

การควบคุมกระแสไฟฟ้าของโหลดด้วยอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดโดยใช้
เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า

THE LOAD CURRENT CONTROL BY GRID-CONNECTED INVERTER
USING PREDICTIVE CURRENT CONTROL TECHNIQUE

สามารถ แจ้งศิริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมกระแสไฟฟ้าของโหลดด้วยอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดโดยใช้
เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า

สามารถ แจ้งศิริณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมกระแสไฟฟ้าของโหลดด้วยอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดโดยใช้
เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า

The Load Current Control by Grid-Connected Inverter Using
Predictive Current Control Technique

ชื่อ - นามสกุล

นายสามารถ แจ้งศิริณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

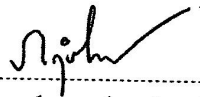
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.

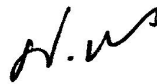
ปีการศึกษา

2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 22 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกระแสไฟฟ้าของโหลดด้วยอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า
ชื่อ – นามสกุล	นายสามารถ แจ่มศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้าสำหรับการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของโหลด เพื่อลดปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าที่กริดให้น้อยลง โดยใช้วิธีควบคุมการทำงานที่ชุดอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับพลังงานมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานเข้าไปยังกริดของระบบไฟฟ้า

การออกแบบวิธีการควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จำนวน 6 ตัว แบบ 3 เฟส 2 ระดับ โดยกำหนดให้ทำงานตามคำสั่งที่กำหนดค่ากระแสไว้ล่วงหน้า ซึ่งมีการสร้างอัลกอริทึมเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกอ้างอิงไว้ล่วงหน้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเป็นการเลียนแบบลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าในสถานการณ์จริง เพื่อเป็นการทดสอบแบบจำลอง โดยได้กำหนดค่าของกระแสที่ใช้อ้างอิงให้มีขนาดเท่ากับ 5 7 และ 10 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ชุดอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังกริดตามที่ต้องการอย่างรวดเร็ว

ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่ากระแสอ้างอิงกับกระแสที่ได้จากการวัดมีขนาดเท่ากัน โดยมีการติดตามมุมเฟสที่กริดขณะเชื่อมต่อกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กริด โดยใช้วงจรเฟสล็อกูป ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่กริดจะขึ้นอยู่กับค่าการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองจะเห็นว่า สามารถชดเชยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดร้อยละ 15.56 ของปริมาณของกระแสโหลดเมื่อเทียบกับความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของกริด

คำสำคัญ: การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับกริด อินเวอร์เตอร์

Thesis Title	The Load Current Control by Grid-Connected Inverter Using Predictive Current Control Technique
Name – Surname	Mr. Samart Janghirun
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Nathabhat Phankong, Ph.D.
Academic Year	2019

ABSTRACT

This thesis presents the predictive current control technique for controlling the load current to reduce electricity consumption at the grid system. It was designed to control the inverter connected to solar cell in supplying the current into the grid system.

The six-switching control methodology for three-phase two-level inverter was designed and operated under the determined predictive current values. The algorithm model was created to compare the current values between the measured current and the previous reference current using the computer program which imitated the real situation in supplying current into the grid system. To test the simulation model, the reference current was specified as 5, 7, and 10 A, respectively, to control the current of the inverter in the solar cell system to rapidly supply the current into the grid.

The simulation results showed that the values of the reference current and the measured current were similar. The tracking phase angle was done while the grid was connected to the solar cell system. The phase lock loop circuit was also used to trace maximum power at the grid. Hence, the maximum power occurring at the grid depended on the current control of the inverter. As a result, the proposed system could compensate the maximum power demand which was 15.56 % of the load current when compared to the capability in supplying current of the grid power source.

Keywords: predictive current control, grid-connected system, inverter

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัทร พันธุ์คง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง เป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 4 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองต้นแบบงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบใจเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ให้ความสนใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สามารถ แจ้งศิริณู

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
1 บทนำ	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	13
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	14
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	14
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 สถานการณ์พลังงานในปัจจุบัน	16
2.2 วิธีลดการใช้พลังงาน	17
2.3 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ	21
2.4 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ.....	28
2.5 เฟสล็อกกลุ๊ปสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้ากริดด้วยวิธี P-Q	49
2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	53
3 รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการวิจัย.....	57
3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	58
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	58
3.3 ขั้นตอนการออกแบบ	60
3.4 การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ทดลอง.....	62
3.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	65
3.6 การดำเนินการตามหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ.....	70
3.7 การแปลงแกนการแปลงแกน $abc - \alpha\beta$ โดยใช้วิธี Clark Tarfronmer.....	71
3.8 การกำหนดกระแสไฟฟ้าอ้างอิง.....	74
4 ผลการจำลองและการทดสอบ.....	81

สารบัญ(ต่อ)

4.1 ผลการทดลองการทำงานตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	84
4.2 สรุปผลการทดลอง.....	89
5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	90
5.1 สรุปผลงานวิจัยและอภิปรายงานวิจัย	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	127



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สถานะของสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์.....	33
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการควบคุมกระแสแบบ SVM และ Predictive control.....	49
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ.....	58
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	63
ตารางที่ 3.3 สถานะของสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์.....	68
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	83



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวิธีการควบคุมการนำยที่ใช้ในเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์.....	21
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของ MPC.....	23
รูปที่ 2.3 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าสร้างขึ้นโดยระดับที่แตกต่างกัน (a) อินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับ(b) อินเวอร์เตอร์สามเฟสสามระดับ.....	26
รูปที่ 2.4 ลักษณะ MPC ทัวไปสำหรับตัวแปลงพลังงาน.....	27
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ.....	29
รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	30
รูปที่ 2.7 การกำหนดค่าโหนดที่เท่ากันสำหรับ สถานการณ์สวิตซ์ซึ่งที่แตกต่างกัน.....	31
รูปที่ 2.8 ภาพแสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าบนแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ.....	32
รูปที่ 2.9 หลักการทำงาน: พล็อตแบบเวกเตอร์ของการอ้างอิงและการทำนายกระแส.....	36
รูปที่ 2.10 หลักการทำงาน: การอ้างอิงและกระแสคาดการณ์.....	37
รูปที่ 2.11 หลักการทำงาน: ค่าของฟังก์ชันต้นทุนสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละอัน.....	39
รูปที่ 2.12 แผนภาพการไหลของการควบคุมกระแสคาดการณ์.....	40
รูปที่ 2.13 เวลาของงานต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 2.14 กระแสโหนดและสถานะแรงดันคงที่สำหรับเวลาการสุ่มตัวอย่าง $T_s = 100 \mu s$	41
รูปที่ 2.15 กระแสโหนดและสถานะแรงดันคงที่สำหรับเวลาการสุ่มตัวอย่าง $T_s = 25 \mu s$	41
รูปที่ 2.16 ค่าจริงและประมาณการส่วนกลับ.....	42
รูปที่ 2.17 โหนดกระแสสำหรับขั้นตอนในแอมพลิจูดของเวกเตอร์ปัจจุบันอ้างอิง i ด้วยเวลาการสุ่มตัวอย่าง $= 25 \mu s$	43
รูปที่ 2.18 ภาพรวมของการตั้งค่าระบบทดลอง.....	44
รูปที่ 2.19 ผลการทดลองในสภาวะคงตัว โหลดกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟสเดียวของโหลด.....	44
รูปที่ 2.20 ผลการทดลองสำหรับขั้นตอนหนึ่งในแอมพลิจูดของ i_α^* กระแสโหนด.....	45
รูปที่ 2.21 ผลการทดลองสำหรับขั้นตอนหนึ่งในแอมพลิจูดของ i_α^* โหลดกระแสและแรงดัน.....	45
รูปที่ 2.22 ผลการทดลองสำหรับขั้นตอนในแอมพลิจูดของการอ้างอิงโหลดปัจจุบันภาระกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟสเดียว.....	46
รูปที่ 2.23 ผลลัพธ์สำหรับขั้นตอนในการอ้างอิงปัจจุบัน i_α^* (a) การควบคุมกระแสคลาสสิกด้วย PWM (b) การควบคุมกระแสคาดการณ์.....	47
รูปที่ 2.24 สเปกตรัมแรงดันโหนด.....	48
รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกัลูปแบบพื้นฐาน.....	50
รูปที่ 2.26 การเกิดสัญญาณลอคความถี่เมื่อเทียบกับไซน์อ้างอิง.....	51

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 เฟสล็อกด้วยวิธี PQ-PLL.....	51
รูปที่ 2.28 เวกเตอร์ลาก-ทรานสฟอร์ม.....	52
รูปที่ 2.29 เวกเตอร์ปาร์ค-ทรานสฟอร์ม.....	52
รูปที่ 2.30 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกแบบพื้นฐาน.....	53
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการวิจัย.....	59
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	60
รูปที่ 3.3 โครงสร้างแสดงส่วนประกอบงานวิจัย.....	61
รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองของระบบ.....	62
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการจากกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงขนาด 50 เควีเอ.....	63
รูปที่ 3.6 โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการควบคุมกระแสแบบล่วงหน้า.....	64
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ.....	65
รูปที่ 3.8 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	66
รูปที่ 3.9 รูปแบบการทำงานของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและการทำนายกระแสล่วงหน้า.....	71
รูปที่ 3.10 Clark Tarfronmer Block Diagram. บนโปรแกรม Simulink.....	72
รูปที่ 3.11 การแปลงค่ากระแส 3 เฟส ให้เป็นกระแสในแนวแกน d และ แกน q ได้เป็น.....	73
รูปที่ 3.12 แบบจำลองการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง.....	74
รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส เป็นระบบ 2 เฟส.....	75
รูปที่ 3.14 วิธีการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ซิง.....	76
รูปที่ 3.15 แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 แรงดัน.....	77
รูปที่ 3.16 ชุดคำสั่งของ m file.....	78
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกแบบพื้นฐาน.....	81
รูปที่ 4.2 แสดงการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ.....	82
รูปที่ 4.3 แสดงสถานที่ใช้ไฟฟ้า ต.ผึ่งรวง อ.เมืองสระบุรี จ.สระบุรี.....	82
รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมการจ่ายกระแสไฟฟ้า ต.ผึ่งรวง อ.เมืองสระบุรี จ.สระบุรี.....	83
รูปที่ 4.5 กระแสไฟฟ้าขณะชานกับกริดที่ 5 A.....	84
รูปที่ 4.6 กระแสไฟฟ้าขณะชานกับกริดที่ 7 A.....	84
รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าขณะชานกับกริดที่ 10 A.....	85
รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าที่กริดก่อนชานกับอินเวอร์เตอร์.....	85
รูปที่ 4.9 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของกริด(หม้อแปลง) ก่อนชานกับอินเวอร์เตอร์.....	86
รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้า ที่อินเวอร์เตอร์ก่อนชานกับกริด.....	86
รูปที่ 4.11 กระแสที่ได้จากการแปลงกระแส 3 เฟส เป็น 2 เฟส.....	87

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 กระแสที่ใช้อ้างอิงจำนวน 2 เฟส.....	87
รูปที่ 4.13 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขนานกับกริด 3 เฟส.....	87
รูปที่ 4.14 มุมเฟสล็อกกลุ่มของอินเวอร์เตอร์ที่ขนานเข้ากับกริด.....	88
รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องใช้งาน.....	88
รูปที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าที่กริดขณะที่ขนานกับอินเวอร์เตอร์.....	89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะการใช้พลังงานในปัจจุบัน นับวันก็จะมีอัตราการเพิ่มของการใช้พลังงานที่สูงมากขึ้น ซึ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการขยายตัวของการบริโภคพลังงานที่สูงมากขึ้น คือ การเพิ่มของจำนวนประชากรที่มีอัตราสูงขึ้น และการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่เป็นตัวจักรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการบริโภคพลังงาน ทั้งในรูปแบบพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และรูปแบบพลังงานที่มีการหมุนเวียน ซึ่งในบทความนี้ เราให้ความสำคัญต่อพลังงานที่มีการหมุนเวียนที่ได้จากแหล่งพลังงานจากดวงอาทิตย์ ที่สามารถส่งผ่านพลังงานมายังโลกเท่ากับ $5 \text{ kwh} / \text{m}^2$ เมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่ของประเทศไทย พลังงานที่ได้้นั้นมากกว่าค่าความต้องการใช้พลังงานทั้งประเทศประมาณ 5,000 เท่าของปริมาณที่พลังงานแสงอาทิตย์ส่งผ่านลงมายังพื้นที่ของประเทศไทย เราจึงหาแนวทางนำประโยชน์ของพลังงานส่วนนี้มาใช้ โดยการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า และทำการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาขนานเข้ากับกริดของการไฟฟ้า[1] โดยการใช้อุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้าเข้ามาเชื่อมต่อหรือเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ เข้ามาควบคุมการทำงานของขบวนการทำงานของสวิตซ์ซึ่งจำนวน ทั้ง 6 ตัว[2-4]ของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวิธีการทดลอง โดยการใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์เข้ามาจำลองเงื่อนไขต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้น เพื่อเลียนแบบให้เข้ากับสถานการณ์การจ่ายกระแส ถ้าจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าแบบล่วงหน้า เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าไปยังกริดของการไฟฟ้า เพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ เราสามารถออกแบบขบวนการลดค่าการใช้พลังงานได้ 3 วิธี ได้แก่ การปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบกริด, การลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด และการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า(demand) ซึ่งเป็นหัวใจหลักของการลดค่าพลังงานสูงสุดในแต่ละวันของรอบเดือน ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นย่อยได้อีก เช่น การลดกำลังไฟฟ้าในช่วงโหลดสูงสุด, การเพิ่มการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ต่ำสุด, การเปลี่ยนการใช้โหลดในแต่ละเวลาให้ใกล้เคียงกัน และการอนุรักษ์พลังงาน สิ่งทีกล่าวมาข้างต้นนั้น เราสามารถที่จะกำหนดวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ได้การเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นปัญหาทางไฟฟ้าที่สำคัญมากที่สุดในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งในอดีตได้มีการควบคุมอยู่หลายรูปแบบทำให้มีความยุ่งยากและความสลับซับซ้อนของสมการ โดยมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งวิธีการควบคุมแบบอนาล็อกมาจนถึงรูปแบบการควบคุมแบบดิจิทัล เราจึงเล็งเห็นถึงความต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการพัฒนาการควบคุมด้วยกระบวนการใหม่ๆ ซึ่งในบทความนี้ จึงได้ทำการศึกษาขบวนการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า โดยให้ครอบคลุมตัวแปรที่มีความหลากหลายมากขึ้น ที่พบล่าสุดค่อนข้างเป็นลักษณะสำคัญของการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า คือ การใช้รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์มีความสลับซับซ้อนน้อยลง ทำให้เวลาในการคำนวณสมการต่างๆ จึงใช้เวลาน้อยลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบไมโครโปรเซสเซอร์ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การทำนายพฤติกรรมระบบในอนาคต

ของตัวแปรควบคุม ข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลองวิธีควบคุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์เข้าใกล้สิ่งที่เรากำหนดไว้ เป็นผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยลง การเพิ่มประสิทธิภาพที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า เป็นการควบคุมแบบทำนายที่ถูกประยุกต์ใช้ให้เข้ากับตัวแปลงพลังงาน ซึ่งวิธีการควบคุมแบบทำนายในรูปแบบต่างๆ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการศึกษาครั้งนี้ โดยขั้นตอนแรกของการใช้ MPC (Predictive control) ในโครงการควบคุมปัจจัยจากอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดันจึงเป็นโทโพโลยีที่รู้จักกันมาก ซึ่งในบทความนี้จะได้นำเสนอรูปแบบของการใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า(Predictive control) สำหรับการควบคุมการทำงานในอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการควบคุมและการทำงาน โดยหลักการจะได้รับการอธิบายในรายละเอียดมากกว่าโปรแกรม เพราะแนวความคิดและคำอธิบายที่เหมือนกันสามารถขยายได้สำหรับตัวอย่างทั้งหมดที่จะนำเสนอต่อไป ซึ่งกลยุทธ์ที่ใช้ในการควบคุมแบบคาดการณ์เอาไว้ล่วงหน้าจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของสถานะสวิตช์ซึ่งให้เป็นตามเวกเตอร์ของสมการแรงดัน[5]ที่จะเป็นการกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้าด้านออกเป็นแบบคงที่ และใกล้เคียงกระแสไฟฟ้าที่อ้างอิงไว้ก่อนหน้าเพื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าที่ได้จ่ายย่อยเข้าไปยังกริดได้อย่างเหมาะสมและเป็นการสร้างความมั่นคงให้กับกริดได้อีกทางหนึ่ง โดยจะเป็นการเพิ่มแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกริด ในขณะที่กริดมีความต้องการพลังงานมากขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน โดยการใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า แบบแกนไอดีและไอคว

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า โดยการใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์

1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์(PV) ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าในขณะที่ขนานกับกริด โดยการจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีการควบคุมกระแสโดยใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ศึกษาการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างเรียบแบบการจ่ายไฟฟ้าจากสถานที่จริง เพื่อหาวิธีการชดเชยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการใช้ขบวนการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าที่ชุดอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยสวิตช์ซึ่งกำลัง จำนวน 6 ตัว ที่ติดตั้งอยู่ในอินเวอร์เตอร์โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงไว้ที่ขนาด 5 ,7 และ 10 แอมแปร์ ด้วยวิธีการควบคุมแบบทำนายบนแกนไอดีและแกนไอคว เพื่อสังเกตการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (อินเวอร์เตอร์) ว่าจะสามารถจ่ายกระแสจริงตามเงื่อนไข ซึ่งผู้ทดลองกำหนดกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าไว้ เพื่อจะชดเชยกำลังไฟฟ้าในขณะที่ขนานกริดเพื่อลดความต้องการกำลังไฟฟ้าให้มีค่าน้อยลง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและจำลองการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า (Predictive control) ที่ขนานกับกริดที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 380 โวลต์ และสายจำหน่ายที่ค่าความต้านทาน 0.5 โอห์มและค่าอินดักแตนซ์ 10 มิลลิเฮนรี่

1.4.2 ทดสอบและวิเคราะห์ระบบควบคุมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ขณะที่ขนานกับกริด

1.4.3 ทดสอบระบบควบคุมจะต้องรักษาแรงดันเชื่อมโยงไฟกระแสสลับให้คงที่ ขณะที่เชื่อมต่อกับกริด

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า เพื่อจ่ายกระแสเข้าไปร่วมกับกริดในกรณีที่กริดไม่สามารถเพิ่มการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ โดยสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของปัญหาด้านกำลังไฟฟ้า

1.5.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าและวิธีการต่าง ๆ

1.5.3 ออกแบบและสร้างโมเดลของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.5.4 วิเคราะห์การชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า

1.5.5 สรุปวิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการวิจัย

1.6 ขอบจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยการใช้วิธีการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าไว้ที่ขนาด 5 , 7 และ 10 แอมแปร์ โดยจ่ายผ่านชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟจากกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับโดยการควบคุมสวิตซ์ซึ่งจำนวน 6 ตัวให้ทำงานในตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยใช้ขบวนการควบคุมกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าขนานเข้าไปยังกริด และสังเกตผลการเปรียบเทียบกระแสอ้างอิงกับกระแสที่ได้จากการวัดที่ขนาดต่างๆ ที่กำหนดไว้ และนำผลที่ได้จากการศึกษาออกมาออกแบบชนิดของอุปกรณ์ และหน้าที่ของการทำงานให้สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 การควบคุมการทำงานแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าสามารถที่จะช่วยการชะลอตัวของการจัดหาพลังงานในอนาคต

1.7.1 ลดต้นทุนด้านพลังงานและขนาดของตัวต้นกำลัง

1.7.2 การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและวารสารด้านพลังงาน

1.7.3 การส่งเสริมการสร้างความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยรวมของประเทศ

1.7.4 ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.7.5 ได้ศึกษาแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ด้วยวิธีการใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าวล่วงหน้า



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งเน้นถึงวิธีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากภาคครัวเรือนซึ่งประสบปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน โดยที่ผ่านมามีการใช้ไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เช่น การใช้เครื่องปรับอากาศ โดยในแต่ละเดือนที่มีอัตราค่าพลังงานสูงขึ้น ประกอบกับสถานะเศรษฐกิจในปัจจุบันที่มีการชะลอตัวด้านเศรษฐกิจ ส่งผลให้เกิดความต้องการที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่หลากหลาย เช่น การติดตั้งเครื่องควบคุมเวลาในการใช้พลังงาน การลดขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กลง หรือ วิธีใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นคือการจัดหาแหล่งพลังงานอื่นที่มีต้นทุนต่ำไม่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ โดยเฉพาะบริเวณประเทศไทย การใช้พลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนพลังงานคลื่นแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่า แผงโซลาร์เซลล์และพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะนำมาจ่ายร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลักที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยอาศัยตัวเชื่อมที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ โดยอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าตรงให้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับ ซึ่งในอดีตการควบคุมการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์จะอาศัยการทำงานแบบพี ไอ ดี คอนโทรล (PID Control) หรือ พี ไอ (PI Control) ซึ่งในการควบคุมดังกล่าว มีความซับซ้อนทางด้านสมการทางคณิตศาสตร์ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณมีเวลาค่อนข้างนาน และไม่มีเสถียรภาพในการควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้กระแสสลับและนำมาจ่ายให้กับโหลด โดยในงานวิจัยนี้จะแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการใช้เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ภายในอินเวอร์เตอร์ หรือเรียกว่า พรีดิกทีฟ คอนโทรล (Predictive Control) โดยตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง หรือ ปริมาณไฟฟ้าที่โหลดต้องการจะเป็นตัวกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าจริงเพื่อชดเชยให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากกริดของการไฟฟ้าที่มีปริมาณลดลงเนื่องจากเราใช้หลักการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ (Predictive Control) เข้ามาควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์อีกทางหนึ่งที่จ่ายเข้าที่โหลดส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ได้จากกริดของการไฟฟ้าที่มีปริมาณลดลงแต่ได้ทำให้แรงดันที่จ่ายให้กับโหลดเกิดความขัดข้องเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตก เพราะมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยเสริมในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดอีกทางหนึ่ง โดยในงานวิจัยครั้งนี้เป็นจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และเพิ่มสมการ Predictive Control เข้าไปแทนระบบการควบคุมแบบเดิมๆ จึงทำให้สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าจริงที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกันได้อย่างมีเสถียรภาพและเป็นการลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกริดให้มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลดลงตามไปด้วย

2.1 สถานการณ์พลังงานในปัจจุบัน

พลังงานเป็นเครื่องมือสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศมาโดยตลอด เป็นปัจจัยพื้นฐานต่อยอดสู่การพัฒนาทุกด้าน ทั้งภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม แรงงาน สังคม ตลอดจน

ภาคครัวเรือนล้วนต้องพึ่งพาพลังงานด้วยกันทั้งสิ้น ดังนั้น นโยบายของรัฐบาลที่ต้องการผลักดันยุทธศาสตร์ไทยแลนด์ 4.0 จำเป็นต้องมีแนวทางการพัฒนาพลังงาน 4.0 ของกระทรวงพลังงาน กระทรวงฯ ได้กำหนดนโยบายพลังงาน 4.0 เพื่อขับเคลื่อนและสนับสนุนเศรษฐกิจ ภายใต้หลักการ คือ การยกระดับประสิทธิภาพของระบบพลังงาน และนำนวัตกรรมที่เหมาะสมมาใช้ในการพัฒนาซึ่งต้องครอบคลุมทั้งระบบ ตั้งแต่การผลิต จัดหา แปรรูปจนถึงการใช้ตามประเภทพลังงาน ได้แก่ น้ำมัน เชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ไฟฟ้า และต้องสอดคล้องกับการทำงานด้านประชารัฐด้วย

2.1.1 สำหรับแนวทางการพัฒนาพลังงาน มีดังนี้

2.1.1.1 น้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อตอบสนองนโยบายพลังงาน 4.0 ต้องสร้างความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐาน มีแผนจะพัฒนาระบบท่อมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความมั่นคงในการขนส่ง ที่ผ่านมาได้เริ่มขยายท่อขนส่งน้ำมันไปภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือแล้ว รวมทั้งการก่อสร้างคลังน้ำมันรองรับการขนส่งทางท่อจะช่วยลดต้นทุนการขนส่งน้ำมันทางรถยนต์ และทำให้โครงสร้างราคาขายปลีกน้ำมันในต่างจังหวัดใกล้เคียงกับราคาในเขตกรุงเทพฯ และเขตปริมณฑล ขณะเดียวกันลดการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง ส่งเสริมอนุรักษ์พลังงานภาคขนส่ง ผลักดันให้ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพเพิ่มขึ้น

2.1.1.2 ก๊าซธรรมชาติ เสนอให้มีการร่างพระราชบัญญัติปิโตรเลียมฉบับใหม่ กำหนดรูปแบบการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมให้ครอบคลุม ประกอบด้วยระบบแบ่งปันผลผลิต (พีเอสซี) และระบบจ้างผลิต (เอสซี) เพิ่มเติมจากระบบสัมปทานปัจจุบัน นอกจากนี้ ยังส่งเสริมการแข่งขันให้บุคคลที่สามเข้ามาใช้โครงสร้างพื้นฐานด้านก๊าซธรรมชาติทั้งส่วนท่อก๊าซและท่ารับก๊าซ

2.1.1.3 ด้านไฟฟ้า มีแผนบริหารสัดส่วนเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าที่ไม่สมดุล การพัฒนาพลังงานทดแทนโดยลดนำเข้าพลังงานทุกรูปแบบด้วยการผลักดันให้มีโรงไฟฟ้าถ่านหินเทคโนโลยีสะอาด และพัฒนาระบบพลังงานอัจฉริยะ (สมาร์ตกริด) ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าของไทยอยู่ระดับ 3.0 หากสามารถลดก๊าซธรรมชาติลงและเพิ่มถ่านหินจะทำให้มีโอกาสเข้าสู่พลังงาน 4.0 โดยปัจจุบันมีการใช้ถ่านหิน 14 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซธรรมชาติ 62 เปอร์เซ็นต์ น้ำมัน 1 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรหรือพลังงานน้ำ 13 เปอร์เซ็นต์ พลังงานทดแทน 10 เปอร์เซ็นต์อย่างไรก็ตาม เป้าหมายของพลังงาน 4.0 เพื่อยกระดับการบริหารจัดการระบบพลังงานของประเทศต้องดำเนินการไปพร้อมกับการสร้างความเข้าใจให้กับประชาชนด้านอื่นด้วย จึงจะสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้กับประเทศได้อย่างแท้จริง

2.2. วิธีลดการใช้พลังงาน

ต้นทุนค่าพลังงานโดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าในสถานประกอบการหรือ โรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้นทุนสำคัญที่ต้องบริหารจัดการ ซึ่งปัจจุบันการอนุรักษ์พลังงานในสถานประกอบการมีหลากหลายรูปแบบ และมีมาตรการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดีเป็นรูปธรรม ผลตอบแทนการลงทุนในการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานมีความคุ้มค่าในระยะยาว ซึ่งหนึ่งในมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม คือ การจัดการโหลดไฟฟ้าภายในโรงงานนั่นเอง

2.2.1 จัดการโหลดไฟฟ้าทั้งด้านผู้ผลิตและผู้ใช้งาน

สำหรับการจัดการโหลดไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การจัดการโหลดจากทางด้านผู้ผลิตพลังงาน และการจัดการโหลดจากทางด้านผู้ใช้พลังงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การจัดการโหลดจากทางด้านผู้ผลิตพลังงาน การจัดการโหลดในลักษณะนี้จำเป็นต้องพิจารณาสัญญาระหว่างผู้ผลิตพลังงานและผู้ใช้พลังงาน โดยในที่นี้ คือ การไฟฟ้าฯ และผู้ใช้ไฟฟ้าตามลำดับ สำหรับตัวอย่างสัญญานั้นอาจพิจารณาสัญญาซื้อขายไฟฟ้าในอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่สามารถงดจ่ายไฟฟ้าได้ (Interruptible Tariff) ในช่วงเวลาที่จะเกิดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบ โดยการไฟฟ้าฯ จะส่งสัญญาณหรือแจ้งให้ผู้ใช้ไฟฟ้าตัดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าลงในระดับที่ได้ทำสัญญากันไว้ การจัดการโหลดในกรณีนี้เหมาะสำหรับเจ้าของกิจการหรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าตั้งแต่ 5,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป และมีปริมาณพลังไฟฟ้าที่สามารถให้งดจ่ายไฟฟ้าได้ (Interruptible Demand) เมื่อการไฟฟ้าฯ ร้องขอไม่น้อยกว่า 1,000 กิโลวัตต์

การจัดการโหลดจากทางด้านผู้ใช้พลังงาน คือ ผู้ใช้พลังงานหรือผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถดำเนินการจัดการโหลดของตนเองให้เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลดีต่อสถานประกอบการหรือโรงงานอุตสาหกรรมของตนเอง เพราะสามารถเพิ่มความเป็นไปได้ในการเพิ่มกระบวนการผลิตใหม่ โดยไม่ต้องลงทุนเพิ่มเติมมากเกินไป ระบบไฟฟ้าสามารถเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดเฉลี่ยได้สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้ โดยไม่ทำให้ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้น ทำให้ลดค่าไฟฟ้าได้ หรือเสียค่าไฟฟ้าเท่าเดิมแต่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น เป็นต้น

ทั้งนี้ การใช้ไฟฟ้าโดยทั่วๆ ไปย่อมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดที่การไฟฟ้าจะนำไปใช้ในการคิดค่าไฟฟ้า จึงต้องใช้หลักการของการใช้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ไปในช่วงเวลาที่ได้กำหนดไว้ สำหรับการซื้อขายไฟฟ้ระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายกับผู้ใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยจะใช้ช่วงเวลา 15 นาทีในการหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย แล้วเรียกค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้นี้ว่าความต้องการพลังไฟฟ้า โดยจะเรียกค่าความต้องการพลังไฟฟ้าครั้งที่มีค่าสูงที่สุดในแต่ละเดือน ว่าเป็นความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Demand)

2.2.2 ค่าตัวประกอบโหลดสูง คุ่มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่า

สำหรับค่าตัวประกอบโหลดมักใช้ในการอธิบายความสม่ำเสมอของการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้ ตัวประกอบโหลดอาจมีความหมายเป็นอย่างอื่นตามมุมมองของผู้ใช้ไฟฟ้าก็ได้ เช่น ผู้ใช้ไฟฟ้าอาจกำหนดนิยามให้ตัวประกอบโหลดมีค่าเป็นอัตราส่วนของโหลดที่เกิดขึ้นจริงต่อขนาดพิกัดของระบบที่ต้องรับโหลดนั้น เช่น ตัวประกอบโหลดของหม้อแปลง เป็นต้น โดยภาพรวมแล้วการใช้ไฟฟ้าในลักษณะที่ทำให้เกิดค่าตัวประกอบโหลดสูง จะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่า

การปรับปรุงตัวประกอบโหลดให้สูงขึ้นอาจมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก โดยอุปกรณ์ที่ใช้ อาจเป็นเพียงตัวส่งสัญญาณเตือนหรือเครื่องขับเคลื่อนอย่างง่าย ๆ เท่านั้น ซึ่งเครื่องควบคุมโหลดอย่างง่าย

ราคาถูกล้นจะตัดโหลดที่จะทำให้เกิดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่กำหนดทำให้ค่าตัวประกอบโหลดมีค่าสูงขึ้นในบางกรณี เช่น ผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ขึ้น อาจใช้เครื่องควบคุมแบบอัตโนมัติในการควบคุมโหลด เพื่อเพิ่มประโยชน์ที่จะได้รับจากการลดค่าไฟฟ้า

นอกจากนี้ ควรพิจารณาปรับรูปแบบการใช้ไฟฟ้าให้มีรูปแบบที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะกรณีที่เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าเสียค่าไฟฟ้าแบบอัตราปกติ ควรใช้ไฟฟ้าให้สม่ำเสมอที่สุด แต่สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าตามอัตรา TOD ต้องหลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าระหว่างเวลา 18:30 น. ถึง 21:30 น. วันละ 3 ชั่วโมงทุกวัน ส่วนผู้ใช้ไฟฟ้าตามอัตรา TOU ควรพิจารณาเพิ่มการใช้ไฟฟ้าในช่วงกลางคืนระหว่างเวลา 22:00 น. ถึง 09:00 น. ของวันรุ่งขึ้นที่เป็นวันทำงานตามปกติ และเพิ่มการใช้ไฟฟ้าตลอด 24 ชั่วโมงของวันหยุดเสาร์ – อาทิตย์และวันหยุดราชการตามปกติการปลดโหลดด้วยมือ

การปลดโหลดเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีนี้ ใช้เพียงเครื่องส่งสัญญาณเตือนประเภทกริ่งหรือหลอดไฟเพื่อส่งเสียงหรือแสงเตือน โดยอาจติดตั้งอยู่ที่ศูนย์ควบคุมการทำงานส่วนกลาง หรือบริเวณโหลดขนาดใหญ่ที่สามารถปลดออกจากระบบในจังหวัดที่ต้องการหรือลดโหลดการทำงานลง โดยไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตหลัก

การตัดสินใจปลดโหลดออกจากระบบอาจเป็นหน้าที่ของพนักงานควบคุมเครื่องจักรหรือผู้จัดการโรงงานที่จะเลือกว่าจะปลดโหลดหรือเครื่องจักรตัวใดออก

2.2.3 การปลดโหลดต้องเหมาะสมถูกที่ ถูกเวลา

สำหรับการปลดโหลดแบบอัตโนมัติ วิธีนี้ต้องระบุโหลดที่จะปลดก่อนว่าเป็นตัวใด โดยปกติแล้วจะเป็นโหลดที่ไม่ค่อยมีความสำคัญ ซึ่งสามารถปลดออกจากระบบได้เมื่อจำเป็น และเมื่อพ้นช่วงเวลาวิกฤตไปแล้วโหลดดังกล่าวจะถูกต่อกลับเข้าไปกับระบบได้อีกครั้งโดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ โดยเครื่องควบคุมโหลดแบบเปรียบเทียบ จะปลดโหลดได้ 2 จังหวัด โดยไม่รบกวนการทำงานของโหลดที่สำคัญ

ส่วนเครื่องควบคุมโหลดแบบทำนาย (Predicting) จะมีการออกแบบที่ก้าวหน้ากว่าและทำงานบนพื้นฐานของการทำนายเหตุการณ์ล่วงหน้ามากกว่าการทำงานแบบเปรียบเทียบ ในช่วงเริ่มต้นของช่วงเวลาที่วัดความต้องการพลังงานไฟฟ้า โหลดทั้งหมดจะถูกประเมินและคำนวณเพื่อดูว่าถ้าอัตราการใช้อยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อครบช่วงเวลาที่กำหนดแล้วความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ หากผลการทำนายพบว่าเกินกว่าค่าที่กำหนด เครื่องควบคุมจะสั่งการปลดโหลดที่กำหนดไว้ออกจากระบบ แต่ถ้ามีโหลดถูกปลดอยู่ก่อนหน้านี้ และการทำนายพบว่าโหลดไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ เครื่องควบคุมจะส่งต่อโหลดกลับเข้าระบบตามเดิม

หากผู้ประกอบการเลือกใช้เครื่องควบคุมโหลดแบบทันที กรณีที่โหลดมีความซับซ้อน เครื่องควบคุมโหลดแบบทันทีจะมีความเหมาะสมมากกว่าสองแบบแรก การทำงานของเครื่องควบคุมแบบนี้จะต่างจากแบบทำนายดังกล่าวข้างต้น ซึ่งอาศัยการทำนายความต้องการพลังงานไฟฟ้า ณ เวลาจบ

ช่วงเวลาที่วัดความต้องการพลังงานไฟฟ้า แต่เครื่องควบคุมโหลดแบบทันทีจะใช้อัตราการใช้พลังงาน ณ เวลาใดๆ ตลอดช่วงการวัดในการทำนายค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า ถ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่งอัตราการใช้พลังงานจริงมีค่าสูงกว่าค่าอัตราการใช้พลังงานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าถ้าปล่อยให้มีการใช้ไฟฟ้าอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆ เมื่อจบช่วงเวลาการวัดจะเกิดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่กำหนดจึงต้องมีการปลดโหลดออกจากระบบ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราการใช้พลังงานจริงมีค่าต่ำกว่าอัตราการใช้พลังงานที่กำหนดไว้ แสดงว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจะต่ำกว่าค่าที่กำหนดจึงต้องโหลดเพิ่มเข้าไปในระบบได้ การควบคุมในลักษณะนี้จะทำให้เส้นโค้งโหลดรายวันมีความสม่ำเสมอดีขึ้น ผลลัพธ์จะให้ค่าโหลดแฟกเตอร์สูงขึ้น

2.2.4 กระจายโหลดให้สม่ำเสมอมากขึ้นได้ประโยชน์ และประหยัดมากขึ้น

ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้งานให้สมบูรณ์ การใช้เครื่องควบคุมโหลดนั้น มิได้หมายความว่า จะเพิ่มโหลดแฟกเตอร์ ไม่ได้หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตปกติที่ทำอยู่ทุกวัน ในหลายๆ กรณีนั้นไม่จำเป็นต้องไปเปลี่ยนแปลงขั้นตอนการทำงานพื้นฐานที่ใช้อยู่ แต่ควรพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของการกระจายโหลดให้สม่ำเสมอมากขึ้น ก็จะทำให้ได้รับประโยชน์สูงขึ้น โดยเฉพาะกรณีที่เป็นระบบขนาดเล็ก พื้นที่ไม่กว้างมาก การควบคุมที่หน่วยงานสามารถทำได้ แต่ในกรณีที่เป็นระบบขนาดใหญ่ ครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางอีกทั้งโหลดอยู่กระจัดกระจายห่างจากจุดควบคุม การควบคุมในลักษณะนี้ควรใช้การควบคุมจากควบคุมต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายและปัญหาทางเทคนิคในการเดินสายสัญญาณต่างๆ ด้วย

2.2.5 ควรพัฒนาโปรแกรมควบคุมโหลดเพื่อความสะดวกของระบบ

เพื่อให้การควบคุมการลดโหลดไฟฟ้าในโรงงานมีประสิทธิภาพ สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้จริง เกิดผลประหยัดได้จริง ผู้ประกอบการสามารถดำเนินการจัดทำโปรแกรมควบคุมโหลด หรือพัฒนาโปรแกรมควบคุมโหลดอย่างง่ายขึ้นมา โดยจำกัดขอบเขตเฉพาะเรื่องการตัดสินใจว่าจะปลดโหลดตัวใดออกจากระบบ จะปลดโหลดในลักษณะลำดับก่อนหลังอย่างไร และจะปลดโหลดนานเพียงใด ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้อาจสั่งโหลดให้ทำงานเป็นวัฏจักรตามขั้นตอนที่ได้มีการกำหนดไว้ล่วงหน้า โปรแกรมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นจะสามารถแก้ไขโหลดให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และต้องการข้อมูลมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับลำดับความสำคัญของโหลดแต่ละตัวขนาดของโหลดแต่ละตัว ช่วงเวลาสูงสุดและต่ำสุดของการปลดโหลด พร้อมอัตราส่วนของมัน ตลอดจนจำนวนครั้งของการเริ่มเดินเครื่องที่ยอมให้เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่กำหนด

