

การประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลตเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มี  
การอัดประจุสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส

นายศุภณัฐ สถาวร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ASSESSMENT OF TRANSFORMER OVERLOADING IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION  
SYSTEM WITH SINGLE-PHASE ELECTRIC VEHICLE CHARGING

Mr. Suphanut Satarworn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลง  
ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีการอัดประจุ  
สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส

โดย

นายศุภณัฐ สถาวร

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.จักรเพชร มัทราช)

ศุภณัฐ สถาวร : การประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีการอัดประจุสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส (ASSESSMENT OF TRANSFORMER OVERLOADING IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEM WITH SINGLE-PHASE ELECTRIC VEHICLE CHARGING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 53 หน้า.

การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่อยู่อาศัย อาจส่งผลให้เกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า เนื่องจากพฤติกรรมการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงและต่อเนื่องเป็นเวลานาน วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลกระทบของการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าที่บ้านต่อการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า โดยพิจารณาปัจจัยด้านพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า การศึกษาและประเมินผลกระทบได้ทดลองบนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่จำหน่ายไฟฟ้าให้แก่บ้านเรือนจำนวน 57 ครั้วเรือน ผลการศึกษายกได้ว่าเมื่อรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาในระบบทดสอบเป็นจำนวนมากกว่าร้อยละ 75 ของจำนวนครั้วเรือน จะส่งผลให้ดัชนีด้านระยะเวลาเฉลี่ยที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในภาวะโหลดเกิน มีค่าเกินกว่า 4 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่การไฟฟ้าหรือผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจะยอมรับได้ และหากสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าลดลง ยังทำให้ดัชนีด้านระยะเวลาเฉลี่ยที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในภาวะโหลดเกินมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงถึงอัตราความสำเร็จในการอัดประจุ พบว่ามีรถยนต์ไฟฟ้าที่อัดประจุไม่สำเร็จจ้อยสูงสุดไม่เกินร้อยละ 7 ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าและพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ อย่างไรก็ตามการปรับพฤติกรรมการใช้รถยนต์เพื่อหลีกเลี่ยงช่วงที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบจำหน่าย จะส่งผลให้ดัชนีด้านระยะเวลาเฉลี่ยที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในภาวะโหลดเกินลดลงน้อยกว่า 4 ชั่วโมงต่อวัน จากผลการทดสอบทั้งหมดผู้ดูแลระบบไฟฟ้าสามารถใช้เป็นแนวทางในการเฝ้าระวังและจัดการในกรณีที่รถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาเชื่อมต่อในระบบผ่านบ้านเรือน และเตรียมการสำหรับการปรับปรุงระบบไฟฟ้าในเวลาที่เหมาะสม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5670409521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRIC VEHICLES / HOME CHARGER / URBAN AREA DISTRIBUTION / TRANSFORMER OVERLOADING

SUPHANUT SATARWORN: ASSESSMENT OF TRANSFORMER OVERLOADING IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEM WITH SINGLE-PHASE ELECTRIC VEHICLE CHARGING. ADVISOR: ASSOC. PROF. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 53 pp.

The concentration of electric vehicles (EV) in a residential area can cause distribution transformer overloading because of their charging behavior and the resulting power demand. This thesis assesses the impact of EV home charging on transformer overloading considering three critical factors, which are driving behavior, EV penetration level and EV driving performance. Test scenarios are confined by a low-voltage distribution system with residential load profiles of 57 households. Test results show that the transformer overloading indexes are unacceptable when EV penetration level reaches 75 percent. The Transformer Overloading Average Duration Index (TOADI) is more than 4 hours per day, which is an acceptable criterion based on the practical standard of the utility, and will be greater when the EV driving performance is lower. Additionally, there is no more than 7 percent of unsuccessful charge event in all tested cases, depending on the driving behavior and driving performance. Test results also show that the change in driving behavior can reduce the TOADI to be acceptable. The assessment can provide guidelines for a power utility to devise necessary monitoring and control scheme to accommodate the EV penetration, and to plan for upsizing the distribution transformer in an appropriate time.

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาการทำวิจัย รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องเกี่ยวกับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชาณูณรงค์ บาลมงคล รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ และ ดร.จักรเพชร มัทราช ที่ได้อนุเคราะห์เวลามาช่วยตรวจสอบ และให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เป็นไปด้วยดี

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือด้านงานธุรการและความดูแลเอาใจใส่ต่อนักศึกษาทุกคนอย่างเต็มกำลังความสามารถ ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อมูลที่จำเป็น ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัย

ทั้งนี้ขอขอบคุณชมรมบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับกิจกรรมเพื่อเสริมสร้างทักษะที่จำเป็น ในการเรียนระดับบัณฑิตศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ช่วยสนับสนุนและให้กำลังใจในการเรียนต่อกับผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

|                                                                                 | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                            | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                         | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                            | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                                     | ช    |
| สารบัญภาพ .....                                                                 | 1    |
| สารบัญตาราง.....                                                                | 1    |
| บทที่ 1 บทนำ .....                                                              | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....                                                      | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ .....                                                          | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....                                                  | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน .....                                       | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                              | 2    |
| บทที่ 2 ผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลตเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า.....     | 3    |
| 2.1 คุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้า .....                                               | 3    |
| 2.2 คุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า .....                                    | 4    |
| 2.3 ภาวะโหลตเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า .....                                    | 9    |
| บทที่ 3 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า.....                                    | 12   |
| 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า .....                   | 12   |
| 3.2 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EV Charging Management) .....              | 14   |
| บทที่ 4 การศึกษาผลกระทบด้านภาวะโหลตเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในพื้นที่อยู่อาศัย ..... | 16   |
| 4.1 การประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลตเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า .....                     | 16   |
| 4.2 การสร้างโหลดโปรไฟล์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน .....                      | 18   |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3 การศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลตเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า ..                                | 27 |
| 4.4 ผลการศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลตเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า .....                            | 31 |
| 4.5 สรุปและวิเคราะห์การศึกษาผลกระทบ.....                                                                      | 40 |
| บทที่ 5 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลตเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในพื้นที่อยู่อาศัย ..... | 41 |
| 5.1 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period.....                                   | 41 |
| 5.2 การทดสอบการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period .....                          | 42 |
| บทที่ 6 สรุป .....                                                                                            | 49 |
| รายการอ้างอิง .....                                                                                           | 51 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....                                                                              | 53 |



## สารบัญภาพ

หน้า

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 1 การกระจายของความน่าจะเป็นของพฤติกรรมการใช้รถยนต์ในพื้นที่อยู่อาศัย .....                | 8  |
| ภาพที่ 2 ตัวอย่างโพลโพรไฟล์เฉลี่ยของบ้านหนึ่งหลัง .....                                          | 9  |
| ภาพที่ 3 คุณลักษณะของอายุการใช้งานหม้อแปลงที่เสียไปเนื่องจากภาวะโหลดเกิน .....                   | 10 |
| ภาพที่ 4 ระบบจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ .....                                    | 13 |
| ภาพที่ 5 ระบบจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ .....                                       | 14 |
| ภาพที่ 6 ตัวอย่างการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า .....                                           | 15 |
| ภาพที่ 7 การแจกแจงความน่าจะเป็นช่วงเวลาที่รถเข้าและออกจากบ้านพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก .....         | 19 |
| ภาพที่ 8 การแจกแจงความน่าจะเป็นช่วงเวลาที่รถเข้าและออกจากบ้านพื้นที่ประเทศไทย .....              | 19 |
| ภาพที่ 9 การกระจายของข้อมูลระยะทางที่รถยนต์ใช้ในแต่ละวัน .....                                   | 20 |
| ภาพที่ 10 ขั้นตอนวิธีในการจำลอง Parking Profiles .....                                           | 21 |
| ภาพที่ 11 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสุ่มเวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้านและออกจากบ้านในแต่ละวัน ....        | 21 |
| ภาพที่ 12 ตัวอย่างผลลัพธ์เวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้านและออกจากบ้านภายหลังพิจารณา<br>เงื่อนไข ..... | 22 |
| ภาพที่ 13 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสร้าง Parking Profiles .....                                      | 23 |
| ภาพที่ 14 ขั้นตอนวิธีในการจำลอง Charging Profiles .....                                          | 24 |
| ภาพที่ 15 ตัวอย่างจากการสุ่มระยะทางเพื่อแปลงเป็นเวลาในการอัดประจุ .....                          | 24 |
| ภาพที่ 16 ตัวอย่างผลลัพธ์ของเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจะทำการอัดประจุสำเร็จ .....                        | 24 |
| ภาพที่ 17 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสร้าง Charging Profiles .....                                     | 25 |
| ภาพที่ 18 ตัวอย่างความไม่สัมพันธ์กันของเวลาที่อัดประจุสำเร็จและเวลาที่รถออกจากบ้าน .....         | 26 |
| ภาพที่ 19 ตัวอย่างการพิจารณาโพลโพรไฟล์เพื่อสร้าง Complete Charging Profiles .....                | 26 |
| ภาพที่ 20 ตัวอย่างโพลโพรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า .....                                      | 27 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 21 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในเขตพื้นที่อยู่อาศัย 19 บัส .....                                 | 28 |
| ภาพที่ 22 รูปแบบโหลตรายวันของบ้านทั้งหมดต่อ 1 เฟส .....                                      | 28 |
| ภาพที่ 23 ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....                                             | 29 |
| ภาพที่ 24 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันของโหลดที่มีปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าแตกต่างกัน.....                 | 29 |
| ภาพที่ 25 สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ทำการศึกษา.....                                            | 30 |
| ภาพที่ 26 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันของโหลดรถยนต์ไฟฟ้าที่มีสมรรถนะแตกต่างกัน .....               | 30 |
| ภาพที่ 27 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันของโหลดรถยนต์ไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมการใช้งานแตกต่างกัน.....      | 31 |
| ภาพที่ 28 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อดัชนีภาวะโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลง .....              | 33 |
| ภาพที่ 29 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อ TOAFI.....                                          | 33 |
| ภาพที่ 30 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อ TOADI.....                                          | 33 |
| ภาพที่ 31 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อดัชนีภาวะโหลดเกินพิกัดของหม้อ<br>แปลง.....       | 34 |
| ภาพที่ 32 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อ TOADI.....                                      | 34 |
| ภาพที่ 33 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อ EVSCR .....                                     | 34 |
| ภาพที่ 34 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ประเทศไทย.....                                 | 35 |
| ภาพที่ 35 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ประเทศไทย.....                             | 35 |
| ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้รถและปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า.....                  | 36 |
| ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้รถและปัจจัยด้านสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า.....              | 38 |
| ภาพที่ 38 ผลการวิเคราะห์ดัชนี TOAFI.....                                                     | 39 |
| ภาพที่ 39 ผลการวิเคราะห์ดัชนี TOADI .....                                                    | 39 |
| ภาพที่ 40 ผลการวิเคราะห์ดัชนี EVSCR.....                                                     | 39 |
| ภาพที่ 41 แผนภาพแสดงโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของ Restricted Charging Period .....           | 41 |
| ภาพที่ 42 เกณฑ์การพิจารณาเกรดสำหรับดัชนี TOAFI, TOADI และ EVSCR .....                        | 42 |
| ภาพที่ 43 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่า Restricted Charging Period ในพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก ... | 43 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 44 ผลจากการประเมินเกรดของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก .....       | 44 |
| ภาพที่ 45 ผลการประเมินเกรดเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก .....    | 45 |
| ภาพที่ 46 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่า Restricted Charging Period ในพื้นที่ประเทศไทย ..... | 46 |
| ภาพที่ 47 ผลจากการประเมินเกรดของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่ประเทศไทย .....            | 47 |
| ภาพที่ 48 ผลการประเมินเกรดเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่ประเทศไทย .....         | 48 |



## สารบัญตาราง

หน้า

|                                                                             |   |
|-----------------------------------------------------------------------------|---|
| ตารางที่ 1 ประเภทของแบตเตอรี่ ที่ถูกใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าแบ่งตามผู้ผลิต ..... | 4 |
| ตารางที่ 2 Charging power levels (SAE J1772) .....                          | 7 |



# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานวิทยานิพนธ์

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อมและการประยุกต์ใช้ในงานระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) ความนิยมในตัวรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles, EV) กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วสังเกตได้จากการที่มีผู้ผลิตรถยนต์ให้ความสนใจผลิตรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากทั่วโลก

ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นย่อมหมายถึงปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้น ปัญหาดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่เชื่อมต่อกับบ้านเรือนโดยตรง หม้อแปลงจำหน่ายของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำมีแนวโน้มที่จะต้องรับภาระโหลดที่เพิ่มขึ้นจากการเข้ามาของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่สั้นลง และอาจรุนแรงถึงขั้นเกิดความเสียหายที่หม้อแปลง ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับและทำให้ความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าลดลง

การศึกษานี้จะพิจารณาการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ตามบ้านเรือนในพื้นที่ชุมชน โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลกับการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่จะถูกเชื่อมต่อเข้ามาในระบบ และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่แปรผันตามสภาพอากาศและการจราจร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการอัดประจุ

การศึกษาผลกระทบจะนำไปสู่วิธีการแก้ปัญหาที่สอดคล้องกับปัจจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้น เพื่อให้ระบบสามารถรองรับการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า อันเนื่องมาจากการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าตามบ้านแบบ 1 เฟส โดยประยุกต์ใช้พฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ รวมไปถึงพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ
2. นำเสนอวิธีการจัดการที่สอดคล้องกับผลการศึกษา เพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า อันเนื่องมาจากการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าตามบ้านแบบ 1 เฟส

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ระดับแรงดัน 230/400 V
2. พิจารณาเฉพาะหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่ระดับแรงดัน 22/0.4 kV
3. พิจารณาเฉพาะการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ตามบ้าน เท่านั้น

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาพื้นฐานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำในเขตพื้นที่อยู่อาศัย
2. ศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นของรถยนต์ไฟฟ้าและการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส
3. ศึกษาตัวอย่างโหลดของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในเขตชุมชน
4. ศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า
5. ศึกษาวิธีการป้องกันหรือแก้ไขผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า
6. สร้างโหลดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน
7. ทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน ที่ส่งผลต่อการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า
8. นำเสนอวิธีการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า เนื่องมาจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส
9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาสามารถถูกนำไปปรับใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้ดูแลระบบไฟฟ้า ในการติดตามเพื่อเฝ้าระวังปริมาณและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในเขตพื้นที่อยู่อาศัย และนำไปสู่กระบวนการจัดการเพื่อลดผลกระทบต่อไป

## บทที่ 2

### ผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโลกร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวคุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้า และลักษณะการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าที่จะส่งผลกระทบให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า รวมไปถึงผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้าว่าส่งผลอย่างไรต่อหม้อแปลง

#### 2.1 คุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้า

รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) คือรถยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ซึ่งเป็นแนวคิดที่ใช้งานใช้งานมาช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้ว ในรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle, HEV) หรือรถยนต์ไฟฟ้าที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine, ICE) ปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนไปได้ด้วยระบบไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังสามารถทำการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ในรถยนต์เพื่อให้รถยนต์สามารถวิ่งต่อไปได้ในลักษณะเดียวกับการเติมน้ำมัน ซึ่งรถยนต์ในลักษณะนี้มักถูกเรียกว่า Plugged-in Electric Vehicle (PEV) หรือเรียกว่า Battery Electric Vehicle (BEV)

เมื่อพูดถึงรถยนต์ไฟฟ้า คงไม่อาจปฏิเสธได้ว่า หนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า คือ แบตเตอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันมีอยู่หลากหลายประเภท ส่งผลให้มีการใช้งานแบตเตอรี่หลากหลายประเภท แต่แบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน มีอยู่สองประเภทด้วยกัน ได้แก่ แบตเตอรี่ประเภทนิเกิลเมทัลไฮไดรด์ (NiMH) และแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-Ion) [1]

แบตเตอรี่ประเภทนิเกิลเมทัลไฮไดรด์ มักพบในรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด ส่วนมากรถยนต์ประเภทนี้ไม่มีความจำเป็นต้องทำการอัดประจุ แบตเตอรี่ที่ถูกใช้ในรถยนต์ประเภทนี้จึงเน้นไปที่ศักยภาพในการเก็บสะสมพลังงานทั้งในเรื่องของอายุการใช้งานและปริมาณความจุที่ต้องมีมากกว่าแบตเตอรี่ทั่วไป [1]

ในอีกด้านหนึ่ง แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน จะถูกใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าแบบ Battery Electric Vehicle โดยใช้หลักการเดียวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป เช่น โทรศัพท์มือถือหรือกล้องถ่ายรูปที่สามารถทำการอัดประจุเพื่อนำไปใช้งาน เพียงแต่แบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ความจุที่เพิ่มขึ้น และอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น [1]

ทั้งนี้ได้มีการรวบรวมแบตเตอรี่ที่ถูกใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าจากหลากหลายผู้ผลิต เพื่อให้เห็นการนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน ซึ่งรวมไปถึงการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ ที่อยู่ระหว่างการพัฒนาหรือไม่เป็นที่นิยมใช้นัก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของแบตเตอรี่ ที่ถูกใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าแบ่งตามผู้ผลิต

| Company      | Country     | Vehicle model       | Battery technology (Size) |
|--------------|-------------|---------------------|---------------------------|
| GM           | USA         | Chevy-Volt          | Li-Ion                    |
|              |             | Saturn Vue Hybrid   | NiMH                      |
|              |             | EV1                 | Lead-acid                 |
| Ford         | USA         | Escape, Fusion, MKZ | NiMH                      |
|              |             | Escape PHEV         | Li-Ion                    |
| Toyota       | Japan       | Prius, Lexus        | NiMH                      |
| Honda        | Japan       | Civic, Insight      | NiMH                      |
| Hyundai      | South Korea | Sonata              | Lithium polymer           |
| Chrysler     | USA         | Chrysler 200C EV    | Li-Ion                    |
| BMW          | Germany     | X6                  | NiMH                      |
|              |             | Mini E (2012)       | Li-Ion                    |
| BYD          | China       | E6                  | Li-Ion                    |
| Daimler Benz | Germany     | ML450, S400         | NiMH                      |
|              |             | Smart EV (2010)     | Li-Ion                    |
| Mitsubishi   | Japan       | iMiEV (2010)        | Li-Ion                    |
| Nissan       | Japan       | Altima              | NiMH                      |
|              |             | Leaf EV (2010)      | Li-Ion (24 – 30 kWh)      |
|              |             | Altra               | Li-Ion                    |
| Tesla        | USA         | Roadster (2009)     | Li-Ion                    |
| Think        | Norway      | Think EV            | Li-Ion                    |
|              |             |                     | Sodium/Metal Chloride     |

ที่มา: [1, 2]

## 2.2 คุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของสถานีอัดประจุสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติดังต่อไปนี้ จะใช้ในการพิจารณาเพื่อเลือกสถานีอัดประจุที่เหมาะสมกับการใช้งาน อีกทั้งยังใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ ในกรณีที่มีการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคต โดยจะกล่าวถึงชนิดของสถานีอัดประจุสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า และมาตรฐานของสถานีอัดประจุที่ถูกใช้อยู่ใน



ปัจจุบัน เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ทำให้การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ [1, 3, 4]

### 2.2.1 มาตรฐานการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้า

มาตรฐานของสถานีอัดประจุสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า จะเป็นตัวกำหนดระดับแรงดัน และระดับของกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้ในการอัดประจุ รวมไปถึงโครงสร้างพื้นฐานและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดประจุ ซึ่งในปัจจุบันสามารถจำแนกการอัดประจุออกเป็น 3 ระดับ ดังแสดงไว้ใน



## ตารางที่ 2

พบว่ามาตรฐานการอัดประจุระดับที่ 1 (Level 1 Charging) เป็นการอัดประจุที่ช้าที่สุด เนื่องจากเป็นการใช้อุปกรณ์แบบ 1 เฟส เชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าระดับแรงดัน 110-220 โวลต์ การอัดประจุในระดับนี้จะพบได้ตามที่พักอาศัยซึ่งเป็นสถานที่ส่วนบุคคล หรือแม้แต่ตามลานจอดรถในที่ทำงาน ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เนื่องจากในรถยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้นำอุปกรณ์สำหรับการอัดประจุในระดับนี้บรรจุไว้ในตัวรถด้วย เพื่อความสะดวกในการใช้งาน อย่างไรก็ตามการอัดประจุในลักษณะนี้อาจใช้เวลาในการอัดประจุได้นานที่สุดถึง 20 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์อัดประจุที่ติดตั้งมากับตัวรถและขนาดความจุของแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า [3, 4]

