



หลักการและการประยุกต์ใช้งาน ดีซีไดรฟ์



ศิวะ หงษ์นภา

หลักการและการประยุกต์ใช้งาน

ตีสไตร์

โดย ศิวะ หงษ์นภา

หลักการและการประยุกต์ใช้งาน ตีสไตร์

โดย ศิวะ หงษ์นภา

สงวนลิขสิทธิ์ โดย ศิวะ หงษ์นภา

ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ

นอกจากจะได้รับอนุญาตจากผู้เขียนเป็นลายลักษณ์อักษร

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

ศิวะ หงษ์นภา

หลักการและการประยุกต์ใช้งานตีสไตร์. - กรุงเทพฯ : บริษัท กู๊ดวิลล์ไดเรคชั่น จำกัด, 2547.

262 หน้า

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. 2. เครื่องจักรกลไฟฟ้า - - กระแสตรง. I. ชื่อเรื่อง. 621.462

ISBN 974-92443-5-4

พิมพ์ที่ บริษัท กู๊ดวิลล์ไดเรคชั่น จำกัด

63 ซอยอินทราพระ 8 ถนนสุทธิสาร พญาไท กทม. 10400

โทร. 0-2279-6737 แฟกซ์. 0-2279-9753

คำนำ

ผู้เขียนเชื่อว่าหลายท่านที่จบมาทำงานใหม่ๆ คงจะได้ยินเพื่อนๆ ที่ทำงานอยู่ด้วยกัน มักจะพูดกันบ่อยๆ ว่า สิ่งที่เรียนไม่ตรงกับสิ่งที่เจอขณะทำงาน หลายคนถึงกับบอกว่าต้องมาเรียนรู้เอาเองใหม่ทั้งหมด ครั้นถ้าลองถามกลับไปว่า สมัยเรียนเขาเรียนรู้เรื่องหรือเปล่า ส่วนหนึ่งจะตอบว่าเรียนไม่รู้เรื่อง ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งตอบว่าเรียนรู้เรื่องแต่ลืมไปแล้ว เมื่อถามต่อว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น เป็นจำนวนมากของคำตอบที่ได้กลับมาคือ ตอนเรียนรู้รู้สึกว่าไม่น่าสนใจ เพราะไม่ทราบว่าจะเรียนแล้วจะนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างไร ทำให้ขาดแรงจูงใจที่จะตั้งใจเรียน เมื่อไม่ตั้งใจเรียนจึงเรียนไม่รู้เรื่อง ในขณะที่ผู้ตั้งใจเรียนและเรียนรู้เรื่องส่วนหนึ่งก็ทำไปเพราะอยากได้เกรดดีๆ แต่เมื่อสอบเสร็จแล้วได้เกรดดีๆ ตามที่ตั้งใจแล้ว ก็คืนอาจารย์เสียทั้งหมด เพราะมองไม่เห็นประโยชน์ของสิ่งที่ได้เรียนมานอกจากทำให้ได้เกรดดีๆ จึงขาดแรงจูงใจที่จะทำให้เรื่องที่เรียนมาฝังอยู่ในสมอง และไม่สามารถเชื่อมโยงระหว่างสิ่งที่เรียนกับสิ่งที่มีอยู่จริงได้ ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงนำไปสู่ปัญหาในการทำงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากปัญหาในเรื่องของการขาดแรงจูงใจ และไม่มีค่านาสนใจที่จะศึกษาจนนำไปสู่ความไม่รู้ เมื่อเข้าสู่การทำงาน ปัญหาใหญ่อีกปัญหาคือปัญหาคือปัญหาเรื่องความสามารถของผู้เรียนในการบูรณาการความรู้หรือการนำเอาความรู้จากหลายสาขามาผสมกันจนเป็นหนึ่งเดียว เพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาที่มีอยู่หลากหลายรูปแบบ ปัญหานี้เป็นปัญหาลำคัญ เพราะหลักสูตรที่สถานศึกษาจัดให้เกือบทั้งหมดจะเน้นการศึกษาแบบแยกแยะเอกเทศ โจทย์ปัญหาที่เจอก็จะเน้นการฝึกความเชี่ยวชาญในแต่ละสาขานั้น แต่ในการทำงานจริง ปัญหาหนึ่งปัญหาอาจประกอบไปด้วยประเด็นปัญหาของหลากหลายวิชารวมกัน ผู้ที่จะมองปัญหาออกจำเป็นต้องเชี่ยวชาญในหลายๆ วิชาจึงมีความสามารถแยกปัญหาออกเป็นส่วนๆ ได้ และวิเคราะห์ได้ว่า แต่ละส่วนของปัญหาเป็นประเด็นปัญหาของสาขาวิชาใด เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเป็นธรรมดาที่หลายคนที่จะบ่นว่าสิ่งที่เจอในขณะที่ทำงานไม่มีในวิชาเรียน ซึ่งแท้จริงแล้วไม่ใช่แต่เป็นเพราะผู้เรียนส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นผู้เชี่ยวชาญในหลากหลายวิชามากพอ ทำให้ไม่สามารถนำเอาความเชี่ยวชาญนั้นมาบูรณาการร่วมกันในการแยกแยะประเด็นปัญหาได้ ซึ่งถ้าได้ส่วนถึงสาเหตุของปัญหาที่สำคัญก็มักจะได้อำตอบเช่นเดิมคือ ในสมัยเรียนผู้เรียนมักขาดแรงดึงดูดใจที่จะเรียนรู้ เมื่อเป็นเช่นนี้ คนส่วนใหญ่จึงเสียโอกาสสำคัญในการฝึกความเชี่ยวชาญในช่วงของการเรียน และนำไปสู่การขาดบูรณาการ

ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้น หนังสือเล่มนี้จึงได้ถือกำเนิดขึ้นภายใต้แนวคิดที่ว่า เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้จะต้องมีส่วนในการสร้างความกระตือรือร้นให้กับผู้เรียน ได้มีส่วนช่วยให้ผู้เรียนรู้สึกสนุกกับสิ่งที่กำลังได้ศึกษา และได้มีส่วนให้ผู้เรียนได้รู้ว่าเขาจะได้ประโยชน์อะไรจากการศึกษา รวมถึงต้องเป็นหนังสือเพื่อการบูรณาการที่จะทำให้ผู้เรียนสามารถนำเอาความรู้จากหลายวิชามาผสมกันให้กลมกลืน

สำหรับในส่วนของผู้ที่ทำงานแล้ว หนังสือเล่มนี้มุ่งที่จะเสริมในส่วนที่ขาดหายเนื่องจากการเสียโอกาสฝึกฝนเมื่อครั้งเรียนหนังสือ และสร้างฐานความรู้ที่แข็งแกร่งให้ใหม่ เพื่อเป็นฐานของความคิด

อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย และการพัฒนาความสามารถในการพึ่งตนเอง ซึ่งจะยังประโยชน์ทั้งต่อตนเอง ต่อองค์กร และต่อประเทศชาติ