เมื่อข้อมูลข่าวสารเหล่านี้ได้รับการพัฒนาขึ้นและป้อนเข้าสู่เครื่องควบคุมแล้วระบบจะใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการปรับโหลดไม่ให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ และในขณะเดียวกันก็เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดด้วยตามปกติไม่ว่าจะใช้โปรแกรมแบบใดก็จำเป็นที่จะต้องมีการปรับตั้งการควบคุมโดยอาศัยความรู้ในเรื่องการทำงานกระบวนการผลิตของโรงงาน ดังนั้นผู้จัดการโรงงานจึงต้องเข้ามามีส่วนร่วมในการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมโหลดด้วย

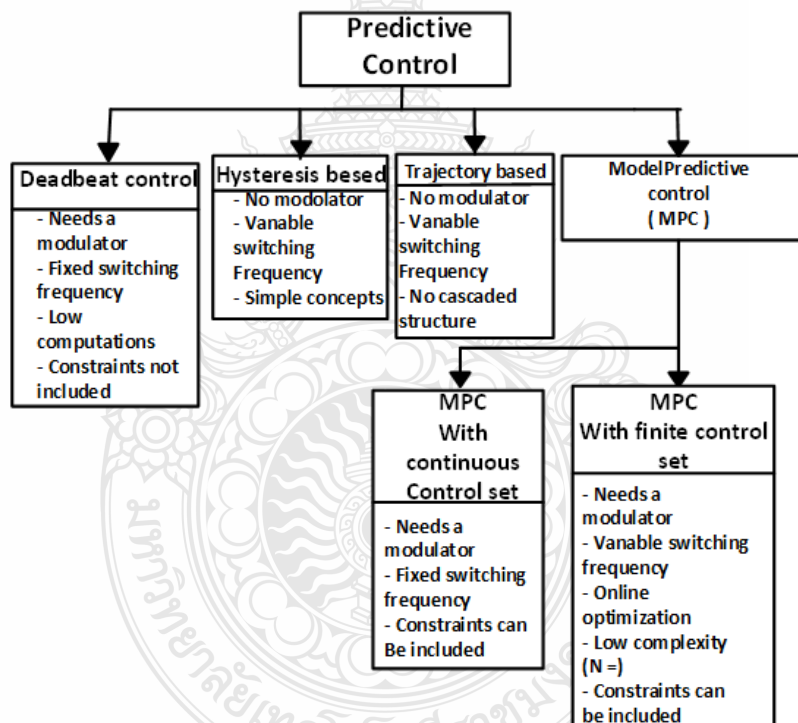
ทั้งนี้ เมื่อใช้โปรแกรมใดๆ ก็ตาม ความต้องการด้านความปลอดภัยยังต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยการผลิตต้องไม่เสี่ยงอันตรายและไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพการทำงาน

อย่างไรก็ตาม การจัดการโหลดการใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นเป็นเพียงหนึ่งในมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่มีหลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและสถานการณ์ที่แตกต่างกันออกไป ผู้ประกอบการควรเลือกใช้มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบแทนจากการลงทุนเพื่อการอนุรักษ์พลังงานอย่างคุ้มค่า

2.3 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control)

2.3.1 วิธีการควบคุมแบบพรีดิกทีฟสำหรับตัวแปลงพลังงานและไดรฟ์

การควบคุมแบบพรีดิกทีฟครอบคลุมตัวควบคุมได้ในระดับกว้าง ซึ่งเป็นการค้นพบล่าสุดที่นำมาประยุกต์ใช้ในตัวแปลงพลังงาน การจำแนกประเภทสำหรับวิธีการควบคุมแบบพรีดิกทีฟมีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.1 [6]



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวิธีการควบคุมการทํานายกระแสที่ใช้ในเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์

ในเทคนิคการควบคุมขั้นสูงนั้นคือขั้นสูงกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิม (PID) ซึ่งการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) เป็นหนึ่งในการควบคุมที่ประสบความสำเร็จในการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม แม้ว่าแนวคิดของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) จะได้รับการพัฒนาในทศวรรษที่ 1960 ในฐานะที่เป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมที่ดีที่สุด และเริ่มต้นได้รับความสนใจในภาคอุตสาหกรรม[12-14]ในปลายปี 1970[15]

ตั้งแต่นั้นมาการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) ได้ถูกนำไปใช้อย่างประสบความสำเร็จในอุตสาหกรรมทางเคมี ซึ่งค่าคงที่เวลานั้นยาวนานพอที่จะทำการคำนวณที่ในสิ่งที่จำเป็นทั้งหมด การประยุกต์ใช้ในช่วงแรก ๆ ของแนวคิดเกี่ยวกับ MPC ในอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics) พบในช่วงทศวรรษ 1980 โดยพิจารณาจากระบบพลังงานสูงที่มีความถี่ในการสวิตช์ซึ่งต่ำ เพราะในเวลานั้นไม่สามารถใช้ความถี่ในการสวิตช์ซึ่งสูงได้ เนื่องจากต้องใช้เวลามากในการคำนวณขั้นตอนวิธีการควบคุม

อย่างไรก็ตามด้วยการพัฒนาไมโครโพรเซสเซอร์ (microprocessors) ที่รวดเร็วและทรงพลัง ทำให้ความสนใจในการใช้ MPC ในอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) สามารถอธิบายตระกูลของตัวควบคุมได้อย่างกว้างขวาง โดยเป็นตัวควบคุมที่ไม่ได้มีหลักการการควบคุมที่มีความเฉพาะ ซึ่งองค์ประกอบทั่วไปของตัวควบคุมชนิดนี้ คือ การใช้แบบจำลองของระบบเพื่อทำนายพฤติกรรมในอนาคตของตัวแปรจนกว่าจะถึงช่วงเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และการเลือกการกระตุ้นที่เหมาะสมจากค่าที่น้อยที่สุดใน cost function

โครงสร้างนี้มีข้อดีที่สำคัญหลายประการ:

- แนวคิดที่ใช้งานง่ายและเข้าใจง่าย
- สามารถนำไปใช้กับระบบที่หลากหลายได้
- ในกรณีที่มีตัวแปรหลายตัวสามารถพิจารณาได้อย่างง่ายดาย
- สามารถชดเชย Dead times ได้
- การรวมที่ไม่เป็นเชิงเส้นในโมเดลสามารถทำได้ง่าย
- การรักษา constraints ง่าย
- ตัวควบคุมที่เป็นผลลัพธ์นั้นสามารถนำไปใช้งานง่าย

วิธีการนี้เหมาะสำหรับการรวมของการดัดแปลงและการขยายโดยขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้ที่มีความเฉพาะอย่างไรก็ตามยังคงมีข้อเสียบางอย่างที่ต้องกล่าวถึง เช่น ต้องใช้การคำนวณจำนวนมาก เมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม คุณภาพของแบบจำลองมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณภาพของตัวควบคุมที่เป็นผลลัพธ์ และหากพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนไปตามกาลเวลาจะต้องพิจารณาการปรับเปลี่ยนหรือการประมาณค่าบางอย่าง

แนวคิดพื้นฐานใน MPC คือ:

- การใช้แบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมในอนาคตของตัวแปรจนกว่าจะถึงเวลาที่กำหนด
- cost function ที่แสดงถึงพฤติกรรมที่ต้องการของระบบ
- ได้รับการกระตุ้นที่เหมาะสมจากค่าที่น้อยที่สุดใน cost function

ต้นแบบที่ใช้ในการทำนายเป็นต้นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแสดงเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะ (state space model) ได้ดังนี้:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.1)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (2.2)$$

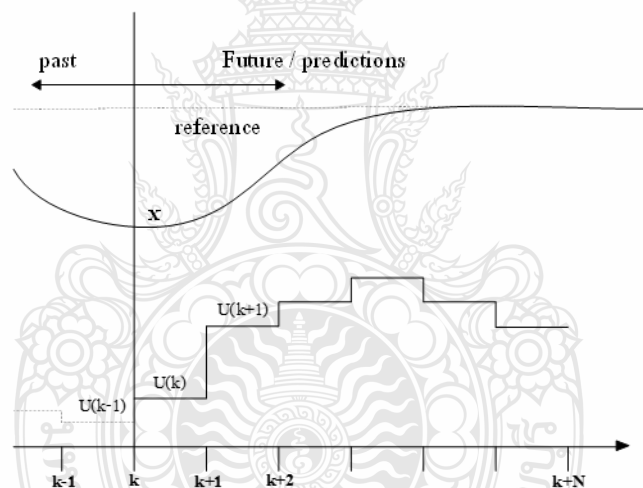
cost function ที่แสดงถึงพฤติกรรมที่ต้องการของระบบจำเป็นต้องได้รับการกำหนด ซึ่งฟังก์ชันนี้พิจารณาการอ้างอิง, สถานะในอนาคต และการกระตุ้นในอนาคต:

$$J = f(x(k), u(k), \dots, u(k+N)) \quad (2.3)$$

MPC เป็นปัญหาในการปรับให้เหมาะสม (optimization problem) ที่ประกอบด้วยค่าที่น้อยที่สุดใน cost function (J) สำหรับเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (N) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบและข้อจำกัดของระบบ ผลลัพธ์คือ N นั่นคือ ลำดับของการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุด

$$u(k) = (10 \dots 0) \arg \min_u J \quad (2.4)$$

ตัวควบคุมจะใช้เฉพาะองค์ประกอบแรกของลำดับที่เป็นปัญหาของการปรับให้เหมาะสมจะได้รับการแก้ไขอีกครั้งในแต่ละการสุ่มตัวอย่างโดยใช้ข้อมูลที่วัดได้ใหม่และได้รับลำดับใหม่ของการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละครั้ง สิ่งนี้เรียกว่า receding horizon strategy



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของ MPC

หลักการทำงานของ MPC สรุปได้ในรูปที่ 2.2 โดยค่าในอนาคตของสถานะของระบบจะถูกคาดการณ์จนกระทั่งถึงเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า $k + N$ โดยใช้แบบจำลองระบบและข้อมูลที่มีอยู่ (การวัด) จนถึงเวลา k ลำดับของการกระตุ้นที่เหมาะสมจะคำนวณจากค่าที่น้อยที่สุดใน cost function และนำองค์ประกอบแรกของลำดับนี้มาใช้ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้จะถูกทำซ้ำอีกครั้งสำหรับการสุ่มตัวอย่างแต่ละครั้งโดยพิจารณาข้อมูลใหม่ที่วัดได้

2.3.3 การควบคุมแบบพรีดิกทีฟสำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไดรฟ์

แม้ว่าทฤษฎีของ MPC ได้รับการพัฒนาในทศวรรษ 1970 แต่การประยุกต์ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไดรฟ์เป็นสิ่งที่เพิ่งเกิดขึ้นได้ไม่นาน เนื่องจากเวลาการสุ่มตัวอย่างอย่างรวดเร็วที่จำเป็นในระบบเหล่านี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รวดเร็วที่มีอยู่ในทศวรรษที่ผ่านมาได้ถูกวิจัยในรูปแบบ

การควบคุมใหม่ อย่างเช่น MPC สำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไดรฟ์ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่า MPC ครอบคลุมตระกูลของตัวควบคุมที่กว้างมากและมีการนำไปใช้งานที่แตกต่างหลากหลาย ทางเลือกที่น่าสนใจคือ การใช้การควบคุมแบบพรีดิกทีฟทั่วไป (GPC) ซึ่งช่วยให้การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เมื่อระบบเป็นเส้นตรงและไม่มีข้อจำกัด การจัดทำกฎการควบคุมที่ชัดเจนที่สามารถนำไปใช้ได้อย่างง่าย [16-17] รูปแบบการควบคุมนี้ถูกใช้ในตัวแปลงพลังงานหลายตัว [18-19] และไดรฟ์ [20-23] เพื่อให้ MPC เกิดการดำเนินการที่เป็นไปได้ในระบบจริงควรพิจารณาถึงเวลาที่ใช้น้อยสำหรับการคำนวณ เนื่องจากการสุ่มตัวอย่างที่รวดเร็ว ที่ได้รับการเสนอให้ย้ายปัญหาของการปรับให้เหมาะสม (optimization problem) แบบออฟไลน์โดยใช้กลยุทธ์ที่เรียกว่า explicit MPC ปัญหาการปรับให้เหมาะสม (optimization problem) ของ MPC ได้รับการแก้ไขแบบออฟไลน์ โดยพิจารณาถึงรูปแบบของระบบ ข้อจำกัด และวัตถุประสงค์ ซึ่งส่งผลให้ตารางการค้นหามีวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในฟังก์ชันของสถานะของระบบ โดย Explicit MPC ได้ถูกนำไปใช้ในการควบคุมตัวแปลงพลังงาน เช่น ตัวแปลง DC – DC และอินเวอร์เตอร์สามเฟส [24-25] และถูกนำไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์เชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) [26] รูปแบบของ GPC และ Explicit MPC ส่วนใหญ่ตั้งสมมติฐานว่าโมเดลของตัวแปลงพลังงานเป็นระบบเชิงเส้นโดยใช้มอดูเลเตอร์ สมมติฐานนี้ทำให้เหมาะสมได้ง่ายขึ้นและช่วยให้การคำนวณกฎของการควบคุมชัดเจนขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องทำให้เหมาะสมในรูปแบบออนไลน์ อย่างไรก็ตาม การทำความเข้าใจที่ง่ายขึ้นโดยไม่ได้คำนึงถึงธรรมชาติที่ไม่ต่อเนื่องของตัวแปลงพลังงานโดยธรรมชาติที่ไม่ต่อเนื่องของตัวแปลงพลังงานที่สามารถจะลดความซับซ้อนของปัญหาการปรับให้เหมาะสม (optimization problem) และการใช้งานแบบออนไลน์ เมื่อพิจารณาถึงจำนวนสวิตช์ซึ่งที่จำกัด และไมโครโพรเซสเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้น การคำนวณการกระตุ้นที่เหมาะสมโดยการประเมินผลออนไลน์ของแต่ละสวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้จริง ซึ่งการพิจารณาถึงสิ่งเหล่านี้ช่วยให้มีความยืดหยุ่นและความง่ายมากขึ้นในรูปแบบการควบคุมเนื่องจากสถานการณ์ของสวิตช์ซึ่งของตัวแปลงพลังงานช่วยให้มีจำนวนที่จำกัดของการกระตุ้นที่เป็นไปได้ วิธีการสุดท้ายนี้ถูกเรียกว่า finite control set MPC

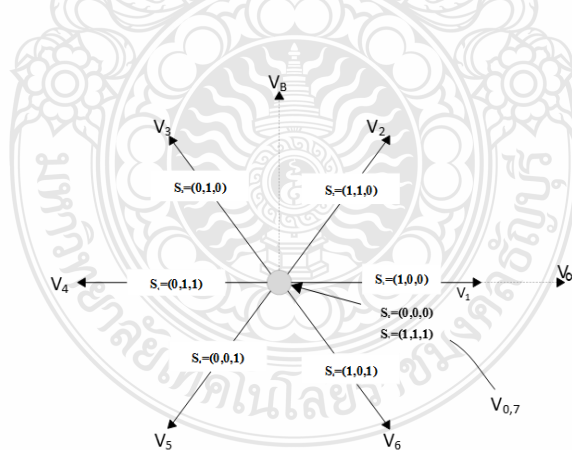
2.3.4 การออกแบบตัวควบคุม

ในขั้นตอนการออกแบบสถานะของ finite control set MPC สำหรับการควบคุมของตัวแปลงพลังงาน โดยมีการระบุขั้นตอนต่อไปนี้:

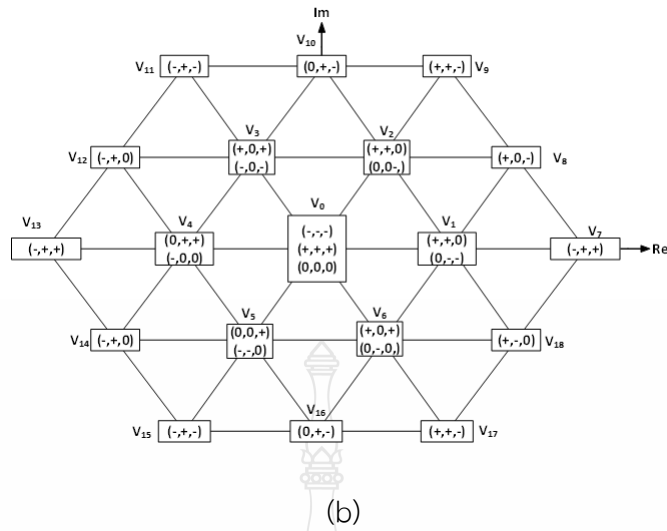
- (1) การสร้างแบบจำลองของตัวแปลงพลังงานที่ระบุสถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดและความสัมพันธ์ของอินพุต หรือเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแส
- (2) การกำหนด cost function ที่แสดงถึงพฤติกรรมที่ต้องการของระบบ
- (3) การได้รับตัวแบบเวลาไม่ต่อเนื่องที่สามารถทำนายพฤติกรรมในอนาคตของตัวแปรที่ถูกควบคุม

การสร้างแบบจำลองคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานคือสวิตช์ไฟ ซึ่งอาจเป็น IGBT, ไทริสเตอร์, (GTO) หรืออื่น ๆ โดยรูปแบบที่ง่ายที่สุดของสวิตช์ไฟนี้ถือว่าเป็นสวิตช์ในอุดมคติที่มีเพียงสองสถานะ: เปิดและปิด ดังนั้นจำนวนสวิตช์ซึ่งทั้งหมดของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์จึงเท่ากับจำนวนชุดค่าผสมที่แตกต่างกันของสวิตช์ซึ่งสองสถานะของแต่ละสวิตช์ อย่างไรก็ตามชุดค่าผสมบางอย่างไม่

สามารถทำได้ เช่น ชุดค่าผสมที่ลัดวงจรลิงค์แบบ DC ซึ่งตามกฎทั่วไปจำนวนสถานะการณีสวิตช์ซึ่งเป็นไปได้ N คือโดยที่ x คือจำนวนสถานะที่เป็นไปได้ของแต่ละขาของคอนเวอร์เตอร์ และ y คือจำนวนเฟส (หรือขา) ของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยวิธีนี้คอนเวอร์เตอร์สามเฟส สองระดับ มี $N = 23 = 8$ สถานะการณีสวิตช์ซึ่งเป็นไปได้ของคอนเวอร์เตอร์สามเฟส สามระดับมี $N = 33 = 27$ สถานะการณีสวิตช์ซึ่งของคอนเวอร์เตอร์ห้าเฟส สองระดับ มี $N = 25 = 32$ ในบางรูปแบบการเชื่อมต่อ (topologies) หลายระดับจำนวนสถานะสวิตช์ซึ่งของคอนเวอร์เตอร์สามารถสูงมาก เช่นเดียวกับในอินเวอร์เตอร์ H-bridge สามเฟส ระดับเกาท์ที่เรียงซ้อนกันซึ่งจำนวนสถานะสวิตช์ซึ่งมีมากกว่า 16 ล้านอีกแง่มุมของตัวแบบของคอนเวอร์เตอร์ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะสวิตช์ซึ่งและระดับแรงดันไฟฟ้า ในกรณีของคอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวหรือเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า ในกรณีของคอนเวอร์เตอร์สามเฟสหรือมัลติเฟส และสำหรับแหล่งที่มาของคอนเวอร์เตอร์ในกระแส สถานะสวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้นั้นสัมพันธ์กับเวกเตอร์กระแสแทนที่จะเป็นเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า สามารถพบได้ในหลายกรณี สถานะสวิตช์ซึ่งสองสถานะขึ้นไปจะสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเดียวกันตัวอย่างเช่น ในคอนเวอร์เตอร์สามเฟส สองระดับ แปรสถานะการณีสวิตช์ซึ่ง จะสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันเจ็ดแบบ โดยสถานะการณีสวิตช์ซึ่งสองสถานะจะสร้างเวกเตอร์ศูนย์ ส่วนในคอนเวอร์เตอร์สามเฟส สามระดับมีความซับซ้อนที่สำคัญ โดยมี 27 สถานะการณีสวิตช์ซึ่งจะสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 19 แบบที่แตกต่างกัน โดยรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะสวิตช์ซึ่งและเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าสำหรับโทโพโลยีคอนเวอร์เตอร์สองตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งในโทโพโลยีอื่น ๆ วิธีการคำนวณสถานะสวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้อาจแตกต่างกัน



(a)



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าสร้างขึ้นโดยระดับที่แตกต่างกัน (a) อินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับ
(b) อินเวอร์เตอร์สามเฟสสามระดับ

แอปพลิเคชันที่แตกต่างกันแต่ละข้อมีข้อกำหนดการควบคุมหลายอย่างในระบบ เช่น การควบคุมกระแส การควบคุมแรงบิดการควบคุมพลังงาน ความถี่ในการสวิตช์ซึ่งต่ำ ฯลฯ ข้อกำหนดเหล่านี้สามารถแสดงเป็น cost function ที่มีค่าน้อยที่สุด cost function พื้นฐานที่ดีที่สุดที่จะกำหนด คือ การวัดความผิดพลาดระหว่างการอ้างอิง และตัวแปรที่คาดการณ์ไว้ ตัวอย่าง เช่น ข้อผิดพลาดในการไหลกระแส ข้อผิดพลาดด้านกำลัง ข้อผิดพลาดแรงบิด และอื่น ๆ ตามที่แสดงในส่วนต่อไปของบทความนี้ อย่างไรก็ตามหนึ่งในข้อดีของวิธีการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ คือ ความเป็นไปได้ในการควบคุมตัวแปรชนิดต่าง ๆ รวมถึงข้อ จำกัดใน cost function เพื่อจัดการกับหน่วยต่าง ๆ และขนาดของตัวแปรควบคุม โดยแต่ละเทอมของ cost function จะถูกคูณด้วยปัจจัยค่าน้ำหนักที่สามารถใช้เพื่อปรับความสำคัญของแต่ละเทอม หากสร้างแบบจำลองพรีดิกทีฟ ตัวแปรควบคุมจะต้องถูกพิจารณาเพื่อให้ได้แบบจำลองแบบไม่ต่อเนื่องที่สามารถใช้สำหรับการคาดการณ์ตัวแปรเหล่านี้ นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่จะต้องกำหนดว่าตัวแปรใดบ้างที่ถูกวัดและไม่ได้ถูกวัด เพราะในบางกรณีตัวแปรที่จำเป็นสำหรับตัวแบบพรีดิกทีฟไม่ได้ถูกวัดและจำเป็นต้องมีการประมาณค่าบางอย่าง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ต่อเนื่องจำเป็นต้องใช้วิธีการลดทอนบางอย่าง สำหรับ first-order systems มันมีประโยชน์เพราะง่ายต่อการประมาณอนุพันธ์โดยใช้วิธีการ the Euler forward method นั่นคือ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (2.5)$$

โดยที่ T_s คือเวลาการสุ่มตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเมื่อลำดับของระบบสูงขึ้น โมเดลไม่ต่อเนื่องที่ใช้วิธี Euler นั้นไม่ดีนักเนื่องจากข้อผิดพลาดที่ได้รับจากวิธีนี้สำหรับระบบการสั่งการที่สูงกว่านั้น

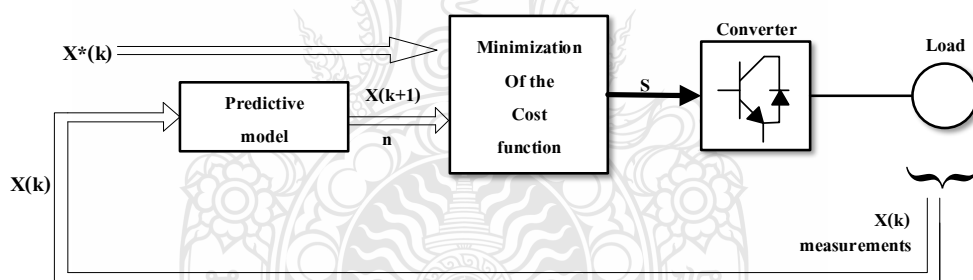
นัยสำคัญ สำหรับระบบการสั่งการที่สูงขึ้นเหล่านี้จะต้องใช้การแยกย่อย หรือแปลงค่าของข้อมูลให้มีรายละเอียดต่ำลง

2.3.5 การปฏิบัติการ

เมื่อนำไปใช้งาน ตัวควบคุมจะต้องถูกพิจารณา ดังนี้:

- ทำนายพฤติกรรมของตัวแปรควบคุมสำหรับสถานการณ์สวิตช์ซึ่งเป็นไปได้ทั้งหมด
- ประเมิน cost function สำหรับการทำนายแต่ละครั้ง
- เลือกสถานะการณีสวิตช์ซึ่งที่ cost function มีค่าน้อยที่สุด

การใช้ตัวแบบพรีดิกทีฟ และหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟอาจจะประสบปัญหาที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของแพลตฟอร์มที่ใช้ เมื่อดำเนินการโดยใช้หน่วยประมวลผลแบบจุดคงที่ (fixed-point processor) จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษกับการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ได้ความแม่นยำที่ดีที่สุดในการเป็นตัวแทนจุดคงที่ของตัวแปรในทางกลับกัน เมื่อนำมาใช้โดยใช้ตัวประมวลผลเลขทศนิยม (floating-point processor) การเขียนโปรแกรมแบบเดียวกันที่ใช้สำหรับการจำลองเกือบทั้งหมดสามารถใช้ในท้องปฏิบัติการได้ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบควบคุม การคำนวณที่อาจมีความสำคัญและอาจจะจำกัดเวลาขั้นต่ำในการการสุ่มตัวอย่างในกรณีที่ง่ายที่สุด การควบคุมกระแสพรีดิกทีฟเวลาการคำนวณค่อนข้างสั้น แต่ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การควบคุมแรงบิด และการควบคุมฟลักซ์ เวลาการคำนวณเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดเวลาการสุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 2.4 ลักษณะ MPC ทัวไปสำหรับตัวแปลงพลังงาน

ในการเลือกสถานะการณีสวิตช์ที่ cost function ที่มีค่าน้อยที่สุด จะมีการประเมินสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมดและจะเก็บค่าที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้ถัดไป จำนวนการคำนวณเกี่ยวข้องโดยตรงกับจำนวนสถานะการณีสวิตช์ซึ่งเป็นไปได้ ในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส สองระดับ การคำนวณเพื่อคาดการณ์สำหรับสถานะการณีสวิตช์ซึ่งเป็นไปได้แปดสถานะไม่ใช่ปัญหา แต่ในกรณีของระบบหลายระดับและหลายเฟสต้องพิจารณาวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดที่แตกต่างกันตามลำดับ เพื่อลดจำนวนการคำนวณ

2.3.6 รูปแบบการควบคุมทั่วไป

รูปแบบการควบคุมทั่วไปสำหรับ MPC ที่ใช้กับตัวแปลงพลังงานและไดรฟ์ที่แสดงไว้ในรูป 2.4 ตัวแปลงพลังงานสามารถมาจากโทโพโลยีและจำนวนเฟสในขณะที่โหลดทั่วไปที่แสดงในรูปสามารถเป็นตัวแทนของเครื่องใช้ไฟฟ้ากริด หรือโหลดอื่น ๆ ในรูปแบบนี้ตัวแปรที่วัดได้ $X(k)$ ถูก

นำมาใช้ในตัวแบบเพื่อคำนวณการคาดการณ์ $X(k+1)$ ของตัวแปรควบคุมสำหรับแต่ละการกระตุ้นที่เป็นไปได้ นั่นคือ สถานการณ์สวิตช์ซึ่ง แรงดันไฟฟ้า หรือกระแสจากนั้นการคาดการณ์เหล่านี้จะถูกประเมินโดยใช้ cost function ซึ่งพิจารณาค่าอ้างอิง $X^*(k)$ และข้อจำกัด และการกระตุ้นที่เหมาะสม (S) จะถูกเลือกและนำไปใช้ในคอนเวอร์เตอร์

2.3.7 สรุป

บทนี้นำเสนอภาพรวมของวิธีการควบคุมแบบพรีดิกทีฟที่แตกต่างกัน มีการนำเสนอหลักการพื้นฐานของ MPC และการประยุกต์ใช้สำหรับตัวแปลงพลังงานและไดรฟ์

2.4 การควบคุมแบบพรีดิกทีฟของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

การควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัญหาที่มีการศึกษามากที่สุดในอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [27-29] ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องศึกษาขั้นตอนแรกของการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) ในรูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้อินเวอร์เตอร์สามเฟส สองระดับเป็นทอพอโลยี หรือลักษณะทางกายภาพที่รู้จักกันดีอยู่แล้ว ซึ่งส่วนใหญ่สามารถพบได้จากการใช้ในไดรฟ์ บทนี้จะนำเสนอรูปแบบของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) สำหรับการควบคุมกระแสไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งยึดตามรูปแบบการควบคุมที่ได้นำเสนอ [30] โดยจะมีการอธิบายรายละเอียดของรูปแบบการควบคุมและหลักการทำงานมากกว่าการใช้งานอื่น ๆ เพราะแนวคิดและคำอธิบายเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้ หรือขยายไปถึงตัวอย่างทั้งหมดที่จะนำเสนอได้

2.4.1 การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ

หลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟที่นำเสนอขึ้นขึ้นอยู่กับข้อเท็จจริงที่ว่า สถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้มีจำนวนจำกัด และสถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้เท่านั้นที่สามารถสร้างขึ้นได้โดยตัวแปลงพลังงานแบบคงที่ และรูปแบบของระบบนั้นสามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมของตัวแปรสำหรับแต่ละสถานะของสวิตช์ซึ่ง สำหรับการเลือกสถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้จะต้องกำหนดเกณฑ์การเลือกไว้ ซึ่งเกณฑ์นี้ประกอบด้วย cost function ที่จะถูกประเมินสำหรับค่าทำนายของตัวแปรที่ถูกควบคุม โดยการทำนายค่าในอนาคตของตัวแปรเหล่านี้จะถูกคำนวณสำหรับแต่ละสถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่เป็นไปได้ จากนั้นจะทำการเลือกค่าที่น้อยที่สุดใน cost function หลักการการควบคุมสามารถสรุปได้ในขั้นตอนต่อไปนี้:

- กำหนด cost function หรือ g
- สร้างแบบจำลองของตัวแปลง หรือคอนเวอร์เตอร์ และสถานการณ์สวิตช์ซึ่ง ที่เป็นไปได้

ได้

- สร้างแบบจำลองของโหลดสำหรับการคาดการณ์ หรือการทำนาย

แบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องของโหลดจำเป็นต้องนำมาใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของตัวแปรที่ประเมินโดยฟังก์ชันต้นทุน (cost function) นั่นคือกระแสโหลด

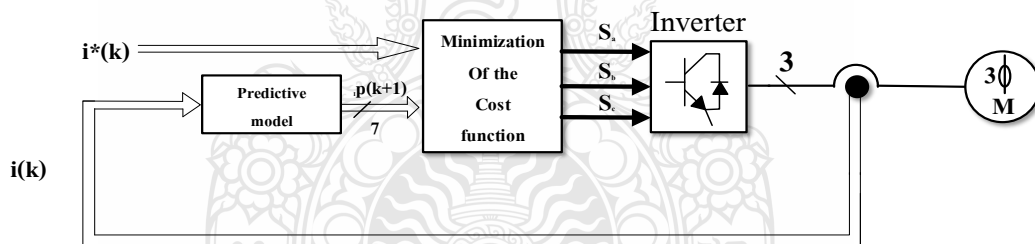
2.4.2 ฟังก์ชันต้นทุน

วัตถุประสงค์ของรูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้า คือการลดข้อผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่ากระแสที่ใช้อ้างอิง ความต้องการนี้สามารถเขียนได้ในรูปแบบของ Cost

Function โดย Cost Function แสดงด้วยพิกัดมุมมากและวัดข้อผิดพลาดระหว่างค่าการอ้างอิงกับกระแสไฟฟ้าที่ทำนาย:

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \quad (2.6)$$

เมื่อ $i_{\alpha}^p(k+1)$ และ $i_{\beta}^p(k+1)$ เป็นค่าจำนวนจริงและค่าจินตภาพของการทำนายเวกเตอร์กระแสไหล $i^p(k+1)$ สำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด การทำนายนี้ทำได้โดยใช้แบบจำลองไหลซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในส่วนต่อไป โดยที่กระแสไฟฟ้าอ้างอิง $i_{\alpha}^*(k+1)$ และ $i_{\beta}^*(k+1)$ เป็นค่าจำนวนจริงและค่าจินตภาพของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าอ้างอิง $i^*(k+1)$ เพื่อความง่ายเราจะสมมติว่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงนี้ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาการสุ่ม ดังนั้นเราจะพิจารณา $i^*(k+1) = i^*(k)$ โดยสมมุติฐานนี้อาจแนะนำใช้กับ sample delay 1 ตัวในการติดตามค่าอ้างอิง ซึ่งไม่ได้เป็นปัญหาหากความถี่ในการสุ่มถูกนำมาพิจารณาด้วย ส่วนในอุปกรณ์อื่น ๆ เป็นไปได้ที่จะคาดการณ์ค่าอ้างอิงในอนาคตการอ้างอิงนี้ถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ควบคุมภายนอก เช่น การควบคุมแบบ field-oriented หรือการควบคุมแบบเวกเตอร์ของเครื่องเหนี่ยวนำ บล็อกไดอะแกรมของหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟที่ใช้กับการควบคุมกระแสไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยแสดงในรูปที่ 2.5 การควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้ใน 4 ขั้นตอน ดังที่อธิบายดังนี้

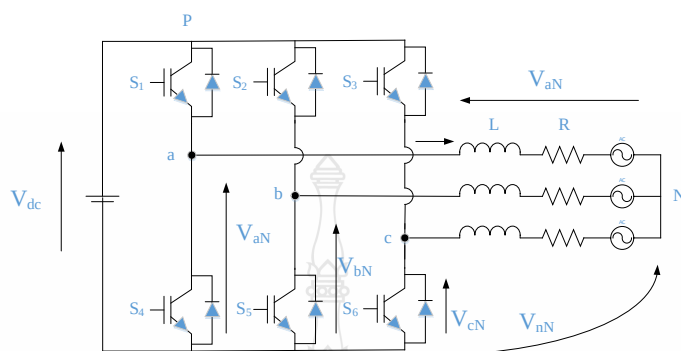


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ

1. ค่าของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง เท่ากับ $i^*(k)$ ที่ได้มาจากอุปกรณ์ควบคุมภายนอก และค่ากระแสไหลที่วัดได้ $i(k)$
2. แบบจำลองของระบบจะถูกใช้ในการทำนายค่าของกระแสไหลในช่วงการสุ่มถัดไป $i(k+1)$ สำหรับแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน
3. ใช้ cost function g ประเมินข้อผิดพลาดระหว่างค่าการอ้างอิงและกระแสที่ทำนายได้ในระหว่างการสุ่มถัดไปสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละอัน
4. เลือกแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในกระแสน้อยที่สุด และสอดคล้องกับสัญญาณสถานการณ์สวิตซ์ซึ่ง จะถูกสร้างขึ้น

2.4.3 วงจรพลังงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน

วงจรพลังงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะแปลงพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยใช้รูปแบบไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เมื่อพิจารณาว่าสวิตช์ 2 ตัวในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมด complementary เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของแหล่งจ่ายกระแสตรง (DC) โดยสถานการณ์สวิตช์ซึ่งของสวิตช์ S_x มี $x = 1, \dots, 6$, สามารถแทนได้ด้วยสัญญาณสวิตช์ S_a , S_b และ S_c ที่กำหนดดังนี้:

$$S_a = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ is On \& } S_4 \text{ is Off} \\ 0 & S_1 \text{ is Off \& } S_4 \text{ is On} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ is On \& } S_5 \text{ is Off} \\ 0 & S_2 \text{ is Off \& } S_5 \text{ is On} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ is On \& } S_6 \text{ is Off} \\ 0 & S_3 \text{ is Off \& } S_6 \text{ is On} \end{cases} \quad (2.9)$$

สัญญาณสวิตช์เหล่านี้กำหนดค่าเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้า

$$V_{aN} = S_a V_{dc} \quad (2.10)$$

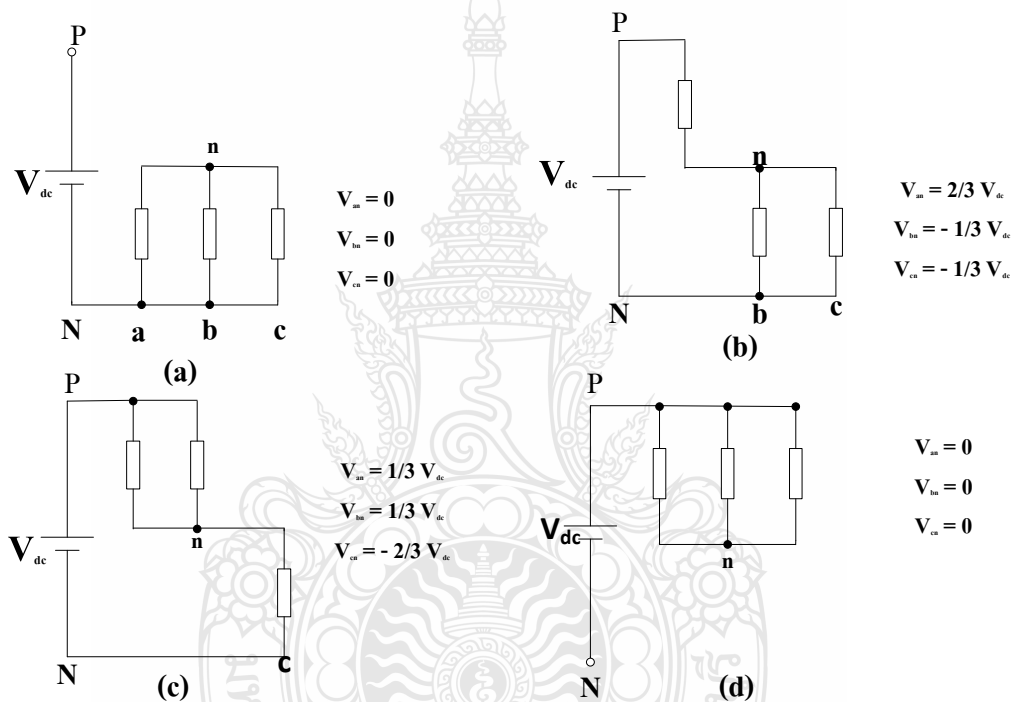
$$V_{bN} = S_b V_{dc} \quad (2.11)$$

$$V_{cN} = S_c V_{dc} \quad (2.12)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อพิจารณาถึงเวกเตอร์ที่รวมกัน $a = e^{j2\pi/3}$ ซึ่งแสดงถึงมุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$V = \frac{2}{3}(V_{aN} + aV_{bN} + a^2V_{cN}) \quad (2.13)$$

เมื่อ v_{aN} , v_{bN} และ v_{cN} เป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสกับนิวทรัล (N) ของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.7 การกำหนดค่าโวลต์ที่เท่ากันสำหรับ สถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่แตกต่างกัน

(a) สถานการณ์สวิตช์ซึ่ง (0, 0, 0) (เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_0)

(b) สถานการณ์สลับ (1, 0, 0) (เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_1)

(c) สถานการณ์สลับ (1, 1, 0) (เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_2)

(d) การสลับสถานะ (1, 1, 1) (เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_7)

ด้วยวิธีนี้สถานการณ์สวิตช์ซึ่ง $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$ สร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_0 ที่กำหนดเป็น

$$V_o = \frac{2}{3}(0 + a0 + a^2 0) = 0 \quad (2.14)$$

และสอดคล้องกับวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.7a

สถานการณ์สวิตช์ซึ่ง (1, 0, 0) สร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_1 ที่กำหนดเป็น

$$V_1 = \frac{2}{3}(V_{dc} + a0 + a^2 0) = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (2.15)$$

เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_2 ถูกสร้างขึ้นโดยสถานะการสวิตช์ซึ่ง $(1, 1, 0)$ และถูกกำหนดเป็น

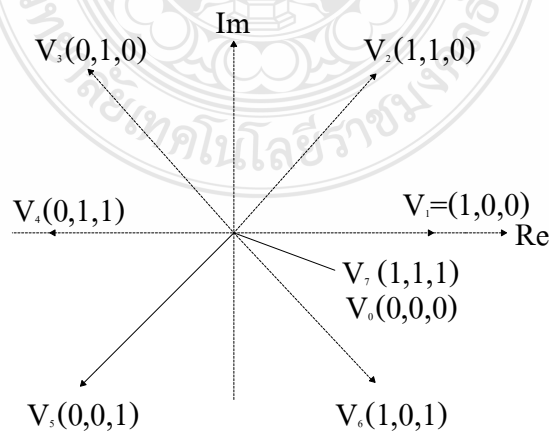
$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{2}{3}(v_{dc} + av_{dc} + a^2 0) \\ &= \frac{2}{3}\left(v_{dc} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)v_{dc}\right) = \frac{v_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc} \end{aligned} \quad (2.16)$$

และสอดคล้องกับวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.7b

สถานการณ์สลับ $(1, 1, 1)$ สร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_7 ที่คำนวณเป็น

$$v_7 = \frac{2}{3}(v_{dc} + av_{dc} + a^2 v_{dc}) = \frac{2}{3}v_{dc}(1 + a + a^2) = 0 \quad (2.17)$$

สถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่แตกต่างกันจะสร้างการกำหนดค่าที่แตกต่างกันของโหนดสามเฟสที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อพิจารณาการรวมกันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของสัญญาณ gating Sa, Sb และ Sc ซึ่งใช้อุปกรณ์การสวิตช์ซึ่ง 8 ตัว และส่งผลให้ได้รับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 8 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ส่วนในรูปที่ 2.8 สังเกตว่า $V_0 = V_7$ ส่งผลให้ชุดเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันมีเพียง 7 ตัวในระนาบเชิงซ้อน โดยคำนึงถึงเทคนิคมอดูเลชัน อย่างเช่น PWM ซึ่งอินเวอร์เตอร์สามารถประมาณการเป็นระบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามในบทนี้อินเวอร์เตอร์จะถูกพิจารณาว่าเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเวลาเป็นช่วง (non linear discrete system) โดยมีเพียง 7 สถานะที่แตกต่างกันเป็นเอาต์พุตที่เป็นไปได้



รูปที่ 2.8 แสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าบนแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

ตารางที่ 2.1 สถานะของสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

S_a	S_b	S_c	Voltage Vector V
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = (2/3)V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = (1/3)V_{dc} + j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = (-1/3)V_{dc} + j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = (2/3)V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = (1/3)V_{dc} - j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = (-1/3)V_{dc} - j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

เราควรทราบว่ารูปแบบของคอนเวอร์เตอร์ที่ซับซ้อนมากขึ้นนั้นสามารถนำมาใช้สำหรับการสวิตช์ซึ่งที่มีความถี่สูงขึ้น ซึ่งอาจรวมถึงแบบจำลองช่วงเวลาวิฤต (dead time), แรงดันอิมิต์ IGBT และไดโอดที่แรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแส (diode forward voltage drop) เป็นต้น อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เน้นความเข้าใจง่าย ดังนั้นรูปแบบอย่างง่ายของอินเวอร์เตอร์จะถูกนำมาใช้

2.4.4 แบบจำลองโหลด

เมื่อพิจารณาถึงคำจำกัดความของตัวแปรจากวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.6 สมการสำหรับกระแสไดนามิก สำหรับแต่ละเฟสสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{aN} = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + V_{nN} \quad (2.18)$$

$$V_{bN} = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + V_{nN} \quad (2.19)$$

$$V_{cN} = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + V_{nN} \quad (2.20)$$

เมื่อ R คือความต้านทานโหลด และ L คือ ตัวเหนี่ยวนำโหลด

โดยการแทนที่สมการที่ (2.18) - (2.20) ในสมการ (2.13) สมการเวกเตอร์สำหรับไดนามิกกระแสโหลดสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v = L \frac{d}{dt} \left(\frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \right) + R \left(\frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \right) \\ + \frac{2}{3} (e_a + ae_b + a^2 e_c) + \frac{2}{3} (v_{nN} + av_{nN} + a^2 v_{nN}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

เมื่อพิจารณาคำจำกัดความเวกเตอร์สเปซสำหรับแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ที่กำหนดโดยสมการ (2.13) และคำจำกัดความสำหรับกระแสโหลด และเวกเตอร์ back-emf space สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$i = \frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \quad (2.22)$$

$$e = \frac{2}{3} (e_a + ae_b + a^2 e_c) \quad (2.23)$$

และสมมติว่าค่าสุดท้ายของสมการ (4.16) เท่ากับศูนย์

$$\frac{2}{3} (v_{nN} + av_{nN} + a^2 v_{nN}) = v_{nN} \frac{2}{3} (1 + a + a^2) = 0 \quad (2.24)$$

จากนั้นไดนามิกกระแสโหลดสามารถอธิบายได้โดยสมการเชิงอนุพันธ์ คือ

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.25)$$

เมื่อ v คือ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์ i คือ เวกเตอร์กระแสโหลดและ e คือ เวกเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) จากโหลด
โปรดทราบว่าสำหรับการจำลองและผลการทดลองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) จากโหลดถือว่าเป็น Sine ที่มีแอมพลิจูดและความถี่คงที่

2.4.5 แบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องสำหรับการทำนาย

ในส่วนนี้เป็นการอธิบายกระบวนการ discretization ของสมการกระแสโหลด (2.25) ที่เวลาการสุ่ม T_s โดยแบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องจะใช้ในการทำนายค่าในอนาคตของกระแสโหลดจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้ทันทีจากการสุ่มที่ k th วิธีการ discretization ที่หลากหลายสามารถนำมาใช้เพื่อให้ได้แบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณของการทำนาย และเมื่อพิจารณาว่าโหลดสามารถสร้างแบบจำลองเป็นระบบลำดับแรก ซึ่งแบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องสามารถถูกรับได้โดยการประมาณค่าแบบง่ายของอนุพันธ์

อย่างไรก็ตามสำหรับระบบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นการประมาณค่านี้อาจนำข้อผิดพลาดมาสู่โมเดล และต้องใช้วิธีการ discretization ที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยอนุพันธ์กระแสโหลด di / dt จะถูกแทนที่ด้วยการประมาณค่าแบบ Euler forward method กล่าวคือ อนุพันธ์มีการประมาณการดังนี้:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (2.26)$$

ซึ่งเมื่อนำไปแทนที่ในสมการ (2.25) เพื่อให้ได้สมการที่ช่วยทำนายกระแสโหลดในอนาคต ณ เวลา $k + 1$ สำหรับแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า $v(k)$ จำนวน 7 ค่า ที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์โดยสมการนี้คือ

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} \left(v(k) - \hat{e}(k)\right) \quad (2.27)$$

เมื่อ $\hat{e}(k)$ หมายถึง ค่าประมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) ในขณะที่ยกกำลัง p คือ ตัวแปรที่ทำนายได้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.25) โดยพิจารณาจากการวัดแรงดันโหลดและกระแสโหลด โดยแสดงเป็นสมการต่อไปนี้

$$\hat{e}(k-1) = v(k-1) - \frac{L}{T_s} i(k) - \left(R - \frac{L}{T_s}\right) i(k-1) \quad (2.28)$$

เมื่อ $\hat{e}(k-1)$ เป็นค่าโดยประมาณของ $e(k-1)$

ในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) $e(k)$ สามารถประมาณได้โดยใช้การประมาณค่าที่ผ่านมาของค่าประมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) อีกทางหนึ่งเมื่อความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) นั้นน้อยกว่าความถี่ของการสุ่มอย่างมาก เราจะสมมติว่าความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาการสุ่มหนึ่งครั้ง ดังนั้นสมมติให้ $\hat{e}(k) = \hat{e}(k-1)$

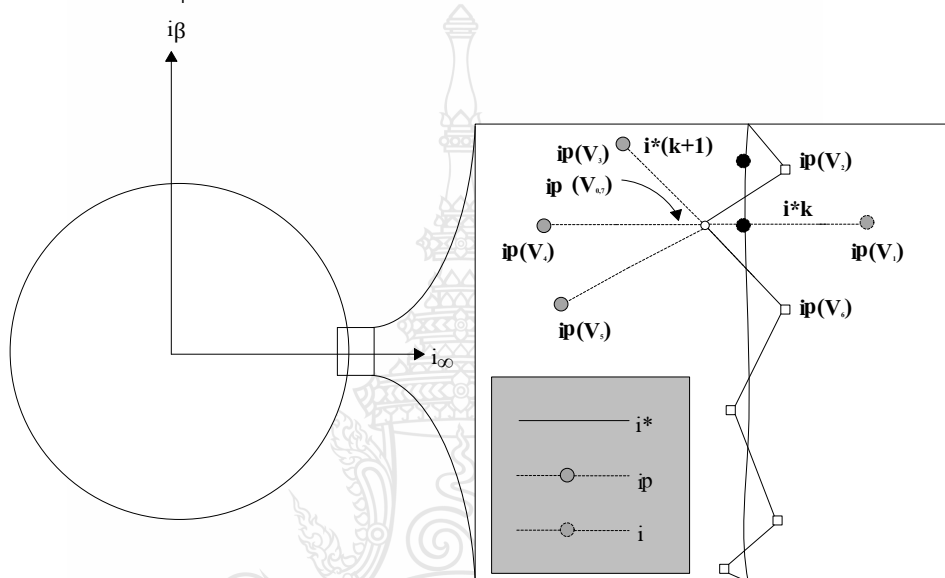
2.4.6 หลักการทำงาน

เพื่อแสดงให้เห็นว่าหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟมีการทำงานอย่างไร โดยรายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 โดยกระแสโหลด i_α, i_β และค่าอ้างอิงจะแสดงเป็นระยะเวลาที่สมบูรณ์ของการอ้างอิง เมื่อใช้การวัด $i(k)$ และสถานการณ์สวิตช์ซึ่งทั้งหมดของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า $v(k)$ กระแสในอนาคต $i(k+1)$ จะถูกประมาณการเป็น $i^p(k+1)$ ในพล็อตแบบเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถสังเกตได้ว่าเวกเตอร์ V_2 เป็นเวกเตอร์กระแสที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับเวกเตอร์อ้างอิงดังที่แสดงในรูปที่ 2.10, กระแสไฟฟ้า $i_\alpha^p(V_0, 7)$ สอดคล้องกับกระแสที่ทำนายได้ หากเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_0 หรือ V_7 ถูกนำมาใช้ในเวลา k ดังจะเห็นได้ในรูปนี้ว่าเวกเตอร์ V_2 และ V_6 เป็นค่าที่ความผิดพลาดน้อยที่สุดในกระแสไฟฟ้า i_α และเวกเตอร์ V_2 และ V_3 เป็นค่าที่ความผิดพลาดน้อยที่สุดในกระแสไฟฟ้า i_β ได้ ดังนั้นเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ลดฟังก์ชันต้นทุน g คือ V_2 รูปเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความหมายของ cost function ในการวัดความผิดพลาดหรือระยะห่างระหว่างเวกเตอร์อ้างอิงกับเวกเตอร์ที่ทำนายได้ ซึ่งมันง่ายที่จะดูข้อผิดพลาดและระยะห่างเหล่านี้สำหรับกรณีของการควบคุมกระแสไฟฟ้า แต่พล็อตเหล่านี้กลับกลายเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปได้สำหรับสร้าง cost function ที่ซับซ้อนมากขึ้นจากมุมมองเชิงตัวเลข การเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะดำเนินการตามที่แสดงในรูปที่ 2.11 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละตัวสร้างกระแสที่ทำนายได้ที่ให้ค่าของ

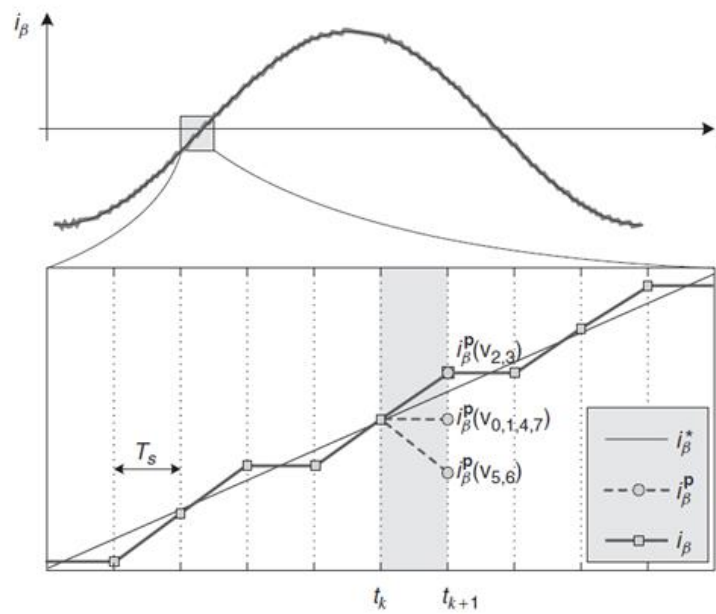
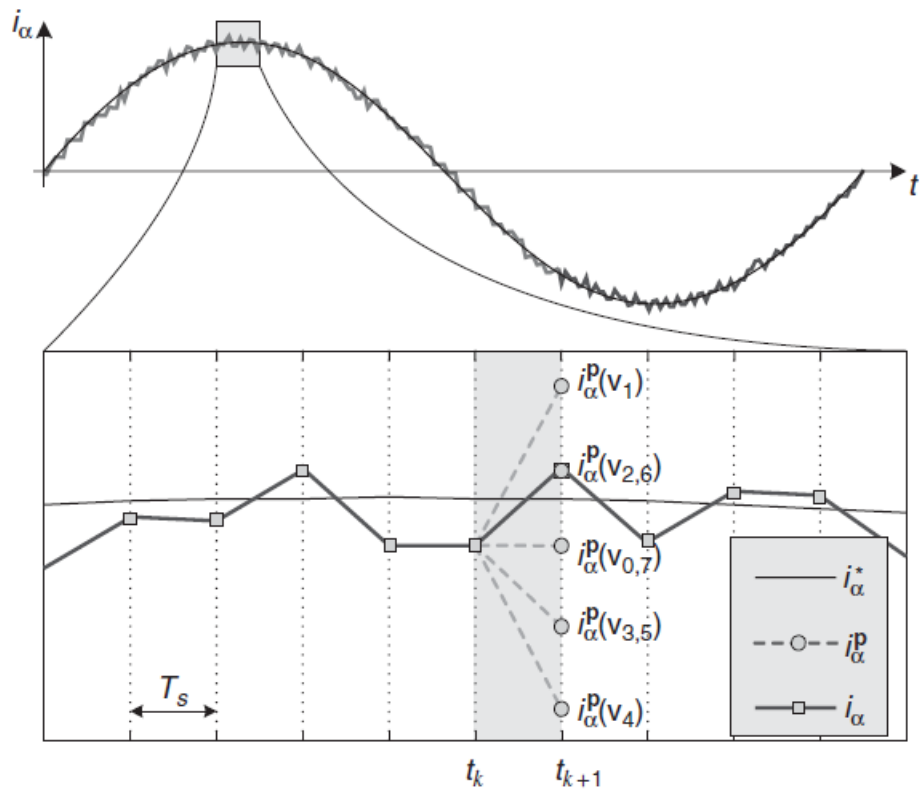
cost function ตามที่แสดงในตาราง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า ตามตัวอย่างนี้เวกเตอร์ V_2 สร้างค่าต่ำสุดของ cost function g จากนั้นเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_2 และนำไปใช้ในอินเวอร์เตอร์

2.4.7 การดำเนินการตามหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ

แผนภาพของภารกิจต่างๆที่ดำเนินการโดยตัวควบคุมแบบพรีดิกทีฟจะแสดงในรูปที่ 2.12 โดยลูปภายนอก (outer loop) จะถูกดำเนินการทุกครั้งที่มีการสุ่ม ในขณะที่ลูปภายใน (inner loop) จะถูกดำเนินการสำหรับแต่ละสถานะที่เป็นไปได้เพื่อรับสถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในช่วงระยะเวลาการสุ่มครั้งต่อไป



รูปที่ 2.9 หลักการทำงาน: พล็อตแบบเวกเตอร์ของการอ้างอิงและการทำนายกระแส



รูปที่ 2.10 หลักการทำงาน: การอ้างอิงและกระแสดาคาการณ

ช่วงเวลาของภารกิจต่างๆแสดงในรูปที่ 2.13 โดยภารกิจที่ใช้เวลามากที่สุดคือการทำนายและการเลือกสถานการณ์สวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสมที่สุดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.13

เนื่องจากเพราะการคำนวณแบบจำลองโหนดและ cost function จะถูกคำนวณ 7 ครั้ง โดยคำนวณ 1 ครั้งในแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

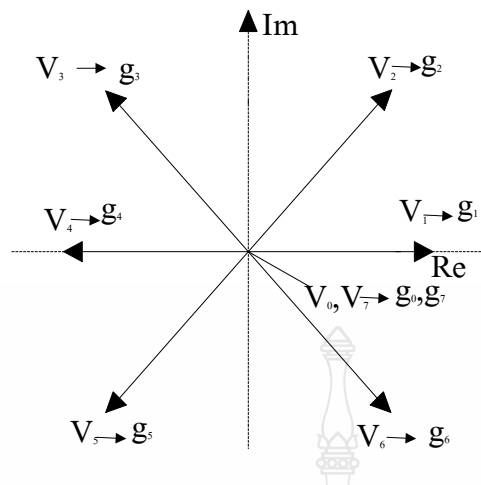
หลักการการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองในโปรแกรม MATLAB ให้เป็น S-Function ซึ่งมีรหัสต่อไปนี้:

```
ek = v(xop_1) - L/Ts*ik - (R-L/Ts)*ik_1;
g_opt = inf;
for i=1:7
    ik1 = (1-R*T/L)*ik + Ts/L*(v(i)-ek);
    g = abs(real(ik_ref-ik1)) + abs(imag(ik_ref-ik1));
    if (g<g_opt)
        g_opt = g;
        x_opt = i;
    end
end
xop_1=xop;
xop=x_opt;
```

โดยที่ $ik = i(k)$, $ik1 = i(k + 1)$, $ik_1 = i(k - 1)$ และ $ek = e(k)$ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่ลดความผิดพลาดให้มีค่าน้อยที่สุดคือ $v(xop)$

เมื่อการควบคุมแบบพรีดิกทีฟถูกนำไปใช้ในการทดลอง รหัสเดียวกันจะถูกเขียนใหม่อีกครั้งในภาษา C ที่มีกระแสไฟฟ้าและเบต้าคำนวณแยกกัน

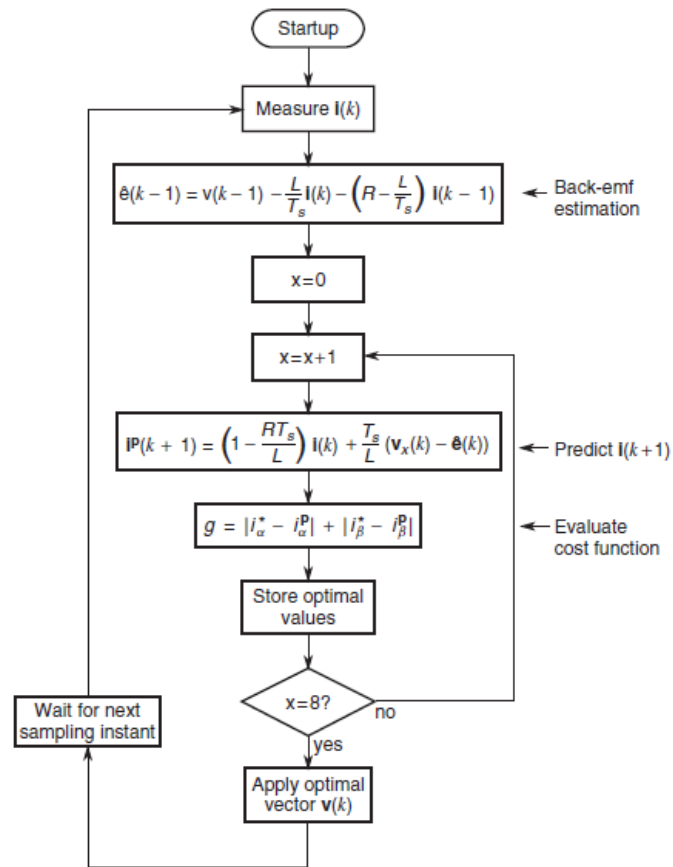
ผลลัพธ์การใช้หลักการการควบคุมที่นำมาใช้ในโปรแกรม MATLAB / Simulink จะแสดงไว้ในลำดับถัดไปโดยพิจารณาในสมการ (2.27) สำหรับการทำนายกระแสโหนด และสมการ (2.28) สำหรับการประมาณการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) โดยพารามิเตอร์ระบบ $V_{dc} = 520$ V, $L = 10$ mH, $R = 10 \Omega$, และ $e = 100V_{peak}$ ได้รับการพิจารณาสำหรับการจำลองกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในหนึ่งเฟสของโหนดแสดงในรูปที่ 2.14 สำหรับเวลาการสุ่ม $T_s = 100 \mu s$ ซึ่งไม่มีข้อผิดพลาดของสถานะคงที่ในกระแสไฟฟ้า แต่มีคลื่นที่เห็นได้ชัดเจน



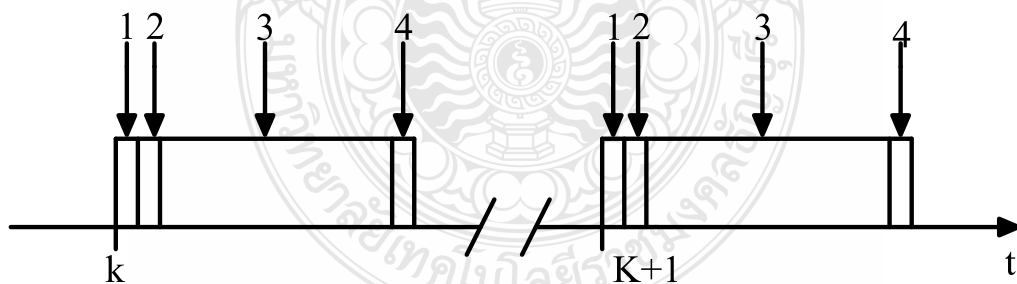
Voltage vector	Cost function
V_0, V_7	$g_0, g_7 = 0.60$
V_1	$g_1 = 0.82$
V_2	$g_2 = 0.24$
V_3	$g_3 = 0.42$
V_4	$g_4 = 0.96$
V_5	$g_5 = 1.24$
V_6	$g_6 = 1.19$

← optimum

รูปที่ 2.11 หลักการทำงาน: ค่าของฟังก์ชันต้นทุนสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละอัน

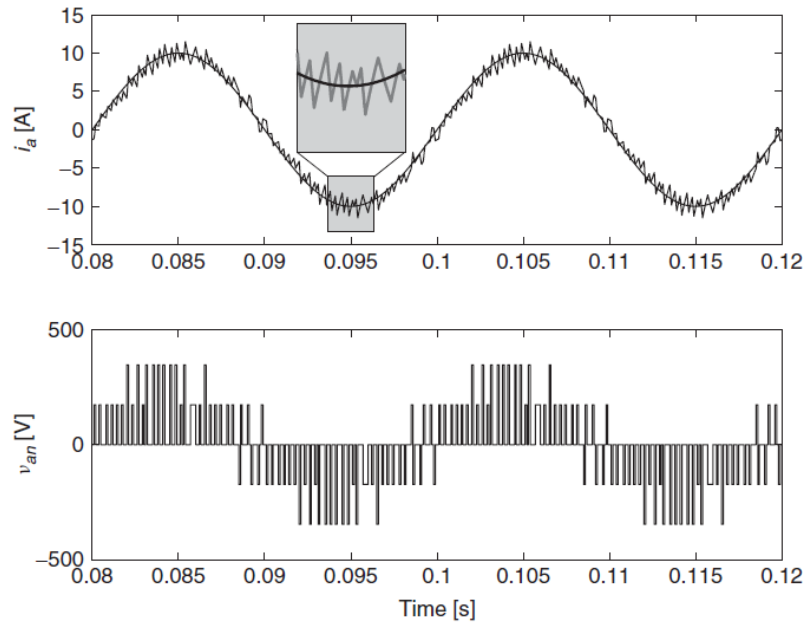


รูปที่ 2.12 แผนภาพอะกอรี่ทิมของการควบคุมกระแสค่าการณ

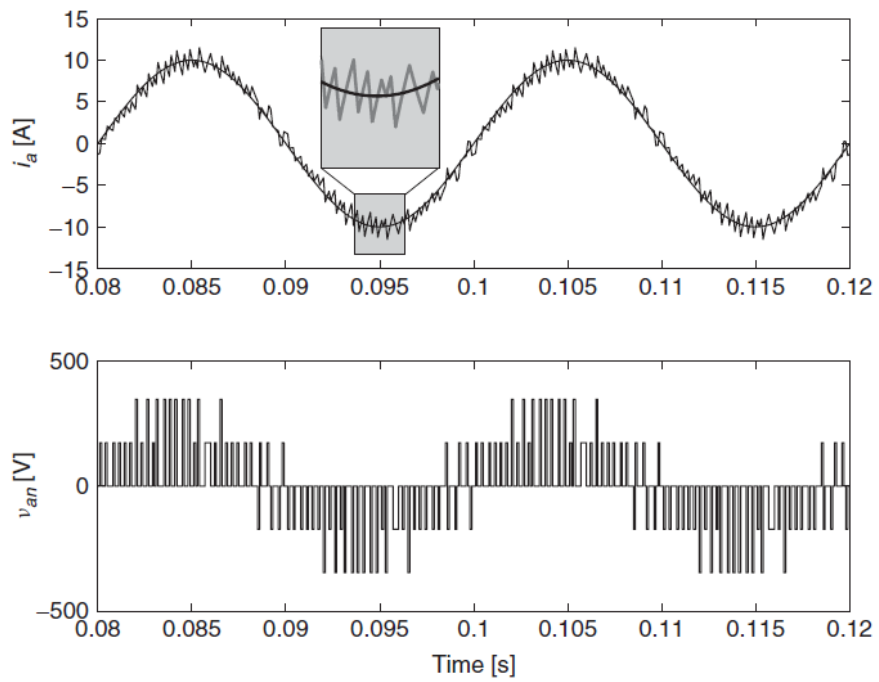


รูปที่ 2.13 เวลาของงานต่าง ๆ

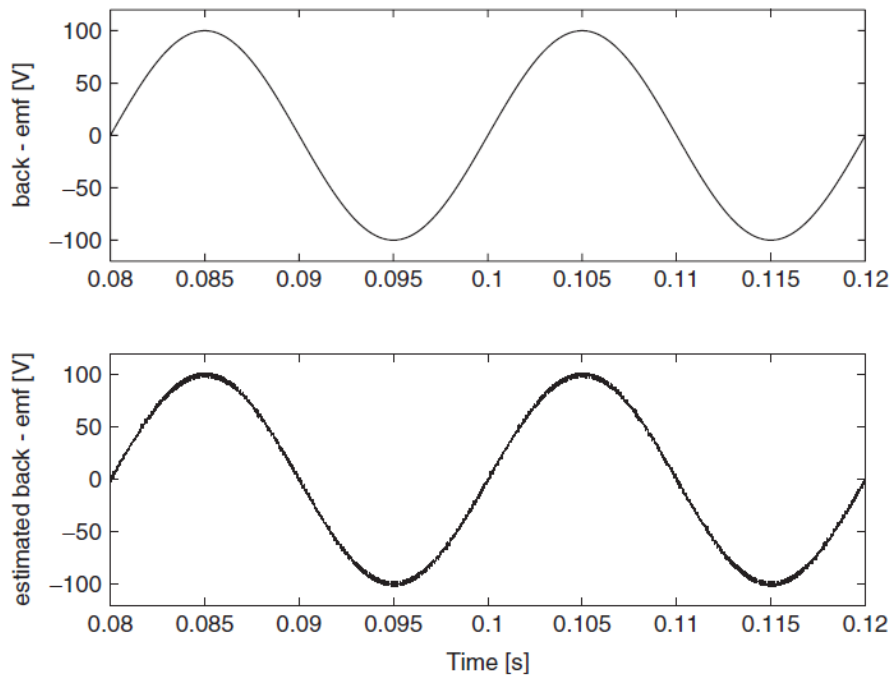
1. การวัดปัจจุบัน
2. การประเมินค่า Back-emf
3. โหลดค่าทำนายปัจจุบันและการเลือก g ที่ดีที่สุด
4. ใช้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 2.14 กระแสโหลดและสถานะแรงดันคงที่สำหรับเวลาการสุ่มตัวอย่าง $T_s = 100 \mu s$



รูปที่ 2.15 กระแสโหลดและสถานะแรงดันคงที่สำหรับเวลาการสุ่มตัวอย่าง $T_s = 25 \mu s$

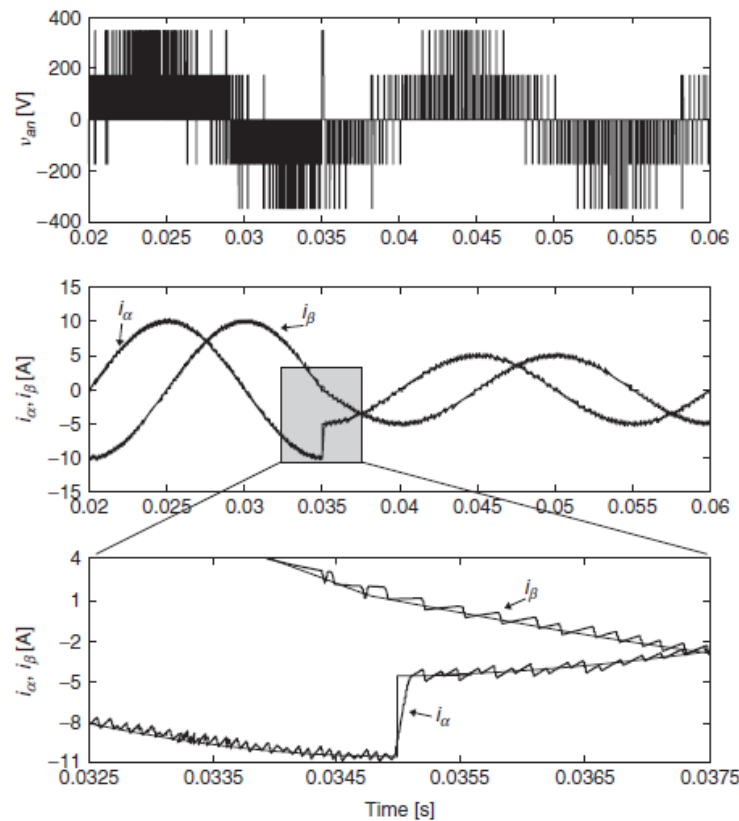


รูปที่ 2.16 ค่าจริงและประมาณการส่วนกลับ

คลื่นนี้จะลดลงอย่างมากเมื่อใช้เวลาสุ่มน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 2.15 สำหรับเวลาการสุ่ม ตัวอย่าง $T_s = 25 \mu s$ อย่างไรก็ตามการลดเวลาการสุ่ม ความถี่ในการสวิตช์ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามที่ได้เห็นได้จากการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากโหนดในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 โดยค่าจริงและค่าประมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) จะแสดงในรูปที่ 2.16 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) ถูกใช้ประมาณการตามสมการ (2.28) โดยมีเวลาในการสุ่ม $T_s = 25 \mu s$ การตอบสนองของระบบไปยังขั้นตอนในแอมพลิจูดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (I_d) แสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่ากระแสโหนดเป็นไปตามค่าอ้างอิงด้วยการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ในรูปนี้ยังแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าจากโหนดเปลี่ยนแปลงอย่างไรในระหว่างขั้นตอนของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

หลักการการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพลิติกที่พญานำมาใช้กับการตั้งค่าการทดลองที่อธิบายไว้ในรูปที่ 2.18 โดยอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสของ Danfoss VLT5008 5.5kW พร้อมโหนด RLถูกนำมาใช้ ซึ่งวงจรเชื่อมโยงทาง DC (DC link) ถูกป้อนโดยวงจรเรียงกระแสไดโอดสามเฟส โดยอินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมจากภายนอกผ่านอินเตอร์เฟสและการดบป้องกัน (IPC) โดย TMS320C6713 floating-point DSP ถูกนำมาใช้สำหรับการควบคุมสัญญาณเกตไดรฟ์ (gate drive) สำหรับขาแต่ละตัวของอินเวอร์เตอร์นั้นถูกส่งจาก DSP ไปยัง IPC ผ่านสายไฟเบอร์อปติก ซึ่งการวัดกระแสไฟฟ้าสองเฟสจะถูกส่งกลับจากอินเวอร์เตอร์ไปยัง DSP ผ่านสายโคแอกเซียล โดย FPGA ซึ่งเป็นแผงวงจรลูก (daughter card) จะจัดการแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล, แปลงดิจิตอลเป็นอนาล็อก และเอาต์พุตดิจิตอลสำหรับ DSP เวลาในการดำเนินการสำหรับขั้นตอนวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าอยู่ประมาณ $7 \mu s$ ส่วนพารามิเตอร์ของการตั้งค่าการทดลองคือ $V_{dc} = 520 V$, $L = 10 mH$, $R = 10 \Omega$, $e = 0V_{peak}$ และ T_s

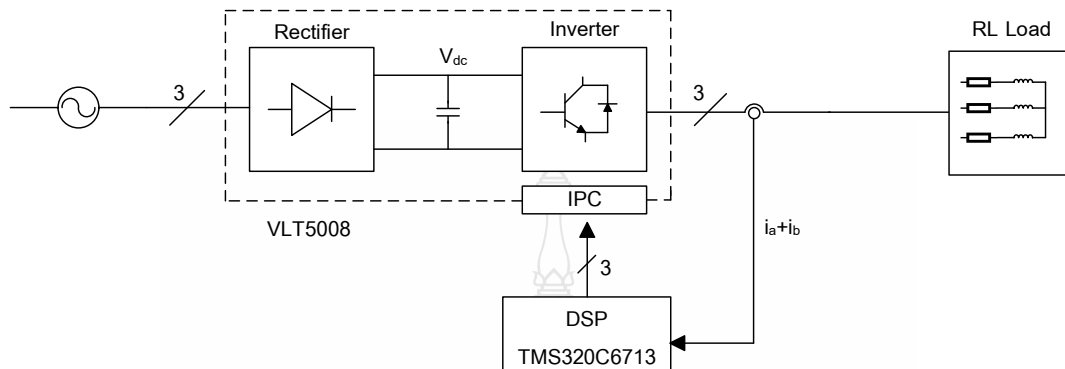
= 25 μ s พฤติกรรมของกระแสไหลและแรงดันไฟฟ้าในเฟสเดียวที่การทำงานของสถานะคงที่แสดงในรูปที่ 2.17 ส่วนแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงถูกตั้งค่าเป็น 10A ที่ความถี่ 50 Hz โดยกระแสไฟฟ้ามี่ Sine ที่มีความเพี้ยนของสัญญาณ Harmonic ต่ำ



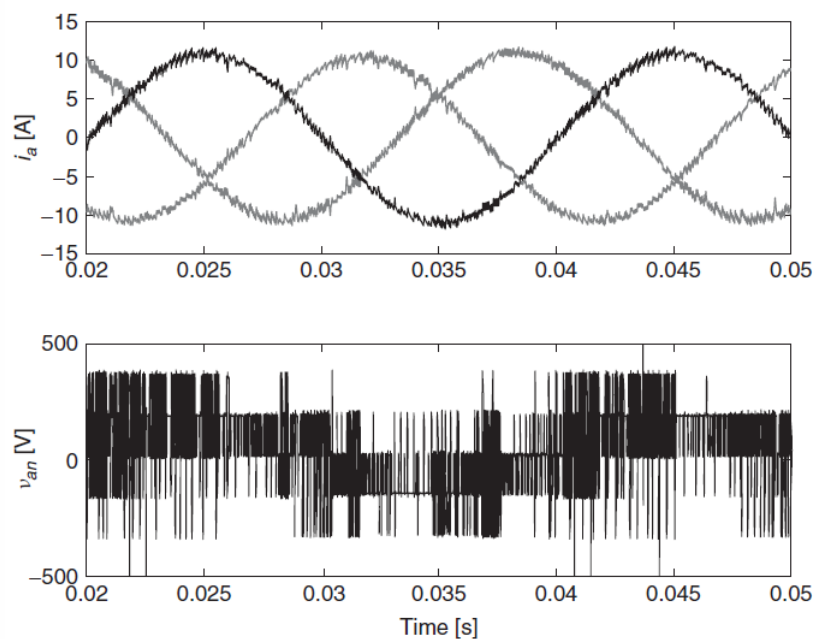
รูปที่ 2.17 โหลดกระแสสำหรับขั้นตอนในแอมพลิจูดของเวกเตอร์ปัจจุบันอ้างอิง ด้วยเวลาการสุ่มตัวอย่าง = 25 μ s

ผลลัพธ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนในแอมพลิจูดของค่าอ้างอิง i_α^* จาก 5 เป็น 10A แสดงในรูปที่ 2.20 ส่วนแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง i_β^* ถูกเก็บไว้ที่ 10 A ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่ากระแสไหลของ i_α ถึงการอ้างอิงด้วยไดนามิกที่เร็วมากในขณะที่ i_β ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าจะถูกแยกออกในรูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิคทีฟ โดยแรงดันไฟฟ้าจากโหลด van สำหรับการทดสอบเดียวกันแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในระหว่างการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนของกระแสไฟฟ้า i_α แรงดันโหลดจะถูกเก็บไว้ที่ค่าสูงสุดจนกว่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงถึงจุดที่กำหนดพฤติกรรมของกระแสไหลและแรงดันโหลดสำหรับขั้นตอนในแอมพลิจูดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าอ้างอิงแสดงในรูปที่ 2.22 แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงเปลี่ยนจาก 10 เป็น 5A และหลังจากนั้นเปลี่ยนจาก 5 เป็น 10A สำหรับทุกเฟสกระแสไฟฟ้า

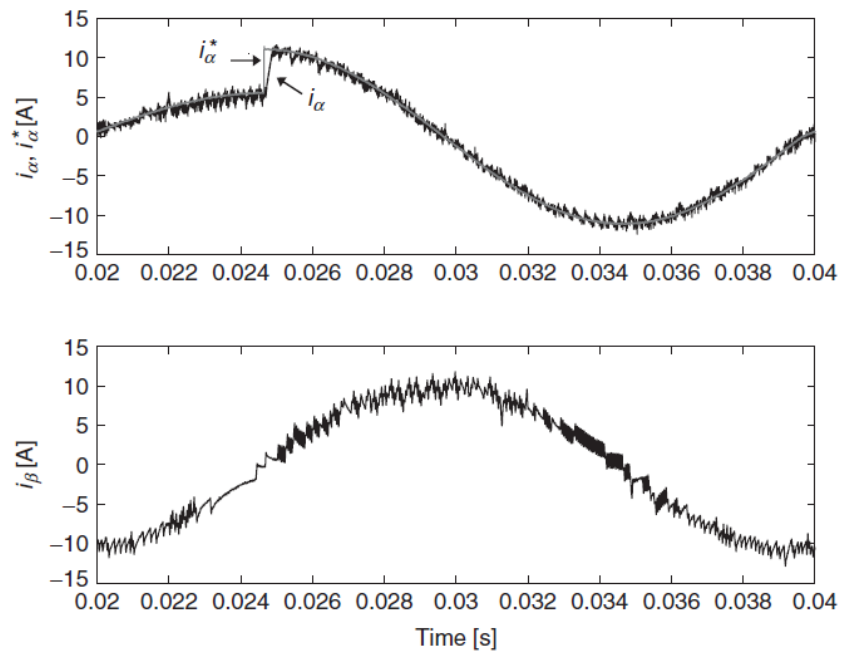
อ้างอิงของ i_a^* ก็แสดงไว้ในรูปภาพด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดของกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหลังจากการเปลี่ยนแปลงของค่าอ้างอิง ซึ่งในรูปยังแสดงให้เห็นแรงดันโหลด V_{an} มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดสอบนี้



