การวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

นางสาวภรณี ไชยลังกา

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF VOLTAGE VARIATIONS CAUSED BY ELECTRIC VEHICLE CHARGING IN DISTRIBUTION SYSTEMS

Miss Paranee Chailungka

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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	การวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า
โดย	นางสาวภรณี ไชยลังกา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เยรบุตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภรณี ไชยลังกา : การวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (ANALYSIS OF VOLTAGE VARIATIONS CAUSED BY ELECTRIC VEHICLE CHARGING IN DISTRIBUTION SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์, 85 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลกระทบของแรงดันเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อหาปริมาณของรถยนต์ไฟฟ้าที่สามารถเชื่อมต่อในระบบได้โดยไม่ทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลงเกินเกณฑ์มาตรฐาน และเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรง การวิเคราะห์จะพิจารณาการอัดประจุแบบกระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 และการอัดประจุกระแสตรง โดยติดตั้งการอัดประจุกระแสสลับในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ และติดตั้งสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงในระบบแรงดันปานกลาง เวลาที่เริ่มต้นอัดประจุรถยนต์มาจากผลสำรวจพฤติกรรมของผู้ขับรถจาก NHTS ลักษณะการใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระบบทดสอบที่ใช้เป็นระบบแรงดันต่ำ 400 โวลต์ และระบบแรงดันปานกลาง 20 กิโลโวลต์ มาจากระบบทดสอบของทวีปยุโรปจาก CIGRE โดยทำการจำลองคุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้าโดยโปรแกรม MATLAB และคำนวณจากไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า หากมีโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 9 คันอัดประจุอยู่ในเฟสเดียวกันในระบบ สามารถก่อให้เกิดแรงดันเฟสเปลี่ยนแปลงเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันพื้นฐาน และ ในระบบแรงดันปานกลางหากติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 50 กิโลวัตต์ จำนวน 8 หัวจ่ายต่อหนึ่งสถานีในระบบจำนวนหนึ่งสถานีจะไม่เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงเกินปริมาณที่ยอมรับได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2559		

5670324821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: ELECTRIC VEHICLES / VOLTAGE VARIATIONS / AC CHARGING / DC CHARGING / CHARGING STATION / DISTRIBUTION SYSTEM

PARANEE CHAILUNGKA: ANALYSIS OF VOLTAGE VARIATIONS CAUSED BY ELECTRIC VEHICLE CHARGING IN DISTRIBUTION SYSTEMS. ADVISOR: ASSOC. PROF.THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 85 pp.

This thesis studies the voltage variation from charging electric vehicles in a distribution system. The work will obtain the number of connected electric vehicles that can be connected without violating the voltage standard limit and proper location to install DC charging stations. The analysis will cover AC charging level 1, AC charging level 2 and DC charging. The AC charging is in a LV distribution system, while DC charging is in a MV distribution system. Charging time used in this thesis were taken from transportation behavior research of NHTS and load profiles from Thailand’s utility, PEA. CIGRE test systems were used to simulate case studies which are 400 V European low voltage system and 20 kV European medium voltage system. Charging characteristic was calculated by MATLAB and DIgSILENT PowerFactory program was used to calculate power flow. Results showed that 9 electric vehicle charging at the same phase can cause phase voltage variation over 10% from nominal voltage in a low voltage system. DC charging station with 8 fast chargers having 50 kW per charger was tested in a medium voltage system, resulting no voltage variation problem.

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2016		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์ (อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก) ที่ช่วยอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องเกี่ยวกับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล (ประธานกรรมการ), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ (กรรมการ) และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เยรบุตร (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้อนุเคราะห์เวลามาช่วยตรวจสอบ และให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เป็นไปได้ด้วยดี

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำแนะนำ และให้ข้อมูลที่จำเป็น ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัย รวมถึงขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยดำเนินความสะดวกในการติดต่อประสานงานและการดำเนินการต่างๆ เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ช่วยสนับสนุนและให้กำลังใจในการเรียนต่อกับผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูปภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ 3

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ 3

1.7 โครงสร้างของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ 5

บทที่ 2 รถยนต์ไฟฟ้า 7

2.1 ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า 7

2.2 การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า 8

2.2.1 Conductive charging 8

2.2.2 Inductive charging หรือ Contactless charging 9

2.3 หัวจ่ายประจุไฟฟ้า (Charging connector) 9

2.4 แบตเตอรี่ (Battery) 10

2.4.1 ชนิดของแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.4.2 คุณลักษณะของแบตเตอรี่ (Battery characteristic) 10
2.5 ผลกระทบที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า 11
2.5.1 ความต้องการกำลังไฟฟ้า (Power demand) 11
2.5.2 กำลังสูญเสียในระบบ (Power loss) 12
2.5.3 แรงดันเปลี่ยนแปลง (Voltage variations) 12
บทที่ 3 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า 13
3.1 การจำแนกประเภทของคุณภาพไฟฟ้า 13
3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน 22
3.3 ดัชนีที่ใช้ในการประเมินแรงดันเปลี่ยนแปลง 24
3.3.1 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย (Average voltage drop index) 24
3.3.2 ดัชนีแรงดันตกสูงสุด (maximum voltage drop index) 25
3.4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า 25
3.4.1 ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558 [21] 26
3.4.2 ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [22] 27
บทที่ 4 การทดสอบ 28
4.1 การจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EV charging characteristic) 28
4.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า 28
4.1.2 ขั้นตอนการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า 30
4.2 การวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลง 31
4.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลง 31
4.2.2 กรณีศึกษา 37
4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ 39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

บทที่ 5 ผลการทดสอบ 41
5.1 การทดสอบที่ 1 : การอัดประจุแบบกระแสสลับ ในระบบแรงดันต่ำ 41
5.1.1 การอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 41
5.1.2 การอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 2 48
5.1.3 การอัดประจุทั้งกระแสสลับระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 ในระบบ 56
5.1.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบจากกรณีย่อยต่างๆ 61
5.2 การทดสอบที่ 2 : สถานีอัดประจุกระแสตรง ในระบบแรงดันปานกลาง 68
5.3 การทดสอบที่ 3 : การอัดประจุกระแสสลับในระบบแรงดันต่ำ และสถานีอัดประจุกระแสตรงในระบบแรงดันปานกกลาง 69
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบ และ ข้อเสนอแนะ 74
6.1 สรุปผลการทดลอง 74
6.2 ข้อเสนอแนะ 74
รายการอ้างอิง 76
ภาคผนวก 79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบรถยนต์ไฟฟ้าต่างๆที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [12] 7

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบระดับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน SAE-J1772 [13] 8

ตารางที่ 3.1 ประเภทและคุณลักษณะของคุณภาพไฟฟ้าชนิดต่างๆ 20

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง กรณีผู้ขอใช้บริการไม่จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ [21] 26

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง กรณีผู้ขอใช้บริการจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ [21] 26

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [22] 27

ตารางที่ 4.1 ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า [5] 28

ตารางที่ 4.2 ระดับการอัดประจุ [13] 29

ตารางที่ 4.3 กรณีศึกษาที่ 1 การอัดประจุแบบกระแสสลับในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 38

ตารางที่ 4.4 กรณีศึกษาที่ 3 พิจารณาการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 และสถานีอัดประจุกระแสตรง 39

ตารางที่ 5.1 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดกรณีศึกษาย่อยที่ 1-6 48

ตารางที่ 5.2 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 7-12 55

ตารางที่ 5.3 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 60

ตารางที่ 5.4 แสดงดัชนีแรงดันตกสูงสุด และ ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย ของแต่ละบัสที่ติดตั้งสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิดกระแสตรง 68

ตารางที่ 5.5 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดการทดสอบที่ 3 72

Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 หัวจ่ายประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ [16] 10

รูปที่ 3.1 กระแสอิมพัลส์ชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่า 13

รูปที่ 3.2 กระแสออสซิลเลเตอร์ที่เกิดจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุแบบ back-to-back 14

รูปที่ 3.3 กระแสออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำที่เกิดจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไร้โหลด 14

รูปที่ 3.4 แรงดันตกที่เกิดจากความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลงดิน 15

รูปที่ 3.5 แรงดันตกที่เกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ 15

รูปที่ 3.6 แรงดันเกินที่เกิดจากความผิดพร่องชนิด 1 เฟสลงดิน 16

รูปที่ 3.7 ไฟดับช่วงสั้นที่เกิดจากความผิดพร่องและ recloser ทำงาน 17

รูปที่ 3.8 คลื่นรอยบากที่เกิดจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 19

รูปที่ 3.9 แรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากเตาหลอม 19

รูปที่ 3.10 แรงดันตกในระบบ 3 เฟส โหลดสมดุล [19] 22

รูปที่ 3.11 แรงดันตกในระบบ 3 เฟส 4 สาย โหลดเฟสเดียว [19] 23

รูปที่ 4.1 ระยะทางที่รถยนต์ใช้วิ่งใน 1 วัน 29

รูปที่ 4.2 cdf ของระยะทางที่รถยนต์ใช้วิ่งใน 1 วัน 30

รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุไฟฟ้า 31

รูปที่ 4.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง [24] 32

รูปที่ 4.5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ [24] 33

รูปที่ 4.6 เวลาที่รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พัก 34

รูปที่ 4.7 cdf ของเวลาที่รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พัก 35

รูปที่ 4.8 ช่วงเวลาที่รถยนต์เข้าใช้บริการสถานีอัดประจุกระแสตรง [25] 35

รูปที่ 4.9 ความต้องการไฟฟ้าใน 1 วันของบ้านอยู่อาศัย 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.10 ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วันของกิจการขนาดเล็ก 37

รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบ 40

รูปที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV 42

รูปที่ 5.2 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV 42

รูปที่ 5.3 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 1 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 9 คัน 43

รูปที่ 5.4 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 2 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 27 คัน 44

รูปที่ 5.5 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 3 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 45 คัน 44

รูปที่ 5.6 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 4 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 9 คัน 45

รูปที่ 5.7 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 5 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 27 คัน 45

รูปที่ 5.8 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 6 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 45 คัน 46

รูปที่ 5.9 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีที่ศึกษาย่อยที่ 1-3 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV 47

รูปที่ 5.10 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV 47

รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 7-9 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV 49

รูปที่ 5.12 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV 50

รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 7 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 9 คัน 51

รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 8 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 27 คัน 51

รูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 9 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 45 คัน 52

รูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 10 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 9 คัน 52

รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 11 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 27 คัน 53

รูปที่ 5.18 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 12 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 45 คัน 53

รูปที่ 5.19 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีที่ศึกษาย่อยที่ 7-9 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV 54

รูปที่ 5.20 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV 55

รูปที่ 5.21 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 57

รูปที่ 5.22 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 13 58

รูปที่ 5.23 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 14 58
รูปที่ 5.24 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 15 59
รูปที่ 5.25 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 60
รูปที่ 5.26 การอัดประจุระดับที่ 1 จำนวนรถยนต์ 9 คัน 61
รูปที่ 5.27 การอัดประจุระดับที่ 1 จำนวนรถยนต์ 27 คัน 62
รูปที่ 5.28 การอัดประจุระดับที่ 1 จำนวนรถยนต์ 45 คัน 62
รูปที่ 5.29 การอัดประจุระดับที่ 2 จำนวนรถยนต์ 9 คัน 63
รูปที่ 5.30 การอัดประจุระดับที่ 2 จำนวนรถยนต์ 27 คัน 64
รูปที่ 5.31 การอัดประจุระดับที่ 2 จำนวนรถยนต์ 45 คัน 64
รูปที่ 5.32 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวนรถยนต์ 9 คัน 65
รูปที่ 5.33 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวนรถยนต์ 27 คัน 66
รูปที่ 5.34 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวนรถยนต์ 45 คัน 66
รูปที่ 5.35 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จำนวนรถยนต์ 9 คัน 67
รูปที่ 5.36 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จำนวนรถยนต์ 27 คัน 67
รูปที่ 5.37 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จำนวนรถยนต์ 45 คัน 68
รูปที่ 5.38 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 70
รูปที่ 5.39 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 1 71
รูปที่ 5.40 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 2 71
รูปที่ 5.41 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 3 72

บทที่ 1
บทนำ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันรถยนต์เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเดินทางอย่างหนึ่ง แต่ปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นสาเหตุของการเกิดมลพิษทางอากาศและการสิ้นเปลืองน้ำมันซึ่งเป็นพลังงานหลักในการขับเคลื่อนรถยนต์ จึงได้เกิดรถยนต์ไฟฟ้าขึ้นซึ่งรถยนต์ไฟฟ้านั้นใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้ไม่สิ้นเปลืองน้ำมันและไม่เกิดมลพิษทางอากาศเพราะรถยนต์ไฟฟ้าไม่มีการเผาไหม้ให้ก๊าซที่เป็นมลพิษทางอากาศ รถยนต์ไฟฟ้ามีหลายประเภทเช่น รถยนต์ไฟฟ้าชนิดใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (Battery electric vehicle, BEV) รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดจ์ (Hybrid electric vehicle, HEV) และรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริดจ์ (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) การที่รถยนต์ไฟฟ้าต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนนั่นจึงต้องมีการอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อทดแทนพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ใช้ไป พลังงานที่นำมาอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจึงต้องนำมาจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ามีหลายระดับ คือการอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรงและการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความแตกต่างกันของแรงดันและกำลังที่ใช้ในการอัดประจุ หากมีการอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ เช่น เกิดความต้องการกำลังไฟฟ้าเกินความสามารถผลิตกำลังไฟฟ้า เกิดการสูญเสียกำลังในระบบ และเกิดแรงดันตกเนื่องจากมีผู้ใช้ไฟฟ้ามากเกินไป

จากที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาผลกระทบจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นเพื่อประเมินผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า และยังเป็นแนวทางสำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

(1) ศึกษาการจำลองคุณลักษณะที่สำคัญของการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าชนิดต่างๆในระบบไฟฟ้า

(2) วิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

(1) พิจารณารถยนต์ไฟฟ้าเฉพาะประเภทใช้แบตเตอรี่ (Battery electric vehicle) และปลั๊กอินไฮบริดจ์ (Plug-in hybrid electric vehicle)

(2) พิจารณาระดับการอัดประจุคือ กระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 และกระแสตรงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ และกระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดจ์

(3) พิจารณาระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันปานกลางสำหรับการอัดประจุแบบกระแสตรง และระดับแรงดันต่ำสำหรับการอัดประจุแบบกระแสสลับ

(4) ไม่พิจารณาตัวเก็บประจุชนิดต่อเข้าระบบเอง (Switched capacitor bank) และหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ (Auto-Transformer)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

(1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

(1.1) ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า

(1..2) ศึกษาผลกระทบของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

(1.3) ศึกษาบทความด้านคุณภาพแรงดันไฟฟ้า

(1.4) ศึกษาข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า

(2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา

(3) กำหนดขอบเขตของงานวิจัย

(4) กำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

5) กำหนดขั้นตอนในการการวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

(6) พัฒนาโปรแกรมสำหรับจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB

(7) ทอดสอบการหาแรงดันเปลี่ยนแปลจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

(8) วิเคราะห์ และ สรุปผลการทดลอง

(9) นำเสนอผลงานวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

(1) ได้ทราบถึงผลการวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

(2) เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดจุดติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรงเพื่อให้แรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

(3) เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดจำนวนจุดการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสสลับทั้งระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ตามบ้านเรือน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทความ [1] ศึกษาผลกระบทในด้านความต้องการกำลังไฟฟ้า, การสูญเสียกำลังไฟฟ้า และแรงดันเปลี่ยนแปลง ของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิดปลั๊กอินไฮบริดจ์ (PHEV) โดยใช้การอัดประจุในระดับที่ 1 (Single phase 120V) ระบบทดสอบที่ใช้คือ IEEE 34 node test system การศึกษาแบ่งออกเป็น กรณีที่ 1 ศึกษาผลกระทบใน 1 ปี (ปี 2020) กรณีที่ 2 ศึกษาผลกระทบในระยะสั้น (2020-2026) และกรณีที่ 3 ศึกษาผลกระทบในระยะยาว (2020-2050) ใช้ข้อมูลการใช้รถยนต์จาก NTH2009 โดยลักษณะการใช้รถยนต์จะเปลี่ยนแปลงตามวันในสัปดาห์และฤดูต่างๆ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของโหลด (Load growth) ในแต่ละปีด้วย

บทความ [2, 3] ได้เสนอแนวคิดการจัดการโหลดอย่างฉลาด (smart load management, SLM) ในการแก้ปัญหาผลกระทบของการอัดประจุรถไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ช่วยแก้ปัญหาในเรื่องลดความต้องการใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ แรงดันเปลี่ยนแปลง และลดกำลังสูญเสียของระบบ ในบทความนี้ใช้ระบบทดสอบ 1200 node มีการอัดประจุไฟฟ้าทั้งแบบสถานีอัดประจุแบบเร็วและการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับระดับที่ 1 มีการแบ่งช่วงเวลาการอัดประจุออกเป็น 3 ช่วงเวลาคือ ช่วงสีแดงเริ่มอัดประจุเวลา 18.00-22.00 น. ช่วงสีฟ้าเริ่มอัดประจุเวลา 18.00-01.00 น. และช่วงสีเขียวเริ่มอัดประจุเวลา 18.00-08.00 น.

บทความ [4] ศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของรถไฟฟ้าต่อการลงทุนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ การเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานในระบบ ในบทความใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งมาจากระบบไฟฟ้าจริง 2 ระบบ ผลการศึกษาพบว่าต้นทุนในการลงทุนเพิ่มขึ้น 15% ของการลงทุนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ มีการสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้นถึง 40% ในช่วง off-peak เมื่อ 60% ของรถยนต์ทั้งหมดเป็นรถยนต์ไฟฟ้า

บทความ [5] ศึกษาผลกระทบในด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ผลของแรงดันเปลี่ยนแปลง แรงดันเกิน แรงดันตก และแรงดันไม่สมดุล ได้ถูกจำลองโดยวิธีการ Monte Carlo นอกจากนั้นยังศึกษาผลกระทบของหม้อแปลง หม้อแปลง overload และหม้อแปลงไม่สมดุล รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ศึกษามี 2 ชนิดคือ PHEV และ BEV ระดับการอัดประจุ 2 ระดับคือระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 เป็นการอัดประจุชนิดไฟสลับทั้งสองชนิด ผลการศึกษาพบว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ทำให้เกิดหม้อแปลง overload ได้มากกว่า PHEV และการอัดประจุรถทั้งระดับที่ 2 และระดับที่ 1 ก่อให้เกิดแรงดันตกในด้านทุติยภูมิ และยังก่อให้เกิดหม้อแปลงไม่สมดุลอีกด้วย

บทความ [6] ศึกษาผลกระทบของสถานีอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (Rapid-charge) ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าขนาด 250kW ต่อหนึ่งสถานีอัดประจุไฟฟ้า โดยศึกษาผลกระทบในด้านการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จุดที่แตกต่างกัน 4 จุด และศึกษาความผิดพร่องของระบบ (Fault) แบบสามเฟสลงดินและความผิดพร่องแบบหนึ่งเฟสลงดิน นอกจากนั้นยังศึกษาแรงดันตกในระบบ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ PSCAD ผลการศึกษาแรงดันตกพบว่ามีแรงดันตกไม่เกิน 100V ที่หม้อแปลงด้าน 24.9kV หรือประมาน 0.4992%

บทความ [7] ศึกษาผลกระทบด้านคุณภาพไฟฟ้าของการอัดประจุรถไฟฟ้าแบบ PHEV ในบทความแบ่งการอัดประจุเป็น 3 แบบ คือ การอัดประจุแบบไม่ควบคุม การอัดประจุแบบควบคุม และ การอัดประจุแบบอัจฉริยะ มีการสุ่มคุณลักษณะต่างๆของรถไฟฟ้าเช่น เวลาที่เริ่มต้นอัดประจุ ระยะเวลาในการอัดประจุ และสถานที่ที่มีการอัดประจุ มีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบหลายเฟสทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิในการศึกษาระบบไฟฟ้า ผลจากการศึกษาพบว่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากการอัดประจุรถไฟฟ้าไม่มีผลกระทบที่สำคัญกับระบบไฟฟ้ากำลัง แต่การอัดประจุในระดับที่ 1 สามารถทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นในสายนิวทรัล

บทความ [8] ศึกษาการอัดประจุของแบตเตอรี่โดยแบ่งการอัดประจุเป็นสองแบบคือ การอัดประจุแบบเร็ว (Fast charge) และการอัดประจุแบบอัจฉริยะ (Smart charge) แบตเตอรี่ที่ใช้ทอสอบสองชนิดคือ lithium-ferro-phosphate และ lithium-polymer (NMC) การอัดประจุแบบเร็วแบ่งรูปแบบการอัดประจุเป็น 3 รูปแบบ คือ constant current, constant power และ forced power จากบทความสรุปได้ว่า การอัดประจุแบบเร็วในรูปแบบ constant current มีผลกระทบกับระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด การอัดประจุแบบอัจฉริยะสามารถลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด total energy exchange และ ลดการสูญเสียพลังงานในสายส่ง

บทความ [9] ศึกษาผลหลังจากเกิดแรงดันตกต่ำว่า 80% ของแรงดันนอมินอลตามมาตรฐาน สถานีอัดประจุไฟฟ้าจะถูกตัดออกจากระบบซึ่งทำให้โหลดส่วนใหญ่ถูกตัดออกจากระบบ ทำให้แรงดันหลังจากการถูกรบกวนมีค่ามากกว่าแรงดันก่อนการถูกรบกวนเนื่องจากจำนวนโหลดที่ลดลง บทความศึกษาระบบทดสอบ 23kV 10 node และ IEEE 34 node test feeder

บทความ [10] บทความนี้ศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการจ่ายไฟฟ้าให้ระบบของรถยนต์ (Vehicle to grid) ในบทความวิเคราะห์สถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าหลายชนิด เช่น park and ride, mall center parking areas, airport parking areas, on street recharge station, home wall box charger ผลการศึกษาพบว่ารถยนต์ไฟฟ้าสามารถช่วยลดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าได้เมื่อต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าเป็นจำนวนมากดังเช่น สนามบินหรือลานจอดรถศูนย์การค้า ส่วนกรณีอื่นนั้นไม่เหมาะกับ V2G เพราะมีรถต่อกับระบบไม่มากและไม่เหมาะกับการติดตั้ง bidirectional charging station ในกรณีของการอัดประจุรถไฟฟ้าในบ้าน V2G มีประโยชน์ในการช่วยแก้ปัญหาไฟตกในระดับ 20 นาที และยังลดการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอีกด้วย

1.7 โครงสร้างของเนื้อหาวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 6 ส่วนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และ บทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงโครงสร้างของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2 รถยนต์ไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า ประเภทขอรถยนต์ไฟฟ้า การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ความรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่ ชนิดของแบบเตอรรี่ คุณลักษณะของแบตเตอรี่ และผลกระทบจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 3 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงปัญหาของคุณภาพไฟฟ้า การจำแนกประเภทของคุณภาพไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ดัชนีที่ใช้ในการประเมินแรงดันเปลี่ยนแปลง และ ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

บทที่ 4 การทดสอบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการจำลองคุณลักษณะการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง ขั้นตอนในการจำลอง การวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลง ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ กรณีศึกษา และขั้นตอนการทดสอบ

บทที่ 5 ผลการทดสอบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบจากกรณีต่างๆ การอัดประจุกระแสสลับในระบบแรงดันต่ำ การติดตั้งสถานีอัดประจุกระแสตรงในระบบแรงดันปานกลาง

บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบ และ ข้อเสนอแนะ

ในส่วนนี้จะสรุปผลการทดสอบ และ ข้อเสนอแนะ ในการทดสอบหาแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
รถยนต์ไฟฟ้า

เนื้อหาของบทนี้นำเสนอความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ และผลกระทบที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า

รถยนต์ไฟฟ้าหรือ Electric vehicle สามารถแบ่งออกได้หลายประเภทดังนี้ [11]

(1) All-Electric Vehicles (EVs) หรือเรียกอีกอย่างว่า Battery electric vehicles (BEVs) รถยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้จะใช้แบตเตอรี่ในการเก็บสะสมพลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยไม่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Inter combustion engines, ICE) เป็นส่วนประกอบ แบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าสามารถอัดประจุโดยการต่อสาย (plug-in) เข้ากับแหล่งพลังงานไฟฟ้า ขนาดความจุของแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้จะมีขนาดใหญ่สุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่น

(2) Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) รถยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้ใช้พลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้านอกจากนั้นยังใช้พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงอื่น เช่น น้ำมันเบนซิน หรือ น้ำมันดีเซล ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์สันดาปภายใน หากมีการใช้รถยนต์ในระยะทางไม่มากเกินความจุของแบตเตอรี่ จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว การอัดประจุแบตเตอรี่ของรถยนต์ประเภทนี้จะใช้การต่อสายเข้ากับระบบไฟฟ้าเช่นเดียวกับ BEV แต่ระยะเวลาในการอัดประจุจะน้อยกว่าเนื่องจากขนาดของแบตเตอรี่ของรถยนต์ PHEV จะมีขนาดเล็กกว่ารถยนต์ BEV

(3) Hybrid Electric Vehicles (HEVs) เป็นรถยนต์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในกับแบตเตอรี่ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้ไม่ต้องอัดประจุแบตเตอรี่จากระบบไฟฟ้าภายนอก แต่ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือ จากแหล่งพลังงานขับเคลื่อน (Propulsion source) และการส่งคืนพลังงานกลับขณะเบรก (Regenerative breaking) แบตเตอรี่ของรถยนต์ HEV จะมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้าประเภทอื่น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบรถยนต์ไฟฟ้าต่างๆที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [12]

ยี่ห้อ	รุ่น	ชนิด	ขนาดแบตเตอรี่ (kWh)	all-electric range (mile)
Toyota	Prius	PHEV	4.4	14
Chevrolet	Volt	PHEV	16	40

ยี่ห้อ	รุ่น	ชนิด	ขนาดแบตเตอรี่ (kWh)	all-electric range (mile)
Mitsubishi	i-MiEV	BEV	16	96
Nissan	Leaf	BEV	24	100
Tesla	Roadster	BEV	53	245

2.2 การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

วิธีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ามี 2 วิธีคือ Conductive charging และ Inductive charging [12]

2.2.1 Conductive charging

คือการอัดประจุที่มีการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายไฟ โดยมีสายเคเบิลเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อ การอัดประจุไฟฟ้าแบบเชื่อต่อโดยตรงนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การอัดประจุแบบไฟฟ้ากระแสสลับ และ การอัดประจุแบบไฟฟ้ากระแสตรง มาตรฐานการอัดประจุมีหลายระดับ เช่น ระดับการอัดประจุตามมาตรฐาน SAE-J1772 [13] แบ่งระดับการอัดประจุดังนี้

(1) การอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 (AC Level 1) เป็นการอัดประจุชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาดแรงดันในการอัดประจุคือ 120 โวลต์ ใช้กระแส 16 แอมแปร์ มีกำลังในการอัดประจุประมาณ 2 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งที่ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ เช่นภายในบ้านเรือน

(2) การอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 2 (AC Level 2) เป็นการอัดประจุชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสหรือ 3 เฟส ขนาดแรงดันในการอัดประจุคือ 208-240 โวลต์ กระแส 80 แอมแปร์ มีกำลังในการอัดประจุประมาณ 20 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งภายในบ้านเรือน และติดตั้งในที่สาธารณะ เช่น ติดตั้งในลานจอดรถหรือในห้างสรรพสินค้า

(3) การอัดประจุกระแสตรง (DC Level) เป็นการอัดประจุชนิดไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันในการอัดประจุ 500 โวลต์ กระแส 80 แอมแปร์ มีกำลังในการอัดประจุประมาณ 50 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งเป็นสถานีอัดประจุสาธารณะหรือในเชิงพาณิชย์เช่นเดียวกับสถานีบริการน้ำมัน

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบระดับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน SAE-J1772 [13]