เพื่อบรรลุดังกล่าว หนังสือเล่มนี้จึงเป็นหนังสือที่มีรูปภาพที่เน้นความสวยงามเป็นจำนวนมากในการประกอบคำบรรยาย ทั้งนี้เพื่อสร้างความน่าสนใจและทำให้ผู้อ่านได้มองเห็นภาพการทำงานที่ชัดเจนขึ้น ในส่วนของการบรรยาย หนังสือเล่มนี้จะเน้นการบรรยายเชิงพรรณนาแทนการบรรยายด้วยคณิตศาสตร์ ทั้งนี้เนื่องจากตระหนักดีว่า ผู้ที่จบการศึกษาไปแล้วหลายคน ได้ฝากวิชาคณิตศาสตร์ไว้กับอาจารย์ผู้สอนเสียเป็นส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ทางวิชาการ ผู้เขียนจึงได้เสริมส่วนที่เป็นคณิตศาสตร์ไว้ในภาคผนวกสำหรับผู้สนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งนักศึกษาที่กำลังศึกษาในเรื่องนี้ แต่สำหรับผู้ที่ไม่สนใจคณิตศาสตร์ก็สามารถละเลยไปไม่อ่านได้โดยไม่เสียประเด็นสำคัญแต่อย่างใด และท้ายสุด เพื่อให้ได้ชื่อว่าเป็นหนังสือเพื่อการบูรณาการ ผู้เขียนจึงได้รวมเอาเนื้อหาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ดีซีไดรฟ์ มาไว้รวมกัน ไม่ว่าจะเป็นความรู้ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, อิเลคทรอนิกส์กำลัง, ระบบควบคุม รวมถึงกลศาสตร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญมาก แต่มักไม่มีการกล่าวถึงในหนังสือที่เกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์ และเพื่อให้เป็นหนังสือเพื่อการบูรณาการอย่างเต็มภาคภูมิการเขียนบรรยายจึงมีลักษณะของการบรรยายเชื่อมโยงความรู้ของแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน เพื่อให้ความรู้ทั้งหมดผสมกลมกลืนกันเป็นหนึ่งเดียว อันจะทำให้ผู้อ่านสามารถมองเห็นการทำงานร่วมกันของแต่ละส่วนได้อย่างเป็นระบบโดยรวม

ในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนต้องขอขอบคุณผู้มีพระคุณหลายท่านที่ช่วยให้การจัดทำหนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณตรีเพชร ลังษ์เจริญ ที่ช่วยตรวจสอบต้นฉบับรวมถึงให้คำแนะนำในการจัดทำเนื้อหาและรูปภาพที่น่าสนใจ ขอขอบคุณบริษัท เบนนิคส์เทคโนโลยี จำกัด ที่ช่วยให้หนังสือเล่มนี้ออกมาสู่สายตาผู้อ่านได้, ขอขอบคุณเพื่อนของผู้เขียนท่านหนึ่งซึ่งเป็นผู้ไม่ประสงค์ออกนาม ท่านผู้นี้ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากในเรื่องการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมกระดาษ ขอขอบคุณทีมงานจัดทำอาร์ตเวิร์คที่อดทนแก้ไขรูปภาพและรูปแบบหนังสือจนได้เป็นรูปเล่มที่สวยงาม ขอขอบคุณผู้ที่เคยเข้ารับการฝึกอบรมจากผู้เขียนทุกท่านที่ทำให้ผู้เขียนได้ข้อมูลด้านการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบขอขอบคุณผู้ที่อยู่เบื้องหลังการทำงานทุกท่านที่ยังไม่ได้เอ่ยนาม ที่มีส่วนในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ และสุดท้ายขอขอบคุณ แม่ ครอบครัว และผู้ใกล้ชิดทุกท่าน ที่ได้ให้กำลังใจจนสามารถทำให้การจัดทำสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คิระ หงษ์นภา

ข้อตกลงทางสัญลักษณ์

f	ความถี่ (Hz)
I	กระแสไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย (Average dc current) กระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นค่า rms (rms current)
i	กระแสขณะใดๆ (Instantaneous current)
J	โมเมนต์ของความเฉื่อย (Moment of inertia)
k	ค่าคงที่ (Constant value)
L	ความเหนี่ยวนำ (Inductance)
n	ความเร็ว (รอบต่อนาที, rpm) อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ ต่อขดลวดด้านปฐมภูมิของ หม้อแปลงไฟฟ้า หรือของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Turn ratio)
P	กำลังงาน (Power) จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Number of poles)
Q	กำลังรีแอคทีฟ (Reactive power)
R	ความต้านทาน (Resistance)
s	สลิปต่อหนึ่งหน่วย (Per unit slip) ตัวกระทำลาปลาซ (Laplace operator)
T	คาบเวลา (Time period) อุณหภูมิ (Temperature) แรงบิด (Torque)
V	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย (Average dc voltage) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นค่า rms (rms voltage) ความเร็วในโดเมนของความถี่ (Velocity in frequency domain)
v	แรงดันขณะใดๆ (Instantaneous voltage)
v	ความเร็ว (Velocity , m/s)
W	พลังงาน (Energy)

X	รีแอคแตนซ์ (Reactance)
α	มุมจุดชนวน (Firing angle)
β	มุมแอดวานซ์ (Advance angle)
γ	มุมหยุดการนำกระแส (Turn-off angle)
δ	มุมกำลังของเครื่องจักรกลซิงโครนัส (Power angle of synchronous machine), อัตราส่วนวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle ratio)
θ	มุมระหว่างตัวแปรใดๆ (Angle)
μ	มุมเหลื่อม (Overlap angle)
τ	ค่าคงตัวเวลา (Time constant)
ϕ	มุมระหว่างแรงดันกับกระแส (Angle between voltage and current) มุมของตัวประกอบกรัดจัด (Displacement factor angle)
Φ	เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง (Flux linkage)
ω	ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity, rad/s)

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.0	บทนำ	1
1.1	โครงสร้างและหลักการทำงานเบื้องต้น	3
1.2	พฤติกรรมของการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุม	5
1.3	การควบคุมความเร็วรอบ และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางกล	10
1.4	การควบคุมความเร็วรอบ เมื่อความเร็วของมอเตอร์เกินความเร็วตามพิกัด	14
1.5	ปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์	17
1.6	ขดลวดอินเตอร์โพล	27
1.7	ขดลวดขดเชยสนามแม่เหล็ก	28
1.8	การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	30

บทที่ 2 วงจรภาคกำลัง

2.0	บทนำ	35
2.1	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไม่มีการควบคุมการไหลของพลังงาน	36
2.1.1	คอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสอย่างง่าย	36
2.1.2	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบ บริดจ์	38
2.1.3	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส อย่างง่าย	40
2.1.4	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบบริดจ์	43
2.2	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมการไหลของพลังงานได้สองทิศทาง	50
2.2.1	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสอย่างง่าย	51
2.2.2	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบบริดจ์	52
2.2.3	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส อย่างง่าย	58
2.2.4	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบบริดจ์	62
2.3	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมการไหลของพลังงานได้ทิศทางเดียว	70
2.3.1	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสอย่างง่าย	70

2.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบบริดจ์	72
2.3.2.1 แบบมี freewheeling diode	72
2.3.2.2 แบบไม่มี freewheeling diode โดยใช้ไดโอดแทนไทรสเตอร์ชุดล่าง	75
2.3.2.3 แบบไม่มี freewheeling diode โดยใช้ไดโอดแทนไทรสเตอร์ 1 สาขา	78
2.3.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส อย่างง่าย	81
2.3.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบบริดจ์	81
2.3.4.1 กรณีใช้ไทรสเตอร์ 6 ตัว	81
2.3.4.2 กรณีใช้ไทรสเตอร์เฉพาะบริดจ์ชุดบน	83
2.4 การนำคอนเวอร์เตอร์มาเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับติชมิเตอร์	85
2.5 Dual Converter	91
2.6 การป้องกันไทรสเตอร์	94
2.6.1 dv/dt กับผลกระทบต่อการทำงานของไทรสเตอร์	94
2.6.2 di/dt กับผลกระทบต่อการทำงานของไทรสเตอร์	95
2.7 ผลของตัวเหนี่ยวนำที่มีต่อการทำงานของคอนเวอร์เตอร์	96
2.8 ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์	97
2.9 หม้อแปลงและผลกระทบต่อฮาร์มอนิกส์	103
2.10 คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์	106

ภาคผนวก บทที่ 2

2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบไม่มีการควบคุมการไหลของพลังงาน	109
2.1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสอย่างง่าย	109
2.1.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบบริดจ์	109
2.1.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส อย่างง่าย	110
2.1.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบบริดจ์	110
2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมการไหลของพลังงานได้ 2 ทิศทาง	111
2.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส อย่างง่าย	111
2.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบบริดจ์	111
2.2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสอย่างง่าย	113
2.2.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบบริดจ์	113
2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบควบคุมการไหลของพลังงานได้ทิศทางเดียว	114

