



รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่ม
แรงดันสูงยิ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส

(A High Step-Up DC-DC Converter for Three-Phase Motor
Drive Systems)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่ม
แรงดันสูงยิ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส

(A High Step-Up DC-DC Converter for Three-Phase Motor
Drive Systems)

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุदारัตน์ ขวัญอ่อน

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2562

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงยิ่งประมาณ 30 เท่า สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งประกอบด้วย วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส และมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะทำหน้าที่เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ที่ 600 Vdc ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นได้รับการพัฒนางจรให้ใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวแทนการใช้สวิตช์กำลังหลายตัว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า รวมถึงสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้โดยง่าย ทั้งนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำในช่วง 20-50 Vdc ให้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงถึง 600 Vdc โดยที่แรงดันเอาต์พุตจะถูกควบคุมระดับแรงดันให้คงที่ ที่ 600 Vdc ด้วยตัวควบคุมชนิดพีโอ จากโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจึงได้นำเสนอหลักการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม หลักการออกแบบควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันดังกล่าว จากนั้นจึงเป็นการประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ

Abstract

This research proposes a new topology of a high step-up DC-DC converter with a high voltage conversion ratio, approximately 30, for a three-phase motor drive system. The motor drive system includes a three-phase inverter and a three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM). A proposed high step-up DC-DC converter acts as a $600 V_{dc}$ power supply for the three-phase inverter. The proposed converter employs only a single power switch instead of using several switches, resulting in the satisfactory efficiency and simple control technique to regulate the output voltage. The proposed converter can step up the low input voltage (20-50 V_{dc}) to the high output voltage level approximately $600 V_{dc}$. The PI controller is used to regulate the output voltage at the level of $600 V_{dc}$. In this research, the proposed converter configuration is presented and the operation principle of the proposed converter is analyzed. The proposed converter is designed and the control strategy of the proposed converter is described. In addition, the proposed converter is employed to step up the low input voltage to the output level for a three-phase motor drive system. The simulation results show the effectiveness of proposed converter under different operating conditions.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนางสาวโสภิตา วัชรสุขโพธิ์ และ นายเกื้อกูล กองกาญจนะ ผู้ช่วยวิจัย ที่ดำเนินงานด้วยความทุ่มเทและเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

สุดาร์ตน์ ขวัญอ่อน

มีนาคม 2562



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
รายการสัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 การสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มี อัตราขยายแรงดันสูง	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง.....	9
2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยาย แรงดันสูง.....	17
2.4 สรุป.....	20
บทที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่ง ที่พัฒนาขึ้น.....	21

3.3	หลักการทํางานของวงจรแปลงผันกําลังไฟฟ้ากระแสเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น	22
3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกําลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	30
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์	33
3.6	สรุป	37
บทที่ 4	การควบคุมวงจรแปลงผันกําลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น	38
4.1	บทนำ	38
4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกําลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	38
4.2.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอวงแรงดัน (Voltage Controller Loop)	39
4.2.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอวงกระแส (Current Controller Loop)	41
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์	43
4.4	สรุป	46
บทที่ 5	วงจรแปลงผันกําลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส	47
5.1	บทนำ	47
5.2	มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโรตอรีแม่เหล็กถาวร	47
5.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ PMSM	48
5.4	อินเวอร์เตอร์สามเฟส	53
5.5	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับ PMSM	55
5.5.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแส	55
5.5.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบ	56
5.6	ผลการจำลองสถานการณ์	80
5.7	สรุป	76
บทที่ 6	สรุป	77
6.1	สรุป	77
	รายการอ้างอิง	79
	ประวัติผู้เขียน	83
	ภาคผนวก	84

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	2
1.2 โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับกริด	3
1.3 โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบอิสระ.....	3
1.4 โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบผสมผสาน	4
1.5 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส	4
2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิม.....	10
2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงอินเวอร์สลิฟแบบสองเฟส.....	11
2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ.....	11
2.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคดสองชั้น	11
2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ	12
2.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบคร่วมกับตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ	12
2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์	13
2.8 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายระดับร่วมกับตัวเก็บประจุสวิตช์	13
2.9 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสวิตช์	14
2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำตัวคู่ควบและตัวเก็บประจุสวิตช์	14
2.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิฟที่ใช้ตัวเก็บประจุคู่ควบ	15
2.12 โครงสร้างของ SC cell	15
2.13 วงจรทระดับแรงดันแบบเซต้า.....	16
2.14 วงจรทระดับแรงดันแบบอินเวอร์ตติ้งเซปิก	16
2.15 วงจรทระดับแรงดันแบบอินเวอร์ตติ้งเซต้า	16
2.16 วงจรทระดับแรงดันแบบเซปิก	17
2.17 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก	17
3.1 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น	22
3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส	23
3.3 KVL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส	23
3.4 KCL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส.....	24
3.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส	25

3.6	KVL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส	26
3.7	KCL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส	27
3.8	รูปคลื่นสัญญาณกระแส และแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	28
3.9	อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พิจารณา	29
3.10	กระแส i_{L1} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น	30
3.11	กระแส i_{L2} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น	31
3.12	พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	32
3.13	แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	34
3.14	กระแสและแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	35
3.15	การกระเพื่อมของกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	36
4.1	โครงสร้างการควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น	39
4.2	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอในวงจรควบคุมแรงดัน	39
4.3	แผนภาพการควบคุมวงแรงดันด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ	40
4.4	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอในวงจรควบคุมกระแส	41
4.5	แผนภาพการควบคุมวงกระแสด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ	41
4.6	โครงสร้างการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	43
4.7	ผลการจำลองสถานการณ์วงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อแรงดันอินพุต $20 V_{dc}$	44
4.8	ผลการจำลองสถานการณ์วงวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต	45
4.9	ผลการจำลองสถานการณ์วงวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน	46
5.1	โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว	48
5.2	แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	49
5.3	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เทียบกับแกนอ้างอิงโรเตอร์	49
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแกน qd และ abc	50
5.5	วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	53
5.6	เทคนิคการสร้างสัญญาณพัลส์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม	54
5.7	แหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิคพีดีบีเบิลยูเอ็ม	54
5.8	แผนภาพการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	55

5.9	แผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ	55
5.10	แผนภาพการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมพีไอ	56
5.11	โครงสร้างการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์	58
5.12	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อความเร็วคงที่ที่ 500 rad/s....	60
5.13	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเมื่อมีความเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	61
5.14	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส เมื่อมีความเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด	62
5.15	พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่ทำการออกแบบใหม่	63
5.16	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับโหลดความต้านทาน	64
5.17	ผลตอบสนองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อโหลดความต้านทาน 360Ω.....	65
5.18	ผลตอบสนองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อโหลดความต้านทาน 1500 Ω	66
5.19	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อน PMSM	67
5.20	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อความเร็วรอบคงที่ที่ 500 rad/s.....	68
5.21	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ.....	69
5.22	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด	70
5.23	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนโหลดแบบขนาน	71
5.24	การขับเคลื่อนโหลดแบบขนานด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อความเร็วรอบคงที่ที่ 500 rad/s.....	73
5.25	การขับเคลื่อนโหลดแบบขนานด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลด ความต้านทาน	74
5.26	การขับเคลื่อนโหลดแบบขนานด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด และ โหลดความต้านทาน	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง.....	17
3.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการกระเพื่อมของกระแสและแรงดันของวงจรที่พัฒนาขึ้น.....	33
5.1 พารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาด 1.1 kW.....	58
5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส.....	58
5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นชุดใหม่.....	64



รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
V_{in}	แรงดันอินพุต
V_o	แรงดันเอาต์พุต
V_s	แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง
D	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์
S	สวิตช์กำลัง
M	อัตราขยายแรงดัน
L_1, L_2	ตัวเหนี่ยวนำ
C_1, C_2, C_3, C_o	ตัวเก็บประจุ
$P_{O,max}$	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด
R	โหลดความต้านทาน
Δi_{L1}	ค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L1}
Δi_{L2}	ค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L2}
$\Delta v_{C2,3}$	ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน $V_{C2,3}$
Δv_{C_o}	ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน V_{C_o}
ω_n	ความถี่ธรรมชาติ
ζ	อัตราส่วนการหน่วง
ω_{mi}	ความถี่ธรรมชาติของวงกระแส
i_{L1}	กระแสอินพุต
ω_r	ความเร็วเชิงมุม
θ_r	ตำแหน่งเชิงมุม
R_s	ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส
λ_{pm}	ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์นำกระแสไฟฟ้า
$\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt}$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
T_e	แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์
ω_m	ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์
θ_m	ตำแหน่งเชิงมุมทางกลของโรเตอร์
P	จำนวนขั้วแม่เหล็ก

T_L	แรงบิดของโหลด
B	ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน
J	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และโหลด
N	พิกัดความเร็วรอบ
L_d	ตัวเหนี่ยวนำบนแกนดี
L_q	ตัวเหนี่ยวนำบนแกนคิว
i_{abc}	กระแสสามเฟส
i_{qd}	กระแสนบนแกนดีคิว
V_{qd}	แรงดันบนแกนดีคิว
V_{abc}	แรงดันสามเฟส
K_{PV}, K_{IV}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอในวงจรควบคุมแรงดัน
K_{PC}, K_{IC}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอในวงจรควบคุมกระแส
$K_{P\omega}, K_{I\omega}$	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงควบคุมความเร็วรอบ



บทที่ 1

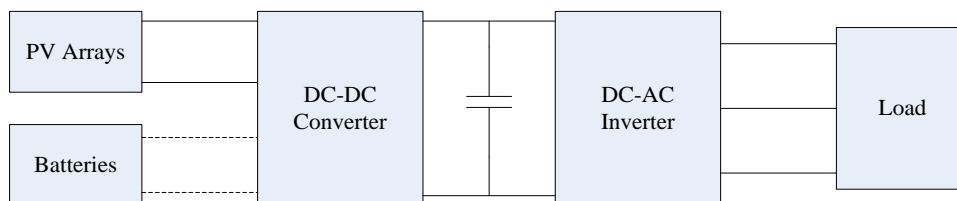
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพื่อการพัฒนาประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรธรรมชาติในประเทศที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงาน เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน มีปริมาณลดลง ซึ่งอาจหมดสิ้นในที่สุด ทำให้ต้องมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศจำนวนมาก เพื่อเพียงพอกับความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสถานะเศรษฐกิจของชาติและคุณภาพชีวิตของประชาชน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการแสวงหาแนวทางเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ซึ่งอาจทำได้โดยส่งเสริมให้มีการพัฒนาด้านพลังงานทดแทน (Renewable Energy) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) พลังงานลม (wind energy) พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell energy) และพลังงานชีวมวล (biomass energy) เป็นต้น เพื่อสามารถนำพลังงานดังกล่าวมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังคงจำเป็นต้องรณรงค์ให้ประชาชนร่วมใจใช้พลังงานที่เหลืออยู่อย่างประหยัดควบคู่กันด้วย

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรกรอบกับลักษณะทางภูมิประเทศและภูมิอากาศ ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง รวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด (clean energy) ไม่สร้างมลภาวะให้กับสภาพแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในประเทศอย่างยั่งยืน

รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบสำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic หรือ solar cell) ที่นำต่อกันเป็นลักษณะแผง PV arrays, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter), วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (Inverter) ที่ต่อเชื่อมกับโหลด (Load) นอกจากนี้ยังมีแบตเตอรี่ซึ่งเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไว้ใช้ในเวลาที่ต้องการ โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองในกรณีที่กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอกับโหลดที่ต้องการ รวมทั้งทำหน้าที่เป็นโหลดในกรณีที่แผง PV arrays ผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากเกินไป



รูปที่ 1.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

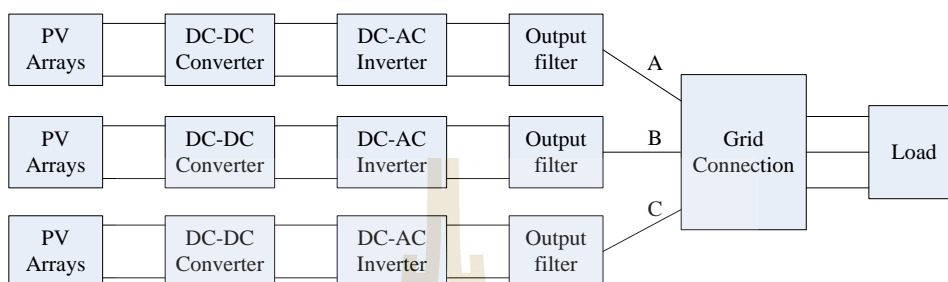
ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แผง Photovoltaic (PV) module ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก โดยสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น silicon, polycrystalline silicon หรือ amorphous silicon จะรับพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของความเข้มแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แต่เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละโมดูลมีค่าไม่สูงนักเพียงประมาณ 16 Vdc ในช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์ส่องมายังแผง PV module อย่างเต็มที่ [1] ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องนำแผง PV modules จำนวนมากมาต่ออนุกรมกัน (series-connected configuration) เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงให้สูงขึ้น [2] จากนั้นตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจะทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตอีกครั้ง และควบคุมให้ได้ระดับที่เหมาะสมกับความต้องการของตัวอินเวอร์เตอร์ เพื่อขับโหลดกระแสสลับต่อไป