ระดับการอัดประจุ	แรงดัน	กระแสสูงสุด
AC Level 1	120-240 V AC, 1-phase	16 A

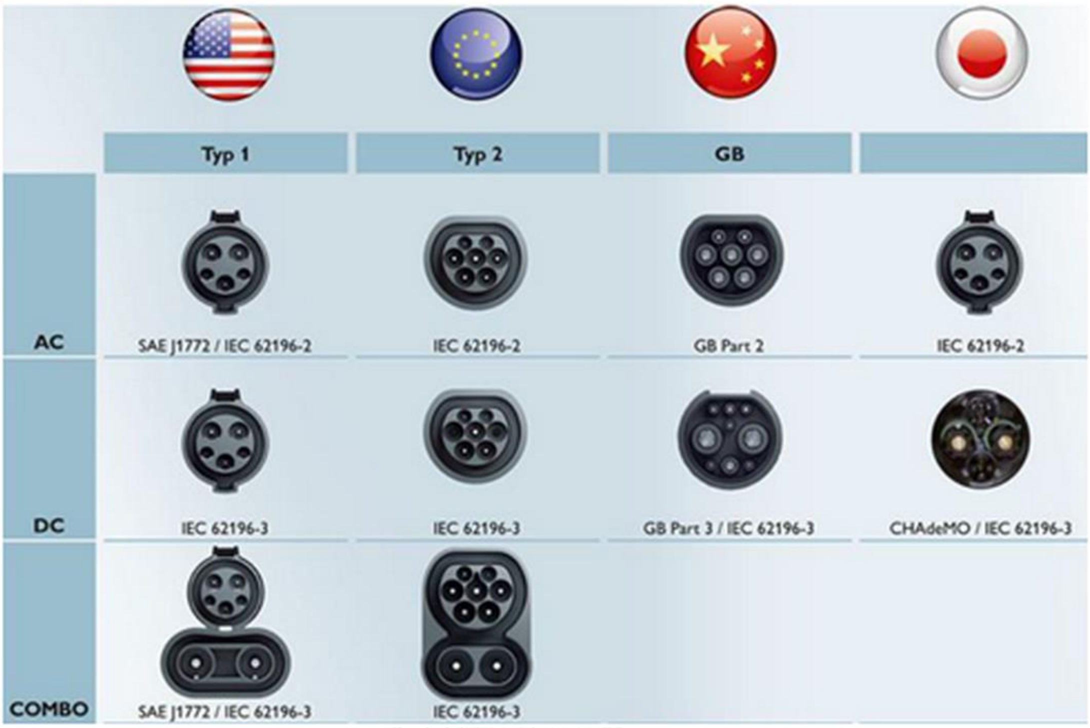
ระดับการอัดประจุ	แรงดัน	กระแสสูงสุด
AC Level 2	208-400 V AC, 1-phase or 3 phase	80 A
DC Level	200-500 V DC	80 A

2.2.2 Inductive charging หรือ Contactless charging

คือการอัดประจุไฟฟ้าชนิดที่ไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่ใช้การส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กผ่านขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ประโยชน์ของการอัดประจุชนิดนี้คือความสะดวกในการอัดประจุ สามารถนำไปพัฒนาให้อยู่บนถนนทางหลวงและอัดประจุขณะขับรถได้ ข้อเสียของการอัดประจุชนิดนี้คือ ประสิทธิภาพต่ำ กำลังไฟฟ้าน้อย ความซับซ้อนในการผลิต และ ราคาสูง

2.3 หัวจ่ายประจุไฟฟ้า (Charging connector)

หัวจ่ายของสถานีอัดประจุไฟฟ้ามีหลายแบบขึ้นอยู่กับระดับและมาตรฐานของการอัดประจุและผู้ผลิตของรถยนต์ไฟฟ้าว่าจะเลือกใช้มาตรฐานหัวจ่ายประจุไฟฟ้าชนิดใด มาตรฐาน IEC 62196-1 [14]จำแนกหัวจ่ายประจุกระแสสลับเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดที่ 1 เป็นหัวจ่ายตามมาตรฐานของเมริกา และชนิดที่ 2 เป็นหัวจ่ายตามมาตรฐานยุโรป และยังจำแนกหัวจ่ายประจุกระแสตรงออกเป็นชนิดที่ 1 และ 2 เช่นเดียวกับหัวจ่ายประจุกระแสสลับ นอกจากนี้หัวจ่ายประจุกระแสตรงยังมีหัวจ่าย CHAdeMO [15] ซึ่งพัฒนาโดยประเทศญี่ปุ่นสำหรับจ่ายประจุกระแสตรงให้กับรถยนต์ไฟฟ้าที่มาจากประเทศญี่ปุ่นเช่น Nissan Mitsubishi และยังมีหัวจ่ายแบบ Combined charging system (CCS) [14] ซึ่งสามารถจ่ายประจุได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบหัวจ่ายประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.1 หัวจ่ายประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ [16]

2.4 แบตเตอรี่ (Battery)

2.4.1 ชนิดของแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า

แบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้ามีหลายชนิดตามแต่ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น รถยนต์ไฟฟ้าประเภท BEV นิยมใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion) หรือ รถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดจ์นิยมใช้แบตเตอรี่นิโลหะนิกเกิลผสม (NiMH) [17]

2.4.2 คุณลักษณะของแบตเตอรี่ (Battery characteristic)

(1) ความจุของแบตเตอรี่ (Battery capacity, E_B) คือพลังงานในแบตเตอรี่มีหน่วยเป็น kWh

(2) Consumed energy E_C คือพลังงานที่ถูกใช้ไปในการเดินทาง

$$E_C = d \times \varepsilon \qquad (2.1)$$

d = ระยะทางที่รถยนต์วิ่งก่อนการอัดประจุ มีหน่วยเป็น mile

ε = energy consumption มีหน่วยเป็น kWh/mile

(3) State of charge (SOC) คือพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ก่อนที่จะอัดประจุ

$$SOC = \frac{E_B - E_C}{E_B} \times 100\% \qquad (2.2)$$

(4) Depth of discharge (DOD) คืออัตราส่วนพลังงานที่สามารถนำออกมาใช้ได้จากแบตเตอรี่ เช่น DOD 60% หมายความว่า โหลดสามารถใช้พลังงานได้ 60% ของความจุของแบตเตอรี่

(5) Require energy to charge E_R คือปริมาณพลังงานที่ต้องการใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่

$$E_R = \frac{\left(1 - \frac{SOC}{100}\right) \times E_B}{\eta} \quad (2.3)$$

η = ประสิทธิภาพของการอัดประจุ

(6) Charging duration คือระยะเวลาในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

$$D = \frac{E_R}{P} \quad (2.4)$$

P = กำลังของการอัดประจุ มีหน่วยเป็น kW

2.5 ผลกระทบที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

การเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าต้องการพลังงานไฟฟ้าปริมาณมากเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ให้พร้อมสำหรับการใช้งาน ผลกระทบที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ามีดังนี้

2.5.1 ความต้องการกำลังไฟฟ้า (Power demand)

เนื่องจากผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าหลังจากใช้งานรถเสร็จในแต่ละวัน หรือช่วงที่กลับถึงที่พักอาศัย ซึ่งเป็นเวลากลางคืนที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เมื่อมีโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มเข้าไปโดยไม่มีการควบคุมจึงสามารถทำให้กำลังไฟฟ้าในระบบไม่เพียงพอต่อผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นผลให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยความต้องการกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้า บทความ [1-3] ได้ศึกษาผลกระทบด้านความต้องการกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการอัดประจุรถยนต์โดยการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 โดยพิจารณาระดับการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าที่ระดับการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบในหนึ่งวันจะเพิ่มขึ้นตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.2 กำลังสูญเสียในระบบ (Power loss)

การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับ 1 เฟสเป็นที่นิยมในผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากความสะดวกในการใช้งาน สามารถอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าได้ที่บ้านเพียงต่อกับไฟบ้านเสมือนการอัดประจุของแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ ซึ่งเมื่อมีการอัดประจุรถไฟฟ้าเกิดขึ้นในแต่ละบ้านไม่พร้อมกัน เป็นผลทำให้เกิดความไม่สมดุลในระบบ ซึ่งความไม่สมดุลนี้ก่อให้เกิดกำลังสูญเสียในระบบ ยิ่งมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณรถยนต์ไฟฟ้ามีมากขึ้นกำลังสูญเสียในระบบยิ่งเพิ่มขึ้นตาม บทความ [1-4] ศึกษาผลกระทบด้านกำลังสูญเสียในระบบ โดยจะมีกำลังสูญเสียในระบบในช่วงที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูง (Peak load) มากกว่าช่วงที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ (Off-peak) และกำลังการสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามระดับการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ

2.5.3 แรงดันเปลี่ยนแปลง (Voltage variations)

การเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้ากับระบบเพื่ออัดประจุนั้นเสมือนการเพิ่มโหลดในตำแหน่งนั้นในระบบ ซึ่งหากมีการเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้าในหนึ่งตำแหน่งมากจะสามารถทำให้เกิดแรงดันตกเนื่องจากมีโหลดที่มากขึ้นได้ บทความ [1-3, 5] ศึกษาแรงดันเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับระดับที่ 1 และกระแสสลับระดับที่ 2 ในระบบแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำ ผลการศึกษาพบว่าเกิดแรงดันตกที่บัสที่มีการเชื่อมต่อรถยนต์ทั้งในระบบแรงดันปานกลางและระบบแรงดันต่ำ แต่ในระบบแรงดันปานกลางขนาดแรงดันตกยังไม่เกินมาตรฐาน แต่ในระบบแรงดันต่ำนั้นขนาดแรงดันตกมีค่าเกินกว่ามาตรฐาน บทความ [6] ศึกษาแรงดันเปลี่ยนแปลงจากสถานีอัดประจุกระแสตรงเมื่อมีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุ 1 คันต่อหนึ่งสถานี ผลการศึกษาพบว่าเกิดแรงดันตกเมื่อมีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า แต่ขนาดของแรงดันตกไม่เกินค่ามาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

3.1 การจำแนกประเภทของคุณภาพไฟฟ้า

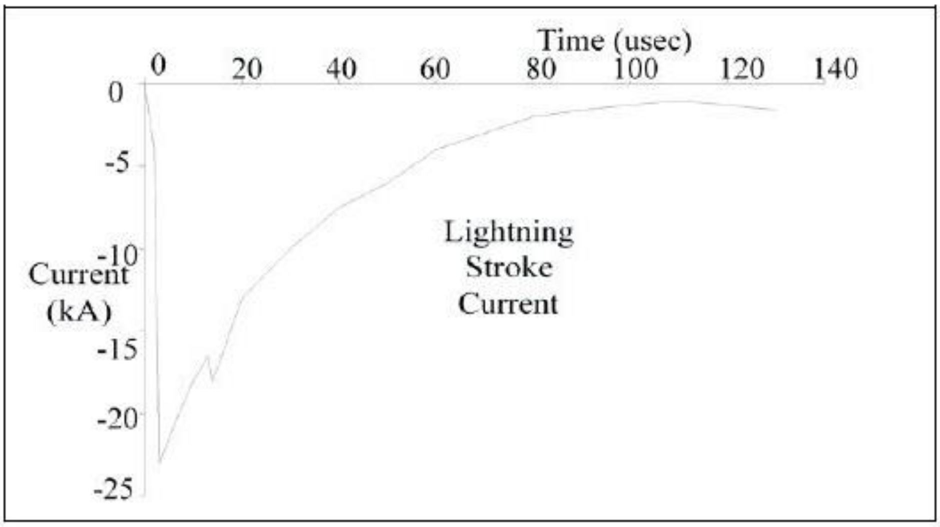
มาตรฐาน IEEE 1159 [18] จำแนกคุณภาพไฟฟ้าเป็น 7 ประเภทดังนี้

(1) ภาวะชั่วครู่ (Transient)

คือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในเวลาทันทีทันใด แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ impulsive transient และ oscillatory transient

(1.1) อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive transient)

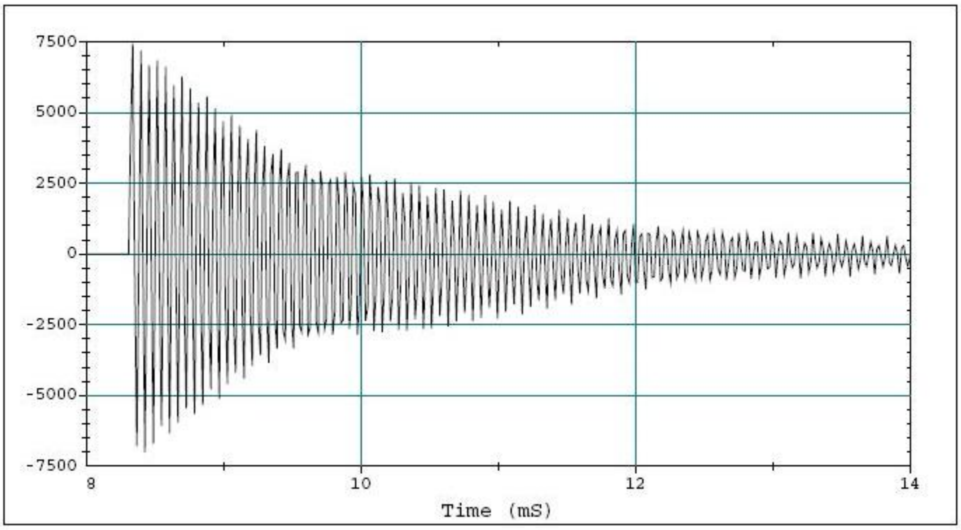
คือการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดขอกระแสหรือแรงดันโดยไม่เปลี่ยนแปลงความถี่มีขั้วทิศทางเดียว มีสาเหตุหลักเกิดจากฟ้าผ่า กระแสอิมพัลส์ชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่าแสดงดังรูปที่ 3.1



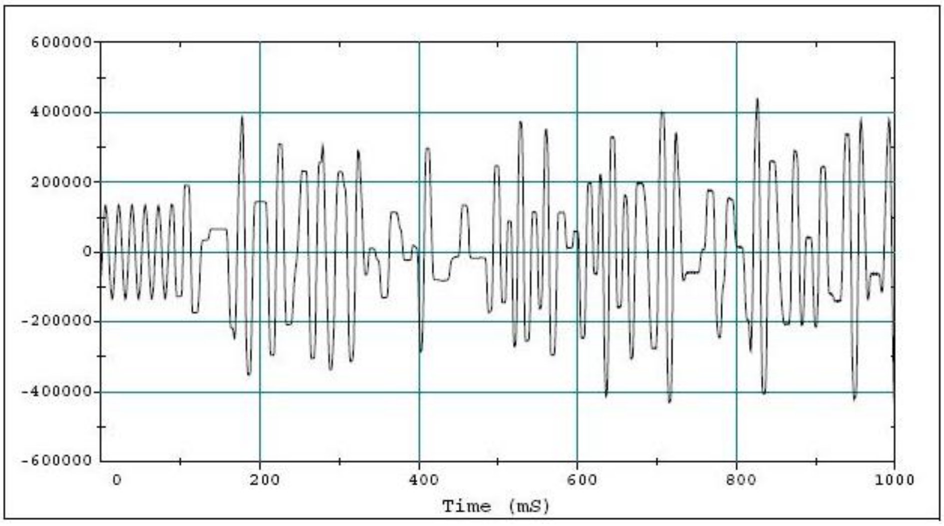
รูปที่ 3.1 กระแสอิมพัลส์ชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่า

(1.2) ออสซิลเลเตอร์ชั่วครู่ (Oscillatory transient)

คือการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดขอกระแสหรือแรงดัน ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง มีขั้วได้ทั้งสองทิศคือบวกหรือลบ สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อย ได้แก่ ความถี่สูง ความถี่กลาง และ ความถี่ต่ำ มีสาเหตุการสวิตชิ่งของอุปกรณ์ในระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบได้รับความเสียหาย กระแสและแรงดันออสซิลเลเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.2-3.3



รูปที่ 3.2 กระแสออสซิลเลเตอร์ที่เกิดจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุแบบ back-to-back



รูปที่ 3.3 กระแสออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำที่เกิดจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไร้โหลด

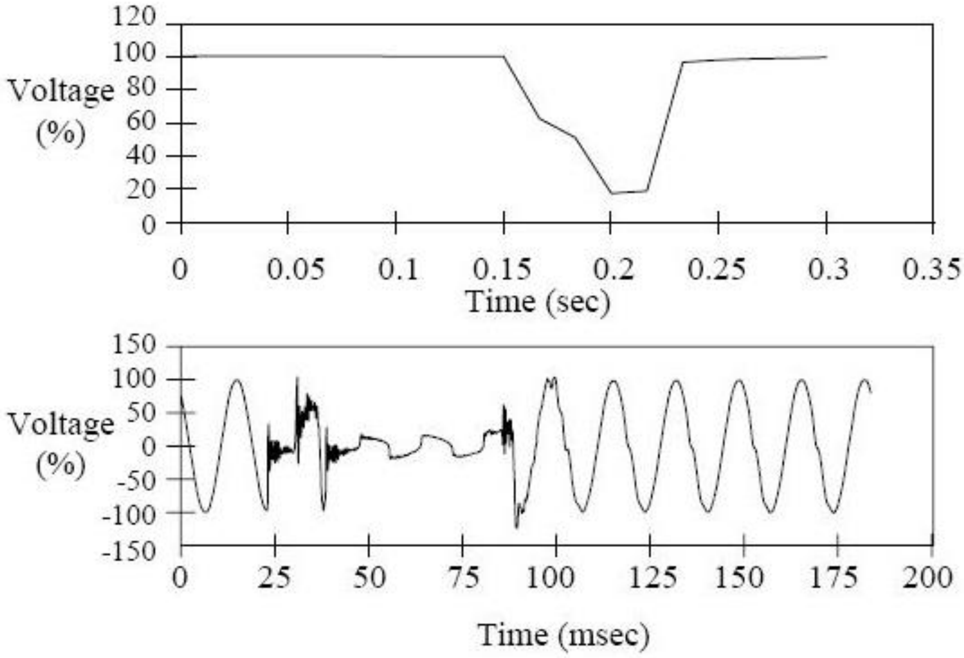
(2) การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะเวลาสั้น (Short duration variations)

คือการการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน rms ในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที โดยมีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากความผิดพร่องของระบบ (fault) เป็นผลทำให้เกิด แรงดันตกชั่วขณะ (voltage sag/dip) แรงดันเกินชั่วขณะ (voltage swell) และ ไฟดับชั่วขณะ (interruption) สามารถแบ่งระยะเวลาที่เกิดได้คือ ทันทีทันใด (instantaneous) ชั่วขณะ (momentary) และชั่วครู่ (temporary)

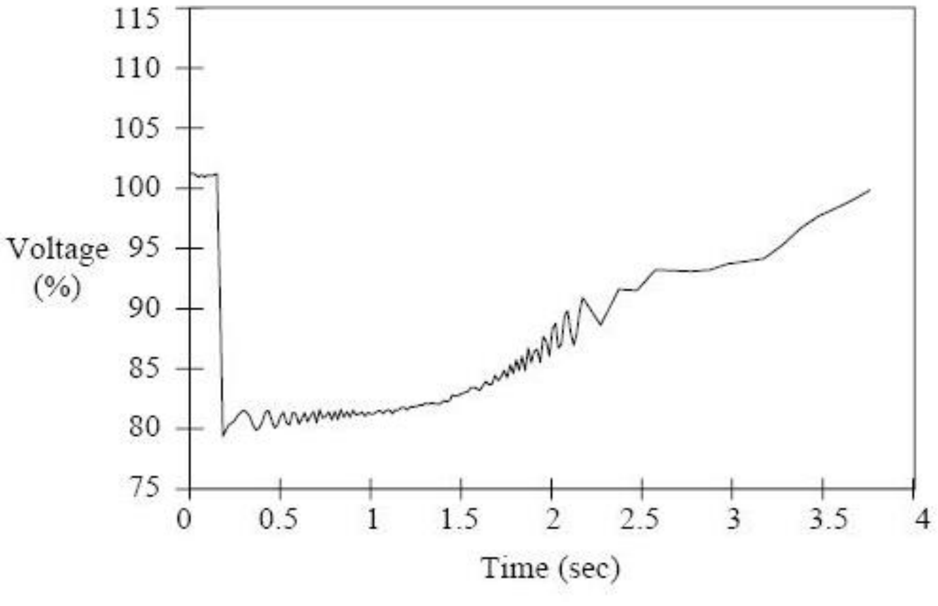
(2.1) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag/dip)

คือการลดลงของแรงดัน rms ตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u. ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 0.5 cycle ถึง 1 นาที แรงดันตกส่วนใหญ่เกิดการความผิดพร่องของระบบ รูปที่ 3.4 แสดงแรงดันตก 20% ที่เกิดจากความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลงดิน หรือหมายถึงแรงดันคงเหลือ 0.2

p.u. นอกจากนั้นยังสามารถเกิดจากการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้ากับระบบ และการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ รูปที่ 3.5 แสดงแรงดันตกที่เกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่



รูปที่ 3.4 แรงดันตกที่เกิดจากความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลงดิน

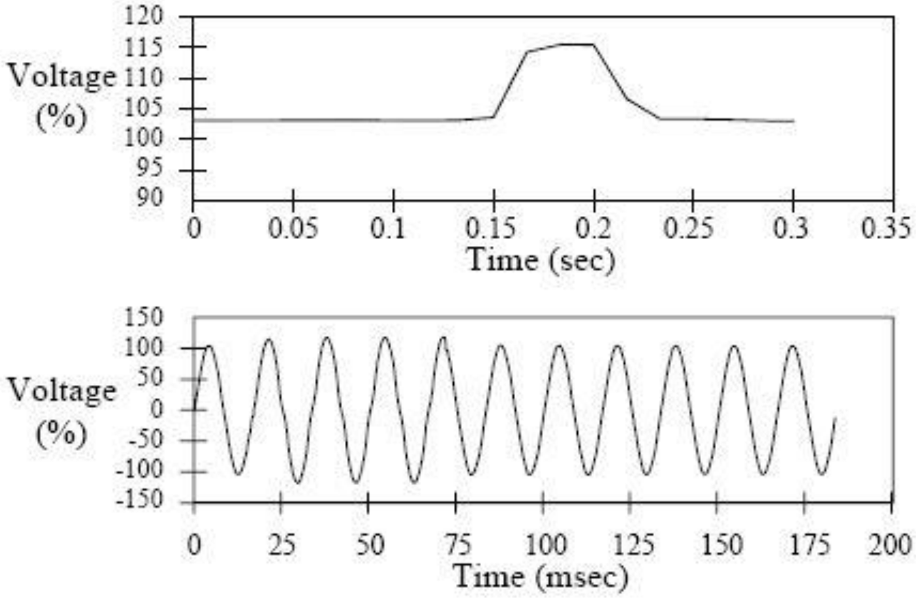


รูปที่ 3.5 แรงดันตกที่เกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่

(2.2) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage swell)

คือการเพิ่มขึ้นของแรงดัน rms มากกว่า 1.1 p.u. ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 0.5 cycle ถึง 1 นาที ขนาดของแรงดันเกิดคือค่าของแรงดันที่คงอยู่ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 1 p.u.

เสมอ เช่นเดียวกับแรงดันตกแรงดันเกินเกิดการความผิดพร่องของระบบแต่มีโอกาสเกิดน้อยกว่าแรงดันตก นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่โหลดขนาดใหญ่ถูกตัดออกจากระบบ รูปที่ 3.6 แสดงแรงดันเกินที่เกิดจากความผิดพร่องชนิด 1 เฟสลงดิน

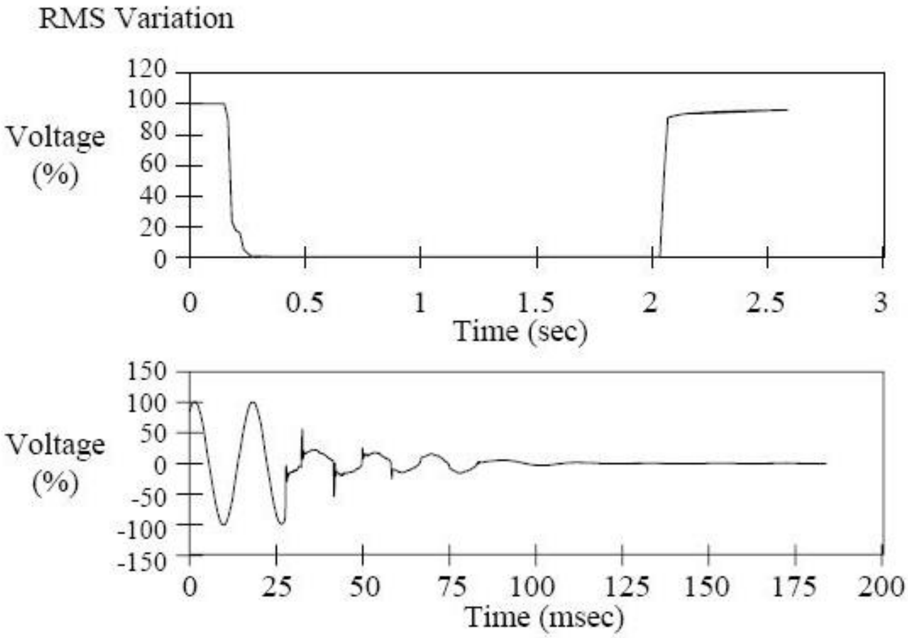


รูปที่ 3.6 แรงดันเกินที่เกิดจากความผิดพร่องชนิด 1 เฟสลงดิน

(2.3) ไฟดับชั่วขณะ (Interruption)

คือการที่ค่าแรงดัน rms ลดลงต่ำกว่า 0.1 p.u. ในช่วงเวลาไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากความผิดพร่องของระบบหรืออุปกรณ์ทำงานผิดพลาด ไฟดับบางครั้งเกิดขึ้นหลังจากแรงดันตกช่วงหลังจากเกิดความผิดพร่องและก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน รูปที่ 3.7 แสดงไฟดับช่วงสั้นที่เกิดจากความผิดพร่องและ recloser ทำงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.7 ไฟดับช่วงสั้นที่เกิดจากความผิดพร่องและ recloser ทำงาน

(3) การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะเวลายาว (Long duration variations)

คือการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน rms ในช่วงระยะเวลามากกว่า 1 นาที สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดในระบบ ไม่ได้เกิดจากความผิดพร่อง เป็นผลทำให้เกิด แรงตก (Under voltage) แรงดันเกิน (Overvoltage) และไฟดับระยะยาว (Sustained interruption)

(3.1) แรงดันตก (Under voltage)

คือค่าแรงดัน rms ลดลงต่ำกว่า 0.9 p.u. เป็นเวลานานเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้ากับระบบ หรือการปลด capacitor bank ออกจากระบบ และการมีโหลดมากเกิน (overload) เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดแรงดันตกได้

(3.2) แรงดันเกิน (Overvoltage)

คือค่าแรงดัน rms มากกว่า 1.1 p.u. เป็นเวลานานเกิน 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากการปลดโหลดออกจากระบบ การต่อ capacitor bang เข้ากับระบบ และการปรับแทปหม้อแปลงที่ไม่เหมาะสมเป็นผลทำให้เกิดแรงดันเกินได้เช่นกัน

(3.3) ไฟดับระยะยาว (Sustained interruption)

คือค่าแรงดัน rms ต่ำกว่า 0.1 p.u. เป็นเวลานานเกิน 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากความผิดพร่องของระบบทำให้อุปกรณ์ป้องกันตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกจากระบบถาวร

(4) แรงดันไม่สมดุล (Voltage imbalances)

คือขาดแรงดันของระบบ 3 เฟสมีค่าต่างกัน หรือมีมุมเปลี่ยนไฟจาก 120 องศา กำหนดได้จากอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบลำดับศูนย์ (zero sequence) หรือ องค์ประกอบลำดับลบ (negative sequence) ต่อองค์ประกอบลำดับบวก (positive sequence)

(5) ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform distortions)

คือการเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่กำลังไฟฟ้า แบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด

(5.1) องค์ประกอบไฟตรง (DC-offset)

คือการที่มีแรงดันหรือกระแสไฟตรงผสมอยู่ในไฟสลับ ปรากฏการณ์นี้เกิดจากผลของ geomagnetic disturbance หรือเกิดจากผลของอุปกรณ์เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น เป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการอิ่มตัวและความร้อนของหม้อแปลง และเกิดความตึงเครียดของฉนวน

(5.2) ฮาร์มอนิก (Harmonics)

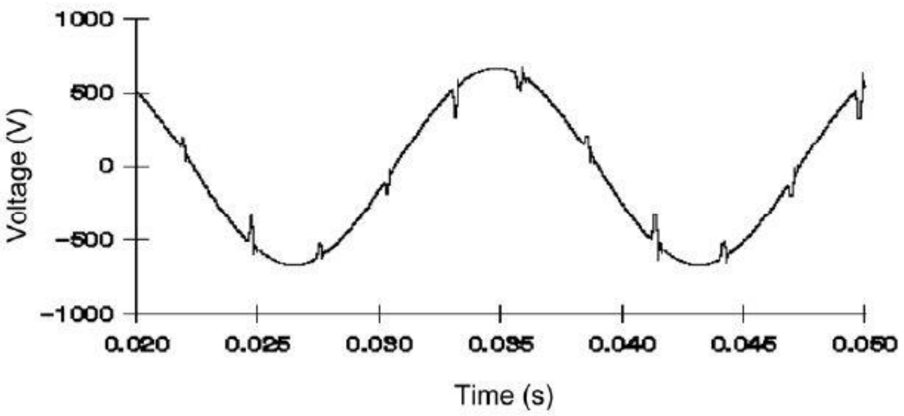
คือแรงดันหรือกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) รวมกับแรงดันหรือกระแสที่ความถี่มูลฐานทำให้มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นเกิดขึ้น ฮาร์มอนิกเกิดจากอุปกรณ์หรือโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ power-electronic เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

(5.3) อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonics)

คือแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน อินเตอร์ฮาร์มอนิกมีสาเหตุหลักเกิดจาก static frequency converter, cycloconverter, induction furnace , arcing device

(5.4) คลื่นรอยบาก (Notching)

คือการรบกวนแรงดันแบบรายคาบเกิดจากการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง รูปที่ 3.8 แสดงคลื่นรอยบากที่เกิดจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์



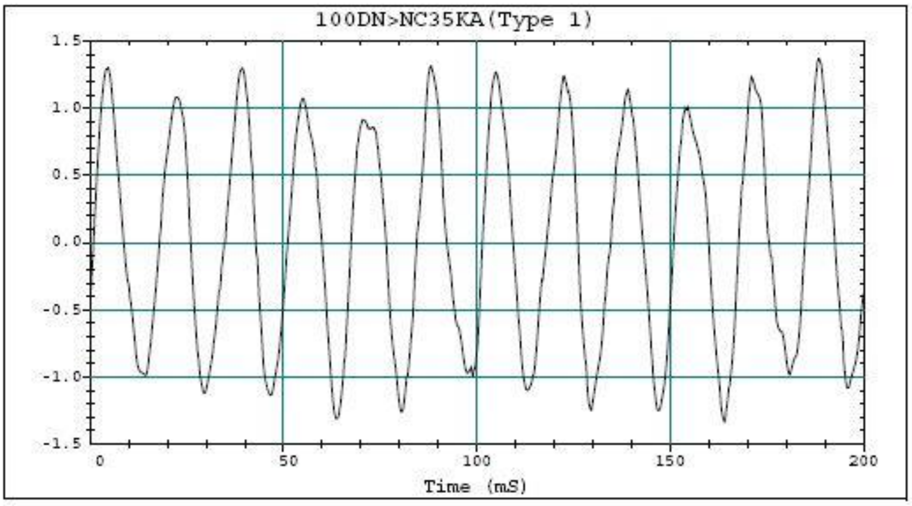
รูปที่ 3.8 คลื่นรอยบากที่เกิดจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

(5.5) สัญญาณรบกวน (Noise)

คือสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ต้องการส่วนมากมีความถี่ต่ำกว่า 200 kHz เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรควบคุม และ ผลจากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

(6) แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuations)

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน rms อย่างต่อเนื่องมีขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.95-1.05 p.u. แรงดันมีสาเหตุมาจากโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา หรือเกิดจากเตาหลอม (arc furnace) กระเพื่อมสามารถรับรู้ได้จากการเกิดไฟกระพริบของหลอดไฟ (flicker) รูปที่ 3.9 แสดงแรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากเตาหลอม



รูปที่ 3.9 แรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากเตาหลอม

(7) การเปลี่ยนแปลงความถี่กำลังไฟฟ้า (Power frequency variations)

คือการเปลี่ยนแปลงความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้ากำลังจากปกติ 50Hz หรือ 60Hz เกิดจากการทำงานผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่

คุณภาพไฟฟ้าทั้ง 7 ชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ประเภทและคุณลักษณะของคุณภาพไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1. Transient			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1μs rise	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Nanosecond	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 p.u.
1.2.2 Microsecond	5 - 500 kHz	20 μs	0 - 8 p.u.
1.2.3 Millisecond	0.5 - 5 MHz	5 μs	0 - 4 p.u.
2. Short duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5 - 30 cycles	0.1 - 0.9 p.u.
2.1.2 Swell		0.5 - 30 cycles	1.1 - 1.8 p.u.
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles - 3 s	< 0.1 p.u.
2.2.2 Sag		30 cycles - 3 s	0.1 - 0.9 p.u.
2.2.3 Swell		31 cycles - 3 s	1.1 - 1.4 p.u.

