

บทที่ 3 หลอดไฟฟ้า

บทนี้มีเป้าหมายเพื่อให้เข้าใจแบบจำลองหลอดที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า โดยจะเน้นเฉพาะหลอดแสงสว่างและหลอดมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นหลอดทางไฟฟ้าหลักที่ต้องใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเนื้อหาในตอนต้นจะได้อธิบายคุณสมบัติของหลอดแสงสว่างแต่ละประเภทรวมถึงอุปกรณ์ต่อร่วมขณะที่ใช้งาน เช่น บัลลาสต์ (Ballast) ซึ่งมีผลต่อแนวความคิดการประหยัดพลังงาน หลังจากนั้นจะได้อธิบายถึงคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และในตอนท้ายจึงจะได้กล่าวถึงแบบจำลองของหลอดเหล่านี้ที่ขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้า โดยเนื้อหาในแต่ละส่วนมีดังนี้

3.1 หลอดแสงสว่าง

หลอดแสงสว่างหมายถึงหลอดหลอดไฟประเภทต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่ต้องใช้ร่วม เช่น บัลลาสต์ ปกติเราใช้หลอดไฟในโรงงานสำหรับส่องสว่างในพื้นที่ใช้งาน เช่น อาคารสำนักงาน หรือพื้นที่ทำงานในโรงงาน หลอดไฟบางประเภทสามารถปลดปล่อยความยาวคลื่นแสงเพื่อใช้ในวัตถุประสงค์บางอย่าง เช่น ฆ่าเชื้อโรค ให้ความร้อนเพื่ออบชิ้นงาน หรือแม้แต่ให้ความร้อนหรือคุณภาพแสงสำหรับให้ความอบอุ่นแก่สิ่งมีชีวิตแทนแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันได้อีกด้วย หลอดไฟในปัจจุบันสามารถแบ่งตามเทคโนโลยีของแหล่งกำเนิดแสงสว่าง ได้เป็น 2 ประเภท คือ หลอดไฟแบบมีไส้ (Incandescent Lamp) และหลอดไฟแบบบรรจุก๊าซ (Gaseous Discharge Lamp) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 หลอดไฟแบบมีไส้ เป็นหลอดที่ให้แสงสว่างจากความร้อนของไส้หลอด (Filament) ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หลอดแบบมีไส้จะมีค่า Efficacy ค่อนข้างต่ำประมาณ 4-24 lm/watt มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 1000 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ไส้หลอด ก๊าซที่บรรจุ ช่วงเวลาที่ปิด-เปิด และกำลังไฟฟ้าของหลอด เป็นต้น ปริมาณแสงของหลอดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสีแดง เนื่องจากการเปล่งแสงจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง จึงเป็นหลอดที่มีอายุการใช้งานที่สั้น แต่มีข้อดี คือ มีราคาถูก ควบคุมการหรี่แสงได้ง่าย แสงสีแดงที่ได้สามารถใช้ในการประดับตกแต่ง นอกจากนั้นความร้อนจากหลอดสามารถใช้ในงานอบให้ความร้อนทั้งแก่สิ่งมีชีวิต และวัสดุชิ้นงานต่างๆ โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

- **หลอดมีไส้แบบมาตรฐาน** ใช้เส้นลวดทังสเตน (Tungsten) ทำไส้หลอด ใช้วัสดุพวกแก้วเป็นตัวหลอดห่อหุ้มไส้หลอดไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจน ภายในหลอดบรรจุด้วยก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน และไนโตรเจน เพื่อป้องกันไม่ให้ไส้หลอดระเหิดเร็วเกินไปทำให้อายุการใช้งานลดลง แสงสว่างลดลง นอกจากนั้นทังสเตนที่ระเหิดจะไปเกาะที่ผิวด้านในของหลอดทำให้ปริมาณฟลักซ์แสงที่ผ่านออกมาลดลงไปอีก ในหลอดที่ให้ปริมาณแสงต่ำนิยมทำให้เป็นหลอดสูญญากาศ
- **หลอดทังสเตนฮาโลเจน** เป็นหลอดไส้ที่อยู่ในกระเปาะแก้วบรรจุก๊าซฮาโลเจนคือไอโอดีนหรือโบรมีน รวมกับก๊าซอื่นที่เติมในหลอด ไส้หลอดและตัวหลอดแก้วจะมีขนาดเล็กเพื่อรักษาอุณหภูมิไส้หลอดขณะทำงานให้สูง ตัวหลอดจะทำจากควอตซ์ (Quartz) เพื่อให้ทนความร้อนได้ เมื่อก๊าซทังสเตนระเหิดออกจากไส้หลอดจะรวมกับก๊าซฮาโลเจน เป็นโมเลกุลของทังสเตน-ฮาโลเจน

โมเลกุลก๊าซนี้จะวิ่งเข้าหาไส้หลอดและถูกกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้ฮาโลเจนหลุดออกมา ทำให้อัตราการระเหิดของทั้งสแตนดลง หลอดจึงมีอัตราการลดลงของแสงช้าและมีอายุยาวนานขึ้น หลอดชนิดนี้สามารถใช้ในงานอบให้ความร้อนขึ้นงานแทนแสงอาทิตย์ได้ ข้อควรระวังขณะใช้งาน หลอดชนิดนี้คือ ไม่ควรจับไส้หลอดด้วยมือเปล่าเพราะไขมันจากมือจะไปเกาะที่ผิวด้านข้างหลอด ทำให้เมื่อใช้งานกระเปาะแก้วที่ร้อนจะขยายตัวไม่เท่ากันจนแตกได้



