การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์

A Study in Voltage Stability of Power System with Solar Photovoltaic Source

โดย

นายเกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
นายคณิต โอปิลันทพงษ์
นายคุณากร อุบลม่วง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์
A Study in Voltage Stability of Power System with Solar Photovoltaic Source

T144379

โดย

นายเกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
นายคณิต โอปิลันทพงษ์
นายคุณากร อุบลม่วง

หมวดหมู่.........
เลขทะเบียน 144379
วัน เดือน ปี 24 พ.ย. 2559

.b 12820192X
.i ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

A Study in Voltage Stability of Power System with Solar Photovoltaic Source

Keattipoom Keawprasert

Kanit Opilantapong

Khunakorn Ubonmoung

THIS PROJECT SUMMITED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF THECHNOLOGY LADKRABANG
2015

ปีการศึกษา 2558

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์

A Study in Voltage Stability of Power System with Solar Photovoltaic Source

โดย

เกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
คณิต โอปิลันทพงษ์
คุณากร อุบลม่วง

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วรวรรธน์ นาคะวิโร

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ

1. นายเกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
2. นายคณิต โอปิลันทพงษ์
3. นายคุณากร อุบลม่วง

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วรวรรธน์ นาคะวิโร)

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์

นายเกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
นายคณิต โอปิลันทพงษ์
นายคุณากร อุบลม่วง
ดร.วรวรรธน์ นาคะวิโร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ในระยะหลังแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้น เนื่องจากเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์และข้อจำกัดทางสิ่งแวดล้อมหลายประการ ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังอาจประสบกับปัญหาการดำเนินการระบบต่างๆ ซึ่งเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นหนึ่งในภัยคุกคามต่อความมั่นคงของระบบซึ่งอาจนำมาสู่การเกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้างได้ ปริญญานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันแบบพลวัตในระบบทดสอบที่มีการเชื่อมแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นที่ผลจากกำลังการผลิตของ PV ที่แตกต่างกันต่อการพังทลายของแรงดัน นอกจากนั้นยังสนใจผลของการทำงานของอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer : ULTC) ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) และตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเสถียรภาพแรงดัน แบบจำลองระบบทดสอบได้ถูกพัฒนาขึ้นในโปรแกรม Digsilent Power Factory โดยจำลองให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบอยู่ในระดับสูงและระดับการผลิตของ PV มีค่าแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล นอกจากนั้นได้มีการคำนวณหาดัชนีบ่งชี้เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาศัยเทคนิคการวัดค่ามุมเฟส (Phaser Measurement Technique)

Voltage Stability Studies in a Power System with Solar Photovoltaic Source

Keattipoom	Keawprasert
Kanit	Opilantapong
Khunakorn	Ubonmoung
Dr. Worawat	Nakawiro
Advisor	

Year 2015

ABSTRACT

Recently, more solar photovoltaics (PV) have been connected to power system due to economic and environmental reasons. This could potentially endanger stable operation that might eventually leads to wide area blackout. Therefore, this project investigates dynamic voltage stability of a test power system with interconnected solar PV. The emphasis is given on the impact of different levels of solar power on voltage collapse. Moreover, the study is extended to study the impact of operation of major power system equipment such as Under Load Tap Changer (ULTC), Automatic Voltage Regulator (AVR) and Over Excitation Limiter (OEL) of synchronous generator on voltage stability of the system. Simulation is carried out on Digsilent Power Factory. The test system is assumed to be heavily loaded. Different generation levels of solar PV are used to reflect seasonal variation of solar irradiance. A voltage stability index based on phasor measurement technique is used to indicate proximity to the collapse point. Simulation results reveal that generation level or solar PV has direct impact on voltage stability of the power system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการช่วยเหลือสนับสนุนจาก ดร.วรวรรธน์ นาคะวิโร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และผู้มีพระคุณต่อคณะผู้จัดทำทุกท่าน ผู้ที่ให้สนับสนุนด้านคำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	5
2.2 เสถียรภาพแรงดัน	6
2.3 แรงดันพังทลาย	6
2.4 ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ	9
2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป	9
2.5.1 การปรับแทปของ ULTC	10
2.6 ตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน	11
2.7 การหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน	12

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ 14

2.8.1 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ 14

2.8.3 การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเซลล์แสงอาทิตย์ 16

บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบระบบจำลอง 17

3.1 บทนำ 17

3.2 ระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน 17

3.2.1 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดัน 18

3.2.2 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบที่ภาระทางไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน 18

3.2.3 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการรักษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง 19

บทที่ 4 ผลการทดลอง 21

4.1 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดัน 22

4.2 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบที่ภาระทางไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน 26

4.3 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง 29

4.4 วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบไฟฟ้าด้วยดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน 33

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 34

5.1 สรุปผลการทดลอง 34

5.2 ข้อเสนอแนะ 34

เอกสารอ้างอิง 35

ภาคผนวก 37

ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ 38

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ข้อมูลระบบทดสอบ	43
ประวัติผู้เขียน	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อคควบคุม AVR	9
2.2 การปรับแทปของ ULTC	10
2.3 การปรับแทปของ ULTC (ต่อ)	10
2.4 หลักการ make (2) before break (1)	11
2.5 บัสโหลดที่ต่อกับระบบสมมูลเทวินิน	12
2.6 การเคลื่อนที่ของ Zload ซึ่งระบบจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ก็ต่อเมื่อ Zload เคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ของ Zthev	13
2.7 N-P junction ของ PV	15
3.1 ระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน	18
3.2 การใช้ photovoltaic ในระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน	19
3.3 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ PV	20
4.1 แรงดันไฟฟ้าของโหลดที่บัส 10	22
4.2 กระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2	23
4.3 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2	24
4.4 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2	24
4.5 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 7	25
4.6 แรงดันไฟฟ้าของโหลดที่บัส 10	26
4.7 กระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2	27
4.8 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2	28
4.9 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนเมษายน	29
4.10 กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน	30
4.11 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน	30
4.12 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน	31
4.13 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนสิงหาคม	32
4.14 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนธันวาคม	32
4.15 ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันของเดือนเมษายน	33

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แผนการดำเนินงาน 3

3.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบของกรณีศึกษาต่างๆ 18

3.2 ระดับของภาระทางไฟฟ้า 19

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงเพราะไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตประจำวัน การขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจและระบบอุตสาหกรรม ซึ่งมีแนวโน้มว่าความต้องการจะเพิ่มสูงขึ้นอีกในอนาคต โดยความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นจากการใช้ของทั้งชุมชนและอุตสาหกรรม ในขณะที่ไม่มีการเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้า เป็นการลดความมั่นคงและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ซึ่งความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้านั้นอยู่ที่การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้มีคุณภาพและเพียงพอต่อการใช้งาน ทางด้านคุณภาพคือระดับแรงดันมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ส่วนทางด้านความเพียงพอคือระบบต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการและไม่ก่อให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับขึ้น ซึ่งหากความต้องการสูงจนไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ อาจก่อให้เกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปัจจุบันแหล่งจ่ายไฟฟ้าในประเทศไทยมีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานก๊าซธรรมชาติมากถึงร้อยละ 70 [5] โดยแบ่งเป็นสัดส่วนจากแหล่งก๊าซอ่าวไทยร้อยละ 60 จากแหล่งก๊าซสหภาพเมียนมาร์ร้อยละ 40 ปัจจุบันรับก๊าซธรรมชาติจากแหล่งสหภาพเมียนมาร์วันละ 1,030 ล้านลูกบาศก์ฟุต หรือคิดเป็นกำลังผลิตประมาณ 6,000 เมกะวัตต์ แต่การใช้พลังงานก๊าซธรรมชาติในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 70 จะทำให้ขาดความมั่นคงทางด้านพลังงานเนื่องจากพึ่งพาเชื้อเพลิงชนิดเดียวมากเกินไป และโรงไฟฟ้ามีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ต้องใช้น้ำในปริมาณมาก ดังนั้นการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนเป็นการลดการนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากต่างประเทศ และเป็นการเพิ่มความมั่นคงและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในประเทศ สภาพภูมิประเทศของประเทศไทยมีศักยภาพในการใช้พลังงานทดแทนหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือพลังงานแสงอาทิตย์ ประเทศไทยมีพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีประมาณ 5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (kWh/m^2/day) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใช้การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยปกติพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาจะมีปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การใช้อินเวอร์เตอร์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาต่างๆได้ การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบไฟฟ้าต้องอาศัยอินเวอร์เตอร์ [6],[8] เพื่อทำการปรับความถี่ให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้ นอกจากนี้อินเวอร์เตอร์ยังถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า ข้อดีในการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ควบคุมการจ่ายกำลังให้ระบบคือสามารถตอบสนองต่อระบบได้รวดเร็ว ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอที่สามารถนำมาใช้รักษาเสถียรภาพแรงดันให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า [3]

เสถียรภาพแรงดัน [14] หมายถึง ความสามารถในการรักษาแรงดันของทุกบัสในระบบให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในสภาวะปกติและหลังจากที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ปัจจัยที่สำคัญที่มักก่อให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันคือ สายส่งรับภาระทางไฟฟ้ามากเกิน ภาระไฟฟ้าอยู่ไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เกินไป แหล่งจ่ายมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเกินไป ระบบไฟฟ้ามีตัวชดเชย

กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟไม่เพียงพอและอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ามีการประสานงานไม่ถูกต้อง ผลกระทบของการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันอาจเป็นเหตุให้เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) [1] ซึ่งการเกิด voltage collapse จะเป็นการสูญเสียเสถียรภาพอย่างรวดเร็วการทำนายเพื่อหาวิธีป้องกันจึงมีความจำเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นจะต้องมีการคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน [2],[4] เพื่อแสดงความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพราะระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่สามารถเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสามารถในการรักษาเสถียรภาพหากระบบเกิดการเสียเสถียรภาพในกรอบเวลาที่มีระยะสั้น

การพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) เกิดเมื่อภาระไฟฟ้า (โหลด) มีความต้องการกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงดันตกในสายส่งเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงดันที่บัสโหลดจึงลดลง ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดเพิ่มสูงขึ้นมากเกินกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่บัสโหลดรับได้ จะทำให้แรงดันที่บัสโหลดตกลงมาอย่างรวดเร็ว เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การพังทลายของแรงดัน ซึ่งผลของเหตุการณ์นี้อาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับในวงกว้างส่งผลต่อการใช้ไฟฟ้าของชุมชนและความสูญเสียทางเศรษฐกิจ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและจำลองเหตุการณ์เกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม DIgSILENT เพื่อนำมาวิเคราะห์การตอบสนองของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาและประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) กับระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อนำผลการจำลองมาทำการเปรียบเทียบ โดยการใช้วิธีคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability margin) ของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟดังนี้ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเปลี่ยนแทป (Under load tap changer transformer: ULTC) ตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV)
2. ไม่มีการคำนวณหาจุดการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละอุปกรณ์
3. พลังงานทดแทนที่พิจารณาคือเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

ศึกษาทฤษฎีและเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองระบบด้วยโปรแกรม DIgSILENT โดยใช้กระบวนการจำลองบนฐานของเวลา (Time domain simulation)

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพแรงดันและการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า									
สร้างและวิเคราะห์แบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน									
ศึกษาการควบคุมและการทำงานของ PV									
นำ PV มาใช้กับระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน									
ศึกษาการคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน และวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบ									
รายงานและสรุปผลวิจัย									

แผนดำเนินงานสามารถแสดงดังตารางที่ 1.1

1. การดำเนินงานในเดือนที่ 1
   - ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยต่างๆ ของทั้งภายในประเทศและต่างประเทศเกี่ยวกับเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง
   - ศึกษาผลตอบสนองเมื่อระบบถูกรบกวนและสถานการณ์ตัวอย่างปัญหาเสถียรภาพแรงดัน
   - ศึกษาการใช้โปรแกรม DIgSILENT
2. การดำเนินงานเดือนที่ 2 ถึงเดือนที่ 4
   - สร้างแบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง
   - วิเคราะห์ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง
   - จัดทำการนำเสนอเพื่อสอบในภาคเรียนที่ 1
3. การดำเนินงานเดือนที่ 5 ถึงเดือนที่ 7
   - ศึกษาหลักการทำงานและการควบคุม PV
   - นำ PV ไปใช้กับแบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน
4. การดำเนินงานเดือนที่ 8 ถึงเดือนที่ 9
   - ศึกษาการคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน
   - วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบโดยการใช้คำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน
   - รายงานและสรุปผลวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

ด้านองค์ความรู้ใหม่

- เข้าใจเกี่ยวกับเสถียรภาพของแรงดันในระบบไฟฟ้ารวมถึงสาเหตุของปัญหาและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า
- สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพในระบบแรงดันไฟฟ้า ไปต่อยอดหรือเผยแพร่ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยต่อไปในภายหน้า
- เข้าใจเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมต่างๆในการจำลองเหตุการณ์และแก้ปัญหามากขึ้น อาทิเช่น Matlab และ DIgSILENT เป็นต้น

ด้านการอนุรักษ์พลังงาน

- สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการนำ PV ไปใช้ผลิตไฟฟ้าแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ ซึ่งจะเป็นการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้นในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง ระดับความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถทำการจ่ายโหลดได้ในกรณีที่เกิดการขัดข้องต่างๆ เกิดขึ้นกับระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพที่ดีย่อมสามารถจะทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ได้มาก

ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและรุนแรง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดขัดข้องและหยุดการทำงาน อันเนื่องมาจากการตัดตอนของอุปกรณ์ป้องกันหรือในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับสายไฟฟ้าแรงสูง

2) ผลกระทบเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป เช่น การส่งผ่านพลังงานเข้าสู่ระบบจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือจ่ายโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดเวลา

โดยปกติประเภทของเสถียรภาพของระบบจะแบ่งตามช่วงเวลาหลังจากเกิดผลกระทบ (Disturbance) ขึ้นกับระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1) เสถียรภาพของระบบในสภาวะชั่วครู่ (Transient stability)

หมายถึงความมั่นคงหรือความสามารถของระบบไฟฟ้าที่จะสามารถทำงานต่อไปได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ หลังจากที่เกิดเหตุขัดข้องที่รุนแรงขึ้นกับระบบ การพิจารณาเสถียรภาพในสภาวะทรานเซียนท์ มักจะพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรแบบซิงโครนัส

ในกรณีของเครื่องจักรซิงโครนัสที่สภาวะอยู่ตัว หากเครื่องจักรดังกล่าวได้รับผลกระทบจากภายนอก เช่นมีเหตุการณ์ผิดพร่องเกิดขึ้นทำให้มุมโรเตอร์ของเครื่องจักรกลเครื่องนี้เบี่ยงเบนออกไปจากแกนอ้างอิง (Reference axis) การที่จะสรุปว่าเครื่องจักรดังกล่าวมีเสถียรภาพหรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าโรเตอร์จะสามารถเข้าสู่จุดสมดุลใหม่ในการปฏิบัติงานได้หรือไม่ ถ้าหลังจากระบบปรับตัวต่อเหตุการณ์ดังกล่าวได้แล้ว โรเตอร์ไปทำงานอยู่ ณ จุดสมดุลยังถือว่าระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ แต่ถ้าโรเตอร์มีการแกว่งตัวและไม่สามารถทำงาน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่แน่นอนก็ย่อมส่งผลทำให้เครื่องดังกล่าวเสียเสถียรภาพ

โดยปกติผลกระทบต่างๆ ที่เข้ามาสู่ระบบภายใต้เงื่อนไขของการศึกษาเสถียรภาพของระบบในสภาวะทรานเซียนท์ มักจะเป็นผลกระทบที่รุนแรงและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น การลัดวงจรของสายส่ง บัส หรือขั้วของหม้อแปลง รวมไปถึงข้อผิดพร่องต่างๆ เช่น การเกิดข้อผิดพร่องทั้งสามเฟส (Three phase fault) การเกิดข้อผิดพร่องเฟสใดเฟสหนึ่งกับดิน (Single line to ground fault) ฯลฯ ซึ่งการศึกษาเสถียรภาพของระบบเมื่อเกิดข้อผิดพร่องขึ้นในระบบนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา คือ ระยะเวลาที่ระบบยังคงสามารถทนทานต่อจุดผิดปกติที่เกิดขึ้นและยังสามารถทำงานได้ตามปกติ นั้นคือ ต้องหาเวลาที่ช้าที่สุดที่จะต้องกำจัดข้อจำกัดข้อผิดพร่องออกไป ก่อนที่จะทำให้ระบบเสียเสถียรภาพหรือ Critical clearing time (t_c)

2) เสถียรภาพของระบบในสภาวะอยู่ตัว (Steady state stability)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายหลังจากเกิดผลกระทบขึ้นกับระบบไฟฟ้าไปเป็นระยะเวลานานหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงช้าๆ นั้นจะถือว่า เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะอยู่ตัว (Steady state stability)

