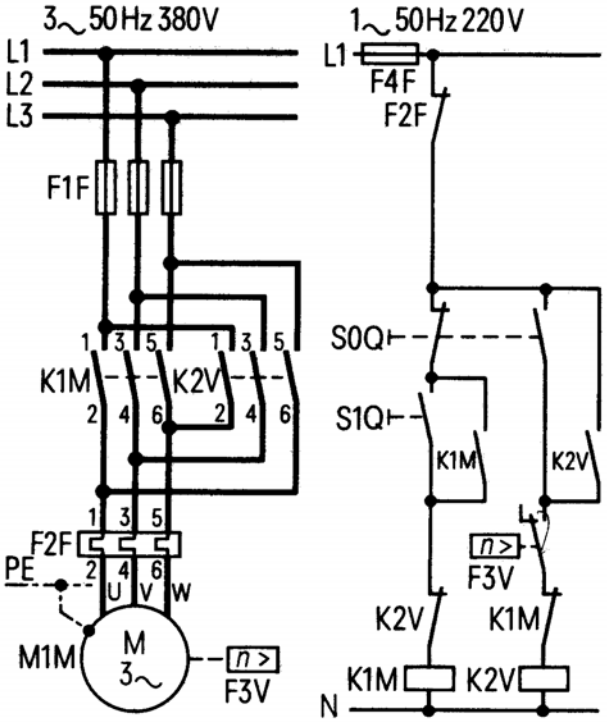
สงวนลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2546 ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ โดย บริษัท ไทนามิก จำกัด ห้ามลอกเลียนแบบไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใด ของบทความฉบับนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ นอกจากจะได้รับอนุญาต เป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเท่านั้น *ยกเว้นเพื่อการศึกษาโดยไม่แสวงหากำไร* (Copyright © 2004)

การเบรกอินดักชั่นมอเตอร์ 3 เฟส ด้วยระบบไฟฟ้า
Electrical Braking of 3 Phase Induction Motors

การเบรก หมายถึง การหน่วงให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ให้หมุนช้าลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุน จะด้วยวิธีทางกล หรือด้วยวิธีทางไฟฟ้า ในที่นี้จะข้อกล่าวเฉพาะการเบรกด้วยทางไฟฟ้าเท่านั้น

ข้อดีของการเบรกด้วยไฟฟ้า เมื่อเทียบกับทางกล เช่น ไม่ต้องการการบำรุงรักษาเปลี่ยนผ้าเบรก หรือทำให้มีผงฝุ่นจากระบบเบรก โดยเฉพาะในโรงงานทางด้านอาหาร และยังสามารถติดตั้งระบบเบรกเพิ่มเติมได้ หลังจากมอเตอร์ใช้งานอยู่ก่อนแล้ว ส่วนข้อเสียที่เป็นของระบบไฟฟ้าบางวิธี คือไดนามิกส์อาจจะไม่ดี และไม่สามารถทำการเบรกให้หยุดสนิท หรือเมื่อมอเตอร์หยุดหมุนแล้ว จะไม่สามารถเบรกให้ Lock อยู่กับที่ได้ คือไม่สามารถ holding brake ได้ เช่น

การเบรกแบบปลั๊ก (Plug braking)



รูปที่ 1 วงจรกำลัง และวงจรควบคุม Plug braking

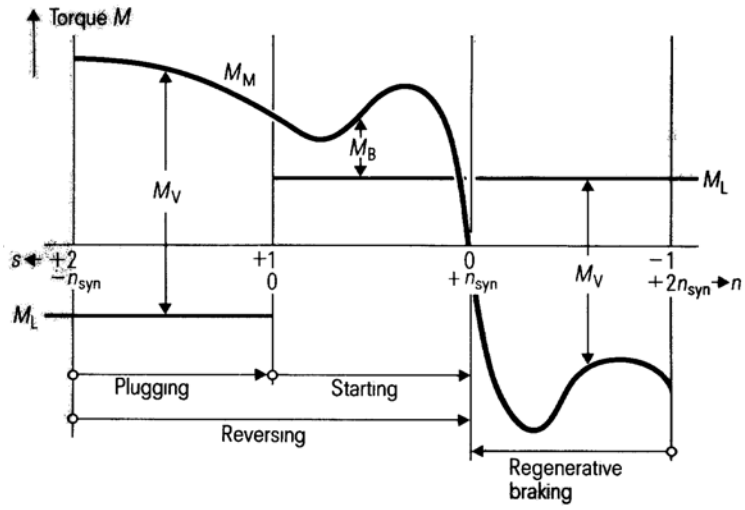
การเบรกด้วยวิธีนี้คือการเบรกด้วยวิธีกลับทางหมุนนั้นเอง เป็นวิธีที่นิยมทำกันและเป็นวิธีที่ง่ายของการเบรกทางไฟฟ้าและต้องการวงจรเพิ่มน้อยดังแสดงใน*รูปที่ 1*

