$

$$I_a = 17 / 0.1 = 170 \text{ A}$$

$$V_t = 53 \text{ V}$$

(ง) เมื่อตัวคงที่ขั้วเครื่องกำเนิด $V_t = 0$ และ $I_f = 0$ ดังรูปตัวอย่างที่ 4.3 (ก) โดยแรงดันที่เครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าผลิตขึ้นมีค่าเท่ากับแรงดันเนื้องจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

$$E_a = E_r = 6 \text{ V}$$

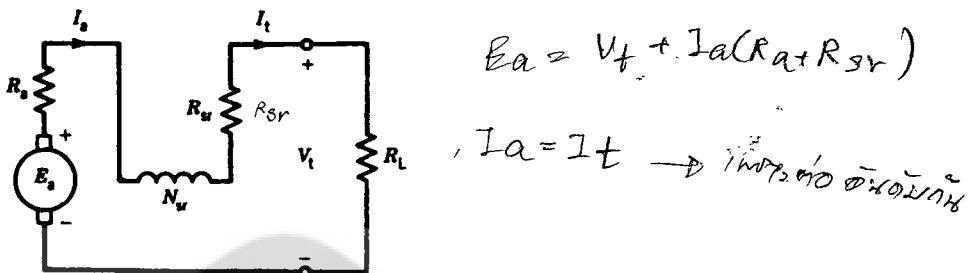
$$I_a R_a = 6 \text{ V}$$

$$I_a = \frac{6}{0.1} = 60 \text{ A}$$

และเนื่องจาก $I_f = 0 \text{ A}$ ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำงานที่ระดับของเส้นแรงมีค่าต่ำในส่วนที่
เป็นเชิงเส้นของเส้นโถงการทำแม่เหล็กและจะไม่มีผลของสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์

3. เครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบอนุกรณ์ (Series DC Machine)

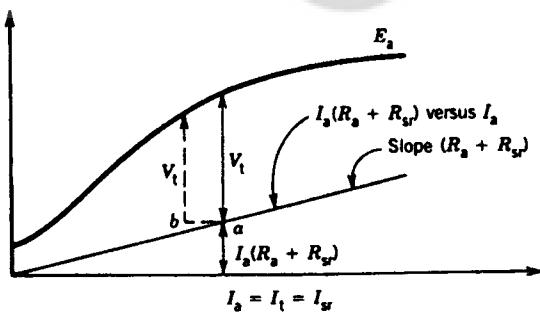
เครื่องกำเนิดแบบอนุกรณ์คลอดสร้างสนามแม่เหล็กถูกต่ออนุกรณ์กับอาร์เมเนเจอร์เพื่อสร้างเส้นแรงในเครื่องจักรกลโดยกระแสอาร์เมเนเจอร์ที่ไหลผ่านตัวมัน ซึ่งจะสร้างสนามจะไม่สมบูรณ์จนกว่าโคลดถูกต่อเข้ากับเครื่องจักรกลและรูปที่ 4.40 แสดงวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบอนุกรณ์



รูปที่ 4.40 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบอนุกรณ์

รูปที่ 4.41 แสดงเส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง E_a กับ I_a ของเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบอนุกรณ์โดยคลอดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรณ์ถูกต่อตื้นแยกและในส่วนของคุณลักษณะแรงดัน V_t กับกระแส I_t หาได้โดยลากเส้นตรงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งมีความชันต่างกัน $R_a + R_{sr}$ เส้นตรงดังกล่าวมีเทนค่าแรงดันตกครึ่อง R_a และ R_{sr} และสำหรับระยะห่างระหว่างเส้นโค้งการทำแม่เหล็กกับเส้นตรงคือค่าแรงดัน V_t

กรณีที่พิจารณาถึงผลของสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเนเจอร์แรงดัน V_t จะมีค่าน้อยลงแสดงให้เห็นได้จากเส้นประในรูปที่ 4.41 โดยที่ ab แทนกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเนเจอร์ $I_a(AR)$

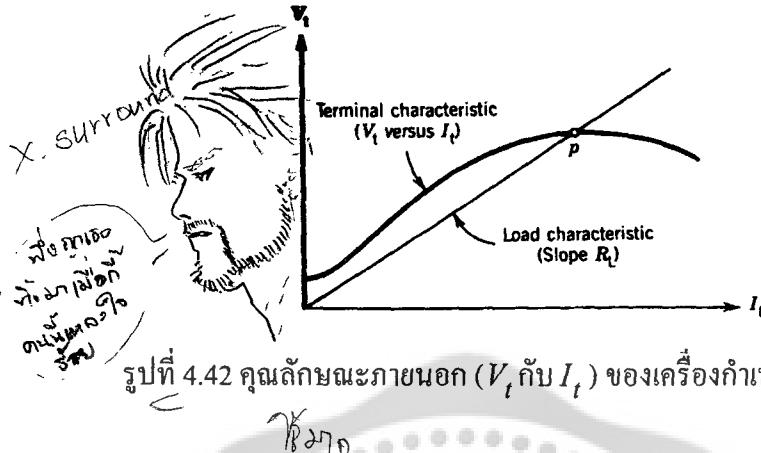


รูปที่ 4.41 เส้นโค้งการทำแม่เหล็ก E_a กับ I_a และ $I_a(R_a + R_{sr})$ กับ I_a

จดหมาย

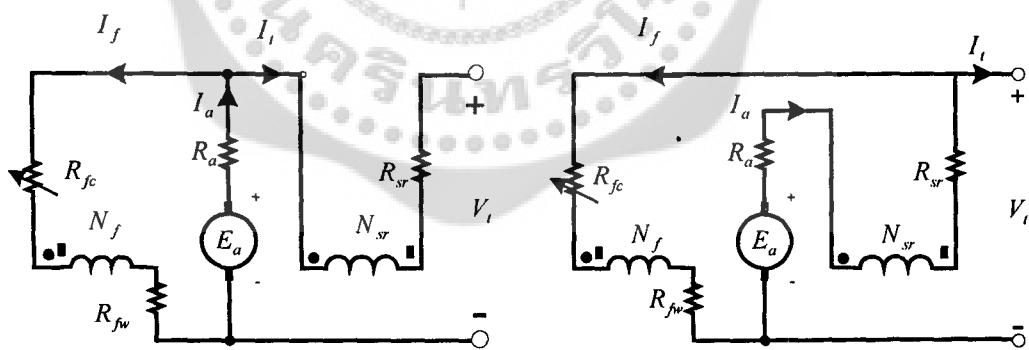
เมื่อย้อนกลับไปพิจารณาแรงดัน V_t สำหรับกรณีที่ค่ากระแส I_t เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งแรงดันดังกล่าวมีสามารถนำมาพล็อตความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 4.42 ถ้ากำหนดให้ R_L คือความต้านทานโหลดดังนั้นคุณลักษณะเชิงโหลดระหว่าง V_t ต่อ I_t คือเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ

R_L โดยจุดทำงานสำหรับโหลดดังกล่าวคือจุดที่เส้นตรงตัดกันเส้น โค้งทำแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.42 ข้อสังเกตุถ้า R_L มีค่าสูงแรงดัน V_t จะเปลี่ยนแปลงน้อยนั้นคือเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบอนุกรมจะไม่สามารถผลิตแรงดันขึ้นมาได้



4. เครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบผสม(Compound DC. Generators)

เครื่องกำเนิดกระแสตรงชนิดนี้ ขาด漉ดสร้างสนามแม่เหล็กทั้งขาด漉ดบนnan (Shunt winding) และขาด漉donan (Series winding) ถูกต่อร่วมกันเป็นเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบผสมโดยมีการต่อสองลักษณะด้วยกันคือ Short-shunt ซึ่งจะต่อขาด漉ดสนามบนnanคร่อมอาร์เมเจอร์และ Long-shunt โดยที่จะต่อขาด漉ดสนามบนnanคร่อมขาด漉ดสนามอนุกรมที่ต่ออนุกรมอยู่ร่วมกับอาร์เมเจอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.43



(a) Short shunt

(b) Long shunt

- Cumulatively Compounded
- Differentially Compounded

รูปที่ 4.43 วงจรสมมูล์ของเครื่องจักรกระแสตรงแบบผสมขณะไร้โหลด

สมการเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องจักรกลกระแสตรงแบบพสมกำหนดไว้ดังนี้คือ

Short-shunt

$$V_t = E_a - I_a R_a - I_t R_{sr} \quad (4.46)$$

$$I_t = I_a - I_f \quad (4.47)$$

Long-shunt

$$V_t = E_a - I_a (R_a + R_{sr}) \quad (4.48)$$

$$I_t = I_a - I_f \quad (4.49)$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_{fw} + R_{fc}} \quad (4.50)$$

สำหรับการต่อขดลวดทั้งสองแบบนี้ ถ้าสมมุติการเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น(Magnetic linearity) แรงดันที่ผลิตขึ้นคือ

$$E_a = K_a (\phi_{sh} + \phi_{sr}) \omega_m \quad (4.51)$$

เมื่อ ϕ_{sh} คือ เส้นแรงต่อขัวสร้างขึ้นโดย mmf ของขดลวดสนามนาน

ϕ_{sr} คือ เส้นแรงต่อขัวสร้างขึ้นโดย mmf ของขดลวดสนามอนุกรม

กรณีที่เส้นแรงต่อขัวสร้างทั้งสองเสริมกันจะเรียกว่า Cumulative compound dc Generator และถ้าเส้นแรงต่อขัวสร้างทั้งสองตรงข้ามกันจะเรียกว่า Differential compound dc Generator

ข้อสังเกตุสำหรับการหาค่า mmf นั้นต้องรวม mmf ของขดลวดสนามนานและอนุกรม ดังนั้นผลรวมของค่า mmf ต่อขัวคือ

$$F_{net} = F_{sh} \pm F_{sr} - F_{AR} \quad (4.52)$$

$$N_f I_f = N_f I_f \pm N_{sr} I_{sr} - N_f I_f \quad (4.53)$$

เมื่อ N_f คือ จำนวนรอบของขดลวดสนามนานต่อขัว

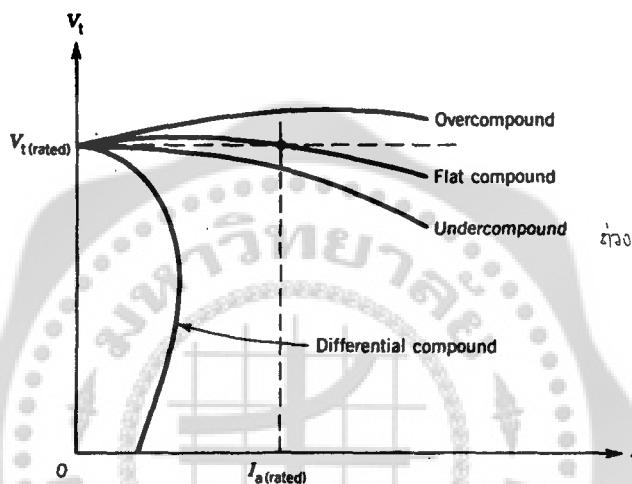
N_{sr} คือ จำนวนรอบของขดลวดสนามอนุกรมต่อขัว

F_{AR} คือ mmf เนื่องจากสนามแม่เหล็กstaticท้อนจากอาร์มเจอร์

แยกจากสมการ(4.52)

$$I_f^* = \left(I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - I_{f(AR)} \right) \quad (4.54)$$

รูปที่ 4.44 แสดงคุณลักษณะแรงดัน-กระแสของเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบผสม โดยที่ การต่อในลักษณะ Cumulative compound นั้นจะทำให้เกิดคุณลักษณะสามประการด้วยกันคือ Over compound เกิดจากการเพิ่มกระแส I_a เพิ่มขึ้นแต่ V_t มีค่าลดลงและ Flat compound ลักษณะนี้เมื่อ I_a เพิ่มขึ้นทำให้ได้ V_t เกือบคงที่ตลอด ส่วน Undercompound เมื่อกระแส I_a เพิ่มขึ้นแรงดันที่ขึ้ว V_t มีค่าลดลง ซึ่งคุณลักษณะทั้งสามนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของคลัวดstanan อนุกรม



รูปที่ 4.44 คุณลักษณะแรงดัน-กระแสของเครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบผสม
ครุฑ์ ษิลป์ พล. ๙๖ ๑๔๗๘๗๗๗๗๗๗๗

สำหรับ Differential compound แรงดัน V_t จะตกลงอย่างรวดเร็วเมื่อกระแส I_a เพิ่มขึ้นเนื่องจาก mmf ของคลัวดstanan อนุกรมตรงกันกับของคลัวดstanan ขนาด โดยเท่าริงแล้วนั้นกระแส I_a จะถูกรักษาให้คงที่

4.3.2 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรง คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ ส่วนใหญ่มอเตอร์กระแสตรงถูกใช้งานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (DC Motor Drive) เช่น การควบคุมแรงบิด การควบคุมความเร็ว เป็นต้น

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงนั้น การควบคุมความเร็ว (speed regulation : SR) กำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\%SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} \times 100\% \quad (4.55)$$

$$\%SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \quad (4.56)$$

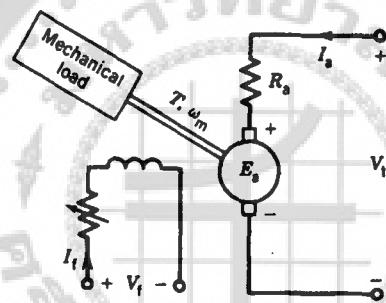
จากสมการ(4.55) หรือ(4.56) ถ้า $\%SR$ มีค่ามากแสดงว่า ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นขณะโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น

มอเตอร์กระแสตรงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่'

1. มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้น

(Separately Excited DC Motor)

วงจรสมมูลบัญช่องมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้นแสดงดังรูปที่ 4.45 โดยที่วงจรสนามถูกป้อนแรงดันคงที่



รูปที่ 4.45 วงจรสมมูลบัญช่องมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้น

จากการสมมูลรูปที่ 4.45 เก็บสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad (4.57)$$

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (4.58)$$

และ

$$I_L = I_a$$

โดยที่ E_a คือ แรงดันต้านกลับ (back emf)

I_a คือ กระแสอาร์เมเนอร์

I_L คือ กระแสโหลด

E_a คือ E_b จึงทำให้เรา
ได้ผลลัพธ์ใน motor

2. มอเตอร์กระแสตรงแบบต่อขาน (shunt DC Motor)

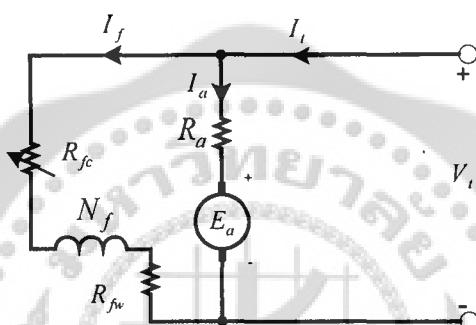
การกำหนดคุณลักษณะสมมุติทางด้านยาต์พูตของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามต่อขานเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (4.59)$$

