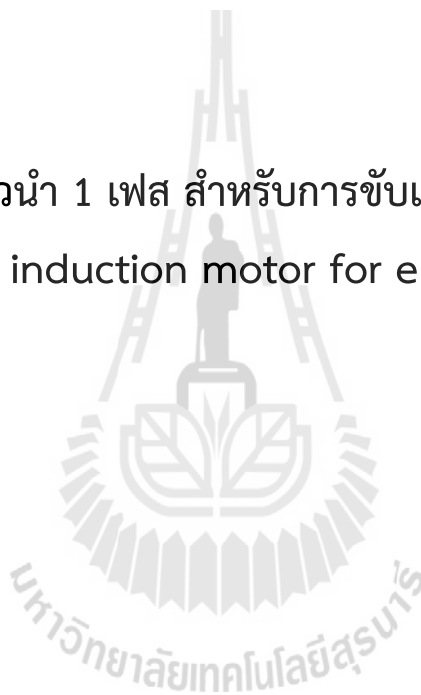




## รายงานการวิจัย

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า  
(Single-phase induction motor for electric vehicle)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

# มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (Single-phase induction motor for electric vehicle)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลรรวานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

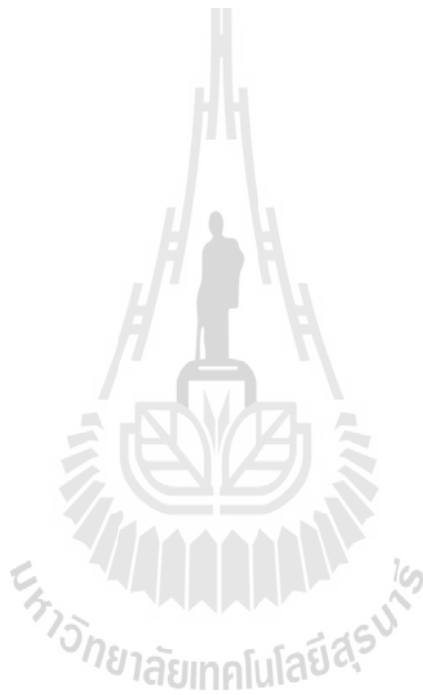
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

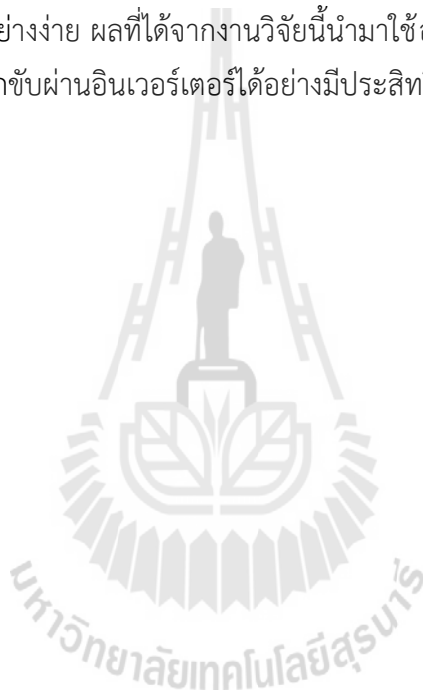
## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้ร่วมงานทุกท่าน และหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



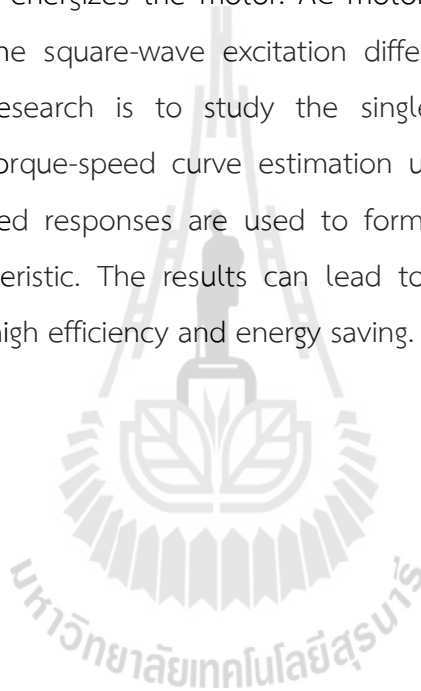
## บทคัดย่อ

รถขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ไฟฟ้ามีใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในสนามกอล์ฟ โรงงานอุตสาหกรรม หน่วยงานราชการ รัฐวิสาหกิจ หรือสวนสัตว์ เป็นต้น การขับเคลื่อนดำเนินการผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าดีซีที่ควบคุมง่าย แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น การบำรุงรักษายุ่งยาก ราคาแพง และขนาดต่อพิกัดโตกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเอซี เป็นต้น การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเอซีมาใช้งานต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟให้เป็นเอซี ที่มีสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สมรรถนะของมอเตอร์เอซีภายใต้แหล่งจ่ายไฟนี้ มีความแตกต่างจากกรณีที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายไฟรูปไซน์โดยตรง งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เอซีเฟสเดียวผ่านคุณลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ ภายใต้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม แบบจำลองในสถานะชั่วคราวถูกนำมาใช้งานเพื่อจำลองผลการจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายรูปสี่เหลี่ยม ผลตอบสนองที่ได้จะถูกนำมาใช้ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปของสมการอย่างง่าย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้นำมาใช้ออกแบบการขับเคลื่อนรถสกูตเตอร์ไฟฟ้าด้วยมอเตอร์เอซีเฟสเดียวที่ถูกขับผ่านอินเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยประหยัดพลังงานในอนาคตได้



## ABSTRACT

Electric vehicles driven by an on-board battery have been widely used in various applications, e.g. a golf cart in golf yard, a folk lift in an industrial plant or service car in zoo. Their traction drive conventionally employs a simply-controlled DC motor. However, there are still several disadvantages of using the DC motor, such as maintenance problems, expensive cost and larger size. Alternatively, to drive an AC motor by using the on-board battery requires a power inverter circuit in which a square-wave voltage is produced across its output terminal and then energizes the motor. AC motor characteristics especially the torque-speed curve under the square-wave excitation differ from that obtained by the sinusoidal excitation. This research is to study the single-phase AC induction motor characteristics through the torque-speed curve estimation under the square-wave power supply. Obtained torque-speed responses are used to formulate a simple expression to represent the motor characteristic. The results can lead to traction-motor design of an electric scooter vehicle with high efficiency and energy saving.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	2
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวคิด (Conceptual Framework).....	3
2.3 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	5
2.4 สรุป.....	12
บทที่ 3 การจำลองผลและการทดสอบ	
3.1 กล่าวนำ.....	13
3.2 การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เอซีที่จ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับ การขับเคลื่อนรถไฟฟ้า.....	13
3.3 แบบจำลองและการจำลองผลการขับเคลื่อนสก็ูตเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส.....	33
3.4 สรุป.....	37
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุป.....	38
4.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
บรรณานุกรม.....	39
ภาคผนวก ก. ผลผลิตจากงานวิจัย.....	41

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส.....	4
รูปที่ 2.2 รูปของ DC link inverter.....	4
รูปที่ 2.3 รายละเอียดของแบตเตอรี่.....	5
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว.....	7
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ดีซี.....	14
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	15
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส.....	18
รูปที่ 3.4 direct axis และ quadrature axis ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
รูปที่ 3.5 แหล่งจ่ายไฟรูบไซน์.....	21
รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟรูบสี่เหลี่ยม.....	21
รูปที่ 3.7 อินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส.....	22
รูปที่ 3.8 อินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	22
รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้แบตเตอรี่.....	23
รูปที่ 3.10 แหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้จากอินเวอร์เตอร์.....	23
รูปที่ 3.11 การส่งถ่ายแรงจากแกนสู่ล้อ.....	24
รูปที่ 3.12 เส้นโค้งของแรงบิดเทียบกับความเร็วของดีซีมอเตอร์.....	25
รูปที่ 3.13 เส้นโค้งของแรงบิดเทียบกับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	25
รูปที่ 3.14 โครงสร้างของแบตเตอรี่.....	26
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดและความเร็ว.....	26
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา.....	27
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา.....	27
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา.....	28
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา.....	28
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา.....	29
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและเวลา.....	29
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดตั้งและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย.....	30
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดตั้งและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่ายที่ใช้ตัวปรับ คูณแล้ว.....	30
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา.....	31
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา.....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 2 แหล่งจ่าย.....	32
รูปที่ 3.27 ทำการคูณด้วยตัวปรับคูณแล้ว.....	32
รูปที่ 3.28 สกอตเตอร์ไฟฟ้า.....	33
รูปที่ 3.29 การเคลื่อนที่บนพื้นเอียง.....	33
รูปที่ 3.30 ค่าความสูงต่ำของพื้นถนน.....	35
รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดและเวลา.....	35
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อนกับเวลา.....	35
รูปที่ 3.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกับเวลา.....	35
รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา.....	36
รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางกับเวลา.....	36
รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกับระยะทาง.....	36





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ผลกระทบจากสภาวะน้ำมันแพงนั้นได้เป็นปัญหาใหญ่สำหรับทุกคนที่ต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งสินค้าหรือว่าการเดินทางต่างๆที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะล้วนต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงทั้งสิ้น และราคาน้ำมันก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยทำให้เกิดปัญหาอย่างมากไม่ว่าจะเป็นเรื่องการขึ้นราคาสินค้าอุปโภคบริโภค ต่างๆ การขึ้นราคาคาร์ลโดยสารรวมถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมัน ทำให้ผู้บริโภคจ่ายเงินมากขึ้น อีกปัญหาหนึ่งที่เรากำลังเผชิญอยู่ในขณะนี้คือปัญหามลพิษทางอากาศและปัญหาโลกร้อนขึ้นเนื่องจากผลกระทบจากสภาวะเรือนกระจกที่มีสาเหตุมาจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มาจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้คำนึงถึงการขับเคลื่อนที่ไม่ต้องใช้น้ำมันเพื่อหลีกเลี่ยงจากสภาวะน้ำมันแพงและเพื่อลดปัญหามลพิษทางอากาศงานวิจัยนี้ใช้กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนรถยนต์โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสเป็นตัวต้นกำลัง ซึ่งมีข้อดีหลายอย่างคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสมีราคาถูก ง่ายต่อการบำรุงรักษา ราคาของตัวอินเวอร์เตอร์ (inverter) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 1 เฟสมีราคาถูกกว่า อินเวอร์เตอร์ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส การขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนาดเล็กโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่นั้นส่วนใหญ่ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อนเนื่องจากควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบได้ง่ายวงจรควบคุมไม่ซับซ้อนและสามารถใช้ไฟจากแบตเตอรี่ได้โดยตรงอย่างไรก็ตามด้วยเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาไปรวดเร็วทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ซับซ้อนและใช้งานได้กับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้การเชื่อมโยงกระแสตรงมีราคาต่ำลงประกอบกับการบำรุงรักษาที่ไม่ยุ่งยากทำให้งานประยุกต์บางอย่างได้นำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้งานแทนมอเตอร์กระแสตรงนอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ชุดอินเวอร์เตอร์จะพบว่าอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีวงจรที่ง่ายและราคาไม่แพง ประกอบกับการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส นิยมใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กการซ่อมบำรุงทำได้ง่ายดังนั้นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสมาใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนาดเล็กจึงมีความเป็นไปได้สูงและมีนัยสำคัญในทางเศรษฐศาสตร์เช่น รถไฟฟ้าใช้งานในสนามกอล์ฟที่มีน้ำหนักบรรทุกไม่มากนัก รถไฟฟ้าสำหรับรับส่งเอกสารหรือชิ้นงานขนาดไม่ใหญ่มากภายในโรงงานหรือรถไฟฟ้าสำหรับนำเที่ยวในสวนสาธารณะหรือตามสถานที่ท่องเที่ยวต่างๆ เป็นต้น งานวิจัยนี้จะทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิด ขนาดพิกัดของมอเตอร์ที่เลือกใช้ ย่านการทำงาน สมรรถนะของการขับเคลื่อนแบบต่างๆเพื่อวัตถุประสงค์ในการอนุรักษ์และประหยัดพลังงาน รวมถึงการสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับรถไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาเชิงเปรียบเทียบเชิงสมรรถนะการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ
- 1.2.2 ออกแบบและพัฒนาอินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส สำหรับรถที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า
- 1.2.3 ออกแบบและพัฒนาวิธีการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาาระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าพิกัดไม่เกิน 5 kW
- 1.3.2 รถไฟฟ้าที่ศึกษาเป็นชนิดขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง แบบ direct coupling
- 1.3.3 ระบบขับเคลื่อนใช้พลังงานจากแบตเตอรี่รถยนต์ที่ติดตั้งบนตัวรถ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้หลักและแนวความคิดสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์ (inverter) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส
- 1.4.2 ได้หลักและการออกแบบการจ่ายพลังงานที่เหมาะสมที่สุดของแบตเตอรี่
- 1.4.3 ได้แบบจำลองของรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เพื่อเป็นแนวทางที่พัฒนาต่อไป
- 1.4.4 ได้สิทธิบัตรสำหรับรถไฟฟ้าต้นแบบที่ขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสผ่านอินเวอร์เตอร์

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย
  - ศึกษาการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ
  - ศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของอินเวอร์เตอร์ควบคุมสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส
  - ศึกษาการคำนวณการใช้พลังงานอย่างน้อยที่สุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส
  - ศึกษาการและออกแบบจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่เพื่อใช้กับรถไฟฟ้า
  - ศึกษาาระบบการส่งกำลังของรถที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า

### 1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

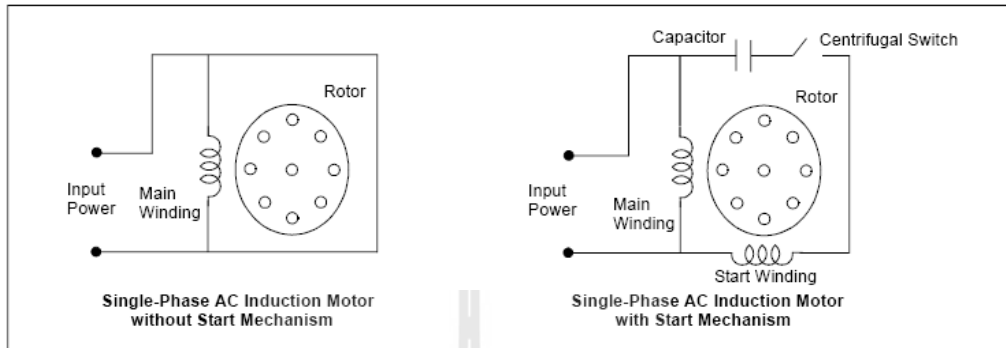
จากการทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์การขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ โดยย่อได้ ดังนี้ งานวิจัยของ Thomas B Gage (2000) ได้อธิบายถึงคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้ารวมทั้งหลักการเลือกใช้แบตเตอรี่เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการซึ่งรวมถึง กำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ ราคา และอายุการใช้งาน งานวิจัย Chan-Chiao Lin, Zoran Filipi, Yongsheng Wang, Loucas Louca, Huei Peng, Dennis Assanis, Jeffrey Stein (2001) ได้อธิบายถึงระบบของรถไฟฟ้าแบบผสมโดยรวม และอธิบายถึง อัลกอริทึมของการจัดการกำลังงานของรถไฟฟ้า งานวิจัยของ Amuliu Bogdan Proca และ Ali Keyhani (2002) ได้อธิบายถึงวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำรวมถึงค่าการสูญเสียต่างๆด้วย งานวิจัยของ E.R.Collins และ R.E. Achley (1991) ได้อธิบายถึงวิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการปรับความถี่ รวมถึงศึกษาถึงค่าแรงบิดที่ได้จากการหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำ, งานวิจัยของ Alexander L. Julian, Richard S. Wallace (1995) ได้อธิบายถึงลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ที่หลายความถี่ งานวิจัยของ Vanja Ambrožič Manuele Bertoluzzo, Giuseppe S. Buja (2005) ได้อธิบายถึงคุณลักษณะสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการป้อนไฟให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการควบคุมด้วย direct torque control (DTC) เทคนิค, งานวิจัยของ J. S. Lai, R. W. Young, and J. W. McKeever (1994) ได้อธิบายถึงการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของ DC link แบบ soft switch inverter ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์, งานวิจัยของ K.A. Corzine, M.W. Wielebski, F.Z. Peng, J. Wang (2003) ได้อธิบายถึง การควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบ case caded หลายๆระดับโดยใช้การต่อโหลดด้วย งานวิจัยของ Edward Randolph Collins ได้อธิบายถึงพฤติกรรมทอร์คและสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ขับเคลื่อนได้หลาย ๆ ความถี่

#### 2.2 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework)

รถไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนนี้มีส่วนประกอบที่ใช้ในการศึกษาดังนี้

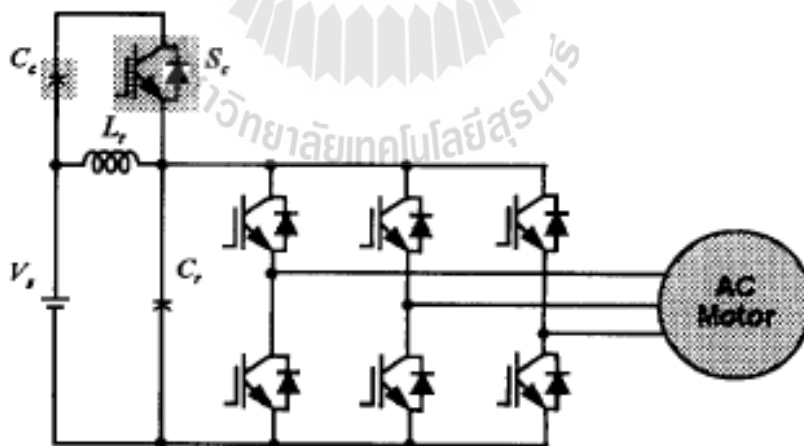
1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส (single-phase induction motor) เป็นอุปกรณ์แปลงผันพลังงานที่เป็นตัวขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในกรณีที่เราเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้น เพราะว่า มีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง (dc motor) และมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (three phase induction motor) คือ ราคาถูกเมื่อเทียบกับมอเตอร์ทั้งสองชนิด ดูแลรักษาง่าย และ

อินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่ใช้กับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส นั้น ราคาถูกกว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ส่วนการต่อเข้ากับเฟลานั้นเราใช้เป็นแบบ direct coupling ที่ขับเคลื่อนเฉพาะล้อหลัง ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 2.1



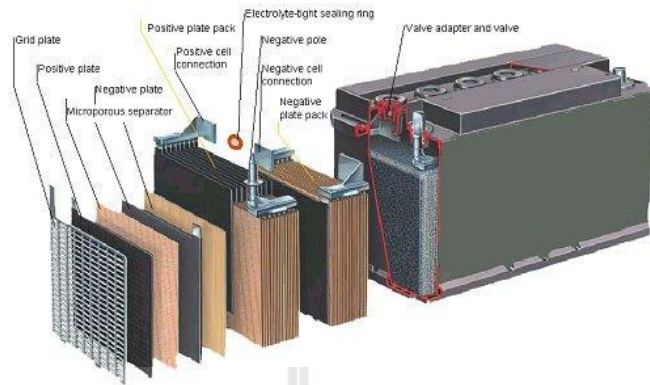
รูปที่ 2.1 วงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

2. อินเวอร์เตอร์ (inverter) มีวงจรดังรูปที่ 2.2 และตัวควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (controller) ที่ควบคุมทั้งขนาด (amplitude) และความถี่ (frequency) อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวเก็บประจุกระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันและความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 2.2 รูปของ DC link inverter

3. แบตเตอรี่ (battery) ดังรูปที่ 2.3 เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยมี อินเวอร์เตอร์ (inverter) เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแบตเตอรี่ไปเป็นกระแสสลับเพื่อไปจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ของรถยนต์ทั่ว ๆ ไป โดยต้องมีแผงวงจรสำหรับเก็บประจุไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของแบตเตอรี่

4. โหลด (load) ซึ่งเป็นน้ำหนักของรถยนต์ที่รวมทั้งน้ำหนักของที่จะบรรทุกและน้ำหนักคนนั่ง เราจะต้องพิจารณาค่าของโหลดที่เหมาะสม

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปกรอบแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสดังนี้

1. ศึกษาผลตอบสนองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ใช้แรงดันจากอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถจะให้ค่าแรงบิดที่จะขับเคลื่อนรถไฟฟ้านั้นเป็นอย่างไรและศึกษาขอบเขตของโหลดที่จะใช้โหลดขนาดเท่าใดจึงจะเป็นการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

2. ศึกษาการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสนั้นควรใช้แบตเตอรี่ขนาดเท่าใดที่จะเพียงพอกับความต้องการของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

3. ศึกษาการ coupling ของมอเตอร์กับเฟลาของรถไฟฟ้าที่เป็นแบบ direct coupling นั้นจะมีผลกระทบต่อการทำงานของรถไฟฟ้าหรือไม่

4. ศึกษาผลกระทบของการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่มีแรงดันขาเข้าเป็น square wave ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์

## 2.3 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากการศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าส่วนประกอบของงานมีหลายส่วนประกอบกัน ผู้จัดทำงานวิจัยจึงได้แบ่งเนื้อหาของการศึกษาออกเป็นหัวข้อย่อย ๆ ดังต่อไปนี้

### 2.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โครงสร้างสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่หยุดนิ่งหรือสเตเตอร์ (stator) และส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ (rotor) ในส่วนของสเตเตอร์ทำจากแผ่นเหล็กบาง ๆอัดซ้อนเข้าด้วยกันและทำเป็นช่องสลอต (slot) ไว้บรรจุขดลวด โดยจะมีจำนวนของขั้วแม่เหล็ก เป็นตัว

กำหนดค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์ เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวประกอบด้วย 2 ชุด ได้แก่ ขดลวดหลัก (main winding) และขดลวดช่วย (axially winding) ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel-cage rotor) โครงสร้างของโรเตอร์ ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอกและถูกทำให้เป็นช่องสล็อต เพื่อสำหรับฝังหรือบรรจุตัวนำซึ่งเป็นแท่งทองแดงหรืออะลูมิเนียม 1 แท่งต่อ 1 ช่องสล็อตโดยตรงปลายสุดของตัวนำโรเตอร์จะถูกต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกัน โดยแท่งตัวนำที่วางอยู่ในช่องสล็อตจะวางขนานกับเพลลาแต่จะมีลักษณะการวางเฉียงเล็กน้อยเพื่อลดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (magnetic hum) และการยึดตัวของโรเตอร์อีกชนิดหนึ่งของโรเตอร์ คือ โรเตอร์แบบพันขดลวด (wound rotor) โรเตอร์ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะพบในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งมีการพันแบบขดลวดแบบสองชั้น ขดลวดภายในจะมีการต่อแบบสตาร์โดยปลายทั้ง 3 ปลายจะต่อกับสลีปริ่งที่ติดอยู่กับเพลลาของโรเตอร์ โดยโรเตอร์แบบพันขดลวดนี้สามารถนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์มาต่อเข้ากับสลีปริ่งเพื่อเพิ่มแรงบิดขณะสตาร์ทมอเตอร์ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวซึ่งในโครงสร้างของมอเตอร์จะมีสวิทช์ทางกลเรียกว่า สวิทช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal switch) ทำหน้าที่เชื่อมต่อและปลดขดลวดหลักออกจากขดลวดช่วย

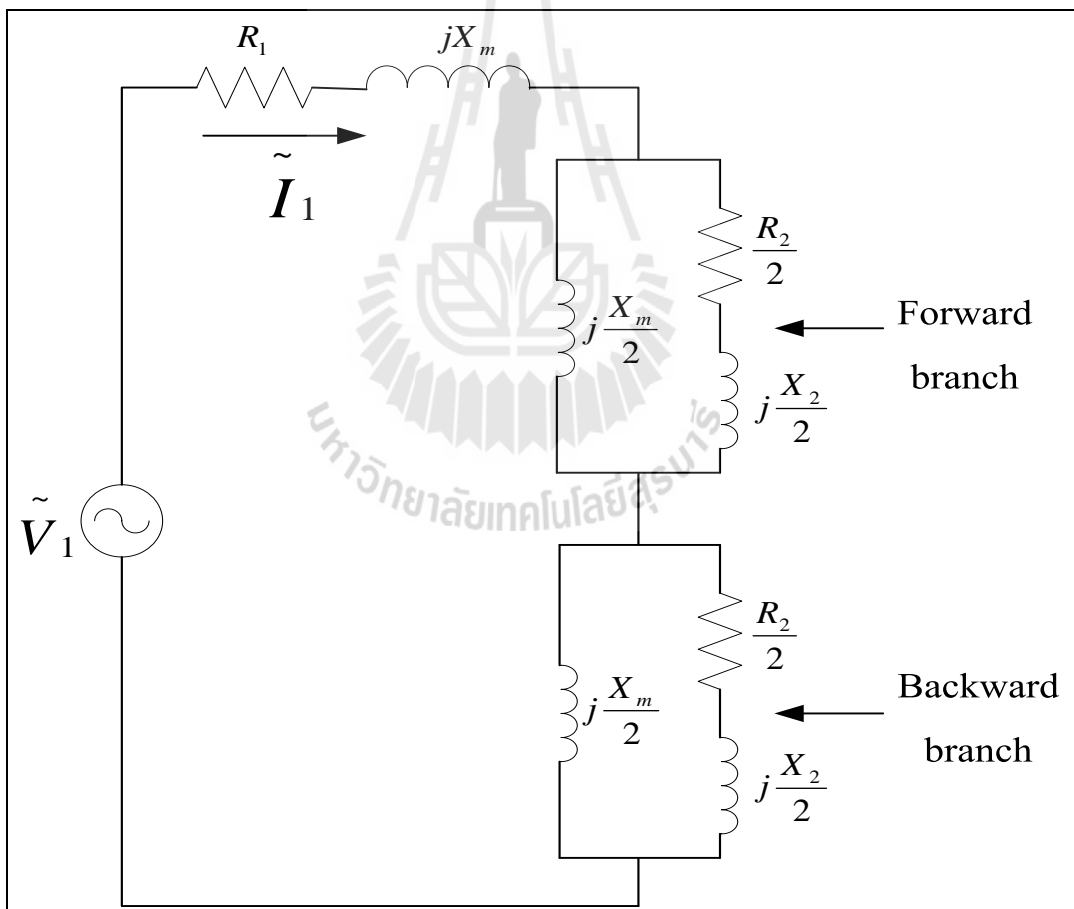
### 2.3.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือการอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในตัวมอเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กลักษณะเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับสเตเตอร์และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลักและดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสจะอาศัยความต่างเฟสของกระแสที่ออกจากแหล่งจ่าย โดยลักษณะดังกล่าวจะเหมือนว่าเกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบ ๆ สเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเนื่องจากสเตเตอร์มีการพันขดลวดแบบเฟสเดียว และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสเดียว ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์จะไม่ใช้สนามแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสเหมือนกับมอเตอร์แบบสามเฟส จึงเป็นสาเหตุให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางกลับไปกลับมาอยู่ที่สเตเตอร์ตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (double revolving-field theory) จึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวไม่สามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง โดยมอเตอร์จะหมุนก็ต่อเมื่อทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งก่อนแล้ว วิธีดังกล่าวอาจใช้มือหรือเครื่องมือช่วยหมุนโรเตอร์ โดยหนึ่งในวิธีนั้นคือการต่อขดลวดช่วยขนานกับขดลวดหลักโดยการวางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิด

สนามแม่เหล็กหมุนเหนี่ยวนำให้โรเตอร์หมุนทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทและขดลวดช่วยจะถูกปลดออกจากวงจรของสเตเตอร์โดยการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส

### 2.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์แบบเฟสเดียวนั้นจากการศึกษาพบว่า มีการวิเคราะห์อยู่ 2 แบบคือ พิจารณาแบบสภาวะคงตัว (steady-state model) และแบบสภาวะพลวัต (dynamic model) ในกรณีของแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวมีการพิจารณาวงจรสมมูลจากทฤษฎีสถาแม่เหล็กหมุนคู่ ทำให้วงจรเสมือนของโรเตอร์ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและเส้นแรงแม่เหล็กหมุน (Bhag, Guru, Huseyin, and Hiziroglu, 2001) ไปด้านหลัง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถนำมาวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ในสภาวะคงตัวได้ เช่น ค่าแรงบิดเทียบกับความเร็ว (torque-speeds curve) ค่ากำลังสูญเสียของ

มอเตอร์ เป็นต้น แบบจำลองแบบพลวัตเป็นแบบจำลองอีกแบบหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์ในช่วงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเขียนอยู่ในรูปของสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์ สมการแรงดันจะประกอบด้วยผลรวมของแรงดันคร่อมความต้านทานของขดลวดกับอนุพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก (flux linkages) ฟลักซ์แม่เหล็กนี้เกิดจากผลคูณของกระแสกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด จากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่สเตเตอร์จะมีขดลวดอยู่ 2 ชุดซึ่งวางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นในการพิจารณาแบบจำลองจึงมีการอาศัยทฤษฎีสองแกน (dq-frame theory) ดังนั้นสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์จะปรากฏอยู่ที่ทั้งบนแกนดี (d-axis) และแกนควิ (q-axis) โดยที่สมการแรงดันของแต่ละแกนจะอยู่ในรูปแบบผลรวมของแรงดันคร่อมความต้านทานของขดลวดกับอนุพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก ในส่วนของแกนอ้างอิงเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แต่ที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือการอ้างอิงที่ขดลวดหลักโดยอาศัยอัตราส่วนของขดลวดประสิทธิผลระหว่างขดลวดช่วยกับขดลวดหลัก นอกเหนือจากแบบจำลองจากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำยังมีแบบจำลองของพฤติกรรมทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยพิจารณาตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน จากแบบจำลองทางพลวัตจะแสดงผลตอบสนองในสถานะชั่วคราว (Krause, Waszynsek, and Acott, 1987) หลังจากได้ทำการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้มีการศึกษาการใช้งานแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากบทความ ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้ในการศึกษาเรื่องสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจำเป็นต้องพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อทราบถึงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบต่างๆ ด้วยเหตุนี้ผู้ทำการวิจัยจึงได้มีการศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในรูปแบบต่างๆ แบบจำลองที่ได้ทำการศึกษา มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบแสดงผลในรูปสถานะคงตัว (steady state) และแบบที่แสดงผลในรูปของสถานะชั่วคราว (transient) แบบจำลองในสถานะคงตัวซึ่งได้พัฒนาจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน (revolving filed) ทำให้ได้วงจรมูลของมอเตอร์ โดยพิจารณาแบบ 2 เฟสไม่สมดุล อ้างอิงที่แกนหยุดนิ่ง (stationary frame) ในแบบจำลองนี้จะใช้อัตราส่วนระหว่างขดลวดหลักกับขดลวดช่วยเป็นตัวเชื่อมของค่าแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วยทั้งส่วนของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง (symmetrical component) และมีการพิจารณาการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ผลจากแบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปพิจารณาค่าเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว (Collins and Ashley, 1991) ต่อมาแบบจำลองจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนได้ถูกนำมาใช้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetomotive force) ของขดลวดหลักและขดลวดช่วย จากแบบจำลองดังกล่าวค่าพารามิเตอร์จะอยู่ในรูปของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ สมการของแรงบิดจะอยู่ในรูปของกระแสของขดลวดหลัก (Mademlis, Kioskeridis, and Theodoulidis, 2005) มีการพิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวเป็นมอเตอร์แบบสองเฟส โดยพิจารณาจากทฤษฎีสองแกน (dq-



frame theory) ที่แกนอ้างอิงหยุดนิ่ง(dq stationary frame) โดยเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ โดยค่าแรงดันดังกล่าวเกิดจากผลคูณของกระแสกับความต้านทานรวมกับค่าฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ ส่วนสมการของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะอยู่ในรูปของผลคูณของค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุคูณกับกระแสที่สเตเตอร์ (Abdel-Rahim and Shaltout, 2002) จากการพิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองเฟสจากทฤษฎีสองแกน เมื่อนำไปใช้พิจารณาร่วมกับการทำงานของสวิทช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal switch) มอเตอร์เมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่าความเร็วเท่ากับ 75เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส ทำให้ได้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส (Correa, Lima, and Silva, 2002)

### 2.3.4 การควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำในปัจจุบันเป็นที่นิยมเนื่องจากคุณสมบัติหลายประการที่ดีกว่ามอเตอร์กระแสตรง แต่การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นไปได้ยาก จึงมีการพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เราจึงสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้มากขึ้นโดยวิธีควบคุมมี 2 วิธี ได้แก่ การแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ที่ความถี่คงที่ และการควบคุมความถี่ของแรงดันสเตเตอร์

การแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ที่ความถี่คงที่ (Variable Voltage, Fixed Frequency: VVFF) วิธีนี้จะใช้หลักการของการควบคุมเฟส (phase control) เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีราคาถูก แต่ระบบมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียในโรเตอร์ของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามสลลิป (Slip : s) กำลังสูญเสียในสเตเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสในสเตเตอร์เมื่อสลลิปเพิ่มขึ้น การควบคุมแรงดันนี้ประสิทธิภาพของมอเตอร์รวมทั้งแรงบิด (torque) จะลดลงมากโดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ ๆ เนื่องจากมอเตอร์ต้องทำงานที่ค่าสลลิปสูง ดังนั้นถ้าดำเนินการควบคุมแรงดันด้วยวิธีนี้จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกมากขึ้นทั้งใน AC line และในตัวมอเตอร์ ทำให้กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้น อีกทั้งตัวประกอบกำลังของระบบจะลดลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยข้อเสียดังกล่าวทำให้การใช้งานของระบบควบคุมความเร็วโดยวิธีควบคุมแรงดันถูกจำกัดเฉพาะในระบบที่มีขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งต้องการราคาถูกกว่าประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลัง โดยการควบคุมแรงดันสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการปรับแก้ของขดลวดหลักและการใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวควบคุม (Metwally, 2001)

การควบคุมความถี่ของแรงดันสเตเตอร์ เป็นวิธีการปรับค่าความเร็วของมอเตอร์วิธีหนึ่ง มอเตอร์จะถูกจ่ายด้วยแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ ค่าความถี่ที่ถูกปรับจะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันในรูปของอัตราส่วน จึงส่งผลให้ได้วิธีการควบคุมความถี่ 2 แบบ ได้แก่

- 1) การควบคุมโดยการรักษาอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่ให้คงที่

เมื่อเราต้องการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำได้โดยการเพิ่มค่าของแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟ แต่เมื่อเพิ่มค่าจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ (air-gap flux) ลดลงเนื่องจากการลดลงของกระแสแม่เหล็ก (magnetizing current) ทำให้แรงบิดสูงสุด (maximum torque) ลดลง เพื่อรักษาระดับของกระแสแม่เหล็กและแรงบิดสูงสุดดังกล่าวให้คงที่ จำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนของแรงดันของแหล่งจ่ายต่อความถี่ให้มีค่าคงที่ ส่งผลให้เกิดการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ค่าแรงบิดคงที่ (constant torque drive) อย่างไรก็ตาม การควบคุมแบบนี้ทำได้ในย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วพิกัด (rated speed)

## 2) การควบคุมโดยการรักษาอัตราส่วนของแรงกับความถี่ไม่คงที่

ในกรณีที่ต้องการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ย่านความเร็วสูงกว่าความเร็วพิกัด แรงบิดไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์เกิดสภาวะโหลตเกิน ดังนั้น การควบคุมมอเตอร์ในลักษณะนี้ใช้วิธี Variable Voltage, Variable Frequency (VVVF) การควบคุมความเร็วในย่านนี้กำลังงานสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่ แต่แรงบิดมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ข้อดีของการใช้วิธีการควบคุมแรงดันคือ สามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่ของมอเตอร์ แรงบิดเริ่มต้น (starting torque) ของมอเตอร์มีค่าสูง นอกจากนี้การควบคุมความเร็วโดยใช้การควบคุมแรงดันทำได้โดยไม่ต้องมีการป้อนกลับหรือถ้าระบบป้อนกลับเกิดขัดข้องก็จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายที่รุนแรงต่อระบบ แต่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการควบคุมความเร็วรอบเท่านั้น

จากการศึกษาทฤษฎีของการขับเคลื่อนข้างต้น ได้มีการศึกษาเทคนิคการขับเคลื่อนโดยเน้นการขับเคลื่อนที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในการศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของมอเตอร์ เช่น ค่าแรงบิด ค่าความเร็ว เป็นต้น เทคนิคการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายเพื่อเปรียบเทียบผลของเทคนิคการปรับแรงดันให้ค่ากำลังให้คงที่ (constant power dissipation: CPD) กับเทคนิคการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่ให้คงที่ (constant V/f) โดยผลที่ได้วิธี CPD จะให้สมรรถนะของแรงบิดที่สูงและสามารถใช้งานที่ย่านของความถี่กว้างกว่าวิธี Constant V/f แต่ในช่วงความถี่ 26 Hz ถึง 60 Hz กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์พบว่า วิธี Constant V/f จะมีค่าน้อยกว่าวิธี CPD และค่าแรงดันที่ใช้ วิธี constant V/f จะมีค่าน้อยกว่าวิธี CPD ที่ความถี่เดียวกัน (Collins and Ashley, 1991) การควบคุมแรงดันเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนที่มีผลต่อคุณสมบัติของมอเตอร์ ปรับแรงดันอินพุตโดยวิเคราะห์ผ่านการควบคุมตัวประกอบกำลัง โดยค่ากำลังอินพุตมีค่าน้อยที่สุดและประสิทธิภาพมีค่าสูงที่สุดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) มีค่าเหมาะสมที่สุด การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังจะคำนวณจากมุมต่างของกระแสและแรงดัน (phase shift) โดยค่าประสิทธิภาพจะแสดงออกมาในรูปของกำลังเอาต์พุต เมื่อมีการปรับค่าแรงดันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับมุมจุดชนวน (firing delay angle) ของไตรแอก

เพื่อให้ได้แรงบิดตามที่โหลดต้องการและยังรักษาค่าตัวประกอบกำลังได้ (Benbouzid, Beguenane, and Capolino, 1996) ผลการสำรวจโครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวแบบต่าง ๆ เช่น AC/AC Chopper Cycloconverter Single Phase PWM inverter Two Phase PWM inverter เพื่อนำไปใช้ในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในการขับเคลื่อนจากการปรับความถี่โดยใช้กฎอัตราส่วนต่อความถี่มีค่าคงที่เพื่อการพัฒนาสมรรถนะของแรงบิดที่ย่านความถี่ต่ำ (Ba-thunya, Khopkar, Kexin Wei, and Toliyat, 2001) การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจากแหล่งจ่ายแบบสองเฟสผ่านชุดขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์มอดูเลตแบบพัลส์ การสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์จะเลือกใช้เทคนิค selective harmonic elimination (SHE) โดยพิจารณาจุดจุดของอนุกรมสวิตช์ เพื่อจ่ายให้ชุดขดลวดแต่ละชุดขดลวดโดยผลที่ได้จะนำมาพิจารณาผลของสมรรถนะของมอเตอร์ในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว จากผลของการจำลอง พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสองเฟสให้สมรรถนะที่ดีกว่าแบบเฟสเดียว (Abdel-Rahim and Shaltout, 2002)

### 2.3.5 การประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำอยู่ในรูปแบบของเทคนิคการควบคุมการทำงานของชุดขับเคลื่อนเพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือมีกำลังงานการสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยวิธีการที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้น (six-step) ที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เทคนิคดังกล่าวคือการควบคุมความถี่ของโรเตอร์ (perturbing rotor frequency control) และการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่ (V/f control) โดยนำเสนอผลในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์ของความเร็ว โดยค่าประสิทธิภาพจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของค่าสลิป ค่าความถี่และค่าแรงดันของแหล่งจ่าย (Parviz and Jimie, 1991) การลดพลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบสภาวะคงตัวที่อยู่ในรูปการพิจารณาแบบสองแกน โดยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะใช้การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GA) หาค่าพิกซ์แม่เหล็กของโรเตอร์ ที่มีค่าเหมาะสมที่สุด จากผลการทดลองพบว่าระบบที่มีการหาค่าความเหมาะสมด้วย GA ค่ากำลังงานสูญเสียจะน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการหาค่าความเหมาะสมด้วย GA นอกจากนี้จำนวนประชากร จำนวนรุ่นของการปรับปรุงสายพันธุ์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพในช่วงเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ (Poirier, hribi, and Kaddouri, 2001) ปัญหาของประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เป็นแบบ symmetrical component model ในการควบคุมจะใช้ไตรแอกในการควบคุมแรงดันของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้มอเตอร์ (voltage control) การหาค่าความเหมาะสมใช้ความสัมพันธ์ของกระแส

ของขดลวดหลักและกระแสของขดลวดช่วยเพื่อหาค่าความเหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการคงที่ของแรงบิด(Mademlis, Kioskeridis, and Theodoulidis, 2005)

## 2.4 สรุป

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยกล่าวถึงโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การประหยัดพลังงานโดยเน้นไปที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้



