

หม้อแปลงไฟฟ้า

(Transformers)



ไวพจน์ ศรีธัญ

120.-

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers)

กลุ่มอาชีพพลังงาน ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์

ISBN 978-616-495-343-7

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2569

จำนวนที่พิมพ์ 3,000 เล่ม

เรียบเรียงโดย
ไวพจน์ ศรีธัญ



e-book แต่ละบทเรียน
ในรูปแบบ QR Code

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย...



บริษัท วังอักษร จำกัด

69/3 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงวัดอรุณ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ

โทร. 0-2472-3293-4 Mobile 08-8585-1521

Facebook : สำนักพิมพ์ วังอักษร

e-Mail : wangaksorn9@gmail.com

<http://www.wangaksorn.com>

Line ID : wangaksorn



บริษัท วังอักษร จำกัด

ขอสงวนลิขสิทธิ์

ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์เพิ่มเติม พ.ศ. 2565
ห้ามมิให้ทำการคัดลอก ดัดแปลง แก้ไขเนื้อหา หรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนไม่ว่ารูปแบบใด
ชื่อและเครื่องหมายการค้าอื่น ๆ ที่อ้างอิงในหนังสือฉบับนี้
เป็นลิขสิทธิ์โดยชอบด้วยกฎหมายของเจ้าของแต่ละราย
บริษัทฯ มิได้อ้างความเป็นเจ้าของแต่อย่างใด

ตารางกำหนดการจัดการเรียนรู้

วิชา หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers)

ครั้งที่	รายการ		จำนวนชั่วโมง		
	ทฤษฎี	ปฏิบัติ	ท	ป	รวม
1	บทเรียนที่ 1 โครงสร้างและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	-	1	3	4
2	บทเรียนที่ 2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า	-	1	3	4
3-4	บทเรียนที่ 3 การทดสอบและประสิทธิภาพ	ใบงานที่ 3.1 การทดสอบหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก	2	6	8
5	บทเรียนที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าและการประกอบเครื่องวัด		1	3	4
6-10	บทเรียนที่ 5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า	ใบงานที่ 5.1 การหาขั้วหม้อแปลงไฟฟ้า ใบงานที่ 5.2 การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ใบงานที่ 5.3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-สตาร์ ใบงานที่ 5.4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-เดลตา ใบงานที่ 5.5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตา-เดลตา ใบงานที่ 5.6 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตา-สตาร์ ใบงานที่ 5.7 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพ่นเดลตา	5	15	20
11	บทเรียนที่ 6 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า	ใบงานที่ 6.1 การศึกษาข้อมูลจากเนมเพลต	1	3	4

ครั้งที่	รายการ		จำนวนชั่วโมง		
	ทฤษฎี	ปฏิบัติ	ท	ป	รวม
12-17	บทเรียนที่ 7 การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	ใบงานที่ 7.1 การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ใบงานที่ 7.2 การทำบ็อบบินด้วยกระดาษไฟเบอร์แดง ใบงานที่ 7.3 การทำบ็อบบินด้วยไม้อัด ใบงานที่ 7.4 การพันขดลวด ใบงานที่ 7.5 การชุบขดลวดด้วยน้ำยารวานิช ใบงานที่ 7.6 การประกอบแกนเหล็ก ใบงานที่ 7.7 การทดสอบฉนวนและหาอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า	6	24	28
18	ประเมินผลลัพธ์การเรียนรู้ระดับรายวิชา		1	3	4
รวม			18	54	72

คำนำ

บริษัท วังอักษร จำกัด ได้จัดทำหนังสือวิชา **หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers)** เพื่อใช้
บูรณาการและประกอบการเรียนการสอน ตามหลักสูตรอาชีวศึกษา (สอศ.) หลักสูตรส่งเสริมการเรียนรู้
(สกร.) หลักสูตรอุดมศึกษา ผู้สนใจในการพัฒนาการเรียนรู้และทักษะ

หนังสือเล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาสาระ ใบบาง แบบฝึกหัดคู่ขนาน มีจุดประสงค์ในการยกระดับ
ผู้เรียนให้เรียนทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อเสริมสร้างทักษะ ประสบการณ์ และการประยุกต์ใช้ได้จริง โดยเน้น
กระบวนการเรียนรู้ที่มีคุณธรรม จริยธรรม จรรยาบรรณวิชาชีพ และกิจนิสัยในการทำงาน เพื่อสร้าง
สมรรถนะตามความต้องการของสถานประกอบการ เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้แบ่งออกเป็น 7 บทเรียน คือ
บทเรียนที่ 1 โครงสร้างและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ บทเรียนที่ 2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
บทเรียนที่ 3 การทดสอบและประสิทธิภาพ บทเรียนที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าและการประกอบเครื่องวัด
บทเรียนที่ 5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า บทเรียนที่ 6 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า บทเรียนที่ 7
การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

หนังสือเล่มนี้มีเนื้อหาที่ทันสมัย ตามแผนการพัฒนาศึกษาด้านวิชาชีพ ซึ่งสอดคล้องกับ
ยุทธศาสตร์ชาติและแผนการศึกษาแห่งชาติ เพื่อให้ผู้เรียนมีผลลัพธ์การเรียนรู้และสมรรถนะตามมาตรฐาน
ฝีมือแรงงานแห่งชาติ กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน สาขานักงานประกอบหม้อแปลงขนาดเล็ก ระดับ 1

ไวพจน์ ศรีธัญ

สารบัญ

บทเรียนที่ 1 โครงสร้างและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	1
1.1 การเกิดสนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า.....	2
1.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า	4
1.3 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	5
1.4 ทิศทางของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
1.5 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	10
1.6 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	14
1.7 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า	19
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 1	28
 บทเรียนที่ 2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า	 30
2.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า	31
2.2 สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า	35
2.3 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง	37
2.4 แอมแปร์ - เทิร์น	43
2.5 หม้อแปลงในสภาวะไม่มีโหลด	44
2.6 หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลด	49
2.7 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล	56
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 2	57
 บทเรียนที่ 3 การทดสอบและประสิทธิภาพ	 60
3.1 ความต้านทานสมมูล	61
3.2 รีแอกแตนซ์สมมูล	64
3.3 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า	68
3.4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	69
3.5 โวลต์เตจเรกูเลชัน	75