อย่างไรก็ตามการนำแผง PV modules มาต่อกันแบบอนุกรมกันจะมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากนำมาใช้ในภาคครัวเรือน รวมถึงอาจทำให้กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผง PV arrays ลดลง อันเนื่องมาจากการบังเงาของเมฆ ต้นไม้ หรือการชำรุดเสียหายของแผง PV modules เป็นต้น [3] ดังนั้นการนำแผง PV modules มาต่อกันแบบขนาน (parallel-connected configuration) จึงเป็นทางเลือกที่จะทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผง PV modules ที่ต่อกันแบบขนานมีค่าน้อยไม่เพียงพอกับความต้องการของตัวอินเวอร์เตอร์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้ตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่สามารถเพิ่มค่าแรงดันได้สูงยิ่ง (high-step-up DC-DC converter) เพื่อเพียงพอกับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ [4] คือ

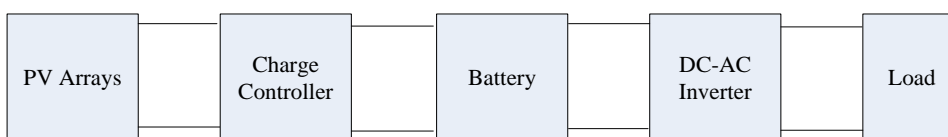
1. ระบบที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้า (grid-connected system) โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับกริดแสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งต้องใช้แผง PV modules จำนวนมากต่อกันในลักษณะต่างๆ ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น จากนั้นตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจะเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตอีกครั้งและควบคุมให้คงที่ประมาณ 380 Vdc สำหรับเป็นอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ (full bridge inverter) จะได้แรงดันกระแสสลับ 220 Vac,

50 Hz หนึ่งเฟสสำหรับเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้า ทั้งนี้วงจรกรองเอาต์พุต (output filter) จะทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงอันเนื่องมาจากการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และพร้อมสำหรับจ่ายกำลังงานให้กับโหลดกระแสสลับ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับกริด

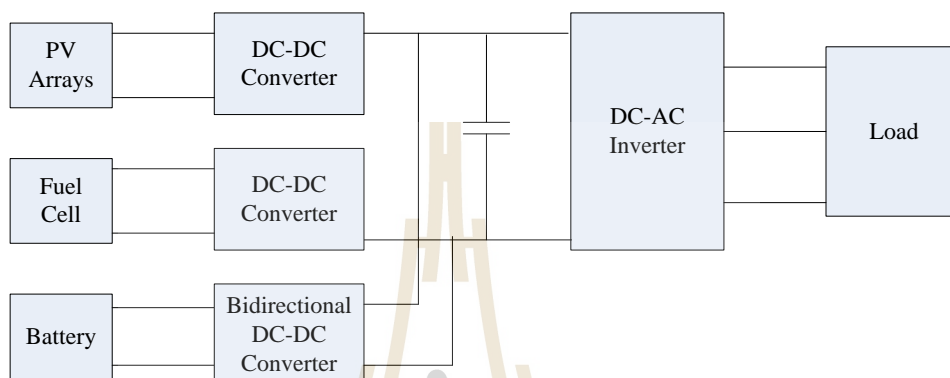
2. ระบบอิสระ (PV stand-alone power system) เป็นทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับใช้ในภาคครัวเรือนหรือชนบท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่ห่างไกลจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะไม่สูงมากนัก โดยแผง PV modules อาจถูกติดตั้งในบริเวณที่โล่งแจ้ง หรือบนหลังคาที่พักอาศัย และเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้ในแต่ละครัวเรือน โครงสร้างของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 1.3 โดยพลังงานจากแสงอาทิตย์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ผ่านอุปกรณ์ควบคุมการอัดประจุ (charge controller) จากนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในครัวเรือน ทั้งนี้แบตเตอรี่จะเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองสำหรับใช้ในเวลากลางคืน หรือใช้ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าจากแผง PV arrays ไม่เพียงพอกับความต้องการของโหลด



รูปที่ 1.3 โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบอิสระ

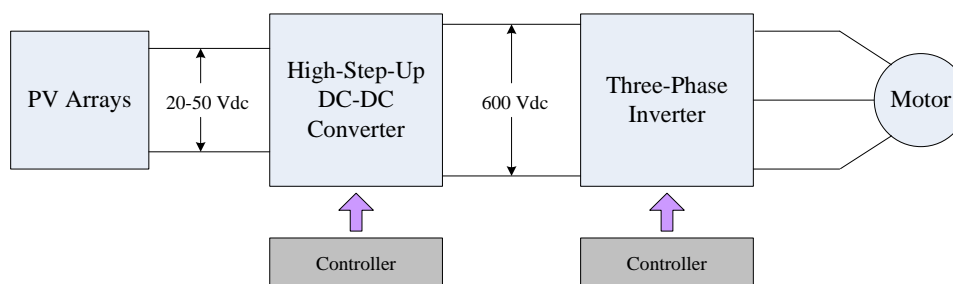
3. ระบบผสมผสาน (PV hybrid power system) เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนหลายแหล่ง อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานเชื้อ

เพลง เป็นต้น ทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งอาจจะต่อเข้ากับกริดของการไฟฟ้า หรืออาจนำไปใช้สำหรับภาคครัวเรือนที่ต้องการกำลังไฟฟ้าที่มากขึ้น รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่าง โครงสร้างของการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบผสมผสานจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานเชื้อเพลิง โดย แบตเตอรี่ยังคงทำหน้าที่ในการสะสมพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองใน กรณีที่จำเป็น



รูปที่ 1.4 โครงสร้างการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบผสมผสาน

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่ง (high-step-up DC-DC converter) เพื่อสามารถขยายระดับแรงดันเอาต์พุต กระแสตรงได้สูงถึง 600 Vdc เมื่อระดับแรงดันอินพุตกระแสตรงที่ได้จากแผง PV arrays มีค่าน้อย ประมาณ 20-50 Vdc ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ใน ภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนอย่างยั่งยืน โดยโหลดที่นำมาต่อเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นโหลดชนิด มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสที่มีกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก รูปที่ 1.5 แสดงระบบพลังงาน แสงอาทิตย์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรสำคัญสองส่วนคือ วงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันที่สูงมาก และวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบสามเฟส



รูปที่ 1.5 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 30 เท่า เพื่อประยุกต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่ได้จากแผง PV arrays มีค่าไม่สูงมากนัก และแปรเปลี่ยนค่าได้ในช่วง 20-50 Vdc ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังแผง PV modules ในการดำเนินงานจะทำการวิเคราะห์ ออกแบบ และควบคุม วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ระดับ 600 Vdc เพื่อเป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป อย่างไรก็ตามในการดำเนินงานจะพิจารณาให้โหลดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเป็นโหลดชนิดตัวต้านทานขนาดไม่เกิน 1kW เพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่พัฒนาขึ้นในการเพิ่มค่าแรงดันได้สูงยิ่งที่ระดับ 600 Vdc รวมทั้งแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงไป เทียบเคียงได้กับการความเข้มจากแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา รวมถึงการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงดำเนินการต่อไปโดยพิจารณาให้แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรที่พัฒนาขึ้นเป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อขับเคลื่อนซินโครนัสมอเตอร์สามเฟส ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบตามต้องการได้ ทั้งนี้จะทำการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการศึกษา พัฒนา วิเคราะห์ และควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จากนั้นจึงดำเนินการจำลองสถานการณ์ระบบซึ่งประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส และซินโครนัสมอเตอร์สามเฟส ทั้งนี้ในระบบที่พิจารณาจะไม่ปรากฏในส่วนของแบตเตอรี่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสำรอง เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในสภาวะชั่วคราว ดังนั้นเมื่อมอเตอร์เปลี่ยนจุดการทำงาน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ต้องสามารถถูกควบคุมให้ทำงานที่ระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ 600 Vdc แม้ในขณะความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ ทำให้ทราบข้อเด่นข้อด้อยของวงจรต่างๆ เหล่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์ในระบบที่แตกต่างกัน
- 1.2.2 เพื่อหาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์

- 1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เมื่อแรงดันอินพุตกระแสตรงของวงจรมีค่าน้อยและไม่คงที่
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส สำหรับขับเคลื่อนซินโครนัสมอเตอร์สามเฟส ให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบตามต้องการได้
- 1.2.5 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งที่ได้พัฒนาขึ้น ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส และซินโครนัสมอเตอร์สามเฟส ซึ่งจะดำเนินการควบคุมทั้งระดับแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรที่พัฒนาขึ้น และการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยอาศัยการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อได้แรงดันกระแสสลับที่มีขนาดและความถี่ที่เหมาะสม
- 1.2.6 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบ วิเคราะห์ และควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทนในรูปแบบอื่นๆ เช่น พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานลม พลังงานชีวมวล หรืออาจเป็นระบบพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน (Hybrid Renewable Energy System)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ระบบพลังงานทดแทนที่ใช้ในโครงการวิจัยคือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ปรับค่าได้ทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปรับความเข้มแสงได้
- 1.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน จะพิจารณาทั้งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่ง และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับขับเคลื่อนซินโครนัสมอเตอร์สามเฟส
- 1.3.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงจะถูกออกแบบเพื่อทำการเพิ่มแรงดันกระแสตรงจาก 20-50 Vdc เป็น 600 Vdc
- 1.3.4 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่น่าเสนอ ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส และซินโครนัสมอเตอร์สามเฟส จะถูกแสดงโดยผลการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับขับเคลื่อนระบบมอเตอร์สามเฟส เพื่อประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยศึกษาจากการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.3 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ร่วมกับการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส
- 1.4.4 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ
- 1.4.5 ผลที่ได้จากการวิจัย สามารถนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในอนาคตต่อไป

1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 6 บท ซึ่งในแต่ละบทได้มีการนำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์

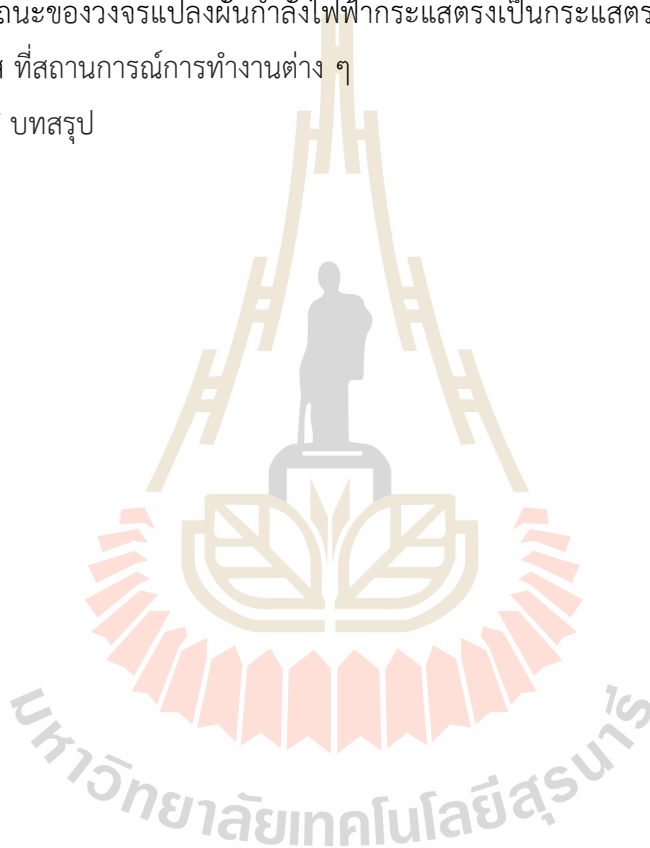
บทที่ 3 กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น รวมถึงวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรดังกล่าว แสดงการเปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันที่สูงถึงประมาณ 30 เท่า

บทที่ 4 อธิบายหลักการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบตัวควบคุมของวงแรงดัน การออกแบบตัวควบคุมของวงกระแส และผลการจำลอง

สถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นเมื่อต้องการแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ $600 V_{dc}$ ภายใต้การทำงานในสภาวะต่าง ๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสชนิดแม่เหล็กถาวร วงจรอินเวอร์เตอร์ จากนั้นได้อธิบายเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์สามเฟสชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งอาศัยตัวควบคุมพีไอที่ประกอบด้วยวงควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และวงควบคุมกระแสของมอเตอร์ โดยการใช้การแปลงระบบสามเฟส abc เป็นระบบสองเฟส dq ในกระบวนการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ทั้งนี้ได้แสดงวิธีการออกตัวควบคุมพีไอสำหรับวงควบคุมทั้งสอง จากนั้นเป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส ที่สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ

บทที่ 6 บทสรุป



บทที่ 2

การสำรวจประสิทธิภาพการที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

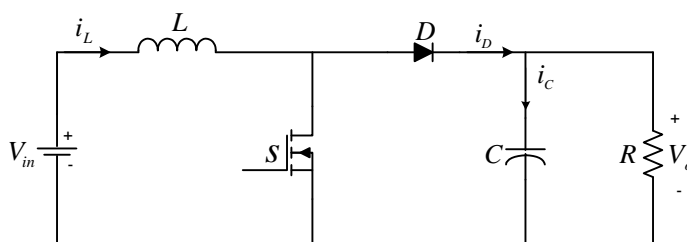
2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน เช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทนี้ จึงเป็นการนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งดำเนินการสำรวจประสิทธิภาพที่มีปรากฏในอดีต ซึ่งเกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อศึกษาข้อเด่นและข้อด้อยของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับงานวิจัยนี้

2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยแบบแรกจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกัลวานิก (galvanic transformer) เพื่อแยกกราวด์ระหว่างด้านแรงดันต่ำ และแรงดันสูง โดยหม้อแปลงดังกล่าวจะมีอัตราส่วนการพันขดลวดสูง (large turn ratio) ซึ่งความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) และตัวเก็บประจุแอบแฝง (parasitic capacitance) ที่เกิดขึ้นในขดลวดทุกขดของหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดการพุ่งเกิน (spike) ของแรงดัน และกระแสในวงจร ทำให้สมรรถนะ และประสิทธิภาพของระบบลดลง รวมทั้งอาจทำให้วงจรได้รับความเสียหาย [5] ในขณะที่แบบไม่แยกกราวด์ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลง ทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบแยกกราวด์ [6] ดังนั้นในการทบทวนประสิทธิภาพการจะมุ่งเน้นเพียงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์เท่านั้น