เมื่อ $E_a = K\phi\omega_m$

ดังนั้น

$$V_t = K_a\phi\omega_m + I_a R_a \quad (4.60)$$



รูปที่ 4.46 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบขาน

และ $T_e = K_a\phi I_a$ ดังนั้น I_a เจียนได้ดังนี้คือ

$$I_a = \frac{T_e}{K_a\phi} \quad (4.61)$$

$\tau_e \propto I_a$
 $\omega \propto \tau_e$

จากสมการ (4.60) และ (4.61)

$$V_t = K_a\phi\omega_m + \frac{T_e}{K_a\phi} R_a \quad (4.62)$$

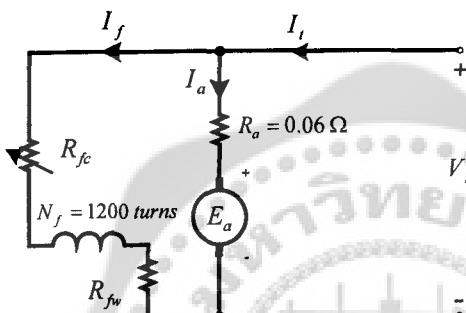
และสมการในการกำหนดค่าความเร็วแสดงได้ดังนี้คือ

$$\omega = \frac{V_t}{K_a\phi} - \frac{R_a}{(K_a\phi)^2} T_e \quad (4.63)$$

ตัวอย่างที่ ๑ จ่ายกระแสตรงชนิดคลอดสร้างสนามแม่เหล็กต่อขาน 50 HP 250 V 1200 rpm มีค่า ค.ต.ท. อาร์เมเจอร์ 0.06 Ω ถ้าวงจรสนามมีค่า ค.ต.ท. รวมเท่ากับ 50 Ω ซึ่งทำให้มอเตอร์มีความเร็วขณะไร้โหลด 1200 rpm และสำหรับคลอดสนามกำหนดให้มีจำนวนรอบเท่ากับ 1200 รอบต่อชั่ว ตัวอย่างที่ 4.5 จงคำนวณ

- (ก) ความเร็วของมอเตอร์ขณะกินกระแสอินพุต 100 A
- (ข) ความเร็วของมอเตอร์ขณะกินกระแสอินพุต 200 A
- (ค) ความเร็วของมอเตอร์ขณะกินกระแสอินพุต 300 A
- (ง) จำนวนแรงบิดตามเงื่อนไขของโหลดที่ค่าต่างๆ

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$$



รูปที่ตัวอย่างที่ 4.5

วิธีทำ

จากสมการ (4.15)

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad \text{หน่วย RPM}$$

หรือ

$$E_a = K_a \phi n_m \quad (\text{ความเร็วในหน่วย rpm})$$

ถ้ากระแสที่ไหลในเครื่องจักรกลมีค่าคงที่ (เนื่องจาก V_t และ R_t มีค่าคงที่) และเมื่อไม่คิดผลกระแทบ อันเนื่องจากสนามแม่เหล็กจะห้อนจากอาร์เมเจอร์ ซึ่งเส้นแรงในมอเตอร์มีค่าคงที่ด้วย ดังนั้นความ ตั้มพันธ์ระหว่างแรงดัน E_a กับเงื่อนไขของโหลดสองค่าที่ต่างกันกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{K_a \phi n_2}{K_a \phi n_1}$$

ดังนั้น

$$n_2 = \frac{E_{a2}}{E_{a1}} n_1$$

และขณะไร้โหลด $I_a = 0$ โดยที่ $E_{a1} = V_t = 250 V$ ขณะความเร็ว $n_1 = 1200 rpm$ จากข้อพิจารณาข้างต้นนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความเร็วของมอเตอร์ตามเงื่อนไขของโหลดที่ค่าต่างๆ ได้

$$(ก) \quad \text{เมื่อ } I_t = 100 A$$

$$\begin{aligned} I_a &= I_t - I_f = I_t - \frac{V_f}{R_f} \\ &= 100 - \frac{250}{500} = 95 A \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$E_a = V_t - I_a R_a$$

$$= 250 - (95 \times 0.06) = 244.3 V$$

\therefore ความเร็วมอเตอร์ที่ $I_f = 100 A$ คือ

$$n_2 = \frac{E_{a2}}{E_{a1}} n_1 = \frac{244.3}{250} \times 1200$$

$$= 1173 \text{ rpm}$$

$$(ข) \quad \text{เมื่อ } I_f = 200 A$$

$$I_a = 200 - \frac{250}{50} = 195 A$$

ดังนั้น

$$E_a = 250 - (195 \times 0.06)$$

$$= 238.3 V$$

\therefore ความเร็วมอเตอร์ที่ $I_f = 200 A$ คือ

$$n_2 = \frac{238.3}{250} \times 1200$$

$$= 1144 \text{ rpm}$$

$$(ค) \quad \text{เมื่อ } I_t = 300 A$$

$$I_a = 300 - \frac{250}{50} = 295 A$$

ดังนั้น

$$E_a = 250 - (295 \times 0.06)$$

$$= 232.3 V$$

$$T_e = \frac{E_a I_a}{\frac{\theta_{ext}}{60}}$$

$$I_f = 200 A$$

$$I_a = I_f - \frac{V_t}{R_{eq}} = 200 - \frac{250}{50} = 200 - 5 = 195 A$$

$$E_a = V_t - I_a R_a = 250 - 195 \times 0.06 \\ = 238.3 V$$

ดัง

∴ ความเร็วอตอร์ที่ $I_f = 300 A$ คือ

$$n_2 = \frac{232.3}{250} \times 1200$$

$$= 1115 rpm$$

$$\text{on } \frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2 = \frac{E_{a2}}{E_{a1}} \times n_1$$

$$= \frac{238.3}{250} \times 1200 = 1143.8 rpm$$

$$T_e = \frac{E_a I_a}{2\pi(1143.8)/60}$$

(4) คำนวณแรงบิดตามเงื่อนไขของ โหลดที่ค่าต่างๆ โดยพิจารณาจากสมการ (4.18)

$$= 238.3 \times 195 / 2\pi(1143.8)$$

$$= 387.9 N.m \approx 388 N.m$$

ซึ่งแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น คือ

$$T_e = \frac{E_a I_a}{\frac{\omega_m}{2\pi(1143.8)}} \times \frac{60}{60}$$

ดังนั้นขณะกระแส $I_f = 100 A$ จะได้แรงบิด

$$T_e = \frac{244.3 \times 95}{(2\pi)(1173)} = 190 N.m$$

แรงบิด T_e ขณะ $I_f = 200 A$ คือ

$$T_e = \frac{238.3 \times 195}{(2\pi)(1144)} = 388 N.m$$

แรงบิด T_e ขณะ $I_f = \frac{200}{300} A$ คือ



$$T_e = \frac{232.3 \times 295}{(2\pi)(1115)} = 587 \quad N.m$$

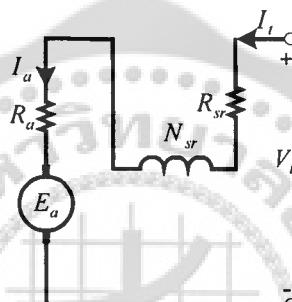
ตอบ

60

3. มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม (Series DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมนี้เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลย์ ดังรูปที่ 4.47 กำหนดได้

ตามสมการ (4.64)



รูปที่ 4.47 วงจรสมมูลย์มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_{sr}) \quad (4.64)$$

และสำหรับสมการแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (T_e) หากได้ดังนี้ คือ

$$T_e = K_a \phi I_a \quad (4.65)$$

เมื่อสมมติให้เส้นแรงในเครื่องจักรกลเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น และกำหนดได้ตามสมการ (4.66)

$$\phi = cI_a \quad (4.66)$$

โดยที่ c คือ อัตราส่วนของค่าคงที่

จากสมการ (4.65) และ (4.66) ดังนั้นแรงบิด T_e กำหนดใหม่

$$T_e = K_a \phi I_a = KcI_a^2$$

(4.67)

สำหรับคุณลักษณะสมบัติที่ขึ้นของมอเตอร์กระแสตรงชนิดคลาดstanan ต่ออนุกรมนี้ การคำนวณเป็นการพิจารณาและวิเคราะห์บนพื้นฐานของเส้นโค้งคุณลักษณะสมบัติการทำแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และผลของการอิมตัวในวงจรแม่เหล็กจะพิจารณาจากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ ดังนั้นการหาคุณลักษณะของแรงบิด – ความเร็ว กระทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

จากสมการ

$$I_a = \left(\frac{T_e}{cK} \right)^{1/2} \quad I_a = \sqrt{\frac{T_e}{cK}}$$



แทนค่าสมการ I_a ข้างต้นและ $E_a = K_a \phi \omega_m$ ในสมการ (4.68)

$$V_t = K_a \phi \omega_m + \left(\frac{T_e}{cK} \right)^{1/2} \times (R_a + R_{sr}) \quad (4.68)$$

และจากสมการ (4.67)

$$I_a = \left(\frac{\phi}{c} \right)$$

ดังนั้นสมการแรงบิดเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$T_e = \frac{K}{c} \phi^2$$

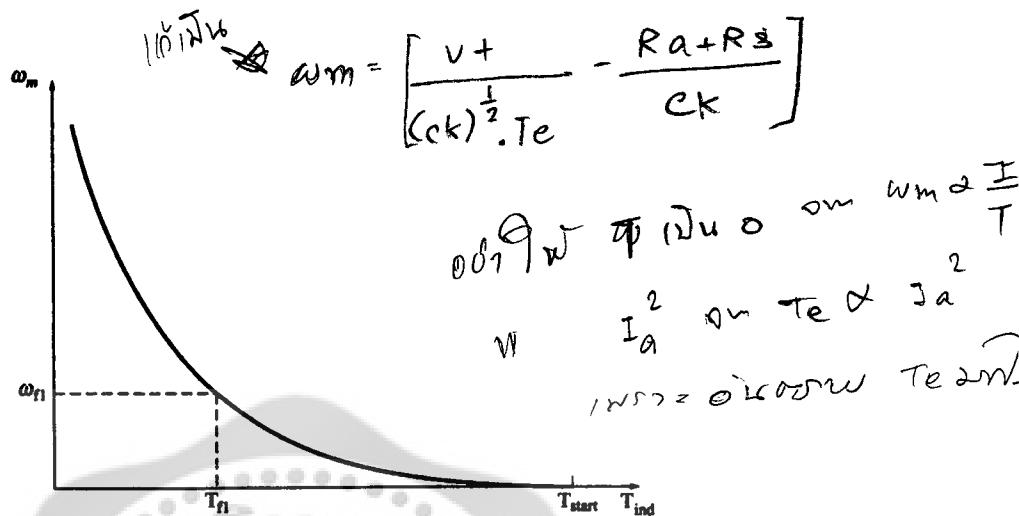
และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ในมอเตอร์กำหนดใหม่ดังนี้ คือ

$$\phi = \left(\frac{c}{K} \right)^{1/2} \times (T_e)^{1/2} \quad (4.69)$$

แทนค่าสมการ (4.69) ลงในสมการ (4.68) จะได้

$$V_t = K \left(\frac{c}{K} \right) \times (T_e)^{1/2} \omega_m + \left(\frac{T_e}{cK} \right)^{1/2} \times (R_a + R_{sr})$$

$$\omega_m = \left[\frac{V_t}{(cK)^{\frac{1}{2}} \times T_e} - \frac{R_a + R_s}{cK} \right] \quad (4.70)$$



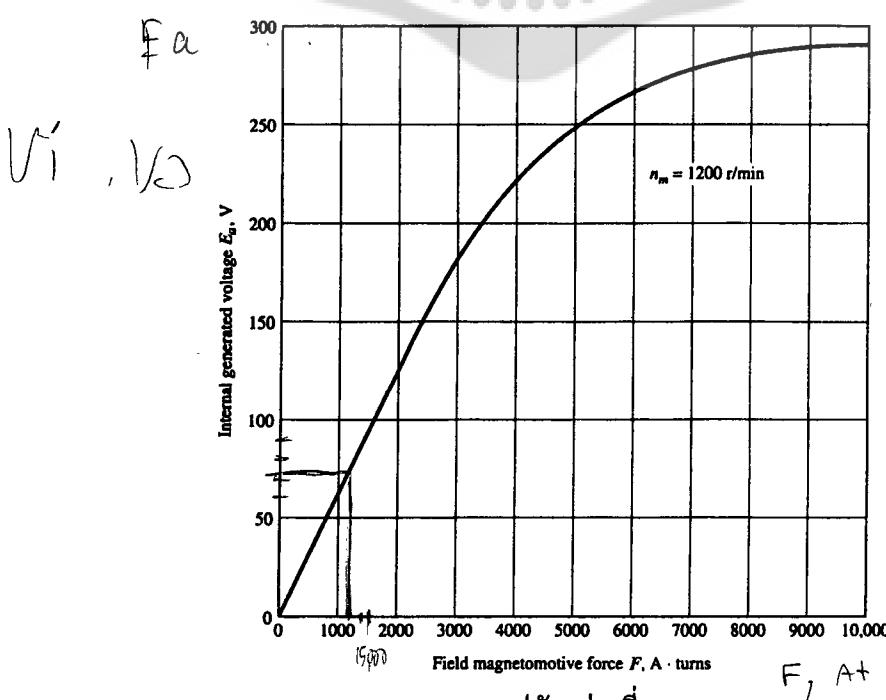
รูปที่ 4.48 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม

ตัวอย่างที่ 4.6 มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมดังรูปที่ 4.47 มีค่าแรงดันที่ข้อ 250 V ค.ต.ท.

$R_a + R_s$ เท่ากับ 0.08Ω โดยที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรมมีขดลวดพันอยู่จำนวน 25 รอบต่อข้าว และกำหนดเดือน ให้คุณลักษณะสมบัติ ดังรูปต่อไปนี้

(ก) ความเร็วและแรงบิดที่สร้างขึ้นของมอเตอร์กินกระแส I_a เท่ากับ 50 A

(ข) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ แรง – ความเร็ว



รูปตัวอย่างที่ 4.6

วิธีทำ จากเส้นโค้งคุณสมบัติดังรูปดัวอย่างที่ 4.6 เป็นความสัมพันธ์ของแรงดัน E_a และ mmf ที่ความเร็วมอเตอร์ 1200 rpm ดังนั้นที่ $I_a = 50 \text{ A}$ จะได้

$$(g) \quad E_a = V_t - I_a(R_a + R_{sr})$$

$$= 250 - 50(0.08) = 246 \text{ V}$$

เมื่อ $I_a = I_f = 50 \text{ A}$ ดังนั้น

$$F = Ni = 25 \times 50 = 1250 \text{ At}$$

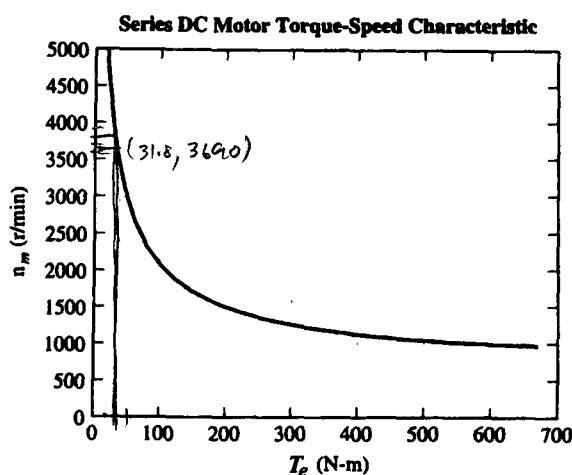
และที่ $F = 1250 \text{ At}$ แรงดัน $E_{ao} = 80 \text{ V}$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{E_a}{E_{ao}} n_o \\ &= \frac{246}{80} \times 1200 \text{ rpm} = 3690 \text{ rpm} \end{aligned}$$