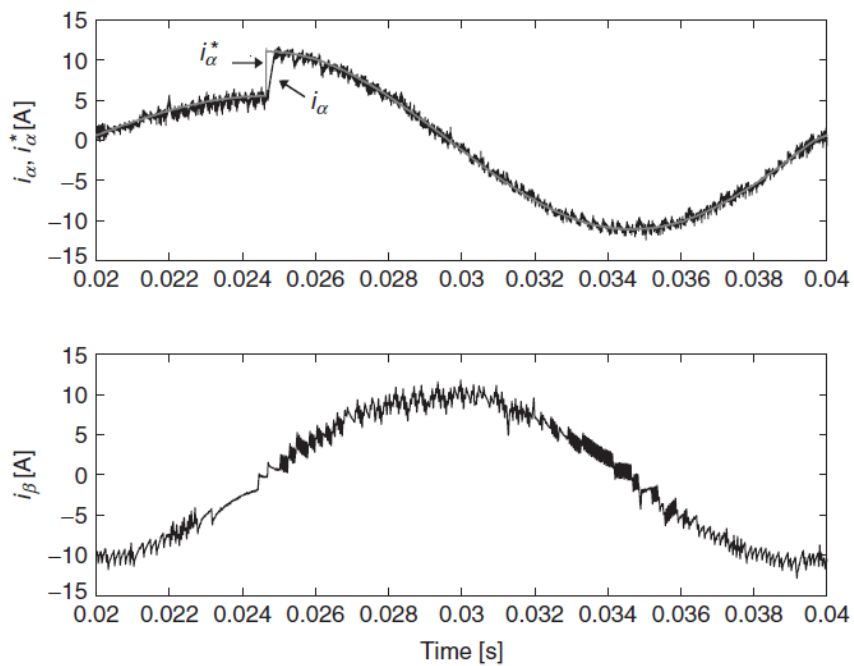
รูปที่ 2.18 แสดงภาพรวมของการตั้งค่าระบบทดลอง



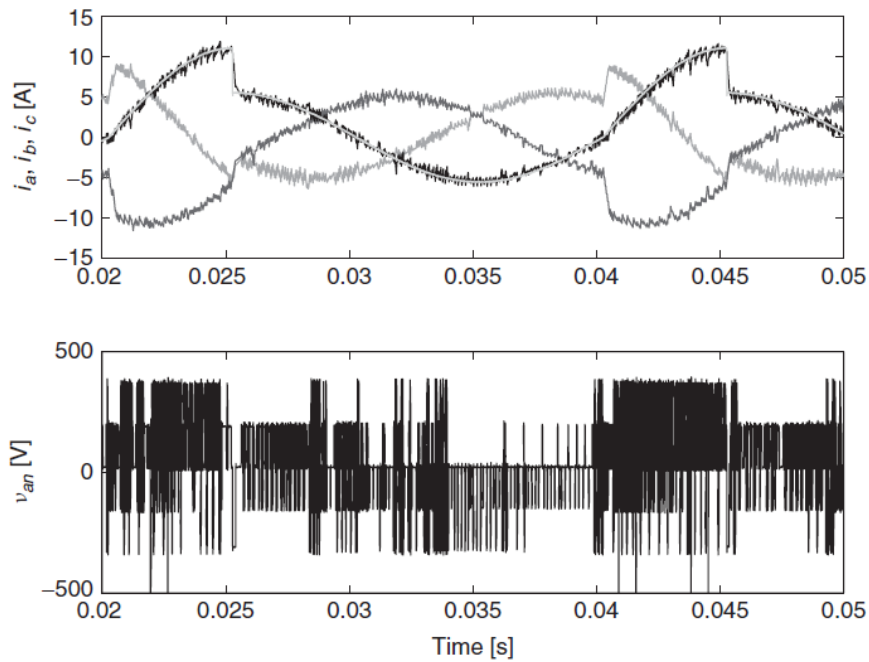
รูปที่ 2.19 ผลการทดลองในสภาวะคงตัว โหลดกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟสเดียวของโหลด



รูปที่ 2.20 ผลการทดลองสำหรับขั้นตอนหนึ่งในแอมพลิจูดของ i_α^* กระแสไหล



รูปที่ 2.21 ผลการทดลองสำหรับขั้นตอนหนึ่งในแอมพลิจูดของ i_α^* โหลดกระแสและแรงดัน

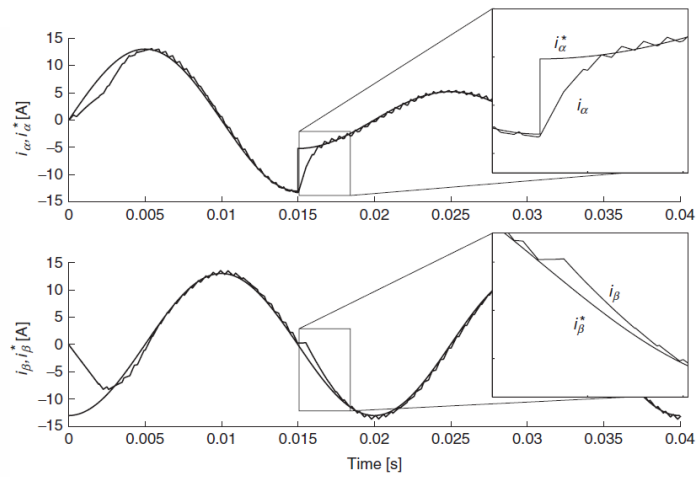


รูปที่ 2.22 ผลการทดลองสำหรับขั้นตอนในแอมพลิจูดของการอ้างอิงโวลต์ปัจจุบัน ภาระกระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟสเดียว

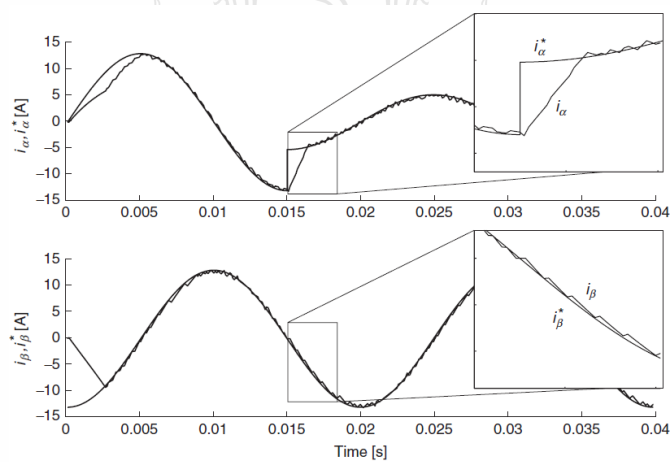
2.4.8 การเปรียบเทียบกับรูปแบบการควบคุมแบบดั้งเดิม

การเปรียบเทียบการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิคทีฟกับการควบคุมแบบดั้งเดิมด้วย PWM แสดงไว้ในรูปที่ 2.23a และรูปที่ 2.24b ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง i_α^* ลดลงจาก 13 เป็น 5.2A ในทันทีที่ $t = 0.015$ s ในขณะที่แอมพลิจูดของกระแส i_β^* คงที่โดยสิ่งนี้ทำเพื่อประเมินความสามารถในการแยกกระแสออกของอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไหลได้รับโดยใช้ตัวควบคุม PI กับ PWM ดังแสดงในรูปที่ 2.23a ที่แสดงให้เห็นความเป็นคู่ระหว่าง i_α และ i_β และการตอบสนองที่ช้าลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าวงปิดสำหรับการทดสอบเดียวกันการตอบสนองของการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิคทีฟแสดงในรูปที่ 2.23b การตอบสนองแบบไดนามิกนั้นรวดเร็วด้วยการแยกส่วนระหว่างองค์ประกอบทั้งสองในกระแสไฟฟ้านอกจากความสามารถในการติดตามค่าอ้างอิงของวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแล้ว การวัดที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สร้างขึ้นโดยอินเวอร์เตอร์ สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าสำหรับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมและแบบพรีดิคทีฟจะถูกเปรียบเทียบในรูปที่ 2.24 สเปกตรัมความถี่ของรูปที่ 2.24a แสดงให้เห็นว่ารายละเอียดของฮาร์โมนิก (harmonic content) ที่สร้างขึ้นเมื่อใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่มีความเข้มรอบความถี่ของการสวิตช์ซึ่งเนื่องจาก PWM ส่วนในรูปที่ 2.24b นำเสนอสเปกตรัมความถี่จากการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิคทีฟสเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าของวิธีการควบคุมแบบพรีดิคทีฟนั้นมีลักษณะเป็นเส้นสเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่องคล้ายกับการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบดั้งเดิม แม้ว่าเส้นสเปกตรัมเหล่านี้จะกระจายมากขึ้นเมื่อช่วงความถี่มากขึ้น และถึงแม้ความถี่การสวิตช์ซึ่งสำหรับการควบคุมแบบพรีดิคทีฟจะแปรผัน แต่ก็ยังคงถูกจำกัดไว้ในความเป็นจริงสถานการณ์การสวิตช์ซึ่งของ

อินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้เพียงครั้งเดียวระหว่างการสุ่มแต่ละครั้ง ดังนั้นความถี่ในการสวิตช์ ซึ่งจะถูกจำกัดเพียงครึ่งหนึ่งของความถี่ของการสุ่ม (f_s) อย่างไรก็ตามสถานการณ์สวิตช์ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงในทุกการสุ่ม ดังนั้นความถี่การสวิตช์ซึ่งโดยเฉลี่ยจะน้อยกว่า $f_s / 2$ เสมอผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของความถี่การสวิตช์ซึ่งมีความเข้มข้นระหว่าง $f_s / 5$ และ $f_s / 4$ นอกจากนี้ความถี่การสวิตช์ซึ่งสามารถถูกควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยน cost function ตามที่จะแสดงในตัวอย่างถัดไป

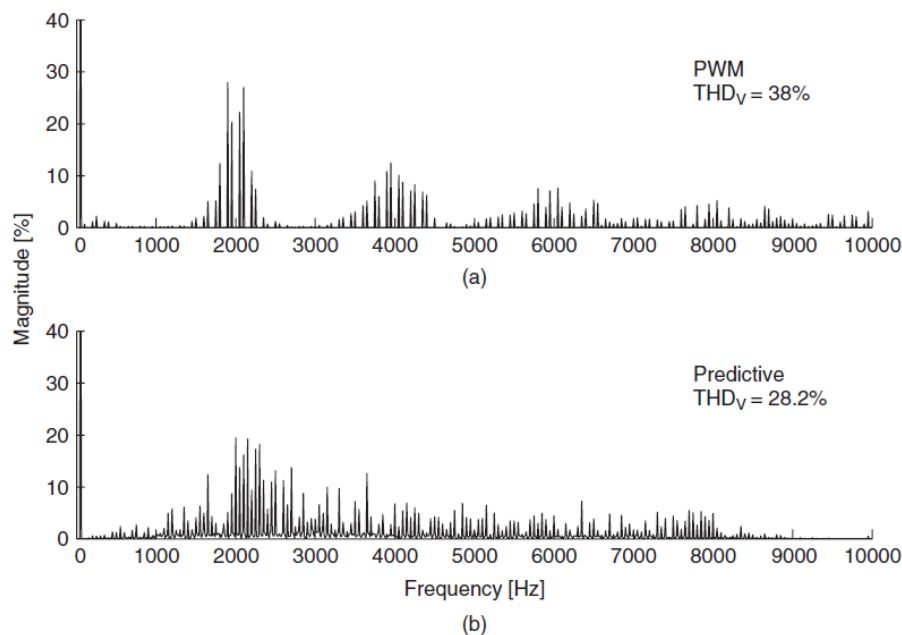


(a)



(b)

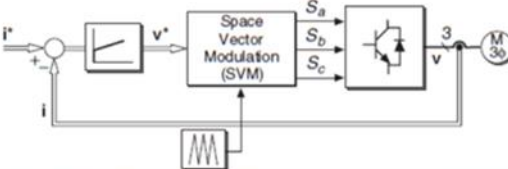
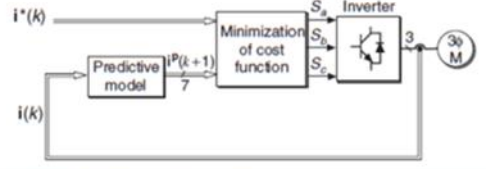
รูปที่ 2.23 ผลลัพธ์สำหรับขั้นตอนในการอ้างอิงปัจจุบัน i_α^* (a) การควบคุมกระแสคลาสสิกด้วย PWM (b) การควบคุมกระแสคาดการณ์



รูปที่ 2.24 สเปกตรัมแรงดันโวลต์

การประเมินหลักการทำงานของระบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบดั้งเดิม และรูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ซึ่งแม้ว่ารูปแบบการควบคุมแบบพรีดิกทีฟจะขึ้นอยู่กับทฤษฎีการควบคุมขั้นสูงมากขึ้น แต่หลักการทำงานของผลลัพธ์นั้นไม่ซับซ้อนไปกว่ารูปแบบดั้งเดิมที่ใช้ตัวควบคุม PI และ SVM การควบคุมทั้งสองรูปแบบต้องการโมเดลของอินเวอร์เตอร์และเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ซึ่งในรูปแบบดั้งเดิมนั้นความรู้เกี่ยวกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าถูกนำมาใช้สำหรับการทำงานของตัวควบคุมกระแส (modulator) สำหรับการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเป็นเซตที่มีจำกัดของการกระตุ้นที่เป็นไปได้ เพื่อปรับตัวควบคุม PI และโมเดลเชิงเส้นของโหลดที่มีความจำเป็นตัวควบคุมแบบพรีดิกทีฟจะคำนวณการทำนายสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละอันโดยใช้แบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องของโหลดซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นแบบเชิงเส้น โดยประสิทธิภาพของตัวควบคุม PI ขึ้นอยู่กับการปรับพารามิเตอร์ k_p และ k_i ที่เหมาะสม ส่วนในรูปแบบการควบคุมแบบพรีดิกทีฟไม่มีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับ แต่ต้องกำหนด cost function ซึ่งในกรณีของการควบคุมกระแสไฟฟ้านั้นง่ายมาก

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการควบคุมกระแสแบบ SVM และ Predictive control

Current Control with SVM	Predictive Control
	
1. SVM uses seven voltage vectors for modulation 2. Linear model $v = Ri + L \frac{di}{dt} + e$	1. MPC uses seven voltage vectors for prediction 2. Load model for prediction (can be nonlinear): $i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (v(k) - \hat{e}(k))$
3. Controller adjustment: $v^* = k_p(i^* - i) + k_i \int (i^* - i) dt$	3. Cost to function: evaluated for each voltage vector: $g = i_a^* - i_a^p + i_\beta^* - i_\beta^p $ with selection of g optimal.
4. Space vector modulation (SVM) $v^* = \frac{1}{T} (v_a t_a + v_b t_b + v_0 t_0)$ $T = t_a + t_b + t_0$	

2.4.9 สรุป

บทนี้แนะนำเสนอหนึ่งในการควบคุมแบบพรีดิกทีฟที่ง่ายที่สุด นั่นคือ การควบคุมกระแสไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์สามเฟส ซึ่งตัวอย่างนี้ช่วยให้เราสามารถแนะนำวิธีการควบคุมนี้ในสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งรูปแบบที่ง่ายของคอนเวอร์เตอร์และโหลดได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้จากนั้นได้มีการอธิบายรายละเอียดของวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ และมีการนำเสนอผลลัพธ์และเปรียบเทียบกับรูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

2.5 เฟสล็อกกลุ่สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้ากริดด้วยวิธี P-Q

ในปัจจุบันได้มีการนำเฟสล็อกกลุ่มาประยุกต์ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้ากริด (Grid-connected Inverter) เนื่องจากความสามารถในด้านการซิงโครไนซ์ที่ความถี่เดียวกันและมุมเฟสที่ตรงกัน รวมทั้งข้อกำหนดของมาตรฐานทางไฟฟ้า อาทิเช่น IEEE 929-2000[31] และ IEC 61727 [32] ที่มีการกำหนดเงื่อนไขของแรงดันและความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เงื่อนไขของการเชื่อมต่อเข้ากริดและการแยกตัวเป็นอิสระ (Islanding) โดยเมื่อพิจารณาจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานซึ่งสามารถแยกประเภทของเฟสล็อกกลุ่ได้ 2 แบบคือเฟสล็อกกลุ่แบบหนึ่งเฟสและสามเฟส

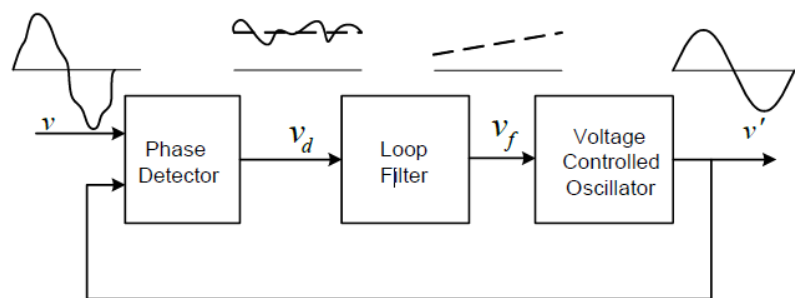
2.5.1 การทำงานของเฟสล็อกกลุ่ประกอบด้วย

2.5.1.1 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกกลุ่การทำงานของเฟสล็อกกลุ่มีบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานดังรูปที่ 2.25 ประกอบด้วย 3 บล็อกดังนี้

2.5.1.2 ตัวตรวจจับเฟส (Phase detector; PD) ทำหน้าที่ตรวจจับความต่างเฟสของสัญญาณ อินพุตและสัญญาณที่ได้จากออสซิลเลเตอร์ สัญญาณความต่างเฟสที่ได้นั้นจะมีองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง

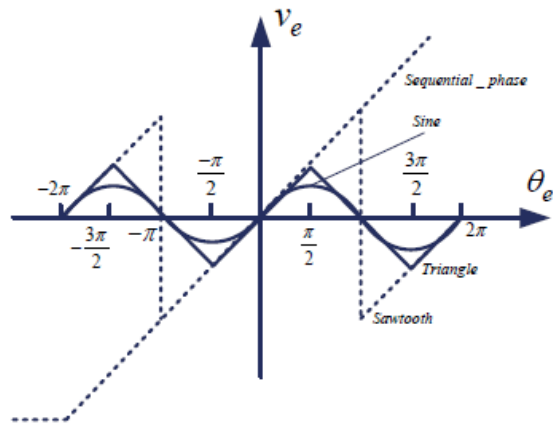
2.5.1.3 ตัวกรองรูป (Loop filter; LF) ทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณความถี่สูง และกรองสัญญาณความถี่ต่ำจากบล็อกตัวตรวจจับเฟสผ่าน ซึ่งนิยมใช้ตัวกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่ง หรือตัวควบคุมพีไอ

2.5.2 ออสซิลเลเตอร์ควบคุม ด้วยแรงดัน (Voltage Control Oscillator; VCO) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับการแรงดันด้านอินพุต



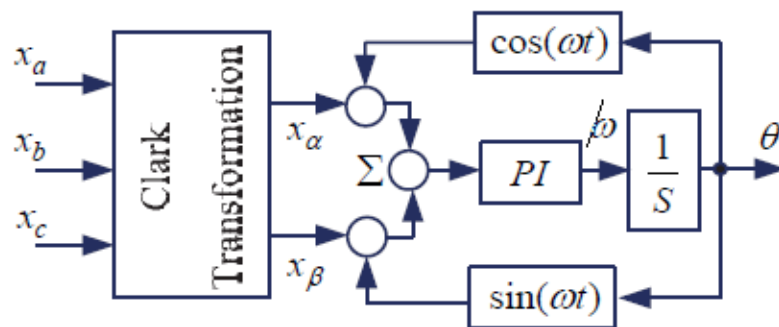
รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกกลูแบบพื้นฐาน

การทำงานของเฟสล็อกกลู เมื่อนำไปใช้งานจริงสามารถสร้างตัวตรวจจับเฟสด้วยตัวคูณสัญญาณ (Multiplier) สร้างตัวกรองรูป ด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอ และสร้างออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันจากตัวอินทิเกรตผ่านฟังก์ชันโคไซน์สัญญาณแรงดันอินพุต (v) ของเฟสล็อกกลูสัญญาณความถี่อ้างอิงภายนอกเป็นสัญญาณรายคาบ (Periodic) เข้ามาที่อินพุตภาคเปรียบเทียบเฟสจะทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณจากภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากภาคเฟสดีเทคเตอร์จะมีลักษณะแรงดันที่มีแอมพลิจูดเป็นสัดส่วนกับผลต่างในเฟสของสัญญาณทั้งสองที่ทำการเปรียบเทียบแรงดันผลต่างนี้ป้อนไปให้วงจรรูปฟิลเตอร์ซึ่งเป็นชนิดโลว์พาสฟิลเตอร์กรองเอาเฉพาะความถี่ที่ต้องการเพื่อส่งไปภาคควบคุมออสซิลเลเตอร์ของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันต่อไปเมื่อลูปอยู่ในสภาพล็อก (Lock) ความถี่ของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุตพอดีอาจจะมีเฟสแตกต่างออกไปแต่ค่าเฟสที่แตกต่างนั้นจะมีค่าคงที่ (Constant Phase Difference) ในกรณีที่มีเฟสไม่ตรงกับภาคเฟสดีเทคเตอร์จะจ่ายแรงดันคลาดเคลื่อน (Error Voltage) ไปควบคุมการทำงานของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันเพื่อไม่ให้เฟสคลาดเคลื่อนจนกว่าจะเข้าสู่สภาพล็อกเอาต์พุตของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันจึงมีแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอแต่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณอินพุตดังภาพที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเกิดสัญญาณลอคความถี่เมื่อเทียบกับไซน์อ้างอิง

การคำนวณหาเฟสล็อกคลูปแบบดิจิตอลเนื่องจากกริดจะมีความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่มูลฐานป้อนมาทำให้การคำนวณผิดพลาด [33 –34] ได้นำเสนอวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำผลจากสมการคลากทรานสฟอร์มใช้วิธีการของ PQ-PLL มาคำนวณดังภาพที่ 2.27

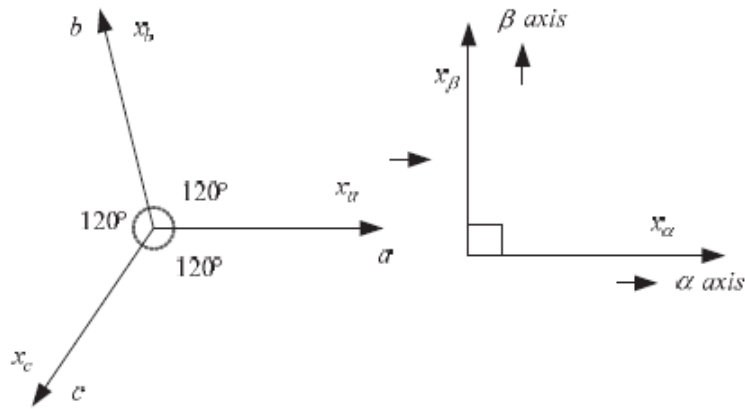


รูปที่ 2.27 เฟสล็อกคลูปด้วยวิธี PQ-PLL

2.5.3 ทฤษฎีการแปลงแกนของปาร์ค-คลาก ทรานสฟอร์ม

ปาร์ค-คลากทรานสฟอร์ม (Park-Clarke Transformation) [35 - 36] การศึกษาพฤติกรรมของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสโดยทั่วไปต้องการทราบค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็นสมการคณิตศาสตร์วิธีการแปลงค่าตัวแปรจะมีสองวิธีคือ

2.5.3.1 คลาก-ทรานสฟอร์ม (Clarke-Transformation) ปริมาณเวกเตอร์แบบสามเฟสสามารถแปลงเป็นเวกเตอร์สองเฟสหมุนบนแกนคงที่ด้วยการใช้วิธีของคลาก-ทรานสฟอร์มแสดงในรูปที่ 2.28 และมีสมการคณิตศาสตร์ดังนี้



รูปที่ 2.28 เวกเตอร์คลาก-ทรานสฟอร์ม

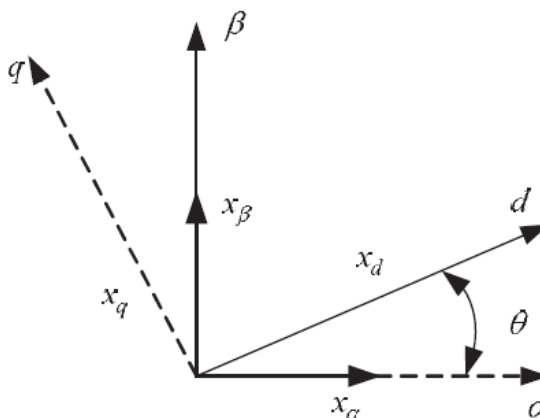
$$V_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} x_{abc} \quad (2.29)$$

เมื่อ x_α , x_β คือปริมาณเวกเตอร์บนแกนหมุนคงที่

x_{abc} คือปริมาณของเวกเตอร์สามเฟส

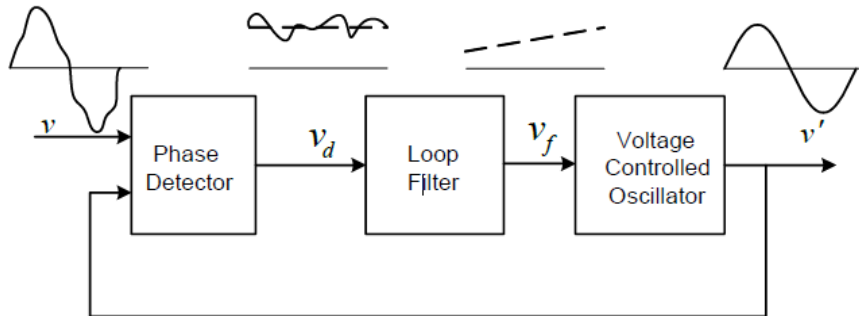
ดังนั้น x_α เป็นค่าที่ซ้อนทับกับ x_a เมื่อรวม $i_a, i_b, i_c = 0$

2.5.3.2 ปาร์ก-ทรานสฟอร์ม (Park-Transformation) ปริมาณแกนอ้างอิงสองเฟสอยู่กับที่สามารถเปลี่ยนเป็นปริมาณแกนหมุนอ้างอิงด้วยวิธีปาร์ก-ทรานสฟอร์มแสดงในรูปที่ 2.29 สามารถคำนวณด้วยสมการดังนี้



รูปที่ 2.29 เวกเตอร์ปาร์ก-ทรานสฟอร์ม

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} X_{\alpha\beta} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.30 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกูปแบบพื้นฐาน

เมื่อ X_d , X_q คือ ปริมาณของเวกเตอร์อ้างอิง

X_α , X_β คือ ปริมาณเวกเตอร์บนแกนหมุนคงที่

θ คือ มุมของการหมุน

2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 A Model Predictive Current Control Method of PMSM Based on the Simultaneous Optimization of Voltage Vector and Duty Cycle งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการทำแบบจำลองการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ (MPCC) ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) โดยอาศัยการจำลองหาค่าที่เหมาะสมของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและการทำงาน (Duty Cycle) คือจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ ในส่วนของวิธีการ MPCC นั้นในช่วงเวลาของทุกๆ active-vector จะถูกคำนวณตามหลักการของการควบคุมกระแสบนแกน q (q-axis) เป็นอันดับแรกจากนั้นทั้งเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและช่วงเวลาของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าจะถูกหาค่าที่เหมาะสมพร้อมกันใน cost function ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบกับการทำงานแบบเดิมของแบบจำลองการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ (MPCC) กับวิธีการของแบบจำลองการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ (MPCC) ที่นำเสนอขึ้นจะทำให้เกิดคลื่นกระแสที่ต่ำกว่าและฮาร์มอนิกส์กระแสน้อยลง

2.6.2 A Predictive Direct Power Control Technique for Transformerless Grid Connected PV Systems Application พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ชนิดกริดไม่มีหม้อแปลงนั้นประหยัดและมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ชนิดมีหม้อแปลง อย่างไรก็ตามพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ชนิดกริดไม่มีหม้อแปลงทำให้เกิดกระแสไฟรั่วสูงซึ่งจะไหล

ระหว่างชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV arrays) กับกริดเนื่องจากความจุไฟฟ้าแฝงในระบบ กระแสรั่วไหลนี้เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง, การอิมิตตัวของหม้อแปลงจำหน่าย และปัญหาด้านความปลอดภัย ซึ่งแรงดันร่วม (CMV) เป็นสาเหตุหลักสำหรับการเกิดของกระแสรั่วไหลนี้ เพื่อจัดการกับปัญหาที่เกิดจากการละเลยการแยกส่วนของการทำงานระบบไฟฟ้าด้วยกลาวานิก (หม้อแปลง) ซึ่งในบทความนี้ได้เสนอการควบคุมพลังงานโดยตรงแบบพรีดิกทีฟ (PDPC) ที่มีแรงดันไฟฟ้าร่วมลดลง (CMV) หรือที่เรียกว่า active zero predictive direct power control (AZ-PDPC) ทั้งทฤษฎีและการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอนั้นช่วยลดระดับของแรงดันไฟฟ้าร่วมลดลง (CMV) พร้อมกับประสิทธิภาพที่ดีโดยทั่วไป ลักษณะของวิธีการที่นำเสนอจะถูกเปรียบเทียบกับเทคนิคการควบคุมพลังงานโดยตรงแบบพรีดิกทีฟ (PDPC)

2.6.3 A Simplified Predictive Current Control for Voltage Source Inverter วิธีการที่สำคัญสำหรับการควบคุมกระแสในอินเวอร์เตอร์แบบฮาร์ดสวิตช์ คือ การเปรียบเทียบแรมป์ (ramp) และการควบคุมฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ซึ่งในอดีตจะเกี่ยวข้องกับตัวควบคุม PI และปัญหาจากประสิทธิภาพต่ำชั่วคราว ต่อมาภายหลังมีความต้องการวงจรแบบอะนาล็อกที่ซับซ้อนเพื่อให้ความถี่การสวิตช์ซึ่งคงที่ บทความนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีการการควบคุมกระแสแบบพรีดิกทีฟที่เข้าใจง่าย และประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ขั้นตอนวิธีการแบบเรียลไทม์จะปรับพารามิเตอร์การเหนี่ยวนำและทำนายค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) ในอนาคต ผ่านค่าความเหนี่ยวนำในสายส่ง และการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) จากนั้นวิธีดังกล่าวจะใช้แบบจำลองพรีดิกทีฟเพื่อทำนายค่าในอนาคตของกระแสโหลดสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปได้ ซึ่งเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่มีค่า quality function น้อยที่สุดจะถูกเลือกและนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ในรอบการควบคุมถัดไป ผลการจำลองการควบคุมกระแสแบบพรีดิกทีฟที่เสนอไปนั้นได้แสดงให้เห็นว่าเป็นขั้นตอนวิธีการที่มีประสิทธิภาพ

2.6.4 Current-Sensor-Based Predictive Current Control of a Synchronous Reluctance Motor Fed by a Six-Switch Three-Phase Inverter ในการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอเซ็นเซอร์วัดกระแสที่ใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ (CSBPCC) ของอินเวอร์เตอร์หกสวิตช์ สามเฟส (SSTP) อินเวอร์เตอร์ที่ป้อนซิงโครนัสรีลักซ์แทนซ์มอเตอร์ (SynRM) โดยทั่วไปแล้วเซ็นเซอร์วัดกระแส 2 ตัวถูกนำไปใช้สำหรับการตรวจจับกระแส a- และ b- เฟสของสเตเตอร์ของระบบขับเคลื่อน ซิงโครนัสรีลักซ์แทนซ์มอเตอร์ SynRM ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาของการสุ่มที่สเตเตอร์ จะทำการอ่านหนึ่งครั้งและการอ่านสองครั้ง หลังจากนั้นรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านมาสามารถบันทึกและจำแนกตามความแตกต่างของสถานะการสวิตช์ซึ่งที่สร้างขึ้นโดยอินเวอร์เตอร์ ต่อจากนั้นกระแสสเตเตอร์ตัวอย่างและรูปแบบกระแสที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้จะถูกใช้เพื่อทำนายกระแสของสเตเตอร์ในอนาคตโดยไม่มีการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-EMF) หรือพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใด ๆ จากนั้นสถานะการสวิตช์ซึ่งครั้งต่อไปจะถูกเลือกจาก cost function ที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยตรงในช่วงเวลาการสุ่มครั้งต่อไป เพื่อวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบการควบคุมกระแสฮิสเทอรีซิส (hysteresis) แบบดั้งเดิม (HCC) และการควบคุมกระแสแบบพรีดิกทีฟที่เสนอนั้นถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการติดตามกระแสไฟฟ้า

2.6.5 H-Bridge(Model Predictive Current Control with Neutral Current Elimination for H-Bridge Two-Level Active Power Filters) ในบทความนี้คือการนำเสนอรูปแบบวิธีการชดเชยกำลังรีแอกทีฟและการกำจัดกระแสไฟฟ้าที่ชั่ววินตรอนตามแบบจำลองการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ และในบทความนี้จะนำเสนอวงจรกรองกำลังแอกทีฟ หรือวงจรกรองกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานได้จริงที่เป็นวงจรกรองกำลังสองระดับ สี่สาย แบบ H-bridge คุณสมบัติหลักที่บทความนี้มุ่งนำเสนอ คือ การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และการกำจัดกระแสไฟฟ้าที่ชั่ววินตรอนสำหรับกรณีที่โหลดไม่สมดุลเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าวิธีการนี้จะทำนายพฤติกรรมในอนาคตของการควบคุม ที่พิจารณาจากสถานะการสวิตซ์ซึ่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยวิธีที่นำเสนอจะเลือกเวกเตอร์สวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาจาก cost-function ที่กำหนดไว้

2.6.6 Implementation of Predictive Current Control for Shunt Active Power Filter โดยมีการนำเสนอ โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่เสื่อมคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยฮาร์มอนิกและกระแสรีแอกทีฟที่จุดต่อร่วมของทั้งสอง บทความนี้ขอเสนอหลักการการควบคุมกระแสแบบพรีดิกทีฟที่นำไปใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อพัฒนาคุณภาพกำลังพลังงานวิธีที่เสนอนี้ใช้แบบจำลองระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา เพื่อทำนายค่าในอนาคตของวงจรกรองกระแสสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดมีวัตถุประสงค์ เพื่อลดข้อผิดพลาดระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ถูกทำนายไว้โดยใช้ค่า cost-function โดยมีขั้นตอนการควบคุมที่นำเสนอด้วยโปรแกรม Matlab \ Simulink (TM) วิธีการจำลอง และผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพและความเสถียรภาพของวิธีการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ และเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกระแสฮิสเทรีซิสในทุกโหมดการทำงาน

2.6.7 In direct Model Predictive Current Control Techniques for a Direct Matrix Converter เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์แบบแปลงทางตรงมีสถานะการสวิตซ์ซึ่งที่เกิดขึ้นได้ 27 ครั้ง ซึ่งหมายความว่า การประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบพรีดิกทีฟในคอนเวอร์เตอร์นี้ต้องใช้ต้นทุนการคำนวณสูง ในขณะที่ต้องทำการเลือกตัวประกอบค่า cost function เพื่อควบคุมทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตของตัวแปลงโดยได้เสนอหลักการแบบจำลองการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟทางอ้อมสองรูปแบบ เพื่อลดความซับซ้อนของต้นทุนการคำนวณ และหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับแนวคิด dc-link ที่สมมุติขึ้นที่ถูกนำมาใช้ในอดีต สำหรับการมอดูเลชันแบบดั้งเดิมและเทคนิคการควบคุมของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ แบบแปลงทางตรงผลการจำลองยืนยันความเป็นไปได้ด้วยเทคนิคที่ได้นำเสนอดังกล่าวที่แสดงให้เห็นว่าเป็นเทคนิคที่เป็นทางเลือกที่ใช้ในการควบคุมกระแสแบบพรีดิกทีฟแบบดั้งเดิมสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์แบบแปลงทางตรง

2.6.8 Predictive Current Control Operating at Fixed Switching Frequency in a Grid-Connected NPC Converter บทความนี้ ได้กล่าวเกี่ยวกับการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟที่มีความถี่การสวิตซ์ซึ่งคงที่สำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แคลมป์ที่จุดนิวทรัลที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า วิธีนี้ใช้สเปซเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าสามตัวในทุกช่วงเวลาของการสุ่มและคำนวณรอบการทำงานโดยใช้ cost function ซึ่งค่า current errors กับแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลคือเกณฑ์การควบคุม ในขณะที่ความถี่ การสวิตซ์ซึ่งคงที่และถูกกำหนดโดยระยะเวลาของการสุ่ม ผล

การจำลองในบทความนี้แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และการวัดกระแสอย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 3

รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลังงานไฟฟ้าขณะที่โหลดมีความต้องการพลังงานไฟฟ้า ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังนั้นคือการใช้ไฟฟ้าที่ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งในขณะที่มีการผลิตไฟฟ้านั้นไม่สามารถผลิตแล้วเก็บรักษาไว้ใช้ได้โดยวิธีง่ายๆจึงต้องผลิตและจัดส่งจ่ายเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้เท่านั้นทำให้ไม่สามารถผลิตออกมาเต็มกำลังผลิตได้ และในขณะเดียวกันก็ไม่สามารถลดขีดความสามารถของการผลิตและส่งจ่ายสูงสุดลงได้เนื่องจากถ้ามีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อใดแล้วไม่สามารถส่งจ่ายให้ผู้ใช้ได้ตามความต้องการ อาจทำให้ความเสียหายให้กับผู้ใช้และอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ซึ่งจะกระทบถึงผลทางเศรษฐศาสตร์โดยรวมได้ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาวิเคราะห์เพื่อคำนวณการใช้ไฟฟ้าเพื่อหาจุดที่เหมาะสมกับความต้องการในช่วงเวลานั้นๆคือต้องวิเคราะห์เกี่ยวกับโหลดและลักษณะการใช้นั้นเอง การผลิตกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นถูกกำหนดโดยผู้ใช้ไฟฟ้าหรือลูกค้าซึ่งถือว่าเป็นโหลดของระบบแต่การใช้ไฟฟ้านั้นมิได้คงที่อยู่ทุกขณะ ปริมาณการใช้สูงบ้างต่ำบ้างในช่วงเวลาหนึ่งไม่มีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการจัดระบบผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมเพราะสิ่งสำคัญคือจะต้องพยายามรักษาระดับแรงดันในการส่งจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงหรือต่ำเกินไป จนเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้โดยจะต้องมีการวางแผนและจัดโปรแกรมการเดินเครื่องหรือหยุดเดินเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องให้เหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาหรือถ้ามองในแง่ของเศรษฐศาสตร์วิธีการดังกล่าวยังช่วยให้เกิดความประหยัดเช่นในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยๆ ก็ไม่จำเป็นต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพร้อมกันทุกเครื่องซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้จัดหาแหล่งพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้ในช่วงที่โหลดผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการพลังงานสูงสุดเพื่อที่เป็นการลดต้นทุนของการผลิต โดยสิ่งที่ผู้วิจัยมีความสนใจและจะนำเสนอคือแหล่งที่มาของพลังงานที่ได้มาจากแสงอาทิตย์และวิธีการที่จะควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีความเหมาะสมและมีขีดความสามารถที่จะเชื่อมต่อกับกริดได้ โดยผู้วิจัยจึงได้ทำการวิธีการทดลองดังนี้