## บทที่ 3

### การจำลองผลและการทดสอบ

#### 3.1 กล่าวนำ

การศึกษาลักษณะสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อนำมาใช้งานขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ต้องศึกษาสมบัติแรงบิดและความเร็วรอบเป็นสำคัญ เนื่องจากงานระบบขับเคลื่อนเป็นงานที่ต้องใช้แรงฉุดในการเริ่มออกตัวและการเร่งความเร็วเพื่อไต่ทางชัน หรือจุดโหด ในบทนี้ได้ทำการจำลองผลและทดลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติดังกล่าวและผลของการนำไปใช้งานกับรถสกูตเตอร์ไฟฟ้า (electric scooter) ดังนี้

#### 3.2 การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เอซีที่จ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

รถขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ไฟฟ้ามักใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในสนามกอล์ฟ โรงงานอุตสาหกรรม หน่วยงานราชการ รัฐวิสาหกิจ หรือสวนสัตว์ เป็นต้น การขับเคลื่อนดำเนินการผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าดีซีที่ควบคุมง่าย แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น การบำรุงรักษายุ่งยาก ราคาแพง และขนาดต่อพิกัดโตกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเอซี เป็นต้น การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเอซีมาใช้งานต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟให้เป็นเอซี ที่มีสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สมรรถนะของมอเตอร์เอซีภายใต้แหล่งจ่ายไฟนี้ มีความแตกต่างจากกรณีที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายไฟรูปไซน์โดยตรง งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เอซีผ่านคุณลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ภายใต้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม แบบจำลองในสถานะชั่วคราวถูกนำมาใช้งานเพื่อจำลองผลการจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายรูปสี่เหลี่ยม ผลตอบสนองที่ได้จะถูกนำมาใช้ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปของสมการอย่างง่าย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้นำมาใช้ออกแบบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์เอซีที่ถูกขับผ่านอินเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยประหยัดพลังงานในอนาคตได้ มอเตอร์ดีซีพิกัด 1.86 kW มอเตอร์เอซีเฟสเดียวพิกัด 0.26 kW และมอเตอร์เอซีสามเฟสพิกัด 0.37 kW ถูกนำมาใช้ทดสอบ เพื่อประเมินสมรรถนะแรงบิด-ความเร็วรอบ ผลจากการทดสอบ พบว่า คุณลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วรอบจากการป้อนไฟโดยใช้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม มีรูปร่างคล้ายกับการป้อนด้วยแหล่งจ่ายรูปไซน์ ต่างกันเพียงขนาดแรงบิดสูงสุดเท่านั้น ทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดได้โดยใช้ตัวปรับคูณที่เหมาะสม

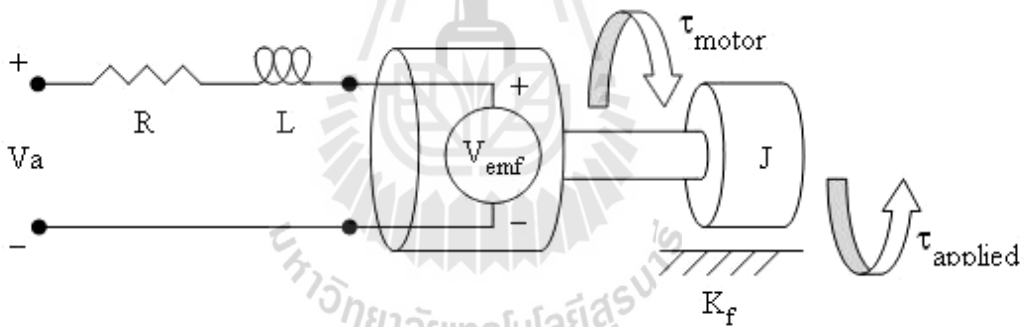
##### 3.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลซึ่งมีการใช้งานในปัจจุบันอย่างหลากหลาย การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน แต่ละ

ประเภทซึ่งดูว่าเหมาะกับงานประเภทใดบ้างเช่น งานที่ใช้ความเร็วรอบสูง งานที่ต้องการแรงบิดมากๆ งานที่ต้องการควบคุมความเร็ว เป็นต้น มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามกระแสไฟที่ใช้ งานคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวและมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ในที่นี้ได้กล่าวถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 3.2.1.1 มอเตอร์ดีซี

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามลักษณะของสเตเตอร์ คือ ขดลวดสนามแม่เหล็ก (wound field) และแบบขั้วแม่เหล็กถาวร ถ้าแบ่งตามขดลวดสนามแม่เหล็ก จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการกระตุ้นของ สนามแม่เหล็ก คือ แบบกระตุ้นแยก (Separately Excited) และ แบบกระตุ้นตัวเอง (Self-Excited) หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าดีซีนั้นอาศัยหลักการของปฏิกิริยา ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามแม่เหล็กและ ขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวขดลวดตัวนำนั้น แรงที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ในการจำลองผลนั้นได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของมอเตอร์ดีซีและจากโครงสร้างของมอเตอร์ดีซีนั้น



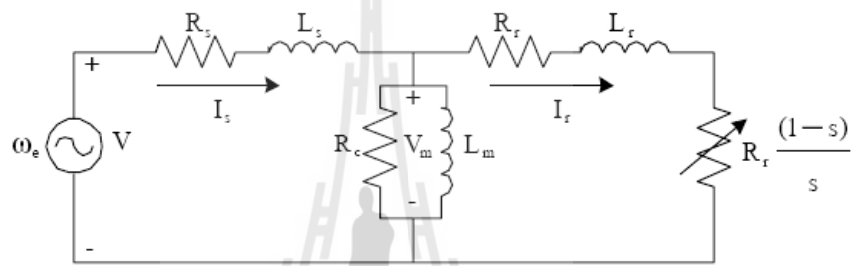
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ดีซี

จะสามารถเขียนสมการสถานะ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & -K_b \\ L & L \\ K_m & -K_f \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ L & 0 \\ 0 & -1 \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ \tau_{applied} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

### 3.2.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งแบบ 3 เฟส และ แบบเฟสเดียวนั้น จากการศึกษาพบว่ามีการวิเคราะห์ที่อยู่ 2 แบบ คือ พิจารณาแบบสภาวะคงตัว (steady-state model) และ แบบสภาวะพลวัต (dynamic model) โดยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสจะพิจารณาวจรสมมูลแบบ ต่อเฟสที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันที่สเตเตอร์กับแรงดันที่โรเตอร์ด้วยอัตราส่วนของรอบประสิทธิผล (effective turn ratio) โดยจะมีการย้ายค่าพารามิเตอร์ของโรเตอร์ไปอยู่บนสเตเตอร์ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลสมการกระแสของโรเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถอธิบายได้โดยสมการต่อไปนี้

$$I_r = \frac{V_{th}}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right) + j(X_{th} + X_r)} \quad (3.2)$$

$$V_{th} = \frac{X_m}{X_{ls} + X_m} V_s \quad (3.3)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m (R_{ls} + jX_{ls})}{R_{ls} + j(X_{ls} + X_m)} \quad (3.4)$$

$$T_{ind} = \frac{3V_{th}^2 R_r / s}{\omega_s \left[ \left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right]} \quad (3.5)$$

แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นสามารถเขียนสมการสถานะให้อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt}[x] = [A][x] + [B][u] \quad (3.6)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 [G_1] &= \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \\
 [G_2] &= \begin{bmatrix} L_{ms} \cos \theta_r & L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_r & L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_r \end{bmatrix} \\
 [G_3] &= \begin{bmatrix} L_{ms} \cos \theta_r & L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_r & L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_r \end{bmatrix} \\
 [G_4] &= \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \\
 [H_1] &= \begin{bmatrix} -R_{ls} & 0 & 0 \\ 0 & -R_{ls} & 0 \\ 0 & 0 & -R_{ls} \end{bmatrix} \\
 [H_2] &= \begin{bmatrix} \omega_r L_{ms} \sin \theta_r & \omega_r L_{ms} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_r L_{ms} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_r L_{ms} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_r L_{ms} \sin \theta_r & \omega_r L_{ms} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_r L_{ms} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_r L_{ms} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_r L_{ms} \sin \theta_r \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 [H_3] &= \begin{bmatrix} \omega_r L_{ms} \sin \theta_r & \omega_r L_{ms} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \omega_r L_{ms} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \omega_r L_{ms} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \omega_r L_{ms} \sin \theta_r & \omega_r L_{ms} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \omega_r L_{ms} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \omega_r L_{ms} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \omega_r L_{ms} \sin \theta_r \end{bmatrix} \\
 [H_4] &= \begin{bmatrix} -R_{lr} & 0 & 0 \\ 0 & -R_{lr} & 0 \\ 0 & 0 & -R_{lr} \end{bmatrix} \\
 [M] &= \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 [x] &= [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs} \quad i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr} \quad \omega_r \quad \theta_r]^T \\
 [u] &= [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs} \quad v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr} \quad -\frac{P}{2J}(T_E - T_L) \quad 0]^T \\
 [G] &= \begin{bmatrix} G_1 & G_2 \\ G_3 & G_4 \end{bmatrix} \\
 [H] &= \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_3 & H_4 \end{bmatrix} \\
 [A] &= \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \\
 [B] &= \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}
 \end{aligned}$$

โดยที่  $R_{ls}$  คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของสเตเตอร์ ( $\Omega$ )

$R_{lr}$  คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของโรเตอร์ ( $\Omega$ )

$L_{ls}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสของสเตเตอร์ (H)

$L_{lr}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสของโรเตอร์ (H)

$L_{ms}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (H)

$\theta$  คือ ตำแหน่งของโรเตอร์ (rad)

$\omega$  คือ ความเร็วของโรเตอร์ (rad/s)

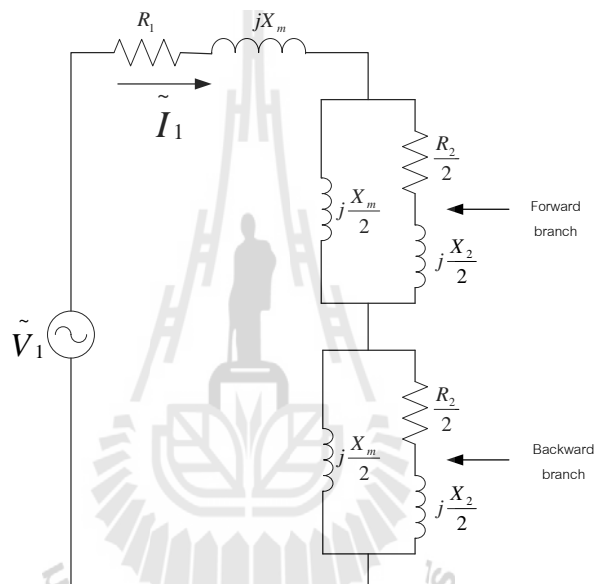
$[ i_{as}, i_{bs}, i_{cs} ]$  คือ กระแสทั้ง 3 เฟสของสเตเตอร์

$[ i_{ar}, i_{br}, i_{cr} ]$  คือ กระแสทั้ง 3 เฟสของโรเตอร์

$J_m$  คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

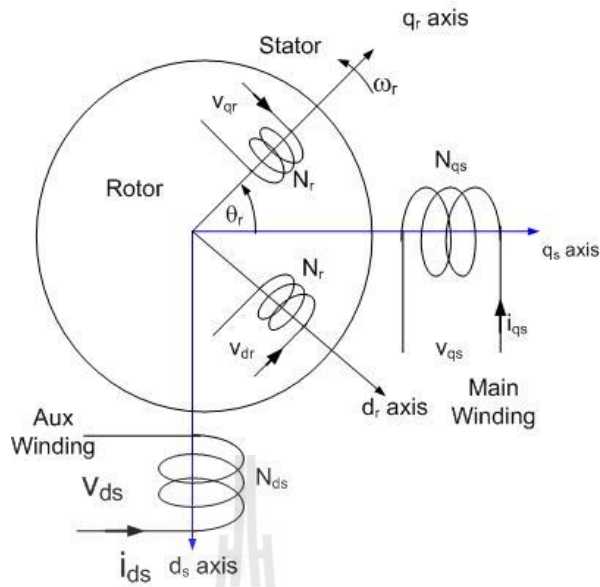
### 3.2.1.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

ในกรณีของแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวมีการพิจารณาวงจรสมมูลจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ทำให้วงจรเสมือนของโรเตอร์ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และ เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปด้านหลัง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวประกอบด้วย ขดลวดหลัก ขดลวดช่วยที่วางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าบนส่วนที่อยู่กับที่ (stator) ชุดขดลวดตัวหมุน (rotor winding) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะใช้แบบจำลองแบบพลวัตซึ่งต้องอาศัยการพิจารณามอเตอร์แบบ 2 แกน ซึ่งประกอบด้วย direct axis (แกน d ) และ quadrature axis (แกน q ) ซึ่งทั้ง 2 แกนจะตั้งฉากกัน ดังนั้นด้วยลักษณะการวางตัวของชุดขดลวดหลักและชุดขดลวดช่วยทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน จึงสามารถพิจารณาโดยใช้หลักการของทฤษฎี 2 แกนได้ ในที่นี่จะพิจารณาที่แกนอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame)



รูปที่ 3.4 direct axis และ quadrature axis ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิจารณาค่าแรงดันของขดลวดที่บนสเตเตอร์และโรเตอร์ จะได้ตามสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqr} & L_{drds} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ทำการแปลงค่าแรงดัน ค่ากระแส ในโรเตอร์ ( $V_{qr}, V_{dr}, i_{qr}, i_{dr}$ ) ไปอยู่บน สเตเตอร์ จากสมการแรงดันของ ทั้งโรเตอร์ และ สเตเตอร์จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ 0 & r_{ds} & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r \\ -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & r_r & 0 \\ -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{lqs} + L_{mqs} & 0 & L_{mqs} \cos \theta_r & -L_{mqs} \sin \theta_r \\ 0 & (L_{lds} + L_{mqs}) & L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r \\ L_{mqs} \cos \theta_r & L_{mqs} \sin \theta_r & (L_{lr} + L_{mqs}) & 0 \\ -L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r & 0 & (L_{lr} + L_{mqs}) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

โดยที่

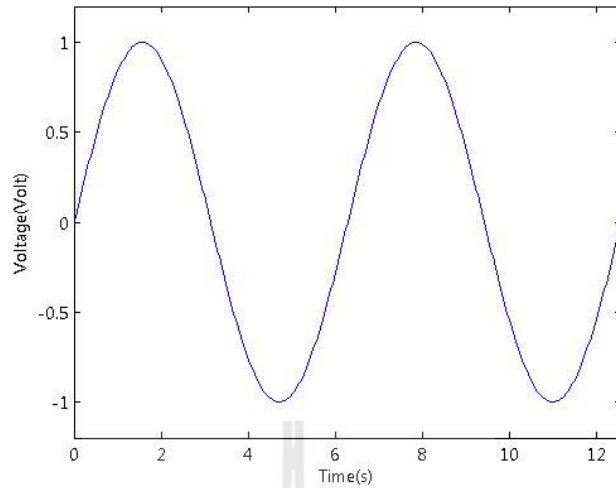
- $r_{qs}$  คือ ความต้านทานของขดลวดหลัก
- $r_{ds}$  คือ ความต้านทานของขดลวดช่วย
- $L_{lqs}$  คือ ความเหนี่ยวนำค้ำของขดลวดหลัก
- $L_{lds}$  คือ ความเหนี่ยวนำค้ำของขดลวดช่วย
- $L_{lr}$  คือ ความเหนี่ยวนำค้ำที่โรเตอร์
- $L_{mqs}$  คือ ความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก
- $i_{qs}$  คือ กระแสที่ผ่านต้านทานของขดลวดหลัก
- $i_{ds}$  คือ กระแสที่ผ่านต้านทานของขดลวดช่วย

### 3.2.2 แหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งเป็นต้นกำลังของการขับเคลื่อนต่าง ๆ แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีด้วยกัน 3 ประเภท

#### 3.2.2.1 แหล่งจ่ายไฟเอซี

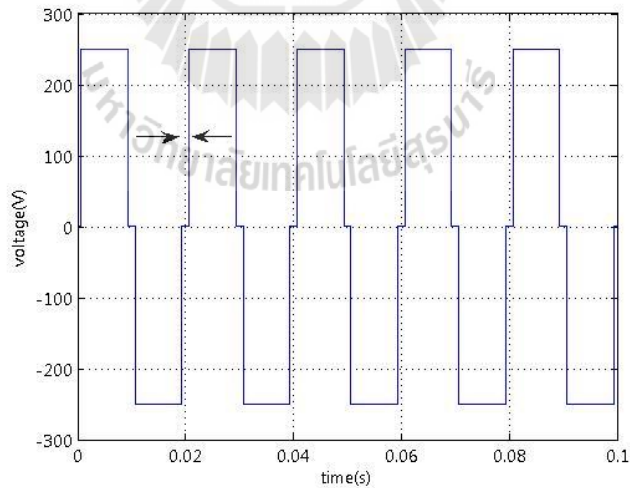
แหล่งกำเนิดไฟเอซีหรือไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้มาจากโรงไฟฟ้านั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าแปรค่าเป็นฟังก์ชันของไซน์ ด้วยความถี่ 50 รอบต่อวินาที (Hz) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นรูปคลื่นสัญญาณไซน์ในอุดมคติ



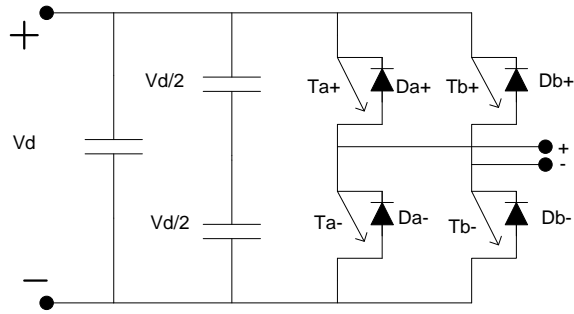
รูปที่ 3.5 แหล่งจ่ายไฟรูปไซน์

### 3.2.2.2 แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม

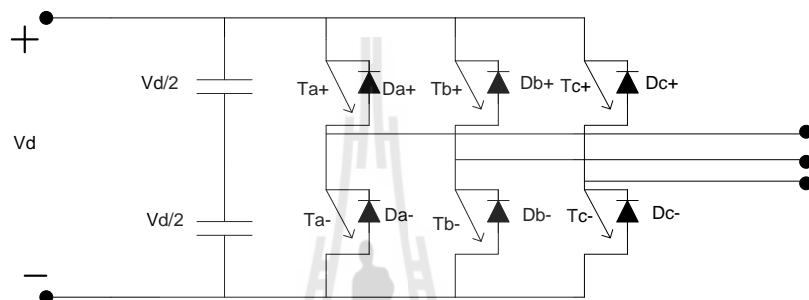
แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเอชเอ็น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.6 ซึ่งรูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่นที่ได้จากการแปลงของอินเวอร์เตอร์ซึ่งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์นั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.7 อินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส



รูปที่ 3.8 อินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยที่ค่าแรงดันเฉลี่ย ( $V_{rms}$ ) ของรูปคลื่นนั้น มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ โดยมีค่า delta เป็นตัวกำหนดความกว้างของแหล่งจ่ายไฟรูบสี่เหลี่ยม จากความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเฉลี่ยนั้นจะสามารถประยุกต์สมการดังต่อไปนี้

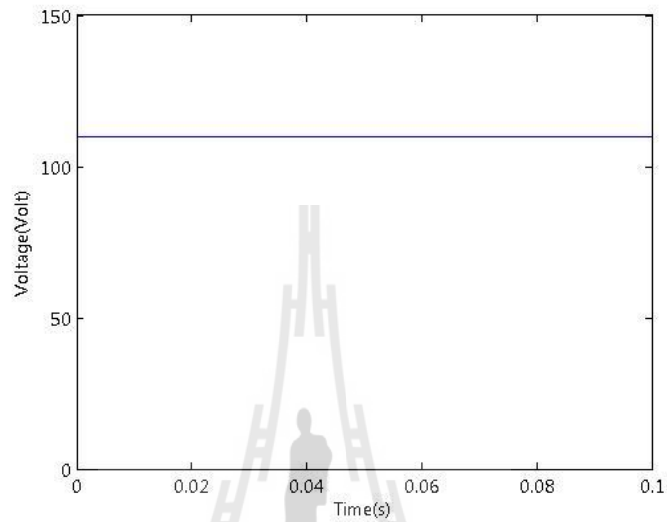
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_t)^2 dt} \tag{3.9}$$

ให้เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับค่า  $\delta$  (delta) เพื่อคำนวณหาค่าของ  $\delta$  โดยการกำหนดค่าแรงดันสูงสุด ( $V_m$ ) และ  $V_{rms}$  รูปแบบของสมการมีดังนี้