รูปที่ 3.1 หลอดไส้



(a)



(b)

รูปที่ 3.2 หลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

(a) ขั้วอยู่ข้างเดียวกัน

(b) ขั้วอยู่คนละข้าง

3.1.2 หลอดไฟแบบบรรจุก๊าซ (Discharge Lamp)

หลอดชนิดนี้อาศัยหลักการเกิดเบรคดาวไนในก๊าซทำให้เกิดแสงสว่างขึ้น จึงต้องมีการควบคุมปริมาณกระแสให้พอเหมาะตลอดเวลาโดยใช้บัลลาสต์ (Ballast) เพื่อรักษากระบวนการแตกตัวของอะตอมก๊าซที่เกิดขึ้นให้สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ปริมาณแสงที่ได้มีค่าคงที่ และอายุการใช้งานของหลอดยาวนาน หลอดประเภทนี้แบ่งเป็น 2 ชนิดตามระดับความดันภายในหลอด คือ หลอดบรรจุก๊าซความดันต่ำ (Low-pressure Gaseous Discharge Lamps) และ หลอดบรรจุก๊าซความดันสูง (High-pressure Gaseous Discharge Lamps) ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติดังนี้

3.1.2.1 หลอดบรรจุก๊าซความดันต่ำ แบ่งออกได้หลายประเภท เช่น

- **หลอดฟลูออเรสเซนต์** เป็นหลอดที่มีค่า Efficacy ค่อนข้างสูงประมาณ 75-80 lm/W ภายในหลอดบรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน อาร์กอน-นีออน และปรอทอีกเล็กน้อย เมื่อเกิดแรงดันคร่อมที่ขั้วอิเล็กโทรดมากพอ ก๊าซในหลอดจะเกิดการไอออไนซ์จนกระแสสามารถไหลผ่านได้ ไอปรอทจะแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ขั้วอิเล็กโทรดนิยมใช้ขดลวดทั้งสแตนเลสเคลือบด้วยออกไซด์ของอัลคาไลด์ ซึ่งจะสามารถปลดปล่อยประจุออกมาได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูง ผิวด้านในของหลอดเคลือบด้วยสารฟอสเฟอร์ (Phosphor) กระจ่ายแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะขึ้นอยู่กับสารเคลือบนี้ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้เกิดการเรืองแสงในช่วงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ รังสีที่ปล่อยออกมาแบ่งได้ 6 แบบ คือ Cool White, Cool White Deluxe, Warm White, Warm White Deluxe, White และ Daylight หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดที่นิยมสำหรับการให้แสงในสำนักงาน และปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ออกใหม่ที่จะช่วยประหยัดพลังงานมากกว่าในอดีตมาก เช่นพวกหลอดผสมรุ่นต่างๆ รวมถึงหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กหมุนเป็นเกลียวที่เรียกว่า Compact Fluorescent (CFL)



รูปที่ 3.3 หลอดฟลูออเรสเซนต์พร้อมโคมพร้อมลักษณะการติดตั้งใช้งานบนเพดาน



รูปที่ 3.4 หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ CFL

- หลอดโซเดียมความดันต่ำ (Low-pressure Sodium Lamp) แสงสว่างที่ได้จากหลอดชนิดนี้เป็นแสงสีเหลืองเกิดขึ้นในหลอดอาร์ค (Arc Tube) ที่เป็นหลอดแก้วมีลักษณะเป็นระลอกเพื่อให้โซเดียมกระจายสม่ำเสมอในหลอด ภายในบรรจุอาร์กอนและนีออนเล็กน้อย ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 260°C โดยทั่วไปการจุดหลอดชนิดนี้จะใช้เวลาประมาณ 9-15 นาที นิยมใช้เป็นไฟถนน



รูปที่ 3.5 หลอดโซเดียมความดันต่ำ

3.1.2.2 หลอดบรรจุก๊าซความดันสูง

หลอดบรรจุก๊าซความดันสูงที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ชนิด คือ หลอดบรรจุไอปรอท หลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดโซเดียมความดันสูง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- **หลอดบรรจุไอปรอท (High Pressure Mercury Lamp, HPM)** ภายในหลอดอาร์คจะบรรจุไอปรอท อาร์กอน นีออน และคริปทอน หลอดแก้วภายนอกเคลือบด้วยฟอสเฟอร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพสีที่ออกมา ให้มีส่วนของแสงสีแดงเพิ่มมากขึ้นจากแสงสีน้ำเงินเขียวที่เป็นแสงของไอปรอทปกติ ในตอนเริ่มจุดหลอดไอปรอทจะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนก่อนพัฒนาเป็นอาร์คระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหลักกับขั้วอิเล็กโทรดสตาร์ท ท้ายสุดจะเกิดการอาร์คระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง อาร์คที่เกิดขึ้นจะปลดปล่อยรังสีอุลตราไวโอเลตออกมาซึ่งสามารถทะลุผ่านหลอดแก้วที่ทำจากควอทซ์ได้ หลอดบรรจุไอปรอทที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำจะมีค่า Efficacy ไม่สูงนัก ประมาณ 30 lm/W แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 70 lm/W เมื่อกำลังงานของหลอดมากขึ้นจนประมาณ 1000 W ในท้องตลาดบางครั้งเรียกหลอดชนิดนี้ว่าหลอดแสงจันทร์ นิยมใช้ให้แสงสว่างภายในพื้นที่ที่ต้องการแสงนวล เช่น โรงงานหรือโกดังที่มีหลังคาสูง พื้นที่โล่ง และถนนภายในโรงงาน