ในขณะที่มีแหล่งจ่ายแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายไฟร่วมกับกริดโดยอาศัยวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์โดยการเลียนแบบจากงานจริงที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 แหล่ง คือ 1)แหล่งจ่ายที่ได้จากกริด 2)แหล่งจ่ายที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีชุดอินเวอร์เตอร์ เป็นตัวกลางเข้ามาต่อเชื่อมทั้ง 2 ระบบเข้าด้วยกัน แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังโหลดโดยใช้วิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า เพื่อสร้างสัญญาณการควบคุมการทำงานและส่งมาควบคุมยังสวิตช์ทั้ง 6 ตัวของชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 แรงดันเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกเป็นไปตามขนาดของเวกเตอร์แรงดันที่มีการคำนวณไว้ โดยในวิธีการทดลองในบทนี้ได้มีการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าไว้ที่ขนาด 5, 7 และ 10 แอมแปร์ แล้วสังเกตค่ากระแสไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ล่วงหน้าหรือไม่และมีการส่งผลกระทบต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงอย่างไร โดยมีขั้นตอนการศึกษาวิจัย ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ

การดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลา											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. จัดหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย												
2. หาวิธีการที่ใช้ในการทดลอง												
3. ออกแบบขั้นตอนในการดำเนินการ												
4. สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์												
5. ทดลองและแก้ไข												
6. สรุปผลการทดลอง												

3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า โดยสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของปัญหาด้านกำลังไฟฟ้า

3.1.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าและวิธีการต่าง ๆ

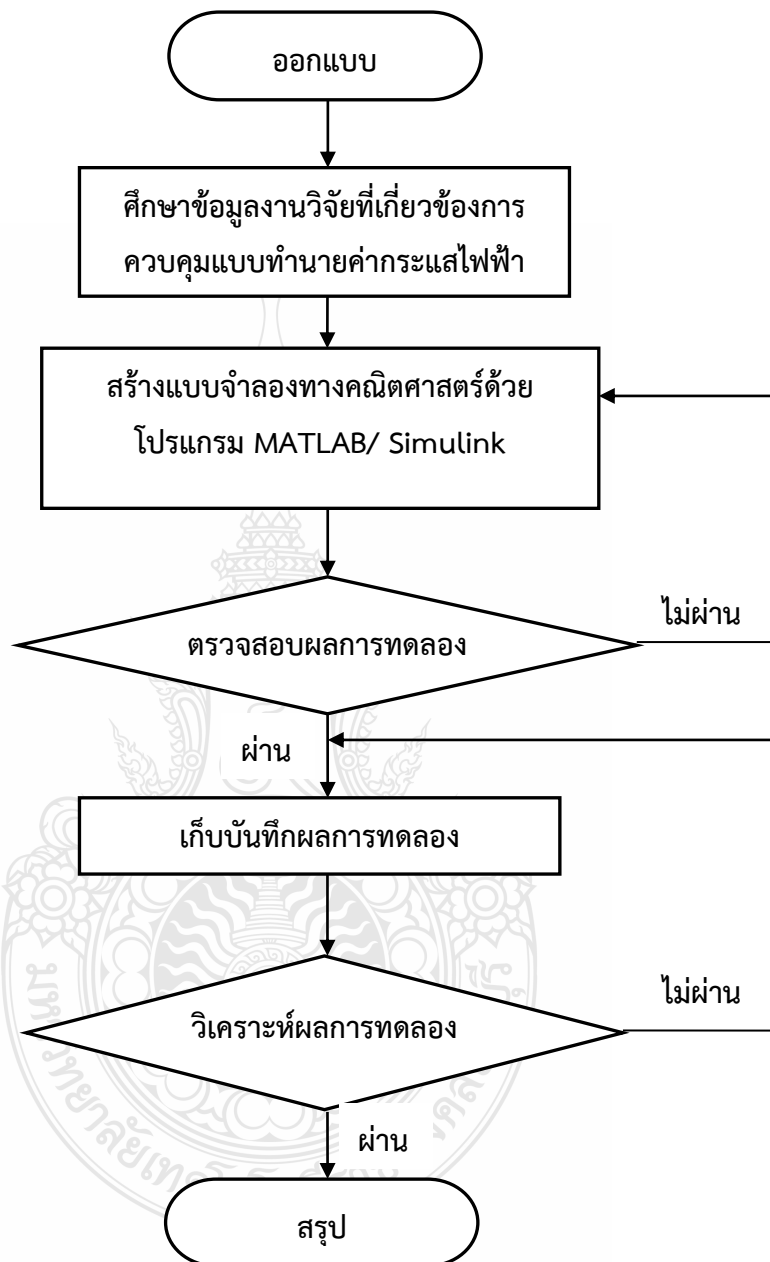
3.1.3 ออกแบบและสร้างโมเดลของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า ในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

3.1.4 วิเคราะห์การชดเชยกำลังไฟฟ้า แบบทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้า

3.1.5 สรุปวิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการวิจัย

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

เพื่อศึกษาเทคนิควิธีการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ด้วยเทคนิควิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า มีลำดับขั้นตอนการศึกษาดำเนินการวิจัย ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1



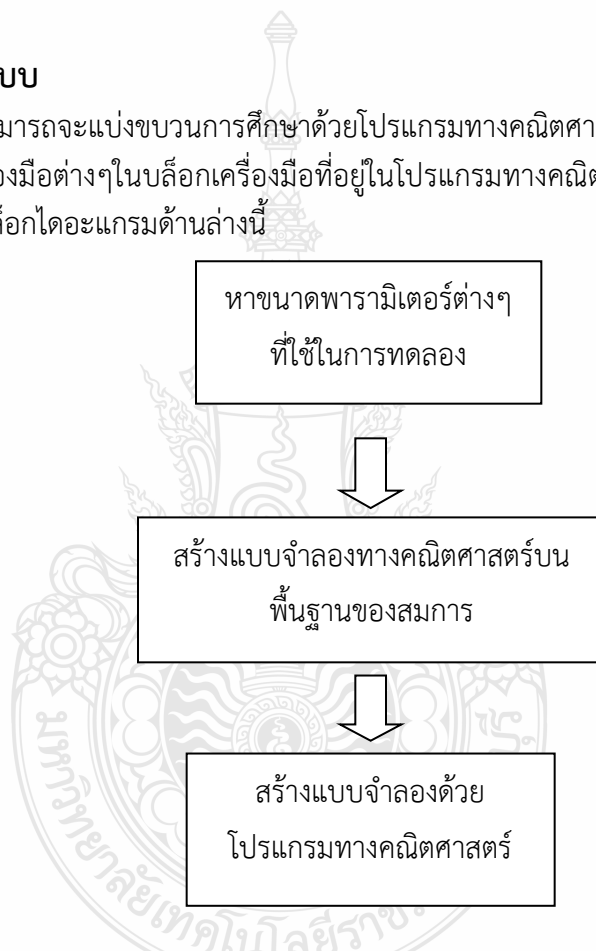
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการวิจัย

จากโครงสร้างที่ 3.1 เราสามารถออกแบบขบวนการที่ใช้ควบคุมการทำงานที่เราตั้งสมมุติฐานไว้ โดยได้กำหนดค่าตัวแปรต่างๆไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะขอล่าวในย่อหน้าต่อไป ผู้วิจัยได้ทบทวนตามขั้นตอนที่

จะทดลองจึงได้ออกแบบการจำลองขบวนการชดเชยค่าความต้องการของกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยเทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 3.2 เพื่อลดความซับซ้อนลงในเรื่องของการสร้างและการทำความเข้าใจในระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องหมายรวมถึงค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่างๆที่เป็นการอธิบายพฤติกรรมบางอย่างด้วย และสามารถที่จะอธิบายถึงการเชื่อมโยงกับแบบจำลองที่มีอยู่ 3 ขั้นตอนในการทดลองคือการสร้างแบบจำลองการค้นหาพฤติกรรมและการประเมินผลโดยจะใช้เครื่องมือที่จะอธิบายและวิเคราะห์คือโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการอธิบาย

3.3 ขั้นตอนการออกแบบ

ในส่วนนี้เราสามารถจะแบ่งขบวนการศึกษาด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ได้เป็น 3 ส่วน เพื่อจะเป็นต้นแบบในการใช้เครื่องมือต่างๆในบล็อกเครื่องมือที่อยู่ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์จะได้ทำงานได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น ดังบล็อกไดอะแกรมด้านล่างนี้

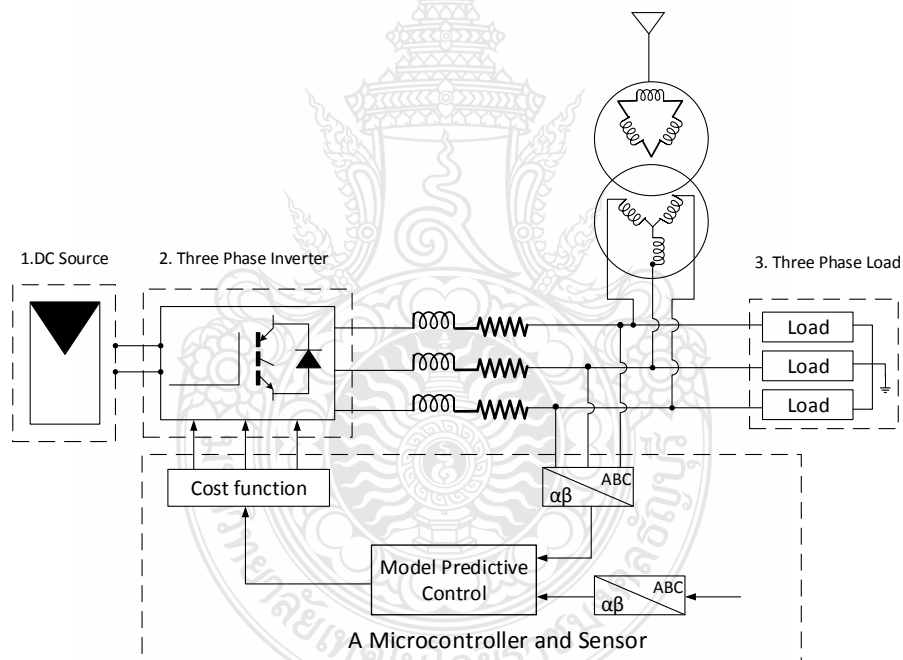


รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้เราสามารถที่จะสร้างขั้นตอนของระบบโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ได้ตามอัลกอริทึมได้ และที่จะสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิสูจน์หลักการทางของรูปแบบที่กำหนดขึ้นให้สอดคล้องกับรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟ โดยมีแหล่งจ่ายจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายขนานเพื่อช่วยความต้องการกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าให้มีปริมาณที่น้อยลงจากเดิมที่มีการจ่ายไฟฟ้าตามปกติโดยมีส่วนประกอบที่มีส่วนสำคัญในการทดลองนี้ประกอบด้วย

- 1.แหล่งจ่ายที่ได้จากกริดในที่นี้คือ หม้อแปลง
- 2.แผงโซลาร์เซลล์
- 3.ชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน
- 4.เฟสล็อกกลูป
- 5.ชุดควบคุมพรีดิคทีฟ

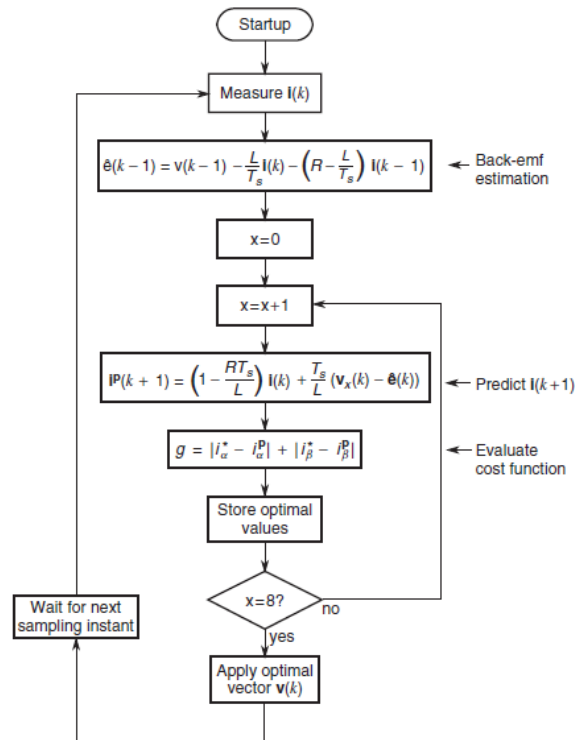
ส่วนประกอบที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งในบทที่ 3 นี้จะขอก้าวถึง ขบวนการทดลองที่ใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์โดยมีหัวใจหลักในการทดลอง เพื่อสังเกตกำลังไฟฟ้าที่กริด ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้ามาที่โหลดโดยมีแหล่งจ่ายแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายร่วมอยู่ด้วย โดยมีชุด อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าตรงให้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับโดยได้รับคำสั่งควบคุมกระแสไฟฟ้า แบบทำนายล่วงหน้าเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 ตัวให้ทำงานอย่างถูกต้อง ดังแสดงโครงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างแสดงส่วนประกอบงานวิจัย

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าหัวใจหลักของงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นรูปแบบเฉพาะวิธีการควบคุม อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 แรงดันที่ต่อขนานร่วมกับกริดของการไฟฟ้าใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้า

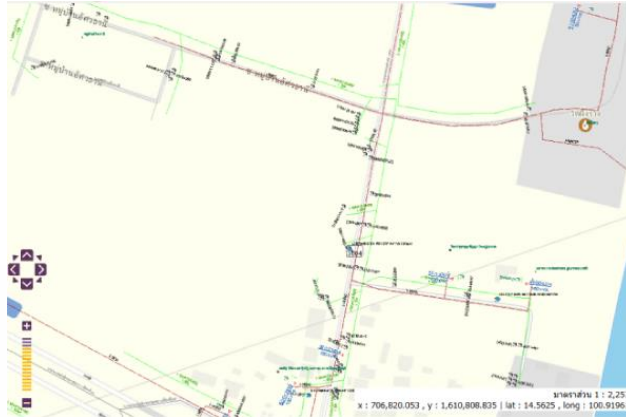
แบบทำนายล่วงหน้า ที่เป็นตัวกำหนดหน้าที่ของสวิตช์ซึ่งทั้ง 6 ตัว ให้ทำงานตามสมการเวกเตอร์ของแรงดัน โดยสามารถที่จะเขียนอัลกอริทึมได้ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองของระบบ

3.4 การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ทดลอง

จากการทดลองเราสามารถที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ทฤษฎีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้าด้วยการทำงานของชุดแปลงพลังงานชนิด 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน (อินเวอร์เตอร์) ซึ่งในการจำลองด้วยวิธีนี้เราสามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้ใกล้เคียงกับสภาพสถานที่จ่ายกระแสจริงดังแสดงในรูปที่ 3.5

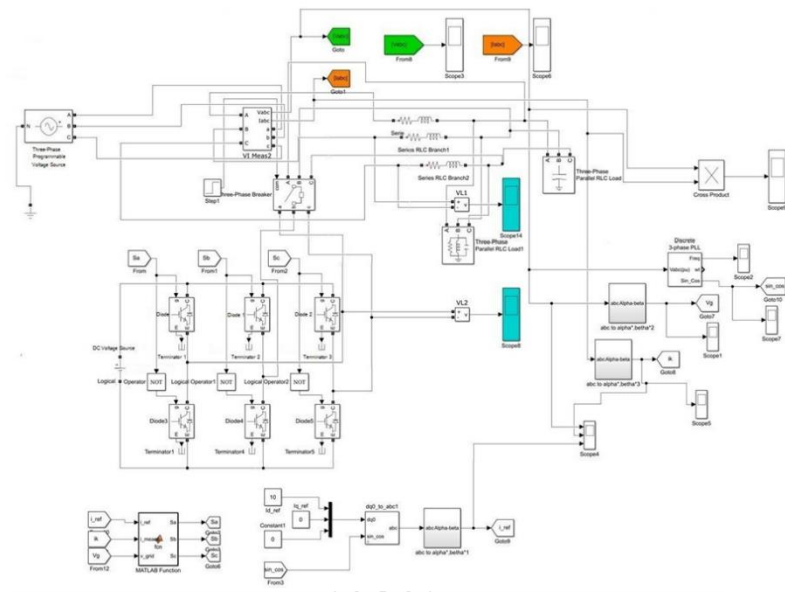


รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการจากกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงขนาด 50 เควีเอ.

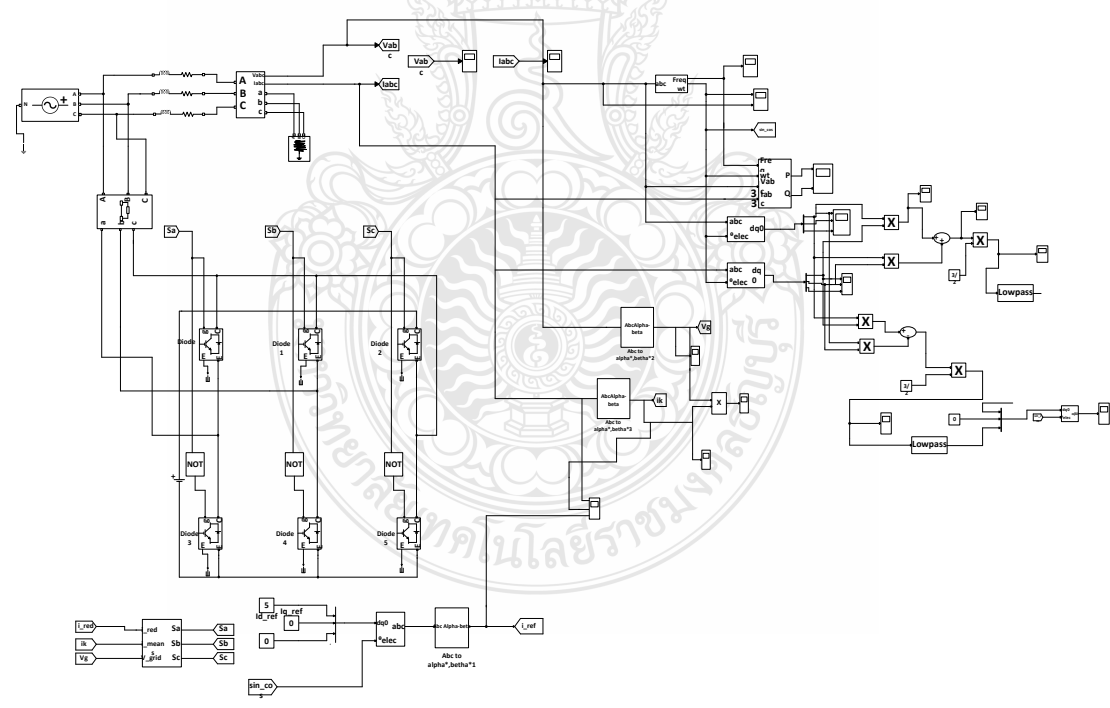
จากรูปที่ 3.2 เราสามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับขบวนการทดลองที่จะต้องใช้เป็นข้อมูลตั้งต้น เพื่อที่เป็นค่าพารามิเตอร์ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	ขนาด/หน่วยวัด
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แผ่นโซล่าเซลล์	600 V_{dc}
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกที่อินเวอร์เตอร์	380 V_{ac}
แหล่งจ่ายแรงดันที่กริด	380 V
กำลังไฟฟ้าของกริด	50 KVA
ความต้านทานสายตัวนำ (R)	0.5 Ω
ตัวเหนี่ยวนำ (L)	10 mH
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ	25 μsec
กระแสอ้างอิง	5,7,10 A
กระแสจริง	5,7,10 A



(ก)



(ข)

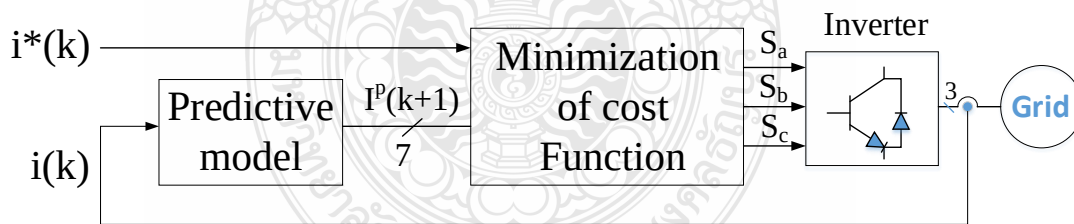
รูปที่ 3.6 โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า

3.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การควบคุมกระแสไฟฟ้า คือการลดข้อผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่ากระแสที่ใช้ อ้างอิง ความต้องการนี้สามารถเขียนได้ในรูปแบบของ Cost Function โดย Cost Function แสดงด้วย พิกัดมุมฉากและวัดข้อผิดพลาดระหว่างค่าการอ้างอิงกับกระแสไฟฟ้าที่ทำนาย:

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \quad (3.1)$$

เมื่อ $i_{\alpha}^p(k+1)$ และ $i_{\beta}^p(k+1)$ เป็นค่าจำนวนจริงและค่าจินตภาพของการทำนายเวกเตอร์ กระแสไหลต $i^p(k+1)$ สำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด การทำนายนี้ทำได้โดยใช้แบบจำลองไหลต ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในส่วนต่อไป โดยที่กระแสไฟฟ้าอ้างอิง $i_{\alpha}^*(k+1)$ และ $i_{\beta}^*(k+1)$ เป็นค่า จำนวนจริงและค่าจินตภาพของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าอ้างอิง $i^*(k+1)$ เพื่อความง่ายเราจะสมมุติว่า กระแสไฟฟ้าอ้างอิงนี้ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาการสุ่ม ดังนั้นเราจะพิจารณา $i^*(k+1) = i^*(k)$ โดย สมมติฐานนี้อาจแนะนำใช้กับ sample delay 1 ตัว ในการติดตามค่าอ้างอิง ซึ่งไม่ได้เป็นปัญหาหากความถี่ ในการสุ่มจะถูกนำมาพิจารณาด้วย ส่วนในกรณีอื่น ๆ เป็นไปได้ที่จะคาดการณ์ค่าอ้างอิงในอนาคตการอ้างอิง นี้ถูกสร้างขึ้นจากหลักการควบคุมภายนอก เช่น การควบคุมแบบ field-oriented หรือการควบคุมแบบ เวกเตอร์ของเครื่องเหนี่ยวนำ บล็อกไดอะแกรมของหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟที่ใช้กับการควบคุม กระแสไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยแสดงในรูปที่ 3.7 การควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถดำเนินการ ใน 4 ขั้นตอน ดังที่อธิบายไว้ในรูปที่ 3.7



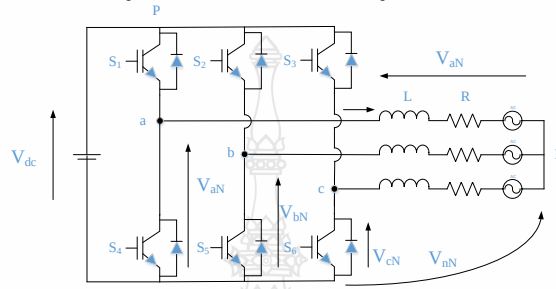
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพรีดิกทีฟ

1. ค่าของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง เท้ากับ $i^*(k)$ ที่ได้มาจากลูปควบคุมภายนอก และค่ากระแสไหลต ที่วัดได้ $i(k)$
2. แบบจำลองของระบบจะถูกใช้ในการทำนายค่าของกระแสไหลตในช่วงการสุ่มถัดไป $i(k+1)$ สำหรับแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน
3. ใช้ cost function g ประเมินข้อผิดพลาดระหว่างค่าการอ้างอิงและกระแสที่ทำนายได้ในช่วง การสุ่มถัดไปสำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละอัน

4. เลือกแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในกระแสน้อยที่สุด และสอดคล้องกับสัญญาณสถานการณ์สวิตช์ซึ่ง ที่จะถูกสร้างขึ้น

วงจรการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน

วงจรพลังงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะแปลงพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยใช้รูปแบบไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เมื่อพิจารณาว่าสวิตช์ 2 ตัวในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมด complementary เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของแหล่งจ่ายกระแสตรง (DC) โดยสถานการณ์สวิตช์ซึ่ง ของสวิตช์ S_x มี $x = 1, \dots, 6$, สามารถแทนได้ด้วยสัญญาณสวิตช์ S_a , S_b และ S_c ที่กำหนดดังนี้:

$$S_a = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ is On \& } S_4 \text{ is Off} \\ 0 & S_1 \text{ is Off \& } S_4 \text{ is On} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ is On \& } S_5 \text{ is Off} \\ 0 & S_2 \text{ is Off \& } S_5 \text{ is On} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ is On \& } S_6 \text{ is Off} \\ 0 & S_3 \text{ is Off \& } S_6 \text{ is On} \end{cases} \quad (3.4)$$

สัญญาณสวิตช์เหล่านี้กำหนดค่าเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้า

$$V_{aN} = S_a V_{dc} \quad (3.5)$$

$$V_{bN} = S_b V_{dc} \quad (3.6)$$

$$V_{cN} = S_c V_{dc} \quad (3.7)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อพิจารณาถึงเวกเตอร์ที่รวมกัน $a = e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ ซึ่งแสดงถึงมุมระหว่างเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 120 องศา เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$V = \frac{2}{3}(V_{aN} + aV_{bN} + a^2V_{cN}) \quad (3.8)$$

เมื่อ V_{aN} , V_{bN} และ V_{cN} เป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสกับนิวทรัล (N) ของอินเวอร์เตอร์ ด้วยวิธีนี้สถานการณ์สวิตช์ซึ่ง $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$ สร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_0 ที่กำหนดเป็น

$$V_o = \frac{2}{3}(0 + a0 + a^20) = 0 \quad (3.9)$$

สถานการณ์สวิตช์ซึ่ง $(1, 0, 0)$ สร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_1 ที่กำหนดเป็น

$$V_1 = \frac{2}{3}(V_{dc} + a0 + a^20) = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (3.10)$$

เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_2 ถูกสร้างขึ้นโดยสถานการณ์สวิตช์ซึ่ง $(1, 1, 0)$ และถูกกำหนดเป็น

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{2}{3}(V_{dc} + aV_{dc} + a^20) \\ &= \frac{2}{3}\left(V_{dc} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_{dc}\right) = \frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc} \end{aligned} \quad (3.11)$$

สถานการณ์สลับ $(1, 1, 1)$ สร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_7 ที่คำนวณเป็น

$$V_7 = \frac{2}{3}(V_{dc} + aV_{dc} + a^2V_{dc}) = \frac{2}{3}V_{dc}(1 + a + a^2) = 0 \quad (3.12)$$

สถานการณ์สวิตช์ซึ่งที่แตกต่างกันจะสร้างการกำหนดค่าที่แตกต่างกันของโหนดสามเฟสที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC) เมื่อพิจารณาการรวมกันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของสัญญาณ gating S_a , S_b และ S_c ซึ่งใช้อุปกรณ์การสวิตช์ซึ่ง 8 ตัว และส่งผลให้ได้รับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 8 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 สังเกตว่า $V_0 = V_7$ ส่งผลให้ชุดเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันมีเพียง 7 ตัวในระนาบเชิงซ้อน ซึ่งอินเวอร์เตอร์สามารถประมาณการเป็นระบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามในบทนี้ อินเวอร์เตอร์จะถูกพิจารณาว่า

เป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเวลาเป็นช่วง (non linear discrete system) โดยมีเพียง 7 สถานะที่แตกต่างกันเป็นเอาต์พุตที่เป็นไปได้

ตารางที่ 3.3 สถานะของสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

vector States	Switcheson	Switchesoff
V_0	S_4, S_5, S_6	S_1, S_2, S_3
V_1	S_1, S_5, S_6	S_2, S_3, S_4
V_2	S_1, S_2, S_6	S_3, S_4, S_5
V_3	S_2, S_4, S_6	S_1, S_3, S_5
V_4	S_2, S_3, S_4	S_1, S_5, S_6
V_5	S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_6
V_6	S_1, S_3, S_5	S_2, S_4, S_6
V_7	S_1, S_2, S_3	S_4, S_5, S_6

เมื่อพิจารณาถึงคำจำกัดความของตัวแปรจากวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.3 สมการสำหรับกระแสไดนามิก สำหรับแต่ละเฟสสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{aN} = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + V_{nN} \quad (3.13)$$

$$V_{bN} = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + V_{nN} \quad (3.14)$$

$$V_{cN} = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + V_{nN} \quad (3.15)$$

เมื่อ R คือความต้านทานโหลด และ L คือ ตัวเหนี่ยวนำโหลด โดยการแทนที่สมการที่ (3.13) - (3.15) ในสมการ (3.8) สมการเวกเตอร์สำหรับไดนามิกกระแสโหลดสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$v = L \frac{d}{dt} \left(\frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \right) + R \left(\frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \right) + \frac{2}{3} (e_a + ae_b + a^2 e_c) + \frac{2}{3} (v_{nN} + av_{nN} + a^2 v_{nN}) \quad (3.16)$$

เมื่อพิจารณาคำจำกัดความเวกเตอร์สเปซสำหรับแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ที่กำหนดโดยสมการ (3.8) และคำจำกัดความสำหรับกระแสโพล และเวกเตอร์ back-emf space สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$i = \frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \quad (3.17)$$

$$e = \frac{2}{3} (e_a + ae_b + a^2 e_c) \quad (3.18)$$

และสมมติว่าค่าสุดท้ายของสมการ (3.16) เท่ากับศูนย์

$$\frac{2}{3} (v_{nN} + av_{nN} + a^2 v_{nN}) = v_{nN} \frac{2}{3} (1 + a + a^2) = 0 \quad (3.19)$$

จากนั้นไดนามิกกระแสโพลสามารถอธิบายได้โดยสมการเชิงอนุพันธ์ คือ

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (3.20)$$

เมื่อ v คือ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์ i คือ เวกเตอร์กระแสโพล และ e คือ เวกเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) จากโพลโปรดทราบว่าการจำลองและผลการทดลองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) จากโพลถือว่าเป็น Sine ที่มีแอมพลิจูดและความถี่คงที่ ในส่วนนี้เป็นกรอธิบายกระบวนการ discretization ของสมการกระแสโพล (3.20) ที่เวลาการสุ่ม T_s โดยแบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องจะใช้ในการทำนายค่าในอนาคตของกระแสโพลจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้ทันทีจากการสุ่มที่ k th วิธีการ discretization ที่หลากหลายสามารถนำมาใช้เพื่อให้ได้แบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณของการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า และเมื่อพิจารณาว่าโพลสามารถสร้างแบบจำลองเป็นระบบลำดับแรก ซึ่งแบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่องสามารถถูกปรับได้โดยการประมาณค่าแบบง่ายของอนุพันธ์

อย่างไรก็ตามสำหรับระบบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นการประมาณค่านี้อาจนำข้อผิดพลาดมาสู่โมเดล และต้องใช้วิธีการ discretization ที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยอนุพันธ์กระแสไหล di/dt จะถูกแทนที่ด้วยการประมาณค่าแบบ Euler forward method กล่าวคือ อนุพันธ์มีการประมาณการดังนี้:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (3.21)$$

ซึ่งเมื่อนำไปแทนที่ในสมการ (3.20) เพื่อให้ได้สมการที่ช่วยทำนายกระแสไหลในอนาคต ณ เวลา $k+1$ สำหรับแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า $v(k)$ จำนวน 7 ค่า ที่สร้างโดยอินเวอร์เตอร์ โดยสมการนี้คือ

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} \left(v(k) - \hat{e}(k) \right) \quad (3.22)$$

เมื่อ $\hat{e}(k)$ หมายถึง ค่าประมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) ในขณะที่ตัวยกกำลัง p คือ ตัวแปรที่ทำนายได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.20) โดยพิจารณาจากการวัดแรงดันไหลและกระแสไหล โดยแสดงเป็นสมการต่อไปนี้

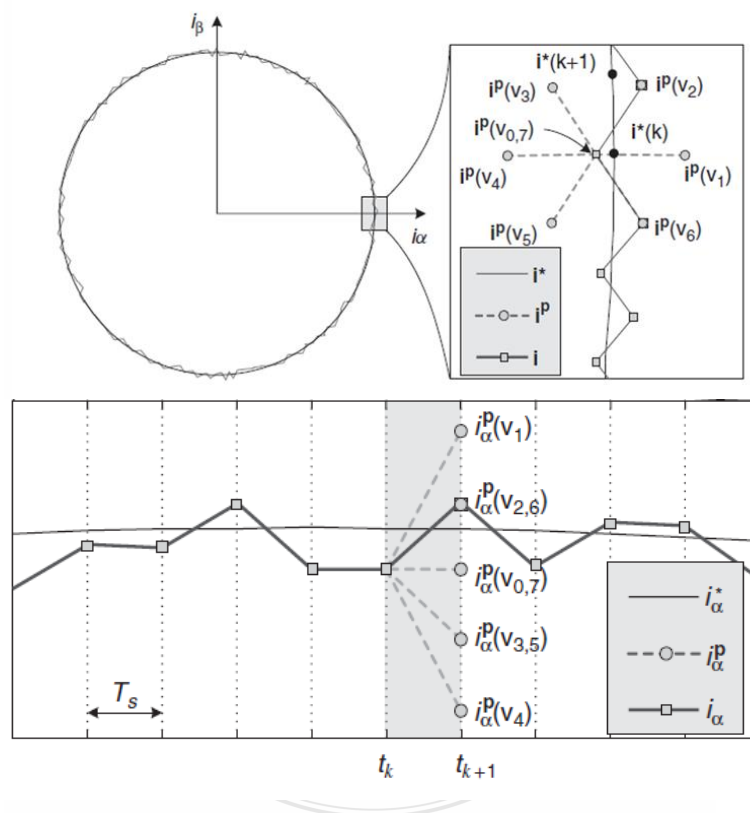
$$\hat{e}(k-1) = v(k-1) - \frac{L}{T_s} i(k) - \left(R - \frac{L}{T_s} \right) i(k-1) \quad (3.23)$$

เมื่อ $\hat{e}(k-1)$ เป็นค่าโดยประมาณของ $e(k-1)$ ในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) $e(k)$ สามารถประมาณได้โดยใช้การประมาณค่าที่ผ่านมาของค่าประมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) อีกทางหนึ่งเมื่อความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) นั้นน้อยกว่าความถี่ของการสุ่มอย่างมาก เราจะสมมุติว่าความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาการสุ่มหนึ่งครั้ง ดังนั้นสมมุติให้ $\hat{e}(k) = \hat{e}(k-1)$

3.6 การดำเนินการตามหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟ

เพื่อแสดงให้เห็นว่าหลักการการควบคุมแบบพรีดิกทีฟมีการทำงานอย่างไร โดยรายละเอียดแสดงในรูปที่ 3.9 โดยกระแสไหล i_α, i_β และค่าอ้างอิงจะแสดงเป็นระยะเวลาที่สมบูรณ์ของการอ้างอิง เมื่อใช้การวัด $i(k)$ และสถานการณ์สวิตช์ซึ่งทั้งหมดของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า $v(k)$ กระแสในอนาคต $i(k+1)$ จะถูกประมาณการเป็น $i^p(k+1)$ ในพล็อตแบบเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สามารถสังเกตได้ว่าเวกเตอร์ v_2 เป็นเวกเตอร์กระแสที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับเวกเตอร์อ้างอิงดังที่แสดงในรูปที่ 3.9 กระแสไฟฟ้า $i_\alpha^p(V_0, 7)$ สอดคล้องกับกระแสที่ทำนายได้ หากเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า V_0 หรือ V_7 ถูกนำมาใช้ในเวลา k ดังจะ

เห็นได้ในรูปนี้ว่าเวกเตอร์ $V2$ และ $V6$ เป็นค่าที่ความผิดพลาดน้อยที่สุดในกระแสไฟฟ้า i_α และเวกเตอร์ $V2$ และ $V3$ เป็นค่าที่ความผิดพลาดน้อยที่สุดในกระแสไฟฟ้า i_β ได้ ดังนั้นเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ลดฟังก์ชันต้นทุน g คือ $V2$ รูปเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความหมายของ cost function ในการวัดความผิดพลาดหรือระยะห่างระหว่างเวกเตอร์อ้างอิงกับเวกเตอร์ที่ทำนายได้ ซึ่งมันง่ายที่จะดูข้อผิดพลาดและระยะห่างเหล่านี้สำหรับกรณีของการควบคุมกระแสไฟฟ้า แต่พล็อตเหล่านี้กลับกลายเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปได้ไม่ได้อีกสำหรับสร้าง cost function ที่ซับซ้อนมากขึ้นจากมุมมองเชิงตัวเลข การเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะดำเนินการตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละตัวจะสร้างกระแสที่ทำนายได้ที่ให้ค่าของ cost function ตามที่แสดงในตาราง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า ตามตัวอย่างนี้เวกเตอร์ $V2$ สร้างค่าต่ำสุดของ cost function g จากนั้นเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า $V2$ และนำไปใช้ในอินเวอร์เตอร์

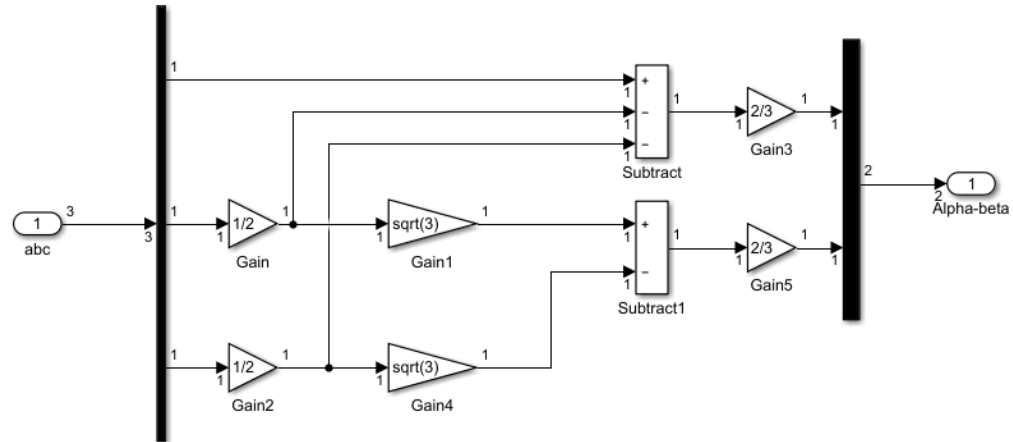


รูปที่ 3.9 รูปแบบการทำงานของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและการทำนายกระแสล่วงหน้า

