



# ผลกระทบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้า ต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

Impact of Electric Vehicle Loads on Power System Stability



กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

ผลกระทบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าต่อ  
เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง  
Impact of Electric Vehicle Loads on Power  
System Stability

กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

# ผลกระทบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

## Impact of Electric Vehicle Loads on Power System Stability

ผู้เขียน กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 260 หน้า พ.ศ. 2565

### ข้อมูลทางบรรณานุกรม

กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

ผลกระทบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

ปทุมธานี: ศูนย์นวัตกรรมการออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนซ์

260 หน้า

1.ยานยนต์ไฟฟ้า 2.เสถียรภาพแรงดัน 3.การไหลของกำลังไฟฟ้า

4.ระบบไฟฟ้ากำลัง 5.สถานีประจุไฟฟ้า 6.เทคนิคการหาค่าความเหมาะสม

### สงวนลิขสิทธิ์

ห้ามคัดลอก ทำซ้ำ ดัดแปลง จัดพิมพ์ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใด ๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตจากผู้เขียน

### ออกแบบปก/จัดพิมพ์โดย

ศูนย์นวัตกรรมการออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนซ์

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 02-549-4531 โทรสาร 02-549-4500

## คำนำ

ตำราฉบับนี้ได้นำเสนอผลกระทบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Impact of Electric Vehicle Loads on Power System Stability) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนวิชา 04411807 หัวข้อเลือกในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (Selected Topics in Electrical Power Engineering) สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งในการผลักดันให้เกิดองค์ความรู้สมัยใหม่ด้านวิศวกรรมไฟฟ้า มีการกล่าวถึงองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้ากำลัง เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง การแบ่งประเภทยานยนต์ไฟฟ้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยานยนต์ไฟฟ้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยานยนต์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกรีด เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การกำหนดตำแหน่งการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า และผลกระทบของยานยนต์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ตำรานี้จะได้ส่งเสริมให้เกิดการเรียนรู้และการต่อยอดเพื่อไปทำงานวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์เชิงลึก จึงจำเป็นต้องถ่ายทอดให้นักศึกษาหรือนักวิจัยทราบที่ต้องวิเคราะห์เพื่อให้ทราบที่มาที่ไปของสูตรความรู้ หรือศาสตร์เฉพาะด้านนี้

ตำราเล่มนี้ได้รวบรวมเนื้อหาสาระมาจากประสบการณ์ของผู้เขียนที่เรียนรู้มา รวมทั้งความรู้จากการทำวิจัยเชิงลึกที่สะสมมาเป็นเวลากว่า 25 ปี หากมีข้อผิดพลาดในตำราเล่มนี้ผู้เขียนพร้อมปรับปรุงแก้ไข ถ้ามีความดีในตำราเล่มนี้ก็ขอให้มีส่วนร่วมกับผู้ที่มีพระคุณทั้งหลายที่มีต่อผู้เขียน และขอขอบคุณผู้ตรวจ วิศวกร นักวิจัย ในหน่วยวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง และต้องขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เป็นผู้ว่าจ้างของผู้เขียนที่ได้ให้โอกาสผู้เขียนทำงานมาร่วม 25 ปี ให้ผู้เขียนได้มีชีวิตและความคิดอิสระอย่างเต็มที่ซึ่งหาได้ยากมากจากสถาบันการศึกษาและจากที่ทำงานอื่นทั่วไป

กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

14 ธันวาคม 2564



# สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 บทนำ	1
1.2 ทิศทางการใช้พลังงานในปัจจุบัน	1
1.3 ทิศทางของยานยนต์ไฟฟ้า	5
1.4 องค์ประกอบของตำราฉบับนี้	11
1.5 บทสรุป	12
เอกสารอ้างอิงบทที่ 1	13
<b>บทที่ 2 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า</b>	<b>16</b>
2.1 บทนำ	16
2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง	16
2.3 การผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย	18
2.4 เทคโนโลยีพลังงานทดแทน	22
2.5 ตัวแปรสำคัญของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่	25
2.6 เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง	29
2.7 บทสรุป	32
เอกสารอ้างอิงบทที่ 2	33
<b>บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง</b>	<b>36</b>
3.1 บทนำ	36
3.2 กำลังไฟฟ้าในระบบหนึ่งเฟส	36
3.3 การไหลของกำลังไฟฟ้า	40
3.4 ระบบไฟฟ้าสามเฟส	42
3.5 การวิเคราะห์เป็นค่าต่อเฟส	45
3.6 การแปลงค่าอิมพีแดนซ์เดลต้า-สตาร์	46
3.7 กำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟสสมดุล	48
3.8 ระบบค่าต่อหน่วย	49
3.9 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส	51
3.10 ขีดจำกัดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ	55
3.11 สายส่งระยะสั้น	56