3.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	82
3.7 ประสิทธิภาพตลอดวัน	85
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 3	89
ใบงานที่ 3.1 การทดสอบหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก	92
บทเรียนที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าและการประกอบเครื่องวัด	98
4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้	99
4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบเครื่องวัด	105
4.3 การวัดกำลังไฟฟ้า	108
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 4	110
บทเรียนที่ 5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า	112
5.1 การกำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า	113
5.2 การขนานของหม้อแปลงไฟฟ้า	115
5.3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	118
5.4 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	125
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 5	126
ใบงานที่ 5.1 การหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า	128
ใบงานที่ 5.2 การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส	134
ใบงานที่ 5.3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-สตาร์	140
ใบงานที่ 5.4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-เดลตา	147
ใบงานที่ 5.5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตา-เดลตา	154
ใบงานที่ 5.6 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตา-สตาร์	161
ใบงานที่ 5.7 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพ่น เดลตา	168
บทเรียนที่ 6 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า	174
6.1 การระบายความร้อน	175
6.2 น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	178
6.3 การทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	179

6.4 การตรวจสอบและบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า	180
6.5 กลุ่มเวกเตอร์	182
6.6 แผ่นป้ายบอกข้อมูล	183
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 6	184
ใบงานที่ 6.1 การศึกษาข้อมูลจาก เนม เฟลต	185
 บทเรียนที่ 7 การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	192
7.1 ขั้นตอนการออกแบบ	193
7.2 แกนเหล็ก	197
7.3 การทำบ็อบบิน	201
7.4 การพันขดลวด	202
7.5 การชุบขดลวดด้วยน้ำยาวานิช	203
7.6 การประกอบแกนเหล็ก	203
7.7 การทดสอบฉนวน	204
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 7	205
ใบงานที่ 7.1 การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	206
ใบงานที่ 7.2 การทำบ็อบบินด้วยกระดาษไฟเบอร์แดง	212
ใบงานที่ 7.3 การทำบ็อบบินด้วยไม้อัด	218
ใบงานที่ 7.4 การพันขดลวด	224
ใบงานที่ 7.5 การชุบขดลวดด้วยน้ำยาวานิช	231
ใบงานที่ 7.6 การประกอบแกนเหล็ก	235
ใบงานที่ 7.7 การทดสอบฉนวนและหาอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า	240
 คำถามเพื่อการทบทวน	247
คำศัพท์	251
บรรณานุกรม	259



บทเรียนที่ 1

โครงสร้าง และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

หัวเรื่องหลัก

- 1.1 การเกิดสนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า
- 1.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.3 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์
- 1.4 ทิศทางของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.5 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.6 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.7 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลลัพธ์การเรียนรู้ระดับบทเรียน

เรียนรู้และเข้าใจโครงสร้างขดลวด การพันขดลวด การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และองค์ประกอบในหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด

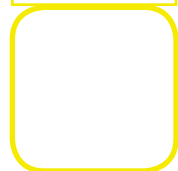
สมรรถนะการเรียนรู้

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างและการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. แสดงความรู้เกี่ยวกับแกนขดลวด การพันขดลวด และองค์ประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ประยุกต์ใช้ความรู้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ลักษณะ และการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายโครงสร้าง ประเภท และชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
2. อธิบายหลักการและการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ถูกต้องตรงตามทฤษฎี
3. วิเคราะห์และเลือกใช้ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า
4. วิเคราะห์และเลือกใช้ลักษณะของแกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า
5. วิเคราะห์ความแตกต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิดได้

e-book 4 สี



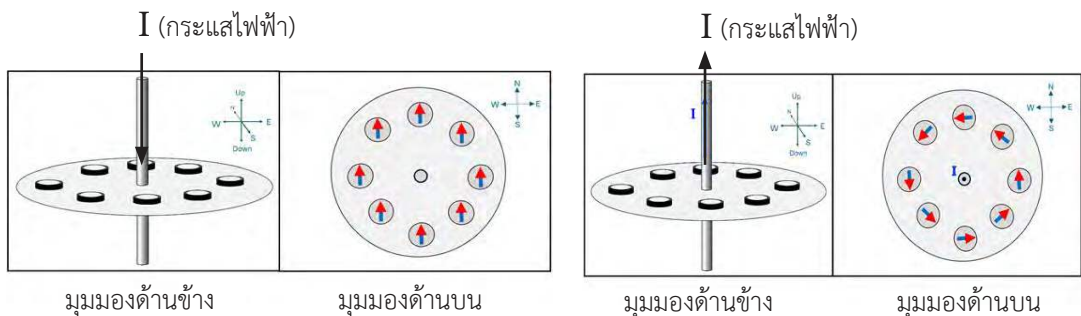
2

หม้อแปลงไฟฟ้า เรียกว่า **ทรานส์ฟอเมอร์ (Transformer)** จะอาศัยการส่งผ่านพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) กับขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) โดยการพันขดลวดตัวนำรอบแกนเหล็กบาง ๆ ที่อัดซ้อนกันหลาย ๆ แผ่น ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอน 0.4% เรียกว่า **แผ่นเหล็ก ลามิเนต (Laminated Steel)** เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current Loss) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจะใช้อากาศช่วยในการระบายความร้อน แต่ถ้าหากเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่อาจจะใช้น้ำมัน หรือพัดลมเป็นตัวกลางช่วยในการระบายความร้อน หรือทั้งสองอย่างรวมกัน



1.1 การเกิดสนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า

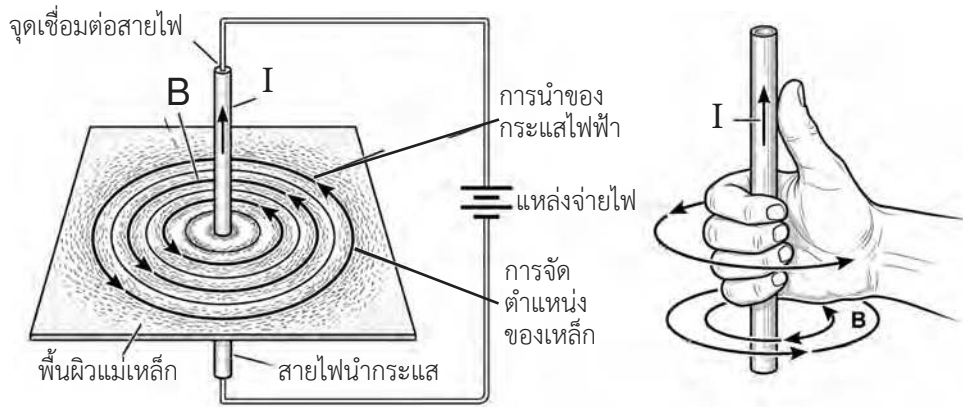
ในปี ค.ศ. 1820 เอร์สเตด (Hans Christian Oersted) ได้ทดลองและสังเกตเห็นว่า เมื่อวางเข็มทิศไว้ใกล้ ๆ ตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เข็มทิศจะเบนไปจากแนวเดิม ถ้าหากเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำ เข็มทิศจะเบนกลับทาง แสดงว่ากระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ และสนามแม่เหล็กนี้เองที่ทำให้เข็มทิศเบนไปจากแนวเดิม