โหมดการทำงาน

การสตาร์ท: กดสวิตช์ S1Q ทำให้ K1M ทำงาน มอเตอร์ก็เริ่มทำงาน หน้าสัมผัสของ F3V เป็นตัววัดความเร็วรอบจะเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อความเร็วรอบต่ำๆ

การหยุด: กดสวิตช์ S0Q ทำให้ K1M หยุดทำงานและ K2V ทำงาน มอเตอร์หยุดทำงานเป็นแบบ plug braking มอเตอร์กลับทางหมุนที่ความเร็วต่ำทำให้ F3V กลับมายังตำแหน่งเดิม ทำให้ K2V หยุดทำงานซึ่ง plug braking สิ้นสุดลง

การสับเปลี่ยนการต่อของ 2 เฟสทำให้ทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กกลับทิศ ทำให้มอเตอร์เกิดการเบรก ค่าแรง-บิดเฉลี่ยขณะทำการเบรกด้วยวิธีนี้จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงบิดล็อกโรเตอร์ดังแสดงใน*รูปที่ 2* ตัวตรวจจับความเร็ว (speed monitor, F3V) มีไว้เพื่อป้องกันมอเตอร์ที่กำลังหมุนกลับทิศทางทันทีทันใดหลังจากหยุดนิ่ง



M_M คือแรงบิดมอเตอร์
M_L คือแรงบิดโหลด
M_B คือแรงบิดเร่ง
M_V คือแรงบิดหน่วง หรือเบรก

รูปที่ 2 การสตาร์ท, การเบรกและการกลับทางหมุนของอินดักชั่นมอเตอร์ชนิดกรงกระรอก

การนำไปใช้งานของวิธีการเบรกแบบนี้ไม่ควรใช้เวลาในการเบรกนานเกิน 5 วินาที ทั้งนี้จะต้องตรวจสอบความสามารถการรองรับกระแสสูงของมอเตอร์แต่ละรุ่น และขึ้นอยู่กับงานที่ขับด้วย เช่นใช้ในการขับเกียร์ของเครื่องกว้านด้วยอินดักชั่นมอเตอร์ชนิดสลิปริงซึ่งมีไดนามิกส์การเบรกต่ำ โดยไดนามิกส์แปรตามความต้านทานของโรเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตาม กราฟลักษณะสมบัติของแรงบิดดังแสดงใน*รูปที่ 2*

การเบรกโดยจ่ายพลังงานคืน (Regenerative braking)

การเบรกด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการขับมอเตอร์ที่ต่อกับเครื่องจักรหมุนซึ่งเป็นโหลดให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้มอเตอร์เกิดการเบรก และจ่ายพลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่ายของระบบ หรือ Regenerative

การเบรกเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน สามารถทำได้โดยการต่อคาปาซิเตอร์ (Capacitor bank) เข้าไปให้กับขั้วของมอเตอร์เป็นช่วงๆ ทำให้เกิดการจ่ายพลังงานเป็นสนามแม่เหล็กหมุน ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่ำๆ การเบรกเกิดขึ้นจากสาเหตุการจ่ายกระแสรีแอ็กทีป (reactive) จากการต่อคาปาซิเตอร์นั้นเอง อย่างไรก็ตามการเบรกด้วยวิธีนี้ไม่คอยนิยมใช้เพราะค่าใช้จ่ายสำหรับคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อสูง และเสียพื้นที่ในการติดตั้งคาปาซิเตอร์