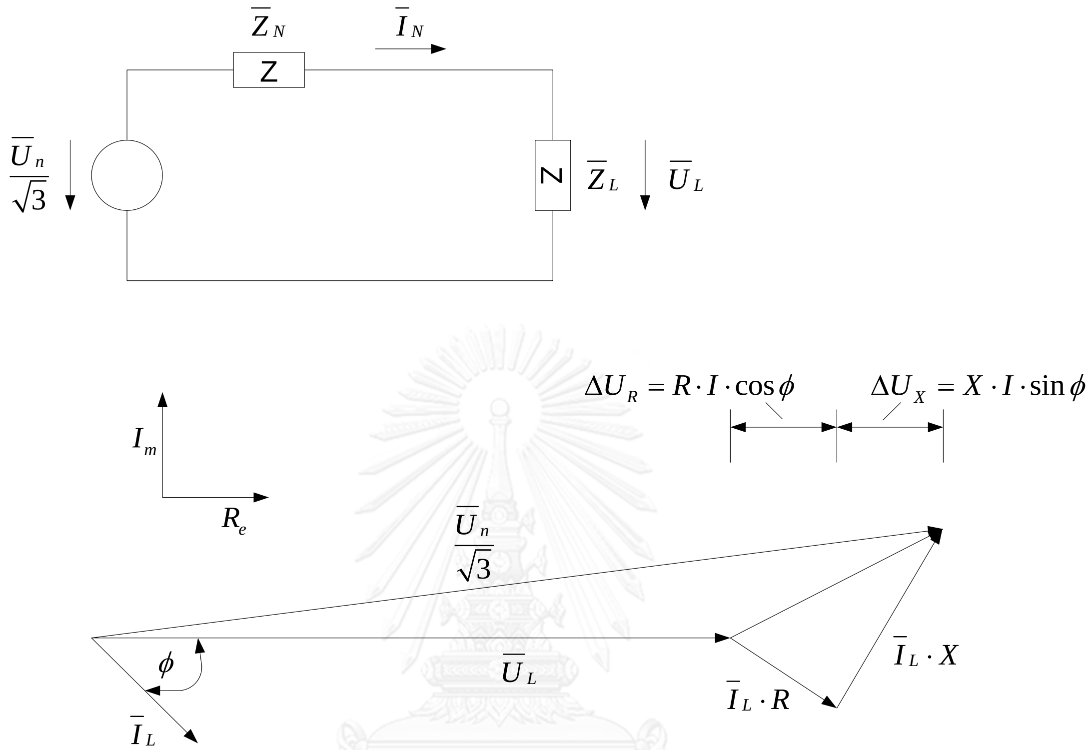
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		> 3 s - 1 min	< 0.1 p.u.
2.3.2 Sag		> 3 s - 1 min	0.1 - 0.9 p.u.
2.3.3 Swell		> 3 s - 1 min	1.1 - 1.2 p.u.
3. Long duration variations			
3.1 Interruption		> 1 min	0.0 p.u.
3.2 Under voltage		> 1 min	0.8 - 0.9 p.u.
3.3 Overvoltage		> 1 min	1.1 - 1.2 p.u.
4. Imbalance			
4.1 Voltage		steady state	0.5 - 2 %
4.2 Current		steady state	1.0 - 30 %
5. Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0 - 0.1 %
5.2 Harmonics	0 - 9 Hz	steady state	0 - 20 %
5.3 Inter harmonics	0 - 9 Hz	steady state	0 - 2 %
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broadband	steady state	0 - 1 %
6. Voltage fluctuation	< 25 Hz	intermittent	0.1 - 7 %
7. Power frequency variations		< 10 s	± 0.1 Hz

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน

การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเกิดจากแรงดันตกในอิมพีแดนซ์ของระบบ แรงดันตกในระบบ 3 เฟส สมดุล แสดงในรูปที่ 3.10 หาได้ดังนี้ [19]



รูปที่ 3.10 แรงดันตกในระบบ 3 เฟส โหลดสมดุล [19]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\Delta\overline{U} = \Delta\overline{I}_L \times \overline{Z}_N \tag{3.1}$$

หรือ
$$\Delta U = \Delta U_R + \Delta U_X = \left(R\cos\phi + X\sin\phi\right)\Delta I_L \tag{3.2}$$

เมื่อ ΔU คือ ขนาดของแรงดันตกที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากโหลด (คิดโดยประมาณ)

ΔI_L คือ ขนาดของกระแสโหลดที่เปลี่ยนแปลง

กำลังงานลัดวงจร (S_{SC}) ณ จุดต่อโหลดหาได้จาก

$$S_{SC} = \sqrt{3} \times U_n \times I_{SC} \tag{3.3}$$

หรือ
$$S_{SC} = \frac{U_n^2}{Z_N} \tag{3.4}$$

เมื่อ U_n คือ แรงดันที่ระบุชองระบบ

Z_N คือ อิมพีแดนซ์ของระบบ

กระแสโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔI_L) สามารถหาได้จากขนาดของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔS)

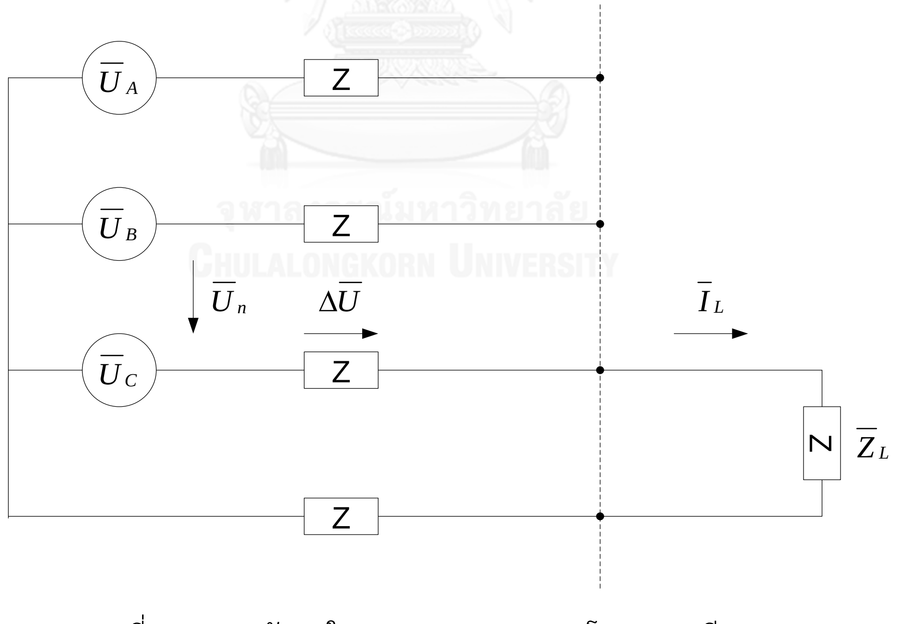
$$\Delta I_L = \frac{\Delta S}{\sqrt{3}U_L} \cong \frac{\Delta S}{\sqrt{3}U_n} \tag{3.5}$$

ΔI_L นี้เป็นการหาค่าโดยประมาณโดยตั้งเงื่อนไขว่า แรงดันตกมีค่าน้อย ดังนั้น

$$\Delta U = \Delta I_L \times Z_N = \frac{\Delta S}{\sqrt{3}U_n} \times \frac{U_n^2}{S_{SC}} = \frac{\Delta S}{S_{SC}} \times \frac{U_n}{\sqrt{3}} \tag{3.6}$$

$$\%\Delta U = \frac{\Delta S}{S_{SC}} \times 100 \tag{3.7}$$

ในกรณีระบบ 3 เฟส 4 สาย และต่อโหลดเฟสเดียวดังรูปที่ 3.6 สามารถวิเคราะห์หาแรงดันตกได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 แรงดันตกในระบบ 3 เฟส 4 สาย โหลดเฟสเดียว [19]

กำลังงานลัดวงจร (S_{SC}) ณ จุดต่อโหลดหาได้จาก

$$S_{SC} = \sqrt{3} \times U_n \times I_{SC}$$

หรือ $$S_{SC} = \frac{U_n^2}{Z_N}$$

กระแสโหลดและกำลังของโหลดหาจาก

$$I_L = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{Z_1} \cong \frac{U_n}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{Z_1} \quad (3.8)$$

$$S = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \times I_L \cong \frac{U_n}{\sqrt{3}} \times I_L \quad (3.9)$$

ขนาดแรงดันที่เปลี่ยนไปหาได้จาก

$$\Delta U = I_L \times 2Z_N$$

$$= \Delta S \times \frac{\sqrt{3}}{U_n} \times 2 \times \frac{U_n^2}{S_{SC}}$$

$$= \frac{\Delta S}{S_{SC}} \times 2\sqrt{3}U_n \quad (3.10)$$

$$\%\Delta U = \frac{\Delta U}{U_n / \sqrt{3}} \times 100 = \frac{\Delta S}{S_{SC}} \times 6 \times 100 \quad (3.11)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 ดัชนีที่ใช้ในการประเมินแรงดันเปลี่ยนแปลง

3.3.1 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย (Average voltage drop index)

คือค่าดัชนีที่คำนวณมาจากแรงดันของทุกบัสในและทุกเวลาที่ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ค่าดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเกิดแรงดันตกเกินกว่าเกณฑ์ที่จะสามารถยอมรับได้ โดยในการศึกษานี้กำหนดให้เกณฑ์ที่ยอมรับได้คือแรงดันตกไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันฐาน หรือค่าดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 ถึงจะอยู่ในค่าที่สามามารถยอมรับได้ ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ตามสมการ [20]

$$AvgV_{index} = \frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|V_{ref} - V_{t,i}\right|}{V_{ref}}}{T \times N} \quad (3.12)$$

โดย V_{ref} คือ แรงดันฐาน

$V_{t,i}$ คือ แรงดันที่บัส i ณ เวลา t

T คือ จำนวนเวลาทั้งหมดที่คำนวณ

N คือ จำนวนบัสทั้งหมด

3.3.2 ดัชนีแรงดันตกสูงสุด (maximum voltage drop index)

คือค่าดัชนีที่มาจากแรงดันของทุกบัสในและทุกเวลาที่ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ค่าดัชนีแรงดันตกสูงสุดนี้แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันตกที่สูงที่สุดในการคำนวณทั้งหมด โดยในการศึกษานี้กำหนดให้เกณฑ์ที่ยอมรับได้คือแรงดันตกไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันฐาน หรือค่าดัชนีแรงดันตกสูงสุดต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 ถึงจะอยู่ในค่าที่สามามารถยอมรับได้ ดัชนีแรงดันตกสูงสุดสามารถคำนวณได้ตามสมการ [20]

$$MaxV_{index} = Max\left(\frac{\left|V_{ref} - V_{t,i}\right|}{V_{ref}}\right) \tag{3.13}$$

โดย V_{ref} คือ แรงดันฐาน

$V_{t,i}$ คือ แรงดันที่บัส i ณ เวลา t

T คือ จำนวนเวลาทั้งหมดที่คำนวณ

3.4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

เนื่องจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าต้องเชื่อมต่อไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ จึงต้องอยู่ในขอบเขตของข้อกำหนดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ทั้งนี้จะกล่าวถึงเฉพาะปริมาณกำลังไฟฟ้าที่รับจากระบบ และ การควบคุมระดับแรงดันเท่านั้น ทั้งนี้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นข้อกำหนดว่าด้วยการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผู้ประกอบกิจการไฟฟ้ารายอื่น ไม่ได้เป็นข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าโดยเฉพาะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.1 ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558 [21]

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะหัวข้อการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ผู้ขอใช้บริการต้องควบคุมระดับแรงดัน ให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวงในแต่ละกรณี ดังตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง กรณีผู้ขอใช้บริการไม่จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ [21]

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 กิโลโวลต์	117.6	106.4	123.0	96
69 กิโลโวลต์	70.4	63.6	72.5	57.3
24 กิโลโวลต์	23.6	21.8	24	21.6
12 กิโลโวลต์	11.8	10.9	12.0	10.8
400 โวลต์	410	371	416	362
230 โวลต์	237	214	240	209

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง กรณีผู้ขอใช้บริการจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ [21]

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 กิโลโวลต์	118.0	113.0	123.0	113.0
69 กิโลโวลต์	71.0	67.0	72.5	67.0
24 กิโลโวลต์	23.6	21.8	24	21.6
12 กิโลโวลต์	11.8	10.9	12.0	10.8
400 โวลต์	410	371	416	362
230 โวลต์	237	214	240	209

3.4.2 ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [22]

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะหัวข้อการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ผู้ขอใช้บริการต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดัน เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าภูมิภาค ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [22]

ระดับแรงดัน	**ภาวะปกติ**		**ภาวะฉุกเฉิน**	
	ค่าสูงสุด	**ค่าต่ำสุด**	**ค่าสูงสุด**	**ค่าต่ำสุด**
115 กิโลโวลต์	120.7	109.2	126.5	103.5
33 กิโลโวลต์	34.7	31.3	36.3	29.7
22 กิโลโวลต์	23.1	20.9	24.2	19.8
380 โวลต์	418	342	418	342
220 โวลต์	240	200	240	200

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
การทดสอบ

4.1 การจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า (EV charging characteristic)

4.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

ข้อมูลที่แสดงต่อไปนี้ เป็นตัวแปรควบคุมของการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณพลังงานที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ไป SOC ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า และคำนวณหาระยะเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ในการอัดประจุ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลคุณลักษณะของแบตเตอรี่ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2

(1) ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า

ในการทดสอบนี้จะใช้รถยนต์ไฟฟ้า 2 ประเภทในการทดสอบ คือ

(1.1) รถยนต์ไฟฟ้าประเภท BEV ขนาดแบตเตอรี่ 24 kWh

(1.2) รถยนต์ไฟฟ้าประเภท PHEV ขนาดแบตเตอรี่ 16 kWh

ตารางที่ 4.1 ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า [5]

Type	Electric range (mile)	Battery capacity (kWh)	Energy consumption (kWh/mile)
BEV	100	24	0.24
PHEV	40	16	0.36

(2) ระดับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

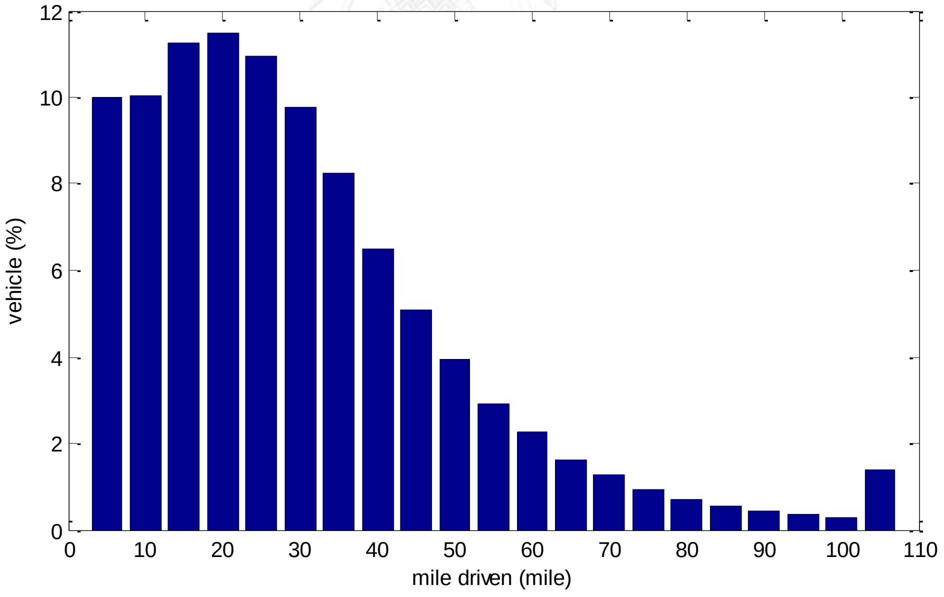
ในการทดสอบนี้กำหนดให้มีการอัดประจุ 3 ระดับ คือ กระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 และกระแสตรง โดยในการศึกษานี้กำหนดให้การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเป็นการอัดประจุแบบกำลังคงที่ตลอดการอัดประจุ (constant power) โดยระระดับการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ระดับการอัดประจุ [13]

Charging Level	Voltage	Max Current	Power
AC Level 1	240 V AC, 1-phase	12 A	1.44 kW
AC Level 2	240 V AC, 1-phase	30 A	7.2 kW
DC Level	500 V DC	80 A	50 kW

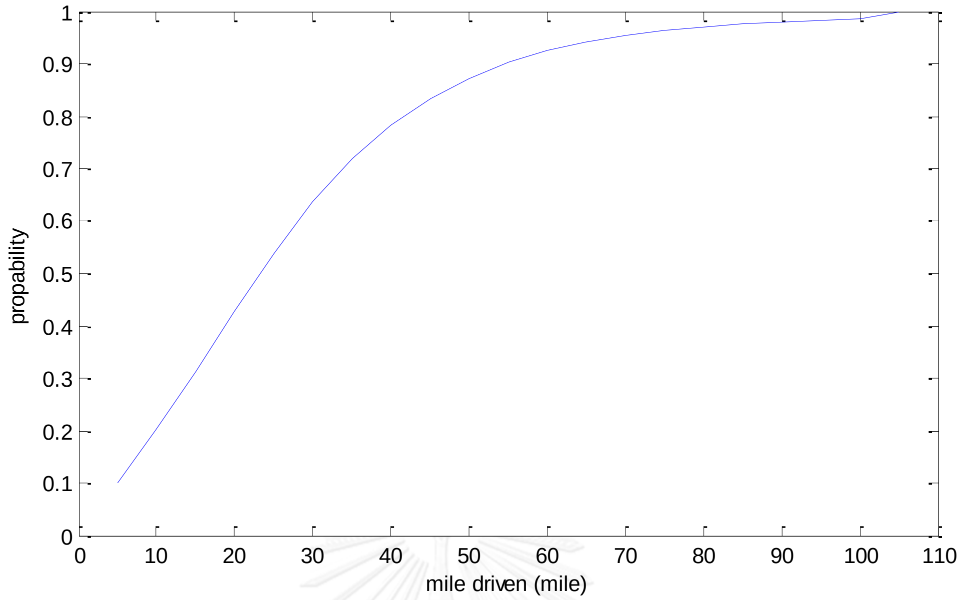
(3) ระยะทางที่รถใช้วิ่งก่อนการอัดประจุ

จากผลการสำรวจของ National Household Travel Survey (NHTS) 2009 [23] ข้อมูลการใช้รถยนต์ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการนำข้อมูลผลสำรวจระยะ ทางที่ผู้ใช้ยานพาหนะประเภทรถยนต์แต่ละคันใช้วิ่งในระยะเวลา 1 ปีของแต่ละผู้ใช้รถยนต์จากจำนวนผู้ใช้รถยนต์ทั้งหมด 150,000 ราย มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการใช้รถยนต์ใน 1 วัน แสดงระยะทางที่รถยนต์ใช้วิ่งเฉลี่ยใน 1 วันดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระยะทางที่รถยนต์ใช้วิ่งใน 1 วัน

เมื่อนำความถี่ของระยะทางที่รถวิ่งได้ในแต่ละช่วงระยะทางมาสร้าง Cumulative probability density function ของระยะทางที่รถใช้วิ่งใน 1 วันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 cdf ของระยะทางที่รถยนต์ใช้วิ่งใน 1 วัน

4.1.2 ขั้นตอนการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า ระดับการอัดประจุ และ ระยะทางที่ใช้

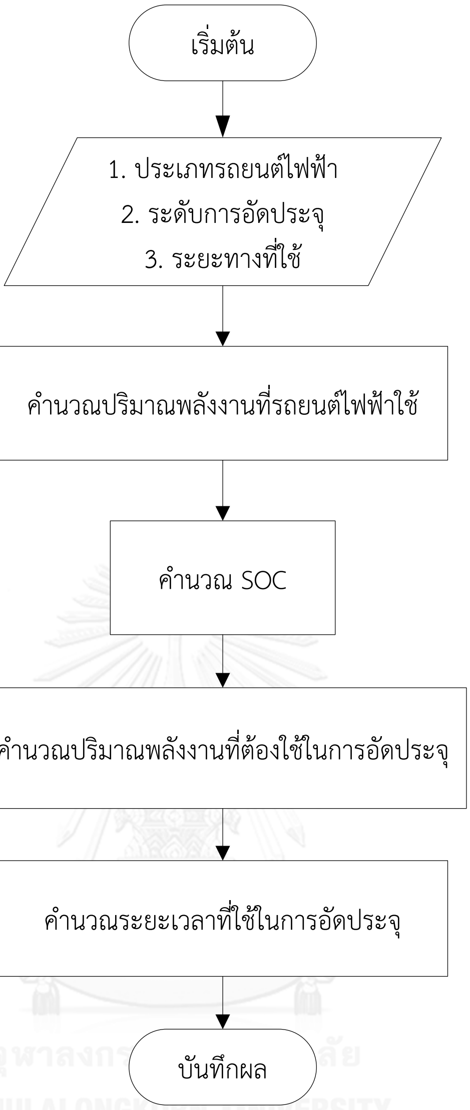
ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณปริมาณพลังงานที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ไป (E_C) ตามสมการ (2.1)

ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณ State of charge (SOC) ตามสมการ (2.2)

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการอัดประจุ (E_R) ตามสมการ (2.3)

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณระยะเวลาในการอัดประจุ (D) ตามสมการ (2.4)

ขั้นตอนการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองคุณลักษณะของการอัดประจุไฟฟ้า

4.2 การวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลง

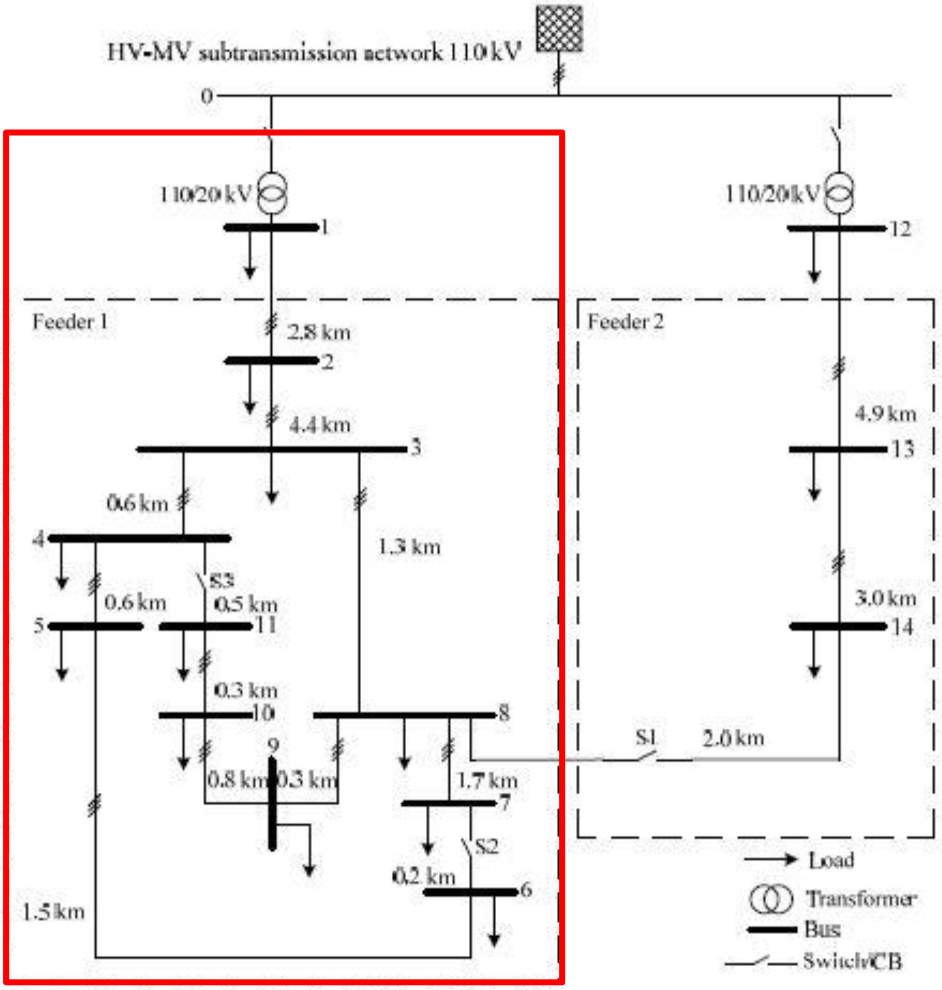
4.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลง

(1) ระบบทดสอบ

ในการวิเคราะห์แรงดันเปลี่ยนแปลงจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้านี้จะใช้ระบบทดสอบ 2 ระบบคือ ระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง และระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