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิม (conventional boost converter) ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ไดโอด และสวิตช์กำลัง แรงดันอินพุต (V_{in}) และแรงดันเอาต์พุต (V_o) คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ



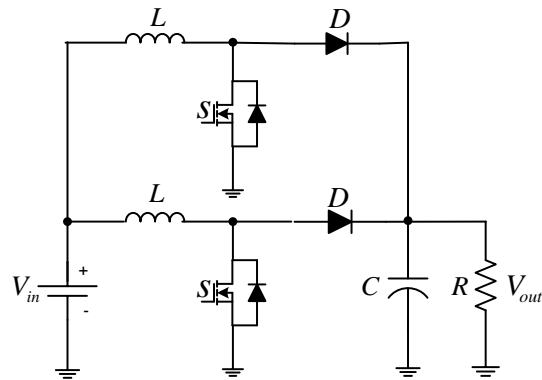
รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิม

อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 พิจารณาได้จากสมการที่ (2.1) โดยที่ D คือ duty cycle ของสวิตช์

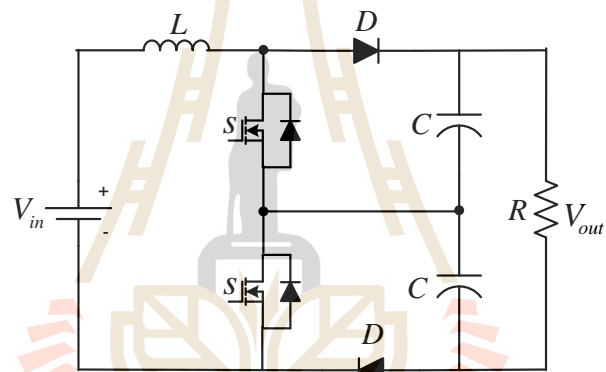
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.1)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต V_o ขึ้นอยู่กับการปรับค่า D โดยแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า D เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำงานที่ค่า D สูงๆ จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของพลาวัตของระบบที่มีต่อโหลด [7] และทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง [5] เนื่องจากกระแสกระเพื่อม (current ripple) ที่ไหลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงนำกระแส (conduction loss) สูง รวมถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงสวิตช์ (switching loss) และช่วงฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse-recovery loss) จะมีค่าสูงด้วย [8]

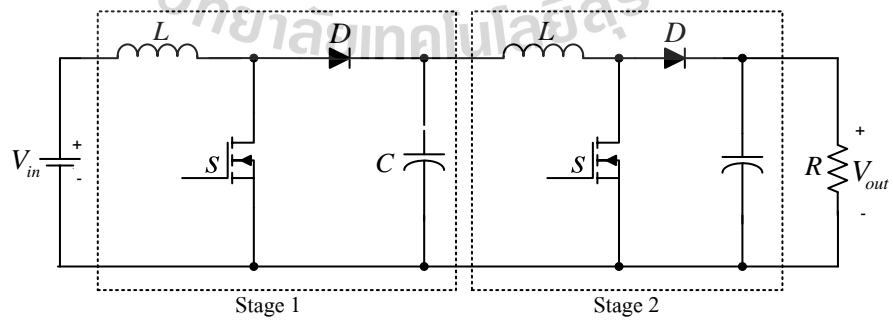
จากข้อจำกัดด้านอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิม ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของวงจรเพื่อให้สามารถเพิ่มระดับของแรงดันเอาต์พุตได้สูงขึ้น โดยรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงอินเทอร์ลีฟแบบสองเฟส (two-phase interleaved boost converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมสองวงจรมาต่อขนานกัน ซึ่งช่วยเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า ลดการกระเพื่อมของกระแส และลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ [9] รูปที่ 2.3 แสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ (three-level boost converter) [10] ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สองเท่า นอกจากนี้การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมหลายๆ วงจรมาต่ออนุกรมกัน ซึ่งเรียกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคด (cascade boost converter) [11] ยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้นได้ รวมทั้งช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยรูปที่ 2.4 แสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคดสองชั้น ทั้งนี้สามารถบูรณาการวงจรดังกล่าวโดยใช้สวิตช์เพียงตัวเดียว เรียกว่า วงจรทบระดับแรงดันกำลังสอง (conventional quadratic boost converter) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงอินเทอร์ลีฟแบบสองเฟส



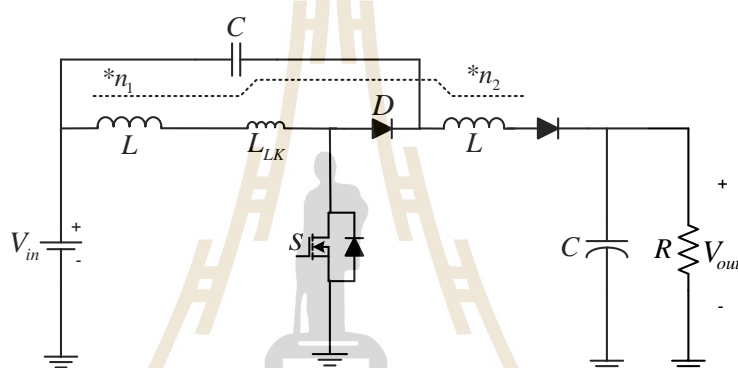
รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ



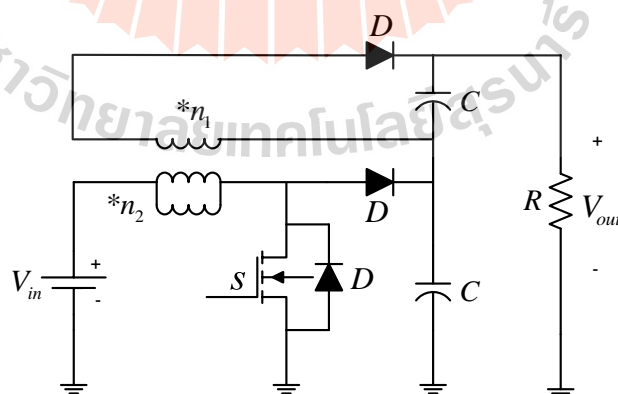
รูปที่ 2.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคดสองชั้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบไม่แยกกราวด์ แบ่งตามโครงสร้างของวงจรได้หลากหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

1. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ (coupled Inductor) [12] โดยตัวเหนี่ยวนำคู่ควบจะทำหน้าที่เสมือนหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น ทั้งนี้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบประกอบด้วยขดลวดสองชุด ซึ่งการขยายแรงดันจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ รูปที่ 2.6 เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบค (flyback converter) มาใช้งานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำคู่ควบเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงให้สูงขึ้น [13]

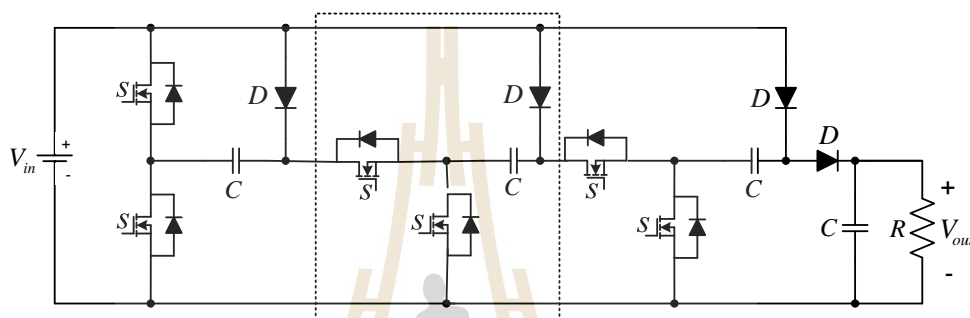


รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ



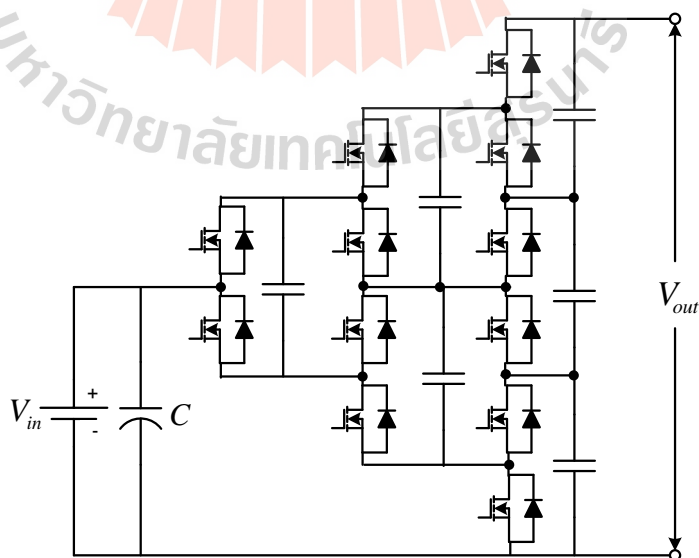
รูปที่ 2.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบคร่วมกับตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ

2. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ (switched capacitor) [14-15] ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เป็นเสมือนอีกหนึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ ซึ่งต่ออนุกรมกัน n ชุด เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันเอาต์พุต โดยตัวเก็บประจุสวิตช์ในแต่ละชุดประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ไดโอด และอุปกรณ์สวิตช์สองตัว จะเห็นได้ว่าไม่มีตัวเหนี่ยวนำหรือหม้อแปลงไฟฟ้าต่อรวมในวงจรดังกล่าว ทำให้ขนาดและน้ำหนักของวงจรลดลง



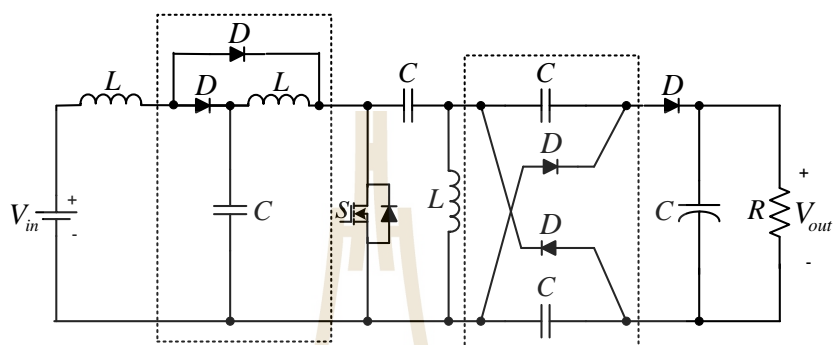
รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์

นอกจากนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบที่ใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ยังสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตโดยการนำตัวเก็บประจุสวิตช์แต่ละชุดมาต่ออนุกรมร่วมกับการต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับ (multi-level boost converter)



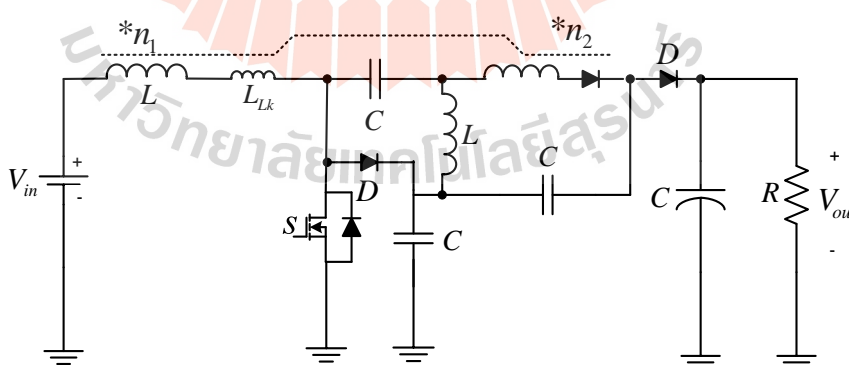
รูปที่ 2.8 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายระดับร่วมกับตัวเก็บประจุสวิตช์

3. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสวิตช์ (Inductor and switched capacitor) [16] เป็นการผสมผสานระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก (Cuk converter) เพื่อให้้อตราขยายสูงขึ้น ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 2.9 ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำสองตัวเพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสทางด้านอินพุตและทางด้านเอาต์พุต



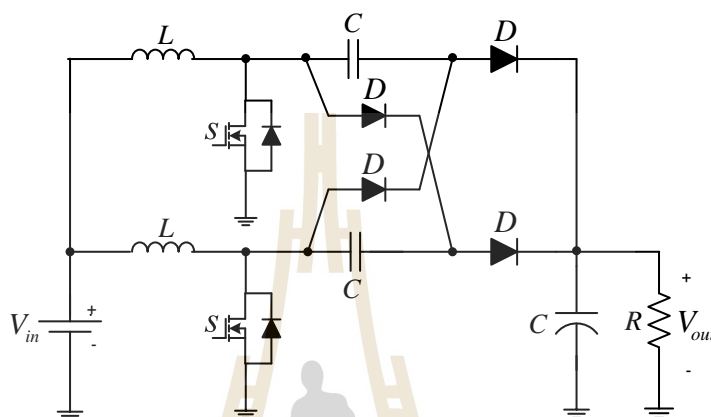
รูปที่ 2.9 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสวิตช์

4. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบและตัวเก็บประจุสวิตช์ (coupled inductor and switched capacitor) [17] เป็นการผสมผสานระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบและแบบใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ เพื่อเพิ่ม้อตราขยายแรงดันและประสิทธิภาพของวงจร โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