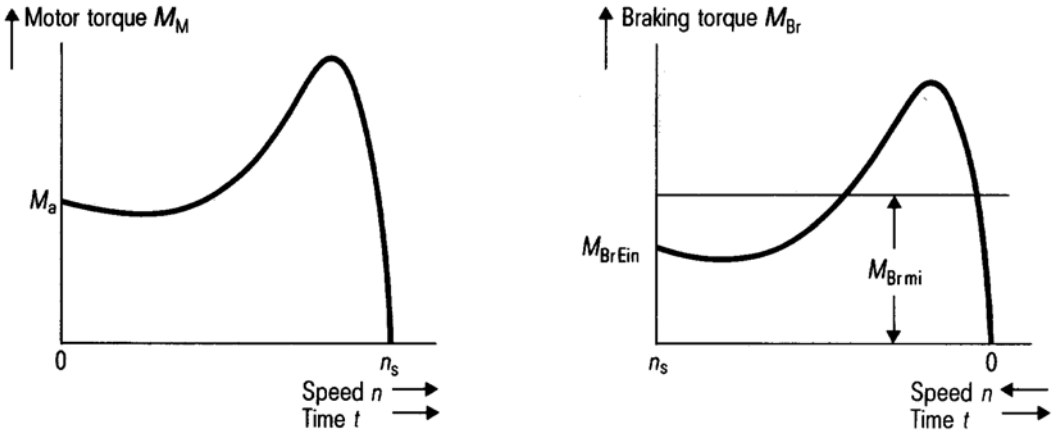
การเบรกโดยการลัดวงจร (Short – circuit braking)

การเบรกด้วยวิธีนี้ทำได้โดยเปิดวงจรมอเตอร์ออกจากแหล่งจ่าย แล้วทำการลัดวงจรที่ขั้วเตเตอร์เข้าด้วยกันก็จะเกิดการเบรก ที่สำคัญขณะลัดวงจรจะทำให้เกิดการอาร์คที่สวิตช์ ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายแต่ไม่สามารถคาดคะเนเวลาที่ทำการเบรก และเวลาที่มอเตอร์จะหยุดนิ่งว่าใช้เวลาเท่าไร

วิธีนี้จะไม่เห็นผลกับมอเตอร์ที่ขับโหลดที่มีความเฉื่อยสูง เพราะฟลักซ์แม่เหล็กในมอเตอร์จะลดลงอย่างเร็วเมื่อลัดวงจร แต่เนื่องจากความเฉื่อยสูงจึงไม่สามารถทำให้มอเตอร์หยุดหมุนได้โดยทันที ซึ่งเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กหมดทำให้การลัดวงจรก็จะไม่มีผลต่อการเบรก

การเบรกโดยฉีดไฟฟ้ากระแสตรง (DC injection braking)

การเบรกด้วยวิธีนี้ทำได้โดยปลดขดลวดสเตเตอร์ออกจากไลน์ แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปกระตุ้นขดลวดในสเตเตอร์แทน เป็นผลให้กราฟแรงบิดของมอเตอร์เป็น กราฟแรงบิดเป็นแบบย้อนกลับ หรือแบบเงา (mirror) ใกล้เคียงกับเส้นกราฟของแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งความสูงของเส้นกราฟจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่ กับการฉีดปริมาณกระแสของ ไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้าไปเพื่อทำการเบรก

