เอกสารเผยแพร่

NECTEC a member of NSTDA

เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า

ดร.ฤเชาว์ ภู่ประดับศิลป์
ทีมวิจัยมอเตอร์และการแปลงผันกำลังงาน (MAP)
กลุ่มวิจัยการควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง (ACERG)
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

image: Freepik.com

เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า : มอเตอร์ไฟฟ้า

ดร.ฤเชาว์ ภู่ประดับศิลป์

ทีมวิจัยมอเตอร์และการแปลงผันกำลังงาน (MAP) , เนคเทค สวทช.

หัวใจหลักที่สำคัญของยานยนต์คือระบบขับเคลื่อนซึ่งยานยนต์แบบเดิมที่ใช้น้ำมันมีเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นส่วนประกอบหลักของระบบ ในขณะที่ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มใช้งานเพิ่มมากขึ้นและเป็นอนาคตที่จะมาแทนที่ยานยนต์แบบเดิมที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ยานยนต์ไฟฟ้าใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานดังนั้นระบบขับเคลื่อนจึงมีลักษณะแตกต่างออกไปจากระบบเดิม ระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าซึ่งได้จากแบตเตอรี่ไปเป็นพลังงานกลในการหมุนล้อทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่และเบรกหยุดได้

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าต้องการมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงโดยสามารถทำงานในย่านความเร็วที่กว้าง ให้แรงบิดสูง ความน่าเชื่อถือสูงในการทนทานต่อการทำงานที่ผิดปกติ ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นต้น ทั้งนี้ มอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการใช้งานในแต่ละประเภทจึงจำเป็นต้องมีการเลือกจุดเด่นในด้านต่างๆ อย่างเหมาะสม สำหรับคุณลักษณะ จุดเด่นและจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่นิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า [1]–[5] มีรายละเอียดดังนี้

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor; IM) มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) โดยป้อนพลังงานไปที่ขดลวดบนสเตเตอร์ ทำให้เกิดสนามเหล็กหมุนที่สเตเตอร์ จากนั้น จึงเกิดการเหนี่ยวนำไปยังโรเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ มีใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องความแข็งแรงทนทานของโครงสร้าง สามารถทำให้โรเตอร์หมุนได้โดยป้อนไฟจากแหล่งจ่ายกระแสสลับได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุม หรือจะใช้งานร่วมกับระบบควบคุม (Controller) ได้เช่นกัน ซึ่งมีการศึกษาวิธีควบคุมมอเตอร์ที่สามารถใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐาน (Benchmark) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น ส่วนจุดด้อยของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำคือ มีประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะเมื่อต้องทำงานที่ความเร็วต่ำ มีแรงบิดเริ่มต้นต่ำ ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) มีค่าไม่สูงมาก กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในตอนเริ่มหมุนสูง มีปัญหาเรื่องการเสียหายของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในโรเตอร์ เป็นต้น ตัวอย่างมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1

Curtis HPEVS AC-51 [6]

DANA TM4 ASY-120 series, ASY-200 series [7]

รูปที่ 1 ตัวอย่างมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำพร้อมด้วยชุดควบคุมสำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

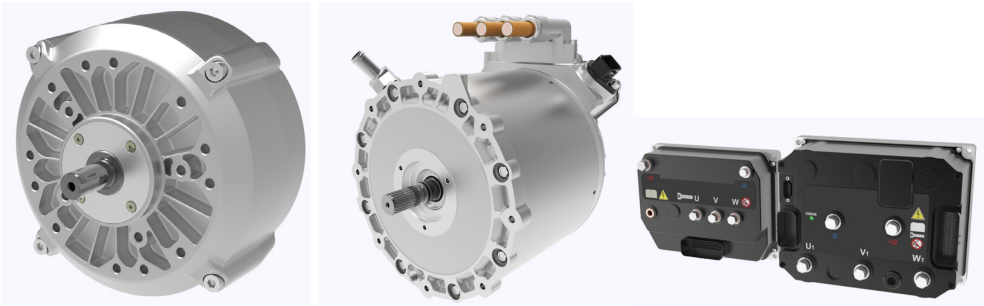
ตัวอย่างคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ สำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