เนื่องจากระยะเวลาในการอัดประจุที่ยาวนาน ทำให้ผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะแนะนำให้ติดตั้งอุปกรณ์อัดประจุเพิ่มเติม ตามมาตรฐานการอัดประจุระดับที่ 2 (Level 2 Charging) เป็นการอัดประจุที่เร็วขึ้นมาอีกระดับหนึ่ง โดยใช้เวลาอัดประจุนานที่สุดประมาณ 8 ชั่วโมง เนื่องจากใช้กำลังไฟฟ้าในการอัดประจุสูงกว่าระดับที่ 1 การอัดประจุในระดับนี้ต้องการแรงดันที่ระดับ 200-240 โวลต์ และสามารถทำการอัดประจุที่ระดับกำลังสูงสุดที่ 19.2 กิโลวัตต์ ด้วยเหตุนี้การอัดประจุในระดับที่ 2 อาจจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดประจุเพิ่มเติม เพื่อรองรับระดับแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 1 [3, 4]

มาตรฐานการอัดประจุระดับที่ 3 (Level 3 Charging) หรือที่รู้จักกันในชื่อการอัดประจุแบบเร็ว (Fast Charging) เป็นการอัดประจุที่ใช้เวลาน้อยที่สุด อาจใช้เวลาเพียง 15 นาทีในรถยนต์ไฟฟ้าบางรุ่น โดยปกติการอัดประจุแบบเร็วจะถูกติดตั้งในรูปแบบสถานีอัดประจุ โดยจะพบสถานีอัดประจุได้บ่อยตามจุดพักรถบนทางหลวงหรือสถานีเติมน้ำมัน เนื่องจากผู้ใช้รถจำเป็นต้องหยุดพักเพื่ออัดประจุให้แก่รถยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่ต้องวิ่งเป็นระยะทางไกล การอัดประจุในระดับที่ 3 จะทำงานด้วยแรงดัน 3 เฟส 480 โวลต์ ทำการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรภายในของสถานีอัดประจุ และสามารถทำการอัดประจุด้วยกำลังสูงสุดถึง 100 กิโลวัตต์ ทำให้การอัดประจุในระดับนี้ต้องการการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดประจุเพิ่มเติมเพื่อรองรับกับกำลังไฟฟ้าที่สูงมาก [3, 4]

ตารางที่ 2 Charging power levels (SAE J1772)

| Charging Level | System            | Maximum Charging Power | Estimated Charging Duration |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|
| Level 1        | 1-phase           | 1.9 kW                 | 15 - 20 hours               |
| Level 2        | 1-phase / 3-phase | 19.2 kW                | 2 - 8 hours                 |
| Level 3        | 3-phase           | 100 kW                 | 15 - 30 minutes             |

ที่มา: SAE J1772, 2010 [3, 4]

## 2.2.2 โหลดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในเขตที่อยู่อาศัย

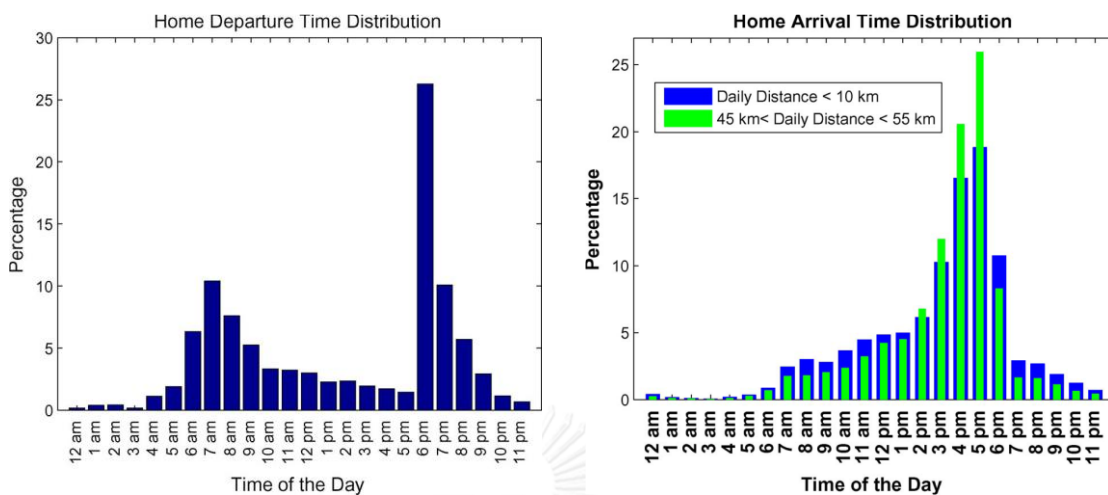
นอกเหนือจากปัจจัยด้านกำลังไฟฟ้าแล้ว ยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะโหลดโปรไฟล์โดยตรง นั่นคือลักษณะการใช้งานในพื้นที่ต่าง ๆ หัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะการใช้งานเครื่องอัดประจุตามบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมกรรมการขับขี่รถยนต์ในพื้นที่ศึกษา [2, 5]

จากการเก็บข้อมูลการใช้รถยนต์ส่วนตัว ในพื้นที่อยู่อาศัยของเมืองวินนิเพก ประเทศแคนาดา โดยทำการเก็บข้อมูลของรถยนต์จำนวน 76 คัน เป็นเวลา 1 ปี เพื่อนำมาใช้ในการจำลองลักษณะโหลดของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่ ช่วงเวลาที่รถยนต์ในพื้นที่ออกจากบ้าน (Home Departure Time) ช่วงเวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้าน (Home Arrival Time) ระยะทางที่รถยนต์แต่ละคันวิ่งไปในแต่ละวัน (Daily Trip Distance) จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งสามมาผ่านกระบวนการเพื่อหาโหลด โดยทำการเปรียบเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันในส่วนของความจุของแบตเตอรี่ ระยะทางที่วิ่งได้สูงสุด และอุปกรณ์อัดประจุที่สามารถใช้งานร่วมกันได้

ภาพที่ 1a และภาพที่ 1b แสดงถึงความน่าจะเป็นที่รถยนต์ไฟฟ้าจะเข้ามาจอดที่บ้านของผู้ใช้เพื่อทำการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในแต่ละวัน โดยตั้งสมมติฐานว่าผู้ใช้จะทำการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าทันทีที่กลับถึงบ้าน ในส่วนของภาพที่ 1c จะแสดงถึงความน่าจะเป็นของระยะทางที่รถวิ่งไปในแต่ละวันในหน่วยกิโลเมตร ซึ่งจะสะท้อนไปถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ระยะทางที่ย่อมหมายถึงการใช้เวลาในการอัดประจุที่นานขึ้นเช่นกัน เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาประมวลผลแล้วพบว่าลักษณะของโหลดการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า เมื่อนำไปผสมกับโหลดฐานที่มีอยู่เดิมจะเป็นไปตามภาพที่ 2

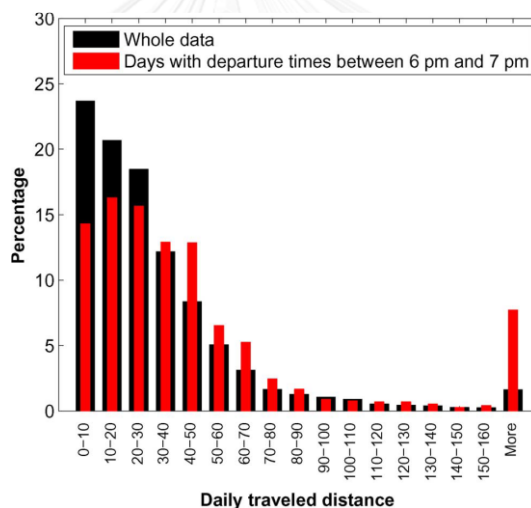
ภาพที่ 2a คือลักษณะของโหลดเฉลี่ยต่อบ้านหนึ่งหลัง เมื่อบ้านแต่ละหลังมีรถยนต์ไฟฟ้าหลังละ 1 คัน พบว่ารถยนต์ไฟฟ้าสามารถทำให้โหลดเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะช่วงพีคโหลดที่เพิ่มขึ้นจากเดิมกว่าร้อยละ 20 และทำให้โหลดของบ้านเรือนที่มีลักษณะไม่เป็นยอดแหลม มีความเป็นยอดแหลมมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบผลิตไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพฤติกรรม

การใช้รถยนต์ อาทิเช่น เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล พฤติกรรมการใช้รถยนต์ที่เปลี่ยนไปจะส่งผลให้ โหลดโปรไฟล์มีค่าเปลี่ยนไปด้วยดังแสดงไว้ในภาพที่ 2b



(a) เวลาที่รถยนต์ออกจากบ้าน

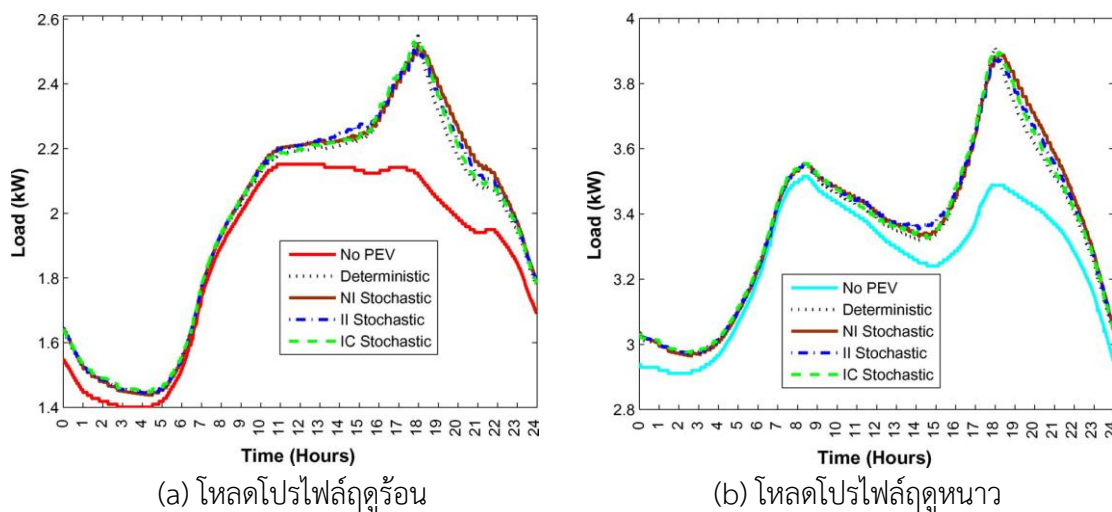
(b) เวลาที่รถยนต์กลับมาบ้าน



(c) ระยะทางที่รถยนต์ใช้ในแต่ละวัน

ที่มา: Ali Ashtari, 2012 [5]

ภาพที่ 1 การกระจายของความน่าจะเป็นของพฤติกรรมการใช้รถยนต์ในพื้นที่อยู่อาศัย



ที่มา: Ali Ashtari, 2012 [5]

ภาพที่ 2 ตัวอย่างโหลดโพรไฟล์เฉลี่ยของบ้านหนึ่งหลัง

## 2.3 ภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

ในภาวะปกติ หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับปริมาณโหลด รวมไปถึงมีการเผื่อการเพิ่มขึ้นของโหลดในอนาคต แต่เนื่องจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ามีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่สูงและต่อเนื่องเป็นเวลานาน ส่งผลให้หม้อแปลงมีความเสี่ยงสูงที่จะต้องรับภาระโหลดเกินพิกัด

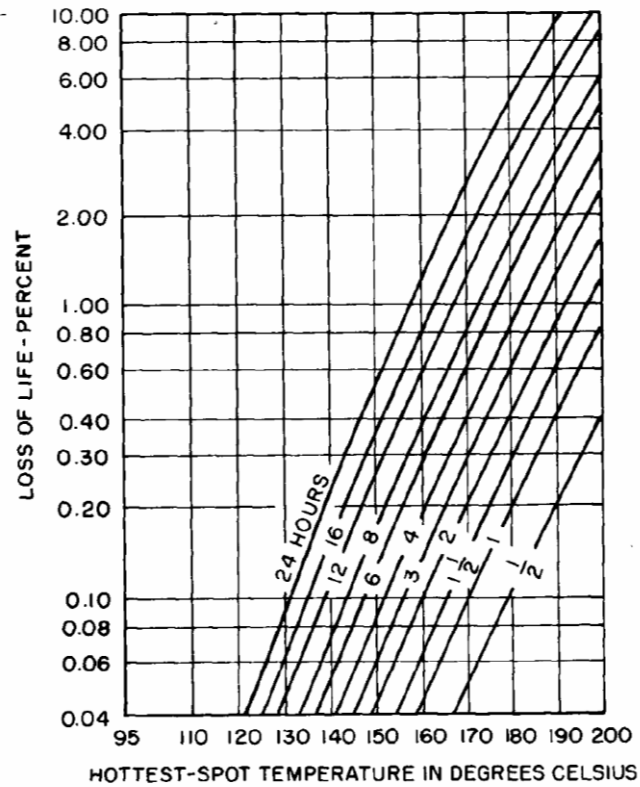
ภาวะโหลดเกินในหม้อไฟฟ้าได้รับการนิยามโดยมาตรฐาน IEEE Std. C57.91-2011 โดยกล่าวถึงผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานเกินพิกัดของหม้อแปลง โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่จะส่งผลต่อพิกัดหม้อแปลงควบคู่ไปพร้อมกัน ซึ่งจะนำไปสู่การนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

### 2.3.1 ภาวะโหลดเกินตามมาตรฐาน IEEE Std. C57.91-2011

การรับภาระโหลดเกินพิกัดจะส่งผลให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานสั้นลง อีกทั้งความร้อนจากการรับภาระโหลดเกินพิกัดอาจทำให้หม้อแปลงได้รับความเสียหาย ซึ่งจะส่งผลให้ดรชนีความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าเกี่ยวกับเหตุการณ์ไฟดับมีค่าแย่งลง [6, 7]

ตามมาตรฐานได้มีการแบ่งรูปแบบการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไว้หลายรูปแบบ งานวิจัยชิ้นนี้จะขอยกมาแต่ส่วนที่เกี่ยวข้อง คือ การรับภาระโหลดเกินระยะสั้นที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง หรือ Short-time loading with moderate sacrifice off life expectancy ซึ่งหมายถึงการอนุญาตให้หม้อแปลงมีการรับภาระโหลดเกินพิกัดได้ ภายใต้ข้อกำหนดทางด้านอุณหภูมิของน้ำมันที่ถูกใช้เป็นสารหล่อเย็นในหม้อแปลง ซึ่งภาวะโหลดเกินถือเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของ

น้ำมันในหม้อแปลง อายุการใช้งานจะลดลงแปรผันตามอุณหภูมิของน้ำมันและระยะเวลาที่น้ำมันคงอยู่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3 [7]



(a)

| Time (h) | 0.05 | 0.10 | 0.25 | % loss of life <sup>a</sup><br>0.50 | 1.00             | 2.00             | 4.00             |
|----------|------|------|------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1/2      | 171  | 180  | 193  | 204 <sup>b</sup>                    |                  |                  |                  |
| 1        | 161  | 171  | 183  | 193                                 | 204 <sup>b</sup> |                  |                  |
| 2        | 153  | 161  | 174  | 183                                 | 193              | 204 <sup>b</sup> |                  |
| 4        | 144  | 153  | 164  | 174                                 | 183              | 193              | 204 <sup>b</sup> |
| 8        | 136  | 144  | 155  | 164                                 | 174              | 183              | 193              |
| 16       | 128  | 136  | 147  | 155                                 | 164              | 174              | 183              |
| 24       | 124  | 131  | 142  | 150                                 | 159              | 168              | 178              |

(b)

ที่มา: IEEE Std. C57.91-2011 [7]

ภาพที่ 3 คุณลักษณะของอายุการใช้งานหม้อแปลงที่เสียไปเนื่องจากภาวะโหลดเกิน

โดยปกติแล้วการคำนวณการสูญเสียของอายุการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าจะมีความซับซ้อน แต่สามารถพิจารณาในรูปแบบอย่างง่าย เพื่อประเมินการสูญเสียอายุการใช้งานได้จากภาพที่ 3a แกนแนวตั้งแสดงค่าการสูญเสียอายุการใช้งานคิดเป็นร้อยละต่ออายุการใช้งานในปัจจุบัน (อายุการใช้งานเริ่มต้นประมาณ 180,000 วัน) และแกนแนวนอนแสดงถึงอุณหภูมิของน้ำมันในหม้อแปลง พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันที่ผู้ใช้หม้อแปลงยอมให้เกิดขึ้นได้ คือที่ 200 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นภาวะโหลตเกินของหม้อแปลงสามารถสรุปผลของระยะเวลาที่หม้อแปลงอยู่ในภาวะโหลตเกินได้ดังภาพที่ 3b และจากมาตรฐานดังกล่าวพบว่า ผู้ใช้งานหม้อแปลงหรือผู้ดูแลระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่ มีค่าอัตราการสูญเสียอายุการใช้งานหม้อแปลงที่ยังยอมรับได้ไม่เกินร้อยละ 4 ต่อวัน หมายถึง ถ้าหม้อแปลงมีการทำงานในภาวะโหลตเกินโดยที่น้ำมันมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 200 องศาเซลเซียส หม้อแปลงจควรอยู่ในภาวะโหลตเกินได้ไม่เกิน 4 ชั่วโมงต่อวัน [7]

### 2.3.2 การประยุกต์ใช้มาตรฐานในการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปัจจุบันได้มีการใช้งานตามหลักเกณฑ์และวิธีการปฏิบัติเกี่ยวกับหม้อแปลง กพภ. พ.ศ. 2557 โดยระบุไว้ว่า การตรวจสอบสภาพการรับโหลตให้วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟส พร้อมคำนวณภาระการรับโหลตดังนี้ [8]

“เมื่อพบว่าหม้อแปลงเครื่องใดรับภาระโหลตเกิน 80% ของพิกัดหม้อแปลง ให้เพิ่มขนาดหม้อแปลงหรือติดตั้งหม้อแปลงเสริมโดยเร็ว”

## บทที่ 3

### การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EV Charging Management) คือ การใช้ประโยชน์จากระบบระบบโหนดในบ้านเรือน (Home Area Networks, HANs) เพื่อเข้าไปแก้ไขรูปแบบของการอัดประจุในลักษณะปกติ ให้บรรลุวัตถุประสงค์ต่าง ๆ อาทิเช่น ป้องกันระบบไม่ได้รับภาระโหนดเกินพิกัด (System Overloading Prevention) หรือลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตไฟฟ้า (Demand-Response) เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานสำหรับระบบการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า รวมไปถึงตัวอย่างของการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

#### 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

ในการป้องกันการเกิดภาวะโหนดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลสถานะของการรับโหนดของหม้อแปลง เพื่อนำมาประมวลผลและตัดสินใจควบคุมการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้า ทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างพื้นฐานได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

##### 3.1.1 หน่วยตรวจวัดข้อมูล (Monitoring Unit)

หน่วยตรวจวัดข้อมูล ถือเป็นหัวใจสำคัญในการขับเคลื่อนระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ ในส่วนของการป้องกันภาวะโหนดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้านนั้น จำเป็นต้องมีหน่วยวัดข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้า และอาจรวมถึงสถานะของการอัดประจุในรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละคันเพื่อให้การควบคุมการอัดประจุสามารถตอบสนองต่อทั้งระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟรถยนต์ไฟฟ้า

จากภาพที่ 4 ในส่วนของหม้อแปลงในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการติดตั้งหน่วยตรวจวัดโหนดที่หม้อแปลง (Transformer Load Monitoring Unit) เพื่อตรวจสอบสถานะว่าหม้อแปลงมีการรับโหนดเกินพิกัดหรือไม่ และต้องมีการตั้งค่าพิกัดของหม้อแปลงเพื่อในกรณีที่หม้อแปลงรับโหนดเกินพิกัด อุปกรณ์นี้จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟ เพื่อขอความร่วมมือในการลดใช้ไฟฟ้าหรือแจ้งผู้ใช้ไฟว่าจะจะทำการตัดโหนดบางชนิดเพื่อรักษาสถานะของหม้อแปลงไม่ให้เกิดภาวะโหนดเกิน [9]

ทางด้านผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้า เมื่อบ้านเรือนเข้าสู่ยุคที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเข้ามามีบทบาท การใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านรวมถึงเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าจะถูกตรวจวัดและรวบรวมโดย HANs เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการจัดการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์ โดย



