



ฟิสิกส์ 2

ระดับมหาวิทยาลัย

เล่ม 3

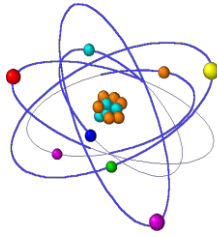
แนะนำ
เว็บไซต์จองซื้อ
000 พล. สุภาวดี สุภาว
ในแอปพลิเคชัน TKTek
และ QR Code



SHOPEE LAZADA

ราคา
199
บาท

เรียบเรียงโดย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ สุภาพ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ฟิสิกส์ ๒

ระดับมหาวิทยาลัย เล่ม ๑

ผศ.สุชาติ สุภาพ

พิมพ์และจำหน่ายโดย

สุชาติ สุภาพ

133/471 หมู่ ๒ (ติดกับ สนง. ที่ดินบางบัวทอง) ต.พิมลราช อ.บางบัวทอง
จ.นนทบุรี 11110

E-mail suchart11111@hotmail.com

พิมพ์ที่ หจก.สปส 1999 ม.เพชรอนันต์ เขตคันนายาว กรุงเทพฯ ๑ 10230

คำนำ

หนังสือ ฟิสิกส์ ๑ ระดับมหาวิทยาลัย เล่ม ๑ นี้ มีเนื้อหาในหมวดไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และทัศนศาสตร์ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของเทคโนโลยีในยุคปัจจุบัน เนื้อหาในเล่มมี ๕ บท ได้แก่

- ตัวเหนี่ยวนำและความเหนี่ยวนำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานในสนามแม่เหล็ก และเป็นหัวใจของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด เช่น หม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ที่พบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ทั้งในบ้าน โรงงาน และระบบพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอธิบายการทำงานของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุในระบบกระแสสลับ
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคลื่นที่สามารถเดินทางผ่านอวกาศได้โดยไม่ต้องใช้ตัวกลาง และเป็นพื้นฐานของการสื่อสาร การมองเห็น และเทคโนโลยีไร้สาย
- ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ที่อธิบายการสะท้อนและหักเหของแสงในเชิงเส้นตรง เหมาะกับการวิเคราะห์เลนส์ กระจก และการสร้างภาพ
- ทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ ซึ่งเจาะลึกพฤติกรรมของแสงในลักษณะคลื่น เช่น การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และโฟลาไรซ์ ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิดแบบรังสี

ผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะช่วยจุดประกายความเข้าใจในปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่รอบตัว และสร้างพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่แข็งแกร่งสำหรับผู้เรียน เพื่อเตรียมพร้อมสู่การศึกษาในระดับที่สูงขึ้นหรือต่อข้อต่อสู่การประยุกต์ใช้อย่างสร้างสรรค์ในโลกยุคใหม่

หรือถ้าท่านสนใจหนังสือในรูปแบบ E-BOOK ก็มีจำหน่ายที่เว็บไซต์ ร้านนายอินทร์ , MEB , อุกปี, ซีเอ็ด , hystexts , ศูนย์หนังสือจุฬาฯ และ DDebook

สำหรับท่านที่สนใจหนังสือของกระผมแต่หาซื้อตามร้านหนังสือทั่วไปไม่ได้ สามารถซื้อออนไลน์ที่แอปต่าง ๆ โดยสแกน QR โค้ดข้างล่างนี้
(ที่ช้อปปีมีหนังสือมากที่สุด)



สุชาติ สุภาพ

มือถือ ๐๘๓-๑๒๐-๓๘๒๕

สารบัญ

หน้า

บทที่ 10 ตัวเหนี่ยวนำและความเหนี่ยวนำ	5
10.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง	6
10.2 วงจรอนุกรม RL	14
10.3 พลังงานของตัวเหนี่ยวนำ	24
10.4 ความเหนี่ยวนำร่วม	30
10.5 การแกว่งทางไฟฟ้าในวงจร LC	34
10.6 วงจร RLC	42
บทที่ 11 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	45
11.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และแผนภาพเฟสเซอร์	45
11.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแต่ตัวต้านทาน เพียงอย่างเดียว	48
11.3 พลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับ และกระแสตรง เมื่อแรงดันเฉลี่ยเท่ากัน	49
11.4 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแต่ตัวเหนี่ยวนำ เพียงอย่างเดียว	52
11.5 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแต่ตัวเก็บประจุ เพียงอย่างเดียว	55
11.6 วงจร RLC ที่ต่อกันแบบอนุกรม	63
11.7 การกำหนดในวงจร RLC ที่ต่อกันแบบอนุกรม	75
11.8 วงจร RLC ที่ต่อกันแบบขนาน	79
11.9 กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	83
11.10 หม้อแปลงไฟฟ้า และการส่งกำลังงาน	89
บทที่ 12 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	92
12.1 กฎต่างๆของแม่เหล็กและไฟฟ้า	93
12.2 สมการแมกซ์เวลล์	96
12.3 การถอดสมการแมกซ์เวลล์ และคลื่นระนาบ	98
12.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบ	103
12.5 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	106
12.6 โมเมนตัมและความดันของการแผ่รังสี	112

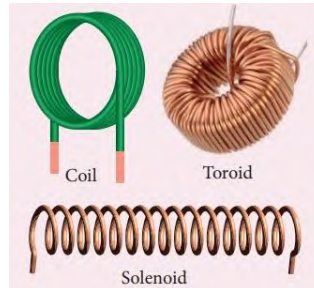
สารบัญ

หน้า

12.7 อัตราส่วนระหว่่างการถ่ายถอดพลังงานและการถ่ายทอดโมเมนตัม	115
12.8 การผลิตคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสายอากาศ	117
12.9 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	119
บทที่ 13 ทศนคาสตร์เชิงเรขาคณิต	122
13.1 ธรรมชาติของแสง	122
13.2 การประมาณรังสีด้านแสงเชิงเรขาคณิต	123
13.3 การสะท้อนและการหักเห	124
13.4 ดัชนีหักเหของแสง	128
13.5 การสะท้อนกลับหมด	132
13.6 หลักของฮอยเกนส์	133
13.7 ภาพที่เกิดจาก กระจกเงาราบ	134
13.8 ภาพที่เกิดจากกระจกโค้ง	136
13.9 ภาพที่เกิดจากการหักเหของแสง	143
13.10 เลนส์บาง	148
13.11 ความคลาดของเลนส์	154
13.12 ทศนอุปกรณ์	156
13.13 นัยน์ตาและการมองเห็น	163
บทที่ 14 ทศนคาสตร์เชิงกายภาพ	165
14.1 การแทรกสอดของแสงที่ผ่านสลิตคู่	166
14.2 การเลี้ยวเบนของแสง	197
14.3 เกรตติงเลี้ยวเบน	210
14.4 การโพลาไรซ์ของคลื่นแสง	221
14.5 การทำแสงไม่โพลาไรซ์ให้เป็นแสงโพลาไรซ์	223
14.6 กฎของมาลุส หรือกฎโคไซน์กำลังสอง	227

