

อภิธาน์นทนาการ

สัญญาเลขที่ R2557C067



สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิก

(Voltage level control in low voltage distribution networks with photovoltaic system)

คณะผู้วิจัย

ดร. ปิยดนัย

ภาชนะพรรณณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน... 2.5.ค.ค. 2559
เลขทะเบียน... 1690905X
เลขเรียกหนังสือ... 0 ๐๐

๐62

๕44

๗618๕

2๐5๘

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยนเรศวร ปีงบประมาณ 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟโตโวลตาอิก สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ทดลอง และ ห้องปฏิบัติการ ให้สามารถดำเนินงานจัดทำวิจัยได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร. ศักดา สมกุล ที่ได้กรุณาให้ข้อคิด คำแนะนำ ช่วยเหลือในเรื่องการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า จนสามารถทำงานวิจัยได้อย่างถูกต้อง และ เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ท้ายนี้ ขอบพระคุณ นายภูดิท อินไทย ที่ได้ช่วยเหลือในการพัฒนาชุดทดสอบ ทำการทดสอบและ เก็บข้อมูล รวมทั้งร่วมเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ดร. ปิยนัย ภาชนะพรรณม์

หัวหน้าโครงการวิจัย



หัวข้อวิจัย	การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟโตโวลตาอิก
ชื่อผู้วิจัย	ปิยนัย ภาชนะพรรณ
หน่วยงาน	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
คำสำคัญ	ระบบไฟโตโวลตาอิก, การควบคุมแรงดันเกิน, ระบบจำหน่ายแรงต่ำ, การชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ, ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีความต้องการเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าชนิดโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic system, PV) จากภาครัฐเริ่มเข้ากับระบบจำหน่ายแรงต่ำเพื่อวัตถุประสงค์ขายไฟให้การไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งการเชื่อมต่อของระบบไฟโตโวลตาอิกที่มากขึ้น อาจส่งผลให้เกิดปัญหา กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้นในระบบ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้ามีค่าไม่สูงมาก เช่น ในช่วงเวลากลางวันของวันธรรมดา ซึ่งการแก้ปัญหาแรงดันเกินสามารถทำได้โดยชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งในกรณีระบบไฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สมัยใหม่สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของตัวอินเวอร์เตอร์เอง แต่ในกรณีระบบไฟโตโวลตาอิกที่ใช้อินเวอร์เตอร์รุ่นเก่าซึ่งไม่สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ อาจจะต้องมีอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแยกต่างหาก

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Micro Static Var Compensator, μ SVC) โดยจะเน้นไปที่การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพของตัวเหนี่ยวนำด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor, TCR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเรียบง่ายและมีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน นำมาต่อขนานกับระบบไฟโตโวลตาอิกเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินแบบอัตโนมัติ โดย μ SVC จะทำการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต้อมีค่าเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้

ผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการกับชุดทดสอบจริงเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส พบว่าอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาสามารถปรับเปลี่ยนการรับกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่จุดเชื่อมต่อกับระบบไฟโตโวลตาอิกได้ ทำให้สามารถป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินได้ ณ จุดเชื่อมต่อได้ และไม่ส่งผลต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้าด้านอื่น เช่น ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งความสามารถในการควบคุมแรงดันเกินของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ใช้และตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบ

Title Voltage level control in low voltage distribution networks with photovoltaic system

Author Piyadanai Pachanapan

Institute Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

Keywords Photovoltaic system, Over-voltage control, low-voltage distribution networks, reactive power compensation, micro static var compensator

Abstract

The number of residential photovoltaic (PV) systems connected into low-voltage distribution networks has increased dramatically. Although the PV systems can provide the benefit in term of extending the clean energy generation, the high penetration of PV connections is able to cause the reverse power flow and then introducing the over-voltage problem to the distribution network (especially during the noon time which the demand of electricity consumption is low whilst the power generation from the solar is high). The voltage level in distribution networks can be controlled by using reactive power compensation techniques. The modern inverter used in the PV system can adjust the reactive power responding to the change of voltage level at the point of common coupling (PCC). However, the most inverter installed in the existed PV systems is operated at the unity power factor which cannot providing neither reactive power compensation nor active voltage controllability.

In this research work, the micro static var compensator (μ SVC) is implemented as the automatic over-voltage control device for the PV systems that use the fixed power factor typed inverter. The μ SVC is installed parallel to the PV system and the reactive power is adjusted based on the thyristor controlled reactor, which has simple structure and inexpensive. The value of reactive power flowing through the μ SVC is controlled by using the thyristor's phase controller. In addition, the trigger angle of thyristor is adjusted by phase controller when the voltage level at the PCC is above the reference value or statutory limit.

The results from computer simulations and practical experiments in a single phase low voltage system show that the μ SVC can provide the active voltage controllability for the PV system efficiency. It is found that the μ SVC will absorb the reactive power from the distribution network when the voltage level at the PCC trends to above the statutory limit, without causing another power quality problems such as harmonics. Furthermore, the voltage control capability of the μ SVC depending on the size of reactor and the location of μ SVC in the network.

บทสรุปผู้บริหาร

เรื่อง การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิก

โดย ดร. ปิยดนัย ภาชนะพรรณณ์

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบโฟโตโวลตาอิกซึ่งผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ (Solar Cells) เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางสำหรับการกระจายระบบผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศมีศักยภาพที่จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงแดดได้ในปริมาณที่สูง ซึ่งปัจจุบันระบบโฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อเข้าระบบแล้ว จะเป็นระบบที่ขนาดใหญ่และเชื่อมต่อกับระบบแรงดันสูงเป็นส่วนมาก เนื่องจากการมีต้นทุนที่สูง (โดยเฉพาะค่าแผงโซลาร์เซลล์) จึงต้องสร้างระบบที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้คุ้มทุนได้ไว แต่ในอนาคตระบบโฟโตโวลตาอิกที่มีขนาดเล็กและเชื่อมต่อกับระบบแรงต่ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเชื่อมต่อเข้ามาจากภาคครัวเรือนและชุมชน เนื่องจากราคาแผงโซลาร์เซลล์มีแนวโน้มถูกลง กอปรกับนโยบายรัฐที่ต้องการส่งเสริมประชาชนให้มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของความต้องการทางไฟฟ้าในอนาคต และลดการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่

ระบบโฟโตโวลตาอิกขนาดเล็กจากบ้านหรือครัวเรือนส่วนใหญ่จะเป็นระบบ 1 เฟส โดยจะเชื่อมต่อแบบกระจายไปตามแนวสายจ่ายย่อย (feeder) ของระบบแรงต่ำ 220-240 โวลต์ การเพิ่มขึ้นของระบบโฟโตโวลตาอิกนี้อาจสร้างปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าถ้ามีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะช่วงที่มีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ามาในระบบมากกว่าความต้องการไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าในแนวสายจ่ายย่อยเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ ซึ่งในสภาวะนี้จะเกิดปัญหาแรงดันเกินตลอดตามแนวสายจ่ายย่อยนั้น ซึ่งถ้าระบบโฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อเข้ามามีปริมาณมากขึ้น โดยขาดการควบคุมหรือวางแผนที่ดีพอ ก็มีโอกาสส่งผลให้แรงดันเกินมีขนาดสูงกว่าค่ามาตรฐานของการไฟฟ้าได้ (เช่น ค่ามาตรฐาน +10% ตามข้อกำหนดของกฟภ.)

สำหรับระบบโฟโตโวลตาอิกในปัจจุบันจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งคอยทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงโซลาร์เซลล์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้ามาในระบบจำหน่ายจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งแปรผันตามความเข้มของแสงแดด โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันทั่วไปไม่มีฟังก์ชันในส่วนการควบคุมขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกและไม่มีการควบคุมระดับแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ (ผลิตได้เท่าไร ก็จ่ายเท่านั้นเลย) ซึ่งทำให้บางช่วงเวลาโดยเฉพาะช่วงกลางวันที่มีแสงแดดมีความเข้มสูง ระบบโฟโตโวลตาอิกจะผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามาในระบบจำหน่ายมากเกินไป จนทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินได้

ในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์และหาแนวคิดสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส ที่มีระบบไฟโตโวลตาอิกต่อเข้ามาเป็นจำนวนมาก เมื่อได้แนวคิดหรือวิธีการที่เหมาะสมแล้ว จะพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่สามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขณะที่มีระบบไฟโตโวลตาอิกต่อเข้ามาเป็นจำนวนมาก โดยเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่พัฒนาจะคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ เช่น การติดตั้งราคา และควรใช้ได้กับอุปกรณ์ในระบบไฟโตโวลตาอิกที่มีจำหน่ายทั่วไปหรือที่ติดตั้งอยู่เดิมในระบบโดยไม่ต้องทำการดัดแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติมด้วย

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ในเรื่องปัญหาระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากการเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกจำนวนมากเข้ากับระบบแรงต่ำ 1 เฟส
2. นำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาระดับแรงดันเกินในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส
3. พัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ในระบบจำหน่ายมีขนาดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ขณะที่มีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ามาจากระบบไฟโตโวลตาอิก

สมมติฐานการวิจัย

1. การเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกที่มากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันเกินขึ้นในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ โดยเฉพาะที่บริเวณปลายสายจ่ายย่อย
2. สามารถลดปัญหาแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นได้ เมื่อมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ณ จุดเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกกับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของการกระจายระบบผลิตไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ในเรื่องปัญหาระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากการเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกจำนวนมากเข้ากับระบบแรงต่ำ 1 เฟส และพัฒนาเครื่องมือสำหรับควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกโดยไม่ต้องทำการดัดแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์เดิม

ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบในเรื่องการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีการเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก โดยการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีการเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก เมื่อมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบต่างๆในระบบ โดยการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3. พัฒนาอุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส สำหรับป้องกันปัญหาแรงดันเกิน โดยออกแบบบนพื้นฐานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต
4. ทดสอบความสามารถของอุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสที่ได้พัฒนาขึ้น กับชุดทดสอบระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 1 เฟส ในห้องปฏิบัติการ

เครื่องมือการวิจัย

1. โปรแกรม DigSILENT PowerFactory สำหรับการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. ชุดทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Tecquipment NE9102 Distribution Trainer)

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบการเชื่อมต่อระบบโพลีโวลตาอิกเป็นจำนวนมากเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำด้วยการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ในช่วงที่ระบบมีความต้องการไฟฟ้าน้อย แต่มีกำลังการผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิกมาก จะมีแนวโน้มเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินเกิดขึ้น โดยเฉพาะที่บริเวณปลายสายส่งย่อย ในทางตรงกันข้ามบริเวณต้นทางสายส่งจะมีระดับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่น้อยกว่า ซึ่งการทดสอบระบบกรณีศึกษาในสภาวะคงตัวพบว่า การชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่แต่ละจุดเชื่อมต่อด้วยการดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบจำหน่ายมาที่ระบบโพลีโวลตาอิก สามารถช่วยลดปริมาณการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าได้ แต่การชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเฉพาะจุดที่แรงดันเกินค่ามาตรฐาน (โดยเฉพาะที่ปลายสาย) จะต้องใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าจินตภาพมาก เพื่อชดเชยให้แรงดันกลับมาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดนั้นมีค่าที่ต่ำเกินไปจนเกินกว่าค่าที่การไฟฟ้ายอมรับได้ เพราะฉะนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่จุดใดจุดหนึ่งมากเกินไป จะต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากจุดเชื่อมต่ออื่นในระบบด้วย โดยเฉพาะจากตำแหน่งที่ระดับแรงดันยังอาจไม่สูงเกินค่ามาตรฐาน เช่น ที่บริเวณต้นสาย และ กึ่งกลางสาย ซึ่งจากการทดสอบพบว่าการให้มีการกระจายการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากจุดอื่นในระบบด้วย จะสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินได้ โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดที่ทำการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ซึ่งการที่จะให้มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากจุดอื่นมาช่วยเสริมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบ สามารถทำได้โดยกำหนดรูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพเป็นสองรูปแบบคือ 1) ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ หรือ $Q(V)$ และ 2) ขึ้นอยู่กับกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิก หรือ $Q(P)$ โดยที่จะกำหนดให้ระบบโพลีโวลตาอิกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสาย และ ปลายสายมีการทำงานแบบ $Q(V)$ ในขณะที่ตำแหน่งต้นสายให้ทำงานแบบ $Q(P)$ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าไม่มาก นอกจากนี้จะกำหนดให้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพในแต่ละตำแหน่งมีการประสานการทำงานกัน โดยมีการตั้งค่าเริ่มการทำงานของระบบควบคุมในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่าง เพื่อประโยชน์ในการหลีกเลี่ยงการทำงานรบกวนกันระหว่างตัวชดเชยในแต่ละตำแหน่งให้มากที่สุด เนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพที่จุดใดๆในระบบ ก็ส่งผลกระทบต่อการระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดอื่นๆ ในระบบด้วย

(สามารถพิจารณาได้จากเมตริกซ์ค่าความไวการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า) จากการศึกษาในสภาวะชั่วคราวบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบโฟโตโวลตาอิกที่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอุปกรณ์ 2 ชนิด คือ 1) ตัวอินเวอร์เตอร์ของระบบโฟโตโวลตาอิกเอง (กรณีสามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อัตโนมัติ) และ 2) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (ต่อขนานเพิ่มกับระบบโฟโตโวลตาอิก) พบว่า อุปกรณ์ชดเชยทั้ง 2 ชนิดสามารถตอบสนองต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่แต่ละจุดเชื่อมต่อได้อย่างรวดเร็ว และสามารถป้องกันการเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ แต่ผลตอบสนองต่อแรงดันในกรณีตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กจะช้ากว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีใช้อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากผลของการหน่วงของตัวเหนี่ยวนำในวงจร และการเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวนจะมีการหน่วงอยู่ช่วงเวลาหนึ่งด้วย เพราะฉะนั้นในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ในระบบโฟโตโวลตาอิกไม่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อย่างอัตโนมัติ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กนี้ จะเหมาะมากที่จะใช้เพื่อควบคุมแรงดันเกิน ณ จุดเชื่อมต่อ เนื่องจากมีโครงสร้างและการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน มีผลตอบสนองที่รวดเร็วยอมรับได้ และไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนโครงสร้างระบบโฟโตโวลตาอิกเดิมที่มีอยู่แล้ว

อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเกิน 1 เฟสที่ได้พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต ออกแบบเพื่อใช้กับระบบโฟโตโวลตาอิกขนาด 300 W เชื่อมต่อกับระดับแรงดันไฟฟ้า 220 V ซึ่งสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้ประมาณ 100 Var (ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.95 ที่กำลังไฟฟ้าจริง 300 W) จากการทดสอบแบบลูปเปิด (Open loop test) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าที่กำหนด ระบบควบคุมแรงดันจะปรับเปลี่ยนมุมจุดชนวนโดยพิจารณาจากตารางตัดสินใจที่ได้กำหนดขึ้น ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงของมุมจุดชนวนสามารถถูกควบคุมให้สอดคล้องกับระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี นอกจากกระแสและกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ไหลที่ในชุดชดเชยไม่ส่งผลกระทบต่อระดับฮาร์โมนิกส์ที่จุดเชื่อมต่อมากนักและยังมีระดับความเพี้ยนแรงดันเชิงฮาร์โมนิกรวมอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ไม่เกินค่าตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าภูมิภาค)

เมื่อนำชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตที่ได้พัฒนาไปทดสอบกับชุดทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ พบว่าการดูกลับค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบมาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตจะสามารถช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อได้ โดยความสามารถในการชดเชยจะขึ้นกับค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อนั้นๆ และจากการทดสอบแบบลูปปิด (Close loop test) พบว่าตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตที่ได้พัฒนามานั้น สามารถทำงานตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้อย่างรวดเร็วและช่วยลดปัญหาการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบจำหน่ายได้นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมให้มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพในปริมาณที่ถูกต้องสอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการควบคุมได้

การเผยแพร่งานวิจัย

นำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

P. Pachanapan and S. Premrudeepreechacharn, "Dynamic performance of Reactive Power Control for Voltage Support in Low-Voltage Distribution networks with Photovoltaic Systems", International Electrical Engineering Congress (iEECON), Phuket, March 2015.

ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

P. Pachanapan, S. Premrudeepreechacharn, "Dynamic Performance of Reactive Power Control for Voltage Support in Low-Voltage Distribution Networks with Photovoltaic Systems", Applied Mechanics and Materials, Vol. 781, pp. 388-392, Aug. 2015
<http://www.scientific.net/AMM.781.388>



สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและหลักการทํางาน.....	3
2.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายด้วยการชดเชย กำลังไฟฟ้าจินตภาพ.....	3
2.1.1 ความไวของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Voltage sensitivity).....	4
2.1.2 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าในระบบโพลีโวลตาอิก.....	5
2.1.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบโพลีโวลตาอิก.....	6
2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำแบบเรเดียลที่เชื่อมต่อกับ ระบบโพลีโวลตาอิก.....	7
2.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต.....	9
2.3.1 โครงสร้างและการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต.....	9
2.3.2 การควบคุมการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต.....	10
2.3.3 การจำลองการทรักของไทรสเตอร์.....	12
กรณีที่ 1: ไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวต้านทาน.....	12
กรณีที่ 2: ไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	14
2.3.4 การจำลองการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตใน ระบบจำหน่ายที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย.....	15
3 การศึกษาด้วยแบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	18
3.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบโพลีโวลตาอิก.....	18
3.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก.....	20
3.3 ระบบทดสอบสำหรับกรณีศึกษา.....	21
3.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว.....	22
3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะชั่วคราว.....	23
3.5.1 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบโพลีโวลตา อิก.....	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5.2 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก.....	26
กรณีที่ 1 การควบคุมมุมจุดชนวนด้วยระบบควบคุมแบบ PI.....	27
กรณีที่ 2 การควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตารางตัดสินใจ.....	28
3.6 สรุปการศึกษาผลกระทบด้วยแบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	30
4 การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันและชุดทดสอบ.....	32
4.1 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมกับชุดทดสอบ.....	32
4.1.1 พัฒนาชุดทดสอบระบบไฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า.....	32
4.2 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ในส่วนโปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน.....	42
4.2.1 ระบบควบคุมแบบลูปเปิด.....	43
4.2.2 ระบบควบคุมแบบลูปปิด.....	46
1.) ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่ไม่คิดผลกระทบของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	46
2.) ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระทบของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	49
5 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ.....	52
5.1 การต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กกับชุดทดสอบระบบไฟโตโวลตาอิก.....	52
5.2 การต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กกับชุดทดสอบระบบจำหน่าย.....	53
5.3 การทดสอบระบบแบบลูปเปิด.....	54
5.3.1 การทดสอบกับชุดทดสอบระบบไฟโตโวลตาอิก.....	54
1) ปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้.....	54
2) ผลของมุมทริกไทรสเตอร์กับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ.....	56
5.3.2 การทดสอบกับชุดทดสอบระบบจำหน่าย.....	57
5.4 การทดสอบระบบแบบลูปปิด.....	58
5.4.1 ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่ไม่คิดผลกระทบของระบบไฟโตโวลตาอิก...	59
5.4.2 ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระทบของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6 สรุปลผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
สรุปลผลการวิจัย.....	62
ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	67



สารบัญตาราง

บทที่		หน้า
3.1	ตัวอย่างเงื่อนไขการควบคุมมุมชนวนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่างๆ (แบ่งเป็น 3 ช่วง).....	21
3.2	เมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า จินตภาพ (หน่วย p.u. ต่อ MVar).....	23
3.3	พารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ.....	25
3.4	พารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ.....	27
3.5	เงื่อนไขการควบคุมมุมชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 1.....	28
3.6	เงื่อนไขการควบคุมมุมชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 2.....	29
3.7	เงื่อนไขการควบคุมมุมชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 3.....	29
4.1	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันแต่ละอันดับของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อ ระบบไฟโตโวลตาอิก.....	34
4.2	ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้อิฟฟารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม).....	34
4.3	ขีดจำกัดของกระแสของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิก.....	35
4.4	ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้อิฟฟารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม.....	35
4.5	สัญญาณการควบคุมมุมจุดชนวนเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของตัว เหนี่ยวนำ.....	41
4.6	ตารางตัดสินใจ.....	43
4.7	การเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล.....	43
4.8	ความสัมพันธ์ของมุมในการทริกและค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ.....	46
5.1	ทดสอบปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้.....	54
5.2	มุมทริกไทรสเตอร์กับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ แต่ละอันดับ.	56
5.3	ผลของ (V), (I_{svc}) และ (Q_L) เมื่อมีการควบคุมมุมทริก.....	57

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
2.1	ระบบจำหน่ายที่มีระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายต่อเข้ามา.....	3
2.2	รูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบโพลีโวลตาอิก.....	7
2.3	ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตย์ หรือ SVC.....	10
2.4	วงจรสมมูลย์ของ SVC สำหรับออกแบบระบบควบคุม.....	11
2.5	จำลองการทริกมูมของไทรสเตอร์ (α) กรณีไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวต้านทาน.....	12
2.6	กราฟกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน กรณีทริกมูมไทรสเตอร์ (α) ต่างๆ.....	13
2.7	จำลองการทริกมูมของไทรสเตอร์ (α) กรณีไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	14
2.8	กราฟกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ กรณีทริกมูมไทรสเตอร์ (α) ต่างๆ.....	15
2.9	การทำงานของ μ SVC และระบบจำหน่ายสำหรับกรณีศึกษา.....	16
2.10	กระแสไหลจาก DG, กระแสไหลเข้า μ SVC, กระแสรวมที่ไหลเข้าระบบและ %ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ (เรียงรูปจากบนลงล่าง ตามลำดับ).....	17
3.1	โครงสร้างควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพของอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI..	19
3.2	ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบ $Q(P)$ และ $Q(V)$ ในอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI.....	19
3.3	ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก.....	20
3.4	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมในตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก.....	21
3.5	ระบบจำหน่ายแรงต่ำสำหรับใช้ศึกษาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	22
3.6	แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบ เมื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในกรณีต่างๆ..	22
3.7	การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิกในแต่ละตำแหน่ง.....	24
3.8	ผลจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราว กรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบโพลีโวลตาอิก.....	26
3.9	ผลจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราว กรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยตัวชดเชยแบบ μ VSC โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PI.....	28
3.10	ผลจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราว กรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยตัวชดเชยแบบ μ VSC โดยใช้ตารางเงื่อนไข.....	30
4.1	วงจรสมมูลของระบบโพลีโวลตาอิกเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส.....	32
4.2	ชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อกับระบบโพลีโวลตาอิกกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 1 เฟส.....	33
4.3	รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงดัน.....	33
4.4	รูปคลื่นกระแสเอาต์พุตและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของกระแส.....	33
4.5	บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดัน.....	37
4.6	ภาพรวมของระบบควบคุม.....	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
4.7	อุปกรณ์ในระบบควบคุมแรงดัน.....	38
4.8	โครงสร้างส่วนประกอบและการทำงานของบอร์ด Arduino Uno.....	39
4.9	โมดูล ET-OPTO AC DIMMER.....	39
4.10	สัญญาณ Zero-Crossing เป็นจุดอ้างอิงในการกระตุ้นเฟส.....	40
4.11	ตู้ทดสอบระบบจำหน่าย TecQuipment รุ่น NE9102.....	42
4.12	ผังการออกแบบระบบควบคุมแบบลูเปิด.....	44
4.13	แผนผังลำดับการทำงานของระบบควบคุมแบบเปิด.....	45
4.14	ผังการออกแบบระบบควบคุมแบบลูปิด.....	46
4.15	หลักการออกแบบโปรแกรมระบบควบคุมแบบปิด.....	47
4.16	แผนผังลำดับการทำงานระบบควบคุมแบบปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	48
4.17	บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมกระแส.....	49
4.18	ภาพรวมของระบบควบคุมกรณีที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	49
4.19	อุปกรณ์ในระบบควบคุมกรณีที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	50
4.20	แผนผังลำดับการทำงานระบบควบคุมแบบปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	51
5.1	ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กต่อเข้ากับชุดทดสอบระบบไฟโตโวลตาอิก.....	52
5.2	อุปกรณ์ที่ใช้กับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย.....	53
5.3	ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กต่อเข้ากับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย.....	53
5.4	รูปคลื่นกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{svC}).....	56
5.5	กราฟมุมทริกไทริสเตอร์กับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ แต่ละอันดับ.....	56
5.6	กราฟเปรียบเทียบผลของ (V), (I_{svC}) และ (Q_L) เมื่อมีการควบคุมมุมทริก.....	58
5.7	การสับตัวเก็บประจุในการทดสอบ.....	58
5.8	ผลของระบบควบคุมแบบลูปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	59
5.9	ผลของระบบควบคุมแบบลูปิดที่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก.....	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation, DG) เชื่อมต่อเข้ามาในระบบจำหน่าย ระบบแรงดันสูง (มากกว่า 1 กิโลโวลต์) และระบบแรงดันต่ำ (น้อยกว่า 1 กิโลโวลต์) เป็นจำนวนมาก โดยระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าสู่ระบบ โดยที่ส่วนใหญ่จะใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เช่น ระบบโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic System, PV) หรือพลังงานชีวมวล (Biomass) ซึ่งสามารถช่วยลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่สิ้นเปลือง เช่น น้ำมันและก๊าซธรรมชาติในการผลิตพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แต่ว่าการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายด้วยปริมาณที่มากเกินไป สามารถสร้างปัญหาต่อคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) ได้ เช่น ภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน หรือฮาร์มอนิกส์ที่มากเกินไป

สำหรับประเทศไทย ระบบโฟโตโวลตาอิกซึ่งผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ (Solar Cells) เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางสำหรับการกระจายระบบผลิตไฟฟ้า เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศมีศักยภาพที่จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงแดดได้ในปริมาณที่สูง ซึ่งปัจจุบันระบบโฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อเข้าระบบแล้ว จะเป็นระบบที่ขนาดใหญ่และเชื่อมต่อกับระบบแรงดันสูงเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากการมีต้นทุนที่สูง (โดยเฉพาะค่าแผงโซลาร์เซลล์) จึงต้องสร้างระบบที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้คุ้มทุนได้ไว แต่ในอนาคตระบบโฟโตโวลตาอิกที่มีขนาดเล็กและเชื่อมต่อกับระบบแรงต่ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเชื่อมต่อเข้ามาจากภาคครัวเรือนและชุมชน เนื่องจากราคาแผงโซลาร์เซลล์มีแนวโน้มถูกลง กอปรกับนโยบายรัฐที่ต้องการส่งเสริมประชาชนให้มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของความต้องการทางไฟฟ้าในอนาคต และลดการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่

ระบบโฟโตโวลตาอิกขนาดเล็กจากบ้านหรือครัวเรือนส่วนใหญ่จะเป็นระบบ 1 เฟส โดยจะเชื่อมต่อแบบกระจายไปตามแนวสายจ่ายย่อย (feeder) ของระบบแรงต่ำ 220-240 โวลต์ การเพิ่มขึ้นของระบบโฟโตโวลตาอิกนี้อาจสร้างปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าถ้ามีการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะช่วงที่มีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ามาในระบบมากกว่าความต้องการไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าในแนวสายจ่ายย่อยเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ ซึ่งในสภาวะนี้จะเกิดปัญหาแรงดันเกินตลอดตามแนวสายจ่ายย่อยนั้น ซึ่งถ้าระบบโฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อเข้ามา มีปริมาณมากขึ้น โดยขาดการควบคุมหรือวางแผนที่ดีพอ ก็มีโอกาสส่งผลให้แรงดันเกินมีขนาดสูงกว่าค่ามาตรฐานของการไฟฟ้าได้ (ค่ามาตรฐาน +10% ตามข้อกำหนดของกพภ.) (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2558)

สำหรับระบบโฟโตโวลตาอิกในปัจจุบันจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งคอยทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงโซลาร์เซลล์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้ามาในระบบจำหน่ายจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันทั่วไปไม่มีฟังก์ชันในส่วนการควบคุมขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกและไม่มี การควบคุมระดับแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ (ผลิตได้เท่าไร ก็จ่ายเท่านั้นเลย) ซึ่งทำให้บางช่วงเวลาโดยเฉพาะ

ช่วงกลางวันที่มีแสงแดดมีความเข้มสูง ระบบโฟโตโวลตาอิกจะผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามาในระบบจำหน่ายมากเกินไป จนทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินได้

ในงานวิจัยนี้ จะหาแนวคิดสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส ที่มีระบบโฟโตโวลตาอิกต่อเข้ามาเป็นจำนวนมาก เมื่อได้แนวคิดหรือวิธีการที่เหมาะสมแล้ว จะพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่สามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขณะที่มีระบบโฟโตโวลตาอิกต่อเข้ามาเป็นจำนวนมาก โดยเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่พัฒนาจะคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ เช่น การติดตั้ง ราคา และควรใช้ได้กับอุปกรณ์ในระบบโฟโตโวลตาอิกที่มีจำหน่ายทั่วไปหรือที่ติดตั้งอยู่เดิมในระบบโดยไม่ต้องทำการตัดแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติมด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในเรื่องปัญหาระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากการเชื่อมต่อบรรยากาศโฟโตโวลตาอิกจำนวนมากเข้ากับระบบแรงต่ำ 1 เฟส
2. นำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาระดับแรงดันเกินในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส
3. พัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เพื่อป้องกันไม่ให้ระดับแรงดันในระบบจำหน่ายมีขนาดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ขณะที่มีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ามาจากระบบโฟโตโวลตาอิก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของการกระจายระบบผลิตไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ในเรื่องปัญหาระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากการเชื่อมต่อบรรยากาศโฟโตโวลตาอิกจำนวนมากเข้ากับระบบแรงต่ำ 1 เฟส และพัฒนาเครื่องมือสำหรับควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อบรรยากาศโฟโตโวลตาอิกโดยไม่ต้องทำการตัดแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์เดิม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้และความเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้นในการเชื่อมต่อบรรยากาศโฟโตโวลตาอิกจำนวนมากเข้ากับระบบแรงต่ำ
2. ได้พัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าได้
3. แก้ไขปัญหาคุณภาพสัญญาณไฟฟ้า เพิ่มความเสถียรภาพของระบบจำหน่ายแรงต่ำที่เชื่อมต่อบรรยากาศโฟโตโวลตาอิก

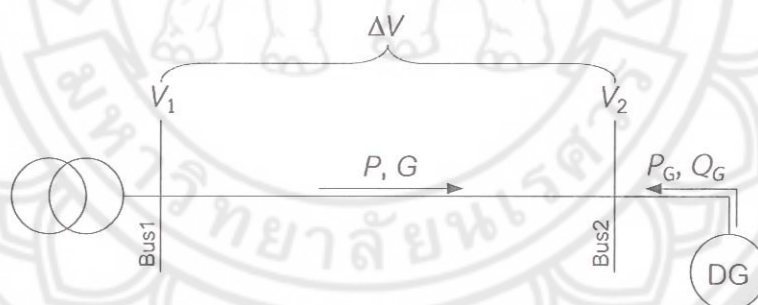
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือส่วนที่ 1 จะกล่าวถึงหลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Reactive power, Q) แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ และส่วนที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต (Static var compensation, SVC) รวมถึงผลการจำลองการทำงานของ SVC ด้วยแบบจำลองบนโปรแกรม PSIM และการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Micro SVC หรือ μ SVC) ต่อระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยแบบจำลองบนโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

2.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ

N. Jenkins, J.B. Ekanayake, และ G. Strbac (2010) กล่าวว่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่มีระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย การไหลของกำลังไฟฟ้าจะมีทิศทางเดียวคือจากแหล่งจ่าย/สถานีไฟฟ้าไปยังกลุ่มภาระไฟฟ้า แต่ถ้ามีระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายต่อเข้ามา ก็จะส่งผลต่อทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันในระบบจำหน่าย โดยที่การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันจากการที่มีกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้ามาจากระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบจำหน่ายที่มีระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายต่อเข้ามา

กรณีไม่มีระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาดแรงดันตก ΔV ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดัน V_1 และ V_2 สามารถหาได้จาก

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{PR + QX}{V_2} \quad (2.1)$$

เมื่อ P และ Q คือกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Reactive Power) ที่ส่งจากบัส 1 ตามลำดับ, R และ X คือความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของวงจร ถ้าสมมุติให้แรงดันที่จุดต่อเชื่อมกับระบบผลิตไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 1 p.u. สมการที่ (2.1) จะสามารถประมาณได้เป็น

$$\Delta V = PR + QX \quad (2.2)$$

ถ้าระบบผลิตไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังจินตภาพคือ P_G และ Q_G ตามลำดับ สมการที่ (2.2) จะเขียนได้เป็น

$$\Delta V = (P - P_G)R + (Q - Q_G)X \quad (2.3)$$

ซึ่งจะพบว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามาจากระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย จะส่งผลให้เทอม $(P - P_G)$ และ $(Q - Q_G)$ ลดลง ทำให้ ΔV ลดลงตามด้วย ซึ่งแรงดันที่บัส 2 (จุดเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้า) จะมีขนาดสูงขึ้น ในสภาวะปกติระบบผลิตไฟฟ้าจะทำงานที่ค่าประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียง 1 ซึ่ง Q_G จะมีค่าประมาณ 0 ทำให้ระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับขนาดกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายมาจากระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายเป็นหลัก ซึ่งจะพบว่าที่ V_2 จะมีค่ามากกว่า V_1 (เกิดภาวะแรงดันเกินที่จุดต่อเชื่อม) ถ้า P_G มากกว่า P ซึ่งกำลังไฟฟ้าจะไหลย้อนเข้ามาที่สถานีไฟฟ้า/หม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นถ้าสามารถปรับเปลี่ยนการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่มาจากระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายให้สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่ออยู่ได้ ก็จะสามารถลดปัญหาแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นได้ ซึ่งในกรณีระบบไฟโตโวลตาอิกสามารถประยุกต์แนวทางนี้เพื่อแก้ปัญหาแรงดันเกิน โดยการพัฒนาระบบให้สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงด้วยการปรับกำลังการผลิตที่เข้ามาจากระบบโซลาร์เซลล์ให้ลดลง แต่การลดกำลังไฟฟ้าจริงจะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบไฟโตโวลตาอิกมีค่าลดลงไปด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ทำธุรกิจขายไฟฟ้าไม่ต้องการจะให้เกิดขึ้น จึงหันมาสนใจในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพแทน ทำการรับค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพเข้ามาจากระบบจำหน่ายให้มากขึ้นเพื่อแก้ปัญหาแรงดันเกิน โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ายังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

2.1.1 ความไวของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Voltage sensitivity)