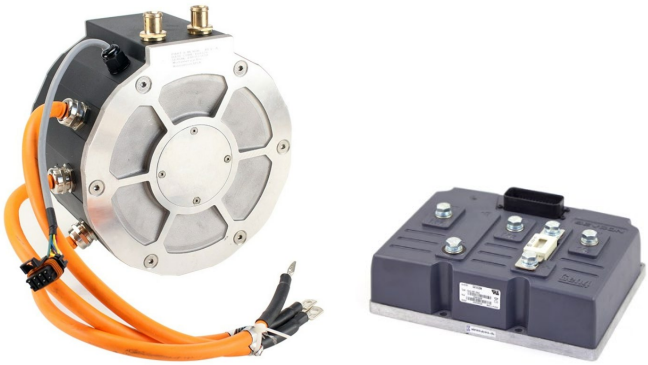
	Curtis HPEVS AC-51	ASY-120 series	ASY-200 series
Voltage range [V]	108-155	24-48	24-96
Peak torque [Nm]	146.4	5-30	30-200
Continuous power [W]	35 kW	Up to 2 kW	Up to 20 kW
Peak power [W]	65.99 kW	Up to 4 kW	Up to 50 kW
Rated speed [rpm]	10,000	5,000	7,500

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Motor; PMSM) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้หลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนและมีลักษณะโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ โดยป้อนกระแสไฟฟ้าสลับเข้าไปยังขดลวดของสเตเตอร์เช่นเดียวกัน ส่วนที่แตกต่างกัน คือโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้แม่เหล็กถาวรมาเป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยสร้างแรงสนามแม่เหล็ก ทำให้ความสูญเสียที่โรเตอร์ลดลง สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ามีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น

แรงบิดสูงขึ้น ซึ่งเป็นจุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา ทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งแรงเฉื่อย (Inertia) น้อย ทำให้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองอย่างทันทีทันใด (High dynamic response) สำหรับจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ ต้นทุนที่ค่อนข้างแพง เนื่องจากราคาของแม่เหล็กถาวรที่สูงเนื่องจากต้องใช้แม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของราคาแม่เหล็กในตลาดโลกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความเสี่ยงที่อาจจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนราคาของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยรวม อีกทั้งแม่เหล็กถาวรมีโอกาสที่จะสูญเสียคุณสมบัติของแม่เหล็ก เมื่อต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ามีขนาดเล็ก, ให้แรงบิดสูง, และมีประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ในงานยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2



DANA TM4 IPM-200 series, MV-275 series [7]



ME1616/Sevcon Gen4 [8]

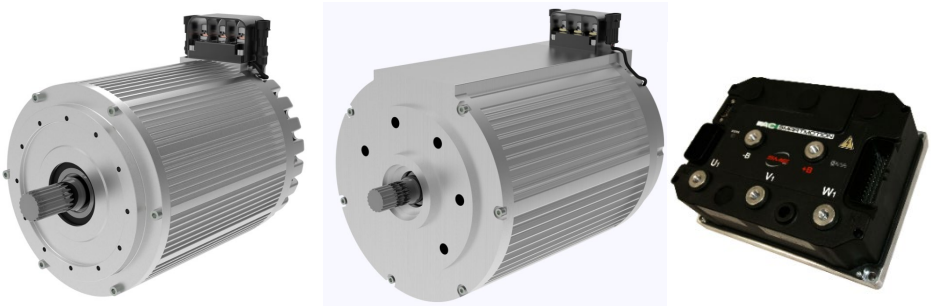
รูปที่ 2 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร พร้อมด้วยชุดควบคุม สำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า

ตัวอย่างคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวรสำหรับใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร สำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

	IPM-200 series	MV-275 series	ME1616/Sevcon Gen4
Voltage range [V]	24-96	130-450	48-120
Peak torque [Nm]	45-95	275	134
Continuous power [kW]	3-18	100	20
Peak power [kW]	5-35	205	20-55
Rated speed [rpm]	6,750	15,000	6,000

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ (Synchronous Reluctance Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้หลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนและมีลักษณะโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำและมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร โดยมีการป้อนกระแสไฟฟ้าสลับที่สเตเตอร์เช่นเดียวกัน แตกต่างกันที่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์จะไม่มีการใส่ขดลวด แท่งอลูมิเนียม หรือแม่เหล็กถาวร โดยโรเตอร์ของมอเตอร์ชนิดนี้ จะมีการออกแบบรูปร่างของตัวกั้นทางเดินสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux barrier) เพื่อให้เกิดแรงรีลักแตนซ์ (Reluctance force) ทำให้มอเตอร์หมุน โดยจุดเด่นของมอเตอร์ชนิดนี้ คือ ประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังจะใกล้เคียงหรือดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ แต่จะต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร ต้นทุนการผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำและมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร เนื่องจากโครงสร้างที่ง่ายของโรเตอร์ซึ่งไม่มีส่วนประกอบของขดลวด, แท่งอลูมิเนียม, หรือแม่เหล็กถาวรซึ่งมีราคาสูงเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ การกระเพื่อมของแรงบิด (Torque Ripples) จะมีค่าค่อนข้างสูง อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อน้ำหนักของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร ตัวอย่างของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ซึ่งได้มีการประยุกต์นำมาใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3