บทที่ 10

ตัวเหนี่ยวนำ และความเหนี่ยวนำ

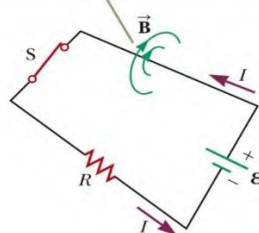


ในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ อุปกรณ์หนึ่งที่มีบทบาทสำคัญไม่แพ้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ก็คือ "ตัวเหนี่ยวนำ" อุปกรณ์ที่เก็ขข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบขึ้น และหากกระแสในขดลวดเปลี่ยนแปลง สนามแม่เหล็กนั้นก็จะเปลี่ยนตาม ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำมีบทบาทอย่างมากในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC), วงจรกรองสัญญาณ (filters), หม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงเครื่องกำเนิดและมอเตอร์ไฟฟ้า ความเข้าใจเรื่องตัวเหนี่ยวนำจึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้า บทเรียนนี้จะพานักศึกษาไปทำความรู้จักกับแนวคิดของความเหนี่ยวนำ หน่วยงานของมัน หลักการทำงานของตัวเหนี่ยวนำ การเหนี่ยวนำตัวเอง และการเหนี่ยวนำร่วมพร้อมทั้งตัวอย่างการใช้งานจริงในเทคโนโลยีรอบตัวเรา

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในขดลวดอุปกรณ์ที่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในตัวเองได้ ตัวเหนี่ยวนำมีแนวโน้มจะขัดขวางการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแส โดยถ้ากระแสเพิ่มขึ้น ก็เกิดการต่อต้านการไหลของอิเล็กตรอน แต่ถ้ากระแสลดลง ตัวเหนี่ยวนำก็จะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา หน่วยงานของตัวเหนี่ยวนำ คือ เฮนรี ตัวเหนี่ยวนำจะเป็นขดลวด

เมื่อปิดวงจรไฟฟ้าใดๆ ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลทันทีทันใด แต่กระแสไฟฟ้ายังไม่ได้มีค่าสูงสุดในทันทีทันใด ถึงแม้ว่าช่วงเวลากระแสไฟฟ้าเพิ่มจากศูนย์เป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดจะใช้เวลาที่สั้นมาก ๆ ก็ตาม แต่จำเป็นต้องกล่าวถึง

After the switch is closed, the current produces a magnetic flux through the area enclosed by the loop. As the current increases toward its equilibrium value, this magnetic flux changes in time and induces an emf in the loop.



รูป 10.1 เมื่อปิดวงจร กระแสไฟฟ้าจะไม่ได้มีค่าสูงสุดในทันทีทันใด

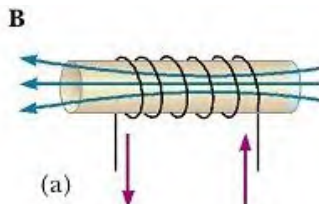
ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น เนื่องจากเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรไฟฟ้าก็จะมีสนามแม่เหล็กแผ่ออกมาจากสายไฟฟ้านั้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะตัดผ่านลวดทั้งหมดที่เป็นส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า (มองวงจรไฟฟ้าเป็นเสมือนลวดลวด 1 ลวด) สนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านลวดก็จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในทิศทางที่ต้านกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าหลัก ดังรูป 10.1 เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้มีค่าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในวงจร ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จึงมีค่ามากที่สุดขณะปิดวงจร และเมื่อเวลาผ่านไปจนเกิดสมดุลทางไฟฟ้าแล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะมีค่าเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรก็จะมีเพียงกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นหลังจากเกิดสมดุลทางไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าสูงสุด

ความเหนี่ยวนำเป็นคุณสมบัติของลวดตัวนำ ที่จะต้านการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งหลักพื้นฐานของความเหนี่ยวนำจะอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวเหนี่ยวนำเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ตัวเหนี่ยวนำมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า คอยล์ (Coil) หรือ โซลิด (Choke)

10.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-induced Electromotive Force)

ในวงจรไฟฟ้าที่มีกระแสไหลผ่านลวดหรือสายตัวนำยาว ๆ จะเกิด สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเพิ่มหรือลด สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็เปลี่ยนแปลงตาม และนั่นทำให้เกิดปรากฏการณ์สำคัญอย่างหนึ่งที่เรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง” **แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำหรือลวดลวดเอง** เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจรเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจาก กฎของฟาราเดย์ ว่าด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และสอดคล้องกับ กฎของเลนซ์ ที่ระบุว่า แรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำจะมีทิศทาง “ต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสต้นเหตุ” เสมอ ปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญอย่างมาก เพราะมันคือพื้นฐานของการทำงานของ ตัวเหนี่ยวนำ และส่งผลต่อการออกแบบวงจรไฟฟ้า โดยเฉพาะวงจรที่มีกระแสสลับ หรือวงจรที่ต้องการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าให้ราบรื่น หัวข้อนี้จะพานักศึกษา ทำความเข้าใจว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองเกิดขึ้นได้อย่างไร มีปัจจัยใดบ้างที่เกี่ยวข้อง และสามารถคำนวณได้จากสมการทางฟิสิกส์อย่างไร พร้อมตัวอย่างการใช้งานจริงในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามา หรือเมื่อมีการหยุดไหลของกระแสไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามาในลวด หรือการที่กระแสไฟฟ้าหยุดไหลทันทีทันใด สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองในทิศทางที่ตรงข้ามกับทิศของกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อเราชกปลั๊กเครื่องใช้ไฟฟ้าขณะที่เครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่จะเกิดประกายไฟเป็นต้น ในบางกรณีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจมีค่าสูงกว่าเดิมมาก



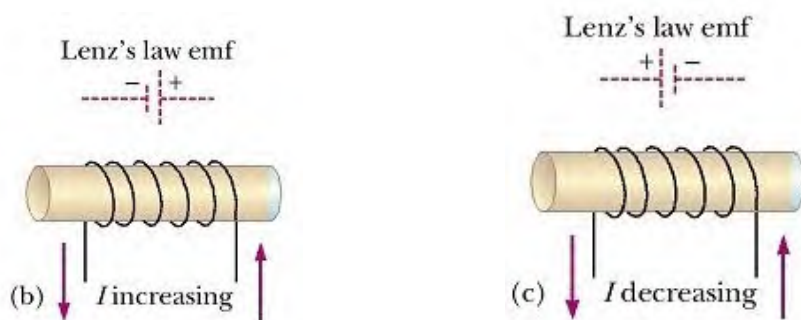
รูป 10.2 มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวดโซลินอยด์แกนโลหะ

รูป 10.2 เป็นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดจะทำให้มีสนามแม่เหล็กแผ่ออกมาจากลวด ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยการขยายตัวของ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเริ่มจากจุดกึ่งกลางของขดลวด การเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กนี้ จะเสมือนว่ามีการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กตัดกับขดลวดที่อยู่กับที่ ดังนั้น จึงส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด การที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้ามาในขดลวด แล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในขดลวดนี้ เรียกว่า “ความเหนี่ยวนำตัวเอง” การเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดทำให้เกิด “แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back emf.)”