โดยปกติค่าต่างๆ ที่นิยมนำมาพิจารณาเสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัวของระบบ คือมุมเฟสของโรเตอร์ (Rotor angle) ความถี่ของระบบ (System frequency) Governor output และ excitation voltage ดังนั้นเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะอยู่ตัวนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ในสภาวะอยู่ตัวของระบบเอง เช่น ถ้าในระบบที่มีความยืดหยุ่นสูงก็สามารถส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าได้ดี เสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะอยู่ตัวก็จะสูงตามไปด้วย นั่นคือระบบมี steady state limit สูง

2.2 เสถียรภาพแรงดัน

เสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability) หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีแรงดันไฟฟ้าคงที่และมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถรับได้อาจมีค่าแตกต่างไม่เกินค่ามาตรฐานร้อยละ 5 หรือร้อยละ 10 ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีการรบกวนระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าจะมีการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเนื่องจากการรบกวนระบบ การต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หรือการเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากการเกิดแรงดันตกอย่างควบคุมไม่ได้ ปัญหาสำคัญของการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันมาจากการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งปัจจัยสำคัญของการเกิดแรงดันตกมาจากการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานในระบบสายส่ง

2.3 แรงดันพังทลาย

การพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) [7] จะเกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบหลายๆเหตุการณ์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันตกในระบบอย่างมาก

การเกิดปัญหาดังกล่าวจะเกิดจากความต้องการกำลังไฟฟ้ากำลังรีแอคทีฟในระบบกะทันหัน ความต้องการของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะรับภาระโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและตัวชดเชย โดยปกติแล้วระบบไฟฟ้าจะมีแรงดันไฟฟ้ารีแอคทีฟเพียงพอที่จะทำให้แรงดันในระบบมีความเสถียรอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามหากเกิดการรบกวนของระบบเกิดขึ้นความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เพิ่มขึ้นอาจก่อให้เกิดปัญหาการพังทลายของแรงดันในระบบ

การเกิดการพังทลายของแรงดันจะเกิดขึ้นตามเหตุการณ์ต่อไปนี้

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ใกล้ศูนย์กลางโหลดเกิดการหยุดการจ่ายกำลังไฟฟ้า ผลจะทำให้สายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงพิเศษบางเส้นจะต้องรับภาระหนักมากขึ้นและความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน
- ทันทีที่เกิดการสูญเสียสายส่งแรงดันสูง จะทำให้เกิดแรงดันตกในระบบ จากนั้นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากลับมามีค่าเท่าเดิมโดยการเพิ่มกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถึงขณะนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถึงจุดที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อีกเนื่องจากกระแสอาร์มาเจอร์และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กถึงขีดจำกัดของความร้อน กังหันจะทำการปรับความถี่เพื่อลดการจ่ายกำลังไฟฟ้า

- การเกิดแรงดันตกจะส่งผลไปถึงระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer : ULTC) ของสถานีไฟฟ้าย่อยจะพยายามทำการปรับแรงดัน ซึ่งในแต่ละการเปลี่ยนแทปของหม้อแปลงจะเป็นการเพิ่มความสูญเสียในระบบ (ความสูญเสียขดลวด) หมายถึงทุกๆการเปลี่ยนแปลงแทปของหม้อแปลงจะเป็นการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องจ่าย การเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ ของการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟซึ่งถูกจำกัดโดยตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) [9] เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบได้เพียงพอก็จะมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ

กระบวนการต่างๆจะส่งผลร่วมกันจนทำให้เกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าในระบบก่อให้เกิดไฟฟ้าดับในวงกว้างของระบบไฟฟ้า

ลักษณะการเกิดทั่วไปของการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

1. เหตุการณ์เริ่มต้นอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเพิ่มของโหลดที่ละน้อยๆในระบบ หรือการเกิดการรบกวนระบบใหญ่ๆ เช่น การสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือสายส่ง
2. โดยทั่วไปการพังทลายของแรงดันจะเกิดจากระบบไฟฟ้าถึงจุดที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้ตามความต้องการของระบบไฟฟ้า แต่ในบางอาจเกิดจากการได้รับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากพื้นที่ข้างเคียงน้อยลงทีละเล็กน้อยจนอาจทำให้เกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า
3. การพังทลายของแรงดันไฟฟ้าจะเห็นว่าเกิดจากการลดลงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ละน้อยๆ ส่งผลเกิดจากการกระทำของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า, อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ป้องกัน โดยกรอบเวลาของการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ใช้เวลาหลายนาที แต่ในบางเหตุการณ์อาจจะเกิดในเวลาไม่กี่วินาที มักจะเกิดกับเหตุการณ์ที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [10] หรือ คอนเวอร์เตอร์กระแสตรง (DC Converter)
4. ตัวแปรสำคัญต่อไปนี้จะมีผลต่อการเกิดการพังทลายของแรงดันอย่างมาก
    1) ระยะทางที่ไกลกันมากระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลด
    2) ULTC ทำงานเมื่อระบบมีแรงดันที่ต่ำมาก
    3) ลักษณะพิเศษของโหลดซึ่งไม่พึงประสงค์
    4) การควบคุมอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าที่แย่
    5) การพังทลายของแรงดันไฟฟ้าอาจเกิดจากการมีตัวเก็บประจุชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบมากเกินความจำเป็น การจะทำให้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้ผลมากที่สุดจะต้องมีการผสมผสานการใช้งานระหว่าง shunt capacitor, static var systems และ synchronous condenser อย่างเหมาะสม

การป้องกันการพังทลายของแรงดัน

การป้องกันสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือ แนวทางด้านการออกแบบ (Design measures) และแนวทางด้านการดำเนินการ (Operation measures)

แนวทางด้านการออกแบบ

1. การใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

   เพื่อการรับประกันระยะห่างที่ปลอดภัยของเสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage stability margin) การเลือกอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟอย่างเหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก โดยต้องพิจารณาขนาด พิกัด ตำแหน่งติดตั้ง

2. การควบคุมกำลังรีแอคทีฟและแรงดันของทั้งระบบ

   อาจทำได้โดยการเปลี่ยนบัสควบคุม (Regulated bus) ของระบบควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (Automatic voltage regulator: AVR) จากบัสแรงสูงของหม้อแปลง เป็นบัสอื่นที่ใกล้กับจุดศูนย์กลางโหลด หรืออาจใช้การควบคุมทุติยภูมิ (Secondary control) โดยใช้การควบคุมแบบรวมศูนย์กลาง เพื่อดูแลกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่จ่ายจากหลายเครื่องกำเนิดและรักษาระดับแรงดันของระบบในวงกว้าง

3. การทำงานสอดประสานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination of protective devices)

   สาเหตุหนึ่งของการเกิด voltage collapse คือการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันหรือควบคุมที่ไม่สอดคล้องกับระบบไฟฟ้ากำลัง การปลดอุปกรณ์ต่างๆเพื่อป้องกันปัญหาโหลดเกินควรจะเป็นวิธีสุดท้ายในทางปฏิบัติ

4. การควบคุม ULTC

   ULTC ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันด้านทุติภูมิให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ การทำงานดังกล่าวอาศัยลอจิกที่โปรแกรมเอาไว้ล่วงหน้าโดยออกคำสั่งให้เปลี่ยนแทปโดยอัตโนมัติ การเปลี่ยนแทปดังกล่าวในบางกรณีส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของแรงดัน ในบางระบบใช้วิธีการบล๊อคแทปเมื่อแรงดันปฐมภูมิตกลง

5. การตัดโหลดเมื่อแรงดันต่ำ (Under voltage load shedding)

   คล้ายคลึงกับการตัดโหลดเมื่อความถี่ต่ำ (Under frequency load shedding) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมาก และราคาถูก แต่ผลกระทบอย่างรุนแรงต่อระบบ จึงมักถูกเลือกใช้เป็นวิธีการสุดท้าย นอกจากนั้นยังจำเป็นต้องมีอัลกอริทึมที่แม่นยำในการแยกแยะสถานการณ์ว่าเป็นแรงดันตกแบบชั่วขณะ (Voltage dip) การลัดวงจร หรือแรงดันต่ำซึ่งอาจจะนำไปสู่การพังทลายของแรงดัน

แนวทางด้านการดำเนินการ

1. ระยะห่างที่ปลอดภัยของเสถียรภาพ (Stability margin)

จำเป็นต้องจัดให้มีระยะห่างที่ปลอดภัยของเสถียรภาพอย่างพอเหมาะ โดยการจัดสรรการใช้งานแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ นอกจากนั้นยังจำเป็นต้องมีดัชนีชี้วัดที่เที่ยงตรง และเข้าใจง่ายต่อผู้ดูแลระบบ

2. กำลังสำรองพร้อมใช้ (Spinning reserve)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องมีกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสำรองให้เพียงพอต่อความต้องการทั้งในภาวะปกติและภาวะฉุกเฉิน หากมีความจำเป็น ณ การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการ

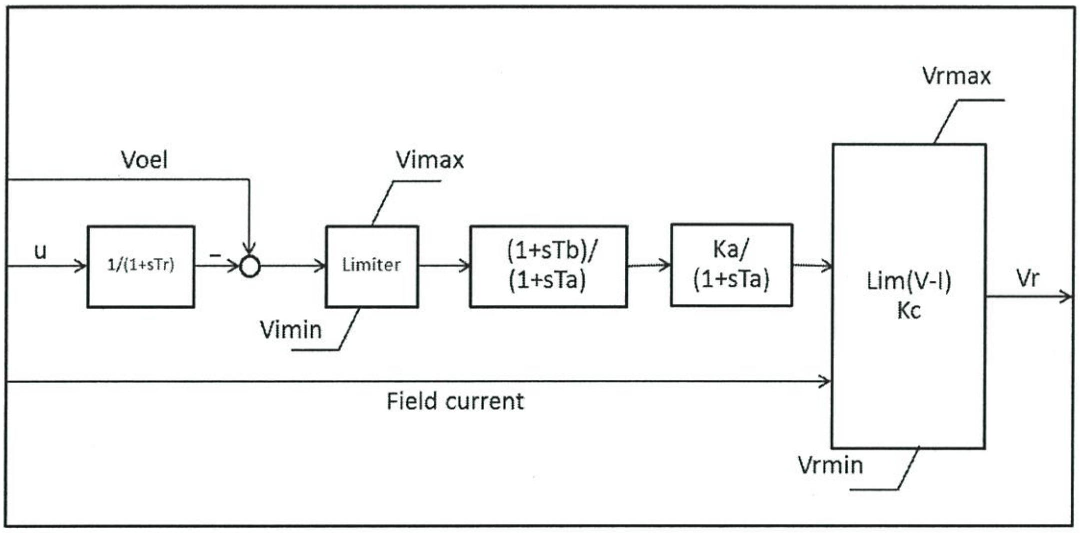
กระตุ้นระดับต่ำหรือปานกลางอาจต้องใช้ตัวเก็บประจุเพื่อรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ

3. การดำเนินการของผู้ดูแลระบบ (Operators' action)

ผู้ดูแลระบบต้องมีความเข้าใจ ตระหนักต่ออาการ สัญญาณบอกเหตุ และสามารถเลือกใช้การควบคุมที่เหมาะสม ระบบการติดตามผลอย่างออนไลน์และแนะนำวิธีการแก้ปัญหาเข้ามามีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในระยะหลัง

2.4 ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ

ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic voltage regulator) ทำหน้าที่รักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการขยายสัญญาณค่าผิดพลาดแรงดัน (Error voltage) ตัวผ่านตัวขยายสัญญาณ ดังรูปที่ 2.1 ผลลัพธ์จะได้สัญญาณที่จะไปควบคุมแรงดันโดยผ่านการเพิ่มหรือลดการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 บล็อคควบคุม AVR

2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป

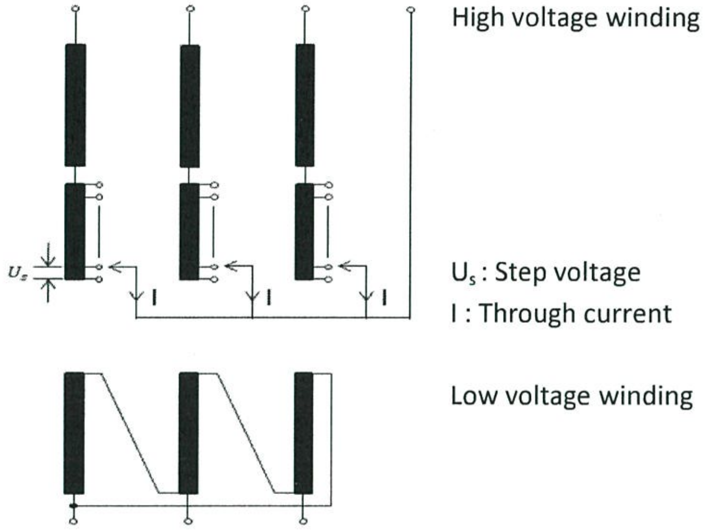
ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่ผู้จำหน่ายไฟฟ้าหรือผู้ใช้งานอาจมีระดับแรงดันไฟฟ้าตก เนื่องจากมีการส่งจ่ายในระยะทางไกลทำให้ต้องมีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในย่านที่ยอมรับได้ การควบคุมแรงดันทำได้โดยการปรับอัตราส่วนของการแปลงกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการแทปที่สามารถเลือกได้โดยหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer transformer : ULTC)

ซึ่งในการปรับแทปแต่ละแทปของหม้อแปลงเป็นการเพิ่มอิมพิแดนซ์ในระบบ ส่งผลให้ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน การทำงานของ ULTC คือ การขยับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยที่ไม่รบกวนกระแสโหลด ULTC ถูกขับเคลื่อนโดยอุปกรณ์ทางกลที่

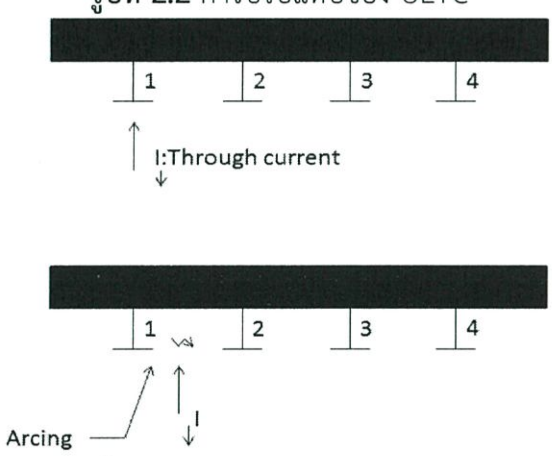
ซับซ้อนและสามารถทำงานได้ประมาณ 100000 ครั้งตลอดอายุการใช้งาน [7] โดยขึ้นอยู่กับการใช้งานและพื้นที่ที่ใช้งาน ระบบการทำงานของ ULTC โดยปกติจะใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ แต่ ULTC ก็ยังสามารถควบคุมจากห้องควบคุมหรือควบคุมได้โดยตรงที่หม้อแปลงไฟฟ้า

2.5.1 การปรับแทปของ ULTC

ULTC ปรับอัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยการเพิ่มหรือลดรอบที่ขดลวดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

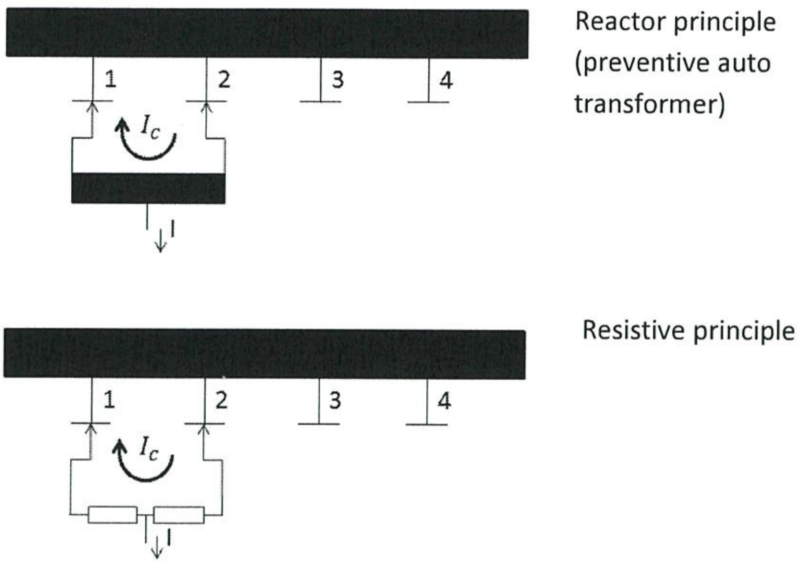


รูปที่ 2.2 การปรับแทปของ ULTC



รูปที่ 2.3 การปรับแทปของ ULTC (ต่อ)

จากรูปที่ 2.2 และ 2.3 แสดงหลักการต่อสายของหม้อแปลงสามเฟสต่อแบบวาย-เดลต้าที่ติดตั้ง ULTC ที่ขดลวดแรงสูง การเปลี่ยนแทประหว่างที่หม้อแปลงต่อกับภาระทางไฟฟ้าจะไม่สามารถกระทำได้โดยตรง เนื่องจากจะเกิดการอาร์คที่หน้าสัมผัสของ ULTC ทำให้เกิดความสูญเสียจากกระแสอาร์คและยังส่งผลเสียต่ออุปกรณ์อีกด้วย ในการเปลี่ยนแปลงแทปจึงจำเป็นต้องใช้หลักการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 หลักการ make (2) before break (1)