3.7 การแปลงแกนการแปลงแกน $abc - \alpha\beta$ โดยใช้วิธี Clark Tarfronmer

การแปลงระบบไฟฟ้า 3 เฟส(abc)ให้เป็นระบบ 2 เฟส($\alpha\beta$) โดยใช้วิธี Clark Tarfronmer เพื่อเป็นการแก้ปัญหาทางด้านสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความสลับซับซ้อนที่มีค่าพารามิเตอร์ที่มีการ

เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยอาศัยหลักการตามทฤษฎีเพื่อแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้า (v_{abc}) และกระแส (i_{abc}) ของระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้า ($v_{\alpha\beta 0}$) และกระแส ($i_{\alpha\beta 0}$) ที่อยู่บนแกน ($\alpha\beta 0$) ตามสมการที่ (3.24)



รูปที่ 3.10 Clark Tarfromer Block Diagram. บนโปรแกรม Simulink

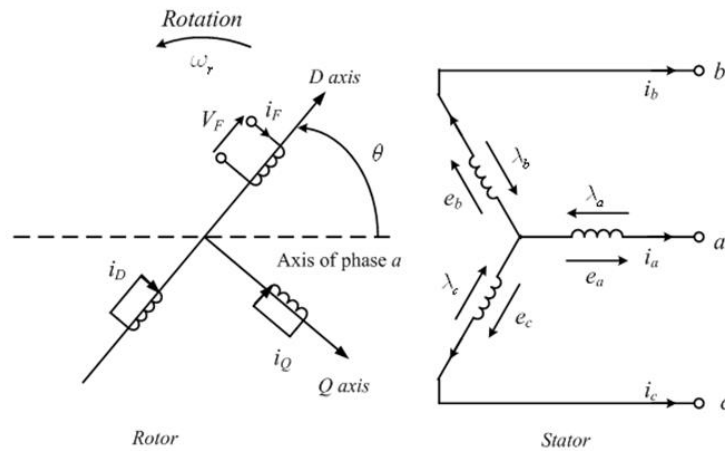
จากภาพที่ 3.2 แสดงการเขียนสมการการแปลงกำลังไฟฟ้าสามเฟส (abc) บนแกน ($\alpha\beta 0$) โดยโปรแกรม Simulink ตามทฤษฎี Clark Tarfromer สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$T_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

และสามารถแปลงให้อยู่ในภาพเมตริกกลับ (Inverse matrix) ได้ดังสมการที่(3.25)

$$T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ทฤษฎีของ park Tarfronmer ว่าด้วยการแปลงจากระบบ 3 เฟส เป็นระบบ 2 เฟส เรียกทฤษฎีการแปลงนี้ว่า ทฤษฎีสองแกน(Two Axis theory) ซึ่งคิดค้นโดย Blondel, Doherty, Nickle และ Park



รูปที่ 3.11 การแปลงค่ากระแส 3 เฟส ให้เป็นกระแสในแนวแกน d และ แกน q ได้เป็น

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos \left(\theta_d - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_d + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_d & -\sin \theta_d \left(\theta_d - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \theta_d \left(\theta_d + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

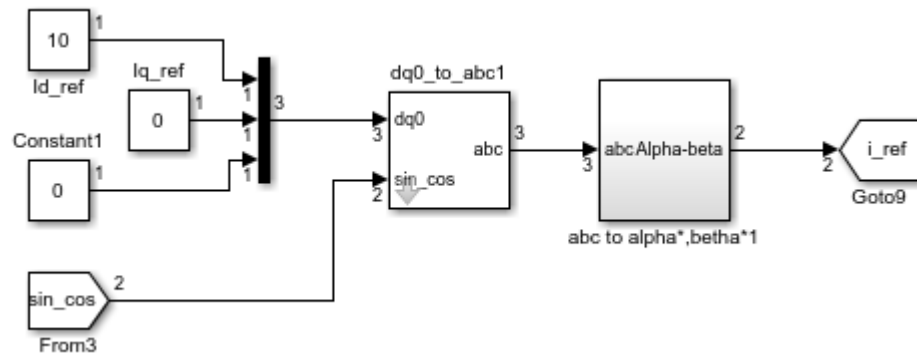
เราสามารถทำเมตริกกลับ ได้ดังนี้

$$T_{dq0}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d & 1 \\ \cos \left(\theta_d - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \theta_d \left(\theta_d - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta_d + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \theta_d \left(\theta_d + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

จากทฤษฎีของ park Tarfronmer ได้มีการในการแปลงจากเวกเตอร์ชนิด 3 แกน ให้เหลือเวกเตอร์ 2 แกน โดยให้อยู่ในรูปของแกนไอดีและไอคว โดยแกนไอดีจะต้องนำหน้าแกนไอควอยู่ที่มุม 90 องศาเสมอ

3.8 การกำหนดกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

รูปแบบการจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ เพื่อเป็นตัวกำหนดค่าของกระแสจริงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 3.12 โดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบจากสมการแปลงแกน ให้อยู่ในรูปแบบกรอบอ้างอิงแกน $\alpha\beta$



รูปที่ 3.12 แบบจำลองการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

การสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงสัญญาณไซน์ 3 เฟส มีค่าแอมพลิจูด 5 แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิร์ต จากสมการที่ 3.26 - 3.28

$$i_a = I_m \sin \omega t \quad (3.28)$$

$$i_b = I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.29)$$

$$i_c = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.30)$$

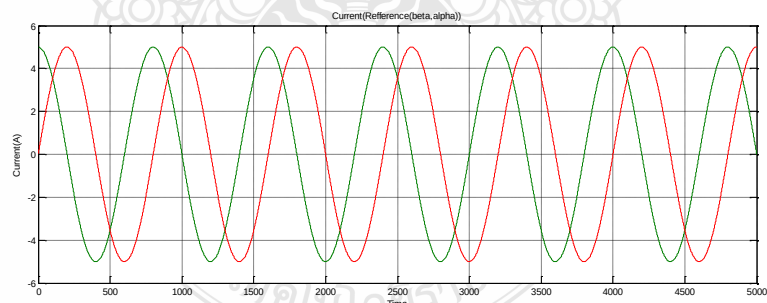
แทนค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงในสมการที่ 3.28-3.39

$$i_a = 5 \sin \omega t$$

$$i_b = 5 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c = 5 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

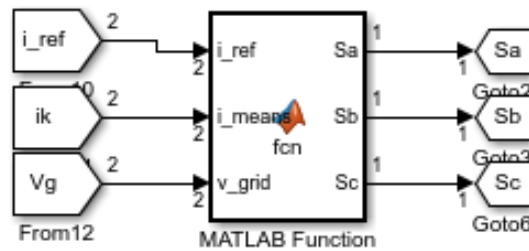
หลังจากได้กำหนดกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในระบบไฟฟ้า 3 เฟส และดำเนินการแปลงแกน ให้อยู่ในรูปแบบ 2 แกน ดังสมการที่ 3.1 จะได้ผลการสร้างรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงจากการจำลองที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส เป็นระบบ 2 เฟส

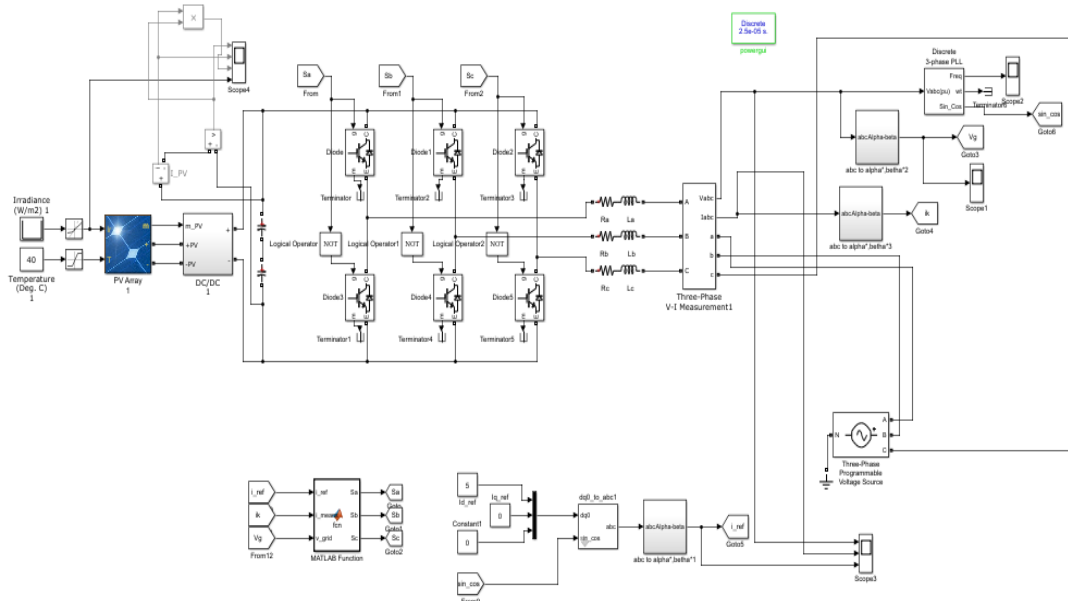
จากการทำงานของสวิตซ์ซึ่งจำนวน 6 ตัวของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า จะเป็นตัวกำหนดให้สวิตซ์ของแต่ละเฟสให้ทำงานสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกำหนดค่าขึ้นมาจากการคำนวณให้ได้ตามขนาดของเวกเตอร์แรงดัน (ตารางที่ 3.2) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ให้อินเวอร์เตอร์ทำงานถูกต้องตามค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้าของแต่ละรอบการคำนวณ เพื่อค่า

ของกระแสไฟฟ้าจริงที่วัดได้มีค่าที่ถูกต้องและมีความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยถูกกำหนดด้วยสมการของค่า cost function เพื่อที่จะจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าเข้าไปที่กริดโดยผ่านวงจรของเฟสล็อกกลูปเป็นตัวกำหนดค่ามุมต่างเฟสให้มีขนาดเท่ากันสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วิธีการควบคุมการทำงานของสวิตช์

จากรูปที่ 3.15-3.16 แสดงแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งที่ใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 ตัว เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานเข้าไปยังกริด โดยได้มีการกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้าล่งหน้าทีขนาด 5,7 และ 10 แอมป์ และได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 3.2 โดยแสดงแบบจำลองไว้สามส่วน คือ 1. วงจรกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2. ชุดควบคุมของกระแสไฟฟ้าล่งหน้า 3. ชุดของเฟสล็อกกลูป (ดังแสดงรูปที่ 3.16) โดยชุดของการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบล่งหน้าประกอบไปด้วยสัญญาณอินพุตจาก 2 แหล่งคือ อินพุตกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและ อินพุตกระแสไฟฟ้าของระบบ เพื่อใช้ในการคำนวณและควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่งหน้า เพื่อสร้างสัญญาณไปควบคุมสวิตช์ Sa, Sb และ Sc ภายในของอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์, โหลด RL หรือภาระทางไฟฟ้า, การตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า, การแปลงแกนในระบบ 3 เฟสให้อยู่ในรูปแบบ 2 เฟส ทั้งนี้ส่วนประกอบย่อยที่สำคัญและเป็นสิ่งจำเป็นได้แก่ การแปลงแกนกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง หรือ การแปลงแกน $\alpha\beta$



รูปที่ 3.15 แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 แรงดัน

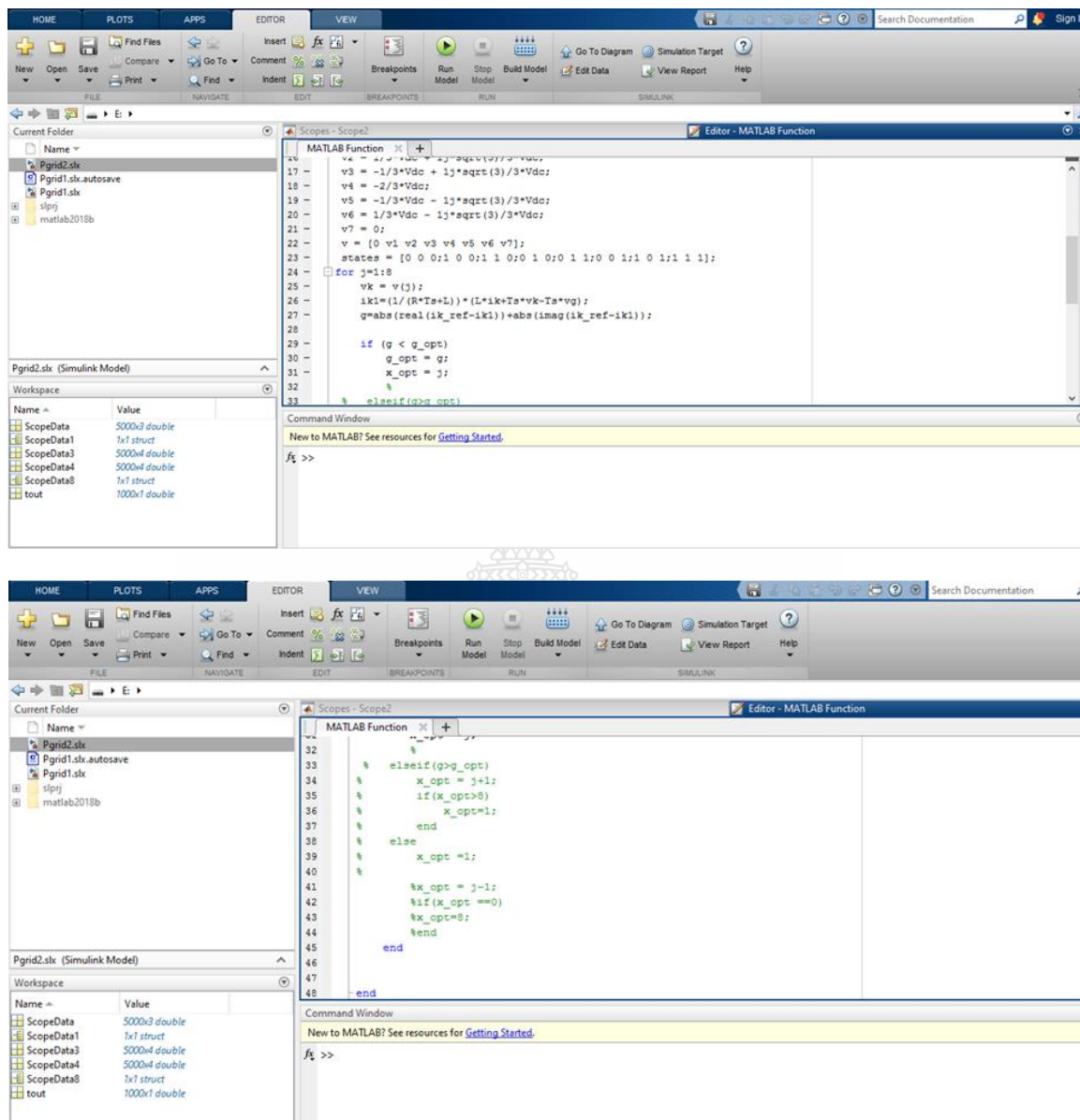
จากรูปที่ 3.15 แสดงคำสั่งการทำงานภายในโปรแกรมประมวลผลที่ใช้ควบคุมการทำงานแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้า และทำการส่งค่าสัญญาณเอาต์พุตในการขับสวิตซ์ซึ่งทั้ง 6 ตัวรับค่าสัญญาณอินพุตกระแสไฟฟ้าอ้างอิง, กระแสไฟฟ้าของระบบ, แรงดันไฟฟ้าอินพุต และค่าเวลาการประมวลผลสัญญาณให้กับชุดแปลงผันพลังงาน(อินเวอร์เตอร์) ในรูปแบบการทำงานของชุด m file ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ในแต่ละรอบการประมวลผลการทำงานสามารถนำมาสร้างคำสั่งเขียนโปรแกรมดังนี้

Function [Sa,Sb,Sc,] = control(I_ref,I_meas,Vdc,Ts)

```

function [Sa,Sb,Sc,] = control(I_ref,I_meas,Vdc,Ts)
1  function [Sa,Sb,Sc,] = fcn(I_ref,I_meas,Vdc,Ts)
2
3  ik_ref = I_ref(1) + 1*I_ref(2);
4  ik_meas = I_meas(1) + 1*I_meas(2);
5  vg_ref = Vdc(1) + 1*Vdc(2);
6
7  R = 0.5;
8  L = 10e-3;
9  Ts = 25e-6;
10 x_opt = inf;
11 q_opt = inf;
12 Vdc = 600;
13
14 v0 = 0;
15 v1 = 2/3*Vdc;
16 v2 = 1/3*Vdc + 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
17 v3 = -1/3*Vdc + 1j*sqrt(3)/3*Vdc;

```



รูปที่ 3.16 ชุดคำสั่งของm file

Function [Sa,Sb,Sc,] = control(l_ref,l_meas,Vdc,Ts)

$R = 5.50;$

ความหมาย : กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโหลดความต้านทาน (โอห์ม)

$L = 10e-3;$

ความหมาย : กำหนดค่าความเหนี่ยวนำ (มิลลิเฮนรี่)

```
v0=0;
v1 = 2/3*Vdc;
v3 = 1/3*Vdc + 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
v4 = -2/3*Vdc;
v5 = -1/3*Vdc - 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
v6 = 1/3*Vdc - 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
v7 = 0;
v = [v0 v1 v2 v3 v4 v5 v6 v7];
states = [0 0 0;1 0 0;1 1 0;0 1 0;0 1 1;0 0 1;1 0 1;1 1 1];
```

ความหมาย : กำหนดสถานการณ์ทำงานจากสมการเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ

```
ik_ref = I_ref(1) + (1*j)*I_ref(2);
ik = I_meas(1) + (1/j)*(I_meas(2);
```

ความหมาย : แยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงกับที่วัดได้

```
persistent x_old i_old x_opt
```

ความหมาย : กำหนดตัวแปรแบบถาวร

```
if isempty(x_old),x_old = 1; end
if isempty(i_old),i_old = 1; end
if isempty(i_old),i_old = 0-(j*0); end
if isempty(x_opt),x_opt= 0; end
g_opt = inf;
```

ความหมาย : กำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้น

```
e = v(x_old) - L/Ts/ik - (R - L/Ts)*i_old;
```

ความหมาย : คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

```
i_old = ik;
```

ความหมาย : เก็บค่ากระแสไฟฟ้าปัจจุบัน

```
for i = 1 : 8
v_ol = v(i);
ikl = (1 - R*T/L)*ik + Ts/L*(v_ol - e);
g = abs(real(ik_ref - ikl)) + abs(imag(ik_ref - ikl));
```

```

if(g<g_opt)
g_opt = g;
x_opt = i;
end

```

ความหมาย : ทำการวนรูปการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ ตามจำนวนของเวกเตอร์ แรงดันไฟฟ้าให้ครบทุกตัว (8 เวกเตอร์) เพื่อทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดน้อยที่สุด และทำการเก็บค่าตัวแปร g จาก cost function ที่มีค่าความเหมาะสม แสดงถึงการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ikl จากสมการ

$$ikl = (1 - R \cdot Ts/L) \cdot ik + Ts/L \cdot (v_{ol} - e)$$

```

x_old = x_opt;
Sa = states(x_opt,1);
Sb = states(x_opt,2);
Sc = states(x_opt,3);

```

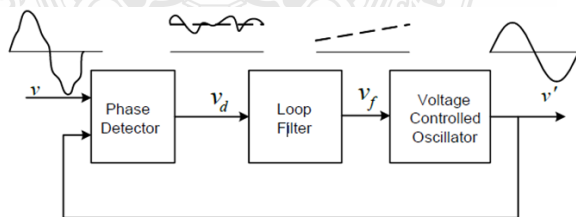
ความหมาย : กำหนดเอาต์พุตสัญญาณขับเคลื่อนที่ด้านการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากการคำนวณ จากคำสั่งการเขียนโปรแกรม m file เมื่อสามารถเลือกและกำหนดสัญญาณเอาต์พุต สำหรับการขับเคลื่อน Sa, Sb และ Sc เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนที่สอดคล้องกับเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าในลำดับของการทำงานรอบถัดไป จากการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและทำการคำนวณไปรอบเวลาการทำงานไซเคิลถัดไป

บทที่ 4

ผลการจำลองและการทดสอบ

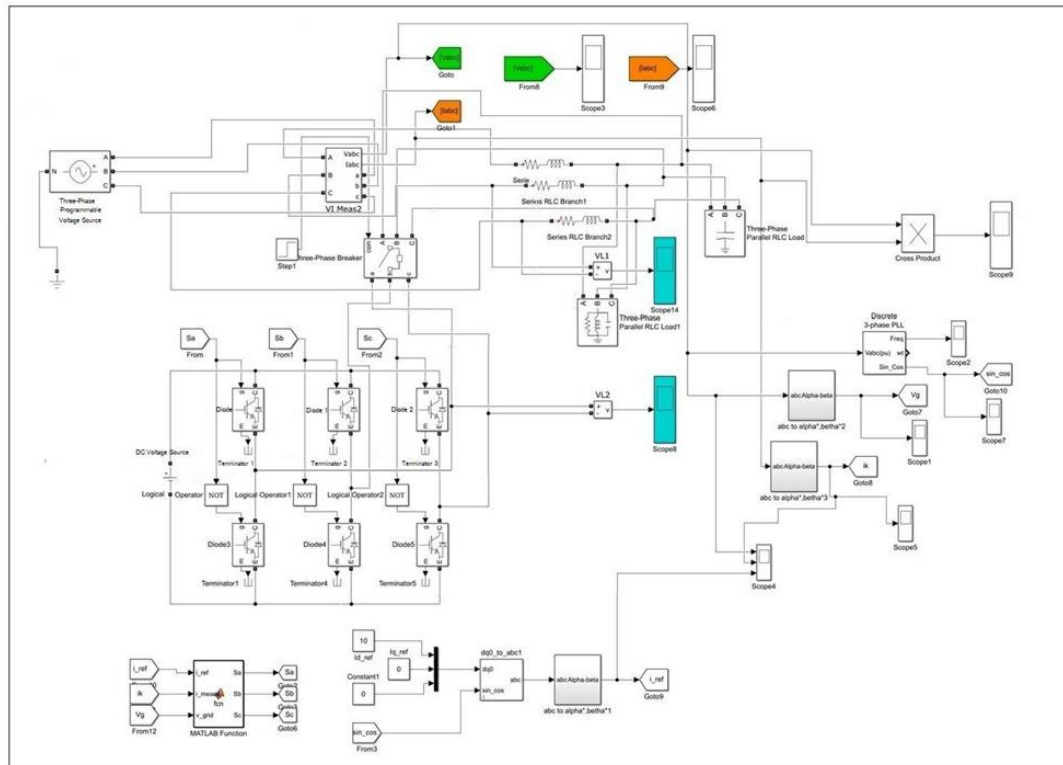
จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อดำเนินการศึกษาวិธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน เพื่อชดเชยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้การควบคุมแบบทำนายกระแสล่วงหน้าบนแกน D-Q เพื่อฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่โหลดพร้อมกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากกริดจะช่วยลดพลังงานที่กริดให้มีความน้อยลง จะเห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าวได้เกี่ยวข้องกับทฤษฎีที่ว่าด้วยการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ซึ่งจำนวนทั้ง 6 ตัวเพื่อให้ค่าของกระแสที่ขาออกเป็นไปตามกระแสไฟฟ้าตามต้องการที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานไว้ที่กระแสไฟฟ้าขนาด 5, 7 และ 10 แอมแปร์โดยมีต้นกำลังที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ โดยแผงจะทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองโดยการจำลองตามขบวนการที่กำหนดไว้ในบทที่ 3 โดยการใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อมาเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของกริดว่ามีขนาดเท่าไร ขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกับชุดจ่ายกำลังที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งการจ่ายกระแสรวมกันโดยใช้การควบคุมที่ชุดอินเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า (Predictive control) ดังแสดงดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 แสดงการจำลองโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ โดยได้จำลองการสร้างสัญญาณการควบคุมสวิตซ์ซึ่งทั้ง 6 ตัว ที่อยู่ภายในชุดอินเวอร์เตอร์ที่ต่อขนานกับแหล่งจ่ายทั้ง 2 แหล่งโดยได้จำลองขบวนการทำงานแบบ Predictive control เพื่อควบคุมให้เป็นไปตามที่กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าไว้ล่วงหน้า โดยในงานที่วิเคราะห์นี้ จะมีส่วนที่มีปัจจัยที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ เฟสล็อกกลูบที่ทำหน้าที่ประสานงานให้กับอินเวอร์เตอร์ต่อรวมเข้ากับกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Grid-connected Inverter) เนื่องจากความสามารถในด้านการซิงโครไนซ์ที่ความถี่เดียวกันและมุมเฟสที่ตรงกัน



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกกลูบแบบพื้นฐาน

บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกกลูบแบบพื้นฐานเราสามารถที่จะนำการรูปแบบดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะสร้างรูปแบบการควบคุมเพื่อเชื่อมต่อระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และกริด

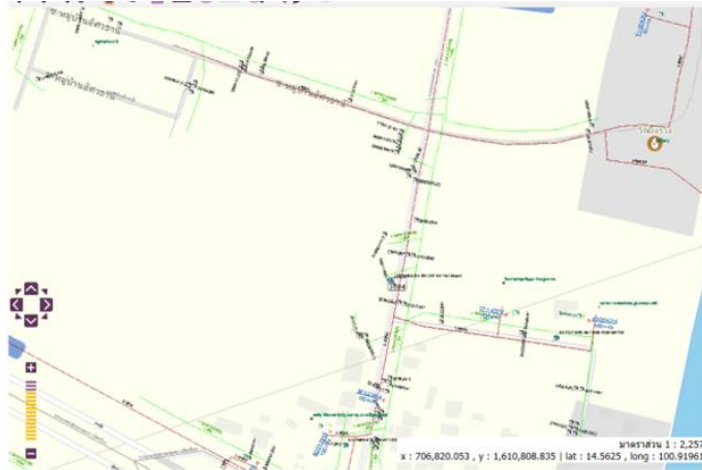


รูปที่ 4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยการควบคุมแบบพรีดิคทีฟ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบไว้ให้ใกล้เคียงกับระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าจริง โดยได้กำหนดพื้นที่และโหลดการใช้ไฟฟ้าของสถานประกอบการ ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 สถานที่ใช้ไฟฟ้า ต.ผึ้งรวง อ.เมืองสระบุรี จ.สระบุรี

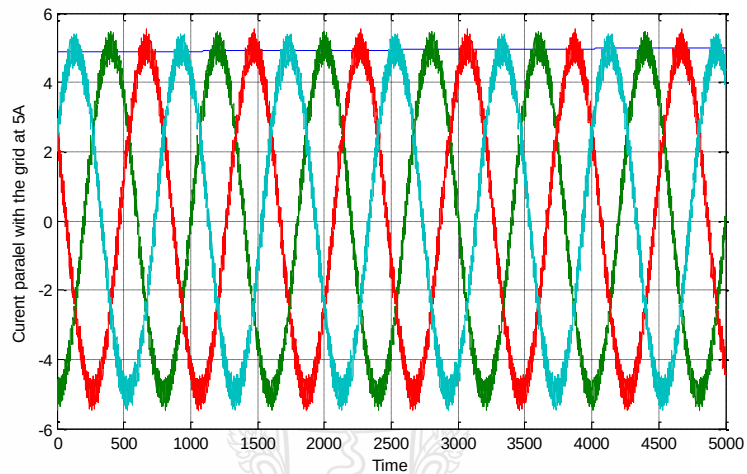


รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมการจ่ายกระแสไฟฟ้า ต.ฝั่งรวง อ.เมืองสระบุรี จ.สระบุรี
 โดยในการทดลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 4.1
 ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์

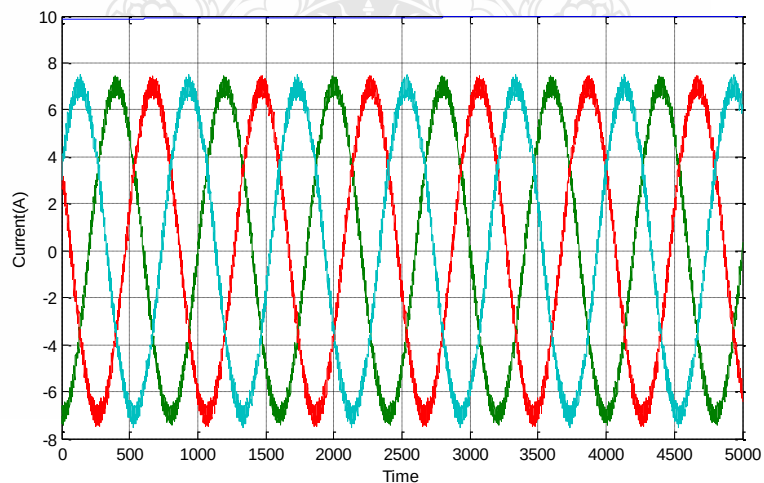
พารามิเตอร์	ขนาด/หน่วยวัด
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แผ่นโซล่าเซลล์	600 V_{dc}
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกที่อินเวอร์เตอร์	380 V_{ac}
แหล่งจ่ายแรงดันที่กริด	380 V
กำลังไฟฟ้าของกริด	50 KVA
ความต้านทานสายตัวนำ (R)	0.5 Ω
ตัวเหนี่ยวนำ (L)	10 mH
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ	25 μsec
กระแสไฟฟ้าอ้างอิง	5,7,10 A
กระแสไฟฟ้าจริง	5,7,10 A

4.1 ผลการทดลองด้วยกระบวนการจำลองทางคณิตศาสตร์

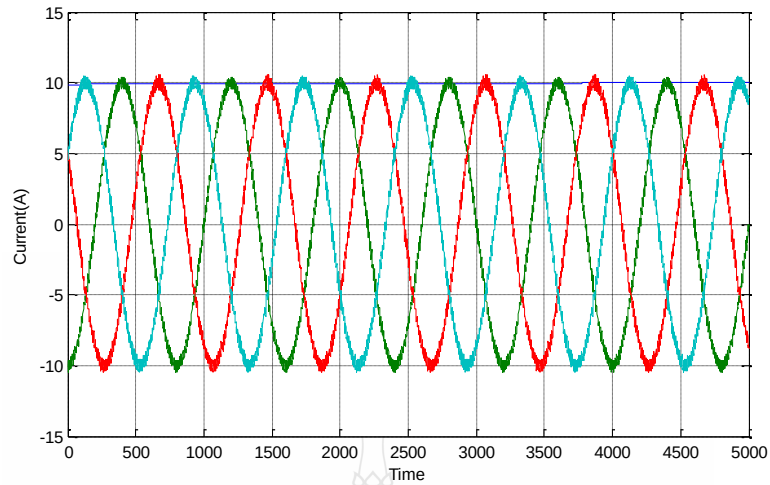
การจำลองที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้ามีขนาด 5, 7, 10 แอมแปร์ โดยวิธีการใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า เพื่อชดเชยค่าความต้องการด้านพลังงานนั้น จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นั้นเป็นตามค่าของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า ดังรูปที่ 4.4-4.6



รูปที่ 4.5 กระแสไฟฟ้าขณะขนานกับกริดที่ขนาด 5 A



รูปที่ 4.6 กระแสไฟฟ้าขณะขนานกับกริดที่ขนาด 7 A



รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าขณะขนานกับกริดที่ขนาด 10 A

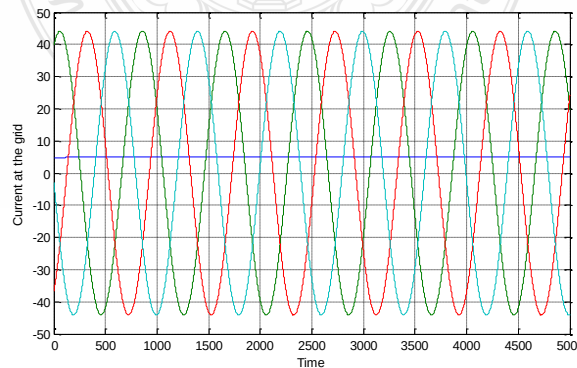
จากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นั้นจะมีขนาดเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าตามสมการ

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right)i(k) + \frac{T_s}{L} \left(v(k) - \hat{e}(k) \right) \quad \text{ที่ใช้สำหรับการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า}$$

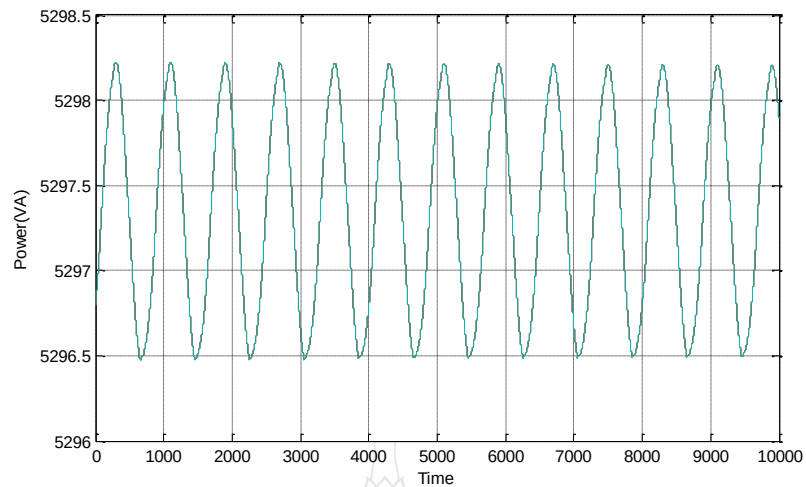
ล่วงหน้า(Predictive control)ที่เกิดขึ้นในเวลาลำดับถัดไป (t+1)โดยจะมีค่า cost function ดังสมการ

$$g = |i_\alpha^* - i_\alpha^p| + |i_\beta^* - i_\beta^p| \quad \text{จะเป็นตัวจำกัดค่าความผิดพลาดระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่าของ}$$

กระแสไฟฟ้าอ้างอิงให้มีความน้อยลง โดยที่แหล่งจ่ายกระแสที่กำหนดไว้ที่โปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ขนาด 50 เควีเอ.ที่มีความสามารถในการจ่ายกระแสอยู่ที่ประมาณ 45 แอมแปร์ดังรูปที่ 4.7 และขนาดกำลังไฟฟ้าของกริดที่ใช้ในการทดลองก่อนที่จะมีการขนานแหล่งจ่ายทั้ง 2 เข้าด้วยกัน คือ แหล่งจ่ายแรงดันที่ได้จากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกริด ประมาณ 53 เควีเอ.ดังแสดงที่รูป 4.8

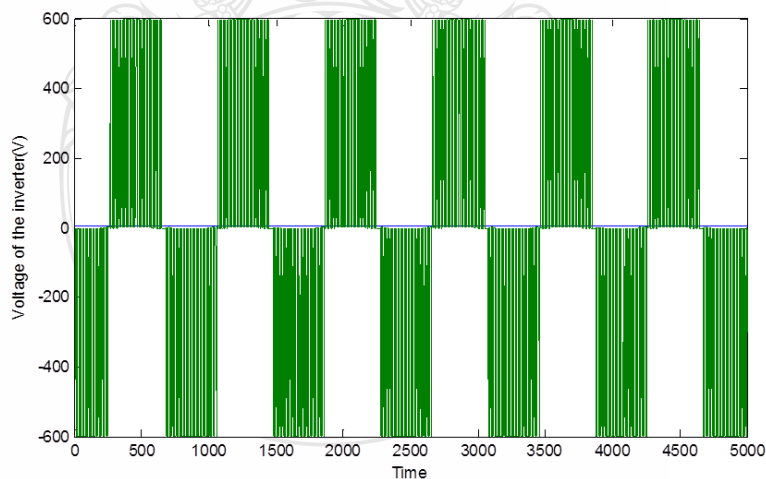


รูปที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าที่กริดก่อนขนานกับอินเวอร์เตอร์



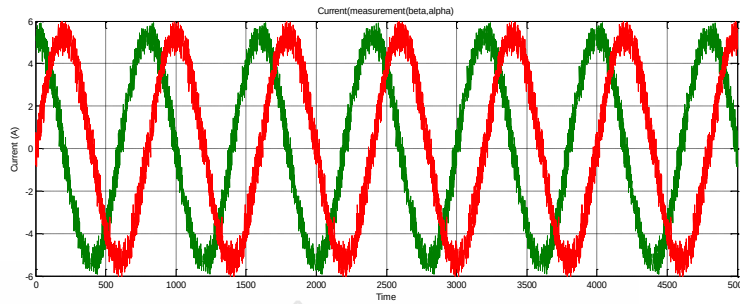
รูปที่ 4.9 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของกริด(หม้อแปลง)ก่อนขนานกับอินเวอร์เตอร์

จะเห็นว่าแหล่งจ่ายแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยได้ต่อร่วมกับชุดแปลงพลังงานไฟฟ้าหรือชุดอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดของแรงดันไฟฟ้าก่อนที่จะมีการขนานเข้ากับกริด ดังแสดงรูปที่ 4.9 จะเห็นว่ารูปที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณ Square Wave



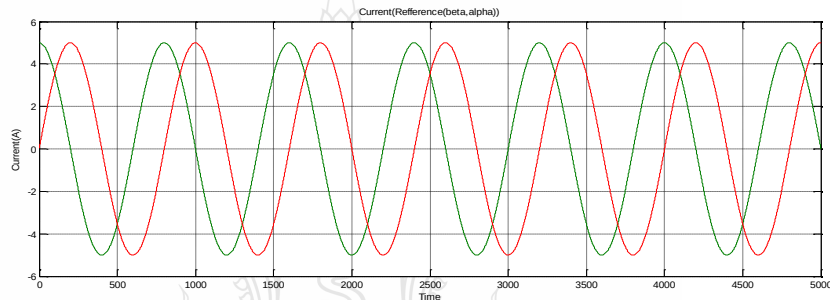
รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้า ที่อินเวอร์เตอร์ก่อนขนานกริด

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้การควบคุมเป็นไปได้โดยง่ายและสามารถควบคุมมุมของแหล่งจ่ายทั้ง 2 ให้มีมุมต่างเฟสตรงกัน และแก้ปัญหาของสมการที่มีความสลับซับซ้อนที่มีค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของเวลาซึ่งตรงทฤษฎีของ Clarke's Transformation ซึ่งดังรูปที่ 4.11 ให้



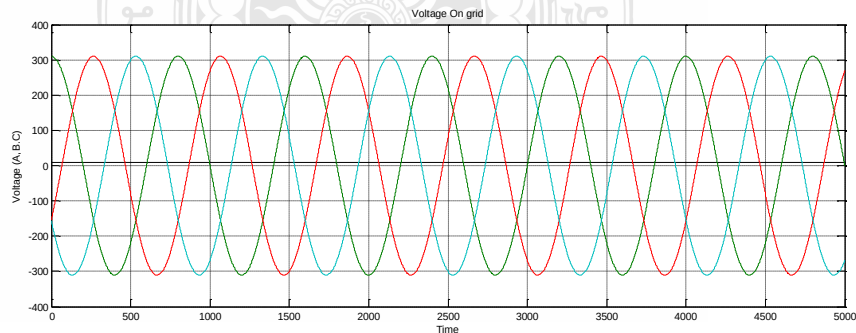
รูปที่ 4.11 กระแสที่ได้จากการแปลงกระแส 3 เฟส เป็น 2 เฟส

การสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงโดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าให้รูปกระแสไอดีและกระแสไอควิดแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กระแสที่ใช้อ้างอิงจำนวน 2 เฟส