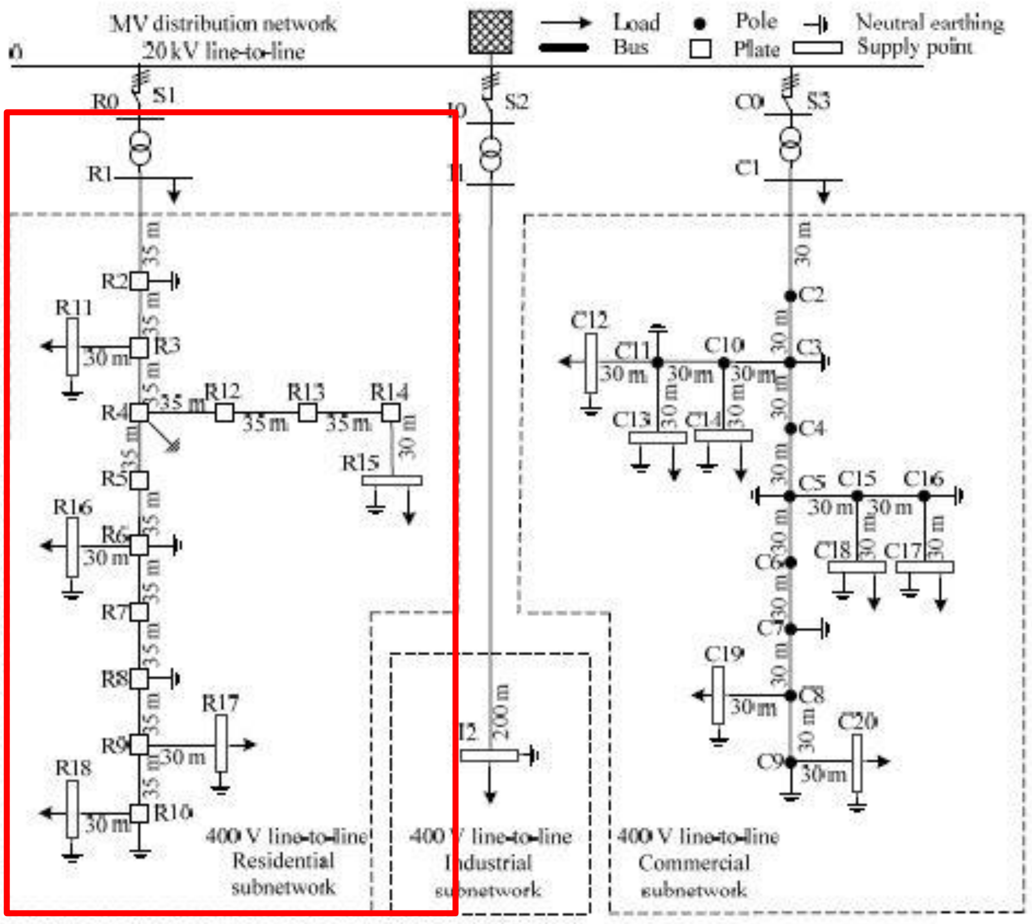
(1.1) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ดัดแปลงระบบจาก CIGRE Benchmark Systems Europe Medium Voltage [24] ระดับแรงดัน 20 กิโลโวลต์ซึ่งประกอบไปด้วยโหลดของผู้พักอาศัย และโหลดของกิจการร้านค้า โดยพิจารณาเฉพาะ

feeder 1 และกำหนดให้สวิตช์ทั้งหมดในระบบเปิดอยู่ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลางแสดงดังรูปที่ 4.4 [24]



รูปที่ 4.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง [24]

(1.2) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ดัดแปลงจากระบบ CIGRE Benchmark Europe Low Voltage [24] ระดับแรงดัน 400 โวลต์ โดยจะพิจารณาเฉพาะโหลดของผู้พักอาศัยและละเลยการต่อสายดินในระบบ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแสดงดังรูปที่ 4.5 [24]



รูปที่ 4.5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ [24]

(2) ข้อมูลคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า

ข้อมูลคุณลักษณะของการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากหัวข้อ 4.1

(3) Penetration level

เป็นอัตราส่วนของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อจำนวนโหลดทั้งหมดในระบบโดยกำหนดให้ มี 3 ระดับของการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้า คือมีรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาในระบบปริมาณ 10% 30% และ 50% ของจำนวนหลดทั้งหมดในระบบ หรือมีรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาจำนวน 9 27 และ 45 คันตามลำดับ

(4) ตำแหน่งเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้า

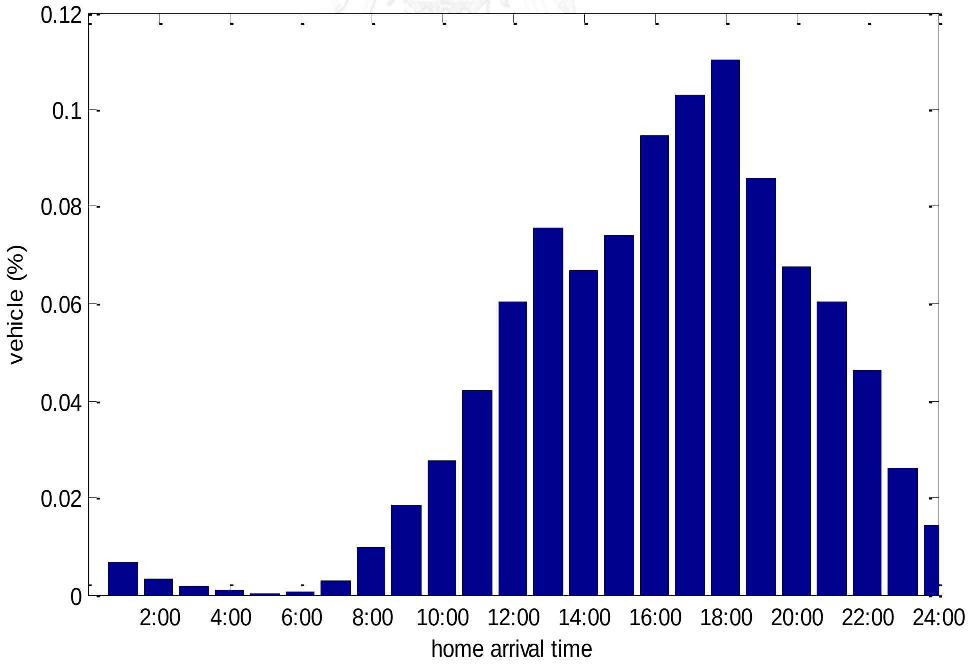
ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 1 เฟสกำหนดให้สามารถเชื่อมต่อการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 และระดับที่ 2 โดยรถยนต์ไฟฟ้าสามารถเชื่อต่อที่ปลายสายของระบบหรือบัสที่มีโหลดผู้พักอาศัยต่อ

อยู่ ทั้งหมดจำนวน 5 บัส คือตำแหน่งบัสที่ 11, 15, 16, 17 และ 18 โดยรถยนต์ไฟฟ้ามีการกระจายตัวในแต่ละบัสด้วยอัตราส่วนเท่าๆกัน และรถยนต์ไฟฟ้านั้นสามารถต่อกับเฟสใดก็ได้ในแต่ละบัสคือ เฟส A B และ เฟส C โดยการกระจายตัวของรถยนต์ไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีการกระจายในอัตราส่วนเท่ากันในทุกเฟส

สถานีอัดประจุกระแสตรงกำหนดให้มีความคล้ายคลึงกับสถานีบริการน้ำมัน ซึ่งจะต่อกับระบบแรงดันปานกลาง โดยกำหนดให้ในหนึ่งสถานีสามารถมีการอัดประจุรถยนต์ได้ไม่เกิน 8 คันต่อหนึ่งสถานี

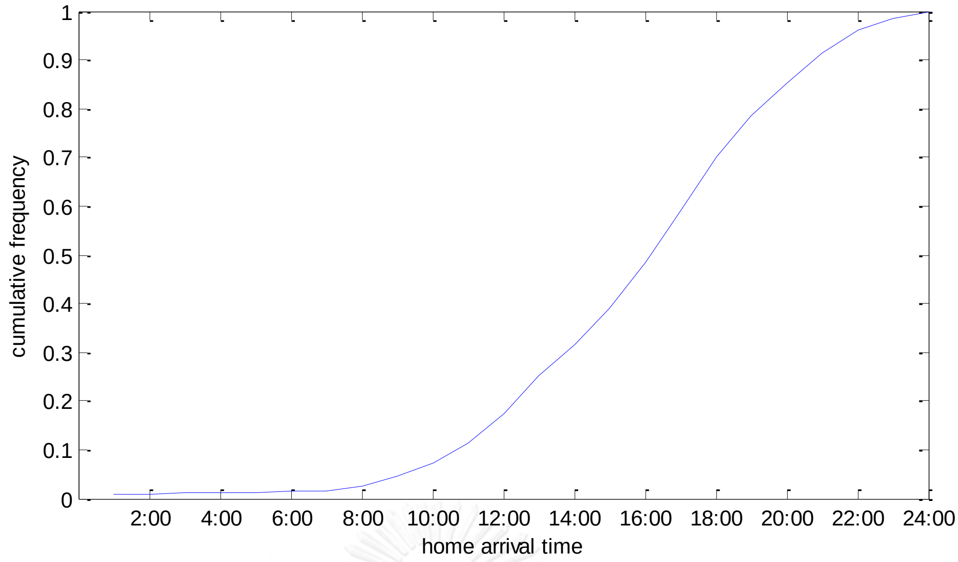
(5) เวลาเริ่มต้นการอัดประจุ

ในการศึกษานี้กำหนดให้เวลาที่เริ่มต้อนการอัดประจุเริ่มต้นเมื่อผู้ใช้รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พักอาศัย ซึ่งขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการใช้รถของผู้ใช้รถยนต์นั้นๆ โดยจากผลสำรวจของ National Household Travel Survey (NHTS) 2009 [23] ผลการสำรวจข้อมูลพฤติกรรมการใช้ยานพาหนะจากผู้ใช้รถยนต์จำนวน 150,000 ราย สามารถแสดงเวลาการกลับถึงที่พักของผู้ใช้รถยนต์ได้ดังรูปที่ 4.6



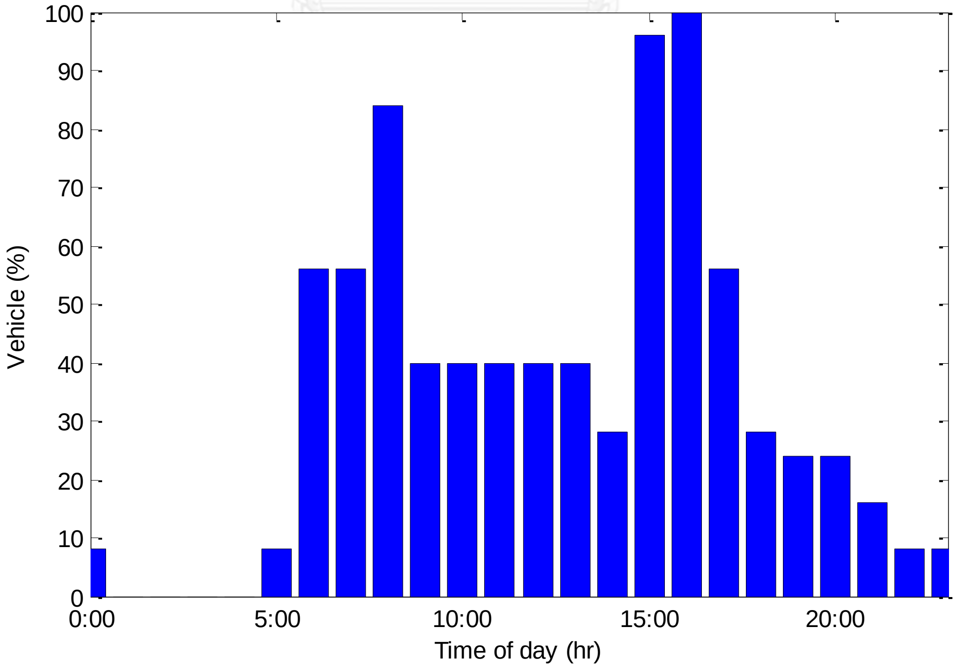
รูปที่ 4.6 เวลาที่รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พัก

เมื่อนำความถี่ของช่วงเวลาที่รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พักมาสร้าง Cumulative probability density function ของเวลาที่รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พัก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 cdf ของเวลาที่รถยนต์เดินทางกลับถึงที่พัก

เวลาเริ่มต้นการอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้าที่สถานีอัดประจุกระแสตรงนั้นกำหนดให้คล้ายคลึงกับช่วงเวลาที่รถยนต์เข้าเติมน้ำมันที่สถานีบริการน้ำมัน [25] ซึ่งรถยนต์ส่วนมากจะรับบริการอัดประจุที่ช่วงเวลาเช้าก่อนทำงาน และช่วงเวลาบ่ายหลังเลิกงาน โดยสามารถประมาณช่วงเวลาที่รถยนต์เข้าใช้บริการสถานีอัดประจุกระแสตรงได้ดังรูปที่ 4.7 [25]

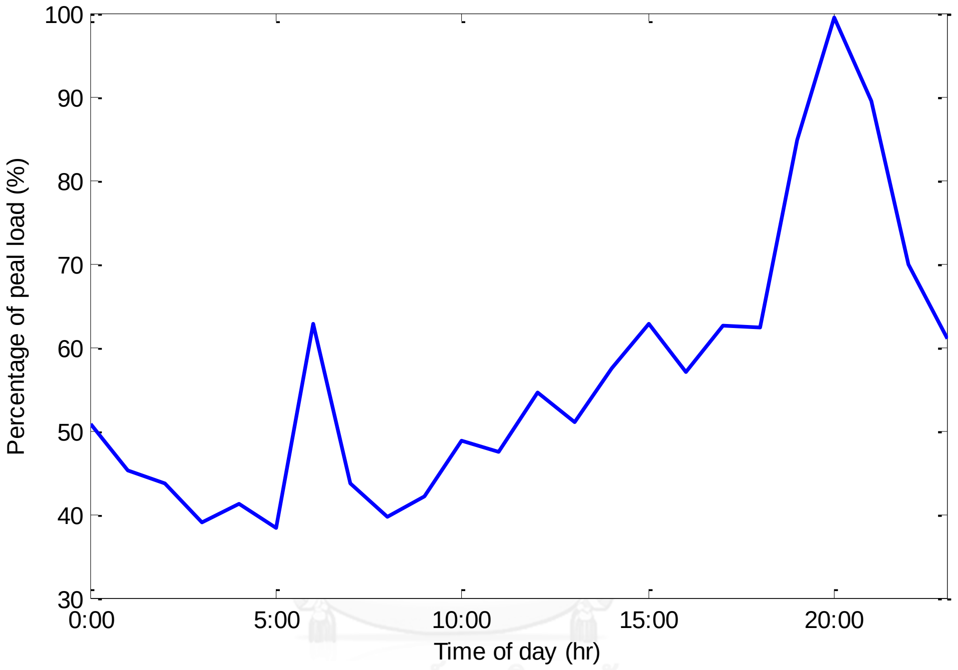


รูปที่ 4.8 ช่วงเวลาที่รถยนต์เข้าใช้บริการสถานีอัดประจุกระแสตรง [25]

(6) ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วัน

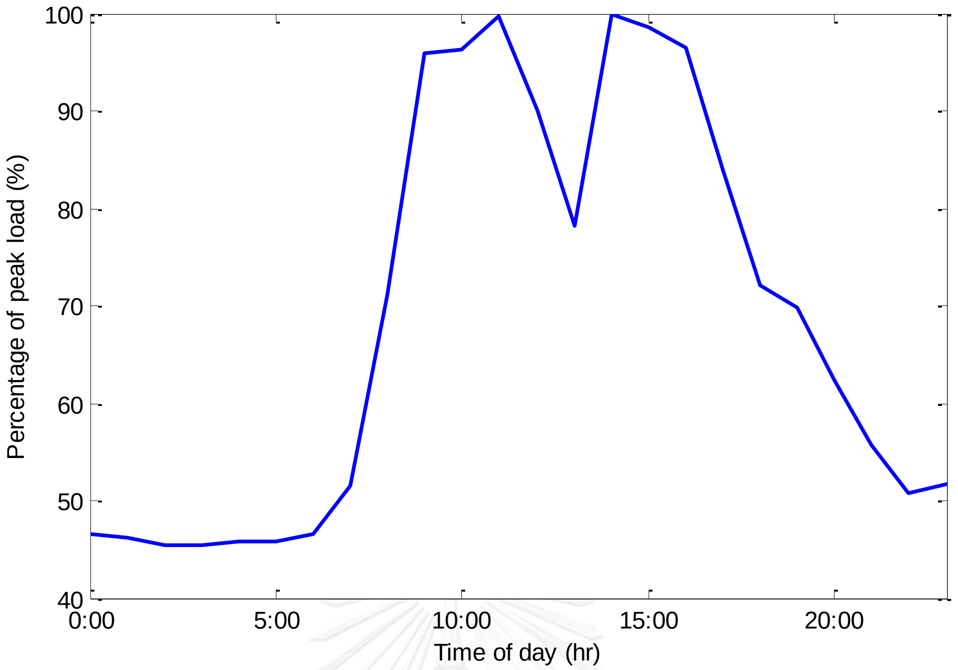
ในการทดสอบนี้จะพิจารณาความต้องการกำลังไฟฟ้า 2 แบบ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วันของโหลดผู้พักอาศัย และ ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วันของโหลดกิจการขนาดเล็ก

ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วันในวันธรรมดา (weekday) ของบ้านอยู่อาศัย >150 หน่วย/เดือน ข้อมูลจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [26] แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความต้องการไฟฟ้าใน 1 วันของบ้านอยู่อาศัย

ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วันในวันธรรมดา (weekday) ของกิจการขนาดเล็ก ข้อมูลจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [26] แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความต้องการกำลังไฟฟ้าใน 1 วันของกิจการขนาดเล็ก

(7) ดัชนีที่ใช้ในการประเมินแรงดัน

ในการประเมินแรงดันเปลี่ยนแปลงจะพิจารณาจากระดับแรงดันในแต่ละบัสกำหนดให้ช่วงแรงดันที่ยอมรับได้คือ มีแรงดันเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10% ของแรงดันฐาน หรือมีค่าแรงดันไม่ต่ำกว่า 0.9 p.u. โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันขณะไม่มีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า โดยพิจารณาขนาดแรงดันลำดับบวก (Positive Sequence Voltage) และขนาดแรงดันเฟส นอกจากนี้ยังมีดัชนีที่ใช้ในการประเมินคือ ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และ ดัชนีแรงดันตกสูงสุด ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.3

4.2.2 กรณีศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งกรณีศึกษาเป็น 3 กรณีได้ดังต่อไปนี้

(1) กรณีศึกษาที่ 1 : การอัดประจุแบบกระแสสลับ ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ในกรณีศึกษานี้จะพิจารณาเปรียบเทียบการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 และการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 2 และเปรียบเทียบรถยนต์ไฟฟ้าประเภท PHEV และ BEV ในระบบแรงดันต่ำโดยสามารถแบ่งเป็นกรณีศึกษาย่อยได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 กรณีศึกษาที่ 1 การอัดประจุแบบกระแสสลับในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

กรณีศึกษาย่อย	ระดับการอัดประจุ	ชนิดของรถยนต์ไฟฟ้า	จำนวนรถ (คัน)
1	AC level1	PHEV 16kWh	9
2			27
3			45
4		BEV 24kWh	9
5			27
6			45
7	AC level2	PHEV 16kWh	9
8			27
9			45
10		BEV 24kWh	9
11			27
12			45
13	AC level 1& AC level 2	PHEV&BEV	9
14			27
15			45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(2) กรณีศึกษาที่ 2 : พิจารณาเฉพาะสถานีอัดประจุกระแสตรง

ในกรณีศึกษานี้จะศึกษาแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 1 สถานี เข้ามาในระบบแรงดันปานกลาง โดยสถานีอัดประจุกระแสตรงนี้จะประกอบไฟด้วย หัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 50 kW จำนวน 8 หัวจ่าย

(3) กรณีศึกษาที่ 3 : พิจารณาการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 และสถานีอัดประจุกระแสตรง

ในกรณีศึกษานี้จะศึกษาระบบแรงดันปานกลางที่มีสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าและมีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุกระแสสลับทั้งระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ร่วมด้วย โดยสามารถแบ่งเป็นกรณีศึกษาย่อยได้ตามตาราง

ตารางที่ 4.4 กรณีศึกษาที่ 3 พิจารณาการอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1 กระแสสลับระดับที่ 2 และสถานีอัดประจุกระแสตรง

กรณีศึกษาย่อย	ระดับการอัดประจุ	ชนิดของรถยนต์ไฟฟ้า	จำนวนรถ (คัน)
1	AC level 1&		9
2	AC level 2 &	PHEV&BEV	27
3	DC station		45

4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบนี้กำหนดให้แต่ละกรณีย่อยทำการทดสอบทั้งหมดจำนวน 365 รอบ หรือเทียงเท่ากับการจำลองเหตุการณ์ทั้งหมดใน 1 ปี และกำหนดให้การสุ่มตัวแปรต่างๆมีการแจกแจงแบบปกติ

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดจำนวนรถ (n_car) และ จำนวนรอบที่คำนวณ (round)

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดประเภทของระยนต์ไฟฟ้า (Eb, Es, dmax) และ ระดับการอัดประจุ (P)

ขั้นตอนที่ 3 : สุ่มระยะทางที่รถใช้ไปก่อนเริ่มอัดประจุ (d) จากรูปที่ 4.2

ขั้นตอนที่ 4 : หากระยะทางที่สุ่มมากกว่าระยะทางที่รถสามารถวิ่งได้ (d>dmax) ให้ระยะทางที่สุ่มเท่าระยะทางที่รถวิ่งได้ (d=dmax)

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณ พลังงานที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้ไป (Ec), SOC, พลังงานที่ต้องใช้อัดประจุ (Er), ระยะเวลาที่ใช้อัดประจุ (D)

ขั้นตอนที่ 6 : สุ่มเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มอัดประจุ (T) จากรูปที่ 4.7

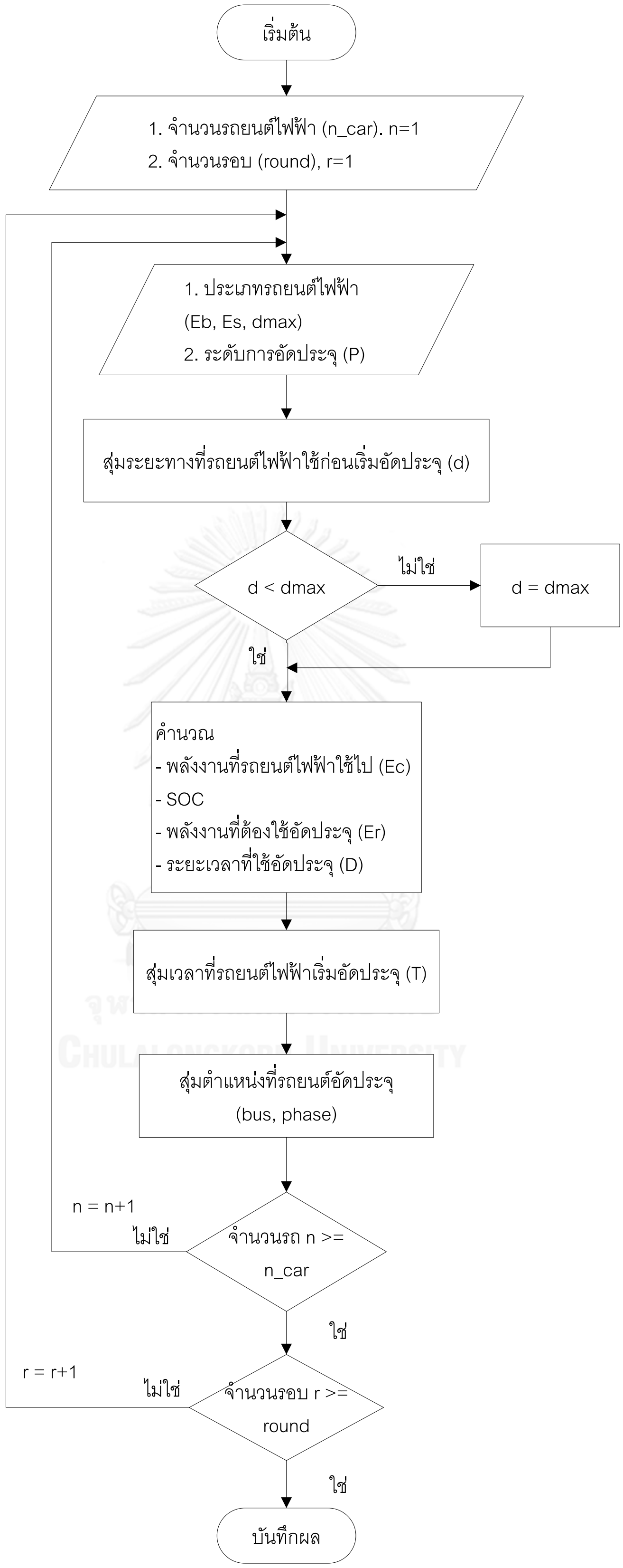
ขั้นตอนที่ 7 : สุ่มตำแหน่งที่รถยนต์อัดประจุ (bus, phase)

ขั้นตอนที่ 8 : ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2. จนครบจำนวนรถที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 9 : ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2. จนครบจำนวนรอบที่กำหนด

ขั้นตอนการทดสอบสามารถแสดงดังรูปที่ 4.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบ

บทที่ 5
ผลการทดสอบ

5.1 การทดสอบที่ 1 : การอัดประจุแบบกระแสสลับ ในระบบแรงดันต่ำ

การทดสอบที่ 1 นี้จำลองการอัดประจุกระแสสลับทั้งระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ สามารถแบ่งเป็นกรณีศึกษาย่อยได้ 15 กรณี แบ่งผลการทดสอบออกเป็น

(1) การอัดประจุเฉพาะกระแสสลับระดับที่ 1 ในระบบ

(2) การอัดประจุเฉพาะกระแสสลับระดับที่ 2 ในระบบ

(3) การอัดประจุทั้งกระแสสลับระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 ในระบบ

โดยการทดสอบทุกกรณีย่อยจะแสดงผล

(1) แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก

(2) แรงดันเฟส

(3) กำลังไฟฟ้าในระบบ

(4) ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และดัชนีแรงดันตกสูงสุด

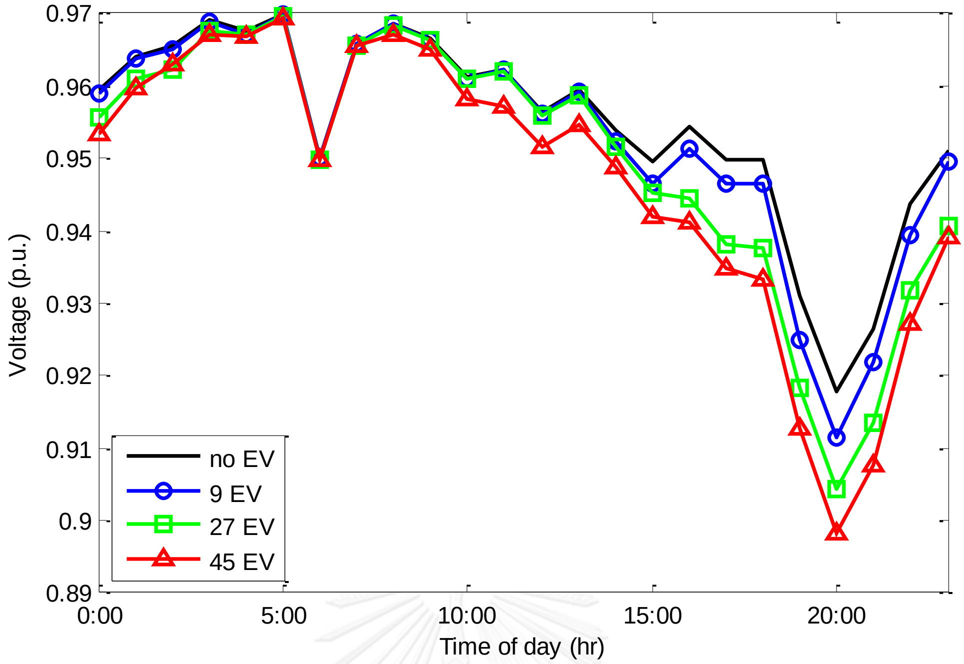
5.1.1 การอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