2.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสอย่างง่าย	114
2.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบบริดจ์	114
2.3.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส อย่างง่าย	115
2.3.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบบริดจ์	115
2.4 ผลของตัวเหนี่ยวนำต่อการทำงานของคอนเวอร์เตอร์	117
2.5 ตัวอย่างวงจรจุดชนวนคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบบริดจ์	119

บทที่ 3 วงจรภาคควบคุม

3.0 บทนำ	121
3.1 หลักการพื้นฐานของระบบควบคุม	122
3.2 ตัวควบคุมในระบบเชิงเส้น	125
3.2.1 พฤติกรรมการควบคุมแบบ P	125
3.2.2 พฤติกรรมการควบคุมแบบ I	131
3.2.3 พฤติกรรมการควบคุมแบบ PI	135
3.3 ระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์	138
3.4 การควบคุมความเร็วรอบโดยการปรับค่ากระแสที่จ่ายให้สนามแม่เหล็กหลัก	144

ภาคผนวกบทที่ 3

3.1 การแปลงลาปลาซ	152
3.2 ระบบทางกลเชิงเส้น	156
3.3 ระบบทางกลเชิงมุม	160
3.4 ตัวควบคุมแบบ P	164
3.5 ตัวควบคุมแบบ I	173
3.6 ตัวควบคุมแบบ PI	185
3.7 ดีไซน์มอเตอร์และโหลดทางกล	189

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งาน

4.0 บทนำ	197
4.1 การประยุกต์ใช้งานดีซีไดรฟ์ในอุตสาหกรรมพลาสติก	197
4.2 การประยุกต์ใช้งานดีซีไดรฟ์ในการควบคุมแรงบิด	201
4.3 การประยุกต์ใช้งานดีซีไดรฟ์ในอุตสาหกรรมเหล็ก โลหะ และลวด	207
4.3.1 ขบวนการผลิตแบบ Rolling	207
4.3.2 ขบวนการผลิตแบบขึ้นรูป หรือ Forming	210

4.3.3 ขบวนการผลิตแบบการดึงหรือ Drawing	211
4.4 การใช้ดีซีมอเตอร์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปช่วยกันขับโหลด	214
4.4.1 การควบคุมการแบ่งโหลดโดยการควบคุมกระแสอาร์เมเจอร์	214
4.4.2 การควบคุมการแบ่งโหลดโดยการควบคุมกระแสฟิลด์	216
4.5 การประยุกต์ใช้งานดีซีไดรฟ์ในอุตสาหกรรมกระดาษ	219
4.5.1 Sectional Drives	219
4.5.2 Slitter Rewinder	231

บทที่ 5 การเลือกขนาดดีซีมอเตอร์และไดรฟ์

5.0 บทนำ	237
5.1 การเลือกมอเตอร์ใหม่	237
5.2 การเลือกมอเตอร์ทดแทนมอเตอร์เดิม	241
5.3 ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการกำหนดขนาดของมอเตอร์	247
5.3.1 ผลเนื่องจากความร้อน	247
5.3.2 ผลเนื่องมาจากปัจจัยทางกล	253
5.4 การเลือกขนาดดีซีไดรฟ์	256
5.4.1 การเลือกขนาดไดรฟ์ในสถานะการณ์ไม่ต้องรับโอเวอร์โหลด	257
5.4.2 การเลือกขนาดไดรฟ์ในสถานะการณ์ที่ต้องรับโอเวอร์โหลด	259

บรรณานุกรม

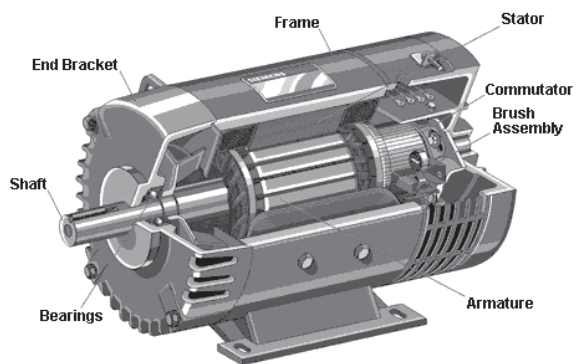
บรรณานุกรมภาพ

บทที่ 1

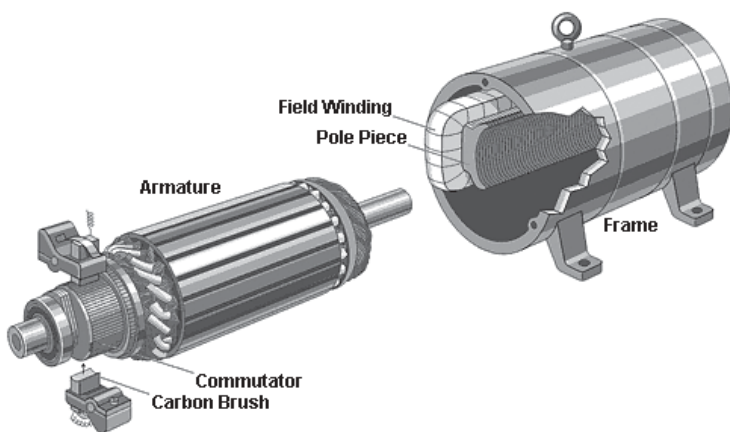
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.0 บทนำ

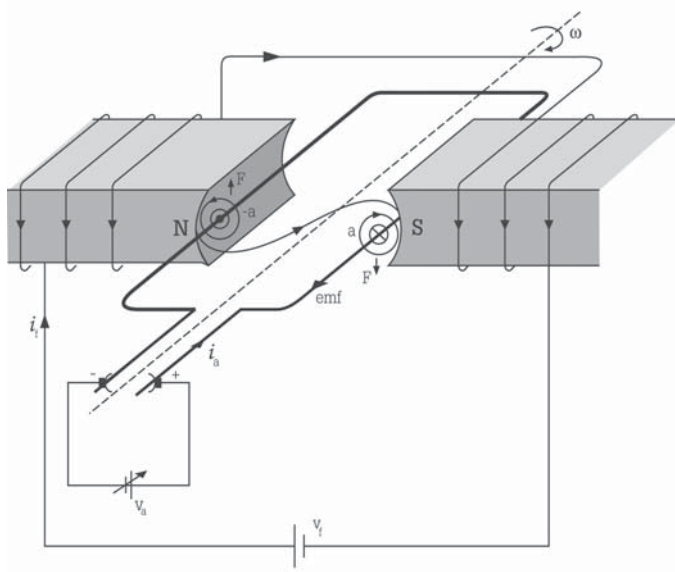
เมื่อกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือที่คนในวงการช่างมักเรียกทับศัพท์ว่าดีซีมอเตอร์ ผู้เขียนเชื่อว่าวิศวกรหรือช่างเทคนิคที่ทำงานคลุกคลีอยู่กับมอเตอร์ประเภทนี้คงคุ้นเคยดี และพอนึกภาพออกว่า มอเตอร์ประเภทนี้ทำงานอย่างไร แต่เชื่อหรือไม่ว่าสิ่งที่ผู้เขียนได้รับทราบและสังเกตเห็นจากวิศวกรและช่างเทคนิคที่เคยเข้ารับการฝึกอบรมเกี่ยวกับดีซีไดรฟ์จากผู้เขียนนั้น พบว่าส่วนใหญ่จะเข้าใจว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานอย่างไร แต่ความเข้าใจนั้นมักจะจำกัดอยู่แต่ในสภาวะที่มอเตอร์ไม่มีไดนามิก กล่าวคือ เมื่อหมุนด้วยความเร็วเท่าใดก็เท่านั้นหรือรับโหลดอยู่เท่าใดก็เป็นเท่านั้น ไม่เปลี่ยนแปลง แต่พอเริ่มกล่าวถึงพฤติกรรมของมอเตอร์กระแสตรงในสภาวะไดนามิก กล่าวคือช่วงที่กำลังเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือกำลังเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดแล้ว พบว่าส่วนมากหรือเกือบจะทั้งหมดยังไม่เข้าใจในพฤติกรรมของมอเตอร์ขณะอยู่ในสภาวะไดนามิกอย่างแท้จริง เพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ในทุกๆด้านที่ผู้ที่เข้ามาศึกษาเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพึงจะต้องรับรู้ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมในทุกๆ ด้านของระบบขับเคลื่อนทั้งระบบ ผู้เขียนจึงเห็นควรที่จะกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไว้ในหนังสือเล่มนี้ด้วย โดยจะเน้นไปที่พฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในขณะกำลังเกิดสภาวะเปลี่ยนแปลงหรืออยู่ในสภาวะไดนามิกเป็นหลัก เพราะจากประสบการณ์การทำงานของผู้เขียนพบว่าการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อน ส่วนใหญ่จะต้องใช้ความเข้าใจพฤติกรรมของระบบขณะอยู่ในสภาวะไดนามิก จึงจะสามารถอธิบายปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมของโหลดทางกลและมอเตอร์ได้อย่างดี ส่วนเนื้อหาพื้นฐานที่มีอยู่ในหนังสือทั่วไปนั้น หนังสือเล่มนี้ จะขอกกล่าวถึงก็เพียงเพื่อจะเกริ่นนำหรือให้เกิดความเชื่อมโยงต่อเนื่องในเนื้อหา เพื่อนำพาไปสู่ความเข้าใจในเนื้อหาหลักเป็นสำคัญ