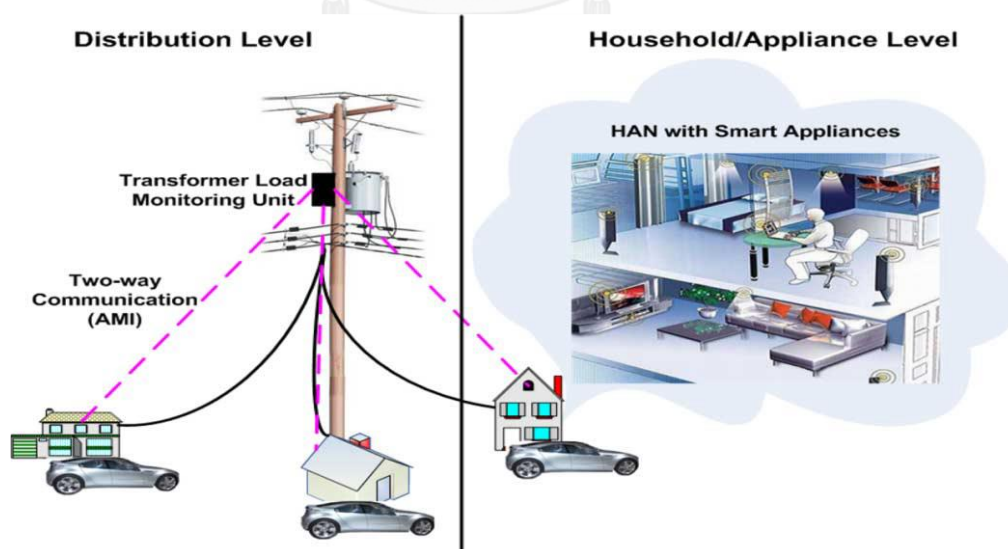
ข้อมูลจากการตรวจวัดจะถูกส่งไปประมวลผลยังหน่วยควบคุม นอกจากนี้ HANs ยังยังสามารถทำหน้าที่ในการจัดการการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยรับคำสั่งที่ถูกส่งกลับมาจากหน่วยควบคุมอีกด้วย

### 3.1.2 หน่วยควบคุม (Control Unit)

หน่วยควบคุม มีหน้าที่ในการตัดสินใจในการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า โดยจะประมวลผลจากข้อมูลที่รวบรวมมาได้จาก HANs และทำการสั่งจัดการการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าให้เป็นไปตามแบบแผนของหน่วยควบคุมนั้น ๆ [9]

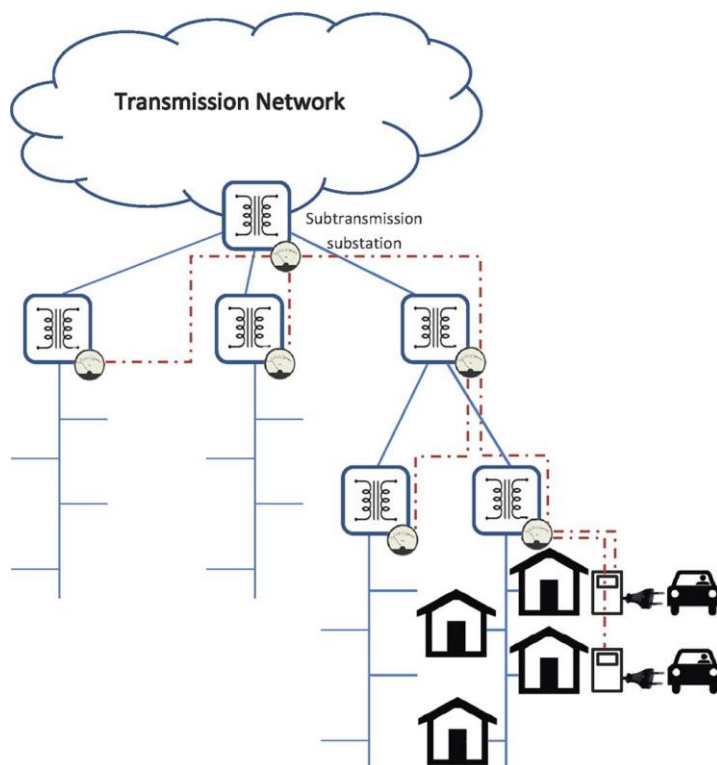
ในบางกรณี HANs สามารถทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมไปพร้อมกับการเป็นหน่วยตรวจวัดข้อมูล โดยการฝังการประมวลผลไว้ในตัวอุปกรณ์เหล่านี้และทำการควบคุมภายในบ้านเรือนนั้น ๆ หรือที่เรียกว่าการจัดการโหลดแบบกระจายศูนย์ (Decentralize Load Management) ดังตัวอย่างในภาพที่ 4

อีกกรณีของการจัดการที่สามารถพบได้ คือ การจัดการโหลดแบบรวมศูนย์ (Centralize Load Management) หลังจากที่ HANs ตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า แล้วทำการส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังหน่วยควบคุม ซึ่งอาจจะถูกติดตั้งไว้ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation) ดังตัวอย่างในภาพที่ 5 หน่วยควบคุมจะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลทั้งหมดและสั่งการจัดการโหลดแต่เพียงส่วนเดียว โดยส่งคำสั่งการจัดการไปยัง HANs ทุกเครื่องในเครือข่าย



ที่มา: Shengnan Shao, 2011 [9]

ภาพที่ 4 ระบบจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์



ที่มา: Omid Ardakanian, 2011 [10]

ภาพที่ 5 ระบบจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบรวมศูนย์

### 3.2 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EV Charging Management)

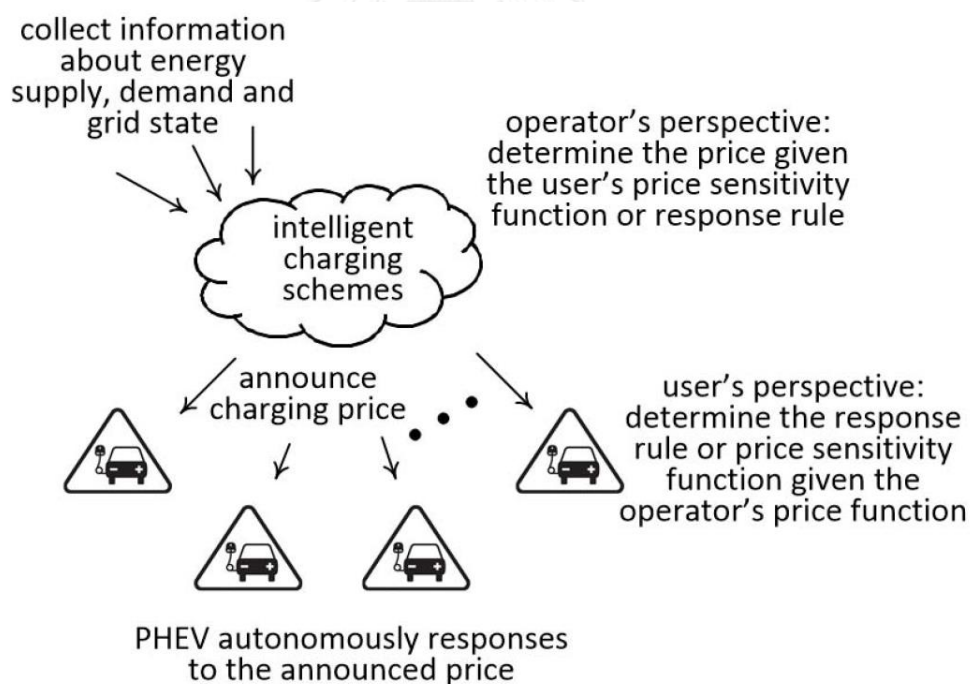
การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า หมายถึงการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าโดยไม่ได้มีการควบคุมการอัดประจุผ่านคำสั่งโดยตรง แต่จะใช้การแจ้งเตือนผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าผ่านทาง HANs เพื่อขอความร่วมมือในการลดการใช้งานอุปกรณ์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า โดยบางครั้งการแจ้งเตือนจะมาในรูปแบบของการขอความร่วมมือในการลดใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ หรือบางครั้งอาจมาในรูปแบบของแรงจูงใจ เช่น การเพิ่มราคาต่อหน่วยไฟฟ้าในขณะที่ระบบไฟฟ้ามีความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบ และลดราคาต่อหน่วยไฟฟ้าในช่วงเวลาที่โหลดน้อย เพื่อเชื้อเชิญให้ผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าหลีกเลี่ยงการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในบางช่วงเวลา

การทำงานของกรอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าทางอ้อมได้ถูกอธิบายไว้ดังภาพที่ 6 ผ่านมุมมองของแต่ละหน่วยการให้บริการและการใช้บริการ ทางฝั่งผู้ให้บริการจะทำการเก็บข้อมูลที่จำเป็น อาทิเช่น ข้อมูลทางฝั่งการผลิต ข้อมูลสถานะของระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน จากนั้นจึงนำมาคิดเป็นราคาต่อหน่วยของการใช้ไฟในแต่ละช่วงเวลาหรือที่รู้จักในชื่อ อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ไฟ (Time of Use Rate, TOU)

ในงานวิจัย [11] ได้ประยุกต์ใช้แนวคิด TOU ในการช่วยให้ผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (peak load) โดยคาดหวังให้มีการลดการใช้ไฟฟ้าลงร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับก่อนที่จะมีการจัดการ

จากนั้นจึงได้มีการประยุกต์แนวความคิดนี้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงราคาค่าไฟตามเวลาจริง (Real-time pricing) ในงานวิจัย [12] เพื่อให้การจัดการในลักษณะนี้มีผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น รวมไปถึงงานวิจัย [13, 14] ที่เพิ่มแนวคิดเกี่ยวกับความไม่แน่นอนของเวลาที่ผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าจะกลับมาถึงบ้าน และเริ่มต้นอัดประจุแก่รถยนต์ไฟฟ้า ทำให้ได้สมการการคิดราคาค่าไฟตามเวลาจริงที่มีความสอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม การจัดการการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าทางอ้อมยังไม่สามารถรับประกันการจัดการเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ เนื่องจากปัจจัยที่จะทำให้การจัดการประสบความสำเร็จ นั้นขึ้นอยู่กับทางฝั่งผู้ใช้บริการ ถึงแม้จะมีการชดเชยด้วยราคาค่าไฟต่อหน่วยที่สูงขึ้นแต่บางครั้งอาจเกิดเหตุการณ์ที่กระทบต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นการจัดการการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าทางอ้อมจึงมีการจัดการควบคู่ไปกับการจัดการการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าทางตรงเพื่อป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าว



ที่มา: Peng-Yong Kong, 2016 [15]

ภาพที่ 6 ตัวอย่างการจัดการการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้า

## บทที่ 4

### การศึกษาผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในพื้นที่อยู่อาศัย

บทนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้านเรือนต่อสถานะโหลดเกินในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ โดยพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในระบบและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า วรรณคดีที่ใช้ในการวัดผลกระทบประกอบด้วย วรรณคดีเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า (TOAFI) และวรรณคดีระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า (TOADI) อีกทั้งสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่นำมาพิจารณา ยังส่งผลให้เวลาในการอัดประจุเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นทางผู้ทำวิจัยจึงได้เพิ่มวรรณคดีทางฝั่งผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้า คือ วรรณคดีอัตราความสำเร็จในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EVSCR) การทดลองถูกออกแบบให้มีความสมจริง โดยอ้างอิงระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของประเทศไทย รวมไปถึงการใช้ข้อมูลของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้านจากเขตที่อยู่อาศัยในประเทศแคนาดา โดยทำการเลือกข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานรถยนต์ในประเทศไทย

#### 4.1 การประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังที่ได้กล่าวไปในตอนต้น การประเมินผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า จะคำนึงถึงความเสี่ยงในการเกิดภาวะโหลดเกิน เนื่องจากความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นสูงย่อมแสดงถึงความเสี่ยงที่หม้อแปลงอาจได้รับความเสียหายเนื่องจากการรับโหลดเกินพิกัด ต่อมาได้คำนึงถึงระยะเวลาที่หม้อแปลงคงอยู่ในภาวะโหลดเกิน เพราะการที่หม้อแปลงรับภาระโหลดเกินพิกัดเป็นเวลานานย่อมส่งผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง วรรณคดีตัวสุดท้ายจะเป็นตัวสะท้อนถึงความเหมาะสมในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ ว่าผู้ใช้สามารถใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างสะดวกสบายหรือไม่ โดยจะกล่าวถึงวรรณคดีทั้งสามในหัวข้อต่อไป ดังนี้

##### 4.1.1 วรรณคดีเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า (TOAFI)

วรรณคดีเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลง (Transformer Overloading Average Frequency Index, TOAFI) แสดงถึงโอกาสหรือความเสี่ยงที่หม้อแปลงอาจได้รับผลกระทบจากการอยู่ในสถานะโหลดเกิน ปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดเพื่อจำกัดความเสี่ยงในการเกิดภาวะโหลดเกิน แต่ค่าวรรณคดีที่ดีควรมีค่าน้อยเพื่อลดโอกาสที่หม้อแปลงจะเข้าสู่ภาวะโหลดเกิน ซึ่งเป็นภาวะที่หม้อแปลงมีความเสี่ยงที่จะได้รับความเสียหาย

การคำนวณค่าดัชนี TOAFI สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 1 เมื่อ TOE หรือ Total Overloading Event คือจำนวนครั้งทั้งหมดที่หม้อแปลงเปลี่ยนสถานะจากภาวะโหลดปกติไปเป็นภาวะโหลดเกินภายในระยะเวลาที่ใช้ศึกษาเท่ากับ T มีหน่วยเป็น ครั้งต่อวัน (times/day)

$$TOAFI = \frac{TOE}{T} \quad (1)$$

#### 4.1.2 ดรรชนีระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า (TOADI)

ดรรชนีระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดสภาวะโหลดเกินในหม้อแปลง (Transformer Overloading Average Duration Index, TOADI) แสดงถึงช่วงเวลาเฉลี่ยที่หม้อแปลงจำหน่ายคงอยู่ในสภาวะโหลดเกิน โดยปกติแล้วผู้ออกแบบหม้อแปลงจะไม่อนุญาตให้เกิดภาวะโหลดเกินขึ้นในหม้อแปลงเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน แต่บางครั้งการใช้งานหม้อแปลงในภาวะโหลดเกินเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ผู้ใช้ส่วนใหญ่จึงนิยมใช้งานหม้อแปลงในภาวะที่มีการรับโหลดเกินพิกัดไม่เกิน 4 ชั่วโมงต่อวัน เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไม่ลดลงไปกว่าร้อยละ 4 ของอายุการใช้งานในแต่ละวัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3

การคำนวณค่าดรรชนีระยะเวลาเฉลี่ยสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 2 เมื่อ TOD หรือ Total Overloading Duration คือระยะเวลาทั้งหมดที่หม้อแปลงอยู่ในสภาวะโหลดเกินภายในระยะเวลาที่ใช้ศึกษาเท่ากับ T มีหน่วยเป็นชั่วโมงต่อวัน (hours/day)

$$TOADI = \frac{TOD}{T} \quad (2)$$

#### 4.1.3 อัตราความสำเร็จของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EVSCR)

อัตราความสำเร็จของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Successful Charge Rate, EVSCR) แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างเหตุการณ์ที่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถอัดประจุได้เต็ม 100% (Successful Charge Event, SCE) เทียบกับเหตุการณ์การอัดประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ใช้ศึกษา (All Charge Event, ACE) ดังสมการที่ 3

$$EVSCR = 100 * \frac{SCE}{ACE} \quad (3)$$

## 4.2 การสร้างโหนดโปรไฟล์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน

โหนดโปรไฟล์สำหรับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน (EV Home Charging Profiles) คือ การโหนดโปรไฟล์ที่มีลักษณะเฉพาะ เป็นผลมาจากการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งรถยนต์ไฟฟ้ามีความแตกต่างจากโหนดชนิดอื่น คือมีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงและต่อเนื่องเป็นเวลานาน โหนดโปรไฟล์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าสามารถเปรียบเทียบได้กับโหนดโปรไฟล์การอัดประจุโทรศัพท์มือถือเพียงแต่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ามกกว่าหลายเท่าตัว

การสร้างโหนดโปรไฟล์สำหรับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน จะช่วยให้การศึกษาผลกระทบที่มีต่อภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในพื้นที่อยู่อาศัยมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากความไม่แน่นอนของการใช้งาน ทั้งด้านช่วงเวลาที่ยอดรถยนต์ไฟฟ้าจะถูกอัดประจุ รวมไปถึงระยะเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุ หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างโหนดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลพฤติกรรมการใช้รถในเขตพื้นที่อยู่อาศัย ควบคู่กับรายละเอียดของรถยนต์ไฟฟ้าที่มาจากผู้ผลิต

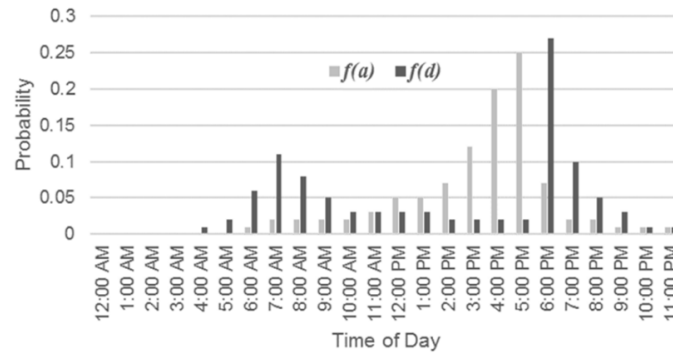
### 4.2.1 ข้อมูลอินพุตสำหรับการสร้างโหนดโปรไฟล์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น เพื่อให้โหนดโปรไฟล์มีความสมจริง งานวิจัยได้นำข้อมูลพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ในพื้นที่อยู่อาศัยของมาใช้ โดยจะประกอบด้วยเวลาที่รถยนต์จะออกจากบ้านและกลับมาถึงบ้านในแต่ละวัน รวมไปถึงระยะทางที่รถยนต์แต่ละคันวิ่งไปในแต่ละวัน

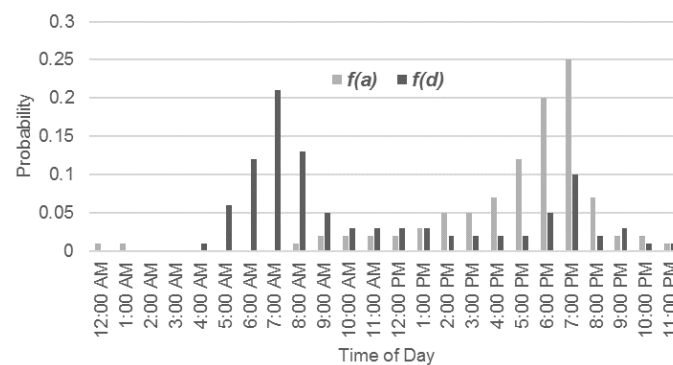
ภาพที่ 7 แสดงพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ของเมืองวินนิเพ็ก ประเทศแคนาดาโดยใช้การแจกแจงความน่าจะเป็นช่วงเวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้าน (Probability Density Function of Home Arrival Time,  $f(a)$ ) และการแจกแจงความน่าจะเป็นช่วงเวลาที่รถยนต์ออกจากบ้าน (Probability Density Function of Home Departure Time,  $f(d)$ ) จากการสังเกตพบว่าผู้ใช้รถส่วนใหญ่เมืองวินนิเพ็ก จะเริ่มต้นออกจากบ้านในช่วงเวลาเช้าตั้งแต่เวลา 4 นาฬิกา และมีความน่าจะเป็นสูงสุดของการออกจากบ้านในเวลาเช้าที่ประมาณร้อยละ 10 ที่เวลา 7 นาฬิกา นอกจากนี้ผู้ใช้รถยังนิยมออกจากบ้านในช่วงเย็นของแต่ละวัน โดยมีความน่าจะเป็นที่รถยนต์จะออกจากบ้านสูงถึงร้อยละ 25 ที่เวลา 18 นาฬิกา ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเวลาที่ผู้ใช้รถกลับมาที่บ้านแล้ว ส่งผลให้มีแนวโน้มที่รถยนต์ไฟฟ้าในระบบจะมีปริมาณมากในช่วงเย็นตั้งแต่เวลา 15 นาฬิกา ไปจนถึงเวลา 18 นาฬิกา

จากภาพที่ 7 พบว่าพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ของเมืองวินนิเพ็กอาจไม่สอดคล้องกับการใช้งานรถยนต์ในประเทศไทยเท่าใดนัก ทางผู้วิจัยจึงทำการดัดแปลงการแจกแจงความน่าจะเป็นดังกล่าวให้มีความเหมาะสมกับบริบทประเทศไทยมากยิ่งขึ้น โดยประมาณค่าการแจกแจงความน่าจะเป็นได้ดัง

ภาพที่ 8 โดยสมมติให้ผู้ใช้รถส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 50 ออกไปทำงานในตอนเช้าตั้งแต่เวลา 4 นาฬิกา ไปจนถึงเวลา 9 นาฬิกา และกลับมาถึงบ้านในช่วงเย็นโดยมีค่าความน่าจะเป็นสูงสุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 25 ที่เวลา 19 นาฬิกาของแต่ละวัน