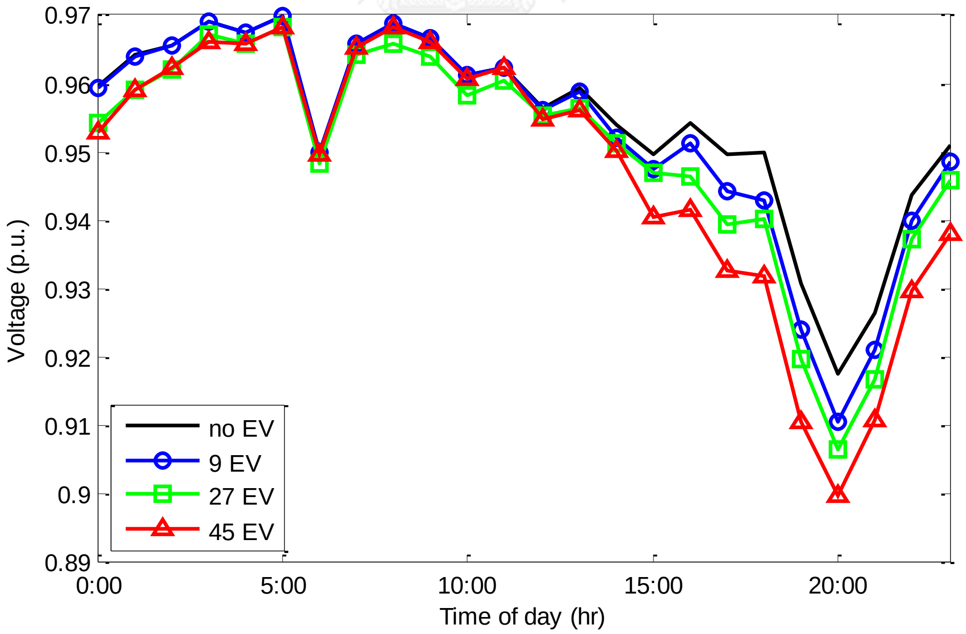
(1) แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก

ผลการทดสอบแสดงแรงดันในบัสที่เกิดผลกระทบมากสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือเกิดแรงดันต่ำสุดที่บัสที่ 15 กรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 สามารถแสดงแรงดันลำดับบวกในรอบการคำนวณที่เกิดแรงดันต่ำที่สุดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ได้ดังรูปที่ 5.1 และกรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 แสดงแรงดันลำดับบวกในรอบการคำนวณที่เกิดแรงดันต่ำที่สุดจากการอัดประจุรถยนต์ชนิด PHEV ได้ดังรูปที่ 5.2

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงให้เห็นว่าทุกกรณีย่อยจะเกิดแรงดันต่ำสุดที่เวลาเดียวกันคือ 20.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีแรงดันต่ำที่สุดแม้จะไม่มีการอัดประจุรถยนต์ในระบบ เมื่อมีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 45 คันในระบบสามารถทำให้เกิดแรงดันดันต่ำกว่า 0.9 p.u. หรือมีแรงดันตกเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันพื้นฐาน



รูปที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV

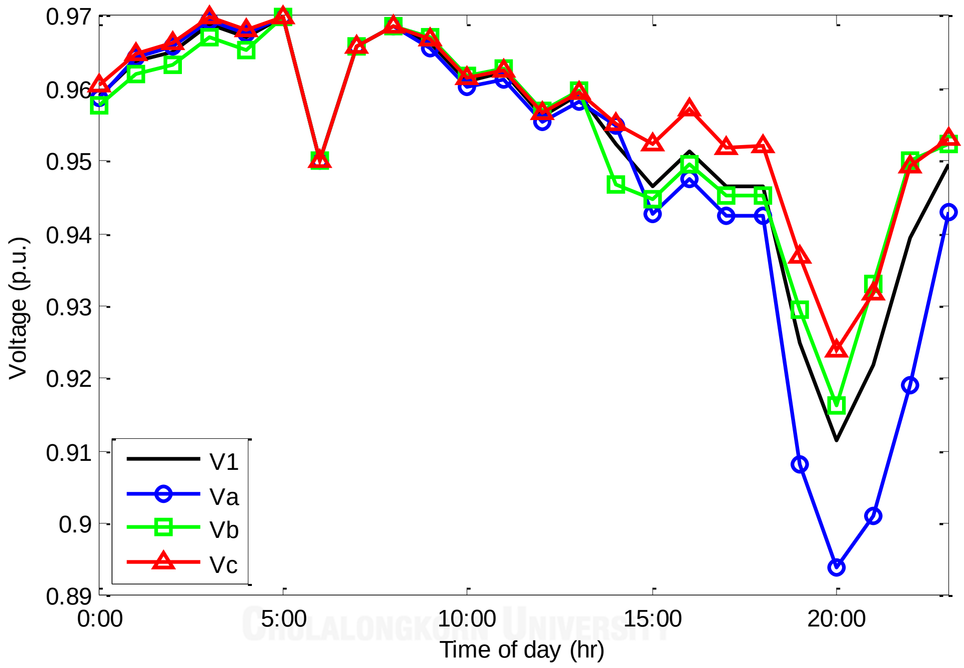


รูปที่ 5.2 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV

(2) แรงดันเฟส

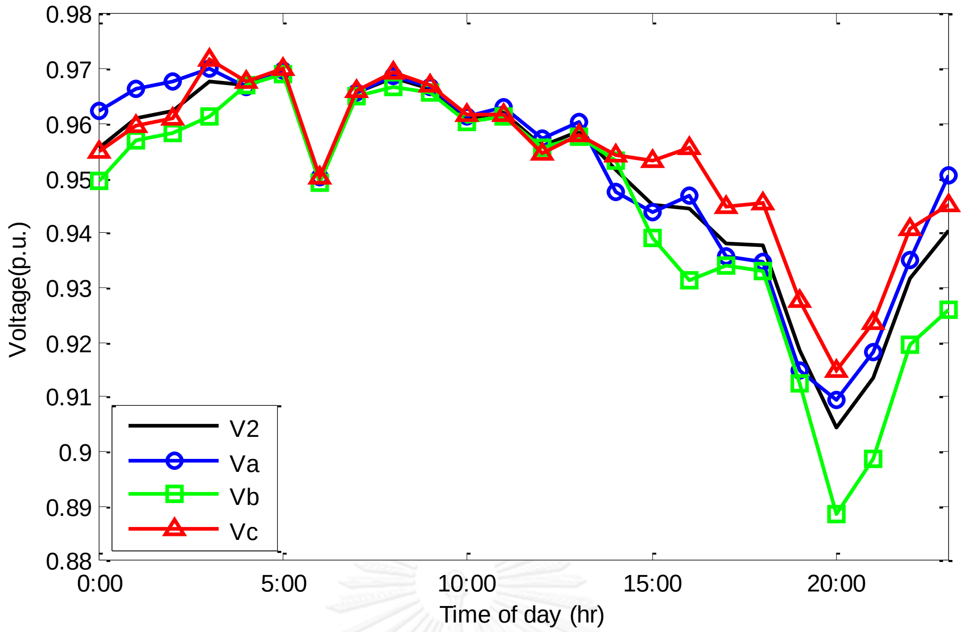
ผลการทดสอบแรงดันเฟส แยกเป็น เฟส A เฟส B และ เฟส C ในรอบการคำนวณที่ทำให้เกิดแรงดันลำดับบวกต่ำที่สุด จากกรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3-5.5

จากรูปที่ 5.3 ถึง 5.5 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันลำดับบวกจะมีขนาดมากกว่า 0.9 p.u. แต่แรงดันเฟสอาจมีขนาดน้อยกว่า 0.9 p.u. ได้ ซึ่งทั้งกรณีศึกษาย่อยที่ 1 และ 2 แรงดันลำดับบวกมีขนาดต่ำสุดมากกว่า 0.9 p.u. แต่กรณีศึกษาย่อยที่ 1 มีขนาดแรงดันเฟส A ต่ำกว่า 0.9 p.u. และในกรณีศึกษาย่อยที่ 2 มีขนาดแรงดันเฟส B ต่ำกว่า 0.9 p.u.

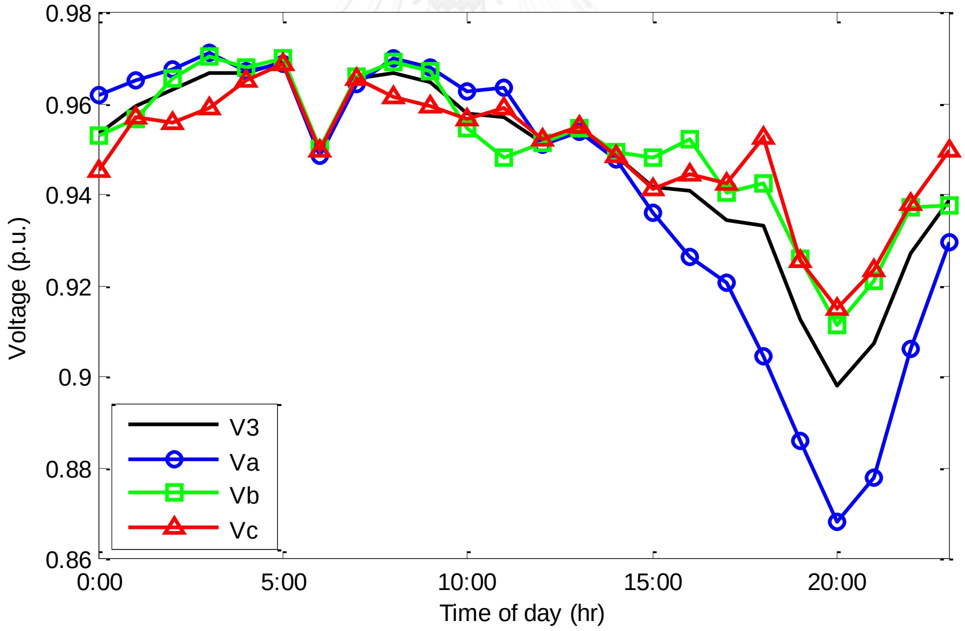


Chulalongkorn University

รูปที่ 5.3 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 1 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 9 คัน

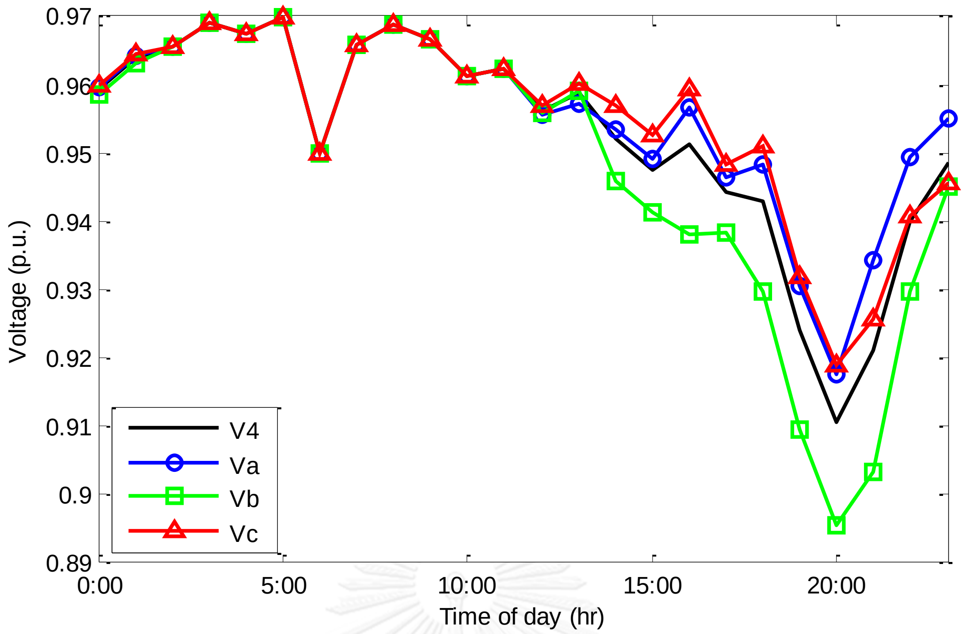


รูปที่ 5.4 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 2 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 27 คัน

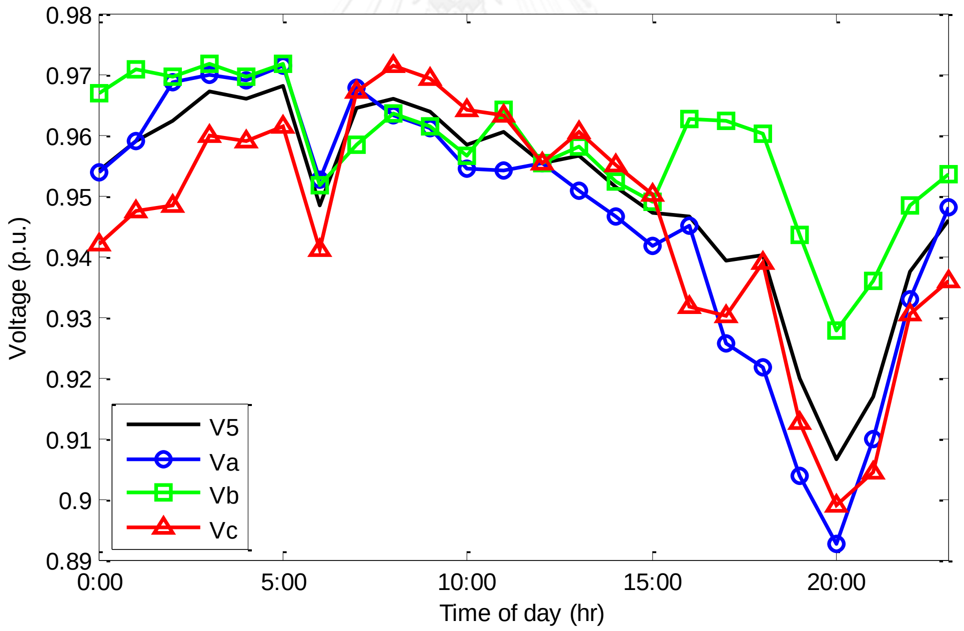


รูปที่ 5.5 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 3 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 45 คัน

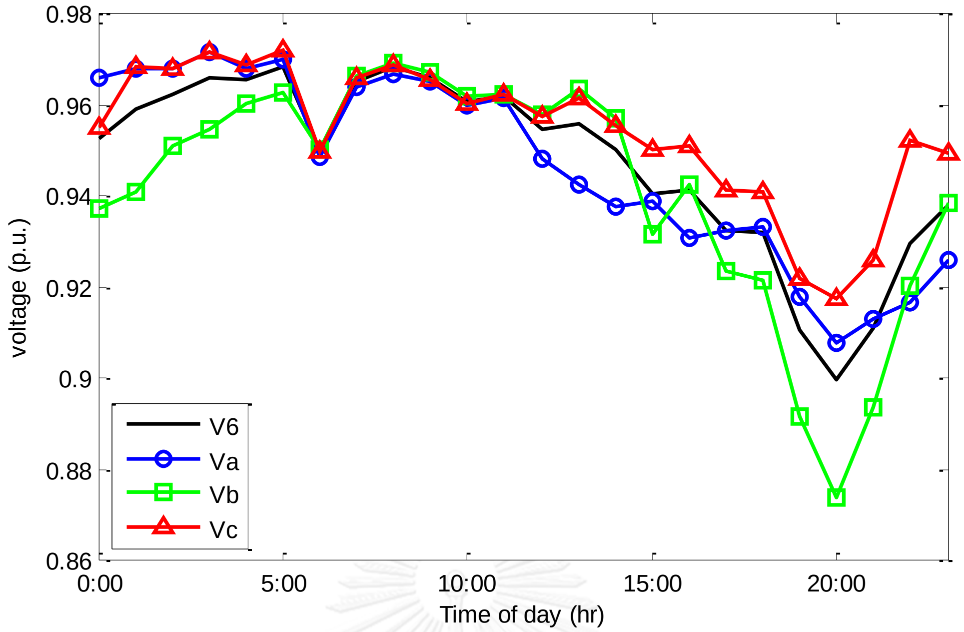
ผลการทดสอบแรงดันเฟสแยกเป็น เฟส A เฟส B และ เฟส C ในรอบการคำนวณที่ทำให้เกิดแรงดันลำดับบวกต่ำที่สุดของกรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6-5.8



รูปที่ 5.6 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 4 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 9 คัน



รูปที่ 5.7 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 5 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 27 คัน

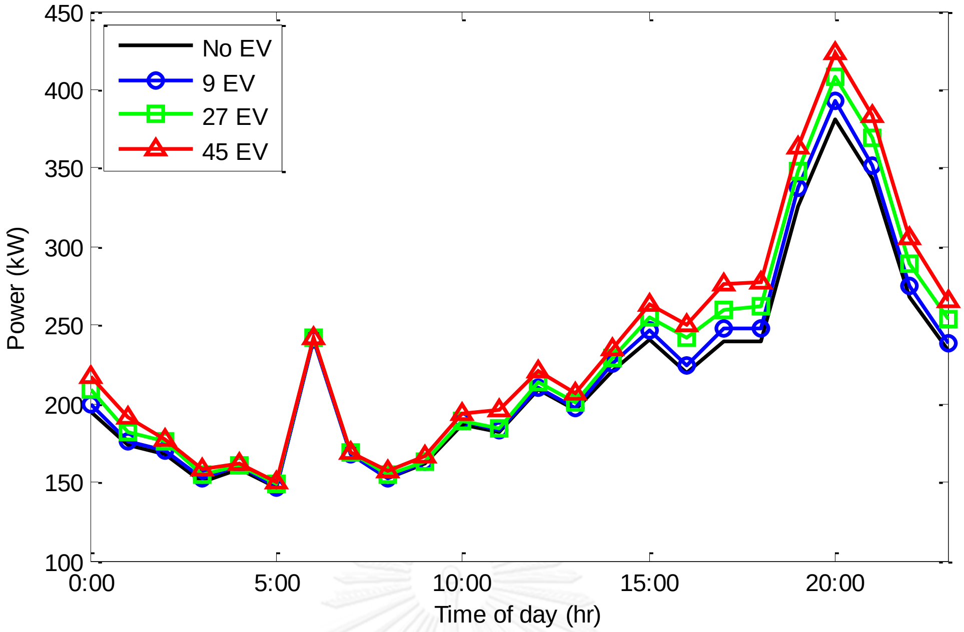


รูปที่ 5.8 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 6 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 45 คัน

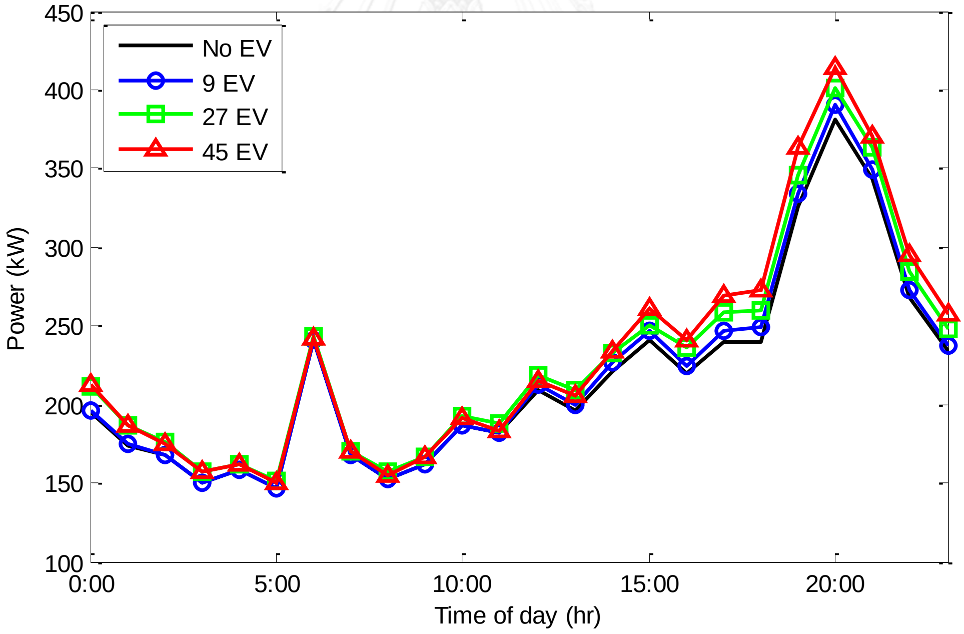
จากรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันลำดับบวกจะมีขนาดมากกว่า 0.9 pu. แต่แรงดันเฟสอาจมีขนาดน้อยกว่า 0.9 p.u. ได้ ซึ่งทั้งกรณีศึกษาย่อยที่ 4 และ 5 แรงดันลำดับบวกมีขนาดต่ำสุดมากกว่า 0.9 p.u. แต่กรณีศึกษาย่อยที่ 4 มีขนาดแรงดันเฟส B ต่ำกว่า 0.9 p.u. และในกรณีศึกษาย่อยที่ 5 มีขนาดแรงดันเฟส A และขนาดแรงดันเฟส C ต่ำกว่า 0.9 p.u.

(3) กำลังไฟฟ้าในระบบ

ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบเมื่อมีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเทียบกับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจากการทดสอบกรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 และจากการทดสอบกรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีที่ศึกษาย่อยที่ 1-3 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV



รูปที่ 5.10 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV

จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงให้เห็นว่ามีโหลดรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากโหลดในระบบเพียงเล็กน้อย และที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าเท่ากัน โหลดที่เพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 ซึ่งเป็นโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV มีค่าสูงสุดมากกว่าโหลดที่เพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษาย่อยที่ 4-6 ซึ่งเป็นโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV แสดงให้เห็นว่าถึงแม้รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จะมีขนาดความจุของแบตเตอรี่

น้อยกว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV แต่รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV สามารถทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบได้มากกว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ในกรณีที่อัดประจุด้วยระดับเดียวกันและมีรถยนต์อัดประจุอยู่ในระบบจำนวนเท่ากัน

(4) ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และ ดัชนีแรงดันตกสูงสุด

ผลการทดสอบดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 1-6 ซึ่งคำนวณมาจากแรงดันลำดับบวกในทุกรอบของการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตาราง ที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดกรณีศึกษาย่อยที่ 1-6

กรณีศึกษาย่อย	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด
base	0.0293	0.0823
1	0.0299	0.0886
2	0.0312	0.0957
3	0.0324	0.1018
4	0.0298	0.0894
5	0.0308	0.0936
6	0.0319	0.1003

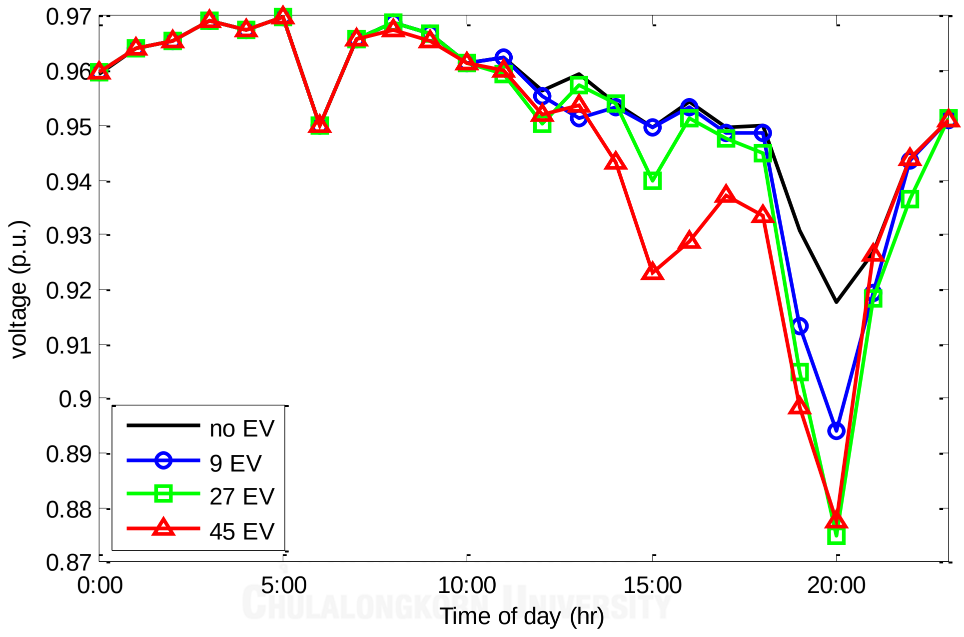
จากตารางที่ 5.1 แสดงดัชนีแรงดันตกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้า ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าเช่นเดียวกับดัชนีแรงดันตกสูงสุด เมื่อพิจารณาดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าจำนวนเท่ากัน การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จะทำให้ค่าดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยมีความมากกว่าการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV แสดงว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV มีแนวโน้มทำให้เกิดแรงดันตกได้มากกว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV

5.1.2 การอัดประจุกระแสสลับระดับที่ 2

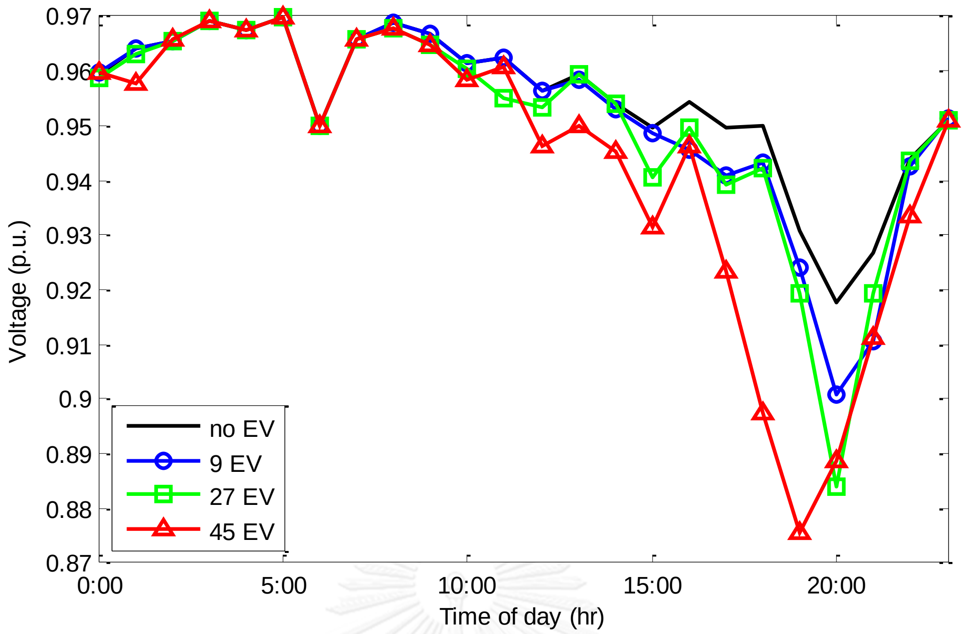
(1) แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก

ผลการทดสอบแสดงแรงดันในบัสที่เกิดผลกระทบมากสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือเกิดแรงดันต่ำสุดที่บัสที่ 15 กรณีศึกษาย่อยที่ 7-9 สามารถแสดงแรงดันลำดับบวกในรอบการคำนวณที่เกิดแรงดันต่ำสุดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV ได้ดังรูปที่ 5.11 และกรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 แสดงแรงดันลำดับบวกจากการอัดประจุรถยนต์ชนิด BEV ได้ดังรูปที่ 5.12

จากรูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงให้เห็นว่าทุกกรณีย่อยจะเกิดแรงดันต่ำสุดที่เวลาเดียวกันคือ 20.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีแรงดันต่ำที่สุดแม้จะไม่มีการอัดประจุรถยนต์ในระบบ เมื่อมีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวน 9 คันในระบบสามารถทำให้เกิดแรงดันดันต่ำกว่า 0.9 p.u. หรือมีแรงดันตกเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันพื้นฐาน แต่ในกรณีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จะเกิดแรงดันต่ำกว่า 0.9 p.u. เมื่อมีการอัดประจุรถยนต์ 27 คัน นอกจากนี้ยังเห็นว่าการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวน 27 คัน ก่อให้เกิดแรงดันตกมากกว่าการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวน 45 คัน ณ เวลา 20.00 น. ซึ่งต้องพิจารณาเรื่องจำนวนรถยนต์ที่อัดประจุ ณ ช่วงเวลานี้ร่วมด้วย หากพิจารณาเฉพาะขนาดแรงดันลำดับบวกเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถสรุปผลนี้ได้



รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 7-9 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV

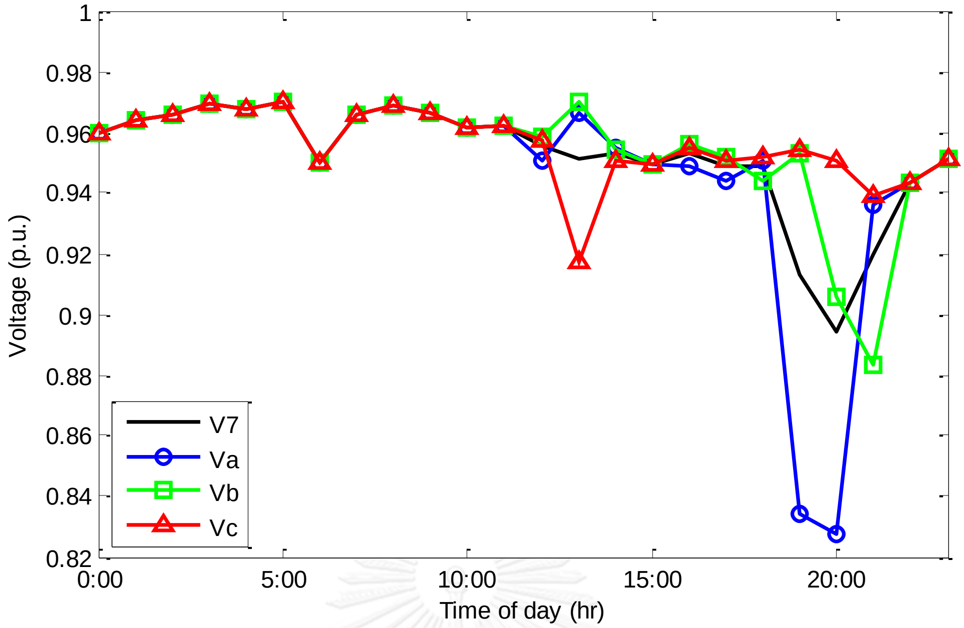


รูปที่ 5.12 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV

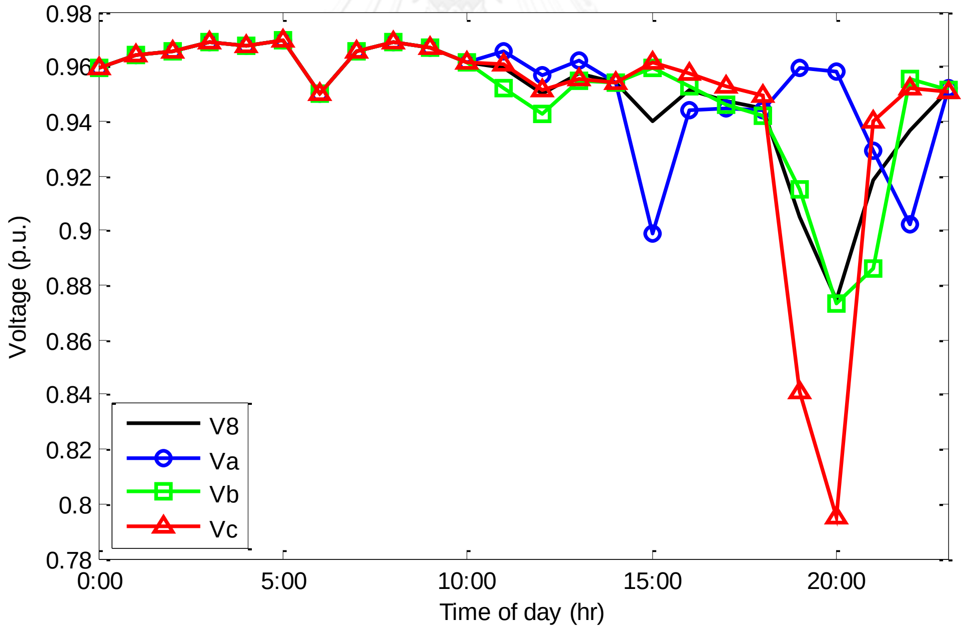
(2) แรงดันเฟส

ผลการทดสอบแรงดันเฟส แยกเป็น เฟส A เฟส B และ เฟส C ในรอบการคำนวณที่ทำให้เกิดแรงดันลำดับบวกต่ำที่สุดของกรณีศึกษาย่อยที่ 7-9 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13-5.15

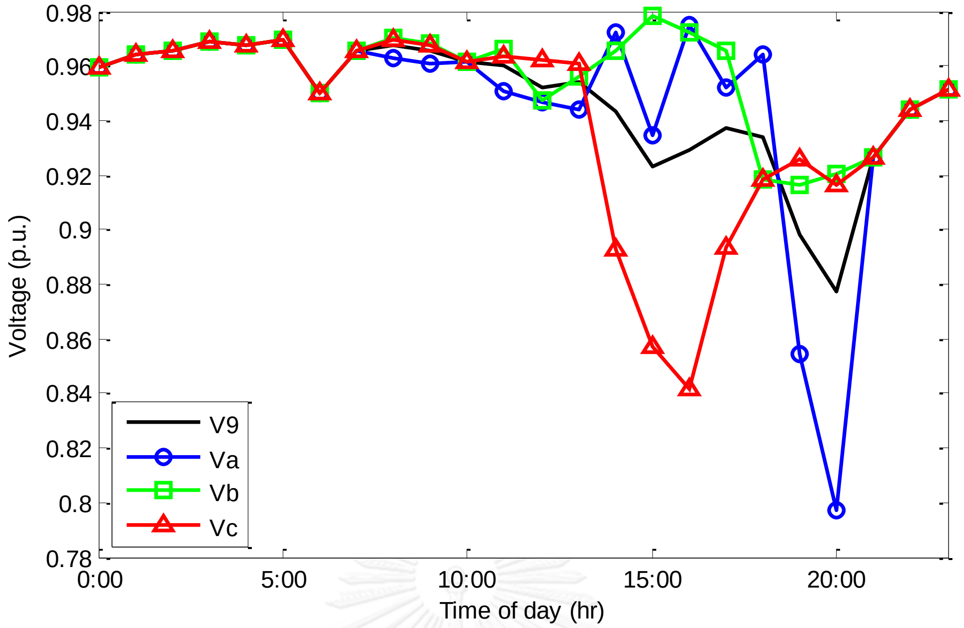
จากรูปที่ 5.13 ถึง 5.15 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันลำดับบวกจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.87-0.89 p.u. แต่แรงดันเฟสอาจมีขนาดน้อยกว่า 0.8 p.u. ได้ ซึ่งทั้งกรณีศึกษาย่อยที่ 8 และ 9 แรงดันลำดับบวกมีขนาดต่ำสุดมากกว่า 0.87 p.u. แต่กรณีศึกษาย่อยที่ 8 มีขนาดแรงดันเฟส C ต่ำกว่า 0.8 p.u. และในกรณีย่อยที่ 9 มีขนาดแรงดันเฟส A ต่ำกว่า 0.8 p.u.



รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 7 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 9 คัน

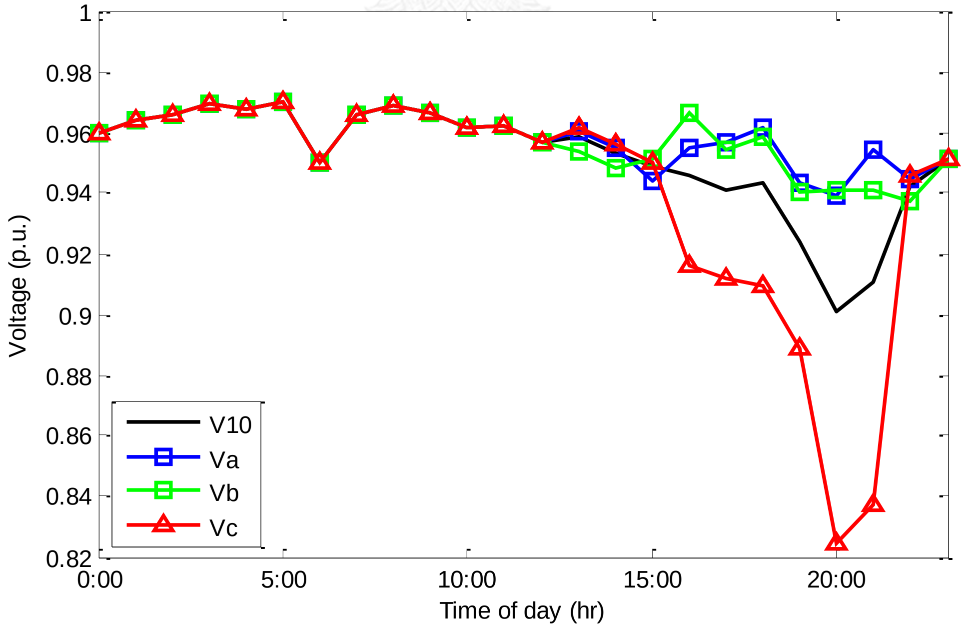


รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 8 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 27 คัน

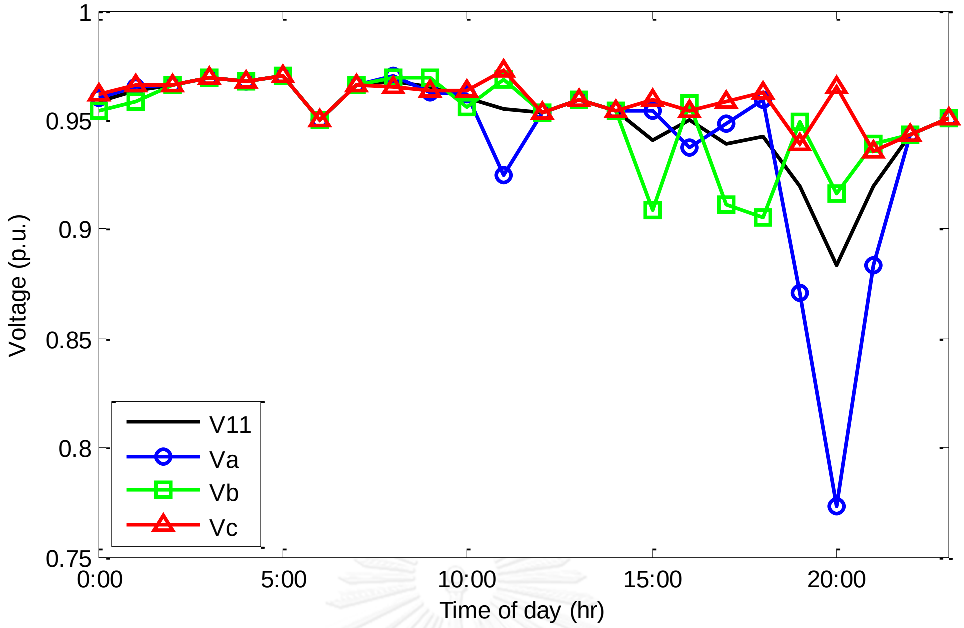


รูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 9 รถยนต์ไฟฟ้า PHEV 45 คัน

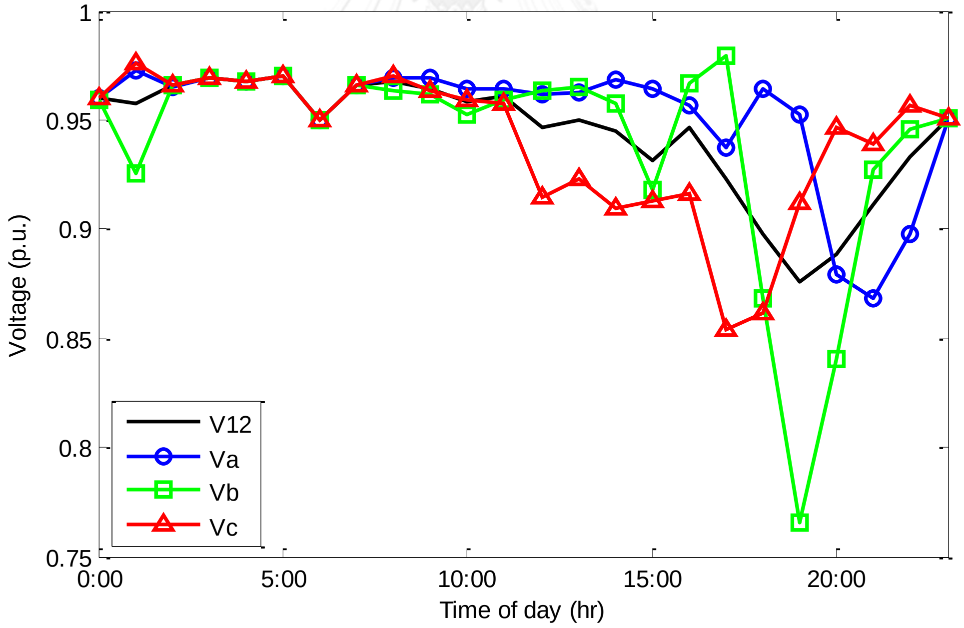
ผลการทดสอบแรงดันเฟส แยกเป็น เฟส A เฟส B และ เฟส C ในรอบการคำนวณที่ทำให้เกิดแรงดันลำดับบวกต่ำที่สุดของกรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16-5.18



รูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 10 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 9 คัน



รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 11 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 27 คัน

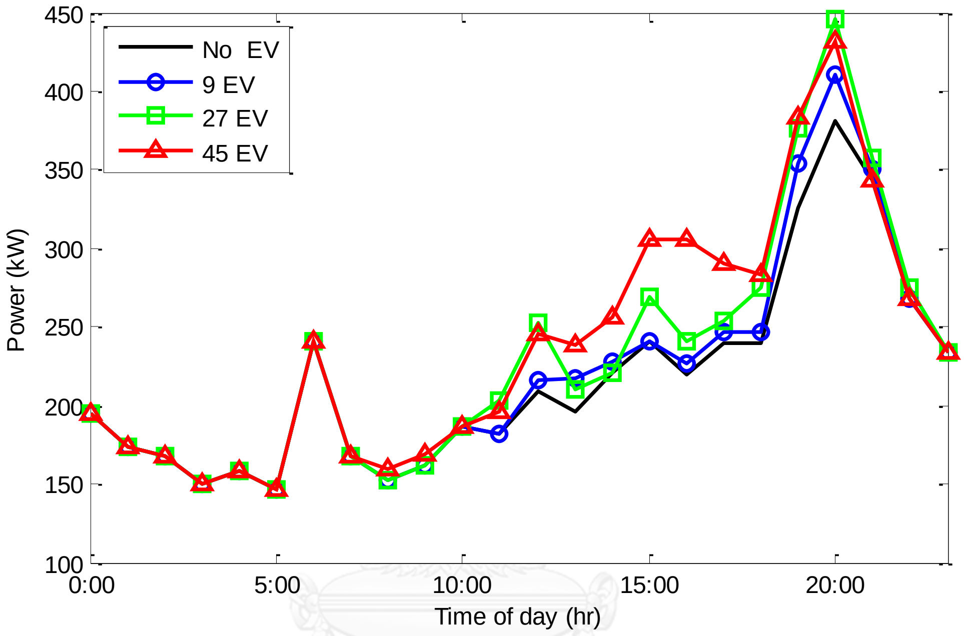


รูปที่ 5.18 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 12 รถยนต์ไฟฟ้า BEV 45 คัน

จากรูปที่ 5.16 ถึง 5.18 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันลำดับบวกจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.87-0.9 p.u. แต่แรงดันเฟสอาจมีขนาดน้อยกว่า 0.8 p.u. ได้ ซึ่งทั้งกรณีศึกษาย่อยที่ 11 และ 12 แรงดันลำดับบวกมีขนาดต่ำสุดมากกว่า 0.87 p.u. แต่กรณีศึกษาย่อยที่ 11 มีขนาดแรงดันเฟส A ต่ำกว่า 0.8 p.u. และในกรณีย่อยที่ 12 มีขนาดแรงดันเฟส B ต่ำกว่า 0.8 p.u.

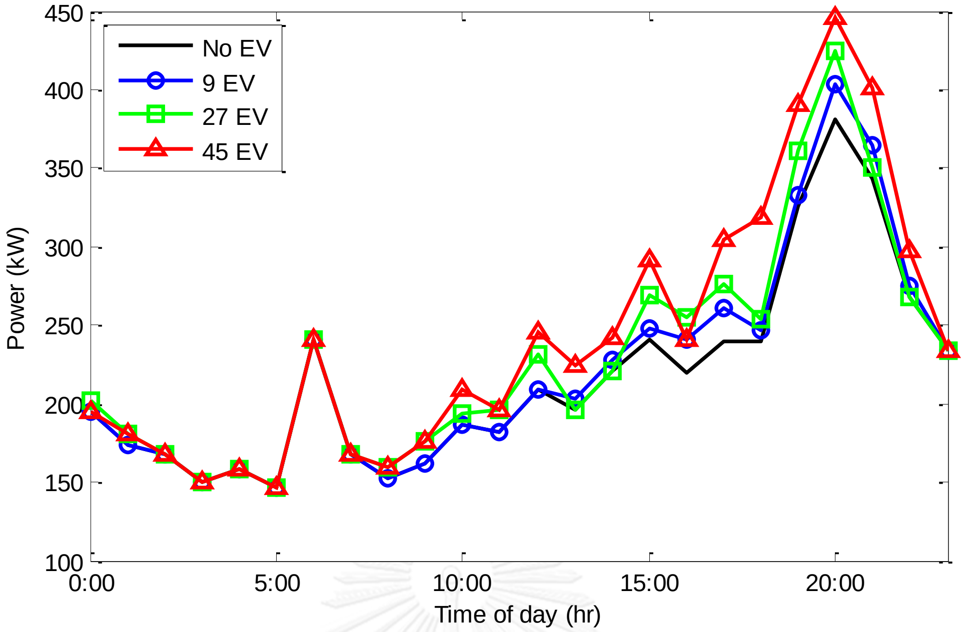
(3) กำลังไฟฟ้าในระบบ

ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบเมื่อมีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเทียบกับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจากการทดสอบกรณีศึกษาย่อยที่ 7-9 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 และจากการทดสอบกรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.19 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีที่ศึกษาย่อยที่ 7-9 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.20 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV

จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 แสดงให้เห็นว่ามีโหลดรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีผลกับโหลดสูดสุดในระบบ รูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นว่าโหลดของรถยนต์ไฟฟ้ากรณีย่อยที่ 9 หรือมีรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ 45 คัน เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 15.00-16.00 น. ทำให้ช่วงเวลาที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบที่เวลา 20.00 น. ในกรณีย่อยที่ 8 ซึ่งมีรถยนต์ไฟฟ้าต่อในระบบ 27 คัน มีค่ามากกว่า กรณีย่อยที่ 9 ซึ่งมีรถยนต์ไฟฟ้าต่อในระบบ 45 คัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันลำดับบวกของกรณีย่อยที่ 9 ที่มีรถยนต์ไฟฟ้า PHEV จำนวน 45 คัน มีค่าสูงกว่ากรณีย่อยที่ 8 ที่มีรถยนต์ไฟฟ้า PHEV จำนวน 27 คัน เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษาย่อยที่ 7-9 ซึ่งเป็นโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV มีค่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษาย่อยที่ 10-12 ซึ่งเป็นโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ซึ่งสอดคล้องกับในผลการทดสอบการอัดประจุระดับที่ 1 ในกรณีย่อยที่ 1-6

(4) ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และ ดัชนีแรงดันตกสูงสุด

ผลการทดสอบดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 7-12 ซึ่งคำนวณมาจากแรงดันลำดับบวกในทุกรอบของการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 7-12

กรณีศึกษาย่อย	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด
base	0.0293	0.0823

กรณีศึกษาย่อย	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด
7	0.0300	0.1060
8	0.0316	0.1253
9	0.0331	0.1224
10	0.0300	0.0990
11	0.0316	0.1162
12	0.0331	0.1246

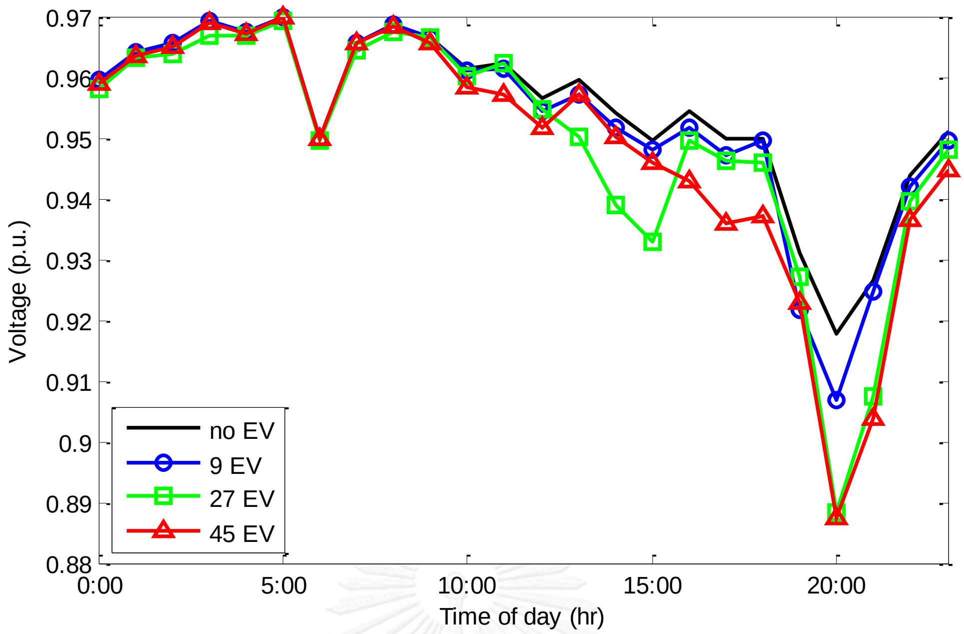
จากตารางที่ 5.2 แสดงดัชนีแรงดันตกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้า ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าเช่นเดียวกับดัชนีแรงดันตกสูงสุด เมื่อพิจารณาดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าจำนวนเท่ากัน การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV และ รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV มีค่าเท่ากันแสดงว่ารถยนต์ทั้งสองชนิดมีผลต่อการเกิดแรงดันตกเท่ากัน

5.1.3 การอัดประจุทั้งกระแสสลับระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 ในระบบ

(1) แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก

ผลการทดสอบแสดงแรงดันในบัสที่เกิดผลกระทบมากสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือเกิดปรงดันต่ำสุดที่บัสที่ 15 กรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 สามารถแสดงแรงดันลำดับบวกจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าทั้งชนิด BEV และ PHEV ได้ดังรูปที่ 5.21

จากรูปที่ 5.21 แสดงให้เห็นว่าทุกกรณีย่อยจะเกิดแรงดันต่ำสุดที่เวลาเดียวกันคือ 20.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีแรงดันต่ำที่สุดแม้จะไม่มีการอัดประจุรถยนต์ในระบบ เมื่อมีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 27 คันในระบบสามารถทำให้เกิดแรงดันดันต่ำกว่า 0.9 p.u. หรือมีแรงดันตกเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันพื้นฐาน



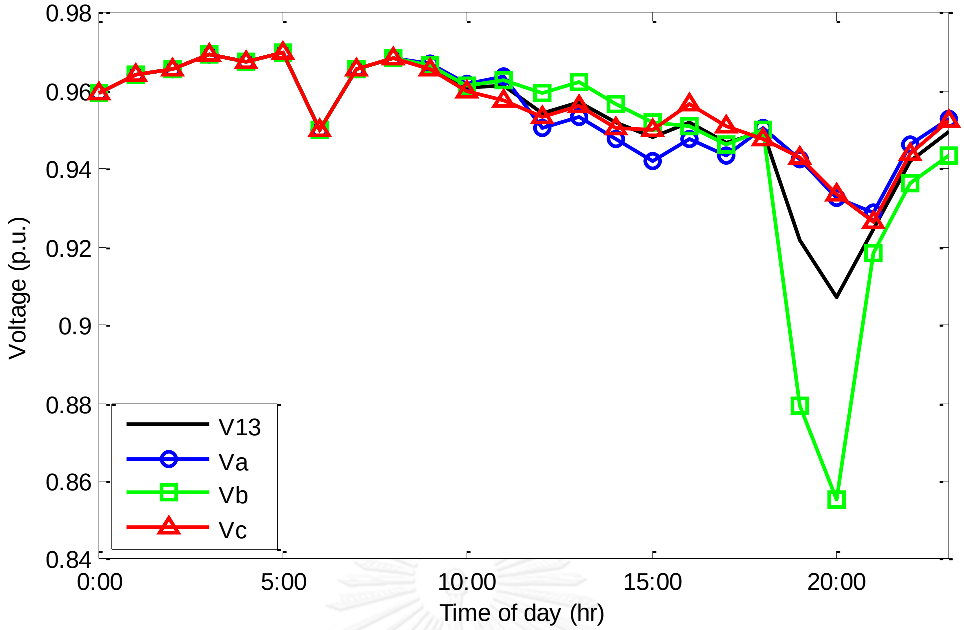
รูปที่ 5.21 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 13-15

(2) แรงดันเฟส

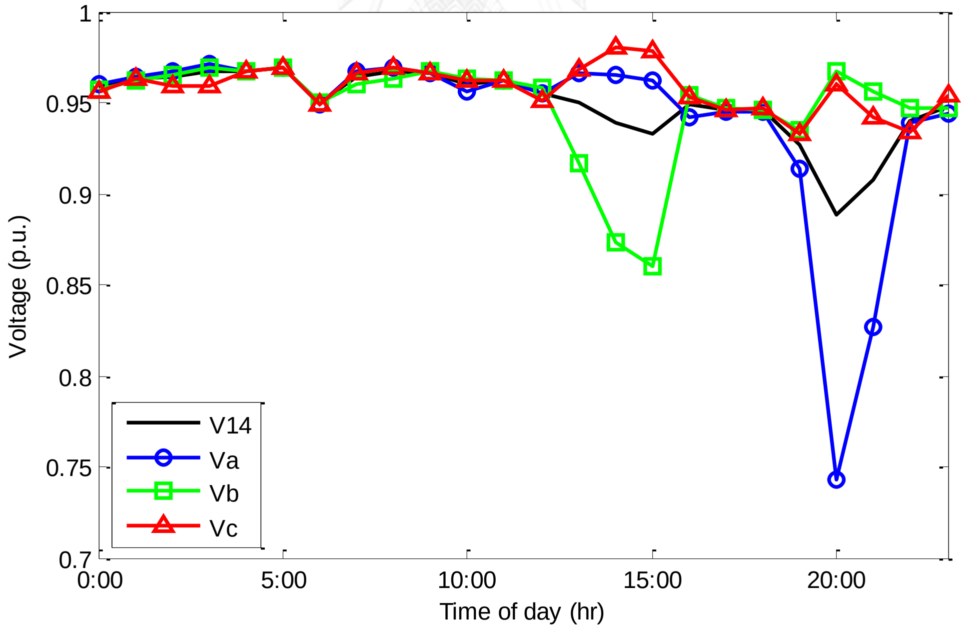
ผลการทดสอบแรงดันเฟสของกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22-5.24

จากรูปที่ 5.22 ถึง 5.24 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันลำดับบวกจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.88-0.9 p.u. แต่แรงดันเฟสอาจมีขนาดน้อยกว่า 0.8 p.u. ได้ ซึ่งทั้งกรณีศึกษาย่อยที่ 14 แรงดันลำดับบวกมีขนาดต่ำสุดมากกว่า 0.89 p.u. แต่กรณีย่อยที่ 14 มีขนาดแรงดันเฟส A ต่ำกว่า 0.8 p.u.