โดยที่ T_e คำนวณได้ดังนี้ คือ

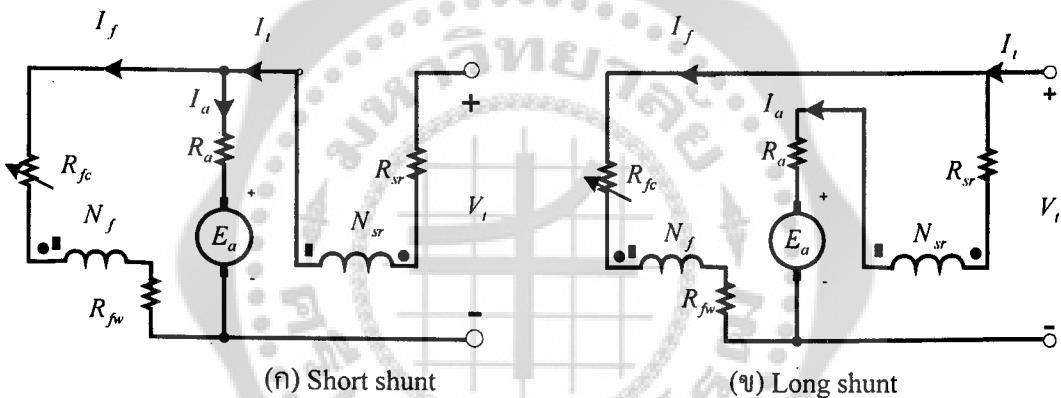
$$T_e = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = \frac{246 \times 50}{2\pi \times \frac{3690}{60}} = 31.8 \text{ N.m}$$

(x) คำนวณหาค่า T_e ที่ความเร็วค่าต่างๆ แล้วนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้ คือ



4. มอเตอร์กระแสตรงแบบผสม (The Compounded DC Motor)

การต่อมอเตอร์แบบนี้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขนาดและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรมต่อร่วมกัน ดังรูปที่ 4.49 (ก) และ (ข) สำหรับการกำหนดจุด (dot) ที่ขดลวดทั้งสองเหมือนกับการกำหนดในหน้าแปลงถ้าพิจารณากระแสที่ไหลผ่าน dot ซึ่งทำให้ค่า mmf เป็นบวก โดยที่การไหลของกระแสผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กทั้งสองส่งผลให้ค่า mmf เสริมกัน ดังนั้นผลรวมของค่า mmf มีค่าสูงขึ้นซึ่งมอเตอร์จะทำงานเป็น Cumulatively Compounded DC motor และในทางตรงข้ามถ้ากระแสไหลผ่าน dot ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กชุดหนึ่งส่วนขดลวดชุดที่เหลือกระแสไหลอีกทางหนึ่ง (ไม่ไหลเข้า dot) โดยผลลัพธ์ของค่า mmf เนื่องจากขดลวดทั้งสองมีค่าเป็นลบ เรียกมอเตอร์ว่า Differentially Compounded DC Motor



- Cumulatively Compounded

- Differentially Compounded

รูปที่ 4.49 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์แบบผสม

สำหรับสมการแรงดันที่ขึ้นของมอเตอร์กระแสตรงชนิดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กต่อผสมกำหนดได้ตามสมการ(4.71)

$$V + V_f = E_a + I_a(R_a + R_s) \quad \text{long shunt} \quad (4.71)$$

และความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลในมอเตอร์แสดงได้ดังนี้ คือ

$$I_a = I_t - I_f \quad (4.72)$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad (4.73)$$

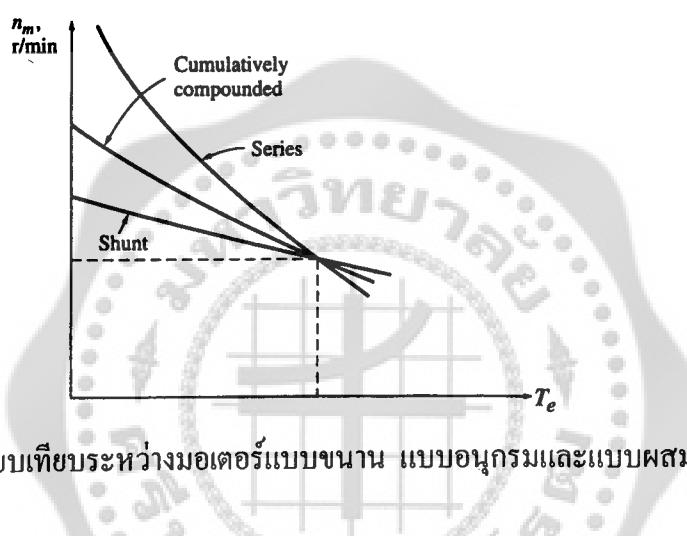
โดยที่ผลรวมของ mmf และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กประสิทธิผล กำหนดตามสมการ(4.74)

$$F_{net} = F_f \pm F_{sr} - F_{AR} \quad (4.74)$$

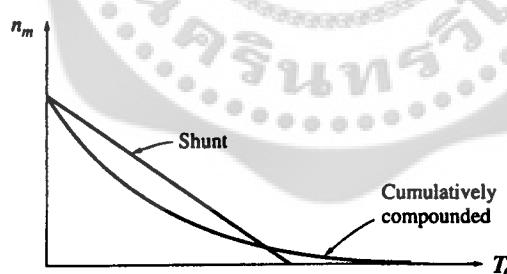
และ

$$I_f^* = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_a - \frac{F_{AR}}{N_f} \quad (4.75)$$

สำหรับคุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.50



(ก) เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบขานาน แบบอนุกรมและแบบผสม



(ข) เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบขานานและแบบผสม

รูปที่ 4.50 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็ว

ตัวอย่างที่ 4.7 มอเตอร์กระแสตรงชนิดคลอดสร้างสนามแม่เหล็กต่อผสม ขนาด 100 HP 250 V กำหนดค่า ค.ต.ท. $R_{sr} = 0.04 \Omega$ จำนวนรอบของคลอดสนามขานานและคลอดสนามอนุกรมเท่ากับ 1000 รอบต่อชั่ว และ 3 รอบต่อชั่วสำหรับวงจรสมมูลย์และเส้นโถงคุณลักษณะสมบัติของมอเตอร์แสดงดังรูปที่4.49(ข) และดังรูปตัวอย่างที่ 4.4 สำหรับจะไร้โหลดทำการปรับ ค.ต.ท. R_{fc} จนกระแสทั้งไฉความเร็วในสภาวะนี้ 1200 rpm ถ้าไม่คิดการสูญเสียทางกัด การสูญเสียที่แกน และการสูญเสียอื่นๆ (stray losses)

- (ก) กระแส I_f ขณะมอเตอร์ทำงานตอนไร้โหลด
- (ข) ถ้าเครื่องจักรกลทำงานเป็น cumulatively compounded dc motor จงคำนวณความเร็ว
ขณะกระแส $I_a = 200 A$
- (ค) ถ้าเครื่องจักรกลทำงานเป็น differentially compounded dc motor จงคำนวณความเร็ว
ขณะกระแส $I_a = 200 A$

วิธีทำ

- (ก) ขณะไร้โหลด $I_a = 0 A$ แรงดัน $E_a = V_t = 250 V$ จากเส้นโค้งการทำแม่เหล็กจะได้
กระแส $I_f = 5 A$ ซึ่งทำให้เกิดแรงดัน $E_a = 2500 V (n_r = 1200 rpm)$
ดังนั้นกระแส $I_f = 5 A$
- (ข) เมื่อทำงานเป็น cumulatively compounded

$$E_a = V_t + I_a(R_a + R_{sr})$$

$$= 250 - (200 \times 0.04) = 242 V$$

$$I_f^* = I_f + \frac{N_{sr}}{N_f} I_a - \frac{F_{AR}}{N_f}$$

$$= 5 + \left(\frac{3}{1000} \times 200 \right) = 5.6 A$$

และจากเส้นโค้งการทำแม่เหล็ก $E_{ao} = 262 V$ ที่ความเร็ว $n_o = 1200 rpm$

ดังนั้น $n_r = \frac{E_a}{E_{ao}} n_o = \frac{242}{262} \times 1200 rpm = 1108 rpm$

- (ค) เมื่อทำงานเป็น differentially compounded

$$I_f^* = I_f - \frac{N_{sr}}{N_f} I_a - \frac{F_{AR}}{N_f}$$

$$= 5 - \left(\frac{3}{1000} \times 200 \right) = 4.4 A$$

$$-e^{-t/0.24}$$

$$t = \frac{1}{e^{1/0.24}} \quad \text{155}$$

$$e^{2\pi f} = 2\pi f \cdot 1/0.24 \quad \frac{1}{e^{\infty}} = \frac{1}{1000000}$$

และจากด้านโถงการทำแม่เหล็ก $E_{ao} = 236 V$ พี่ความเร็ว $n_o = 1200 rpm$

$$\text{ดังนั้น} \quad n_r = \frac{E_a}{E_{ao}} n_o = \frac{242}{236} \times 1200 rpm = 1230 rpm$$

ตอบ

$$0.8 \times 97.6 = 78.08$$

$$m \omega_m t = 97.6(1 - e^{-t/0.24})$$

$$78.08 = 97.6(1 - e^{-t/0.24})$$

$$0.8 = (1 - e^{-t/0.24})$$

4.4 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว (Torque-Speed Characteristics)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแส постоянสุดติดใช้งานกันอย่างกว้างขวางในระบบขับเคลื่อน荷重ทางกล

(Drive mechanical loads) สำหรับการควบคุมมอเตอร์ดังกล่าวที่ส่วนมากจะเป็นการควบคุม $e^{-t/0.24}$
ความเร็วให้คงที่ในขณะที่荷重任มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งตามคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแส постоянสุด
นั้นเราสามารถที่จะควบคุมความเร็วได้ในช่วงกว้างและในทางปฏิบัติแล้วนั้นไฟฟ้ากระแส постоянสุด
ความเร็วที่จะควบคุมจะสัมพันธ์กับแรงบิดที่เกิดขึ้น ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงคุณลักษณะของ
แรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

เมื่อพิจารณา.motors ไฟฟ้ากระแส постоянสุดแบบแยกกระตุ้น(Separately excited dc motor) ดังแสดง $t = 0.2 = \ln 2 / 0.24$
ในรูปที่ 4.51 แรงดัน, กระแส, ความเร็ว และแรงบิดมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$E_a = K_a \phi \omega_m = V_t - I_a R_a$$

$$-1.61 = -t/0.24$$

$$-t = -1.61 \times 0.24$$

$$(4.76) -t = -0.393$$

$$- + - 0.393$$

$$(4.77)$$

$$T_e = K_a \phi I_a$$

จากสมการ (4.76) ความเร็ว (ω_m) กำหนดได้ดังนี้คือ

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi}$$

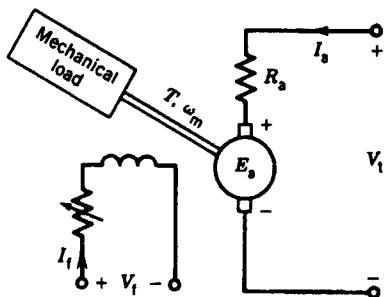
$$(4.78)$$

และจากสมการ (4.77) กับ (4.78) ดังนี้

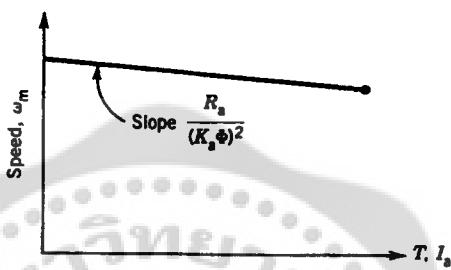
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a T_e}{(K_a \phi)^2}$$

2020/2021 ภาคฤดูร้อน 1/17/2021 10:45 AM

$$(4.79)$$



รูปที่ 4.51 นอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้น



รูปที่ 4.52 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของนอเตอร์กระแสตรง
แบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้น

ถ้าแรงดันที่ข้อ (terminal voltage) V_t และสีนแรงแม่เหล็ก ϕ มีค่าคงที่จะได้คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.52 ความเร็ว ω_m มีค่าลดลงต่ำมากเมื่อเพิ่มแรงบิดหมายความว่า speed regulation นั้นค่อนข้าง ในความเป็นจริงแล้วนั้นสีนแรงแม่เหล็กจะมีค่าลดน้อยลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะห้อนจากอาร์เมเจอร์(armature reaction) นั้นคือแรงบิด หรือกระแสอาร์เมเจอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้น ล่งผลให้ความเร็วของเตอร์ ตกลงและมีค่าต่ำกว่าในรูปที่ 4.52 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่า speed regulation ในนอเตอร์กระแสตรง

จากสมการที่ (4.79) การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรกระแสตรงนั้นสามารถทำได้ตามวิธีการดังต่อไปนี้คือ

1. ควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ (V_t)
2. ควบคุมสนามแม่เหล็ก (ϕ)
3. ควบคุมความต้านทานที่อาร์เมเจอร์ (R_a)

โดยแท้จริงแล้วนั้นความเร็วของนอเตอร์กระแสตรง (ω_m) จะมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นเมื่อ V_t มีค่าเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่อ ϕ หรือ R_a เพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตุได้จากสมการที่ (4.78) และ (4.79) สำหรับคุณลักษณะเด่นของวิธีการควบคุมความเร็วทั้งสามแบบนั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

การควบคุมแรงดันที่อาร์เมจอร์ (Armature Voltage Control)

การควบคุมความเร็วของเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีการนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมจอร์ (R_a) และจะรักษากระแสสลัดคงที่ I_f ให้คงที่ (ตามปกติจะควบคุมไว้ที่พิกัด) ส่วนแรงดันที่ข้าวอาร์เมจอร์ (V_t) จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วถ้าไม่คิดผลของสนามแม่เหล็ก static ที่ขันจากอาร์เมจอร์แล้วนั้น ความเร็ว ω_m จากสมการ (4.79) กำหนดใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\omega_m = K_1 V_t - K_2 T \quad (4.80)$$

เมื่อ

$$K_1 = \frac{1}{K_a \phi}$$

$$K_2 = \frac{R_a}{(K_a \phi)^2}$$

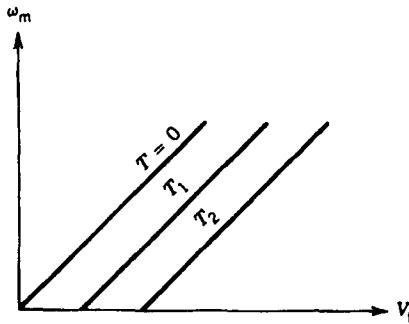
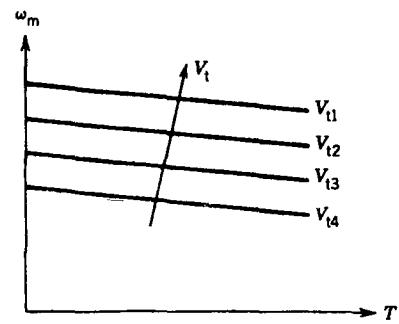
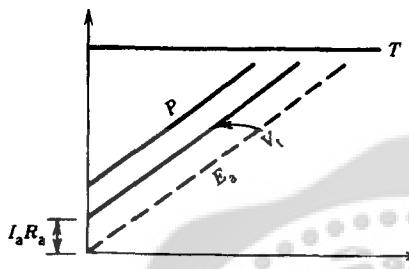
สำหรับในการณ์ที่ load torque คงที่ ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนโหลดจำพวกลิฟต์หรือเครนยกของ ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นเทียบกับ V_t ดังแสดงในรูปที่ 4.53 (ก) ถ้าแรงดันที่ข้าวถูกรักษา ให้คงที่และ load torque เปลี่ยนแปลงความเร็วสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่า V_t ดังรูปที่ 4.53 (ข)