(ก) เข็มทิศวางใกล้ตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (ข) กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลทำให้เข็มทิศเบนกลับทาง

รูปที่ 1.1 เข็มทิศจะเบนกลับทาง เมื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำ

จากการตรวจสอบการเบนของเข็มทิศ พบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำ จะมีลักษณะเป็นรูวงกลมรอบๆ ตัวนำ ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ณ จุดใดๆ จะพุ่งตามแนวเส้นสัมผัสของวงกลม สำหรับทิศทางของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา (Right – Hand Rule) ซึ่งกล่าวว่า “ใช้มือขวากำรอบเส้นลวดตัวนำ หัวแม่มือจะชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลในลวดตัวนำ สำหรับนิ้วทั้งสี่ที่กำรอบเส้นลวดตัวนำ จะแสดงทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้น ”



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า

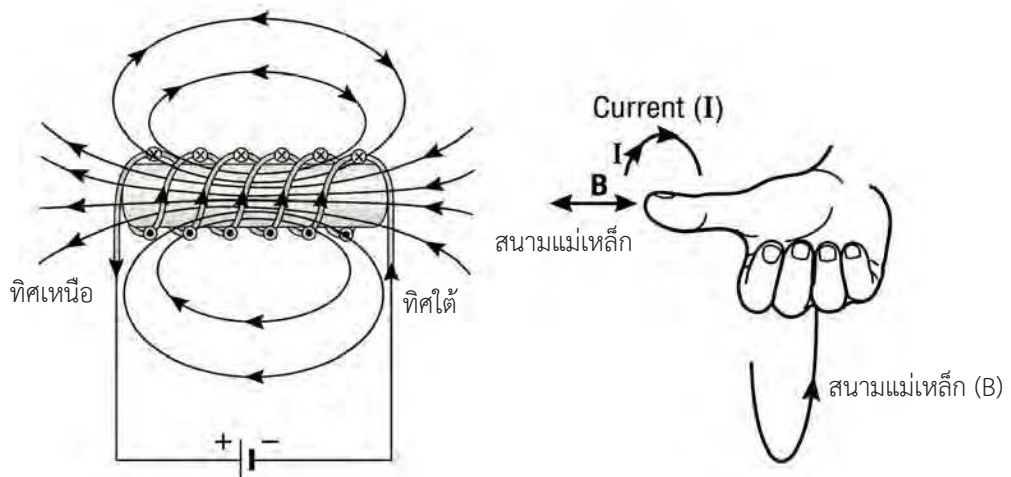
และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตามกฎมือขวา

ขนาดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B ณ จุดซึ่งอยู่ห่างจากตัวนำเป็นระยะทาง d ในแนวตั้งฉากกับตัวนำ จะมีค่า

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B = \frac{KI}{d}$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 2×10^{-7} $\frac{\text{เทสลา} - \text{เมตร}}{\text{แอมแปร์}}$

ถ้าหากนำลวดตัวนำหุ้มฉนวน พันรอบแกนรูปทรงกระบอก โดยขดเป็นวงกลมหลาย ๆ ขด แต่ละขดมีรัศมีเท่ากัน จะเรียกขดลวดลักษณะนี้ว่า **ขดลวดโซเลนอยด์ (Solenoid Coil)** เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำ ตามหลักของเออร์สเตด



รูปที่ 1.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดโซเลนอยด์

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดโซเลนอยด์ หาได้จากสมการ

$$B = \mu N I$$

เมื่อ B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ศูนย์กลางของขดลวดโซเลนอยด์ (จะมีความเข้มมากที่สุด)

μ = ความซึมซาบสนามแม่เหล็กของตัวกลาง

N = จำนวนรอบต่อหนึ่งหน่วยความยาว

I = กระแสไฟฟ้าในขดลวดโซเลนอยด์

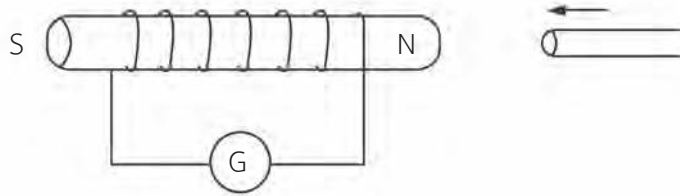
สำหรับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ศูนย์กลางของขดลวดโซเลนอยด์ หาได้จากการดัดแปลงกฎมือขวา กล่าวคือ ใช้มือขวากำรอบขดลวด นิ้วทั้งสี่ที่กำรอบชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้า (I) ส่วนนิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ซึ่งก็คือ ขั้วเหนือ (North Pole ; N) นั่นเอง



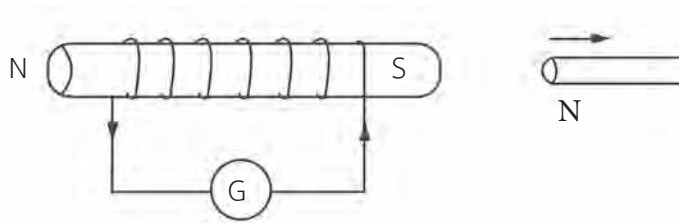
1.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 1831 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ค้นพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive Force ; emf) เมื่อต่อวงจรของขดลวดให้ครบวงจรจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด เรียกว่า **กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Current)** สำหรับทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะเป็นไปตามกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” หรืออาจจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า “กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไหลในทิศทางที่สร้างอำนาจแม่เหล็กเพื่อต้านทานการเคลื่อนที่ของขดลวด” โดยสามารถอธิบายกฎของเลนซ์ได้ ดังนี้

ถ้าหากเคลื่อนขั้วเหนือ (North Pole ; N) เข้าหาขดลวดดังรูปที่ 1.4 (ก) กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดจะสร้างอำนาจแม่เหล็กขั้วเหนือเพื่อต้านทานการเคลื่อนที่เข้ามาของขั้วเหนือ แต่ถ้าหากเคลื่อนขั้วเหนือออกจากขดลวด ดังรูปที่ 1.4 (ข) กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จะสร้างอำนาจแม่เหล็กขั้วใต้เพื่อต้านทานการเคลื่อนที่ออกของขั้วเหนือ