รูป 1.1 ก. ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 1.1 ข. ส่วนประกอบภายในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 1.1 ค. โครงสร้างและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.1 โครงสร้างและหลักการทำงานเบื้องต้น

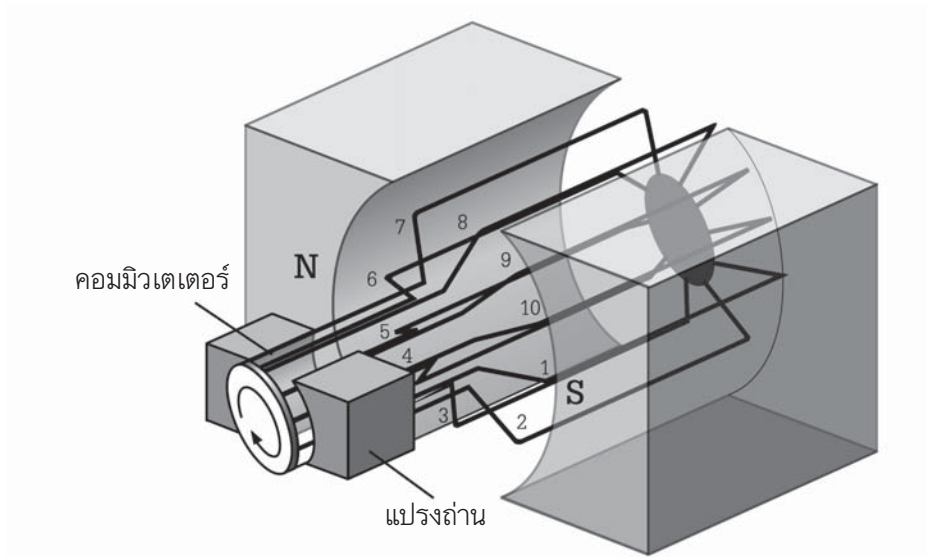
เมื่อกล่าวถึงการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง ผู้เขียนเชื่อว่าภาพที่เกิดขึ้นในสมองของผู้อ่านส่วนใหญ่ คงจะตรงกับที่เกิดขึ้นในสมองของผู้เขียน ซึ่งก็คือภาพที่แสดงได้ดังรูป 1.1 ก. ที่มีโครงสร้างภายในดังรูป 1.1 ข. และ 1.1 ค.

หลักการง่ายๆ ของมอเตอร์กระแสตรง หรือต่อไปอาจใช้คำว่า ดีซีมอเตอร์ ก็คือ จะมีสนามแม่เหล็กอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่บนสเตเตอร์ และส่วนที่อยู่บนอาร์เมเจอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่อยู่บนสเตเตอร์นั้น เกิดจากการจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่าย v_f ทำให้เกิดกระแส i_f ไหลเข้าไปในขดลวด เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือ-ใต้ขึ้นบนสเตเตอร์ และทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก วังผ่านช่องว่างและโรเตอร์จากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้

สนามแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งคือสนามแม่เหล็กที่อยู่บนอาร์เมเจอร์ซึ่งขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กนี้ จะพันอยู่บนโรเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้เป็นสนามแม่เหล็กของเส้นแรงที่วนอยู่รอบตัวนำบนโรเตอร์ จากรูป 1.1 ข. ถ้าเราพิจารณาเฉพาะขดลวดเพียงขดเดียวที่รับไฟจากแปรงถ่าน ผ่านคอมมิวเตเตอร์ และสมมุติให้ขดลวดนั้นพันเพียงรอบเดียว เราจะได้รูปของขดลวดที่วางอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กดังรูป 1.1 ค. จากรูปเนื่องจากกระแส i_a ไหลผ่านแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์เข้าขดลวดทางตัวนำ a และกลับทางตัวนำ $-a$ จึงทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางตามเข็มนาฬิกา a และทิศทางทวนเข็มนาฬิกา $-a$ (โดยใช้กฎมือขวา) เนื่องจากโดยธรรมชาติ เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ตัดกันทำให้เส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหลักบิดตัวอ้อมตัวนำ a และ $-a$ ดังในรูป ผลก็คือทำให้เกิดการผลักกันระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหลักและเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ a , $-a$ ทำให้ขดลวด a , $-a$ บนโรเตอร์ถูกผลักให้หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาตามรูป การหมุนดังกล่าวจะทำให้ตัวนำ $-a$ หมุนมาแทนที่ตัวนำ a และตัวนำ a ก็จะหมุนไปแทนที่ตัวนำ $-a$ ในส่วนของกระแสก็จะกลายเป็นไหลเข้าตัวนำ $-a$ และออกทาง a ทำให้เกิดแรงผลักให้หมุนอย่างต่อเนื่อง

ถ้าเราต้องการให้หมุนกลับทางก็ทำได้โดยจ่ายไฟบวกเข้าทาง $-a$ และลบเข้า a กระแสก็จะไหลกลับทางเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหลักก็จะถูกบิดให้อ้อมในทิศทางตรงกันข้าม การหมุนก็จะเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

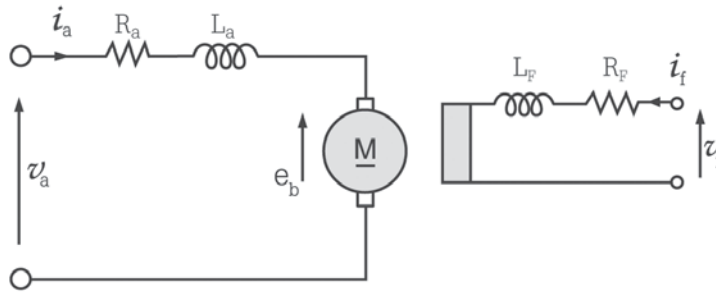
อย่างไรก็ตาม การมีตัวนำเพียงคู่เดียว คือ a กับ $-a$ ทำให้แรงบิดไม่ต่อเนื่องและเกิดการกระเพื่อมสูงในงานจริงจึงต้องเพิ่มตัวนำเข้าไปมากขึ้นเพื่อให้แรงบิดมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากขึ้น ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างโรเตอร์เมื่อเพิ่มตัวนำ