ขนาดแรงดันไฟฟ้า (V) และ มุมเฟสแรงดัน (θ) ที่ตำแหน่งต่างๆในระบบไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับปริมาณกำลังไฟฟ้าจริง (P) และ กำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q) ที่เปลี่ยนแปลง ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยที่ความไว (sensitivity) ของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟส ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพ สามารถพิจารณาในรูปของเมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensitivity matrix, S_V) ดังแสดงใน (2.4) ซึ่งเมตริกซ์ความไวนี้หาได้จากส่วนกลับของเมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton – Raphson) ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากในหนังสือ Power System Analysis ของ H. Saadat (2004, บทที่ 6) โดยที่ค่าความไวของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนี้ จะขึ้นอยู่กับรูปร่างโครงสร้างของระบบไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เชื่อมต่อกันในระบบไฟฟ้านั้น

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial\theta} & \frac{\partial P}{\partial|V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial\theta} & \frac{\partial Q}{\partial|V|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \\
 &= \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial\theta}{\partial P} & \frac{\partial\theta}{\partial Q} \\ \frac{\partial|V|}{\partial P} & \frac{\partial|V|}{\partial Q} \end{bmatrix}}_{S_v} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_p^\theta & S_o^\theta \\ S_p^{|V|} & S_o^{|V|} \end{bmatrix}}_{S_v} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

จากเมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้าใน (2.4) พบว่า ในระบบไฟฟ้าหนึ่ง ถ้ารู้ค่าอัตราส่วนของ $S_p^{|V|}$ และ $S_o^{|V|}$ ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริง หรือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพ เกิดขึ้น ณ จุดหนึ่งในระบบ ก็จะสามารถประเมินค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้งระบบได้ ซึ่งในทางกลับกัน สามารถใช้ $S_p^{|V|}$ และ $S_o^{|V|}$ ในเมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้าเพื่อประมาณปริมาณ กำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าจินตภาพ สำหรับเพื่อควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าให้สามารถเปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ตามที่ต้องการ

2.1.2 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าในระบบโพลีโวลตาอิก

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าใน (2.3) และเมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้าใน (2.4) โดยเฉพาะเมตริกซ์ย่อย $S_p^{|V|}$ และ $S_o^{|V|}$ พบว่า การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อของระบบโพลีโวลตาอิกกับระบบไฟฟ้า สามารถทำได้โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของกำลังไฟฟ้าจริง หรือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพ ที่ไหลในระบบโพลีโวลตาอิกนั้นๆ โดยในกรณีที่ระบบเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกิน สามารถทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ ได้ 2 วิธีคือ

- 1) ลดขนาดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมาจากระบบโพลีโวลตาอิก (Active power Curtailment)
- 2) ชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพโดยการดูดกลืนเข้ามาที่ระบบโพลีโวลตาอิก (Reactive power absorption)

ซึ่งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าเกินมีขนาดที่สูงมาก ก็ใช้วิธีการลดระดับแรงดันไฟฟ้า ทั้ง 2 วิธีควบคู่กัน โดยมักจะทำการดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพเข้ามาที่ระบบโพลีโวลตาอิกให้ได้มากที่สุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ซึ่งอาจเป็นตัวอินเวอร์เตอร์ หรือ อุปกรณ์ชดเชยที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จากนั้นถ้าระดับแรงดันไฟฟ้ายังมีขนาดที่สูงเกินมาตรฐาน กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากระบบโพลีโวลตาอิกเข้ามาที่ระบบไฟฟ้าก็จะถูกลดขนาดลงไปเรื่อยๆ จนได้ระดับแรงดันไฟฟ้าตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งบางครั้งอาจต้องลดลงมาจนมีค่าเป็นศูนย์ (เปรียบเหมือนไม่ได้ต่อระบบโพลีโวลตาอิกเข้ามาในระบบ) ซึ่งถ้าเป็นระบบโพลีโวลตาอิกที่ถูกสร้างมาเพื่อขายไฟให้การไฟฟ้า การลดขนาดกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อป้องกันปัญหาแรงดันเกินอาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่ดีนัก เนื่องจากจะทำให้

เจ้าของระบบโฟโตโวลตาอิกหรือผู้ทำธุรกิจขายไฟฟ้าสูญเสียรายได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพมากกว่า

2.1.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบโฟโตโวลตาอิก

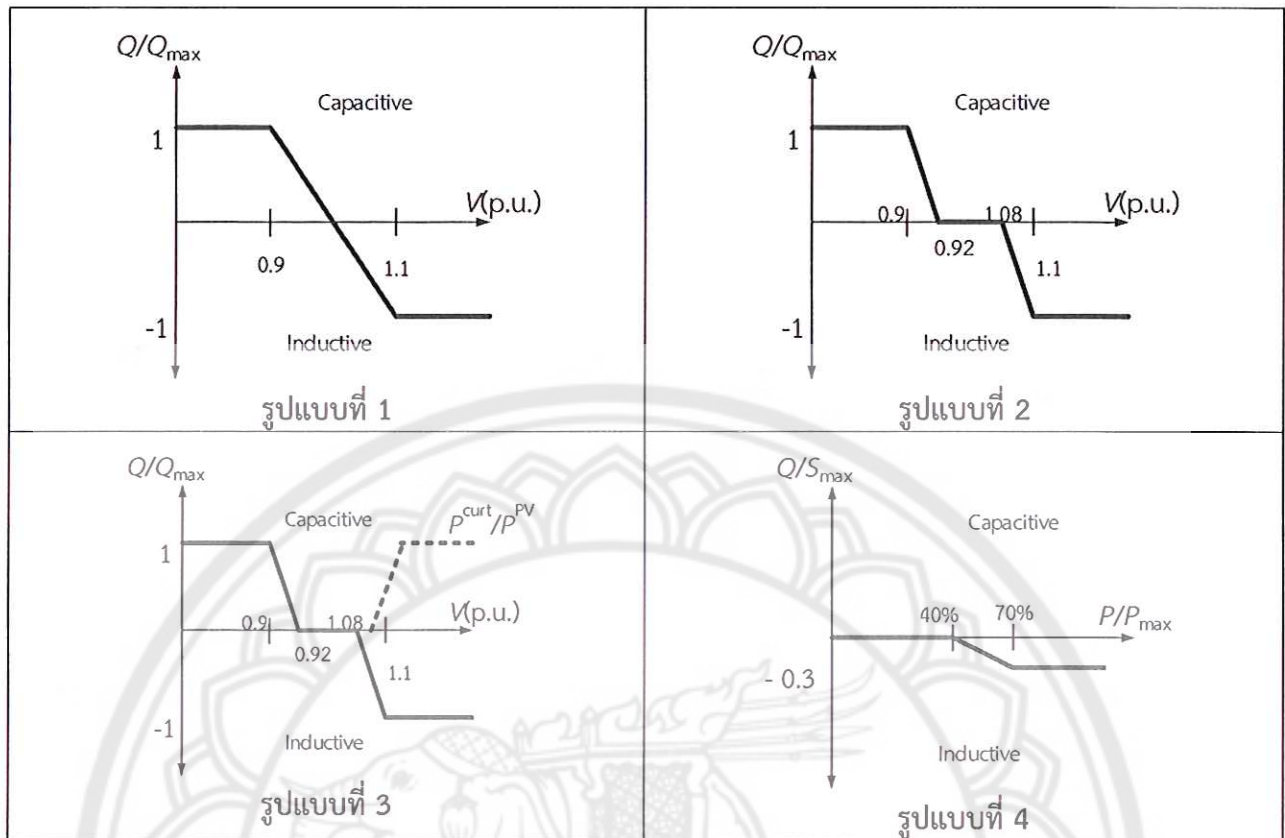
Sam Weckx และคณะ (2014) ได้สรุปรูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบโฟโตโวลตาอิกได้ 4 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อวัตถุประสงค์ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อให้ เป็นไปตามมาตรฐาน (เช่น IEEE 1159-2009 หรือ IEC 61000-6-1) หรือเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าต่างๆ โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในแต่ละรูปแบบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1: เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (การควบคุมแบบ $Q(V)$) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจินตภาพอย่างทันทีทันใดเมื่อแรงดันเปลี่ยนแปลงไป จากค่าแรงดันที่ต้องการควบคุม เหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก

รูปแบบที่ 2: เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (การควบคุมแบบ $Q(V)$) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจินตภาพก็ต่อเมื่อแรงดันเปลี่ยนแปลงไปใกล้กับค่าแรงดันสูงสุด/ต่ำสุดที่ยอมรับได้ (การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพจะมีช่วงไร้การตอบสนอง (Dead band) ต่อแรงดันที่เปลี่ยนแปลง) เหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก

รูปแบบที่ 3: เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพควบคุมไปกลับการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (การควบคุมแบบ $Q(V)$ และ $P(V)$) โดยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจะถูกชดเชยเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้สูงหรือต่ำ เกินค่ามาตรฐาน ส่วนการลดปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกจะลดลงเพื่อป้องกันปัญหาแรงดันเกิน โดยการควบคุมกำลังจริงนี้มักจะทำหลังขั้นตอนการควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ

รูปแบบที่ 4: เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิก (การควบคุมแบบ $Q(P)$) เหมาะสำหรับใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในบริเวณที่แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ถึงแม้จะมีกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนที่สูงขึ้น เช่น บริเวณใกล้กับหม้อแปลงจำหน่ายที่เป็นต้นทางของสายส่งย่อย ซึ่งการควบคุมรูปแบบนี้เหมาะสำหรับใช้เสริมกับระบบควบคุมรูปแบบอื่นๆ โดยเฉพาะระบบจำหน่ายที่ลักษณะเป็นแบบเรเดียล โดยที่กำลังไฟฟ้าจินตภาพจะถูกดูดกลืนมาที่ระบบโฟโตโวลตาอิก เมื่อพบว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกมีค่าสูงเกินปริมาณขั้นต่ำที่ได้ตั้งค่าไว้



รูปที่ 2.2 รูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบโฟโตโวลตาอิก

2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำแบบเรเดียลที่เชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิก

ระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำแบบเรเดียล เป็นระบบไฟฟ้าที่ประกอบแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 ตัว โดยในสถานะที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิก จะมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ศทางจากแหล่งจ่ายไปยังภาระไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งจ่ายมากขึ้น และบางบริเวณอาจมีปัญหาแรงดันตกมากเกินไปเกินค่าที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะที่บริเวณปลายสายส่งย่อย สำหรับในกรณีที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก อาจมีการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกย้อนกลับมาที่แหล่งจ่ายเกิดขึ้น โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวันที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมากขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้ามักมีค่าไม่สูงมาก และจะส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันเกินขึ้นในตลอดแนวสายส่งย่อยในระบบ

จากการศึกษาโดย E. Demirok และคณะ (2011) พบว่า เมื่อเกิดปัญหาแรงดันเกินอันเนื่องจากการเชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิกมากเกินไป บริเวณที่มีขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือที่บริเวณปลายสายส่งย่อย ส่วนบริเวณต้นทางสายส่งย่อย (ใกล้กับหม้อแปลงจำหน่าย) จะมีการเพิ่มของระดับแรงดันไฟฟ้าไม่มาก และอาจไม่เกิดปัญหาแรงดันเกินค่ามาตรฐาน ณ บริเวณนี้ เพราะฉะนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพเพื่อรักษาระดับแรงดันไม่ให้เกินกว่ามาตรฐาน ซึ่งถ้ากำหนดให้ระบบโฟโตโวลตาอิกมีแต่การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบ $Q(V)$ ทั้งหมด จะพบว่าในสายส่งย่อยเดียวกัน บางบริเวณอาจไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเนื่องจากแรงดันที่จุดเชื่อมต้อมีค่าไม่สูงเกินค่าขั้นต่ำที่ตั้งไว้ และบางบริเวณอาจมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเป็นจำนวนมากเกินไป จนอาจทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำเกินกว่าข้อกำหนดของการไฟฟ้าได้

เพื่อให้มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพกระจายไปยังทุกจุดเชื่อมต่อกับระบบโพลีโวลตาอิก จึงควรเลือกใช้การควบคุมแบบ $Q(P)$ กับบริเวณที่แรงดันไฟฟ้าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง (เช่น บริเวณต้นทางสายส่งย่อย) และ เลือกใช้การควบคุมแบบ $Q(V)$ (รูปแบบที่ 1 หรือ 2) กับบริเวณที่ระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงตอบสนองกับการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิกได้ง่าย (เช่น บริเวณกึ่งกลางและปลายสาย) โดยรายละเอียดของระบบควบคุมกำลังจินตภาพแบบ $Q(P)$ และ $Q(V)$ สำหรับป้องกันแรงดันเกินในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่เชื่อมต่อกับระบบโพลีโวลตาอิกมีดังต่อไปนี้

- การควบคุมแบบ $Q(P)$: เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพสำหรับระบบโพลีโวลติกที่ติดตั้งในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไม่มาก โดยที่กำลังไฟฟ้าจินตภาพจะค่อยๆถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตออกมาจากระบบโพลีโวลตาอิก ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันได้ดัง (2.5) โดยที่ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบ $Q(P)$ นี้จะเริ่มทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อและกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิกมีค่าสูงกว่าค่าขั้นต่ำ (Threshold value) ที่ได้กำหนดไว้ (ได้แก่ V_{th} และ P_{th} ตามลำดับ)

$$Q = \begin{cases} m(P - P_{th}) & \text{when } V > V_{th} \text{ and } P > P_{th} \\ 0 & \text{when } \text{else} \end{cases} \quad (2.5)$$

เมื่อ m คือ อัตรากำลังขยาย (Gain) ซึ่ง Afshin Samadi และคณะ (2014) ได้เสนอวิธีการประมาณค่า m จากอัตราส่วน $S_p^{|V|}$ ต่อ $S_o^{|V|}$ ของสมาชิก ณ ตำแหน่งบัสที่ถูกพิจารณา

- การควบคุมแบบ $Q(V)$: เป็นรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมกับระบบโพลีโวลตาอิกที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อได้ง่าย โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้เหมาะสมกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเริ่มทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ และกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิกมีค่าเกินค่าขั้นต่ำที่ได้ตั้งไว้ (ได้แก่ V_{th} และ P_{th} ตามลำดับ) นอกจากนี้ระบบควบคุมแบบ PI (Proportional-Integral controller) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้การปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังแสดงในรูปแบบฟังก์ชันได้ดังสมการด้านล่าง

$$Q = K \left(1 + \frac{1}{sT} \right) (V - V_{th}) \quad \text{when } P > P_{th} \text{ and } V > V_{th}. \quad (2.6)$$

เมื่อ K และ T คือ อัตรากำลังขยาย (Gain) ของระบบควบคุมแบบ PI

ในขณะที่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพนั้น จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ของระบบโพลีโวลตาอิกมีขนาดที่ลดลงไปด้วย (สูงสุดคือ 1 ที่ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพเท่ากับ 0) ซึ่งถ้ามีการจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพมากเกินไป ก็จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าข้อกำหนดของการไฟฟ้าได้ จึงทำให้บางครั้งต้องมีจำกัดค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพสูงสุด (Q_{max}) ที่สามารถให้ชดเชยได้ โดยคำนวณจาก

$$\pm Q_{max} = \pm P \tan(\cos^{-1}(PF_{min})) \quad (2.7)$$

เมื่อ PF_{min} คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ยอมรับได้
 P คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโพลีโวลตาอิก

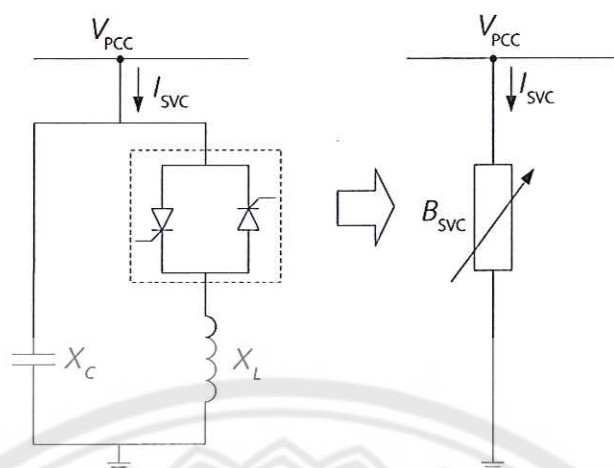
2.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจลนภาพแบบสถิต

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจลนภาพแบบสถิต (Static var compensation, SVC) ถูกพัฒนาเพื่อใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า โดยมักนิยมติดตั้งใช้ในระบบส่ง ซึ่งโครงสร้างของตัว SVC นี้จะประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำขนานกัน หลักการทำงานของ SVC คือ จะควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำให้ได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าจลนภาพตามที่ต้องการด้วยการควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ (Thyristor) ซึ่งในกรณีใช้ SVC เพื่อป้องกันแรงดันเกินนั้น ต้องการเฉพาะกำลังไฟฟ้าจลนภาพชนิดเหนี่ยวนำเพื่อการควบคุมแรงดัน ส่งผลให้โครงสร้าง SVC ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียว หรือ เรียก SVC แบบเฉพาะนี้ ว่า Thyristor controlled reactor (TCR)

2.3.1 โครงสร้างและการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจลนภาพแบบสถิต

โครงสร้างของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจลนภาพแบบสถิตย์ หรือ SVC ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C) แบบค่าคงที่และตัวเหนี่ยวนำ (L) แบบที่มีไทรสเตอร์ช่วยทำให้กระแสไหลผ่านถูกปรับค่าได้ซึ่งเรียกว่า Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor หรือ FC-TCR โดยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับ ไทรสเตอร์ TCR ที่ต่อขนานกลับหัวกัน ดังรูปที่ 2.3

ซึ่งการทำงานของ SVC เป็นการตรวจสอบแรงดันที่โหลดหรือที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) ดังรูปที่ 2.3 (ก) เมื่อแรงดันที่จุดต่อร่วมเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมจะรับรู้และสั่งปรับมุมทริกของไทรสเตอร์ เพื่อให้การไหลของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำถูกปรับให้สอดคล้องกับค่าที่ควรจะเป็น ทำให้กระแสของ SVC (I_{SVC}) ซึ่งเป็นกระแสลัพท์ของกำลังไฟฟ้าจลนภาพเป็นค่าที่เหมาะสมโดยอาศัยการหักล้างกันของกำลังไฟฟ้าจลนภาพจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ กล่าวโดยสรุปคือการทำงานของ SVC สามารถมองในลักษณะของวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) คือเป็นชั้สเสแดนซ์ (B_{SVC}) ที่ปรับค่าได้ (ณัฐวุฒิ ที่จันทัก, พินิจ ศรีธรร, 2555)



(ก) โครงสร้างของ SVC แบบ FC-TCR

(ข) วงจรเทียบเคียงแทนด้วย B_{SVC}

รูปที่ 2.3 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตย์ หรือ SVC

ที่มา: ณีรัฐติ ที่จันทัก และพินิจ ศรีธร, 2555, หน้า 2

ในทางอุดมคติอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานไม่มีองค์ประกอบของค่าความต้านทานจึงไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัว SVC ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจินตภาพจะเป็นฟังก์ชันของขนาดแรงดันที่โหนด ณ จุดต่อร่วมและค่าซัสเซปแทนซ์สมมูลย์ของ SVC (B_{SVC}) ดังแสดงในสมการที่ (2.8) (R. M. Mathur, R. K. Varma, 2002)

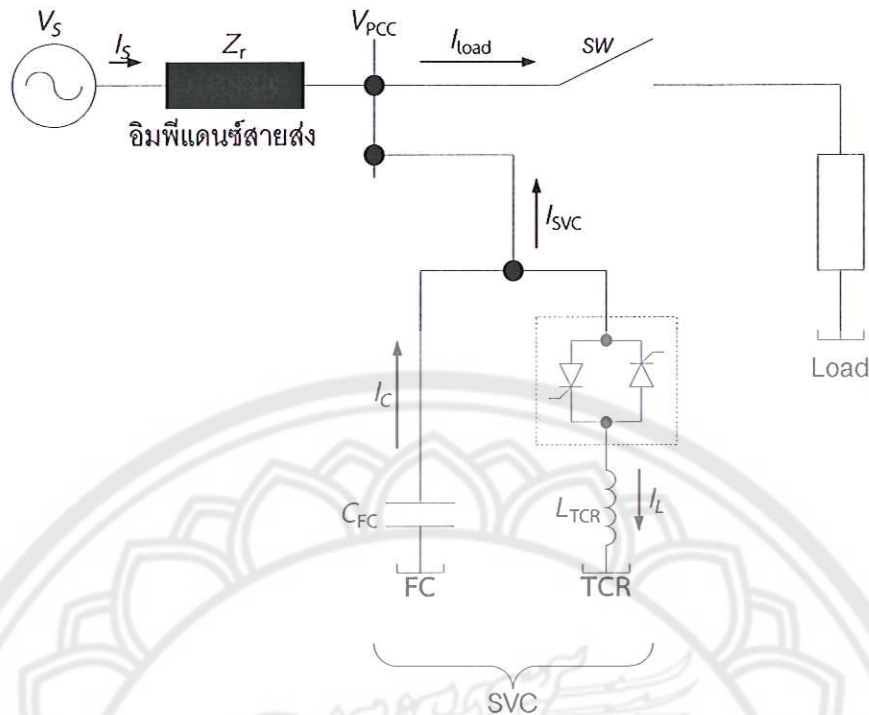
$$\begin{aligned} P_i &= 0 \\ Q_i &= -|V_i|^2 B_{SVC} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ค่าเก็บประจุและค่าเหนี่ยวนำของ SVC จะถูกใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการกำหนดจุดทำงานของ SVC ซึ่งขณะที่แรงดันของระบบอยู่ในสภาวะปกติต้องไม่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่าง SVC และระบบไฟฟ้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจินตภาพจึงพิจารณาได้จากมุมทริกของไทรสเตอร์ (α) ที่เปลี่ยนแปลงไป ตามสมการที่ (2.9) (E.Acha, V.G. Agelidis, O.Anaya-Lara, T.J.E. Miller, 2002)

$$Q_{SVC} = V_{PCC}^2 \left(\frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{2\pi X_L} - X_C \right) \quad (2.9)$$

2.3.2 การควบคุมการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต

การออกแบบระบบควบคุมสำหรับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตย์นี้จะออกแบบบนพื้นฐานการทำงานตามวงจรมูลและนำมาแสดงพร้อมทิศทางกระแสที่สำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 คือ กระแส I_L , I_C และ I_{SVC} เมื่อระบบควบคุมทำงานมุมทริกของไทรสเตอร์จะถูกปรับอัตโนมัติทำให้กระแส I_L ถูกปรับเปลี่ยนได้สอดคล้องกับขนาดของแรงดันที่โหนด โดยที่ค่าของกระแส I_C จะไม่มีการปรับแต่งแต่ค่าอาจเปลี่ยนตามธรรมชาติของมันตามขนาดของแรงดันที่ตกคร่อม



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของ SVC สำหรับออกแบบระบบควบคุม

กระแส I_{SVC} ในรูปที่ 2.4 เป็นผลรวมของกระแส I_L และกระแส I_C ซึ่งเมื่อค่าของกระแส I_L ถูกควบคุมให้เปลี่ยนค่าไป กระแส I_{SVC} จึงถูกปรับเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนที่สัมพันธ์กับมุมทริกของไทรสเตอร์ และเป็นผลให้การไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพถูกปรับค่าตามหลักการพื้นฐาน ดังนั้นระบบควบคุมจึงเป็นตัวกำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการได้ (ณัฐวุฒิ ที่จันทัก, พินิจ ศรีธีร, 2555)

ในกรณี SVC ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียว จะสามารถวิเคราะห์ปริมาณกระแสที่ไหลในวงจร TCR ได้ดังนี้

แรงดันที่จ่ายเข้ามาที่วงจร TCR เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ กำหนดเป็น

$$v = V_m \sin(\omega t) \quad (2.10)$$

เมื่อ V_m คือค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และ ω คือ ความเร็วเชิงมุม แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับ

$$v = L \frac{di_L}{dt} = V_m \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี) และ i_L คือ กระแสที่ไหลผ่านวงจร TCR คำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจร TCR ด้วยการอินทิเกรตสมการที่ (2.11) ได้เป็น

$$i_L = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t) + C \quad (2.12)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่

เมื่อไทรสเตอร์ถูกจุดชนวนที่ค่ามุม α กระแสจะเริ่มไหลผ่านวงจร TCR ซึ่งจะได้ค่าเริ่มต้นเป็น

$$i_L(\alpha) = 0 \quad (2.13)$$

แทนสมการ (2.13) ลงใน (2.14) จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$i_L = \frac{V_m}{\omega L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) \quad (2.14)$$

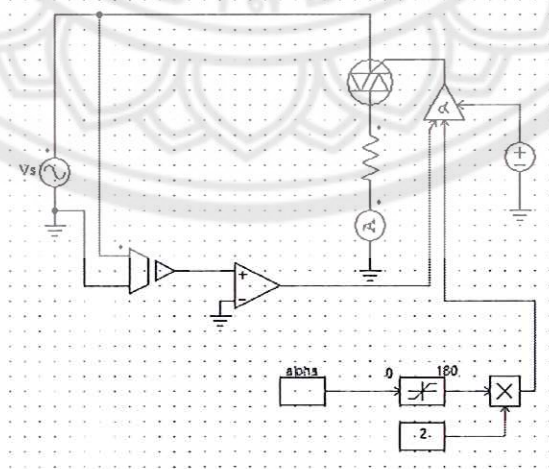
ซึ่งระบบควบคุมจะปรับให้สัญญาณทริก TCR เลื่อนไปมาระหว่างมุม 90 องศา ถึง 180 องศา ของรูปคลื่นแรงดันอินพุตอ้างอิงของระบบเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสสลับในวงจร TCR ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพเพื่อชดเชยระดับแรงดันโวลต์ที่เปลี่ยนแปลงที่จุดต่อเชื่อม

2.3.3 การจำลองการทริกของไทรสเตอร์

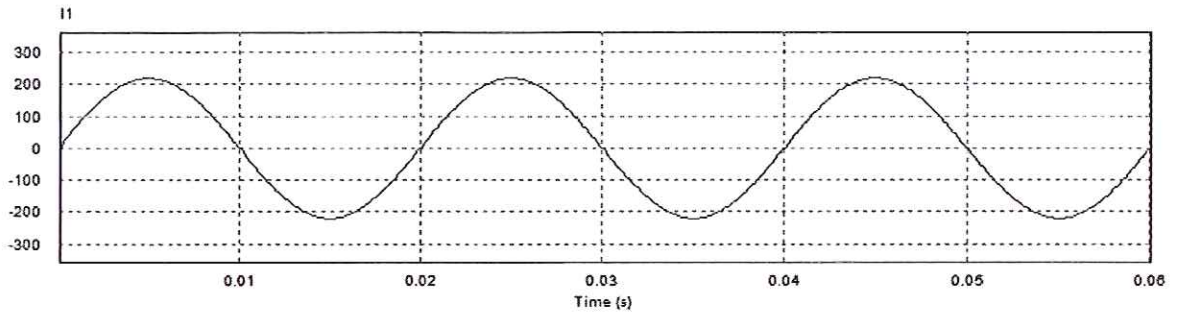
จำลองการทริกมุมของไทรสเตอร์ (α) ในโปรแกรม PSIM ซึ่งผลิตโดยบริษัท Powersim Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยกำหนดให้แรงดันแหล่งจ่าย (V_s) มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ 50 Hz. ทำการจำลองระบบ 2 กรณีคือกรณีต่อไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวต้านทาน และต่อไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พล็อตกราฟของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

กรณีที่ 1: ไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวต้านทาน

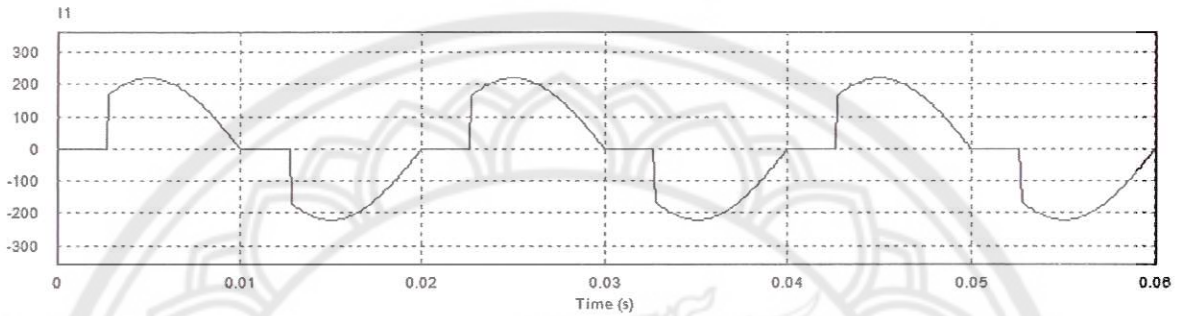
ทำการศึกษาแบบจำลองการทำงานของไทรสเตอร์ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 1 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะได้ลักษณะกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ค่ามุมจุดชนวนขนาดต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากการศึกษาพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะมีขนาดมากที่สุดที่มุมจุดชนวน 0 องศา และจะไม่มีการไหลในวงจรเมื่อไทรสเตอร์จุดชนวนที่มุม 180 องศา



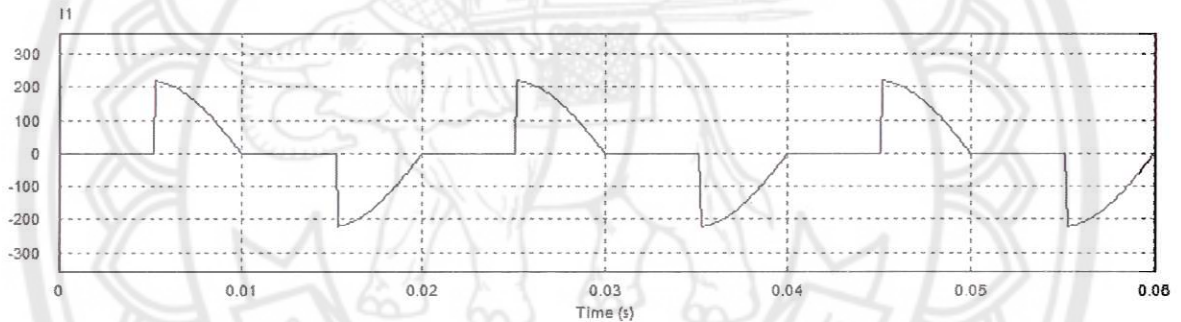
รูปที่ 2.5 จำลองการทริกมุมของไทรสเตอร์ (α) กรณีไทรสเตอร์อนุกรมกับตัวต้านทาน



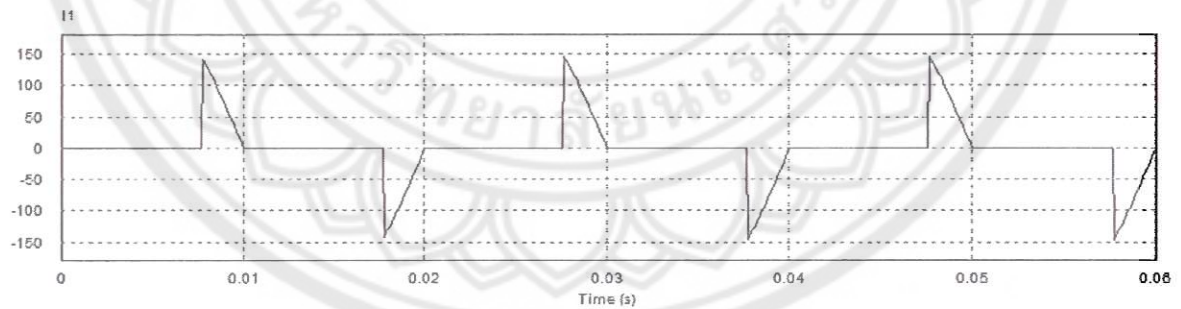
(ก) $\alpha = 0^\circ$



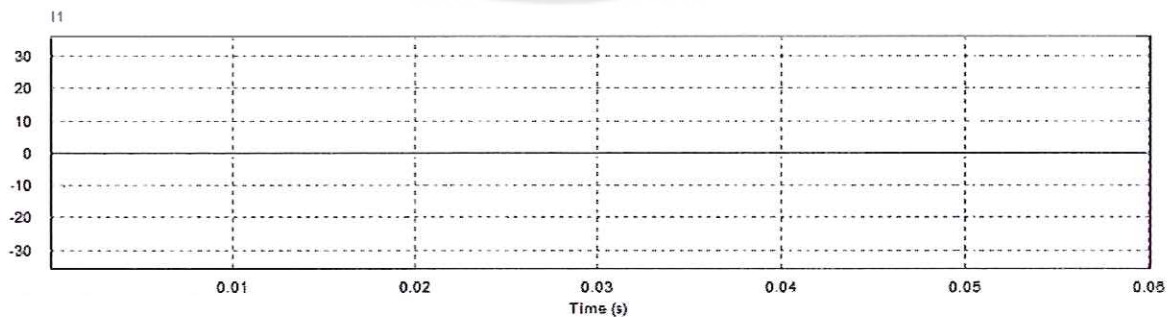
(ข) $\alpha = 45^\circ$



(ค) $\alpha = 90^\circ$



(ง) $\alpha = 135^\circ$



(ฉ) $\alpha = 180^\circ$

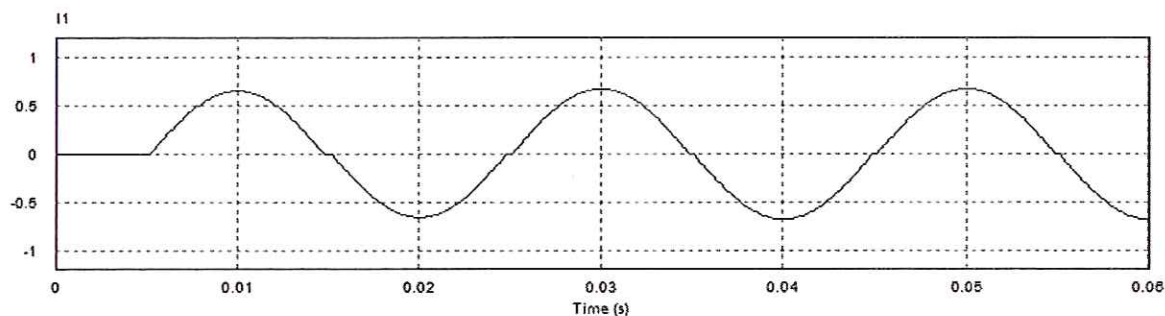
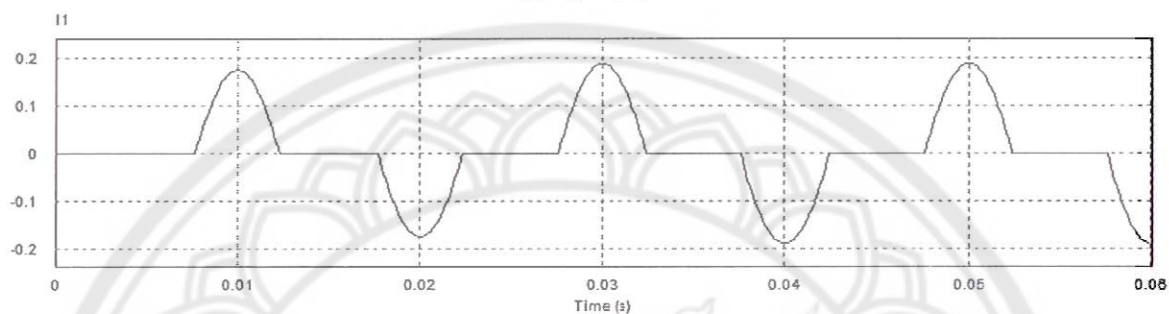
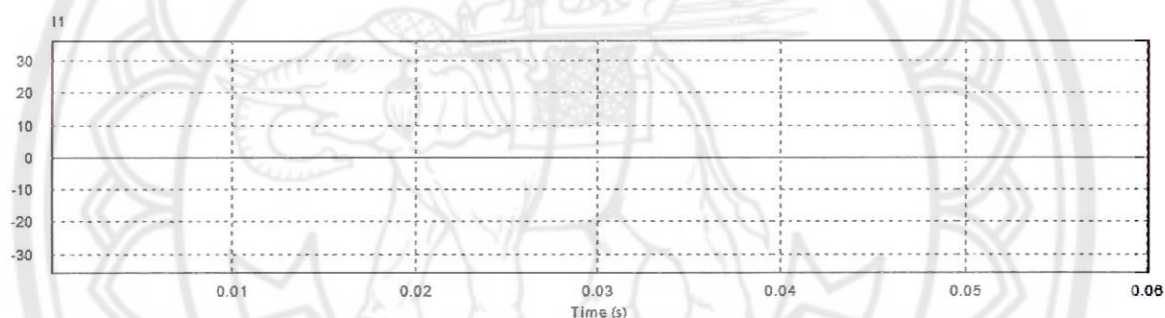
รูปที่ 2.6 กราฟกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน กรณีทริกมุมไทรสเตอร์ (α) ต่างๆ