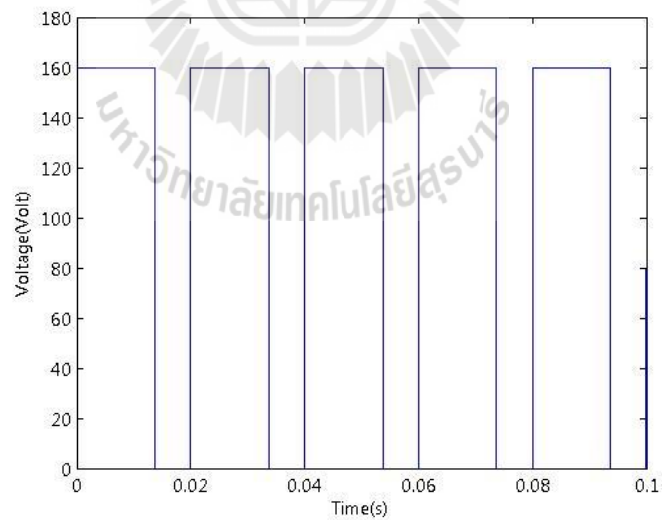
$$\delta = \frac{T}{4} \left( \frac{1 - V_{rms}^2}{V_m^2} \right) \tag{3.10}$$

### 3.2.2.3 แหล่งจ่ายไฟดีซี

แหล่งจ่ายไฟที่เป็นดีซีนั้นมีสองประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งได้ถูกออกแบบให้มีค่าของ แรงดันที่เท่ากันระหว่างแหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้จากแบตเตอรี่โดยตรง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.9 กับ แหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีรูปคลื่นดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.10



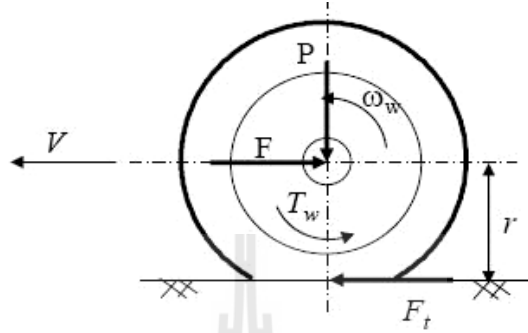
รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้แบตเตอรี่



รูปที่ 3.10 แหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้จากอินเวอร์เตอร์

### 3.2.3 การคำนวณเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงฉุดดึง (tractive effort) กับความเร็ว

การหาความสัมพันธ์ของแรงฉุดดึง (tractive effort) เทียบกับความเร็วที่เป็นเชิงเส้นนั้นมีหลายองค์ประกอบซึ่งแรงฉุดหรือแรงดึงจะเป็นส่วนที่สำคัญในการที่จะแสดงให้เห็นถึงการส่งถ่ายแรงฉุดไปยังล้อของรถไฟซึ่งเรียกว่าแรงฉุดลากดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การส่งถ่ายแรงจากแกนสู่ล้อ

สมการที่แสดงถึงแรงฉุดลากของแกนที่ส่งถ่ายไปยังล้อนั้นแสดงให้เห็นในสมการต่อไปนี้

$$TE = \frac{\text{Torque}}{r} \quad (3.10)$$

$$V = \omega r \quad (3.11)$$

โดยที่  $TE$  คือ แรงฉุดลาก

$Torque$  คือ แรงบิดของมอเตอร์

$r$  คือ รัศมีของล้อ

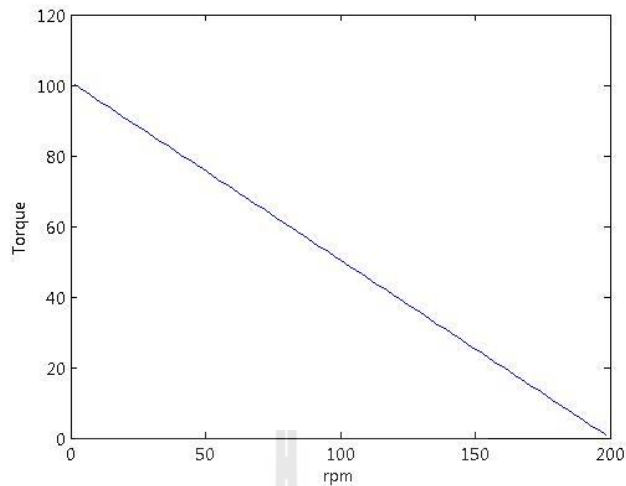
$v$  คือ ความเร็วเชิงเส้น

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม

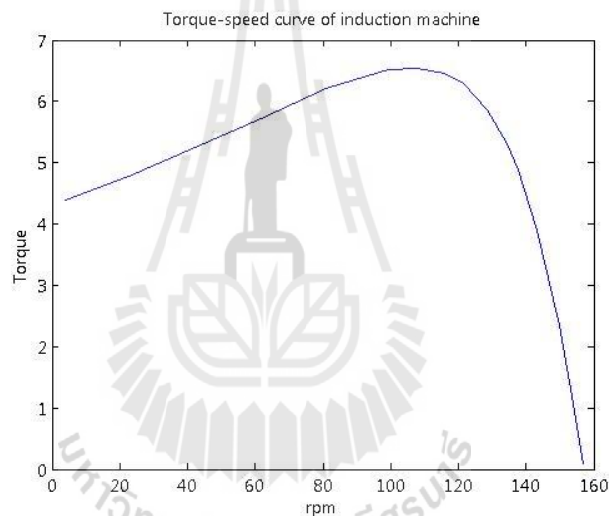
เมื่อได้เส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงบิดเทียบกับความเร็วเชิงมุมดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.12

- 3.13 ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลัง





รูปที่ 3.12 เส้นโค้งของแรงบิดเทียบกับความเร็วของดีซีมอเตอร์

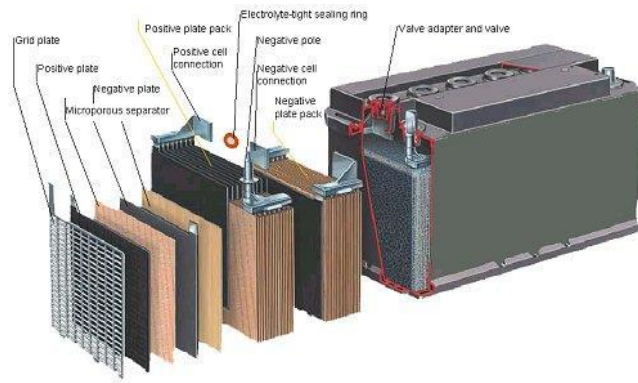


รูปที่ 3.13 เส้นโค้งของแรงบิดเทียบกับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 3.2.4 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานที่สะดวกต่อการใช้งานแต่ก็มีข้อเสียคือ ข้อจำกัดในด้านปริมาณของพลังงาน การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ที่เป็นชนิดตะกั่วกรดนั้นสามารถแบ่งตามการใช้งานได้ 2 ประเภท

- 1.แบบธรรมดา (conventional) เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้โลหะตะกั่วผสมพลวงสำหรับใช้งานทั่วไป
2. แบบไม่ต้องบำรุงรักษา (maintenance Free)



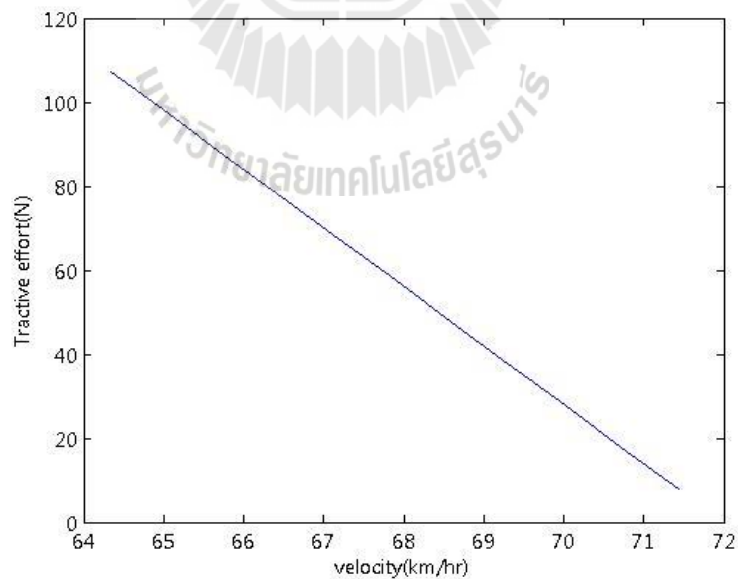
รูปที่ 3.14 โครงสร้างของแบตเตอรี่

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดในการป้อนพลังงาน ให้แก่ระบบขับเคลื่อน เนื่องจากว่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดนี้ใช้งานได้ทนทานต่อการใช้งานและทนการประจุได้หลายครั้ง

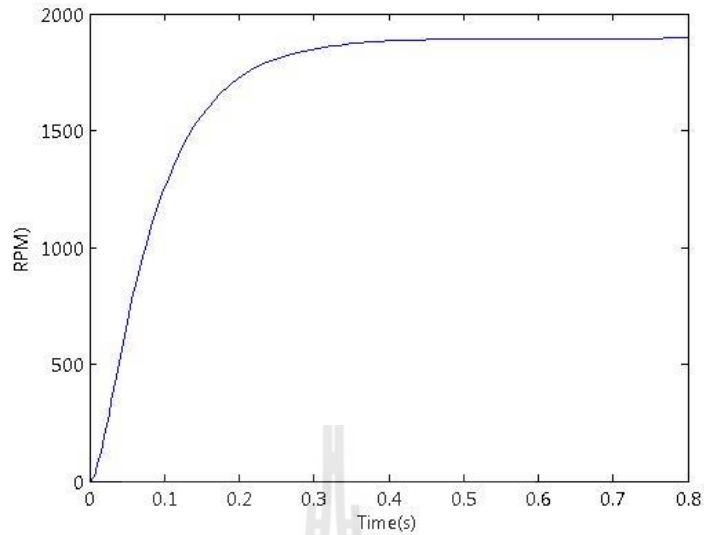
### 3.2.5 ผลการจำลอง

3.2.5.1 การจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นต้นกำลังโดยที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

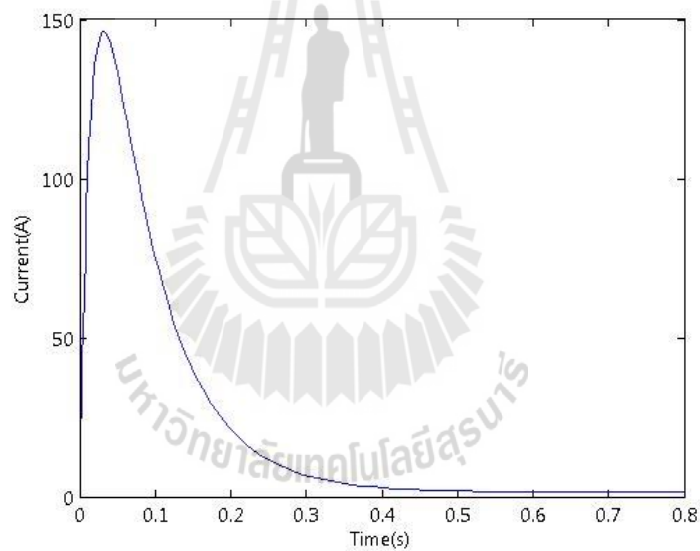
$$R = 0.6 \, \Omega, K_b = 0.55 \, \text{V-s/rad}, K_m = 0.55 \, \text{kg-m/A}^2, K_f = 0.004 \, \text{N-m-s}, L = 8e-3 \, \text{H}, J = 0.0465 \, \text{kg-m-s}^2, V = 110 \, \text{Volt}$$



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดและความเร็ว



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา



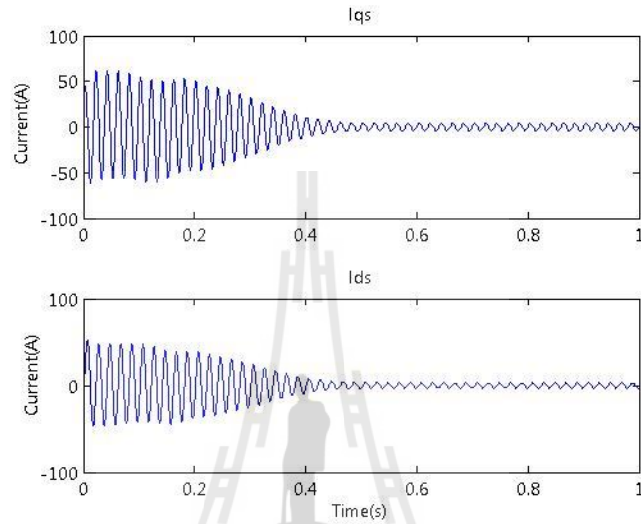
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

ในการจำลองผลนี้ได้ทำการป้อนโพลต์ตั้งแต่ 0-100 เพื่อให้มอเตอร์นั้นหมุนตัวเปล่าจนกระทั่งหยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนั้น จะได้ผลดัง รูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดและความเร็วและรูปที่ 3.16 และ 3.17 ซึ่งเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลากับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาตามลำดับ

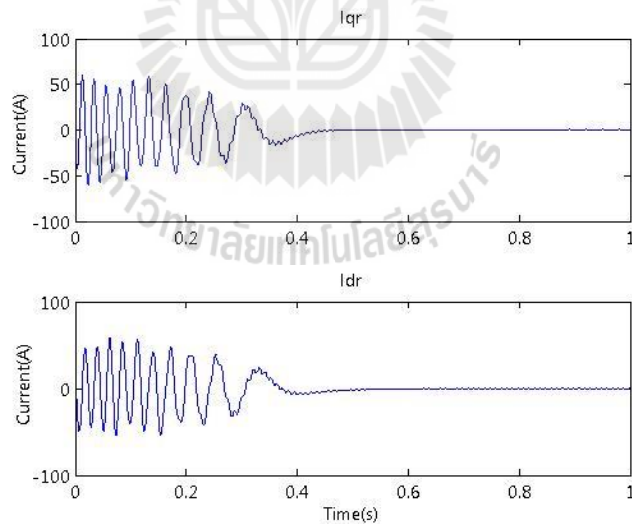
3.2.5.2 ผลการจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เป็นต้นกำลังโดยที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$r_{qs} = 7.3 \, \Omega, r_{ds} = 21.3 \, \Omega, r_r = 8.8533 \, \Omega, L_{mqs} = 0.37716 \, \text{H}, L_{lr} = 0.03776 \, \text{H}, \\ L_{lqs} = 0.03776 \, \text{H}, L_{lds} = 0.03243 \, \text{H}, J = 0.0738 \, \text{N-m-s}^2/\text{rad};$$

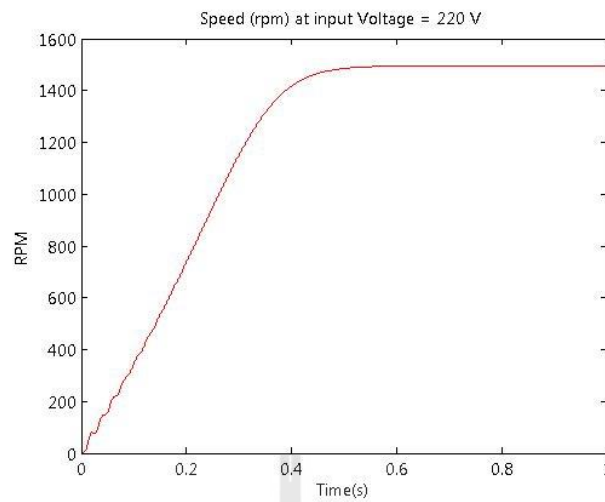
การจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรม MATLAB แล้วทำการป้อนโพลิตตั้งแต่ 0 นิวตัน จนถึง 7.5 นิวตัน เพื่อให้มอเตอร์ นั้นหมุนตัวเปล่าจนกระทั่งหยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนั้นจะได้ผลดังรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างกระแสเตเตอร์และเวลาและรูปที่ 3.19 และ 3.20 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโรเตอร์และเวลากับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาตามลำดับ



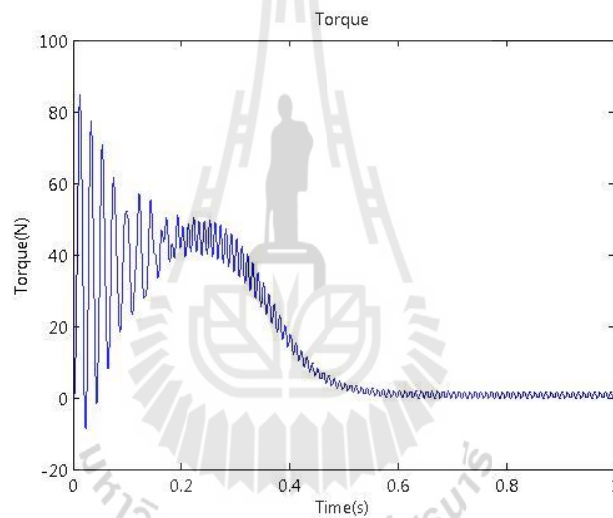
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

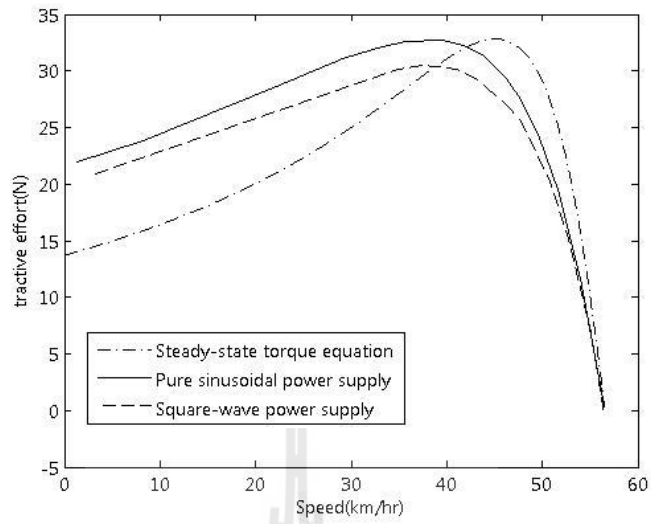


รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา

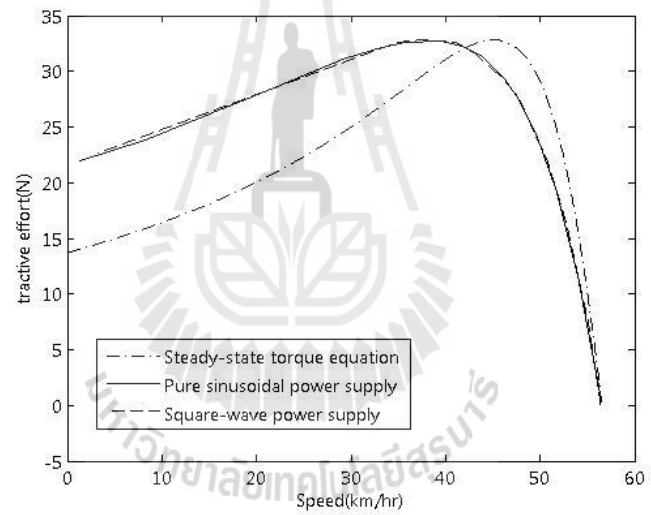


รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและเวลา

เมื่อทำการป้อนโพลต์ให้กับมอเตอร์แล้วความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองผลที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดดึงกับความเร็วในที่นี่ได้ทำการจำลองผลที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การจำลองผลโดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และการใช้สมการแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 3.22 จากนั้นได้ทำการใช้ตัวปรับคูณ 1.08 กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดดึงกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดดึงกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 3.23



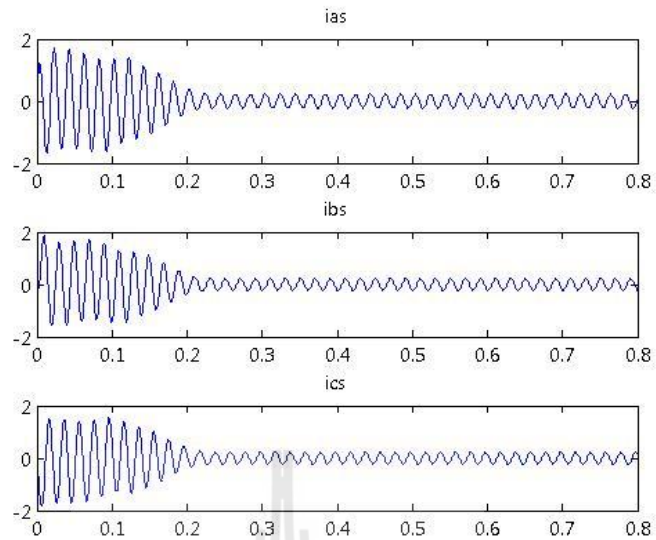
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดึงและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดึงและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย  
ที่ใช้ตัวปรับคุณแล้ว