จากรูป ถ้าให้การหมุนเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อ 1 กับ 6 ออกจากแปรงถ่าน 10 กับ 5 ก็จะเข้ามารับแทน แรงผลักรักก็จะเกิดขึ้นบน 10 กับ 5 แทน และเมื่อ 10 กับ 5 หมุนออกจากแปรงถ่าน 9 กับ 4 ก็จะเข้ามารับไฟแทน แรงผลักรักก็จะเกิดกับ 9 และ 4 ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นบนโรเตอร์อย่างต่อเนื่อง

ทั้งหมดที่กล่าวมาคือ หลักการทำให้เกิดแรงบิดขึ้นบนโรเตอร์เพื่อนำไปขับโหลดอีกต่อหนึ่ง เราเรียกพฤติกรรมนี้ว่าเป็นพฤติกรรมมอเตอร์ ซึ่งเกิดจากการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลผ่านการผลักรักของพลังงานจากสนามแม่เหล็ก แต่หากพิจารณาให้ลึกลงไป ในขณะที่โรเตอร์กำลังหมุนอยู่นั้น ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ถูกใช้เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กมาผลักรักกับสนามแม่เหล็กหลักนั้นก็จะหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กหลักไปในตัวด้วย การที่ขดลวดตัวนำอาร์เมเจอร์หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กหลักนี้ ก็ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในตัวหนึ่งมีทิศทางต้านการไหลของกระแส i_a ซึ่งเป็นกระแสตัวที่ทำให้เกิดการหมุนขึ้น (เป็นไปตามกฎธรรมชาติที่ว่าเมื่อ i_a ทำให้เกิดการหมุน ก็ต้องมีแรงดันมาต้านการไหลของ i_a เพื่อสร้างความสมดุล) เราเรียกแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในทิศต้านกลับนี้ว่า back emf ดังแสดงในรูป 1.1 ค. ซึ่งเป็นพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน และสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ รูป 1.1 ค. ได้ดังรูป 1.3



รูป 1.3 วงจรสมมูลของดีซีมอเตอร์

- เมื่อ R_a คือ ความต้านทานในขดลวดอาร์เมเจอร์
 L_a คือ ความเหนี่ยวนำในขดลวดอาร์เมเจอร์
 e_b คือ back emf
 R_f คือ ความต้านทานในขดลวดสนามแม่เหล็กหลัก
 L_f คือ ความเหนี่ยวนำในขดลวดสนามแม่เหล็กหลัก

และสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในวงจรได้ดังนี้

$$\text{วงจรอาร์เมเจอร์} \quad : \quad v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (1.1)$$

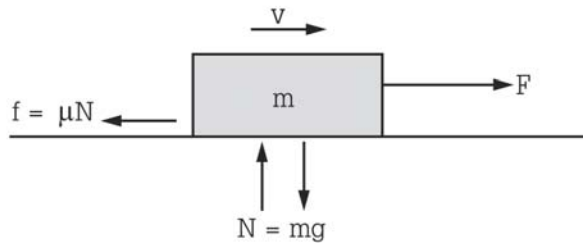
$$\text{วงจรสร้างแม่เหล็กหลัก} \quad : \quad v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (1.2)$$

1.2 พฤติกรรมของการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุม

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการอธิบายให้ทราบว่ามอเตอร์หมุนได้อย่างไร ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายเพิ่มเติมว่า แล้วจะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อย่างไร และในระหว่างเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ มีค่าตัวแปรใดเปลี่ยนแปลงบ้าง และเปลี่ยนอย่างไร เมื่อการเปลี่ยนแปลงสิ้นสุดลงค่าของตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจะไปสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลง ณ จุดไหน ซึ่งเนื้อหาต่างๆ ที่กล่าวมานี้จะไปสัมพันธ์กับเนื้อหาในข้อถัดไปที่จะกล่าวถึงการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางกล กล่าวคือจะพิจารณาว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางกล ตัวแปรต่างๆ ในมอเตอร์จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นอย่างไร และเมื่อช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงสิ้นสุดลงตัวแปรต่างๆ เหล่านี้จะหยุดการเปลี่ยนแปลง ณ จุดใด

อย่างไรก็ตาม การที่จะเข้าใจพฤติกรรมทั้งหมดดังกล่าวข้างต้น จะต้องทำความเข้าใจในพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ทั้งแบบเชิงเส้นและเชิงมุมหรือการเคลื่อนที่แบบหมุนของวัตถุก่อนทั้งสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (static) และสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลง (dynamic) ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบดังกล่าวข้างต้น แต่เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จะขอเริ่มอธิบายด้วยการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่เป็นที่คุ้นเคยก่อน

สมมุติว่ามีวัตถุมวล m วางอยู่บนพื้นราบดังรูป 1.4 ถ้าเราต้องการเคลื่อนวัตถุนั้นไปในแนวเส้นตรงหรือแนวเชิงเส้นด้วยความเร็วคงที่ กฎข้อที่ 1 ของนิวตันบอกเราว่า จะต้องให้แรงกริยา F เท่ากับแรงปฏิกิริยา f โดยที่ $f = \mu N$ วัตถุมวล m จึงจะคงสภาวะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในกรณีนี้เราอาจจะกล่าวได้ว่า ถ้าต้องการให้มวล m เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อมวล m จะต้องเท่ากับศูนย์



รูป 1.4 แสดงแรงต่างๆ ที่กระทำต่อวัตถุ ขณะเกิดการเคลื่อนที่

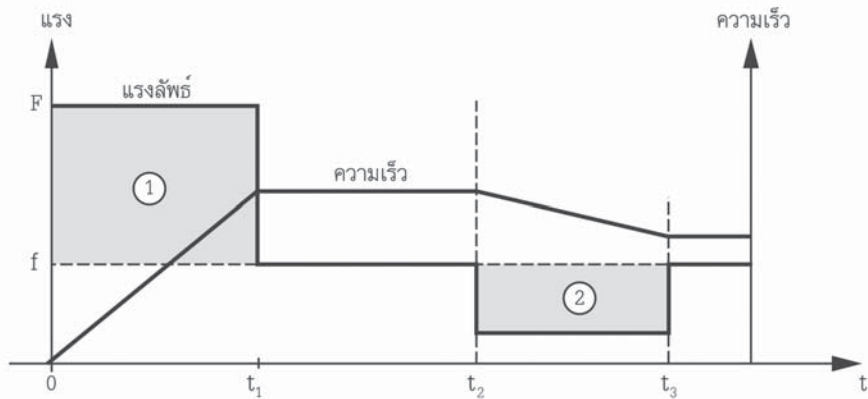
สมมุติว่าต่อมาเราต้องการให้มวล m เคลื่อนที่เร็วขึ้น กล่าวคือมีความเร่งในการเคลื่อนที่ นิวตันบอกเราว่าถ้าต้องการให้มวล m มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว แรงลัพธ์ที่กระทำต่อมวล m จะต้องไม่เท่ากับ 0 ซึ่งเขียนเป็นสมการตามกฎข้อที่สองของนิวตันได้ว่า

$$\Sigma F = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (1.3)$$

เมื่อ a คือ ความเร่งหรือการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในช่วงเวลาที่กำหนด (dv/dt)

ΣF คือผลรวมของแนวแรงในทางเวกเตอร์

จากรูปที่ 1.4 ถ้าเราต้องการให้มวล m เคลื่อนไปทางขวาด้วยความเร็วมากขึ้นเราจะต้องทำให้ F มากกว่า f เพื่อให้ ΣF ไม่เท่ากับศูนย์และเป็นบวก จึงจะเกิด a ในทิศของการเคลื่อนที่ และเป็นที่เหตุให้ความเร็วของมวล m เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง F ลดลงมากเท่ากับ f ระบบจึงหยุดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และในทางตรงกันข้าม ถ้า ΣF เป็นลบ a จะมีทิศทางกลับกันทำให้วัตถุมวล m ลดความเร็วลงดังแสดงในรูปที่ 1.5