กรณีที่ 2: ไทริสเตอร์อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ทำการศึกษาแบบจำลองการทำงานของไทริสเตอร์ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 เฮนรี ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะได้ลักษณะกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ค่ามุมจุดชนวนขนาดต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากการศึกษาพบว่ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีขนาดมากที่สุดที่มุมจุดชนวน 90 องศา และจะไม่มีกระแสสลับไหลในวงจรเมื่อไทริสเตอร์จุดชนวนที่มุม 180 องศา นอกจากกระแสสลับที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีมุมเฟสตามหลังแรงดันแหล่งจ่ายอยู่เท่ากับ 90 องศา เพราะฉะนั้นถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพจะต้องทำการควบคุมการจุดชนวนของไทริสเตอร์ให้อยู่เฉพาะในช่วงระหว่าง 90 องศา ถึง 180 องศา นั้นเอง



รูปที่ 2.7 จำลองการทริกมุมของไทริสเตอร์ (α) กรณีไทริสเตอร์อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

(ก) $\alpha = 90^\circ$ (ข) $\alpha = 135^\circ$ (ค) $\alpha = 180^\circ$

รูปที่ 2.8 กราฟกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ กรณีทริกมุมไทรสเตอร์ (α) ต่างๆ

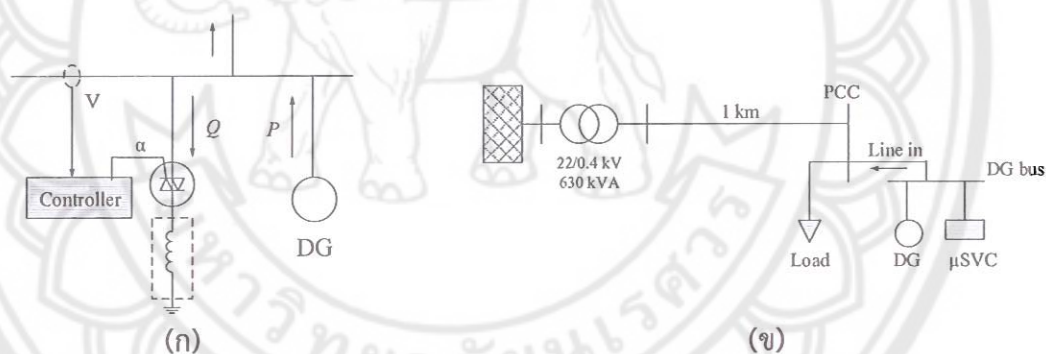
2.3.4 การจำลองการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตในระบบจำหน่ายที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อกับระบบโพลีโวลติคกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ เมื่อมีการเชื่อมต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Micro static var compensator, μ SVC) ขนานเข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (DG) แล้วกำหนดให้มีการปรับมุมจุดชนวนที่ค่าต่างๆ โดยทำการทดสอบบนโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

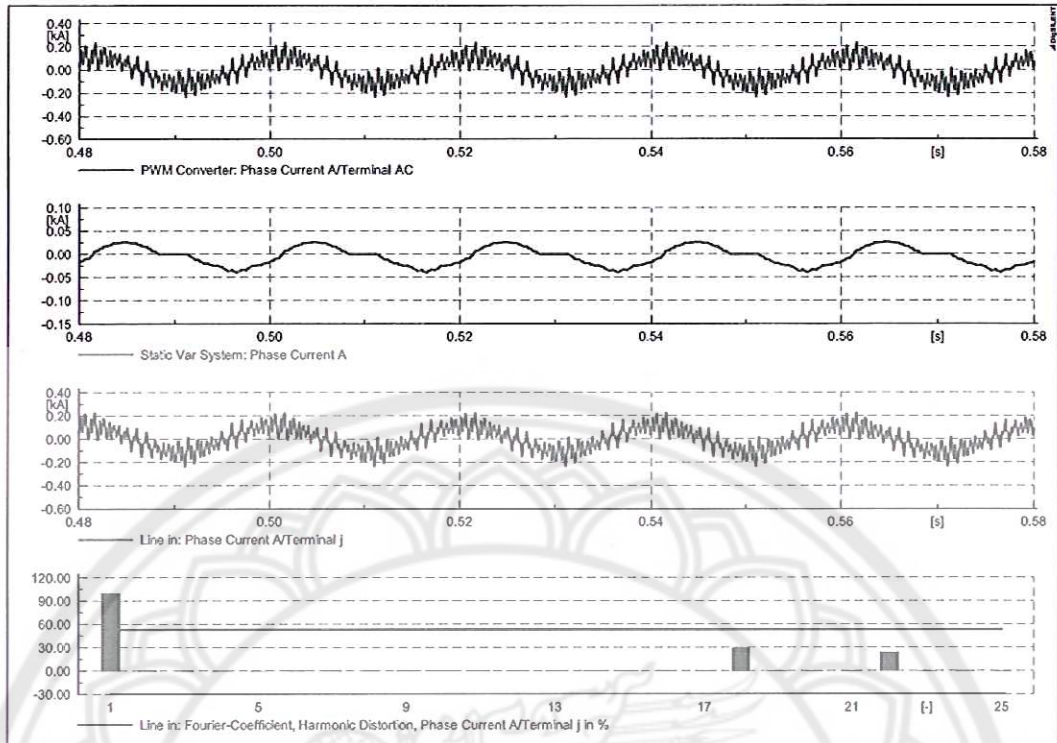
แบบจำลองสำหรับใช้เป็นกรณีศึกษา ประกอบด้วย ระบบจำหน่ายแรงต่ำ 3 เฟส 400 V ดังรูปที่ 2.9 สายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $0.346 + j0.0754$ โอห์ม โดยที่ DG มีพิกัด 60 kW และสมมติให้ DG เชื่อมต่อเข้าระบบผ่านอินเวอร์เตอร์ที่สวิตซ์ชิ่งแบบ PWM (pulse width modulation) ที่ความถี่ 1 kHz ส่วน μ SVC ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำมีขนาดพิกัด 35 kVar (คิดเป็นตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.85 เมื่อเทียบกับพิกัดของ DG) และระบบมีความต้องการไฟฟ้ารวม 15 kW ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.85 (แบบล้าหลัง)

จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่า ในกรณีที่ไม่มีติดตั้ง μ SVC เมื่อทำเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ DG มาที่ 60 kW จะพบว่าแรงดันที่บัส PCC เพิ่มขึ้นสูงถึง 1.1 p.u. แต่เมื่อมีการติดตั้ง μ SVC พบว่า ผลของการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วย μ SVC จะทำให้การเพิ่มของแรงดันที่บัส PCC ลดลงมามีค่าเหลือประมาณ 1.08 p.u. ที่ค่ามุมจุดชนวนของ μ SVC เท่ากับ 90 องศา (การทำงานของ μ SVC จะเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวนจาก 180° ไปจนถึง 90°) สำหรับในรูปที่ 2.10 แสดงกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจร μ SVC และกระแสส่วนอื่นๆในวงจรที่ได้จากการวิเคราะห์พลวัตในสภาวะชั่วคราว ที่ค่ามุมจุดชนวน 135 องศา (μ SVC ทำงาน 50%) และ 90 องศา (μ SVC ทำงาน 100%) ซึ่งการที่กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำใน μ SVC จะเป็นการดูตกค่านำกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบมาที่ตัว μ SVC ให้มากขึ้นตามขนาดมุมจุดชนวน

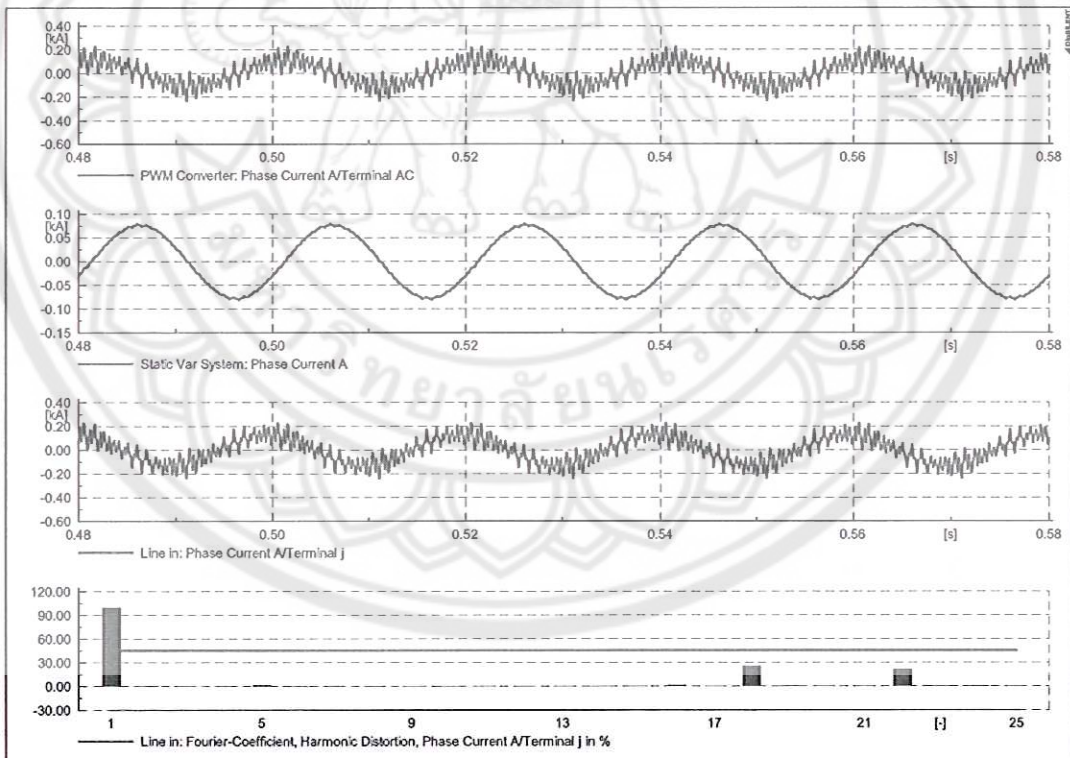
ซึ่งจากลักษณะกระแสที่ตำแหน่งต่างๆ ในรูปที่ 2.10 พบว่า การไหลของกระแสในตัว μ SVC ที่ค่ามุมจุดชนวนขนาดต่างๆ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ มากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวเหนี่ยวนำใน μ SVC ยังสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรกรองได้อีกด้วย ซึ่งจากการวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่ไหลในสาย Line in (ดูในภาพที่ 2.9 (ข)) ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลเข้าระบบจำหน่าย อันเป็นผลรวมของกระแสจาก DG และ μ SVC จากภาพที่ 2.10 พบว่า เมื่อ μ SVC ทำงานเต็มที่ (100%) จะช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่ไหลเข้าระบบอันเกิดจากอินเวอร์เตอร์ได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ μ SVC ทำงานครึ่งเดียว (50%) โดยเฉพาะฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 18 และ 22 ซึ่งเป็นแถบความถี่ข้าง (side band) ของการสวิตชิ่งที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 2.9 การทำงานของ μ SVC และระบบจำหน่ายสำหรับกรณีศึกษา



(ก) μ SVC ทำงานที่ 50% (17.5 kVar)



(ข) μ SVC ทำงานที่ 100% (35 kVar)

รูปที่ 2.10 กระแสไหลจาก DG, กระแสไหลเข้า μ SVC, กระแสรวมที่ไหลเข้าระบบและ %ฮาร์มอนิกส์ ลำดับต่างๆ (เรียงรูปจากบนลงล่าง ตามลำดับ)

บทที่ 3

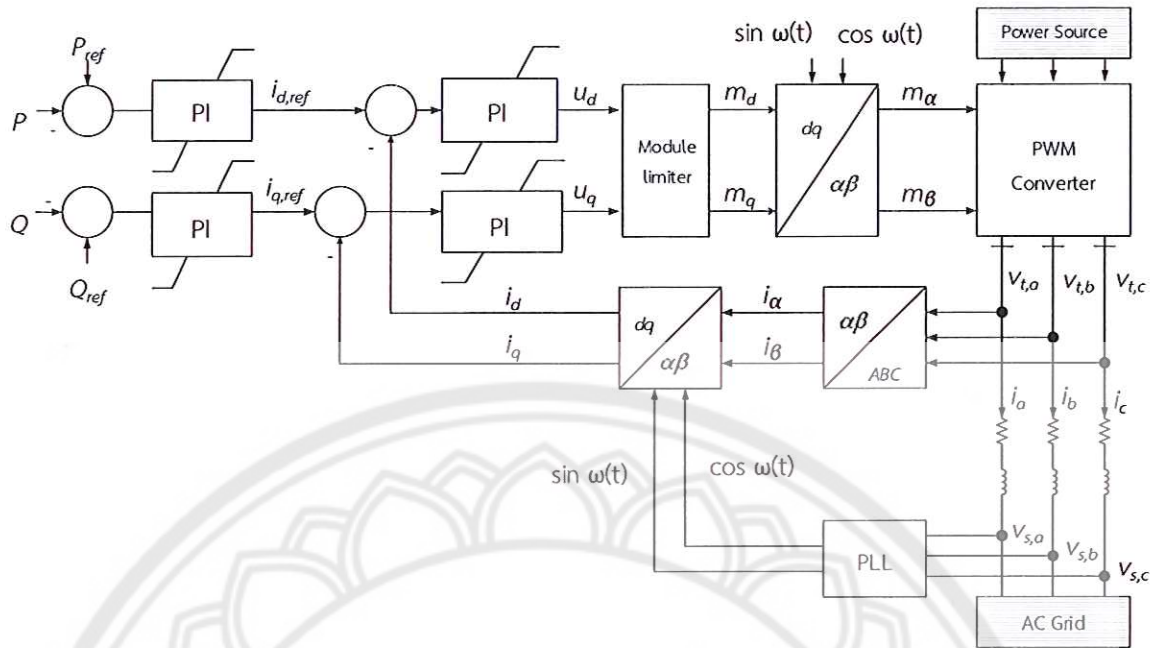
การศึกษาด้วยแบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลกระทบต่อขนาดแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ เมื่อมีการเชื่อมต่อและเพิ่มกำลังการผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนที่มากขึ้น โดยจะทำการสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบโฟโตโวลตาอิกและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นบนโปรแกรม DlgSILENT PowerFactory การศึกษาจะเน้นไปที่กรณีปัญหาแรงดันเกิน โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ความต้องการไฟฟ้าน้อย (เช่น เวลากลางวันในบริเวณพื้นที่ชุมชน) ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจะถูกวิเคราะห์ทั้งในสภาวะคงตัว (Steady state analysis) และในสภาวะชั่วคราว (Transient analysis) โดยที่ผลการศึกษาจะเป็นการเปรียบเทียบระดับแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างกรณีที่ไม่มีและมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ทั้งจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ของระบบโฟโตโวลตาอิกเอง และจากตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (μ VSC)

3.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบโฟโตโวลตาอิก

อินเวอร์เตอร์สมัยใหม่ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบโฟโตโวลตาอิกสำหรับในอนาคต (เริ่มมีใช้บ้างแล้วในปัจจุบัน แต่ยังมีราคาที่สูงอยู่มาก) สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (ทั้งจ่ายเข้าและดูดกลืนจากระบบ) ด้วยตัวอินเวอร์เตอร์เองได้อย่างรวดเร็ว โดยที่โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์จะประกอบอุปกรณ์สวิตชิงที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฟฟ้า เช่น มอสเฟตกำลัง หรือ ไอจีบีที จึงเรียกอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ว่า Voltage source Inverter หรือ VSI ซึ่งอินเวอร์เตอร์ยังมีข้อดีคือ ระบบควบคุมมีการตอบสนองที่รวดเร็วต่อค่าพารามิเตอร์ในระบบที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดย Brian K. Perera และคณะ (2013) พบว่าสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด VSI นี้ชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเพื่อควบคุมแรงดันได้ภายในระยะเวลาไม่ถึง 1 วินาที รวมถึงมีระดับฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำเมื่อทำงานที่ย่านความถี่สวิตชิงสูงๆ แต่ก็มีข้อเสียคือ ยังทนต่อระดับแรงดันและกำลังไฟฟ้าค่าสูงมากๆไม่ได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดจากเรื่องความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตชิง (Aaron VanderMeulen และ John Maurin, 2014)

สำหรับระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพของอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI ในระบบโฟโตโวลตาอิก จะอยู่บนพื้นฐานของ dq -synchronous reference frame (A. Yazdani และ R. Iravani, 2010 บทที่ 8) โดยที่กระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมแบ่งเป็น 2 แกน คือแกน d และแกน q โดยมีแกนแปลงกระแสจากระบบ 1 เฟส หรือ 3 เฟส ให้เป็นปริมาณ 2 เฟส ด้วยการแปลงของปาร์ค (Park transformation) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพจะถูกควบคุมบนแกน q ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมแบบแกน d ดังแสดงในรูปที่ 3.1



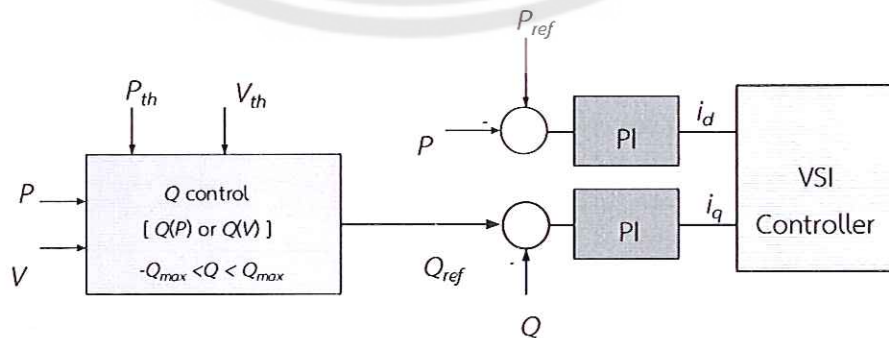
รูปที่ 3.1 โครงสร้างควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพของอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI

ปริมาณกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q) ที่สามารถถูกนำมาใช้ชดเชยด้วยตัวอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI จะขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏของอินเวอร์เตอร์ (S) และ กำลังไฟฟ้าจริง (P) ที่ผลิตออกมาจากระบบโฟโตโวลตาอิก ณ เวลาที่กำลังพิจารณา ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\pm Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{3.1}$$

โดยที่ ในกรณีอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่าย ค่า Q เป็นบวก คือ จ่ายกำลังไฟฟ้าจินตภาพเข้าระบบ และ ค่า Q เป็นลบ คือ ดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบ

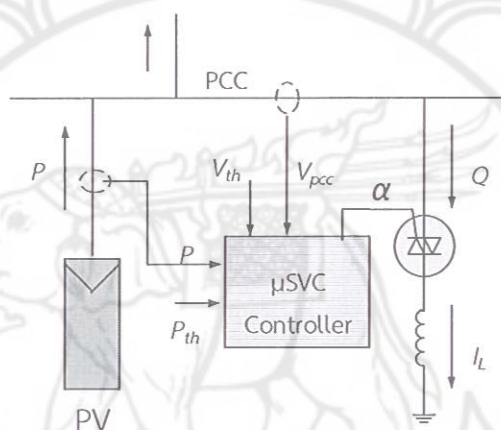
สำหรับการประยุกต์ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพทั้งแบบ $Q(P)$ และ $Q(V)$ สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI สามารถแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการควบคุมกระแสในแกน dq ให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ และ ปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกที่เปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ซึ่งค่าอ้างอิงของกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q_{ref}) จะเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (2.5) หรือ (2.6) ในบทที่ 2 ขึ้นอยู่กับรูปแบบการควบคุม



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบ $Q(P)$ และ $Q(V)$ ในอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI

3.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจลนภาพด้วยตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก

ในกรณีที่ระบบโวลตาจิกใช้อินเวอร์เตอร์รุ่นเก่าที่ไม่สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าจลนภาพ หรือตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ อาจจะต้องมีอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าจลนภาพแยกต่างหาก จึงมีแนวคิดพัฒนาตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจลนภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Micro static var compensator, μ VSC) มาเพื่อใช้สำหรับป้องกันปัญหาแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน จะเน้นไปที่การควบคุมกำลังไฟฟ้าจลนภาพของตัวเหนี่ยวนำด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor controlled reactor, TCR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเรียบง่ายและมีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน โดยนำ μ VSC มาต่อขนานกับระบบโวลตาจิก เพื่อป้องกันการการแรงดันไฟฟ้าเกินแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งตัว μ VSC จะทำการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ (α) ในช่วงระหว่าง $90^\circ - 180^\circ$ (E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara และ T.J.E. Miller, 2002 บทที่ 6) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อและกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโวลตาจิก มีค่าเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ (V_{th} และ P_{th} ตามลำดับ)



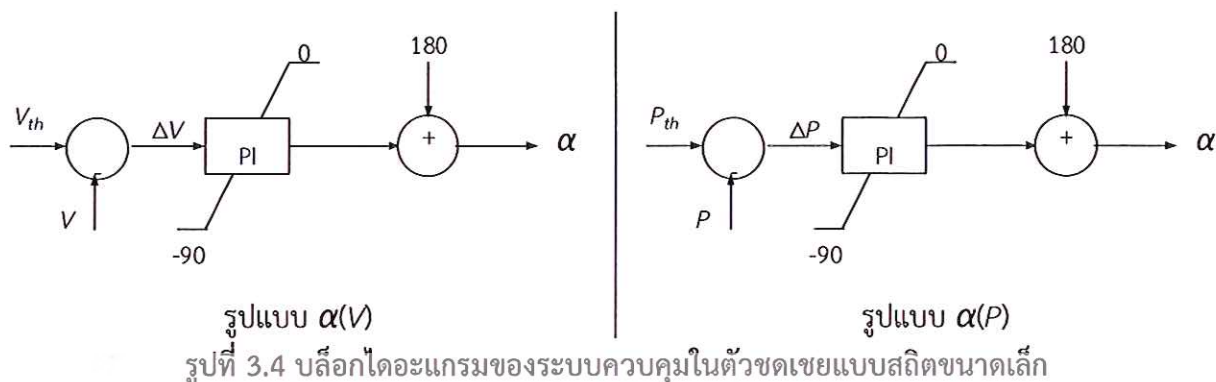
รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจลนภาพด้วยตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก

จากรูปที่ 3.3 ตัวชดเชย μ VSC จะควบคุมกระแสที่ไหลเข้าตัวเหนี่ยวนำให้สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ขนาดกระแสหรือกำลังไฟฟ้าจลนภาพในตัวชดเชย μ VSC จะถูกควบคุมด้วยการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ (α) โดยที่ กระแสจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อมุมจุดชนวนเท่ากับ 180° และ กระแสจะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมจุดชนวนเท่ากับ 90° โดยที่การควบคุมมุมจุดชนวนนี้สามารถออกแบบรูปแบบการทำงานได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ $\alpha(V)$ และ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโวลตาจิก $\alpha(P)$ ซึ่งในกรณีระบบควบคุมเป็นชนิด PI จะสามารถเขียนฟังก์ชันการควบคุมทั้ง 2 รูปแบบ ได้เป็น

$$\alpha = K \left(1 + \frac{1}{sT} \right) (V_{th} - V) \quad \text{เมื่อ} \quad P > P_{th} \text{ และ } V > V_{th}. \quad (3.2)$$

$$\alpha = K \left(1 + \frac{1}{sT} \right) (P_{th} - P) \quad \text{เมื่อ} \quad P > P_{th} \text{ และ } V > V_{th}. \quad (3.3)$$

เนื่องจากช่วงทำงานของมุมจุดชนวนจะอยู่ระหว่าง $90^\circ - 180^\circ$ ทำให้บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ประยุกต์จากฟังก์ชันใน (3.2) และ (3.3) สามารถเขียนได้เป็นรูปที่ 3.4



นอกจากจะออกแบบระบบควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตัวควบคุมแบบ PI ได้แล้ว ยังสามารถออกแบบการควบคุมมุมจุดชนวนโดยพิจารณาจากตารางตัดสินใจ (Decision table) โดยที่ขนาดมุมจุดชนวนจะถูกเลือกให้สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ในแต่ละช่วง ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งพื้นฐานของการใช้ตารางเงื่อนไขเพื่อตัดสินใจนี้ สามารถนำมาประยุกต์เป็นการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic, ตรรกศาสตร์คลุมเครือ) ได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของตัวชดเชยชนิด μ VSC

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างเงื่อนไขการควบคุมมุมจุดชนวนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่างๆ (แบ่งเป็น 3 ช่วง)

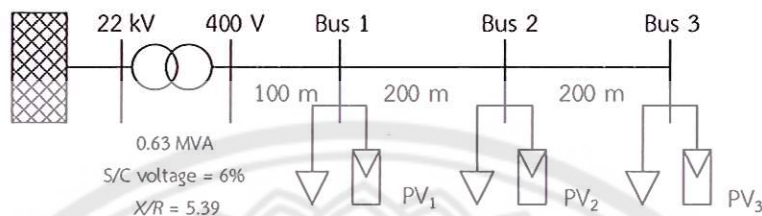
กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบไฟโตโวลตาอิก	ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ	มุมจุดชนวน
$P < P_{th}$	ทุกระดับแรงดัน	$\alpha = 180^\circ$
$P \geq P_{th}$	$V < V_{th}$	$\alpha = 180^\circ$
$P \geq P_{th}$	$V_{th} \leq V < V_1$	$\alpha = \alpha_1$ (โดยที่ $\alpha_2 < \alpha_1 < 180^\circ$)
$P \geq P_{th}$	$V_1 \leq V < V_2$	$\alpha = \alpha_2$ (โดยที่ $90^\circ < \alpha_2 < \alpha_1$)
$P \geq P_{th}$	$V \geq V_2$	$\alpha = 90^\circ$

สำหรับความเร็วในการตอบสนองของตัวชดเชย μ VSC จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการควบคุมและขนาดของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งถ้าขนาดตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ก็อาจจะเป็นหน่วงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วย ซึ่ง E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara และ T.J.E. Miller (2002, บทที่ 8) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของการใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตย์ (VSC) เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งแบบโปรแกรม PSCAD/EMTDC พบว่าตัวชดเชยแบบ VSC สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาไม่ถึง 0.1 วินาที ในการเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวนจาก 120 องศา ไปเป็น 180 องศา

3.3 ระบบทดสอบสำหรับกรณีศึกษา

ระบบจำหน่ายที่ถูกจำลองเพื่อทำการศึกษาคือ ระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมมูล ระดับแรงดันไฟฟ้า 400 V และมีกลุ่มของระบบไฟโตโวลตาอิกเชื่อมต่ออยู่ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณตอนต้น, ตอนกลาง และตอนท้าย ของสายส่งย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สมมติให้ระบบอยู่ในสภาวะโหลดน้อย โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- อิมพีแดนซ์สายส่ง เท่ากับ $0.346 + j0.0754$ โอห์มต่อกิโลเมตร
- ระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านระบบแรงสูง เท่ากับ 1.02 p.u.
- ภาระไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง เท่ากับ 1 kW ที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.9 ล้าหลัง
- ระบบโฟโตโวลตาอิกในแต่ละตำแหน่ง จ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 50 kW

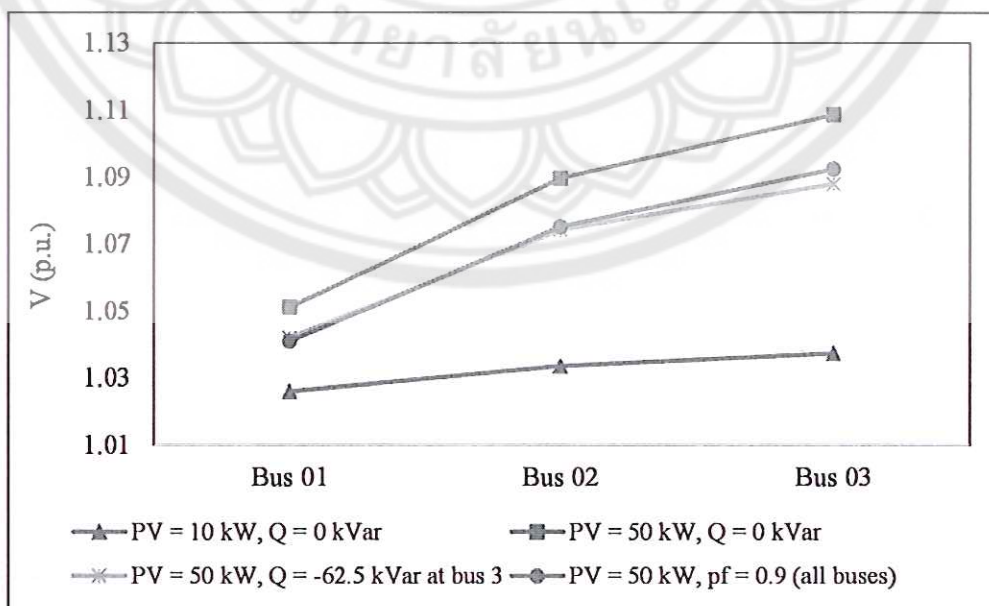


รูปที่ 3.5 ระบบจำหน่ายแรงต่ำสำหรับใช้ศึกษาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการศึกษาแรงดันเกินโดยเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกในแต่ละตำแหน่ง จาก 10 kW ไปเป็น 50 kW โดยกำหนดให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งไม่ให้มีขนาดเกิน 1.09 p.u. และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดต่อเชื่อมไม่ให้ต่ำเกินกว่า 0.9 (ล้าหลัง)

3.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว

ที่สภาวะเริ่มต้น กำหนดให้ระบบโฟโตโวลตาอิกในแต่ละตำแหน่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 10 kW และมีค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพเท่ากับ 0 kVar (ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1) จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสมีค่าไม่เกินตามข้อกำหนด (< 1.09 p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และมีสมาชิกแต่ละตัวในเมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้า S_{ij}^{V} ดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบ เมื่อวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในกรณีต่างๆ

ตารางที่ 3.2 เมตริกซ์ความไวของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (หน่วย p.u. ต่อ MVar)

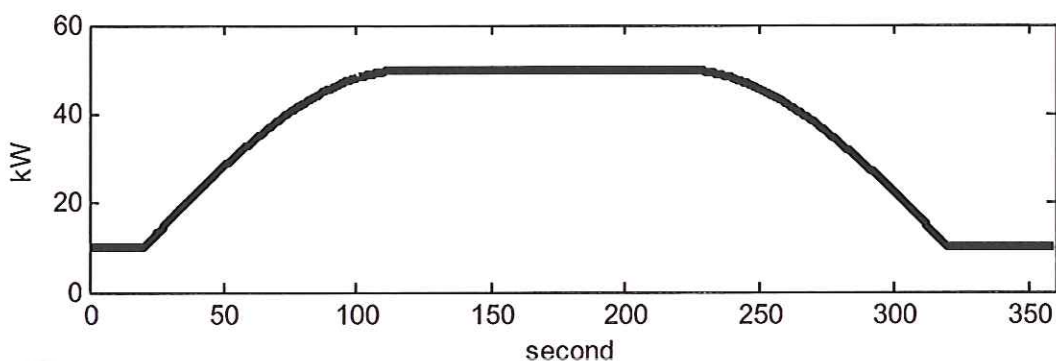
บัส	400 V	Bus 1	Bus 2	Bus 3
400 V	0.091792	0.091814	0.091841	0.091853
Bus 1	0.091295	0.137317	0.137506	0.137595
Bus 2	0.090636	0.136325	0.227873	0.228114
Bus 3	0.090307	0.135831	0.227046	0.318229

จากรูปที่ 3.6 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกเป็นที่ค่าพิกัด 50 kW พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 (ที่ปลายสายส่งย่อย) มีขนาดประมาณ 1.108 p.u. ซึ่งเกินกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนด (>1.09 p.u.) ขณะที่แรงดันที่ตำแหน่งใกล้เคียงหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งถ้าต้องการลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 ให้ลดลงมาเหลือประมาณ 1.09 p.u. ด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ตำแหน่งบัส 3 บัสเดียว จากการประเมินด้วยเมตริกซ์ $S_Q^{|V|}$ ที่ตำแหน่งบัส 3 พบว่าต้องใช้กำลังไฟฟ้าจินตภาพมาชดเชยด้วยการดูดกลืนเข้ามาที่ระบบโฟโตโวลตาอิกที่บัส 3 จำนวนประมาณ -62.5 kVAr ซึ่งผลจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในรูปที่ 7 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 สามารถลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (บัสอื่นๆ ก็มีขนาดลดลงด้วย) แต่การชดเชยด้วยกำลังไฟฟ้าจินตภาพขนาดนี้จะทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่บัส 3 เหลือแค่ 0.63 แบบล้าหลัง(ที่กำลังไฟฟ้าจริง 50 kW)