ความจริงแล้วนั้นขณะที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ข้าว กระแสอาร์เมจอร์จะถูกรักษาให้คงที่ (ถ้าขณะเช่นนี้จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบวงจรรอบปิด) ดังนั้นจากสมการที่ (4.76) ถ้า I_a มีค่าคงที่

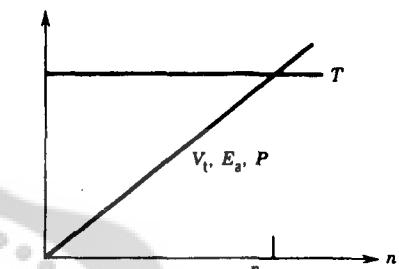
$$\begin{aligned} E_a &\propto V_t \\ &\propto \omega_m \end{aligned}$$

นั่นคือ เมื่อ V_t มีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็ว ω_m จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (ดังรูปที่ 4.53 ก) และ กำลังทางด้านอินพุตจากแหล่งจ่าย ($P = V_t I_a$) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นกันเมื่อ เทียบกับ ω_m (ดังรูปที่ 4.53 ก) ถ้าไม่คิด R_a ค่าของ V_t , E_a และ P จะเท่ากับศูนย์ที่ความเร็วเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.53 ง)

โครงสร้างของการควบคุมแรงดันที่อาร์เมจอร์ความเร็ว ω_m สามารถควบคุมได้อย่างราบรื่น จากศูนย์จนถึงความเร็วฐาน (base speed) ซึ่งความเร็วฐาน n_{base} กำหนดได้จากความเร็วที่พิกัดแรงดันที่ข้าว วิธีการควบคุมความเร็วดังกล่าววนอีกตามเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากจำเป็นต้อง มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับค่าได้เพื่อใช้ในวงจรอาร์เมจอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลง ω_m (ข) การปรับความเร็ว ω_m 

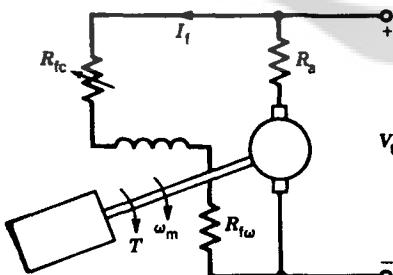
(ค) การทำงานภายใต้แรงบิดคงที่

(ง) การทำงานเมื่อ $R_a = 0$

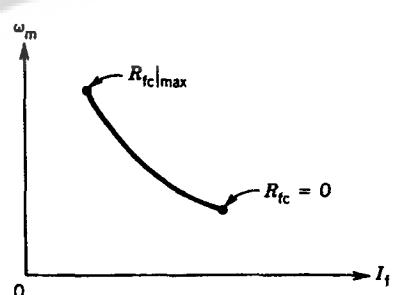
รูปที่ 4.53 การควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

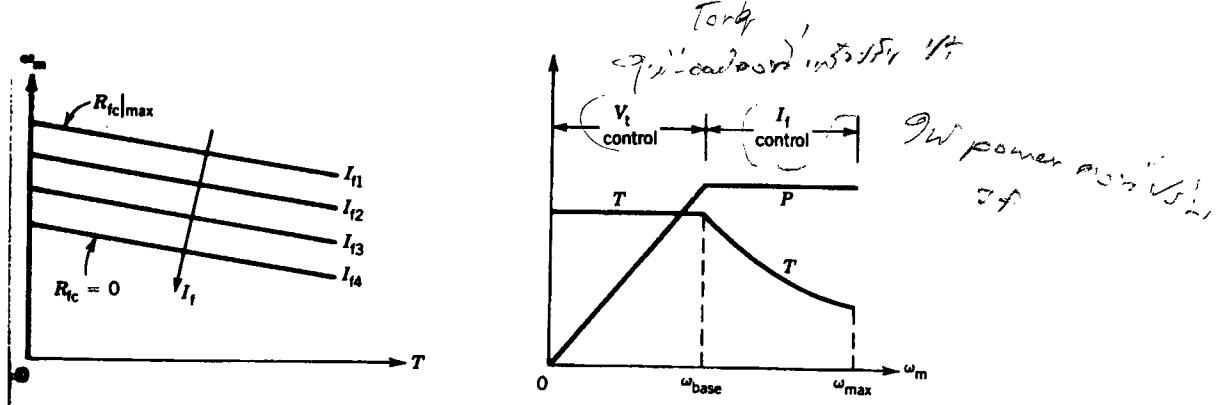
การควบคุมสนามแม่เหล็ก (Field Control)

ในการควบคุมด้วยวิธีการนี้ความต้านทาน R_a และแรงดัน V_t จะกำหนดไว้ที่ค่าหนึ่งให้คงที่ ดังนั้นความเร็วสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_f ของวงจรสนาม ซึ่งความปกติแล้วนั้นจะควบคุม I_f ด้วยการควบคุม R_{fc} ดังรูปที่ 4.54 (ก)



(ก) วงจรการควบคุม

(ข) การปรับความเร็วโดยการควบคุม I_f



(ค) การปรับระดับความเร็วโดยการควบคุม I_f

(ง) การทำงานขณะแรงบิดและกำลังคงที่

รูปที่ 4.54 การควบคุมสนามแม่เหล็ก

ถ้าสมมุติว่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น (magnetic linearity) เส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรกล ϕ จะเป็นสัดส่วนกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f ดังนี้

$$K_a \phi = K_f I_f \quad (4.81)$$

จากสมการที่ (4.79) และ (4.81)

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_f I_f} - \frac{R_a}{(K_f I_f)^2} T \quad (4.82)$$

สำหรับในการณ์ขณะไร้โหลด $T \approx 0$ ดังนั้นสมการที่ (4.82) ได้กลายเป็น

$$\omega_m \approx \frac{V_t}{K_f I_f} \quad \text{or: Control Power arm must Maximum}$$

ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจะพันกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.54 (ข) และจากรูปที่ 4.54 (ข) จะสังเกตุได้ว่าถ้ากระแส $I_f \rightarrow 0$ ความเร็ว ω_m จะเข้าสู่อนันต์ ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่อัตราสูง

จากสมการที่ (4.82) ความเร็ว ω_m กำหนดได้ใหม่คือ

$$\omega_m = K_3 - K_4 T \quad (4.83)$$

เมื่อ $K_3 = \frac{V_t}{K_f I_f}$ แสดงค่าในเทอมของความเร็วขณะไร้โหลด

$$K_4 = \frac{R_a}{(K_f I_f)^2}$$

เมื่อพิจารณากรณีที่ต้องการให้ความเร็วคงที่ขั้นแรกบิดเบลี่ยนแปลงความสามารถควบคุมความเร็วดังกล่าวเนี้ยโดยการปรับค่า I_f ดังแสดงในรูปที่ 4.54 (ค) ดังนั้นในลักษณะเดียวกันการควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ การควบคุมสนามแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการควบคุมความเร็ว ω_m

การควบคุมความเร็วจากศูนย์จนถึงความเร็วสูงตามปกติแล้วนั้นจะทำได้โดยการควบคุมแรงดันที่ขั้ว V สำหรับในการควบคุมความเร็วสูงทำได้โดยการลดค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f หลักจากพื้นส่วนเรียกว่า field weakening ที่ความเร็วสูง ω_{base} คือการจำกัดกำลังให้คงที่เรียกการทำงานส่วนนี้ Constant-power operation นั่นคือ

$$P = V_t I_a \quad (\text{คงที่})$$

$$\approx E_a I_a$$

$$T\omega_m = E_a I_a$$

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega_m} \approx \frac{\text{constant}}{\omega_m}$$

และจากเหตุผลดังกล่าวมานั้นความเร็วจะลดลงในสภาวะ field weakening จุดสำคัญของการควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์คือทำให้ได้แรงบิดคงที่และการควบคุมสนามแม่เหล็กทำให้ได้กำลังคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.54 (ง)

การควบคุมสนามแม่เหล็กทำได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายไม่แพงมากเนื่องจากเป็นการควบคุมที่ระดับกำลังต่ำของวงจรสนามอย่างไรก็ตามอินดักเต้นซึ่งมีค่าสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f เกิดขึ้นอย่างช้าซึ่งส่งผลการตอบสนองสำหรับความเร็วนั้นเป็นไปอย่างช้า

การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance Control)

วิธีการควบคุมแบบนี้จะพยากรณ์รักษาแรงดันที่ขั้ว V และกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f คงที่ที่พิกัดทั้งสอง ซึ่งความเร็วจะถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ (R_{ae}) ดังแสดงในรูปที่ 4.55 (ก) ซึ่งสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (4.84)

จากสมการที่ (4.79)

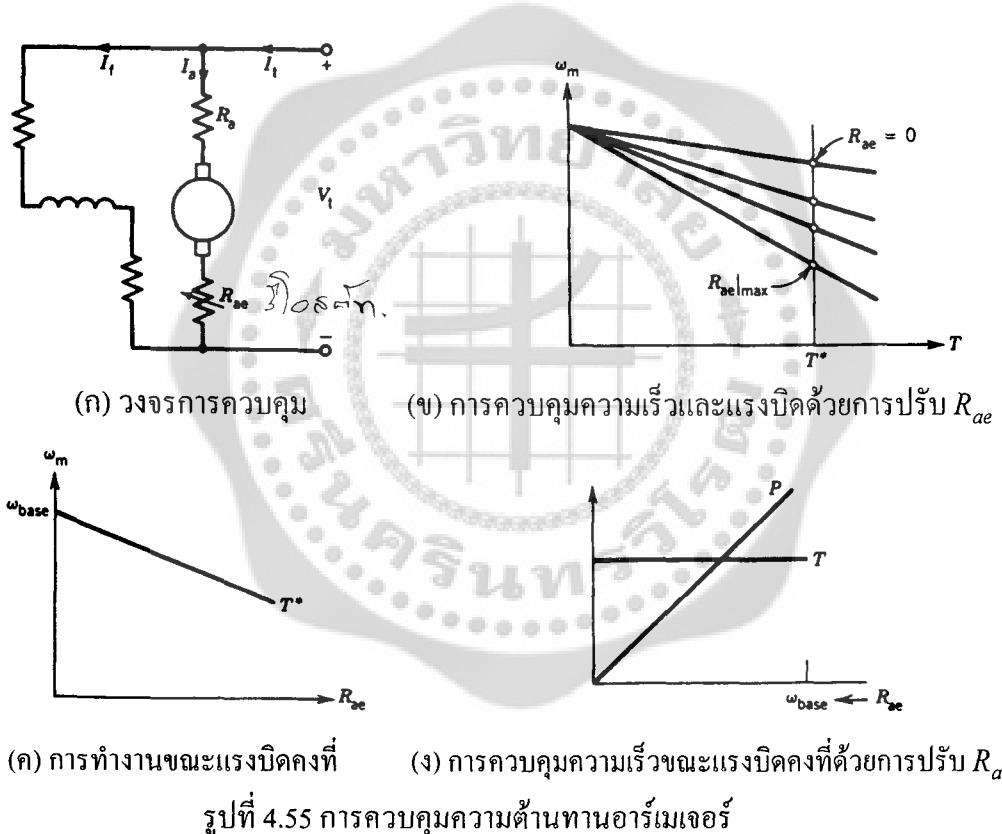
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \phi)^2} T \quad (4.84)$$

ถ้า V_t และ ϕ ไม่เปลี่ยนแปลง

$$\omega_m = K_5 - K_6 T \quad (4.85)$$

เมื่อ $K_5 = \frac{V_t}{K_a \phi}$ ในเทอมของความเร็วขณะไร้โหลด

$$K_6 = \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \phi)^2}$$



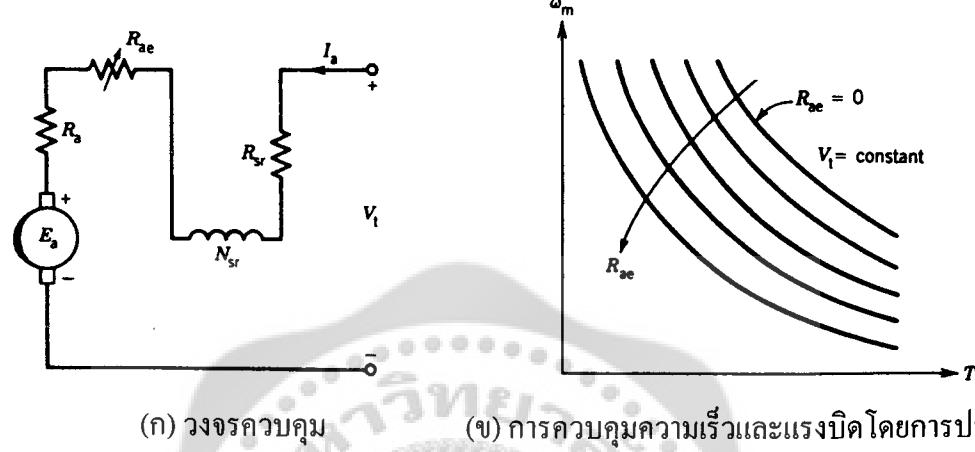
รูปที่ 4.55 การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์

คุณลักษณะความเร็ว-แรงบิด สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในวงจรอาร์เมเจอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.55 (ข) ค่า R_{ae} สามารถปรับได้จากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วโดยที่จะพยายามให้กระแส I_a ($T = K_a \phi I_a$) คงที่ ในรูปที่ 4.55 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า K_{ae} ที่จุดการทำงานของแรงบิด T^* เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเร็วกับค่าความต้านทานสำหรับการทำงานที่แรงบิดคงที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.55 (ค) และขณะแรงบิดคงที่นั้นความเร็วสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากศูนย์ถึงความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 4.55 (ง) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า R_{ae}

สำหรับการควบคุมแบบนี้ทำได้จ่ายอย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์นั้น จะให้ประสิทธิภาพดีเนื่องจากเกิดการสูญเสียจาก R_{ae} นอกจากนี้ด้วยวิธีการควบคุมดังกล่าวจะ

ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการควบคุมด้วยวิธีการควบคุมสมานแม่เหล็ก ซึ่งส่วนมากใช้ในระบบขนส่งยานพาหนะ

มอเตอร์แบบอนุกรม



รูปที่ 4.56 โครงสร้างการควบคุมมอเตอร์แบบอนุกรม

วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์แบบอนุกรมดังรูปที่ 4.56(ก) สามารถควบคุมความเร็วรอบได้โดยการปรับค่า R_{ae} ซึ่งต่ออยู่กับอาร์เมเจอร์ สำหรับสมการพื้นฐานเพื่อกำหนดค่าความเร็วของมอเตอร์แสดงได้ดังต่อไปนี้

ถ้าสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงในวงจรแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้น

$$K_a \phi = K_{sr} I_a \quad (4.86)$$

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าผ่านชุดลวดสมานอนุกรม N_{sr} ดังนี้ สมการแรงดันเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์ คือ

$$E_a = K_{sr} I_a \omega_m \quad (4.87)$$

และสมการแรงบิด

$$T_e = K_{sr} I_a^2 \quad (4.88)$$

สำหรับแรงดัน E_a ถ้าพิจารณาจากวงจรสมมูลย์รูปที่ 4.56 กำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$E_a = V_t - I_a (R_a + R_{ae} + R_{sr}) \quad (4.89)$$