3.12 สายส่งระยะปานกลาง	57
3.13 สายส่งระยะยาว	59
3.14 การไหลดอิมพีแดนซ์เสิร์จ	62
3.15 การไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนไหลผ่านสายส่ง	63
3.16 บทสรุป	65
เอกสารอ้างอิงบทที่ 3	67
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้ากำลัง</b>	<b>68</b>
4.1 บทนำ	68
4.2 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้า	68
4.3 สมการกำลังไฟฟ้าที่บัส	69
4.4 การเขียนเมทริกซ์ของบัสแอดมิตแตนซ์	70
4.5 หม้อแปลงและจุดต่อ	71
4.6 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	73
4.7 บทสรุป	85
เอกสารอ้างอิงบทที่ 4	86
<b>บทที่ 5 เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง</b>	<b>87</b>
5.1 บทนำ	87
5.2 การจำแนกเสถียรภาพระบบไฟฟ้า	87
5.3 เสถียรภาพเชิงมุม	88
5.4 เสถียรภาพแรงดัน	90
5.5 เสถียรภาพระยะยาวและระยะปานกลาง	90
5.6 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก	91
5.7 เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว	104
5.8 การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง	113
5.9 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	116
5.10 บทสรุป	128
เอกสารอ้างอิงบทที่ 5	129
<b>บทที่ 6 วิวัฒนาการยานยนต์ไฟฟ้า</b>	<b>131</b>
6.1 บทนำ	131
6.2 ประเภทยานยนต์ไฟฟ้า	131
6.3 เทคโนโลยีและการจัดการแบตเตอรี่	138

6.4 การบูรณาการยานยนต์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า	140
6.5 บทสรุป	148
เอกสารอ้างอิงบทที่ 6	149
<b>บทที่ 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยานยนต์ไฟฟ้า</b>	<b>154</b>
7.1 บทนำ	154
7.2 รูปแบบโหลดยานยนต์ไฟฟ้า	155
7.3 การประจุแบตเตอรี่สำหรับโหลดยานยนต์ไฟฟ้า	165
7.4 บทสรุป	168
เอกสารอ้างอิงบทที่ 7	169
<b>บทที่ 8 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเมื่อโหลดยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น</b>	<b>172</b>
8.1 บทนำ	172
8.2 เสถียรภาพระบบไฟฟ้าสัญญาณขนาดเล็กเมื่อโหลดยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	172
8.3 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	181
8.4 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เมื่อโหลดยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า	184
8.5 บทสรุป	201
เอกสารอ้างอิงบทที่ 8	202
<b>บทที่ 9 ตำแหน่งการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า</b>	<b>206</b>
9.1 บทนำ	206
9.2 การกำหนดตำแหน่งสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า	206
9.3 การกำหนดตำแหน่งสถานีประจรร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม	212
9.4 การประมาณการจำนวนสถานีประจุ	218
9.5 บทสรุป	224
เอกสารอ้างอิงบทที่ 9	225
<b>บทที่ 10 ผลกระทบของยานยนต์ไฟฟ้าที่ต่อร่วมกับกริด</b>	<b>229</b>
10.1 บทนำ	229
10.2 ยานยนต์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	233
10.3 การวิเคราะห์การไหลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	235
10.4 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม	242



10.5 ผลกระทบของยานยนต์ไฟฟ้าที่ต่อร่วมกับ ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	244
10.6 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบยานยนต์ไฟฟ้าต่อ ร่วมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	247
10.7 บทสรุป	253
เอกสารอ้างอิงบทที่ 10	254
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>257</b>
<b>ดัชนี</b>	<b>282</b>