เพื่อหลีกเลี่ยงการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเป็นจำนวนมากจากระบบโฟโตโวลตาอิกที่บัส 3 บัสเดียว จึงควรมีการกระจายการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบโฟโตโวลตาอิกจากตำแหน่งอื่นๆในสายส่งย่อยเดียวกันด้วย ซึ่งในกรณีกำหนดให้ระบบโฟโตโวลตาอิกทั้ง 3 บัส ช่วยกันชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพขนาดไม่เกิน 24.22 kVar เพื่อหลีกเลี่ยงตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.9 (ล้าหลัง) เมื่อระบบโฟโตโวลตาอิกจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด จากการวิเคราะห์ด้วยเมตริกซ์ $S_Q^{|V|}$ พบว่าการกระจายการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพนี้จะสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 ได้ประมาณ 0.017 p.u. ซึ่งผลจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 สามารถกลับมาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เหมือนกับกรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพขนาด 62.5 kVar ที่บัส 3 เพียงบัสเดียว

3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาพลวัตของการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันในระบบจำหน่ายที่ทำการศึกษา เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ โดยกำหนดลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกในแต่ละตำแหน่งให้มีการค่อยๆเพิ่มค่าขึ้น (จาก 10 kW ไปเป็น 50 kW) และค่อยๆลดค่าลง (จาก 50 kW เหลือ 10 kW) เป็นระยะเวลาทั้งหมด 360 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์บนโปรแกรม DigSILENT PowerFactor จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพในรูปของค่าเฉลี่ย rms (Root mean square)



รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกในแต่ละตำแหน่ง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในสถานะคงตัว พบว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งเมื่อกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากระบบโฟโตโวลตาอิกเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้การเลือกรูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจึงตามทั้งค่า P_{th} และ V_{th} ของระบบโฟโตโวลตาอิกจะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อประสานการทำงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตามในแต่ละตำแหน่งให้สามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจึงตามให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบจำหน่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจึงตามในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าไม่มาก เช่น บริเวณต้นทางของสายส่งย่อย ควรเลือกรูปแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตามขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิก ณ บริเวณนั้น โดยจะเริ่มชดเชยเมื่อกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกเพิ่มขึ้นถึงค่าระดับหนึ่ง ที่มีค่าสูงพอจะมั่นใจว่าจะอาจส่งผลให้เกิดแรงดันเกินที่ส่วนอื่นในระบบได้ และหลีกเลี่ยงการชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตามกับปัญหาแรงดันเกินอันเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ใช่จากการระบบโฟโตโวลตาอิก

ในส่วนบริเวณ กึ่งกลาง และ ปลายสายส่งย่อย ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่มาก ควรเลือกรูปแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตามขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้นๆ โดยตรง โดยจะเริ่มทำการชดเชยเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าได้เพิ่มถึงค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งที่ค่าแรงดันที่ตั้งไว้ควรจะมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตาม สำหรับความไวในการตอบสนองของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตามในแต่ละตำแหน่งควรจะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยที่ตัวชดเชยที่บริเวณปลายสายควรทำงานได้รวดเร็วที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินได้มากที่สุด

3.5.1 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบโฟโตโวลตาอิก

การทดสอบส่วนนี้เป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าจึงตามโดยสมมติให้อินเวอร์เตอร์ของระบบโฟโตโวลตาอิกทั้ง 3 ตำแหน่งในรูปที่ 3.6 เป็นชนิด VSI ซึ่งสามารถจ่ายและดูดซับกำลังไฟฟ้าจึงตามได้ไม่เกิน 24.22 kVar (ซึ่งทำให้ค่าประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 0.9 ที่กำลังไฟฟ้าจริง เท่ากับ 50 kW) โดยกำหนดให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจึงตามที่บัส 1 เป็นแบบ $Q(P)$ และมีการควบคุมเป็นแบบ $Q(V)$ สำหรับบัสที่ 2 และ 3

จากรูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าในสมการที่ (2.5) ถึง (2.7) ในบทที่ 2 เพื่อเป็นการประสานการทำงานของระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจึงตามทั้ง 3 ตำแหน่งในระบบ จะมีการกำหนดค่า V_{th} และ P_{th} รวมทั้งค่าอัตราขยายของระบบควบคุม (Controller's gains) แต่ละตัวให้มีความแตกต่างกัน เพื่อให้



สอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งตลอดแนวสายส่งย่อย โดยระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ในแต่ละตำแหน่ง มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 3 และกำหนดให้ระบบควบคุมในแต่ละตำแหน่งมีการอพยพค่ากำลังไฟฟ้าจริง, กำลังไฟฟ้าจินตภาพ และ แรงดันไฟฟ้า ณ บริเวณนั้น ในเวลาทุกๆ 1 วินาที

25 ธ.ค. 2559

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ

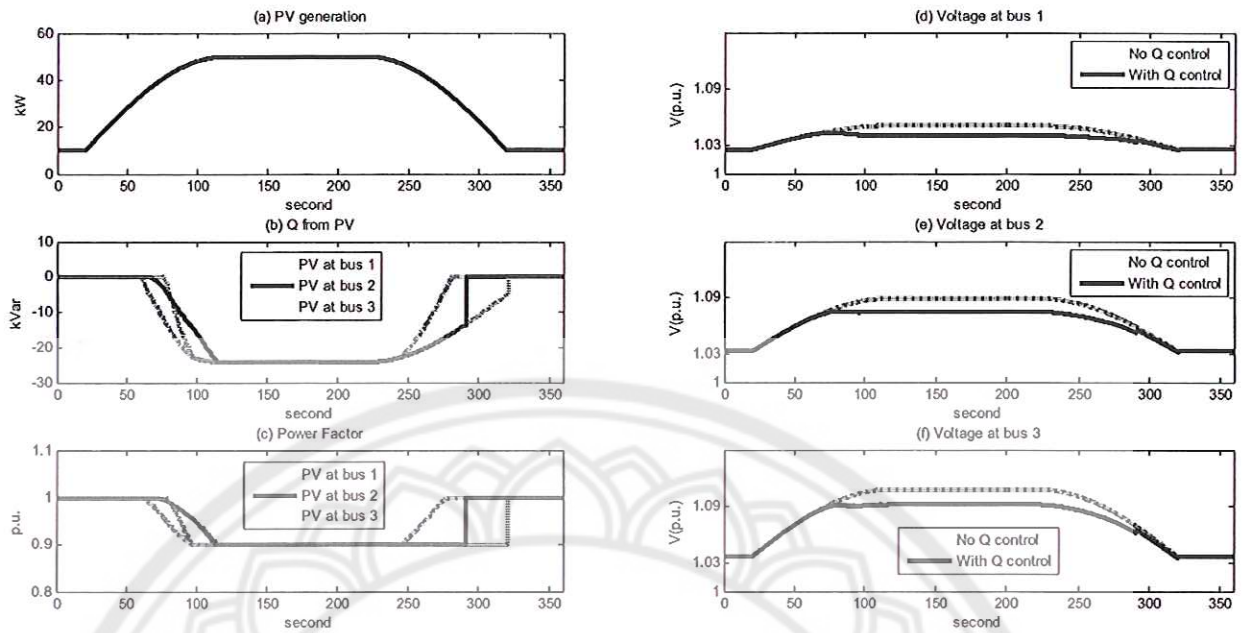
บัส	รูปแบบการชดเชย	V_{th} (p.u)	P_{th} (kW)	อัตราขยาย
1	Q(P)	$V_{th,1} = 1.035$	$P_{th,1} = 33.3$	$m = 1.65$
2	Q(V)	$V_{th,2} = 1.07$	$P_{th,2} = 27.8$	$K_2 = 1$ $T_2 = 0.5$
3	Q(V)	$V_{th,3} = 1.08$	$P_{th,3} = 10$	$K_3 = 2$ $T_3 = 0.1$

๑๐๐
๖๖
E44
๒๖๘๕
๒๖๘๘

ผลการจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราวด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory แสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจะแสดงพลวัตการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ, กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่เปลี่ยนแปลงจากอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว และ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ ซึ่งพบว่าในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ แรงดันไฟฟ้าที่บัส 3 จะมีขนาดเกิน 1.09 p.u. เมื่อกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกเพิ่มไปถึงค่าประมาณ 39 kW (ที่เวลาประมาณ 72 วินาที) ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้อินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ตำแหน่งสามารถประสานการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้ จะสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าตลอดแนวสายส่งย่อยไม่ให้สูงเกินค่าที่กำหนดไว้ได้ (< 1.09 p.u.)

จากรูปที่ 3.8 พบว่าอินเวอร์เตอร์ของระบบโฟโตโวลตาอิกที่บัส 1 จะเริ่มชดเชยเมื่อกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกมามีค่าที่ค่อนข้างสูง (> 50 % ของพิกัด) ที่เวลาประมาณ 60 วินาที และชดเชยต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.9 แล้วหลังจากนั้นอินเวอร์เตอร์ของระบบโฟโตโวลตาอิกที่บัส 2 และ 3 จะเริ่มทำงานที่เวลา 65 และ 75 วินาทีตามลำดับ ถึงแม้อินเวอร์เตอร์ที่บัส 2 จะทำงานก่อน แต่ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ที่บัส 3 จะทำงานไวกว่า เพื่อให้ตอบสนองต่อแรงดันที่เปลี่ยนแปลงที่ปลายสายได้อย่างรวดเร็ว โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่บัส 2 และ 3 นี้ จะพยายามรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับค่า V_{th} ที่ตั้งไว้ให้มากที่สุด โดยที่ขนาดกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกชดเชยที่บัส 2 และ 3 จะต้องไม่ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 0.9

หลังจากเวลา 223 วินาที กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกจะเริ่มค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ชดเชยจากอินเวอร์เตอร์ที่บัส 1 ค่อยๆ ลดลงไปด้วย และจะหยุดการชดเชยที่เวลาประมาณ 280 วินาที (ซึ่งเป็นเวลาที่กำลังไฟฟ้าจริง และ แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าน้อยกว่าค่า $P_{th,1}$ และ $V_{th,1}$ ที่กำหนดไว้) ในส่วนอินเวอร์เตอร์ที่บัส 2 และ 3 จะทำการค่อยๆ ลดการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพลง เมื่อแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีระดับต่ำกว่าค่า $V_{th,2}$ และ $V_{th,3}$ โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองจะยังพยายามควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้คงที่ค่า 0.9 อยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตออกมามีค่าต่ำกว่า $P_{th,2}$ และ $P_{th,3}$ ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์ที่บัส 2 และ 3 นี้จะหยุดการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่เวลาประมาณ 291 และ 320 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ผลจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราว กรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบไฟโตโวลตาอิก

3.5.2 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวชดเชยแบบสถิตขนาดเล็ก

จากโครงสร้างของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (μ VSC) ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพจะถูกชดเชยผ่านการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ (ระหว่าง 90 องศา – 180 องศา) โดยที่ตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ มีขนาดพิกัดเท่ากับ 24.22 kVar และจะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว เพื่อวัตถุประสงค์สำหรับป้องกันปัญหาแรงดันเกินเท่านั้น และกำหนดให้ระบบควบคุมของ μ VSC ในแต่ละตำแหน่งมีการอัปเดตค่ากำลังไฟฟ้าจริง, กำลังไฟฟ้าจินตภาพ และ แรงดันไฟฟ้า ณ บริเวณนั้น ในเวลาทุกๆ 4 วินาที เนื่องจากผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพของ μ VSC จะช้ากว่ากรณีใช้การชดเชยจากอินเวอร์เตอร์ชนิด VSI จากการที่ขนาดมุมชนวนเปลี่ยนค่าแบบทันทีทันใดไม่ได้ และมีการหน่วงค่ากระแสจากผลของตัวเหนี่ยวนำ

ในทำนองเดียวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอินเวอร์เตอร์ รูปแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ติดตั้งตัว μ VSC ในระบบจำหน่าย โดยที่ตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 1 จะมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพตามการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบไฟโตโวลตาอิก ในขณะที่ตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 2 และ 3 จะควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพตามการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ

สำหรับการศึกษาการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวชดเชยแบบ μ VSC ในสภาวะชั่วคราวนี้ จะแบ่งเป็น 2 ส่วนตามลักษณะรูปแบบระบบควบคุมมุมจุดชนวน ได้แก่

- 1) ควบคุมมุมจุดชนวนด้วยระบบควบคุมแบบ PI
- 2) ควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตารางเงื่อนไข

กรณีที่ 1 การควบคุมมุมจุดชนวนด้วยระบบควบคุมแบบ PI

จากโครงสร้างระบบควบคุมในรูปที่ 3.4 และรูปแบบการควบคุมตามสมการที่ (5) และ (6) กำหนดให้ตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 1 มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบ $\alpha(P)$ ในขณะที่บัส 2 และ 3 ตัวชดเชยจะทำงานแบบ $\alpha(V)$ โดยที่ระบบควบคุมของตัวชดเชยแบบ μ VSC ในแต่ละตำแหน่ง มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 3.4

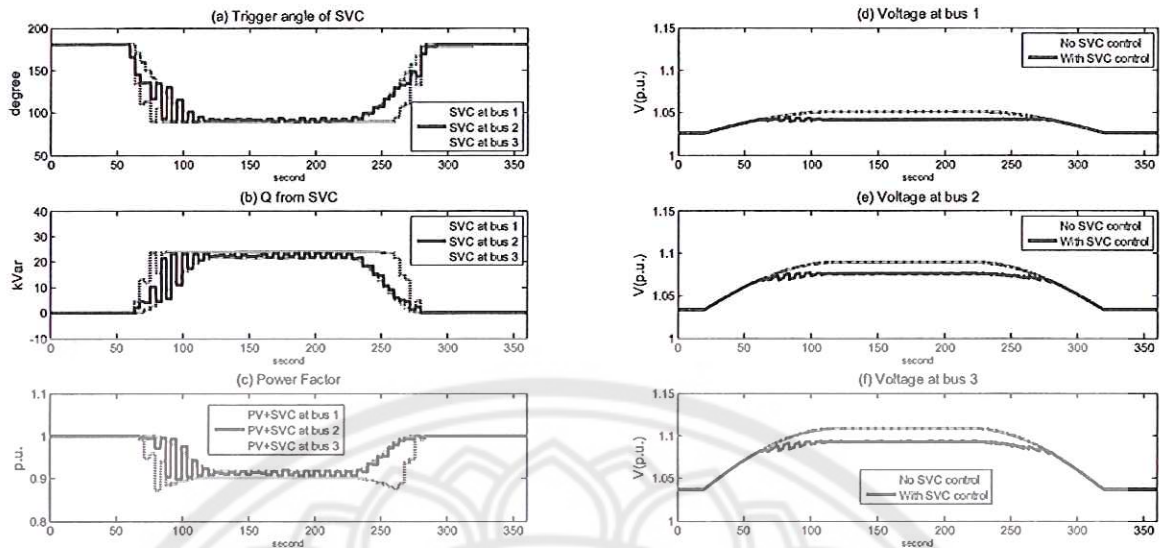
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ

บัส	รูปแบบการชดเชย	V_{th} (p.u)	P_{th} (kW)	อัตราขยาย
1	$\alpha(P)$	$V_{th,1} = 1.035$	$P_{th,1} = 33.3$	$K_1 = 300$ $T_1 = 30$
2	$\alpha(V)$	$V_{th,2} = 1.063$	$P_{th,2} = 27.8$	$K_2 = 7000$ $T_2 = 7000$
3	$\alpha(V)$	$V_{th,3} = 1.08$	$P_{th,3} = 11.1$	$K_3 = 15000$ $T_3 = 15000$

ผลการจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราวด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory แสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะแสดงพลวัตการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ, กำลังไฟฟ้าจินตภาพและมุมจุดชนวนที่เปลี่ยนแปลงจากตัวชดเชยแบบ μ VSC แต่ละตัว และ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ ซึ่งพบว่าการออกแบบให้มีการประสานการทำงานระหว่างตัวชดเชยแบบ μ VSC ในแต่ละตำแหน่ง จะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้เต็มที่ และสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าตลอดแนวสายส่งย่อยไม่ให้สูงเกินค่าที่กำหนดไว้ได้ (<1.09 p.u.) โดยที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดต่อเชื่อม มีขนาดไม่เกิน 0.9 แบบล้าหลัง

จากรูปที่ 3.9 พบว่าการประสานการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพระหว่างตัวชดเชยแบบ μ VSC ในแต่ละตำแหน่ง จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับการชดเชยด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ VSI โดยที่ตัวชดเชยแบบ μ VSC จะเริ่มดูดกลืนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลติกและแรงดันที่จุดต่อเชื่อมมีขนาดเกินกว่าค่า P_{th} และ V_{th} ของตัวชดเชยแบบ μ VSC แต่ละตัว และจะชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพไปเรื่อยๆ จนถึงค่าพิกัดที่ประมาณ 24.22 kVar (ทำให้มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อเท่ากับ 0.9 ล้าหลัง ที่พิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิก 50 kW)

นอกจากนี้ยังพบว่าจะมีการแกว่งของแรงดันเกิดขึ้นเล็กน้อยในแต่ละบัส ตรงบริเวณใกล้กับค่า V_{th} ของตัวควบคุมในแต่ละตัวชดเชยแบบ μ VSC ซึ่งการแกว่งนี้เป็นผลมาจากมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่ตำแหน่งอื่น แล้วส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่พิจารณาด้วย (การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอันเกิดจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ณ ตำแหน่งอื่นสามารถพิจารณาได้จากเมตริกซ์ความไวแรงดันไฟฟ้า S_{ij}^V ดังแสดงในตารางที่ 3.2) ซึ่งการแกว่งที่เกิดขึ้นจะไปรบกวนการทำงานของระบบควบคุม ณ ตำแหน่งนั้นๆ ทำให้ต้องพยายามปรับค่าแรงดันกลับมาเหมือนเดิม ซึ่งจากการทดสอบพบว่าการแกว่งนี้จะเกิดขึ้นเป็นเวลาประมาณ 55 วินาที



รูปที่ 3.9 ผลจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราว กรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยตัวชดเชยแบบ μ VSC โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PI

กรณีที่ 2 การควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตารางตัดสินใจ

กำหนดตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 1 จะมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพตามการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิก ในขณะที่ตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 2 และ 3 จะควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพตามการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ โดยที่ตารางที่ 3.5 ถึง 3.7 จะแสดงเงื่อนไขการควบคุมมุมจุดชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 1 ถึง บัส 3 ตามลำดับ ซึ่งมีการออกแบบให้ตัวชดเชยแบบ μ VSC ทั้ง 3 ตำแหน่งนี้ทำงานแบบประสานกันด้วย

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการควบคุมมุมจุดชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 1

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ	กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิก	มุมจุดชนวน
$V < 1.035$ p.u.	ทุกค่ากำลังไฟฟ้าจริง	$\alpha = 180^\circ$
$V \geq 1.035$ p.u.	$P < 33.3$ kW	$\alpha = 180^\circ$
$V \geq 1.035$ p.u.	33.3 kW $\leq P < 38.9$ kW	$\alpha = 157.5^\circ$
$V \geq 1.035$ p.u.	38.9 kW $\leq P < 44.5$ kW	$\alpha = 135^\circ$
$V \geq 1.035$ p.u.	44.5 kW $\leq P < 50$ kW	$\alpha = 112.5^\circ$
$V \geq 1.035$ p.u.	$P \geq 50$ kW	$\alpha = 90^\circ$

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการควบคุมมุมชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 2

กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิก	ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ	มุมจุดชนวน
$P < 27.8 \text{ kW}$	ทุกระดับแรงดัน	$\alpha = 180^\circ$
$P \geq 27.8 \text{ kW}$	$V < 1.06 \text{ p.u.}$	$\alpha = 180^\circ$
$P \geq 27.8 \text{ kW}$	$1.06 \text{ p.u.} \leq V < 1.065 \text{ p.u.}$	$\alpha = 157.5^\circ$
$P \geq 27.8 \text{ kW}$	$1.065 \text{ p.u.} \leq V < 1.07 \text{ p.u.}$	$\alpha = 135^\circ$
$P \geq 27.8 \text{ kW}$	$1.07 \text{ p.u.} \leq V < 1.075 \text{ p.u.}$	$\alpha = 112.5^\circ$
$P \geq 27.8 \text{ kW}$	$V \geq 1.075 \text{ p.u.}$	$\alpha = 90^\circ$

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการควบคุมมุมชนวนของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่บัส 3

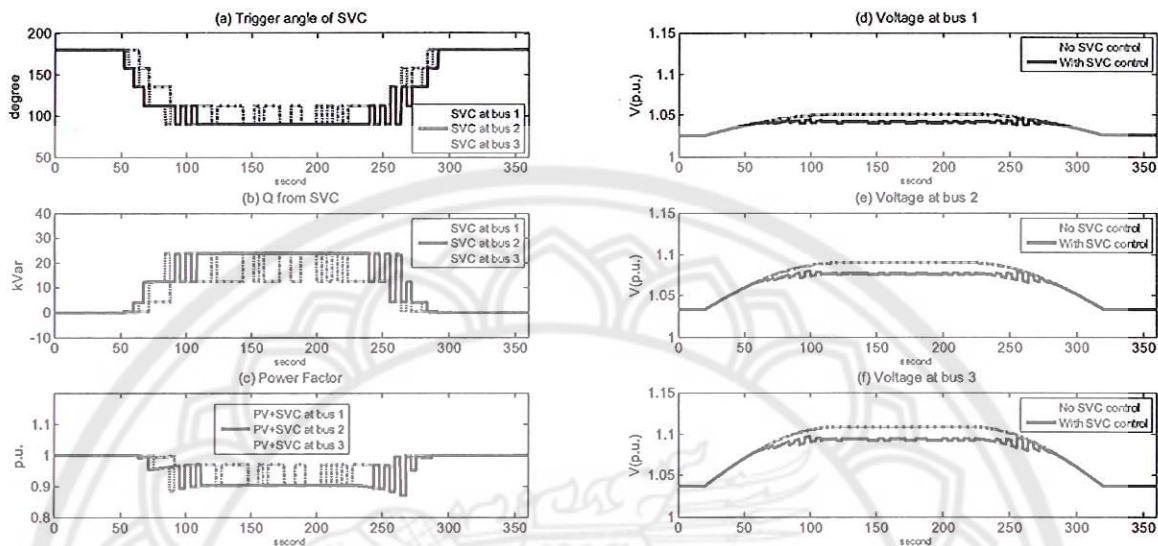
กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิก	ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ	มุมจุดชนวน
$P < 11.1 \text{ kW}$	ทุกระดับแรงดัน	$\alpha = 180^\circ$
$P \geq 11.1 \text{ kW}$	$V < 1.07 \text{ p.u.}$	$\alpha = 180^\circ$
$P \geq 11.1 \text{ kW}$	$1.07 \text{ p.u.} \leq V < 1.075 \text{ p.u.}$	$\alpha = 157.5^\circ$
$P \geq 11.1 \text{ kW}$	$1.075 \text{ p.u.} \leq V < 1.08 \text{ p.u.}$	$\alpha = 135^\circ$
$P \geq 11.1 \text{ kW}$	$1.08 \text{ p.u.} \leq V < 1.085 \text{ p.u.}$	$\alpha = 112.5^\circ$
$P \geq 11.1 \text{ kW}$	$V \geq 1.085 \text{ p.u.}$	$\alpha = 90^\circ$

จากตารางตัดสินใจทั้ง 3 ตาราง พบว่า ความละเอียดของการสั่งค่ามุมจุดชนวนจะส่งผลต่อลักษณะการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อและกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโฟโตโวลตาอิกที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้ามีช่วงการสั่งค่ามุมจุดชนวนที่หยابเกินไป การชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพก็จะมีลักษณะกระโดดและไม่ต่อเนื่องเท่าที่ควร เพราะฉะนั้นถ้าสามารถออกแบบให้มีการสั่งจุดมุมชนวนได้ละเอียดมากเท่าไร ก็จะทำให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพของตัวชดเชยแบบ μ VSC มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการจากการวิเคราะห์ในสภาวะชั่วคราวด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะแสดงพลวัตการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ กำลังไฟฟ้าจินตภาพและมุมจุดชนวนที่เปลี่ยนแปลงจากตัวชดเชยแบบ μ VSC แต่ละตัว และ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ ซึ่งพบว่าการออกแบบให้มีการประสานการทำงานระหว่างตัวชดเชยแบบ μ VSC ในแต่ละตำแหน่ง จะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพและควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าตลอดแนวสายส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ (แรงดันไฟฟ้ามีค่า $< 1.09 \text{ p.u.}$) โดยที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดต่อเชื่อม มีขนาดไม่เกิน 0.9 แบบล้าหลัง

จากรูปที่ 3.10 ลักษณะพลวัตของสัญญาณไฟฟ้าต่างๆจากการควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตารางตัดสินใจ จะมีลักษณะเหมือนกันกรณีควบคุมมุมจุดชนวนด้วยระบบควบคุมแบบ PI แต่การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจินตภาพและมุมจุดชนวนจะไม่ราบเรียบเท่า นอกจากนี้ยังพบว่ามีแกว่งของแรงดันไฟฟ้า (ปรากฏการณ์ hunting oscillation ที่เป็นการรบกวนการทำงานของระบบควบคุม อันเนื่องจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพของตัวชดเชยแบบ μ VSC ที่ตำแหน่งอื่น) เกิดขึ้นเป็นขนาดที่มากกว่ากรณีใช้

ระบบควบคุมแบบ PI เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตารางตัดสินใจนี้มีความละเอียดของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมจุดชนวนน้อยกว่าการควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ PI นั้นเอง แต่โดยรวมการควบคุมมุมจุดชนวนด้วยตารางเงื่อนไขสามารถใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่เชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกได้เป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 3.10 ผลจากการวิเคราะห์ในสถานะชั่วคราว กรณีชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยตัวชดเชยแบบ μ VSC โดยใช้ตารางเงื่อนไข

3.6 สรุปการศึกษาผลกระทบด้วยแบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการศึกษาผลกระทบการเชื่อมต่อระบบไฟโตโวลตาอิกเป็นจำนวนมากเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำด้วยการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ในช่วงที่ระบบมีความต้องการไฟฟ้าน้อย แต่มีกำลังการผลิตจากระบบไฟโตโวลตาอิกมาก จะมีแนวโน้มเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินเกิดขึ้น โดยเฉพาะที่บริเวณปลายสายส่งย่อย ในทางตรงกันข้ามบริเวณต้นทางสายส่งจะมีระดับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่น้อยกว่า

ซึ่งการทดสอบระบบกรณีศึกษาในสถานะคงตัวพบว่า การชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่แต่ละจุดเชื่อมต่อ ด้วยการดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบจำหน่ายมาที่ระบบไฟโตโวลตาอิก สามารถช่วยลดปริมาณการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าได้ แต่การชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพเฉพาะจุดที่แรงดันเกินค่ามาตรฐาน (โดยเฉพาะที่ปลายสาย) จะต้องใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าจินตภาพมาก เพื่อชดเชยให้แรงดันกลับมาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดนั้นมีค่าที่ต่ำเกินไปจนเกินกว่าค่าที่การไฟฟ้ายอมรับได้

เพราะฉะนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่จุดใดจุดหนึ่งมากเกินไป จะต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากจุดเชื่อมต่ออื่นในระบบด้วย โดยเฉพาะจากตำแหน่งที่ระดับแรงดันยังอาจไม่สูงเกินค่ามาตรฐาน เช่น ที่บริเวณต้นสาย และ กึ่งกลางสาย ซึ่งจากการทดสอบพบว่า การให้มีการกระจายการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากจุดอื่นในระบบมาช่วยด้วย จะสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินได้ โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดที่ทำการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ซึ่งการที่จะให้มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากจุดอื่นมาเพื่อช่วยเสริมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้โดยกำหนดรูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพเป็นสองรูปแบบคือ 1) ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ หรือ $Q(V)$ และ 2) ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากระบบโวลตาอิก หรือ $Q(P)$ โดยที่จะกำหนดให้ระบบโวลตาอิกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสาย และ ปลายสายมีการทำงานแบบ $Q(V)$ ในขณะที่ตำแหน่งต้นสายให้ทำงานแบบ $Q(P)$ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าไม่มาก นอกจากนี้จะกำหนดให้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพในแต่ละตำแหน่งมีการประสานการทำงานกัน โดยมีการตั้งค่าเริ่มการทำงานของระบบควบคุมที่แตกต่าง เพื่อประโยชน์ในการหลีกเลี่ยงการทำงานกวนกันระหว่างตัวชดเชยในแต่ละตำแหน่งให้มากที่สุด เนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพที่จุดใดจุดหนึ่งในระบบ ก็จะส่งผลต่อการระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดอื่นๆ ในระบบด้วย (สามารถพิจารณาได้จากเมตริกซ์ค่าความไวการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า)

กำหนดให้มีระบบโวลตาอิกมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยอุปกรณ์ 2 ชนิด คือ 1) ตัวอินเวอร์เตอร์ของระบบโวลตาอิกเอง (กรณีสามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อัตโนมัติ) และ 2) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (ต่อขนานเพิ่มกับระบบโวลตาอิก) ซึ่งจากการทดสอบกรณีศึกษาในสภาวะชั่วคราว พบว่า อุปกรณ์ชดเชยทั้ง 2 ชนิดสามารถตอบสนองต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่แต่ละจุดเชื่อมต่อได้อย่างรวดเร็ว และสามารถป้องกันการเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ แต่ผลตอบสนองต่อแรงดันในกรณีตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กจะช้ากว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีใช้อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากผลของการหน่วงของตัวเหนี่ยวนำในวงจร และการเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวนจะมีการหน่วงอยู่ช่วงเวลาหนึ่งด้วย

เพราะฉะนั้นในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ในระบบโวลตาอิกไม่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อัตโนมัติ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กนี้ จะเหมาะมากที่จะใช้เพื่อควบคุมแรงดันเกิน ณ จุดเชื่อมต่อ เนื่องจากมีโครงสร้างและการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน มีผลตอบสนองที่รวดเร็วยอมรับได้ และไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนโครงสร้างระบบโวลตาอิกเดิมที่มีอยู่แล้ว เพียงแค่ต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กเข้ากับจุดเชื่อมต่อ หรือ ขนานกับระบบโวลตาอิก เท่านั้น

บทที่ 4

การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันและชุดทดสอบ

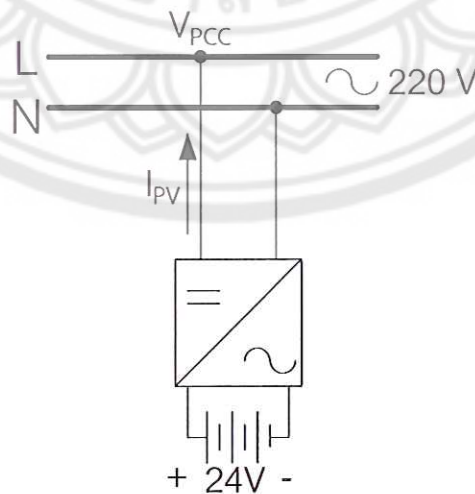
จากการศึกษาในบทที่ 3 พบว่าการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต สามารถใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อได้ในลักษณะเดียวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากตัวอินเวอร์เตอร์ในระบบโฟโตโวลตาอิกเอง ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กสำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก 1 เฟส เพื่อป้องกันไม่ให้ระดับแรงดันในระบบจำหน่ายมีขนาดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ขณะที่มีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ามาจากระบบโฟโตโวลตาอิก แบ่งการออกแบบและพัฒนาเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) อุปกรณ์ควบคุมแรงดันกับชุดทดสอบ และ 2) โปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน

4.1 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมกับชุดทดสอบ

ในส่วนการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมกับชุดทดสอบ จะกล่าวถึงการพัฒนารุ่นชุดทดสอบสำหรับจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิกกับระบบไฟฟ้า รวมทั้งการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันนั้นก็คือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (μ SVC) ซึ่งการออกแบบจะประกอบด้วย การคำนวณหาขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในอุปกรณ์ควบคุม ภาพรวมของระบบควบคุมแรงดันรวมไปถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน

4.1.1 พัฒนาชุดทดสอบระบบโฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

พัฒนาชุดทดสอบเพื่อจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 1 เฟส โดยสมมุติให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เสมือนแผงโซลาร์เซลล์ ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ ขนาดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มีขนาด 300 วัตต์ต่ออินพุตเข้ากับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ และต่อเอาต์พุตเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ ศึกษาลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้าจากการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบโฟโตโวลตาอิกเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า แสดงวงจรสมมูลในรูปที่ 4.1 และอุปกรณ์ชุดทดสอบในรูปที่ 4.2



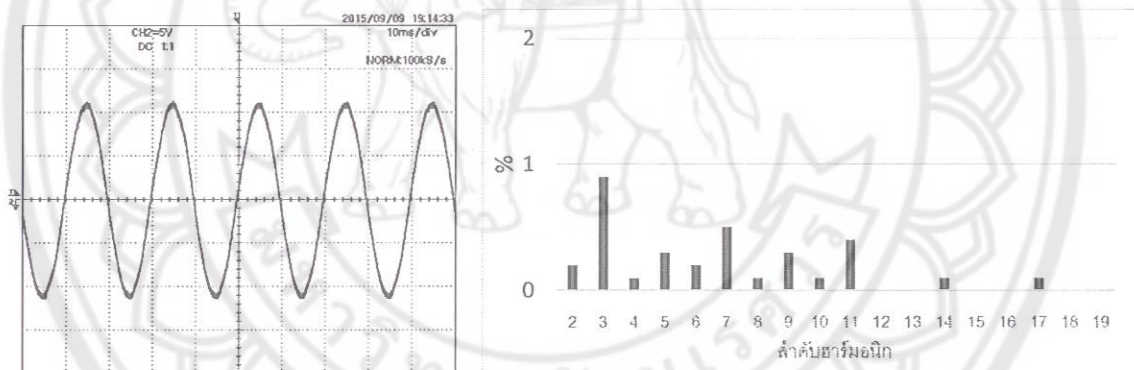
รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของระบบโฟโตโวลตาอิกเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส



รูปที่ 4.2 ชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิกกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 1 เฟส

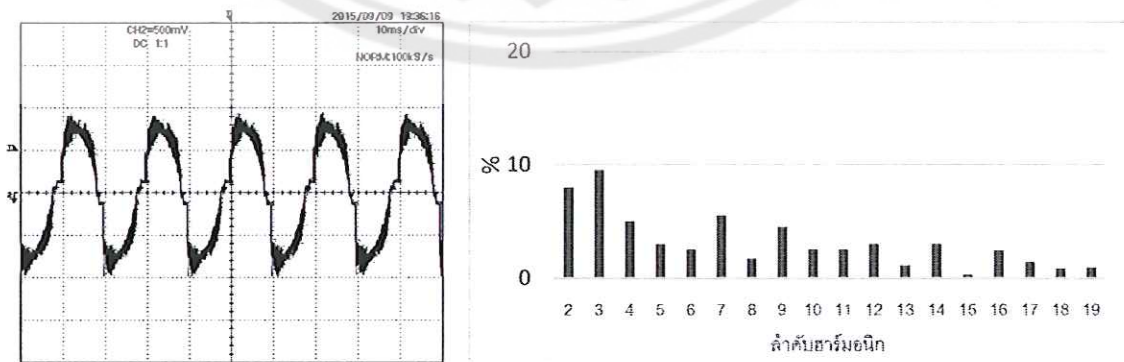
วัดแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์รวมทั้งค่าฮาร์มอนิกสเปกตรัม (Harmonic Spectrum) 19 อันดับ โดยเครื่องมือวัดที่ใช้คือ KYORITSU kew power quality analyzer รุ่น KEW6310 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ ณ จุดเชื่อมต่อ (V_{PCC}) วัดได้ประมาณ 230 V และมีระดับความเพี้ยนแรงดันเชิงฮาร์มอนิกรวม (THD_V) เท่ากับ 1.8%