รูปที่ 3.6 หลอดบรรจุไอปรอท

- **หลอดเมทัลฮาไลด์ (Metal Halide Lamps, MH)** เป็นหลอดที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานคล้ายกับหลอดบรรจุไอปรอท แต่ภายในหลอดอาร์คจะบรรจุโลหะฮาไลด์เพิ่มเติมจากหลอดไอปรอททำให้เกิดแสงโทนสีแดงเพิ่มขึ้น จึงไม่จำเป็นต้องเคลือบฟอสเฟอร์ หลอดจะมีจุดกำเนิดแสงที่เล็กสามารถควบคุมแสงได้ง่าย การติดตั้งหลอดเมทัลฮาไลด์จะนิยมติดตั้งในแนวราบ ทำให้อุณหภูมิภายในหลอดมีค่าสม่ำเสมอ การเริ่มจุดหลอดจะใช้เวลาประมาณ 9 นาที Efficacy ของหลอดจะแปรตามพิกัดกำลังงานของหลอด โดยหลอดขนาด 200 W จนถึง 1500 W จะมี Efficacy ประมาณ 80 จนถึง 100 lm/W



รูปที่ 3.7 หลอดเมทัลฮาไลด์

- **หลอดโซเดียมความดันสูง (High-pressure Sodium Lamp)** หลอดอาร์คของหลอดโซเดียมความดันสูงจะมีขนาดเล็กเพื่อให้อุณหภูมิขณะทำงานสูง จึงไม่ต้องใช้อิเล็กโทรดสตาร์ทเพื่อช่วยจุดหลอด หลอดอาร์คจะทำจากเซรามิกเพื่อให้สามารถทนความร้อนได้สูง ภายในบรรจุขึ้นอนอะมัลกัมของปรอทและโซเดียม หลอดโซเดียมความดันสูงจะให้แสงในช่วงความยาวคลื่น แต่จะมากในช่วงของแสงสีเหลืองและส้ม เมื่อต้องการให้เกิดแสงสีแดง น้ำเงิน และเขียว เพิ่มเติม ทำได้โดยเพิ่มความดันภายในหลอดอาร์ค แรงดันที่จ่าย และเปลี่ยนจุดทำงานของบัลลาสต์ Efficacy ของหลอดจะแปรตามพิกัดกำลังงานของหลอด โดยหลอดขนาด 70 W จนถึง 1000 W จะมี Efficacy ประมาณ 80 จนถึง 140 lm/W



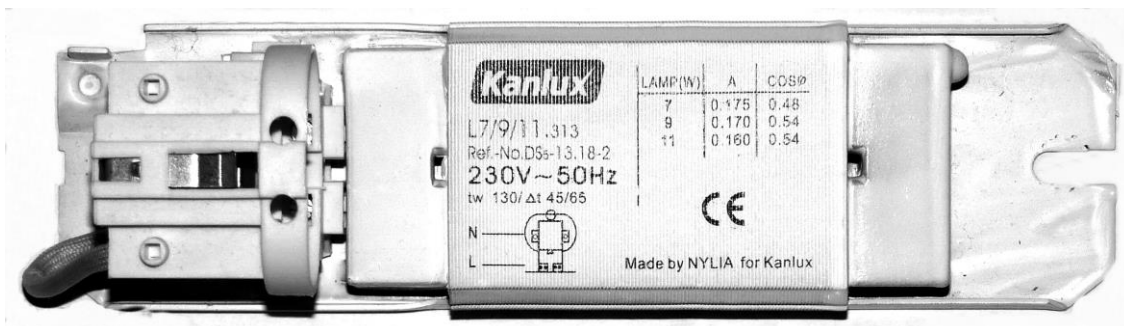
รูปที่ 3.7 หลอดโซเดียมความดันสูง

3.2 บัลลาสต์

บัลลาสต์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดบรรจุก๊าซความดันสูง มีหน้าที่สองอย่างคือ สร้างแรงดันสูงเพียงพอในการเริ่มจุดหลอดและทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่หลอดให้มีความสม่ำเสมอในสภาวะการทำงานปกติ การทำงานของบัลลาสต์มีผลต่อปริมาณและคุณภาพของแสงสว่าง อายุการใช้งานของหลอด ในด้านการอนุรักษ์พลังงานต้องคำนึงถึงพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวบัลลาสต์ด้วย เทคโนโลยีในการสร้างบัลลาสต์มีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

3.2.1 บัลลาสต์แกนเหล็ก ทำขึ้นจากการใช้ขดลวดพันรอบแกนเหล็กเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ บัลลาสต์แกนเหล็กยังคงมีใช้อยู่มากเนื่องจากมีความคงทนสูง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- **แกนเหล็กแบบธรรมดา** เป็นบัลลาสต์ที่ใช้กันแพร่หลายในสมัยอดีต ในขณะใช้งานจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กสูง ทำให้อุณหภูมิขณะการใช้งานจะค่อนข้างสูงประมาณ 55–70 °C
- **แกนเหล็กประสิทธิภาพสูง** ออกแบบให้ประหยัดพลังงานโดยใช้ขดลวดและแกนเหล็กที่มีคุณภาพดีทำให้กำลังสูญเสียลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของแกนเหล็กแบบธรรมดา อุณหภูมิขณะใช้งานจะอยู่ที่ประมาณ 35 - 50°C