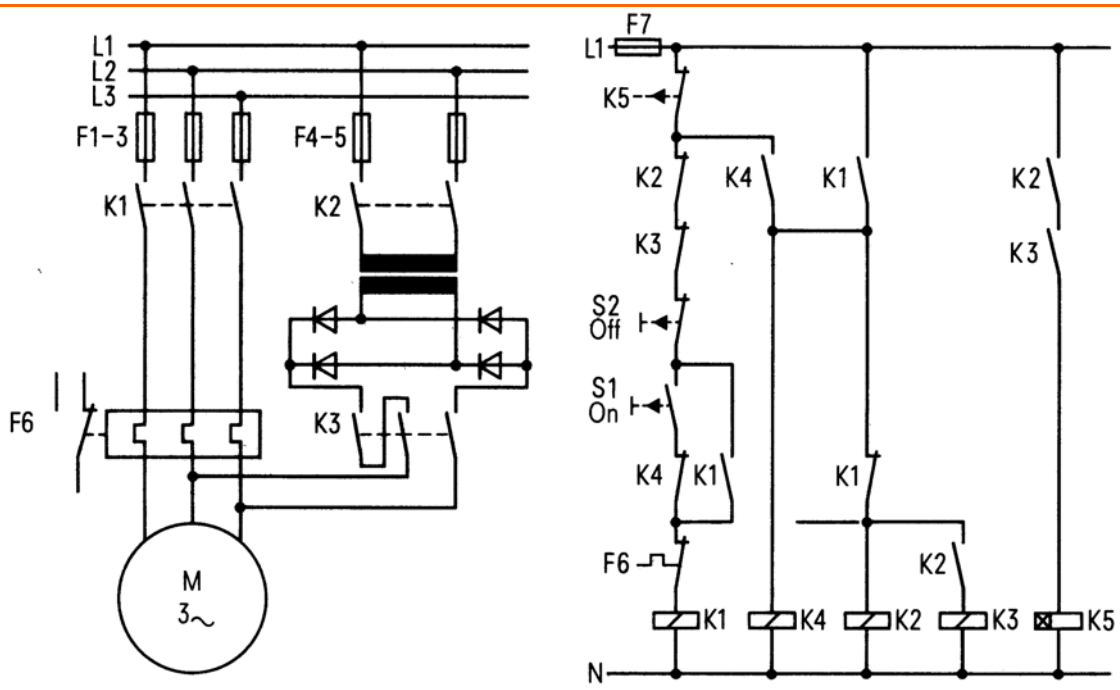


รูปที่ 3 เส้นโค้งแรงบิดเบรกที่มีการเบรกโดยฉีดไฟกระแสตรงที่เปรียบเทียบกับเส้นโค้งแรงบิดของมอเตอร์

สนามแม่เหล็กที่สร้างมาจากไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเบรก I_{BG} ที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์สามารถหาได้จากเส้นกราฟ Magnetization ของมอเตอร์ หลังจากแปลงไฟฟ้าตรงเป็นค่าสมมูลย์ทางไฟสลับในรูปของของกระแสเฟส I_1' :

$$I_{BG} = k \cdot I_1'$$

ค่ากระแสเฟสสมมูลย์ทางไฟฟ้ากระแสสลับ คือกระแสที่สร้าง m.m.f. และแรงบิดเดียวกันจากไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4 ไดอะแกรมวงจรสำหรับการเบรกแบบฉีดไฟฟ้ากระแสตรง

การสตาร์ทมอเตอร์

กดสวิตช์ปุ่มกด S1 ทำให้คอนแทกเตอร์ K1 ทำงาน หน้าสัมผัส K1 ล็อกสวิตช์ S1 และคอนแทกเตอร์ช่วย K4 ก็จะทำงานเช่นกัน หน้าสัมผัส NC ของ K1 จะล็อกไม่ให้ K2 และ K3 ทำงาน หน้าสัมผัส NC ของ K4 จะช่วยล็อกให้การทำงานเป็นไปตามลำดับ

การหยุดมอเตอร์ด้วยการฉีดไฟฟ้ากระแสตรง

โดยกดสวิตช์ปุ่มกด S2 ทำให้คอนแทกเตอร์ K1 หยุดทำงาน (มอเตอร์ได้รับไฟฟ้ากระแสตรงหลังจาก K2 และ K3 ทำงาน) หน้าสัมผัส NO ของ K2 และ K3 ทำให้ตัวนับเวลา (timer) K5 เริ่มทำงาน เมื่อถึงเวลาของการฉีดสิ้นสุดจะปลดการฉีดออกโดยทำให้ K2 และ K3 หยุดทำงาน

แรงบิดมอเตอร์จะแปรผันตามกำลังที่ช่องอากาศ (air-gap power) เมื่อมีการหมุนก็จะทำให้เกิดค่าสูญเสียในโรเตอร์ ถ้าไม่พิจารณาสลิป และกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก แรงบิดมอเตอร์จะแปรผันตามกระแสยกกำลังสอง ซึ่งมีสมการของแรงบิดดังนี้

$$M_{Br} = M_m \left(\frac{I_1'}{I_m} \right)^2$$

เมื่อ M_m คือแรงบิดมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโหลดเช่นเดียวกับกระแสของมอเตอร์ I_m ขณะมอเตอร์หมุนอยู่ และกระแสเฟสสมมูลย์ทางไฟสลับ I'_1 ค่าทั้งหมดนำมาคำนวณแรงเบรก M_{Br} ขณะมอเตอร์หมุนได้