(ก) เคลื่อนขั้วเหนือเข้าหาขดลวด



(ข) เคลื่อนขั้วเหนือออกจากขดลวด

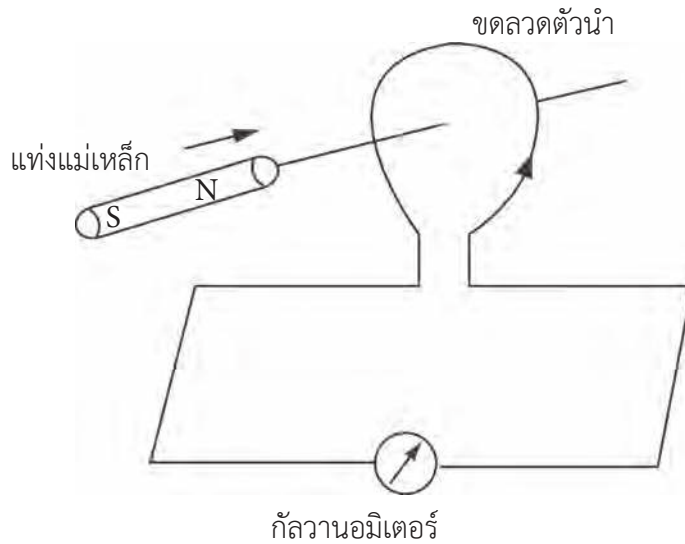
รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ตามกฎของเลนซ์



1.3 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

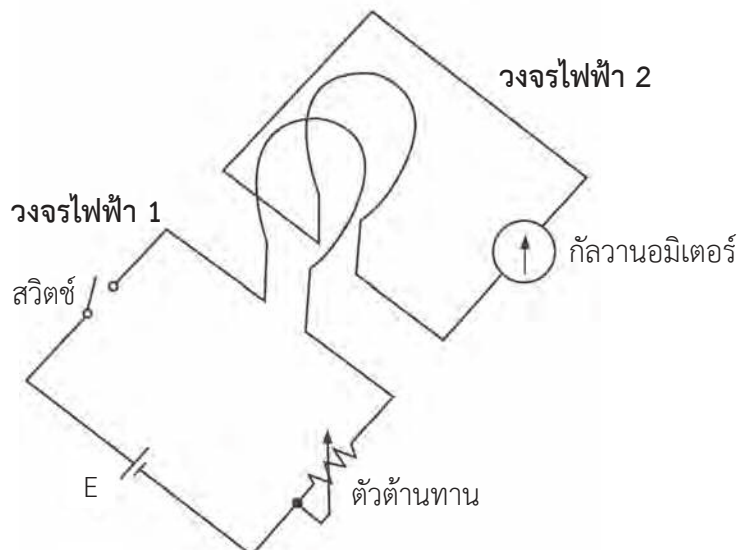
กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ สามารถสรุปได้สองข้อ ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่เออร์สเตดได้ค้นพบสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำ จากหลักการดังกล่าวทำให้ฟาราเดย์เกิดแนวคิดว่า ในทางกลับกันนั้นอำนาจแม่เหล็กน่าจะสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ ฟาราเดย์จึงทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสอง โดยใช้แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาขดลวดตัวนำพร้อมกับสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกัลวานอมิเตอร์ (Galvanometer ; G) ที่ต่อเข้ากับขดลวดดังรูปที่ 1.5 ผลปรากฏว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์เกิดการบ่ายเบนไปจากเดิม นั่นคือ อำนาจแม่เหล็กสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำได้โดยเรียกว่า **กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ** และเรียกแรงดันไฟฟ้าในขดลวดนี้ว่า **แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ**

จากการทดลองดังกล่าว ฟาราเดย์ได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่า การเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหาขดลวดตัวนำ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กบริเวณขดลวดเปลี่ยนแปลงไป จนเป็นเหตุให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั่นเอง สังเกตได้จากการบ่ายเบนของกัลวานอมิเตอร์



รูปที่ 1.5 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์

ฟาราเดย์ได้ทำการทดลองต่อไปอีก โดยนำขดลวดมาวางไว้ใกล้ๆ กันดังรูปที่ 1.6 กล่าวคือ ขดลวดชุดที่ 1 ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ สวิตช์ และตัวต้านทานปรับค่าได้ ส่วนขดลวดชุดที่ 2 ต่อปลายขดลวดเข้ากับกัลวานอมิเตอร์ เมื่อกดสวิตช์ให้ต่อวงจรแล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดชุดที่ 1 ทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์บ่ายเบนได้ และเมื่อปรับค่าความต้านทานจะทำให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดชุดที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดชุดที่ 2 เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดชุดที่ 2 ซึ่งสังเกตได้จากการบ่ายเบนของกัลวานอมิเตอร์ การที่วงจรขดลวดชุดที่ 1 ถ่ายโอนพลังงานให้กับอีกวงจรหนึ่ง (ขดลวดชุดที่ 2) ดังกล่าวข้างต้น เราเรียกว่า “การเหนี่ยวนำร่วมกัน” หรือ มีววล อินดักแตนซ์ (Mutual Inductance)



รูปที่ 1.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กและทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ

จากการทดลองทั้งสองวิธี ฟาราเดย์ได้สรุปเป็นกฎไว้ 2 ข้อ ดังนี้

กฎข้อที่ 1 เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็ก (ซึ่งอยู่กับที่) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำซึ่งเป็นหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในทางตรงกันข้าม ถ้าหากสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงตัดกับตัวนำ (ซึ่งอยู่กับที่) ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำเช่นกัน เป็นหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

กฎข้อที่ 2 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก $\Delta\Phi$ (Magnetic Flux) ที่เชื่อมต่อกัน เมื่อลวดตัวนำอยู่กับที่เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ โวลต์}$$

แต่ถ้าหากตัวนำมีจำนวน N รอบ ดังนั้น

$$e = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

เมื่อ e = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
หน่วยเป็นเวเบอร์ต่อวินาที (Weber Per Second ; wb / s)
หรือเป็นโวลต์ (Volt ; V)

N = จำนวนรอบของขดลวด

$\Delta\Phi$ = ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก (ฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง)

Δt = ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก

หน่วยเป็นวินาที (Second ; s)