- 822
Pm/s² Poffenent / 1926
control Ammeter, Control Elec

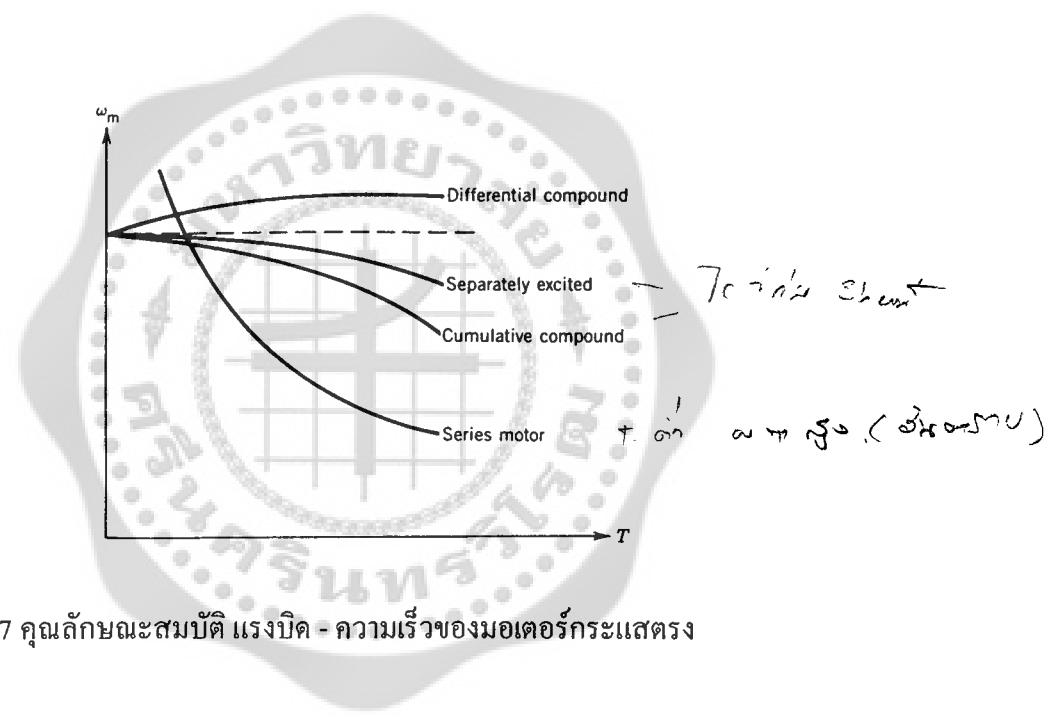
จากสมการ (4.87) และ (4.89)

ฟิล์มร่องรอยของมอเตอร์

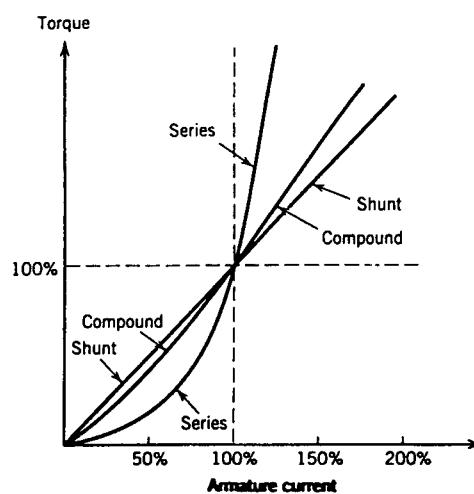
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr} I_a} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}} \quad (4.90)$$

และจากสมการ (4.88) และ (4.90)

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr} \sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}} \quad (4.91)$$



รูปที่ 4.57 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง



(ก) คุณสมบัติของแรงบิดกับกระแสอาร์เมจเจอร์

$$\textcircled{4} \quad e = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$w = Pdt = \int_{t_1}^{t_2} e idt$$

$$= \int \frac{d\phi}{dt} idt$$

$$= \int Q_2 Nid\phi$$

$$\phi = B \cdot A$$

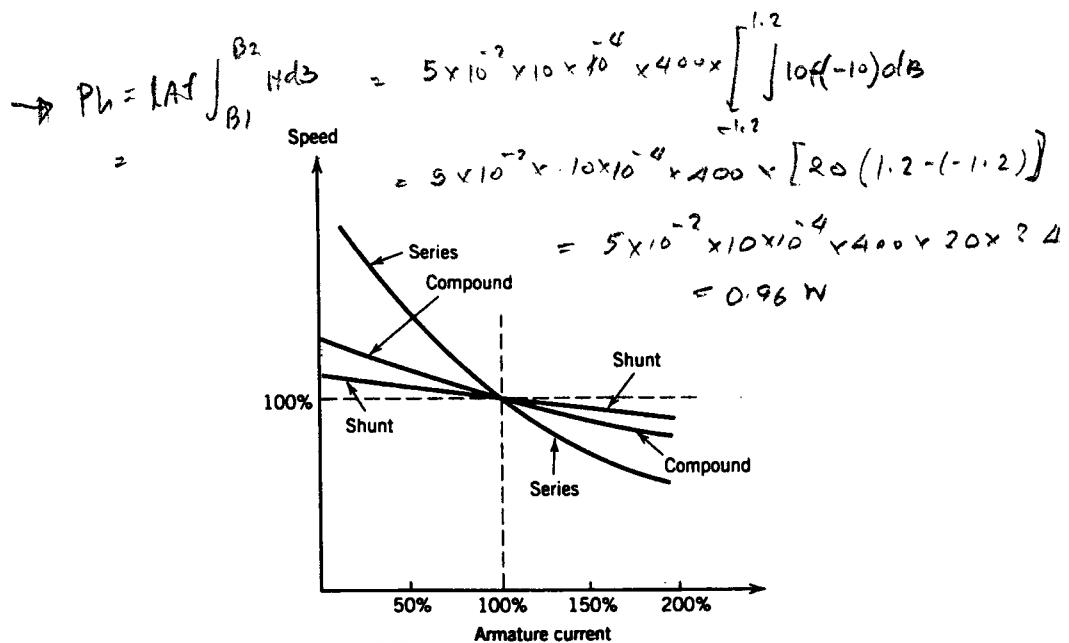
$$i = Hf/w$$

$$= \int_{B_1}^{B_2} w H A d\phi$$

$$= \int_{B_1}^{B_2} H A d\phi$$

$$= I A \int_{B_1}^{B_2} H d\phi$$

~~= I A~~



(ก) คุณสมบัติของความเร็ว กับ กระแส อิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 4.58 คุณสมบัติแรงบิดและความเร็วชิงโอลด์ของมอเตอร์กระแสตรง

$$\textcircled{5} \quad \text{an. } B \cdot H = KB^n \text{ max}$$

$$(1.2 \times 2)(10^2) = KB^n \text{ max}$$

$$A_8 = KB^n \text{ max}$$

$$P_h = KB^n \max \times f \times \frac{1}{V} \text{ core}$$

$$= 1.2 \times 400 \text{ Hz} \times 5 \times 10^{-2} \times 10 \times 10^{-4}$$

$$= 0.96 \text{ W}$$

$$\textcircled{6} \quad i_{coil} \text{ รอบ } = 0.012 \text{ Wb}$$

$$\text{an. } \Phi = Ni / 4\pi \times 10^{-4}$$

$$\therefore i = \frac{\Phi R_{coil}}{N}$$

$$= 0.012 \times 50 \times 35 \times 10^{-4} / 300$$

$$= 2.01556 \text{ A}$$

$$B_{air} = \frac{\Phi_{air}}{A_{air}} = \frac{0.012}{15 \times 10 \times 10^{-4}} = 0.8 \text{ T}$$

$$B_{sat} = \frac{\Phi_{sat}}{A_{air}} = \frac{0.012}{10 \times 10 \times 10^{-4}} = 1.2 \text{ T}$$

$$\text{an. } H = B/m$$

$$H_{air} = B/m = 38.3 \text{ A/m}$$

$$= 0.8 / 2000 \times 4 \pi \times 10^{-7}$$

$$H_{air} = B/m$$

$$= 1.2 / 2000 \times 4 \pi \times 10^{-7}$$

$$= 477.4 \text{ A/T m}$$

$$F_{air} = F_{air} + F_{air}$$

$$= (HL)_{air} + (HL)_{air}$$

$$= 318.3 \times 2 \times 35 \times 10^{-2} + (477.4 \times 2 \times 100 \times 10^{-2})$$

$$= 222.8 + 381.92 = 604.72 \text{ A Am}$$

$$i = \frac{F}{N} = \frac{604.7}{300} = 2.0159 \text{ A}$$

แบบฝึกหัดบทที่ 4

1. จงอธิบายการเกิดสนามแม่เหล็ก静态ท้อนจากอาร์เมเจอร์ และวิธีแก้ไข
2. จงอธิบายการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของเครื่องจักรกลกระแสตรง
3. มอเตอร์กระแสตรงแบบขานานขนาด $250 V$ มีค่า ค.ต.ท. $R_a = 0.25 \Omega$ และ $R_f = 125 \Omega$ ขณะไrido โหลดมอเตอร์กินกระแส $5 A$ มีความเร็วที่ $1200 rpm$ ถ้าขณะโหลดเดิมพิกัดมอเตอร์กินกระแส $52 A$ จงคำนวณความเร็วที่พิกัดโหลด
4. มอเตอร์กระแสตรงแบบขานานขนาด $10 HP$ $250 V$ กินกระแสที่พิกัดโหลด $40 A$ ค่า ค.ต.ท. อาร์เมเจอร์ และ ค.ต.ท. คงคลาดสนามเท่ากับ 0.25Ω และ 230Ω ตามลำดับ ถ้าแรงดันตกคร่อม แปรรูปต้านรวมเท่ากับ $2 V$ และการสูญเสียที่แกนรวมกับการสูญเสียนี้ของจากแรงเสียดทาน เท่ากับ $380 W$ จงคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์สมมุติว่าการสูญเสียนี้ของจากความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กเป็น 1 เปอร์เซนต์ของพิกัดเอาต์พุต
5. เครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบพสมซึ่งมีการต่อขดลวดแบบ short shunt โดยมีค่า ค.ต.ท. $R_a = 0.06 \Omega$ $R_{sr} = 0.04 \Omega$ และ $R_f = 125 \Omega$ จงคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์ E_a ที่พิกัดโหลด และแรงดันที่ข้ามเมื่อแรงดันตกคร่อมแปรรูป
6. เครื่องจักรกลกระแสตรง 4 ขั้วแม่เหล็กกำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว $15 mwb$ อาร์เมเจอร์ มี 75 จุด coils ในแต่ละจุด coils พื้นที่คลาวด์ 4 รอบ ถ้าต่อขดลวดอาร์เมเจอร์แบบ Wave winding จงคำนวณหา แรงดันที่เครื่องจักรกลสร้างขึ้นที่ความเร็ว $1050 rpm$
7. เครื่องจักรกลกระแสตรง 6 ขั้วแม่เหล็ก กำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว $30 mwb$ อาร์เมเจอร์ มี 536 ตัวนำต่อพื้นแบบ lap winding ถ้าเครื่องจักรกลหมุนด้วยความเร็วรอบ $1050 rpm$ และ จ่ายกระแสอาร์เมเจอร์ที่พิกัด $225 A$ ไปยังโหลดซึ่งต่ออยู่กับขั้วของมัน
 - (ก) ค่าคงที่ของเครื่องจักรกล K_a
 - (ข) แรงดันเหนี่ยวนำ E_a
 - (ค) กระแสที่ไหนในตัวนำ I_c
 - (ง) แรงบิดทางแม่เหล็ก T_e
 - (จ) กำลังไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ P_a
8. จากโจทย์ในข้อ 7 ถ้าอาร์เมเจอร์ต่อแบบ Wave Winding โดยกระแสที่โหลดในตัวนำ I_c มีค่าคงเดิม จงคำนวณหา
 - (ก) ค่าคงที่ของเครื่องจักรกล K_a
 - (ข) แรงดันเหนี่ยวนำ E_a
 - (ค) กระแสอาร์เมเจอร์ I_a

- (๔) แรงบิดทางแม่เหล็ก T_e
 (๕) กำลังไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ P_a
9. เครื่องจักรกลกระแสตรงขนาด $6 \text{ kW} 120 \text{ V} 1200 \text{ rpm}$ กำหนดคุณลักษณะสมบัติเส้นโค้ง การทำแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 1200 rpm ดังต่อไปนี้

$I_f(A)$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2
$E_a(V)$	5	20	40	60	79	93	102	114	120	125

และกำหนดให้ $R_a = 0.2 \Omega$ และ $R_{fv} = 100 \Omega$ ถ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้ามุนด้วยความเร็วรอบ 1200 rpm โดยการกระตุนขดลวดสนามเป็นแบบแยกกระแส เมื่อปรับ กระแส $I_f = 0.8 A$ และ ต่อโอลด์ $R_L = 2 \Omega$ เข้าที่ข้ออาร์เมเจอร์ (ไม่คิดผลของสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์) งคำนวณ

- (ก) ปริมาณ $K_a \Phi$ ของเครื่องจักรกล
 (ข) แรงดันที่สร้างขึ้น E_a และกระแสอาร์เมเจอร์ I_a
 (ค) แรงบิด T_e และกำลังที่โอลด์ P_L
10. เครื่องกำเนิดแบบขนาด $20 \text{ kW}, 200 \text{ V}, 1800 \text{ rpm}$ กำหนดให้ $R_a = 0.1 \Omega$, $R_{fv} = 150 \Omega$ สมมุติว่า $E_a = V_t$ ขณะไร้โอลด์ และข้อมูลการกำหนดคุณลักษณะเส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่ ความเร็วรอบ 1800 rpm ดังต่อไปนี้

$I_f(A)$	0.0	0.125	0.25	0.5	0.625	0.75	0.875	1.0	1.25	1.5
$E(V)$	5	33.5	67	134	165	175	190	200	214	223

1. เมื่อทำงานเป็นเครื่องจักรแบบขนาด
- (ก) งคำนวณแรงดันสูงสุดที่สร้างขึ้น
 (ข) ที่พิกัดโอลด์ $V_t = V_{t(\text{rate})}$, $I_a = I_{a(\text{rate})}$ และ $I_f = 1.25 A$ งคำนวณค่า ค.ต.ท R_{fc}
 (ค) งคำนวณกำลังไฟฟ้า P_a และแรงบิด T_a ที่พิกัดโอลด์
 (ง) งคำนวณผลกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์ $I_{f(AR)}$ ที่พิกัด โอลด์
 (จ) งคำนวณกระแสอาร์เมเจอร์สูงสุด $I_{a(\text{max})}$ สมมุติว่า $I_{f(AR)}$ เป็นสัดส่วนกับ I_a
2. ถ้าเครื่องกำเนิดแบบขนาด ถูกต่อขดลวดให้เป็นเครื่องกำเนิดแบบผสม (Long Shunt compound generator)
 (ก) งแสดงการต่อเครื่องจักรกลแบบ Long Shunt compound

(ข) จงคำนวณจำนวนรอบต่อขั้วของขดลวดสนามอนุกรมโดยต้องให้แรงดันที่ขั้วทึบขณะไร้โหลดและขณะโหลดเต็มพิกัด $V_t = 200 V$ เมื่อ $R_{sr} = 0.04 \Omega$ และ $N_f = 1200 \text{ turns/pole}$

$$\therefore k\phi = \frac{E_a}{I_a}$$

$$I_a = \frac{\rho_a}{R_{sr}} = \frac{102.5}{0.04} = 2562.5 \text{ A}$$

สภาพชั่วครู่ และสภาพทางไนดามิกส์

Transients and Dynamics

ในบทก่อน ๆ เป็นการพิจารณาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงกับกระแสสลับในสภาพการทำงานภายใต้เงื่อนไขในสภาพคงตัว (Steady state) อย่างไรก็ตามเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นพฤติกรรมของเครื่องจักรกลจะแตกต่างไปจากสภาพเดิม สำหรับช่วงเวลาที่รบกวนหายไป ระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายภายในชั้งการทำงานในสภาพคงตัว ซึ่งการประยุกต์ใช้งานเครื่องจักรกลนั้นจำเป็นต้องเรียนรู้พฤติกรรมการตอบสนอง เมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในช่วงเวลาชั่วครู่ บทนี้จะศึกษาทั้งพฤติกรรมของสภาพชั่วครู่ทางไฟฟ้าและพฤติกรรมทางกล (ไนดามิกส์) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยแท้จริงแล้วนั้น การศึกษาพฤติกรรมสภาพชั่วครู่และไนดามิกส์ ทำได้ไม่ง่ายนัก อย่างไรก็ตามการพิจารณาจะลดความยุ่งยากลงโดยสมมุติภายในชั้งการวิเคราะห์