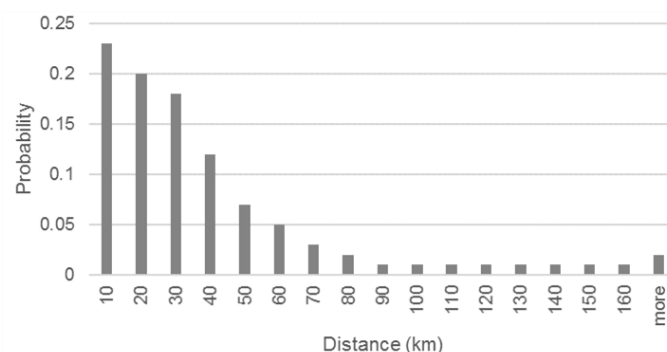


ภาพที่ 7 การแจกแจงความน่าจะเป็นช่วงเวลาที่ยานยนต์เข้าและออกจากบ้านพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก



ภาพที่ 8 การแจกแจงความน่าจะเป็นช่วงเวลาที่ยานยนต์เข้าและออกจากบ้านพื้นที่ประเทศไทย

พฤติกรรมการใช้งานรถยนต์อีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจนำมาพิจารณา คือระยะทางที่รถยนต์วิ่งไปในแต่ละการเดินทาง จากภาพที่ 9 การแจกแจงความน่าจะเป็นของระยะทางที่รถยนต์วิ่งไปในแต่ละวัน (Probability Density Function of Distance per Trip,  $f(l)$ ) ซึ่งนำมาใช้ในการหาระยะทางที่รถยนต์วิ่งไปในแต่ละการเดินทาง เพื่อนำมาแปลงเป็นความต้องการพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าและนำไปสู่ระยะเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจะใช้ในการอัดประจุ พบว่ารถยนต์กว่าร้อยละ 75 มีระยะทางที่ใช้ไปในแต่ละวันไม่เกิน 50 กิโลเมตร และกว่าร้อยละ 25 ที่ระยะทางที่ใช้ไม่เกิน 10 กิโลเมตร โดยจะกล่าวถึงการแปลงระยะทางเป็นระยะเวลาในการอัดประจุในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 9 การกระจายของข้อมูลระยะทางที่รถยนต์ใช้ในแต่วัน

นอกจากข้อมูลลักษณะการใช้งานรถยนต์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ยังมีข้อมูลอื่นที่จำเป็นต้องใช้เพื่อประกอบการสร้างแบบจำลองการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ ( $n$ ) จำนวนครั้งของการอัดประจุต่อคันตลอดระยะเวลาการศึกษา ( $m$ ) รวมไปถึงคุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อัดประจุ ได้แก่ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์อัดประจุไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์ ( $P$ ) ขนาดความจุของแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง ( $C$ ) ระยะเวลาของรถยนต์ไฟฟ้าต่อการอัดประจุเต็ม 1 ครั้งในหน่วยกิโลเมตร ( $R$ ) และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า ( $E$ ) โดยข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกเปิดเผยต่อสาธารณะโดยผู้ผลิตของอุปกรณ์อัดประจุและผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้า

#### 4.2.2 ขั้นตอนวิธีการสร้างโหนดโปรไฟล์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน

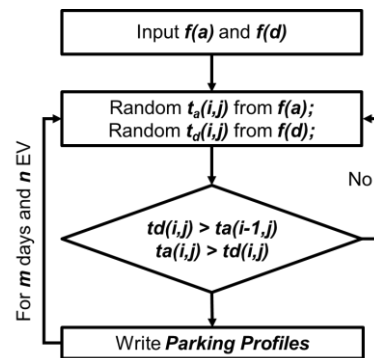
ขั้นตอนวิธีนี้จะทำหน้าที่นำข้อมูลอินพุตที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา มาประมวลผล เพื่อให้เกิดเป็นโหนดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามบ้าน โดยโหนดโปรไฟล์จะประกอบขึ้นมาจากโปรไฟล์สองส่วน ได้แก่ โปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่ที่บ้าน (Parking Profiles) และโปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าถูกอัดประจุ (Charging Profiles) จากนั้นจะนำโปรไฟล์ทั้งสองมาพิจารณาร่วมกันเพื่อให้ได้โหนดโปรไฟล์ของการอัดประจุที่สมบูรณ์ (Complete Charging Profiles)

ภาพที่ 10 แสดงขั้นตอนวิธีในการสร้างโปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่ที่บ้าน โดยทำการสร้างโปรไฟล์ตามจำนวนครั้งของการอัดประจุ  $m$  ครั้ง ตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา ผลกระทบ ของรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน  $n$  คัน โดยเริ่มต้นจากการรับข้อมูลอินพุตที่จำเป็นในการสร้างโปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่ที่บ้าน ได้แก่ การแจกแจงความน่าจะเป็นของเวลาที่รถยนต์กลับมาบ้านและการแจกแจงความน่าจะเป็นของเวลาที่รถยนต์ออกจากบ้าน

ขั้นตอนต่อไปคือการสุ่มเวลาที่รถกลับมาที่บ้านและออกจากบ้านจากการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น โดยสุ่มผ่านกระบวนการ Random Discrete Variable ผลลัพธ์ที่ได้จะออกมา



ดังตัวอย่างในภาพที่ 11a และภาพที่ 11b เป็นการสร้างสุ่มเพื่อสร้างโปรไฟล์ของเวลาที่รถจอดอยู่ที่บ้านของรถยนต์จำนวน 57 คัน และมีการอัดประจุกันละ 7 ครั้ง



ภาพที่ 10 ขั้นตอนวิธีในการจำลอง Parking Profiles

|          |   | n_EV |    |    |     |    |
|----------|---|------|----|----|-----|----|
| ta       |   | 1    | 2  | 3  | ... | 57 |
| n_Charge | 1 | 9    | 18 | 18 | ... | 12 |
|          | 2 | 17   | 17 | 13 | ... | 13 |
|          | 3 | 18   | 14 | 17 | ... | 18 |
|          | 4 | 17   | 20 | 22 | ... | 17 |
|          | 5 | 12   | 18 | 10 | ... | 18 |
|          | 6 | 18   | 17 | 17 | ... | 16 |
|          | 7 | 19   | 18 | 17 | ... | 14 |

(a) Home Arrival Time

|          |   | n_EV |    |    |     |    |
|----------|---|------|----|----|-----|----|
| td       |   | 1    | 2  | 3  | ... | 57 |
| n_Charge | 1 | 6    | 12 | 18 | ... | 5  |
|          | 2 | 19   | 6  | 20 | ... | 6  |
|          | 3 | 5    | 20 | 18 | ... | 18 |
|          | 4 | 5    | 12 | 4  | ... | 9  |
|          | 5 | 10   | 19 | 4  | ... | 10 |
|          | 6 | 7    | 4  | 18 | ... | 6  |
|          | 7 | 18   | 4  | 7  | ... | 8  |

(b) Home Departure Time

ภาพที่ 11 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสุ่มเวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้านและออกจากบ้านในแต่ละวัน

อย่างไรก็ดี การสุ่มของเวลาดังกล่าวจำเป็นต้องมีความสอดคล้องและสมเหตุสมผล ดังนั้นเวลาที่ได้จากการสุ่มดังภาพที่ 11a และภาพที่ 11b จะต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องด้วยสมการที่ 4 ซึ่งมีความหมายว่าเมื่อมีการสุ่มเวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้าน เวลาที่รถยนต์จะออกจากบ้านในครั้งต่อไปต้องเกิดขึ้นหลังจากที่รถยนต์กลับมาจอดที่บ้านแล้ว ยกตัวอย่างเช่น เวลาเข้าและออกจากบ้านของการอัดประจุกครั้งที่ 2 ของรถยนต์ไฟฟ้าคันที่ 2 ในภาพที่ 11 พบว่ารถยนต์กลับมาถึงบ้านในเวลา 17 นาฬิกา และจะออกจากบ้านในเวลา 6 นาฬิกา ซึ่งเวลา 6 นาฬิกาจะต้องเกิดขึ้นในวัน

ถัดไป รวมไปถึงสมการที่ 5 ซึ่งมีความหมายว่าการกลับมาถึงบ้านของรถยนต์ในครั้งถัดไปจะต้องเกิดขึ้นหลังจากที่รถยนต์ออกจากบ้านไปแล้ว

$$t_d(i, j) > t_a(i, j) \quad (4)$$

$$t_a(i+1, j) > t_d(i, j) \quad (5)$$

หลังจากผ่านกระบวนการการตรวจสอบความสมเหตุสมผลแล้ว เวลาที่รถยนต์เข้าหรือออกจากบ้านจะถูกแปลงจากภาพที่ 11 ไปเป็นผลลัพธ์ในภาพที่ 12 โดยผลลัพธ์ดังกล่าวจะแสดงเวลาที่รถยนต์กลับเข้ามาและออกจากบ้าน ยกตัวอย่างเช่น กรณีของรถยนต์ไฟฟ้าคันที่ 2 ในวันที่ 2 ในภาพที่ 12 รถยนต์จะกลับมาถึงบ้านในชั่วโมงที่ 41 ของการศึกษาซึ่งก็คือเวลา 17 นาฬิกาของวันที่ 2 และออกจากบ้านในชั่วโมงที่ 53 ซึ่งก็คือเวลา 7 นาฬิกาของวันที่ 3 นั้นเอง และเมื่อนำผลลัพธ์จากภาพที่ 12 ไปขยายออกให้เป็นโปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่ที่บ้านดังภาพที่ 13 โดยสามารถเขียนออกมาได้ตามจำนวนครั้งของการอัดประจุตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา โดยค่า 1 ในตารางหมายถึงช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่ที่บ้าน ในขณะที่ค่า 0 จะหมายถึงช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าไม่ได้จอดอยู่ที่บ้าน

|          |    | n_EV |     |     |     |     |
|----------|----|------|-----|-----|-----|-----|
|          |    | 1    | 2   | 3   | ... | 57  |
| n_Charge | ta | 9    | 18  | 18  | ... | 12  |
|          | 1  | 41   | 41  | 61  | ... | 37  |
|          | 2  | 66   | 62  | 89  | ... | 66  |
|          | 3  | 89   | 92  | 94  | ... | 89  |
|          | 4  | 108  | 114 | 106 | ... | 114 |
|          | 5  | 138  | 137 | 137 | ... | 136 |
|          | 6  | 163  | 162 | 161 | ... | 158 |

(a) Home Arrival Time

|          |    | n_EV |     |     |     |     |
|----------|----|------|-----|-----|-----|-----|
|          |    | 1    | 2   | 3   | ... | 57  |
| n_Charge | td | 29   | 35  | 41  | ... | 28  |
|          | 1  | 42   | 53  | 67  | ... | 53  |
|          | 2  | 76   | 67  | 89  | ... | 89  |
|          | 3  | 100  | 107 | 99  | ... | 104 |
|          | 4  | 129  | 114 | 123 | ... | 129 |
|          | 5  | 150  | 147 | 137 | ... | 149 |
|          | 6  | 185  | 171 | 174 | ... | 175 |

(b) Home Departure Time

ภาพที่ 12 ตัวอย่างผลลัพธ์เวลาที่รถยนต์กลับมาถึงบ้านและออกจากบ้านภายหลังพิจารณาเงื่อนไข

**Day 1**  
**EV status (when 0 = Not Parking, 1 = Parking)**

| Parking | 1 | 2 | 3 | ... | 57 |
|---------|---|---|---|-----|----|
| 0       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 1       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 2       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 3       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 4       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 5       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 6       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 7       | 0 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 8       | 1 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 9       | 1 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 10      | 1 | 0 | 0 | ... | 0  |
| 11      | 1 | 0 | 0 | ... | 1  |
| 12      | 1 | 0 | 0 | ... | 1  |
| 13      | 1 | 0 | 0 | ... | 1  |
| 14      | 1 | 0 | 0 | ... | 1  |
| 15      | 1 | 0 | 0 | ... | 1  |
| 16      | 1 | 0 | 0 | ... | 1  |
| 17      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |
| 18      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |
| 19      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |
| 20      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |
| 21      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |
| 22      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |
| 23      | 1 | 1 | 1 | ... | 1  |

ภาพที่ 13 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสร้าง Parking Profiles

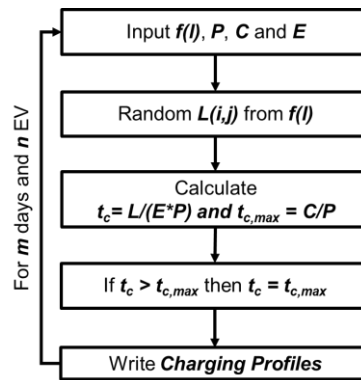
เมื่อได้โปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่ที่บ้านแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างโปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุ ภาพที่ 14 แสดงขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างโปรไฟล์ของช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุ โดยในขั้นตอนแรกจะรับเอาการแจกแจงความน่าจะเป็นของระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ไปในแต่ละวันจากภาพที่ 9 เช่นเดียวกันกับเวลาที่รถกลับเข้ามาหรือออกจากบ้าน ระยะทางจะถูกสุ่มโดยวิธี Random Discrete Variables และนำระยะทางที่สุ่มได้ไปแปลงให้เป็นระยะเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุโดยใช้สมการที่ 6 และสมการที่ 7 ทั้งนี้ในการแปลงจากระยะทางเป็นเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ จำเป็นต้องอยู่ภายในเงื่อนไขของขนาดแบตเตอรี่และกำลังไฟฟ้าในการอัดประจุ ซึ่งแสดงไว้ในสมการระยะเวลาสูงสุดที่ใช้ในการอัดประจุสมการที่ 8 และ 9

$$t_{c,ij} = \frac{L_{ij}}{(E * P)}; \forall i \in [1, m] \& j \in [1, n] \quad (6)$$

$$\text{when } E = \frac{R}{C} \quad (7)$$

$$\text{if } t_{c,ij} > t_{c,\max} \text{ then } t_{c,ij} = t_{c,\max}; \forall i \in [1, m] \& j \in [1, n] \quad (8)$$

$$\text{when } t_{c,\max} = \frac{C}{P} \quad (9)$$



ภาพที่ 14 ขั้นตอนวิธีในการจำลอง Charging Profiles

|          |    | n_EV |   |     |     |    |
|----------|----|------|---|-----|-----|----|
|          |    | 1    | 2 | 3   | ... | 57 |
| n_Charge | tc | 1    | 3 | 2   | ... | 1  |
|          | 1  | 1    | 3 | 2   | ... | 1  |
|          | 2  | 1    | 5 | 2   | ... | 1  |
|          | 3  | 9    | 9 | 1   | ... | 3  |
|          | 4  | 1    | 5 | 1   | ... | 3  |
|          | 5  | 5    | 2 | 1   | ... | 2  |
|          | 6  | 2    | 2 | 1   | ... | 1  |
| 7        | 5  | 5    | 1 | ... | 2   |    |

ภาพที่ 15 ตัวอย่างจากการสุ่มระยะทางเพื่อแปลงเป็นเวลาในการอัดประจุ

|          |     | n_EV |     |     |     |     |
|----------|-----|------|-----|-----|-----|-----|
|          |     | 1    | 2   | 3   | ... | 57  |
| n_Charge | tc  | 10   | 21  | 20  | ... | 13  |
|          | 1   | 10   | 21  | 20  | ... | 13  |
|          | 2   | 42   | 46  | 63  | ... | 38  |
|          | 3   | 75   | 71  | 90  | ... | 69  |
|          | 4   | 90   | 97  | 95  | ... | 92  |
|          | 5   | 113  | 116 | 107 | ... | 116 |
|          | 6   | 140  | 139 | 138 | ... | 137 |
| 7        | 168 | 167  | 162 | ... | 160 |     |

ภาพที่ 16 ตัวอย่างผลลัพธ์ของเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจะทำการอัดประจุสำเร็จ

จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ของเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้ากลับมาถึงบ้านในภาพที่ 12a มาพิจารณาร่วมกับระยะเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุในภาพที่ 15 โดยมีสมมติฐานว่าผู้ใช้จะทำการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าของตัวเองทันทีที่กลับมาถึงบ้าน และรถยนต์ไฟฟ้าจะทำการอัดประจุต่อเนื่องจนกว่าจะใช้เวลาในการอัดประจุจากภาพที่ 15 จนหมด ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดังภาพที่ 16 โดยผลลัพธ์จะแสดงถึงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าทำการอัดประจุสำเร็จเต็มความจุของแบตเตอรี่ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ในภาพที่ 12a และที่ 16 มาขยายออกเพื่อสร้างเป็นโปรไฟล์ของการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าง่ายๆในภาพที่ 17 โดยที่ค่า 3.6 ในตารางหมายถึงช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าถูกทำการอัดประจุ ในขณะที่ค่า 0 จะหมายถึงช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าไม่ได้ถูกอัดประจุ

**Day 1**  
EV status (when 0 = Not Charging, 3.6 = Charging)

| Parking | 1   | 2   | 3   | ... | 57  |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 1       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 2       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 3       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 4       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 5       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 6       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 7       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 8       | 3.6 | 0   | 0   | ... | 0   |
| 9       | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 10      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 11      | 0   | 0   | 0   | ... | 3.6 |
| 12      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 13      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 14      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 15      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 16      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 17      | 0   | 3.6 | 3.6 | ... | 0   |
| 18      | 0   | 3.6 | 3.6 | ... | 0   |
| 19      | 0   | 3.6 | 0   | ... | 0   |
| 20      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 21      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 22      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 23      | 0   | 0   | 0   | ... | 0   |

ภาพที่ 17 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการสร้าง Charging Profiles

และในส่วนสุดท้ายคือการพิจารณา Charging Profiles ควบคู่ไปกับ Parking Profiles เพื่อนำไปสร้างเป็นโหนดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า จากการสุ่มเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้ากลับมาถึงบ้าน เวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าออกจากบ้าน และเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุจนเต็ม พบว่ามีบางกรณีที่รถยนต์ไฟฟ้ายังไม่ถูกอัดประจุจนเต็มแต่ผู้ใช้รถมีความจำเป็นที่จะต้องออกจากบ้าน ดังตัวอย่างที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 18 การอัดประจุครั้งที่ 3 ของรถยนต์ไฟฟ้าคันที่ 2 มีเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าจะอัดประจุจนเต็มอยู่ที่ชั่วโมงที่ 71 ของเวลาที่ใช้ในการศึกษาซึ่งก็คือเวลา 23 นาฬิกาของวันที่ 3 แต่จากภาพที่ 18a พบว่าผู้ใช้รถมีความจำเป็นจะต้องออกจากบ้านในชั่วโมงที่ 67 หรือก็คือเวลา 19 นาฬิกาของวันที่ 3 นั่นเอง ส่งผลให้รถยนต์ไฟฟ้าในเหตุการณ์ดังกล่าวไม่ประสบผลสำเร็จในการอัดประจุและไม่ถูกนำไปรวมใน SCE ของการคำนวณค่าธรรมเนียม EVSCR

ภาพที่ 19 เมื่อแถบสีเขียวในภาพที่ 19a แทนช่วงเวลาที่รถยนต์จอดอยู่ที่บ้าน แถบสีเหลืองในภาพที่ 19b ภาพที่ 19c แทนช่วงเวลาที่รถยนต์จอดอยู่ที่บ้านและทำการอัดประจุอยู่ และแถบสีแดงในภาพที่ 19c แสดงถึงช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้ายังต้องการการอัดประจุแต่รถไม่ได้จอดอยู่ที่บ้านหรือผู้ใช้ไฟฟ้าได้ขับรถออกไปก่อนจะทำการอัดประจุจนเต็มนั่นเอง

|          |    | n_EV |     |     |     |     |
|----------|----|------|-----|-----|-----|-----|
|          |    | 1    | 2   | 3   | ... | 57  |
| n_Charge | tc | 10   | 21  | 20  | ... | 13  |
|          | 1  | 42   | 46  | 63  | ... | 38  |
|          | 2  | 75   | 71  | 90  | ... | 69  |
|          | 3  | 90   | 97  | 95  | ... | 92  |
|          | 4  | 113  | 116 | 107 | ... | 116 |
|          | 5  | 140  | 139 | 138 | ... | 137 |
|          | 6  | 168  | 167 | 162 | ... | 160 |

(a) End of Charging Time

|          |    | n_EV |     |     |     |     |
|----------|----|------|-----|-----|-----|-----|
|          |    | 1    | 2   | 3   | ... | 57  |
| n_Charge | td | 29   | 35  | 41  | ... | 28  |
|          | 1  | 42   | 53  | 67  | ... | 53  |
|          | 2  | 76   | 67  | 89  | ... | 89  |
|          | 3  | 100  | 107 | 99  | ... | 104 |
|          | 4  | 129  | 114 | 123 | ... | 129 |
|          | 5  | 150  | 147 | 137 | ... | 149 |
|          | 6  | 185  | 171 | 174 | ... | 175 |