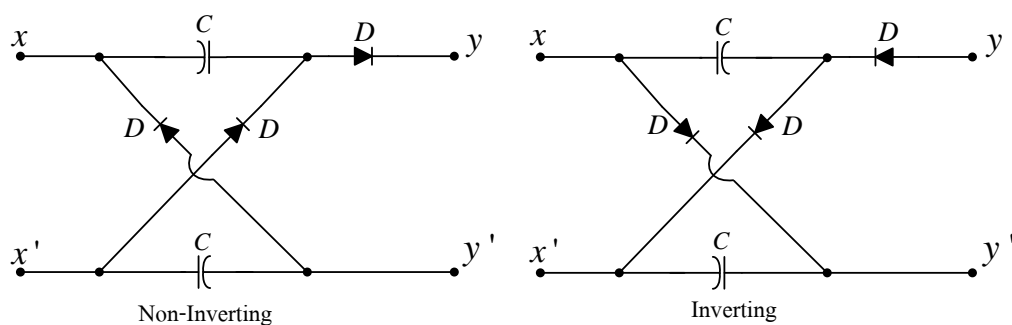
รูปที่ 2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำตัวคู่ควบและตัวเก็บประจุสวิตช์

5. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟ (interleaved boost converter) [18] เป็นการนำวงจรยกระดับแรงดันอินเทอร์ลีฟแบบดั้งเดิม (conventional interleaved boost DC-DC converter) มาต่อร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เพื่อให้อัตราขยายแรงดันของวงจรเพิ่มขึ้นได้ ช่วยลดการกระเพื่อมของกระแส รวมทั้งลดขนาดของอุปกรณ์พาสซีฟ โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟที่ใช้ตัวเก็บประจุคู่ควบแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



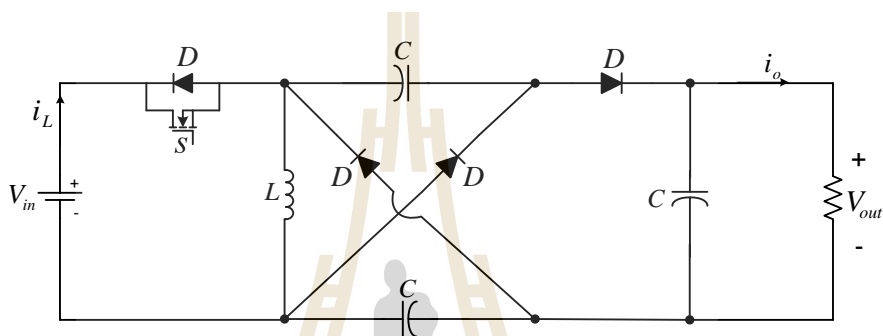
รูปที่ 2.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟที่ใช้ตัวเก็บประจุคู่ควบ

6. วงจรยกระดับแรงดันแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (high-step-up boost converter with a single switch) โดยอาศัยวงจรเสริมที่เรียกว่า SC cell ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุสองตัว และไดโอดสามตัว เข้าช่วยในการเพิ่มค่าระดับแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้โครงสร้างของ SC cell จะปรากฏในรูปแบบไม่ผกผัน (non-inverting) และแบบผกผัน (inverting) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 วงจรทั้งสองรูปแบบมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันที่ทิศทางของไดโอดทั้งสามตัว ซึ่งทำให้ลักษณะการทำงานของวงจรทั้งสองรูปแบบมีความแตกต่างกันด้วย โดยที่โครงสร้างของ SC cell แบบผกผันสามารถป้องกันกระแสย้อนกลับในวงจรได้

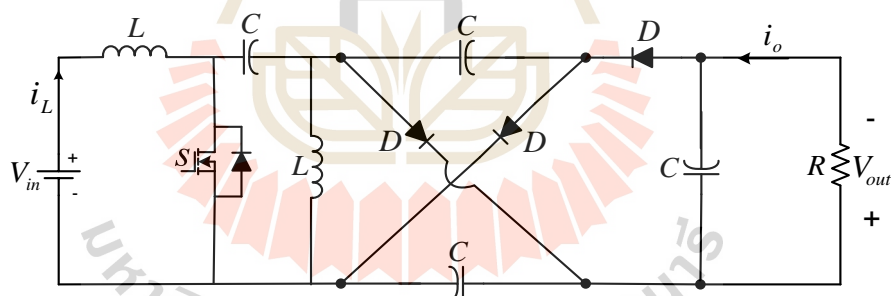


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ SC cell

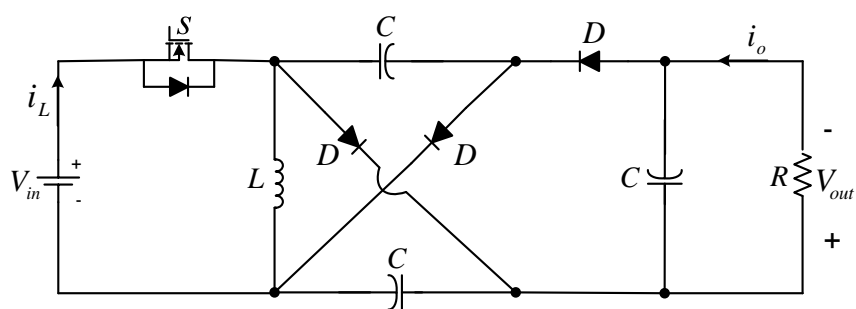
เมื่อนำโครงสร้างของ SC cell มาประยุกต์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ [19] จะได้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเพิ่มค่าระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูง ได้แก่ วงจรทระดับแรงดันแบบเซต้า (Zeta-derived boost converter) วงจรทระดับแรงดันแบบอินเวอร์ตติ้งเซปิก (inverting Sepic-derived boost converter) วงจรทระดับแรงดันแบบอินเวอร์ตติ้งเซต้า (inverting Zeta-derived boost converter) วงจรทระดับแรงดันแบบซีปิก (Sepic-derived boost converter) และวงจรทระดับแรงดันแบบชุก (Cuk-derived boost converter) แสดงดังรูปที่ 2.13 ถึงรูปที่ 2.17 ตามลำดับ



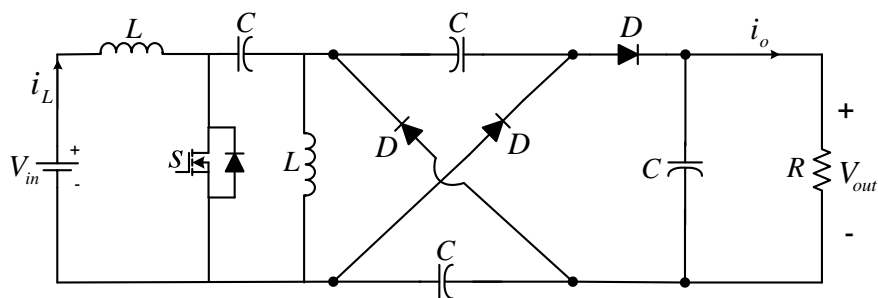
รูปที่ 2.13 วงจรทระดับแรงดันแบบเซต้า



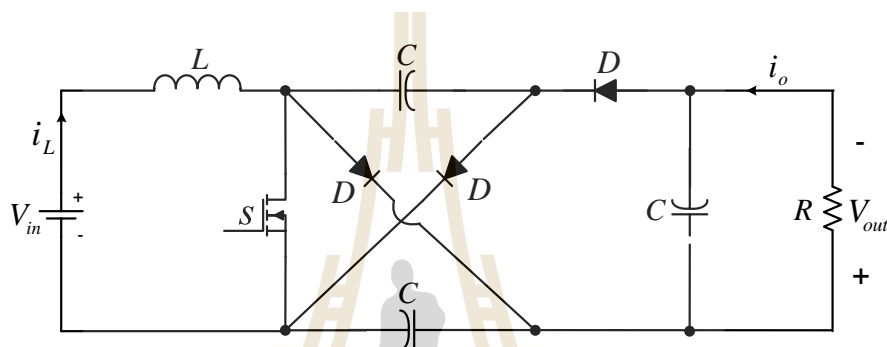
รูปที่ 2.14 วงจรทระดับแรงดันแบบอินเวอร์ตติ้งเซปิก



รูปที่ 2.15 วงจรทระดับแรงดันแบบอินเวอร์ตติ้งเซต้า



รูปที่ 2.16 วงจรทบทระดับแรงดันแบบเซปิก



รูปที่ 2.17 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก

2.3 ปรัชญ์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้างานวิจัยในอดีต เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

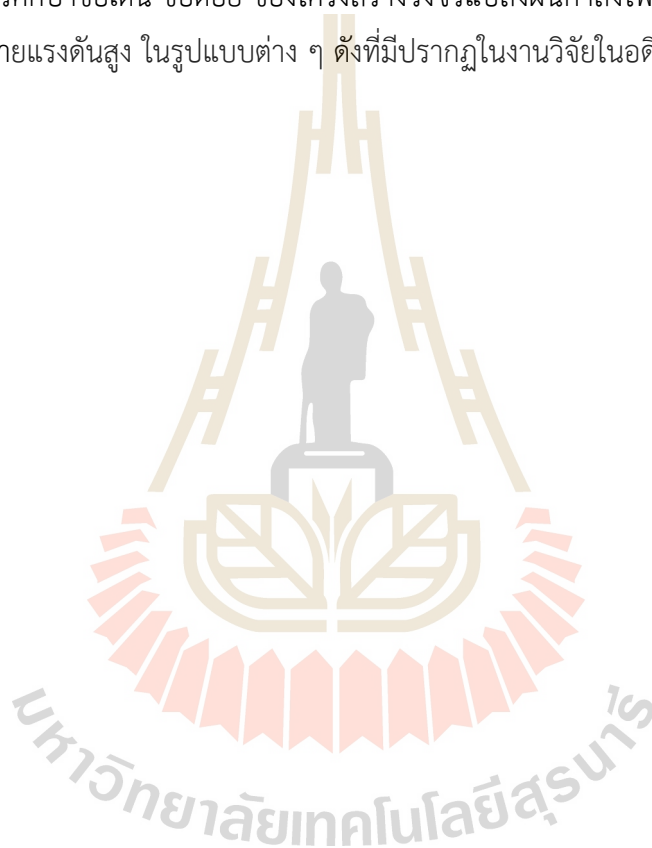
ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
2002 [20]	G. R. Walker and P. C. Sernia	บทความนี้ นำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิมมาต่ออนุกรมกัน เพื่อขยายแรงดันอินพุตที่ได้จากแผงโซลาร์ให้สูงขึ้น
2003 [21]	L. C. Franco, L. L. Pfitcher, and R. Gules	บทความนี้ นำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยนำวงจรทวีแรงดันแบบหลายเฟส (multiphase voltage multiplier) มาต่อขนานกัน เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต

2005 [22]	S.V. G. Oliveira, and I. Barbi	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามเฟส โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบสามเฟสเข้าร่วมเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต และลดการกระเพื่อมของกระแส
2005 [23]	M. Prudente, L.L. Pfitscher and R. Gules	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบเซลล์คูณแรงดัน ซึ่งชุดคูณแรงดันที่เพิ่มขึ้นในวงจรแบบดั้งเดิมจะทำให้สามารถเพิ่มแรงดันจากวงจรดั้งเดิมได้เป็นสองเท่าของวงจรดั้งเดิม
2006 [24]	H. Broeck, and I. Tezcan	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบคูล์อินเทอร์ลีฟ (dual interleaved boost converter) เพื่อใช้ในระบบที่มีแรงดันอินพุตต่ำ
2007 [25]	S.V. Araujo, P. Zacharia, B. Sahan, R. P. Torrico, and F. Antunes	บทความนี้ทำการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ ทั้งแบบแยกกราวด์และไม่แยกกราวด์เพื่อใช้เชื่อมต่อกับแผง PV modules
2008 [26]	R-J. Wai, W-H. Wang, and C-Y. Lin	บทความนี้ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น เป็นการช่วยลดจำนวนแผง PV modules ที่ต้องนำมาต่ออนุกรมกันเป็นจำนวนมาก
2008 [27]	B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici	บทความนี้รวบรวมโครงสร้างของวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสวิตช์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่ไม่ใช้หม้อแปลง เป็นการรวบรวมวิธีการเพิ่มอัตราขยายแรงดันในรูปแบบต่าง ๆ
2008 [28]	M. Prudente, L.L. Pfitscher, R. Gules G. Emmendoerfer, and E.F. Romaneli	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบเซลล์คูณแรงดัน ซึ่งชุดคูณแรงดันที่เพิ่มขึ้นในวงจรแบบดั้งเดิมจะทำให้สามารถเพิ่มแรงดันได้สองเท่าของวงจรดั้งเดิม
2009 [29]	J-M. Kwon, B-H. Kwon, and K-H, Nam	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยใช้การทำงานร่วมกันของวงจรเรียงกระแสรีโซแนนซ์อนุกรมแบบคูล์ (dual series resonant rectifier circuit) และวงจรแคลมป์แบบแอคทีฟ (active clamp circuit)