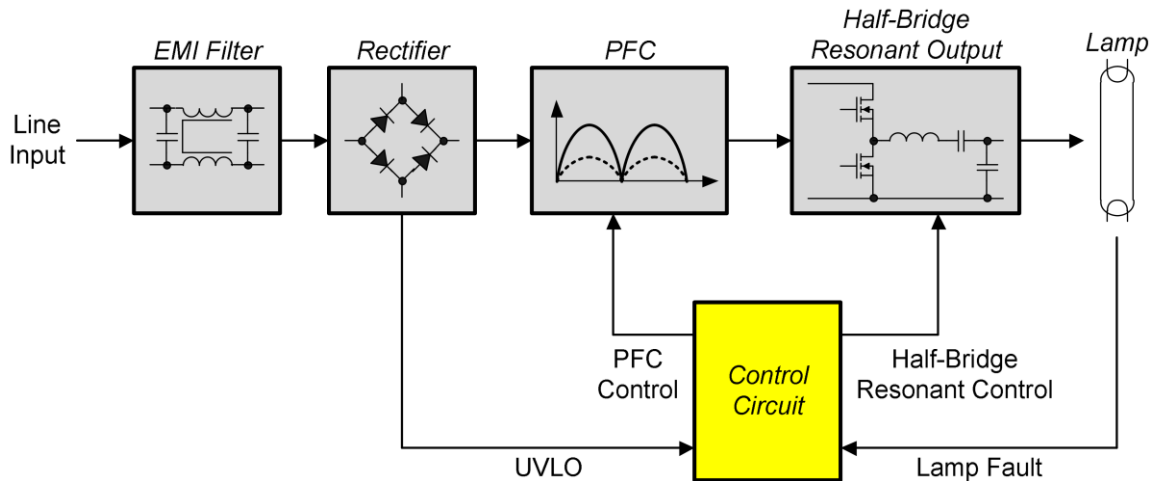
รูปที่ 3.8 บัลลาสต์แกนเหล็กสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์

3.2.2 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นบัลลาสต์ที่ทำขึ้นด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้มีข้อดีหลายอย่าง เช่น กำลังสูญเสียน้อยกว่าแบบแกนเหล็กมาก เปิดติดทันทีโดยที่หลอดไม่กระพริบ ไม่ต้องใช้งานร่วมกับสตาร์ทเตอร์ ไม่มีเสียงรบกวน ช่วยยืดอายุการใช้งานของหลอดให้นานขึ้น ราคาของบัลลาสต์ชนิดนี้จะสูง จึงคุ้มค่าสำหรับการออกแบบที่ต้องการคุณภาพของแสงสว่างที่ดีและมีชั่วโมงการใช้งานหลอดยาวนาน บัลลาสต์ชนิดนี้ไม่เหมาะกับพื้นที่ติดตั้งที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กลางแจ้งหรือพื้นที่อบที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะสั้น

การออกแบบวงจรภายในบัลลาสต์จะประกอบด้วย วงจรกรองและลดทอนสัญญาณรบกวน วงจรทำให้สัญญาณราบเรียบ วงจรสร้างสัญญาณความถี่เปรียบเทียบ วงจรจุดชนวนจ่ายแรงดันให้หลอด วงจรควบคุมการจ่ายแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากผลของวงจรเหล่านี้ทำให้กำลังงานของหลอดมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าหัวหลอดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงแคบๆ



รูปที่ 3.9 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.10 วงจรพื้นฐานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

3.3 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทั้งแบบหนึ่งเฟสและสามเฟส เพราะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูก ซ่อมบำรุงง่าย และสะดวก มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน การเลือกใช้อัตอร์ที่ดีต้องพิจารณาหลายปัจจัย เช่น กำลังงานและแรงบิด คุณลักษณะการใช้งานเมื่อเทียบกับโหลด และวิธีการควบคุม ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับคุณภาพของแรงดันไฟฟ้า รายละเอียดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหนึ่งเฟสและสามเฟสมิดังนี้

3.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหนึ่งเฟส เป็นมอเตอร์ที่ต้องอาศัยคาปาซิเตอร์ หรือกลไกอย่างอื่นเพื่อให้เกิดแรงบิดเริ่มต้นในขณะที่เดินเครื่อง ยังสามารถแบ่งได้เป็นหลายแบบ ดังนี้

3.3.1.1 มอเตอร์แบบสปลิตเฟส (Split-phase Motor) มีขนาดแรงม้าขนาดตั้งแต่ 1/4 ถึง 1 แรงม้า นิยมใช้งานมากในตู้เย็น เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก เครื่องซักผ้า เป็นต้น