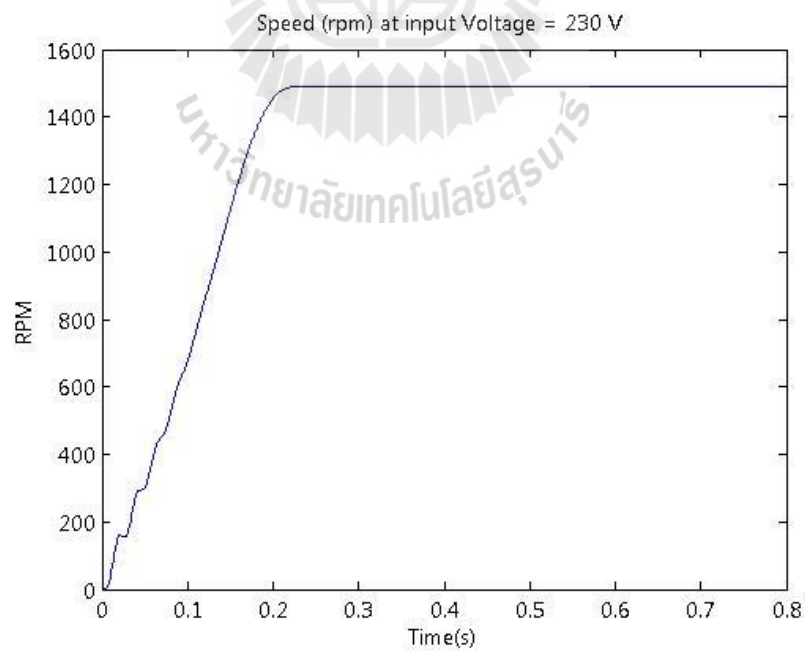
3.2.5.3 ผลการจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นต้นกำลังโดย  
ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$L_{ls} = 0.2087 \text{ H}, L_{lr} = 0.2087 \text{ H}, L_m = 3.4377 \text{ H}, r_s = 74.02 \ \Omega, \\ J = 0.0024 \text{ N-m-s}^2/\text{rad}, B_m = 0.0009 \text{ N-m-s/rad}$$

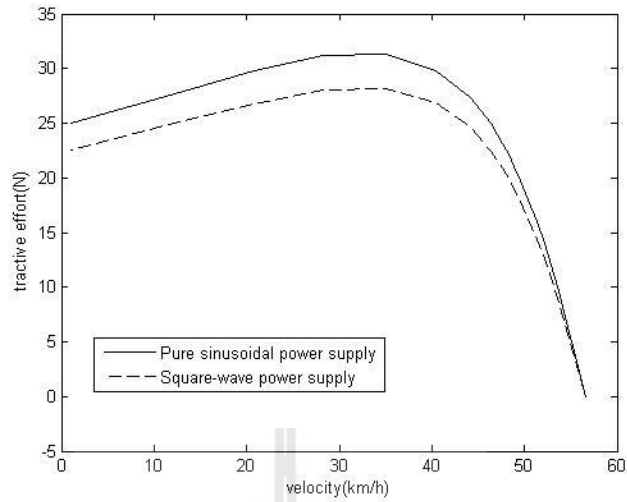


รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

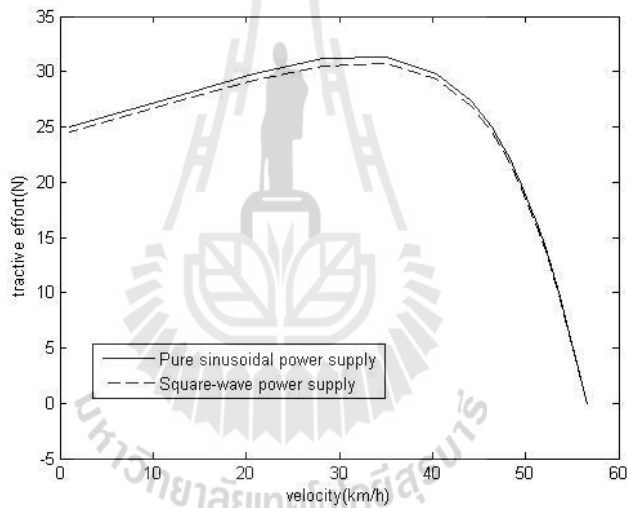
การจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรม MATLAB แล้วทำการป้อนโพลตเพื่อให้มอเตอร์ นั้นหมุนตัวเปล่า จนกระทั่งหยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนั้นจะได้ผลดังรูปที่ 18 ซึ่งเป็น ความสัมพันธ์ ระหว่างระหว่างกระแสเตเตอร์และเวลา และ รูปที่ 3.24 และ 3.25 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทั้ง 3 เฟสและเวลากับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาตามลำดับ



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดึงและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 2 แหล่งจ่าย



รูปที่ 3.27 ทำการคูณด้วยตัวปรับคูณแล้ว

เมื่อทำการป้อนโพลต์ให้กับมอเตอร์แล้วความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลอง คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดึงกับความเร็วในที่นี้ได้ทำการจำลองผลที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ การจำลองผลโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ ที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 3.26 จากนั้นได้ทำการใช้ตัวปรับคูณ 1.08 กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดึงกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดึงกับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 3.27



### 3.3 แบบจำลองและการจำลองผลการขับเคลื่อนสก็ูตเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

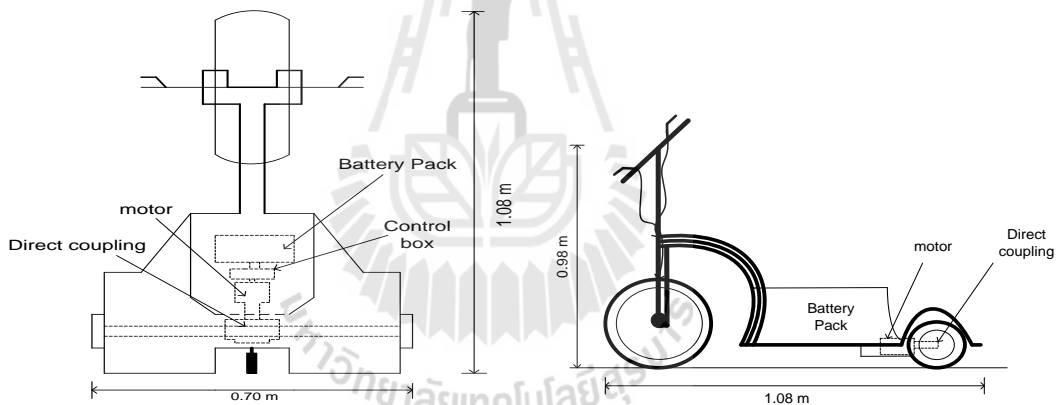
สก็ูตเตอร์ไฟฟ้าที่ทำการจำลองผลนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 ซึ่งมีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เป็นตัวขับเคลื่อนและใช้การเชื่อมต่อแบบโดยตรง (direct coupling) กับเพลลาของสก็ูตเตอร์ไฟฟ้าด้วย เนื่องจาก การเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุมมีความสัมพันธ์กัน แรงและกำลังงานสามารถถ่ายโอนจากแกนหมุนไปสู่การเคลื่อนที่เชิงเส้น หรือในทางตรงกันข้ามแรงเชิงเส้น สามารถถ่ายโอนให้อยู่ในรูปของแรงบิดที่เพลลามอเตอร์ได้ ซึ่งแรงบิดที่กระทำต่อเพลลา จะถูกแปลงไปเป็นแรงขับเคลื่อนผ่านล้อจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$F = \frac{T}{r_w} \quad (3.12)$$

โดยที่  $F$  คือ แรงขับเคลื่อนของรถ (N)

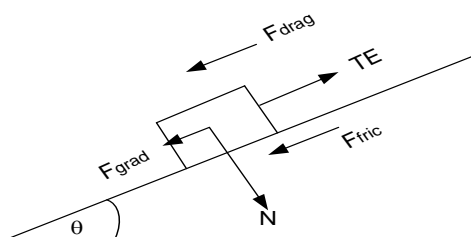
$T$  คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N.m)

$r_w$  คือ รัศมีของล้อรถ (m)



รูปที่ 3.28 สก็ูตเตอร์ไฟฟ้า

ในการขับเคลื่อนของสก็ูตเตอร์ไฟฟ้านั้น มีแรงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการ เคลื่อนที่ของรถในที่นี้ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.29 เมื่อพิจารณาแรงในแนวเชิงมุมที่มีผลต่อความเร่งเชิงเส้น จะแทนที่แรงต่าง ๆ ด้วยแรงบิดที่ถ่ายโอนผ่านล้อที่มีรัศมี  $r_w$  ได้สมการที่ 3.13



รูปที่ 3.29 การเคลื่อนที่บนพื้นเอียง

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Te}{J_T} - \frac{B_m}{J_T} - \frac{T_{glad}}{J_T} - \frac{T_{fric}}{J_T} - \frac{T_{drag}}{J_T} \quad (3.13)$$

โดยที่  $a$  คือ ความเร่งของสกุตเตอร์ไฟฟ้า ( $m/s^2$ )

$Te$  คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N.m)

$J_m$  คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ( $N\cdot m\cdot s^2/rad$ )

$M$  คือ มวลรวมของสกุตเตอร์ไฟฟ้า (kg)

$R_w$  คือ รัศมีของล้อ (m)

$\frac{d\omega}{dt}$  คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)

$J_T$  คือ ค่าโมเมนต์เฉื่อยรวม ( $N\cdot m\cdot s^2/rad$ )

$F_{glad}$  คือ แรงเกรเดียนท์ (N)

$F_{fric}$  คือ แรงเสียดทาน (N)

$F_{drag}$  คือ แรงต้านของอากาศ (N)

ในการจำลองผลของการเคลื่อนที่ของรถสกุตเตอร์ไฟฟ้านั้นจะใช้สมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 3.14 – 3.16

$$dt = t(k) - t(k-1) \quad (3.14)$$

$$u(k) = u(k-1) + a(k)dt \quad (3.15)$$

$$s(k) = s(k-1) + u(k-1)dt + \frac{1}{2}a(k)dt^2 \quad (3.16)$$

โดยที่  $dt$  คือ ช่วงเวลาที่ทำการคำนวณ (s)

$u$  คือ ความเร็วของรถ (m/s)

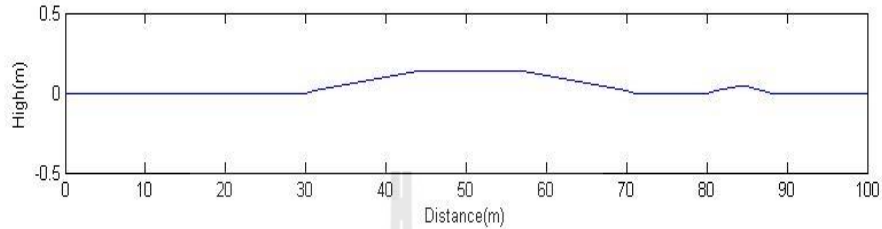
$a$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงขับเคลื่อน ( $m/s^2$ )

$s$  คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ (m)

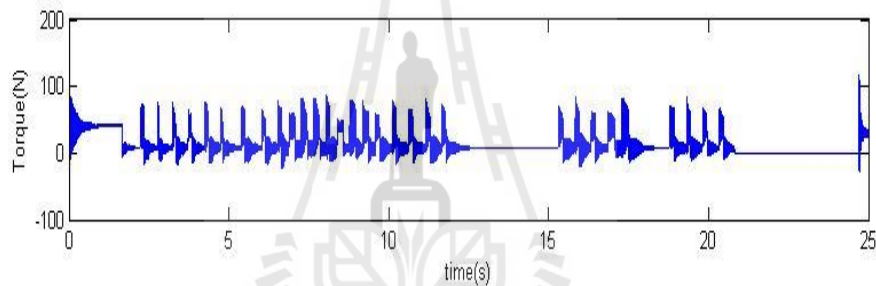
การควบคุมความเร็วของรถสกุตเตอร์ไฟฟ้าใช้วิธีควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส (hysteresis speed control) วิธีนี้เป็นวิธีที่ควบคุมแรงดันให้เป็นสองระดับ คือ เมื่อรถสกุตเตอร์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ จะทำการจ่ายไฟที่แรงดัน 230 โวลต์ และเมื่อเกินค่าความเร็วที่กำหนด จะทำการลดแรงดันลงที่ 100 โวลต์ และเมื่อความเร็วตกเกินกว่าค่าความเร็วที่กำหนด ก็ทำการจ่ายแรงดันที่ 230 โวลต์ อีกครั้งในสยวิจัย

นี้กำหนดค่าความเร็วของสกุเตอร์ไฟฟ้าเป็นช่วงในการกำหนดค่าความเร็วนั้นได้กำหนดความเร็วสูงสุดของสกุเตอร์ไฟฟ้าเป็น 18.72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วต่ำสุดที่กำหนดให้ คือ 17.28 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

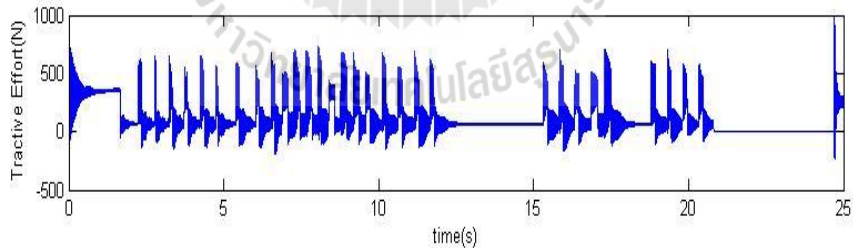
ในการจำลองผลการเคลื่อนที่ของสกุเตอร์ไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่บนพื้นถนนที่ค่าความต่างระดับ ดังที่กำหนดให้ ดังรูปที่ 3.30 ดังนี้



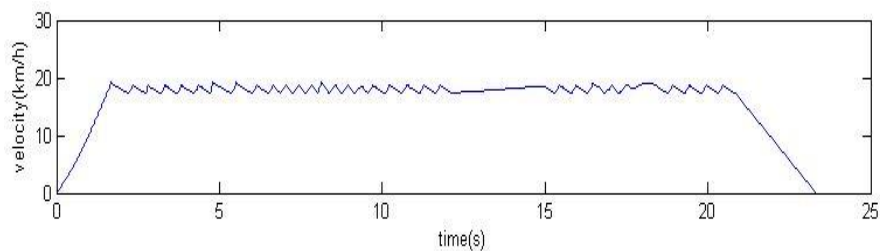
รูปที่ 3.30 ค่าความสูงต่ำของพื้นถนน



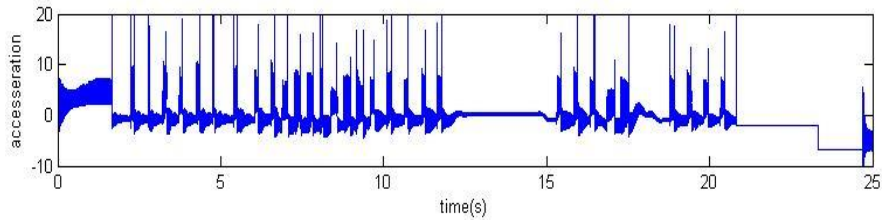
รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดและเวลา



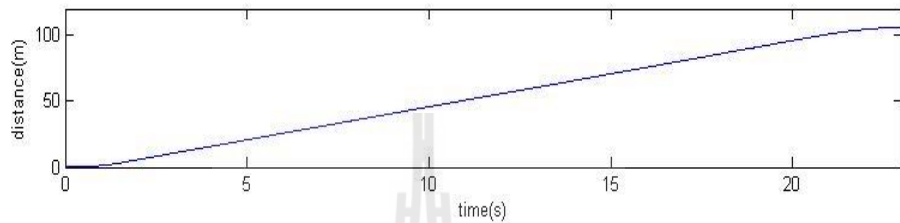
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อนกับเวลา



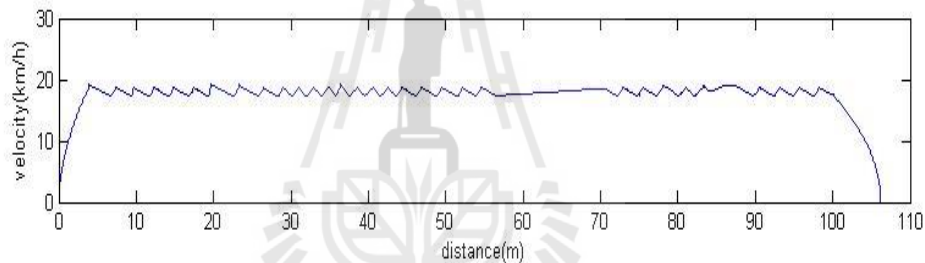
รูปที่ 3.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกับเวลา



รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา



รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางกับเวลา



รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกับระยะทาง

ในรูปที่ 3.31 นั้นเป็นความสัมพันธ์ของแรงบิดและเวลา ในช่วงการเริ่มหมุนของมอเตอร์นั้น จะมีกระแสไหลในวงจรมาก เนื่องจากว่า จะต้องเอาชนะแรงเสียดทาน ทั้งของตัวมอเตอร์เองและของตัวรถระหว่างล้อกับพื้นถนนซึ่ง ในรูปที่ 3.32 เป็นกราฟของความสัมพันธ์ แรงขับเคลื่อนกับเวลา ซึ่ง จะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกับกราฟของความสัมพันธ์ แรงบิดกับเวลา เนื่อง จากว่า กำลังงานการขับเคลื่อนของสกุต์เตอร์ไฟฟ้านั้นได้ถ่ายโอนมาจากแรงบิดของตัวมอเตอร์ ในรูปที่ 3.33 นั้นเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วและเวลา จะเห็นว่าช่วงที่มีการเริ่มหมุนมอเตอร์นั้นจะมีค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่อเทียบกับเวลาเนื่องจาก มอเตอร์จะหมุนความเร็วสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ เมื่อหมุนได้ความเร็วที่กำหนด ก็จะทำให้การลดแรงดันลง จะทำให้ค่าของความเร็วนั้นตกลงมาที่ค่าของความเร็วต่ำสุดที่กำหนดให้ เมื่อถึงค่าความเร็วที่กำหนดให้ นั้น ก็จะทำให้การเพิ่มค่าของแรงดันไปที่ค่าสูงสุด มอเตอร์ก็จะทำการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ ทำให้สกุต์เตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 3.34 เป็นความสัมพันธ์ของค่าความเร่งกับเวลา ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายๆกับค่าของแรงบิด เนื่องจากว่า ค่าของความเร่งนั้นเป็นผลมาจาก ค่าของแรงบิดที่ถ่ายโอนกำลังงานผ่านล้อ ในรูปที่ 3.35

เป็นกราฟความสัมพันธ์ของ ระยะทางกับเวลาในการเคลื่อนที่ รูปที่ 3.36 เป็นความสัมพันธ์ของ ความเร็วกับระยะทาง ซึ่งเมื่อเริ่มเคลื่อนที่จะมีค่าของความเร็วมาก เมื่อผ่านไปสักระยะค่าของ ความเร็วก็จะถูกควบคุม โดยการลดและเพิ่มแหล่งต้นให้กับมอเตอร์ เมื่อรถเคลื่อนที่มาถึงพื้นราบและ ลงเนิน จะทำให้ค่าของความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีแรงเกิดขึ้นเนื่องจากผลของพื้นเอียง

### 3.4 สรุป

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและการ ประยุกต์ใช้งานเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ในบทนี้ได้แบ่งส่วนการศึกษาเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกได้พิจารณาถึงการจำลองผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดดึงกับความเร็วเชิงเส้น ซึ่งมีความสำคัญในการประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ส่งผ่านจากแกนของมอเตอร์สู่ล้อ ณ ที่ ความเร็วต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบกันสองกรณี คือ กรณีที่แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้นเป็น รูปคลื่นไซน์เทียบกับแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้วจำลองผลกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส กับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งผลการจำลองนั้นคล้ายคลึงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดที่เกิดจาก มอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมี แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นที่เป็นสี่เหลี่ยมแต่ก็ยังไม่เท่ากันเลยทีเดียวดังนั้นก็จึงได้ทำการใช้ตัวปรับคุณภาพกับ ผลการจำลองที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งการจำลองนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ตัวปรับคุณภาพแล้วความสัมพันธ์ ระหว่างแรงบิดกับความเร็วนั้นใกล้เคียงกันกับ แบบจำลองที่ใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์