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงดัน

กระแสไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ (I_{PV}) วัดได้ประมาณ 1.4 A และมีระดับความเพี้ยนกระแสเชิงฮาร์มอนิกรวม (THD_I) เท่ากับ 20.6%



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุตและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของกระแส

เมื่อทำการเปรียบเทียบระดับความเพี้ยนแรงดันเชิงฮาร์โมนิกรวม (THD_V) ของชุดทดสอบจำลอง การเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิก (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) กับ ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดัน สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วมตามข้อกำหนดของกฟภ. (ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า, ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม, 2551) แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดันกำหนดให้ไม่เกิน 5% ซึ่งระดับความเพี้ยนแรงดันเชิงฮาร์โมนิกรวม (THD_V) ของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิกวัดได้เท่ากับ 1.8% และจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันแต่ละอันดับของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิก อันดับคี่มีค่าไม่เกิน 4% และ อันดับคู่มีค่าไม่เกิน 2% เลย ดังนั้นระดับความเพี้ยนแรงดันเชิงฮาร์โมนิกรวมของชุดทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนด

ตารางที่ 4.1 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันแต่ละอันดับของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิก

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันแต่ละอันดับ (%)																		
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.2	0.9	0.1	0.3	0.2	0.5	0.1	0.3	0.1	0.4	0	0.3	0	0	0	0.1	0	0.05	

ตารางที่ 4.2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม ของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดัน แต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11, 12, 22 และ 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 ขึ้นไป	1.5	1	0.5

ทำนองเดียวกัน ทำการเปรียบเทียบขีดจำกัดของกระแสของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิก (ดังแสดงในตารางที่ 4.3) กับ ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วมตามข้อกำหนดของกฟภ. (ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า, ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม, 2551) แสดงดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าขีดจำกัดของกระแสของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิก ในแต่ละอันดับฮาร์โมนิกที่ 220 โวลต์ แสดงในตารางที่ 4.3 มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของกฟภ.ทั้งหมด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขีดจำกัดของกระแสของชุดทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดและอินเวอร์เตอร์สามารถใช้งานได้

ตารางที่ 4.3 ขีดจำกัดของกระแสของชุดทดสอบจำลองการเชื่อมต่อระบบโพลีโวลตาอิก

อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																		
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.1	0.13	0.08	0.05	0.04	0.08	0.02	0.07	0.03	0.04	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	

ตารางที่ 4.4 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม

ระดับ แรงดันไฟฟ้า ที่ จุดต่อร่วม (kV)	อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
11 และ 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
22, 24 และ 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1	
115 ขึ้นไป	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

หมายเหตุ : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

4.1.2 การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน

งานวิจัยนี้จะเลือกใช้การแก้ไขปัญหาระดับแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบจำหน่ายด้วยวิธีต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กลง (μ SVC) เข้ากับระบบจำหน่าย (สามารถ ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.3) เพื่อใช้ในระบบโพลีโวลตาอิกที่อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อัตโนมัติ โดยใช้ในส่วนการควบคุมตัวเหนี่ยวนำ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าเกิน ณ จุดเชื่อมต่อ ซึ่งตัว μ SVC มีโครงสร้างและการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถควบคุมได้อัตโนมัติและมีประสิทธิภาพอีกด้วย

การพิจารณาขนาดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ จะยึดตามข้อกำหนดของ กฟภ. เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำมากเกินไป โดยที่ กฟภ. ได้กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะต้องสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าจินตภาพเพื่อรักษาระดับแรงดัน ณ จุดต่อเชื่อม ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ. โดยความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันต่ำอยู่ที่ 0.95 ล้าหลัง ถึง 0.95 นำหน้า (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2558) ซึ่งข้อกำหนดนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาขนาดตัวเหนี่ยวนำใน μ SVC

4.1.2.1 การออกแบบขนาดตัวเหนี่ยวนำ

ขนาดตัวเหนี่ยวนำที่นำมาใช้งาน จะอ้างอิงถึงความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันต่ำอยู่ที่ 0.95 ล้าหลัง ถึง 0.95 นำหน้า จาก

$$Q = P \tan \theta \quad (4.1)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบโพลีโวลตาอิก มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

θ คือ มุมเฟสทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นองศา หาได้จาก

$$\text{ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor)} = \cos \theta \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาที่ขนาดอินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์ และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต้องการไม่เกิน 0.95 จาก (4.1) จะได้

$$Q = 300 \tan(\cos^{-1} 0.95)$$

$$Q = 98.61 \text{ Var}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้จาก

$$Q = \frac{V^2}{X_L} \quad (4.3)$$

โดยที่ V คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุม มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

X_L คือ รีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

จาก (4.3) จะได้

$$X_L = \frac{V^2}{Q} = \frac{220^2}{98.61}$$

$$X_L = 490.82 \text{ } \Omega$$

และสามารถหาค่าขนาดของตัวเหนี่ยวนำได้จาก

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.4)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 50 Hz

L คือ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

จาก (4.4) จะได้

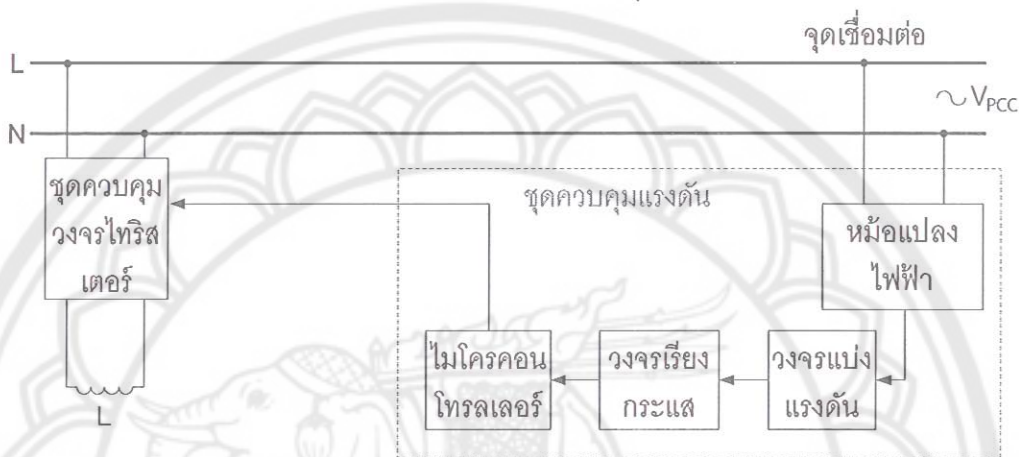
$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{490.82}{2\pi \times 50}$$

$$L = 1.56 \text{ H}$$

ในชุดอุปกรณ์ควบคุมที่ได้พัฒนาจะใช้ตัวเหนี่ยวนำสำเร็จรูปแบบปรับค่าได้ที่ 95 Var (ปรับได้ 8 สเตป) ซึ่งค่าเหนี่ยวนำที่เลือกใช้ มีค่าเท่ากับ 1.62 เฮนรี

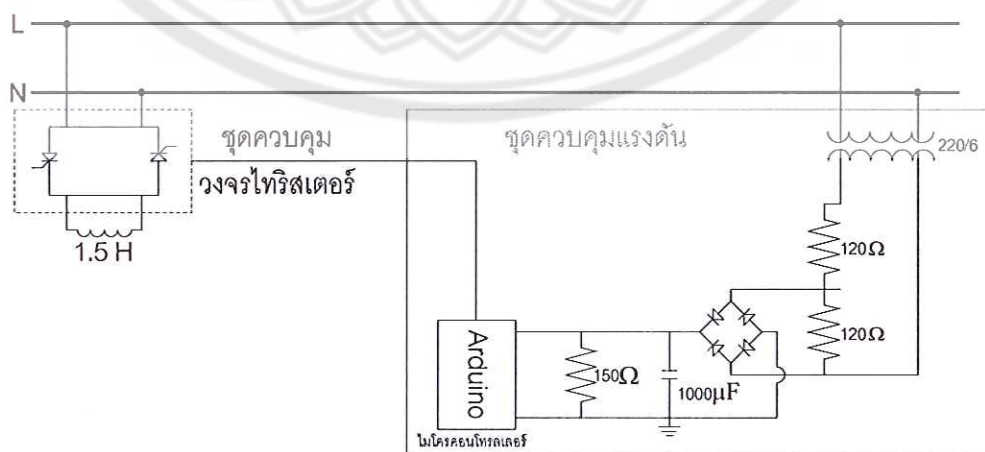
4.1.2.2 การออกแบบระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะประกอบด้วยชุดควบคุมการทำงานหลักๆ 2 ชุด คือ ชุดควบคุมแรงดันและชุดควบคุมวงจรถิรสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ชุดควบคุมแรงดันประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเข้าวงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดระดับแรงดันอีกชั้นหนึ่ง เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 5 โวลต์ จากนั้นต่อเข้ากับ วงจรเรียงกระแส เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงแล้วจ่ายเป็นแรงดันอ้างอิงให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมวงจรถิรสเตอร์ที่เหมือนสวิตช์ปิดเปิดเพื่อจ่าย กำลังไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำ ทำให้สามารถรักษาระดับแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อได้



รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดัน

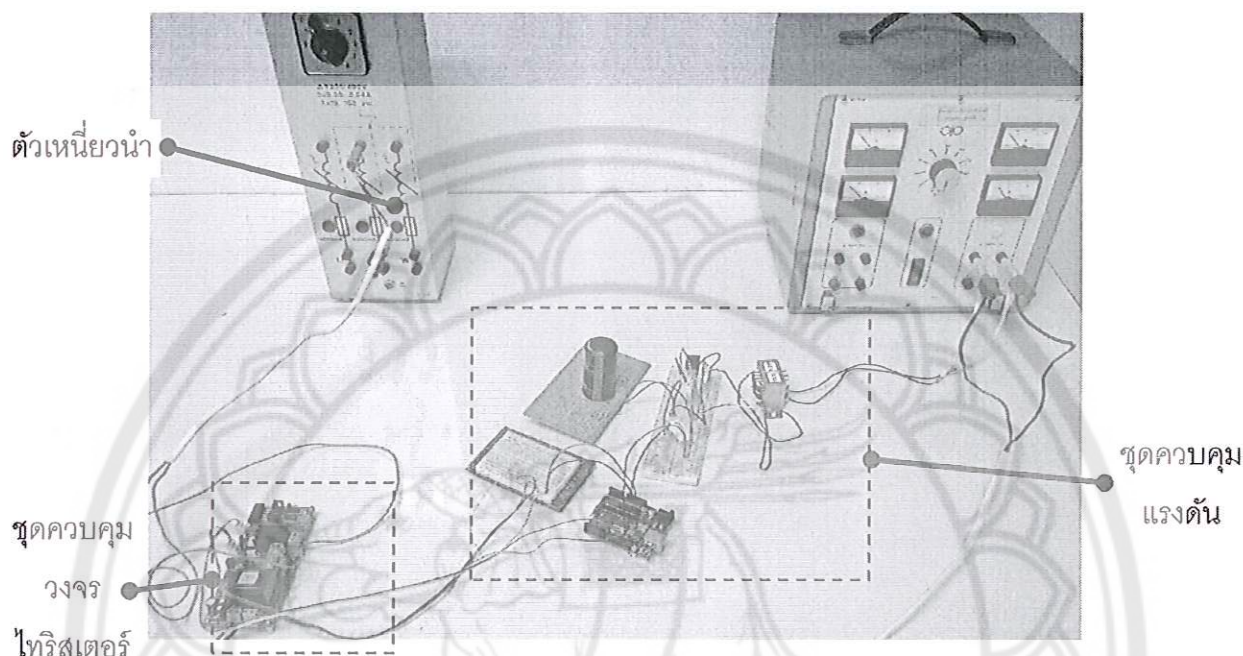
จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.5 สามารถพัฒนาวงจรในแต่ละส่วนได้ดังรูปที่ 4.6 โดยที่ หม้อแปลงจะใช้ขนาด 220/6 โวลต์ สำหรับวงจรแบ่งแรงดันประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 120Ω เท่ากัน 2 ตัว เพื่อลดแรงดันเหลือครึ่งหนึ่ง ในส่วนวงจรเรียงกระแสประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ต่อขานานเข้ากับตัวเก็บประจุ 1000μF และตัวต้านทาน 150Ω เพื่อกรองแรงดันกระแสตรงให้เรียบขึ้น เพื่อใช้เป็นแรงดันขาเข้าเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการ ควบคุม โดยที่ชุดควบคุมแรงดันจะเป็นตัวกำหนดและสั่งการชุดควบคุมวงจรถิรสเตอร์ให้ทริกมุมทริสเตอร์ เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งจากวงจรที่ได้ออกแบบ พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ จะแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 1.26 โวลต์



รูปที่ 4.6 ภาพรวมของระบบควบคุม

4.1.2.3 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในระบบควบคุมแรงดัน

จากวงจรระบบควบคุมแรงดันในรูปที่ 4.5 และ 4.6 สามารถนำมาพัฒนาเป็นชุดทดสอบจริงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมนี้ นอกเหนือจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปแล้ว อุปกรณ์หลักๆที่สำคัญในงานควบคุมจะประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์และชุดควบคุมวงจรทรานซิสเตอร์ รายละเอียดมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ในระบบควบคุมแรงดัน

1.) ไมโครคอนโทรลเลอร์

งานวิจัยนี้ได้เลือกคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในระบบควบคุมเป็น Arduino Uno เนื่องจากเป็นบอร์ดที่ใช้งานได้ง่าย คือสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขาอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ดแล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐานไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น รวมถึงเป็นฮาร์ดแวร์เปิด (Open Hardware) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน แผนผังโครงสร้างส่วนประกอบและการทำงานของบอร์ดแสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนี้

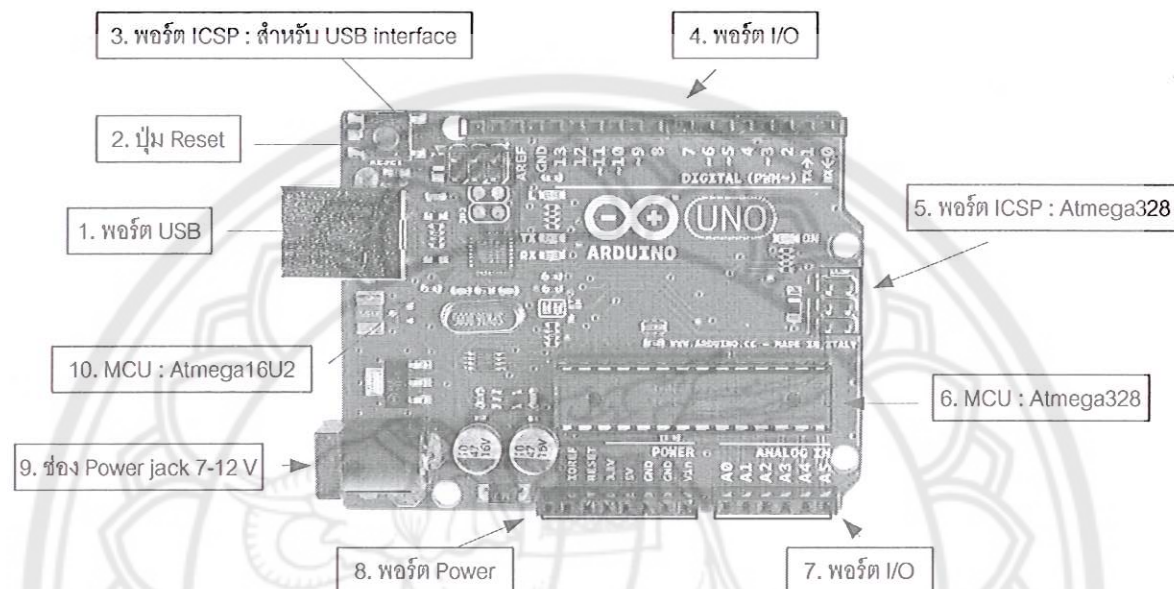
1. USBPort: ใช้สำหรับต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่มรีเซ็ต ใช้กดเมื่อต้องการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Comport บนAtmega16U2
4. I/OPort: อินพุตและเอาต์พุตดิจิทัล ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้บางขาจะทำหน้าที่อื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU: Atmega328 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้บนบอร์ด
7. I/OPort: นอกจากจะเป็นอินพุตและเอาต์พุตดิจิทัลแล้ว ยังเปลี่ยนเป็นช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5

8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}

9. Power Jack: รับไฟจากอะแดปเตอร์โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V

10. MCU ของ Atmega16U2 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่าน Atmega16U2

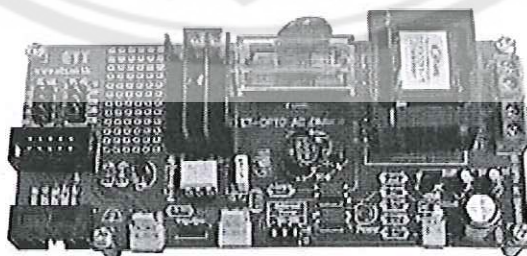
(<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>)



รูปที่ 4.8 โครงสร้างส่วนประกอบและการทำงานของบอร์ด Arduino Uno

2.) ชุดควบคุมวงจรไทรสเตอร์

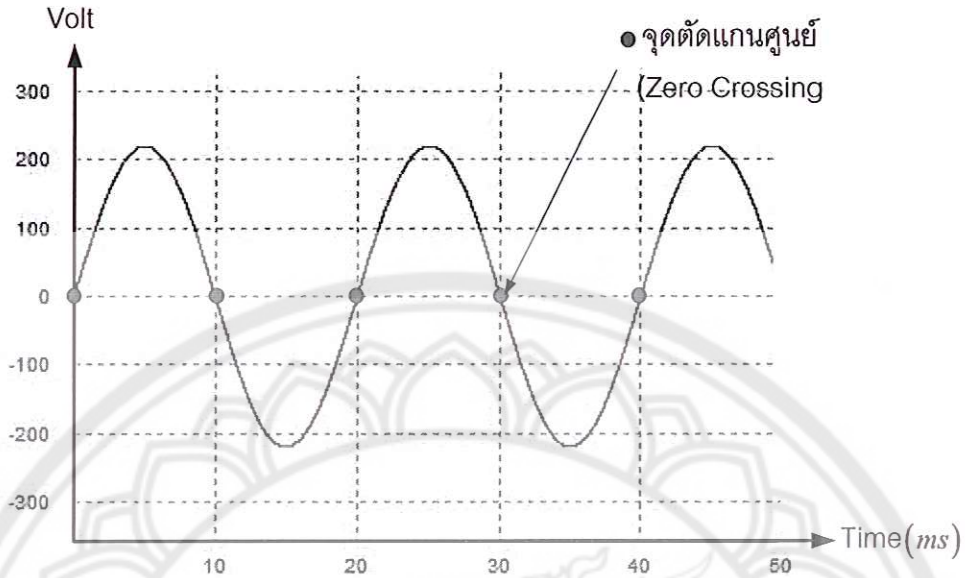
งานวิจัยนี้ได้เลือกโมดูล ET-OPTO AC DIMMER เป็นชุดควบคุมวงจรไทรสเตอร์ ซึ่งในโมดูลจะประกอบด้วยไทรสเตอร์ต่อขนานกัน 2 ตัวแบบกลับขั้วหรือเรียกว่า “ไตรแอก (TRIAC)” ทำให้สามารถควบคุมแรงดันและกระแสได้ทั้งซีกบวกและซีกลบ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมระบบไฟฟ้ากระแสสลับให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยอาศัยหลักการในการควบคุมเฟสของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (สัญญาณ AC 220V) ซึ่งเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (มุมเฟส 360°) ขนาดความถี่ 50Hz สามารถควบคุมมุมเฟสได้ทั้งหมด 11 ระดับ ($0^\circ - 180^\circ$) แบ่งออกเป็นระดับละ 18° ซึ่งในกรณีควบคุมมุมเฟสของตัวเหนี่ยวนำก็จะใช้แค่ 6 ระดับ ($90^\circ - 180^\circ$)



รูปที่ 4.9 โมดูล ET-OPTO AC DIMMER

การควบคุมเฟสจะอาศัยหลักการทำงานของไทรสเตอร์ โดยการควบคุมการจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ ซึ่งการจุดชนวนเกตที่มุมเฟสต่างๆ ของไทรสเตอร์จะมีผลต่อค่าระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสสลับ

โดยเราจะใช้สัญญาณจากจุดที่เรียกว่าจุดตัดแกนศูนย์ (Zero-Crossing point) เป็นจุดอ้างอิงในการทำงานแต่ละคาบสัญญาณ



รูปที่ 4.10 สัญญาณ Zero-Crossing เป็นจุดอ้างอิงในการกระตุ้นเฟส

โดยแต่ละคาบสัญญาณมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{1}{f} \quad (4.5)$$

โดยที่ T คือ คาบสัญญาณมีหน่วยเป็น ms

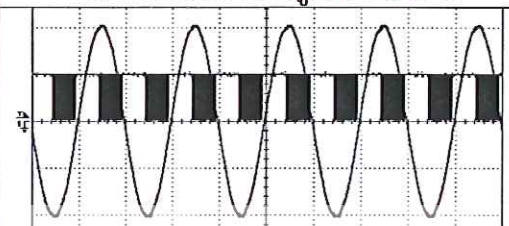
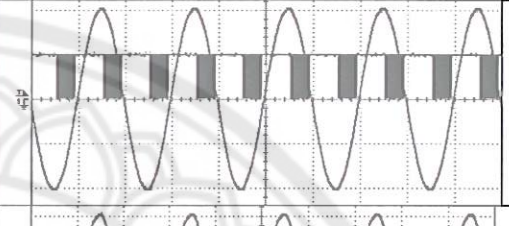
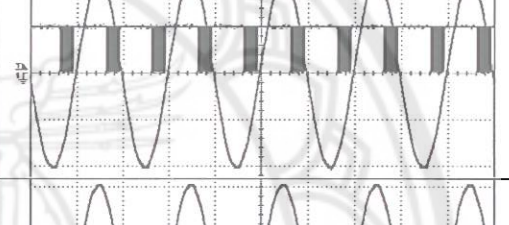
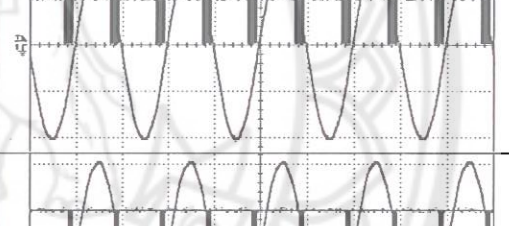
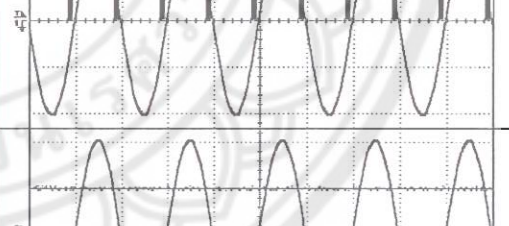
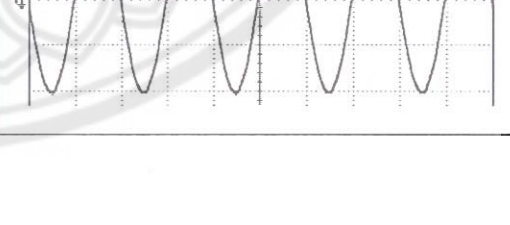
f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งในระบบ 50 Hz จะได้คาบสัญญาณเท่ากับ

$$T = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms}$$

$$T_1 = T_2 = 10 \text{ ms}$$

จากรูปสัญญาณจุดตัดแกนศูนย์จะเกิดขึ้นทุกๆ 10 ms ดังนั้นการควบคุมเฟสของสัญญาณสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการหน่วงเวลาภายใน 0 ถึง 10 ms แล้วส่งพัลส์ไปกระตุ้นขาเกตของวงจรถริสเตอร์ (Ctrl) ซึ่งขนาดของสัญญาณพัลส์ที่ไปกระตุ้นควรมีความกว้างอย่างน้อย 10 μs โดยการจุดชนวนเกตที่ค่าเวลาต่างๆ ภายในเวลา 0 ถึง 10 ms จะมีผลต่อระดับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่เอาต์พุต ซึ่งมีสัดส่วนแปรผันกันโดยตรงกับค่าเวลาดังกล่าว ดังตารางที่ 4.5

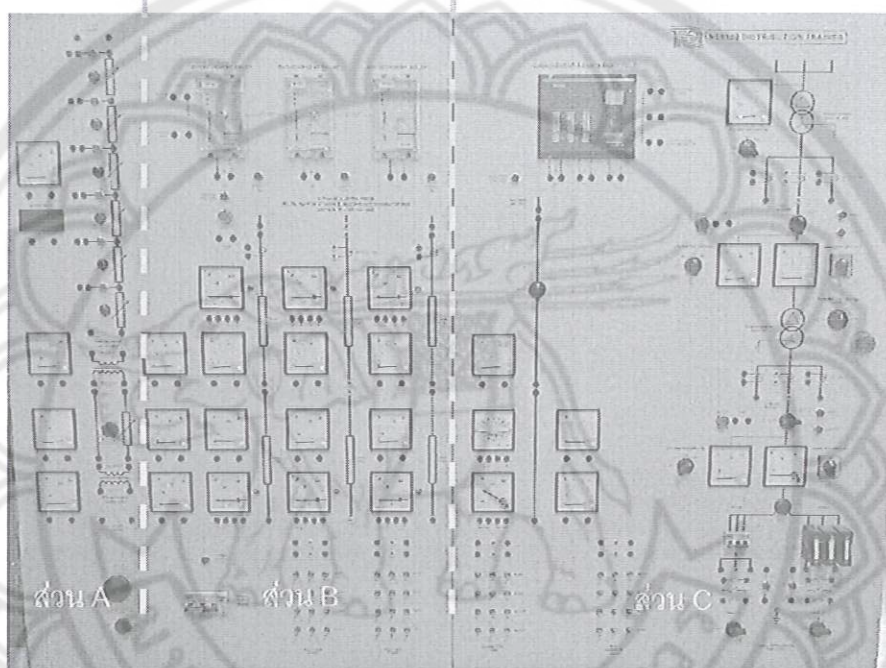
ตารางที่ 4.5 สัญญาณการควบคุมมุมจุดชนวนเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของตัวเหนี่ยวนำ

ช่วงเวลา	มุมเฟสที่ควบคุม สัญญาณ	สัญญาณทริกมุมจุดชนวนเทียบกับสัญญาณ แรงดันของระบบ (รูปคลื่นซายด์)
5 ms	90°	
6 ms	108°	
7 ms	126°	
8 ms	144°	
9 ms	162°	
10 ms	180°	

4.1.3 ตู้ทดสอบระบบจำหน่าย

การจำลองสถานการณ์ในการต่ออุปกรณ์ควบคุมเข้ากับระบบจำหน่าย จะใช้ตู้ทดสอบระบบจำหน่าย TecQuipment รุ่น NE9102 จำลองเป็นระบบจำหน่าย ออกแบบมาให้มีระบบป้องกันฟอลต์ที่ดี สามารถทดสอบการทดลองวงจรในแต่ละส่วนได้อย่างครอบคลุม โดยที่ในแต่ละส่วนจะมีการป้องกันของตัวเอง และสามารถไขแยกกันได้อย่างอิสระ จึงเหมาะมากที่จะนำมาจำลองเป็นระบบจำหน่าย แบ่งส่วนการทดลองออกเป็น ดังรูปที่ 4.11

1. ส่วน A : ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 150 VA 2 ตัว และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ 0-30A มีสวิตช์ที่สามารถเลือกได้ว่าจะใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ ใช้ในการสาธิตหลักการของระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย และระบบเบรคเดียวและระบบวงแหวนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
2. ส่วน B : ประกอบด้วยการส่งจ่าย 3 เฟส พิกัด 240 V_{L-L} จะใช้สาธิตระบบส่งกำลังไฟฟ้า จำลองระบบของสายส่ง การชดเชยแรงดัน ผลกระทบของโหลดต่อแรงดัน ความสูญเสียและประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นต้น
3. ส่วน C : ประกอบไปด้วยหม้อแปลง 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ใช้ในการสาธิตการออกแบบและการใช้แทปหม้อแปลงเพื่อชดเชยแรงดัน เน้นเกี่ยวกับฟอลต์ รวมถึงหลักการของระบบป้องกันฟอลต์



รูปที่ 4.11 ตู้ทดสอบระบบจำหน่าย TecQuipment รุ่น NE9102

4.2 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ในส่วนโปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน

จะแบ่งการออกแบบออกเป็น 2 รูปแบบคือ

- 1) ระบบควบคุมแบบลูปเปิด (Open-loop control system) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมจุดชนวนและสัญญาณไฟฟ้าที่ค่ามุมจุดชนวนแตกต่างกัน, การเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์โมนิกในระบบโพลีโวลตาอิกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมจุดชนวนของ μ SVC ที่ค่าต่างๆ รวมถึงการพิจารณาความไวของแรงดันที่เปลี่ยนแปลง เทียบกับขนาดการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ
- 2) ระบบควบคุมแบบลูปปิด (Closed-loop control system) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าเกิน ณ จุดเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติ โดยที่ระบบควบคุมแรงดันจะคอยตรวจจับสัญญาณแรงดันที่จุดเชื่อมต่อตลอด และปรับค่ามุมจุดชนวนให้เหมาะสมกับระดับแรงดันที่ตรวจจับได้โดยอัตโนมัติ เพื่อสนับสนุนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพให้เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เกิดขึ้น

4.2.1 ระบบควบคุมแบบลูปเปิด

ระบบควบคุมแบบลูปเปิดเป็นระบบที่ค่าเอาต์พุตไม่มีผลต่อการควบคุมขบวนการของระบบ คือไม่มีการนำเอาค่าเอาต์พุตที่ได้กลับมาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ หลักการเขียนโปรแกรมจะพัฒนาโดยใช้ตารางตัดสินใจ (Decision table) ดังตารางที่ 4.6 นั่นก็คือกำหนดค่าเฉพาะเจาะจงให้โปรแกรมทำงาน และไมโคร คอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณพัลส์ไปจุดชนวนวงจรถ่ายแอกตามเงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 4.6 ตารางตัดสินใจ

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ	มุมจุดชนวน
$V \leq 225$	$\alpha = 180^\circ$
$225 < V \leq 230$	$\alpha = 126^\circ$
$230 < V \leq 235$	$\alpha = 108^\circ$
$V > 235$	$\alpha = 90^\circ$

เนื่องจากบอร์ด Arduino Uno รับผิดชอบสัญญาณกระแสตรง ± 5 โวลต์ ในส่วนแรงดันอินพุตของชุดระบบควบคุมจึงจะต้องมีการแปลงระดับแรงดันด้วยหม้อแปลง ลดระดับแรงดันอีกรอบด้วยวงจรถ่ายแอกแรงดัน จากนั้นจึงแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงด้วยวงจรถ่ายแอกแรงดัน เพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรงอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 5 โวลต์ ที่ระดับแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์ แรงดันกระแสตรงจะเท่ากับ 1.26 โวลต์ แล้วจะทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นดิจิตอล เพื่อนำสัดส่วนนี้ไปเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างสัญญาณจุดชนวนไทรสเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าดิจิตอล} = \frac{\text{ค่าดิจิตอลสูงสุด} \times \text{แรงดันกระแสตรงที่เข้ามา}}{\text{แรงดันกระแสตรงสูงสุด}} \quad (4.6)$$

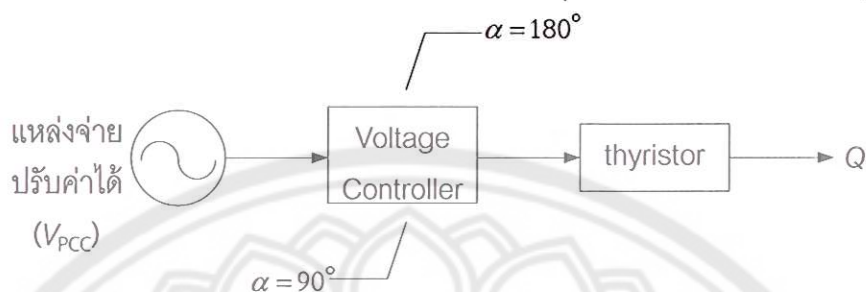
โดยกำหนดให้ค่าดิจิตอลสูงสุดเท่ากับ 1023 ที่ระดับแรงดันกระแสตรงสูงสุด 5 โวลต์ จะได้

$$\text{ค่าดิจิตอล} = \frac{1023}{5} \times \text{แรงดันกระแสตรงที่เข้ามา} \quad (4.7)$$

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (V)	แรงดันกระแสตรง (V)	อนาล็อกเป็นดิจิตอล A/D	ΔV (สัญญาณดิจิตอลที่ระดับแรงดัน V - สัญญาณดิจิตอลที่ระดับแรงดัน 220V)
220	1.26	258	0
225	1.30	266	8
230	1.34	275	17
235	1.38	283	25
240	1.42	292	34

การออกแบบจะอ้างถึงหลักการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต คือจะปรับเปลี่ยนการรับค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือเมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้ (V_{PCC}) มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรงดัน (ΔV) ที่กำหนดไว้ ตัวคอนโทรลเลอร์จะสั่งการให้ไทรสเตอร์ ทริกมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ (Thyristor firing angle, α) เพื่อปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับขนาดแรงดันอินพุตที่เปลี่ยนแปลงในช่วงนั้นๆ



รูปที่ 4.12 ผังการออกแบบระบบควบคุมแบบลูเปิด

โดยที่ค่า rms (root mean square) ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ มีค่าเท่ากับ

$$i_{rms} = \frac{V_{PCC}}{X_L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) \quad (4.8)$$