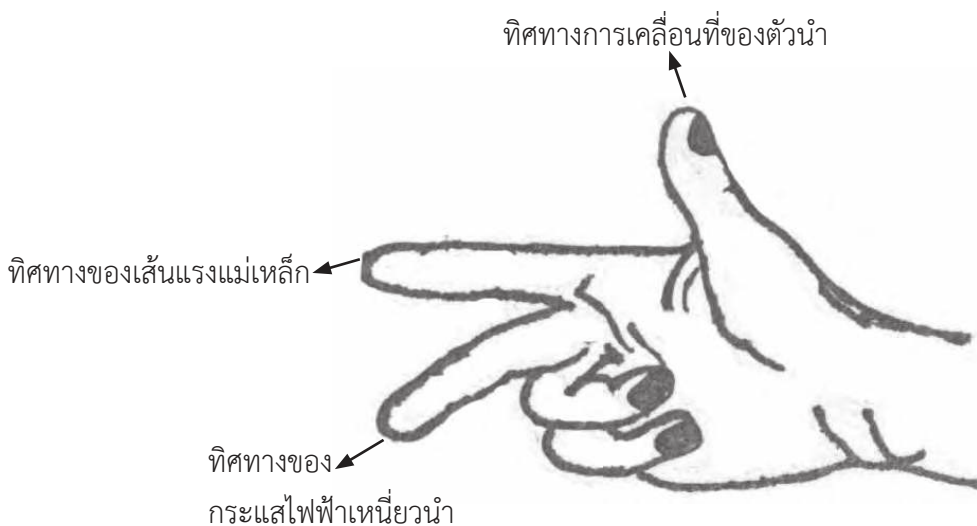


1.4 ทิศทางของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf) หาได้จากกฎมือขวา ของเฟลมมิง กฎมือขวาแบบแบมือ กฎมือขวา และกฎของแมกซ์เวลล์

กฎมือขวาของเฟลมมิง (Fleming's Right - Hand Rule)

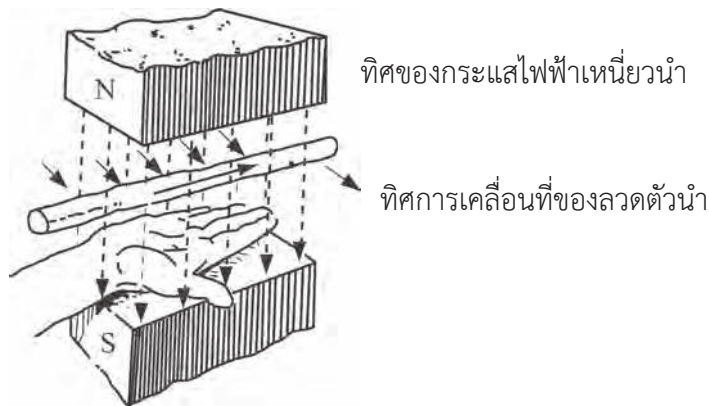
โดยการยกมือขวาขึ้น กาง นิ้วชี้ นิ้วหัวแม่มือ และนิ้วกลาง ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 1.7 กำหนดให้นิ้วชี้แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก (จากเหนือไปได้) นิ้วหัวแม่มือแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ โดยที่นิ้วกลางจะแสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf) ที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้น



รูปที่ 1.7 การหาทิศทางของ emf โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง

กฎมือขวาแบบแบนมือ (Right Flat - Hand Rule)

โดยการแบนมือขวาออก ให้นิ้วหัวแม่มือ ตั้งฉากกับนิ้วทั้งสี่ และตั้งฉากกับฝ่ามือ ดังรูปที่ 1.8 กำหนดให้นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ โดยที่นิ้วทั้งสี่จะชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ emf (Electromotive Force)



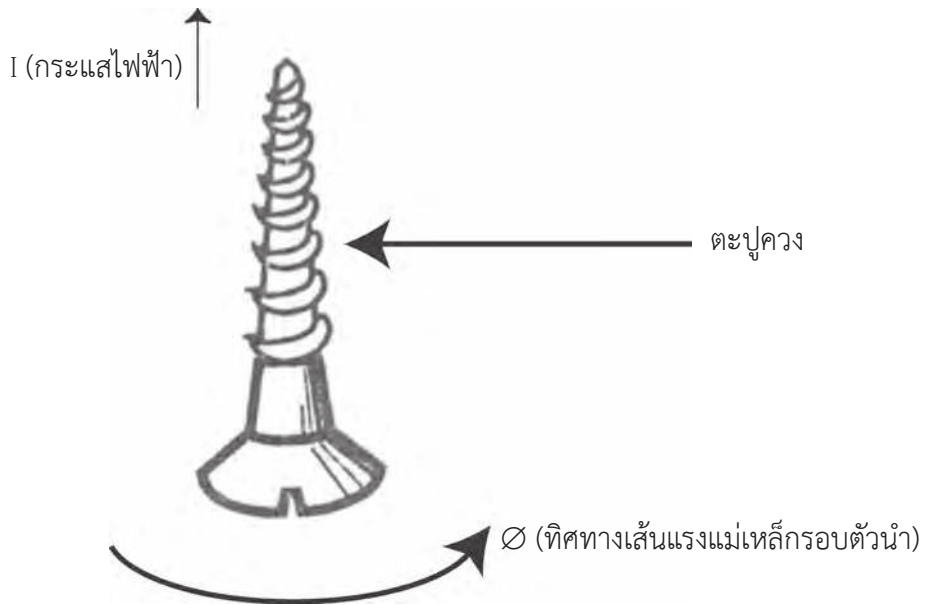
รูปที่ 1.8 การหาทิศทางของ emf โดยใช้กฎมือขวาแบบแบนมือ

กฎมือขวา (Right - Hand Rule)

กฎมือขวาตามหัวข้อนี้จะใช้อธิบายทฤษฎีตามผลการทดลองของเออร์สเตด ดังนี้ “เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตรง จะสามารถหาทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยใช้มือขวากำเส้นลวด ให้นิ้วหัวแม่มือชี้ตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหล ส่วนทิศทางการเวียนของปลายนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ”

กฎของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Rule)

แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) นักฟิสิกส์และนักคณิตศาสตร์ชาวสกอตแลนด์ ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ากับทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ โดยแทนด้วยการขันตะปูควง (สกรู) เข้าไปในเนื้อไม้ “กำหนดให้ปลายของสกรูที่หมุนจะเข้าไปในเนื้อไม้แทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ส่วนทิศทางการหมุนสกรู (เกลียวขวา) แทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำ”