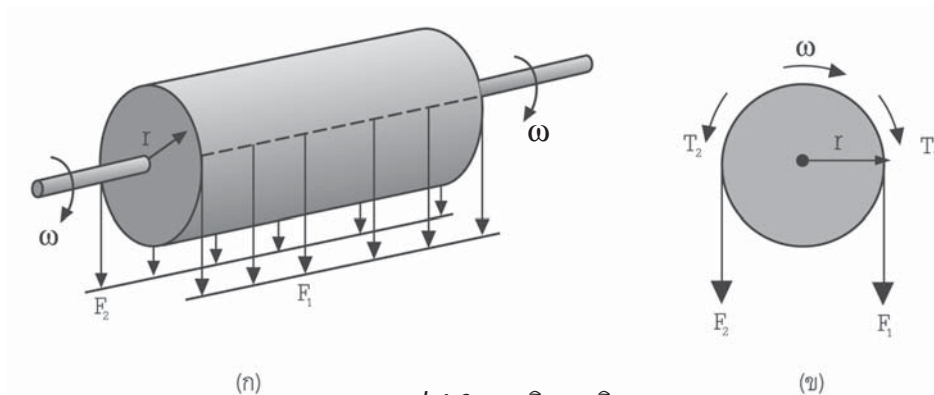


รูปที่ 1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเร็ว

จากรูป $t = 0$ ถึง $t = t_1$ คือช่วงที่ $F - f$ เท่ากับค่าคงที่และเป็นบวก ทำให้ a ซึ่งเท่ากับ $(F - f)/m$ มีค่าคงที่ซึ่งหมายความว่า ความเร็วเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ (dv/dt เท่ากับค่าคงที่) แต่หลังจาก t_1 คือช่วงที่ $t_1 < t < t_2$ แรง F ลดลงมามีค่าเท่ากับแรง f พอดีทำให้ a เป็น 0 วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และในช่วงที่ $t_2 < t < t_3$, F น้อยกว่า f ทำให้ a เป็นลบ วัตถุมวล m จึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลดลงจนกระทั่งถึง t_3 ที่ F กลับมามีค่าเท่ากับ f ใหม่ ขนาดของความเร็วก็จะคงอยู่ ณ ระดับสุดท้ายก่อนที่ F จะกลับมาเท่ากับ f ใหม่

ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นคือทฤษฎีการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นที่ไม่อาจจะเป็นวิศวกรรมหรือช่างเทคนิค ล้วนแล้วแต่คุ้นเคยกับทฤษฎีนี้เป็นอย่างดี แต่ทฤษฎีการเคลื่อนที่เชิงมุมที่พิจารณากันต่อไปนี้ แม้จะมีสอนในหลักสูตรเหมือนกับทฤษฎีการเคลื่อนที่เชิงเส้น แต่พบว่าช่างเทคนิคส่วนใหญ่ไม่มีใครที่จะเข้าใจในพฤติกรรมของการเคลื่อนที่เชิงมุมเท่าใดนัก ในการอธิบายการเคลื่อนที่เชิงมุมนับจากนี้ไป ผู้เขียนจึงพยายามที่จะเปรียบเทียบเข้ากับการเคลื่อนที่เชิงเส้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น

พิจารณาวัตถุทรงกระบอกรัศมี r มีแรง F_1 และ F_2 กระทำอยู่ตรงกันข้ามดังแสดงในรูป 1.6 ก. และเขียนเป็นภาพตัดได้ดังรูป 1.6 ข.



รูป 1.6 การเกิดแรงบิด

โดยปกติ ถ้ามีแรง F มากระทำกับมวล m ที่มีรัศมีตั้งฉากกับแนวแรงเท่ากับ r แล้วจะทำให้เกิดแรงบิด $T = F \times r$ ขึ้นและทำให้วัตถุนั้นหมุนได้ จะเห็นว่าสิ่งที่ทำให้วัตถุทรงกระบอกนี้หมุนได้ไม่ใช่ F เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับ r ด้วย เพราะถ้า $r = 0$ ก็จะไม่เกิดการหมุนขึ้น วัตถุจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปในแนวเชิงเส้นแต่อย่างเดียว เราจึงอาจสรุปได้ว่า สิ่งที่ทำให้วัตถุหมุนไม่ใช่ F แต่เป็น $F \times r$ หรือแรงบิด จากรูป 1.6 ถ้ามีเพียงแรงใดแรงหนึ่ง วัตถุจะเกิดการหมุนขึ้น เช่นถ้าสมมุติว่ามี F_1 แต่เพียงอย่างเดียววัตถุก็จะหมุนขวา และในทางตรงกันข้าม ถ้ามี F_2 อย่างเดียววัตถุก็จะหมุนซ้าย แต่ถ้ามีทั้ง F_1 และ F_2 จะเกิดอะไรขึ้น ในการเคลื่อนที่เชิงเส้นจากรูป 1.4 ถ้า $F = f$ วัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อ F คือสิ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และ f คือสิ่งที่ต้านการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกัน ในกรณีของการเคลื่อนที่เชิงมุม วัตถุจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ก็ต่อเมื่อสิ่งที่ทำให้เกิดการหมุนคือ T_1 มีขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางตรงกันข้ามกับสิ่งที่ต้านการหมุนคือ T_2 หรือ $\Sigma T = 0$ และนี่คือกฎข้อแรกของการเคลื่อนที่เชิงมุม

แต่เมื่อใดก็ตามที่ T_1 ไม่เท่ากับ T_2 เช่น F_1 มากกว่า F_2 หรือรัศมีแนวแรงของ F_1 คือ r_1 มากกว่ารัศมีแนวแรงของ F_2 คือ r_2 (เช่น F_2 อาจไม่ได้กระทำที่ขอบแต่กระทำในตำแหน่งใกล้ศูนย์กลางมากกว่า) ก็จะทำให้เกิดความเร่งขึ้นดังสมการ

$$\begin{aligned}\Sigma T &= T_1 - T_2 = J \alpha \\ &= J \frac{d\omega}{dt}\end{aligned}\quad (1.4)$$

เมื่อ α คือ ความเร่งเชิงมุม มีหน่วยเป็น rad/s^2

ω คือ ความเร็วเชิงมุมมีหน่วยเป็น rad/s

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) มีหน่วยเป็น kg.m^2

สมมุติว่าเดิม วัตถุในรูป 1.6 กำลังหมุนด้วยความเร็วคงที่ ω ไปในทิศตามเข็มนาฬิกา เมื่อใดก็ตามที่ T_1 มากกว่า T_2 ก็จะทำให้เกิดแรงบิดลัพธ์ที่ทำให้วัตถุก่อนหน้านี้หมุนด้วยความเร็วที่มากขึ้นเรื่อยๆ ในกรณีนี้ค่า α หรือค่า $d\omega / dt$ จะมีค่าเป็นบวก กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเป็นไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้า T_1 น้อยกว่า T_2 วัตถุก่อนหน้านี้ก็จะหมุนด้วยความเร็วลดลงในกรณีนี้ ค่า α หรือค่า $d\omega / dt$ ก็จะเป็นลบ

สมการที่ 1.4 ซึ่งเป็นสมการของการเคลื่อนที่เชิงมุมนี้ หากสังเกตให้ดีก็จะเทียบเคียงได้กับสมการที่ 1.3 ซึ่งเป็นสมการของการเคลื่อนที่เชิงเส้น เพราะถ้า F คือสิ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในเชิงเส้น, T ก็คือสิ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในเชิงมุม ถ้า a คือความเร่งในเชิงเส้น, α ก็คือความเร่งในเชิงมุม และถ้า m คือ มวลของวัตถุที่เคลื่อนที่ในเชิงเส้นเราก็จะกล่าวได้ว่า J คือมวลของวัตถุที่เคลื่อนที่ในเชิงมุม หรือกล่าวง่ายๆ ว่า m คือมวลเชิงเส้น ส่วน J คือมวลเชิงมุม