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในขดลวดนั้น มีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น เมื่อเปิดวงจรกระแสในขดลวดหลอดไฟจะมีผลให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ในบางกรณีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้มีค่าสูงกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

ถ้าให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด มีการเปลี่ยนแปลง รูป 10.๓ (๔) กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รูป 10.๓ (๕) กระแสไฟฟ้าลดลง กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าว จะเหนี่ยวนำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองขึ้นในขดลวด ทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองจะเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังรูป 10.๓



รูป 10.๓ ทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองมีทิศทางข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิม และมีค่าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยเวลา และจำนวนรอบของขดลวด (N) หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\varepsilon_L = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

และเพื่อให้่ายในการศึกษา จะพิจารณาขดลวดที่มีขดเดียว ดังนั้นจะได้ว่า

$$\varepsilon_L = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (10-1)$$

สมการ (10-1) มีความหมายว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองมีค่าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในหนึ่งหน่วยเวลา

เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ_B) มีค่าขึ้นอยู่กับการรูปร่างของขดลวด และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด ดังนั้น

$$\phi_B = LI \quad (10-2)$$

เมื่อ L คือค่าคงตัว ที่ขึ้นอยู่กับการรูปร่างของขดลวด มีชื่อเรียกว่า “ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด” แทนสมการ (10-2) ในสมการ (10-1) ได้

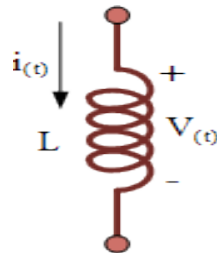
$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (10-3)$$

สมการ (10 - ๓) มีความหมายว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยเวลา

$$L = - \frac{\mathcal{E}_L}{\frac{dI}{dt}} \quad \text{โวลต์.วินาที ต่อแอมแปร์}$$

ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่

ความเหนี่ยวนำ 1 เฮนรี่ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ต่อวินาที ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 โวลต์



รูป 10.4 ขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด เช่น ชักปลั๊กออก หรือ ปิดวงจรไฟฟ้าทันทีทันใดของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบสำคัญ จะทำให้ $\frac{dI}{dt}$ มีค่าสูงมาก จึงเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (*back emf*) ที่มีค่าสูง จนอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นชำรุดเสียหายได้ (ปัจจุบันมีการป้องกัน *back emf* โดยต่อไดโอดคร่อมตัวเหนี่ยวนำ)

จากสมการ (10 - ๒) ถ้าขดลวดมีจำนวน N รอบ จะได้ว่า

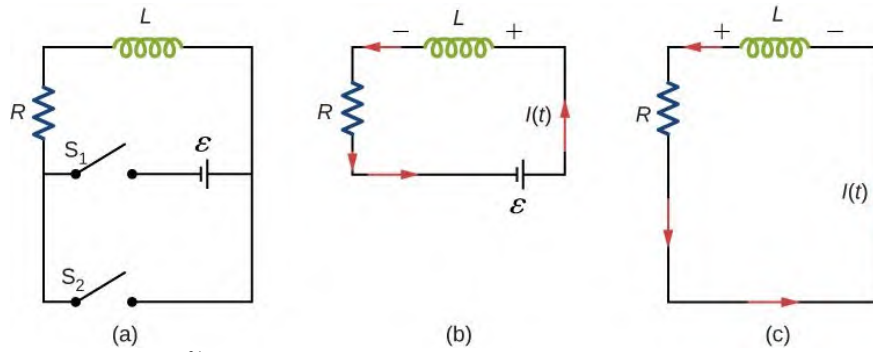
$$N\phi_B = LI$$

หรือ	$L = \frac{N\phi_B}{I}$	(10 - 4)
------	-------------------------	----------

ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด (N)

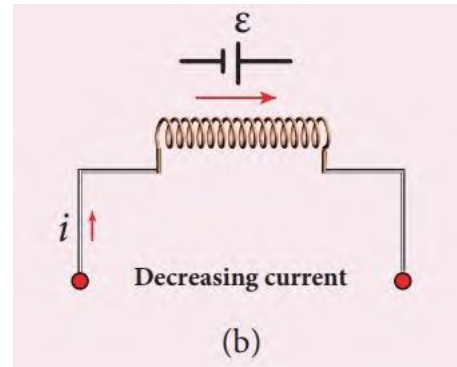
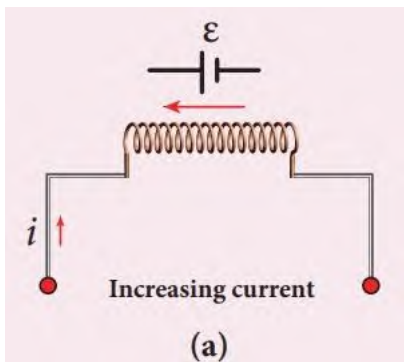


แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด จะมีทิศทางกับกระแสไฟฟ้า



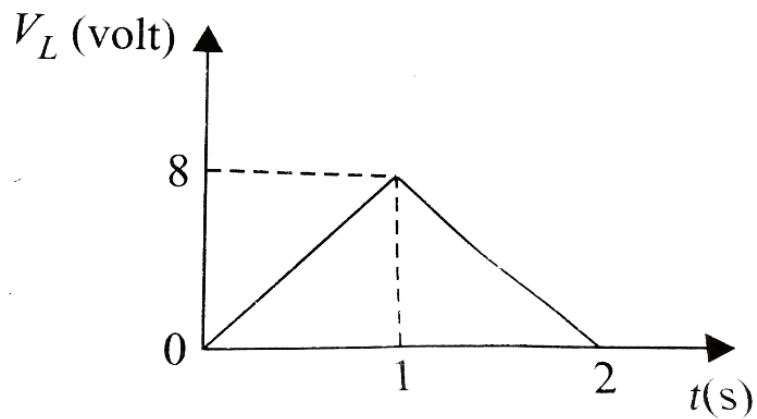
(a) วงจร RL พร้อมสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 (b) วงจรสมบูรณ์เมื่อ S_1 ปิดและ S_2 เปิด

(c) วงจรสมบูรณ์เมื่อ S_1 เปิดและ S_2 ปิด



แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด จะมีทิศทางกับกระแสไฟฟ้า

ตัวอย่าง ถ้าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ 4 เอนมีลักษณะดังรูป จงหากระแสไฟฟ้าเมื่อ $t = 2$ วินาที



วิธีทำ จาก

$$V_L = \frac{L di}{dt}$$

$$\frac{V_L}{L} dt = di$$

$$\frac{1}{L} \int_0^2 V_L dt = \int_0^I di$$

$$\frac{1}{L} \int_0^2 V_L dt = [I - 0]_0^1$$

$$\frac{1}{L} \int_0^2 V_L dt = I_{2s}$$

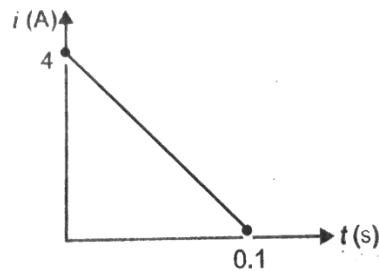
$$\frac{1}{L} \times (\text{พื้นที่ใต้กราฟ } V-t) = I_{2s}$$

$$\frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{2} \times 2 \times 8 \right) = I_{2s}$$

$$I_{2s} = 2A$$

ตอบ

ตัวอย่าง ถ้ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงดังรูป จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น