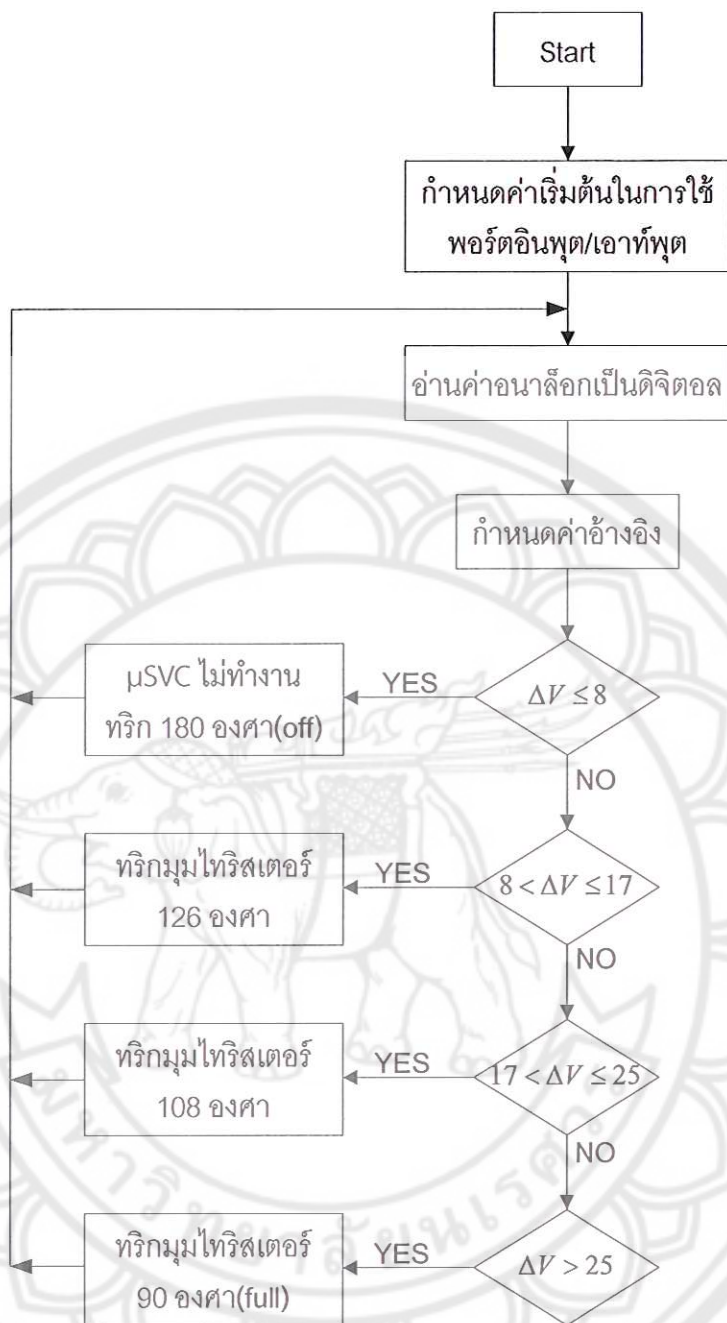
ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพในตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิต สามารถหาได้จาก

$$Q = I_{rms}^2 X_L \quad (4.9)$$

ดังนั้นจาก (4.8) และ (4.9) กำลังไฟฟ้าจินตภาพจะมีค่าเท่ากับ

$$Q = \frac{(V_{PCC})^2}{X_L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t))^2 \quad (4.10)$$

เริ่มต้นโปรแกรม จะกำหนดค่าเริ่มต้นการใช้งานพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตก่อน แล้วจะทำการแปลงค่าแรงดันอินพุตอนาล็อกเป็นแรงดันอินพุตค่าดิจิทัล นำมาลบกับแรงดันดิจิทัลที่แรงดันอ้างอิง 220 โวลต์ เพื่อแปลงเป็นค่า ΔV หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทริกมุมทำงานของไทรสเตอร์ตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในแผนผังลำดับการทำงานในรูปที่ 4.13



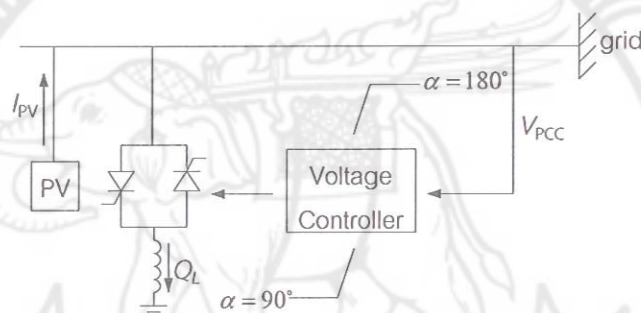
รูปที่ 4.13 แผนผังลำดับการทำงานของระบบควบคุมแบบเปิด

4.2.2 ระบบควบคุมแบบลูปปิด

ระบบควบคุมแบบลูปปิด เป็นระบบที่จะนำสัญญาณจากเอาต์พุตของระบบป้อนกลับเป็นสัญญาณอินพุตใหม่ที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งในกรณีนี้คือสัญญาณแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ เพื่อป้องกันระดับแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่าที่ยอมรับได้ ซึ่งสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบจะเป็นอินพุตใหม่เสมอ ซึ่งจะสามารถแบ่งการออกแบบระบบควบคุมออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ไม่นับคิดผลกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิก กับกรณีที่คิดผลกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิก

1.) ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่ไม่นับคิดผลกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิก

เป็นระบบควบคุมแรงดันที่ตัว μSVC จะทำงานเมื่อแรงดันที่เชื่อมต่อมีค่าเกินกว่าที่ตั้งไว้ โดยที่ไม่สนใจว่ามีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากระบบโฟโตโวลตาอิกหรือไม่ ดังผังการออกแบบในรูปที่ 4.14 จากวงจรพบว่าเมื่อมีการตรวจจับค่าแรงดันอินพุตที่จุดเชื่อมต่อ (V_{PCC}) ค่าๆหนึ่งแล้ว คอนโทรลเลอร์จะพิจารณาและสั่งการให้ไทรสเตอร์ ทริกมุมทำงานของไทรสเตอร์ (α) ให้สอดคล้องกับระดับแรงดันที่ได้ตรวจจับมาในขณะนั้น เพื่อปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้สอดคล้องกับขนาดแรงดัน ทำให้แรงดันอินพุตเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแรงดันอินพุตใหม่ จากนั้นแรงดันอินพุตใหม่ก็จะเป็นแรงดันอินพุตป้อนให้กับระบบต่อไป



รูปที่ 4.14 ผังการออกแบบระบบควบคุมแบบลูปปิด

เนื่องจากชุดควบคุมวงจรไทรสเตอร์สามารถควบคุมมุมเฟสของตัวเหนี่ยวนำได้แค่ 6 ระดับ ($90^\circ - 180^\circ$) ระดับละ 18° วัดค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของมุมในการทริกและค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ

มุมในการทริก	ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ (%)
90°	100
108°	60
126°	28
144°	10
162°	0.02
180°	0

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าในช่วงมุม $126^\circ - 180^\circ$ ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ได้นั้นมีค่าน้อยมาก การออกแบบโปรแกรมจึงจะแบ่งการทำงานเป็น 3 ช่วงหลักๆ คือ

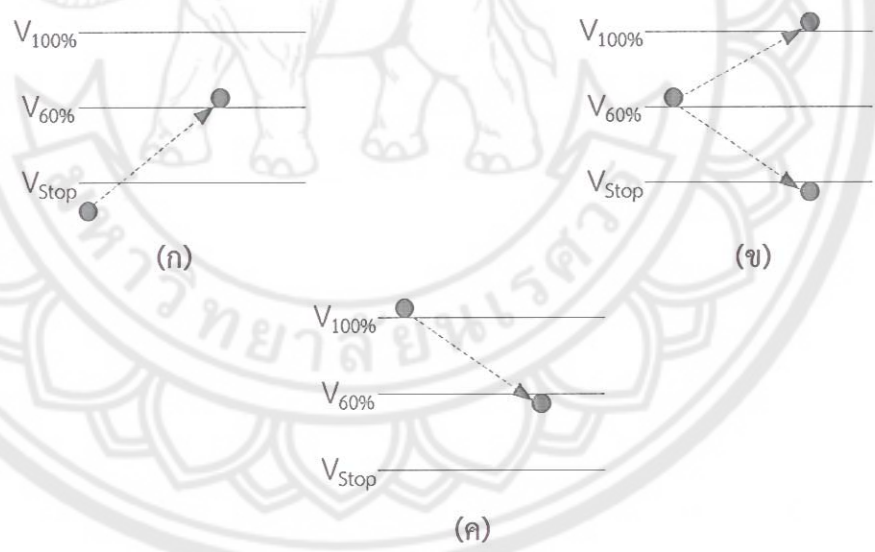
1. V_{stop} จะให้ทริกที่ 180° μSVC ไม่ทำงาน
2. $V_{60\%}$ จะให้ทริกที่ 108° μSVC ทำงานที่ 60%
3. $V_{100\%}$ จะให้ทริกที่ 90° μSVC ทำงานที่ 100%

ลำดับการทำงานของระบบควบคุมวงจรถริสเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมตามเงื่อนไขที่กำหนด เริ่มต้นโปรแกรมจะกำหนดให้รับค่าแรงดันเข้ามา ซึ่งแรงดันที่รับเข้ามาจะเป็นแรงดันที่ควบคุมแล้ว โดยที่

เงื่อนไขที่ 1 เมื่อแรงดันอยู่ในช่วงต่ำกว่า $V_{60\%}$ ระบบควบคุมแรงดันจะยังไม่ทำงาน (มุมจุดชนวนเท่ากับ 180°) โดยคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทรินสเตอร์ทริกที่ 108° เพื่อให้ μSVC ทำงานที่ 60% ก็ต่อเมื่อแรงดันที่รับเข้ามาเกินค่า $V_{60\%}$ โดยยังไม่สนใจค่า V_{stop} ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) จากนั้นแรงดันก็จะเข้าเงื่อนไขในข้อที่ 2

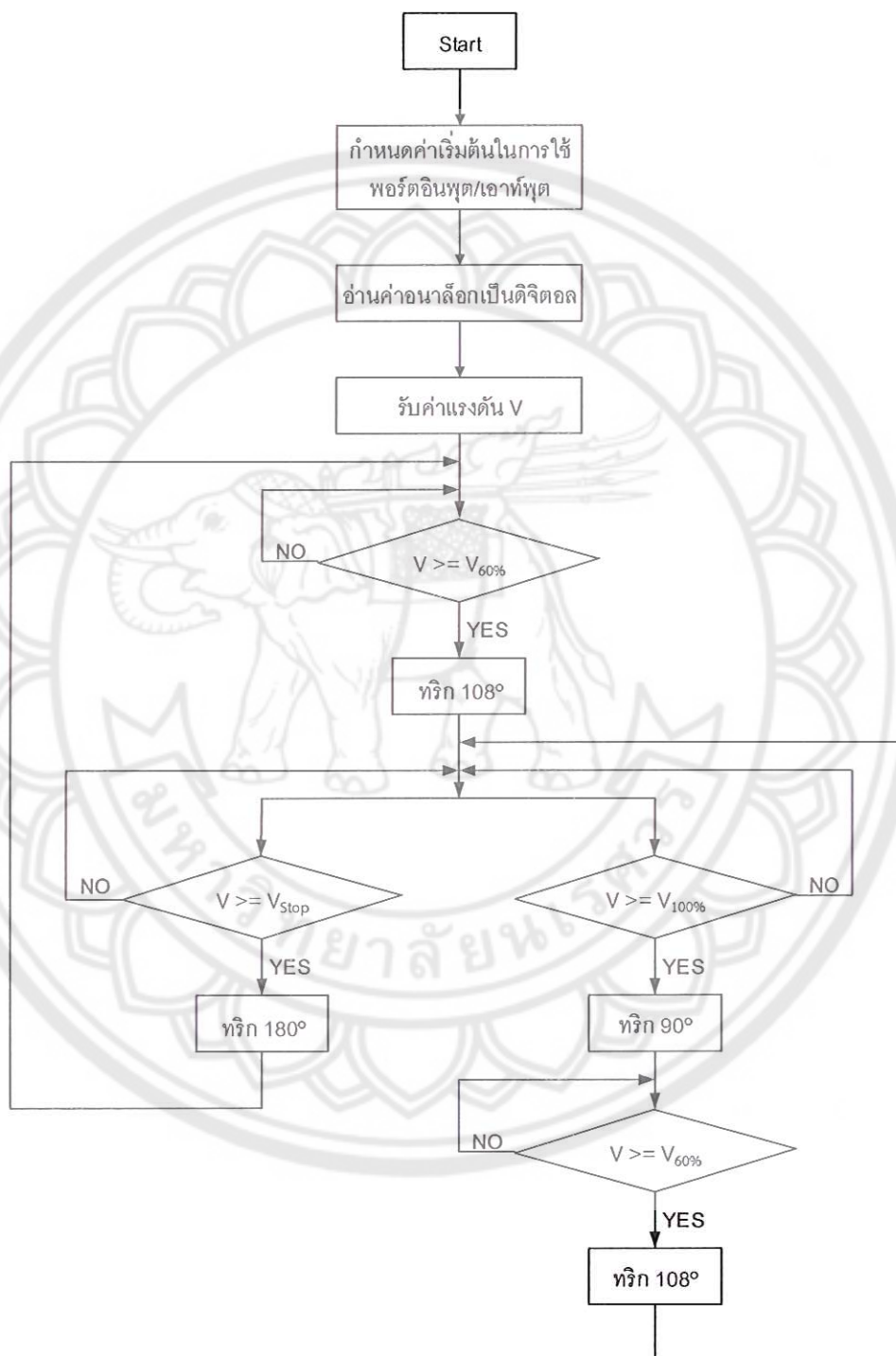
เงื่อนไขที่ 2 ขณะที่ μSVC ทำงานที่ระดับ 60 % แล้วแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงระหว่าง V_{stop} ถึง $V_{100\%}$ ตัว μSVC จะยังคงรักษาระดับการชดเชยที่ 60 % ต่อไป โดยที่ตัว μSVC จะมีการเปลี่ยนขนาดการชดเชยก็ต่อเมื่อ ระดับแรงดันจะขึ้นไปเกินแรงดันช่วง $V_{100\%}$ หรือลดต่ำกว่า V_{stop} ก็ได้ จึงแยกเงื่อนไขการควบคุมออกเป็น 2 เงื่อนไข ดังรูปที่ 4.15 (ข) กล่าวคือถ้าแรงดันอยู่ในช่วงระหว่าง V_{stop} ถึง $V_{100\%}$ แล้วขึ้นไปเกิน $V_{100\%}$ คอนโทรลเลอร์สั่งให้ทรินสเตอร์ทริกที่ 100% แล้วไปทำงานที่เงื่อนไข 3 แต่ถ้าแรงดันอยู่ในช่วงระหว่าง V_{stop} ถึง $V_{100\%}$ แล้วลดต่ำกว่า V_{stop} คอนโทรลเลอร์สั่งให้ทรินสเตอร์ทริกที่ 0% แล้วกลับไปทำงานที่เงื่อนไขที่ 1 ใหม่

เงื่อนไขที่ 3 เมื่อแรงดันอยู่ในช่วงมากกว่า $V_{100\%}$ คอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทรินสเตอร์ทริกที่ 60% ก็ต่อเมื่อแรงดันที่รับเข้ามาต่ำกว่า $V_{60\%}$ ดังรูปที่ 4.15 (ค) จากนั้นก็จะกลับไปทำงานที่เงื่อนไขที่ 2 ใหม่



รูปที่ 4.15 หลักการออกแบบโปรแกรมระบบควบคุมแบบปิด

เริ่มต้นโปรแกรม จะกำหนดค่าเริ่มต้นการใช้งานพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตก่อน แล้วจะทำการแปลงค่าแรงดันอินพุตอนาล็อกเป็นแรงดันอินพุตค่าดิจิทัล เมื่อรับค่าแรงดันอินพุตดิจิทัลแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทริกมุมทำงานของไทรสเตอร์ตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในแผนผังลำดับการทำงานในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แผนผังลำดับการทำงานระบบควบคุมแบบปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก

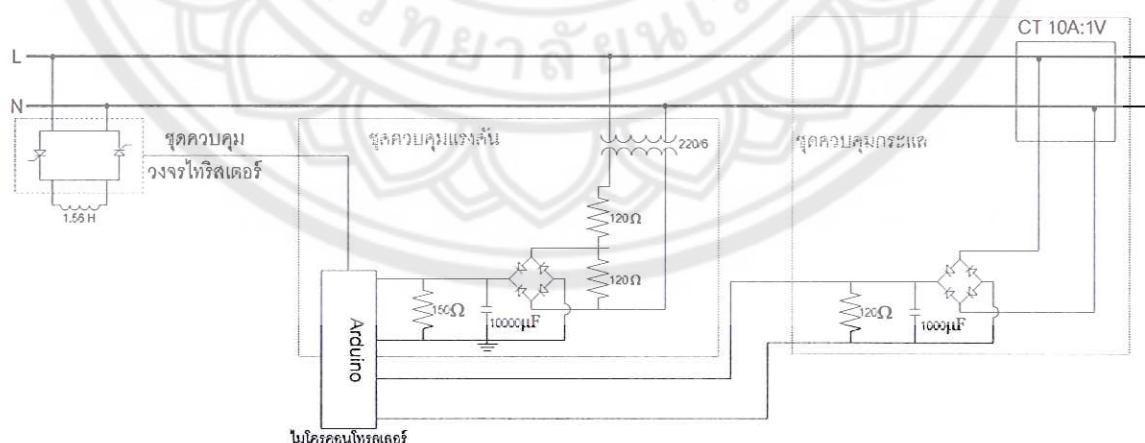
2.) ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระทบของระบบโฟโตโวลตาอิก

สำหรับระบบควบคุมแบบลูปปิดชนิดนี้ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กจะทำงานก็ต่อเมื่อระบบโฟโตโวลตาอิกมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาที่ระบบมากกว่าค่าที่กำหนดเท่านั้น เพื่อป้องกันไม่ให้ตัว μ SVC ทำการควบคุมแรงดันเกินที่จุดเชื่อมต่อ เนื่องจากสาเหตุอื่นที่ไม่ใช่สาเหตุอันเกิดจากการผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกที่มากเกินไป ซึ่งระบบควบคุมจะสามารถตรวจจับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ออกจากระบบโฟโตโวลตาอิกด้วยการตรวจจับสัญญาณกระแสที่ไหลออกจากระบบโฟโตโวลตาอิกโดยใช้หม้อแปลงกระแส ในงานวิจัยนี้กำหนดให้กระแสของระบบโฟโตโวลตาอิกขั้นต่ำ (I_{th}) มีค่าเท่ากับ 50% (0.7A) ถ้า I_{th} มีค่าต่ำกว่า 50% ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กก็จะไม่ทำงาน และจะทำงานเมื่อ I_{th} มีค่ามากกว่า 50%

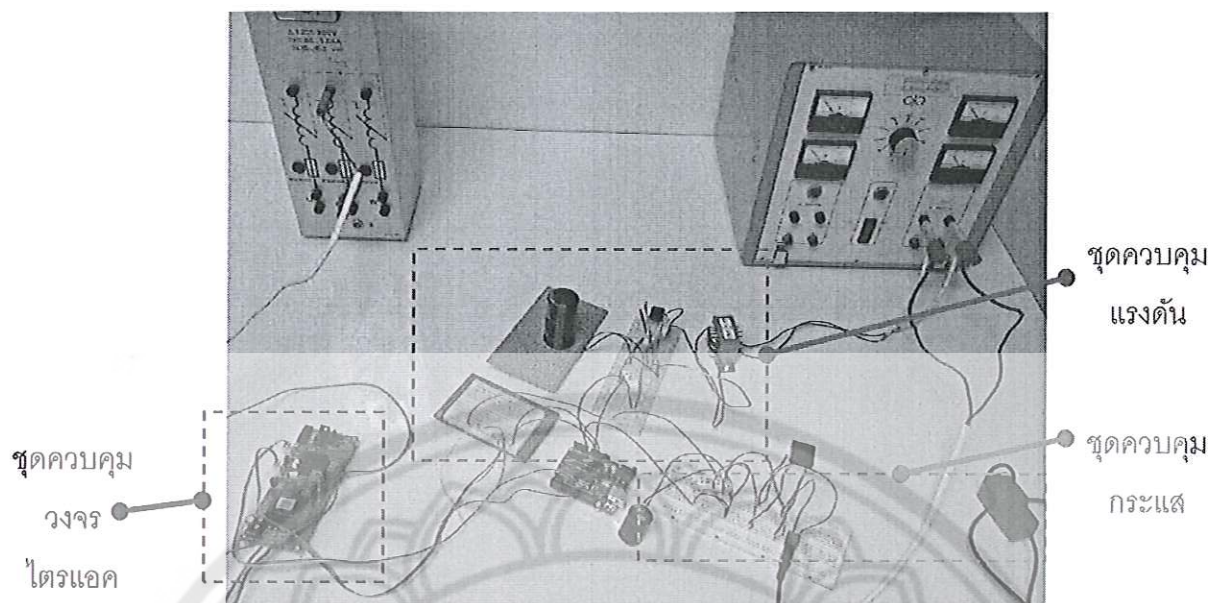
ส่วนในการออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้ากรณีที่เกิดผลกระทบของระบบโฟโตโวลตาอิก จะเพิ่มชุดควบคุมกระแสอีก 1 ชุด ประกอบด้วยวงจรการทำงานพื้นฐานดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมภาพ 4.17 โดยหม้อแปลงกระแสจะตรวจจับปริมาณกระแสที่ไหลออกจากระบบโฟโตโวลตาอิกแล้วแปลงออกมาอยู่ในรูปสัญญาณแรงดันกระแสสลับ จากนั้นจึงต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจ่ายเป็นสัญญาณอินพุตให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในส่วนวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่เพิ่มเข้ามาในระบบควบคุมแรงดัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ส่วนในรูปที่ 4.19 แสดงวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่ได้พัฒนาเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้กับชุดทดสอบจริง



รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมกระแส



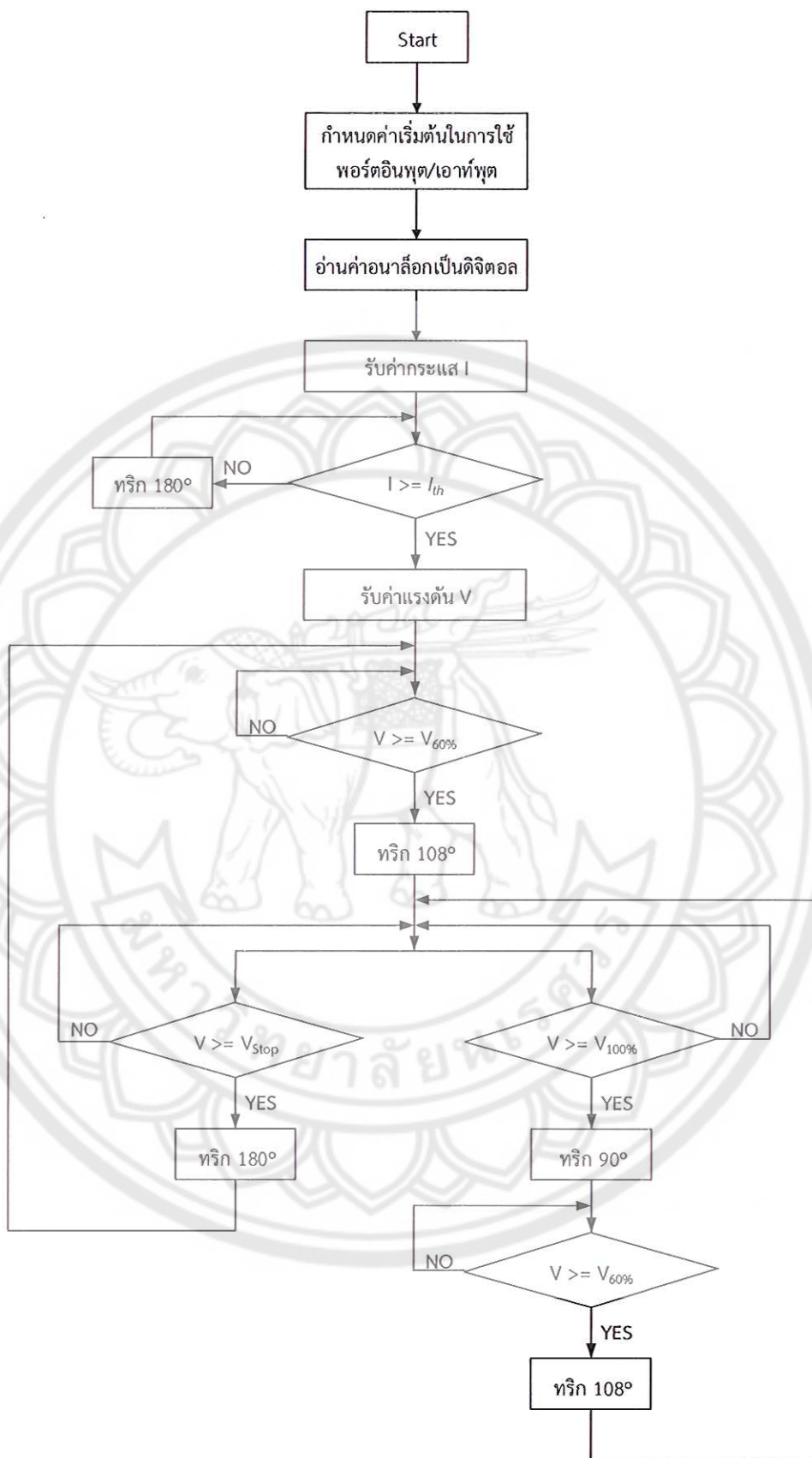
รูปที่ 4.18 ภาพรวมของระบบควบคุมกรณีที่เกิดผลกระทบของระบบโฟโตโวลตาอิก



รูปที่ 4.19 อุปกรณ์ในระบบควบคุมกรณีที่เกิดผลกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิก

การออกแบบโปรแกรมและแผนผังลำดับการทำงานจะคล้ายกับกรณีที่ไม่เกิดผลกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิก เพียงแต่จะเพิ่มในส่วนการคิดผลกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิก โดยที่ชุดควบคุมกระแสที่เพิ่มเติม นั้น จะเป็นตัวกำหนดและสั่งการชุดควบคุมวงจรวจรไทรสเตอร์ทำงานหรือไม่ทำงาน โดยกำหนดว่าถ้ามีกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิกเกินกระแสขั้นต่ำ (I_{th}) จึงจะให้ชุดควบคุมวงจรวจรไทรสเตอร์ทำงาน เพื่อเป็นการยืนยันว่าการควบคุมแรงดันเกินที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากระบบโฟโตโวลตาอิกจริง

โดยเริ่มต้นโปรแกรม จะกำหนดค่าเริ่มต้นการใช้งานพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตก่อน จากนั้นจะทำการแปลงค่าแรงดันและกระแสอินพุตอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัล ทำการเช็คกระแสอินพุตก่อนที่จะสั่งให้ทริกไทรสเตอร์ เพื่อเช็คว่ามีการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิกหรือไม่ โดยที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กจะทำงานก็ต่อเมื่อกระแสของระบบโฟโตโวลตาอิกมีค่ามากกว่ากระแสขั้นต่ำ (I_{th}) ดังแสดงในแผนผังลำดับการทำงานในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แผนผังลำดับการทำงานระบบควบคุมแบบปิดที่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก

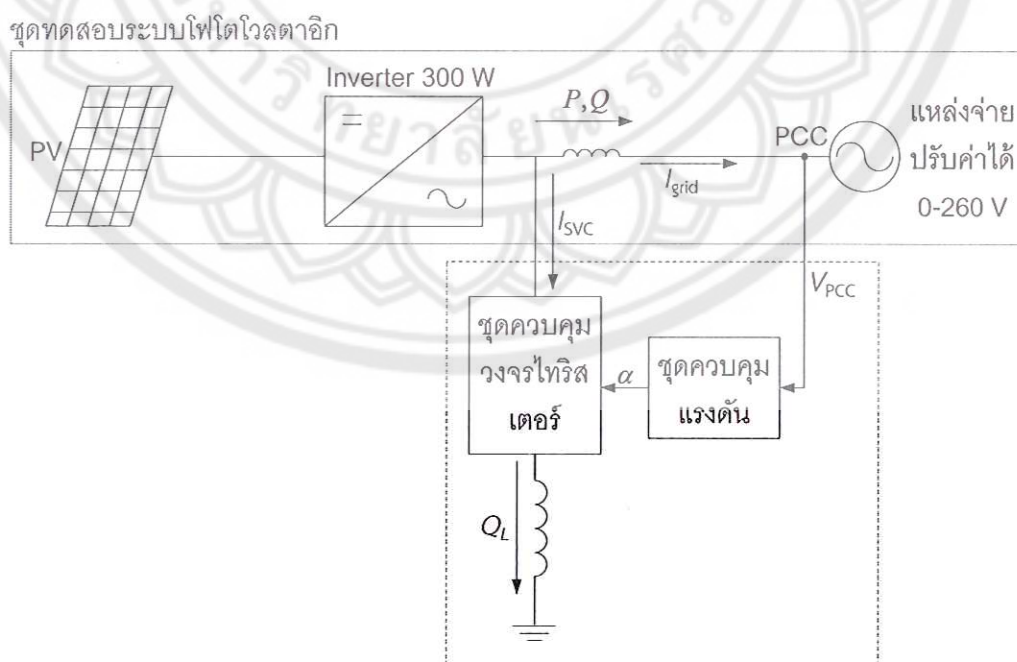
บทที่ 5

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบและผลการทดสอบการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Micro static var compensator, μ SVC) เมื่อใช้งานจริง โดยทำการทดสอบตัว μ SVC กับชุดทดสอบที่จำลองการเชื่อมต่อของระบบโฟโตโวลตาอิกกับระบบไฟฟ้า และกับชุดทดสอบที่จำลองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบจำหน่ายบนตู้ทดสอบระบบจำหน่าย ซึ่งการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือการทดสอบระบบแบบลูปเปิด (Open-loop system) และการทดสอบระบบแบบลูปปิด (Closed-loop system)

5.1 การต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กกับชุดทดสอบระบบโฟโตโวลตาอิก

เป็นชุดทดสอบสำหรับการควบคุมแบบลูปเปิด ซึ่งจะจำลองการเชื่อมต่อระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 1 เฟส โดยการต่อเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายปรับค่าได้ เพื่อจำลองการเกิดสถานะแรงดันเกินขึ้นในระบบ (ด้วยการปรับระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อชุดทดสอบในรูปที่ 4.2 และ 4.7 เข้าด้วยกัน (ต่อขนานกัน) นั่นเอง โดยที่กระแส ณ จุดเชื่อมต่อ (I_{grid}) คือกระแสที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์ ต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก ขนานเข้ากับชุดทดสอบระบบโฟโตโวลตาอิก โดยที่ (V_{PCC}) คือแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้ ซึ่งจะเป็แรงดันอินพุทให้ชุดควบคุมแรงดันเพื่อสั่งให้ทริกมุมไทรสเตอร์ (α) ซึ่งจะทำให้มีการไหลของกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L)

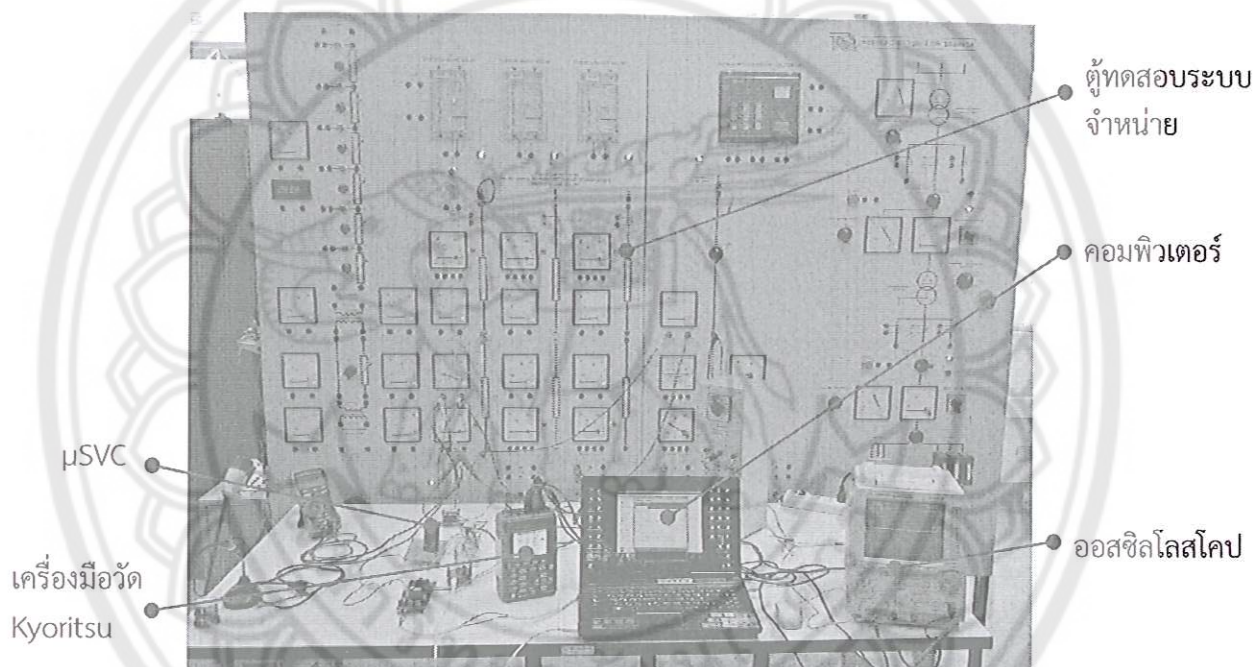


ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก

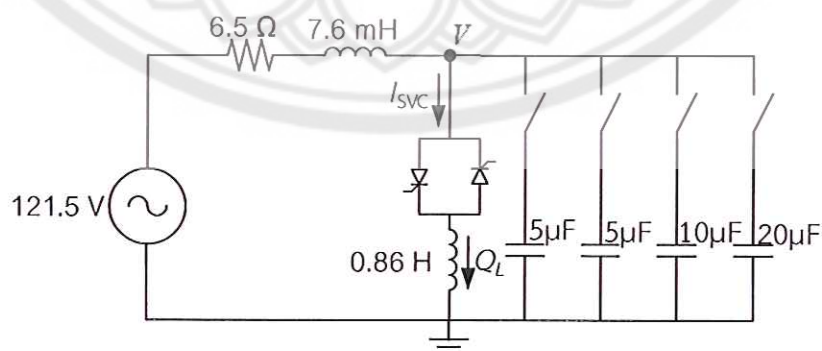
รูปที่ 5.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กต่อเข้ากับชุดทดสอบระบบโฟโตโวลตาอิก

5.2 การต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กกับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย

การต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กเข้ากับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย สามารถแสดงดังรูปที่ 5.2 โดยแหล่งจ่ายของแรงดันตู้ทดสอบระบบจำหน่ายมีค่าเท่ากับ 121.5 โวลต์ อิมพีแดนซ์ของสายมีค่าเท่ากับ $6.5+j2.4$ โอห์ม ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กจะเชื่อมต่อที่บริเวณปลายสาย ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยที่มีตัวเก็บประจุจำนวน 4 ตัว (ซึ่งมีขนาด $5\mu\text{F}$ จำนวน 2 ตัว และขนาด $10\mu\text{F}$ และ $20\mu\text{F}$ อยู่อย่างละตัว) สามารถต่อขนานเข้ากับระบบที่ตำแหน่งปลายได้ เพิ่มสำหรับสร้างกรณีศึกษาการเกิดแรงดันเกินขึ้นที่จุดเชื่อมต่อกับตัว μSVC โดยที่ V คือแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ, I_{SVC} คือกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก และ Q_L คือกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้กับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย



รูปที่ 5.3 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กต่อเข้ากับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย

5.3 การทดสอบระบบแบบรูปเปิด

ทดสอบระบบแบบรูปเปิดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กเมื่อใช้งานจริงกับชุดทดสอบที่จำลองการเชื่อมต่อของระบบโฟโตโวลตาอิกและตู้ทดสอบระบบจำหน่าย เป็นการทดสอบเพื่อดูผลตอบสนองที่อุปกรณ์ μ SVC เมื่อแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีการวัดค่ากระแส มุมจลิตชนวน กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่เปลี่ยนแปลง รวมถึงพิจารณาในเรื่องความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิก

5.3.1 การทดสอบกับชุดทดสอบระบบโฟโตโวลตาอิก

แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ คือปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้ เพื่อดูผลของการทริกของไทรสเตอร์ กระแสและกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก และดูผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิกกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ ที่เกิดจากการทริกมุมของไทรสเตอร์

1) ปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้

ทำการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ (V) 0 – 260 โวลต์ โดยแบ่งระดับแรงดันออกเป็น 6 ช่วง วัดค่ากระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}), กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L) และมุมที่ไทรสเตอร์ทริก (α) ในระดับแรงดันช่วงต่างๆ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1 รวมถึงวัดรูปคลื่นกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) จากการทริกมุมไทรสเตอร์

ตารางที่ 5.1 ทดสอบปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้

แรงดันจากแหล่งจ่าย(โวลต์)	I_{SVC} (A)	Q_L (Var)	มุมทริกไทรสเตอร์ ($^\circ$)
$V \leq 225$	0	0	180° (off)
$225 < V \leq 230$	0.12	27	126°
$230 < V \leq 235$	0.27	63	108°
$V > 235$	0.46	109	90°

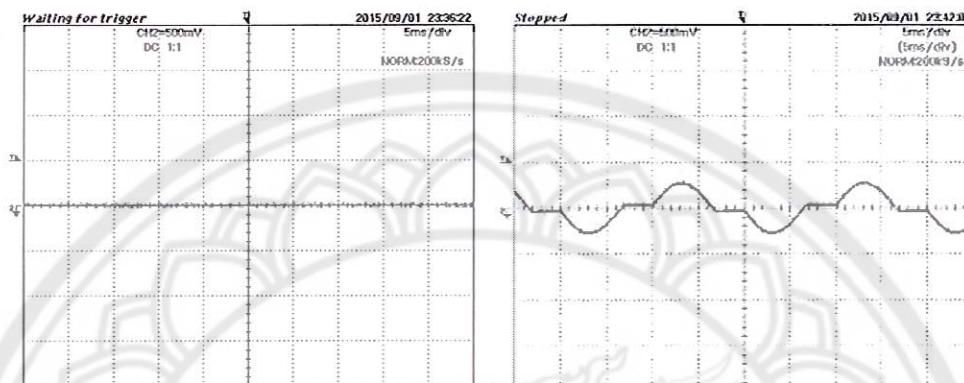
ที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 225 โวลต์ จะเห็นได้ว่าไทรสเตอร์ทริกที่ 180° หรือตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กไม่ทำงานนั่นเอง ทำให้ไม่มีการไหลของกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L)

ที่ระดับแรงดัน 225 - 230 โวลต์ ไทรสเตอร์ทริกที่ 126° ทำให้ค่ากระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L) มีค่าเท่ากับ 0.12 A และ 27 Var ตามลำดับ

ที่ระดับแรงดัน 230 - 235 โวลต์ ไทรสเตอร์ทริกที่ 108° ทำให้ค่ากระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L) มีค่าเท่ากับ 0.27 A และ 63 Var ตามลำดับ

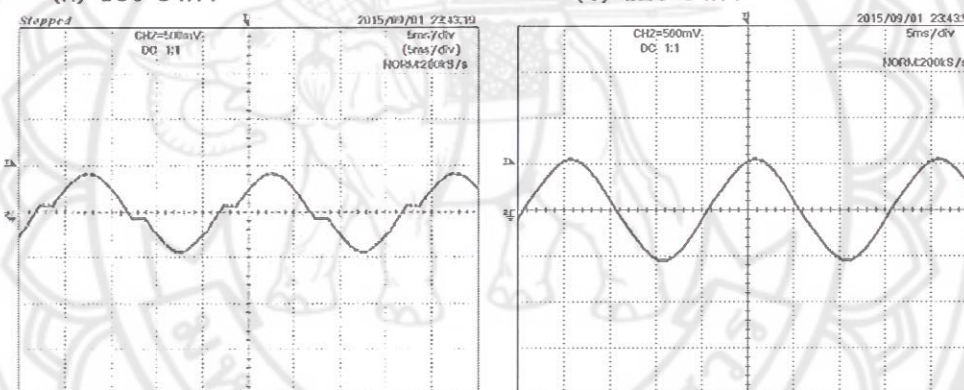
ที่ระดับแรงดันมากกว่า 235 โวลต์ ไทรสเตอร์ทริกที่ 90° ทำให้ค่ากระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L) มีค่าเท่ากับ 0.46 A และ 109 Var ตามลำดับ

จากผลการทดสอบที่ได้ จะเห็นได้ว่าไทรสเตอร์จะทรูกรมตามค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลง ที่มุมทรูกรไทรสเตอร์ 90° จะทำให้การไหลของกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L) มีค่ามากที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อมุมทรูกรไทรสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จนมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อมุมทรูกรไทรสเตอร์เท่ากับ 180° ความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC}) กับมุมทรูกรไทรสเตอร์ (α) แสดงดังรูปที่ 5.4



(ก) 180 องศา

(ข) 126 องศา



(ค) 108 องศา

(ง) 90 องศา

รูปที่ 5.4 รูปคลื่นกระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{SVC})

2) ผลของมุมทริกไทรสเตอร์กับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ

จากการทดสอบปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ ส่งผลให้ไทรสเตอร์จะทรูกรมตามค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลง วัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ (I_{grid}) แต่ละอันดับ จากการทรูกรมไทรสเตอร์ที่ค่าต่างๆ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 มุมทริกไทรสเตอร์กับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ แต่ละอันดับ

ลำดับฮาร์มอนิก	TCR ทริก	180°	126°	108°	90°
	มุมเฟส (off)				
3		8.5%	9.1%	8.3%	8.8%
5		3.5%	4.3%	3.8%	3.4%
7		5.7%	5.4%	5.0%	5.2%
9		4.8%	4.8%	5.3%	4.9%
11		2.5%	1.9%	1.7%	2.3%



รูปที่ 5.5 กราฟมุมทริกไทรสเตอร์กับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ แต่ละอันดับ

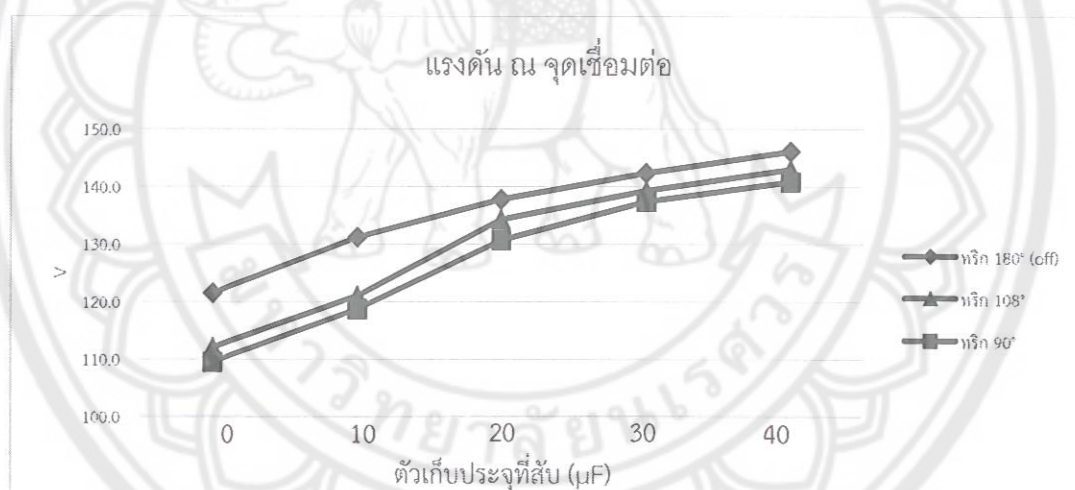
จากกราฟรูปที่ 5.5 จะเห็นว่า การต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (μ SVC) เข้ากับชุดทดสอบที่จำลองการเชื่อมต่อของระบบโตะโวลตาอีกไม่ได้ส่งผลให้มีฮาร์มอนิกของกระแส (I_{grid}) ที่ไหลเข้าระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และถึงแม้จะทำงานในสภาวะทรูกรมไทรสเตอร์มุมต่างๆ ก็ไม่ได้ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อ (I_{grid}) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ

5.3.2 การทดสอบกับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย

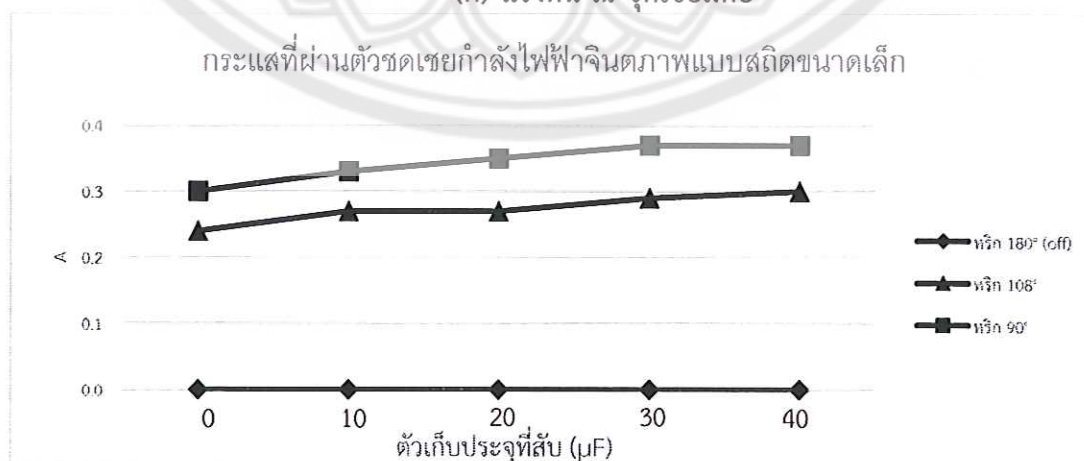
ทดสอบระบบแบบลูปปิด โดยการสร้างแรงดันเกินจากการสับตัวเก็บประจุเข้าในระบบ เพื่อดูผลของแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ (V) กระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (I_{svc}) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ถูกดูดกลืนเข้ามาที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Q_L) ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการควบคุมมุมทริก โดยเครื่องมือที่ใช้วัดจะใช้เป็น KYORITSU kew power quality analyzer รุ่น KEW6310

ตารางที่ 5.3 ผลของ (V), (I_{svc}) และ (Q_L) เมื่อมีการควบคุมมุมทริก

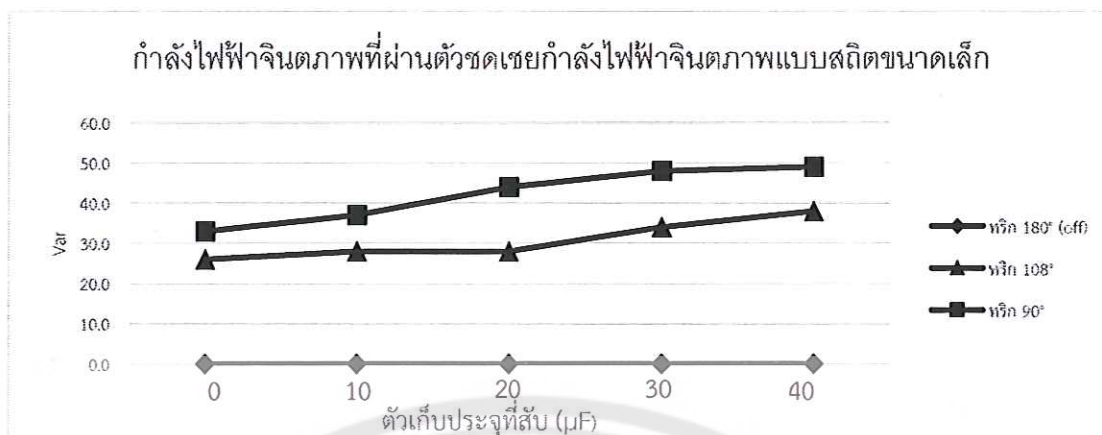
ตัวเก็บประจุที่สับ (μF)	ทริก 180° (ไม่ทำงาน)			ทริก 108°				ทริก 90°			
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Q (Var)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Q (Var)	$\Delta V/\Delta Q$ (V/Var)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Q (Var)	$\Delta V/\Delta Q$ (V/Var)
0	121.5	0.00	0	112.0	0.24	26	0.3654	109.5	0.30	33	0.3636
10	131.2	0.00	0	121.0	0.27	28	0.3643	118.7	0.33	37	0.3378
20	137.8	0.00	0	134.3	0.27	28	0.1250	130.7	0.35	44	0.1614
30	142.4	0.00	0	139.3	0.29	34	0.0912	137.4	0.37	48	0.1042
40	146.1	0.00	0	143.0	0.30	38	0.0816	140.8	0.37	49	0.1082



(ก) แรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ



(ข) กระแสที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก



(ค) กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ผ่านตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก

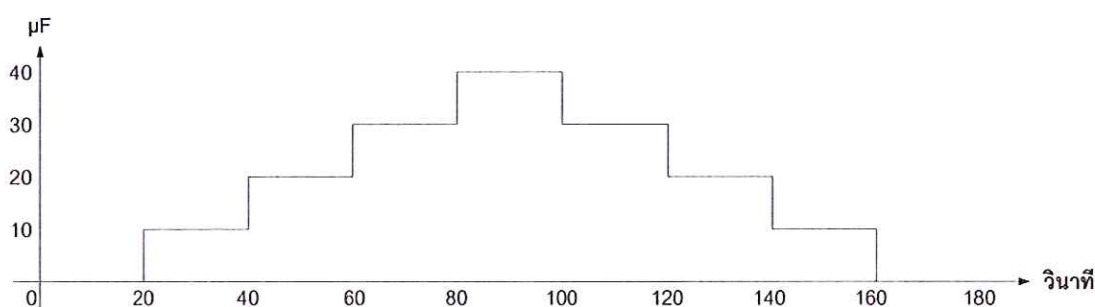
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบผลของ (V) , (I_{sVC}) และ (Q_L) เมื่อมีการควบคุมมุมทริก

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นได้ว่าแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงเมื่อมีการทริกมุมจุดชนวน ไทริสเตอร์ให้มีค่าลดลงจาก 180° (มีการดูกลืนค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ) จากผลการทดสอบที่ได้ สามารถพิจารณาว่าความไวของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Voltage sensitivity, $\Delta V/\Delta Q$) ที่แรงดันปกติ 121.5 โวลต์ ได้เท่ากับ 0.36 โดยประมาณ เมื่อทริกมุมจุดชนวน ไทริสเตอร์ 90° จะมีการดูกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพเท่ากับ 33 Var ส่งผลให้สามารถลดขนาดของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ได้ประมาณ 12 โวลต์

ดังนั้นเราสามารถที่จะประเมินค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้ ถ้ารู้ค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ ($\Delta V/\Delta Q$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจินตภาพ ซึ่งในทางกลับกัน สามารถใช้ค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ เพื่อประเมินปริมาณกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้อีกด้วย

5.4 การทดสอบระบบแบบลูปปิด

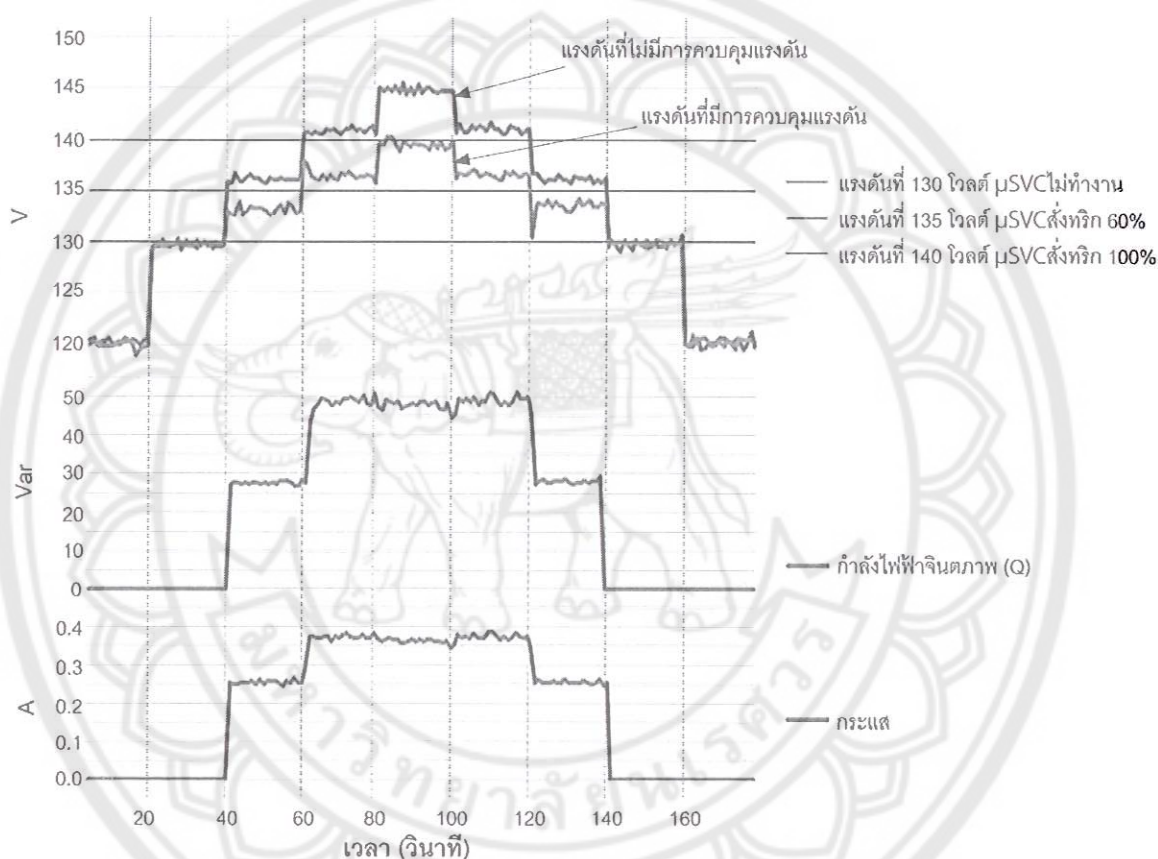
การทดสอบระบบแบบลูปปิดจะทดสอบเฉพาะกับและผู้ทดสอบระบบจำหน่าย เพื่อทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก ทำการสับตัวเก็บประจุเข้าในระบบเพื่อสร้างกรณีการเกิดแรงดันเกิน เริ่มต้นคือไม่สับตัวเก็บประจุเป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นเริ่มสับตัวเก็บประจุเพิ่มทุกๆ $10\mu\text{F}$ ในทุกๆ 20 วินาที สับตัวเก็บประจุจนถึง $40\mu\text{F}$ เป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นลดการสับตัวเก็บประจุลงทุกๆ $10\mu\text{F}$ ในทุกๆ 20 วินาที จนกลับมาสถานะเริ่มต้นคือไม่สับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 5.7 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ คือระบบควบคุมแบบลูปปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก และระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก



รูปที่ 5.7 การสับตัวเก็บประจุในการทดสอบ

5.4.1 ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก

ระบบควบคุมจะทำงานตามการออกแบบในหัวข้อที่ 4.2.2 (หัวข้อระบบควบคุมแบบลูปปิด) โดยที่ออกแบบขนาดตัวเหนี่ยวนำ ให้มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ไม่เกิน 0.95 ณ ระดับแรงดัน 120 V และการทำงานของระบบควบคุมแรงดันจะกำหนดให้ที่ 130 โวลต์ให้ μ SVC ไม่ทำงาน, ที่ 135 โวลต์ให้ μ SVC ทำงานที่ระดับ 60% และที่ 140 โวลต์สั่งให้ μ SVC ทำงานที่ระดับ 100% ตามลำดับ จากการทดสอบ สามารถพล็อตการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ เปรียบเทียบกรณีไม่มีการควบคุมแรงดันกับกรณีมีระบบควบคุมแรงดัน, ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพที่รับเข้ามาในระบบ μ SVC จากการควบคุมแรงดัน และปริมาณกระแสที่ไหลเข้ามาในระบบ μ SVC แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ผลของระบบควบคุมแบบลูปปิดที่ไม่คิดผลกระแสของระบบไฟโตโวลตาอิก

ที่เวลา 0 – 40 วินาที แรงดันยังมีค่าไม่เกิน 135 โวลต์ จึงยังไม่มีคำสั่งให้ทรินสเตอร์ทริก ส่งผลให้ในช่วงเวลานี้จะไม่มีกระแสของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสในระบบ

ที่เวลา 40 – 60 วินาที ในระบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดันจะพบว่าระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อจะมีค่าเกิน 135 โวลต์ ซึ่งแรงดันระดับนี้ระบบที่มีการควบคุมแรงดันจะเริ่มทำงาน โดยคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทรินสเตอร์ทริก 108° ทำให้ μ SVC ทำงานที่ 60% ทำให้แรงดันที่มีการควบคุมแรงดันลดลงเหลือ 133 โวลต์ และตัว μ SVC จะทำงานที่ระดับ 60 % คงที่ไปเรื่อยๆ (จนกว่าแรงดันจะต่ำกว่า 130 โวลต์ หรือ สูงกว่า 140 โวลต์) ส่งผลให้ในช่วงเวลานี้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสมีค่าเท่ากับ 28 Var และ 0.25 แอมแปร์ตามลำดับ

ที่เวลา 60 – 80 วินาที ในระบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดันจะพบว่าระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อจะมีค่าเกิน 140 โวลต์ เพราะฉะนั้นระบบที่มีการควบคุมแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงการทำงาน โดยที่ตัว

คอนโทรลเลอร์สั่งให้ทรานซิสเตอร์ทริกที่ 90° ส่งผลให้ μSVC ทำงานเต็มที่ 100% ทำให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีระดับแรงดันลดลงเหลือ 136 โวลต์ โดยที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสมีค่าเท่ากับ 50 Var และ 0.37 แอมแปร์ตามลำดับ

ที่เวลา 80 – 100 วินาที ในระบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดันจะพบว่าระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นไปอีกเป็น 145 โวลต์ ซึ่งในระบบที่มีการควบคุมแรงดันนั้น ตัวคอนโทรลเลอร์ได้สั่งให้ทรานซิสเตอร์ทริกที่มุม 90° ไปแล้ว ส่งผลให้ตัว μSVC จะยังคงทำงานเต็มที่ 100 % ต่อไป ซึ่งจะทำให้แรงดันที่มีการควบคุมแรงดันลดลงเหลือ 140 โวลต์ และจากผลที่ทริกสูงสุดแล้วที่ 100% ส่งผลให้ในช่วงเวลานี้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสมีค่าเท่ากับช่วงเวลา 60 – 80 วินาที

ที่เวลา 100 – 120 วินาที ระบบที่มีการควบคุมแรงดัน จะพบว่าระดับแรงดันลดลงเหลือ 136 โวลต์ ซึ่งโปรแกรมที่ออกแบบกำหนดให้ถ้าแรงดันต่ำกว่า 135 โวลต์ให้เปลี่ยนการทริกจาก 100% เป็น 60% แต่ในกรณีนี้แรงดันที่มีการควบคุมแรงดันยังมีค่าไม่ต่ำกว่า 135 โวลต์ จึงทำให้ทริกที่ 100% อยู่ ส่งผลให้ในช่วงเวลานี้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสมีค่าเท่ากับช่วงที่ผ่านมา

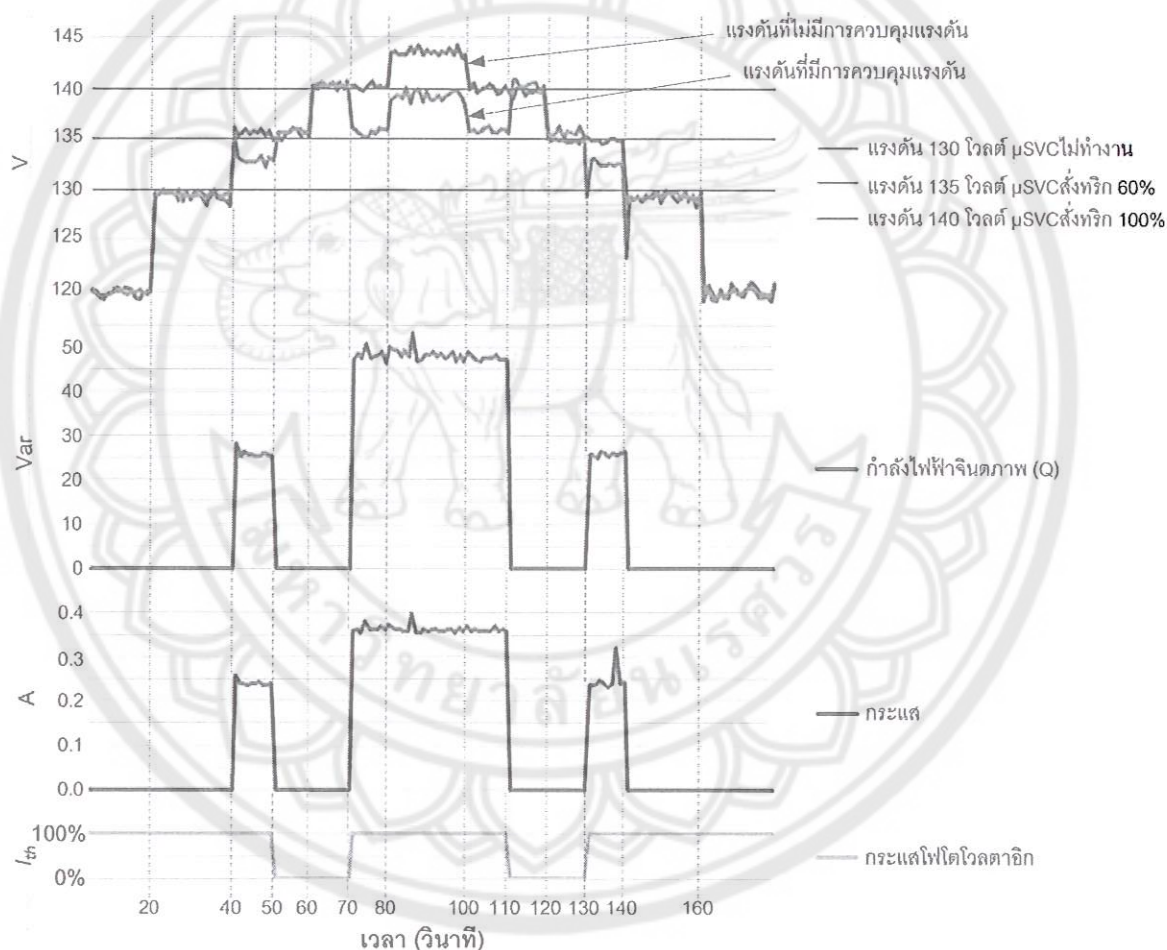
ที่เวลา 120 – 140 วินาที ระบบที่มีการควบคุมแรงดัน จะพบว่าระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ มีขนาดต่ำกว่า 135 โวลต์ (ลดลงมาเหลือประมาณ 131 โวลต์) ทำให้ตัวคอนโทรลเลอร์จึงเปลี่ยนแปลงการทำงาน จากการทริกที่มุม 90° มาเป็น 108° ส่งผลให้ ตัว μSVC ทำการลดขนาดการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจาก 100% มาเป็น 60% ทำให้แรงดันที่มีการควบคุมแรงดันจาก 131 โวลต์เพิ่มระดับแรงดันเป็น 133 โวลต์ ส่งผลให้ในช่วงเวลานี้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสมีค่าเท่ากับ 28 Var และ 0.25 แอมแปร์ตามลำดับ

ที่เวลา 140 – 180 วินาที ระบบที่มีการควบคุมแรงดัน จะพบว่าระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 129 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับที่มีค่าต่ำกว่า 130 โวลต์ ส่งผลให้คอนโทรลเลอร์จึงทำการเปลี่ยนขนาดการทริกมุมจุดชดเชยจาก 108° มาเป็น 180° ซึ่งจะทำให้ ตัว μSVC ทำการลดขนาดการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพจาก 60% ลงมาเหลือ 0% ซึ่งก็คือ ตัว μSVC หยุดทำงานนั่นเอง (เสมือนเปิดวงจรตัว μSVC ไว้) ส่งผลให้ในช่วงเวลานี้จะไม่มีกระแสไหลของกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสในระบบ

5.4.2 ระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระแสของระบบโพลีโวลตาอิก

การทดสอบนี้จะทดสอบเหมือนกับหัวข้อ 5.4.1 แต่จะเพิ่มในส่วนการคิดผลกระแสของระบบโพลีโวลตาอิกเพิ่มด้วย กำหนดให้กระแสของระบบโพลีโวลตาอิกขั้นต่ำ (I_{th}) มีค่าเท่ากับ 50% (0.7A) กล่าวคือ ถ้า I_{th} มีค่าต่ำกว่า 50% (หรือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบโพลีโวลตาอิกมีขนาดน้อยกว่า 50% เมื่อเทียบกับพิกัด) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กก็จะไม่ทำงาน และจะทำงานเมื่อ I_{th} มีค่ามากกว่า 50%

จากการทดสอบ สามารถพล็อตระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ณ จุดเชื่อมต่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีกับมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพ รวมทั้งค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพที่รับเข้ามาในระบบ จากการควบคุมกับกระแสที่ไหลในตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก และกระแสของระบบโพลีโวลตาอิก พล็อตเป็นกราฟแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ผลของระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระแสของระบบโพลีโวลตาอิก

จากผลการทดสอบระบบควบคุมแบบลูปปิดที่คิดผลกระแสของระบบโพลีโวลตาอิก จะเห็นได้ว่า เมื่อมีกระแสโพลีโวลตาอิกจ่ายเข้ามาในระบบเกินค่ากระแสขั้นต่ำที่ตั้งไว้ ก็จะทำให้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กทำงาน แต่เมื่อใดก็ตามที่กระแสโพลีโวลตาอิกจ่ายเข้ามาในระบบต่ำกว่าค่ากระแสขั้นต่ำที่ตั้งไว้ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็กก็จะปิดการทำงาน ทำให้ไม่มีกำลังไฟฟ้าจินตภาพและกระแสไหลอยู่ในระบบ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ในเรื่องปัญหาแรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากการเชื่อมต่อบริเวณโวลตาอิกจำนวนมากเข้ากับระบบแรงต่ำ 1 เฟส ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การเพิ่มขึ้นของระบบโวลตาอิกเป็นจำนวนมากเกินไป มีโอกาสที่จะทำให้กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปที่แหล่งจ่ายได้ อันจะส่งผลให้เกิดภาวะแรงดันเกิน ณ จุดเชื่อมต่อ ซึ่งพบว่าบริเวณที่มีขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงมากที่สุดก็คือที่บริเวณปลายสายส่งย่อย

จากการศึกษาผลกระทบในเรื่องแรงดันเกินจากการเชื่อมต่อบริเวณโวลตาอิกและศึกษารูปแบบการควบคุมแรงดันที่เหมาะสมกับระบบโวลตาอิกที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ โดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ (simulation) บนโปรแกรมสำเร็จรูป ได้แก่ DigSILENT PowerFactory พบว่าในช่วงที่ระบบมีความต้องการไฟฟ้าน้อย แต่กำลังการผลิตจากระบบโวลตาอิกมาก จะมีแนวโน้มเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้นโดยเฉพาะบริเวณปลายสายส่งย่อย และจากการศึกษารูปแบบการควบคุมแรงดันที่เหมาะสมกับระบบโวลตาอิกที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ พบว่าการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยการดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบจำหน่ายมาที่ระบบโวลตาอิก สามารถช่วยลดปริมาณการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพนี้สามารถทำได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดปรับค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบอัตโนมัติ หรือ ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดนาโนไปกับระบบโวลตาอิก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพและควบคุมแรงดันที่เปลี่ยนแปลงที่จุดเชื่อมต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันบนพื้นฐานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบสถิตขนาดเล็ก (Micro static var compensator, μ SVC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเรียบง่ายและมีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน และเหมาะที่จะไปใช้ติดตั้งในระบบโวลตาอิกที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นชนิดปรับค่าไม่ได้ โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ใช้ชดเชยนั้นจะถูกควบคุมด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดมุ่มจุดขนวนในวงจร μ SVC และการเลือกขนาดตัว μ SVC จะคำนึงถึงขีดจำกัดของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ยอมรับได้ (ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าต่างๆ) ผลการทดสอบอุปกรณ์ควบคุมแรงดันในกรณีศึกษาต่างๆ มีดังนี้

การทดสอบแบบระบบลูเปิด

1. ทำการทดสอบตัว μ SVC กับชุดทดสอบที่จำลองการเชื่อมต่อของระบบโวลตาอิก โดยทดลองปรับค่าแรงดันที่ระดับต่างๆ เพื่อทดสอบการสนองของมุ่มจุดขนวนสำหรับทริกของไทรสเตอร์ ผลที่ได้คือ ขนาดของมุ่มจุดขนวนไทรสเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนตามค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงได้ตามที่ออกแบบไว้โดยใช้ตารางตัดสินใจ นอกจากนี้กระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากตัว μ SVC มีการเปลี่ยนมุ่มทริกของไทรสเตอร์ไปที่ค่าต่างๆ ก็ไม่ได้ส่งผลให้ฮาร์โมนิกของกระแสที่ไหลเข้า ณ จุดเชื่อมต่อ (ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสจากระบบโวลตาอิกกับกระแสที่ไหลในตัว μ SVC) มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

2. ทำการทดสอบ ตัว μ SVC กับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย เพื่อทดสอบผลตอบแทนของแรงดันต่อการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพอันเนื่องมาจากตัว μ SVC ผลที่ได้คือแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงเมื่อมีการทริกมุมไทรสเตอร์ขึ้น โดยสามารถที่จะประเมินค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้ ในกรณีที่อยู่ค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Voltage sensitivity, $\Delta V/\Delta Q$) จากการทดสอบพบว่า เมื่อมีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยการดูดกลืนจากระบบมาที่ตัว μ SVC ด้วยปริมาณที่มากขึ้น จะสามารถช่วยลดระดับแรงดันได้มากขึ้นตามไปด้วย แต่ต้องควบคุมในเรื่องค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่ให้ต่ำเกินไปจนเกินกว่าค่าที่การไฟฟ้ายอมรับด้วย

การทดสอบแบบระบบลูปปิด

ทำการทดสอบ ตัว μ SVC กับตู้ทดสอบระบบจำหน่าย โดยทดสอบผลตอบแทนของการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพแบบอัตโนมัติสอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง โดยแบ่งเป็น 2 การทดสอบคือ 1) ไม่คำนึงถึงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิก และ 2) คำนึงถึงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิก (จะเพิ่มระบบตรวจจับกระแสที่ออกจากระบบโฟโตโวลตาอิกเข้ามาในระบบควบคุมแรงดัน)

ผลการทดสอบในกรณีไม่คิดผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบโฟโตโวลตาอิก พบว่า สามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็วตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ายังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในส่วนผลการทดสอบที่คิดผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโฟโตโวลตาอิกด้วย ผลที่ได้คืออุปกรณ์ควบคุมแรงดันจะพิจารณาขนาดกระแสที่ไหลออกจากระบบโฟโตโวลตาอิกก่อน เมื่อใดก็ตามที่กระแสโฟโตโวลตาอิกจ่ายเข้ามาในระบบเกินค่ากระแสขั้นต่ำที่ตั้งไว้ ถึงจะอนุญาตให้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันทำงานได้ ซึ่งการทำงานของตัว μ SVC สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ออกจากระบบโฟโตโวลตาอิกและแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำ

2. ข้อเสนอแนะ

การแปลงค่าแรงดันจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ เพื่อนำไปเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนไตรแอก ถึงแม้ว่าแรงดันอนาล็อกจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าแรงดันดิจิตอลนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (ถึงแม้จะเล็กน้อยก็ตาม) ดังนั้นถ้าเป็นไปได้ที่จะหาวิธีในการควบคุมแรงดันดิจิตอลให้คงที่ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันอนาล็อก หรือหาวิธีใช้ค่าแรงดันอนาล็อกโดยตรงในการอ้างอิงการสร้างสัญญาณจุดชนวนไตรแอก ก็สามารถยกระดับอุปกรณ์ที่พัฒนาให้มีมาตรฐานมากยิ่งขึ้นได้

จากโครงสร้างของตัว μ SVC ที่เป็นลักษณะตัวเหนี่ยวนำต่อขนานเข้ามาที่ระบบไฟฟ้า การเลือกขนาดตัวเหนี่ยวนำอาจจะต้องคำนึงถึงเรื่องปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วย (นอกเหนือจากพิจารณาจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า) โดยเฉพาะระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุ



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่องการรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ประเภทบ้านอยู่อาศัย (สำหรับการรับซื้อไฟฟ้าเพิ่มให้ครบ 100 เมกะวัตต์). *ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*, หน้า 57-71. วันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2558
- N. Jenkins, J.B. Ekanayake, and G. Strbac, *Distributed Generation*, 1st ed. The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- Hadi Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 2nd edition, 2004
- Weckx, S.; Gonzalez, C.; Driesen, J., "Combined Central and Local Active and Reactive Power Control of PV Inverters," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* , vol.5, no.3, pp.776,784, July 2014
- Demirok, E.; Casado González, P.; Frederiksen, K.H.B.; Sera, D.; Rodriguez, P.; Teodorescu, R., "Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids," *Photovoltaics, IEEE Journal of* , vol.1, no.2, pp.174,182, Oct. 2011
- Samadi, A.; Eriksson, R.; Söder, L.; Rawn, B.G.; Boemer, J.C., "Coordinated Active Power-Dependent Voltage Regulation in Distribution Grids With PV Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.29, no.3, pp.1454,1464, June 2014
- ณัฐฤติ ที่จันทัก และพินิจ ศรีธร, "การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟในย่านพลวัตด้วย SVC" *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4*, วันที่ 3-5 เมษายน 2555.
- R. M. Mathur and R. K. Varma, "Thyristor-Based Facts Controllers For Electrical Transmission System," John Wiley&Sons, 2002.
- E.Acha, V.G. Agelidis, O.Anaya-Lara, and T.J.E. Miller, "Power Electronic Control in Electrical Systems," Power Engineering series, Newnes, 2002.
- Perera, B.K.; Ciufo, P.; Perera, S., "Point of common coupling (PCC) voltage control of a grid-connected solar photovoltaic (PV) system," *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE* , vol., no., pp.7475,7480, 10-13 Nov. 2013
- Aaron VanderMeulen and John Maurin "Current source inverter vs. Voltage source inverter topology", ETON (whitepaper), 2014 A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*, 1st ed.: Wiley, 2010, chapter 8.