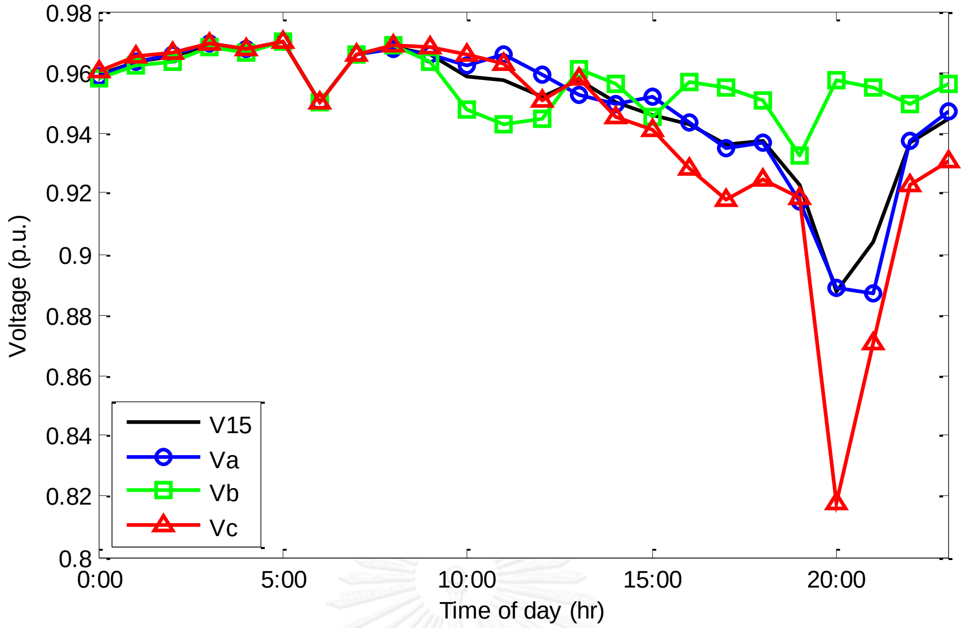
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.22 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 13



รูปที่ 5.23 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 14

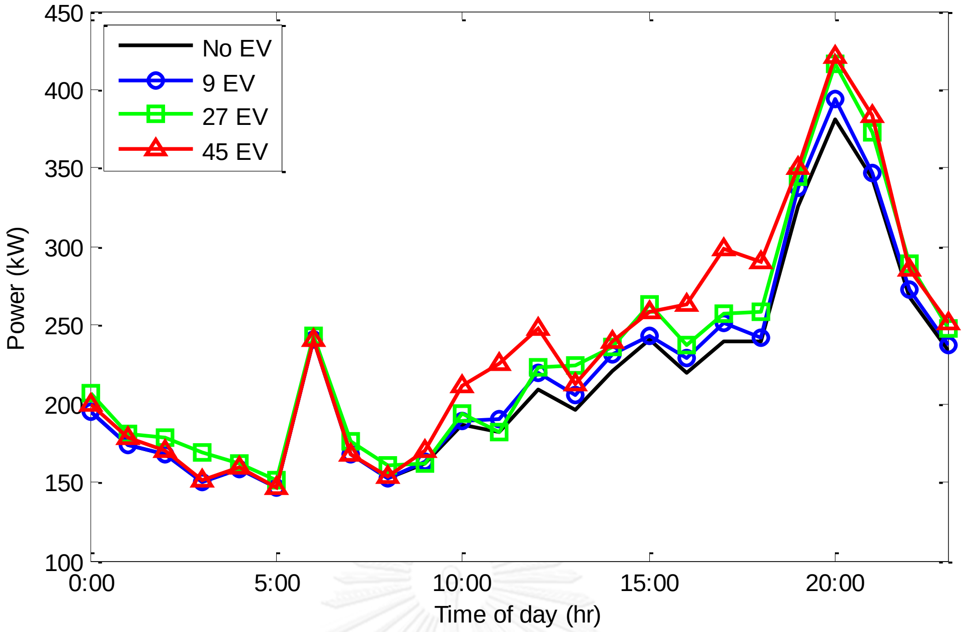


รูปที่ 5.24 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 15

จากรูปที่ 5.16 ถึง 5.18 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันลำดับบวกจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.87-0.9 p.u. แต่แรงดันเฟสอาจมีขนาดน้อยกว่า 0.8 p.u. ได้ ซึ่งทั้งกรณีศึกษาย่อยที่ 11 และ 12 แรงดันลำดับบวกมีขนาดต่ำสุดมากกว่า 0.87 p.u. แต่กรณีย่อยที่ 11 มีขนาดแรงดันเฟส A ต่ำกว่า 0.8 p.u. และในกรณีศึกษาย่อยที่ 12 มีขนาดแรงดันเฟส B ต่ำกว่า 0.8 p.u.

(3) กำลังไฟฟ้าในระบบ

ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบเมื่อมีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเทียบกับกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจากการทดสอบกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 กำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจากกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15

จากรูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นว่ามีโหลดรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีผลกับโหลดสูดสุดในระบบ โหลดของรถยนต์ไฟฟ้ากรณีย่อยที่ 15 หรือมีรถยนต์ไฟฟ้าในระบบ 45 คัน เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 16.00-18.00 น. ทำให้ช่วงเวลาที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบที่เวลา 20.00 น. ในกรณีศึกษาย่อยที่ 14 ซึ่งมีรถยนต์ไฟฟ้าต่อในระบบ 27 คัน มีค่ามากกว่า กรณีศึกษาย่อยที่ 15 ซึ่งมีรถยนต์ไฟฟ้าต่อในระบบ 45 คัน และโหลดที่เพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 ซึ่งเป็นโหลดของรถยนต์ไฟฟ้าทั้งชนิด PHEV และ BEV อีกทั้งยังเป็นการอัดประจุทั้งแบบระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 ทำให้โหลดทั้งหมดในระบบ มีค่าน้อยกว่าในกรณีศึกษาย่อยที่ 7-12 ซึ่งเป็นการอัดประจุระดับที่ 2 เพียงอย่างเดียว

(4) ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และ ดัชนีแรงดันตกสูงสุด

ผลการทดสอบดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15 ซึ่งคำนวณมาจากแรงดันลำดับบวกในทุกรอบของการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตาราง ที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 13-15

กรณีศึกษาย่อย	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด
base	0.0293	0.0823
13	0.0299	0.0930
14	0.0313	0.1117

กรณีศึกษาย่อย	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด
15	0.0326	0.1126

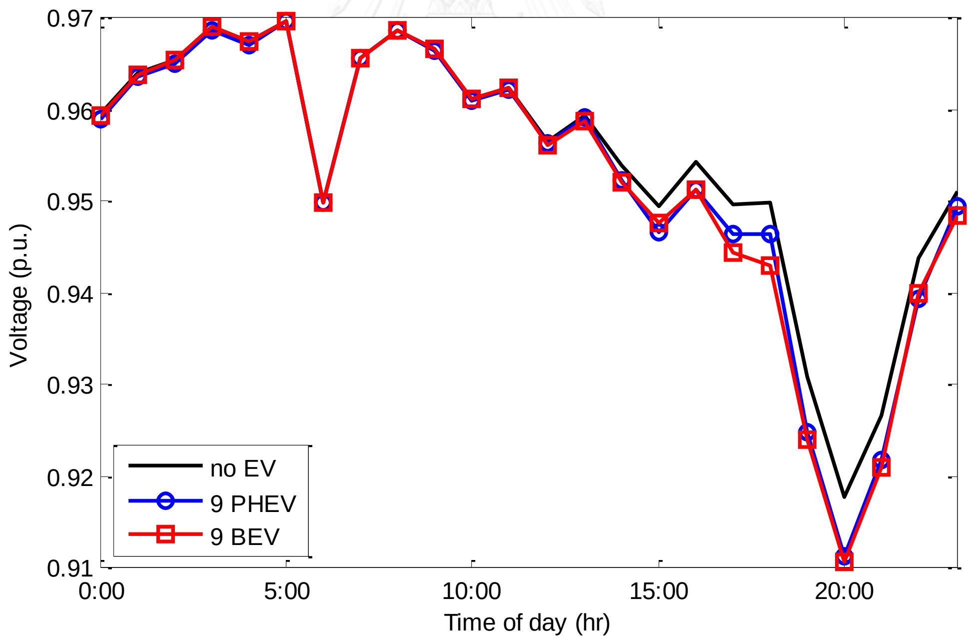
5.1.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบจากกรณีย่อยต่างๆ

(1) ระดับการอัดประจุเท่ากัน ชนิดของรถยนต์ไฟฟ้าต่างกัน

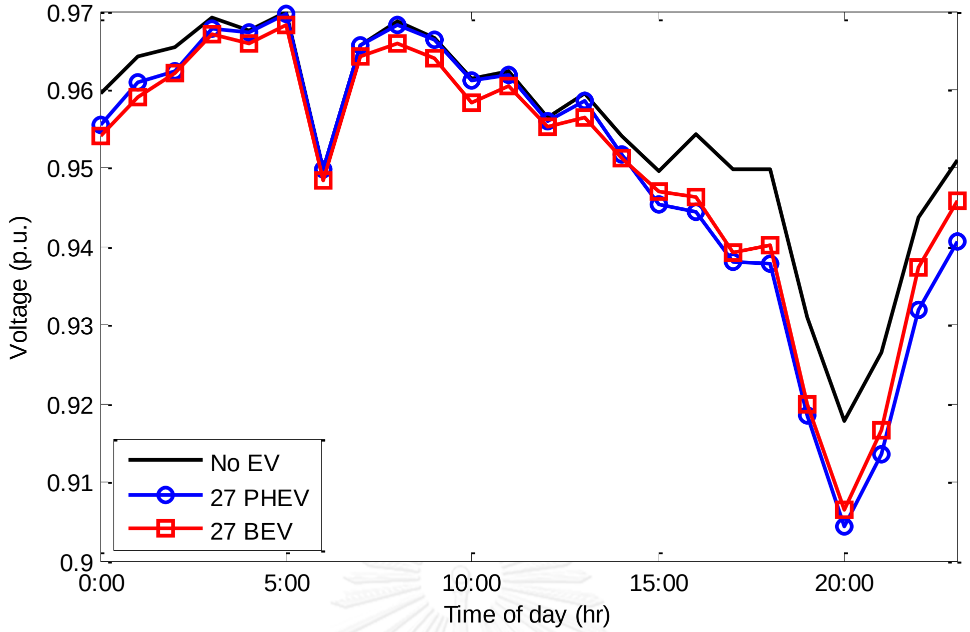
(1.1) การอัดประจุระดับที่ 1

ผลการเปรียบเทียบแรงดันที่การอัดประจุระดับที่ 1 ระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV และ BEV ที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าต่างๆกัน สามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 5.26-5.28

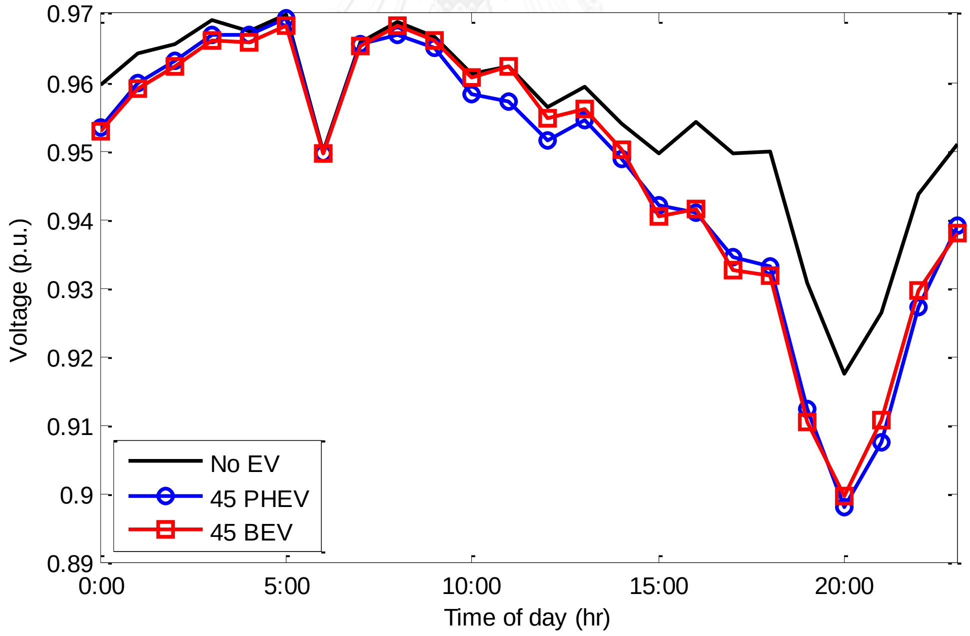
จากรูป ที่ 5.26-5.28 แสดงให้เห็นว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV ก่อให้เกิดแรงดันตกมากกว่ารถยนต์ไฟฟ้า BEV แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างเป็นนัยยะสำคัญที่เห็นได้ชัดจากการการอัดประจุระดับที่ 1



รูปที่ 5.26 การอัดประจุระดับที่ 1 จำนวนรถยนต์ 9 คัน



รูปที่ 5.27 การอัดประจุระดับที่ 1 จำนวนรถยนต์ 27 คัน

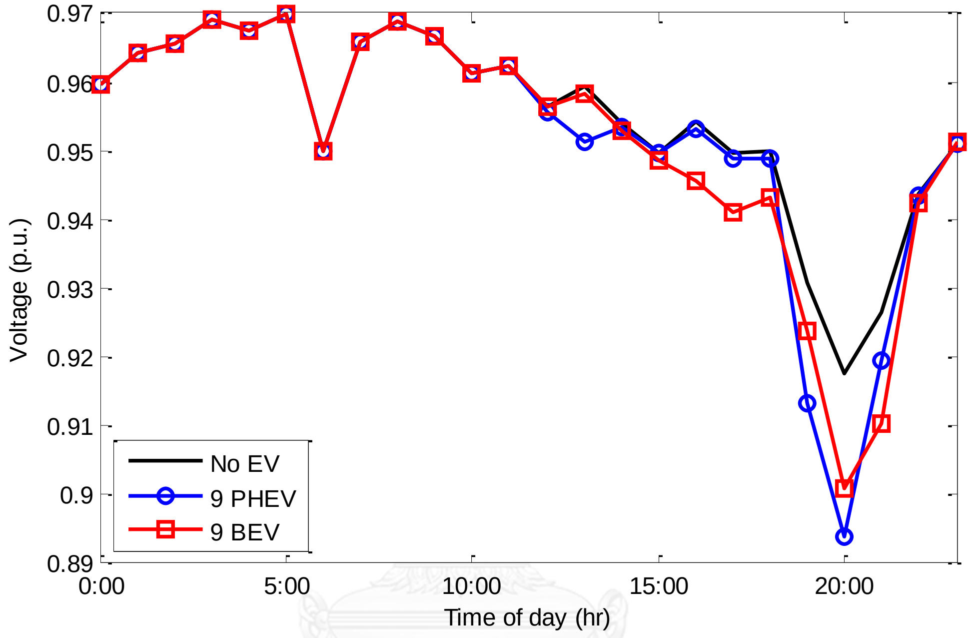


รูปที่ 5.28 การอัดประจุระดับที่ 1 จำนวนรถยนต์ 45 คัน

(1.2) การอัดประจุระดับที่ 2

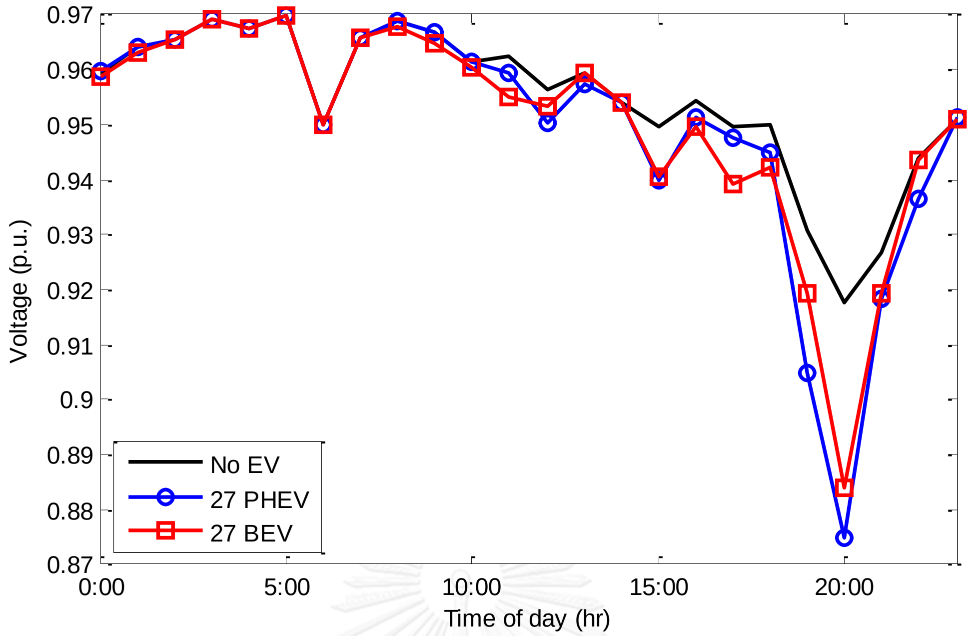
ผลการเปรียบเทียบแรงดันที่การอัดประจุระดับที่ 2 ระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV และ BEV ที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.29-5.31

จากรูป ที่ 5.29-5.31 แสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างเล็กน้อยในช่วง 0.1-0.2 p.u. สำหรับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าทั้งสอบชนิดที่การอัดประจุระดับที่ 2 ซึ่งรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV มีแนวโน้มทำให้เกิดแรงดันตกกว่ากว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ยกเว้นในกรณีที่มีรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 45 คัน รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ก่อให้เกิดแรงดันตกมากกว่ารถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV

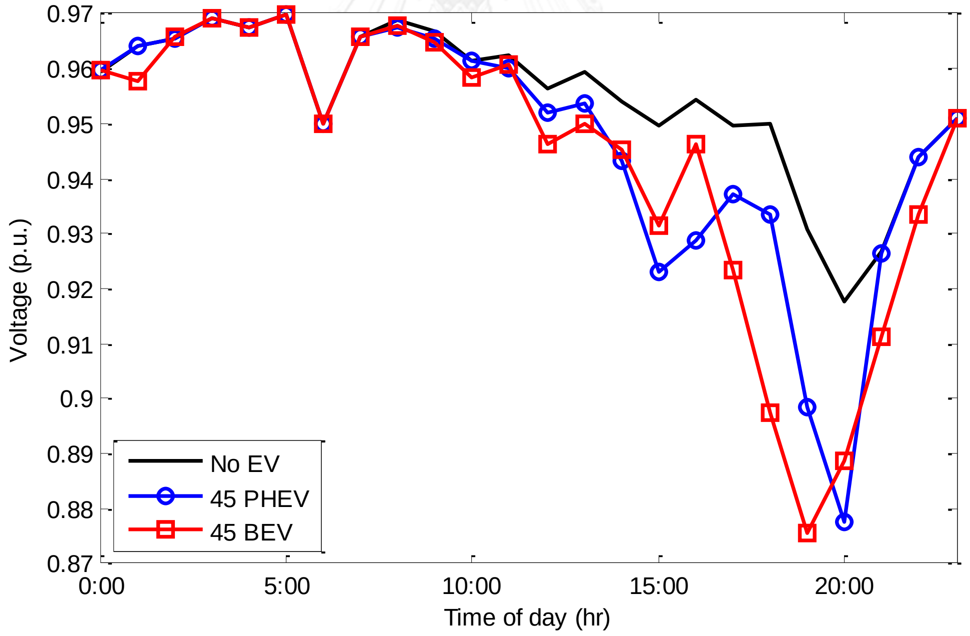


รูปที่ 5.29 การอัดประจุระดับที่ 2 จำนวนรถยนต์ 9 คัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 5.30 การอัดประจุระดับที่ 2 จำนวนรถยนต์ 27 คัน



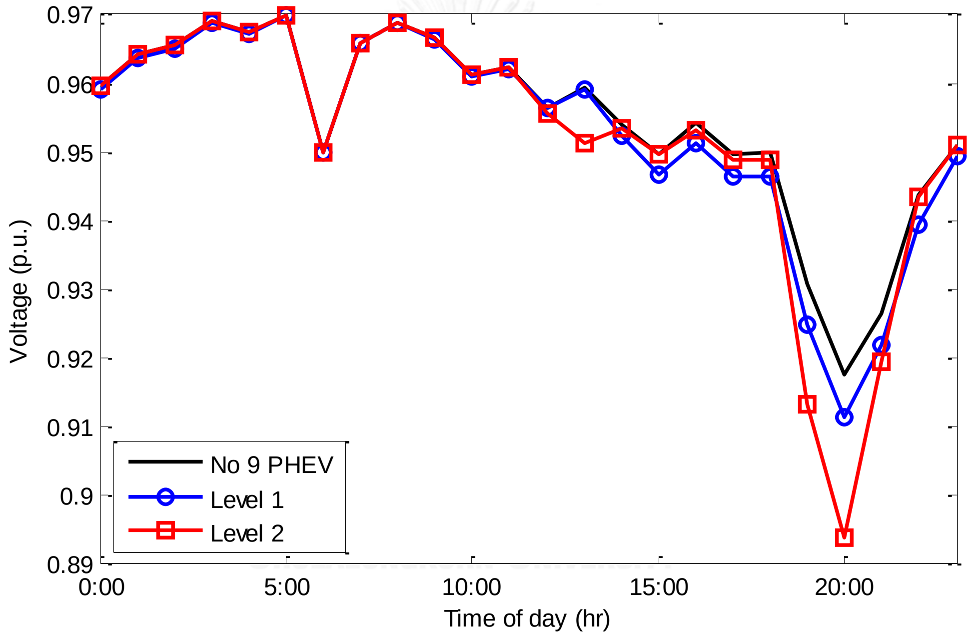
รูปที่ 5.31 การอัดประจุระดับที่ 2 จำนวนรถยนต์ 45 คัน

(2) ชนิดของรถยนต์ไฟฟ้าเหมือนกัน ระดับการอัดประจุไฟฟ้าต่างกัน

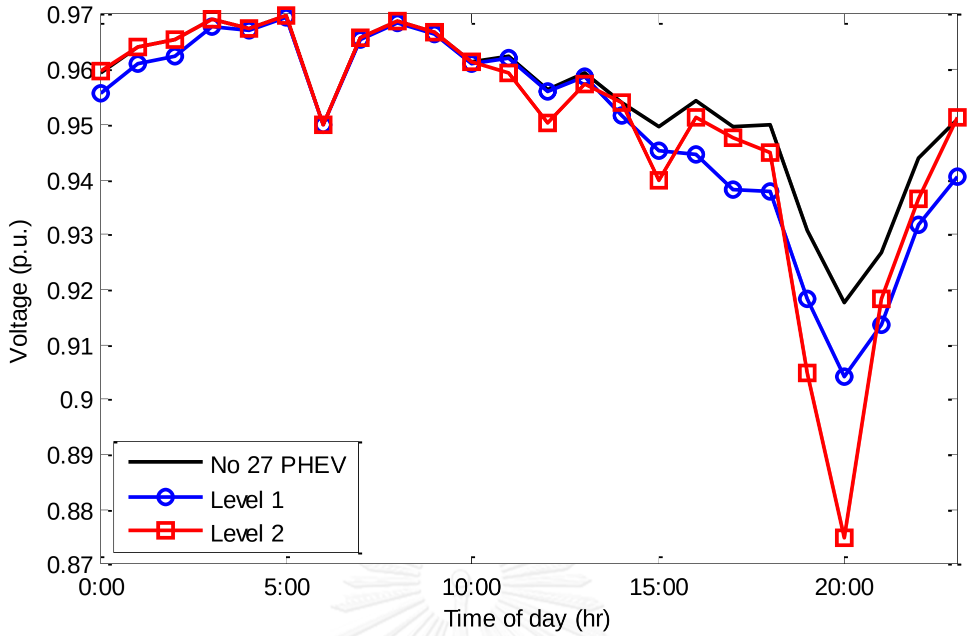
(2.1) รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV

ผลการเปรียบเทียบแรงดันที่การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV ระหว่างการอัดประจุระดับที่ 1 และ การอัดประจุระดับที่ 2 ที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.32-5.34

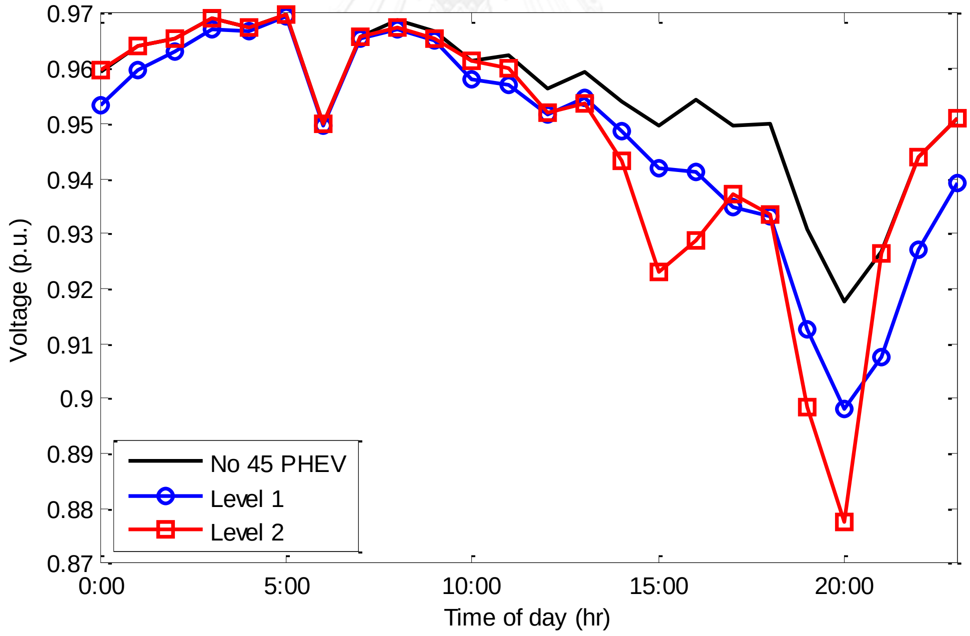
จากรูป ที่ 5.32-5.34 แสดงให้เห็นว่า มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด และจะเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อจำนวนรถยนต์ในระบบมากขึ้นสำหรับการอัดประจุทั้งสองระดับในระยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV การอัดประจุระดับที่ 2 ทำให้เกิดแรงดันตกมากกว่าการอัดประจุระดับที่ 1



รูปที่ 5.32 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวนรถยนต์ 9 คัน



รูปที่ 5.33 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวนรถยนต์ 27 คัน

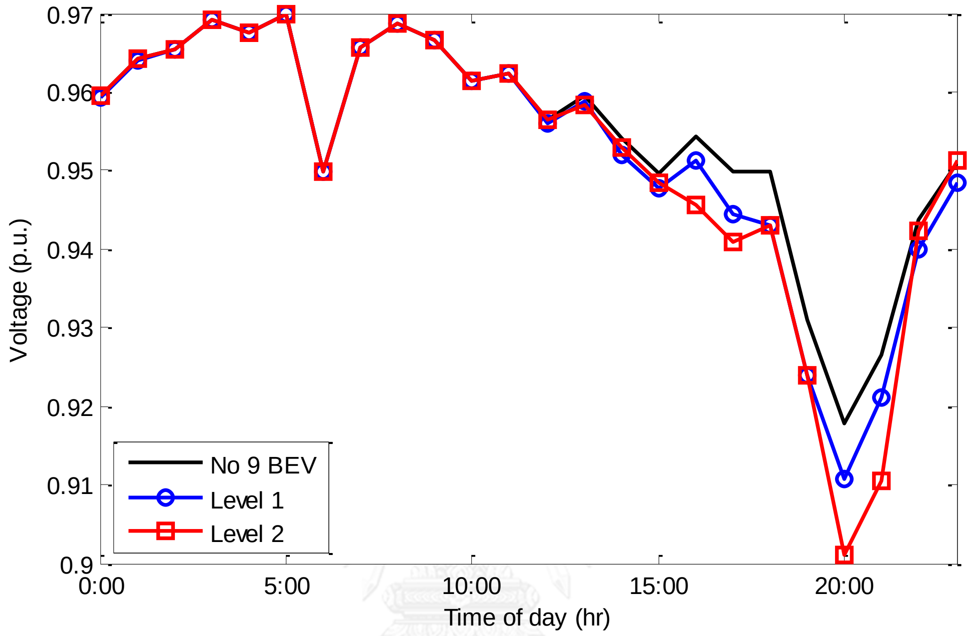


รูปที่ 5.34 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จำนวนรถยนต์ 45 คัน

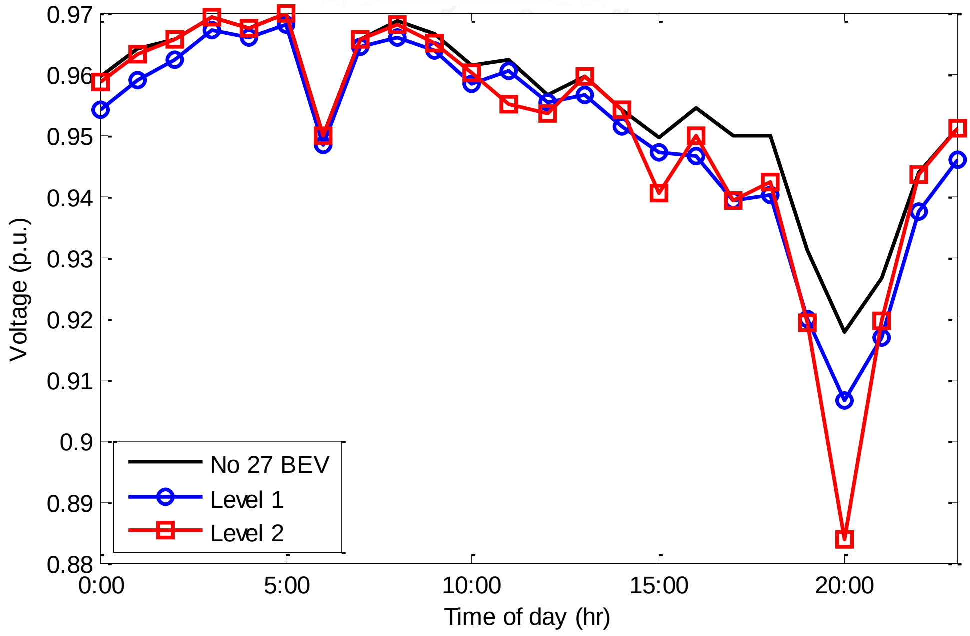
(2.2) รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV

ผลการเปรียบเทียบแรงดันที่การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ระหว่างการอัดประจุระดับที่ 1 และ การอัดประจุระดับที่ 2 ที่จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.35-5.37

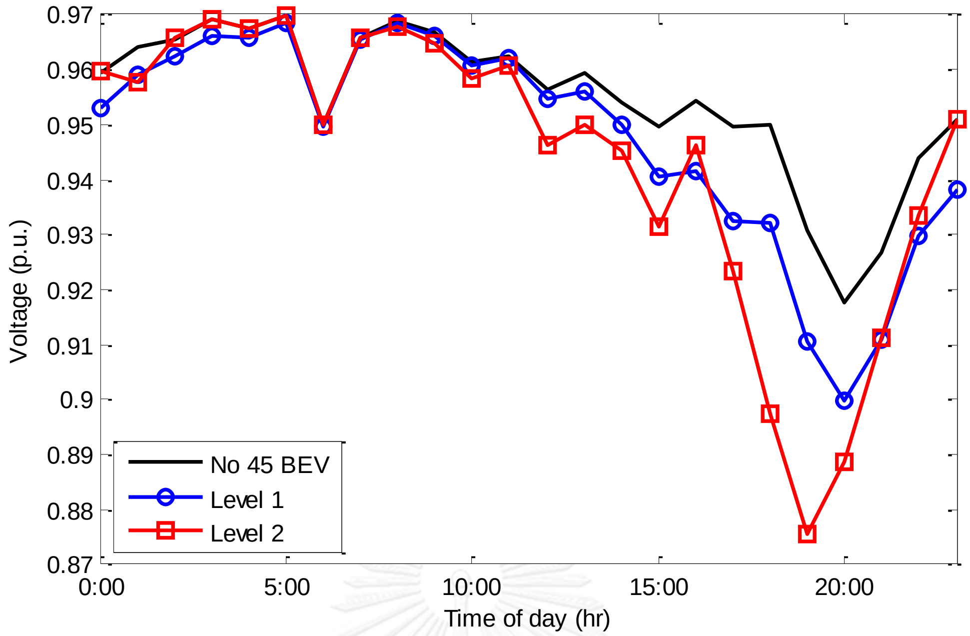
จากรูป ที่ 5.35-5.37 แสดงให้เห็นว่า มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด และจะเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อจำนวนรถยนต์ในระบบมากขึ้นสำหรับการอัดประจุทั้งสองระดับในระยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV การอัดประจุระดับที่ 2 ทำให้เกิดแรงดันตกมากกว่าการอัดประจุระดับที่ 1 เช่นเดียวกับการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV



รูปที่ 5.35 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จำนวนรถยนต์ 9 คัน



รูปที่ 5.36 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จำนวนรถยนต์ 27 คัน



รูปที่ 5.37 รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV จำนวนรถยนต์ 45 คัน

5.2 การทดสอบที่ 2 : สถานีอัดประจุกระแสตรง ในระบบแรงดันปานกลาง

การทดสอบที่ 2 นี้ ทำการติดตั้งสถานีอัดประจุกระแสตรงจำนวน 1 สถานี ซึ่งประกอบด้วยหัวจ่ายประจุกระแสตรงขนาด 50 กิโลวัตต์ จำนวน 8 หัวจ่าย ต่อหนึ่งสถานี โดยมีประมาณการเข้าใช้บริการของผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.2.1 ผลการศึกษาการติดตั้งสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละบัสของระบบแรงดันปานกลางสามารถแสดงออกมาได้เป็นค่า ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และ ดัชนีแรดันตกสูงสุดซึ่งคำนวณมาจากแรงดันลำดับบวกในทุกรอบของการคำนวณสามารถแสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงดัชนีแรงดันตกสูงสุด และ ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย ของแต่ละบัสที่ติดตั้งสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิดกระแสตรง

บัสที่ติดตั้งสถานีอัดประจุ	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย
1	0.0713	0.0579
2	0.0729	0.0594
3	0.0758	0.0618
4	0.0759	0.0619

บัสที่ติดตั้งสถานีอัดประจุ	ดัชนีแรงดันตกสูงสุด	ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย
5	0.0759	0.0620
6	0.0759	0.0621
7	0.0767	0.0623
8	0.0766	0.0622
9	0.0768	0.0623
10	0.0773	0.0624
11	0.0775	0.0624

จากตารางที่ 5.4 แสดงว่า ทุกบัสเมื่อต่อสถานีประจุอัดไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปแล้วไม่เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันฐาน บัสก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือบัสที่ 11 และบัสที่เกิดผลกระทบน้อยที่สุดคือบัสที่ 1 ซึ่งเป็นบัสต้นสายที่ติดอยู่กับหม้อแปลง ดังนั้นหากจะติดตั้งสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าเข้าไประระบบแรงดันปานกลางนี้แล้วไม่ทำให้เกิดผลกระทบกับระบบไฟฟ้ามากเกินไปควรติตั้งในบริเวณบัสที่ 3 ถึงบัสที่ 6 ซึ่งเป็นช่วงบัสที่มีค่าดัชนีแรงดันตกสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0758-0.0759 และมีค่าดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.0618-0.0621

5.3 การทดสอบที่ 3 : การอัดประจุกระแสสลับในระบบแรงดันต่ำ และสถานีอัดประจุกระแสตรงในระบบแรงดันปานกกลาง

การทดสอบที่ 3 นี้จำลองการอัดประจุกระแสตรงทั้งระดับที่ 1 และ ระดับที่ 2 ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำซึ่งต่อยู่ในระบบแรงดันปานกลางที่มีสถานีอัดประจุกระแสตรงต่อร่วมอยู่ด้วย โดยพิจารณาเฉพาะระบบแรงดันต่ำที่ต่ออยู่ที่บัสที่ 11 ของระบบแรงดันปานกลาง และ สถานีอัดประจุกระแสตรงต่ออยู่ที่บัสที่ 11 ของระบบแรงดันปานกลางเช่นกัน ซึ่งการต่อระบบเช่นนี้จะทำให้เกิดค่าแรงดันตกได้มากที่สุด สามารถแบ่งเป็นกรณีศึกษาย่อยได้ 3 กรณี การทดสอบทุกกรณีย่อยจะแสดงผล

(1) แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก

(2) แรงดันเฟส

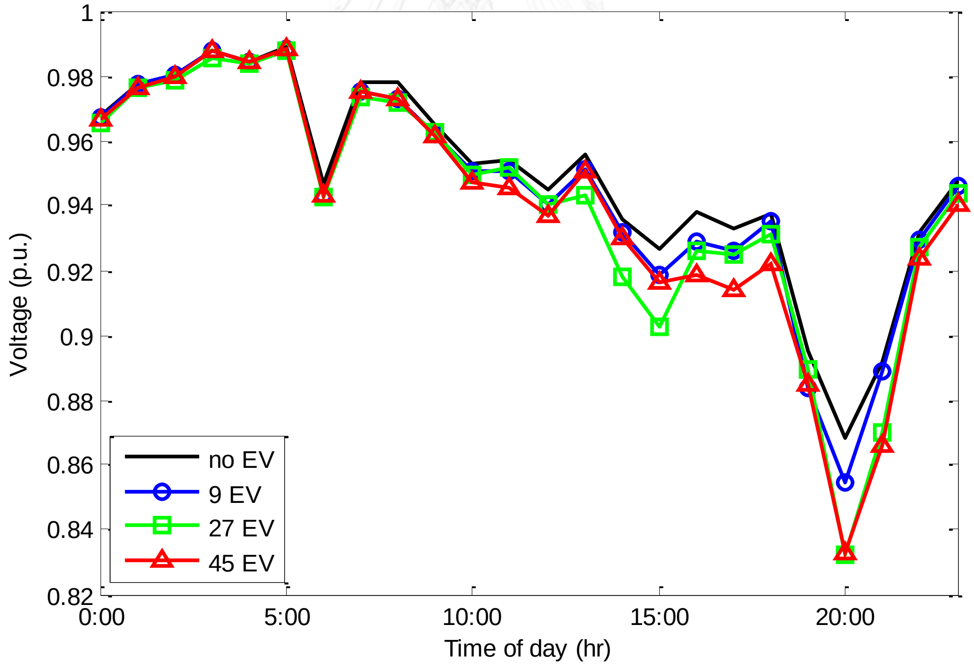
(3) ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และดัชนีแรงดันตกสูงสุด

โดยที่ในกรณีศึกษานี้จะไม่แสดงผลกำลังไฟฟ้าในระบบเนื่องจาก ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มเข้าในในระบบเมื่อเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบนั้นมีปริมาณที่น้อย ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

(1) แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก

ผลการทดสอบแสดงแรงดันในบัสที่เกิดผลกระทบมากสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือเกิดแรงดันต่ำสุดที่บัสที่ 15 ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ กรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 สามารถแสดงแรงดันลำดับบวกในรอบการคำนวณที่เกิดแรงดันต่ำที่สุดจากการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV และ BEV ได้ดังรูปที่ 5.38

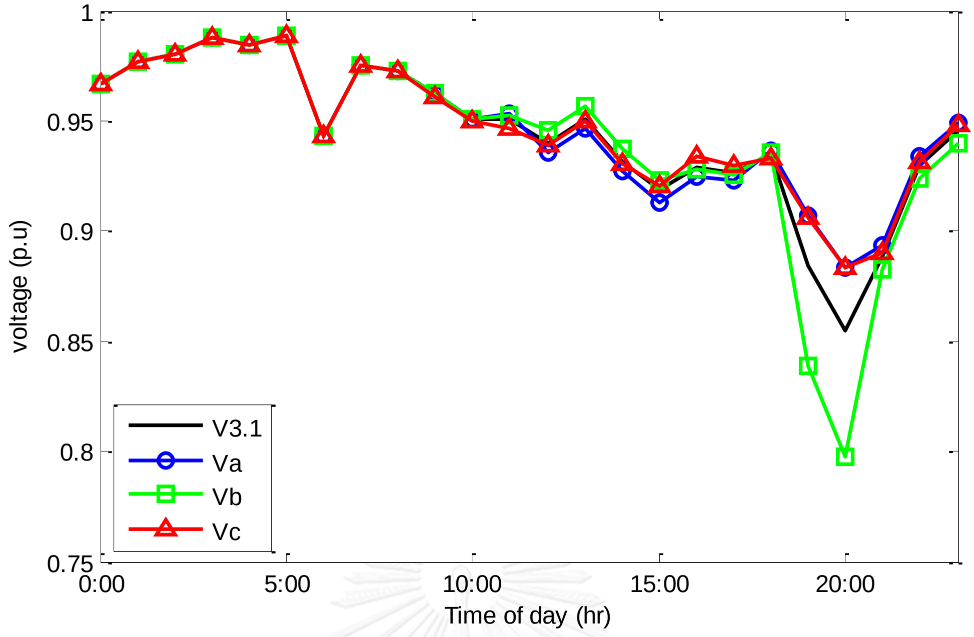
จากรูปที่ 5.38 แสดงให้เห็นว่าทุกกรณีย่อยจะเกิดแรงดันต่ำสุดที่เวลาเดียวกันคือ 20.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีแรงดันต่ำที่สุดแม้จะไม่มีการอัดประจุรถยนต์ในระบบ เมื่อมีการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 9 คันในระบบสามารถทำให้เกิดแรงดันดันต่ำกว่า 0.9 p.u. หรือมีแรงดันตกเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันพื้นฐาน



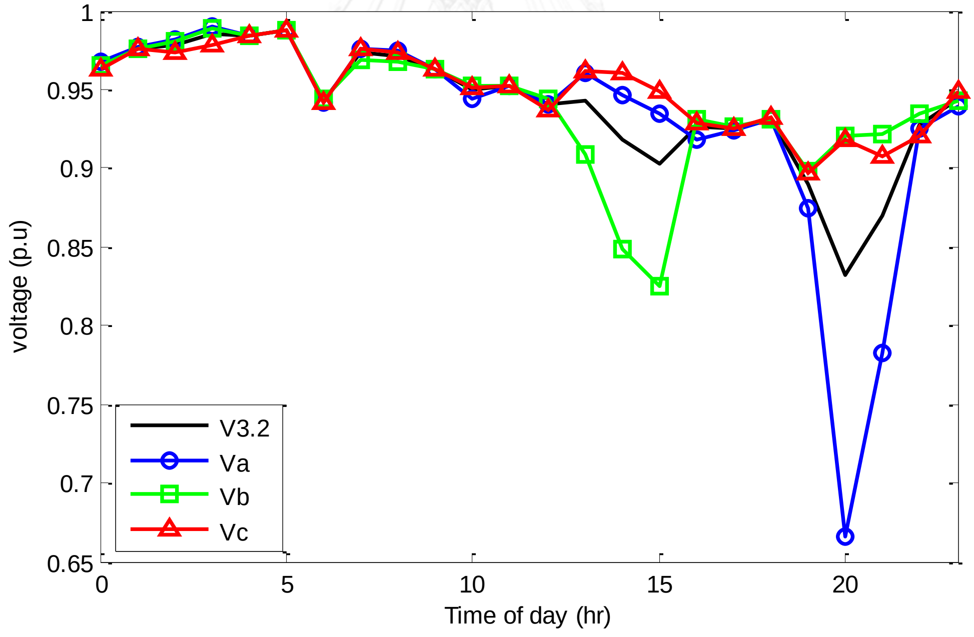
รูปที่ 5.38 แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก กรณีศึกษาย่อยที่ 1-3

(2) แรงดันเฟส

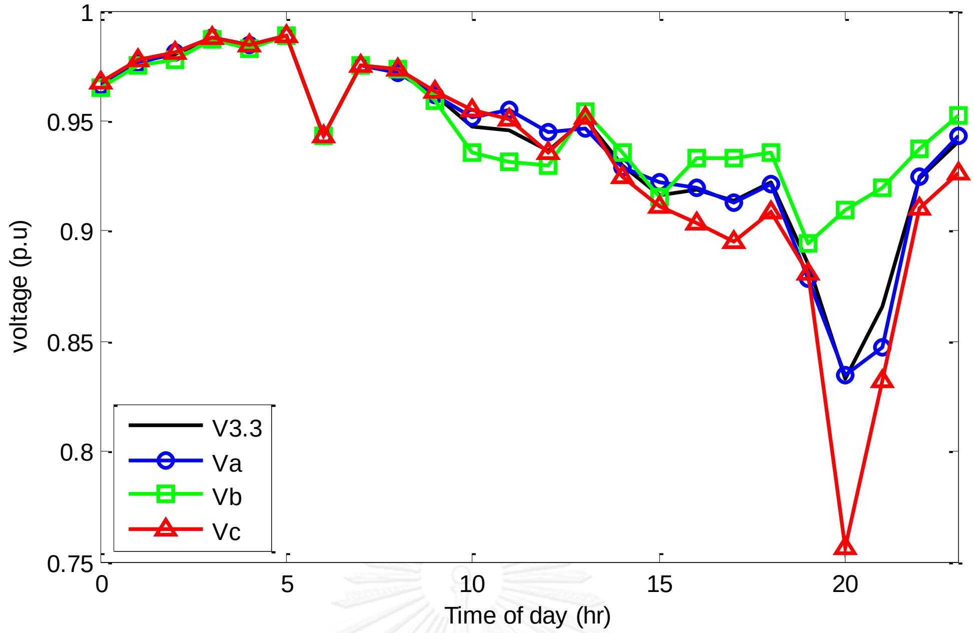
ผลการทดสอบแรงดันเฟส แยกเป็น เฟส A เฟส B และ เฟส C ในรอบการคำนวณที่ทำให้เกิดแรงดันลำดับบวกต่ำที่สุด จากกรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.39-5.41



รูปที่ 5.39 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 1



รูปที่ 5.40 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 2



รูปที่ 5.41 แรงดันเฟส กรณีศึกษาย่อยที่ 3

จากรูปที่ 5.39-5.41 แสดงแรงดันเฟสที่บัสที่ 15 ของระบบแรงดันต่ำ โดยแรงดันเฟสมีค่าต่ำสุดสามารถเกิดได้ทั้ง เฟส A เฟส B และ เฟส C โดยในแต่ละกรณีศึกษาย่อยที่ 1 มีแรงดันต่ำที่สุดเกิดขึ้นที่เฟส B กรณีศึกษาย่อยที่ 2 มีแรงดันต่ำที่สุดที่เฟส A และกรณีศึกษาย่อยที่ 3 มีแรงดันต่ำที่สุดที่เฟส C

(3) ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย และ ดัชนีแรงดันตกสูงสุด

ผลการทดสอบดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดจากกรณีศึกษาย่อยที่ 1-3 ซึ่งคำนวณมาจากแรงดันลำดับบวกในทุกรอบของการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตาราง ที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยและดัชนีแรงดันตกสูงสุดการทดสอบที่ 3

กรณีศึกษาย่อย	**ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ย**	**ดัชนีแรงดันตกสูงสุด**
base	0.0285	0.1317
1	0.0304	0.1455
2	0.0314	0.1677
3	0.0324	0.1673

จากตารางแสดงค่า ดัชนีแรงดันตกเฉลี่ยมีค่ามากที่สุดในกรณีที่ย่อยที่ 3 แต่ค่าดัชนีแรงดันตกสูงสุดมีค่ามากที่สุดในกรณีย่อยที่ 2 ซึ่งแสดงว่าถึงแม้รถยนต์ไฟฟ้าต่ออยู่ในระบบน้อยกว่าแต่สามารถทำให้เกิดแรงดันตกสูงสุดในระบบได้มากกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปผลการทดสอบ และ ข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทที่จะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งจะกล่าวถึงข้อสรุปของผลการทดสอบที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 และในส่วนที่สองจะกล่าวถึงข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบในส่วนที่วิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ทำการพิจารณา

6.1 สรุปผลการทดลอง

(1) การอัดประจุของรถยนต์ไฟฟ้า ทั้งชนิด PHEV และ BEV มีผลกับแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยขึ้นอยู่กับระดับของการอัดประจุ จำนวนรถยนต์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ และ เวลาที่รถยนต์ไฟฟ้ารับการอัดประจุในระบบ

(2) เมื่อมีรถยนต์ไฟฟ้าอัดประจุในระบบจำนวนเท่ากัน การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าโดยมีทั้งการอัดประจุระดับที่ 1 และการอัดประจุระดับที่ 2 ทำให้มีผลกระทบด้านแรงดันไฟฟ้าและด้านกำลังไฟฟ้ารวมในระบบน้อยกว่าการอัดประจุระดับที่ 2 เพียงระดับเดียวในระบบ

(3) การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV เพียงชนิดเดียว ทำให้เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง และเกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าในระบบมากกว่าการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV เพียงอย่างเดียว เนื่องจากรถยนต์ใช้ใช้ระยะทางในการวิ่งเฉลี่ยใน 1 วันมีระยะทางน้อยกว่าระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV สามารถวิ่งได้ ทำให้การอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด BEV ใช้พลังงานน้องกว่าการอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(4) การติดตั้งสถานีอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าชนิดกระแสตรงกำลังสูงจำนวนหนึ่งสถานีในระบบทดสอบที่นำมาศึกษา โดยมีหัวจ่ายไฟฟ้าชนิดกระแสตรงขนาด 50 กิโลวัตต์ จำนวน 8 หัวจ่ายต่อหนึ่งสถานี ไม่เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงจนเกินปริมาณที่ยอมรับได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ระบบทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบที่มาจากระบบไฟฟ้าของทวีปยุโรป ซึ่งหากนำการทดสอบไปใช้กับระบบไฟฟ้าของประเทศไทยจะสามารถหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย และสามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบไฟฟ้าของประเทศไทยเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าได้

(2) พฤติกรรมการใช้รถยนต์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มาจากผลสำรวจของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งผลสำรวจนี้ในประเทศไทยยังไม่มีการทำสำรวจขึ้นมา หากมีผลสำรวจพฤติกรรมการใช้รถยนต์ในประเทศไทยจะส่งผลดีต่อการศึกษาในอนาคตเป็นอย่างมาก

(3) การทดสอบหาแรงดันเปลี่ยนแลงสามารถทำได้ด้วยการใช้วิธีการอื่น เช่น สารจำลองเหตุการณ์ด้วยวิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โลซึ่งจะครอบคลุมจำนวนเหตุการณ์ได้มากกว่าวิธีการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ หรือวิธีการวิเคราะห์หาตัวแปรที่สามารถก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันเปลี่ยนแปลงได้มากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

[1] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rastegar, "Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 4, pp. 1351-1360, 2013.

[2] A. S. Masoum, S. Deilami, P. S. Moses, M. A. S. Masoum, and A. Abu-Siada, "Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation," *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. 5, pp. 877-888, 2011.

[3] 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.

[4] L. P. Fernandez, T. G. S. Roman, R. Cossent, C. M. Domingo, and P. Frias, "Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 26, pp. 206-213, 2011.

[5] M. K. Gray and W. G. Morsi, "Power Quality Assessment in Distribution Systems Embedded With Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 30, pp. 663-671, 2015.

[6] M. Etezadi-Amoli, K. Choma, and J. Stefani, "Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations," *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 25, pp. 1883-1887, 2010.

[7] C. Jiang, R. Torquato, D. Salles, and W. Xu, "Method to assess the power quality impact of plug-in electric vehicles," in 2014 16*th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),* 2014, pp. 177-180.

[8] O. M. F. Camacho, P. B. Nørgård, N. Rao, and L. Mihet-Popa, "Electrical Vehicle Batteries Testing in a Distribution Network Using Sustainable Energy," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 5, pp. 1033-1042, 2014.

[9] S. Kundu and I. A. Hiskens, "Overvoltages due to Synchronous Tripping of Plug-in Electric-Vehicle Chargers Following Voltage Dips," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 29, pp. 1147-1156, 2014.

[10] M. Brenna, F. Foiadelli, and M. Longo, "The Exploitation of Vehicle-to-Grid Function for Power Quality Improvement in a Smart Grid," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on,* vol. 15, pp. 2169-2177, 2014.

[11] "Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging Station Hosts," National Renewable Energy Laboratory (NREL)2012.

[12] 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.

[13] S. International, "SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler," in *SAE J*1772, ed, 2012.

[14] IEC, "Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements," in *IEC* 62196-1 *ed*3.0 (2014-06), ed, 2014.

[15] *CHAdeMO Association*. Available: http://www.chademo.com/

[16] Y. E. R. Association. *Why we do not drive all electric?* Available: http://www.yera.be/waarom-rijden-we-niet-allemaal-elektrisch/

[17] C. W. K.Young, L.Wang and K.Strunz, *Electric Vehicle Battery Technologies*: Springer, 2013.

[18] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *IEEE Std* 1159-2009 (*Revision of IEEE Std* 1159-1995), pp. c1-81, 2009.

[19] ไชยยะ แซ่มช้อย, คู่มือคุณภาพไฟฟ้า: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในบรมราชูปถัมภ์, 2557.

[20] R. C. Leou, C. L. Su, and C. N. Lu, "Stochastic Analyses of Electric Vehicle Charging Impacts on Distribution Network," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 29, pp. 1055-1063, 2014.

[21] การไฟฟ้านครหลวง, "ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2558," ed, 2558.

[22] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2559," 2559.

[23] *National Household Travel Survey*. Available: http://nhts.ornl.gov

[24] K.Strunz, E.Abbasi, and C. Abbey, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources," CIGRE Task Force C6.04.02,April 2014.

[25] K.Yanus, H.Parra, and M.Reza, "Distrinution Grid Impact of Plug-In Electric Vehicles Charging at Fast Charging Stations Using Stochastic Charging Model," in *The* 2011-14*th European Conference on Power Electronics and Application*, August 2011, pp. 1-11.

[26] *Load Profile ::* การศึกษาลักษณะการใช้ไฟฟ้า. Available: http://pastpea.pea.co.th/th/loadprofile_t/show.php

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข้อมูลระบบทดสอบ

ภาคผนวกแสดงรายระเอียดของข้อมูลระบบทดสอบแรงดันปานกลางและ ระบบทดสอบแรงดันต่ำดังต่อไปนี้

(1) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง European MV distribution network

ตารางที่ ผ.1 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

Node from	Node to	R'ph (Ω/km)	X'ph (Ω/km)	R'0 (Ω/km)	X'0 (Ω/km)	L (km)
1	2	0.501	0.716	0.817	1.598	2.82
2	3	0.501	0.716	0.817	1.598	4.42
3	4	0.501	0.716	0.817	1.598	0.61
4	5	0.501	0.716	0.817	1.598	0.56
5	6	0.501	0.716	0.817	1.598	1.54
6	7	0.501	0.716	0.817	1.598	0.24
7	8	0.501	0.716	0.817	1.598	1.67
8	9	0.501	0.716	0.817	1.598	0.32
9	10	0.501	0.716	0.817	1.598	0.77
10	11	0.501	0.716	0.817	1.598	0.33
11	4	0.501	0.716	0.817	1.598	0.49
3	8	0.501	0.716	0.817	1.598	1.3
12	13	0.51	0.366	0.658	1.611	4.89
13	14	0.51	0.366	0.658	1.611	2.99
14	8	0.51	0.366	0.658	1.611	2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ผ.2 ข้อมูลหม้อแปลงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

Node from	Node to	Connection	V1 (kV)	V2 (kV)	Ztr (Ω)	S rated (MVA)
0	1	3-ph Dyn1	110	20	0.016+j1.92	25
0	12	3-ph Dyn1	110	20	0.016+j1.92	25

ตารางที่ ผ.3 ข้อมูลบัสของระบบจำหน่ายฟ้าแรงดันปานกลาง

Node	Apparent Power, S [kVA]		Power Factor, pf	
	Residential	Commercial	Residential	Commercial
1	15300	5100	0.98	0.95
2	---	---	---	---
3	285	265	0.97	0.85
4	445	---	0.97	---
5	750	---	0.97	---
6	565	---	0.97	---
7	---	90	---	0.85
8	605	---	0.97	---
9	---	675	---	0.85
10	490	80	0.97	0.85
11	340	---	0.97	---
12	15300	5280	0.98	0.95
13	---	40	---	0.85
14	215	390	0.97	0.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(2) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ European LV distribution network

ตารางที่ ผ.4 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำโหลดผู้พักอาศัย

Node from	Node to	Conductor ID	l (m)
R1	R2	UG1	35
R2	R3	UG1	35
R3	R4	UG1	35
R4	R5	UG1	35
R5	R6	UG1	35
R6	R7	UG1	35
R7	R8	UG1	35
R8	R9	UG1	35
R9	R10	UG1	35
R3	R11	UG3	30
R4	R12	UG3	35
R12	R13	UG3	35
R13	R14	UG3	35
R14	R15	UG3	30
R6	R16	UG3	30
R9	R17	UG3	30
R10	R18	UG3	30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ผ.5 ข้อมูลความต้านทานของสายส่งระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

Conductor ID		Phase impedance matrix [Ω /km]		
		A	B	C
UG1 / 3-ph	A	0.287 + j0.167	0.121 + j0.110	0.125 + j0.070
	B	0.121 + j0.110	0.279 + j0.203	0.121 + j0.110
	C	0.125 + j0.070	0.121 + j0.110	0.287 + j0.167
UG2 / 3-ph	A	0.455 + j0.204	0.185 + j0.146	0.190 + j0.107
	B	0.185 + j0.146	0.444 + j0.238	0.185 + j0.146
	C	0.190 + j0.107	0.185 + j0.146	0.455 + j0.204
UG3 / 3-ph	A	1.152 + j0.458	0.321 + j0.390	0.330 + j0.359
	B	0.321 + j0.390	1.134 + j0.477	0.321 + j0.390
	C	0.330 + j0.359	0.321 + j0.390	1.152 + j0.458

ตารางที่ ผ.6 ข้อมูลหม้อแปลงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

Node from	Node to	Connection	V1 (kV)	V2 (kV)	Ztr (Ω)	S rated (kVA)
R0	R1	3-ph Dyn1	20	0.4	0.0032+j0.0128	500
I0	I1	3-ph Dyn1	20	0.4	0.0107+j0.0427	150
C0	C1	3-ph Dyn1	20	0.4	0.0053+j0.0213	300

ตารางที่ ผ.7 ข้อมูลบัสของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

Node	Apparent Power, S [kVA]	Power Factor, pf
R1	200	0.95
R11	15	0.95

Node	Apparent Power, S [kVA]	Power Factor, pf
R15	52	0.95
R16	55	0.95
R17	35	0.95
R18	47	0.95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภรณี ไชยลังกา เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ระหว่างการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต นางสาวภรณี ไชยลังกา มีผลงานตีพิมพ์และนำเสนอบทความ “Analysis of Voltage Variations caused by Electric Vehicle Charging in Distribution Systems” ในการประชุมทางวิชาการ The 9th Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering (RCEEE 2016) ระหว่างวันที่ 17-18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2559 ณ กรุงฮานอย ประเทศเวียดนาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University