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ความต้องการพลังงานปฐมภูมิของโลก	2
รูปที่ 1.2 การใช้พลังงานของโลกที่แบ่งตามภาคกิจกรรมการบริโภค	3
รูปที่ 1.3 ทิศทางการซื้อขายรถยนต์และยานยนต์ไฟฟ้าตามเทคโนโลยี	4
รูปที่ 1.4 รูปแบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับประจุแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า	8
รูปที่ 1.5 องค์ประกอบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้า	9
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานระบบไฟฟ้ากำลัง	17
รูปที่ 2.2 ผลกระทบผู้บริโภคตามระยะเวลาของ DSM	21
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าย่อยและการควบคุม	30
รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสจ่ายให้โหลด	36
รูปที่ 3.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมและสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าของโหลด RL และ RC	39
รูปที่ 3.3 วงจรสองแหล่งจ่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	40
รูปที่ 3.4 เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟส	42
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมวงจรสมมูลโหลดไฟฟ้าต่อแบบสตาร์	43
รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมวงจรสมมูลโหลดไฟฟ้าต่อแบบเดลต้า	44
รูปที่ 3.7 วงจรหนึ่งเฟสแทนสามเฟส เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าสามเฟส	46
รูปที่ 3.8 การแปลงค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างเดลต้าเป็นสตาร์ของระบบสามเฟสสมดุล	46
รูปที่ 3.9 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าเฟสและแรงดันไฟฟ้าสาย	47
รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสในสภาวะคงตัว	52
รูปที่ 3.11 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับบัสอนันต์	52
รูปที่ 3.12 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อต่อโหลดตัวประกอบกำลังแบบล่าหลัง	53
รูปที่ 3.13 เฟสเซอร์เครื่องกำเนิดจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงคงที่แต่ตัวประกอบกำลังต่างกัน	53

รูปที่ 3.14	วงจรสมมูลเครื่องกลเชิงโครนัสแบบขั้วยื่น	54
รูปที่ 3.15	เฟสเซอร์เครื่องกำเนิดเชิงโครนัสแบบขั้วยื่น	54
รูปที่ 3.16	ขีดจำกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	56
รูปที่ 3.17	(a) แบบจำลองสายส่งระยะสั้น (b) วงจรข่ายสองท่า	57
รูปที่ 3.18	แบบจำลองสายส่งระยะปานกลาง	58
รูปที่ 3.19	การจำลองสายส่งระยะยาว	59
รูปที่ 3.20	แบบจำลองสายส่ง แบบ $\pi$ สำหรับสายส่งระยะยาว	62
รูปที่ 4.1	ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อพิจารณาหากำลังไฟฟ้าที่บัส	69
รูปที่ 4.2	หม้อแปลงที่จุดต่อเป็น $1:a$	71
รูปที่ 4.3	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	73
รูปที่ 4.4	ลำดับชั้นการแก้ปัญหาการไหลของโหลดด้วยวิธีเกาส์ไซเดล	75
รูปที่ 4.5	รูปแบบสายส่งเพื่อหาค่าการสูญเสียในสาย	76
รูปที่ 4.6	วิธีของนิวตัน	78
รูปที่ 4.7	ลำดับชั้นวิธีนิวตันราฟสัน	81
รูปที่ 4.8	ลำดับชั้นวิธีแยกเร็วเพื่อแก้ปัญหาการไหลของโหลด	84
รูปที่ 5.1	การจำแนกเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง	88
รูปที่ 5.2	เงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด	106
รูปที่ 5.3	ขีดจำกัดกำลังสูงสุดของเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน	107
รูปที่ 5.4	ไดอะแกรมเส้นเดียวเครื่องกำเนิดต่อกับระบบใหญ่ที่มีการลัดวงจร	109
รูปที่ 5.5	เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันในการลัดวงจรสามเฟสด้านส่ง	109
รูปที่ 5.6	เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤต	110
รูปที่ 5.7	ไดอะแกรมเส้นเดียวการลัดวงจรห่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	111
รูปที่ 5.8	เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเมื่อลัดวงจรห่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	112
รูปที่ 5.9	เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรห่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	113
รูปที่ 5.10	การจำลองตัวเสถียรภาพในระบบ	115
รูปที่ 6.1	ทิศทางการไหลกำลังของยานยนต์ไฟฟ้าใช้พลังงานแบบผสมผสาน	133
รูปที่ 6.2	ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานผสมผสานแบบอนุกรม	134
รูปที่ 6.3	ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานผสมผสานแบบขนาน	135

รูปที่ 6.4	ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานผสมผสานแบบผสม (อนุกรม-ขนาน)	136
รูปที่ 6.5	สถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	137
รูปที่ 6.6	การเปรียบเทียบคุณลักษณะหว่างแบตเตอรี่กับคาปาซิเตอร์ อัลตรา	139
รูปที่ 7.1	วงจรเทียบเคียงยานยนต์ไฟฟ้า	157
รูปที่ 7.2	วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน	158
รูปที่ 7.3	วงจรเทียบเคียงการประจุยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเป็น คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน	160
รูปที่ 7.4	รูปแบบสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	162
รูปที่ 7.5	วงจรสมมูลสถานีประจุเร็วแบบ 3 เฟสสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	163
รูปที่ 7.6	วงจรสมมูลชุดประจุแบตเตอรี่ แบบ 1 เฟส สำหรับยานยนต์ ไฟฟ้า	164
รูปที่ 7.7	รูปแบบหัวต่อสำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า	166
รูปที่ 8.1	ระบบไฟฟ้าทดสอบ 6 บัส	173
รูปที่ 8.2	การหาค่าอัตราส่วนการหน่วงที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO สำหรับค่าพารามิเตอร์ PSS	175
รูปที่ 8.3	การแกว่งของความถี่โรเตอร์เครื่องจักรกลซิงโครนัสกรณีโหลด ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 50 % ที่บัส B3 ที่เวลา 2 วินาที	178
รูปที่ 8.4	การแกว่งของความถี่โรเตอร์เครื่องจักรกลซิงโครนัส กรณีโหลด ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 100 % ที่บัส B3 ที่เวลา 2 วินาที	178
รูปที่ 8.5	การแกว่งของความถี่โรเตอร์เครื่องจักรกลซิงโครนัส กรณีโหลด ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 150 % ที่บัส B3 ที่เวลา 2 วินาที	179
รูปที่ 8.6	การแกว่งของความถี่โรเตอร์เครื่องจักรกลซิงโครนัส กรณีโหลด ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 200 % ที่บัส B3 ที่เวลา 2 วินาที	179
รูปที่ 8.7	การแกว่งของความถี่โรเตอร์เครื่องจักรกลซิงโครนัส กรณีโหลด ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 300 % ที่บัส B3 ที่เวลา 2 วินาที	180
รูปที่ 8.8	GUI สำหรับผู้ใช้งานกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโหลดยานยนต์ ไฟฟ้า	183
รูปที่ 8.9	โหลดยานยนต์ไฟฟ้าที่หน้าต่าง GUI ใน Simulink ของ โปรแกรม PSAT	184

รูปที่ 8.10	ระบบทดสอบ IEEE14 บัส กรณีติดตั้งโหลดยานยนต์ไฟฟ้า บัสที่ 14	185
รูปที่ 8.11	รูปแบบแรงดันไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	186
รูปที่ 8.12	รูปแบบแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสกรณีโหลดยานยนต์ไฟฟ้า เพิ่มขึ้น 50 MVA ที่บัส 15	187
รูปที่ 8.13	รูปแบบแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส กรณีโหลดยานยนต์ไฟฟ้า เพิ่มขึ้น 79 MVA ที่บัส 15	187
รูปที่ 8.14	รูปแบบของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง ขนาดโหลดที่บัส 15 กรณีพิจารณาเป็นโหลดแบบกำลัง ไฟฟ้าคงที่ PQ โหลด	188
รูปที่ 8.15	รูปแบบของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดโหลดที่บัส 15 กรณีพิจารณาเป็นโหลดยานยนต์ ไฟฟ้าแบบที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า	189
รูปที่ 8.16	การเปรียบเทียบ PV curves เมื่อมีการปรับค่าขนาดจาก 5MVA ถึง 79MVA ของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าและโหลดแบบ PQ ที่บัส 15	189
รูปที่ 8.17	ระบบทดสอบ 26 บัส กรณีติดตั้งโหลดยานยนต์ไฟฟ้าสถานี ประจุเร็วจำนวน 7 สถานี	192
รูปที่ 8.18	ขั้นตอนการหาขนาดและตำแหน่งของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ แบงค์แบบค่าคงที่	193
รูปที่ 8.19	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เหมาะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ขนาดของตัวคาปาซิเตอร์แบบค่าคงที่	198
รูปที่ 9.1	ขั้นตอนการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีประจุเร็วที่เหมาะสมใน ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ด้วยวิธีการ PSO	208
รูปที่ 9.2	การเปรียบเทียบรูปแบบของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าแบบ คงตัวกรณีติดตั้งสถานีประจุเร็วขนาด 5.04 MW ในระบบ ทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส	210
รูปที่ 9.3	ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 33 บัส และการแบ่งกลุ่มของ ตำแหน่งของสถานีประจุเร็วจำนวน 7 สถานี	213