2011 [30]	J-H. Lee, J-H. Park, and J. H. Jeon	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิดฟอว์เวิร์ดฟลายแบคแบบต่ออนุกรม (series-connected forward-flyback converter) เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น
2011 [31]	G. Siazzi, P. Mattavelli, and A. Costabeber	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบคร่วมกับวงจรแยกที่ฟิแลคคัมพ์และวงจรทวิแรงดันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นมากๆ
2011 [32]	W. Li, and X. He	บทความนี้รวบรวมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบไม่แยกกราวด์เพื่อเชื่อมต่อกับแผง PV Modules เป็นการรวบรวมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ เมื่อต้องการใช้งานร่วมกับแผง PV Modules
2012 [33]	K-J. Lee, B-G. Park, R- Y. Kim, and D-S. Hyun	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำสองตัวร่วมกับตัวเหนี่ยวนำรีโซแนนซ์ เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดัน
2012 [34]	Y. Park, B. Jung and S. Choi	บทความนี้นำเสนอวิธีการสวิตซ์ในช่วงแรงดันและกระแสเป็นศูนย์ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบรีโซแนนซ์ที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรดังกล่าว
2013 [35]	S. M. Chen, T. J. Liang, L. S. Yang, and J. F. Chen	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงอัตราขยายแรงดันสูงโดยใช้การเพิ่มแรงดันจากตัวเก็บประจุเข้าช่วย ทำให้ได้อัตราขยายแรงดันสูงขึ้นและลดการกระเพื่อมของกระแส อีกทั้งยังง่ายต่อการควบคุม
2015 [36]	M.S.S.Andrade, L. Schuch, and M. L. S. Martins	บทความนี้เสนอการออกแบบและวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงอัตราขยายแรงดันสูงบูรณาการแบบกำลังสองเซต้า (Quadratic-Boost-Zeta) เป็นการวิเคราะห์หาค่าความเครียดแรงดันและกระแสที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจร

2.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ ได้นำเสนอการปฏิวัติวิศวกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูง ซึ่งเป็นประโยชน์และเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาโครงสร้างใหม่สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 ทั้งนี้ในบทนี้ได้ทำการศึกษาข้อเด่น ข้อด้อย ของโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่มีปรากฏในงานวิจัยในอดีต



บทที่ 3

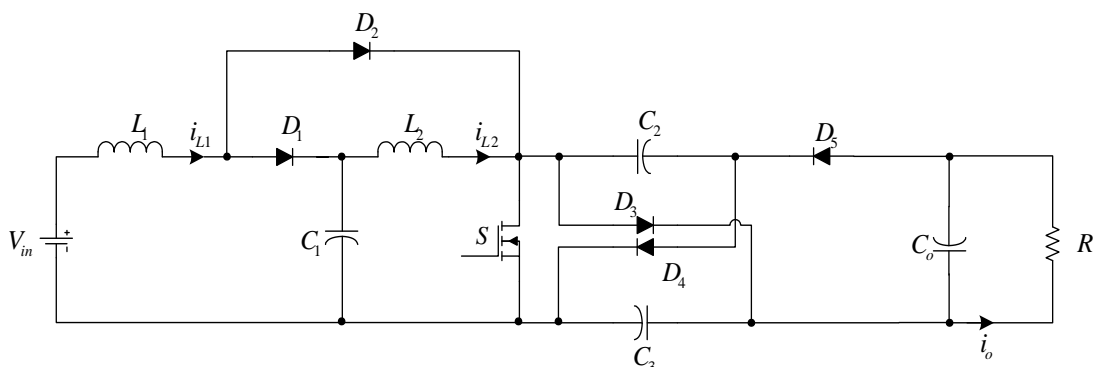
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น

3.1 บทนำ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในบทที่ผ่านมา พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจร และช่วยลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ ดังนั้นเพื่อพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งประมาณ 30 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส ซึ่งมีค่าแรงดันอินพุตประมาณ 20-50 V_{dc} โดยโครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวเท่านั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น การวิเคราะห์หลักการทำงาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมทั้งยังนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น

3.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงโดยทั่วไป สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้ระดับหนึ่ง เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม วงจรทบระดับแรงดันกำลังสอง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก เป็นต้น ดังนั้นการประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าร่วมกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระดับแรงดันเอาต์พุตที่ได้ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงต้องพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายสูงมาก เพื่อเพิ่มระดับแรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งพลังงานทดแทนประมาณ 20-50 V_{dc} ให้สูงถึง 600 V_{dc} สำหรับนำไปใช้งานกับระบบที่ต้องการแรงดันสูง เช่น ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟส โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มค่าแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของโครงสร้างวงจรประกอบด้วย สวิตช์กำลัง (S), ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2), ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2, C_3, C_4) และไดโอด (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5)



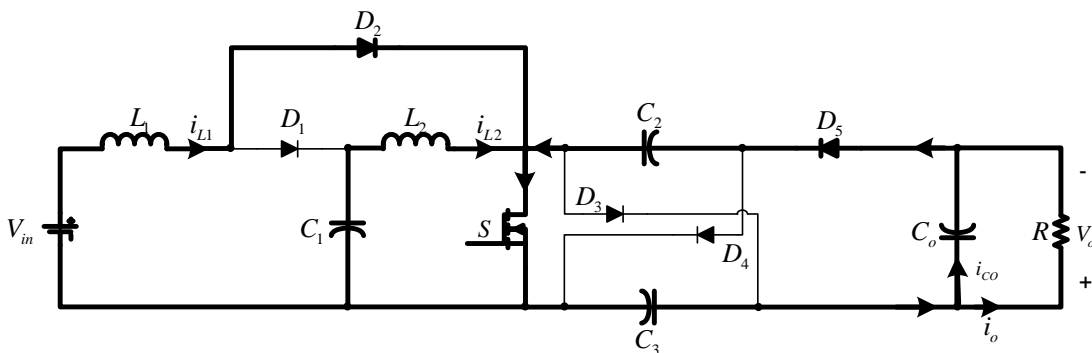
รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่พัฒนาขึ้น เป็นการผสมผสานโครงสร้างของวงจรที่สำคัญ 2 วงจร คือ วงจรทบระดับแรงดันกำลังสอง (Conventional Quadratic Boost Converter) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก (High-Voltage Cuk-Derived Converter) ซึ่งการผสมผสานโครงสร้างของวงจรทั้งสอง เป็นการเพิ่มความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นให้สูงขึ้น ภายใต้การทำงานของสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น สามารถพิจารณาการทำงานของวงจรได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส และไม่นำกระแส

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส ; ลักษณะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 พิจารณาการทำงานของไดโอดจากแรงดันที่ขั้วแอโนด (anode) และแคโทด (cathode) จะพบว่าไดโอด D_2 และ D_5 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากไดโอดทั้งสองได้รับการไบอัสตรง ในขณะที่ไดโอด D_1 , D_3 และ D_4 ไม่สามารถนำกระแส โดยที่ไดโอด D_1 ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากตัวเก็บประจุ C_1 ที่ทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดันอีกหนึ่งแหล่งจ่ายในวงจร ดังนั้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสจึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ไดโอด D_2 และ D_5 สวิตช์กำลัง S ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 และ C_0 และไหลลดความต้านทาน ซึ่งในช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ออกมาเพื่อช่วยอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_0

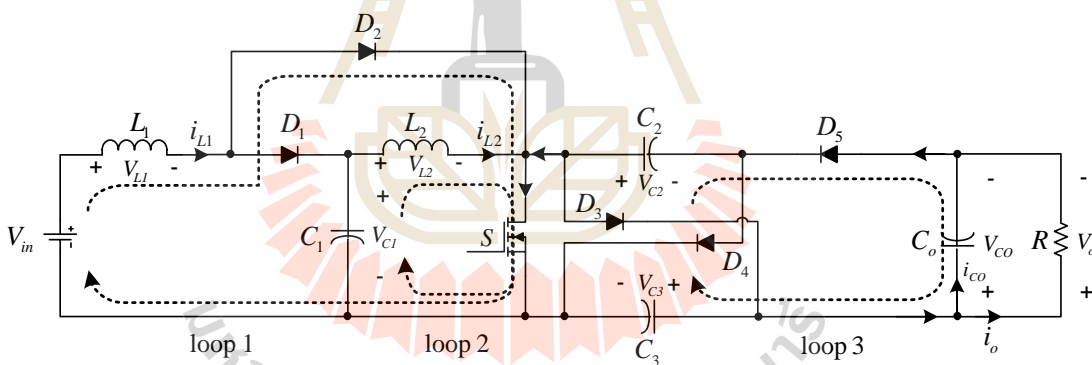


รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส โดยใช้กฎแรงดัน (KVL) และกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามลำดับดังนี้

กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) :

ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 3 วงการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 KVL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.3 ใน loop 1 และ loop 2 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแสตามลำดับ ได้ดังนี้

loop 1 ;
$$-V_{in} + V_{L1} = 0$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in}$$

จะได้

$$i_{L1} = \frac{V_{in}}{L_1} \tag{3.1}$$

loop 2 ; $-V_{C1} + V_{L2} = 0$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C1}$$

จะได้ $i_{L2} = \frac{V_{C1}}{L_2}$ (3.2)

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.3 ใน loop 3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 กับแรงดันเอาต์พุตในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส ได้ดังนี้

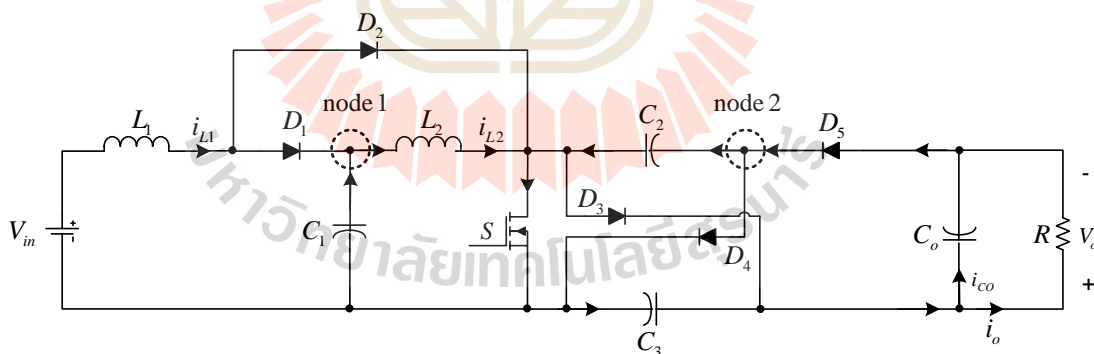
loop 3 ; $V_{C2} + V_{C3} - V_{Co} = 0$

โดยที่ $V_{C2} = V_{C3}$ และ $V_{Co} = V_o$

จะได้ $V_{C2,3} = \frac{V_o}{2}$ (3.3)

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) :

ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส สามารถพิจารณากฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 2 จุดการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 KCL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.4 ณ node 1 และ node 2 สามารถแสดงความสัมพันธ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแสตามลำดับ ได้ดังนี้

node 1 ; $i_{C1} = i_{L2}$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{L2}$$

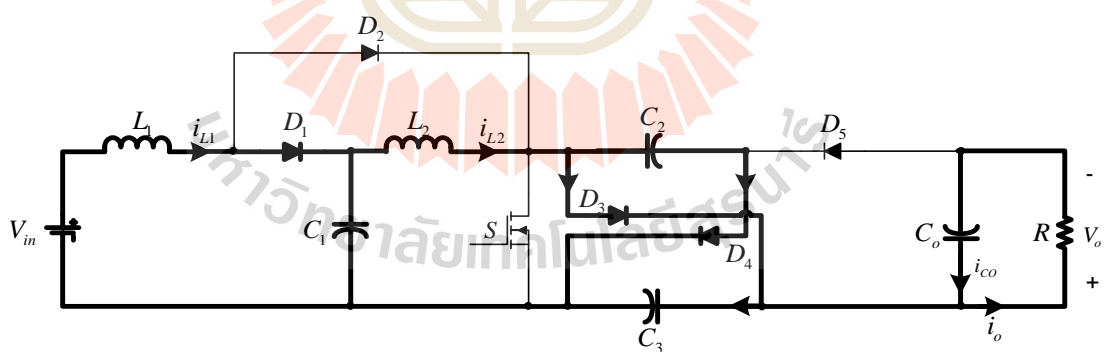
จะได้
$$V_{C1} = \frac{i_{L2}}{C_1} \tag{3.4}$$

node 2 ;
$$i_{C2,3} = i_{CO} + i_o$$

$$C_{2,3} \frac{dv_{C2}}{dt} = i_{CO} + i_o$$

จะได้
$$V_{C2,3} = \frac{i_{CO} + i_o}{C_{2,3}} \tag{3.5}$$

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส ; ลักษณะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 พิจารณาการทำงานของไดโอดจากแรงดันที่ ขั้วแอโนด และแคโทด พบว่าไดโอด D_1, D_3 และ D_4 สามารถนำกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ได้ เนื่องจากไดโอดทั้งสามได้รับการไบอัสตรง โดยที่กระแส i_{L1} ที่ไหลผ่านไดโอด D_1 นั้นถูก แบ่งกระแสออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของกระแสที่แบ่งไหลไปยังตัวเก็บประจุ C_1 เพื่อทำการอัดประจุ ให้กับตัวเก็บประจุ และส่วนของกระแสที่แบ่งไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 กระแส i_{L2} แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกันเพื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 ในขณะที่ไดโอด D_2 และ D_5 ได้รับการไบอัส ย้อนกลับจึงไม่สามารถนำกระแสได้ ช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ C_O จึงคายพลังงานให้กับโหลดความ ต้านทาน

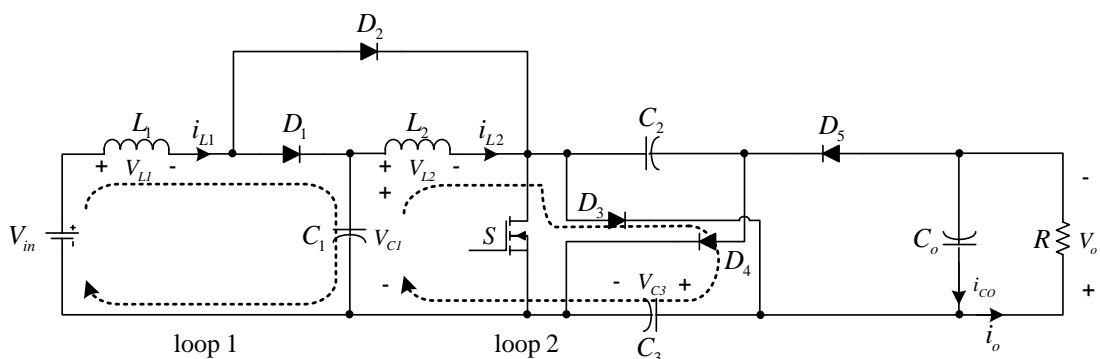


รูปที่ 3.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส โดยใช้กฎแรงดัน (KVL) และกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามลำดับดังนี้

กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) :

ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 2 วงการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 KVL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.6 ใน loop 1 และ loop 2 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในช่วงที่สวิตช์ S ไม่นำกระแสตามลำดับ ได้ดังนี้

loop 1 ;

$$-V_{in} + V_{L1} + V_{C1} = 0$$

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1}$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - V_{C1}$$

$$i_{L1} = \frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \quad (3.6)$$

loop 2 ;

$$-V_{C1} + V_{L2} + V_{C3} = 0$$

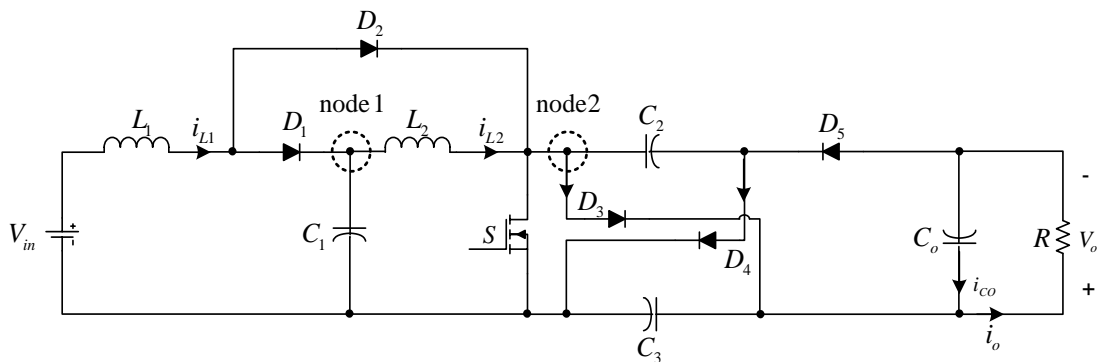
$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C3}$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C1} - V_{C3}$$

$$i_{L2} = \frac{V_{C1} - V_{C3}}{L_2} \quad (3.7)$$

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) :

ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส สามารถพิจารณากฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 2 จุดการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 KCL ในขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.7 ณ node 1 และ node 2 สามารถแสดงความสัมพันธ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ในช่วงที่สวิตช์ S ไม่นำกระแสตามลำดับ ได้ดังนี้

node 1 ;

$$-i_{C1} + i_{L1} - i_{L2} = 0$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{L1} - i_{L2}$$

$$V_{C1} = \frac{i_{L1} - i_{L2}}{C_1} \quad (3.8)$$

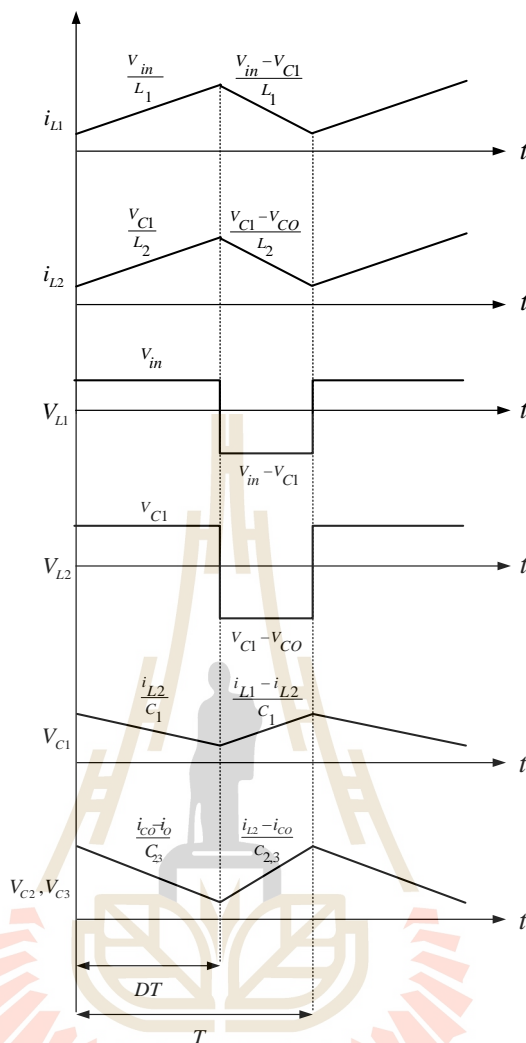
node 2 ;

$$-i_{C2,3} + i_{L2} - i_{CO} = 0 \quad \text{โดยที่ } i_{CO} = i_o$$

$$C_{2,3} \frac{dv_{C2,3}}{dt} = i_{L2} - i_{CO}$$

$$V_{C2,3} = \frac{i_{L2} - i_{CO}}{C_{2,3}} \quad (3.9)$$

จากการพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส และไม่นำกระแส ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแส และแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในสภาวะคงตัว ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.8 เพื่อหาอัตราขยายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นได้ดังนี้

$$L_1 ; V_{in} (DT) + (V_{in} - V_{C1})(1 - D)T = 0 \quad (3.10)$$

$$L_2 ; V_{C1} (DT) + (V_{C1} - V_{C3})(1 - D)T = 0 \quad (3.11)$$

จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 กับแรงดันอินพุต ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังนี้

$$V_{in}D + V_{in} - V_{in}D - V_{C1} + V_{C1}D = 0$$

$$V_{in} - (1 - D)V_{C1} = 0$$

$$V_{C1} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \tag{3.12}$$

สามารถหาอัตราขยายแรงดัน (M) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ได้จาก

$$V_{C1}D + V_{C1} - V_{C1}D - V_{C3} + V_{C3}D = 0$$

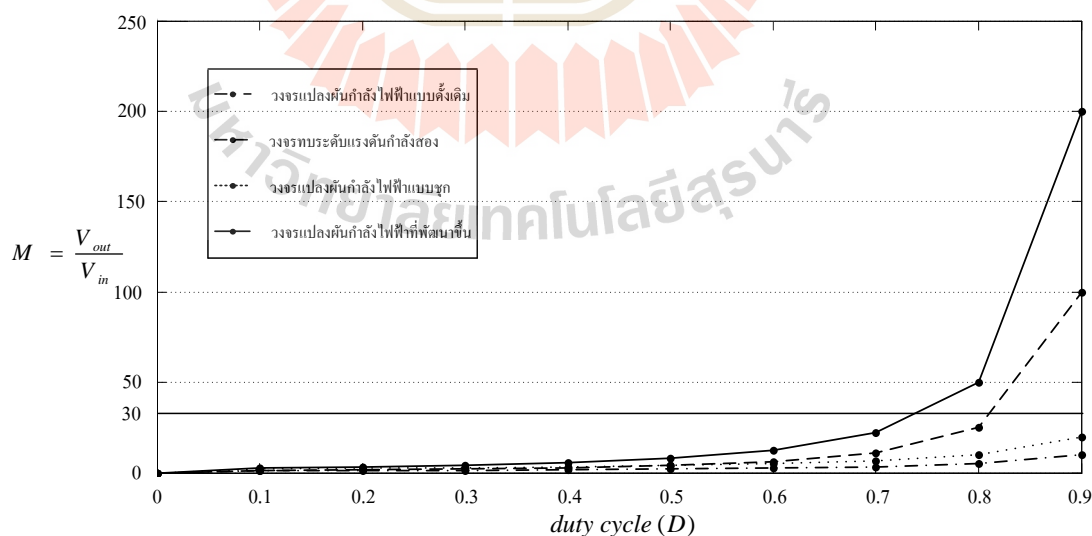
$$V_{C1} - (1-D)V_{C3} = 0$$

โดยที่ $V_{C1} = \frac{V_{in}}{(1-D)}$ และ $V_{C2,3} = \frac{V_o}{2}$

$$\frac{V_{in}}{(1-D)} - (1-D)\frac{V_o}{2} = 0$$

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{(1-D)^2} \tag{3.13}$$

พิจารณาอัตราขยายแรงดันดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่ออัตราขยายแรงดันเป็น 30 เท่า พบว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.74 ในขณะที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม วงจรทระดับแรงดันกำลังสอง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก จะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่สูงกว่า ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันได้สูงมาก โดยไม่จำเป็นต้องทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูง ๆ



รูปที่ 3.9 อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พิจารณา

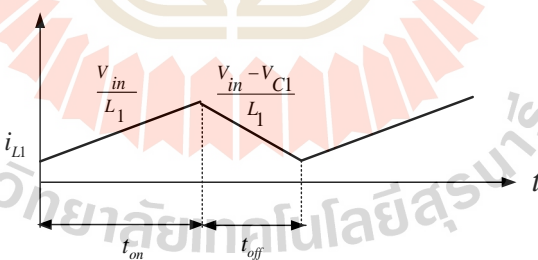
3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรที่เหมาะสม ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_0 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวนี้ เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และการกระเพื่อมของแรงดันในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันจะส่งผลถึงประสิทธิภาพของวงจร ดังนั้นจึงนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_0 ภายใต้ข้อกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และการกระเพื่อมของแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์แสดงได้ตามลำดับดังนี้

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 :

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_1 พิจารณาจากกระแส i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสแสดงดังรูปที่ 3.10 จะได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$t_{on} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{in}} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.10 กระแส i_{L1} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดังนี้

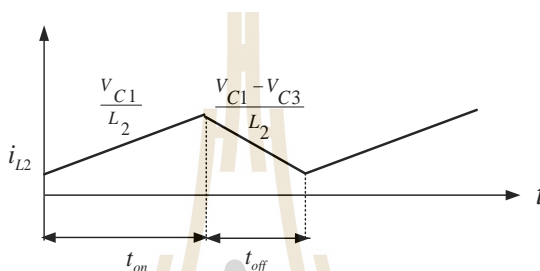
$$L_1 = \frac{V_{in} D}{f_{sw} \Delta i_{L1}} \quad (3.15)$$

โดยที่ Δi_{L1} คือ ค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L1} ที่ยอมรับได้

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_2 :

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_2 พิจารณาเช่นเดียวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 จากกระแส i_{L2} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสแสดงดังรูปที่ 3.10 จะได้สมการความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการทำงาน และค่าตัวเหนี่ยวนำ L_2 ดังนี้

$$t_{on} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{V_{C3}} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.11 กระแส i_{L2} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดังนี้

$$L_2 = \frac{V_{C3} D}{f_{sw} \Delta i_{L2}} \quad (3.17)$$

โดยที่ Δi_{L2} คือ ค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L2} ที่ยอมรับได้

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_1 :

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น พิจารณาการออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรทระดับแรงดันกำลังสอง ซึ่งออกแบบจากกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด ($P_{O,max}$) ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_1 น้อยสุดแสดงการออกแบบได้ดังนี้

$$C_1 \geq \frac{P_{O,max}}{V_{C1}^2 f_{sw}} \quad (3.18)$$

การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 :

การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 พิจารณาในช่วงที่ตัวเก็บประจุทั้งสองได้รับการอัดประจุ คือ ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส โดยสมมติให้การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย จะมีความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$C_{2,3} \geq \frac{2i_o(1-D)}{f_{sw}\Delta v_{C_{2,3}}} \tag{3.19}$$

โดยที่ $\Delta v_{C_{2,3}}$ คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน $V_{C_{2,3}}$ ที่เหมาะสม

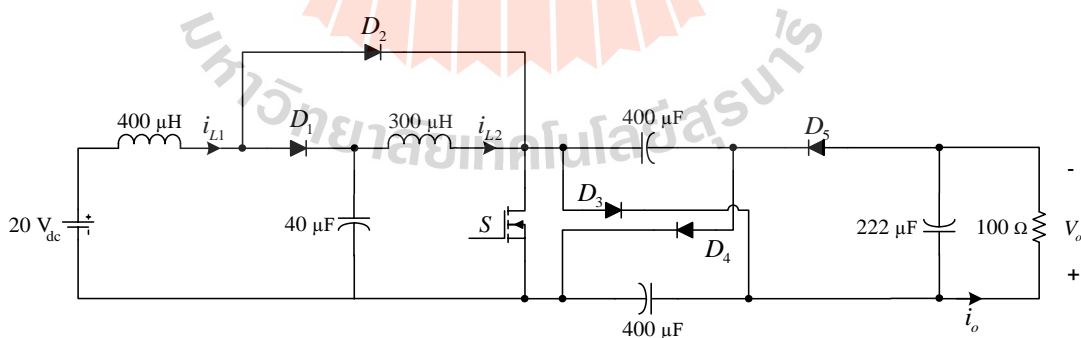
การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_o :

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_o จะพิจารณาช่วงเวลาการทำงานในช่วงที่ตัวเก็บประจุได้รับการอัดประจุ เช่นเดียวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 โดยพิจารณาในช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_o \geq \frac{i_o D}{f_{sw}\Delta v_{C_o}} \tag{3.20}$$

โดยที่ Δv_{C_o} คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน V_{C_o} ที่เหมาะสม

การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น กำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 น้อยกว่า L_2 อยู่ที่ 1% และ 20% ตามลำดับ ในขณะที่การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_2 , C_3 และ C_o โดยการกำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในขอบเขตไม่เกิน 1% ของค่าแรงดันใช้งานสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_o ให้เหมาะสมกับการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