วิธีทำ จาก

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

$$IR = -\frac{d\phi}{dt}$$

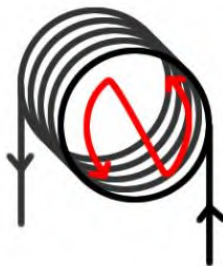
$$d\phi = -iRdt$$

$$\phi = R \int_0^{0.1} i dt = R \text{ คูณกับพื้นที่}$$

$$\phi = (10) \frac{1}{2} (0.1)(4) = 2Wb$$

ตอบ

ตัวอย่าง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามสมการ $I_1 = (t^2 - 7t + 8)A$ ถ้าขดลวดมีค่าความเหนี่ยวนำ ๖๐ มิลลิเฮนรี จงหา ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อเวลา $t = ๓$ วินาที ข) ขณะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในข้อ ก) กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_1 หรือไม่ ค) นานเท่าใดจึงจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



วิธีทำ จาก

$$(V_L)_t = -L \frac{dI}{dt}$$

$$(V_L)_t = -(60 \times 10^{-3} H) \frac{d(t^2 - 7t + 8)A}{dt}$$

$$(V_L)_t = -(60 \times 10^{-3} H)(2t - 7)$$

$$(V_L)_t = -0.12t + 0.42$$

ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$(V_L)_t = -0.12(3s) + 0.42$$

$$(V_L)_{3s} = -0.36 + 0.42 = 0.06V$$

ตอบ

ข) กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในทิศทางข้ามกับกระแสไฟฟ้า I_1

ตอบ

จาก

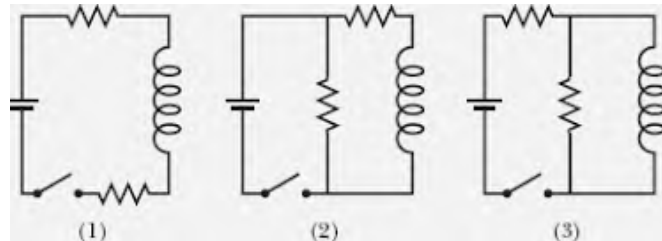
$$(V_L)_t = -0.12t + 0.42$$

$$0 = -0.12t + 0.42$$

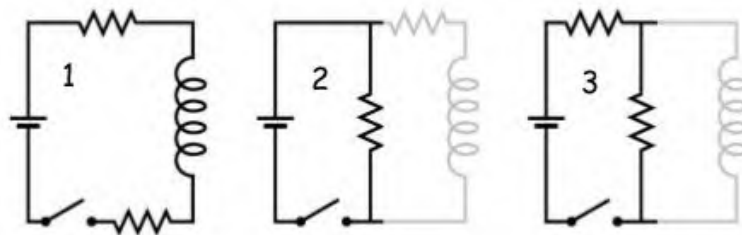
ค) นานเท่าใดจึงจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $t = 3.5s$

ตอบ

ตัวอย่าง วงจรไฟฟ้าดังรูป อยากรบว่าทันทีที่ปิดวงจรไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าในวงจรใดมีค่ามากที่สุด เรียงตามลำดับ



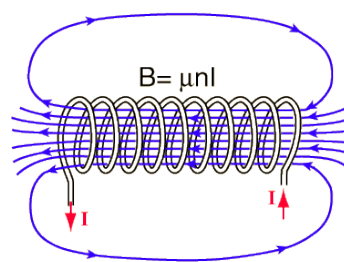
เนื่องจากขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำจะต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นวงจรไฟฟ้า ๑ และ ๓ ในช่วงทันทีที่ปิดวงจรจะเสมือนว่าเป็นดังรูป



ดังนั้นจะได้ว่า $i_2 > i_3 > i_1$

ตอบ

ตัวอย่าง 10.1 จงคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวของขดลวดโซลินอยด์ที่มีความยาวมาก ซึ่งจำนวนขดลวดต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับ n รอบ/เมตร และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A



วิธีทำ เนื่องจาก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล ก็จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวด

$$LI = N\phi_B$$

$$LI = N(BA)$$

$$LI = N(\mu_0 nIA)$$

$$L = N\mu_0 nA$$

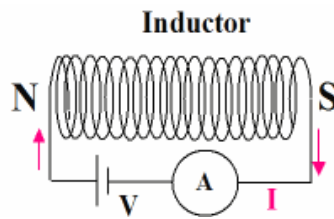
$$L = N\mu_0 \frac{N}{l} A$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} = \mu_0 n^2 l A = \mu_0 n^2 V \quad (10 - 5)$$

สมการ (10 - 5) มีความหมายว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ (L) มีค่าขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนรอบของขดลวด (N)
2. วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน (μ_0)
3. พื้นที่หน้าตัดของแกน (A)
4. ความยาวของแกน (l)
5. ปริมาตรของขดลวด (V)

ตัวอย่าง ขดลวดตัวเหนี่ยวนำยาว 8 เซนติเมตรมีจำนวนรอบ 1600 รอบและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตรมีความต้านทานไฟฟ้า 2.4 โอห์ม ถ้าต่อตัวเหนี่ยวนำกับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ พบว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลสูงสุดในเวลา 0.004 วินาที จงหา ก) ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง ข) กระแสไฟฟ้าสุดท้าย ค) แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับขณะต่อวงจร



วิธีทำ จาก

$$L = \mu_0 n^2 l A \quad (1)$$

$$n = \frac{1600}{0.08m} = 20000 \text{ loop/m} \quad (2)$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12V}{2.4\Omega} = 5A \quad (3)$$

แทนค่าต่าง ๆ ใน (1) ได้

$$L = (4\pi \times 10^{-7})(20000)^2(0.08)\pi(0.02)^2$$

ก) ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง

$$L = 0.05H \quad \text{ตอบ}$$

ข) กระแสไฟฟ้าสุดท้าย

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12V}{2.4\Omega} = 5A \quad \text{ตอบ}$$

ค) แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

$$V = -L \frac{dI}{dt} = (0.05H) \frac{5A-0A}{0.004s} = -63V \quad \text{ตอบ}$$

ตัวอย่าง ขดลวดโซลินอยด์ยาว 50 เซนติเมตรมีจำนวนรอบ 1200 รอบและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร มีกระแสไฟฟ้าไหล 2 แอมแปร์ จงหาค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดโซลินอยด์