(b) Departure Time

ภาพที่ 18 ตัวอย่างความไม่สัมพันธ์กันของเวลาที่อัดประจุสำเร็จและเวลาที่รถออกจากบ้าน

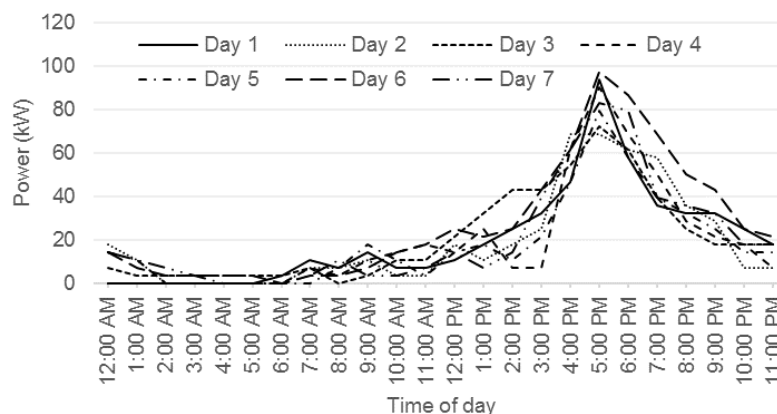
|         |   | Day 3                                         |   |     |    |  |
|---------|---|-----------------------------------------------|---|-----|----|--|
|         |   | EV status (when 0 = Not Parking, 1 = Parking) |   |     |    |  |
| Parking | 1 | 2                                             | 3 | ... | 57 |  |
| 0       | 0 | 1                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 1       | 0 | 1                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 2       | 0 | 1                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 3       | 0 | 1                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 4       | 0 | 1                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 5       | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 6       | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 7       | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 8       | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 9       | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 10      | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 11      | 0 | 0                                             | 0 | ... | 0  |  |
| 12      | 0 | 0                                             | 1 | ... | 0  |  |
| 13      | 0 | 1                                             | 1 | ... | 0  |  |
| 14      | 0 | 1                                             | 1 | ... | 0  |  |
| 15      | 0 | 1                                             | 1 | ... | 0  |  |
| 16      | 0 | 1                                             | 1 | ... | 0  |  |
| 17      | 1 | 1                                             | 1 | ... | 1  |  |
| 18      | 1 | 1                                             | 1 | ... | 1  |  |
| 19      | 1 | 0                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 20      | 1 | 0                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 21      | 1 | 0                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 22      | 1 | 0                                             | 0 | ... | 1  |  |
| 23      | 1 | 0                                             | 0 | ... | 1  |  |

|          |     | Day 3                                             |     |     |     |  |
|----------|-----|---------------------------------------------------|-----|-----|-----|--|
|          |     | EV status (when 0 = Not Charging, 3.6 = Charging) |     |     |     |  |
| Charging | 1   | 2                                                 | 3   | ... | 57  |  |
| 0        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 1        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 2        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 3        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 4        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 5        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 6        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 7        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 8        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 9        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 10       | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 11       | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 12       | 0   | 0                                                 | 3.6 | ... | 0   |  |
| 13       | 0   | 3.6                                               | 3.6 | ... | 0   |  |
| 14       | 0   | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 15       | 0   | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 16       | 0   | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 17       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 3.6 |  |
| 18       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 3.6 |  |
| 19       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 3.6 |  |
| 20       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 21       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 22       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 23       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |

|          |     | Day 3                                             |     |     |     |  |
|----------|-----|---------------------------------------------------|-----|-----|-----|--|
|          |     | EV status (when 0 = Not Charging, 3.6 = Charging) |     |     |     |  |
| Complete | 1   | 2                                                 | 3   | ... | 57  |  |
| 0        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 1        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 2        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 3        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 4        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 5        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 6        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 7        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 8        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 9        | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 10       | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 11       | 0   | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 12       | 0   | 0                                                 | 3.6 | ... | 0   |  |
| 13       | 0   | 3.6                                               | 3.6 | ... | 0   |  |
| 14       | 0   | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 15       | 0   | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 16       | 0   | 3.6                                               | 0   | ... | 0   |  |
| 17       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 3.6 |  |
| 18       | 3.6 | 3.6                                               | 0   | ... | 3.6 |  |
| 19       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 3.6 |  |
| 20       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 21       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 22       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |
| 23       | 3.6 | 0                                                 | 0   | ... | 0   |  |

(a) Parking Profiles      (b) Charging Profiles      (c) Complete Profiles

ภาพที่ 19 ตัวอย่างการพิจารณาโปรไฟล์เพื่อสร้าง Complete Charging Profiles



ภาพที่ 20 ตัวอย่างโหลดโพรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

### 4.3 การศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า

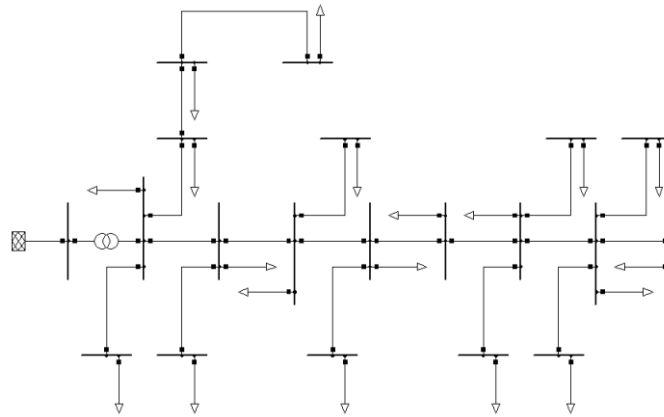
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วยหัวข้อย่อย ได้แก่ ระบบที่ใช้ในการทดสอบ การศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะสามารถส่งผลกระทบต่อภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า ปัจจัยด้านสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า และปัจจัยจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ในแต่ละพื้นที่

#### 4.3.1 ระบบทดสอบ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบทดสอบ ที่จะถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อการเกิดภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ถูกนำมาใช้ คือ ระบบของ Australia Residential System เป็นระบบแบบ Radial System ที่มีแหล่งกำเนิดเพียงจุดเดียวจากหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า ภายในระบบทดสอบประกอบด้วยบัสทั้งหมด 19 บัส โดยทุกบัสจะมีโหลดถูกติดตั้งอยู่ โดยแบ่งโหลดออกเป็น 3 เฟส แต่ละเฟสทำหน้าที่จ่ายโหลดให้แก่บ้าน 1 หลัง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 21

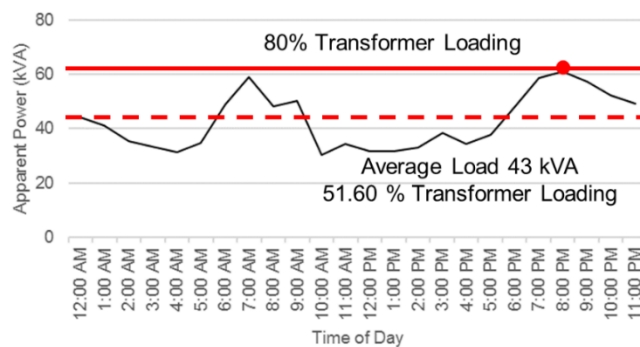
ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทดสอบได้ถูกตั้งค่าตามแบบแผนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยกำหนดให้หม้อแปลงมีค่าพิกัดอยู่ที่ 250 kVA ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันจากระดับ 22 kV มาเป็น 0.4 kV โดยสายจำหน่ายทั้งหมดใช้สายขนาด 185 mm<sup>2</sup> มีระยะทางของสายจำหน่ายตั้งแต่หม้อแปลงถึงปลายสายประมาณ 1 km ส่วนของโหลดจะมีรูปแบบของโหลดที่ใช้ในแต่ละวัน อ้างอิงมาจากข้อมูลโหลดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [16] ดังแสดงไว้ในภาพที่ 22 จากภาพพบว่าโหลดมีแนวโน้มในการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเช้าประมาณ 7 นาฬิกา และจะมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงหัวค่ำตั้งแต่เวลา 19 นาฬิกาไปจนถึงเวลา 21 นาฬิกา นอกจากนี้

ช่วงเวลาที่โหลดสูงสุดหม้อแปลงยังทำงานที่พิกัด แต่โหลดโดยเฉลี่ยของหม้อแปลงกลับอยู่ที่ร้อยละ 51.60 ของพิกัดเท่านั้น



ที่มา: Sara Deilami, 2011 [17]

ภาพที่ 21 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในเขตพื้นที่อยู่อาศัย 19 บัส



ภาพที่ 22 รูปแบบโหลดรายวันของบ้านทั้งหมดต่อ 1 เฟส

#### 4.3.2 การศึกษาผลกระทบจากปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า (EV Penetration Level)

เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้า เป็นโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงและต่อเนื่องเป็นเวลานาน การเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าย่อมส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณโหลด ในงานวิจัยนี้ ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าจะถูกกล่าวถึงในลักษณะของอัตราส่วนระหว่างปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อปริมาณจำนวนครัวเรือนหรือจำนวนโหลดในระบบทดสอบ กล่าวคือ ถ้าระบบทดสอบมีโหลดทั้งหมด 57 ครัวเรือน เมื่อแต่ละครัวเรือนมีรถยนต์ไฟฟ้าหลังละ 1 คัน รวมทั้งหมดเป็น 57 คัน จะทำให้ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 100 ดังสมการที่ 10

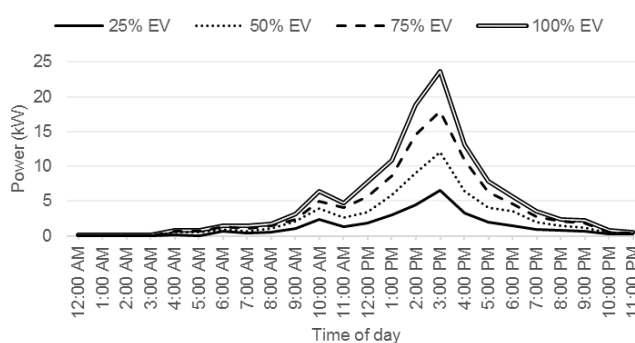
$$\% EV Penetration Level = 100 * \frac{\text{Number of EV in the System}}{\text{Number of Household in the System}} \quad (10)$$



การทดสอบผลกระทบจากปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า จะทำการเพิ่มปริมาณจากที่ไม่มีรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ เพิ่มขึ้นทีละร้อยละ 25 จนกระทั่งจำนวนรถเท่ากับจำนวนครัวเรือนในระบบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 23 โดยจะนำปริมาณรถยนต์ไฟฟ้างกล่าวไปเป็นข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อ 4.2.3 โดยทำการศึกษาทั้งหมด 30 วัน ( $m = 720$  hours) เลือกรถยนต์สำหรับใช้ในเขตเมือง หมายถึงรถยนต์ไฟฟ้าจะมีระยะพิสัยอยู่ที่ 172 กิโลเมตร ( $R = 172$  km) ด้วยขนาดความจุของแบตเตอรี่ 30 กิโลวัตต์ชั่วโมง ( $C = 30$  kWh) [18, 19] ทำให้มีสมรรถนะสูงสุดคิดเป็น 5.73 กิโลเมตรต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ( $E = 5.73$  km/kWh) ในส่วนของอุปกรณ์อัดประจุจะเลือกใช้แบบ 1 เฟส ที่มีกำลังไฟในการอัดประจุสูงสุดที่ 3.6 กิโลวัตต์ ( $P = 3.6$  kW) และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า ทำให้โหลดเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะช่วงที่รถยนต์เข้ามาอัดประจุอย่างแน่น ตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 24

| Penetration Level (%) | $n_{EV}$ Phase A | $n_{EV}$ Phase B | $n_{EV}$ Phase C | $n$ |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|-----|
| 0                     | 0                | 0                | 0                | 0   |
| 25                    | 5                | 5                | 5                | 15  |
| 50                    | 10               | 10               | 10               | 30  |
| 75                    | 15               | 15               | 15               | 45  |
| 100                   | 19               | 19               | 19               | 57  |

ภาพที่ 23 ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา



ภาพที่ 24 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันของโหลดที่มีปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าแตกต่างกัน

#### 4.3.3 การศึกษาผลกระทบจากสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า (EV Driving Performance)

สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าคือ ระยะพิสัยที่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ต่อการอัดประจุเต็ม 1 ครั้ง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทางผู้ผลิตและผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าให้ความสำคัญ โดยทั่วไปสิ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า คือ ลักษณะการขับ สภาพอากาศหรืออุณหภูมิแวดล้อม รวมไปถึงสภาพ

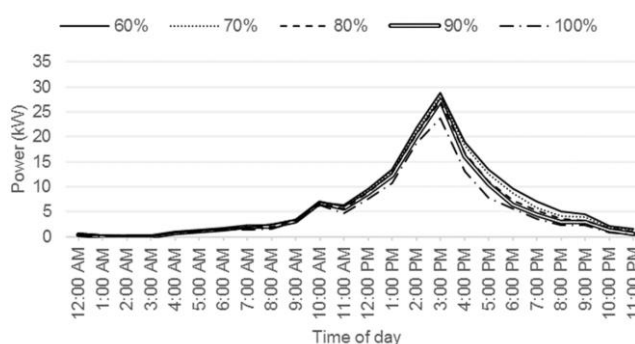
การจราจร ทำให้การประเมินสมรรถนะอย่างแม่นยำทำได้ยากและจำเป็นต้องผ่านการทดลองหลายครั้ง งานวิจัยชิ้นนี้จึงตั้งสมมติฐานอย่างง่าย ว่าสมรรถนะที่ลดลงจะส่งผลกระทบต่อระยะพิสัยที่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ จากสมมติฐานดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับการคำนวณระยะเวลาในการอัดประจุจากสมการที่ 6 และ 7 พบว่าสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ โดยในกรณีที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ระยะทางเท่ากันสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะมีผลให้รถยนต์ไฟฟ้าต้องการระยะเวลาในการอัดประจุที่ยาวนานขึ้น

$$\%EV \text{ Driving Performance} = \frac{EV \text{ Range per full-charged}}{Battery \text{ Capacity}} \quad (11)$$

สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากระยะพิสัยที่รถยนต์ไฟฟ้าทำได้ต่อการอัดประจุเต็ม 1 ครั้งต่อความจุของแบตเตอรี่ดังสมการที่ 11 โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าสมรรถนะเพื่อทดสอบผลกระทบต่ออัตราสิ้นเปลืองของหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงไว้ในภาพที่ 25 โดยทำการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 57 คันจากการทดลองก่อนหน้านี้ การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าพบว่าโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเนื่องจากการที่รถยนต์ที่สมรรถนะลดลงใช้เวลาในการอัดประจุนานขึ้น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 26

| Performance (%) | Range (km) | Battery Capacity (kWh) | Performance (km/kWh) |
|-----------------|------------|------------------------|----------------------|
| 100             | 172.00     | 30                     | $E_1 = 5.73$         |
| 90              | 154.80     | 30                     | $E_2 = 5.16$         |
| 80              | 137.60     | 30                     | $E_3 = 4.59$         |
| 70              | 120.40     | 30                     | $E_4 = 4.01$         |
| 60              | 103.20     | 30                     | $E_5 = 3.44$         |

ภาพที่ 25 สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

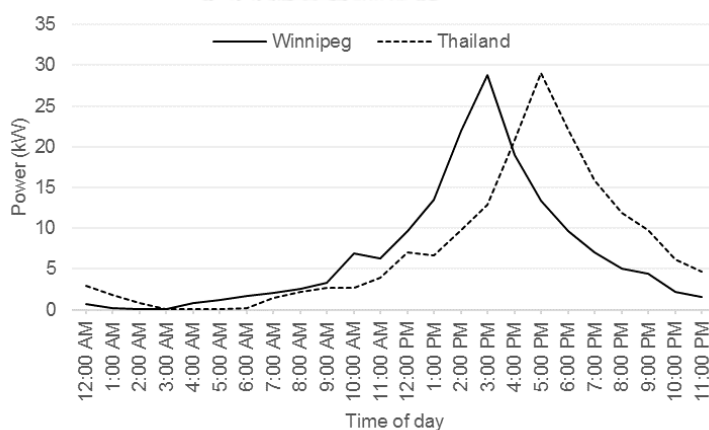


ภาพที่ 26 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันของโหลดรถยนต์ไฟฟ้าที่มีสมรรถนะแตกต่างกัน

#### 4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ (Driving Pattern)

การศึกษาผลกระทบจากพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดโปรไฟล์ จากภาพที่ 24 และภาพที่ 26 พบว่าพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ของเมืองวินนิเพ็ก ประเทศแคนาดา ส่งผลให้โหลดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่เวลา 15 นาฬิกา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโหลดโปรไฟล์ของบ้านเรือน จะมีความไม่สมเหตุสมผลทางด้านเวลา และอาจทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความไม่น่าเชื่อถือ

การศึกษาจึงเพิ่มพฤติกรรมการใช้รถยนต์ ที่คาดการณ์ว่าจะจะเป็นพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการใช้งานรถยนต์ในเขตที่อยู่อาศัยของพื้นที่ประเทศไทยดังแสดงไว้ในภาพที่ 8 เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากพฤติกรรมการใช้รถยนต์ของทั้งสองพื้นที่ โดยมีการทดสอบกับปัจจัยทั้งด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ ดังการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.2 และหัวข้อที่ 4.3.3 และผลของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้รถสามารถทำให้โหลดโปรไฟล์เฉลี่ยเปลี่ยนไปได้ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันของโหลดรถยนต์ไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมการใช้งานแตกต่างกัน

#### 4.4 ผลการศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็นตามปัจจัยที่ได้ถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษาได้ดังนี้

##### 4.4.1 ผลการศึกษาผลกระทบจากปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ

จากการทดสอบผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อกรณีภาวะโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลง ได้ผลลัพธ์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 28 พบว่าในช่วงเริ่มต้นที่ยังไม่มีรถยนต์ไฟฟ้าเชื่อมต่อเข้ามาในระบบไฟฟ้า พบว่าหม้อแปลงยังไม่เกิดภาวะโหลดเกิน ตรีชนี TOAFI TOADI มีค่าเป็น 0 และตรีชนี

EVSCR ยังไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากยังไม่มีเหตุการณ์การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า แต่เมื่อรถยนต์ไฟฟ้าเริ่มเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 25 ของจำนวนครัวเรือนในระบบจนมีจำนวนเป็น 1 คันต่อครัวเรือน พบว่าดัชนี TOAFI เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2 ครั้งต่อวันดังแสดงไว้ในภาพที่ 29

นอกจากนี้ดัชนี TOADI เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นกัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 30 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้ายังไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนี TOADI มีค่าเกินกว่า 4 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ผู้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่ยอมรับ

ในส่วนของดัชนี EVSCR ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก โดยมีค่าอัตราความสำเร็จของการอัดประจุเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 92 ของเหตุการณ์การอัดประจุทั้งหมด ส่วนอีกประมาณร้อยละ 8 ที่เหลือคือรถยนต์ไฟฟ้าที่อัดประจุไม่สำเร็จโดยมีสาเหตุหลัก มาจากการที่ผู้ใช้รถมีความจำเป็นต้องใช้รถยนต์ไฟฟ้าก่อนที่จะทำการอัดประจุเสร็จ

#### 4.4.2 ผลการศึกษาผลกระทบจากสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ

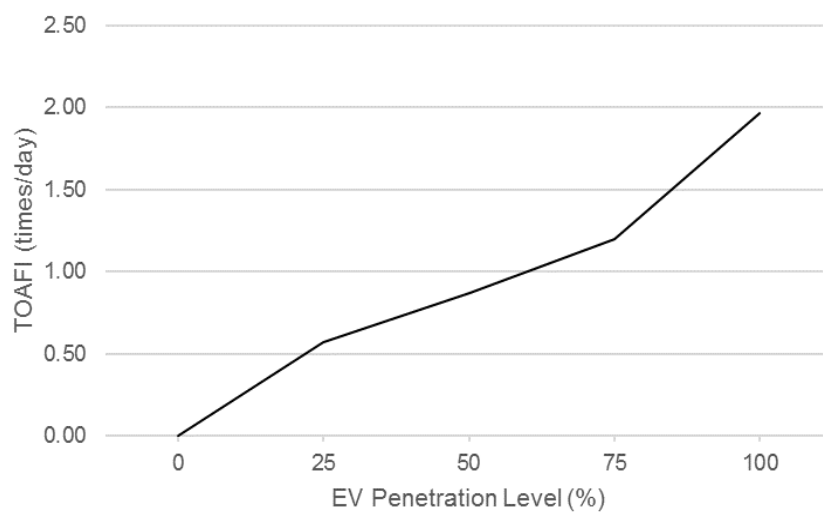
จากการทดสอบผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อดัชนีภาวะโหลดเกินของหม้อแปลง ได้ผลลัพธ์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 31 พบว่าการลดลงของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนี TOAFI เท่าใดนัก แต่ในส่วนของดัชนี TOADI พบว่าจากในตอนแรกที่ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 1 คันต่อครัวเรือนไม่ส่งผลให้ดัชนี TOADI มีค่าเกิน 4 ชั่วโมงต่อวัน แต่เมื่อสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าลดลงต่ำกว่าร้อยละ 70 ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าดังกล่าวได้ส่งผลให้ดัชนี TOADI มีค่ามากกว่า 4 ชั่วโมงต่อวัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 32