DANA TM4 SYR-200 series, SYR-260 series [7]

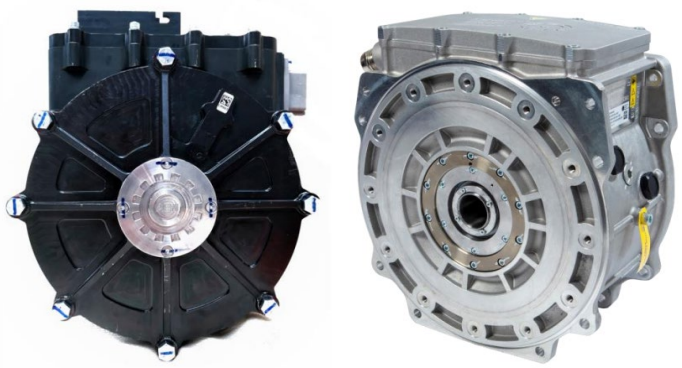
รูปที่ 3 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ พร้อมชุดควบคุม สำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

ตัวอย่างคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ สำหรับใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ สำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

	SYR-200 series	SYR-260 series
Voltage range [V]	24-96	24-96
Peak torque [Nm]	70-220	200-400
Continuous power [kW]	6-20	12-35
Peak power [kW]	2-50	19-70
Rated speed [rpm]	6,000	6,000

มอเตอร์ชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ (Switched Reluctance Motor; SRM) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่ได้ใช้หลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสามชนิดข้างต้น โดยแทนที่การป้อนไฟฟ้ากระแสสลับที่สเตเตอร์จะเปลี่ยนเป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมในขดลวดของแต่ละเฟสตามตำแหน่งของโรเตอร์ โดยโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะมีลักษณะเรียบง่าย เป็นลักษณะขั้วยื่น (Salient pole) ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วที่ต้องการ ซึ่งจุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ ต้นทุนการผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น เนื่องจากไม่มีการใช้ขดลวด, แท่งอลูมิเนียม, หรือแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ นอกจากนี้ รูปร่างโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะซับซ้อนน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงและมีความแข็งแรงทางกลมากกว่า เหมาะสำหรับใช้งานที่ความเร็วสูง สำหรับจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้คือ แรงบิดกระเพื่อม รวมทั้งการสั่นสะเทือน (Vibration) และเสียงรบกวน (Acoustic noise) ที่เกิดจากมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ มีค่าสูงมากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่นๆ อีกทั้งโครงสร้างของระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะแตกต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสามตัวข้างต้นและไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในรถบรรทุกไฟฟ้าที่วิ่งระยะทางไกลๆ ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ดังรูปที่ 4



Advanced Electric Machines HDSRM 150 series, HDSRM 300 series [9]

รูปที่ 4 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ ที่ถูกประยุกต์ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า

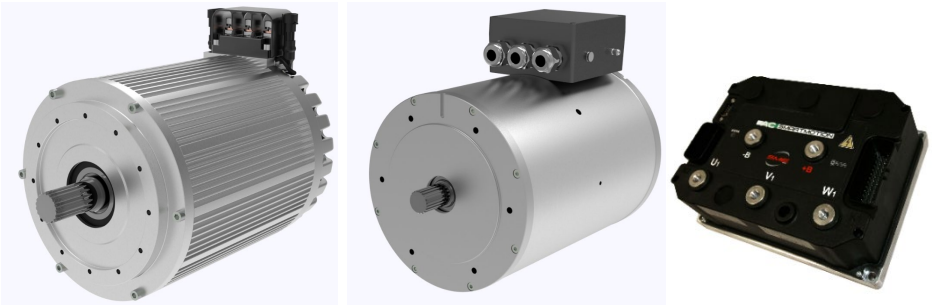
ตัวอย่างคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ สำหรับใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ สำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

	HDSRM 150 series	HDSRM 300 series
Voltage range [V]	700	700
Peak torque [Nm]	90	380-520
Continuous power [kW]	20-40	75
Peak power [kW]	40	166-214
Rated speed [rpm]	8,400	8,400