รูปที่ 1.9 ความสัมพันธ์ตามกฎของแมกซ์เวลล์



1.5 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

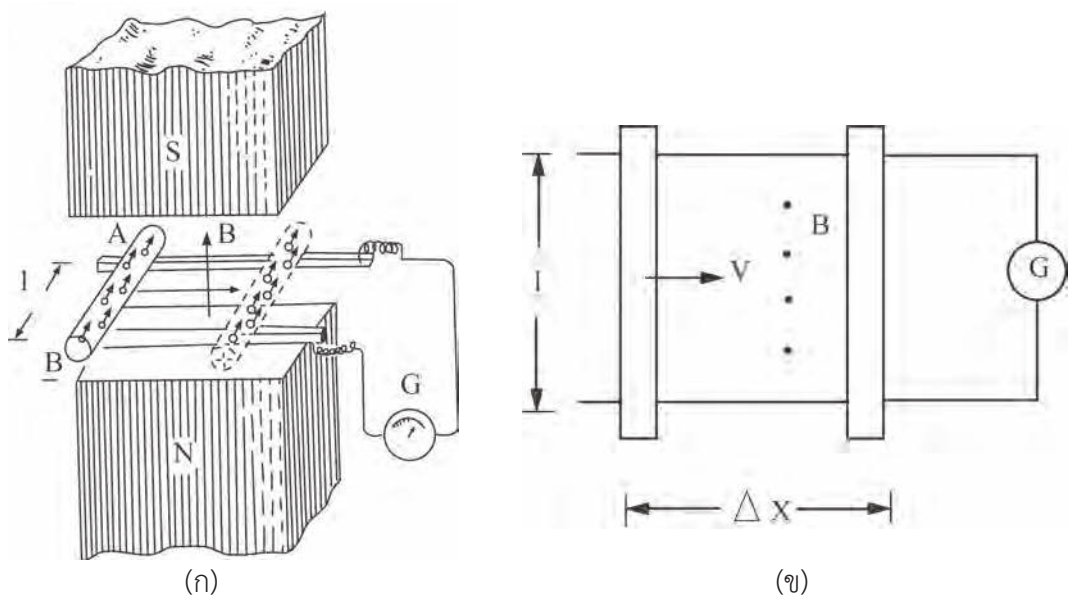
ในกรณีที่ตัวนำเคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 1.10 (ก) ถ้าหากให้ลวดตัวนำ AB ความยาว 1 เมตร วางบนลวดตัวนำเส้นเมื่อลวดตัวนำถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ V เมตรต่อวินาที ตัดผ่านความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่สม่ำเสมอเท่ากับ B เทสลา จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (I) ขึ้นจำนวนหนึ่ง

และจากความสัมพันธ์

$$\text{ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก} = \frac{\text{จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก}}{\text{พื้นที่รองรับ}}$$

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

$$\text{หรือ } \Phi = B \cdot A$$



รูปที่ 1.10 แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สมมติให้ระยะที่ตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับระยะ Δx ในช่วงเวลา Δt ดังรูปที่ 1.10 (ข) ดังนั้น

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= B \cdot \Delta A \\ &= B \cdot l \cdot \Delta x\end{aligned}$$

เนื่องจากความเร็ว $V = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

$$\begin{aligned}\text{หรือ } \Delta x &= V \cdot \Delta t \\ \Delta\phi &= B \cdot l \cdot V \cdot \Delta t\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B \cdot l \cdot V$$

$$e = B \cdot l \cdot V$$

เมื่อ B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
หน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร
(wb/m²) หรือ เทสลา (Tesla)

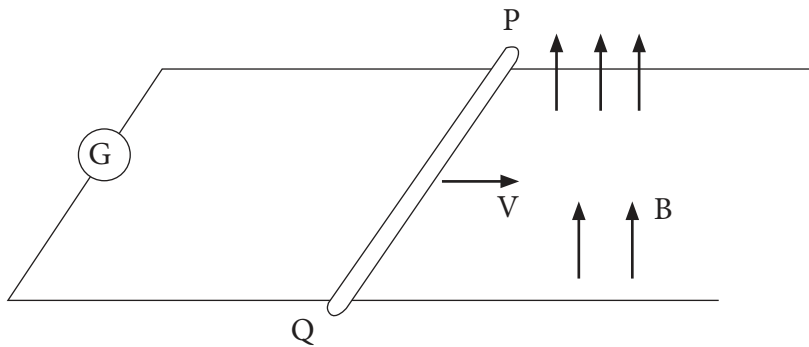
ϕ = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วยเป็นเวเบอร์

A = พื้นที่รองรับ หน่วยเป็นตารางเมตร

ถ้าหากว่าตัวนำ AB เคลื่อนที่ไม่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของมุม $\sin \theta$ สำหรับทิศทางการเคลื่อนที่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นไปตามกฎมือขวาของเฟลมมิง ดังที่กล่าวข้างต้น

$$e = B \cdot I \cdot V \sin \theta \quad \text{หน่วยโวลต์}$$

ตัวอย่างที่ 1.1 ลวดตัวนำ PQ ยาว 20 เซนติเมตร ถูกทำให้เคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กด้วยความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ภายใต้อสนามแม่เหล็กเท่ากับ 3 เทสลา จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่าใด



รูปที่ 1.11

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{จากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} \quad e &= B \cdot I \cdot V \\ &= (3) \left(\frac{20}{100} \right) (10) = \frac{600}{100} \\ &= 6 \end{aligned}$$

นั่นคือ เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่ากับ 6 โวลต์

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.2 จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวยาวที่ยาว 18 เซนติเมตร ซึ่งเคลื่อนที่ผ่าน 30 องศา กับสนามแม่เหล็กขนาด 2.4 เวเบอร์ต่อตารางเมตร ด้วยความเร็ว 5 เมตรต่อวินาที

วิธีทำ จากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $e = B \cdot l \cdot v \sin \theta$

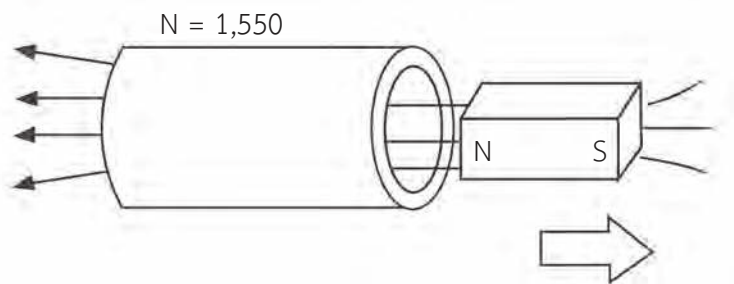
$$= (2.4) \left(\frac{18}{100} \right) (5) (\sin 30^\circ)$$

$$= 1.08$$

นั่นคือ เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1.08 โวลต์

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.3 ขดลวดอันหนึ่งมีจำนวน 1,550 รอบ มีเส้นแรงแม่เหล็ก 4 mwb จากแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่ง ดังรูปที่ 1.12 เมื่อเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กออกจากขดลวด ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงเหลือ 1.7 mwb ภายในเวลา 0.2 วินาที ให้คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1.12