ส่วนที่สองเป็นการจำลองผลของการเคลื่อนที่ของรถมอเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เป็นต้นกำลังนั้น ได้มีการควบคุมความเร็ว ด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส (hysteresis speed control) โดย การป้อนแหล่งจ่ายเป็น 2 ระดับ คือ 230 โวลต์ และ 100 โวลต์ และกำหนดขอบเขตของความเร็ว เป็นช่วง โดยให้มีความเร็วขอบเขตล่างเป็น 17.28 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วขอบเขตบน จะ เท่ากับ 18.72 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยการจำลองการวิ่งบนถนนที่มีการขึ้นเนิน ลงเนิน และวิ่งบนทาง เรียบ โดยการกำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่นั้น เป็น 100 เมตร

รถมอเตอร์ไฟฟ้ามีขนาดเล็กกะทัดรัด ง่ายในการดัดแปลงเพื่อพัฒนาต้นแบบ มีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้

## บทที่ 4

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุป

งานวิจัยนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและการประยุกต์ใช้งานเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้ า ในบทนี้ได้แบ่งส่วนการศึกษาเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกได้พิจารณาถึงการจำลองผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดติดกับความเร็วเชิงเส้นซึ่งมีความสำคัญในการประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ส่งผ่านจากแกนของมอเตอร์สู่ล้อ ฃ ที่ความเร็วต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบกันสองกรณี คือ กรณีที่แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้นเป็นรูปคลื่นไซน์เทียบกับแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้วจำลองผลกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งผลการจำลองนั้นคล้ายคลึงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแต่ก็ยังไม่เท่ากันเลยทีเดียวดังนั้นจึงได้ทำการใช้ตัวปรับคุณภาพกับผลการจำลองที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งการจำลองนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ตัวปรับคุณภาพแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วนั้นใกล้เคียงกันกับ แบบจำลองที่ใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์

ส่วนที่สองเป็นการจำลองผลของการเคลื่อนที่ของสกุตเตอร์ไฟฟ้ า โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เป็นต้นกำลั งนั้น ได้มีการควบคุมความเร็ว ด้วยวิธีฮีสเทอรีซิส (hysteresis speed control) โดยการป้อนแหล่งจ่ายเป็น 2 ระดับ คือ 230 โวลต์ และ 100 โวลต์ และกำหนดขอบเขตของความเร็วเป็นช่วง โดยให้มีความเร็วขอบเขตล่างเป็น 17.28 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วขอบเขตบน จะเท่ากับ 18.72 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยการจำลองการวิ่งบนถนนที่มีการขึ้นเนิน ลงเนิน และวิ่งบนทางเรียบ โดยการกำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่นั้น เป็น 100 เมตร

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

การควบคุมขั้นสูงโดยใช้เทคนิคการควบคุมการจัดเรียงตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (field oriented control) และการควบคุมเชิงเวกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ จะช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน นอกจากนี้ การนำมอเตอร์ไฟฟ้ าเหนี่ยวนำมาใช้งานสามารถพัฒนาต่อยอดจากในงานวิจัยนี้ที่ใช้กับสกุตเตอร์ไฟฟ้ าเป็นการใช้งานกับรถสามล้อไฟฟ้ า หรือตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ า หรืออาจจะใช้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลได้

## บรรณานุกรม

1. C. Lin, Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis, J. Stein, “Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies”, **2001 Society of Automotive Engineers**
2. E.R. Collins and R.E Ashley, “Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies”, **IEEE**, 1991
3. T.B. Gage, “Lead-Acid Batterys:Key to Electric Vehicle Commercialization”, **IEEE**, 2000
4. A.B. Proca and A. Keyhani, “Identification of Variable Frequency Induction Motor Models From Operating Data”, **IEEE**, 2002
5. A.L. Julian, R.S. Wallace, “Multi-Speed Control of Single-phase Induction Motors for Blower Applications”, **IEEE**, 1995
6. L.M. Tolbert, F.Z. Peng, T. Cunyngham and J.N. Chiasson, “Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles”, **IEEE**, 2002
7. P. Pichler, P. Ebner, H. Weiss, “Demand-based Induction Motor Design for Diverging Electrical Vehicle Applications Powered by Battery”, **Helmut Weiss University of Leoben**, Austria
8. V. Ambrožič, M. Bertoluzzo, G.S. Buja, “An Assessment of the Inverter Switching Characteristics in DTC Induction Motor Drives”, **IEEE**, 2005
9. J.S. Lai, R.W. Young, and J.W. McKeever, “Efficiency Consideration of DC Link Soft-Switching Inverters for Motor Drive Applications”, **IEEE**, 1994
10. K.A. Corzine, M.W. Wielebski, F.Z. Peng, J. Wang, “Control of Cascaded Multi-Level Inverters”, **IEEE**, 2003
11. J. F. Manwell, J. G. McGowan, U. Abdulwahid and K. Wu, “Improvements to the Hybrid Battery Model”, **Energy Research Laboratory**, University of Massachusetts, 2005
12. K. Kawaguchai, S. Godo, and T. Kawabatam, “Novel Modulation Method of Single-phase Bridge Inverter for Improved Utilization of Power Device”, **IEEE 33<sup>rd</sup> Annual Power Electronics Specialist Conference**, June 2002, pp. 226 – 231.
13. A.S. Ba-thunya, K. Rahul, W. Kixin, H.A. Toliyat, “Single-phase Induction Motor Drives-A Literature Survey”, **IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, June 17 – 20, 2001, pp.911 – 916.

14. N. Naewngerdee, C. Sukcharoen, and T. Kulworawanichpong, "Optimizing Voltage Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives", **WSEAS Trans Systems**, March 2006, pp. 84 – 89, 2006
15. R. Krishnan, **Electric Motor Drive Modeling Analysis and Control**, Prentice Hall, New Jersey, 2001
16. M.S Sarma, **Electric Machines Steady State Theory and Dynamic Performance**, West Publishing Company, New York, 1994
17. G. Giancarlo, **Motor Vehicle Dynamics Modeling and Simulation**, World Scientific, 1997
18. H. Iqbal, **Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals**, New York, 2003
19. H. Iqbal, S. M. Islam, "Design Modeling and Simulation of an Electric Vehicle System", **International Congress and exposition**, Michigan, 1999
20. F. Hanrong, G. E. Dawson, T. R. Estham, "Model of Electric Vehicle Induction Motor Drive System", **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, September 14 – 17, 1993, pp. 1045-1048
21. N. Barakat, R. Rajagopalan, "Speed Control of a DC Motor Using a Feedforward Computed Torque Control Scheme", **IEEE International Symposium on Intelligent Control**, Dearborn, September 15-18, 1996
22. J.J. Cathey, **Electric Machines Analysis and Design Applying Matlab**, McGraw-Hill, International Edition, New York, 2001



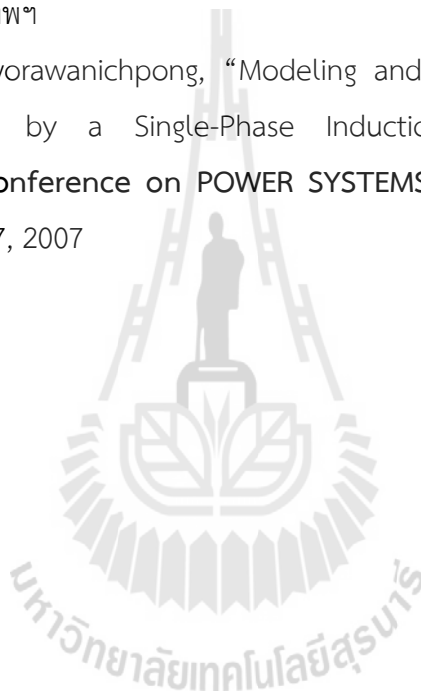
ภาคผนวก ก  
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลผลิต ดังต่อไปนี้

**บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่**

ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ และ ชรินทร์ สุขเจริญ, “การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เอซีที่จ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า”, การประชุมเชิงวิชาการ  
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550 โรงแรมใบหยก  
สกาย จังหวัดกรุงเทพฯ

C. Sukcharoen, & T. Kulworawanichpong, “Modeling and Simulation of an Electric Scooter Driven by a Single-Phase Induction Motor”, 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PE 2007), Beijing, China, September 15-17, 2007



ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ และ ชรินทร์ สุขเจริญ, “การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เอซีที่จ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า”, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550 โรงแรมไบเทคทศสกาย จัหวัดกรุงเทพฯ

การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3  
23-25 พฤษภาคม 2550 โรงแรมไบเทคทศสกาย จัหวัดกรุงเทพฯ

## การประมาณค่าแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เอซีที่จ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (Torque-speed estimation of an inverter-fed AC motor for electric vehicle drives)

ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ และ ชรินทร์ สุขเจริญ  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จัหวัดนครราชสีมา 30000 E-mail: [thanatchai@gmail.com](mailto:thanatchai@gmail.com)

Thanatchai Kulworawanichpong and Charin Sukcharoen  
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
111 University Avenue, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand Tel: 0-4422-4400 Fax: 0-4422-4801 E-mail: [thanatchai@gmail.com](mailto:thanatchai@gmail.com)

### บทคัดย่อ

รถขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ไฟฟ้ามีใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในสนามกอล์ฟ โรงงานอุตสาหกรรม หน่วยงานราชการ วิทยาลัย หรือสวนสัตว์ เป็นต้น การขับเคลื่อนดำเนินการผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีความคุ้มค่าและมีข้อเสียหลายประการ เช่น การบำรุงรักษาที่ยาก ราคาแพง และขนาดต่อพิกัดโตกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเอซี เป็นต้น การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้งานต้องใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟให้เป็นเอซี ที่มีสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สมรรถนะของมอเตอร์เอซีภายใต้แหล่งจ่ายไฟนี้ มีความแตกต่างจากกรณีที่ใช้แหล่งจ่ายไฟรูปไซน์โดยตรง งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาคูสมรรถนะของมอเตอร์เอซีผ่านคุณลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ ภายใต้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม แบบจำลองในสภาวะชั่วคราวถูกนำมาใช้เพื่อจำลองผลการจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายรูปสี่เหลี่ยม ผลตอบลงที่ได้นำมาใช้ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปของสมการอย่างง่าย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ออกแบบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์เอซีที่ถูกรับผ่านอินเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยประหยัดพลังงานในขนาดที่ได้ มอเตอร์สี่ขั้วพิกัด 1.86 kW มอเตอร์เอซีเฟสเดียวพิกัด 0.26 kW และมอเตอร์เอซีสามเฟสพิกัด 0.37 kW ถูกนำมาใช้ทดสอบ เพื่อประเมินสมรรถนะแรงบิด-ความเร็วรอบ ผลจากการทดสอบ พบว่า คุณลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วรอบจากการบ่อนไฟโดยใช้แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม มีรูปร่างคล้ายกับการบ่อนด้วยแหล่งจ่ายรูปไซน์ ต่างกันเพียงขนาดแรงบิดสูงสุดเท่านั้น ทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดได้โดยใช้ตัวปรับค่าที่เหมาะสม

### Abstract

Electric vehicles driven by an on-board battery have been widely used in various applications, e.g. a golf cart in golf yard, a folk lift in an industrial plant or service car in zoo. Their traction

drive conventionally employs a simply-controlled DC motor. However, there are still several disadvantages of using the DC motor, such as maintenance problems, expensive cost and larger size. Alternatively, to drive an AC motor by using the on-board battery requires a power inverter circuit in which a square-wave voltage is produced across its output terminal and then energizes the motor. AC motor characteristics especially the torque-speed curve under the square-wave excitation differ from that obtained by the sinusoidal excitation. This research is to study the AC motor characteristics through the torque-speed curve estimation under the square-wave power supply. Obtained torque-speed responses are used to formulate a simple expression to represent the motor characteristic. The results can lead to traction-motor design of an electric vehicle with high efficiency and energy saving. One DC motor, one single-phase AC motor and one three-phase AC motor with the same rating (10 hp) were tested to evaluate the torque-speed characteristic. As a result, the torque-speed response obtained from the square-wave supply is very similar in shape to that obtained by the sinusoidal supply. The key different is only the maximum pull-out torque. The torque equation of the square-wave case can be simply estimated by using a sinusoidal-excited steady-state torque equation with an appropriate scaling factor.

### 1. บทนำ

มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแทนที่มอเตอร์กระแสตรงซึ่งนี้เนื่องจากข้อได้เปรียบหลายประการ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งราคาการบำรุง

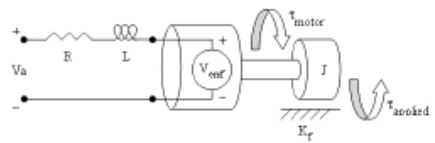
รักษาและขนาดต่อพิกัดที่ต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเอชซี ดังนั้น ในการใช้งานให้เลือกใช้งานให้เลือกใช้งานประเภทที่การเหมาะสม กับแรงขับของตัวรถที่ไม่มากนักเช่น รถส่งเอกสารในโรงพยาบาล ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ขนาดโตมาขับเคลื่อน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้มอเตอร์เอชซีขับเคลื่อนแทนมอเตอร์ดีซี ซึ่งขนาดต่อพิกัดต่ำกว่าและพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนนั้นมากกว่ามอเตอร์เอชซี เนื่องจากว่าแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนนั้นมาจากแบตเตอรี่ ซึ่งแรงดันที่ได้จากแบตเตอรี่นั้นเมื่อผ่านตัวอินเวอร์เตอร์แล้ว จะได้รูปคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมแทนที่แหล่งจ่ายไฟรูปไซน์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ปรับค่าแรงดันและค่าความกว้างของรูปคลื่น ให้มีค่าแรงดันเฉลี่ยให้เท่ากับที่กิตติวัตต์ของมอเตอร์ จากนั้นได้ทำการจำลองเพื่อทดสอบประเมิณสมรรถนะแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ เอชซีเฟสเดียว และมอเตอร์เอชซีสามเฟส ผลการวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาตัวต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต่อไป

2.มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลซึ่งมีการใช้งานในปัจจุบันอย่างหลากหลาย การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน แต่ละประเภทซึ่งดูว่าเหมาะกับงานประเภทใดบ้างเช่น งานที่ใช้ความเร็วรอบสูง งานที่ต้องการแรงบิดมากๆ งานที่ต้องการควบคุมความเร็ว เป็นต้น มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามกระแสไฟฟ้าที่ใช้งาน คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวและมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ในขณะที่กล่าวถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 มอเตอร์ดีซี

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามลักษณะของสเตเตอร์ [1] คือขดลวดสนามแม่เหล็ก (wound field) และแบบขั้วแม่เหล็กถาวร ถ้าแบ่งตามขดลวดสนามแม่เหล็ก จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการกระตุ้นของ สนามแม่เหล็ก คือ แบบกระตุ้นแยก (Separately Excited) และ แบบกระตุ้นตัวเอง (Self-Excited) หลัก การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าดีซี นั้นอาศัยหลักการของปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามแม่เหล็กและ ขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวขดลวดตัวนำนั้น[6]แรงที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ในการจำลองผลนั้นได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [2] จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของมอเตอร์ดีซีและจากโครงสร้างของมอเตอร์ดีซีนั้น



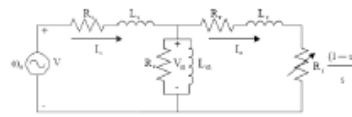
รูปที่ 1 โครงสร้างของมอเตอร์ดีซี

จะสามารถเขียนสมการสถานะ [3] ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & \frac{-K_m}{L} \\ \frac{K_m}{J} & \frac{-K_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_{applied} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งแบบ 3 เฟส และ แบบเฟสเดียว นั้น จากการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์ที่อยู่ 2 แบบ คือ พิจารณาแบบสภาวะคงตัว (steady-state model) และ แบบสภาวะพลวัต (dynamic model) โดยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสจะพิจารณาจลนศาสตร์แบบ ต่อเฟสที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดัน ที่สแตเตอร์กับแรงดันที่โรเตอร์ด้วยอัตราส่วนของการปรับลิทิมัล (effective turn ratio) โดยจะมีกรย้ายค่าพารามิเตอร์ของโรเตอร์ไปอยู่บนสแตเตอร์ [3] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรลจลนศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจลนศาสตร์และการกระแสของโรเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถอธิบายได้โดย สมการที่ 2-5 [4]

$$i_s = \frac{V_s}{(R_s + \frac{R_r}{s}) + j(X_s + X_r)} \quad (2)$$

$$V_r = \frac{X_r}{X_s + X_r} V_s \quad (3)$$

$$Z_m = R_m + jX_m = \frac{R_m(X_s + X_r)}{R_s + j(X_s + X_r)} \quad (4)$$

$$T_{ind} = \frac{3V_s^2 \frac{R_r}{s}}{\omega_s [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (X_s + X_r)^2]} \quad (5)$$

แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นสามารถเขียนสมการสถานะให้อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt} [x] = [A][x] + [B][u] \quad (6)$$

โดยที่

$$[G] = \begin{bmatrix} L_s + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_s + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_s + L_m \end{bmatrix}$$

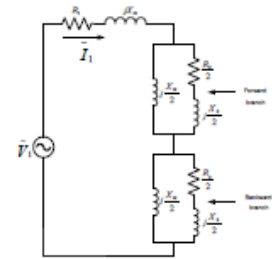
$$\begin{aligned}
 [a_1] &= \begin{bmatrix} L_m \cos \theta & L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos \theta & L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos \theta \end{bmatrix} \\
 [a_2] &= \begin{bmatrix} L_m \cos \theta & L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos \theta & L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos \theta \end{bmatrix} \\
 [a_3] &= \begin{bmatrix} L_s + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_s + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_s + L_m \end{bmatrix} \\
 [H_1] &= \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s \end{bmatrix} \\
 [H_2] &= \begin{bmatrix} \omega L_m \sin \theta & \omega L_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \omega L_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin \theta & \omega L_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \omega L_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin \theta \end{bmatrix} \\
 [H_3] &= \begin{bmatrix} \omega L_m \sin \theta & \omega L_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \omega L_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin \theta & \omega L_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \omega L_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \omega L_m \sin \theta \end{bmatrix} \\
 [H_4] &= \begin{bmatrix} -\pi & 0 & 0 \\ 0 & -\pi & 0 \\ 0 & 0 & -\pi \end{bmatrix} \\
 [M] &= \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 [x] &= [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc} \ \omega \ \theta]^T \\
 [u] &= [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc} \ v_{ra} \ v_{rb} \ v_{rc} \ -\frac{r}{2J}(\tau_s - \tau_r) \ 0]^T \\
 [e] &= \begin{bmatrix} e_1 & e_2 \\ e_3 & e_4 \end{bmatrix} \\
 [H] &= \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_3 & H_4 \end{bmatrix} \\
 [A] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \\
 [B] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}
 \end{aligned}$$

- โดยที่  $R_s$  คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของสเตเตอร์ ( $\Omega$ )
- $R_r$  คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของโรเตอร์ ( $\Omega$ )
- $L_m$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสของสเตเตอร์ (H)
- $L_s$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสของโรเตอร์ (H)
- $L_{sm}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (H)
- $\theta$  คือ ตำแหน่งของโรเตอร์ (rad)
- $\omega$  คือ ความเร็วของโรเตอร์ (rad/s)
- $[i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]$  คือ กระแสทั้ง 3 เฟสของสเตเตอร์

$[i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]$  คือ กระแสทั้ง 3 เฟสของโรเตอร์  
 $J_m$  คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

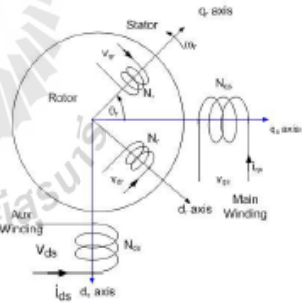
**2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส**

โมเดลของแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว [5] มีการพิจารณาจลนศาสตร์จากทฤษฎี สนามแม่เหล็กหมุนคู่ทำให้องจรเสมือนของโรเตอร์ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และ เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปด้านหลัง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวประกอบด้วย ขดลวดหลัก ขดลวดช่วยที่วางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าบนส่วนที่อยู่กับที่ (stator) ขดลวดตัวหมุน (rotor winding) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะใช้แบบจำลองแบบพลวัตซึ่งต้องอาศัยการพิจารณา มอเตอร์แบบ 2 แกน ซึ่งประกอบด้วย direct axis (แกน d) และ quadrature axis (แกน q) ซึ่งทั้ง 2 แกนจะตั้งฉากกัน ดังนั้นด้วยลักษณะการวางตัวของขดลวดหลักและขดลวดช่วยทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน จึงสามารถพิจารณาโดยใช้หลักการของทฤษฎี 2 แกนได้ ในที่นี้จะ พิจารณาที่แกนอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame) [6]