รูปที่ 3.11 ลักษณะของมอเตอร์แบบสปลิตเฟส

ส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสปลิตเฟสประกอบด้วยทุ่นหมุน (Rotor) ที่ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกัน รอบจะมีร่องตัวนำทองแดงหรืออลูมิเนียมเรียกว่า โรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage rotor) และส่วนสเตเตอร์สำหรับให้สนามแม่เหล็กไหลซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กเซาะร่องเรียกว่า ช่องสลอต (Slot) สำหรับวางขดลวดที่เป็นขดลวดสำหรับสตาร์ทและขดลวดหมุนที่มีการเปลี่ยนขดลวดขณะทำงานด้วยสวิตช์ที่ตรวจสอบการเริ่มหมุนเรียกว่า Centrifugal Switch โดยอุปกรณ์ส่วนสเตเตอร์วางไว้ในโครง (Frame) ทำมาจากเหล็กหล่อ

3.3.1.2 คาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor) มีลักษณะคล้ายสปลิตเฟสมอเตอร์ต่างกันตรงที่ออกแบบให้มีคาปาซิเตอร์ ทำให้มอเตอร์แบบนี้มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง ใช้กระแสขณะสตาร์ทน้อย มีขนาดตั้งแต่ 1/20 – 10 แรงม้า มอเตอร์นี้นิยมใช้งานกับ ปั๊มน้ำ เครื่องอัดลม ตู้แช่ ตู้เย็น เป็นต้น



รูปที่ 3.12 คาปาซิเตอร์มอเตอร์

3.3.1.3 รีพัลชั่นมอเตอร์ (Repulsion Motor) มีโรเตอร์เป็นแบบวาวด์ เหมาะใช้งานที่ต้องการแรงบิดเริ่มหมุนสูง เช่น เครื่องปั๊มลมขนาดใหญ่ ปั๊มน้ำขนาดใหญ่ เครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ หรือตู้แช่ เป็นต้น



รูปที่ 3.13 รีพัลชั่นมอเตอร์

3.3.1.4 ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor) เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กให้แรงบิดเริ่มหมุนสูงมากสามารถใช้ได้กับทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ นำไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมความเร็วได้ได้ง่าย นิยมนำไปใช้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น เครื่องบดและปั่นผสมอาหาร เครื่องโกนหนวดไฟฟ้า เครื่องนวดไฟฟ้า มอเตอร์จักรเย็บผ้า สว่านไฟฟ้า เป็นต้น ไม่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม



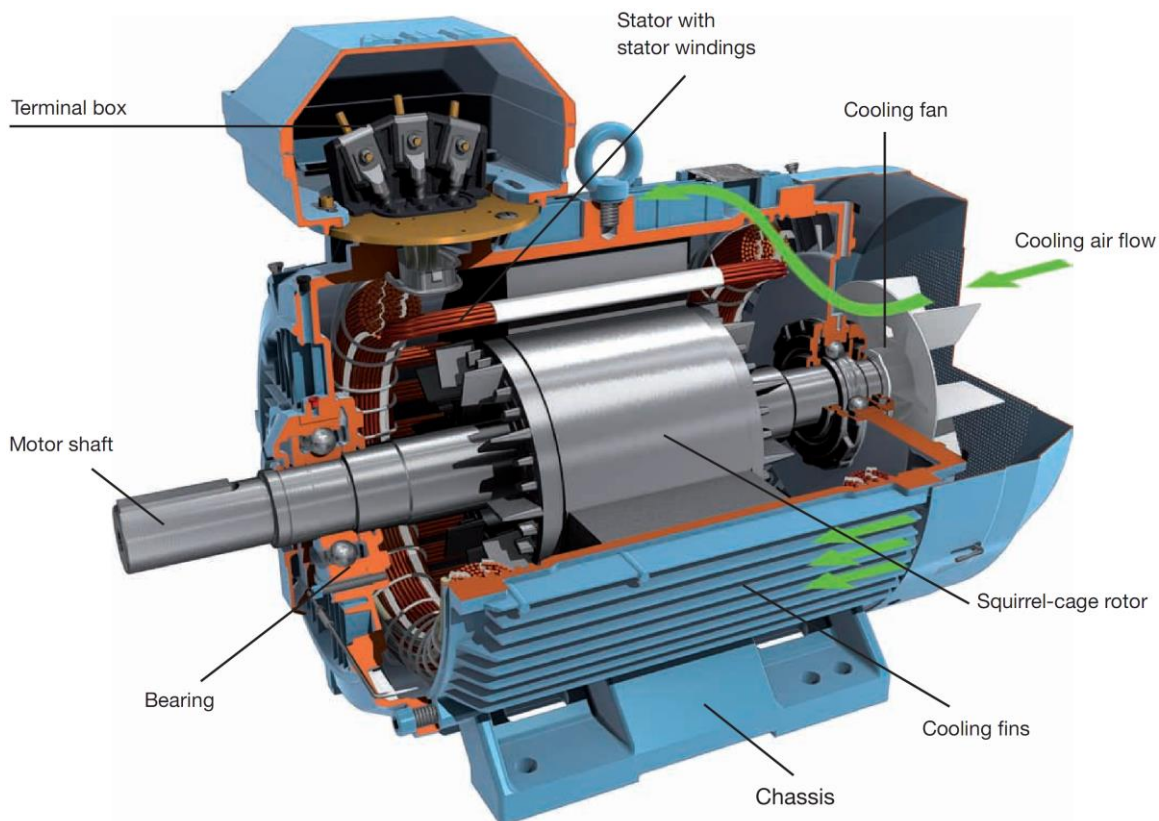
รูปที่ 3.14 ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์