นอกจากนี้การลดลงของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้ายังส่งผลให้ดัชนี EVSCR ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากร้อยละ 92 มาเป็นร้อยละ 86 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 33 เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้ามีระยะทางที่ต้องใช้ในแต่ละการวิ่งเท่าเดิม แต่ความต้องการพลังงานในแบตเตอรี่สูงขึ้นเนื่องจากสมรรถนะที่ลดลงส่งผลให้ความต้องการเวลาในการอัดประจุที่เพิ่มขึ้น

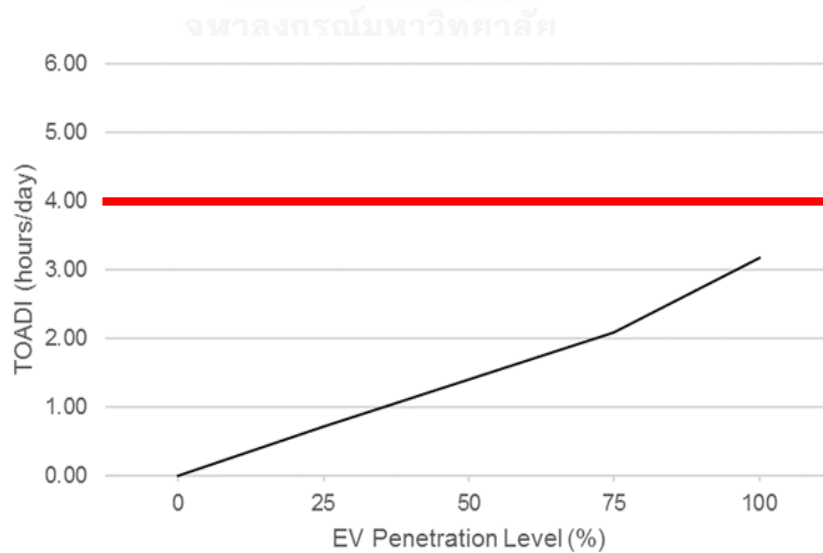
จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลง ส่งผลให้มีความเสี่ยงเล็กน้อยที่หม้อแปลงของระบบทดสอบจะอยู่ในภาวะโหลดเกินพิกัดนานกว่าที่ผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจะรับได้ คือ 4 ชั่วโมงต่อวัน อย่างไรก็ตามการทดสอบเบื้องต้นยังพบความไม่สมเหตุสมผลบางประการ อันเนื่องมาจากโหลดโปรไฟล์ของบ้านและโหลดโปรไฟล์ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ผลการศึกษาในหัวข้อถัดไปจะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าจากพื้นที่เมืองวินนิเพ็กไปเป็นพื้นที่ของประเทศไทย เพื่อให้มีความสอดคล้องกับโหลดที่นำมาจากประเทศไทยเช่นเดียวกัน

| EV Penetration Level (%) | TOAFI (times/day) | TOADI (hours/day) | EVSCR (%) |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| Base case                | 0.00              | 0.00              | n/a       |
| 25                       | 0.57              | 0.73              | 92.45     |
| 50                       | 0.87              | 1.40              | 92.34     |
| 75                       | 1.20              | 2.10              | 93.01     |
| 100                      | 1.97              | 3.17              | 92.92     |

ภาพที่ 28 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อดัชนีภาวะโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลง



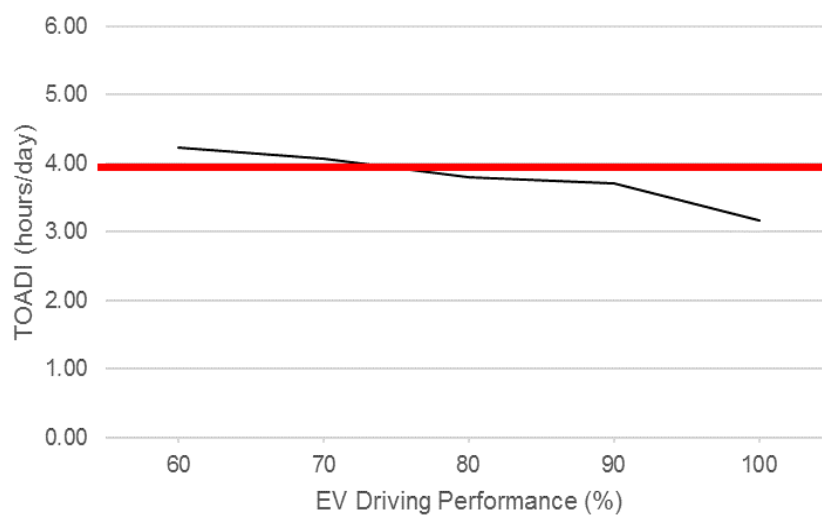
ภาพที่ 29 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อ TOAFI



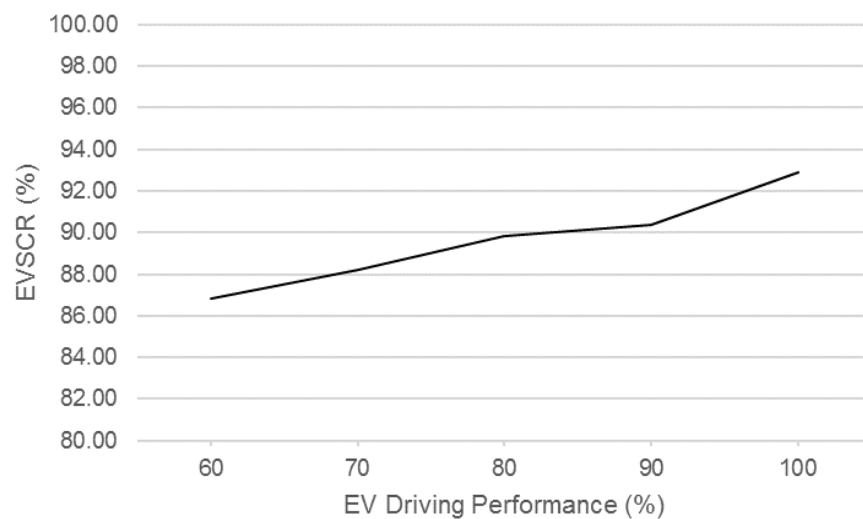
ภาพที่ 30 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าต่อ TOADI

| EV Driving Performance (%) | TOAFI (times/day) | TOADI (hours/day) | EVSCR (%) |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| 60                         | 2.23              | 4.23              | 86.83     |
| 70                         | 2.23              | 4.07              | 88.23     |
| 80                         | 2.20              | 3.80              | 89.85     |
| 90                         | 2.20              | 3.70              | 90.39     |
| 100                        | 1.97              | 3.17              | 92.92     |

ภาพที่ 31 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อดัชนีภาวะโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลง



ภาพที่ 32 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อ TOADI



ภาพที่ 33 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าต่อ EVSCR

#### 4.4.3 ผลการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้รถยนต์

จากผลการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้า พบว่าการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายในปัจจุบันเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพฤติกรรมการใช้รถที่ไม่ตรงกับช่วงที่ผู้ใช้ไฟมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบจำหน่ายในแต่ละวัน (ภาพที่ 22) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างพฤติกรรมการใช้รถของเมืองวินนิเพ็กกับประเทศไทย ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 34 และภาพที่ 35

โดยเมื่อพิจารณาผลกระทบจากปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าควบคู่กับพฤติกรรมการใช้รถในเขตพื้นที่ประเทศไทย พบว่าดัชนี TOAFI ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเหมือนตอนที่ใช้พฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ของเมืองวินนิเพ็ก แต่จะเพิ่มขึ้นและลู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งดังแสดงไว้ในภาพที่ 36a

ในส่วนของดัชนี TOADI ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นแปรผันกับปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ และจากเดิมที่ระบบสามารถรองรับรถยนต์ไฟฟ้าได้ 1 คันต่อ 1 เรือน ปรากฏว่าเมื่อมีการเปลี่ยนมาใช้พฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ของพื้นที่ประเทศไทย ที่ปริมาณรถยนต์ดังกล่าวส่งผลให้ค่าดัชนี TOADI มีค่าเกินกว่า 4 ชั่วโมงต่อวันดังแสดงไว้ในภาพที่ 36b

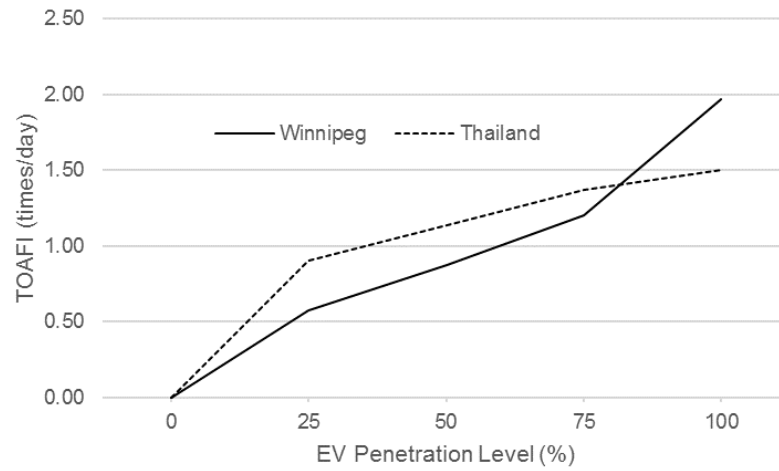
และสุดท้ายดัชนี EVSCR ไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ดัชนีโดยรวมมีค่าสูงขึ้นกว่าตอนที่ใช้พฤติกรรมการใช้รถของเมืองวินนิเพ็กดังแสดงไว้ในภาพที่ 36c

| EV Penetration Level (%) | TOAFI (times/day) | TOADI (hours/day) | EVSCR (%) |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| Base case                | 0.00              | 0.00              | n/a       |
| 25                       | 0.90              | 1.47              | 96.00     |
| 50                       | 1.13              | 2.33              | 97.11     |
| 75                       | 1.37              | 3.50              | 97.04     |
| 100                      | 1.50              | 4.30              | 96.78     |

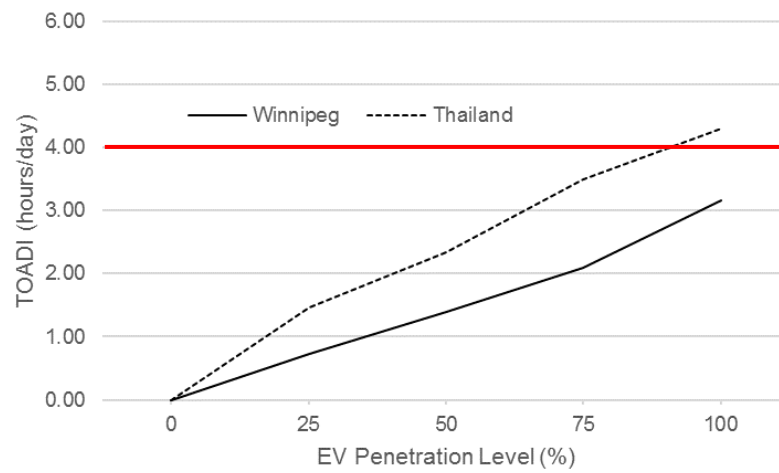
ภาพที่ 34 ผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ประเทศไทย

| EV Driving Performance (%) | TOAFI (times/day) | TOADI (hours/day) | EVSCR (%) |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| 100                        | 1.53              | 4.03              | 96.78     |
| 90                         | 1.50              | 5.27              | 95.73     |
| 80                         | 1.50              | 5.43              | 95.73     |
| 70                         | 1.50              | 5.50              | 95.15     |
| 60                         | 1.50              | 5.67              | 94.97     |

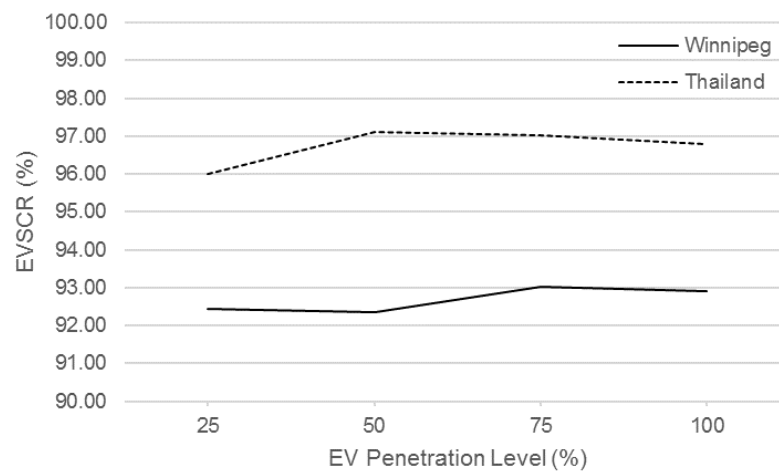
ภาพที่ 35 ผลกระทบของสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ประเทศไทย



(a) TOAFI



(b) TOADI



(c) EVSCR

ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้รถและปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า



เมื่อพิจารณาผลกระทบจากสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าควบคู่กับพฤติกรรมการใช้รถในพื้นที่ประเทศไทย พบว่าค่าสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลงไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนี TOAFI เช่นเดียวกับตอนที่ใช้โพลีโพรไพล์ของเมืองวินนิเพ็ก แต่ดัชนีโดยรวมมีค่าลดลงจากเดิม ดังแสดงไว้ในภาพที่ 37a

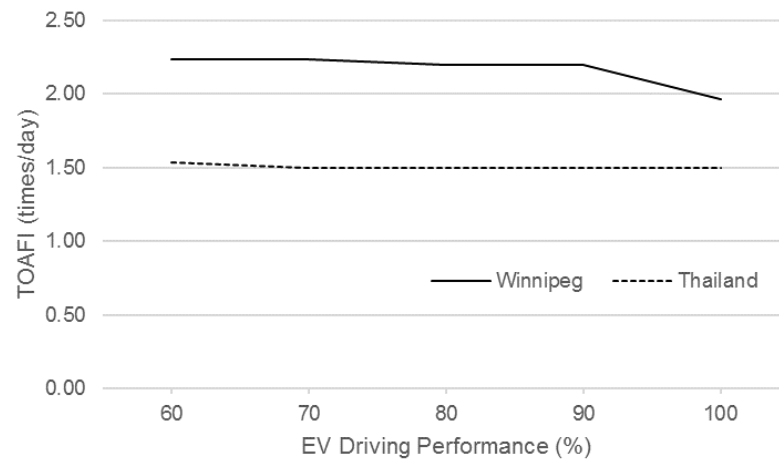
ในส่วนของดัชนี TOADI พบว่าสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลง ยังคงส่งผลให้ดัชนีมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ในพื้นที่ประเทศไทย ทำให้ดัชนีโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม จากตอนแรกที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 4.23 ชั่วโมงต่อวันโดยเพิ่มขึ้นไปสูงสุดเกือบ 6 ชั่วโมงต่อวัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 37b

เช่นกันกับเมืองวินนิเพ็ก สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลงทำให้ดัชนี EVSCR ลดลง แต่สำหรับพื้นที่ประเทศไทย ดรรชนีนี้ได้รับผลกระทบน้อยกว่าอีกทั้งค่าดัชนีโดยรวมยังมีค่าสูงกว่าร้อยละ 94 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 37c

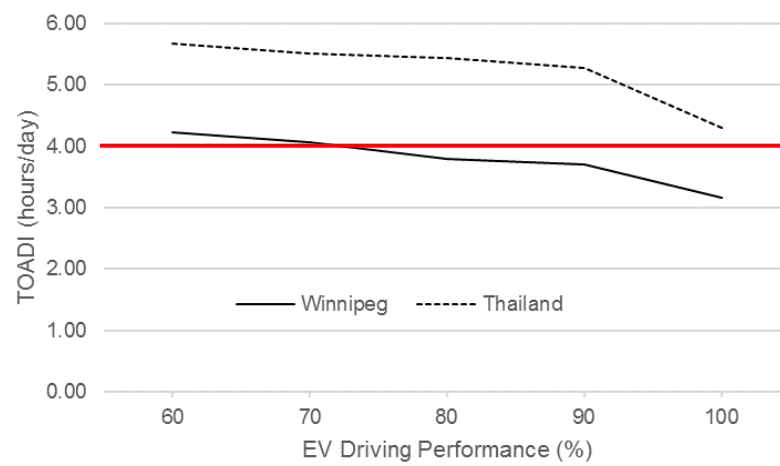
เมื่อนำผลการศึกษาผลกระทบของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบมาพิจารณาร่วมกันดังภาพที่ 38 ถึงภาพที่ 40 พบว่าปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ดัชนี TOAFI มีเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น แต่สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนีดังกล่าว ทั้งนี้ค่าดัชนีสูงสุดที่เกิดขึ้น แสดงถึงโอกาสที่หม้อแปลงจะเข้าสู่ภาวะโหลดเกินได้มากกว่า 1.5 ครั้งต่อวัน

เมื่อพิจารณาดรรชนีด้านระยะเวลาที่หม้อแปลงอยู่ในภาวะโหลดเกิน TOADI จะได้รับผลกระทบมาจากปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลง จากการทดลองพบว่าค่าดัชนี TOADI มีค่าเกินมาตรฐานการรับภาระโหลดของหม้อแปลงตั้งแต่รถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาในระบบร้อยละ 75 ของจำนวนครัวเรือน โดยที่รถยนต์ไฟฟ้าในระบบมีสมรรถนะต่ำกว่าร้อยละ 75 ดังแสดงในภาพที่ 39

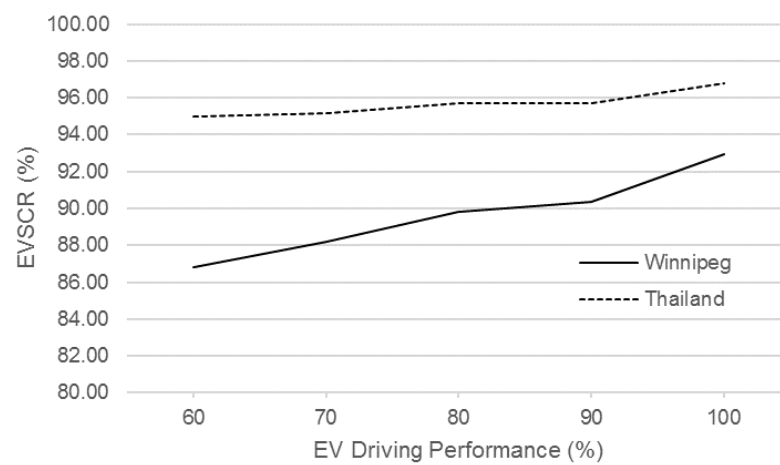
และเมื่อพิจารณาในมุมมองของผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้า พบว่าระบบจำเป็นต้องมีการเพิ่มเติมสถานีอัดประจุแบบเร็ว เนื่องจากตลอดระยะเวลาการศึกษาทั้งหมด 30 วัน ดรรชนีอัตราความสำเร็จในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณร้อยละ 97 และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 93 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 40 ซึ่งการอัดประจุไม่สำเร็จร้อยละ 7 ของเหตุการณ์การอัดประจุทั้งหมด สามารถคำนวณออกมาได้เป็นการอัดประจุไม่สำเร็จประมาณ 2 ครั้งต่อคัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ใช้งานไม่ได้รับความสะดวกสบาย