วิธีทำ จาก

$$L = \mu_0 n^2 l A \quad (1)$$

$$n = \frac{1200}{0.5m} = 2400 \text{ loop/m} \quad (2)$$

แทนค่าต่าง ๆ ใน (1) ได้

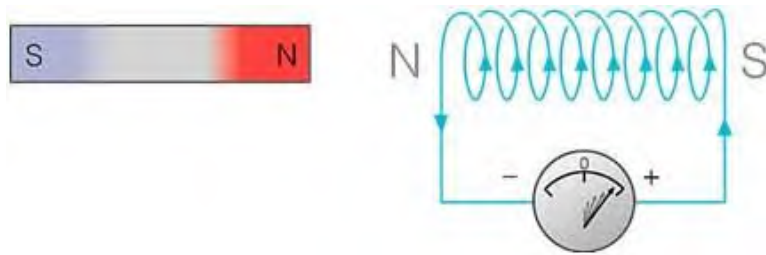
$$L = (4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A})(2400 \text{ loop/m})^2(0.5m)\pi(0.03m)^2$$

$$L = 10.23mH \quad \text{ตอบ}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำตัวเองมีค่าเป็นปริมาณโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (A) และเป็นปริมาณผกผันกับความยาวของขดลวด ซึ่งสามารถแสดงเหตุผลได้ดังนี้

1) เป็นปริมาณโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวด(A)

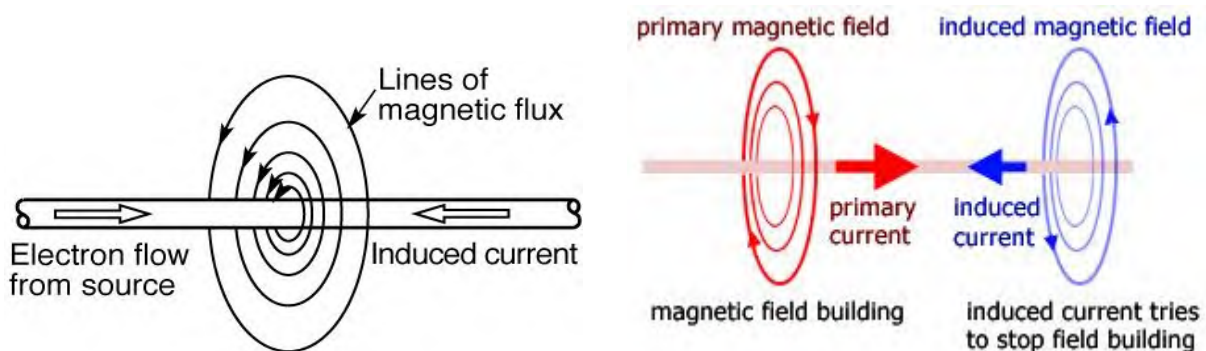
ขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดของขดลวด(A) มากย่อมมีสนามแม่เหล็กลอดผ่านขดลวดได้มากกว่าขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด (A) ดังรูป



รูป 10.5 ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองมีค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

๒) เป็นปริมาณผกผันกับความยาวของขดลวด

ถ้าจำนวนขดลวดเท่าเดิม แต่พันขดลวดให้ชิดติดกันมากขึ้น ขดลวดนั้นก็จะมีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ลอดผ่านขดลวดมากกว่า ขดลวดที่ขางดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นปริมาณผกผันกับความยาวของขดลวด (l)

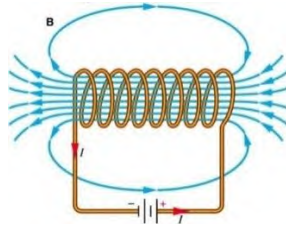


รูป 10.6 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างของการเหนี่ยวนำตัวเองที่น่าจะรู้จัก เช่น เมื่อเปิดสวิตช์(เปิดวงจร)ให้กระแสไฟฟ้าหยุดไหล ทำให้สนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมาจากขดลวดเปลี่ยนแปลง (สนามแม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์) การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ บางกรณีมีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิม หรือกรณีเปิดวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลก็เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองได้ เช่นเดียวกัน

ในการศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำตัวเอง จะศึกษาจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด

ตัวอย่าง 10.2



ขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศมีจำนวนรอบ 300 รอบ ยาว 25 เซนติเมตร พื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ 4 ตารางเซนติเมตร จงหา ก) ค่าความเหนี่ยวนำขดลวด

ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้ ถ้ากระแสไฟฟ้าลดลง 50 แอมแปร์ใน 1 วินาที

วิธีทำ จาก

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m / A})(300)^2 (4 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{25 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$L = 1.81 \times 10^{-4} \text{ T.m}^2 / \text{A}$$

ค่าความเหนี่ยวนำขดลวด

$$L = 0.181 \text{ mH}$$

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$$

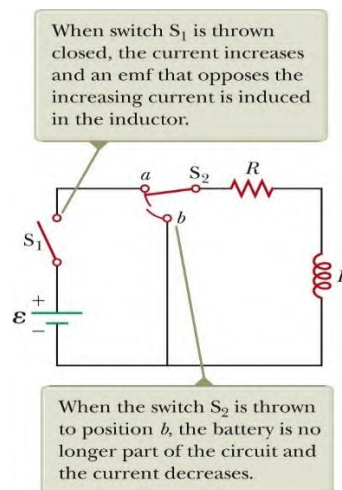
$$\mathcal{E}_L = -(1.81 \times 10^{-4} \text{ T.m}^2 / \text{A})(-50 \text{ A/s})$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$\mathcal{E}_L = 9.05 \text{ mV}$$

ตอบ

10.2 วงจรอนุกรม RL



รูป 10.7 วงจรไฟฟ้าที่ R และ L ต่อกันแบบอนุกรม

เมื่อเราศึกษาวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น เรามักเริ่มต้นจากวงจรที่มีเพียง ตัวต้านทาน (R) ซึ่งให้ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับแรงดัน กระแส และความต้านทานได้เป็นอย่างดี แต่ในโลกของวงจรไฟฟ้าที่ใช้งานจริง โดยเฉพาะในระบบอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้ากำลัง เรามักพบกับวงจรที่มี ตัวเหนี่ยวนำ (L) เข้ามาร่วมด้วย และเมื่อทั้งสององค์ประกอบนี้ถูก รวมกันในลักษณะ “ต่ออนุกรม” เราจะได้วงจรที่เรียกว่า “วงจรอนุกรม RL” วงจรอนุกรม RL เป็นวงจรที่ประกอบด้วย ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกันในเส้นทางเดียวกันกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ จะต้านทานการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้กระแสในวงจรไม่เพิ่มขึ้นทันที แต่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามกฎของการ

เหนื้ขวนนำแม่เหล็ก วงจร RL มีบทบาทสำคัญในหลายระบบ เช่น การกรองสัญญาณ การหน่วงเวลาในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟในอุปกรณ์ไฟฟ้าห้วข้อนี้้จะพนักศึกษา ทำความเข้าใจพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL การวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกฎของโอห์มและกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ รวมถึงการคำนวณค่าคงตัวเวลา (time constant) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสตามเวลาในวงจรแบบกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC)

ในการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL เราจะศึกษา ๒ กรณีด้วยกัน คือ

- 1) การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL ขณะปิดวงจร และกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลในวงจร
- 2) การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL ขณะตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าออกจากวงจร

1) การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL ขณะปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลในวงจร

การศึกษาการไหลของกระแสไฟฟ้าขณะปิดวงจรทำได้โดยการปิดวงจรไฟฟ้าที่สวิตช์ S_1 ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามาในวงจร แต่กระแสไฟฟ้าไม่ได้มีค่าสูงสุดทันทีทันใดเนื่องจากตัวเหนื้ขวนำจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนื้ขวนำในทิศที่ต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร จึงยังไม่มีค่าสูงสุดในทันทีทันใด แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด

ต่อไปจะเป็นการหาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร RL ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนี้

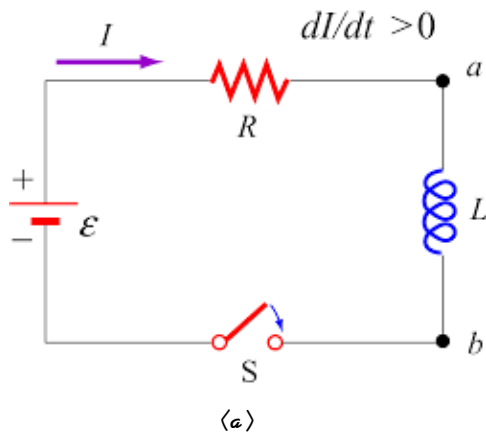
จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 \sum V &= 0 \\
 -\varepsilon + IR + V_L &= 0 \\
 -\varepsilon + IR - L \frac{dI}{dt} &= 0 \\
 IR - L \frac{dI}{dt} &= \varepsilon \\
 -L \frac{dI}{dt} &= \varepsilon - IR \\
 -L dI &= (\varepsilon - IR) dt \\
 -\frac{1}{(\varepsilon - IR)} dI &= \frac{1}{L} dt \\
 -\int_0^I \frac{1}{(\varepsilon - IR)} dI &= -\int_0^t \frac{1}{L} dt \\
 \int_0^I \frac{1}{(\varepsilon - IR)} d(\varepsilon - IR) &= -\int_0^t \frac{R}{L} dt \\
 \ln(\varepsilon - IR) \Big|_0^I &= -\frac{R}{L} t \Big|_0^t \\
 \ln(\varepsilon - IR) - \ln \varepsilon &= -\frac{R}{L} t \\
 \ln \frac{(\varepsilon - IR)}{\varepsilon} &= -\frac{R}{L} t
 \end{aligned}$$

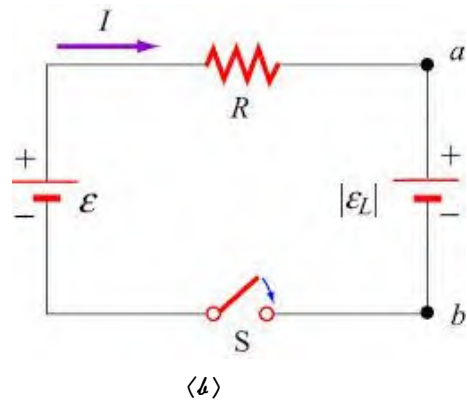
$$\begin{aligned}\frac{(\varepsilon - IR)}{\varepsilon} &= e^{-\frac{R}{L}t} \\ \varepsilon - IR &= \varepsilon e^{-\frac{R}{L}t} \\ IR &= \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \\ I &= \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)\end{aligned}$$

$$I_t = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (10 - 6)$$

สมการ (10 - 6) มีความหมายว่าเมื่อปิดวงจร กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร RL จะไม่ได้มีค่าสูงสุดในทันทีทันใดแต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น

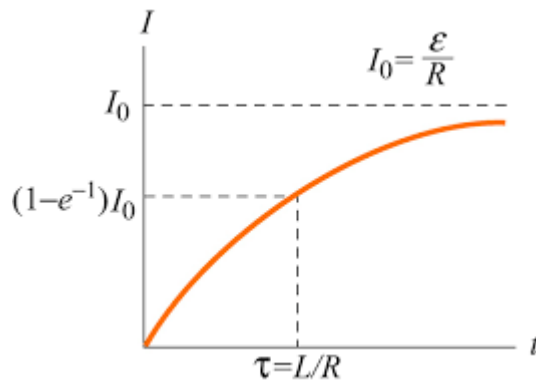


(a) วงจร RL แบบอนุกรม



(b) วงจรสมบูรณ์

เมื่อเวลาเท่ากับ $\frac{L}{R}$ กระแสไฟฟ้าในวงจรจะมีค่าเท่ากับ $I = I_0(1 - e^{-1})$ หรือ $0.632I_0$ เวลาดังกล่าวเรียกว่า “ค่าคงตัวเวลา (time constant, τ)”

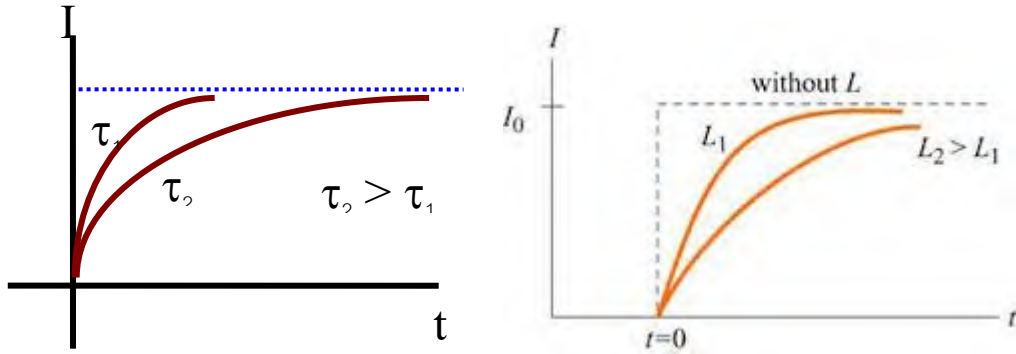


รูป 10.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา ที่เวลาต่าง ๆ

จากรูป 10.8 จะเห็นว่า ถ้าเวลาเท่ากับ time constant กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 63% ของกระแสไฟฟ้าสูงสุด

จากข้อมูลที่ผ่านมาทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าเฉพาะในช่วงแรกของการปิดวงจรไฟฟ้าเท่านั้น และเมื่อเกิดสมดุลของกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำจะไม่ต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าเลย (ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ)

ถ้าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ๒ ตัวมีค่าคงตัวเวลา (time constant) หรือค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ก็จะเข้าสู่สมดุลไฟฟ้าในเวลาที่แตกต่างกัน ดังรูป 10.9



รูป 10.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อตัวเหนี่ยวนำมีค่า τ และ L ต่างกัน

๑) การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL ขณะตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าออกจากวงจร

การศึกษาการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร RL ขณะตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าออกจากวงจรทำได้โดยการสับสวิตช์ S_2 ไปที่ b ดังรูป 10.7 ซึ่งเป็นการตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าออกจากวงจรไฟฟ้า แต่กระแสไฟฟ้าจะไม่ได้เป็นศูนย์ในทันทีทันใด เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้านการลดลงของกระแสไฟฟ้า

ต่อไปจะเป็นการหาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร RL เมื่อตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าออกจากวงจร ดังนี้ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}\sum V &= 0 \\ IR + V_L &= 0 \\ IR + L \frac{dI}{dt} &= 0 \\ L \frac{dI}{dt} &= -IR \\ \frac{1}{I} dI &= -\frac{R}{L} dt \\ \int_{I_0}^I \frac{1}{I} dI &= -\frac{R}{L} \int_0^t dt \\ \ln I \Big|_{I_0}^I &= -\frac{R}{L} t \Big|_0^t \\ \ln I - \ln I_0 &= -\frac{R}{L} t \\ \ln \frac{I}{I_0} &= -\frac{R}{L} t\end{aligned}$$