หลักการ ”make (2) before break (1)” แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานในการออกแบบ ULTC ทั้งหมด การออกแบบ ULTC จะต้องออกแบบให้มี 2 หน้าสัมผัสและต่อตัวจำกัดกระแส จากรูปที่ 2.4 เมื่อต้องการเปลี่ยนแทปจากตำแหน่งที่ 1 ไปที่ตำแหน่งที่ 2 จะต้องมีการเชื่อมต่อหน้าสัมผัสไปที่ตำแหน่งที่ 2 ก่อนที่จะปลดจากตำแหน่งที่ 1 ขณะที่มีการต่อกับหน้าสัมผัสทั้งสองตำแหน่งจะเกิดกระแสไหลวนในวงจร ในการออกแบบจะต้องออกแบบให้กระแสไหลวนนี้มีค่าต่ำมากที่สุด หลังจากนั้นจึงสามารถที่จะปลดหน้าสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 1 ได้ จากการใช้หลักการเช่นนี้จะทำให้ไม่เกิดกระแสอาร์คในขณะที่เปลี่ยนแปลงแทปของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.6 ตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน

วัตถุประสงค์ของตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) คือการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนสูงเกินเนื่องมาจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่มีค่าเกินเป็นระยะเวลานาน ตัวจำกัดนี้โดยทั่วไปถูกอ้างอิงถึงตัวจำกัดการกระตุ้นสูงสุด (Maximum Excitation Limiter : MXL) การทำงานในทางปฏิบัติของ OEL ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงาน

การทำงานของ OEL โดยทั่วไปแล้วจะตรวจหาสภาวะที่กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กมีค่าสูง และหลังจากการหน่วงเวลา OEL ก็จะทำงานผ่าน AVR ให้ทำการลดการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้ากระบวนการนี้ไม่ประสบความสำเร็จ OEL จะสั่งให้ AVR หยุดการทำงานและเปลี่ยนไปควบคุม DC regulator โดยจะทำการตั้งค่าให้กลับไปอยู่ที่ค่าเริ่มต้นซึ่งเป็นไปตามค่าพิกัด ถ้ากระบวนการนี้ยังไม่สามารถลดการกระตุ้นให้อยู่ในค่าที่ปลอดภัยได้ OEL จะสั่งเบรกเกอร์ของตัวกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้หยุดการทำงาน

ประเภทของตัวหน่วงเวลา 2 ชนิดที่ถูกใช้คือ ชนิดเวลาคงที่ (Fixed time) และชนิดเวลาผกผัน (Inverse time) โดยตัวจำกัดชนิดเวลาคงที่ทำงานเมื่อกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกินค่าที่

กำหนดโดยไม่สนใจระดับของการกระตุ้นเกิน ส่วนตัวจำกัดชนิดเวลาผกผันทำงานโดยที่การหน่วงเวลาจะต้องตรงกันกับ field thermal capability

2.7 การหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้หลักการพื้นฐานของวงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin equivalent circuit) เพื่อหาค่าอิมพิแดนซ์เทวินินมาใช้ในการคำนวณตัวบ่งชี้เสถียรภาพแรงดัน จากรูปที่ 2.5 จะพบว่า

$$\left(\frac{P+jQ}{\underline{V}}\right) = \underline{I}^* = \left(\frac{\underline{E}-\underline{V}}{\underline{Z}_{thev}}\right)^* \quad (2.1)$$

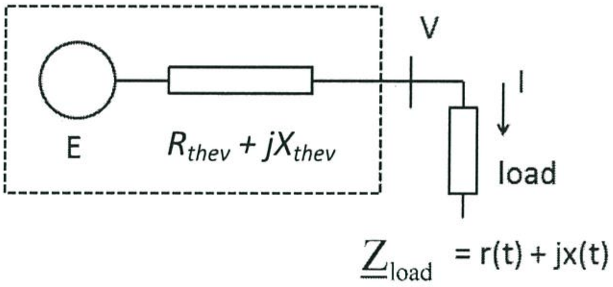
$$(P+jQ).\ \underline{Z}_{thev} = \underline{V}(\underline{E}-\underline{V})^* \quad (2.2)$$

เมื่อให้การส่งจ่ายกำลังเป็น $P+jQ$ และสมการเฟสเซอร์ 2.2 เป็นสมการกำลังสอง ซึ่ง $\underline{V}$ คือคำตอบหนึ่งของสมการและอีกคำตอบหนึ่งสามารถคำนวณได้จาก $(\underline{E}-\underline{V})^*$ ทั้งสองคำตอบของสมการคือคำตอบเดียวกันเมื่อเป็นการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximal power transfer) หากเพิ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นจากนี้จะไม่สามารถหาคำตอบของสมการได้ จึงสรุปได้ว่า

จาก Maximum power transfer $\underline{V} = (\underline{E}-\underline{V})^*$ (2.3)

แทนอิมพิแดนซ์ในสมการ 2.3 $\underline{Z}_{load}\underline{I} = (\underline{Z}_{thev}\underline{I})^*$ (2.4)

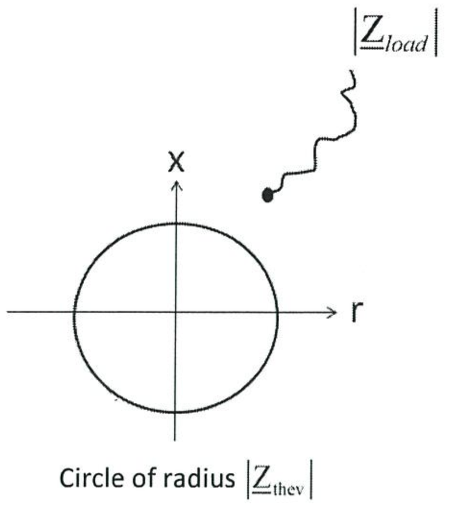
Maximum power transfer $|\underline{Z}_{load}| = |\underline{Z}_{thev}|$ (2.5)



รูปที่ 2.5 บัสโหลดที่ต่อกับระบบสมมูลเทวินิน

อิมพิแดนซ์ของโหลด ($\underline{Z}_{load}$) คือ อัตราส่วนระหว่างเฟเซอร์แรงดันกับเฟเซอร์กระแส ณ บัสที่ทำการวัด จากรูปที่ 2.2 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง $\underline{Z}_{load}$ จะมีการเคลื่อนที่ไปตามแกนและการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $\underline{Z}_{load}$ มีการเคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ของ $\underline{Z}_{thev}$ หรือจุดที่ $|\underline{Z}_{load}| = |\underline{Z}_{thev}|$ ตามสมการที่ 2.5

โดยพื้นที่ของ $\underline{Z}_{thev}$ จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระบบไฟฟ้า [15] เช่น ในกรณีที่ระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีการส่งจ่ายกำลังได้น้อยลง พื้นที่ของ $\underline{Z}_{thev}$ จะมีการขยายเพิ่มมากขึ้น หรือในกรณีโหลดมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ $\underline{Z}_{load}$ มีการขยับเข้าใกล้พื้นที่ $\underline{Z}_{thev}$ มากยิ่งขึ้น (การที่ระบบถูกรบกวนให้มีการส่งจ่ายกำลังน้อยลงหรือมีการเพิ่มขึ้นของโหลดเป็นสาเหตุหลักต่อการเกิดการเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า)



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของ Z_{load} ซึ่งระบบจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันก็ต่อเมื่อ Z_{load} เคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ของ Z_{thev}

การหาค่า Z_{thev} เพื่อนำไปคำนวณหาการตรวจจับการสูญเสียเถียรภาพแรงดันสามารถทำได้หลายวิธี ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้การหาโดย curve fitting

จาก
$$\underline{E}=\underline{V}+\underline{Z}_{thev}\underline{I} \tag{2.6}$$

กำหนดให้
$$\underline{E}=E_r+jE_i \tag{2.7}$$

$$\underline{V}=u+jw \tag{2.8}$$

$$\underline{I}=g+jh \tag{2.9}$$

จะได้
$$\begin{bmatrix}1 & 0 & -g & h\\ 0 & 1 & -h & -g\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}E_r\\ E_i\\ R_{thev}\\ X_{thev}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u\\ w\end{bmatrix} \tag{2.10}$$

ค่าของสัมประสิทธิ์ *u, w, g* และ *h* สามารถทำการวัดได้จากบัสที่ต้องการวัด ส่วนตัวแปรที่ยังไม่ทราบคือ R_{thev}, X_{thev}, E_r และ E_i พบว่าตัวแปรที่ทราบมีเพียง 2 ตัวแปรแต่ต้องการทราบค่า 4 ตัวแปรเพื่อทำการหาจำเป็นจะต้องวัดค่าเพิ่มเติมมากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งผลจะมีการคลาดเคลื่อนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการแกว่งของข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่วิเคราะห์

ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันถูกนำมาใช้เพื่อบ่งบอกถึงการเข้าใกล้การเกิดแรงดันพังทลายโดยขึ้นกับกำลังไฟฟ้าปรากฏ โดยใช้แนวคิดเดียวกับการพยากรณ์การเกิดความไม่เสถียรภาพของแรงดันซึ่งเป็นการบ่งบอกความเข้าใกล้สู่การเกิดแรงดันพังทลายในรูปของระยะห่างระหว่างสองเส้นโค้งแรงดันหรือระหว่างสองเส้นโค้งอิมพีแดนซ์

ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันอธิบายการเข้าใกล้การเกิดแรงดันพังทลายในรูปของกำลังไฟฟ้าโดยดูจากกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ของระบบก่อนที่จะระบบไฟฟ้าจะพังทลายซึ่งจะสามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าปรากฏกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้จริงหรือสามารถหาได้

จากกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เหลือที่สามารถจ่ายให้โหลดก่อนการเกิดแรงดันพังทลาย โดยมีสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\Delta \underline{S}_L = \underline{Z}_L \underline{I}^2 - \underline{Z}_{thev} \underline{I}^2 \tag{2.11}$$

โดย

$\Delta \underline{S}_L$ คือดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันที่บัส L

$\underline{Z}_L$ คือโหลดอิมพีแดนซ์ที่บัส L

$\underline{Z}_{thev}$ คือเทวินินอิมพีแดนซ์ของระบบ

$\underline{I}$ คือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่บัส L

จากสมการที่ 2.11 จะสามารถสรุปได้ว่าเมื่อดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ หมายถึง ณ ขณะนั้นไม่สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดในระบบได้และระบบจะเกิดแรงดันพังทลายขึ้นถ้ามีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ

2.8 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) [11] เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ที่ถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน เป็นต้น เมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง

2.8.1 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon PV panels)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนเพียงผลึกเดียว ซึ่งเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ โดยปกติแล้วจะแปลงพลังงาน 15 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แต่กระบวนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยวค่อนข้างมีความซับซ้อนส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่าเทคโนโลยีชนิดอื่น

2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกรวม (Polycrystalline silicone PV panels)

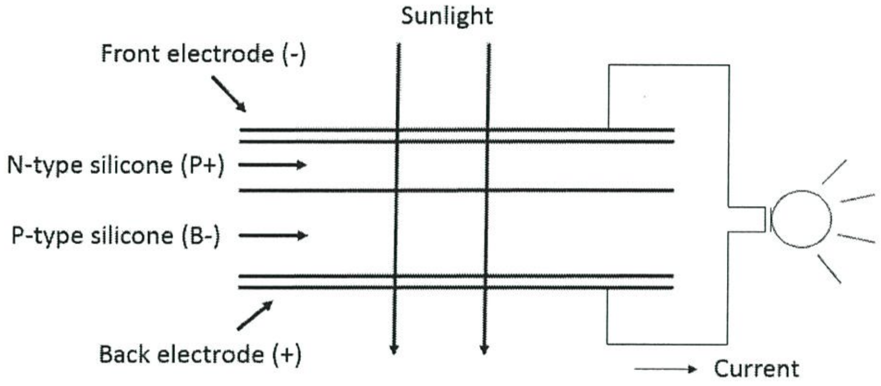
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนหลายผลึก ซึ่งผลึกจะถูกตัดจากแผ่นซิลิกอนที่ถูกหลอมและทำให้เป็นผลึกใหม่ ก้อนผลึกที่ได้จะถูกตัดและทำให้เป็นแผ่นบางจากนั้นประกอบจนกลายเป็นแผ่นที่สมบูรณ์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าชนิดผลึกเดี่ยว ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์

3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon PV panels)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส มีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง โดยจะเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ การสร้างจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิกอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเลน (SiH_4) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศและตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้นโดยพลาสมาเพื่อส่งพลังงานให้ซิลิกอนแยกตัวออกจากก๊าซเข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรองโดยส่วนใหญ่จะเป็น แก้ว สแตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งได้ทำการเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิกอนจะทับถมสะสมบนแผ่นเกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิกอน

2.8.2 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้ ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 N-P junction ของ PV

1. n - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้ง (Doping) ด้วยสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ p - type ซิลิคอน คือสารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงาน จากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิด มาประกบต่อกันด้วย p - n junction จึงทำให้เกิดเป็น "เซลล์แสงอาทิตย์" ในสภาวะที่ยังไม่มีแสงแดด n - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ n - type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน p - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ p - type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล

2. เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยัง

ชั้น n - type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p - type

3. อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน

2.8.3 การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

โดยปกติแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกออกแบบมาเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น แต่ในบางครั้งระบบไฟฟ้าอาจเกิดการแกว่งหรือกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าซึ่งการแกว่งนั้นๆมีความจำเป็นจะต้องควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เพราะฉะนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงจะต้องทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับระบบ แต่การจะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยทั่วไปแล้วจะต้องมีการออกแบบอินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดที่สูงกว่าปกติทั่วไป
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะต้องมีการทำงานดังต่อไปนี้

1. ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นได้ทั้งค่าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงได้
2. จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพียงค่าเดียว
3. การปรับเปลี่ยนการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะต้องขึ้นอยู่กับค่าของระดับแรงดัน

ในกรณีที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่ เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยไม่คำนึงถึงระดับของแรงดันที่บัส หากในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเปลี่ยนไปตามค่าของตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยช่วงของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่แนะนำจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.95 ของการกระตุ้นขาด (0.95 under-excited) และ 0.95 ของการกระตุ้นเกิน (0.95 over-excited)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3

หลักการทำงานและการออกแบบระบบจำลอง

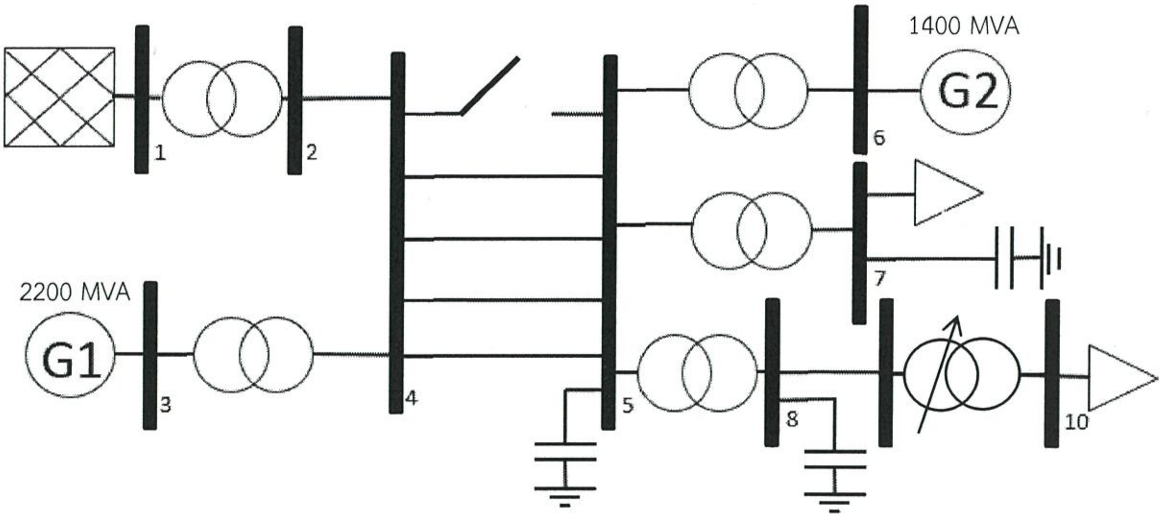
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบจำลองเกิดปัญหาจากการรบกวนขนาดใหญ่คือการสูญเสียสายส่งในระบบโดยไม่เกิดกระแสลัดวงจร เพื่อที่จะนำระบบดังกล่าวมาใช้ศึกษาการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) ในเสถียรภาพแรงดัน ด้วยวิธีการจำลองบนโดเมนเวลาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองจากการคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน

3.2 ระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน

รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้เป็นกรณีศึกษา โดยระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยบัสอนันต์ 1 บัส บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 2 บัส ได้แก่บัสที่ 3 และ 6 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 จะติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการทำงานสองชนิดคือ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) เพื่อรักษาแรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) เพื่อป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนที่เกิดจากกระแสกระตุ้นเกิน บัสโหลดทั้งหมด 2 บัส ได้แก่บัสที่ 7 และ 10 โดยโหลดที่บัส 10 จะเชื่อมต่อกับหม้อแปลงชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer transformer : ULTC) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสโหลด ระบบจำลองปัญหานี้จะมีการสร้างปัญหาเสถียรภาพแรงดันโดยการรบกวนระบบ คือ การสูญเสียสายส่งระหว่างบัสที่ 4 และ 5 จำนวนหนึ่งวงจรจากทั้งหมด 5 วงจร ในระบบจำลองนี้ที่สภาวะปกติ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระดับที่สูงใกล้พิกัดแต่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบได้ เมื่อมีการรบกวนระบบจึงทำให้ระบบอ่อนแอลงอย่างมากเนื่องจากสายส่งระหว่างบัส 4 และ 5 มีระยะทางไกลมาก (300 กิโลเมตร) ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจาก slack bus และ G1 ไม่สามารถส่งกำลังมาได้เพียงพอต่อความต้องการของระบบเนื่องจากผลของความสูญเสียในสายส่งกำลัง การสำรองกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของโหลดจะต้องสำรองที่บัสของโหลดและบัสที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง การตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 จึงมีผลต่อระบบอย่างมากหลังจากเกิดการรบกวน ในการทดลองนี้จึงศึกษาอุปกรณ์ที่สำคัญต่อเสถียรภาพแรงดัน เช่น ULTC AVR และ OEL เป็นต้น

144379



รูปที่ 3.1 ระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน

3.2.1 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดัน

เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดัน ได้แบ่งกรณีศึกษาโดยการจำลองในแต่ละครั้งมีอุปกรณ์หรือตัวควบคุมในระบบ เช่น AVR, ULTC และ OELที่แตกต่างกัน มีกรณีต่างๆดังนี้

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบของกรณีศึกษาต่างๆ

กรณี	อุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบ
1	AVR (ใช้หม้อแปลงชนิด fix type)
2	ULTC
3	ULTC + AVR
4	ULTC + AVR + OEL

3.2.2 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบที่ภาระทางไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน

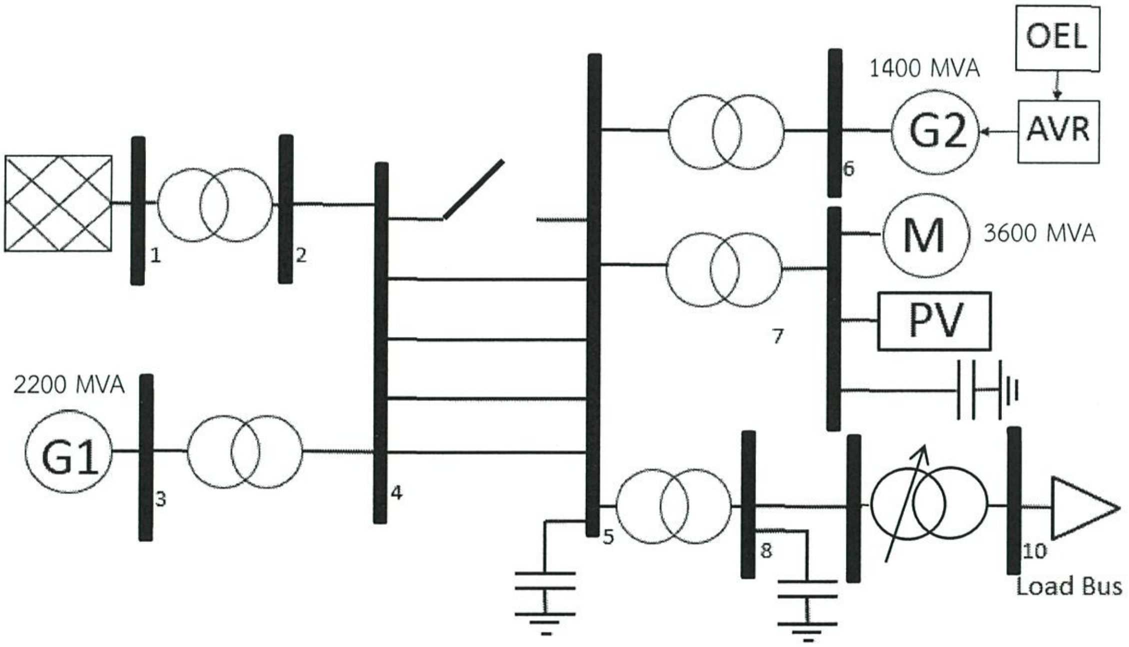
จากระบบในรูปที่ 3.1 เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบที่ภาระทางไฟฟ้าขนาดแตกต่างกันจึงทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนขนาดของภาระทางไฟฟ้าที่บัสที่ 7 และ 10 โดยแบ่งทั้งหมดออกเป็น 3 ระดับดังนี้ ซึ่งการจำลองทุกระดับของโหลดจะเป็นการจำลองในกรณีที่อุปกรณ์ที่พิจารณาประกอบไปด้วย AVR ULTC และ OEL

ตารางที่ 3.2 ระดับของภาระทางไฟฟ้า

ภาระทางไฟฟ้าที่บัส	**ระดับของภาระทางไฟฟ้า**	P (MW)	Q (MVAr)
7	1	3271	1015
	2	3320	1030
	3	3345	1038
10	1	3384	971
	2	3435	985
	3	3460	993

3.2.3 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการรักษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในรูปที่ 3.2 แสดงการนำ PV มาใช้ในการรักษาเสถียรภาพแรงดันกับระบบจำลอง ซึ่งจะทำการเปลี่ยนจากโหลดคงที่ ที่บัส 7 เป็นโหลดชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำและติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด PV เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส 7 โดยจะทำการหาจุดทำงานที่สภาวะปริมาณแสงแตกต่างกันว่าจะส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันอย่างไร โดยการปรับขนาดกำลังการผลิตของ PV



รูปที่ 3.2 การใช้ photovoltaic ในระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน

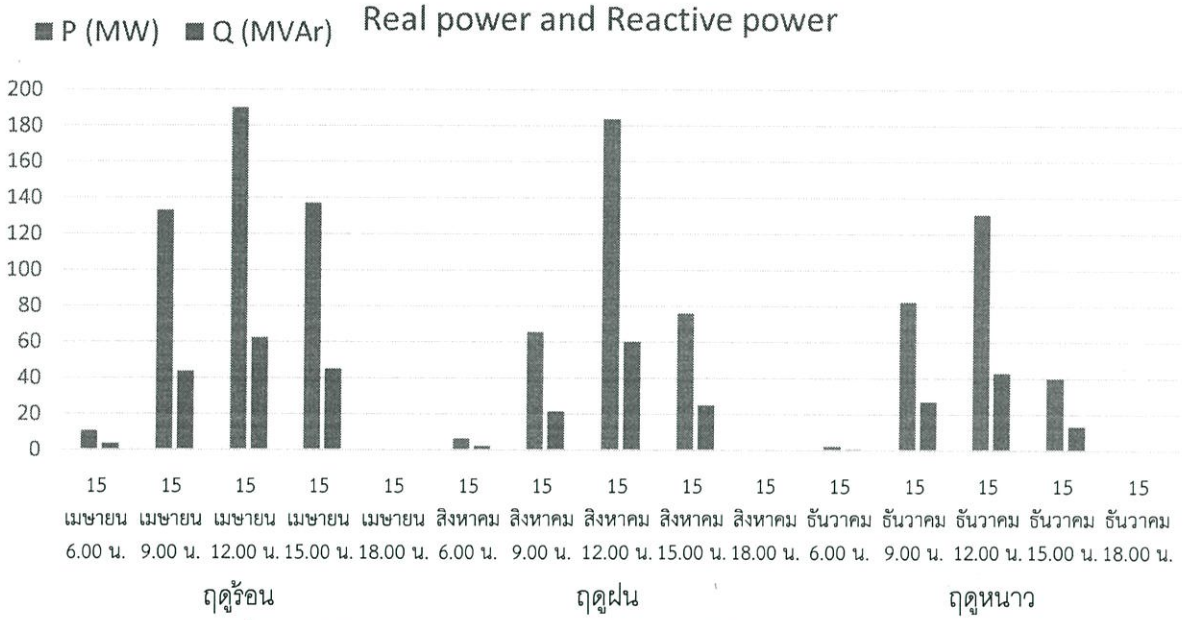
การออกแบบขนาดของ PV

- กำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของ PV คือ 190 MW เมื่อ PV มีความเข้มแสงที่ 900 W/m^2 [13]

- กำหนดให้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุดของ PV คือ 31.2 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด (±62.4 MVAr)
- กำลังการผลิตของ PV เป็นผลจากการศึกษาการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในประเทศไทย การทดลองนี้จึงทำการจำลองผลตอบสนองของระบบในฤดูที่แตกต่างกัน 3 ฤดูคือ ฤดูร้อน ฤดูฝนและฤดูหนาว ซึ่งวันที่ทำการจำลองมีดังต่อไปนี้

  - กำหนดให้เดือนเมษายนเป็นตัวแทนของฤดูร้อน
  - กำหนดให้เดือนสิงหาคมเป็นตัวแทนของฤดูฝน
  - กำหนดให้เดือนธันวาคมเป็นตัวแทนของฤดูหนาว

  ขนาดกำลังการผลิตของ PV ที่แตกต่างกันในแต่ละวันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ PV

3.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองโดยการคำนวณดัชนีบ่งชี้เสถียรภาพแรงดัน

การวิเคราะห์ผลตอบสนองสามารถทำได้โดยการหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability margin calculation) ในหัวข้อนี้จะทำโดยการนำผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ 10 ในระบบไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3.2.3 ซึ่งจะเปรียบเทียบดัชนีบ่งชี้เสถียรภาพแรงดันของระบบที่มีเสถียรภาพแรงดันกับระบบที่ไม่มีเสถียรภาพแรงดันอันเนื่องจากการรบกวน โดยวิธีที่ใช้หาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันคือการคำนวณหา $\underline{Z}_{thev}$ และ $\underline{Z}_{load}$ เพื่อทำนายเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าโดยส่วนของทฤษฎีได้ถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่2.4

บทที่ 4
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดัน โดยแต่ละการทดลองจะแสดงถึงคุณสมบัติของส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อเสถียรภาพแรงดัน รวมถึงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากการคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งมีหัวข้อการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดัน

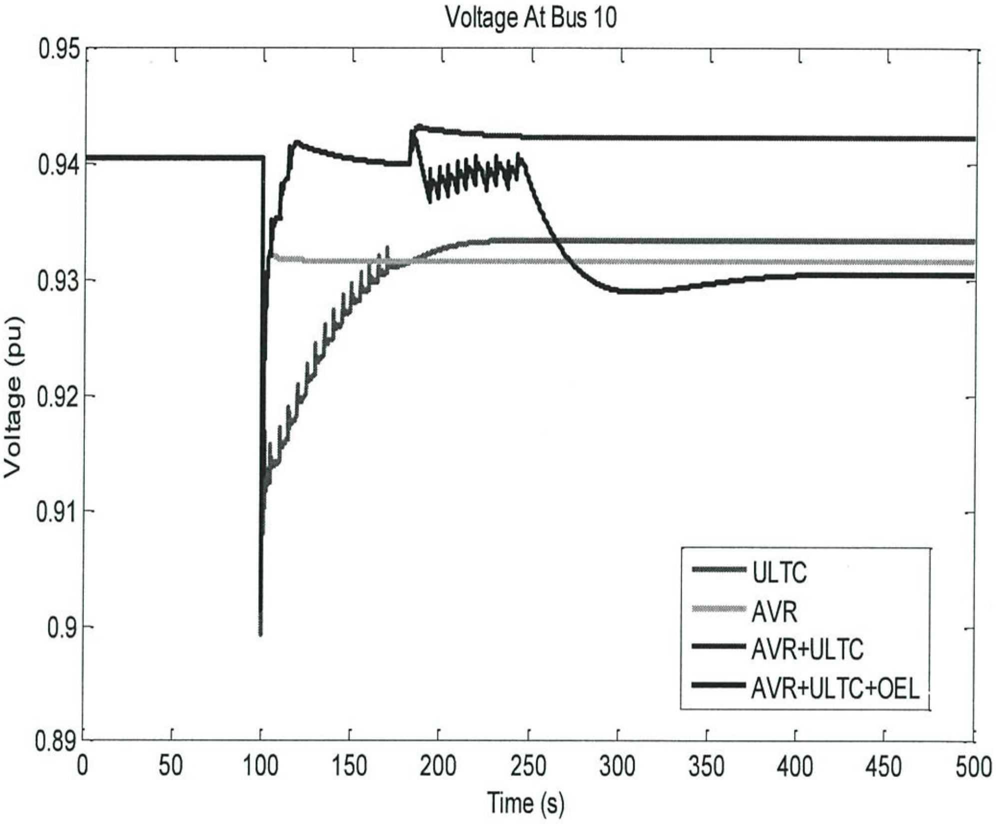
4.2 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบที่ภาระทางไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน

4.3 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) ในการศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

4.4 วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบไฟฟ้าด้วยดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน

4.1 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการรักษาเสถียรภาพแรงดัน

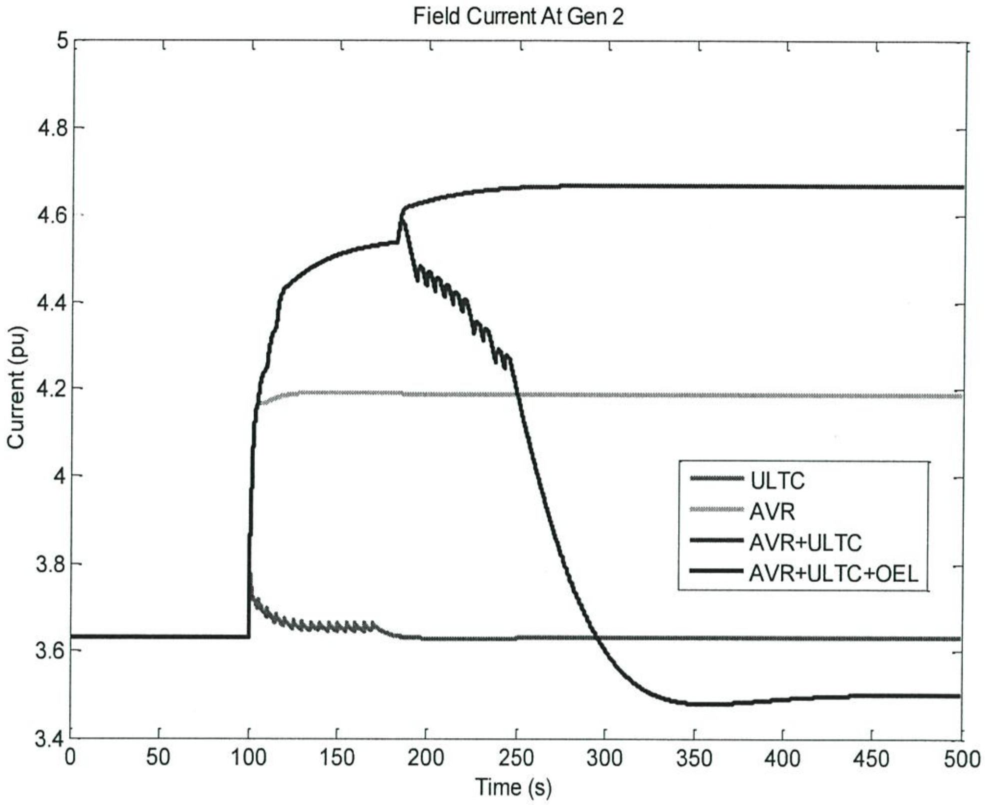
จากการจำลองระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่มีผลต่อเสถียรภาพแรงดัน เมื่อเกิดการรบกวนโดยสายส่งถูกตัดออกไปหนึ่งเส้นที่เวลา 100 วินาที ได้ผลตอบสนองดังรูป 4.1- 4.5



รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าของโหลดที่บัส 10

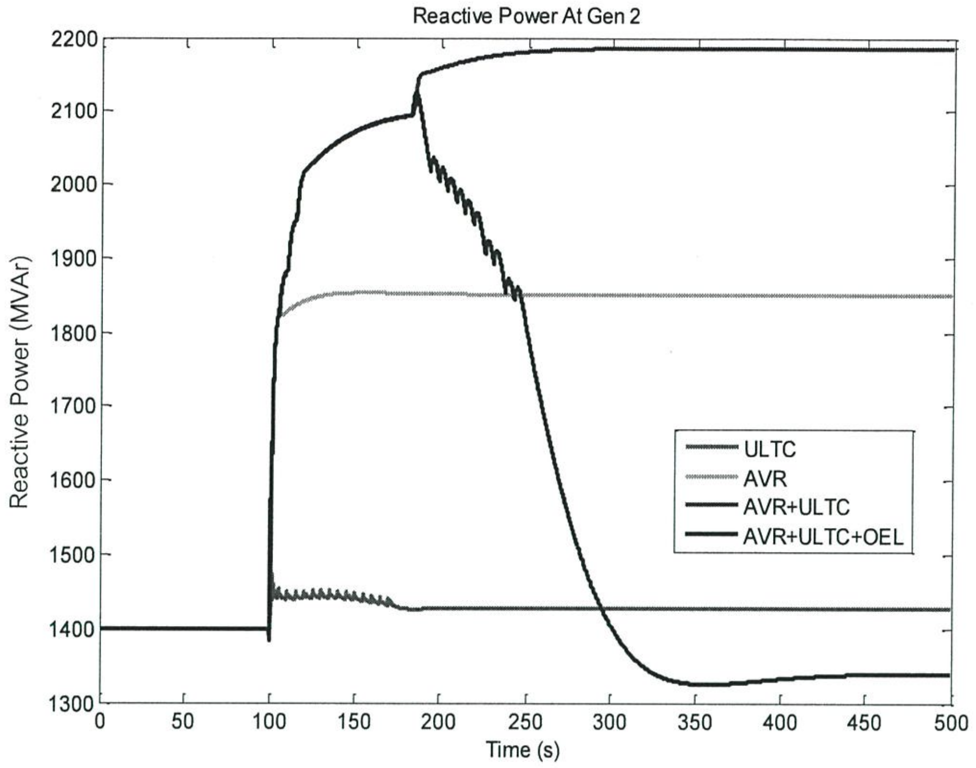
จากรูปที่ 4.1 เป็นการตอบสนองของอุปกรณ์ในการรักษาแรงดันที่บัสโหลดหลังจากเกิดการรบกวนในระบบขึ้น กรณีที่ระบบมี ULTC เพียงชนิดเดียว เมื่อเกิดการรบกวนขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันตกขึ้นในระบบ ULTC จะรักษาระดับแรงดันที่บัสโหลดไปยังค่าที่ต้องการ แต่ในกรณีนี้ ULTC ได้ทำการปรับแทปจนถึงแทปสุดท้ายแล้ว จึงไม่สามารถทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นไปถึงค่าที่ต้องการได้ กรณีที่ระบบมี AVR เพียงชนิดเดียว AVR จะทำการรักษาระดับแรงดันหน้าบัส G2 โดยการปรับการกระตุ้นของ G2 เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากเป็นการรักษาแรงดันที่บัส G2 เพียงอย่างเดียว จึงทำให้แรงดันที่บัสโหลดต่ำกว่าขณะก่อนเกิดการรบกวน ในกรณีที่ระบบมี AVR และ ULTC ในกรณีนี้มีการรักษาระดับแรงดันทั้งบัส G2 และบัสโหลด ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของ AVR และ ULTC จึงทำให้แรงดันที่บัสโหลดสูงถึงค่าที่ต้องการได้ แต่ในกรณีนี้ไม่สามารถนำไปใช้ได้ในทางปฏิบัติ เพราะไม่มีการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการกระตุ้นเกิน ในกรณีที่ระบบมี AVR, ULTC และ OEL เนื่องจากในการปรับแทปทุกๆครั้ง ของ ULTC จะทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันตกที่บัส G2 ดังนั้น AVR จึงต้องเพิ่มการกระตุ้นของ G2 เพื่อเพิ่มกำลังผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟและ

รักษาระดับแรงดันให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการ แต่ถ้าหากมีการกระตุ้นมากเกินไปอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ จึงจำเป็นต้องติดตั้ง OEL เพื่อป้องกันความเสียหายนี้ จากกรณีที่ศึกษานี้ กระแสกระตุ้นของ G2 สูงถึงค่าที่ OEL จำกัดไว้ จึงทำให้ OEL ลดการกระตุ้นลงสู่ค่าที่ปลอดภัยส่งผลให้แรงดันที่บัสโหลดต่ำกว่ากรณีอื่น

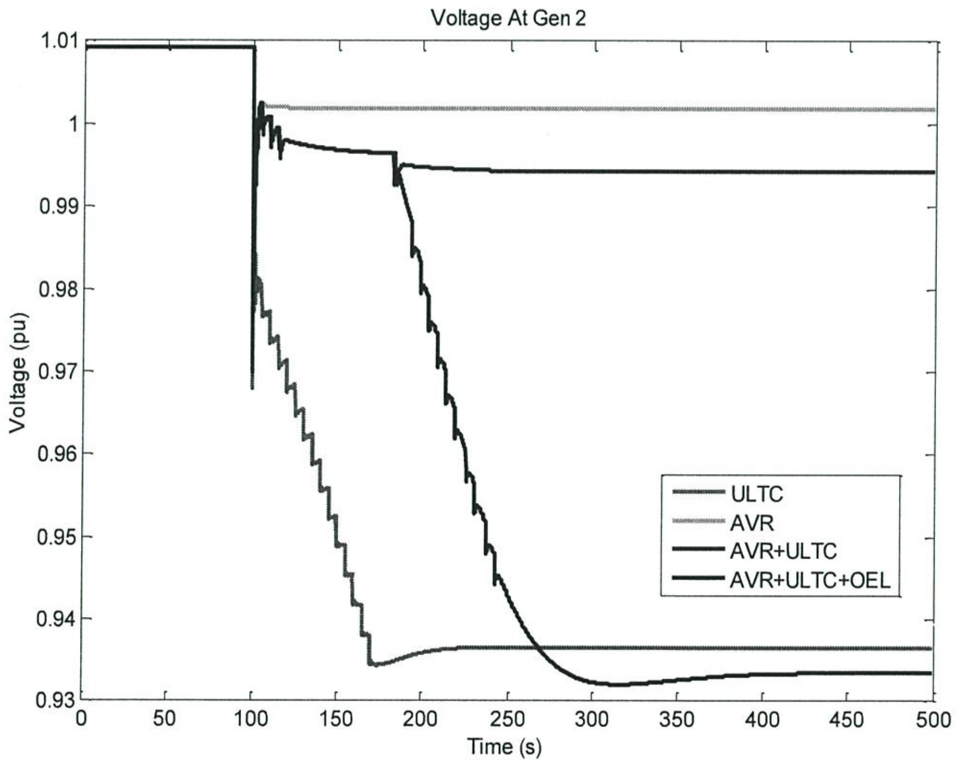


รูปที่ 4.2 กระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2

จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นว่าในกรณีที่ระบบมี ULTC เพียงชนิดเดียว กระแสกระตุ้นของ G2 จะคงที่เนื่องจากไม่มีการเพิ่มการกระตุ้นของ G2 จึงทำให้ไม่มีการเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟดังรูปที่ 4.3 ในกรณีที่ระบบมี AVR เพียงชนิดเดียว กระแสกระตุ้นของ G2 เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของ AVR ในการเพิ่มการกระตุ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัส G2 และเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟดังรูปที่ 4.3 ในกรณีที่ระบบมี AVR และ ULTC กรณีนี้กระแสกระตุ้นสูงขึ้นเนื่องจากมีการแทปของ ULTC จะทำให้แรงดันที่บัส G2 ตกลงในทุกๆครั้งที่เปลี่ยนแปลงแทป AVR จึงต้องเพิ่มการกระตุ้นมากขึ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัส G2 และเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ดังรูป 4.3 ในกรณีที่ระบบมี AVR, ULTC และ OEL เมื่อ AVR เพิ่มการกระตุ้นไปจนถึงจุดๆหนึ่ง จะทำให้กระแสกระตุ้นของ G2 สูงถึงจุดที่ OEL จำกัดไว้ (ที่เวลา 190 วินาที) OEL จะลดกระแสกระตุ้นของ G2 ลงมาสู่ค่าที่ปลอดภัย เพื่อป้องกันความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟลดลง ดังรูปที่ 4.3

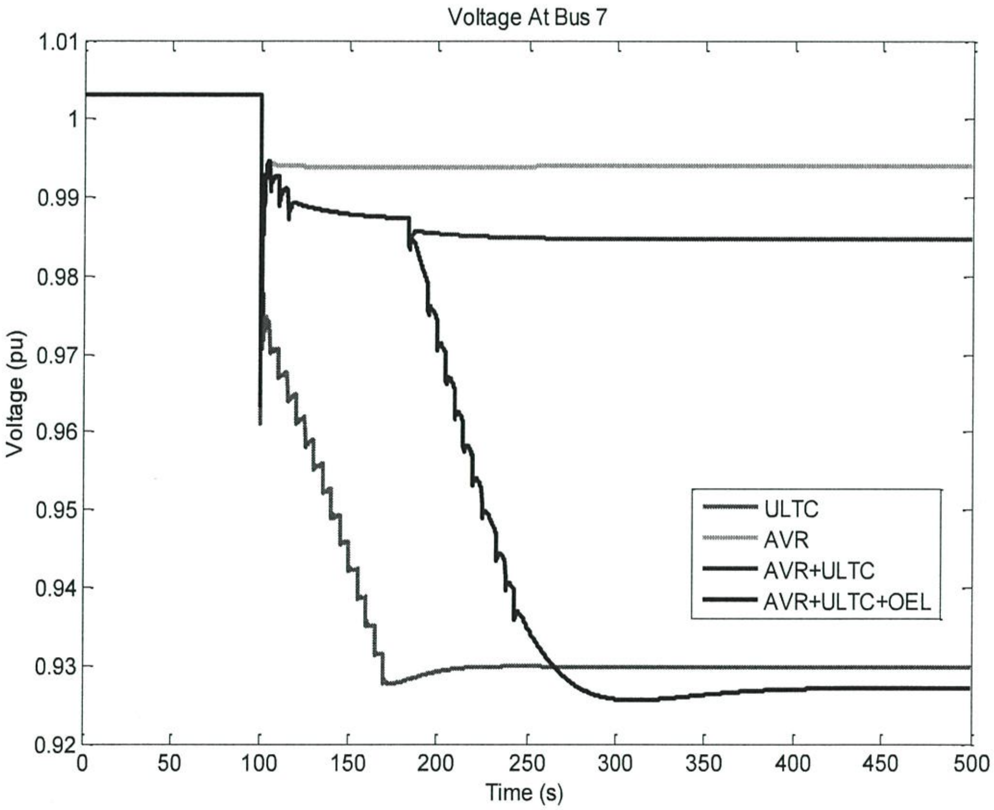


รูปที่ 4.3 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2



รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2

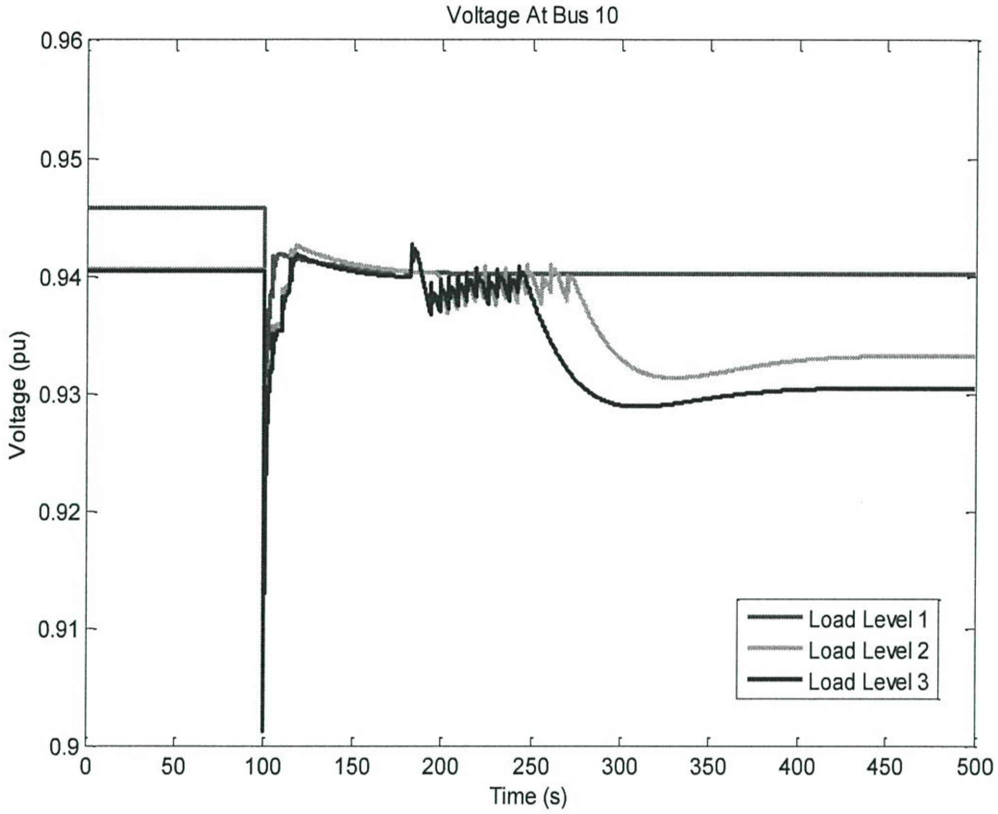
กรณีที่ระบบมี ULTC เพียงชนิดเดียว เนื่องจากไม่มีการเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากในรูปที่ 4.3 จึงทำให้ระดับแรงดันที่บัส G2 ลดลงในทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนแทปของหม้อแปลงดังรูปที่ 4.4 กรณีที่ระบบมี AVR เพียงชนิดเดียว จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่า การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มการกระตุ้นโดย AVR เพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัส G2 ทำให้ระดับแรงดันที่บัส G2 เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.4 ในกรณีที่มี AVR และ ULTC ในระบบ ULTC จะแทปเพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัสโหลดด้วยจึงทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงขึ้นมากดังรูปที่ 4.3 แต่ AVR สามารถเพิ่มการกระตุ้นได้ไม่จำกัดจึงสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัส G2 และระบบได้ดีกว่าสองกรณีแรก ในกรณีที่ระบบมี AVR, ULTC และ OEL เมื่อมีการเพิ่มกระตุ้นมากเกินกว่าที่ OEL จำกัดจึงทำให้ OEL ต้องลดการกระตุ้นลง ส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟลดลง ดังรูปที่ 4.3 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจึงไม่เพียงพอต่อความต้องการในระบบจึงทำให้ระดับแรงดันที่บัส G2 ลดลงมากว่าทุกกรณีข้างต้น เมื่อระดับแรงดันที่บัส G2 เปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลให้แรงดันบัสอื่นๆเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงดันตกเป็นวงกว้างดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 7

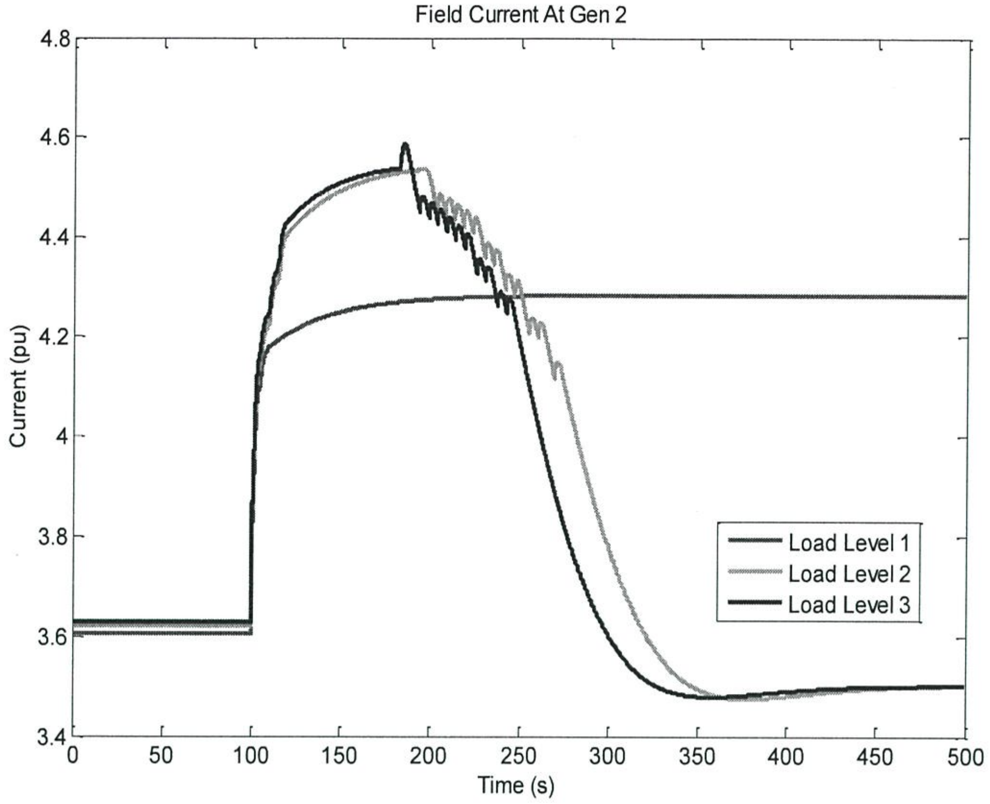
4.2 จำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบที่ภาระทางไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน

จากการจำลองระบบไฟฟ้าที่มีขนาดของโหลดที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดการรบกวนโดยสายส่งถูกตัดออกไปหนึ่งเส้นที่เวลา 100 วินาที โดยในระบบจะมีอุปกรณ์ที่พิจารณาในระบบประกอบไปด้วย AVR ULTC และ OEL ได้ผลตอบสนองของระบบดังรูปต่อไปนี้



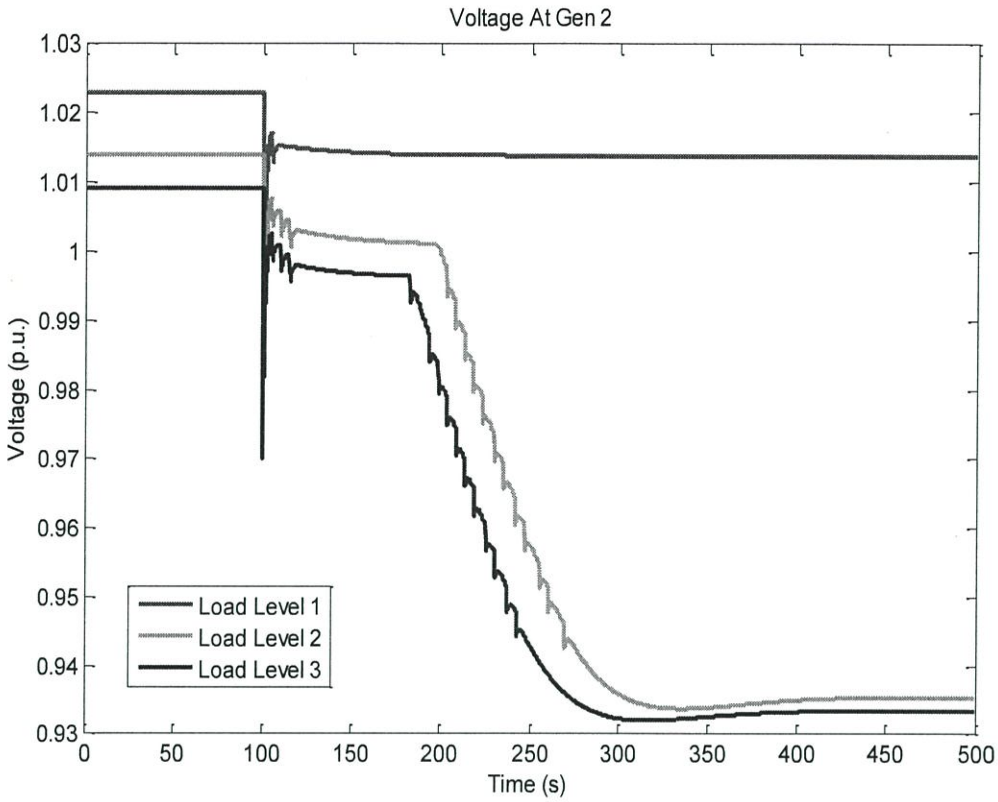
รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าของโหลดที่บัส 10

จากการทดลองรบกวนระบบโดยการเปิดวงจรของระบบสายส่งหนึ่งเส้นและทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดเป็น 3 ระดับเพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบที่มีขนาดโหลดที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.6 หลังจากมีการเปิดวงจรของสายส่งกำลัง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า ณ บัสโหลดเกิดตกลง หม้อแปลงที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันบัสจึงทำการปรับแทปเพื่อรักษาแรงดันไว้ที่ค่าที่ถูกตั้งค่าไว้ พบว่าในโหลดระดับที่ 1 หลังจากมีการแทปของหม้อแปลงแรงดันที่บัสมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นหลังจากถูกรบกวนและระบบมีเสถียรภาพ แต่เมื่อพิจารณาที่โหลดระดับที่ 2 และ 3 หลังการเกิดการรบกวนประมาณ 100 วินาที ระดับของแรงดันเกิดการตกอีกครั้งถึงแม้จะมีการแทปของ ULTC เพื่อรักษาแรงดันบัสแต่ระดับแรงดันก็ยังคงมีค่าตกลงมาจากกรณีโหลดระดับที่ 1 ผลตอบสนองดังนี้เกิดเนื่องจากผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2



รูปที่ 4.7 กระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2

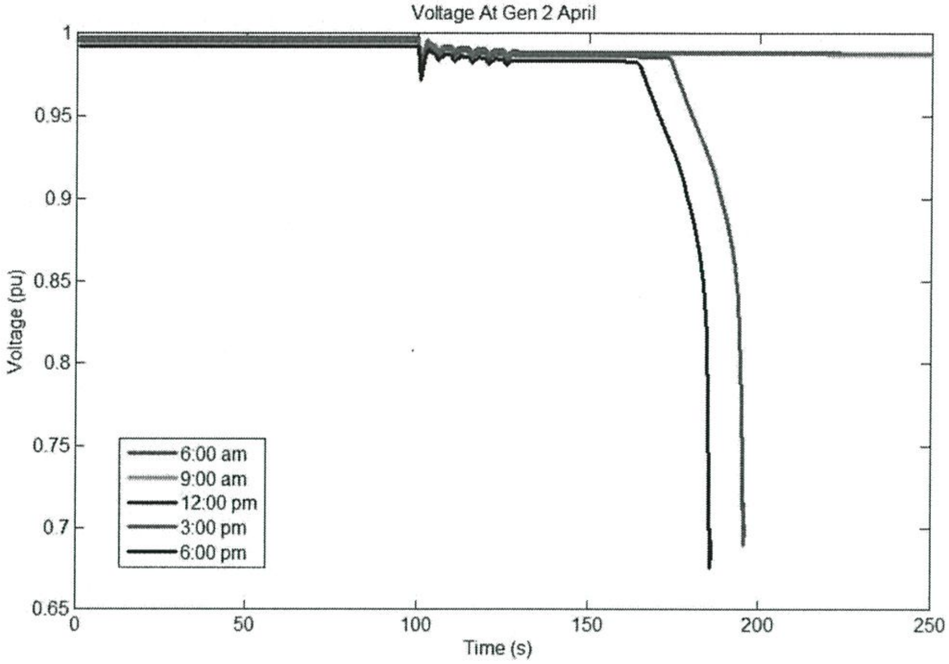
หลังจากเกิดการรบกวนระบบและ ULTC รักษาระดับแรงดันที่บัสโหลด ซึ่งการแทปของ ULTC เพื่อรักษาแรงดันบัสจะเป็นการเพิ่มความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ จากรูปที่ 4.7 AVR ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 จึงต้องเพิ่มระดับการกระตุ้นเพื่อสำรองกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับระบบ แต่เมื่อพิจารณากรณีที่โหลดระดับที่ 2 และ 3 ช่วงเวลาหลังจากเกิดการรบกวนประมาณ 100 วินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 มีการกระตุ้นเพิ่มขึ้นไปถึงค่าที่ถูกจำกัดไว้โดย OEL จึงจำเป็นต้องมีการลดระดับการกระตุ้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงดันที่ตกที่บัสของโหลดและบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2

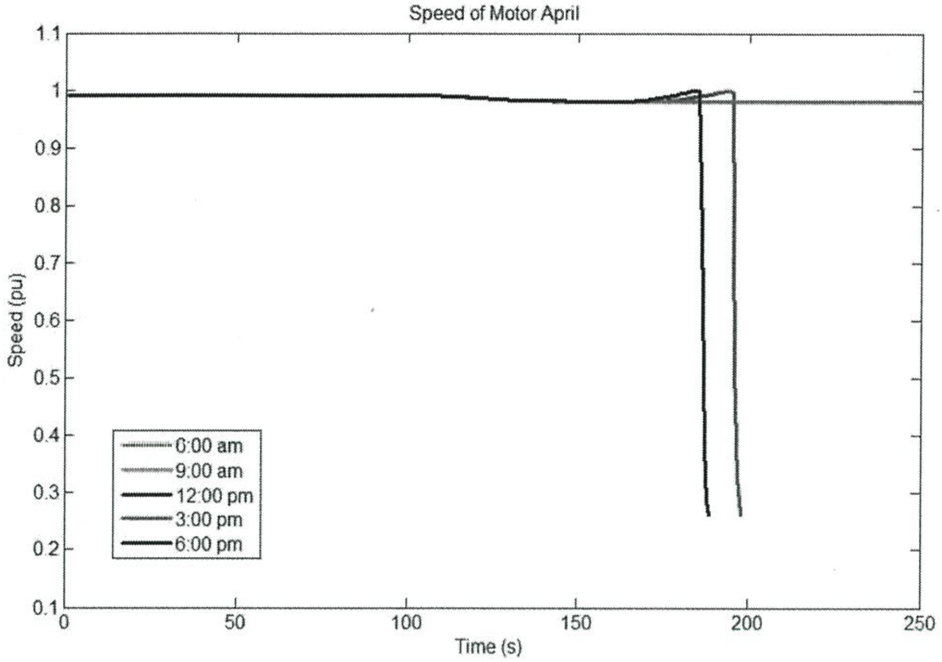
4.3 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการจำลองใช้ PV เพื่อศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่มีโหลดชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำและมีการรบกวนระบบโดยการเปิดวงจรสายส่ง ณ วินาทีที่ 100 ซึ่งจะจำลองระบบที่แตกต่างกันไปตามกำลังการผลิตของ PV โดยมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังการผลิตไปตามช่วงเวลาในแต่ละวัน ในการจำลองนี้ได้เลือกวันที่ 15 ของเดือนเมษายน สิงหาคมและธันวาคมซึ่งเป็นเดือนตัวแทนของฤดูกาลในประเทศไทย

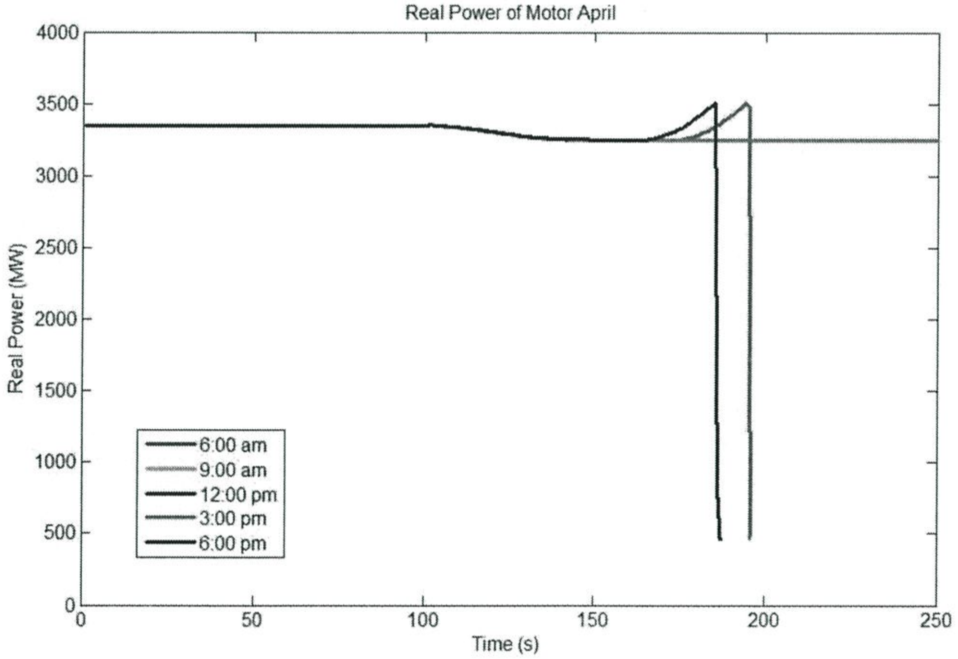


รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนเมษายน

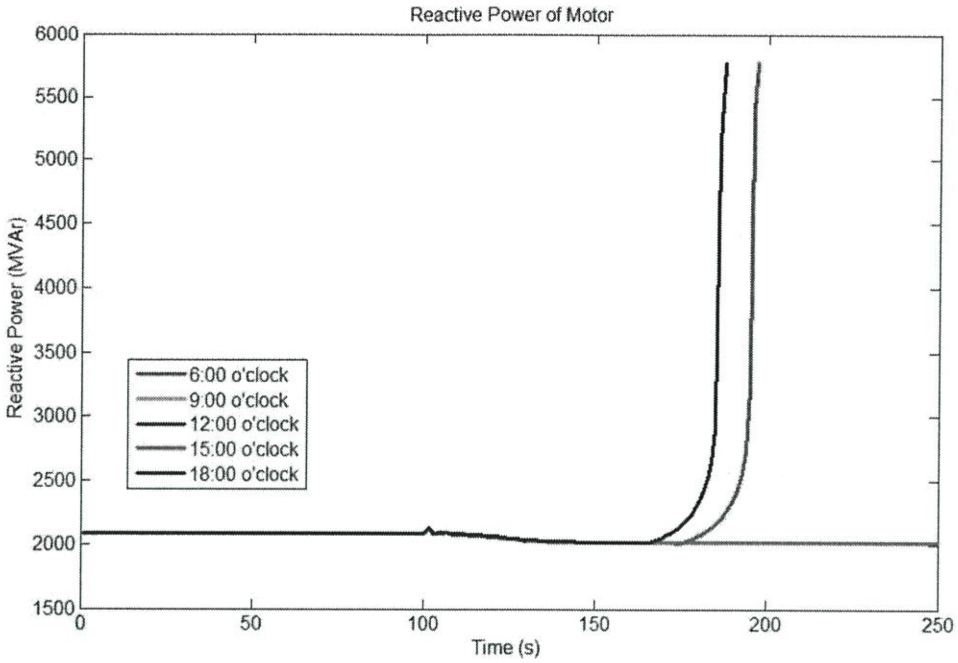
จากรูปที่ 4.9 พบว่าหลังจากมีการรบกวนระบบ ณ วินาทีที่ 100 ส่งผลให้เกิดแรงดันตกในระบบเกิดขึ้น ULTC จึงมีการปรับแทปเพื่อรักษาระดับแรงดันของโหลด ในช่วงเวลาที่ 9.00 น. 12.00 น. และ 15.00 น. ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้โดยมีแรงดันไฟฟ้าตกที่บัสต่างๆเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้โดยการกระตุ้นไม่ถึงค่าที่ OEL จำกัดไว้ แต่เมื่อพิจารณาผลจำลองที่เวลา 6.00 น. พบว่าหลังจากเกิดการรบกวนประมาณ 80 วินาที การเพิ่มขึ้นของของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากการแทปของหม้อแปลงทำให้การกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 กระตุ้นถึงค่าที่ OEL จำกัดไว้จึงทำการลดกำลังการผลิตเพื่อความปลอดภัยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.10 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน



รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน

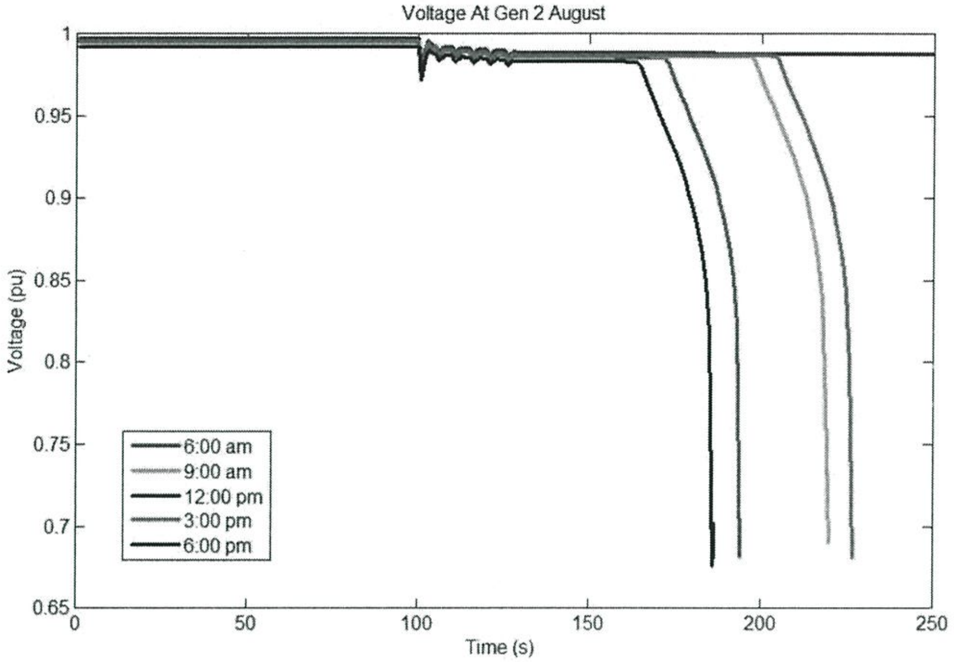


รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน

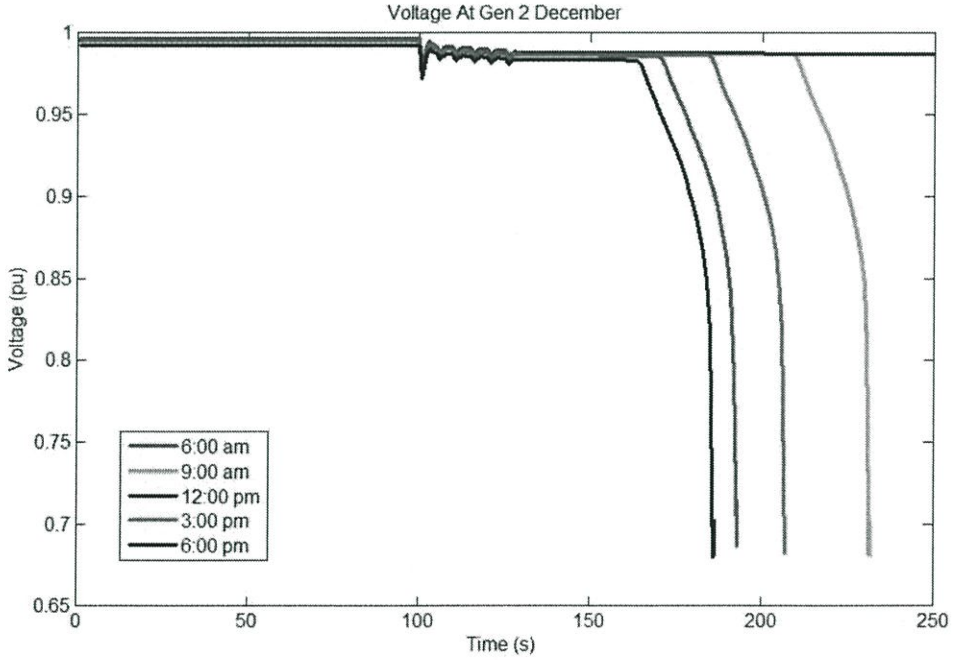
พิจารณารูปที่ 4.10 - 4.12 หลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ถูกจำกัดการกระตุ้นจาก OEL เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหยุดการทำงานกลางคัน (Motor stalling) กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลงและความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แรงดันของระบบไฟฟ้าตกลงจนเกิดการพังทลายของแรงดันเกิดขึ้น