(a) TOAFI

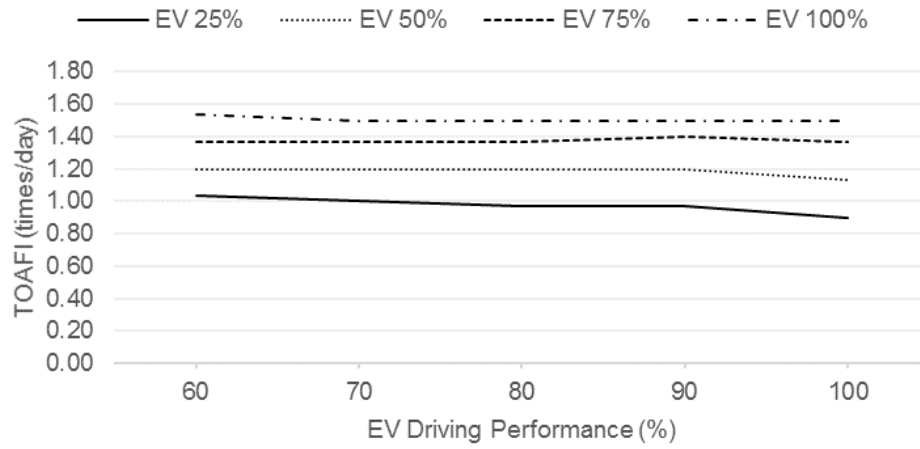


(b) TOADI

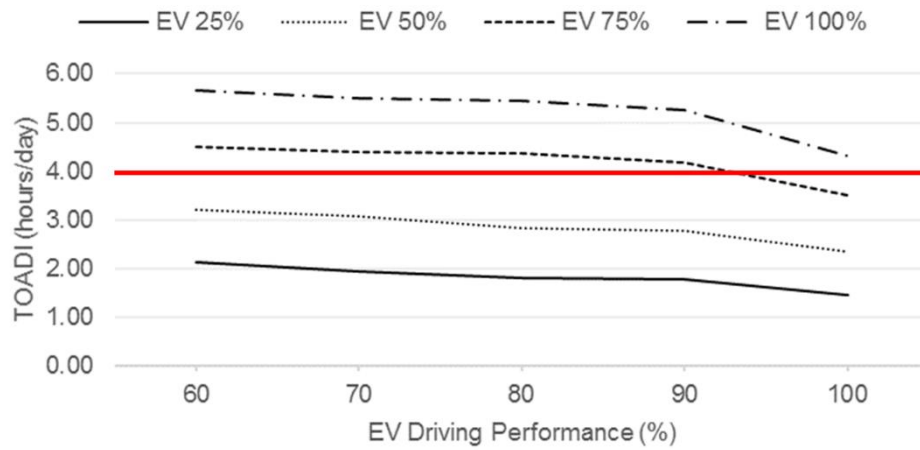


(c) EVSCR

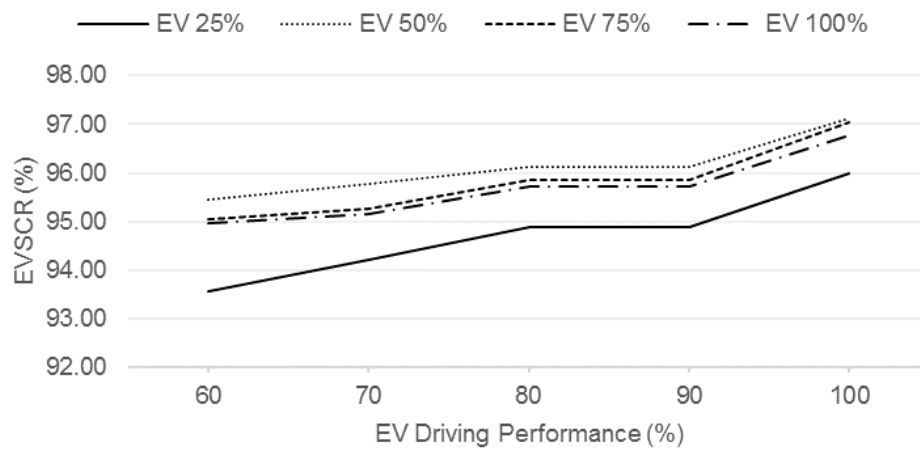
ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้รถและปัจจัยด้านสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 38 ผลการวิเคราะห์ดัชนี TOAFI



ภาพที่ 39 ผลการวิเคราะห์ดัชนี TOADI



ภาพที่ 40 ผลการวิเคราะห์ดัชนี EVSCR

#### 4.5 สรุปและวิเคราะห์การศึกษาผลกระทบ

จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบทั้งสามปัจจัย สามารถส่งผลให้ดรชนีระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ 4 ชั่วโมงต่อวัน โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในระบบจะส่งผลให้ดรชนีดังกล่าวเพิ่มขึ้นได้มากกว่าสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลง

นอกจากนี้ การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า โดยการหลีกเลี่ยงการอัดประจุในช่วงเวลาที่ผู้ใช้ไฟมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ยังช่วยลดดรชนีระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้าให้ลงมาต่ำกว่า 4 ชั่วโมงต่อวันได้ อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมอาจเป็นไปได้ยาก ในบทถัดไปจะนำเสนอวิธีการจัดการการอัดประจุโดยมุ่งเป้าไปที่การลดดรชนีระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดภาวะโหดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่ออัตราความสำเร็จในการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าให้น้อยที่สุด

## บทที่ 5

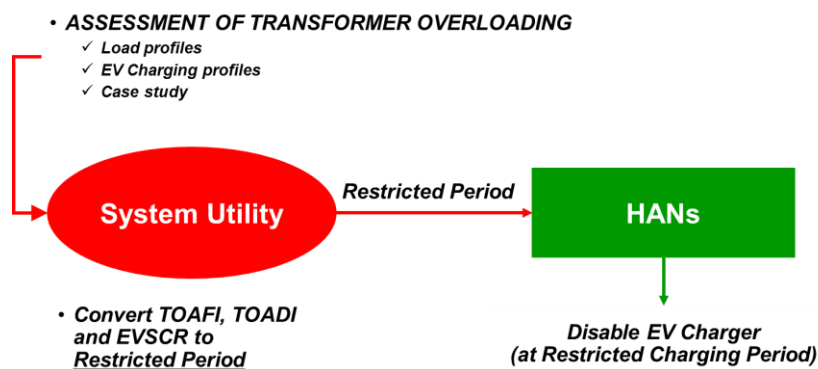
### การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าในพื้นที่อยู่อาศัย

จากแนวคิดในหัวข้อที่ 3.2 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า คือการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโหลดโพรไฟล์ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์บางประการ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทดลองนำแนวคิดเกี่ยวกับการจำกัดช่วงเวลาที่ใช้ในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะพิจารณาผลจากกรณีที่ได้ทำการศึกษาไปในหัวข้อที่ผ่านมา ได้แก่ กรณี TOAFI TOADI และ EVSCR เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจัดการ

#### 5.1 การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period

การจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period คือการตั้งค่าช่วงเวลาที่ไม่อนุญาตให้รถยนต์ไฟฟ้าทำการอัดประจุ เพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินในช่วงเวลาดังกล่าว โดยพิจารณาจากกรณี TOAFI, TOADI และ EVSCR

ภาพที่ 41 แสดงโครงสร้างของการจัดการการอัดประจุ ซึ่งอาศัยผลลัพธ์จากการประเมินผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อมีรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาในระบบ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการจัดการการอัดประจุคือ HANs (Home Area Networks) ที่ถูกติดตั้งไว้ตามบ้านเรือนที่มีการใช้งานอุปกรณ์อัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า โดย HANs จะรับข้อมูลของ Restricted Charging Period จากทางผู้ดูแลระบบไฟฟ้า (System Utility) มาเก็บเอาไว้ เพื่อเปิดใช้งานการตัดวงจรสำหรับอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวของทุกวัน โดยที่ผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจะใช้ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงมาแปลงให้เป็นคะแนนเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกช่วงเวลาสำหรับประยุกต์ใช้ Restricted Charging Period โดยผลลัพธ์ดังกล่าวจะมีที่มาจากทดสอบในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 41 แผนภาพแสดงโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของ Restricted Charging Period

## 5.2 การทดสอบการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period ซึ่งจะถูกทดสอบโดยผู้ดูแลระบบไฟฟ้า โดยอาศัยการศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าหลังจากที่ได้ทำการประยุกต์การจัดการด้วยวิธีนี้เข้าไปแล้ว จากนั้นจะนำผลกระทบของการประยุกต์ใช้ Restricted Charging Period มาทำการประเมินเป็นคะแนนเพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสม ดังนี้

### 5.2.1 สมมติฐานและการวัดผลสัมฤทธิ์

ในส่วนของการทดสอบ ผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจะทำการทดสอบ Restricted Charging Period ในทุกช่วงเวลา ตั้งแต่เวลา 0 นาฬิกา ไปจนถึงเวลา 23 นาฬิกา โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการจำกัดการอัดประจุเพียง 1 ชั่วโมง และทำการบันทึกค่าดัชนี TOAFI TOADI และ EVSCR เพื่อนำมาประเมินผลของการจัดการการอัดประจุต่อรถชนิดดังกล่าว

ภาพที่ 42a แสดงการวัดผลสัมฤทธิ์ของการจัดการการอัดประจุที่ส่งผลกระทบต่อรถชนิด TOAFI โดยมีสมมติฐานว่า การจัดการการอัดประจุด้วยวิธี Restricted Charging Period สามารถส่งผลให้รถชนิด TOAFI มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นการให้คะแนนของรถชนิด TOAFI จะถือว่ามีผลสัมฤทธิ์ดีที่สุดเมื่อสามารถลดรถชนิดนี้ได้ และการเพิ่มขึ้นของรถชนิดดังกล่าวไม่ควรเพิ่มขึ้นจากเดิมมากกว่า 1 ครั้งต่อวัน ดังนั้นถ้าการจัดการการอัดประจุทำให้รถชนิด TOAFI มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเกินกว่า 1 ครั้งต่อวัน จะถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์การให้คะแนนและมีการวัดผลสัมฤทธิ์เป็นเกรด 0

ในส่วนของรถชนิด TOADI การวัดผลสัมฤทธิ์จะประเมินตามความสามารถในการลดรถชนิด TOADI ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1 ชั่วโมงต่อวัน โดยมีที่มาจากระยะเวลาที่ใช้ในการจัดการการอัดประจุ การวัดผลสัมฤทธิ์ของรถชนิด TOADI จะแสดงไว้ในภาพที่ 42b

ภาพที่ 42c แสดงการประเมินผลสัมฤทธิ์ของรถชนิด EVSCR โดยประเมินจากการที่การจัดการการอัดประจุ ต้องไม่ส่งผลให้รถชนิดดังกล่าวลดลงมากกว่าร้อยละ 3.33 หรือเมื่อเปรียบเทียบกับจากเหตุการณ์การอัดประจุทั้งหมดคือ 1 คันต่อครัวเรือนต่อวัน

| $\Delta$ TOAFI | Grade |
|----------------|-------|
| < 0            | 4     |
| 0.00 - 0.33    | 3     |
| 0.33 - 0.66    | 2     |
| 0.66 - 1.00    | 1     |
| > 1.00         | 0     |

(a) TOAFI Grading

| $\Delta$ TOADI | Grade |
|----------------|-------|
| 0.75 - 1.00    | 4     |
| 0.50 - 0.75    | 3     |
| 0.25 - 0.50    | 2     |
| 0.00 - 0.25    | 1     |
| < 0            | 0     |

(b) TOADI Grading

| $\Delta$ EVSCR | Grade |
|----------------|-------|
| 0.00 - 0.83    | 4     |
| 0.83 - 1.67    | 3     |
| 1.67 - 2.50    | 2     |
| 2.50 - 3.33    | 1     |
| > 3.33         | 0     |

(c) EVSCR Grading

ภาพที่ 42 เกณฑ์การพิจารณาเกรดสำหรับรถชนิด TOAFI, TOADI และ EVSCR

## 5.2.2 การทดสอบการจัดการการอัดประจุกับพฤติกรรมการใช้รถยนต์ในพื้นที่เมืองวินนิเพก

จากสมมติฐานในหัวข้อที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการจัดการการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้า ด้วยวิธี Restricted Charging Period เพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลตเกินในพื้นที่เมืองวินนิเพก โดยเลือกกรณีศึกษาจากกรณีที่ทุกครัวเรือนในระบบมีรถยนต์ไฟฟ้าเป็นของตัวเอง (100% EV Penetration Level) และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าทุกคันในระบบมีค่าร้อยละ 60

จากเดิม กรณีดังกล่าวมีดรชนี TOAFI อยู่ที่ 2.23 ครั้งต่อวัน ดรชนี TOADI ที่เท่ากับ 4 ชั่วโมงต่อวัน และดรชนี EVSCR หรืออัตราการอัดประจุสำเร็จของรถยนต์ไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 86.83 พบว่าเมื่อนำการจัดการไปประยุกต์ใช้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าดรชนีมีค่าเปลี่ยนไปทั้งในทางที่ดีขึ้นและแย่ลง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 43

| Start       | End         | TOAFI | TOADI | EVSCR |
|-------------|-------------|-------|-------|-------|
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | 2.23  | 4.23  | 86.65 |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | 2.23  | 4.23  | 86.77 |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | 2.23  | 4.23  | 86.77 |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | 2.23  | 4.23  | 86.77 |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | 2.27  | 4.27  | 86.71 |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | 2.30  | 4.30  | 86.29 |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | 2.47  | 4.47  | 86.35 |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | 1.90  | 3.90  | 86.41 |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | 2.23  | 4.23  | 86.47 |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | 2.23  | 4.23  | 86.23 |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | 2.27  | 4.27  | 85.21 |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | 2.27  | 4.30  | 85.03 |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | 2.37  | 4.43  | 84.85 |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | 2.30  | 4.63  | 82.66 |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | 2.30  | 4.47  | 78.45 |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | 1.83  | 3.97  | 71.32 |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | 2.30  | 4.60  | 80.34 |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | 2.27  | 4.67  | 84.31 |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | 2.27  | 4.37  | 85.51 |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | 2.33  | 3.47  | 85.99 |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | 3.10  | 3.47  | 85.93 |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | 2.27  | 3.60  | 86.23 |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | 2.23  | 4.23  | 86.47 |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | 2.23  | 4.23  | 86.83 |

ภาพที่ 43 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่า Restricted Charging Period ในพื้นที่เมืองวินนิเพก

จากนั้น เมื่อนำผลการจัดการมาพิจารณาเป็นเกรดโดยใช้เกณฑ์ดังภาพที่ 42 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการจัดการมีผลสัมฤทธิ์ดังภาพที่ 44 และเมื่อนำมาสรุปเป็นเกรดเฉลี่ย โดยถ่วงน้ำหนักให้ดรชนีแต่ละตัวตามความสำคัญ คือ ให้ดรชนี TOADI และ EVSCR มีน้ำหนักเป็น 3 และดรชนี TOAFI ซึ่งมีความสำคัญน้อยที่สุดมีค่าน้ำหนักเป็น 1 จะทำให้สามารถจัดอันดับผลสัมฤทธิ์ของการจัดการได้ภาพที่ 45

| <b>ΔTOAFI</b> |             |       |       |
|---------------|-------------|-------|-------|
| Start         | End         | SCORE | GRADE |
| 12:00:00 AM   | 1:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 1:00:00 AM    | 2:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 2:00:00 AM    | 3:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 3:00:00 AM    | 4:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 4:00:00 AM    | 5:00:00 AM  | 0.03  | 3     |
| 5:00:00 AM    | 6:00:00 AM  | 0.07  | 3     |
| 6:00:00 AM    | 7:00:00 AM  | 0.23  | 3     |
| 7:00:00 AM    | 8:00:00 AM  | -0.33 | 4     |
| 8:00:00 AM    | 9:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 9:00:00 AM    | 10:00:00 AM | 0.00  | 3     |
| 10:00:00 AM   | 11:00:00 AM | 0.03  | 3     |
| 11:00:00 AM   | 12:00:00 PM | 0.03  | 3     |
| 12:00:00 PM   | 1:00:00 PM  | 0.13  | 3     |
| 1:00:00 PM    | 2:00:00 PM  | 0.07  | 3     |
| 2:00:00 PM    | 3:00:00 PM  | 0.07  | 3     |
| 3:00:00 PM    | 4:00:00 PM  | -0.40 | 4     |
| 4:00:00 PM    | 5:00:00 PM  | 0.07  | 3     |
| 5:00:00 PM    | 6:00:00 PM  | 0.03  | 3     |
| 6:00:00 PM    | 7:00:00 PM  | 0.03  | 3     |
| 7:00:00 PM    | 8:00:00 PM  | 0.10  | 3     |
| 8:00:00 PM    | 9:00:00 PM  | 0.87  | 1     |
| 9:00:00 PM    | 10:00:00 PM | 0.04  | 3     |
| 10:00:00 PM   | 11:00:00 PM | 0.00  | 3     |
| 11:00:00 PM   | 12:00:00 AM | 0.00  | 3     |

(a) TOAFI

| <b>ΔTOADI</b> |             |       |       |
|---------------|-------------|-------|-------|
| Start         | End         | SCORE | GRADE |
| 12:00:00 AM   | 1:00:00 AM  | 0.00  | 0     |
| 1:00:00 AM    | 2:00:00 AM  | 0.00  | 0     |
| 2:00:00 AM    | 3:00:00 AM  | 0.00  | 0     |
| 3:00:00 AM    | 4:00:00 AM  | 0.00  | 0     |
| 4:00:00 AM    | 5:00:00 AM  | 0.03  | 0     |
| 5:00:00 AM    | 6:00:00 AM  | 0.07  | 0     |
| 6:00:00 AM    | 7:00:00 AM  | 0.23  | 0     |
| 7:00:00 AM    | 8:00:00 AM  | -0.33 | 2     |
| 8:00:00 AM    | 9:00:00 AM  | 0.00  | 0     |
| 9:00:00 AM    | 10:00:00 AM | 0.00  | 0     |
| 10:00:00 AM   | 11:00:00 AM | 0.03  | 0     |
| 11:00:00 AM   | 12:00:00 PM | 0.07  | 0     |
| 12:00:00 PM   | 1:00:00 PM  | 0.20  | 0     |
| 1:00:00 PM    | 2:00:00 PM  | 0.40  | 0     |
| 2:00:00 PM    | 3:00:00 PM  | 0.23  | 0     |
| 3:00:00 PM    | 4:00:00 PM  | -0.27 | 2     |
| 4:00:00 PM    | 5:00:00 PM  | 0.37  | 0     |
| 5:00:00 PM    | 6:00:00 PM  | 0.43  | 0     |
| 6:00:00 PM    | 7:00:00 PM  | 0.13  | 0     |
| 7:00:00 PM    | 8:00:00 PM  | -0.76 | 4     |
| 8:00:00 PM    | 9:00:00 PM  | -0.76 | 4     |
| 9:00:00 PM    | 10:00:00 PM | -0.63 | 3     |
| 10:00:00 PM   | 11:00:00 PM | 0.00  | 0     |
| 11:00:00 PM   | 12:00:00 AM | 0.00  | 0     |

(b) TOADI

| <b>ΔEVSCR</b> |             |        |       |
|---------------|-------------|--------|-------|
| Start         | End         | SCORE  | GRADE |
| 12:00:00 AM   | 1:00:00 AM  | -0.18  | 4     |
| 1:00:00 AM    | 2:00:00 AM  | -0.06  | 4     |
| 2:00:00 AM    | 3:00:00 AM  | -0.06  | 4     |
| 3:00:00 AM    | 4:00:00 AM  | -0.06  | 4     |
| 4:00:00 AM    | 5:00:00 AM  | -0.12  | 4     |
| 5:00:00 AM    | 6:00:00 AM  | -0.54  | 3     |
| 6:00:00 AM    | 7:00:00 AM  | -0.48  | 4     |
| 7:00:00 AM    | 8:00:00 AM  | -0.42  | 4     |
| 8:00:00 AM    | 9:00:00 AM  | -0.36  | 4     |
| 9:00:00 AM    | 10:00:00 AM | -0.60  | 4     |
| 10:00:00 AM   | 11:00:00 AM | -1.62  | 3     |
| 11:00:00 AM   | 12:00:00 PM | -1.80  | 2     |
| 12:00:00 PM   | 1:00:00 PM  | -1.98  | 2     |
| 1:00:00 PM    | 2:00:00 PM  | -4.17  | 0     |
| 2:00:00 PM    | 3:00:00 PM  | -8.38  | 0     |
| 3:00:00 PM    | 4:00:00 PM  | -15.51 | 0     |
| 4:00:00 PM    | 5:00:00 PM  | -6.49  | 0     |
| 5:00:00 PM    | 6:00:00 PM  | -2.53  | 2     |
| 6:00:00 PM    | 7:00:00 PM  | -1.32  | 3     |
| 7:00:00 PM    | 8:00:00 PM  | -0.84  | 3     |
| 8:00:00 PM    | 9:00:00 PM  | -0.90  | 3     |
| 9:00:00 PM    | 10:00:00 PM | -0.60  | 4     |
| 10:00:00 PM   | 11:00:00 PM | -0.36  | 4     |
| 11:00:00 PM   | 12:00:00 AM | 0.00   | 4     |