รูปที่ 4 direct axis และ quadrature axis ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิจารณาค่าแรงดันของขดลวดที่บนสเตเตอร์และโรเตอร์ จะได้ตามสมการที่ (7) และสมการที่ (8) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_{gs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{gs} + \mu_{gs} & \mu_{gs} \\ \mu_{ds} & r_{ds} + \mu_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{gs} & L_{gsd} \\ L_{ds} & L_{dsd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{gs} \\ \dot{i}_{ds} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{gr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{gr} + \mu_{gr} & \mu_{gr} \\ \mu_{dr} & r_{dr} + \mu_{dr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{gr} & L_{grd} \\ L_{dr} & L_{drd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{gr} \\ \dot{i}_{dr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ทำการแปลงค่าแรงดัน, ค่ากระแส ในโรเตอร์ ( $V_{gr}, V_{dr}, i_{gr}, i_{dr}$ ) ไปอยู่บน สเตเตอร์ จากสมการแรงดันของ ทั้งโรเตอร์ และ สเตเตอร์จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{C}_d \\ \dot{C}_q \\ \dot{C}_d' \\ \dot{C}_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_r \sin \theta & \omega_r \cos \theta & 0 & 0 \\ \omega_r \cos \theta & \omega_r \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_r \sin \theta & \omega_r \cos \theta \\ \omega_r \cos \theta & \omega_r \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_d \\ C_q \\ C_d' \\ C_q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{gs} + L_{ms} & 0 & L_{ms} \cos \theta & -L_{ms} \sin \theta \\ 0 & (L_{gs} + L_{ms}) & L_{ms} \sin \theta & L_{ms} \cos \theta \\ L_{ms} \cos \theta & L_{ms} \sin \theta & (L_r + L_{ms}) & 0 \\ -L_{ms} \sin \theta & L_{ms} \cos \theta & 0 & (L_r + L_{ms}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_d \\ C_q \\ C_d' \\ C_q' \end{bmatrix}$$

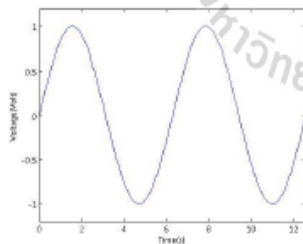
- โดยที่  $r_{gs}$  คือ ความต้านทานของขดลวดหลัก
- $r_{ms}$  คือ ความต้านทานของขดลวดช่วย
- $L_{gs}$  คือ ความเหนี่ยวนำค้ำของขดลวดหลัก
- $L_{ms}$  คือ ความเหนี่ยวนำค้ำของขดลวดช่วย
- $L_r$  คือ ความเหนี่ยวนำค้ำของโรเตอร์
- $L_{ms}$  คือ ความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก
- $i_{gs}$  คือ กระแสที่ผ่านด้านทานของขดลวดหลัก
- $i_{ms}$  คือ กระแสที่ผ่านด้านทานของขดลวดช่วย

3. แหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งเป็นส่วนกำลังของการขับเคลื่อนต่างๆ แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีด้วยกัน 3 ประเภท

3.1 แหล่งจ่ายไฟเอซี

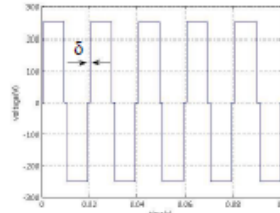
แหล่งกำเนิดไฟเอซีหรือไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้มาจากโรงไฟฟ้านั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าแปรค่าเป็นฟังก์ชันของไซน์ ด้วยความถี่ 50 รอบต่อวินาที (Hz) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5 ซึ่งเป็น รูปคลื่นสัญญาณไซน์ในอุดมคติ



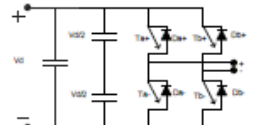
รูปที่ 5 แหล่งจ่ายไฟรูปไซน์

3.2 แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม

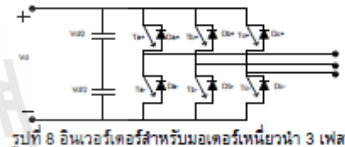
แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำอินทรีย์ ในงานวิจัยนี้ ให้ออกแบบแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6 ซึ่ง รูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่นที่ได้จากการแปลงของอินเวอร์เตอร์ซึ่ง โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์นี้จะแสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 6 แหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 7 อินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส



รูปที่ 8 อินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยที่ค่าแรงดันเฉลี่ย ( $V_{ms}$ ) ของรูปคลื่นนี้มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ โดยที่มีค่า delta เป็นตัวกำหนดความกว้างของแหล่งจ่ายไฟรูปสี่เหลี่ยม [7] จากความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเฉลี่ยนี้จะสามารถประยุกต์สมการดังต่อไปนี้

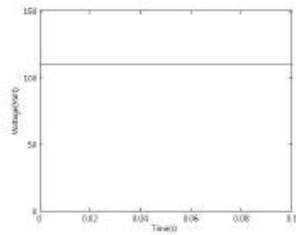
$$V_{ms} \leq \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_r)^2 dt} \quad (9)$$

ไปเป็นสมการที่เกี่ยวข้อง กับค่า  $\delta$  (delta) เพื่อคำนวณหาค่าของ  $\delta$  โดยการกำหนดค่าแรงดันสูงสุด ( $V_m$ ) และ  $V_{ms}$  รูปแบบของสมการมีดังนี้

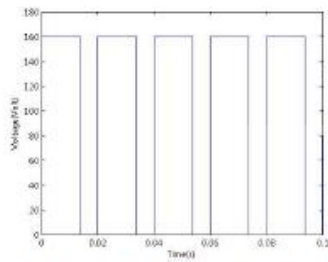
$$\delta = \frac{T}{4} \left( \frac{1 - V_{ms}}{V_m} \right) \quad (10)$$

3.3 แหล่งจ่ายไฟดีซี

แหล่งจ่ายไฟที่เป็นดีซีนั้นมีสองประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งได้ถูกออกแบบให้มีค่าของ แรงดันที่เท่ากันระหว่างแหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้จาก แบตเตอรี่โดยตรง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 9 กับแหล่งจ่ายไฟดีซีที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีรูปคลื่นดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 10

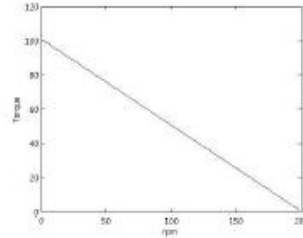


รูปที่ 9 แหล่งจ่ายไฟดัดที่ใส่แบตเตอรี่

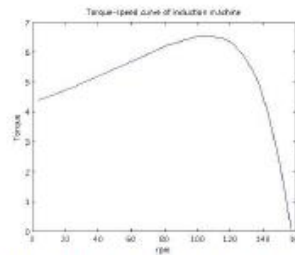


รูปที่ 10 แหล่งจ่ายไฟดัดที่ใส่จากอินเวอร์เตอร์

เมื่อได้เส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงบิดเทียบกับความเร็วเชิงมุมดังแสดงให้เห็นในรูปที่ (10) ซึ่งมีด้วยกัน 3 แบบแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลัง



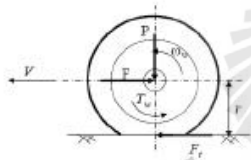
รูปที่ 12 เส้นโค้งของแรงบิดเทียบกับความเร็วของดีซีมอเตอร์



รูปที่ 13 เส้นโค้งของแรงบิดเทียบกับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

**4. การคำนวณเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงจุดดึง (tractive effort) กับความเร็ว**

การหาความสัมพันธ์ของแรงจุดดึง (tractive effort) เทียบกับความเร็วที่เป็นเชิงเส้นนั้นมีหลายองค์ประกอบซึ่งแรงจุดหรือแรงดึงจะเป็นส่วนที่สำคัญในการที่จะแสดงให้เห็นถึงการส่งถ่ายแรงจุดไปยังล้อของรถไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแรงจุดลากดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การส่งถ่ายแรงจุดจากแกนล้อ

สมการที่แสดงถึงแรงจุดลาก ของแกนที่ส่งถ่ายไปยังล้อนั้นแสดงให้เห็นในสมการที่ 10-11[13]

$$TE = \frac{\text{Torque}}{r} \tag{10}$$

$$V = \omega r \tag{11}$$

โดยที่ TE คือ แรงจุดลาก

Torque คือ แรงบิดของมอเตอร์

r คือ รัศมีของล้อ

V คือ ความเร็วเชิงเส้น

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม

**5. แบตเตอรี่**

แบตเตอรี่ เป็นแหล่งเก็บพลังงานที่สะดวกต่อการใช้งานแต่ก็มีข้อเสียคือ ข้อจำกัดในสัณปริมาณของพลังงาน [14] การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ที่เป็นชนิดตะกั่วกรดนั้นสามารถ [15] แบ่งตามการใช้งานได้ 2 ประเภท

- 1.แบบธรรมดา (Conventional) เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้โลหะตะกั่วผสมพลังงานเหมาะกับการใช้งาน ทั่วไป
2. แบบไม่ต้องบำรุงรักษา (Maintenance Free)



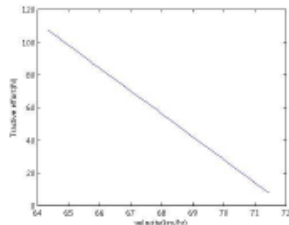
รูปที่ 14 โครงสร้างของแบตเตอรี่

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดในการป้อนพลังงาน ให้แก่ระบบขับเคลื่อนเนื่องจากว่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดนี้ใช้งานได้ทนทานต่อการใช้งานและทนการประจุใส่หลายครั้ง

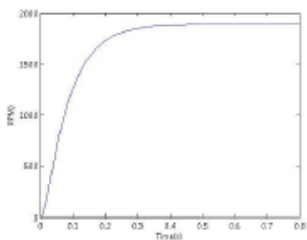
6. ผลการจำลอง

6.1 การจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยอินเวอร์เตอร์กระแสตรง เป็นต้นกำลังโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

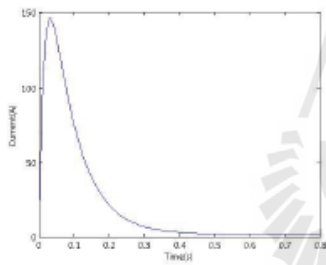
$$R = 0.6 \Omega, K_b = 0.55 \text{ V-s/rad}, K_m = 0.55 \text{ kg-m/A}^2, K_f = 0.004 \text{ N-m-s}, L = 8e-3 \text{ H}, J = 0.0465 \text{ kg-m-s}^2, V = 110 \text{ Volt}$$



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดและความเร็ว



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา



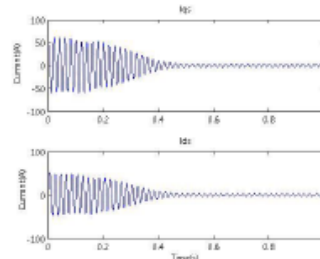
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

ในการจำลองผลนี้ได้ทำการป้อนโพลต์ตั้งแต่ 0-100 เพื่อให้อินเวอร์ต์นั้นหมุนตัวไปส่วนกะทั้งหยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนี้ จะได้โพลต์รูปที่ 15 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดและความเร็วและรูปที่ 16 และ 17 ซึ่งเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลากับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาตามลำดับ

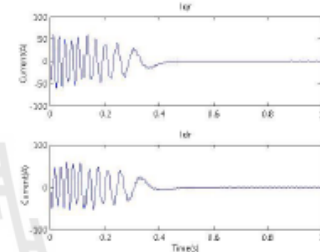
6.2 ผลการจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยอินเวอร์ต์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เป็นต้นกำลังโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$r_m = 7.3 \Omega, r_{ss} = 21.3 \Omega, r_r = 8.8533 \Omega, L_{ms} = 0.37716 \text{ H}, L_r = 0.03776 \text{ H}, L_{ss} = 0.03776 \text{ H}, L_{rs} = 0.03243 \text{ H}, J = 0.0738 \text{ N-m-s}^2/\text{rad}$$

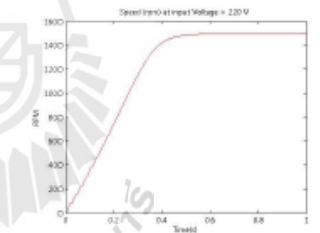
การจำลองผลนี้ได้ใช้โปรแกรม matlab แล้วทำการป้อนโพลต์ตั้งแต่ 0 นวินาทีจนถึง 7.5 นวินาที เพื่อให้อินเวอร์ต์ นั้นหมุนตัวไปส่วนกะทั้งหยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนี้จะได้ผลดังรูปที่ 18 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสเดเตอร์และเวลาและรูปที่ 19 และ 20 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโรเตอร์และเวลากับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาตามลำดับ



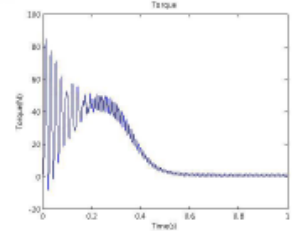
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

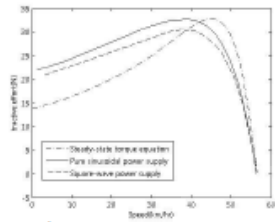


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา

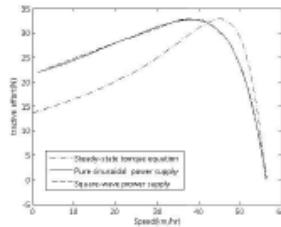


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและเวลา

เมื่อทำการบิ่รโหลดให้กับมอเตอร์แล้วความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองผลที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็วในที่นี่ได้ทำการจำลองผลที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การจำลองผลโดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และการใช้สมการแมทริคโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 22 จากนั้นได้ทำการใช้ตัวปรับรอบ 1.08 กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็ของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็ของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 23

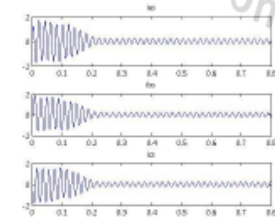


รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย



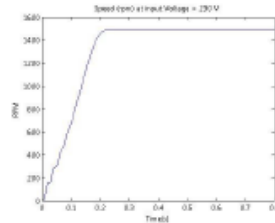
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่ายที่ใช้ตัวปรับรอบแล้ว

6.3 ผลการจำลองผลของการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นต้นกำลังโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้  
 $L_m=0.2087$  H,  $L_s=0.2087$  H,  $L_r=3.4377$  H,  $r_s=74.02$  Ω,  
 $J=0.0024$  N-m-s<sup>2</sup>/rad,  $B_m=0.0009$  N-m-s/rad

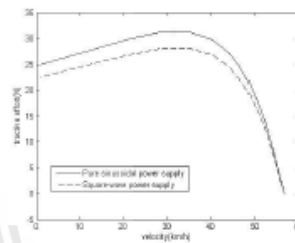


รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

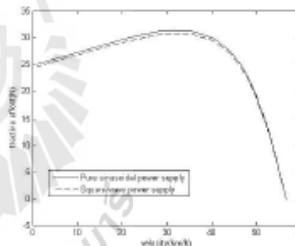
การจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรม matlab แล้วทำการบิ่รโหลดเพื่อให้อิมเตอร์ หนีหมุนตัวเปล่า จนกระทั่ง หยุดนิ่งซึ่งผลการจำลองนั้นจะได้ผลดังรูปที่ 18 ซึ่งเป็น ความสัมพันธ์ ระหว่าง กระแสสเตเตอร์และเวลา และ รูปที่ 24 และ 25 ซึ่งเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทั้ง 3 เฟสและเวลา กับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลาตามลำดับ



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเวลา



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งและความเร็วเปรียบเทียบทั้ง 2 แหล่งจ่าย



รูปที่ 27 ทำการลดด้วยตัวปรับรอบแล้ว

เมื่อทำการบิ่รโหลดให้กับมอเตอร์แล้วความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่งกับความเร็วในที่นี่ได้ทำการจำลองผลที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ การจำลองผลโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ ที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 26 จากนั้นได้ทำการใช้ตัวปรับรอบ 1.08 กับ ความสัมพันธ์ระหว่างแรง จุดดิ่งกับความเร็ของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดดิ่ง กับความเร็ของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 27



### 7. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงการจำลองผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วเชิงเส้นซึ่งมีความสำคัญในการประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ส่งผ่านจากแกนของมอเตอร์สู่ล้อ ณ ความเร็วต่างๆ โดยการเปรียบเทียบกันสองกรณี คือ กรณีที่แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้นเป็นรูปคลื่นไซน์เทียบกับแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้วจำลองผลกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส กับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งผลการจำลองนั้นคล้ายคลึงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นที่เป็นสี่เหลี่ยมแต่ก็ยังไม่เท่ากันเลยทีเดียวจึงได้ทำการใช้ตัวปรับคูลมผลกับผลการจำลองที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งการจำลองนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ตัวปรับคูลแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วนั้นใกล้เคียงกันกับแบบจำลองที่ใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์

### 8. อ้างอิง

- N. Barakat, R. Rajagopalan, "Speed Control of a DC Motor Using a Feedforward Computed Torque Control Scheme", IEEE International Symposium on Intelligent Control Dearborn, MI, September 15-18, 1996
- Syed A. Nasar, "Electric Machines and Power" System, Volum McGraw-Hill, New York, 1995
- William H. Yeadon, P.E., Alan W. Yeadon, P.E., "Handbook of Small Electric Motors", McGraw - Hill, New York, 2001
- T. Kulworawanichpong, K-L. Areerak, P. Pao-la-or, D. Puangdownreong, S. Sujitjorn, "Dynamic Parameter Identification of Induction Motors Using Intelligent Search Technique" Thailand, (2005)
- N. Naewngemdee, C. Sukcharoen & T. Kulworawanichpong, "Optimizing Voltage Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives" IEEE
- Jimmie J. Cathey, "Electric Machines Analysis and Design Applying Matlab", McGraw-Hill, International Edition, New York 2001
- A.A. Arkadan, V. Rossillo-Johnson, N.A. Demerdash, "A DC-AC Inverter - Induction Motor System Network Model Compatible With Commonly Know Network Analysis Software Package IEEE, 1989
- Bhag S. Guru, Huseyin R. Hizioglu, "Electric Machinery and Transformers", Third Edition, Oxford University Press, New York 2001
- R. Krishnan, "Electric Motor Drive Modeling analysis and Control", International Edition Prentice Hall, New Jersey, 2001
- D.P. Kothari, I.J. Nagrath, "Electric Machines", Third Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2004
- Mulkutla S. Sarma, "Electric Machines Steady State Theory and Dynamic Performance" ,Second Edition, West Publishing Company, New York, 1994
- Liuchen Chang, "Recent Development of Electric Vehicles and Their Propulsion Systems", IEEE AES System magazine, December 1993
- Hanrong Fan, Graham E., Dowson Tony R. Eastham, "Model of Electric Vehicle Induction Motor Drive System", IEEE (1993)
- Thomas B. Gage, "Lead - Acid Batteries: Key to Electric Vehicle Commercialization Experience with design, Manufacture, and Use of EVs", IEEE (2000)
- Donald B. Karner, "Current Events in Vehicle Battery Safety", Electric Transportation Applications, IEEE (1995)



- C. Sukcharoen, & T. Kulworawanichpong, "Modeling and Simulation of an Electric Scooter Driven by a Single-Phase Induction Motor", 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PE 2007), Beijing, China, September 15-17, 2007

## **Modeling and Simulation of an Electric Scooter Driven by a Single-Phase Induction Motor**

C. SUKCHAROEN & T. KULWORAWANICHAPONG<sup>†</sup>  
 Power and Energy Research Unit, School of Electrical Engineering,  
 Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
 111 University Avenue, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000  
<sup>†</sup>Corresponding author: thanatchai@gmail.com

*Abstract:* - An electric vehicle driven by DC motors has been widely used for several applications. In this paper, replacement of the DC motor by a single-phase induction motor on the electric vehicle is proposed. Low cost and less maintenance make the single-phase induction motor more impressive although a complicated inverter onboard the vehicle is required. This paper investigates this possibility through a whole system of electric vehicle movement simulation. The whole system simulation consists of three main parts: 1) power supply interface 2) motor performance calculation and 3) vehicle movement simulation. The electric scooter of 0.26 kW rating was employed for test. As a result, a single-phase induction motor showed ability to drive an electric scooter carrying with 80-kg load at almost constant speed of 20 kph.

*Key-Words:* - Electric Scooter, Single-phase Induction Motor, Battery, Speed Control, Vehicle Movement

### **1. Introduction**

To date, three-phase induction motors have been increasingly important for industrial electric motor applications [1]. It should note that there still exist DC motors in some limited applications, e.g. motors for vehicles. Apart from a large-size electric motor drive, single-phase induction motors are widely used in household electric motor applications [2]. This application typically consumes power of a fractional horse power up to around ten horse powers.