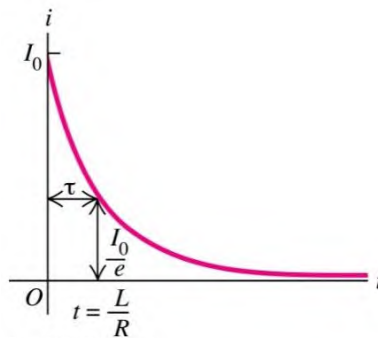
ใช้ exponential ทั้งสองข้าง ได้

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$

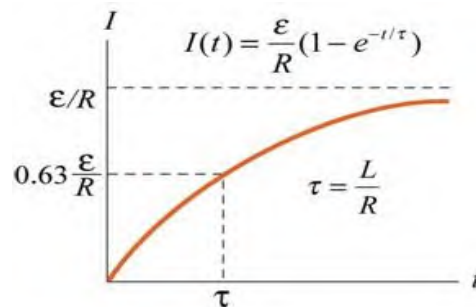
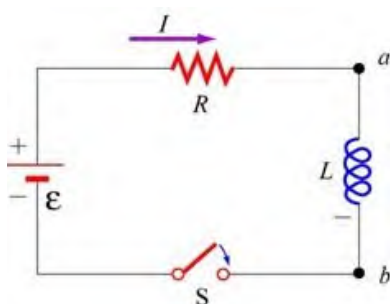
(10 - 7)

สมการ (10 - 7) มีความหมายว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร RL จะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ *time constant* กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ $I = I_0 e^{-1}$ หรือเท่ากับ $0.368I_0$

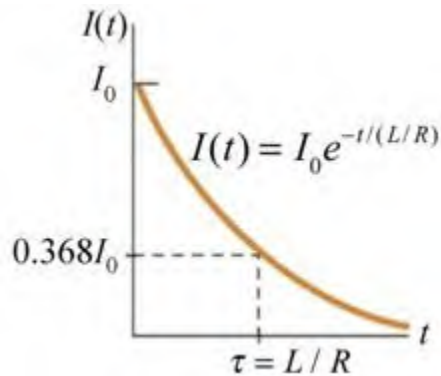
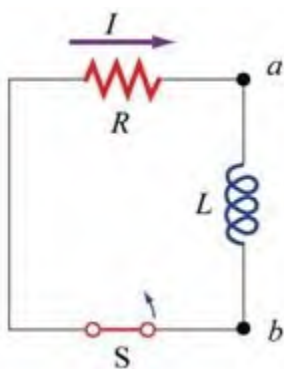


รูป 10.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่เวลาต่างๆ

จะเห็นว่าขณะที่สวิตช์ S_2 ปิด และสวิตช์ S_1 เปิดไม่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แต่กลับมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรได้ แสดงว่าตัวเหนี่ยวนำสามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในตัวมันได้ ในรูปของสนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในขดลวด



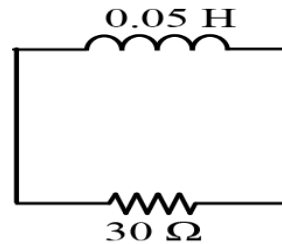
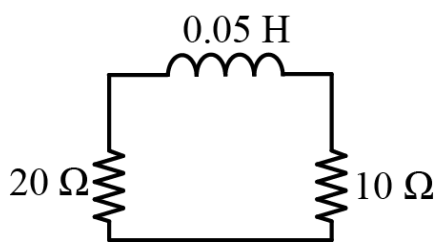
กระแสไฟฟ้าในวงจร RL ในช่วงแรกของการปิดวงจร



กระแสไฟฟ้าในวงจร RL ในช่วงแรกของการตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้า

เปรียบเทียบประจุไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าในวงจร RC กับวงจร RL			
	ดิสชาร์จ	ชาร์จ	ค่าคงตัวเวลา
ตัวเก็บประจุ	$v_C = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$	$v_C = V_0 (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$	RC
ตัวเหนี่ยวนำ	$i_L = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$	$i_L = I_0 (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$	L/R

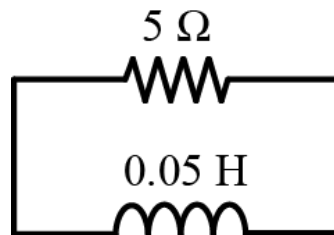
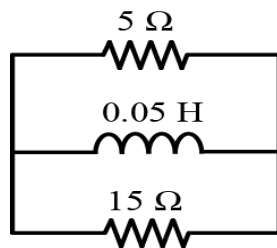
ตัวอย่าง จากรูป จงหาค่า *time constant* ของวงจรนี้



วิธีทำ จาก

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.05H}{30\Omega} = 0.0017s$$

ตอบ



วิธีทำ จาก

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.05H}{3.75\Omega} = 0.013s$$

ตอบ

ตัวอย่าง ตัวเหนี่ยวนำ ๒๐ มิลลิเฮนรี และตัวต้านทาน ๐.๕ โอห์ม เมื่อต่อเข้ากับแบตเตอรี่นานเท่าใดกระแสจึงจะมีค่าเป็น ๙๐ % ของกระแสสูงสุด กำหนดให้ $\ln 10 = 2.3$

วิธีทำ จาก

$$I_t = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

$$\frac{I_t}{I_0} = \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

$$0.9 = 1 - e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$0.1 = e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$\ln 0.1 = -\frac{Rt}{L}$$

$$\ln \frac{1}{10} = -\frac{(0.5)t}{20 \times 10^{-3}}$$

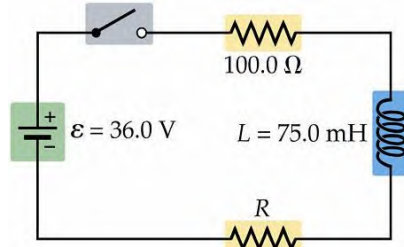
$$\ln 1 - \ln 10 = -\frac{(0.5)t}{20 \times 10^{-3}}$$

$$-2.3 = -\frac{(0.5)t}{20 \times 10^{-3}}$$

$$t = 92 \times 10^{-3} \text{ s}$$

ตอบ

ตัวอย่าง ตัวต้านทาน ๒ ตัว และตัวเหนี่ยวนำ ๑ ตัว เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ดังรูป เมื่อสวิตช์ปิดวงจรเป็นเวลานาน พลังงานแม่เหล็กที่ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ ๓ มิลลิจูล จงหาค่า R