3.3.1.5 เซดเตดโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor) เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กมีแรงบิดเริ่มหมุนต่ำมาก นำไปใช้งานได้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก ๆ เช่น ไดร์เป่าผม พัดลมขนาดเล็ก ไม่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเช่นเดียวกับยูนิเวอร์แซลมอเตอร์



รูปที่ 3.15 เซดเดคโพลมอเตอร์

3.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟส เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีข้อดีเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว คือ มีราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อน สะดวกในการบำรุงรักษา ให้แรงบิดที่ดี สามารถนำไปใช้งานได้ทั่วไป เช่น มอเตอร์หมุนสายพาน โม่บด พัดลมระบายอากาศขนาดใหญ่ ปั๊มน้ำ และสามารถใช้ร่วมกับอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็ว เป็นต้น



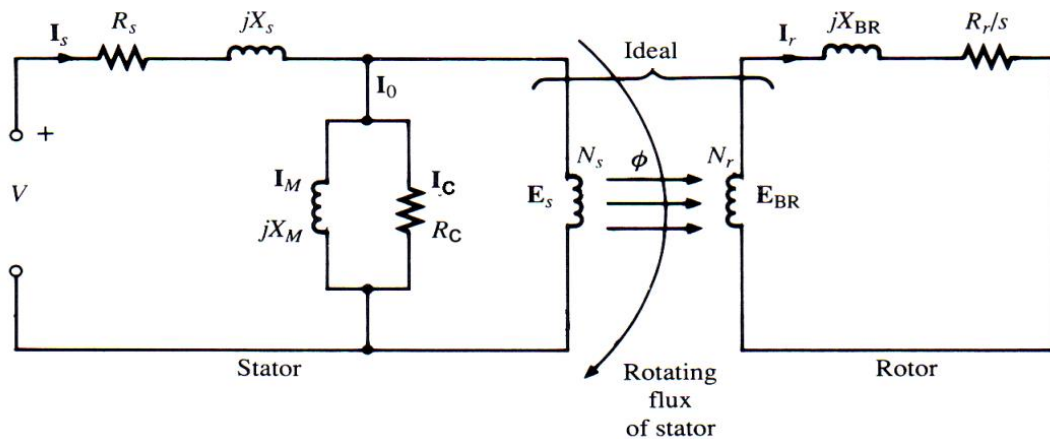
รูปที่ 3.16 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ดังรูปที่ 3.16 ประกอบด้วย

- ส่วนทุ่นหมุนที่มีตัวนำต่อกันเป็นลักษณะคล้ายกรงกระรอก
- ทุ่นหมุนจะต่อเชื่อมกับเฟลา
- เฟลาวางตัวอยู่บนตลับลูกปืนเพื่อให้หมุนได้โดยไม่ฝืด
- ด้านท้ายทุ่นหมุนต่อกับใบพัดเพื่อระบายความร้อนจากมอเตอร์ออกสู่ภายนอก
- ขดลวดสเตเตอร์จะสามารถต่อกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าที่กล่องต่อสาย
- ด้านล่างของส่วนสเตเตอร์จะต่อกับฐานรองรับ

3.4 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

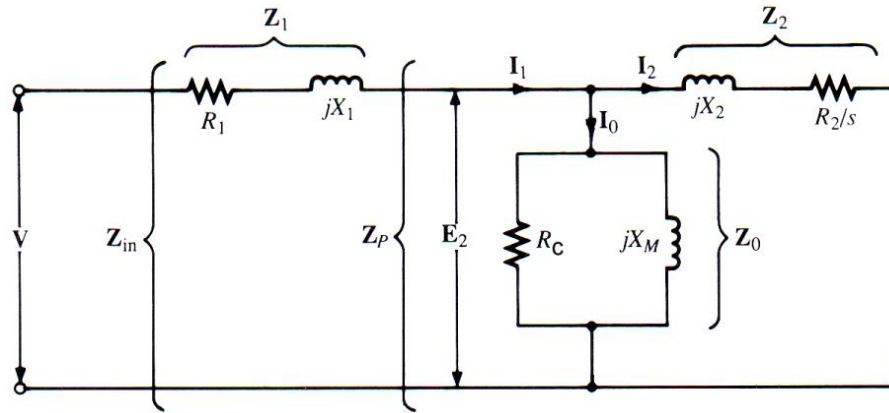
3.4.1 สมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปการวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการทำงานจะใช้วงจรสมมูล ซึ่งสามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อ	R_s	คือความต้านทานต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์
	X_s	คือรีแอคแตนซ์รั่วไหลต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์
	R_c	คือความต้านทานที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกน
	X_m	คือรีแอคแตนซ์ที่ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก
	R_r	คือความต้านทานต่อเฟสของโรเตอร์
	X_{br}	คือรีแอคแตนซ์รั่วไหลต่อเฟสของโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง
	E_s	คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสด้านสเตเตอร์
	E_{br}	คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่โรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง
	I_r	คือกระแสต่อเฟสด้านโรเตอร์
	I_0	คือกระแสกระตุ้นต่อเฟส (Exciting Current)
	s	คือสลลิป (Slip)

เมื่อทำการโอนย้ายพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์ไปรวมไว้ที่ด้านสเตเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอ้างอิงด้านสเตเตอร์