In general, single-phase motors are controlled by a thyristor-phase controller or a variable resistor. This is quite simple, but it is not efficient in terms of energy consumption. To achieve this goal, complex control strategy cannot be avoided as long as AC machines are involved. One of widely-used control schemes is variable-voltage, variable-frequency (VVVF) [1,2]. It can be applied for motor control in many forms. With availability of its performance control, low installation cost and less maintenance, a single-phase induction motor can replace an expensive DC motor for electric vehicle applications.

In this paper, a whole system simulation of an electric scooter drive system is proposed in section 2. It consists of three main parts: 1) power supply interface 2) motor drive performance and 3) vehicle movement simulation. Section 3 presents a simple method to regulate vehicle speed. Simulation results and discussion are shown in section 4 and 5 respectively.

### **2. A Whole System Simulation of An Electric Scooter Drive System**

A whole system simulation of an electric scooter drive system consists of three main parts. The first part is power supply interface. Battery storage [3,4] and power-electronic inverter with its controller [5] are the heart of this part. Its main function is to provide a conditioned voltage waveform to feed an onboard electric motor. The second part is motor drive performance. In this paper, only the single-phase induction motor is focused. Adequate mathematical models are briefed [6,7]. These models are employed to simulate motor performances, e.g. speed of the rotor shaft, motor torque, etc. The third part is electric vehicle movement simulation [8,9]. This part operates by the motor torque generated from the motor performances. This torque directly applies to the vehicle wheel shaft as direct coupling. All three parts are explained in more detail as follows.

#### **2.1 Power Supply Interface**

Battery is vital to energize overall energy to the entire system. In practice, battery onboard a vehicle cannot be modeled by an idea source due to its Ah capacity [3]. This characteristic is the most important assumption to make the simulator virtually realistic. However, a simple battery model is not much complex. It may be represented by a Thevenin's equivalent circuit [4] as shown in Fig. 1. This model can be used together with battery

discharge curve [3] to provide a practical battery voltage characteristic as shown in equation 1.

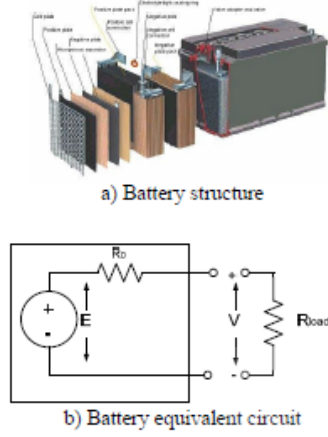


Fig. 1 Battery model

$$V = E - IR_0 \quad (1)$$

Another component in this part is equally important. It is an electronic inverter to provide controlled voltage waveform to feed an onboard traction motor. Although a single-phase inverter can be either half-bridge or full-bridge configuration, in this paper only the full-bridge inverter type [5-7] is chosen as shown in Fig. 2.

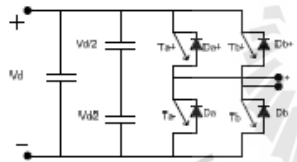


Fig. 2 Full-bridge inverter configuration

## 2.2 Motor Performance Calculation

A single-phase induction motor is selected as an energy converter of the system to converse electrical energy into mechanical energy. Single-phase induction motors can be characterized by several different models. The space-phasor approach [10] is the method used in this paper. With this model, motor currents, torque and speed can be observable. The space-phasor model is very complicated and needs more space for explanation. However, in this paper only a brief description is presented as follows [6,7]

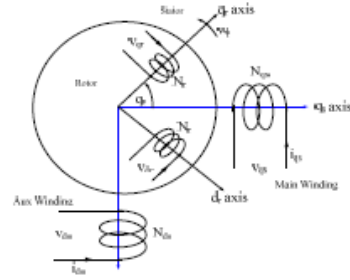


Fig. 3 winding alignment of a single-phase motor

Fig. 3 describes winding alignment of a single-phase induction motor consisting of main and auxiliary windings with their induced voltages and currents. As shown in the figure, a stationary reference frame which is along the axis of the main stator winding is defined and used for mathematical analysis throughout this paper. It is essential to inform that all quantities especially on the rotor need to be transferred to the stator axis. This can be performed by using the following transform matrix.

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

The superscripts  $s$  and  $r$  indicate the reference axis in which the variable belongs to. Briefly, the induced voltages on the stator and rotor windings are summarized in Equations 3 and 4, respectively

$$\begin{bmatrix} V'_{qs} \\ V'_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qqqs} & pL_{qds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dads} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qs} \\ i'_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'_{qr} + pL_{qqr} & pL_{qdr} \\ pL_{dqr} & r_{dr} + pL_{dadr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qqs} & L_{qds} \\ L_{dqs} & L_{dads} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i'_{qs} \\ i'_{ds} \end{bmatrix} \quad (4)$$

By using the transform matrix mentioned above, all state variables can be transformed into the stator direct axis as follows.

$$\frac{d}{dt} [i] = [A][i] + [B][v] \quad (5)$$

where,

$$\begin{aligned}
[A] &= [D]^{-1}[E] \\
[B] &= [D]^{-1} \\
[i] &= [i_{qr}, i_{dr}, i'_{qr}, i'_{dr}]^T \\
[v] &= [v_{qr}, v_{dr}, v'_{qr}, v'_{dr}]^T \\
[E] &= \begin{bmatrix} -r_m & 0 & \omega L_{mq} \sin \theta & \omega L_{mq} \cos \theta \\ 0 & -r'_m & -\omega L_{mq} \cos \theta & \omega L_{mq} \sin \theta \\ \omega L_{mq} \sin \theta & -\omega L_{mq} \cos \theta & -r_r & 0 \\ \omega L_{mq} \cos \theta & \omega L_{mq} \sin \theta & 0 & -r_r \end{bmatrix} \\
[D] &= \begin{bmatrix} L_{mq} + L_{mq} & 0 & L_{mq} \cos \theta & -L_{mq} \sin \theta \\ 0 & (L_{ls} + L_{ls}) & L_{mq} \sin \theta & L_{mq} \cos \theta \\ L_{mq} \cos \theta & L_{mq} \sin \theta & (L_b + L_{mq}) & 0 \\ -L_{mq} \sin \theta & L_{mq} \cos \theta & 0 & (L_r + L_{mq}) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$r_m$  is stator resistance of the main winding  
 $r'_m$  is stator resistance of auxiliary winding  
 $L_{ls}$  is leakage inductance of the main winding  
 $L'_{ls}$  is leakage inductance of the auxiliary winding  
 $L_{mq}$  is mutual inductance on the stator q-axis  
 $r_r$  is rotor resistance  
 $L_r$  is leakage inductance of the rotor q-axis

As can be seen, the two mechanical quantities,  $\omega_r$  and  $\theta_r$ , cause the need for additional two equations which can be obtained from Newton's second law of motion as shown in Equation 6.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} [T_e - T_L] \quad (6)$$

Combine Equations 5 and 6, Equation 7 is formed.

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{4 \times 4} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & -\frac{B_m}{J_m} & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4 \times 1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B]_{4 \times 4} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \frac{P}{2J_m} & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & T_e - T_L \\ \vdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v]_{4 \times 1} \\ T_e \\ T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

where,

$J_m$  is motor's moment of inertia  
 $B_m$  is damping coefficient

Applying a numerical time-stepping method to solve a set of differential equations, motor currents, angular speed and position can be calculated

numerically. Moreover, an induced torque  $T_e$  of a single-phase induction motor can be expressed as equation below.

$$T_e = \left( \frac{P}{2} \right) L_{mq} i_{qr} (i_{qr} \sin \theta - i_{dr} \cos \theta) + L_{mq} i_{dr} (i_{qr} \cos \theta - i_{dr} \sin \theta) \quad (8)$$

### 2.3 Vehicle movement simulation

An induced torque generated by the traction motor directly drives an electric vehicle through an axial of the vehicle wheel. With a simple relation of linear and angular movement by a driving force, the motor torque can be transferred from its original rotational quantity into its equivalent translational force to push the vehicle box as shown in Fig. 4. The torque-force relation can be calculated by using Equation 9.

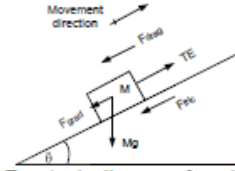


Fig. 4 Free-body diagram of a vehicle box

$$TE = \frac{T_e}{r_w} \quad (9)$$

where,

$TE$  is a vehicle tractive effort  
 $F_{drag}$  is a vehicle dynamic drag force  
 $F_{grad}$  is a gradient force due to road profiles  
 $F_{fric}$  is a friction between wheels and road  
 $r_w$  is a vehicle wheel radius  
 $M$  is a vehicle's effective mass  
 $g$  is the gravity constant ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

To include the linear motion of the vehicle into the motor performance calculation, the vehicle mass can be represented by an effective moment of inertia added with the rotor inertia as shown in Equation 10. In addition, any linear forces multiplied by  $r_w$  are effective torques coupled to the rotor shaft.

$$J_r = J_m + r_w^2 M \quad (10)$$

As can be seen in the free-body diagram, there exist two vehicle resistances and gradient force as follows [8,9,11-13].

**Drag force** ( $F_{drag}$ ) is a vehicle aerodynamic drag force to oppose the vehicle movement. It depends on

many factors such as vehicle body shape or vehicle speed.  $F_{drag}$  is given in Equation 11.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \times \rho \times A_r \times C_d \times v^2 \quad (11)$$

where,

- $\rho$  is the air density
- $A_r$  is a crosssectional area of the vehicle
- $C_d$  is a drag coefficient
- $v$  is a vehicle speed

**Friction** ( $F_{fnc}$ ) is a friction between the vehicle wheel and road surface to oppose the vehicle movement as shown in Fig. 5. It can be either static or dynamic friction. This force can be calculated by using Equation 12.

$$F_{fnc} = \mu_r Mg \cos \theta \quad (12)$$

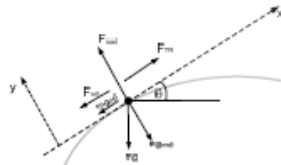


Fig. 5 Friction between the wheel and road surface

**Gradient force** ( $F_{grad}$ ) is a component of the vehicle weight that is projected to the direction of movement. This force exists only when the vehicle climbing up/down a hill. This force can be expressed by using Equation 13.

$$F_{grad} = Mg \sin \theta \quad (13)$$

From the Newton's second law of motion, the vehicle acceleration can be computed by the following equation.

$$a = \frac{T_e}{r_w M} - \frac{F_{grad}}{M} - \frac{F_{fnc}}{M} - \frac{F_{drag}}{M} \quad (14)$$

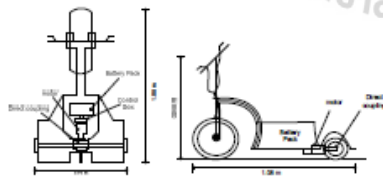


Fig. 6 Electric scooter

To analyze an electric scooter as shown in Fig. 6 as our test vehicle, two mutually coupled sets (linear and angular motion) can be formulated as shown in the free-body diagram in Fig. 7

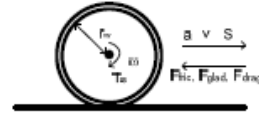


Fig. 7 Linear and angular motion coupling

To include effects of motor performances on the vehicle movement, rotational quantities must be transformed into a linear motion equation as follows.

$$a = \frac{T_e}{R_w (M + \frac{J}{R_w^2})} - \frac{F_{drag}}{(M + \frac{J}{R_w^2})} - \frac{F_{grad}}{(M + \frac{J}{R_w^2})} - \frac{F_{fnc}}{(M + \frac{J}{R_w^2})} \quad (15)$$

When the acceleration ( $a_k$ ) at time  $k$  is computed, vehicle speed and distance can be updated with simple discrete time updating equations as follows.

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} \quad (16)$$

$$v_k = v_{k-1} + a_k \Delta t \quad (17)$$

$$s_k = s_{k-1} + v_k \Delta t + \frac{1}{2} a_k (\Delta t)^2 \quad (18)$$

where,

- $\Delta t$  is the time update interval
- $s_k$  is a vehicle traveling distance at time  $k$
- $v_k$  is a vehicle speed at time  $k$
- $a_k$  is a vehicle acceleration at time  $k$

### 3. Vehicle Speed Control Strategy

To simulate vehicle motion, speed control strategy of a vehicle is required [8,9]. It can be achieved via simple rules. As long as the vehicle is accelerating and its speed is not reached the upper speed limit, the voltage supply fully energizes to the traction motor. When the speed violates the upper speed limit, just switch the power supply off or use a reduced voltage supply to energize the motor. When the power supply is off or reduced, the vehicle speed is decreased dramatically. Whenever it violates the lower speed limit, the full power supply must be back to energize the motor for acceleration as shown in Fig. 8. This speed-control strategy is a so-called ON/OFF control strategy that is widely used in several dynamic control systems, e.g. thermal control system.

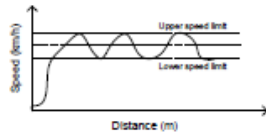


Fig. 8 ON/OFF vehicle speed control strategy

#### 4. Simulation Results

To simulate a scooter drive system, road surface profile as shown in Fig.9 and system parameters as shown in Table 1 are situated for test.

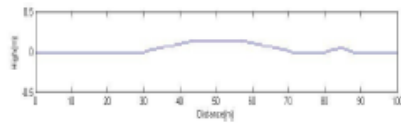


Fig. 9 Road surface profile

Table 1 System parameter for test

Inverter voltage ( $V_{rms}$ )	230 V
Supply frequency (Hz)	50 Hz
Number of poles ( $P$ )	4
Main winding resistance ( $r_m$ )	1.3 $\Omega$
Auxiliary winding resistance ( $r_{a_s}$ )	2.6 $\Omega$
Rotor resistance ( $r_r$ )	2.01 $\Omega$
Main winding inductance ( $L_{m_s}$ )	0.2785H
Auxiliary winding inductance ( $L_{a_s}$ )	0.0074 H
Rotor inductance ( $L_r$ )	0.0053 H
Magnetizing inductance ( $L_{m_m}$ )	0.0074 H
Rotor inertia ( $J_m$ )	0.01 N-m-s <sup>2</sup> /rad
Damping coefficient ( $B_m$ )	0.005 N-m-s/rad
Motor rating	0.26 kw
Static friction coefficient ( $\mu_s$ )	0.7
Dynamic friction coefficient ( $\mu_k$ )	0.2
Effective mass ( $M$ )	80 kg
Wheel radius of the vehicle ( $r_w$ )	0.1 m
Air density ( $\rho$ )	0.129
Drag coefficient ( $C_d$ )	0.2
Cross-sectional area of the vehicle ( $A_c$ )	0.3 m <sup>2</sup>

Start the simulation by setting the upper and lower speed limit as 18.72 kph and 17.28 kph, respectively. The simulation will be terminated when the vehicle distance is greater than 100 m. To achieve the ON/OFF control action, full voltage of 230 V and reduced voltage of 100 V are chosen to energize the traction motor during the journey. Figs 9 – 12 show results from the motor performance calculation throughout the journey. Fig. 13 presents the tractive effort of the traction motor. Figs 14 – 18 give the performance of the vehicle movement simulation.

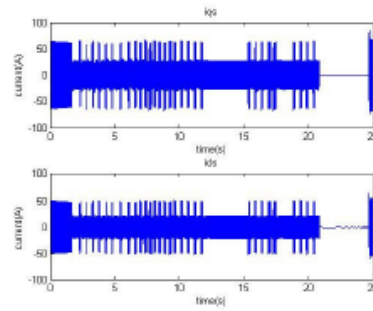


Fig. 9 Stator currents of the traction motor

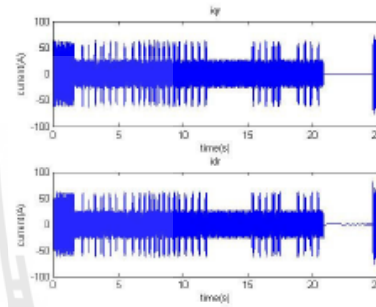


Fig. 10 Rotor currents of the traction motor

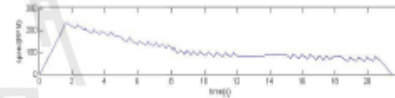


Fig. 11 Angular speed of the traction motor

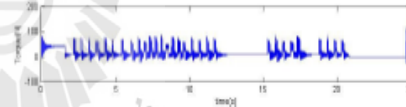


Fig. 12 Induced torque of the traction motor

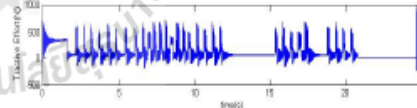


Fig. 13 Tractive effort of the traction motor

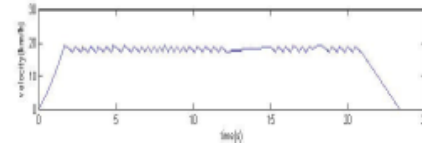


Fig. 14 Regulated speed of the test vehicle

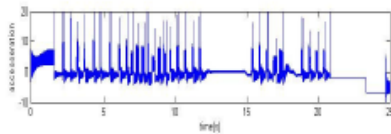


Fig. 15 Acceleration of the test vehicle

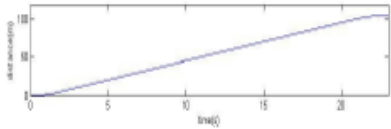


Fig. 16 Travel distance of the test vehicle

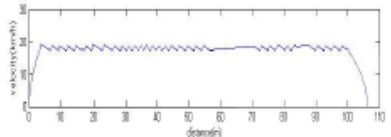


Fig. 17 Speed versus travel distance of the test vehicle

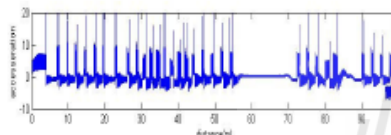


Fig. 18 Acceleration versus travel distance of the test vehicle

## 5. Conclusion

In this paper, modeling and simulation of a single-phase induction motor to drive an electric vehicle is proposed. Models of each part are illustrated. Formulation of a whole system simulator for the electric scooter drive system is developed in fine detail and is the main contribution of this paper. In addition, an ON/OFF vehicle speed control strategy is demonstrated to regulate the vehicle speed within the limit. The results showed that the single-phase induction motor can be employed to drive the electric scooter with good performances.

### References:

- [1] Ba-thunya, A.S., Khopkar, R., Wei, K., Toliyat, H.A., *Single-phase Induction Motor Drives-A Literature Survey*, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC2001), 17 – 20 June 2001, Massachusetts, USA, 2001, pp.911 – 916
- [2] Correa, M.B., Jacobina, C.B., da Silva, E.R.C., Lima, AMN., *Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems*, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 51, pp. 1073 – 1080, 2004
- [3] Gage, T.B. *Lead-acid batteries: key to electric vehicle commercialization. experience with design, manufacture and use of EV's*, The 15<sup>th</sup> Annual Battery Conference on Applications and Advances, 2000, pp. 217 – 222
- [4] Oman, H., *On-board energy and power management on electric vehicles: effect of battery type*, The 17<sup>th</sup> Annual Digital Avionics System Conference, Vol. 2, 1998, pp. I43/1 – I43/6
- [5] Kawaguchi, K., Godo, S., Kawabatam, T., *Novel modulation method of single-phase bridge inverter for improved utilization of power device*, The 33<sup>rd</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 02), 2002, pp.226 – 231
- [6] Naewngemdee, N., Sukcharoen, C., Kulworawanichpong, T., *Simulation of single-phase induction motor drives with non-sinusoidal power supply*, The WSEAS Transactions on Systems, Issue 5, Vol 5, pp. 1029-1034
- [7] Naewngemdee, N., Sukcharoen, C., Kulworawanichpong, T., *Optimizing voltage frequency control strategy for single-phase induction motor drives*, The 5<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE'06), Prague, Czech Republic, 12 – 14 March 2006, pp. 84 – 89, 2006
- [8] Kulworawanichpong, T., Goodman, C.J., *Optimal area control of AC railway systems via PWM traction drives*, IEE Proceedings Part B: Electric Power Applications, Vol. 152, No. 1, pp. 33 – 40, January 2005
- [9] Goodman, C.J., *Overview of electric railway systems and the calculation of train performance*, The 9<sup>th</sup> Institution of Engineering and Technology Professional Development Course on Electric Traction Systems, 6-10 November 2006, pp. 1-24
- [10] Krishnan, R., *Electric motor drive modeling analysis and Control*, Prentice Hall, 2001
- [11] Sarma, M.S. *Electric machines steady state theory and dynamic performance*, West Publishing Company, 1994
- [12] Giancarlo, G., *Motor vehicle dynamics modeling and simulation*, World Scientific, 1997
- [13] Iqbal, H., *Electric and hybrid vehicles design fundamentals*, New York, 2003