มอเตอร์ซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้หลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้แรงบิดที่เกิดจากแรงรีลักแตนซ์เป็นหลักและใช้แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรช่วยปรับปรุงให้ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ชนิดนี้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ กล่าวอีกนัยคือ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ เป็นการเลือกใช้จุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวรและมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์มาประกอบรวมกัน สำหรับจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้คือ ต้นทุนแม่เหล็กถาวรที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ แต่ต้นทุนนี้ จะต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร เนื่องจากใช้จำนวนแม่เหล็กถาวรที่น้อยกว่าและเลือกใช้แม่เหล็กที่มีคุณภาพไม่สูงมากนัก ตัวอย่างของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ที่มีใช้ในการยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5

MOLABO ISCAD V50 [10]



DANA TM4 SRI-200 series, SRI-300 series [7]

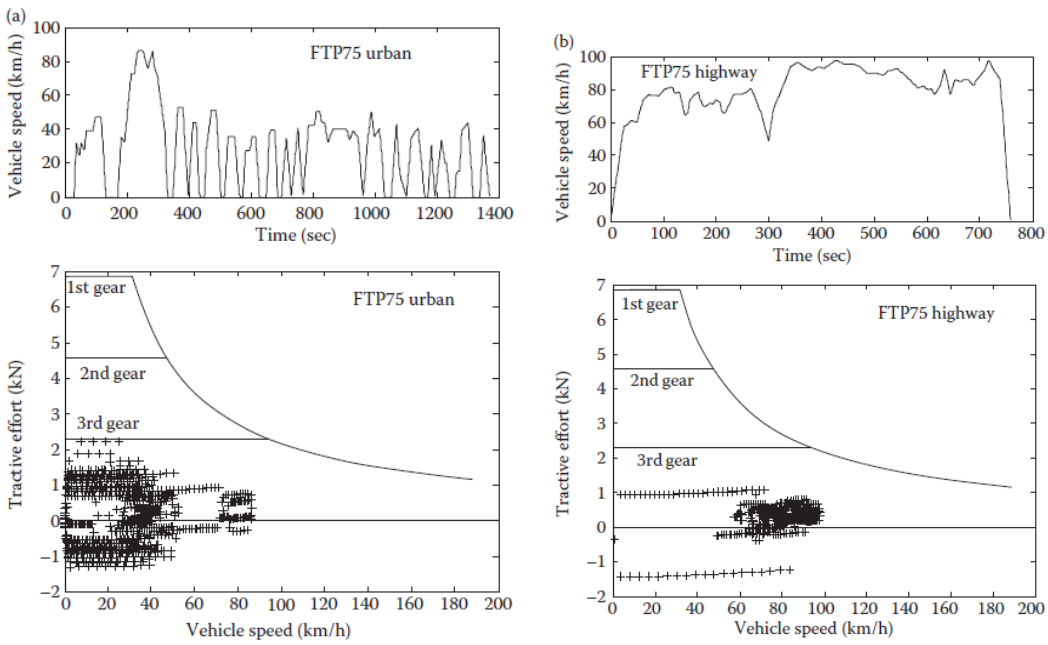
รูปที่ 5 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร ที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า

ตัวอย่างคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร สำหรับใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงในตารางที่ 5

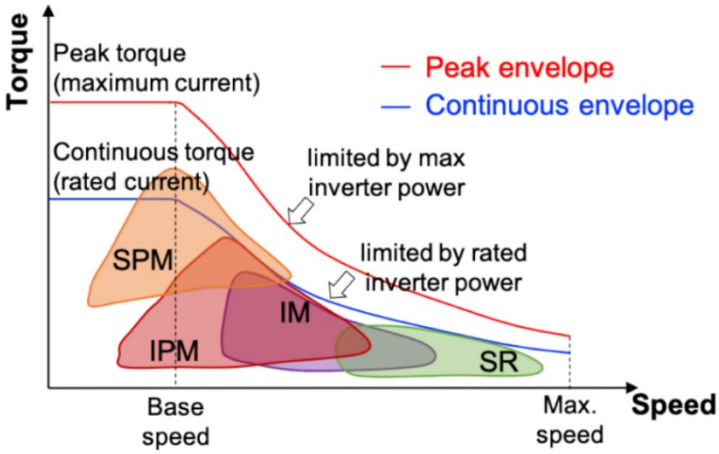
ตารางที่ 5 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร สำหรับงานยานยนต์ไฟฟ้า