อย่างไรก็ตาม ในการวางแผนทางวิศวกรรมจะมีการขยายการคำนวณในทางปฏิบัติดังนี้

$$M_{BrEin} = M_a \left(\frac{I_1'}{I_a} \right)^2$$

สมการนี้ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าได้ ถ้ารู้ข้อมูลจากแคตาล็อกของมอเตอร์ เป็นค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับเริ่มเบรกขณะทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ถ้ามอเตอร์มีแรงบิดภายนอก M_f เข้ามาประกอบค่า M_{Br} จะมีสมการเป็น

$$M_{Br} = f \cdot M_{BrEin} \pm M_f$$

$$M_{Br} = \frac{J \cdot n_N}{9.55 \cdot t_{Br}}$$

ซึ่งถ้าหากมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ ก็จะสามารถคำนวณ หาค่ากระแสเบรก I_{BG} ได้คือ

$$I_{BG} = k \cdot I_a \sqrt{\frac{J \cdot n_N - M_f}{9.55 \cdot t_{Br}} \over f \cdot M_a} \leq 0.6 \cdot k \cdot I_a$$

เมื่อ I_{BG} คือกระแสตรงที่จ่ายในการเบรก [A]

k คือค่าแฟกเตอร์ในวงจรเบรก

I_a คือค่ากระแสล็อกโรเตอร์ต่อเฟส [A] ถ้าเป็นการต่อแบบเดลต้าได้ $\frac{1}{\sqrt{3}} I_a$ (ค่าจากแคตาล็อก)

J คือโมเมนต์ หรือความเฉื่อยรวมของมอเตอร์และของโหลด [kg.m^2]

n_N คือความเร็วพิกัดมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที [rev/min]

t_{Br} คือเวลาเป็นวินาที ที่ใช้ในการเบรก (ยอมให้ไม่เกิน 10 วินาที เพราะอุณหภูมิจะสูงเกิน)

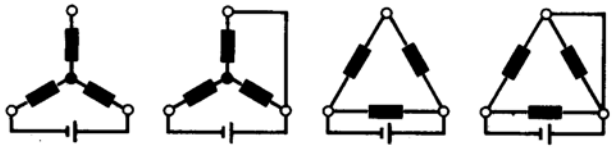
M_f คือแรงบิดหน่วง (retarding torque) ของโหลด [Nm]

M_a คือแรงบิดล็อกโรเตอร์ [Nm]

f คือแฟกเตอร์แรงบิดเบรกของมอเตอร์(Breaking Torque) ตามโรงงานผู้ผลิตโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 1 – 2 เท่า

I_{NS} คือค่ากระแสพิกัดต่อเฟส ถ้าต่อแบบเดลต้า $I_{NS} = 0.58 \cdot I_N$

I_N คือค่ากระแสพิกัด ของมอเตอร์



a b c d

	a	b	c	d
K	1.225	1.41	2.120	2.45
C	2.000	1.50	0.667	0.45

รูปที่ 5 การต่อมอเตอร์สำหรับเบรกโดยฉีดไฟฟ้ากระแสตรง

นอกจากนี้ หากเรารู้ อุณหภูมิในขณะทำงาน และค่าความต้านทานภายในมอเตอร์ เราสามารถคำนวณหาค่าแรงดัน U_{g1} ที่จ่ายเพื่อทำการเบรกมอเตอร์ จากอุณหภูมิในขณะทำงานได้ตามสมการ

$$U_{g1} = C \cdot I_{BG} \cdot R_{Strw} \quad Or \ldots 1.3 \cdot C \cdot I_{BG} \cdot R_{Strk}$$

เมื่อ U_{g1} คือแรงดันเบรกไฟฟ้ากระแสตรง [V]

C คือแฟกเตอร์สำหรับการเบรก [ตาม*รูปที่ 5*]

I_{BG} คือกระแสเบรกไฟฟ้ากระแสตรง [A]

R_{Strw} คือความต้านทานต่อเฟสของขดลวดมอเตอร์ ณ.อุณหภูมิที่ทำงาน [Ω]

R_{Strk} คือความต้านทานต่อเฟสของขดลวดที่อุณหภูมิ 20 °C [Ω]