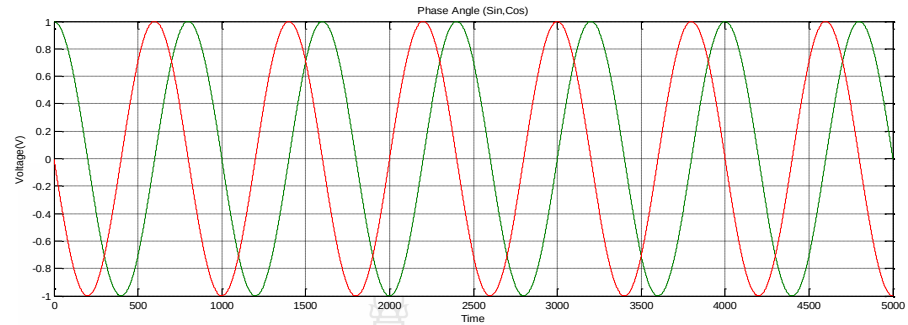
ขณะที่แหล่งจ่ายแรงดันที่ได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ที่ขนานกับระบบกริดจะมีสัญญาณของแรงดันดังรูปที่ 4.13 เป็นเพราะขนาดกำลังที่กริดมีขนาดกำลังที่มากกว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ (รูปที่ 4.9)



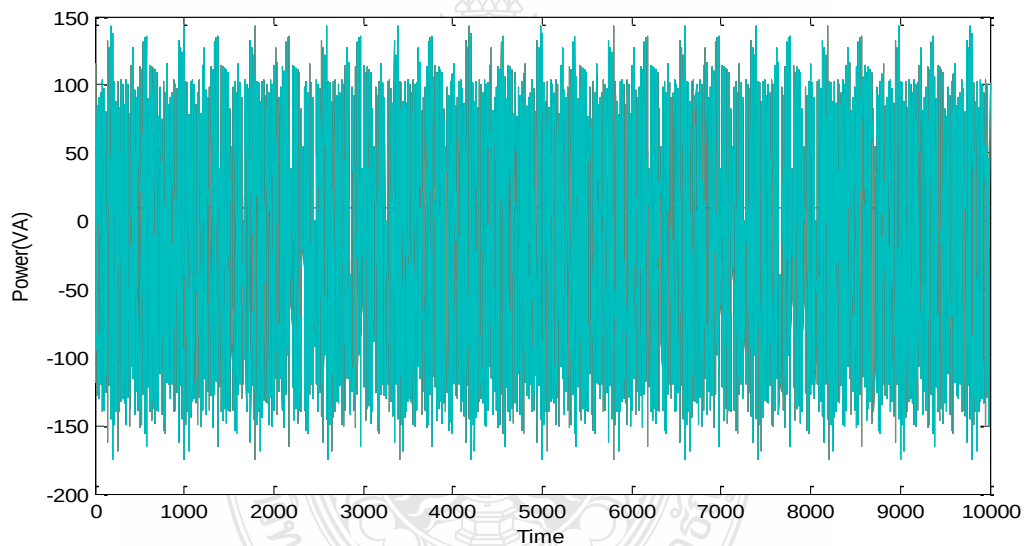
รูปที่ 4.13 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขนานกับกริด 3 เฟส

Phase Locked Loop (PLL) ซึ่งในระบบมีส่วนสำคัญมากที่เป็นตัวช่วยให้ระบบควบคุมความถี่โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟส (Phase) ของความถี่ทางด้านเอาต์พุต กับเฟสของความถี่อ้างอิง (Reference

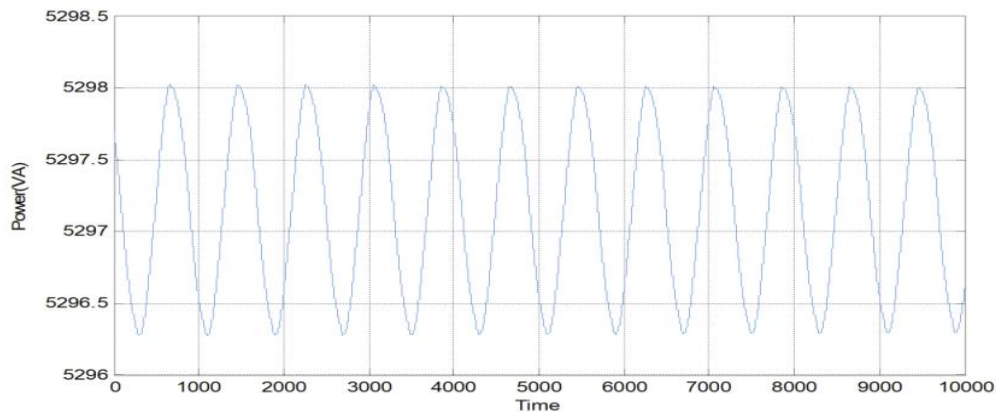
Frequency) ซึ่งถูกป้อนเข้าทางด้านอินพุตของระบบที่กำหนดแรงดันคลาดเคลื่อน (Error Voltage) เป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 มุมเฟสล็อกของอินเวอร์เตอร์ที่ขนานเข้ากับกริด



รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องใช้งาน



รูปที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าที่กริดขณะที่ขึ้นานกับอินเวอร์เตอร์

4.2 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลที่ได้จากการทดลองโดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (mathlab/sumulink) เพื่อจำลองวิธีการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าที่แตกต่างกัน เพื่อสังเกตผลของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ชุดอินเวอร์เตอร์มีผลอย่างไร ในขณะที่กริดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด โดยที่โหลดมีค่าคงที่ขณะที่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากทั้ง 2 แหล่งมาขนานเข้าด้วยกันจากข้อกำหนดที่สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงไว้ที่ตาราง 4.1

เนื่องด้วย เราสามารถขนานกริดกับชุดอินเวอร์เตอร์เข้าด้วยกันได้โดยอาศัยการทำงานของ Phase Locked Loop (PLL) และขนาดของกระแสที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าโดยวิธี predictive control ทำให้กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีขนาดเท่ากัน โดยได้กำหนดค่าของกระแสที่ใช้อ้างอิงให้มีขนาดเท่ากับ 5, 7 และ 10 แอมแปร์ ตามลำดับและประการสำคัญขนาดของกำลังไฟฟ้าของกริดมีขนาดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ขณะที่มีการจ่ายร่วมกันของทั้ง 2 แหล่ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในส่วนของแนวทางที่ใช้ในการทดลองในบทที่ 4 โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองเพื่อเรียนแบบการใช้ไฟฟ้าตามสถานที่ใช้งานที่ติดตั้งจริงในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับบ้านที่อยู่อาศัยประเภทครัวเรือนและสถานประกอบการขนาดเล็ก โดยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ได้จากแผ่นโซลาร์เซลล์ที่มีต้นกำเนิดพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านชุดควบคุมแปลงผันพลังงานจากกระแสไฟฟ้าตรงให้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับ เพื่อเชื่อมโยงกับกริดของการไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า(Predictive control)ที่สั่งการให้สวิตช์ซึ่งทั้ง 6 ตัวทำงานให้สอดคล้องกับเวกเตอร์ของแรงดัน ด้วยการสร้างอัลกอริทึมเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกอ้างอิงไว้ล่วงหน้าเพื่อมาประมวลผลโดยการคำนวณหาค่ากระแสในเวลาถัดไป ($t+1$) โดยมีค่า cost function เป็นกำหนดความผิดพลาดให้มีค่าน้อยส่งผลให้การควบคุมกระแสที่วัดได้เป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ และฉีดกระแสจำนวนดังกล่าวเข้าไปในระบบกริด เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีค่าน้อยลง โดยอาศัยแหล่งพลังงานรูปแบบอื่นในที่นี้คือพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานร่วมกับระบบกริดภายนอกโดยใช้วิธีการที่เรียกว่าการควบคุมกระแสไฟฟ้าของโหลดด้วยอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดโดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า (Predictive control)

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลงานวิจัยและอภิปรายงานวิจัย

จากหัวข้องานวิจัยว่าด้วยการออกแบบวิธีชดเชยความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้านั้นเป็นการออกแบบวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าปายังกริด เพื่อให้กริดลดภาระการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้น้อยลง ด้วยการได้รับกระแสไฟฟ้าจากต้นกำลังที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งแรงดัน ในบทความนี้เป็นการออกแบบวิธีการควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 ตัวที่ติดตั้งอยู่ภายในชุดอินเวอร์เตอร์ขนาด 3 เฟส 2 ระดับ โดยกำหนดให้ทำงานตามคำสั่งที่กำหนดค่ากระแสไว้ล่วงหน้า มีขนาดเท่ากับ 5 7 และ 10 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งมีการสร้างอัลกอริทึมเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกอ้างอิงไว้ล่วงหน้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการเลียนแบบลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าในสถานการณ์จริง เพื่อเป็นการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายล่วงหน้า(Predictive control) บนแกน D-Q เพื่อจะได้ง่ายต่อการควบคุมค่าตัวแปรของกระแสที่วัดได้ให้เป็นไปตามค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งสรุปได้ว่ากำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้า คือ อัตราของการใช้หรือการดูดซับพลังงานในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งกระแสและแรงดันไฟฟ้าก็เป็นตัวแปรพื้นฐานจึงส่งผลถึงการจำลองระบบ จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสอ้างอิงกับ

กระแสที่ได้จากการวัด พบว่ามีขนาดเท่ากัน โดยมีการติดตามมัมเฟสที่กริดขณะเชื่อมต่อกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กริดโดยใช้วงจรเฟสล็อกูป ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่กริดจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ จากการจำลองจะเห็นว่า สามารถชดเชยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดร้อยละ 15.56 ของปริมาณของกระแสโหลดเมื่อเทียบกับความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของตัวต้นกำลังของกริด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จำลองไว้นั้นมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงและมีความสำคัญมาก คือกระแสไฟฟ้าที่เราใช้อ้างอิงไว้ล่วงหน้าไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามกระแสของโหลดได้จึงเป็นข้อจำกัดที่เราจะต้องคำนวณค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับโหลดให้มีความใกล้เคียงกับกระแสที่เราอ้างอิงไว้ล่วงหน้า ก็จะส่งผลให้ค่ากระแสที่วัดจริงใกล้เคียงกับกระแสของโหลด

ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโหลดจะต้องมีการคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานจริงทุกครั้งเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดกระแสไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อกำหนดค่าขึ้นมาใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด



บรรณานุกรม

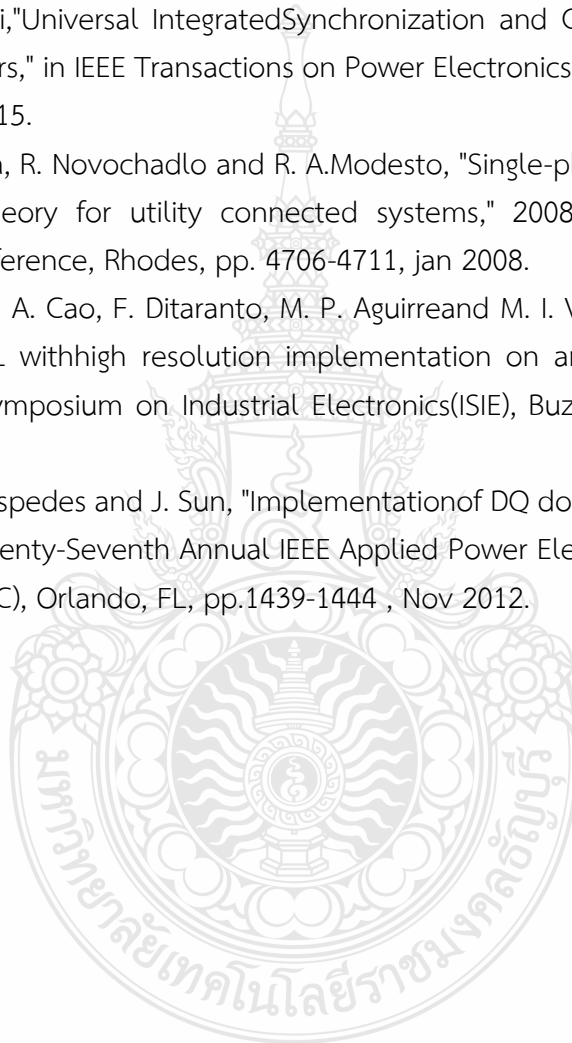
- [1] Kaplan, S. M. (2009). Smart Grid. Electrical Power Transmission: Background and Policy Issues. The Capital.Net, Government Series. Pp. 1-42, May 2002.
- [2] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion," Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, August 1994.
- [3] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in power electronics. Academic Press, July 2002.
- [4] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronics, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., Jun 2003.
- [5] C. C. Hou, C. C. Shih, P. T. Cheng, and A. M. Hava, "Common-mode voltage reduction pulsewidth modulation techniques for three-phase grid-connected converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 4, pp. 1971-1979, Apr. 2013..
- [6] p. Cortes, M. p. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, and J. Rodriguez, "Predictive control in power electronics and drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4312-4324, Dec 2008.
- [7] J. Holtz and S. Stadtfeld, "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source," in International Power Electronics Conference, IPEC, Tokyo, pp. 1665-1675, Jan 1983.
- [8] p. Mutschler, "A new speed-control method for induction motors," in Conference Record of PCIM'98, Nuremberg, pp. 131-136, May 1998.
- [9] T. Kawabata, T. Miyashita, and Y. Yamamoto, "Dead beat control of three phase PWM inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 21-28, Jan 1990.
- [10] o. Kukrer, "Discrete-time current control of voltage-fed three-phase PWM inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 11, no. 2, pp. 260-269, March 1996.
- [11] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodriguez, "Model predictive control - a simple and powerful method to control power converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 1826-1838, June 2009.
- [12] E. F. Camacho and c. Bordons, Mode/ Predictive Control Springer Verlag, 1999.
- [13] J. M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Apr 2002.
- [14] G. c. Goodwin, M. M. Seron, and J. A. D. Dona, Constrained Control and Estimation - An Optimization Perspective. Springer Verlag, Jan 2005.
- [15] c. E. Garcia, D. M. Prett, and M. Morari, "Model predictive control: theory and practice - a survey," Automatica. vol. 25, no. 3, pp. 335-348, May 1989.
- [16] c. Bordons and E. Camacho, "A generalized predictive controller for a wide class of industrial processes," IEEE Transactions on Control Systems Technotogy, vol. 6, no. 3, pp. 372-387, May 1998.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [17] D. W. Clarke, c. Mohtadi, and p. S. Tuffs, "Generalized predictive control - part I. The basic algorithm," *Automatica*. vol. 23, no. 2, pp. 137-148, Jun 1987.
- [18] E. El-Kholy, "Generalized predictive controller for a boost ac to dc converter fed dc motor," in *International Conference on Power Electronics and Drives Systems 2005*. PEDS 2005, vol. 2, pp. 1090-1095, Nov 2005.
- [19] S. Effler, A. Kelly, M. Halton, and K. Rinne, "Automated optimization of generalized model predictive control for dc-dc converters," in *IEEE Power Electronics Specialists Conference 2008*. PESC 2008, pp. 134-139, Jun 2008.
- [20] K. Low, "A digital control technique for a single-phase pwm inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 45, no. 4, pp. 672-674, Aug 1998.
- [21] R. Kennel, A. Linder, and M. Linke, "Generalized predictive control (GPC): ready for use in drive applications?" in *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2001 PESC*, vol. 4, pp. 1839-1844, Jan 2001.
- [22] p. Eguiren, o. Caramazana, A. Garrido Hernandez, and I. Garrido Hernandez, "SVPWM linear generalized predictive control of induction motor drives," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2008*. ISIE 2008, pp. 588-593, Jun 2008.
- [23] S. Hassaine, S. Moreau, c. Ogab, and B. Mazari, "Robust speed control of PMSM using generalized predictive and direct torque control techniques," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2007*. ISIE 2007, pp. 1213-1218, Jun 2007.
- [24] A. Beccuti, S. Mariethoz, S. Cliquennois, S. Wang, and M. Morari, "Explicit model predictive control of dc-dc switched-mode power supplies with extended Kalman filtering," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 56, no. 6, pp. 1864-1874, Jun 2009.
- [25] S. Mariethoz and M. Morari, "Explicit model-predictive control of a PWM inverter with an LCL filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 389-399, Feb 2009.
- [26] S. Mariethoz, A. Domahidi, and M. Morari, "Sensorless explicit model predictive control of permanent magnet synchronous motors," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2009*. IEMDC '09, pp. 1250-1257 May 2009.
- [27] J. Holtz, "Pulsewidth modulation electronic power conversion," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, Aug 1994.
- [28] M. p. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, *Control in power electronics*. Academic Press, Feb 2002.
- [29] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. p. Robbins, *Power electronics*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., May 2003.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [30] J. Rodriguez, J. Pontt, c. Silva et al. "Predictive current control of a voltage source inverter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 495-503, Feb 2007.
- [31] IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, *IEEE*, Jan 2000.
- [32] IEC 61727 Photovoltaic (PV) Systems - Characteristics of the Utility Interface, International Electrotechnical Commission (IEC), Feb 2004.
- [33] M.Karimi-Ghartemani,"Universal Integrated Synchronization and Control for Single-Phase DC/AC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 3, pp. 1544-1557, March 2015.
- [34] S. A. Oliveira da Silva, R. Novochadlo and R. A. Modesto, "Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems," 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, pp. 4706-4711, Jan 2008.
- [35] P. Cossutta, S. Raffo, A. Cao, F. Ditaranto, M. P. Aguirre and M. I. Valla, "High speed single phase SOGI-PLL with high resolution implementation on an FPGA," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, pp. 1004-1009, Sep 2015.
- [36] V. A. Prabhala, M. Céspedes and J. Sun, "Implementation of DQ domain control in DSP and FPGA," 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, pp. 1439-1444, Nov 2012.



ภาคผนวก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





**ELECTRICAL
ENGINEERING
NETWORK 2019**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

The 11th Conference of Electrical Engineering Network 2019

วันที่ 15-17 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ อำเภอ พระนครศรีอยุธยา

จังหวัด พระนครศรีอยุธยา

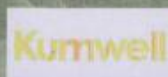


Conference Topics

- 1. Smart Grid (Smart Home / PMU)
- 2. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Power Electronics / PFC)
- 3. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Energy Storage / Battery / ES)
- 4. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Smart Grids and Smart Metering / SG)



- 5. ระบบจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Power Grid and Smart Metering / SG)
- 6. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Power Electronics / PFC)
- 7. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Energy Storage / Battery / ES)
- 8. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Smart Grids and Smart Metering / SG)
- 9. การจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า (Smart Grids and Smart Metering / SG)



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร.มงคล มีอุณ	กรมสอบสวนคดีพิเศษ (DSI)
อาจารย์ ดร.อรุณ พยอมพอม	การไฟฟ้านครหลวง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูรย์ อัครวิเศษ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร.บุษผะ พัทธพงศ์	บริษัท พีอีเอ เอ็นคอม อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุภากร แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฏฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชิต เจริญ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์สุชัย สุขสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิระจิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิบาล พุกษานุนาถ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.คณูชา ประเสริฐสม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพร เลิศวาสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์อัมพันธ์ พรหมพิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ราชู พันธฉลาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อาจารย์ ดร.พุทธร เทวสุภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒินันท์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประวิทย์ กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทิณี ราชบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธคง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย มีรสอาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พินิจ จิตจรัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.กิตติวัฒน์ นิยมเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย คุณพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ภานุวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทร แหม่มงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์เกียรติ์ เศวตเมธิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์องอาจ แสกลใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.วิเชียร อุปแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ ชูสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ คชสาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล นาวงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินทร์ สุดคิ่ง
รองศาสตราจารย์ พงษ์ ลานธารทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรุฒ์ รักไทยเจริญชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเพียรทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว
อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ บุญเจริญลาภ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัมปิตังษ์ ศรีสัตรู
อาจารย์ ดร.ปรีชา มงคลไย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิศักดิ์ แสงสารกิจ
รองศาสตราจารย์พิชิต กิตติสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิชัย บุญปัทม์
ดร.ทพพล พิทธิโพธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ เขยชื่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค โททองคำ
อาจารย์ ดร.นิรันดร์ คืบปศิริวานิชย์
อาจารย์ ดร.คมกฤษ บุญธิ
อาจารย์ ดร.บัญชา เหลืองแดง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎาพร สถาบันทวี
อาจารย์ ดร.อนันต์ น้าอิน
รองศาสตราจารย์ ดร.พาณิช อิ่มดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณพร ทินัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิเชษฐ พิทธิประเสริฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิศรุทธิ์ พรมมี
อาจารย์ ดร.พลกฤษณ์ หุ่นคำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ปลั่งกา
อาจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ สมศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิบูรณ์ ศิริพรอักษร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิติพงษ์ สมไชยวงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาอุทัย เดชธรรมรงค์
อาจารย์ ดร.นพพล นิ่มเพียร
รองศาสตราจารย์ ดร.วันไชย คำแสน

[illegible]

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ สากล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรชกรณม์ ไอย์กุล
 รองศาสตราจารย์ ดร.ณเมียรดี อุดมพรรฆกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภพล คำปัญญา
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ ทองกุลภัทร์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษนา กันทะพะยา
 อาจารย์ ดร.พีรพล จันทพร้อม
 อาจารย์ ดร.สมพร ศรีวัฒนพล
 รองศาสตราจารย์ปรีชา สาครวังค์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมพล เรืองพัฒนาวีวัฒน์
 อาจารย์ ดร.มาลียา ตั้งจิตเจษฎา
 อาจารย์ ดร.เอสิยา เกตุแก้ว
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ วสุนธรเจริญ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่น ดอกพิมมัย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภฤติเดช บัวใหญ่
 อาจารย์ ดร.มงคล ด้านปรางตระกูล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยา แก้วอาษา
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกวิทย์ หทัยกวงษ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธินันท์ ต้นโพธิ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย ส่งงาม
 อาจารย์ ดร.ประจวบ อิมระวงศ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อิสริย์ วงศ์ศรีใส
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิรนาพรศักดิ์ แซ่เจียว
 อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ เป็ดตรวจ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภฤณณะพงศ์ พันธุ์ศรี
 อาจารย์ ดร.กัญญา ชัยอมฤต
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรวัฒน์ บุตรบุญชู
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรพิน ขาญนาสิน
 อาจารย์ ดร.เสกสรร พลสุวรรณ
 รองศาสตราจารย์ชาญชัย ทองโสภา
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ภูมิพลศาล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศักดา สมกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เวียงมูล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพิฑาร์ นามรักษ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชะ วงศ์ปิโยญ

[illegible]

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์โชติรัตน์ ธรรมบุษดี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนันท์ เพ็ชรตระกูล
 รองศาสตราจารย์ ดร.นิรุพร ไชยญาติ
 อาจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล
 รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ ฝั่งสุข
 รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควิทท์วัฒน์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ รักผากวงศ์
 อาจารย์ ดร.สุธาสินี คุปตะบุตร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระวี พรหมหลวงศรี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยอด สุขะมงคล
 รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเริง อินทามะ
 อาจารย์ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาวิไล นาคทวีชัย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ นารายณ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิกิจ สุวัฒน์
 รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ สือเอ
 รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง วังศิลาบัตร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ นางหิน
 ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์
 รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย ใจกล้า
 รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา พิพย์สุวรรณพร
 รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวณิชเลิศ
 รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร ปิณเรศ

มหาวิทยาลัยมหิดล
 มหาวิทยาลัยมหิดล
 มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
 มหาวิทยาลัยราชภัฏปทุมวัน
 มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
 มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
 มหาวิทยาลัยรามคำแหง
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 มหาวิทยาลัยสยาม
 มหาวิทยาลัยสยาม
 มหาวิทยาลัยสยาม
 มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
 สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
 สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เทคนิคการควบคุมแบบทำนายกระแสส่วนเกินสำหรับการลดข้อผิดพลาดการคำนวณค่าเงินเฟ้อสูงสุด

Predictive Current Control Technique for Maximum Power Demand Compensation

สามารถ แจ้งปฏิทิน และ งดผู้พิการ พันธุ์คง :

โดยที่ α คือค่าความไวต่อความถี่ของสัญญาณ และ β คือค่าความไวต่อความถี่ของสัญญาณ

อัครราชบัณฑิต จิตต์โสปลักษณ์ณี ไกรภักดิ์ 0-2349-3420 E-mail: 'somart.bhikul@rmut.ac.th, 'raishabha@rmut.ac.th

UNIVERSITY

[illegible]

คำสำคัญ : การควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อลดความผิดพลาดของกระบวนการผลิต การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

Abstract

This paper proposes a predictive current control technique for the maximum power demand. The power systems are connected with photovoltaic system through the transmission line to compensate the maximum power demand of grid in the daytime. The control technique will vary the current of inverter of the photovoltaic system to supply the current into the grid demand rapidly. Consequently, it is evident that the reference current is equal to the measured current. The phase angle observation that the grid connects to the photovoltaic system to track the peak grid power with phase-locked loop. Therefore, the maximum power of grid is depend on the current control of the inverter. The simulation results shown that the maximum power demand can be compensated by the predictive power control method.

Keywords: Predictive current control, grid connected grid, and power demand

๑. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานในไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัยและอุตสาหกรรมต่างๆ มีประสิทธิภาพที่ต่ำลงเรื่อยๆ และรัฐบาลได้มีนโยบายจัดทำแผนพลังงานต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้ใช้ครอบคลุมถึงภาคส่วน ซึ่งในการจัดทำโครงการเพื่อผลิตถ่านหินไฟฟ้า เพื่อเป็นพลังงานหลักที่จะใช้แทนถ่านหินจากต่างประเทศในรูปแบบของโรงผลิตและโครงสร้างพื้นฐาน โดยการลงทุนนี้จะอยู่ที่ 1.5 ถึง 2 หมื่นล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งประเทศไทยมี 42,299 เมกะวัตต์ และมีความต้องการใช้ถ่านหินไฟฟ้าประมาณ 30,000 เมกะวัตต์ต่อปี โดยมีความต้องการใช้ถ่านหินไฟฟ้าประมาณ 29,000 เมกะวัตต์ โดยมีส่วนที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากธุรกิจอยู่ที่ร้อยละ 3.5 และอุตสาหกรรมประมาณร้อยละ 1.5 ซึ่งมีความต้องการใช้ไฟฟ้าและมีความต้องการก๊าซธรรมชาติ (Peak Demand) ของประเทศไทยอยู่ที่ 34,000 เมกะวัตต์ เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 1.5 ในปี 2560 ตามแผน 2590 ซึ่งมีการคาดการณ์ว่ามีผลกระทบด้านลบกับพื้นที่เรียกว่า Duck Curve ซึ่งเห็นได้ว่าในช่วงเวลากลางวัน จะใช้ไฟฟ้าพลังงานจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในช่วงกลางวันจะผลิตไฟฟ้าได้มากเกินความต้องการใช้ จึงจำเป็นต้องหาโรงไฟฟ้าที่มากทดแทนในช่วงเวลาช่วงกลางคืน แต่ในทางกลับกัน ถ้าสามารถลดต้นทุน หรือใช้เทคโนโลยีต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าแบบใช้พลังงานไฟฟ้าให้เป็นประโยชน์สูงสุด ดังนั้นบทความนี้จึงได้มีเสนอวิธีการหรือเทคนิคเพื่อใช้ควบคุมพลังงานในส่วนและแปลงพลังงานที่เรียกว่า สควอร์เดสซ์ ที่นำพลังงานส่วนเกินมาแปลงเป็นไฟฟ้าได้เพื่อนำมาผลิตพลังงานทดแทนใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของช่วงกลางวันไฟฟ้าเพื่อลดต้นทุนของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้วิธีการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยตัวควบคุม 6 ตัวของอินเวอร์เตอร์ (1-3) ขาควบคุมขาควบคุมขาทำงานของอินเวอร์เตอร์ 6 ตัว ได้เปรียบเทียบกับควบคุมแบบขนาน โดยจะนำไฟฟ้าจากตัวเข้ามาใช้ร่วมกัน [4] ซึ่งระบบจะมีความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพสูงเพื่อให้สามารถใช้งานได้กับโรงไฟฟ้าประเภทต่างๆ

2.1 เกณฑ์การควบคุมคุณภาพงานกระบวนการไฟฟ้ากำลัง

บท: ได้ใช้ลักษณะรูปแบบการเขียนและการทำภาพประกอบวิธีเขียนดังรูปที่ 2



รูปที่ ๔. อัตราการนำเข้าของสินค้าในสินค้ากลุ่มสัตว์

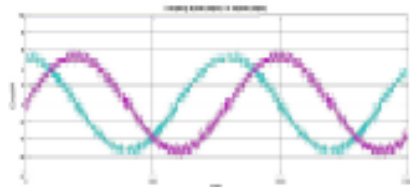
จากรูปที่ 3 แสดงด้วยวงกลมในวงรีด้วยระบบพิกัดขั้วกลางการควบคุม การที่ เรนบนโลกที่ 3 มีเรนบนขั้วและเรนที่ไม่ใช่ เรนบนขั้วอยู่ทั้งภายในเรนบนขั้ว เพื่อเป็นการเรียนแบบของการจำค่าไฟฟ้ในระบบ 3 เฟส

การสัณฐานวิทยาในรูปที่ 3 สามารถคำนวณได้จาก

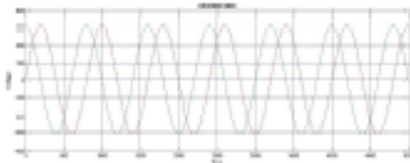
โดยที่แรงดันอากาศของการสัณขีมีในรูปที่ 3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15) - (16) ดังนี้

$$F_{\alpha} = \lambda F_{\beta} \quad (10)$$

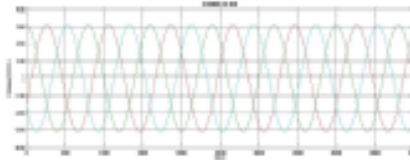
ซึ่งพิจารณาได้จากเวกเตอร์รวม $\alpha = e^{j2\pi n} = 1/2 + j\sqrt{3}/2$ จะได้การเคลื่อนที่ของอนุภาคในระนาบที่เรียกว่า "วิถีวงกลม" ซึ่งให้รายละเอียดที่สมบูรณ์เกี่ยวกับสมการนิวตันด้วยตัวอย่างเช่นกรณีที่ (10) ดังนี้



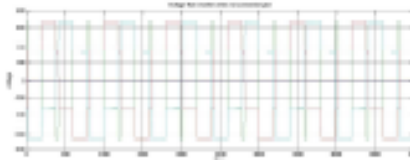
รูปที่ 4 รูปคลื่นการเปลี่ยนที่สมการกระแสเชิงซ้อนกับกระแสขาเข้า



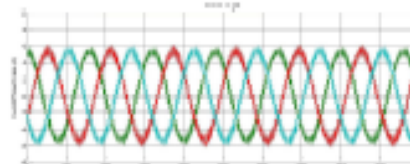
รูปที่ 5 แรงดันที่ขาเข้าได้จากการแปลงแรงดัน 3 เฟสเป็น 2 เฟส



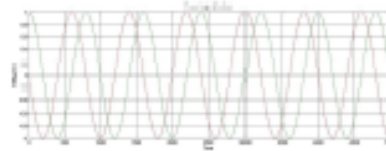
รูปที่ 6 แรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จากอินพุต 3 เฟส



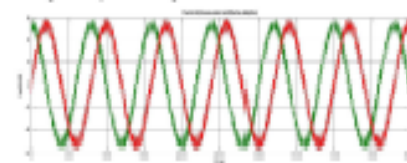
รูปที่ 7 แรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์



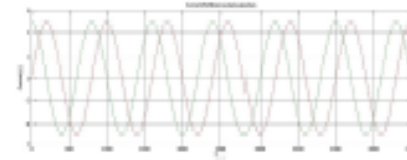
รูปที่ 8 แรงดันที่ขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จากอินพุต 3 เฟส



รูปที่ 9 รูปคลื่นของอินพุตของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 10 แรงดันที่ขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็น 2 เฟส



รูปที่ 11 กระแสที่ใช้ยังอีกจำนวน 2 เฟส

5. สรุป

จากผลการจำลองโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีผลรวมค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดโวลต์โอมได้ ภาระงานการควบคุมกระแสไฟฟ้าอย่างง่าย โดยอาศัยกระบวนการควบคุมการขึ้นและลงของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าตามขั้นตอนที่วางไว้ตามขั้นตอน D-Q เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ช่วยลดความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดโวลต์โอมได้ การขึ้นและลงของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดโวลต์โอมได้เป็นไปตามกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดโวลต์โอมได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 5, pp. 1174-1214, August 1994.
- [2] M. P. Kazemkhanlou, R. Woldoski, and F. Haddad, *Control in power electronics*, Australia Press, 2003.
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [4] J. Rodriguez, et al., "Advanced Voltage Control of a Voltage Source Inverter," *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 3, pp. 2192-2196, 2001.



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

The 11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET2019)

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้เพื่อแสดงว่า

นายสามารถ แฉ่งหิรัญ

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง

เทคนิคการควบคุมแบบทำนายกระแสสลับสำหรับการชดเชยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ระหว่างวันที่ 15-17 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ณ โรงแรม กรังด์ปรีซ์เวสต์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุดมเลขกะ
ประธานคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

จำอากาศโท ดร.ฉัตรชัย ศุภทิพย์สกุล
ประธานดำเนินงานจัดการประชุมครั้งที่ 11



การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 11(ต่อ)





高知工科大学
KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



高知工科大学 校友会
KUT ALUMNI ASSOCIATION THAI-BRANCH

ISFT - 2019

The 7th International Symposium
on Frontier Technology

24th -25th August 2019

Ambassador City Jomtien, Pattaya, Thailand

Advisory Committees

- | | |
|---|--|
| (1) Assoc. Prof. Dr. Bandhit Rojersyanont | President of TNI, Thailand |
| (2) Prof. Dr. Masahiko Isobe | President of KUT, Japan |
| (3) Assoc. Prof. Dr. Pichit Sukchareonpog | Dean of Graduate School, TNI, Thailand |
| (4) Assoc. Prof. Dr. Choompol Antarasena | Dean of Engineering Faculty, TNI, Thailand |

Conference Committees

1. KUT Alumni Association, Thai Branch

- | | |
|--|-------------------------------------|
| (1) Dr.Pheisam Sudwilai, TNI | General Chair |
| (2) Dr.Udom Junthorn, TNI | Financial Chair |
| (3) Dr.Panon Letcherote, TU | Publication Chair |
| (4) Asst. Prof. Dr. Wimal San-Um, TNI | General Secretary |
| (5) Dr. Chatchai Wannaboon, TNI | VISA Application Chair |
| (6) Dr. Satchai Ongpraser, TEAM GROUP | Hotel & Travel Information Chair |
| (7) Dr. Pongsak Suttinon, CU | Organizing and Technical Committees |
| (8) Dr. Piriya Uraiwong, Mekong River Commission | |
| (9) Asst. Prof. Dr.Khanit Matre, SWU | |
| (10) Asst. Prof. Dr. Piysong Janmool, KMUTT | |
| (11) Dr. Chaklam Silasuwanchai, STIU | |
| (12) Dr. Parkfun Duriyasart, VISTEC | |
| (13) Dr. Nattagit Jiteuntragool, TNI | |
| (14) Dr. Chiramathe Nami, TNI | |
| (15) Dr. Anuwat Attachiyawuth, KU | |

2. KUT Alumni Association, Chinese Branch

- | | |
|---------------------------------|---|
| (1) Assoc. Prof. Dr. Sun Liang | Dalian University of Technology |
| (2) Assoc. Prof. Dr. Xin Li | Chinese Academy of Posts and
Telecommunication, Jilin University |
| (3) Asst. Prof. Dr. Ruiqing MA | Taiyuan University of Technology |
| (4) Asst. Prof. Dr. Pengfei YAN | Taiyuan University of Technology |

3. Kochi University of Technology, Japan

- | | |
|-------------------------------|---------------|
| (1) Prof. Dr. Li Chaoyang | Chair, IRC |
| (2) Prof. Shinichiro Sakikawa | Director, IRC |
| (3) Prof. Dr. Hiroshi Shima | IRC |

45	"Structure Control of Nanocarbon Metamaterials" Hiroshi Furuta, Adam Pander, Hiroki Miyaji, Sachio Hayashi, Masaki Komori, Fumiya Nagamine, Junthorn Udom and Akimitsu Hatta	60
46	"Design and Characterization of a Microchannel Splitter for Optical Fiber Communication Fabricated by 3D Printing Technology" Md. Mehedi Hasan, Md. Muzammel Hoque and M. Hasnat Kabir	61
47	"Optimal Placement of Solar Farm and EV-Charging Station using Metaheuristic Optimization Technique" Kulsomsap Yenchemchait, Yuttana Kongjeen and Krischonme Bhumkittipich	62
48	"Impact of Battery Energy Storage System Integrated Distributed Generation based on Standalone Renewable Energy System" Prakasit Prabpai, Yuttana Kongjeen and Krischonme Bhumkittipich	63
49	"Energy Demand Reduction of Power System with PV Grid-Connected Inverter using Predictive Current Control Technique" Samart Janghirun, Natheebhat Phankong and Krischonme Bhumkittipich	64
50	"Design of Flyback Converter for Agriculture Applications using Digital Control" Sidtha Rattanakam and Krischonme Bhumkittipich	65
51	"Design of Load Frequency Control In Two-Area Interconnected Power System under Solar Farm Installation" Sontaya Manmai and Krischonme Bhumkittipich	66
55	"A Design and Development of Low-Cost Electrical Dynamometer for Electrical Machines Laboratory" Phaisam SUDWILAI	67

Energy Demand Reduction of Power System with PV Grid-Connected Inverter using Predictive Current Control Technique

Samarit Janghirun, Nathabhat Phankong and Krischonme Bhunkittipich
Power and Energy Research Unit Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand
samarit_j@mail.rmutt.ac.th, nathabhat.p@en.rmutt.ac.th, krischonme.b@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper presents the energy demand reduction of power system with PV grid-connected inverter using predictive current control technique. According to reduce the monthly payment bill, This study proposes the control algorithm by using a predictive current control process. It is able to reduce the load current of supplying electricity from the grid system up to 10 A. The MATLAB/Simulink mathematical engineering processes is selected to show the system performance. The specified value of the supply voltage of the PV battery at 600 V and the maximum current reference at over 10 A were set into the MATLAB/Simulink program. The inverter module is connected to the grid through power transformer with a capacity of 50 kVA, 3 phase, 380 V. The simulation shows that the electricity reduced unit meter of the establishment down 1,974 units per month, the idea of electricity cost 3.80 baht per unit. It can save electricity per month for 7,501.2 baht. Therefore, the correctness and validity of the proposed method are verified through simulation results.

Keywords— Predictive Current Control, Mathematical simulation program, grid connected



RMUTT

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

RajaMangala University of Technology
Thanyaburi

The 7th International Symposium on Frontier Technology at
Ambassador City Jomtien, Pattaya, Thailand

Paper ID
No. 47

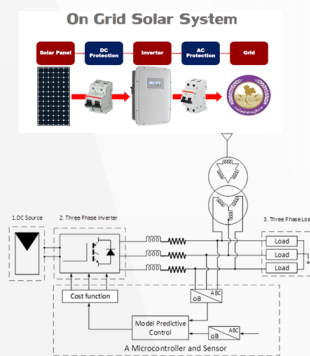


高知工科大学
KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
Thai-Nichi Institute of Technology
朝日工業大学

Energy Demand Reduction of Power System with PV Grid-Connected Inverter using Predictive Current Control Technique



Abstract— This paper presents the energy demand reduction of power system with PV grid-connected inverter using predictive current control technique. According to reduce the monthly payment bill, This study proposes the control algorithm by using a predictive current control process. It is able to reduce the load current of supplying electricity from the grid system up to 10 A. The MATLAB/Simulink mathematical engineering processes is selected to show the system performance. The specified value of the supply voltage of the PV battery at 600 V and the maximum current reference at over 10 A were set into the MATLAB/Simulink program. The inverter module is connected to the grid through power transformer with a capacity of 50 kVA, 3 phase, 380 V. The simulation shows that the electricity reduced unit meter of the establishment down 1,974 units per month, the idea of electricity cost 3.80 baht per unit. It can save electricity per month for 7,501.2 baht. Therefore the correctness and validity of the proposed method are verified through simulation results.