	ISCAD V50	SRI-200 series	SRI-300 series
Voltage range [V]	48	48-144	48-144
Peak torque [Nm]	210	100-250	300-700
Continuous power [kW]	50	6-20	20-60
Peak power [kW]	80	14-70	30-70
Rated speed [rpm]	4,350	9,000	6,000

อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ขนาดกำลังและชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเลือกมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า สิ่งที่จำเป็นต้องทราบคือพฤติกรรมการขับขี่ (Driving cycle) [11], [12] ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงแรงบิดและกำลังไฟฟ้าที่ตัวรถต้องการในขณะที่ทำงานจริง เพื่อให้ได้ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลต่อน้ำหนักบรรทุกของรถและขนาดแบตเตอรี่ที่ตัวรถต้องการ ตัวอย่าง Driving cycle แสดงในรูปที่ 6 เป็น Driving cycle ของการขับขี่ในเมือง (FTP75 Urban) และทางไกล (FTP75 Highway) พบว่า พฤติกรรมการขับขี่ในกรณีที่วิ่งในเมืองและทางไกลจะแตกต่างกัน การขับขี่ในเมืองจะมีการเร่งและหยุดบ่อยกว่าการขับขี่ทางไกล เมื่อรู้ถึงลักษณะ Driving cycle ของการขับขี่แต่ละรูปแบบแล้วก็สามารถนำมาคำนวณหาจุดทำงานของรถ ขนาดแรงที่ต้องใช้ในการออกตัวหรือขับขี่ (Tractive effort force) ได้



รูปที่ 6 ตัวอย่าง Driving cycle (บน) และจุดทำงาน (ล่าง) ของการขับขี่ในเมือง Urban (ซ้าย) และการขับขี่ทางไกลบน Highway (ขวา) [13]



รูปที่ 7 ย่านการทำงานที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิด [5]

ในรูปที่ 7 แสดงย่านการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ให้ประสิทธิภาพดีสุด ซึ่งพบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร ทั้งแบบ SPM และแบบ IPM มีประสิทธิภาพการทำงานที่ย่านความเร็วต่ำได้ดีที่สุด ในขณะที่ย่านความเร็วปานกลางนั้น มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร IPM และมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด และในย่านการทำงานอยู่ในช่วงความเร็วสูง มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าว ผู้ใช้งานสามารถนำไปเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการได้มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Cheng, L. Sun, G. Buja, and L. Song, 'Advanced Electrical Machines and Machine-Based Systems for Electric and Hybrid Vehicles', *Energies*, vol. 8, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2015, doi: 10.3390/en8099541.

[2] M. Yildirim, M. Polat, and H. Kürüm, 'A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles', in *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Sep. 2014, pp. 218–223. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715.

[3] E. Agamloh, A. von Jouanne, and A. Yokochi, 'An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles', *Machines*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2020, doi: 10.3390/machines8020020.

[4] S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang, and L. Jiang, 'Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review', *Chin. J. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–17, Dec. 2017, doi: 10.23919/CJEE.2017.8250419.

[5] L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini, A. Sorniotti, and M. Cheng, 'Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116900–116913, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993235.

[6] 'Affordable Electric Vehicle Batteries & Components from Electric Car Parts Company', *Electric Cars Parts Company*. https://www.electriccarpartscompany.com/ (accessed Aug. 22, 2022).

[7] 'Electric motors', *Dana TM4*. https://www.danatm4.com/products/electric-motors/ (accessed Aug. 22, 2022).

[8] 'ME1616 Brushless 20 kW - 55 kW Liquid-Cooled IPM Motor 48-120V - EV PARTS'. https://www.electricmotorsport.com/me1616-brushless-65hp-liquid-cooled-ipm-motor-24-120v.html (accessed Aug. 22, 2022).

[9] A. E. Machines, 'HDSRM', *Advanced Electric Machines*. https://advancedelectricmachines.com/our-technology/hdsrm/ (accessed Aug. 22, 2022).

[10] 'Molabo'. https://www.energy-solutions.co.uk/products/molabo (accessed Aug. 22, 2022).

[11] E. Carraro, M. Morandin, and N. Bianchi, 'Optimization of a traction PMASR motor according to a given driving cycle', in *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Jun. 2014, pp. 1–6. doi: 10.1109/ITEC.2014.6861838.

[12] T. A. Huynh and M.-F. Hsieh, ‘Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles’, *Energies*, vol. 11, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061385.

[13] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9780429504884.