จากประสบการณ์ที่ผ่านมา ผู้เขียนพบว่า มีผู้ที่เข้าใจในคุณสมบัติของ J ค่อนข้างน้อย และมักมองภาพไม่ออกว่า J คืออะไร ไม่เหมือนกับ m ที่ทุกคนจะเข้าใจดีว่า m ก็คือมวล ทั้งที่แท้จริงแล้ว ทั้ง m และ J ต่างก็มีพฤติกรรมเดียวกันในระบบการเคลื่อนที่ของตัวเอง ผู้เขียนเข้าใจว่าเป็นเช่นนั้น เพราะ m มีหน่วยเป็น kg ซึ่งทุกคนคุ้นเคยกันดี เพราะสามารถเอาวัตถุใดๆ ไปวางบนตราชั่ง แล้วแสดงผลการวัดออกมาเป็นหน่วย kg ได้ แต่ J ไม่ใช่ เพราะ J มีหน่วยเป็น $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ แล้ว J คืออะไร

ผู้เขียนพอจะตอบคำถามนี้ได้ว่าสาเหตุหลักที่ผู้อ่านส่วนใหญ่ไม่เข้าใจคุณสมบัติของ J ก็เพราะผู้อ่านไม่ได้มองคุณสมบัติของ m ให้ลึกซึ้งลงไปมากกว่าสเกลเป็น kg ที่แสดงอยู่บนตราชั่ง เพราะแท้จริงแล้วการเอาวัตถุก่อนใดก่อนหนึ่งไปวางบนตราชั่งแล้วอ่านสเกลได้เป็น kg นั้น ความหมายไม่ได้มีเพียงแค่ว่าวัตถุนั้นหนักกี่ kg ตามภาษาชาวบ้าน แต่หมายความลึกลงไปว่าวัตถุก่อนนั้นคุณสมบัติในการ **ด้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่** มากน้อยเพียงใด ที่ผู้เขียนเน้นว่าด้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ เพราะว่าคุณสมบัติของมวล m คือการด้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ แต่ไม่ได้ด้านการเคลื่อนที่เหมือนแรงเสียดทาน อันนี้พอที่จะอธิบายเป็นภาษาง่ายๆ ได้ว่า ถ้าสมมุติว่ามีวัตถุมวล m ก้อนหนึ่ง แล้วเราพยายามที่จะผลักให้วัตถุก่อนนั้นเคลื่อนที่ คุณสมบัติของมวล m ก็คือทำให้วัตถุนั้นไม่ค่อยอยากจะเคลื่อนที่เท่าใดนัก แต่ครั้นเมื่อเคลื่อนที่ไปแล้ว แล้วเราอยากให้หยุด วัตถุนั้นก็ไม่ค่อยอยากจะหยุด นี่เป็นสาเหตุที่ว่า ทำไมชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งของมวลคือ “ความเฉื่อย” ซึ่งหมายถึงเฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลง แต่หากไปพิจารณาแรงเสียดทาน จะพบว่าเมื่อเราพยายามจะให้วัตถุเคลื่อน แรงเสียดทานจะออกแรงต้านไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ได้ง่าย และเมื่อเคลื่อนที่แล้ว ก็จะต้องออกแรงค่าหนึ่ง อย่างน้อยเท่ากับแรงเสียดทาน วัตถุจึงจะยังคงเคลื่อนที่ต่อไปได้ ซึ่งผิดกับกรณีพิจารณาคุณสมบัติของมวลที่เมื่อวัตถุเคลื่อนที่แล้ว ถ้าไม่มีแรงเสียดทานใดๆ วัตถุก็ยังคงเคลื่อนที่ต่อไปได้ โดยไม่ต้องออกแรงกระทำ นอกจากนี้หากเราต้องการหยุดการเคลื่อนที่ของวัตถุ แรงเสียดทานจะยิ่งช่วยทำให้วัตถุหยุดการเคลื่อนที่เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งตรงนี้ต่างกับมวลอย่างชัดเจน เพราะมวลคือ คุณสมบัติที่ทำให้ วัตถุหยุดการเคลื่อนที่ได้ช้าลง เมื่อเข้าใจความหมาย และพฤติกรรมของมวลแล้ว ก็สามารถที่จะทำความเข้าใจในความหมาย และพฤติกรรมของโมเมนต์ความเฉื่อย J ได้อย่างง่ายๆ ดังนี้

“หากมวล คือคุณสมบัติในการด้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ในเชิงเส้น ก็จะกล่าวได้ว่าโมเมนต์ความเฉื่อย J คือคุณสมบัติในการด้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงมุม”

กล่าวคือ ถ้าเราพยายามที่จะหมุนวัตถุก่อนใดก่อนหนึ่ง คุณสมบัติของ J ก็คือทำให้วัตถุนั้นไม่ค่อยจะหมุนตามที่เรต้องการเท่าใดนัก แต่เมื่อหมุนไปแล้วและต้องการให้หยุดหมุน วัตถุที่มี J มากก็หยุดหมุนได้ยาก

1.3 การควบคุมความเร็วรอบ และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางกล

เมื่อเข้าใจในพฤติกรรมของการเคลื่อนที่แล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในมอเตอร์ ทั้งขณะอยู่ในสภาวะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และกำลังเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือขนาดของโหลด โดยจะเริ่มจากพฤติกรรมของมอเตอร์ ขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ก่อนดังนี้

จากสมการที่ 1.1 และ รูปที่ 1.3 ถ้าไม่คิดผลของ L_a จะได้ว่า

$$i_a = \frac{v_a - e_b}{R_a} \quad (1.5)$$

จากรูปที่ 1.1 ค. จะเห็นว่าแรงผลักดันระหว่างสนามแม่เหล็กหลักกับสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์ จะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหลัก ϕ , กระแสอาร์เมเจอร์ i_a และค่าคงที่เนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพอื่นๆ เช่น จำนวนรอบของขดลวด, ความต้านทานสนามแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ, ความนำแม่เหล็กของแกนเหล็ก ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้จะคงที่ (k) เราจึงเขียนสมการของแรงบิดได้ว่า

$$T = k \phi i_a \quad (1.6)$$

สำหรับ e_b นั้นจะมีค่ามากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหลัก ϕ เพราะถ้า ϕ มาก แรงเคลื่อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำก็มากตาม, ความเร็วรอบ n เพราะถ้าอาร์เมเจอร์หมุนผ่านสนามแม่เหล็กเร็วขึ้น แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำก็จะมากขึ้น, และค่าคงที่เนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพต่างๆ ของมอเตอร์ (k) เราจึงเขียนสมการของ e_b ได้ว่า

$$e_b = k \phi n \quad (1.7)$$

เมื่อนำมารวมกับสมการที่ 1.4 ที่เป็นสมการทางกล จะทำให้ได้กลุ่มสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางไดนามิกของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

$$T_m - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.4)$$

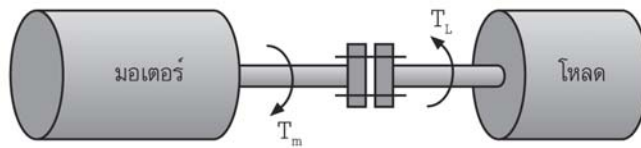
$$i_a = \frac{v_a - e_b}{R_a} \quad (1.5)$$

$$T_m = k \phi i_a \quad (1.6)$$

$$e_b = k \phi n \quad (1.7)$$

เมื่อได้สมการพื้นฐานที่จะวิเคราะห์แล้ว เราจะมาดูต่อกันว่า ถ้าเราเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ 2 ตัว คือ v_a และ T_L จะเกิดอะไรขึ้น