เมื่อ	$R_2 = a^2 R_r$	คือความต้านทานโรเตอร์ที่โอนย้ายมาด้านสเตเตอร์
	$X_2 = a^2 X_{br}$	คือรีแอคแตนซ์ของโรเตอร์ขณะหยุดนิ่งอ้างอิงด้านสเตเตอร์
	$E_2 = E_s = a E_{br}$	คือแรงดันเหนี่ยวนำขณะหยุดนิ่งอ้างอิงด้านสเตเตอร์
	R_l	คือความต้านทานต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์
	X_l	คือรีแอคแตนซ์รั่วไหลต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์
	I_l	คือกระแสต่อเฟสด้านสเตเตอร์
	V	คือแรงดันไฟฟ้าจ่ายเข้าต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์
	a	คืออัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดด้านสเตเตอร์กับด้านโรเตอร์ = $N_s/N_r = E_s/E_{br}$
	$I_2 = I_r/a$	คือกระแสโรเตอร์อ้างอิงด้านสเตเตอร์

3.4.2 กำลังงาน แรงบิด ความเร็วรอบ กำลังสูญเสีย และประสิทธิภาพ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.18 จะได้ความสัมพันธ์ของสมการต่างๆ เพื่อใช้ประกอบในการหาค่ากำลังงานส่วนต่างๆ ดังนี้

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (3.1)$$

$$Z_0 = \frac{R_c jX_m}{R_c + jX_m} \quad (3.2)$$

$$Z_p = \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (3.3)$$

$$Z_{in} = Z_1 + Z_p \quad (3.4)$$

$$I_1 = \frac{V}{Z_{in}} \quad (3.5)$$

$$E_2 = I_1 Z_p \quad (3.6)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} \quad (3.7)$$

ค่าสลิป (s) คือผลต่างของความเร็วซิงโครนัส (n_s) และความเร็วของโรเตอร์ (n_r) ดังสมการที่ (3.8)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความเร็วโรเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.9)

$$n_r = (1-s)n_s \quad (3.9)$$

จะได้ความสัมพันธ์ของค่ากำลังงานในส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามสมการ ดังนี้

$$P_{cus} = 3I_1^2 R_1 \quad (3.10)$$

$$P_{cur} = 3I_2^2 R_2 \quad (3.11)$$

$$P_{ag} = P_{ir} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{P_{cur}}{s} \quad (3.12)$$

$$P_{conv} = P_{dev} = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} = P_{ag} (1-s) \quad (3.13)$$

$$P_{core} = 3 \frac{E_2^2}{R_c} \quad (3.14)$$

$$T_{dev} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} \quad (3.15)$$

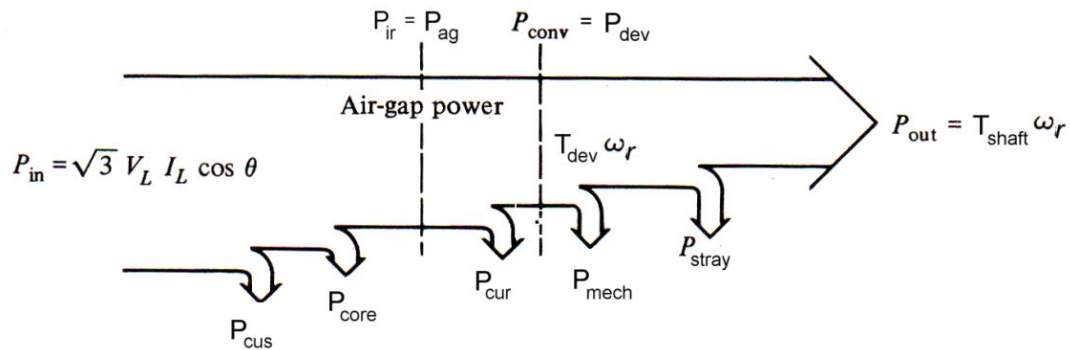
โดยที่	P_{cus}	คือกำลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss)
	P_{cur}	คือกำลังงานสูญเสียในตัวนำของโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)
	P_{ag}	คือกำลังงานในช่องว่างอากาศ (Air-gap Power)
	P_{ir}	คือกำลังงานป้อนเข้าในส่วนวงจรรโรเตอร์ (Rotor Input Power)
	P_{conv}	คือกำลังงานทางกลที่เปลี่ยนรูปจากกำลังงานทางไฟฟ้า (Convert Power)
	P_{dev}	คือกำลังงานทางกลที่มอเตอร์สามารถสร้างขึ้นได้ (Developed Power)
	P_{core}	คือกำลังงานสูญเสียในแกน (Core Loss)
	P_{mech}	คือกำลังงานสูญเสียทางกลเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (Mechanical Loss)
	T_{dev}	คือแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นได้ (Developed torque)