ส่วนของการจำลองที่เวลา 18.00 น. จะมีผลตอบสนองเช่นเดียวกับกรณีช่วงเวลา 6.00 น. แต่จะเกิดการพังทลายของแรงดันที่ไวกว่าในที่นี้ประมาณ 160 วินาทีหลังการรบกวนระบบ เนื่องจากที่เวลา 18.00 น. PV ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้เลย ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 รับภาระมากขึ้นกว่าเดิม ผลจึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 มีการกระตุ้นสูงขึ้นในระยะเวลาที่สั้นกว่าเดิมจนทำงานถึงขีดจำกัดในเวลาที่เร็วขึ้นกว่าเดิม

ผลตอบสนองการจำลองในเดือนสิงหาคมและธันวาคมแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 จากรูปที่ 3.3 เดือนสิงหาคมและธันวาคม PV มีกำลังผลิตที่น้อยกว่าในเดือนเมษายนอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ในสองเดือนนี้เกิดการพังทลายของแรงดันไม่เพียงแต่ในช่วงเวลา 6.00 น. และ 18.00 น. เท่านั้น แต่ยังเกิดในช่วง 9.00 น. และ 15.00 น. อีกด้วย โดยสาเหตุการเกิดนั้นมีลักษณะเดียวกันกับกรณีเดือนเมษายน



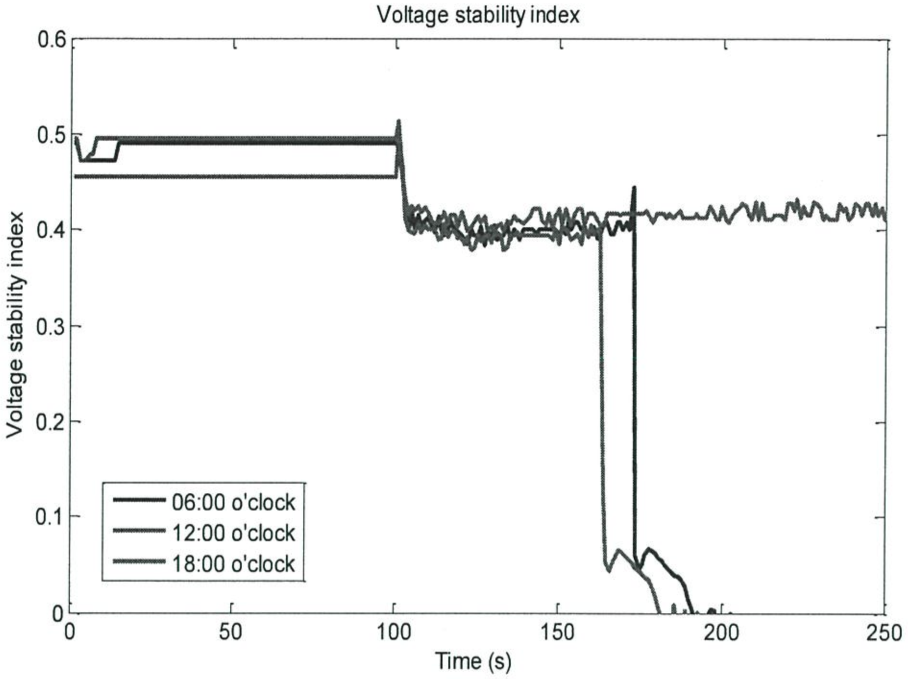
รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนสิงหาคม



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนธันวาคม

4.4 วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบไฟฟ้าด้วยดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบของการทดลองนี้จะเลือกผลตอบสนองจากการจำลองของเดือนเมษายน โดยจะพิจารณาเฉพาะผลการจำลอง ณ เวลา 6.00 น. 12.00 น. และ 18.00 น. เท่านั้น ซึ่งมีทั้งกรณีที่เกิดการพังทลายของแรงดันและกรณีที่รักษาเสถียรภาพได้หลังจากเกิดการรบกวน



รูปที่ 4.15 ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันของเดือนเมษายน

จากรูปที่ 4.15 เป็นการแสดงดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.11 $\Delta\underline{S}_L = \underline{Z}_L\underline{I}^2 - \underline{Z}_{thev}\underline{I}^2$ เมื่อดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีค่าเป็นศูนย์หมายถึง ณ ขณะนั้นไม่สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดในระบบได้และระบบจะเกิดแรงดันพังทลายขึ้นถ้ามีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ ในช่วงเริ่มการจำลองระบบไฟฟ้ามีค่าของดัชนีอยู่ในช่วง 0.4 – 0.5 ทุกกรณีหมายถึง ช่วงก่อนมีการรบกวนระบบไฟฟ้ากำลังมีระยะห่างจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ในกรณีการจำลองที่เวลา 12.00 น. หลังเกิดการรบกวนวินาทีที่ 100 พบว่าดัชนีมีการตกลงมาเพียงเล็กน้อยและไม่มีการตกลงมาเพิ่มเติมในเวลาต่อมา แต่เมื่อพิจารณาการจำลองที่เวลา 6.00 น. และ 18.00 น. หลังจาก OEL จำกัดการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีการตกลงมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงระบบที่กำลังสูญเสียเสถียรภาพแรงดันฉับพลันและหลังจากนั้นประมาณ 30 วินาทีต่อมาจึงเกิดการพังทลายของแรงดันเกิดขึ้น เมื่อดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันจะเกิดขึ้นเมื่อระบบไฟฟ้ากำลังไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้เพียงพอต่อความต้องการต่อโหลด ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบที่ถูกรบกวนให้มีความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำ เมื่อผสมผสานการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เช่น ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer : ULTC) เป็นต้นและตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบไม่สามารถสำรองกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อโหลดและเกิดแรงดันตกในระบบเกิดขึ้น ไม่เพียงเท่านั้นหากเกิดเหตุการณ์เช่นเดียวกันในกรณีที่ระบบมีโหลดชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอและเกิดการหยุดการทำงานอย่างกะทันหัน กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วโดยมอเตอร์ส่งผลให้เกิดการพังทลายของแรงดันในระบบ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) มาทดลองใช้เพื่อศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันพบว่าในระบบที่ทำการจำลอง เซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยรักษาเสถียรภาพแรงดันได้เมื่อมีปริมาณแสงหรือมีกำลังการผลิตมากเพียงพอ นอกจากนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการหาดัชนีบ่งชี้เพื่อการทำนายการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันโดยการคำนวณหาอิมพิแดนซ์ของระบบและนำมาคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน โดยระบบจะสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเมื่อดัชนีมีค่าเท่ากับศูนย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

โครงงานชิ้นนี้มีประเด็นที่สามารถศึกษาเพิ่มเติม และนำไปพัฒนาต่อยอดได้ดังนี้

- ควรจำลองให้ PV มีกำลังการผลิตที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามความเข้มของแสง โดยใช้ตัวควบคุมที่มีซับซ้อนมากยิ่งขึ้นและศึกษาความไวต่อการตอบสนองของ PV เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- ควรศึกษาดัชนีบ่งชี้หลักการอื่นๆที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบมากกว่าเดิม
- ควรจำลองระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชีวมวล เป็นต้น
- ควรจำลองระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] รศ. ดร. อิสระชัย งามหรู, **พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง**, ครั้งที่ 1 , สิงหาคม 2554

[2] Khoi Vu, Miroslav M. Begovic, Damir Novosel and Murari Mohan Saha, **Use of local measurements to estimate voltage-stability margin**, IEEE transactions on power systems, Vol. 14, No. 3, August 1999

[3] Baheej Alghamdi and Mohammed Alamri, **Impacts of Large-Scale Integration of Solar Photovoltaics and Load Characteristics on Power System Voltage Stability,** Chalmers University of Technology.

[4] Muhammad Nizam, Azah Mohamed and Aini Hussain, **Performance evaluation of voltage stability indices for dynamic voltage collapse prediction**, Journal of applied sciences 6(5) : 1104-1113, 2006

[5] ฝ่ายสื่อสารองค์กร บริษัท ปตท. จากัด (มหาชน), "ก๊าซไทยมาจากไหน?," **ก๊าซธรรมชาติ พลังงานในมือเรา** 1 (ธันวาคม 2555): 17.

[6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ,http://www.dede.go.th/main.php?filename=index

[7] P. Kundur, **Power system stability and control,** McGraw-Hill, Inc.

[8] Paul Brucke, **Reactive power control in utility-scale photovoltaic**, Issu 7.4, Jun/Jul '14, http://solarprofessional.com/articles/design-installation/reactive-power-control-in-utility-scale-pv?v=disable_pagination

[9] Masaru Shimomura, Yuou Xia and Masaru Wakabayashi, **A new advanced over excitation limiter for enhancing the voltage stability of power system**, Mitsubishi electric corporation, Kobe Japan

[10] F. Karbalaei, M. Kalantar and A. Kazemi, **Diagnosis of voltage collapse due to induction motor stalling using static analysis**, Energy conversion and management 49 (2008) 151-156

[11] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย Electricity generating authority of Thailand, **เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์**

[12] Farhan Mahmood, **Improving the photovoltaic model in powerfactory**, Degree project in electric power systems, Second level, Stockholm, Sweden 2012

[13] ณรัล ลือวรศิริกุล อาทิตย์ สารสมบูรณ์ และ ดร. อมรา อิทธิพงษ์, **ศึกษาความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา (Study of the intensity of global solar radiation incident in Sunandha Rajaphat university)**

[14] C.W Taylor, **Power System Voltage Stability**, McGraw-Hill, 1994

[15] Bergovic, M., B. Milosevic and D. Novosel, 2002, **A novel method for voltage instability protection**, Proceeding of the 35th Hawaii International Conference on System Science. (HICSS'02)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการ

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

Voltage Stability Studies in a Power System With Renewable Energy Sources

เกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ[1] คณิต โอปิลันทพงษ์[1] คุณากร อุบลม่วง[2]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ซอยฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 15020 โทรศัพท์ 0-2739-2478

บทคัดย่อ

ในระยะหลังแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้นเนื่องจากเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์และข้อจำกัดทางสิ่งแวดล้อมหลายประการ ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังอาจประสบกับปัญหาการดำเนินการระบบต่างๆ ซึ่งเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นหนึ่งในภัยคุกคามต่อความมั่นคงของระบบซึ่งอาจนำมาสู่การเกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้างได้ ปริญญานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันแบบพลวัตในระบบทดสอบที่มีการเชื่อมแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นที่ผลจากกำลังการผลิตของ PV ที่แตกต่างกันต่อการพังทลายของแรงดัน นอกจากนั้นยังสนใจผลของการทำงานของอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer : ULTC) ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) และตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเสถียรภาพแรงดัน แบบจำลองระบบทดสอบได้ถูกพัฒนาขึ้นในโปรแกรม Digsilent Power Factory โดยจำลองให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบอยู่ในระดับสูงและระดับการผลิตของ PV มีค่าแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล นอกจากนั้นได้มีการคำนวณหาดัชนีบ่งชี้เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าซึ่งอาศัยเทคนิคการวัดค่ามุมเฟส (Phaser Measurement Technique)

คำสำคัญ: เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า, การพังทลายของแรงดันไฟฟ้า, ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า, เซลล์แสงอาทิตย์, การจำลองบนโดเมนเวลา

Abstract

Recently, more solar Photovoltaics (PV) have been connected to power system due to economic and environmental reasons. This could potentially endanger stable operation that might eventually leads to wide area blackout. Therefore, this project investigates dynamic voltage stability of a test power system with interconnected solar PV. The emphasis is given on the impact of different levels of solar power on voltage collapse. Moreover, the study is extended to study impacts of operation of major power system equipment such as Under Load Tap Changer (ULTC), Automatic Voltage Regulator (AVR) and Over Excitation Limiter (OEL) of synchronous generator on voltage stability of the system. Simulation is carried out on Digsilent Power Factory. The test system is assumed to be heavily loaded. Different generation levels of Solar PV are used to reflect seasonal variation of solar irradiance. A voltage stability index based on phasor measurement technique is needed to indicate proximity to the collapse point. Simulation results reveal that generation level or solar PV has direct impact on voltage stability of the power system.

Keywords: Voltage stability, Voltage collapse, Voltage stability margin, Photovoltaic,Time domain simulation

1.บทนำ

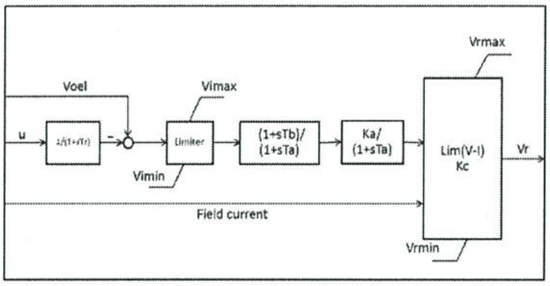
ในปัจจุบันความต้องการของภาระไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นสูงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิต ปัญหาเสถียรแรงดันจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อระบบไฟฟ้าไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของภาระไฟฟ้าซึ่งอาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้างเนื่องจากผลของการพังทลายของแรงดัน การพังทลายของแรงดัน[1] คือ การตกลงอย่างรวดเร็วและไม่สามารถควบคุมได้ของระดับแรงดันไฟฟ้าจากผลของการมีกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟไม่เพียงพอในระบบและอาจเกิดได้จากรบกวนระบบขนาดใหญ่ เช่น การสูญเสียวงจรสายส่งในระบบ การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป และตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน เป็นต้น ซึ่งการติดตามและตรวจสอบจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการหลีกเลี่ยงการพังทลายของแรงดัน นอกจากนั้นในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกให้ความสนใจเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและมีความต้องการที่จะลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกและเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานเลือกที่มี

ศักยภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเสถียรภาพแรงดัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ

ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic voltage regulator) ทำหน้าที่รักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการขยายสัญญาณค่าผิดพลาดแรงดัน (Error voltage) ตัวผ่านตัวขยายสัญญาณ ดังรูปที่ ผลลัพธ์จะได้สัญญาณที่จะไปควบคุมแรงดันโดยผ่านการเพิ่มหรือลดการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 1 บล็อคควบคุม AVR

2.2 การคำนวณดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้หลักการพื้นฐานของวงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin equivalent circuit) เพื่อหาค่าอิมพิแดนซ์
เทวินินมาใช้ในการคำนวณตัวบ่งชี้เสถียรภาพแรงดัน [2]

การหาค่า $\underline{Z}_{thev}$ [3] เพื่อนำไปคำนวณหาการตรวจจับการสูญเสียเถียรภาพแรงดันสามารถทำได้หลายวิธี ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้การหาโดย curve fitting

จาก
$$\underline{E}=\underline{V}+\underline{Z}_{thev}\underline{I} \quad (1)$$

กำหนดให้
$$\underline{E}=E_r+jE_i \quad (2)$$
$$\underline{V}=u+jw \quad (3)$$
$$\underline{I}=g+jh \quad (4)$$

จะได้
$$\begin{bmatrix}1 & 0 & -g & h\\ 0 & 1 & -h & -g\end{bmatrix} \mathrm{x} \begin{bmatrix}E_r\\ E_i\\ R_{thev}\\ X_{thev}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u\\ w\end{bmatrix} \quad (5)$$