จากรูป 1.1 ค. กำหนดให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ n_0 โดยขับโหลดที่มีแรงบิดต้านเท่ากับ T_{L0} ในสภาวะสมดุลและไม่มี การเปลี่ยนแปลงใดๆ มอเตอร์จะออกแรงบิด $T_{m0} = T_{L0}$ เพื่อให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ดังแสดงในรูป 1.7¹ การที่มอเตอร์ออกแรงบิด T_{m0} นี้ ทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของอาร์เมเจอร์เท่ากับ i_{a0} ซึ่งเกิดจากการป้อนแรงดันอาร์เมเจอร์เท่ากับ v_{a0} ส่วน v_f จะให้คงที่ไว้ก่อนเพื่อให้ i_f ไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพื่อพิจารณาผลทางการเปลี่ยนแปลงเฉพาะส่วนที่เป็นอาร์เมเจอร์เมื่อสนามแม่เหล็กหลักมีค่าคงที่



รูป 1.7 สมดุลของแรงบิด

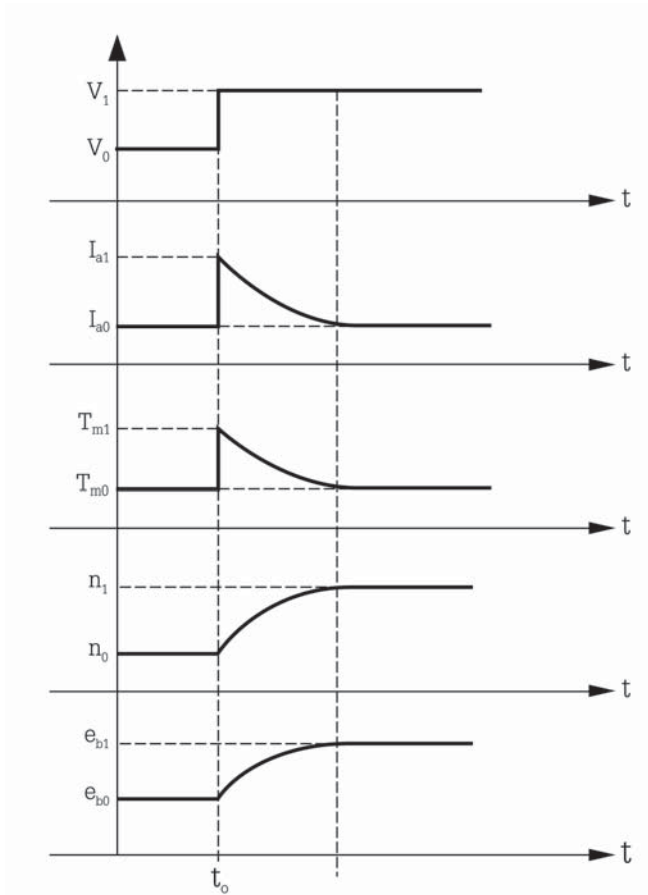
กรณีที่ 1 เปลี่ยนค่า v_a

ถ้าสมมติให้ v_a เพิ่มขึ้น

จากสมการทั้ง 4 สมการข้างต้นจะเห็นว่า เมื่อเพิ่ม v_a จะทำให้ i_a ในสมการที่ 1.5 เพิ่มขึ้น (ขณะนั้น T_m ยังเท่ากับ T_L และความเร็ว $n = n_1$) ส่งผลกระทบบ้างยังสมการที่ 1.6 ทำให้ T_m เพิ่มขึ้น เมื่อ T_m เพิ่มขึ้นทำให้ $T_m > T_L$ (เนื่องจาก T_L ไม่เปลี่ยนแปลง) เกิด $d\omega/dt$ ตามสมการที่ 1.4 ทำให้อัตราการหมุนเร็วมากขึ้น e_b ในสมการที่ 1.7 ก็จะมากขึ้นตาม เมื่อ e_b มากขึ้น i_a ในสมการที่ 1.5 ก็จะเริ่มลดลง แต่ทราบได้ที T_m ยังมากกว่า T_L ก็ยังมี $d\omega/dt$ มอเตอร์จะยังหมุนเร็วมากขึ้น แต่มากขึ้นด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเพราะค่า $d\omega/dt$ ลดลงจากตอนเริ่มต้น เมื่อ n ยังมากขึ้นเรื่อยๆ e_b ในสมการที่ 1.7 ก็จะยังมากขึ้นเรื่อยๆ i_a ในสมการ 1.5 ก็ลดลงเรื่อยๆ ทำให้ T_m ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่ง T_m เท่ากับ T_L มอเตอร์จึงหยุดการเปลี่ยนแปลงเพราะ $d\omega/dt$ เท่ากับศูนย์ และ i_a ก็ลดลงกลับมาเท่ากับค่าที่เริ่มต้น คือ i_{a0} ตรงนี้หลายท่านอาจแปลกใจ แต่ต้องอย่าลืมว่า ตราบใดที่ i_a ยังไม่กลับมาเท่าเดิม T_m ก็จะยังมากกว่า T_{m0} เดิม (ซึ่งเท่ากับ T_{L0}) ทำให้ยังเกิด $d\omega/dt$ ส่งผลให้ n สูงขึ้นไปได้เรื่อยๆ ซึ่ง n จะหยุดเร็วขึ้นก็ต่อเมื่อ T_m ลดกลับลงมากเท่ากับ T_{m0} เดิม ซึ่งหมายถึงว่า i_a ต้องลดลงกลับมาเป็น i_{a0} เหมือนเดิม กราฟ 1.8 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด (ทั้งนี้ไม่คิดผลของ L)

ในทำนองกลับกันถ้า v_a น้อยลง การพิจารณาก็จะเป็นไป ในทำนองเดียวกัน คือ เมื่อ v_a น้อยลง i_a จะน้อยลงทำให้ T_m ลดลงน้อยกว่า T_L ทำให้ $d\omega/dt$ เป็นลบ ซึ่งหมายความว่าความเร็วลดลงเรื่อยๆ ทำให้ e_b ลดลง และ i_a ก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งจุดสุดท้าย i_a จะกลับไปเท่าเดิมในขณะที่มีความเร็วลดลง เราจึงสรุปได้ว่า หากต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วก็จะทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดัน v_a

¹ T_{m0} และ T_{L0} คือ T_1 และ T_2 ในรูป 1.6 ตามลำดับ



รูป 1.8 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอาร์เมเจอร์

กรณีที่ 2 : เปลี่ยนแรงบิดต้านของโหลด T_L

ถ้าสมมติให้ T_L เพิ่มขึ้นจาก T_{L0} เป็น T_{L1} ณ ขณะที่ T_L เพิ่มขึ้น T_m ของมอเตอร์ยังเป็นค่าเดิมอยู่ทำให้ T_m น้อยกว่า T_L จากสมการที่ 1.4 เมื่อ T_m น้อยกว่า T_L ทำให้มอเตอร์ถูกดึงให้ช้าลง ($d\omega/dt$ เป็นลบ) ความเร็วรอบของมอเตอร์ก็ตกลง เมื่อความเร็วรอบตกลง แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ e_b ก็ตกลงตามสมการที่ 1.7 ทำให้ i_a เพิ่มขึ้นตามสมการที่ 1.5² และทำให้ T_m เพิ่มขึ้นตามสมการที่ 1.6 แต่ทราบได้ที่ T_m ยังน้อยกว่า T_L ความเร็วของมอเตอร์ก็ยังลดลงเรื่อยๆ แต่ลดลงด้วยอัตราที่ลดลง³ และ e_b ก็ลดลงเรื่อยๆก็ทำให้ i_a เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และไปเพิ่ม T_m ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง T_m เท่ากับ T_L ความเร็วของมอเตอร์ก็หยุดเปลี่ยนแปลง คือ ไม่ลดลงอีกต่อไป ($d\omega/dt$ เท่ากับศูนย์) ณ จุดสุดท้าย n และ e_b ก็จะลดลงจากเดิม ในขณะที่ i_a และ T_m เพิ่มสูงขึ้นไปตอบรับกับโหลดใหม่โดยมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูป 1.9 ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงผลของ L

² v_a คงที่ แต่ e_b ลดลงทำให้ i_a เพิ่มขึ้น

³ $d\omega/dt$ เป็นลบน้อยลงเนื่องจาก T_m เข้าใกล้ T_L มากขึ้น