ค่าแรงบิดที่แกนและค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ

$$T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (3.16)$$

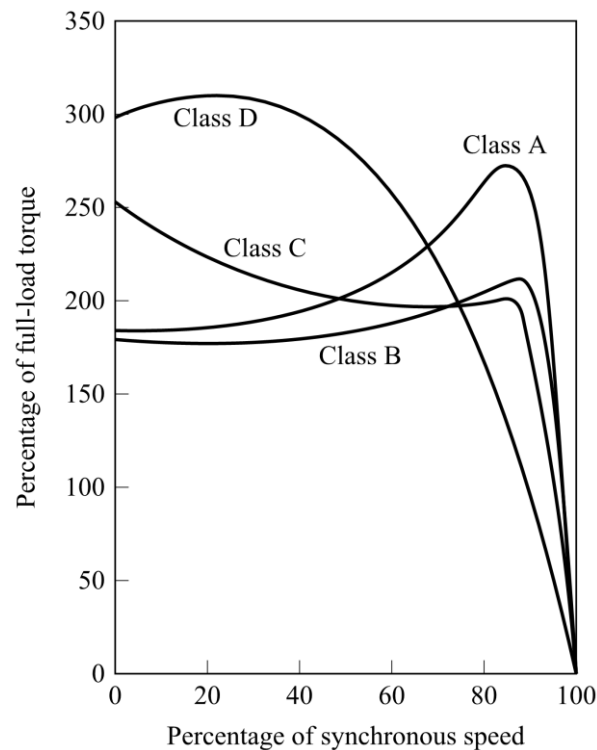
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (3.17)$$

กำลังงานในส่วนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

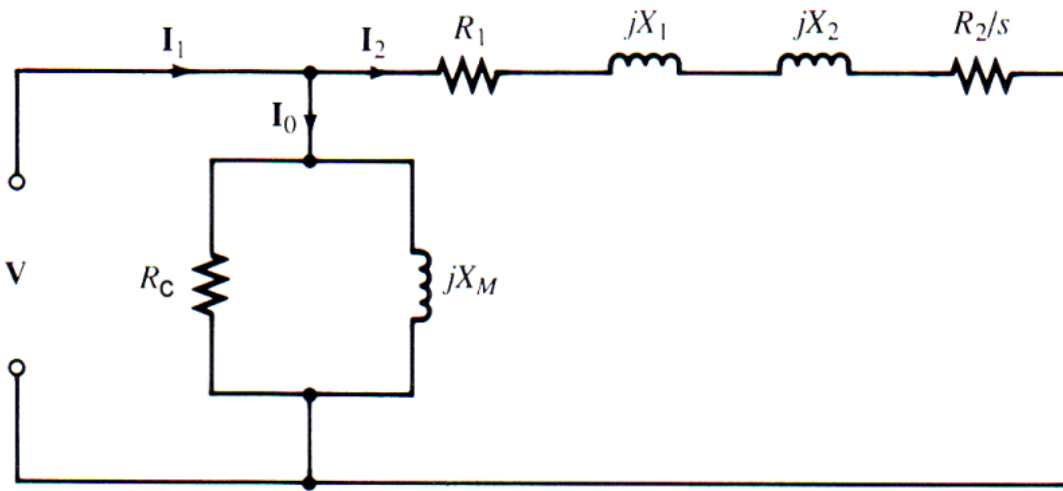
3.4.3 คุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็ว (Torque-Speed Characteristic)



รูปที่ 3.20 คุณลักษณะของความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากรูปที่ 3.20 มอเตอร์เหนี่ยวนำจะออกแบให้อยู่ใน Class A แรงบิดขณะเริ่มต้นหมุนเกิดขึ้นขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนจากลักษณะหยุดนิ่ง หลังจากนั้นความเร็วของมอเตอร์จะถูกเร่งขึ้นไปถึงจุดสูงสุดของกราฟเรียกว่าแรงบิดจุดดึง (Pull-up Torque) หลังจากนั้นผ่านจุดสูงสุดแล้ว แรงบิดจะลดลงมาอยู่ในช่วงการทำงานของมอเตอร์ขณะไม่มีการขับโหลดจนถึงจุดที่มีการขับโหลดเต็มที่ ซึ่งเรียกว่าเป็นช่วงทำงานปกติ (Normal Operating Range) ขณะมอเตอร์ขับโหลดที่ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Developed Torque) มอเตอร์ยังถือว่าไม่มีเสถียรภาพ แต่ถ้ามมีการเพิ่มโหลดมากเกินไปจุดนี้จะทำให้แรงบิดลดลงจากจุดสูงสุด และเป็นผลให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว ในที่สุดจะเสถียรและหยุดลง จึงเรียกว่าเป็นช่วงการทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ ค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างขึ้นได้ขึ้นกับค่าแรงดันและความถี่ไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อาจพิจารณาได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.21 กระแสโรเตอร์คำนวณได้ดังสมการที่ (3.11)

$$I_2 \cong \frac{V}{R_1 + jX_1 + R_2/s + jX_2} \quad (3.18)$$

$$|I_2| \cong \frac{|V|}{\sqrt{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (3.19)$$

แทนกระแสโรเตอร์สมการที่ (3.19) ลงในสมการที่ (3.13) จะได้กำลังทางกลที่มอเตอร์สร้างได้ คือ

$$P_{conv} = \frac{3V^2 R_2}{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2} \cdot \frac{(1-s)}{s} \quad (3.20)$$

แทนสมการที่ (3.20) ลงในสมการที่ (3.15) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้ ดังนี้

$$T_{dev} = \frac{(28.65)V^2 R_2/s}{\left[(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right] n_s} \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.21) แสดงให้เห็นว่าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้จะแปรผันตามค่าแรงดันยกกำลังสอง ถ้าให้พารามิเตอร์ตัวอื่นคงที่ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.22)

$$T_{dev} \propto V^2 \quad (3.22)$$

ดังได้กล่าวไว้แล้วคุณสมบัติของโหลดหลักในทางไฟฟ้าจะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะได้มีการทดสอบจริงและสร้างแบบจำลองสำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4