(c) EVSCR

ภาพที่ 44 ผลจากการประเมินเกรดของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก



| Start       | End         | TOAFI |        | TOADI |        | EVSCR |        | GPA  |
|-------------|-------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
|             |             | GRADE | WEIGHT | GRADE | WEIGHT | GRADE | WEIGHT |      |
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 3     | 3      | 1.71 |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | 4     | 1      | 2     | 3      | 4     | 3      | 3.14 |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | 3     | 1      | 0     | 3      | 3     | 3      | 1.71 |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | 3     | 1      | 0     | 3      | 2     | 3      | 1.29 |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 2     | 3      | 1.29 |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 0     | 3      | 0.43 |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 0     | 3      | 0.43 |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | 4     | 1      | 2     | 3      | 0     | 3      | 1.43 |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 0     | 3      | 0.43 |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 2     | 3      | 1.29 |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 3     | 3      | 1.71 |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | 3     | 1      | 4     | 3      | 3     | 3      | 3.43 |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | 1     | 1      | 4     | 3      | 3     | 3      | 3.14 |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | 3     | 1      | 3     | 3      | 4     | 3      | 3.43 |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | 3     | 1      | 0     | 3      | 4     | 3      | 2.14 |

ภาพที่ 45 ผลการประเมินเกรดเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก

จากผลการวัดผลสัมฤทธิ์ในภาพที่ 45 พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการจัดการการอัดประจุด้วยวิธี Restricted Charging Time สำหรับพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก คือ ช่วงเวลา 19 นาฬิกา ถึงเวลา 20 นาฬิกา และช่วงเวลา 21 นาฬิกา ถึงเวลา 22 นาฬิกา เนื่องจากมีผลสัมฤทธิ์สูงสุดคือ 3.43

สาเหตุที่ช่วงเวลาดังกล่าวมีผลสัมฤทธิ์ที่ดี เพราะช่วงเวลาที่เกิดภาวะโหลดเกินส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง 19 นาฬิกา ไปจนถึง 22 นาฬิกา ประกอบกับช่วงเวลาดังกล่าวรถยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการการอัดประจุในพื้นที่มีน้อยทำให้การจัดการไม่กระทบต่อการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้ามากนัก อย่างไรก็ตามช่วง 20 ถึง 21 นาฬิกาเป็นช่วงระหว่างการเกิดภาวะโหลดเกิน จึงทำให้การจัดการการอัดประจุในช่วงเวลาดังกล่าวทำให้ดรชนี TOAFI แล่ง และมีผลสัมฤทธิ์น้อยกว่าช่วงเวลาที่ถูกเลือกว่าเหมาะสมไปเล็กน้อย

### 5.2.3 การทดสอบการจัดการการอัดประจุกับพฤติกรรมการใช้รถยนต์ในพื้นที่ประเทศไทย

จากการศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าต่อดรชนีภาวะโหลดเกินและดรชนีความสำเร็จในการอัดประจุ พบว่าพฤติกรรมการใช้รถยนต์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าดรชนีเปลี่ยนไป ผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าควรทำการทดลองการจัดการการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี Restricted Charging Period เพื่อลดผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินในพื้นที่ประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบผลของการจัดการว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยเลือกกรณีศึกษาจากกรณีที่ร้อยละ

ละ 90 ของครัวเรือนในระบบมีรถยนต์ไฟฟ้าเป็นของตัวเอง (75% EV Penetration Level) และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าทุกคันในระบบมีค่าร้อยละ 90 ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าดัชนี TOADI เริ่มมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานยอมรับได้

จากเดิม กรณีดังกล่าวมีดัชนี TOAFI อยู่ที่ 1.4 ครั้งต่อวัน ดรรชนี TOADI ที่เท่ากับ 4.17 ชั่วโมงต่อวัน และดัชนี EVSCR หรืออัตราการอัดประจุสำเร็จของรถยนต์ไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 95.85 พบว่าเมื่อนำการจัดการไปประยุกต์ใช้ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าดัชนีมีค่าเปลี่ยนไปทั้งในทางที่ดีขึ้นและแย่ลง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 46

| Start       | End         | TOAFI | TOADI | EVSCR |
|-------------|-------------|-------|-------|-------|
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.57 |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.64 |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.64 |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.64 |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.72 |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.72 |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.72 |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | 1.07  | 3.83  | 95.72 |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | 1.40  | 4.17  | 95.64 |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | 1.40  | 4.17  | 95.57 |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | 1.40  | 4.17  | 95.49 |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | 1.40  | 4.17  | 95.41 |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | 1.40  | 4.17  | 94.95 |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | 1.40  | 4.17  | 95.18 |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | 1.40  | 4.20  | 94.88 |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | 1.40  | 4.40  | 93.34 |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | 1.47  | 4.90  | 91.50 |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | 1.37  | 4.30  | 93.50 |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | 1.67  | 3.67  | 94.34 |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | 2.07  | 3.40  | 95.26 |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | 2.40  | 3.40  | 95.49 |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | 1.50  | 3.43  | 95.57 |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | 1.40  | 4.17  | 95.57 |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | 1.40  | 4.17  | 95.72 |

ภาพที่ 46 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่า Restricted Charging Period ในพื้นที่ประเทศไทย

จากนั้น เมื่อนำผลการจัดการมาพิจารณาเป็นกรณีโดยใช้เกณฑ์ดังภาพที่ 42 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการจัดการมีผลสัมฤทธิ์ดังภาพที่ 47 และเมื่อนำมาสรุปเป็นกรณีเฉลี่ย โดยถ่วงน้ำหนักให้ดัชนีแต่ละตัวตามความสำคัญ คือ ให้ดัชนี TOADI และ EVSCR มีน้ำหนักเป็น 3 และดัชนี TOAFI ซึ่งมีความสำคัญน้อยที่สุดมีน้ำหนักเป็น 1 เช่นเดียวกับในกรณีก่อนหน้า จะทำให้สามารถจัดอันดับผลสัมฤทธิ์ของการจัดการได้ภาพที่ 48

| ΔTOAFI      |             |       |       |
|-------------|-------------|-------|-------|
| Start       | End         | SCORE | GRADE |
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | -0.33 | 4     |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | 0.00  | 3     |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | 0.00  | 3     |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | 0.00  | 3     |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | 0.00  | 3     |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | 0.00  | 3     |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | 0.00  | 3     |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | 0.00  | 3     |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | 0.00  | 3     |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | 0.07  | 3     |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | -0.03 | 4     |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | 0.27  | 3     |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | 0.67  | 1     |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | 1.00  | 1     |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | 0.10  | 3     |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | 0.00  | 3     |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | 0.00  | 3     |

(a) TOAFI

| ΔTOADI      |             |       |       |
|-------------|-------------|-------|-------|
| Start       | End         | SCORE | GRADE |
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | -0.33 | 2     |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | 0.00  | 1     |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | 0.00  | 1     |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | 0.00  | 1     |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | 0.00  | 1     |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | 0.00  | 1     |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | 0.00  | 1     |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | 0.03  | 0     |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | 0.23  | 0     |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | 0.73  | 0     |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | 0.13  | 0     |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | -0.50 | 3     |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | -0.77 | 4     |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | -0.77 | 4     |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | -0.73 | 3     |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | 0.00  | 1     |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | 0.00  | 1     |

(b) TOADI

| ΔEVSCR      |             |       |       |
|-------------|-------------|-------|-------|
| Start       | End         | SCORE | GRADE |
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | -0.29 | 4     |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | -0.21 | 4     |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | -0.21 | 4     |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | -0.21 | 4     |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | -0.13 | 4     |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | -0.13 | 4     |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | -0.13 | 4     |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | -0.13 | 4     |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | -0.21 | 4     |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | -0.29 | 4     |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | -0.36 | 4     |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | -0.44 | 4     |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | -0.90 | 3     |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | -0.67 | 4     |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | -0.97 | 3     |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | -2.51 | 1     |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | -4.35 | 0     |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | -2.36 | 2     |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | -1.51 | 3     |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | -0.59 | 4     |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | -0.36 | 4     |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | -0.29 | 4     |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | -0.29 | 4     |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | -0.13 | 3     |

(c) EVSCR

ภาพที่ 47 ผลจากการประเมินเกรดของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่ประเทศไทย

| Start       | End         | TOAFI |        | TOADI |        | EVSCR |        | GPA  |
|-------------|-------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
|             |             | GRADE | WEIGHT | GRADE | WEIGHT | GRADE | WEIGHT |      |
| 12:00:00 AM | 1:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 1:00:00 AM  | 2:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 2:00:00 AM  | 3:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 3:00:00 AM  | 4:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 4:00:00 AM  | 5:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 5:00:00 AM  | 6:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 6:00:00 AM  | 7:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 7:00:00 AM  | 8:00:00 AM  | 4     | 1      | 2     | 3      | 4     | 3      | 3.14 |
| 8:00:00 AM  | 9:00:00 AM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 9:00:00 AM  | 10:00:00 AM | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 10:00:00 AM | 11:00:00 AM | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 11:00:00 AM | 12:00:00 PM | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 12:00:00 PM | 1:00:00 PM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 3     | 3      | 2.14 |
| 1:00:00 PM  | 2:00:00 PM  | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 2:00:00 PM  | 3:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 3     | 3      | 1.71 |
| 3:00:00 PM  | 4:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 1     | 3      | 0.86 |
| 4:00:00 PM  | 5:00:00 PM  | 3     | 1      | 0     | 3      | 0     | 3      | 0.43 |
| 5:00:00 PM  | 6:00:00 PM  | 4     | 1      | 0     | 3      | 2     | 3      | 1.43 |
| 6:00:00 PM  | 7:00:00 PM  | 3     | 1      | 3     | 3      | 3     | 3      | 3.00 |
| 7:00:00 PM  | 8:00:00 PM  | 1     | 1      | 4     | 3      | 4     | 3      | 3.57 |
| 8:00:00 PM  | 9:00:00 PM  | 1     | 1      | 4     | 3      | 4     | 3      | 3.57 |
| 9:00:00 PM  | 10:00:00 PM | 3     | 1      | 3     | 3      | 4     | 3      | 3.43 |
| 10:00:00 PM | 11:00:00 PM | 3     | 1      | 1     | 3      | 4     | 3      | 2.57 |
| 11:00:00 PM | 12:00:00 AM | 3     | 1      | 1     | 3      | 3     | 3      | 2.14 |

ภาพที่ 48 ผลการประเมินเกรดเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการในพื้นที่ประเทศไทย

จากผลการวัดผลสัมฤทธิ์ในภาพที่ 48 พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการจัดการการอัดประจุด้วยวิธี Restricted Charging Time สำหรับพื้นที่ประเทศไทย คือ ช่วงเวลา 19 นาฬิกา ถึงเวลา 20 นาฬิกา และช่วงเวลา 20 นาฬิกา ถึงเวลา 21 นาฬิกา เนื่องจากมีผลสัมฤทธิ์สูงสุดอยู่ที่ 3.57

สาเหตุที่ช่วงเวลาดังกล่าวมีผลสัมฤทธิ์ที่ดี เพราะช่วงเวลาที่เกิดภาวะโหลดเกินส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง 18 นาฬิกา ไปจนถึง 22 นาฬิกา ประกอบกับพฤติกรรมการอัดใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เมื่อรถยนต์เข้ามาจอดที่บ้านในตอนเย็นแล้ว จะออกจากบ้านอีกทีในตอนเช้าของอีกวันหนึ่ง ทำให้การจำกัดการอัดประจุในช่วงเวลาดังกล่าวไม่กระทบต่ออัตราความสำเร็จของการอัดประจุเท่าใดนัก

อย่างไรก็ดีแม้ช่วงเวลาที่ถูกเลือกกว่าเหมาะสมจะส่งผลให้ดรรชนี TOAFI มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ภาพรวมของผลสัมฤทธิ์ของการจัดการยังคงดีกว่าช่วงเวลาอื่น แต่ถ้าต้องการพิจารณาผลของดรรชนี TOAFI ร่วมด้วยการจัดการในช่วงเวลา 21 ถึง 22 นาฬิกา ก็เป็นตัวเลือกที่เป็นไปได้ เพราะมีผลสัมฤทธิ์ของการลด ดรรชนี TOADI ที่ค่อนข้างน่าพอใจ

## บทที่ 6

### สรุป

#### 6.1 สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต่อภาวะโหลดเกินของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่าปัจจัยที่นำมาพิจารณามีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดภาวะโหลดเกิน ดังนี้

เมื่อพิจารณาผลกระทบโดยใช้พฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ในพื้นที่เมืองวินนิเพ็ก พบว่าผลกระทบด้านภาวะโหลดเกินที่เกิดขึ้น มีความไม่รุนแรงและยังคงอยู่ในระดับที่มาตรฐานรับได้ เนื่องจากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้ช่วงเวลาที่รถยนต์เข้ามาอัดประจุอย่างหนาแน่นไม่สอดคล้องกับช่วงเวลาที่ผู้ใช้ไฟต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบจำหน่ายในประเทศไทย เมื่อมีการปรับพฤติกรรมการใช้ไฟให้สอดคล้องกับช่วงที่โหลดสูงสุดพบว่า ผลกระทบมีความรุนแรงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้

เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในระบบเพียงอย่างเดียว โดยทำการพิจารณาปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในอัตราส่วนระหว่างจำนวนรถต่อจำนวนครัวเรือนในระบบ จำนวนรถต่อครัวเรือนที่เพิ่มขึ้นทำให้ดัชนีความถี่เฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลง (TOAFI) เพิ่มขึ้นไปได้สูงสุดถึง 1.5 ครั้งต่อวัน

ในขณะเดียวกัน ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้ดัชนีระยะเวลาเฉลี่ยที่หม้อแปลงอยู่ในภาวะโหลดเกิน (TOADI) เพิ่มขึ้นได้สูงสุดที่ 4.3 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งส่งผลให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานสั้นลง และค่าดัชนีมีค่าเกินมาตรฐานที่ทางการไฟฟ้าหรือผู้ดูแลระบบไฟฟ้ายอมรับได้

เมื่อพิจารณาในมุมมองของผู้ใช้งานผ่านดัชนีอัตราความสำเร็จในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าปริมาณของรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนีดังกล่าว โดยอัตราความสำเร็จจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 96

ต่อมาเมื่อพิจารณาปัจจัยด้านสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าดัชนีความถี่เฉลี่ยของการเกิดภาวะโหลดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและมีค่าคงที่อยู่ที่ค่าสูงสุดคือ 1.5 ครั้งต่อวัน

อย่างไรก็ตามสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ลดลงสามารถทำให้ดัชนีระยะเวลาเฉลี่ยที่หม้อแปลงอยู่ในภาวะโหลดเกินมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ส่งผลให้จากเดิมที่มีค่าสูงสุดที่ 4.3 ชั่วโมงต่อวันเพิ่มขึ้นไปเป็น 5.67 ชั่วโมงต่อวัน โดยเป็นผลมาจากการที่รถยนต์ไฟฟ้ามีความต้องการเวลาในการอัดประจุ

ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาในการอัดประจุที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้อัตราความสำเร็จของการอัดประจุ แยกเล็กน้อย เนื่องจากมีเหตุการณ์ที่ผู้ใช้รถไม่สามารถทำการอัดประจุสำเร็จได้ทันเวลามากขึ้น โดยอัตราสามารถลดลงมามีค่าต่ำสุดประมาณร้อยละ 94

จากผลการประเมินผลกระทบ พบว่าด้วยปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าและสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา การไฟฟ้าหรือผู้ดูแลระบบไฟฟ้ามีความจำเป็นต้องใช้ระบบการจัดการการอัดประจุเพื่อลดระยะเวลาที่จะส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นลง รวมไปถึงอัตราความสำเร็จที่ลดลงทำให้การไฟฟ้าหรือผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง สามารถนำไปวางแผนการลงทุนการติดตั้งสถานีอัดประจุแบบเร็วในพื้นที่นั้นเพื่อรองรับการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าที่ไม่สำเร็จ

การป้องกันการเกิดภาวะโหดเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการจำกัดการอัดประจुरถยนต์ไฟฟ้าในบางช่วงเวลา โดยเมื่อทำการทดสอบการจำกัดการอัดประจุในทุกช่วงเวลาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการจำกัดการอัดประจุ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพฤติกรรมการใช้งานรถยนต์ในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นทางผู้ดูแลระบบไฟฟ้าอาจจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อเฝ้าระวังและติดตามการเข้ามาของรถยนต์ไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบและสามารถกำหนดนโยบายเพื่อจัดการการอัดประจุได้ทันที่ก่อนที่จะเกิดปัญหาขึ้นในระ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ข้อมูลพฤติกรรมการใช้รถยนต์ที่นำมาใช้ในการทดลอง ยังไม่ได้พิจารณาถึงความแตกต่างของพฤติกรรมในแต่ละวันของสัปดาห์ ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันได้ เช่น พฤติกรรมการใช้รถยนต์ในวันทำงาน และพฤติกรรมการใช้รถยนต์ในวันหยุด
2. ระยะทางที่รถยนต์ถูกใช้ไปในแต่ละวัน อาจส่งผลต่อเวลาเข้าและเวลาออกของรถยนต์ เพื่อความสะดวกในการคำนวณงานวิจัยชิ้นนี้ได้ละเอียดเรื่องดังกล่าวไป ถ้าต้องการความเหมือนจริงยิ่งขึ้นควรพิจารณาปัจจัยดังกล่าวควบคู่ไปด้วย
3. ปัจจัยที่นำมาศึกษา ได้แก่ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า สามารถเพิ่มเติมได้ตามความเหมาะสมของพื้นที่ อาทิเช่น บางครัวเรือนสามารถมีรถยนต์ได้มากกว่า 1 คัน หรือในด้านสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า สามารถศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยด้านสภาพการจราจร อุณหภูมิแวดล้อมในช่วงที่ทำการศึกษา เพื่อให้ได้สมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำการศึกษายิ่งขึ้น
4. ช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษา คือ 30 วัน สามารถนำไปเพิ่มเติมได้เพื่อศึกษาผลกระทบจากรถยนต์ไฟฟ้าในแง่มุมอื่น นอกเหนือจากปริมาณรถยนต์และสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า

## รายการอ้างอิง

- [1] R. Garcia-Valle and J. A. P. Lopes, "Electric Vehicle Battery Technologies," in *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, 11 ed, 2013, p. 325.
- [2] Q. Kejun, Z. Chengke, M. Allan, and Y. Yue, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 802-810, 2011.
- [3] S. International, "J1772," ed, July 2010.
- [4] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 2151-2169, 2013.
- [5] A. Ashtari, E. Bibeau, S. Shahidinejad, and T. Molinski, "PEV Charging Profile Prediction and Analysis Based on Vehicle Usage Data," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 341-350, 2012.
- [6] "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Up to and Including 100 MVA with 55 C or 65 C Average Winding Rise," *ANSI/IEEE Std C57.92-1981*, pp. 1-0, 1981.
- [7] "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators," *IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995)*, pp. 1-123, 2012.
- [8] "Rule and Practical for PEA Transformer 2014," ed: PEA Thailand, 2013, p. 35.
- [9] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid With Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 624-631, 2011.
- [10] O. Ardakanian, S. Keshav, and C. Rosenberg, "Real-Time Distributed Control for Smart Electric Vehicle Chargers: From a Static to a Dynamic Study," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2295-2305, 2014.
- [11] M. M. Collins and G. H. Mader, "The timing of EV recharging and its effect on utilities," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 32, pp. 90-97, 1983.

- [12] D. Wu, D. C. Aliprantis, and L. Ying, "On the Choice Between Uncontrolled and Controlled Charging by Owners of PHEVs," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 2882-2884, 2011.
- [13] Z. Fan, "A Distributed Demand Response Algorithm and Its Application to PHEV Charging in Smart Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1280-1290, 2012.
- [14] S. Bahrami and M. Parniani, "Game Theoretic Based Charging Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2368-2375, 2014.
- [15] P. Y. Kong and G. K. Karagiannidis, "Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid: A Survey," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6846-6875, 2016.
- [16] *Load Profile*. Available: <http://peaoc.pea.co.th/loadprofile/>
- [17] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, "Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 456-467, 2011.
- [18] *2017 Nissan Leaf Electric Cars*. Available: <https://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/>
- [19] *Range & Charging*. Available: <https://www.nissan.com.cy/vehicles/new-vehicles/leaf/range-charging.html>



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภณัฐ สถาวร จบการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงควบคุมอัตโนมัติ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีพุทธศักราช 2556 มีความสนใจด้านระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะสมาร์ตกริด (Smart Grid) และระบบการจัดการพลังงาน (Energy Management System)

ได้เข้าร่วมโครงการวิจัยเกี่ยวกับสมาร์ตกริด อาทิเช่น โครงการ PEA-AFA (PEA Automatic Fault Analysis) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โครงการไมโครกริดเมืองแม่ฮ่องสอน และโครงการวิเคราะห์ลักษณะโหลดการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจุบันมุ่งเป้าหมายการทำวิจัยไปที่การวิเคราะห์ผลกระทบของรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า และได้ตีพิมพ์ผลงานวิชาการในหัวข้อ "Impact of EV Home Charger on Distribution Transformer Overloading in an Urban Area" บนฐานข้อมูลของ IEEE ในปีพุทธศักราช 2560