Keyword: Predictive Current Control, Mathematical simulation program, grid connected.

1. Introduction : This article presents a method or technique to control the transmission and conversion of energy equipment called Inverter that receives energy sources from sunlight by switching from light energy to electrical energy in the form of voltage supply source connected to the inverter set which uses the power control method of 6 inverters of the inverter [1-3]. The process to control the operation of all 6 switches selects the Predictive Current Control technique from the prior calculation [4]. The system will be accurate and close to the results gained from the actual electricity measurement. Discussing the control of switch of the inverter set, it can be accurate with quick response in order to reduce the distortion from the reference current that is set up to supply electricity to the load for reducing the current at the grid parallel to the load. This can also control the current from the supply voltage obtained from the solar cell not to supply to the grid causing the electric meter turning back to the main part.

2. Theory and method of experiment

Fig .1 Functioning behaviors of the switch in the inverter

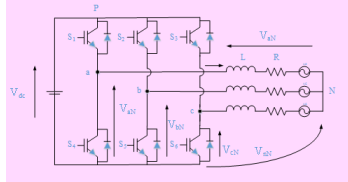


Table 1 Status of the inverter switch

S_1	S_2	S_3	Voltage Vector V
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = (2/3)V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = (1/3)V_{dc} + j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = (-1/3)V_{dc} + j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = (2/3)V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = (1/3)V_{dc} - j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = (-1/3)V_{dc} - j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

REFERENCES

- [1] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion," PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 82, NO. 8, PP. 1194-1214, AUGUST 1994.
- [2] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion," PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 82, NO. 8, PP. 1194-1214, AUGUST 1994.
- [3] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in power electronics, Academic Press, 2002.
- [4] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronics, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [5] J. Rodriguez, et al., "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter," IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 3, pp. 2192-2196, 2004.

Predictive Current Control Technique

The Predictive Current Control or the so-called Model Predictive Control or MPC is used in controlling the inverter set. Thus, we apply such theory in controlling the inverter set to connect with grid (G). The structure of control is as shown in Figure 2 by limiting the numbers following the functional position of switching of inverter. For such function, we can define the switching function in the next process. By predicting the event value in advance in order to select the switching position function, the cost function will determine the correct and appropriate position of the switching position to reduce distortion.

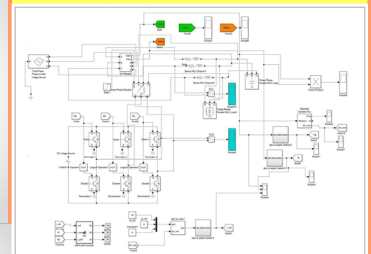
- The purpose of MPC current control is to limit the error between the measured current and the reference current. The cost function equation can be written in the form of perpendicular axis and the error can be measured between the reference current value and the measured value as shown in Equation 1.

$$g = |i_a^* - i_a| + |i_b^* - i_b| \quad (1)$$

- The equation that predicts the predicted load current in the future with reference electricity that generates predictive current control on the D-Q axis can be written as the equation (2) as follows.

$$i(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{R}{L} \int_0^{T_s} v(k) - e(k) \quad (2)$$

Figure 3 Load current reduction control model using predictive current control



3. Simulation and Results

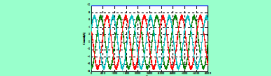


Figure 4 The Current being paralleled to the grid at 7 A

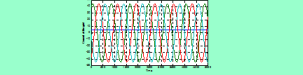


Figure 5 The Current at the grid prior to being paralleled to the inverter

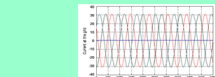


Figure 6 The current obtained from the grid parallel to the inverter

ISFT-2019 The 7th International Symposium
on Frontier Technology

Certificate of Attendance

This is to certify that

Mr.Samart Janghirum

Rajamangala University
of Technology Thanyaburi, Thailand

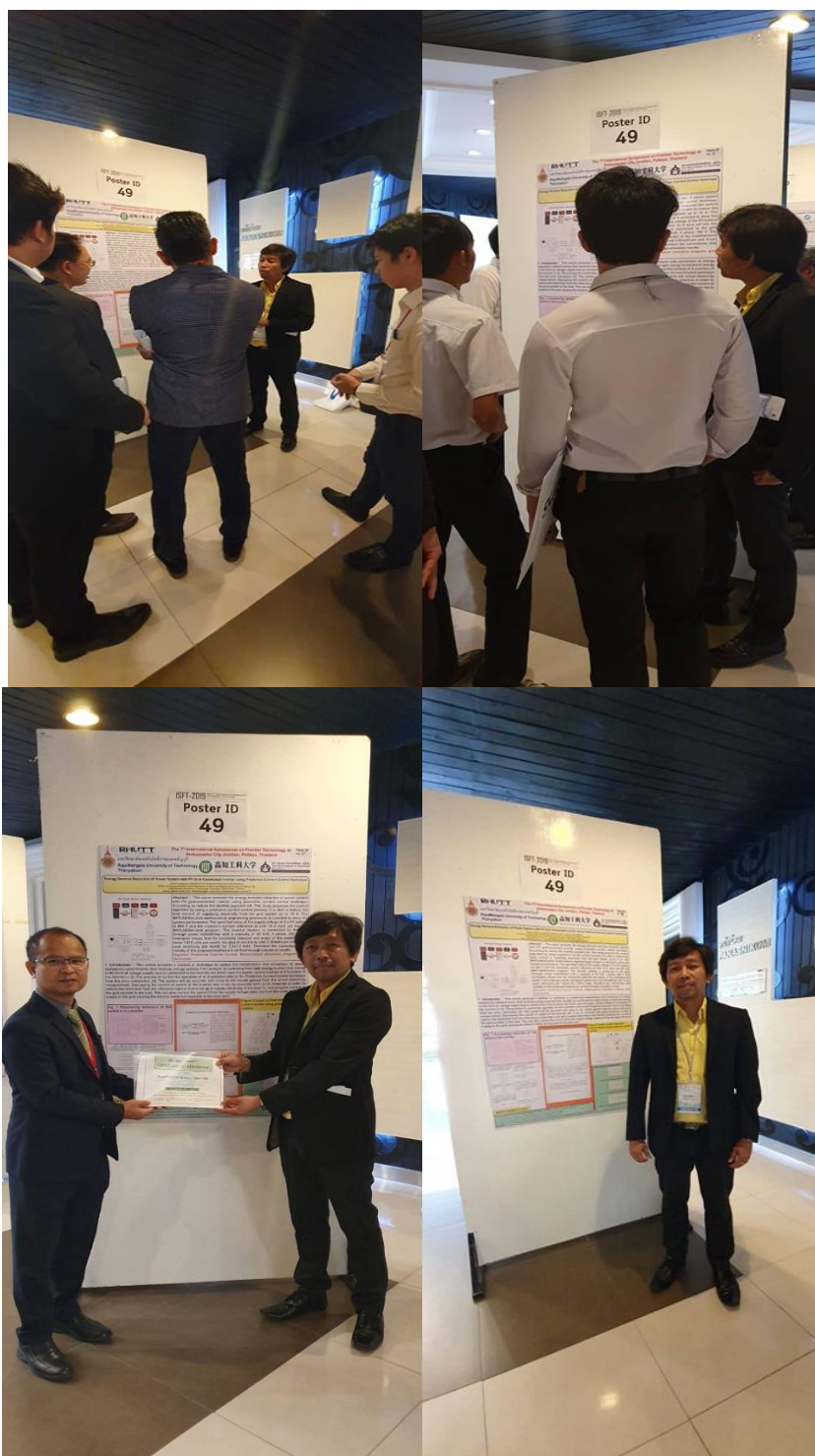
has attended ISFT - 2019

(the 7thInternational Symposium on Frontier Technology)
held at Ambassador Jomtien Hotel, Pattaya, Thailand from August 24th to 25th, 2019.


Phisarn Sudwiti
General Conference Chairman
ISFT-2019


Wimol San-Um
Secretary Conference Chairman
ISFT-2019

งานประชุมวิชาการ ISFT 2019 (24-25 August 2019)





PEACON
& INNOVATION
2019

PEA DIGITAL
UTILITY

งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรมของ PEA ปี 2562

งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟผ. ปี 2562

ระหว่างวันที่ 23 – 24 กันยายน 2562 ณ ศูนย์ประชุมวายุภักษ์
ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติฯ แจ้งวัฒนะ



Full Paper

บทความทางวิชาการ





Keep Improving Existing Business (สาขางานเดิม)

รหัส	รายละเอียด	หน้า
KE31	Fault Analysis for Solving the Effects of GPR on the Operation of Microgrid System Connected with PEA's Main Grid at Baan Khun Pee Microgrid Site Tirapong Kattawat, Patompong Boonlert / Provincial Electricity Authority	220
KE32	Cost of Energy based on Islanding Operation in Microgrid with the Impact of Distribute Energy Resources Kittak Intaprom / Provincial Electricity Authority Autthaporn Supannon, Paimet Witsanti / Chiang Mai University	225
KE33	Stochastic Two-Sided Auction-Based P2P Energy Trading Mechanism of Prosumers Pikarath Angphichitwatt, Sureschal Chaituaney / Chulalongkorn University	231
KE34	Evaluation of Lines Voltage Stability Index in Micro-grid with and without Battery Energy Storage System Richard Joseph, Asst. Prof. Boonruang Marungsi / Sukhothai University of Technology	238
KE35	การประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ VSP ในระบบจำหน่าย กฟน. แบบ Real-Time ในพื้นที่ภาคเหนือโดยใช้อุปกรณ์ข้อมูลของโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก จิตรฤกษ์ จันทา : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	245
KE36	การควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าในครัวเรือนด้วยตัวเชื่อมต่อกับกริดด้วย กระบวนการควบคุม ฟังก์ชันการควบคุมส่วนนี้ สาธิต ธีรวิทย์ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, ภูมณรัตน์ เต็มช้างดี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ณัฐพร พันธุ์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	252
KE37	การวิเคราะห์ปัญหาการจ่ายไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมผสานในพื้นที่เกาะและพื้นที่ห่างไกล : กรณีศึกษาเกาะพิัง จ.ระนอง จิรวิทย์ ชูวรรณสิทธิ์, ไรวัช ภิรมย์กุล : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณัฐพร พันธุ์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	258
KE38	Optimal Penetration of Renewable Energy Generation in The Electrical System Considering Minimum Levelized Cost of System Wenya Imcharoenkul, Sureschal Chaituaney / Chulalongkorn University	263
KE39	Optimal Sizing of Utility-scaled Battery with Consideration of Renewable Energy Uncertainty and System Power Generation Cost Chalermit Klansupar, Sureschal Chaituaney / Chulalongkorn University	269
KE40	การจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย อำเภออมลพ กรณีสายส่งระบบ 115 เควี ไม่สามารถจ่ายได้ (กรณีศึกษาพื้นที่ กฟน.3) พลสิทธิ์ เมธีกาน, ธีรวิทย์ ธีรวิทย์ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	275

คณะกรรมการ
ประชุมวิชาการและนวัตกรรม กฟผ. ปี 2562



ที่ปรึกษาคณะกรรมการ

คุณสมพงษ์ บวรเปี่ยม
คุณศรินทร์พงศ์ ฉาวยี่สุนทร

ผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
และผู้อำนวยการวางแผนและพัฒนาการระบบไฟฟ้า



ประธานคณะกรรมการ

ร้อยโทสุพจน์ ไร่ขาวยาง

และผู้อำนวยการทรัพยากรบุคคล



รองประธานคณะกรรมการ

คุณนราวดี ศิริสรเรืองการ
ว่าที่ร้อยโทสมพงษ์ สมน้ำใส
คุณเกศิชาช แม้วชิชัย

ผู้ช่วยผู้อำนวยการทรัพยากรบุคคล
ผู้ช่วยผู้อำนวยการสารสนเทศและสื่อสาร
ผู้ช่วยผู้อำนวยการวางแผนและพัฒนาการระบบไฟฟ้า



คณะกรรมการ

คุณพริ้มสุดาญ์ ศรีพัฒนานนท์
คุณทองศกร สุทธโกวิท
คุณกัลยา แมตงเกษม
คุณศศิวิภา อัมพรสิทธิ์กุล
คุณวิโรจน์ บัวคี่
คุณภาวิธพงศ์ กิตติประภัสร์

ผู้อำนวยการฝ่ายส่งเสริมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
ผู้อำนวยการฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า
ผู้อำนวยการฝ่ายประชาสัมพันธ์
ผู้อำนวยการฝ่ายงานผู้ว่าฯ
ผู้อำนวยการฝ่ายวิจัยและพัฒนาการระบบไฟฟ้า
ผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาและสนับสนุนระบบสารสนเทศ



คณะกรรมการและเลขานุการ

คุณประติษฐ์ เพ็ญอยู่

ผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาทรัพยากรบุคคล



รศ.ดร.นเรศพรสุข
ผศ.ดร.ธัญชัย
ผศ.ดร.ชนวิฑู
ผศ.ดร.สุภาชัย
ผศ.ดร.นิพนธ์
ดร.วราวุธ
รศ.ดร.นฤมล
รศ.ดร.ภัทราภัสสร
ดร.วิภาวิทย์
คุณบุญเลิศ
คุณปกรณ์
คุณมารุต
ผศ.ดร.คมสันต์
ดร.ศรัณย์

พัฒนเกษตร
เศรษฐาภักดิ์
แสงสว่าง
ชัยทัศน์
นาสุชัย
วิฑูร
กัมภกรณ
เนตินิรม
ล้วนพงษ์
ธนาคนสาร
เลิศเสถียรชัย
พรทิบุณย์
พงษ์สมบัติ
สัมฤทธิ์เดชขจร

[illegible]

ธีระวัฒน์
 โสภณพิพัฒน์
 ธัญญาเจินต์
 เสียงเครือ
 วรวิมลแก้ว
 พนาญทุกซ์
 มีพราน
 สัมพันธ์แก้วดี
 สัจจวัฒน์นิล
 สนิทวงศ์
 พรานกัทพ์นิม
 บุญบาท
 เสาวรา
 มีพราน
 สิริภัทรโธม
 เทียมแพทพันธ์
 คงเจริญดี
 สอนสอาด

[illegible]



คณะกรรมการพิจารณาคำขอ (ต่อ)

คุณปิยะพร	ช่างสุพรรณ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณทอพงศ์	บ๊อบจาด	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณพรอนทิพา	อินทร์พันธ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณหาสนา	โมฬีกุล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณทินิจ	มุตตวรงค์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณภัทรวิทย์	สุวิทย์พันธุ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณภาณุพงศ์	เกษมเวช	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณศศิธร	ธนาภรณ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณศิวานนท์	ศิริกิจจานนท์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณศุภณัฐ	สธาว	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณสมร	การณภ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณสรายุทธ	บุรินทร์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณสุธิษฏา	สฤทธวิญญู	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณสุวิมล	ศิริธนาภรณ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณเสวิชัย	จารุวัฒน์ตึก	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณอัญชลี	ปริญญาคุปต์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณอุทัย	มีทิพย์กิจ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณอุไรรัตน์	เพ็ญสูงเนิน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
คุณเอกศนัย	เข็มน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดด้วย กระบวนการควบคุมกำลังงานกระแสแบบส่วนพหุ

สามารถ แฉ่งชัย^{1,2}, กุลชนพรพรณ์ เม็นช้างสิทธิ์³, ณฐพร พันธะ³

¹การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสระบุรี การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค smart_jgsmail@nmutt.ac.th

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี Kulcomap.ycl@gmail.com

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี Nattabhat.p@nmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ เป็นการออกแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดภายในที่บ้านอยู่อาศัย โดยหลักการที่จะนำเสนอจะเป็นเป็นการนำพลังงานที่ได้จาก 2 แหล่ง มาป้อนให้กับโหลดทางไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติเราจะใช้พลังงานจากการไฟฟ้าเพื่ออย่างเดียว แต่ในการนี้ศึกษาที่จะทำการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบส่วนพหุจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์มาจ่ายควบคู่กับการใช้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบส่วนพหุ ซึ่งเป็นวิธีการจัดการเพื่อลดค่ากระแสไฟฟ้าที่รับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยสามารถลดค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อรวมเข้ากับกริดได้สูงสุด 7 แอมแปร์ เมื่อได้รับการแจ้งจากแหล่งพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการคำนวณการควบคุมกระแสไฟฟ้าร่วมกับกริด ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ (matlab/simulink) ซึ่งจะกำหนดค่าของแหล่งจ่ายแรงดันที่ของแหล่งอาทิตย์ไว้ที่ 300 V_{DC} และกระแสไฟฟ้าอ้างอิงสูงสุดที่ขนาดไม่เกิน 7 แอมแปร์ ด้วยวิธีการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ที่ต่อรวมเข้ามาเข้ากับกริดของการไฟฟ้า โดยให้มีโหลดจำนวน 15 แอมแปร์ 3 เฟส 380 โวลต์เป็นตัววัดปริมาณการใช้กระแสของการไฟฟ้า จากขบวนการทดลองดังกล่าว ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอินเวอร์เตอร์มีขนาดน้อยลง จากปริมาณเดิมที่ไหลอยู่ทุกวัน โดยสามารถลดค่ากระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 15.56 เปอร์เซ็นต์ของกระแสโหลด ค่าหลัก: กระบวนการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบส่วนพหุ, โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์/กริด

1. บทนำ

ถ้าเราพูดถึงระบบสมาร์ตกริด ก็คือ การพัฒนาให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการทำงานได้อย่างชาญฉลาดที่มากขึ้น โดยมีการใช้ทรัพยากรการให้น้อยลง มีประสิทธิภาพ

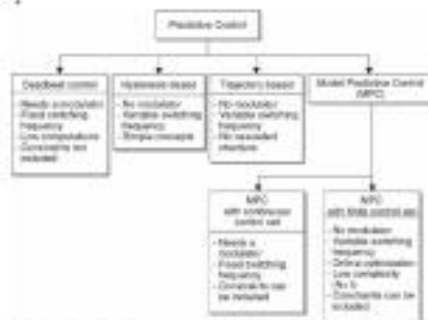
นำเชื้อเพลิง มีความปลอดภัย ยั่งยืน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านการควบคุมแบบอัตโนมัติ หรือผู้ใช้งานให้ใช้หลักการควบคุมแบบส่วนพหุกระแสส่วนพหุ เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลออก โดยการควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานในตำแหน่งที่ถูกตัดตามขนาดแรงดันและกระแส(1) แล้วเชื่อมโยงจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านไปยังกริด(2) โดยการควบคุมการเหล่านี้จะควบคุมระบบไฟฟ้าตั้งแต่ระบบการผลิต ระบบส่ง ระบบจำหน่ายไปจนถึงระบบผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าในปัจจุบันได้ถูกออกแบบให้ใช้งานมาเป็นระยะเวลาช้านาน โดยหน้าที่หลักของระบบไฟฟ้า คือ การส่งไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า โดยพลังงานที่ถูกผลิตขึ้นจะถูกแปลงให้มีขนาดและระดับที่สูงเพื่อลดการสูญเสียในขบวนการส่งไฟฟ้าในระยะเวลาที่ไกลและลดขนาดแรงดันได้ต่ำลงเมื่อส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าในอดีตจึงได้ถูกออกแบบให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวและมีระบบไฟฟ้ายังคงสามารถใช้งานได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องมีการเพิ่มศักยภาพและประสิทธิภาพในการปรับปรุงระบบไฟฟ้า ซึ่งในอนาคตจึงมีการเปลี่ยนแปลงในหลายด้านในการผลิตไฟฟ้าโดยการหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสที่กระจายตัวไม่รวมศูนย์ และกำลังการผลิตไม่สูงมากนัก สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 2 ทางเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานพบพบในการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งในขณะนี้ประเทศไทยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุด จะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆในช่วงเดือนมกราคม เราจึงต้องจัดเตรียมกำลังการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการอย่างสม่ำเสมอ จึงเสนอให้มีการสร้างโรงไฟฟ้าขนาดเล็กขึ้นซึ่งโรงไฟฟ้าขนาดเล็กจะมีการใช้ภายในช่วงเวลาไม่นานของแต่ในรอบปี ส่งผลให้ไฟฟ้าช่วยในการผลิตต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าฐานเป็นอย่างมาก เราจึงหาแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรกับ

ปริมาณและสภาพผิวจึงสามารถผลิตได้ คือพลังงานที่ได้จากแหล่งผลิตมีต้นทุนต่ำกับกริดของการไฟฟ้า เพื่อลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (3) ระบบต้องตอบสนองด้านโหลด โดยอาศัยการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (3) เฟส 2 แรตตัน โดยการควบคุมกระแสบนที่นำมาส่งพิกัดเข้าไปยังกริด เพื่อลดปริมาณการไฟฟ้าของภาคครัวเรือนให้มีค่าน้อยลงที่จะช่วยค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

2. ทฤษฎีไฟฟ้า

2.1 เทคนิคการควบคุมระบบพลังงานทดแทนไฟฟ้าส่วนหน้า

การควบคุมแบบฟีดแบ็ก [4] ครอบคลุมตัวควบคุมได้ในระดับกว้าง ซึ่งเป็นคาร์ดินัลที่สุดที่นำมาประยุกต์ใช้ในด้านพลังงาน การจำแนกประเภทสำหรับวิธีการควบคุมแบบฟีดแบ็กมีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงรายละเอียดในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของวิธีการควบคุมการพลังงานไฟฟ้าในภาคครัวเรือน

ลักษณะสำคัญของระบบการควบคุมแบบฟีดแบ็ก คือ การใช้แบบจำลองของระบบเพื่อทำนายพฤติกรรมในอนาคตของตัวแปรควบคุม ซึ่งจะถูกนำมาใช้โดยตัวควบคุมที่ได้รับผลการกระตุ้นที่เฉพาะเจาะจง และตามเกณฑ์การหาค่าที่เหมาะสมที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า

การควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าส่วนหน้า หรือเรียกอีกแบบว่า Model Predictive Control มีอีกชื่อว่า MPC [5] [6] ที่ใช้ในการควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์ เราจึงมีคำจำกัดความว่า ประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับกริด [7] โดยได้แสดงโครงสร้างการควบคุมดังรูปที่ 2 โดยการจำกัดจำนวนตัวแปรให้เป็นไป

ตามลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งการทำงานลักษณะดังกล่าวเราสามารถกำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในลำดับถัดไป จากการกำหนดค่าเหตุการณ์ล่วงหน้า เพื่อเลือกการทำงานของตัวแปรอินเวอร์เตอร์ โดยที่ค่า Cost function จะเป็นตัวกำหนดให้สถานการณ์การทำงานของตัวแปรอินเวอร์เตอร์ที่ถูกต้องและเหมาะสมเพื่อลดการผิดเพี้ยน

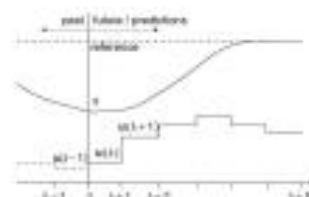


รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าส่วนหน้า

วัตถุประสงค์ของการควบคุมกระแสไฟฟ้ารูปแบบ MPC คือ จำกัดค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนด สามารถเขียนเป็นสมการ cost function ในรูปแบบคณิตศาสตร์ได้ และวัดค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและค่าที่วัดได้และตั้งสมการที่ 1

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} |i_d(k+1) - \hat{i}_d(k+1)| + |i_d(k+1) - \hat{i}_d(k+1)| \quad (1)$$

ในการเลือกสถานการณ์อินเวอร์เตอร์ที่ cost function มีค่าน้อยที่สุด จะมีการประเมินสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมดและจะเก็บค่าที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้ถัดไปจำนวนการคำนวณเกี่ยวข้องโดยตรงกับจำนวนสถานการณ์อินเวอร์เตอร์ที่เป็นไปได้ในการเลือกอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสม สถานะที่ การคำนวณเพื่อคาดการณ์สำหรับการเลือกอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นไปได้ทั้งหมดจะไม่ใช่วิธีการหาที่เหมาะสมที่สุดที่แตกต่างกันตามลำดับ เพื่อลดจำนวนการคำนวณ



รูปที่ 3 หลักการทำงานของ MPC

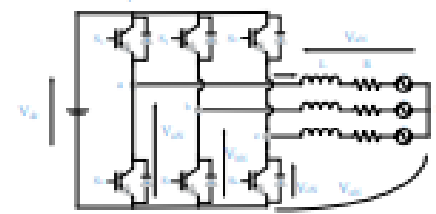
หลักการดำเนินงานของ MPC สรุปได้เป็นรูปที่ 3 โดยค่าในสมการของสถานะของระบบจะถูกคาดการณ์จนกระทั่งถึงเวลาที่กำหนดไว้ส่วนหน้า $k + N$ โดยใช้แบบจำลองระบบและข้อมูลที่ได้อยู่ (การวัด) จนถึงเวลา k ส่วนของการกระตุ้นที่เหมาะสมจะคำนวณจากค่าที่น้อยที่สุดใน cost function และนำองค์ประกอบแรกของลำดับนี้มาใช้ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้จะถูกทำซ้ำอีกครั้งสำหรับการกระตุ้นตัวอย่างแต่ละครั้งโดยพิจารณาข้อมูลใหม่ที่ได้ได้ เราจึงสามารถเขียนเป็นสมการที่ว่าด้วยการควบคุมกระแสแบบทำนายส่วนหน้าดังนี้สมการที่ (2)

$$I^*(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) I(k) + \frac{T_s}{L} (v(k) - \hat{e}(k)) \quad (2)$$

สมการที่คำนวณกระแสโหลดที่คาดการณ์ในอนาคตกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อสร้างควบคุมกระแสแบบทำนายส่วนหน้าบนแกน D-Q(8) (9) สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้ โดยการลดขนาดของแวกเตอร์แรงดันหรือกระแสจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้อยู่ในรูปแบบ 2 เฟส อยู่ในแกนแอลฟาและเบต้าดังนี้สมการที่ (3)

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4 หลักการดำเนินงานของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์
วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สามเฟส แสดงดังรูปที่ 4 แสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการแปลง

ผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยสวิตช์กำลังจำนวน 6 ตัว แบ่งเป็นเฟสละ 2 ตัว ทำตามแบบตรงกันข้ามกันของกันแต่ละเฟส เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดวงจรในขณะใด การทำงานของสวิตช์กำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับโดยอาศัยหลักการดำเนินงานของสวิตช์ ประกอบด้วยตัว S1-S6 เมื่อแผนการทำงานด้วยสมการต่อไปนี้ (3) - (5) และตารางที่ 1

$$S_a = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ is On \& } S_6 \text{ is Off} \\ 0 & S_1 \text{ is Off \& } S_6 \text{ is On} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ is On \& } S_5 \text{ is Off} \\ 0 & S_2 \text{ is Off \& } S_5 \text{ is On} \end{cases} \quad (4)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ is On \& } S_4 \text{ is Off} \\ 0 & S_3 \text{ is Off \& } S_4 \text{ is On} \end{cases} \quad (5)$$

โดยที่แรงดันเอาต์พุตจากการสวิตช์ที่แสดงในรูปที่ 4 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) - (8) ดังนี้

$$V_{an} = S_a V_{dc} \quad (6)$$

$$V_{bn} = S_b V_{dc} \quad (7)$$

$$V_{cn} = S_c V_{dc} \quad (8)$$

ซึ่ง 4 ที่พิจารณาจากแวกเตอร์รวม $\alpha = e^{j(2\pi/3)} = 1/2 + j\sqrt{3}/2$ จะได้การเปลี่ยนที่ของมุมระหว่างเฟสเท่ากับ 120 องศา จึงได้แรงดันเอาต์พุตเมื่อเขียนเทียบกับนิวตรอนดังนี้สมการที่ (9) ดังนี้

$$V_o = \frac{2}{3} (V_{an} + \alpha V_{bn} + \alpha^2 V_{cn}) \quad (9)$$

เมื่อมีการกำหนดค่าโหนดที่เท่ากับโมดการทำงานของสวิตช์ที่แตกต่างกัน

เมื่อสวิตช์ทำงานที่ตำแหน่ง $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับศูนย์ (V_o) ดังนี้สมการที่ (10)

$$V_o = \frac{2}{3} (0 + \alpha 0 + \alpha^2 0) = 0 \quad (10)$$

ถ้ากำหนดสวิตช์ $(S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}) = (1, 0, 0)$ จะได้แรงดันเฉลี่ยจุด (V_u) ดังสมการที่ (11)

$$V_u = \frac{2}{3}(V_{dc} + a \cdot 0 + a^2 \cdot 0) = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (11)$$

ซึ่งสถานะของสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สถานะของสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

Switching States	Switches on			Voltage Vector V_u
	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	
S_1	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = 0$
S_2	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = (2/3)V_{dc}$
S_3	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = (1/3)V_{dc} + j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
S_4	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = (-1/3)V_{dc} + j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
S_5	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = (2/3)V_{dc}$
S_6	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = (1/3)V_{dc} - j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
S_7	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = (-1/3)V_{dc} - j(\sqrt{3}/3)V_{dc}$
S_8	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	$V_u = 0$

โดยคำนึงถึงความหมายของตัวแปรจากวงจรที่แสดงในตารางที่ 1 สถานะสวิตช์การเปลี่ยนของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสสามารถเขียนเป็นตามสมการที่ (12) - (14) ดังนี้

$$V_{u1} = L \frac{di_1}{dt} + R_i i_1 + e_1 + V_{u1} \quad (12)$$

$$V_{u2} = L \frac{di_2}{dt} + R_i i_2 + e_2 + V_{u2} \quad (13)$$

$$V_{u3} = L \frac{di_3}{dt} + R_i i_3 + e_3 + V_{u3} \quad (14)$$

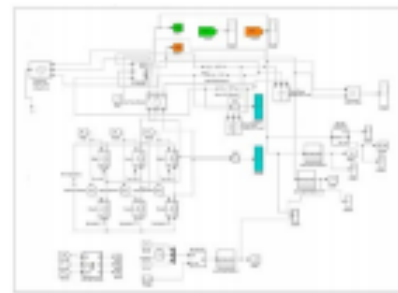
ดังนั้น ถ้านำสมการที่ (12) - (14) แทนในสมการที่ (11) จะได้สมการที่อยู่ในเวกเตอร์ของกระแสดังสมการที่ (15) คือ

$$i = \frac{2}{3}(i_1 + a i_2 + a^2 i_3) \quad (15)$$

3. วิธีการจำลองการควบคุมการลดกระแสแม่เหล็กโดยใช้จำนวนการควบคุมกระแสแม่เหล็กส่วนหนึ่งที่อินเวอร์เตอร์

โดยผู้วิจัยได้พิจารณาการออกแบบเพื่อเขียนแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าจริง ซึ่งมีอยู่ในระบบของการไฟฟ้าที่จ่ายให้กับบ้านที่อยู่อาศัยและหน่วยงานทำการสร้างแบบจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (matlab/simulink) เพื่อหาวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่

จุดเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ซึ่งจำนวน 6 ตัว ที่ต่อขนานกับกริดแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดเพื่อลดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของกริดให้ลดลงตามวิธีการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าไว้ล่วงหน้า เรียกวิธีนี้ว่า พรีดิคทีฟคอนโทรล



รูปที่ 5 แบบจำลองการควบคุมการลดกระแสแม่เหล็กโดยใช้จำนวนการควบคุมกระแสแม่เหล็กส่วนหนึ่ง

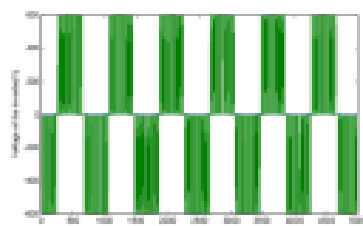
การจำลองเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์นั้น โดยใช้เทคนิควิธีการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบจากการสุ่มสัญญาณในแต่ละรอบการทำงาน เพื่อทำการประมวลผลและทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและประมวลผลค่าที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์อินเวอร์เตอร์ในแต่ละรอบการทำงานเพื่อให้มีความสอดคล้องและเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์

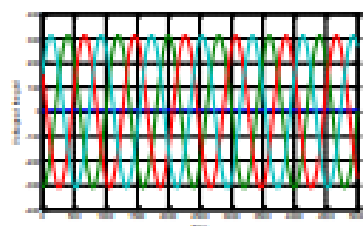
พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วยวัด
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่อินเวอร์เตอร์	600	V_{dc}
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์	380	V_{ac}
แรงดันค่ามาตรฐานที่กริด	380	V
ความเร็วไฟฟ้า	15/45	A
ความถี่การสลับที่กริด	0.5	Q
ความเร็วกริด	10	miH
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ	25	μsec
กระแสไฟฟ้า	7	A
กระแสกริด	7	A

4. ผลของการทำโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

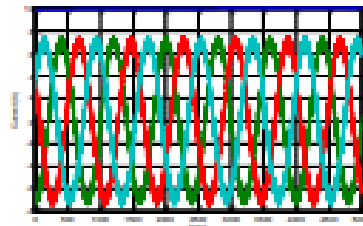
การจากผลของตามแบบที่จำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (mathlab/sumblock) โดยใช้ในการควบคุมกระแสแบบทำนายล่วงหน้าผ่านการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกับกิตที่มีเครื่องวัดขนาด 15/45 แอมป์ 3 เฟส สามารถแสดงค่ากระแสก่อนขนานกับชุดอินเวอร์เตอร์เมื่อรูปที่ 6 โดยมีความถี่ของแรงดันไฟฟ้าในแหล่งรูปที่ 6 ที่มีความถี่ 600 วัตต์ หลังจากนั้นจึงทำการขนานระบบทั้ง 2 เข้าด้วยกัน เป็นแหล่งไฟฟ้าได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปที่ 7 ที่มีความถี่ 310 วัตต์ เพื่อให้ชุดอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสร่วมกับกิต โดยให้กระบวนการควบคุมแบบทำนายล่วงหน้าโดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงรูปที่ 7 แอมป์ ดังแสดงที่รูปที่ 8 จากการที่ไม่ทำการทดลองโดยการจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ด้วยการทำนายกระแสล่วงหน้าจะได้ผลการจำลองที่รูปที่ 10 จะเป็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่องวัดมีขนาดน้อยอยู่ประมาณ 30 แอมป์



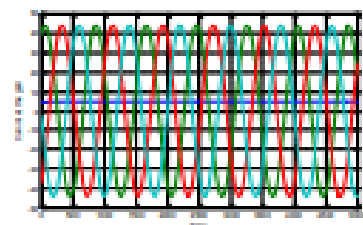
รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้า ที่อินเวอร์เตอร์ก่อนขนานกิต



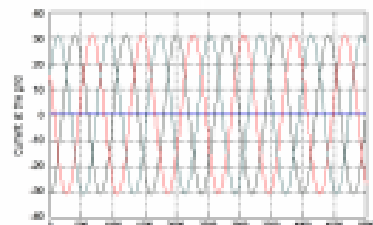
รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าที่กิตขนานกับอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าที่ขนานกับกิตที่ 7 A



รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าที่กิตที่ 45 A



รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าที่ขนานกับกิตที่ 32 A

5. สรุป

จากผลของการจำลองโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (mathlab/sumblock) ด้วยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดันที่ต่อร่วมกับกิต โดยที่มีเครื่องวัดกระแสทางผ่านเจ้าเครื่องวัดขนาด 15/45 แอมป์ 3 เฟส จ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกับชุดและอาทิตย์ที่มีอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นหัวใจหลักที่ใช้การควบคุมแบบทำนายกระแสล่วงหน้าเป็นหัวควบคุมให้กระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าคือ 7 แอมป์ มีกระแสไหลด้วยตัว

ควบคุมกระแสแบบทำนายล่วงหน้าบนแกน D-Q ซึ่งเป็นจุดประกอบที่สำคัญที่ช่วยอินเวอร์เตอร์ทำงานตามหลักการที่ง่ายมากขึ้น และจะทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสกระแสตรงเข้าปัดโมดูล เพื่อลดขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เข้ามาจากกริดให้มีขนาดน้อยลง จึงสรุปได้ว่าการสังเกตสามารถลดกระแสไหลของระบบได้ เป็นผลให้หน่วยการใช้ไฟในระบบมีประสิทธิภาพขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. C. Hou, C. C. Shih, P. T. Cheng, and A. M. Hava, "Common-mode voltage reduction pulswidth modulation techniques for three-phase grid-connected converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1971-1979, Apr. 2013.
- [2] Kaplan, S. M. (2009). Smart Grid. Electrical Power Transmission: Background and Policy Issues. The Capital.Net, Government Series. Pp. 1-42.
- [3] G. Ramos Niembro, "Modelado de la Curva de Usuarios Domesticos para la Implementacion de Medidas de Administracion por el Lado de la Demanda", Boletin Interno IE, Enero/Febrero 1998, pp 11 - 19.
- [4] Arteaga N. O., "Generadores Fotovoltaicos Conectados a la Red Electrica", IE; Informe Final de Proyecto No.IE/OI/14/10 1 16/OO 1/F, Julio 1996
- [5] M. Linderoth, "On robotic work-space sensing and control," Ph.D. dissertation, Dept. Automat. Control, Lund Univ., Lund, Sweden, 2013, Thesis No. TFRT-1098-SE.
- [6] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. M. Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," *Automatica*, vol. 36, no. 6, pp. 789-814, 2000.
- [7] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, August 1994.
- [8] F. Morel, X. Lin-Shi, J. Réif et al. "A Comparative Study of Predictive Current Control Schemes for a Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2715-2728, July 2009.
- [9] Z. Song, Y. Tian, W. Chen et al. "Predictive Duty Control of Three-Phase Active-Front-End Rectifiers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no.01, pp.698-710, Jan. 2015.



PEACON & INNOVATION 2019 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

สามารถ แจ้งภัย, กุศลกริพย์ เย็นชาลิต, ณัฐกร พันธคง

บทความเรื่อง

การควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่อกับกริด
ด้วยกระบวนการควบคุมทำนายกระแสแบบล่วงหน้า

สานงานเดิม

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการและได้รับนำเสนอใน
งานประชุมวิชาการและนวัตกรรม กฟภ. ปี 2562 (PEACON & INNOVATION 2019)
ระหว่างวันที่ 23 - 24 กันยายน 2562

(นายสมพงษ์ ปรีเปรม)

ผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล

นายสามารถ แจ้งศิริณ

วัน เดือน ปีเกิด

12 กุมภาพันธ์ 2514

ที่อยู่

27 ม.4 ต.สวนดอกไม้ อ.เสนาห์ จ.สระบุรี

การศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพ
สตรี

ประสบการณ์ทำงาน

2535-2536

บริษัท ABB SERVICE(ประเทศไทย)

2536-2536

บริษัทในเครือปูนซิเมนต์ไทยจำกัด

2536-ปัจจุบัน

งานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัด
สระบุรี

ตำแหน่ง

ผู้ช่วยหัวหน้าแผนกบริการลูกค้า

เบอร์โทรศัพท์

091-9938322

อีเมล

samart_j@mail.rmutt.ac.th