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม.
ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551, หน้า
3-4.



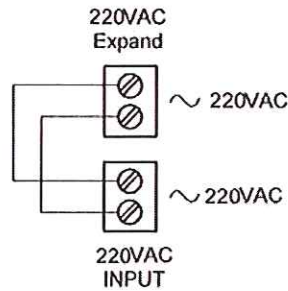


ภาคผนวก

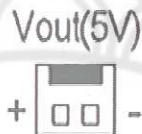
มหาวิทยาลัยนเรศวร



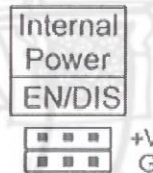
คู่มือการใช้งานโมดูล ET-OPTO AC DIMMER



6. 220VAC INPUT เป็นจุดต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 220VAC เข้ามายังบอร์ดซึ่งสัญญาณนี้จะเชื่อมต่อ
ขานานกับขั้วต่อ 220VAC Expand สำหรับนำไปต่อพ่วงกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการ
7. Vout (5V) เป็นขั้วต่อแรงดันเอาต์พุตกระแสตรง 5V ที่ได้มาจากวงจรเรกติไฟเออร์ (78L05) ภายในบอร์ด
โดยสามารถนำไปต่อเลี้ยงอุปกรณ์ภายนอกได้ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

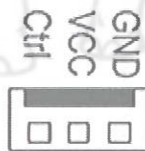


8. Power คือ หลอดไฟแสดงผล LED สำหรับแสดงสถานะของไฟฟ้าภายในบอร์ด
9. Internal Power EN/DIS คือ จัมเปอร์สำหรับเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 V และ GND



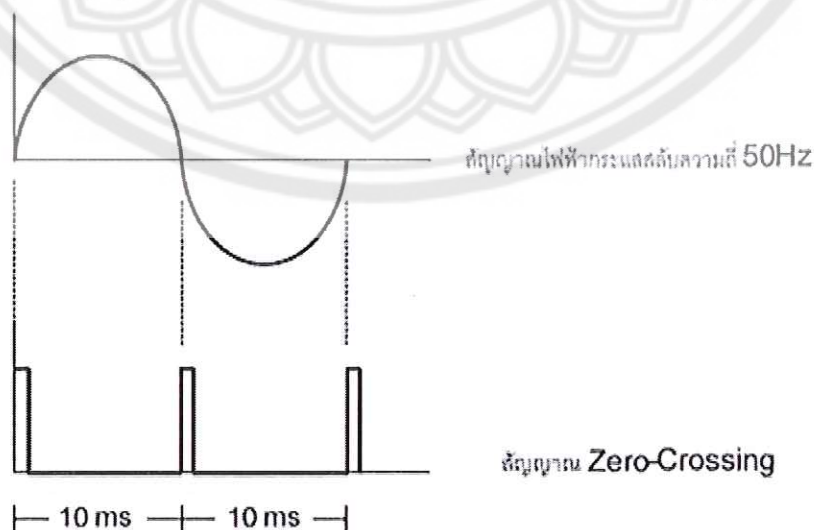
EN = ใช้ไฟจากวงจรเรกติไฟภายใน
DIS = ใช้ไฟจากภายนอก
(เพื่อความเข้าใจโปรดดูวงจรประกอบ)

10. Ctrl คือ ขั้วต่อสัญญาณควบคุมไฟฟ้าที่จุด 220VAC OUT ทำงานที่ลอจิก "0" (Active 0)

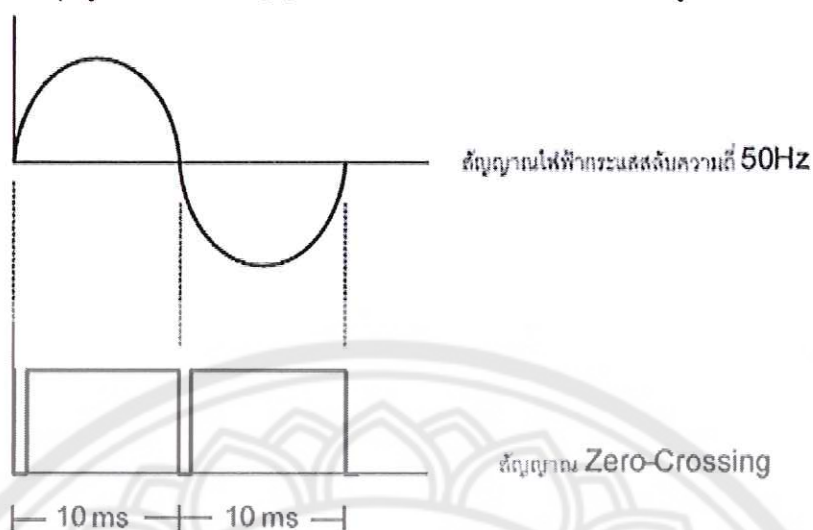


Ctrl = 0 ไตรแอกนำกระแส
Ctrl = 1 ไตรแอกไม่นำกระแส

11. Up/Dw คือ จัมเปอร์สำหรับเลือกรูปแบบของสัญญาณ Zero-Crossing มีรูปแบบดังนี้
Up = ให้สัญญาณที่มุมศูนย์องศาของสัญญาณเป็นลอจิก "1" ซึ่งมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



Dw = ให้สัญญาณที่มุมศูนย์องศาของสัญญาณเป็นลอจิก “0” ซึ่งมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



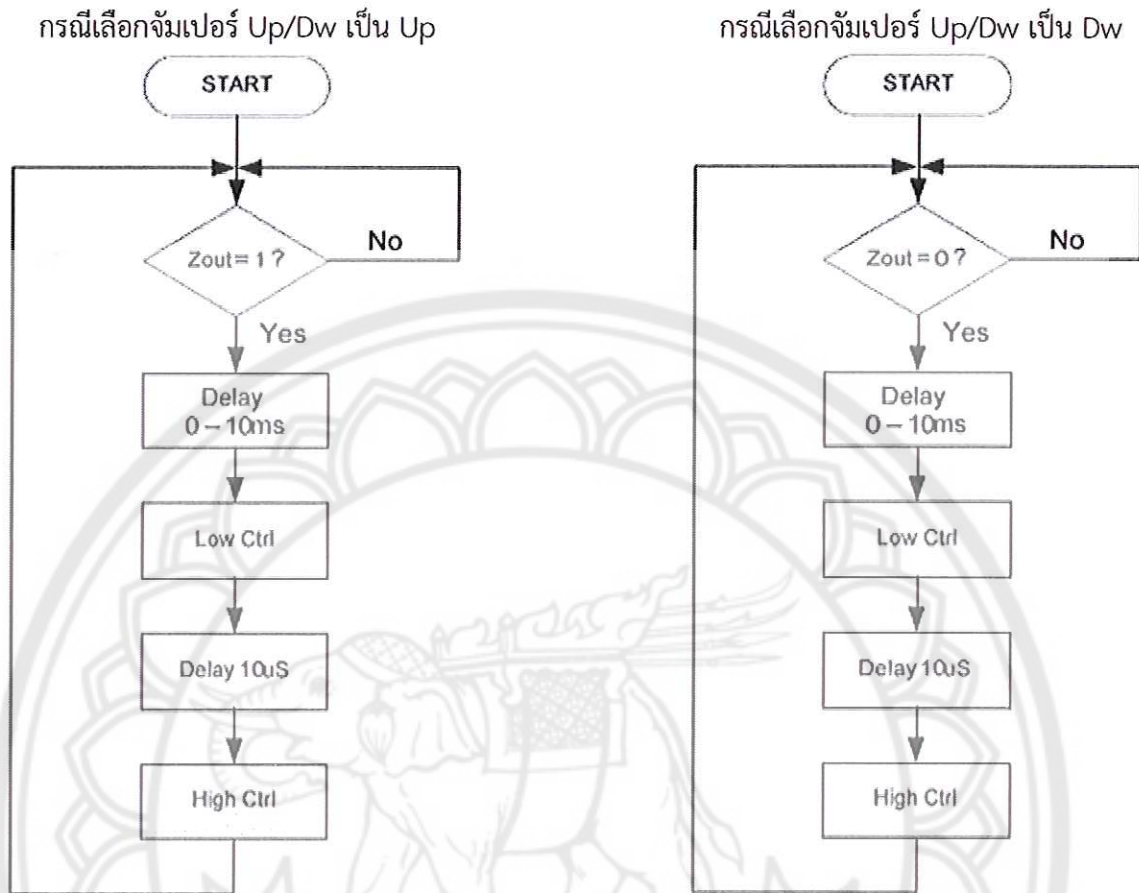
12. ขั้วต่อสัญญาณเอาต์พุต Zero-Crossing โดยจะมีรูปแบบสัญญาณตามข้อ 11
13. LED OUT เป็นหลอดไฟ LED ที่แสดงสถานะการทำงานของวงจรควบคุมไฟฟ้า AC 220V เอาต์พุต
LED ติดสว่าง = มีลอจิกไปทริก หรือ จุดชนวนการทำงานของ TRIAC
LED ดับ = ไม่มี ลอจิกไปทริก หรือ จุดชนวนการทำงานของ TRIAC

การต่อใช้งาน

ET-AC Dimmer จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะมีสัญญาณที่ต้องเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ 3 ส่วน ดังนี้

- 1) สัญญาณ Zero-Crossing (Zout)
- 2) สัญญาณกระตุ้นขาเกต (Gate) ของไทรแอก (Ctrl)
- 3) แหล่งจ่ายไฟ (VCC,GND) ซึ่งสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟจากภายในบอร์ด ET-AC Dimmerหรือจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ภายนอกเองก็ได้ โดยการเลือกจัมป์เปอร์ (Internal Power)

รูปแบบการเขียนโปรแกรมควบคุมไฟ AC แบบง่าย ๆ

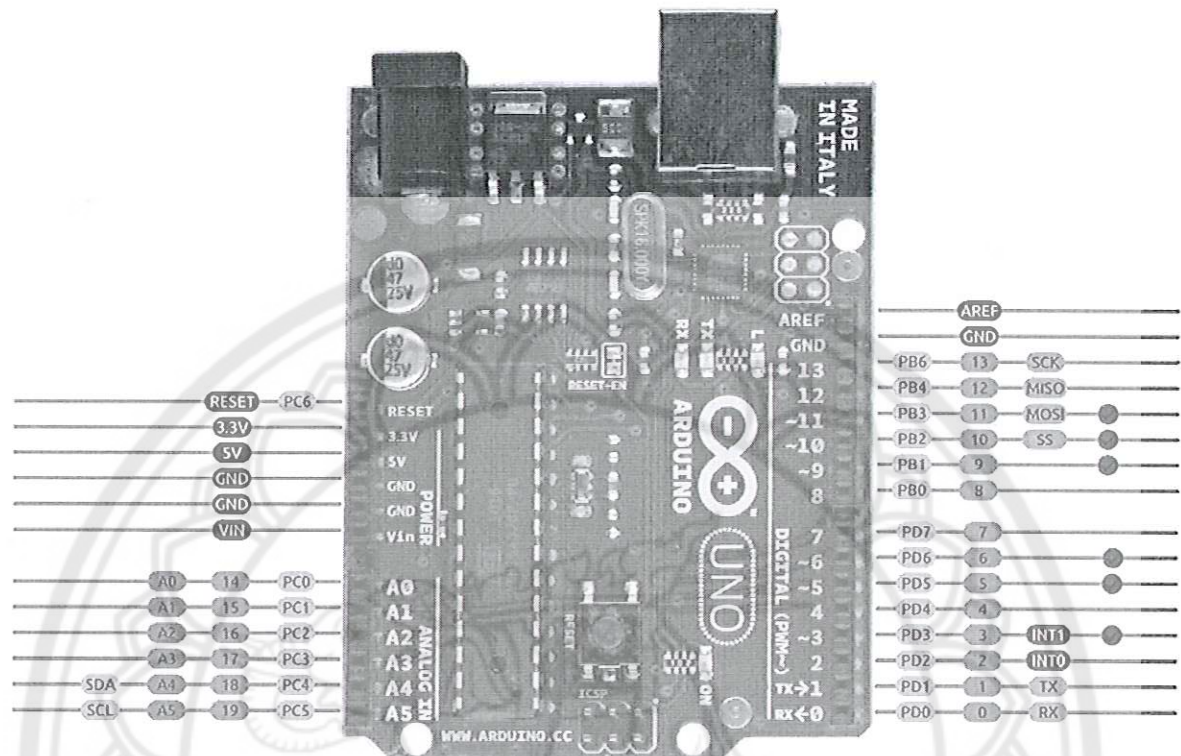


ค่าหน่วงเวลา (0 – 10ms) จะมีผลต่อระดับแรงดันซึ่งแปรผันในช่วง 0 ถึง 220 volt และ จะต้องหน่วงเวลาให้คงที่ทุก ๆ รอบของการเกิด Zero Crossing ตั้งโฟร์ซาร์ดด้านบน

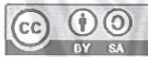


รายละเอียดของบอร์ด Arduino Uno

Arduino Uno Pinout



AVR DIGITAL ANALOG POWER SERIAL SPI I2C PWM INTERRUPT

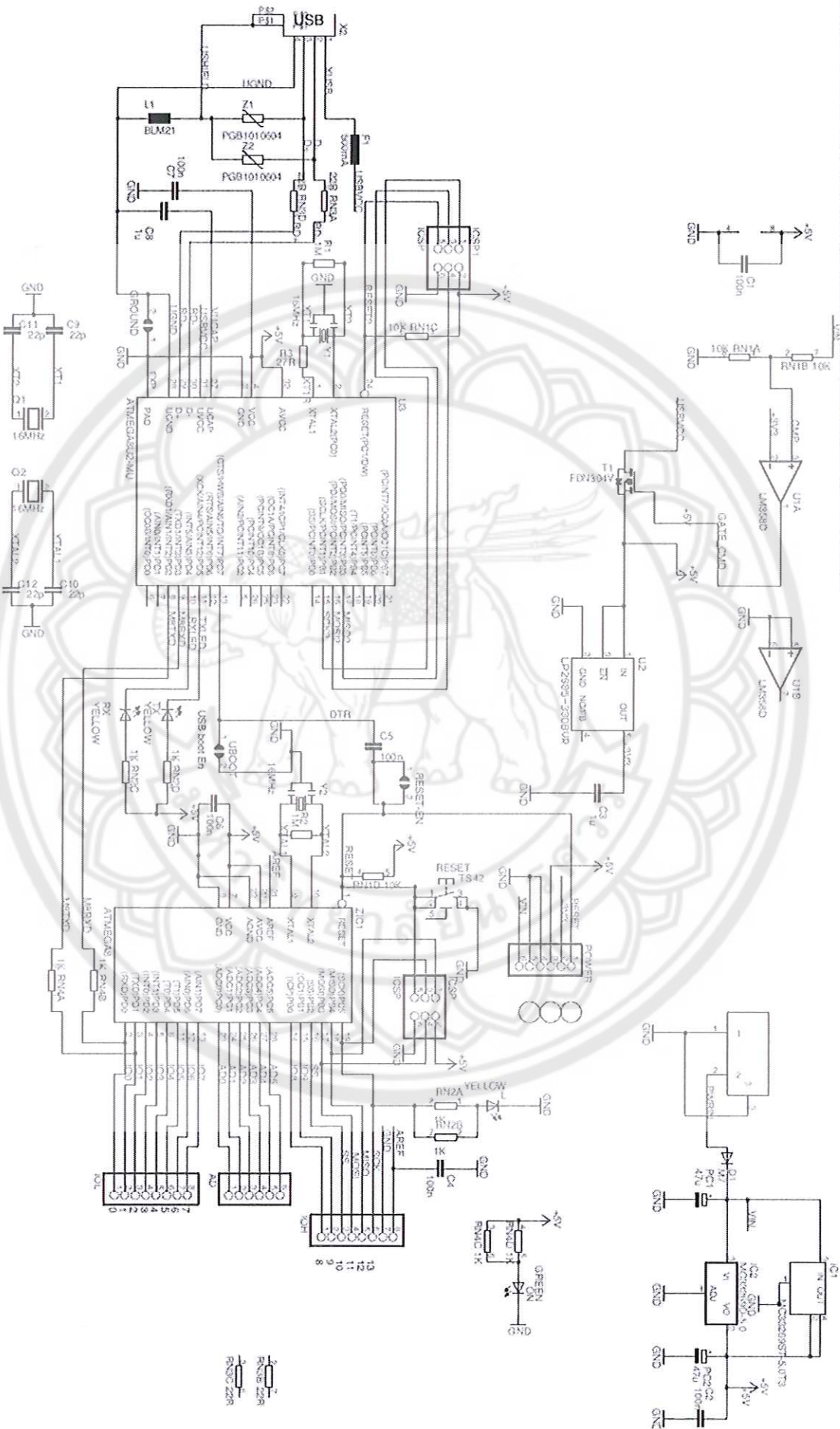


2014 by Bouni
Photo by Arduino.cc

Arduino™ UNO Reference Design

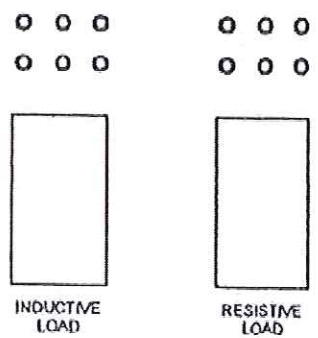
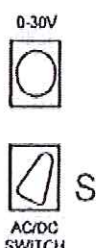
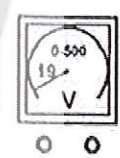
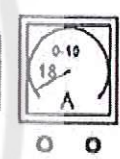
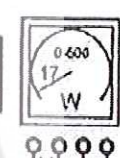
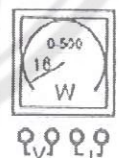
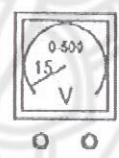
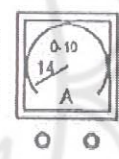
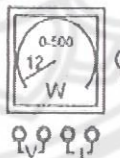
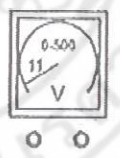
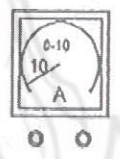
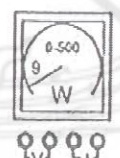
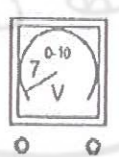
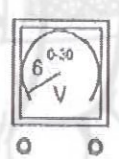
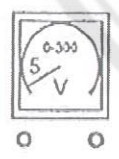
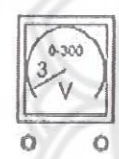
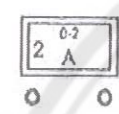
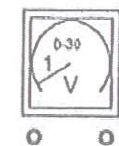
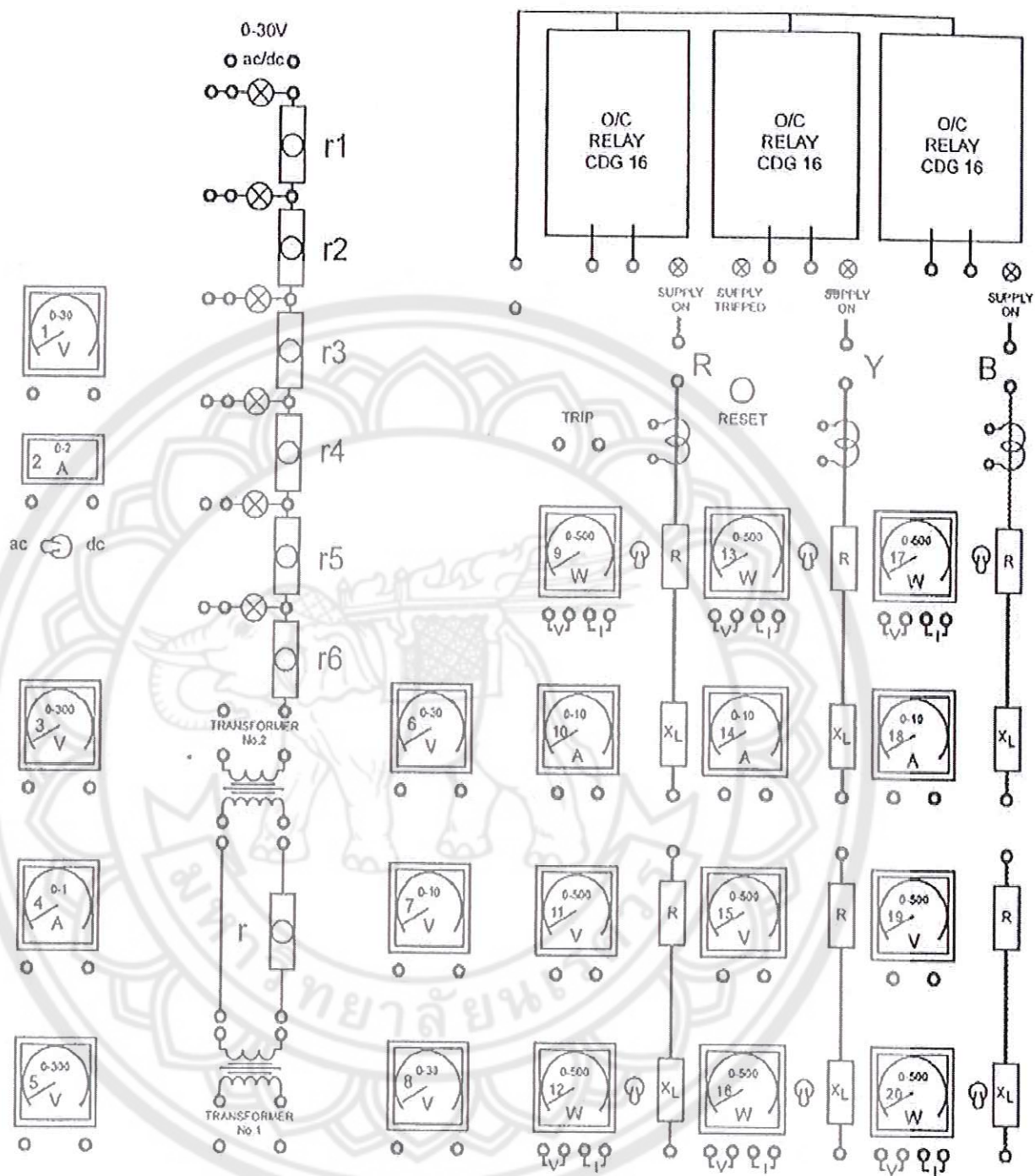
Reference Designs ARE PROVIDED AS IS AND WITH ALL FAULTS. ARDUINO DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or existence of any features or restrictions, printed "intentionally" or "unintentionally". Arduino reserves the right to discontinue or alter specifications without notice at any time. Customers are advised to check the latest version of the product specification on the Web Site of Arduino at www.arduino.cc and to make a design with the information.



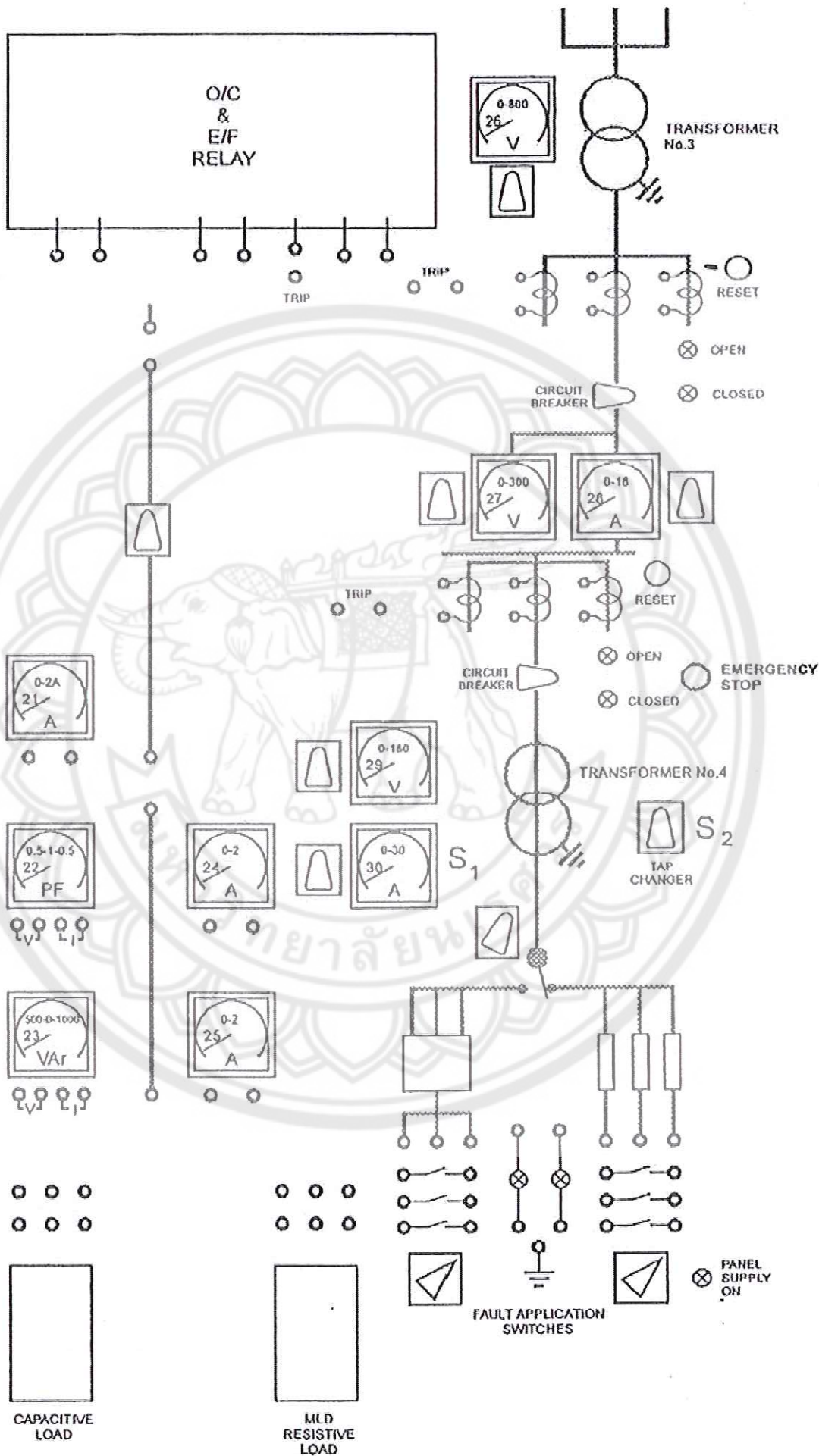


วงจรระบบสายส่งในตู้ทดสอบระบบจำหน่าย TecQuipment
NE9102



SECTION A

SECTION B



SECTION C



Source Code ระบบควบคุมแรงดัน

Open-loop control system

```

int sensorPin = A0; //กำหนดขา A0 ผ่านตัวแปร sensorPin
int ctrl = 13; //กำหนดขา 13 ผ่านตัวแปร ctrl
int zout = 12; //กำหนดขา 12 ผ่านตัวแปร zout
int Vin;
int Vref = 258;
int DeltaV;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ctrl, OUTPUT); //กำหนดให้ ctrl เป็นเอาต์พุต
  pinMode(zout, INPUT); //กำหนดให้ zout เป็นอินพุต
}
void loop()
{
  if(digitalRead(zout) == HIGH)
  {
    Vin = analogRead(sensorPin); //อ่านค่าจากอินพุตออกมาเก็บไว้ที่ตัวแปร Vin
    Serial.print(Vin); //ปรี้นซ์ค่า Vin
    Serial.print("\t");
    DeltaV = Vin - Vref;
    Serial.println(DeltaV); //ปรี้นซ์ค่า DeltaV

    if(DeltaV <= 8) //แรงดัน 0-225 โวลต์
    {
      digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไทรแอกไม่นำกระแส
    }
    else if((DeltaV > 8) && (DeltaV <= 17)) //แรงดัน 225-230 โวลต์
    {
      delay(7);
      digitalWrite(ctrl, LOW); //ไทรแอกนำกระแส
      delay(0.01);
      digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไทรแอกไม่นำกระแส
    }
    else if((DeltaV > 17) && (DeltaV <= 25)) //แรงดัน 230-235 โวลต์
  }
}

```

```
{  
  delay(6);  
  digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส  
  delay(0.01);  
  digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส  
}  
  else //แรงดันมากกว่า 235 โวลต์  
  {  
    delay(5);  
    digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส  
    delay(0.01);  
    digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส  
  }  
}  
}
```



Closed-loop control system without PV

```

int sensorPin = A0; //กำหนดขา A0 ผ่านตัวแปร sensorPin
int ctrl = 13; //กำหนดขา 13 ผ่านตัวแปร ctrl
int zout = 12; //กำหนดขา 12 ผ่านตัวแปร zout
int Vin; //กำหนดตัวแปรเพื่อใช้เก็บค่าเซ็นเซอร์ Vin
int x=0;
int Vmin = 82;
int Vmed = 91;
int Vmax = 100;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ctrl, OUTPUT); //กำหนดให้ ctrl เป็นเอาต์พุต
  pinMode(zout, INPUT); //กำหนดให้ zout เป็นอินพุต
}
void loop()
{
  Vin = analogRead(sensorPin); //อ่านค่าจากอินพุตออกมาเก็บไว้ที่ตัวแปร Vin
  //Serial.println(Vin); //ปรี้นซ์ค่า Vin
  if(digitalRead(zout) == HIGH)
    if(x == 0)
    {
      if(Vin >= Vmed) //ค่ากลาง
      {
        delay(6);
        digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส
        delay(0.01);
        digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส
        x=x+1;
      }
      else //ค่าเริ่มต้น
      {
        digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส
        x=0;
      }
    }
}

```

```
else if(x == 1)
{
    if(Vin >= Vmax) //ค่าสูงสุด
    {
        delay(5);
        digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส
        delay(0.01);
        digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส
        x=x+1;
    }
    else if(Vin <= Vmin) //ค่าต่ำสุด
    {
        digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส
        x=0;
    }
    else
    {
        delay(6);
        digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส
        delay(0.01);
        digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส
        x=x-1;
    }
}
else if(x == 2)
{
    if(Vin <= Vmed) //ค่ากลาง
    {
        delay(6);
        digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส
        delay(0.01);
        digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส
        x=x-1;
    }
    else
    {
        delay(5);
        digitalWrite(ctrl, LOW); //ไตรแอกนำกระแส
        delay(0.01);
```

```
digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส  
    x=2;  
}  
}  
else  
{  
digitalWrite(ctrl, HIGH); //ไตรแอกไม่นำกระแส  
}  
}
```