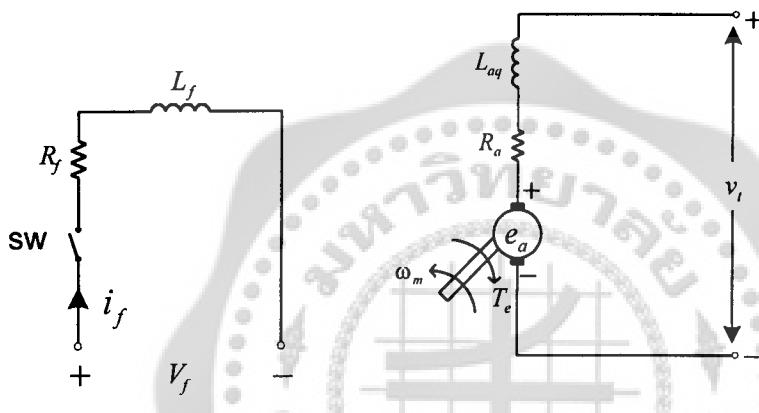
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมได้ง่ายและการใช้งานส่วนใหญ่ จะเป็นการควบคุมความเร็วเนื่องจากสามารถควบคุมได้ในช่วงกว้าง นอกเหนือนี้ยังประยุกต์ในงานควบคุมตำแหน่ง เช่น ระบบขับเคลื่อนเซอร์โว (Servo drives) และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และลดความยุ่งยาก การพิจารณาจะกำหนดองค์ประกอบของระบบดังนี้

- ไม่คิดผลการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก (Magnetic saturation) โดยสมมุติว่าค่าความหนาไม่ขึ้นอยู่กับกระแส
- สมมุติว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเนื่องจากขดลวดสนามและเนื่องจากอาร์เมเจอร์เกิดขึ้นตามแนวแกน d และแนวแกน q ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงไม่เกิดค่าความหนาที่ยานำร่วมระหว่างวงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ และที่สำคัญจากเหตุผลดังกล่าวจะไม่ทำให้ผลของความเป็นสนามแม่เหล็กลดลง (demagnetizing effect) ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์ (armature reaction)

ในส่วนแรกจะเป็นการพิจารณาสภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อศึกษาถึงเหตุผลที่จะนำໄปวิเคราะห์พุทธิกรรมทางไนโอมิกส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะพิจารณาและวิเคราะห์จากสมการและทราบเพอร์ฟังก์ชัน ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านເາຫັນເພື່ອທ່ອນພຸດ ທີ່ໄດ້ຈາກผลการตอบสนองของระบบซึ่งເກີດອິນພຸດທີ່ເປີດຢັນແປລັງ

5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามแยกกระแสตื้น

(Separately Excited DC Generator)



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามแยกกระแสตื้น

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามแยกกระแสตื้นแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำ ของอาร์เมเจอร์แสดงตามแนวแกน q (L_{aq}) เนื่องจากแรงเครื่องแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์เกิดขึ้นตามแนวแกน q สำหรับสมการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงกำหนดดังนี้ ก cioè

$$e_a = K_a \Phi \omega_m \quad (5.1)$$

$$T_e = K_a \Phi i_a \quad (5.2)$$

ถ้าสมนูญว่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น $K_a \Phi = K_f i_f$ ดังนั้นสมการ (5.1) และ (5.2) เก็บไว้ได้ดังนี้ ก cioè

$$e_a = K_f i_f \omega_m \quad (5.3)$$

$$T_e = K_f i_f i_a \quad (5.4)$$

1. สภาวะชั่วครู่ในวงจรสนาม (Field circuit transient)

เมื่อพิจารณาสภาวะชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามแยกกระแสตื้น ประการแรกที่จะศึกษาคือผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการกระแสตื้นแรงดันให้กับวงจรสนาม สำหรับวงจร

อาร์เมเจอร์เปิดวงจรและเครื่องกำเนิดหมุนที่ความเร็วคงที่ ω_m จากรูปที่ 5.1 สมการแรงดันของวงจรสนามหลังจาก สวิตซ์ปิด คือ

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (5.5)$$

ดังนั้น Laplace transform ของสมการ (5.5) เมื่อกำหนดเงื่อนไขของสภาวะต้นเป็นศูนย์ คือ

$$\begin{aligned} \text{Time constant } \tau_f &= \frac{L_f}{R_f} \\ V_f(s) &= R_f I_f(s) + L_f s I_f(s) \\ &= I_f(s)(R_f + sL_f) \end{aligned} \quad (5.6)$$

สำหรับความสัมพันธ์ของ蜓านเฟอร์ฟังก์ชันระหว่างกระแสต่อแรงดันของขดลวดสนามคือ

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + sL_f} = \frac{1}{R_f(1 + s\tau_f)} \quad (5.7)$$

เมื่อ $\tau_f = L_f / R_f$ คือ ค่าเวลาคงตัวของวงจรสนาม

สำหรับแรงดันที่สร้างขึ้นในวงจรอาร์เมเจอร์จากสมการ (5.3) คือ

$$e_a = K_f i_f \omega_m = K_g i_f \quad (5.8)$$

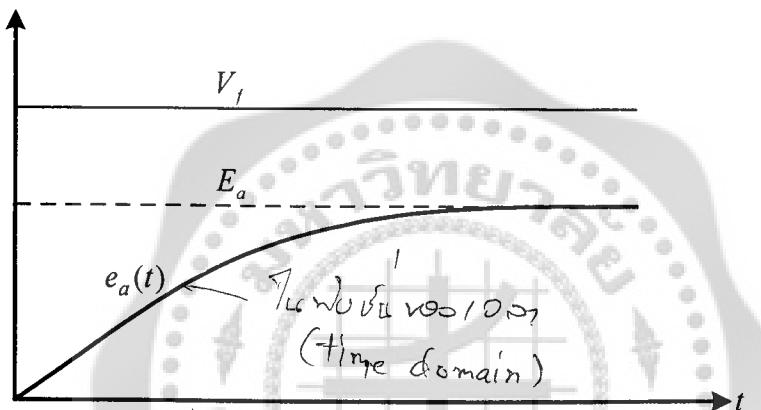
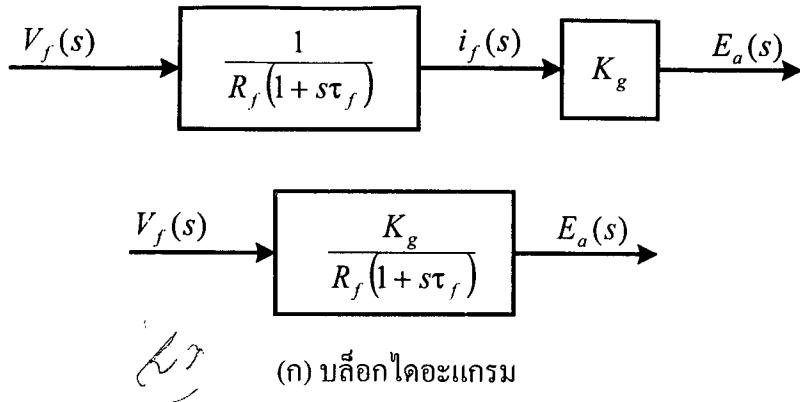
เมื่อ $K_g = K_f \omega_m$ คือความชันของส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น เส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่ความเร็ว ω_m แสดงได้จากการพลีอ็อตค่า e_a กับ i_f สำหรับ Laplace transform ของสมการ (5.8) คือ

$$E_a(s) = K_g I_f(s) \quad (5.9)$$

จากสมการ (5.7) และ (5.9) 蜓านเฟอร์ฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอาร์เมเจอร์ต่อแรงดันวงจรสนามคือ

$$\frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{E_a(s)}{I_f(s)} \cdot \frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{K_g}{R_f(1 + s\tau_f)} \quad (5.10)$$

↑
input



รูปที่ 5.2 สภาพะชั่วครู่ในวงจรstanam

จากสมการ (5.7) , (5.9) และ (5.10) สามารถแสดงโดยบล็อกไซโอดีแกรมรูปที่ 5.2 การตอบสนองในโดเมนเวลาที่สัมพันธ์กับทรานเฟอร์ฟิกก์ชันของสมการ (5.10) (เมื่อ V_f เปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป) คือ

$$\boxed{e_a(t) = \frac{K_g V_f}{R_f} \left(1 - e^{-t/\tau_f} \right)} \quad | \quad \text{ใช้ invert laplace} \quad (5.11)$$

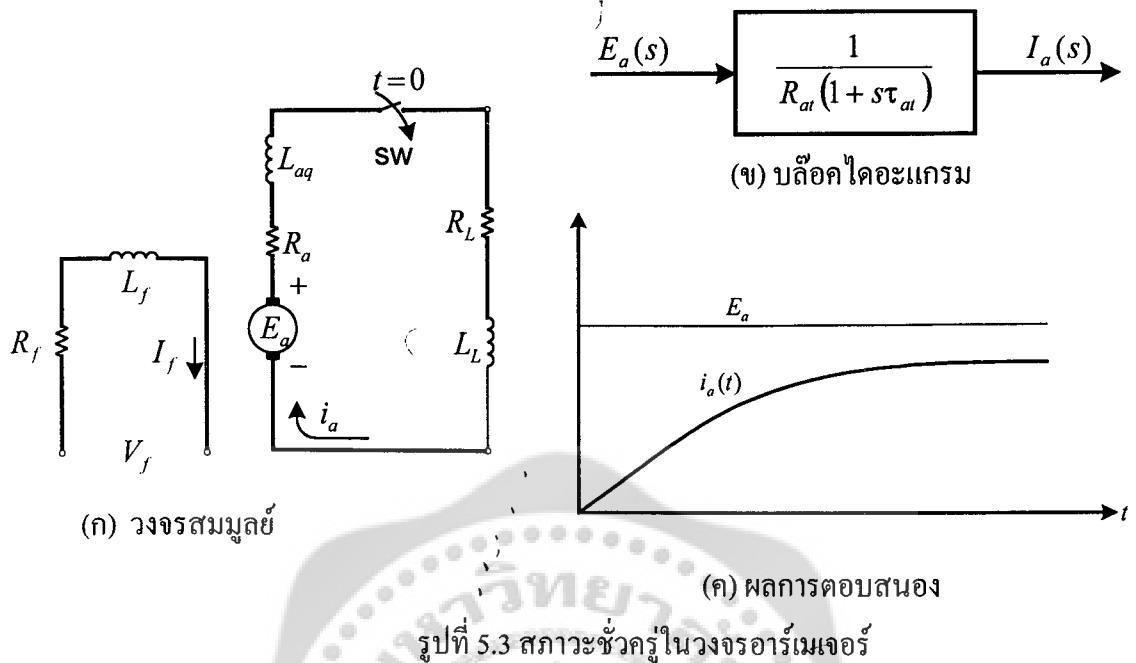
ดูๆ กัน

$$= E_a \left(1 - e^{-t/\tau_f} \right) \quad (5.12)$$

ถ้า $E_a = e_a(\infty) = K_g V_f / R_f = K_g I_f$ คือแรงดันที่เกิดขึ้นในสภาพะคงตัวและ $I_f = V_f / R_f$ คือกระแสที่ป้อนขดลวดเข้าstanam ในสภาพะคงตัว

ผลการตอบสนองดังรูปที่ 5.2 (ข) เป็นผลการตอบสนองของระบบอันดับ 1 (first-order) เทียบกับค่าเวลาคงตัว ซึ่งค่าเวลาคงตัวของวงจรstanam τ_f มีค่ามากและเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.1 - 2 วินาที

2. ทรานเซิ่นในวงจรอาร์เมเนเจอร์



เมื่อพิจารณาสภาพชั่วคราวที่เกิดขึ้นในวงจรอาร์เมเนเจอร์ เมื่อต่อโหลดเข้ากับระบบดังรูปที่ 5.3 ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน R_L และค่าความเหนี่ยวนำ L_L ซึ่งต่ออยู่กับขั้วอาร์เมเนเจอร์ เมื่อสวิตช์ถูกปิดที่เวลา $t = 0$ ถ้าสมมุติว่าอาร์เมเนเจอร์มุนที่ความเร็วคงที่และกระแสของคลาดstanamคงที่ด้วย ดังนั้น หลังจากสวิตช์ปิดสมการแรงดัน E_a กำหนดได้ตามสมการ (5.13)

$$i_a = i_L \quad (5.13)$$

$$E_a = R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} + R_L i_a + L_L \frac{di_a}{dt}$$

ขัดสมการ (5.13) ใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$i_a = i_L =$$

$$E_a = (R_a + R_L) i_a + (L_{aq} + L_L) \frac{di_a}{dt} \quad (5.14)$$

เมื่อ $R_{at} = R_a + R_L$ คือ ผลรวมของค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเนเจอร์

$L_{at} = L_{aq} + L_L$ คือ ผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำในวงจรอาร์เมเนเจอร์

$$E_a = R_{at} i_a + L_{at} \frac{di_a}{dt} \quad (5.15)$$

Laplace transform ของสมการ 5.15 คือ

$$E_a(s) = R_{at} I_a(s) + L_{at} s I_s(s) \quad (5.16)$$

ดังนั้นทรานเฟอร์พิงก์ชัน คือ

$$F(s) = (R_{at} + L_{at}s) I_a(s)$$

$$E_a(s) = R_{at} + \left(1 + \frac{L_{at}}{R_{at}} s\right) I_a(s)$$

173

$$\frac{E_a(s)}{I_a(s)} = \frac{R_{at}(1 + s\tau_{at})}{R_{at}(1 + s\tau_{at}) - 1} \quad (5.17)$$

โดยที่ $\tau_{at} = L_{at}/R_{at}$ คือ ค่าเวลาคงตัวของวงจรอาร์เมเจอร์

ส่วนนี้ลือคไดอะแกรมแสดงทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสมการ (5.17) แสดงดังรูปที่ 5.3(บ) และผลการตอบสนองในโคลเมนเวลา กำหนดตามสมการ (5.18)

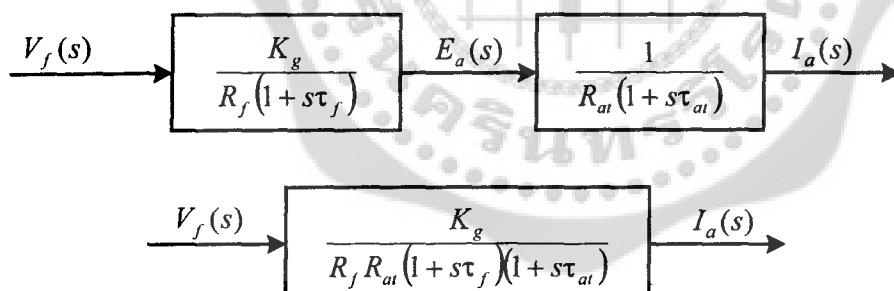
$$i_a(t) = \frac{E_a}{R_{at}} \left(1 - e^{-t/\tau_{at}}\right) \quad (5.18)$$