วิธีทำ จากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $e = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

$$\Delta \Phi = (4 - 1.7) \text{ มิลลิเวเบอร์} = 2.3 \text{ มิลลิเวเบอร์}$$

$$\Delta t = 0.2 \text{ วินาที}$$

$$N = 1,550 \text{ รอบ}$$

แทนค่า

$$e = \frac{(1,550) (2.3 \times 10^{-3})}{0.2}$$

$$= 17.83 \text{ โวลต์}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 ขั้วแม่เหล็ก (Pole) แต่ละขั้วพันไว้ด้วยขดลวดจำนวน 33 รอบ ผลจากการกระตุ้นขดลวดฟิลด์ (Field Winding) ทำให้เกิดการยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็กจาก 1.6 mwb/Pole ลดลงเหลือ 0.44 mwb/Pole ภายในเวลา 4 มิลลิวินาที จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขณะนั้น

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนรอบของเครื่องกำเนิด (N)} &= 33 \times 4 = 132 \text{ รอบ} \\
 \text{จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก (\Delta\phi)} &= 4 \times (1.6 - 0.44) \text{ มิลลิเวเบอร์} \\
 &= 4.64 \times 10^{-3} \text{ เวเบอร์} \\
 \text{ระยะเวลาที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง} &= 4 \times 10^{-3} \text{ วินาที} \\
 \text{แทนค่าจะได้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e} &= (132) \frac{4.64 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-3}} \\
 &= 153.12 \text{ โวลต์} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 1.5 ตัวนำอันหนึ่งวางไว้ในร่องสลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวของสลิต 0.22 เมตร มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 0.85 เทสลา ตัดผ่านด้วยความเร็ว 39 เมตร/วินาที จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำมีค่าเท่าไร

$$\begin{aligned}
 \text{วิธีทำ} \quad \text{แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} \quad e &= B \cdot l \cdot v \\
 &= 0.85 \times 0.22 \times 39 \\
 &= 7.29 \text{ โวลต์} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

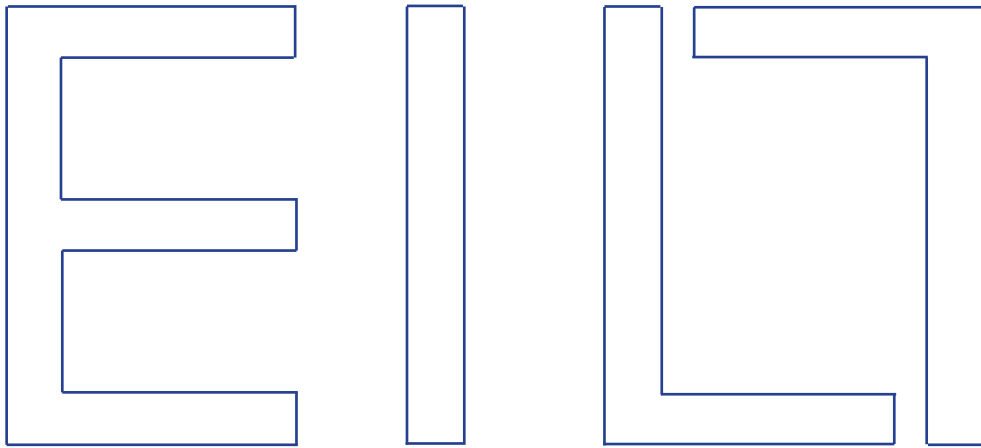


1.6 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ แกนเหล็กและขดลวด

แกนเหล็ก (Steel Core)

แกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้า ทำมาจากแผ่นเหล็กลามิเนต มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบางๆ เคลือบด้วยวานิชบางๆ หรือออกไซด์ของเหล็กเพื่อเพิ่มความต้านทานทางไฟฟ้าและลดการสูญเสีย จากนั้นนำมาอัดซ้อนกันให้แน่นเพื่อใช้เป็นทางเดินของวงจรแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ การทำให้เป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ ก็เพื่อลดกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ผลจากกระแสไฟฟ้าไหลวนจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ที่เปลี่ยนแปลงผ่านขดลวดมีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ สำหรับแผ่นเหล็กที่ใช้จะตัดให้มีรูปร่างลักษณะเป็นรูปตัวอี (E) ตัวไอ (I) และตัวแอล (L) ดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 แผ่นเหล็กลามิเนต รูปตัว E, I และ L

คุณลักษณะที่พึงประสงค์ของแกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า

1. แกนเหล็กจะต้องมีสภาพความซึมซาบได้สูง (High Permeability) เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กสามารถเหนี่ยวนำได้ดี สภาพความซึมซาบได้ (μ) คือ ตัวกลางอันหนึ่งที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มาน้อยแตกต่างกันไป ค่านี้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัตถุนั้น ๆ ส่วนใหญ่นิยมใช้แผ่นเหล็กบางที่มีชื่อทางเทคนิคว่า เกรน โอเรียนต์ ซิลิกอน สตีล (Grain Oriented Silicon Steel) เนื่องจากมีความซึมซาบได้สูงและเกิดเสียงรบกวนต่ำ

2. การสูญเสียในแกนเหล็ก หรือที่เรียกว่า **คอร์ลอส (Core Loss)** จะต้องมีค่าต่ำโดยจะแสดงออกมาในรูปของความร้อนบนแกนเหล็ก ประกอบด้วย

ก. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current Loss) จะต้องมีค่าต่ำ เนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้าไหลวนจะทำให้เกิดความร้อน และทำให้กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ้น้อยกว่าที่ขดลวดปฐมภูมิ นั่นคือ ทำให้ประสิทธิภาพ (Efficiency) ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะลดต่ำลงในขั้นตอนการผลิตจะฉาบแผ่นเหล็กให้เป็นฉนวนตามผิว (Surface Insulation) ด้วยสารจำพวกวานิช (Vanish) เพื่อเพิ่มความต้านทานทางไฟฟ้าและลดการสูญเสียดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ข. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) จะต้องมีค่าต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าที่แกนทำด้วยเหล็ก จะเกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการเกิดความล่า (Hysteresis) ทั้งนี้เพราะพลังงานบางส่วนจะถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนแกนเหล็กให้เป็นแม่เหล็ก ในทางปฏิบัติจึงต้องแก้ไขโดยการเลือกใช้แกนเหล็กที่มีวัฏจักรของความล่า (Hysteresis Loop) ขนาดเล็ก ๆ แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงนิยมทำขึ้นจากเหล็กผสมกับซิลิกอน (Silicon) จากนั้นนำไปอบให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงเพื่อให้อ่อนตัว และมีความต้านทานต่อเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ (Low Reluctance)