รูปที่ 9.4	การเปรียบเทียบรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 33 บัส เมื่อติดตั้งสถานีประจุเร็วสำหรับโหลดยานยนต์ไฟฟ้าและมีการติดตั้งสถานีไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	217
รูปที่ 9.5	ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สายส่งไฟฟ้ากำลังการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสถานีวิทยุบุรี ขนาดพิกัดรวม 90 MVA	220
รูปที่ 9.6	จำนวนสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อมีการปรับค่าการเป็นเจ้าของยานยนต์ไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของจำนวนประชากร	222
รูปที่ 10.1	รูปแบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับประจุนานยนต์ไฟฟ้า	231
รูปที่ 10.2	องค์ประกอบเบื้องต้นสำหรับโหลดยานยนต์ไฟฟ้า	232
รูปที่ 10.3	ภาพรวมผลกระทบของยานยนต์ไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้ากำลัง	234
รูปที่ 10.4	ระบบทดสอบปฏิกิริยา IEEE 33 บัส เมื่อมีการต่อ PEVs เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง	245
รูปที่ 10.5	รูปทรงของรูปแบบแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสในสถานะคงตัวจากประเภทของโหลดที่แตกต่างกันในระบบไฟฟ้า	249
รูปที่ 10.6	รูปทรงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างบัสของระบบไฟฟ้าในสถานะคงตัวจากประเภทของโหลดที่แตกต่างกันในระบบไฟฟ้า	251

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย 23
ตารางที่ 6.2	ข้อดีและข้อเสียของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานผสม ผสมแต่ละชนิด 136
ตารางที่ 6.2	พารามิเตอร์หลักของแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า 138
ตารางที่ 7.1	ดัชนีโหลดในแต่ละประเภท 157
ตารางที่ 7.2	รูปแบบทั่วไปของระดับการประจุและชนิดของหัวประจุของ ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศจีน ยุโรป ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา 167
ตารางที่ 8.1	เงื่อนไขในการทดสอบการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณ ขนาดเล็กชั่วคราวเมื่อโหลดยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบ ไฟฟ้ากำลัง 174
ตารางที่ 8.2	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ PSO 174
ตารางที่ 8.3	การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ PSS ที่เหมาะสมจากการ เพิ่มขึ้นของโหลดยานยนต์ไฟฟ้า 176
ตารางที่ 8.4	เปรียบเทียบความถี่ของโรเตอร์และอัตราส่วนการหน่วงของ ระบบ 177
ตารางที่ 8.5	ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างสมการโหลดยานยนต์ไฟฟ้า 183
ตารางที่ 8.6	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบและค่าแรงดัน ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของโหลด 190
ตารางที่ 8.7	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อโหลดยานยนต์ ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบค่าคงที่ ที่เหมาะสม 196
ตารางที่ 8.8	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อโหลดยานยนต์ ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบค่าคงที่ ที่เหมาะสม 197
ตารางที่ 8.9	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสุดจากการทดสอบโปรแกรมโหลด แบบวนซ้ำ 199
ตารางที่ 8.10	การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธีการ HIMPL ที่ถูก พัฒนาขึ้น 199

ตารางที่ 9.1	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบก่อน-หลัง การติดตั้งสถานีประจุเร็วสำหรับ PEVs ด้วยวิธีการ PSO	211
ตารางที่ 9.2	ขอบเขตตัวแปรที่เป็นไปได้ของตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 7 กลุ่ม และสถานีไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	215
ตารางที่ 9.3	การเปรียบเทียบผลการติดตั้งของกลุ่มยานยนต์ไฟฟ้าและตำแหน่ง PV	216
ตารางที่ 9.4	ผลการประมาณการจำนวนสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	222
ตารางที่ 9.5	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบกรณีที่มี การเพิ่มขึ้นของสถานีประจุเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	223
ตารางที่ 10.1	การเปรียบเทียบรูปแบบแรงดันไฟฟ้าจากกรณีศึกษาของ โหลดในแต่ละชนิด	248
ตารางที่ 10.2	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่งระหว่างบัส ในสถานะคงตัวจากประเภทของโหลดที่แตกต่างกันในระบบ ไฟฟ้า	250
ตารางที่ 10.3	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบและค่าแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนของโหลด (LVD) (Z, I, P และ PEVs)	252



**ผลกระทบของโหลดยานยนต์ไฟฟ้าต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง**  
**Impact of Electric Vehicle Loads on Power System Stability**