และผลการตอบสนองสมการ (5.18) แสดงดังรูปที่ 5.3(ค) ซึ่งเป็นผลตอบสนองอันดับที่หนึ่งเทียบกับค่าเวลาคงตัว τ_{at} ตามปกติแล้วนั้น τ_{at} มีค่าต่ำ ดังนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จะเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

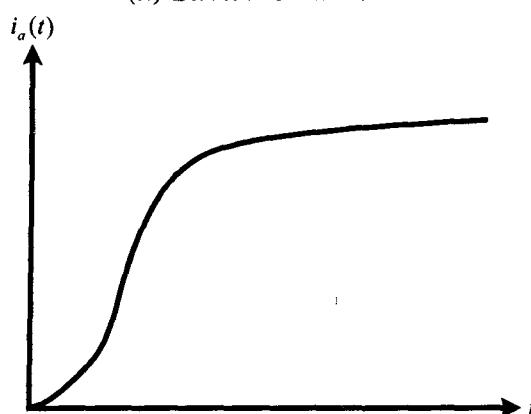
จากสมการ (5.10) และ (5.17) ผลรวมของทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับกระแสอาร์เมเจอร์ต่อแรงดันของลวดสนามคือ

$$\frac{I_a(s)}{V_f(s)} = \frac{I_a(s)}{E_a(s)} \cdot \frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{K_g}{R_f R_{at} (1 + s\tau_f)(1 + s\tau_{at})} \quad (5.19)$$

ความสัมพันธ์ของสมการ (5.19) แสดงได้โดยลือคไดอะแกรมรูปที่ 5.4



(ก) บล็อกไดอะแกรม



(ข) ผลการตอบสนอง

รูปที่ 5.4 สภาวะชั่วครู่ในวงจรสนามและอาร์เมเจอร์

และสำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแบบสเต็ป (Step change of voltage) ในวงจรสามารถกำหนดตามสมการ (5.20)

$$V_f(s) = \frac{V_f}{s} \quad (5.20)$$

แล้วจากสมการ (5.19) และ (5.20) กระแสอาร์เมเจอร์หาได้ตามสมการ (5.21)

$$I_a(s) = \frac{K_g V_f}{R_f R_{at} s (1 + s\tau_f)(1 + s\tau_{at})} \quad (5.21)$$

หรือ

$$I_a(s) = \frac{K_g V_f}{R_f R_{at} \tau_f \tau_{at} s (1 + s\tau_f)(1 + s\tau_{at})} \left(s + \frac{1}{\tau_f} \right) \left(s + \frac{1}{\tau_{at}} \right) \quad (5.22)$$

กำหนดให้ $A = K_g V_f / R_f R_{at} \tau_f \tau_{at}$ ดังนั้นสมการ (5.22) เวียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{A}{s(s + 1/\tau_f)(s + 1/\tau_{at})} \quad (5.23)$$

จากสมการ (5.23) แก้สมการหาค่า $i_a(t)$ ได้ดังนี้ คือ

$$I_a(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s + 1/\tau_f} + \frac{A_3}{s + 1/\tau_{at}} \quad (5.24)$$

เมื่อ $A_1 = \left. \frac{A}{(s + 1/\tau_f)(s + 1/\tau_{at})} \right|_{s=0} = A \tau_f \tau_{at}$

$$A_2 = \left. \frac{A}{s(s + 1/\tau_{at})} \right|_{s=-1/\tau_f}$$

$$A_3 = \left. \frac{A}{s(s + 1/\tau_f)} \right|_{s=-1/\tau_{at}}$$

ดังนั้นผลการตอบสนองของ i_a ในโภmenเวลา คือ

$$i_a(t) = A_1 + A_2 e^{-t/\tau_f} + A_3 e^{-t/\tau_{at}} \quad (5.25)$$

หมายเหตุ A_1 แสดงค่ากระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะคงตัว เมื่อ $A_1 = i_a(\infty) = (K_g V_f)/(R_f R_{at}) = K_g I_f / R_{at} = E_a / R_{at}$ และรูปที่ 5.4 (ข) แสดงการตอบสนองของกระแส i_a สำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันแบบสเตปในวงจรอาร์เมเจอร์

ตัวอย่างที่ 5.1 กำหนดให้พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขาดลวดสนามแยกกระแสตู้น ดังนี้
คือ

$$R_f = 100 \Omega \quad R_a = 0.25 \Omega$$

$$L_f = 25 H \quad L_{aq} = 0.02 H$$

$$K_g = 100 V \text{ ต่อกระแสในวงจรสนามที่พิกัดความเร็ว } f_x$$

(ก) เครื่องกำเนิดขับเคลื่อนที่พิกัดความเร็วและแรงดันของวงจรสนาม $V_f = 200 V$ ขณะจ่ายให้กับขาดลวด
สนามอย่างฉับพลัน

- (1) จงคำนวณแรงดันอาร์เมเจอร์ในฟังก์ชันของเวลา
 - (2) จงคำนวณแรงดันอาร์เมเจอร์ในสภาวะคงตัว
 - (3) จงคำนวณเวลาที่ทำให้แรงดันอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นเป็น 90 เปอร์เซนต์ของแรงดันในสภาวะคงตัว
- (ข) เครื่องกำเนิดขับเคลื่อนที่พิกัดความเร็วและกำหนดให้โหลดที่ประกอบด้วย $R_L = 1 \Omega$ และ $L_L = 0.15 H$ ต่อ อนุกรมกับข้อ้อาร์เมเจอร์ จงคำนวณกระแสอาร์เมเจอร์ในฟังก์ชันเวลา

วิธีที่ 1

(ก) ค่าเวลาคงตัวของวงจรสนาม

$$\tau_f = \frac{L}{R} = \frac{25}{100} = 0.25 \text{ วินาที}$$

(1) จากสมการ (5.11)

$$e_a(t) = \frac{K_g V_f}{R_f} \left(1 - e^{-t/\tau_f} \right)$$

$$= \frac{100 \times 200}{100} \left(1 - e^{-t/0.25} \right)$$

$$= 200 \left(1 - e^{-4t} \right)$$

(2)

$$e_a(\infty) = 200 V$$

(3)

$$0.9 \times 200 = 200 \left(1 - e^{-4t} \right)$$

$$\therefore t = 0.575 \text{ วินาที}$$

0.17

จากสมการ (5.22)

$$\tau_{at} = \frac{L_{att}}{R_{att}} = \left(\frac{\underbrace{0.15 + 0.02}_{1.17}}{\underbrace{t + 0.25}_{1.75}} \right) = 0.136$$

$$I_a(s) = \frac{K_g V_f}{R_f R_{at} \tau_f \tau_{at} s (1 + s\tau_f)(1 + s\tau_{at})}$$

$$= \frac{(s + \frac{1}{\tau_f})(s + \frac{1}{\tau_{at}})}{100 \times 200}$$

$$= \frac{4705.88}{s(s+4)(s+7.35)}$$

$$= \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s+4} + \frac{A_3}{s+7.35} \quad \text{Partial Fraction}$$

(การบวกส่วนประกอบ)

เมื่อ

$$A_1 = \left. \frac{4705.88}{(s+4)(s+7.35)} \right|_{s=0} = 160$$

$$A_2 = \left. \frac{4705.88}{s(s+7.35)} \right|_{s=-4} = -351$$

$$A_3 = \left. \frac{4705.88}{s(s+4)} \right|_{s=-7.35} = 191$$

ดังนั้นจากสมการ (5.25)

$$i_a(t) = A_1 + A_2 e^{-t/\tau_f} + A_3 e^{-t/\tau_{at}}$$

$$i_a(t) = 160 - 351e^{-4t} + 191e^{-7.35t}$$

ตอบ

5.2 สถานะทางไนโามิกส์ของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor Dynamics)

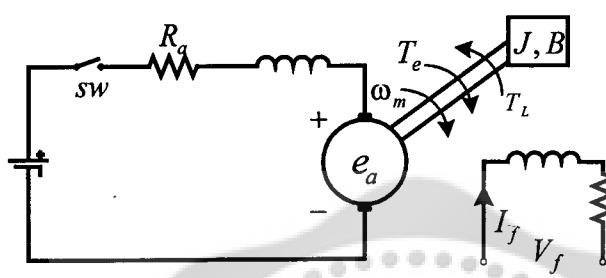
มอเตอร์กระแสตรงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการควบคุมความเร็วและแรงบิดสามารถควบคุมได้ในช่วงกว้าง สำหรับวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยก กระตุ้นเป็นการควบคุมการกระตุ้นขดลวดสนามให้คงที่ โดยที่ความเร็วสามารถควบคุมด้วยการปรับแรงดันที่ข้าว ซึ่งการศึกษาผลที่เกิดจากสถานะทางทรานเซิร์ฟในวงจรอาจเรียกว่าการเปลี่ยนทางกลในระบบขับเคลื่อนทางกลโดยพิจารณาของมอเตอร์

ระบบมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 5.5(ก) ถ้าสมมุติว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น (Magnetic linearity) และสมการพื้นฐานของมอเตอร์กำหนดดังนี้ คือ

$$e_a = K_f i_f \omega_m = K_m \omega_m \quad (5.26)$$

$$T_e = K_f i_f i_a = K_m i_a \quad K_m = K_f i_f \quad (5.27)$$

เมื่อ $K_m = K_f i_f$ คือ ค่าคงที่ ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของ e_a / ω_m แรงดันอาเร่เมเจอร์ e_a จะสัมพันธ์กับกระแสในขดลวดสนาม i_f ที่ความเร็ว ω_m



$$Vt = V_{Ra} + V_{La} + E_a$$

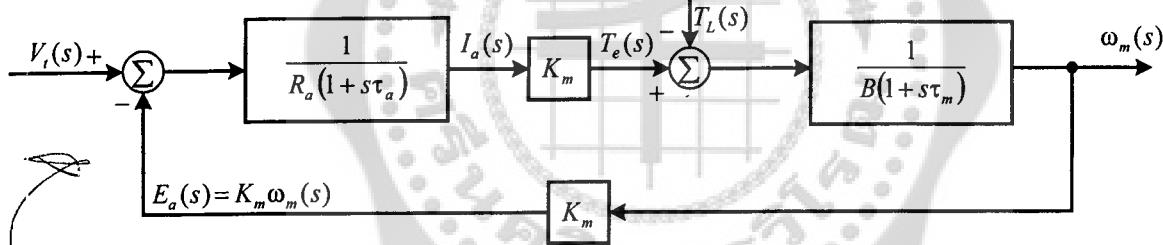
$$Vt = Ra I_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a$$

$$V(s) = Ra I_a(s) + L_a \frac{di_a(s)}{dt} + E_a(s)$$

$$= Ra I_a(s) + L_a \frac{d}{ds} I_a(s) + K_m \omega_m(s)$$

$$= K_m \omega_m(s) + (Ra + L_a s) I_a(s)$$

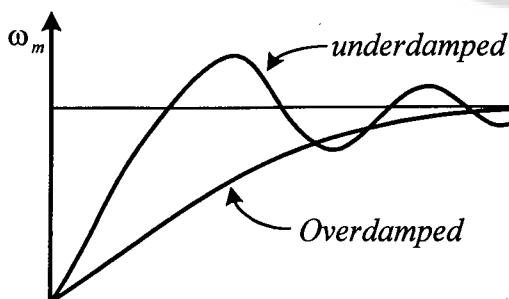
(ก) วงจรสมมูลย์



Second order.

(ข) บล็อกไดอะแกรน

$$Vt(s) = K_m \omega_m(s) + Ra(1 + z_a s) I_a(s)$$



(ค) ผลการตอบสนอง

รูปที่ 5.5 นิรเออร์กระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระแสตู้น

$$T = K_m I_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + T_L -$$

$$T(s) = JS \cdot \omega_m(s) + B \omega_m(s) + T_L(s)$$

$$T(s) = (JS + B) \omega_m(s) + T_L(s)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T(s) - T_L(s)}{B \left(1 + \frac{J}{B} s \right)}$$

5.3

สำหรับ Laplace transforms ของสมการ (5.26) และ (5.27) กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$E_a = K_m \omega_m(s) \quad (5.28)$$

time constant rotor motor

$$T(s) = K_m I_a(s) \quad (5.29)$$

ในรูปที่ 5.5(ก) ถ้าสวิทซ์ปิดที่เวลา $t = 0$ ดังนั้นหลังจากสวิทซ์ปิดไปแล้วแรงดันที่ขึ้น V_t ตามกฎของ KVL กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$V_t = e_a + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \quad (5.30)$$

และจากสมการ (5.26) และ (5.30)

$$V_t = K_m \omega_m + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \quad (5.31)$$

ดังนั้น Laplace transforms ของสมการ (5.31) จากเงื่อนไขขณะเริ่มต้นเป็นศูนย์จะได้ $V_t(s)$ คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + R_a I_a(s) + L_{aq} s I_a(s) \quad (5.32)$$

จัดสมการ (5.32) ใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + I_a(s) R_a (1 + s \tau_a) \quad (5.33)$$

เมื่อ $\tau_a = L_{aq} / R_a$ คือ ค่าเวลาคงตัวของอาร์เมชอร์

สำหรับสมการทางไอนามิกส์ของระบบทางกลกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$T = K_m i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + T_L \quad (5.34)$$

เมื่อ J คือ ผลรวมความเนื้อยื่นของเนื่องจากโอลด์และโรเตอร์

B คือ ค่าคงที่ของแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด ของโอลด์และมอเตอร์

T_L คือ แรงบิดทางกลของโอลด์

สำหรับเทอม $B \omega_m$ แทนแรงบิดสูญเสียเนื่องจากการหมุนของระบบ Laplace transforms ของสมการ (5.34) คือ

$$T(s) = K_m I_a(s) = J s \omega_m(s) + B \omega_m(s) + T_L(s) \quad (5.35)$$

จากสมการ (5.35) และ (5.28) สมการความเร็ว (ω_m) กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\omega_m(s) = \frac{T(s) - T_L(s)}{B(1 + sJ/B)} = \frac{K_m I_a(s) - T_L(s)}{B(1 + s\tau_m)} \quad (5.36)$$

เมื่อ $\tau_m = J/B$ คือ ค่าเวลาคงตัวทางกลของระบบและจากสมการ (5.29) และ (5.33) กระแสอาร์เมเนเจอร์ หาได้ตามสมการ (5.37)

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - E_a(s)}{R_a(1 + s\tau_a)} = \frac{V_t(s) - K_m \omega_m(s)}{R_a(1 + s\tau_a)} \quad (5.37)$$

สำหรับลักษณะของแกรมของสมการ (5.36) และ (5.37) แสดงไว้ในรูปที่ 5.5(ข) และถ้าพิจารณาแยกเป็นกรณีทำได้ดังนี้ คือ

1. แรงบิดของโหลดเป็นสัดส่วนกับความเร็ว

$$T_L \propto \omega_m \\ = B_L \omega_m \quad (5.38)$$

เมื่อกำหนดให้ J คือผลกระทบของความเร็วอยู่ทั่งระบบซึ่งเปลี่ยนได้ดังนี้ คือ

$$J = J_{motor} + J_{load} \quad (5.38 \text{ ก})$$

จากสมการ (5.35) สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$K_m I_a(s) = J_s \omega_m(s) + B_m \omega_m(s) + B_L \omega_m(s) \quad (5.39)$$