ค่าของสัมประสิทธิ์ u, w, g และ h สามารถทำการวัดได้จากบัสที่ต้องการวัด ส่วนตัวแปรที่ยังไม่ทราบคือ R_{thev}, X_{thev}, E_r และ E_r พบว่าตัวแปรที่ทราบมีเพียง 2 ตัวแปรแต่ต้องการทราบค่า 4 ตัวแปรเพื่อทำการหาจำเป็นจะต้องวัดค่าเพิ่มเติมมากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งผลจะมีการคลาดเคลื่อนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการแกว่งของข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่วิเคราะห์

ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันอธิบายการเข้าใกล้การเกิดแรงดันพังทลายในรูปของกำลังไฟฟ้าโดยดูจากกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ของระบบก่อนที่จะระบบไฟฟ้าจะพังทลายซึ่งจะสามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าปรากฏกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้จริงหรือสามารถหาได้จากกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เหลือที่สามารถจ่ายให้โหลดก่อนการเกิดแรงดันพังทลาย โดยมีสมการทางคณิตศาสตร์

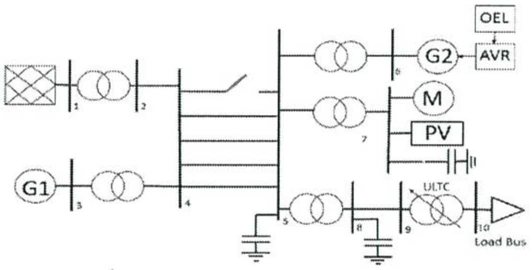
ดังนี้
$$\Delta\underline{S}_L=\underline{Z}_L\underline{I}^2-\underline{Z}_{thev}\underline{I}^2 \quad (6)$$

จากสมการที่ 2.11 จะสามารถสรุปได้ว่าเมื่อดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีค่าเป็นศูนย์หมายถึง ณ ขณะนั้นไม่สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดในระบบได้และระบบจะเกิดแรงดันพังทลายขึ้นถ้ามีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ

3. หลักการทำงานและการออกแบบระบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบจำลองเกิดปัญหาจากการสูญเสียสายส่งในระบบโดยไม่เกิดกระแสลัดวงจร เพื่อศึกษาการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) ในการรักษาเสถียรภาพแรงดัน ด้วยวิธีการจำลองบนโดเมนเวลาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองจากการคำนวณหาดัชนี บ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน

3.1 ระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน



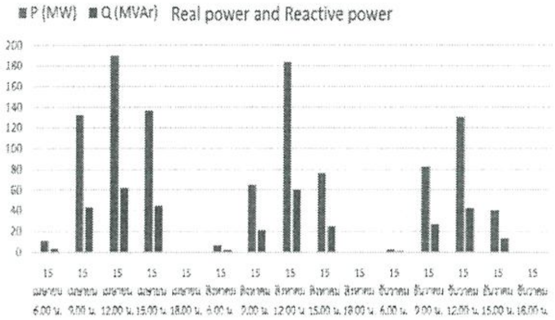
รูปที่ 3 ระบบจำลองปัญหาเสถียรภาพแรงดัน

ระบบจำลอง 10 บัส ประกอบไปด้วยบัสอนันต์ 1 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ถูกติดตั้งเพื่อรักษาแรงดันบัสที่ 6 บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งหมด 2 บัส โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 จะติดตั้งตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) และตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) บัสโหลดทั้งหมด 2 บัส โดยโหลดที่บัส 6 จะเป็นโหลดชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและโหลดที่บัส 10 จะเชื่อมต่อกับหม้อแปลงชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer transformer : ULTC) ระบบจำลองนี้จะมีการรบกวนระบบ คือ การสูญเสียวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 4 และ 5 จำนวนหนึ่งวงจรจากทั้งหมด 5 วงจร

การออกแบบขนาดของ PV

- กำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของ PV คือ 190 MW เมื่อ PV มีความเข้มแสงที่ 900 MW/m^2
- กำหนดให้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุดของ PV คือ 31.2 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด (±62.4 MVAr)
- กำลังการผลิตของ PV [4] เป็นผลจากการศึกษาการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในประเทศไทย การทดลองนี้จึงทำการจำลองผลตอบสนองของระบบในฤดูที่แตกต่างกัน 3 ฤดูคือ ฤดูร้อน ฤดูฝนและฤดูหนาว ซึ่งวันที่ทำการจำลองมีดังต่อไปนี้

ขนาดกำลังการผลิตของ PV ที่แตกต่างกันในแต่ละวันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4

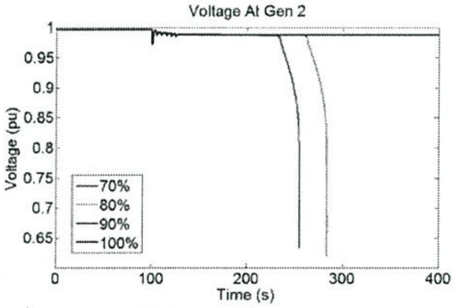


รูปที่ 4 กำลังผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ PV

4. ผลการทดลอง

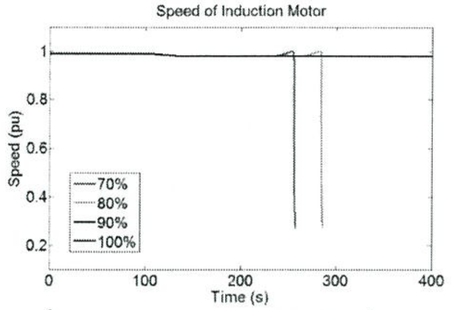
4.1 การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการรักษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการจำลองใช้ PV เพื่อศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่มีโหลดชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำและมีการรบกวนระบบโดยการเปิดวงจรสายส่ง ณ วินาทีที่ 100 ซึ่งจะจำลองระบบที่แตกต่างกันไปตามกำลังการผลิตของ PV โดยมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังการผลิตไปตามช่วงเวลาในแต่ละวัน ในการจำลองนี้ได้เลือกวันที่ 15 ของเดือนเมษายน สิงหาคม และธันวาคมซึ่งเป็นเดือนตัวแทนของฤดูกาลในประเทศไทย

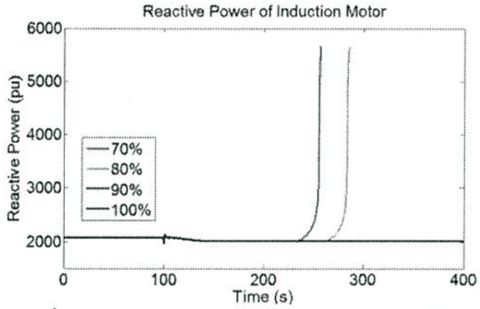


รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ของเดือนเมษายน

จากรูปที่ 5 พบว่าหลังจากมีการรบกวนระบบ ณ วินาทีที่ 100 ส่งผลให้เกิดแรงดันตกในระบบเกิดขึ้น ULTC จึงมีการปรับแทปเพื่อรักษาระดับแรงดันของโหลด ในช่วงเวลาที่ 9.00 น. 12.00 น. และ 15.00 น. ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้โดยมีแรงดันไฟฟ้าตกที่บัสต่างๆเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้โดยการกระตุ้นไม่ถึงค่าที่ OEL จำกัดไว้ แต่เมื่อพิจารณาผลจำลองที่เวลา 6.00 น. พบว่าหลังจากเกิดการรบกวนประมาณ 80 วินาที การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากการแทปของหม้อแปลงทำให้การกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 กระตุ้นถึงค่าที่ OEL จำกัดไว้ จึงทำการลดกำลังการผลิตเพื่อความปลอดภัยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน



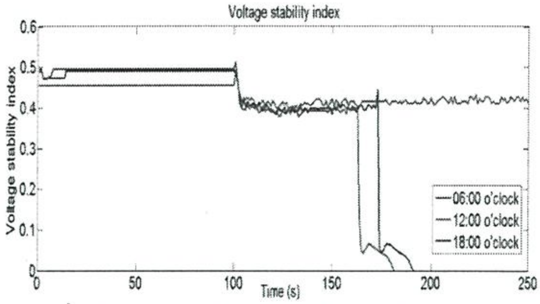
รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเดือนเมษายน

พิจารณารูปที่ 6-7 หลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ถูกจำกัดการกระตุ้นจาก OEL เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหยุดการทำงานกลางคัน (motor stalling) กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลงและความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แรงดันของระบบไฟฟ้าตกลงจนเกิดการพังทลายของแรงดันเกิดขึ้น

ส่วนของการจำลองที่เวลา 18.00 น. จะมีผลตอบสนองเช่นเดียวกับกรณีช่วงเวลา 6.00 น. แต่จะเกิดการพังทลายของแรงดันที่ไวกว่าในที่นี้ประมาณ 160 วินาทีหลังการรบกวนระบบ เนื่องจากที่เวลา 18.00 น. PV ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้เลย ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 รับภาระมากขึ้นกว่าเดิม ผลจึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 มีการกระตุ้นสูงขึ้นในระยะเวลาที่สั้นกว่าเดิมจนทำงานถึงขีดจำกัดในเวลาที่เร็วขึ้น

กว่าเดิม ในเดือนสิงหาคมและธันวาคม PV มีกำลังผลิตที่น้อยกว่าในเดือนเมษายนอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ในสองเดือนนี้เกิดการพังทลายของแรงดันไม่เพียงแต่ในช่วงเวลา 6.00 น. และ 18.00 น. เท่านั้น แต่ยังเกิดในช่วง 9.00 น. และ 15.00 น. อีกด้วย โดยสาเหตุการเกิดนั้นมีลักษณะเดียวกันกับกรณีเดือนเมษายน

4.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยดัชนีบ่งชี้เสถียรภาพแรงดัน



รูปที่ 8 ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันของเดือนเมษายน

จากรูปที่ 7 เป็นการแสดงดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน เมื่อดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีค่าเป็นศูนย์หมายถึงระบบจะเกิดแรงดันพังทลายขึ้นถ้ามีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ ในช่วงเริ่มการจำลองระบบไฟฟ้ามีค่าของดัชนีอยู่ในช่วง 0.4 – 0.5 ทุกกรณีหมายถึง ช่วงก่อนมีการรบกวนระบบไฟฟ้ากำลังมีระยะห่างจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ในกรณีการจำลองที่เวลา 12.00 น. หลังเกิดการรบกวนวินาทีที่ 100 พบว่าดัชนีมีการตกลงมาเพียงเล็กน้อยและไม่มีการตกลงมาเพิ่มเติมในเวลาต่อมา แต่เมื่อพิจารณาการจำลองที่เวลา 6.00 น. และ 18.00 น. หลังจาก OEL จำกัดการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2 ดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีการตกลงมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงระบบที่กำลังสูญเสียเสถียรภาพแรงดันฉับพลันและหลังจากนั้นประมาณ 30 วินาทีต่อมาจึงเกิดการพังทลายของแรงดันเกิดขึ้น เมื่อดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์

5. สรุปผลการทดลอง

การสูญเสียเสถียรภาพแรงดันจะเกิดขึ้นเมื่อระบบไฟฟ้ากำลังไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้เพียงพอต่อความต้องการต่อโหลด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบที่ถูกรบกวนให้มีความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำ เมื่อผสมผสานการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เช่น ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator : AVR) และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแทป (Under Load Tap Changer : ULTC) เป็นต้นและตัวจำกัดการกระตุ้นเกิน (Over Excitation Limiter : OEL) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบไม่สามารถสำรองกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อโหลดและเกิดแรงดันตกในระบบเกิดขึ้น ไม่เพียงเท่านั้นหากเกิดเหตุการณ์เช่นเดียวกันในกรณีที่ระบบมีโหลดชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอและเกิดการหยุดการทำงานอย่างกะทันหัน กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วโดยมอเตอร์ส่งผลให้เกิดการพังทลายของแรงดันในระบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) มาทดลองใช้เพื่อศึกษาผลตอบสนองต่อเสถียรภาพแรงดันพบว่าในระบบที่ทำการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยรักษาเสถียรภาพแรงดันได้เมื่อมีปริมาณแสงหรือมีกำลังการผลิตมากเพียงพอ นอกจากนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการหาดัชนีบ่งชี้เพื่อการทำนายการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันโดยการคำนวณหาอิมพิแดนซ์ของระบบและนำมาคำนวณหาดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพแรงดัน โดยระบบจะสูญเสียเสถียรภาพแรงดันเมื่อดัชนีมีค่าเท่ากับศูนย์

6. กิตติกรรมประกาศ

[1] P. Kundur, **Power system stability and control**, McGraw-Hill, Inc.

[2] Muhammad Nizam, Azah Mohamed and Aini Hussain, **Performance evaluation of voltage stability indices for dynamic voltage collapse prediction**, Journal of applied sciences 6(5) : 1104-1113, 2006

[3] Khoi Vu, Miroslav M. Begovic, Damir Novosel and Murari Mohan Saha, **Use of local measurements to estimate voltage-stability margin, IEEE transactions on power systems**, Vol. 14, No. 3, August 1999

ประวัติผู้เขียน

นายเกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
ที่อยู่ 47/215 ถนนนิมิตใหม่ เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510
E-mail : keattipoom.k@gmail.com
เบอร์โทรศัพท์ : 085-111-9576

นายคณิต โอปีลันทพงษ์
ที่อยู่ 212/1 หมู่ 9 ต.หนองขาม อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี 72240
E-mail : noter_123@hotmail.com
เบอร์โทรศัพท์ : 083-022-6167

นายคุณากร อุบลม่วง
ที่อยู่ 178/12 หมู่ 11 ต.สวนกล้วย อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี 70110
E-mail : khunakorn.u@gmail.com
เบอร์โทรศัพท์ : 082-351-5392

ภาคผนวก ข

ข้อมูลระบบทดสอบ

ข้อมูลระบบทดสอบ

Line :

(R and X in pu on 100 MVA base)

Line (between bus)	R	X	B
2-4	0.0000	0.0040	0.0000
4-5	0.0015	0.0288	1.1730
8-9	0.0010	0.0030	0.0000

Transformer :

(R and X in pu on 100 MVA base)

Transformer (between bus)	R	X	Ratio
1-2	0.0000	0.0020	0.8857
3-4	0.0000	0.0045	0.8857
5-6	0.0000	0.0125	0.9024
5-7	0.0000	0.0030	1.0664
5-8	0.0000	0.0026	1.0800

Under load tap changer transformer (ULTC) :

Time delay for the first tap movement = 30 s

Time delay for subsequent tap movement = 5 s

Dead band = ±1% pu bus voltage

Tap range = ±16 steps

Step size = 0.00625 pu

Load:

Bus	P(MW)	Q(MVAr)	
7	3271	1015	Load level 1
	3320	1030	Load level 2
	3345	1038	Load level 3
10	3384	971	Load level 1
	3435	985	Load level 2
	3460	993	Load level 3

Slack bus : Voltage set point 0.98 p.u.

Synchronous generator 1 (G1) : H = 2.09, MVA rating = 2200 MVA

Synchronous generator 2 (G2) : H = 2.33, MVA rating = 1400 MVA

Parameters for G1 and G2 :

$R_a = 0.0046$ $X_d = 2.07$ $X_q = 1.99$

$X_l = 0.155$ $X_d' = 0.28$ $X_q' = 0.49$

$X_d'' = 0.215$ $X_q'' = 0.215$

$T_d' = 4.10$ $T_q' = 0.56$

$T_d'' = 0.033$ $T_q'' = 0.062$

Exciters :

$T_r = 0.02$ second

Gain $K_a = 400$ pu

Over excitation limiter (OEL) :

Gain = 0.01 pu

Minimum excitation to enable = 3.02 pu

Current first value of curve = 4.5 pu

Time first value of curve = 50 seconds

Current first value of curve = 4.6 pu

Time first value of curve = 30 seconds

Current first value of curve = 4.7 pu

Time first value of curve = 10 seconds

Induction motor :

Motor rating = 3600 MVA, 60 Hz

X_m = 3.3 pu R_s = 0.01 pu X_s = 0.145 pu

R_r = 0.008 pu X_r = 0.145 pu H = 0.6 s

Load torque exponent m = 2.0

ประวัติผู้เขียน

นายเกียรติภูมิ แก้วประเสริฐ
ที่อยู่ 47/215 KC garden home ถนนนิมิตใหม่
เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510
E-mail : keattipoom.k@gmail.com
เบอร์โทรศัพท์ : 085-111-9576

นายคณิต โอปิลันทพงษ์
ที่อยู่ 212/1 หมู่ 9 ต.หนองขาม
อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี 72240
E-mail : noter_123@hotmail.com
เบอร์โทรศัพท์ : 083-022-6167

นายคุณากร อุบลม่วง
ที่อยู่ 178/12 หมู่ 11 ต.สวนกล้วย อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี 70110
E-mail : khunakorn.u@gmail.com
เบอร์โทรศัพท์ : 082-351-5392