3. มีอายุการใช้งานยาวนาน
4. มีความคงทนต่อสภาวะการลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้าและคงทนต่อการสั่นสะเทือนเป็นต้น
5. ไม่มีเสียงฮัมรบกวนขณะทำงาน

ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Winding)

ขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ขดลวดทองแดงอาบน้ำมัน ฝั่มกระดาศ หรือพันทับด้วยเส้นด้าย (Cotton) ขนาดและชนิดของขดลวดที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าหรือพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Rated) ลวดตัวนำที่มีหน้าตัดกลมจะใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กและหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดปานกลาง ส่วนลวดตัวนำที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเหมาะสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งต้องรับภาระโหลดจำนวนมาก

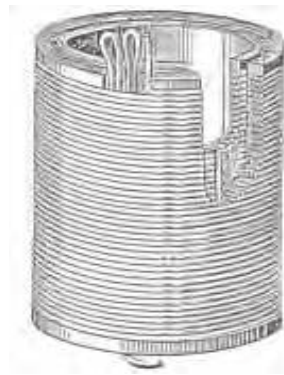
ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ พันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก พันแบบขดลวดจาน (แบบแพนเค้ก) และพันแบบกันหอย

1. ขดลวดชั้นทรงกระบอก (Cylindrical Layer Winding) การพันลักษณะนี้รอบของวงขดลวดจะวางไว้ชิดกัน ใช้พันได้ทั้งลวดตัวนำที่มีหน้าตัดกลม และหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม โดยสามารถพันได้ตั้งแต่ชั้นเดียว (Single Layer) ไปจนถึงหลายชั้นก็ได้เช่นกัน การพันลักษณะนี้เหมาะสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่ำ นิยมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **แบบคอนเซนตริก (Concentric Winding)** เนื่องจากการพันวงขดลวดที่มีแกนเป็นจุดศูนย์กลางร่วม ดังรูปที่ 1.14 (ก) เป็นการพันขดลวดทรงกระบอกสองชั้น (Two Layer) พันด้วยลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมในแต่ละชั้นจะมีฉนวนกันไว้

ส่วนรูปที่ 1.14 (ข) เป็นการพันหลายชั้นด้วยลวดตัวนำที่มีหน้าตัดกลม โดยพันอยู่บนกระบอกเบคิไลต์ (Bakelite Cylinder)



(ก) พันสองชั้นด้วยลวดตัวนำ
ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

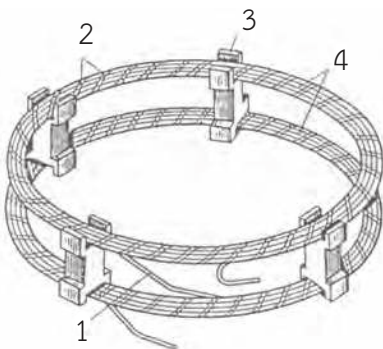


(ข) พันหลายชั้นด้วย
ลวดตัวนำที่มีหน้าตัดกลม

รูปที่ 1.14 ขดลวดชั้นทรงกระบอก

2. ขดลวดจาน (Disc Winding) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบบแพนเค้ก (Pancake Winding)

การพันขดลวดแบบนี้เหมาะสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ใช้ลวดตัวนำที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยที่วงขดลวดจาน (ลักษณะคล้ายจาน) จะพันเป็นชุดจำนวนหลายชุด ลักษณะดังรูปที่ 1.15 (ก) จะพันเป็นขดลวดจานจำนวนสองชุด โดยเริ่มจากกึ่งกลางดังรูปที่ 1.15 (ข) ข้อดี คือ มีความแข็งแรง ข้อเสีย คือ พันยากและมีราคาแพง



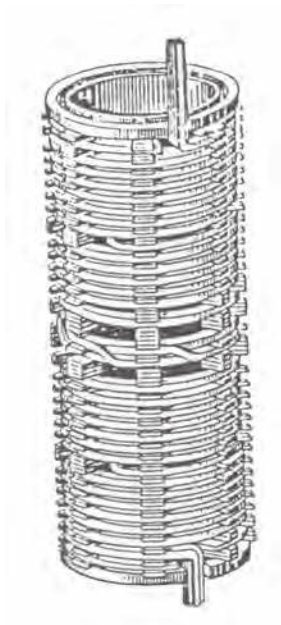
(ก) วงขดลวดแบบจานคู่
1. จุดสับเปลี่ยนภายใน
2. เชือกพัน
3. ตัวยึดชั่วคราว
4. วงขดลวดเดี่ยว



(ข) การพันขดลวดจาน โดยเริ่มพันจากจุดกึ่งกลาง

รูปที่ 1.15 การพันขดลวดแบบขดลวดจาน หรือแบบแพนเค้ก

3. ขดลวดแบบก้นหอย (Helical Simplex Winding) การพันขดลวดแบบนี้จะพันด้วยลวดตัวนำจำนวนหลายเส้นขนานกัน ในลักษณะวางทับซ้อนกันรอบ ๆ กระจบอเบคิไลต์ ดังนั้น จึงต้องมีการสับไขว้สายตัวนำเพื่อให้ความต้านทานของตัวนำแต่ละคู่มีค่าเท่ากัน ถ้าหากไม่มีการสับไขว้กัน ความยาวของสายที่ต่างกัน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ไม่สม่ำเสมอจะมีผลทำให้ความต้านทานของตัวนำทั้งสองชุดมีค่าต่างกัน เป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้ากระจายในขดลวดระหว่างขดลวดขนานมีค่าไม่สม่ำเสมอกัน บางส่วนของสายอาจจะรับภาระเกิน (Overload) ข้อเสียของขดลวดแบบนี้ คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมากที่สุดตรงจุดสับไขว้ ทำให้การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอตลอดแนวความสูงของขดลวด



รูปที่ 1.16 ขดลวดแบบก้นหอย ที่มีการสับไขว้ 3 ครั้ง