วิธีทำ จาก

$$E = \frac{1}{2} LI_{\infty}^2$$

$$3 \times 10^{-3} \text{ J} = \frac{1}{2} (75 \times 10^{-3} \text{ H}) I_{\infty}^2$$

$$I_{\infty} = 0.283 \text{ A}$$

และจาก

$$I_{\infty} = \frac{\varepsilon}{R}$$

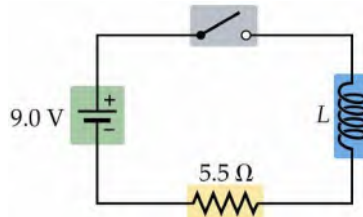
$$0.283 \text{ A} = \frac{36 \text{ V}}{R + 100 \Omega}$$

$$R = 27.7 \Omega$$

ตอบ

ตัวอย่าง เมื่อปิดวงจรจะมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก ๐ ถึง ๐.๒ A ในเวลา ๐.๑๕ วินาที จงหา

ก) กระแสสูงสุด ข) ค่าคงตัวเวลา ค) ระยะเวลาหลังจากปิดวงจรจนมีกระแสไฟฟ้า ๐.๒ A



วิธีทำ จาก

$$I_{\max} = I_{\infty} = \frac{\varepsilon}{R}$$

ก) กระแสสูงสุด

$$I_{\infty} = \frac{9 \text{ V}}{5.5 \Omega} = 1.64 \text{ A}$$

(๑) ตอบ

จาก

$$I = I_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (๒)$$

แทนค่าต่าง ๆ ใน (๒) ได้

$$0.2 \text{ A} = 1.64 \text{ A} \left(1 - e^{-\frac{0.15 \text{ s}}{\tau}} \right)$$

$$0.122 = 1 - e^{-\frac{0.15 \text{ s}}{\tau}}$$

$$e^{-\frac{0.15 \text{ s}}{\tau}} = 0.878$$

ใส่ log ฐาน e ทั้งสองข้าง

$$-\frac{0.15s}{\tau} = \ln 0.878$$

$$-\frac{0.15s}{\tau} = -0.13$$

ข) คำนวณค่าคงตัวเวลา

$$\tau = 1.15s$$

ตอบ

จาก

$$I = I_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$0.4A = 1.64A \left(1 - e^{-\frac{t}{1.15s}} \right)$$

$$0.24 = 1 - e^{-\frac{t}{1.15s}}$$

$$e^{-\frac{t}{1.15s}} = 0.76$$

ใส่ log ฐาน e ทั้งสองข้าง

$$-\frac{t}{1.15s} = \ln 0.76$$

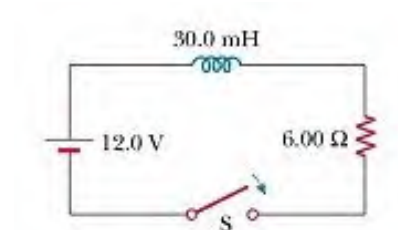
$$-\frac{t}{1.15s} = -0.274$$

ค) ระยะเวลาที่มีกระแสไฟฟ้า 0.4 A

$$t = 0.31s$$

ตอบ

ตัวอย่าง 10.๘



จากรูป เมื่อปิดวงจร จงหา ก) ค่าคงที่เวลา

ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรที่เวลา $t = 2$ มิลลิวินาที

ค) เขียนกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำที่เวลาต่างๆ

ก) ค่าคงที่เวลา

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$\tau = \frac{30 \times 10^{-3} H}{6 \Omega}$$

$$\tau = 5 \text{ msec}$$

ตอบ

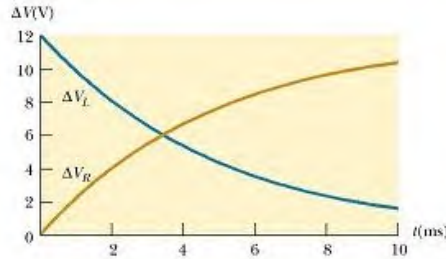
จาก

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-\frac{2}{5}} \right)$$

$$I = \frac{12V}{6\Omega} \left(1 - e^{-0.4} \right) = 0.659A$$

ตอบ



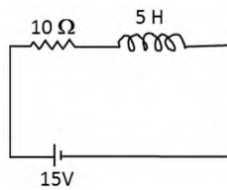
ค)

กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำที่เวลาต่าง ๆ

ตอบ

ตัวอย่าง วงจร RL มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์ ตัวต้านทานมีความต้านทาน 10 โอห์มและตัวเหนี่ยวนำมีความเหนี่ยวนำ

5 เฮนรี่ จงแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของกระแสในเวลา $t =$ อนันต์ และที่ $t = 1$ วินาที เป็นดังนี้ $\frac{I_\infty}{I_{1s}} = \frac{e^2}{e^2 - 1}$



วิธีทำ จาก

$$I_t = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

$$I_{1s} = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{10}{5}(1)} \right) = \frac{15}{10} (1 - e^{-2}) = 1.5 (1 - e^{-2}) \quad \langle 1 \rangle$$

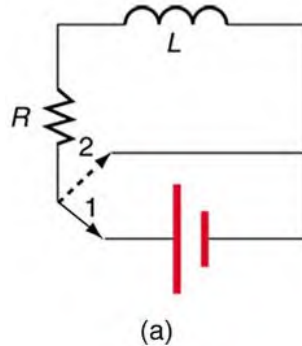
$$I_\infty = I_0 (1 - e^\infty) = I_0 (1 - 0) = I_0 \quad \langle 2 \rangle$$

$$\frac{(2)}{(1)} \quad \frac{I_\infty}{I_{1s}} = \frac{1.5}{1.5(1 - e^{-2})} = \frac{1}{1 - e^{-2}}$$

$$\frac{I_\infty}{I_{1s}} = \frac{1}{1 - e^{-2}} \left(\frac{\frac{1}{e^{-2}}}{\frac{1}{e^{-2}}} \right) = \frac{\frac{1}{e^{-2}}}{\frac{1 - e^{-2}}{e^{-2}}} = \frac{e^2}{\frac{1}{e^{-2}} - \frac{e^{-2}}{e^{-2}}} = \frac{e^2}{e^2 - 1} \quad \text{ตอบ}$$

คำถามระหว่างบทเรียน

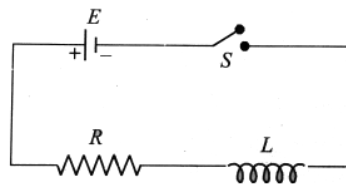
1) เมื่อสวิตช์ไปที่หมายเลข 1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะเป็นอย่างไร



2) เมื่อสวิตช์อยู่ที่หมายเลข 1 เป็นเวลานาน จากนั้นสวิตช์มาที่หมายเลข 2 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะเป็นอย่างไร

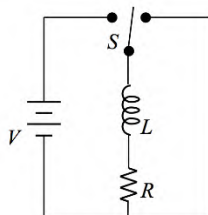
๓) เมื่อสวิตช์ปิดวงจร

- ก) กราฟของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำจะมีลักษณะอย่างไร
- ข) กราฟของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะมีลักษณะอย่างไร
- ค) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่าเท่าไรขณะสวิตช์ ๔ ปิดวงจร (๐)



4) เมื่อสวิตช์ไปทางซ้าย จงหากระแสไฟฟ้าในวงจรที่เวลาดังนี้

- ก) ทันทีทันใดเมื่อสวิตช์
- ข) เมื่อเวลาผ่านไปนาน



5) เมื่อสวิตช์ปิดวงจร จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานหรือไม่ เพราะอะไร