เมื่อกำหนดให้ $B = (B_m + B_L)$ ดังนี้

$$K_m I_a(s) = J_s \omega_m(s) + B \omega_m(s) \quad (5.39 \text{ ก})$$

เมื่อใส่โหลดให้กับระบบขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานเนื่องจากความผิดของระบบทางกลเพิ่มขึ้นและ จากสมการ (5.33) และ (5.39 ก) แรงดันที่ขึ้วเปลี่ยนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + \frac{BR_a}{K_m} (1 + s\tau_m) (1 + s\tau_a) \omega_m(s) \quad (5.40)$$

ดังนั้นอัตราส่วนของความเร็วต่อแรงดันที่ขึ้วหาได้ตามสมการ (5.40 ก) คือ

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{K_m + (BR_a/K_m)(1 + s\tau_m)(1 + s\tau_a)} \quad (5.40 \text{ ก})$$

การตอบสนองของความเร็วกำหนดโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ข้อ V_t ซึ่งเป็นการตอบสนองของระบบอันดับสอง เนื่องจากมีค่าเวลาคงตัวสองค่าคือ τ_m และ τ_a การพิจารณาผลตอบสนองว่าเป็นแบบถ่วงน้อย หรือถ่วงมาก ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวเหล่านั้นรวมทั้งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ด้วย เช่น K_m , B , และ R_a เป็นต้น ซึ่งการตอบสนองทั้งสองกรณีแสดงดังรูปที่ 5.5 (ค)

2. ถ้า $L_{aq} = 0$ นั้นคือไม่คิดผลของค่าความหนี้บาน้ำและค่าเวลาคงตัว $\tau_a = 0$ ทราบเพื่อ ฟังก์ชัน ในสมการ (5.40 ก) เวียนใหม่ได้ตามสมการ (5.41)

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{K_m + (BR_a/K_m)(1+s\tau_m)} \quad (5.41)$$

หรือ

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \left(\frac{K_m}{K_m^2 + R_a B} \right) \left(\frac{1}{1+s\tau'_m} \right) \quad (5.42)$$

เมื่อ

$$\tau'_m = \frac{R_a B}{K_m^2 + R_a B} \tau_m < \tau_m \quad (5.43)$$

3. ถ้า $B = 0$ สมการ (5.39 ก) เวียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$K_m I_a(s) = J s \omega_m(s) \quad (5.44)$$

แล้วยกสมการ (5.33) และ (5.44) จะได้สมการแรงดันที่ข้อ คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + \frac{J s \omega_m(s) R_a (1+s\tau_a)}{K_m}$$

ดังนั้น

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{K_m + (JR_a/K_m)s(1+s\tau_a)} \quad (5.45)$$

4. กรณีเหล่านี้ยกไปด้วยกัน ถ้าเหล่านี้ยกไปด้วยกันอย่างรวดเร็วนั้นคือ สวิทช์ดังรูปที่ 5.5(ก) เปิดออกที่เวลา $t = 0$ สมการทางไอนามิกส์สำหรับระบบทางกล คือ

$$T = K_m i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = 0 \quad (5.46)$$

ดังนั้น

$$B\omega_m = -J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5.47)$$

Take 184

และ Laplace transforms ของสมการ (5.47) คือ

$$B\omega_m(s) = -J[s\omega_m(s) - \omega_{mo}] \quad (5.48)$$

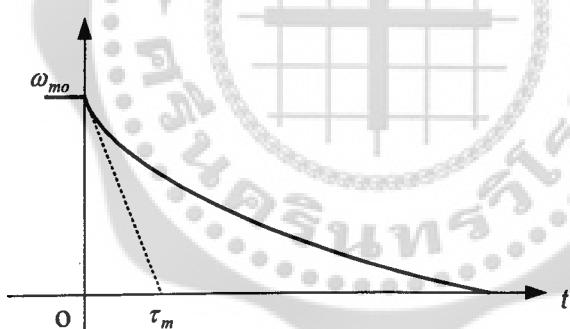
จากสมการ (5.48) เมื่อ ω_{mo} คือ ความเร็วเริ่มต้น

ดังนั้นความเร็ว ω_m เขียนได้ตามสมการ (5.49) คือ

$$\omega_m(s) = \frac{J\omega_{mo}}{B + sJ} = \frac{\omega_{mo}}{(s + B/J)} \quad (5.49)$$

สำหรับผลตอบสนองของความเร็วในโคลเมนเวลา คือ

$$\omega_m(t) = \omega_{mo} e^{-t/\tau_m} \quad (5.50)$$



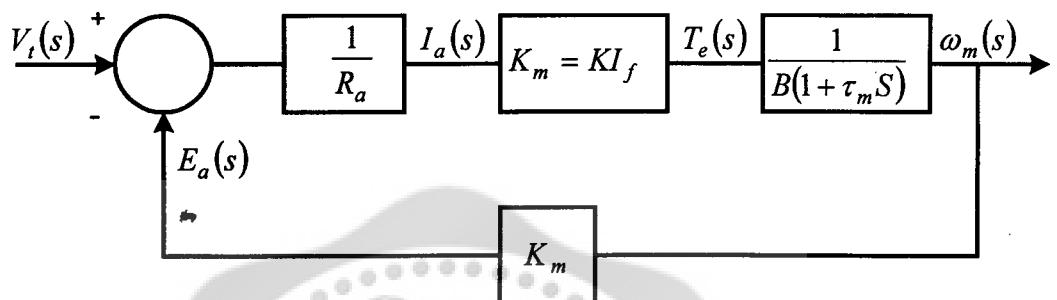
รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองในโคลเมนเวลาเนื่องจากความเร็วลดลงจากความเร็วเริ่มต้น

ตัวอย่างที่ 5.2 มอเตอร์กระแสตรงชนิดคลาสนามแยกระดับ ขนาด 5 HP, 200 V มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $R_a = 0.5 \Omega$, $K = 2 H$, $R_f = 220 \Omega$, $L_f = 110 H$ ถ้าไม่คิดผลของอินดักเต้นซ์ที่อาร์เมเนเจอร์ และแรงบิดเนื่องจากโหลดเป็นสัดส่วนกับความเร็ว เมื่อกำหนดให้ $J = 3 kg.m^3$ และ $B = 0.3 kg.m^2/s$ สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เป็นการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับอาร์เมเนเจอร์ (V_t) และกระแส $I = 1 A$ (คงที่)

(ก) จงเขียนบล็อก ໄດะແກຣມแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมอเตอร์ ω_m กับแรงดันที่จ่าย V_t และจงหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

(ข) จงคำนวณความเร็วมอเตอร์ภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อจ่ายแรงดันแบบสเต็ป 220 V

- (ก) มอเตอร์ใช้เวลาเท่าไรเมื่อความเร็วเป็น 95 % ตามเงื่อนไขในข้อ (ข)
- (ข) จงคำนวณผลรวมของค่าประสิทธิผลเนื่องจากสัมประสิทธิ์ความหนืดหน่วงตามโครงสร้างของมอเตอร์กับโหลด



วิธีทำ

(ก)

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{K_m/[R_a B(1 + \tau_m s)]}{1 + K_m^2/[R_a B(1 + \tau_m s)]}$$

$$= \frac{K_m}{(K_m^2 + R_a B)} \frac{1}{(1 + \tau'_m s)}$$

เมื่อ

$$\tau'_m = \frac{R_a B}{K_m^2 + R_a B} \tau_m = \frac{J R_a}{R_a B + K_m^2}$$

(ข) $\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \omega_m(s)$

ตั้งนี้น
 $V_t(s) = \frac{220}{s}$

$$\omega_m = 220 \frac{K_m}{R_a B + K_m^2}$$

$$= \frac{(220)(2)}{(0.5 \times 0.3 + 4)} = \frac{440}{4.15} = 106 \text{ rad/s}$$

$$(ก) \quad \tau'_m = \frac{JR_a}{R_a B + K_m^2} = \frac{3 \times 0.5}{4.15} = 0.36$$

ดังนั้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 95% ของความเร็วในสภาวะคงตัว ใช้เวลา

$$t = 0.36 \times 3 = 1.08 \quad \text{วินาที}$$

(ง) ผลรวมของค่าประสิทธิผลเนื่องจากสัมประสิทธิ์ความหนืดหน่วง

$$= B + (K_m^2 / R_a)$$

$$= 0.3 + (0.4 / 0.5) = 8.3 \quad \text{kg.m}^2/\text{s}$$

ตอบ

① $m(\phi_c)$, รูปแบบที่ 1 กรณี

$$\phi_c = Ni / R_{5022}$$

$$R_{5022} = L / MA = 2 \times 35 \times 10^{-2} / 2000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 15 \times 10 \times 10^{-4} = 18568.07$$

$$L_{5022} = 2 \times 40 \times 10^{-2} / 2000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 10 \times 10^{-4} = 31830.98$$

$$R_{5022} = 18568.07 + 31830.98 = 50399.058$$

$$\therefore \phi_c = Ni / R_{5022} = \frac{3007 \times 1A}{50399.058} = 0.00595 \text{ wb} \quad \underline{\text{Ans}}$$

② $m(\beta)$ รูปแบบที่ 1 กรณี

$$\beta_{air} = \phi_c / A_{air} = 0.00595 / 15 \times 10 \times 10^{-4} = 0.3966 \text{ T} \quad \underline{\text{Ans}}$$

$$\beta_{air} = \phi_c / A_{HOU} = 0.00595 / 10 \times 10 \times 10^{-4} = 0.595 \text{ T} \quad \underline{\text{Ans}}$$

แบบฝึกหัดบทที่ 5

1. เครื่องกำเนิดกระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ คือ

$$R_f = 100 \Omega \quad L_f = 40 \text{ H}$$

$$R_a = 0.2 \Omega \quad L_{aq} = 10 \text{ mH}$$

$$kg = 100 \text{ V/A field ampere} \text{ ที่ความเร็วรอบ } 1000 \text{ rpm}$$

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับเคลื่อนที่พิกัดความเร็ว 1200 rpm และปรับกระแส $I_f = 2 \text{ A}$ จนนั้นต่อโอลดซึ่งประกอบด้วย ค.ต.ท. 1.8Ω อนุกรมกับอินดักแตนซ์ 10 mH เข้ากับอาร์มเจอร์อย่างฉบับพลัน

- (ก) จงคำนวณแรงดันโอลดที่ขึ้นในฟังก์ชั่นเวลา
- (ข) จงคำนวณแรงดันโอลดที่ขึ้นภายใต้สภาวะคงตัว
- (ค) จงคำนวณแรงบิดในฟังก์ชั่นเวลา

2. มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ

$$R_a = 0.4 \Omega \quad L_{aq} \approx 0 \quad K_m = 2 \text{ V/rad/sec}$$

ถ้าต่อมอเตอร์เข้ากับโอลดซึ่งให้แรงบิดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบและกำหนดให้

$$J = J_m + J_L = 2.5 \text{ kg.m}^2$$

$$B = B_m + B_L = 0.25 \text{ kg.m}^2/\text{sec}$$

เมื่อจ่ายแรงดัน $V_t = 200 \text{ V}$ เข้าที่ขั่วอาร์มเจอร์อย่างทันทีทันใด (กระแส I_f คงที่ ที่พิกัด)

- (ก) จงแสดงสมการความเร็วของมอเตอร์ในฟังก์ชั่นเวลา
- (ข) จงคำนวณความเร็วภายใต้สภาวะคงตัว ๘๐
- (ค) จงคำนวณเวลาที่ทำให้ความเร็วมอเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 75% เปอร์เซนต์ของความเร็วในสภาวะคงตัว

3. มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระแสตู้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ

$$R_a = 0.5 \Omega \quad L_{aq} \approx 0$$

$$J = 2.0 \text{ kg.m}^2 \quad B = 0.2 \text{ kg.m}^2/\text{sec}$$

$$K_m = 2 \text{ V/rad/sec} \text{ ที่พิกัดกระแส } I_f$$

สำหรับพิกัดกระแส I_f และแรงดันที่ขึ้น $V_t = 220 V$

(ก) จงคำนวณความเร็วตามเงื่อนไขของสภาวะคงตัวในหน่วย rad/s และ rpm ขณะมอเตอร์หมุนตามเงื่อนไขในข้อ(ก) ถ้าลดแรงดันที่ขึ้น $V_t = 100 V$ อย่างฉบับพลัน

(ข) จงแสดงสมการสำหรับความเร็วของระบบขั้บเคลื่อน มอเตอร์ – ໂ Holden ในฟังก์ชันเวลา

(ค) จงคำนวณความเร็วสุดท้ายของมอเตอร์ตามเงื่อนไข ที่สภาวะคงตัวในหน่วย rpm

4. มอเตอร์กระแสตรงแบบคลาดstaname แยกกระตุ้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

$$R_a = 0.4 \Omega \quad L_{aq} = 0$$

$$J = 4.5 kg.m^2 \quad B = 0$$

$$K_f = 1$$

ขณะมอเตอร์ทำงานตอนໄร์ໂ Holden $V_t = 220 V$ และ $I_f = 2 A$ (ไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากการหมุนถ้าต้องการหดคลมอเตอร์แบบ plugging โดยกลับทิศแรงดันที่ขึ้น $V_t = -220 V$)

(ก) จงคำนวณความเร็วขณะໄร์ໂ Holden

(ข) จงแสดงสมการความเร็วของมอเตอร์หลังจากหดหมุน มอเตอร์แบบ plugging

(ค) จงคำนวณเวลาที่มอเตอร์หมุนจากความเร็วสูง

5. มอเตอร์กระแสตรงแบบคลาดstaname แยกกระตุ้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

$$R_a = 0.5 \Omega$$

$$J = 2.0 kg.m^2 \quad B = 0 kg.m/sec$$

$$K_f = 1$$

ถ้ากระแส $I_f = 2 A$ และขั้วมอเตอร์ต่อ กับ แหล่งจ่าย $100 V$ ทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว $471.569 rpm$

ขณะໄร์ໂ Holden

(ก) จงคำนวณกระแสของมอเตอร์และแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น

(ข) ถ้ากระแส I_f ลดลงเหลือ $1 A$ จงแสดงสมการความเร็วในฟังก์ชันเวลา พร้อมทั้งคำนวณความเร็วกระแสของมอเตอร์ และแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ค่าใหม่ตามเงื่อนไขในสภาวะคงตัว

TK 454 . ๒๘๔๖

TK 141 . ๙๙๔๕

บรรณานุกรม

1. ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทร์อสต "เครื่องจักรไฟฟ้า ๑" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด
กระบัง 2520
2. อาจารย์พิชิต ถ่ายอง "เครื่องจักรกลไฟฟ้า ๑" วศ.สจล.138 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม
ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2539
3. Sen, P.C. (Peresh Chandra) "Principles of Electric Machines and Power Electronics", Second
Edition , John wiley & Sons, Inc.1997
4. Chapman , Stephen J. "Electric machinery fundamentals", Third Edition , McGraw-Hill series in
electrical engineering.Power and energy, 1991
5. McPherson, George "An introduction to electrical machines and transformers", Second Edition,
John wiley & Sons, Inc.1990
6. Fitzgerald , A.E. "Electric Machinery" Metric Editions Electrical Engineering Series, Fifth Edition
McGraw-Hill ,1992
7. Yamayec, Zia A. "Electromechanical energy devices and power systems" John wiley & sons,
Inc.1994
8. Sarma, Mulukutla S., "Electric machines: steady-state theory and dynamic performance", Second
Edition,West Publishing Company.1985
9. Nasar, S. A. "Electric energy systems" Prentice-Hall, Inc. 1996
10. Theodore Wildi "Electrical Machines, Drives, and Power Systems", Prentice-Hall Interantional,
Inc. 1981

พิมพ์โดย กองหางานวิชาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์