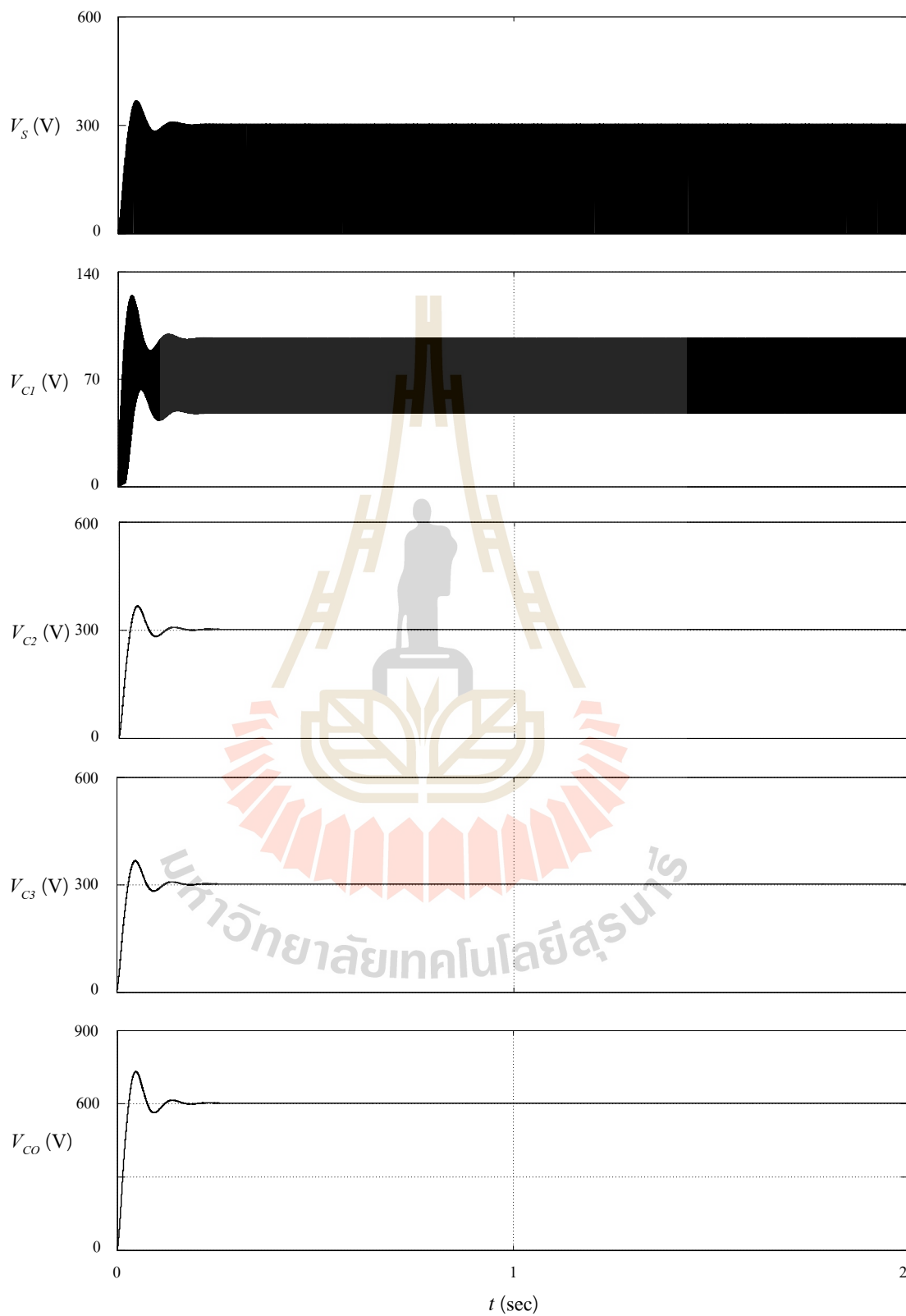
3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบ โดยกำหนดแรงดันอินพุตเป็น $20 V_{dc}$ และค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นโดยกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.74 เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันในวงจรที่ได้วิเคราะห์ข้างต้น รวมทั้งเพื่อแสดงความถูกต้องในการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 และ C_O ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

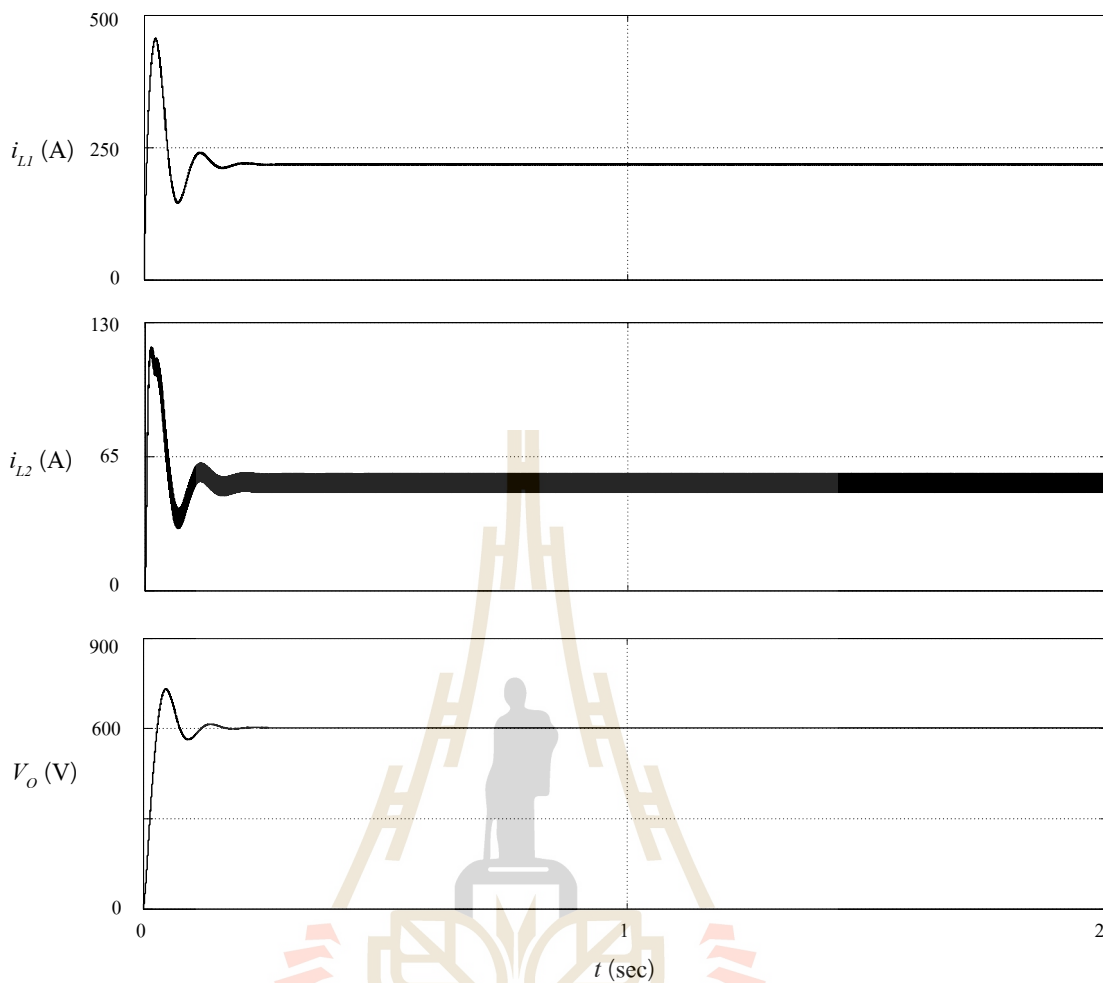
รูปที่ 3.13 แสดงผลการจำลองสถานการณ์แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในขณะที่รูปที่ 3.14 แสดงผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่า $600 V_{dc}$ ที่สถานะอยู่ตัว แสดงถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ที่มีความสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 30 เท่า เมื่อพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกระแส และการกระเพื่อมของแรงดันที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์ในข้างต้น เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมที่กำหนดใช้ในการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจร โดยจะพิจารณาค่าการกระเพื่อมที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 และ C_O สามารถสรุปผลการตรวจสอบการกระเพื่อมได้ดังตารางที่ 3.1 พร้อมกับแสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการกระเพื่อมของกระแสและแรงดันของวงจรที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย (av)	ค่าการกระเพื่อม ที่กำหนดใช้ในการ การออกแบบ	ค่าการกระเพื่อมจากการ จำลองสถานการณ์ (max-min)
i_{L1}	219	1% = 2.19 A	219-217.4 = 1.6 A
i_{L2}	52.7	20% = 10.54 A	56.6-47.6 = 9 A
V_{C1}	72.6	-	96.7-48 = 48.7 V
V_{C2}	301	1 V	302.2-301.5 = 0.7 V
V_{C3}	301	1 V	302.2-301.5 = 0.7 V
V_O	601.3	1 V	602.8-602 = 0.8 V

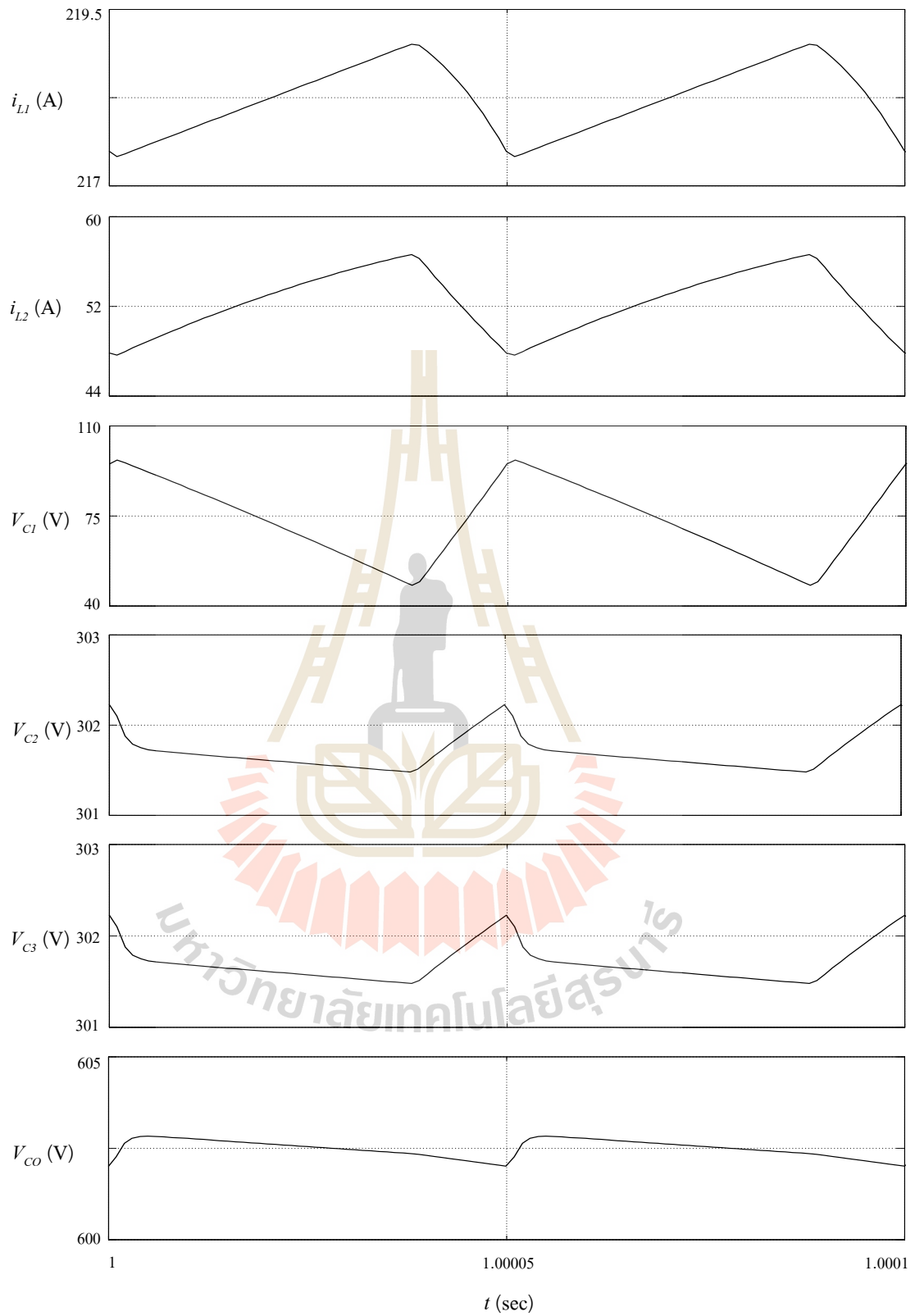


รูปที่ 3.13 แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.14 กระแสและแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.15 พบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีความสอดคล้องกับเงื่อนไขในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบ และเลือกใช้ในวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายสูงยิ่ง มีความเหมาะสมกับโครงสร้าง และลักษณะการทำงานของวงจร ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการออกแบบให้ผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในการพิจารณา โดยพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างกล่าว จะถูกนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ในบทถัดไป



รูปที่ 3.15 การกระเพื่อมของกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

3.6 สรุป

จากการศึกษาพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงโดยทั่วไป นำมาสู่การพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเพื่อเพิ่มระดับแรงดันได้สูงยิ่ง ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่มีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 30 เท่า โดยนำเสนอโครงสร้าง การวิเคราะห์หลักการทำงาน และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจร เพื่อออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงถึงสมรรถนะของวงจรที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้สูงถึง $600 V_{dc}$ ซึ่งการที่จะนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์เพื่อให้เกิดประโยชน์ในอนาคตนั้น จำเป็นต้องทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ จึงจะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในบทถัดไป

บทที่ 4

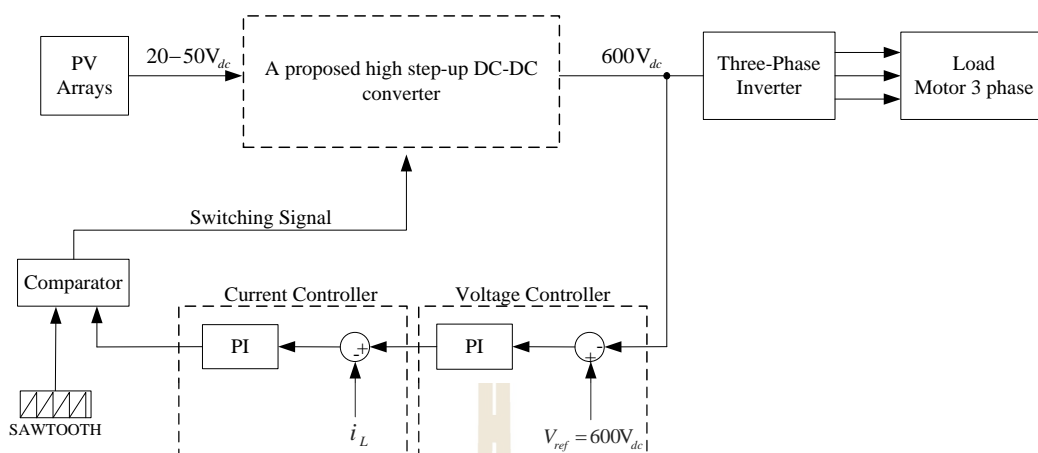
การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

4.1 บทนำ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่มุ่งเน้นในการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งประมาณ 30 เท่า สำหรับประยุกต์ในวงจรที่แรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20-50 V_{dc} ทั้งนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} เพื่อทำหน้าที่เสมือนแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อ (DC-link voltage) ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ต้องการแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่ ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 600 V_{dc} โดยเนื้อหาภายในบทนี้ประกอบไปด้วย หลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในสภาวะการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และสภาวะการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเพื่อพิจารณาสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ทำการออกแบบ รายละเอียดจะนำเสนอต่อไปนี้

4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

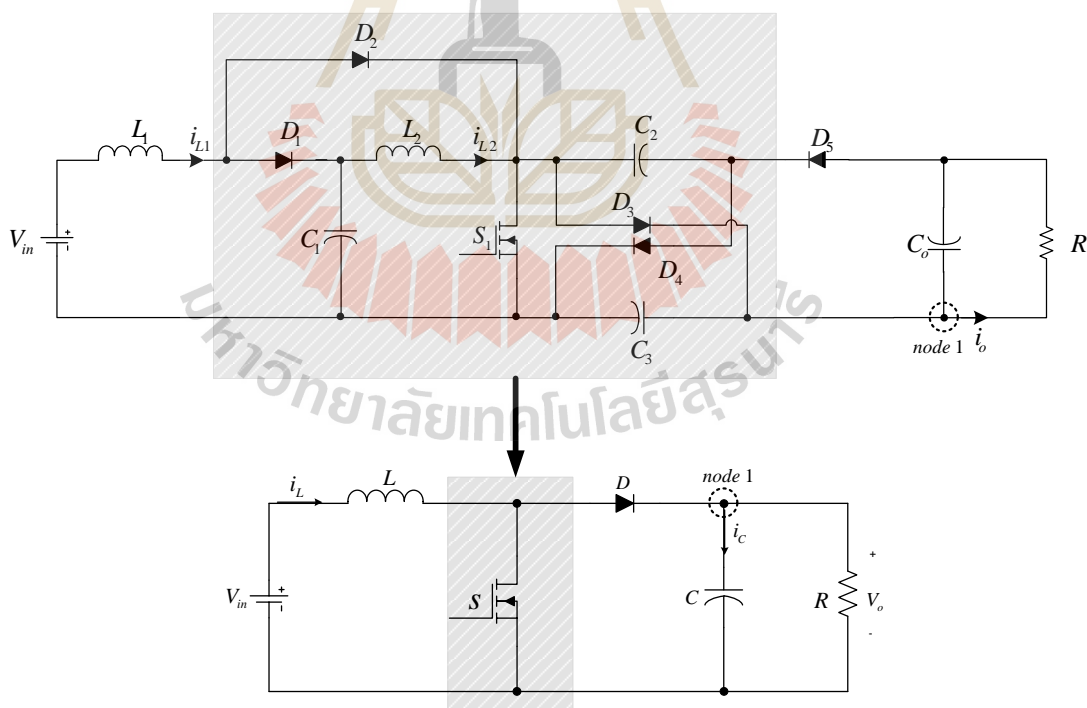
โครงสร้างการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยควบคุมการทำงานของวงจรให้สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ระดับ 600 V_{dc} เมื่อรับแรงดันอินพุตอยู่ในช่วง 20-50 V_{dc} การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น อาศัยพื้นฐานการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม เนื่องจากวงจรทั้งสองทำหน้าที่ในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต อีกทั้งโครงสร้างหลักภายในของวงจรทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน และใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวซึ่งถูกควบคุมให้ทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) ที่เหมาะสม เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 600 V_{dc} ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงจะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอจากโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม ซึ่งพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ วงการควบคุมแรงดัน และวงการควบคุมกระแส สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คแรงดัน (Voltage Controller Loop)

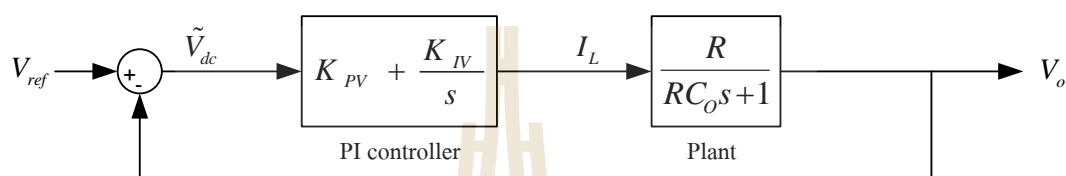
การออกแบบตัวควบคุมชนิดฟีดแบ็คแรงดันในวงจรควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น พิจารณาจากโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมชนิดฟีดแบ็คแรงดันในวงจรควบคุมแรงดัน

ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของการควบคุมแรงดันแสดงดังสมการที่ 4.1 ทั้งนี้จะพิจารณาว่าตัวเก็บประจุ C_o และโหลดความต้านทาน R เป็นพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจร โดยแผนภาพการควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RC_o s + 1} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.3 แผนภาพการควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ

จากแผนภาพการควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอ

$$\frac{V_o}{V_{ref}} = \frac{K_{PV} R s + K_{IV} R}{s^2 + \left(\frac{K_{PV} R + 1}{RC_o} \right) s + \frac{K_{IV} R}{RC_o}} \quad (4.2)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PV} และ K_{IV} ของตัวควบคุมชนิดพีไอ ทำได้โดยเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดจาก (4.2) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรอันดับสองมาตรฐาน (4.3)

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.3)$$

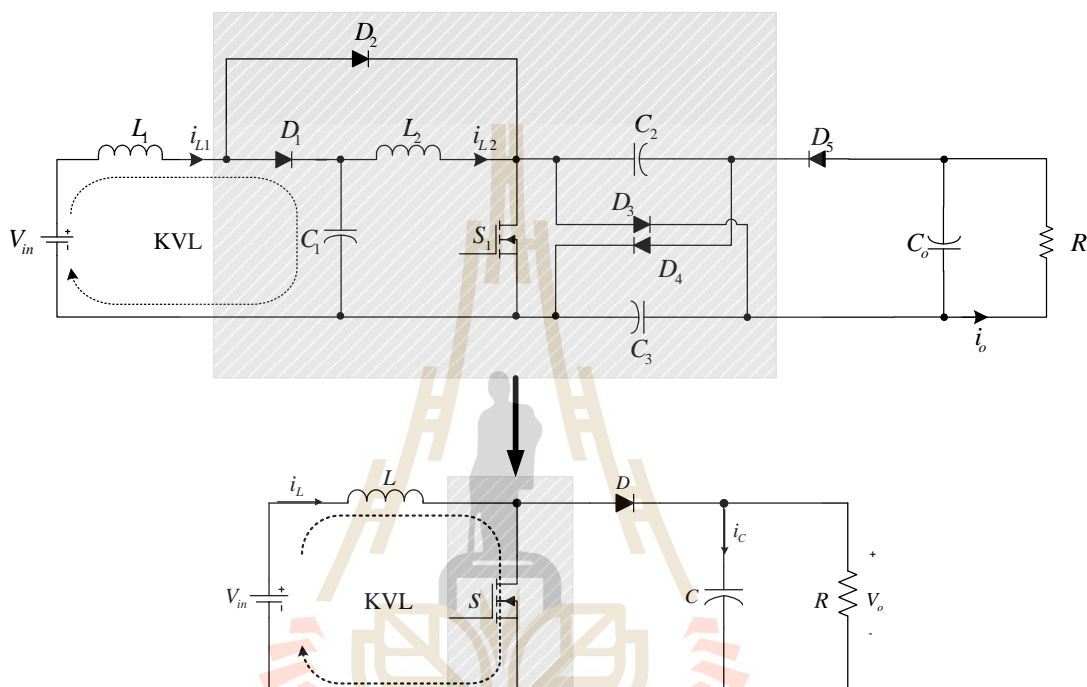
จึงได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงแรงดันดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 โดยที่ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{RC}$ rad/s, ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อให้ผลการตอบสนองของวงจรเป็นแบบหน่วงวิกฤต

$$K_{PV} = 2\zeta\omega_n C_o - \frac{1}{R} \quad (4.4)$$

$$K_{IV} = \omega_n^2 C_o \quad (4.5)$$

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอวงกระแส (Current Controller Loop)

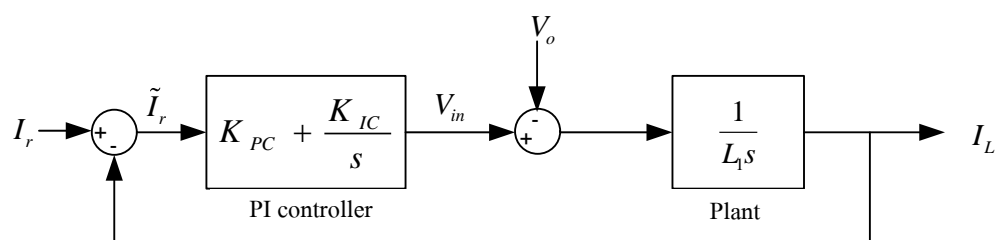
การออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอในวงจรควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น พิจารณาเทียบเคียงกับโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอในวงจรควบคุมกระแส

ดำเนินการหาฟังก์ชันการถ่ายโอน จะได้พลานต์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นใน ส่วนของการควบคุมวงกระแสดังสมการที่ 4.6 โดยแผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมชนิด พีไอแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

$$\frac{I_L}{V_{in} - V_o} = \frac{1}{L_1 s} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพการควบคุมวงกระแสด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ

จากแผนภาพการควบคุมวงกระแสด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} สำหรับตัวควบคุมชนิดพีไอในวงการควบคุมกระแส ดังนี้

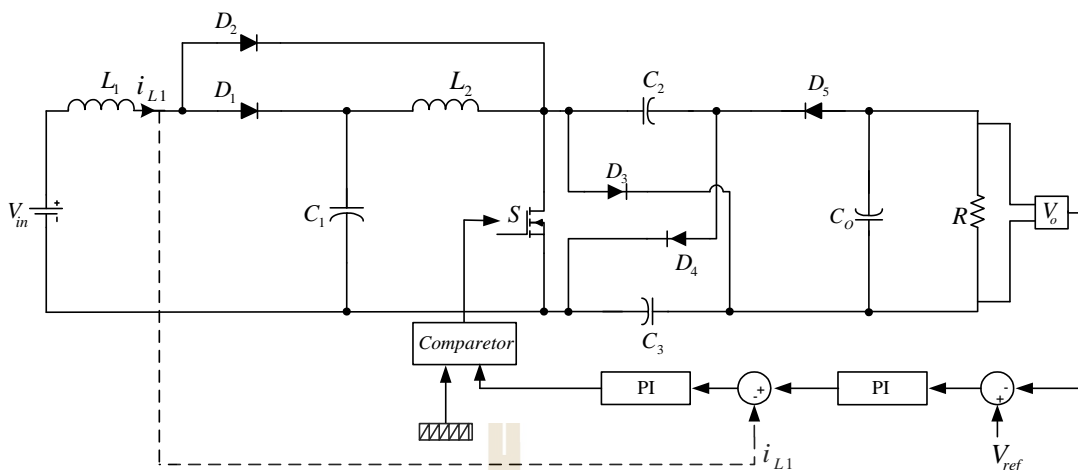
$$\frac{I_L}{I_r} = \frac{K_{PC} V_{in} s + K_{IC} V_{in}}{s^2 + \left(K_{PC} \frac{V_{in}}{L_1} \right) s + K_{IC} \frac{V_{in}}{L_1}} \quad (4.7)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} ของตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงการควบคุมกระแส จะใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดจากสมการที่ 4.7 กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรันดับสองมาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงกระแสดังสมการที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของวงกระแส มีค่าเท่ากับ $N\omega_n$ rad/s โดยที่ N คือ จำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติที่วงกระแสมีการทำงานต่างจากวงแรงดัน กำหนดให้ N มีค่าเท่ากับ 100 , ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

$$K_{PV} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_1}{V_{in}} \quad (4.8)$$

$$K_{IC} = \frac{\omega_{ni}^2 L_1}{V_{in}} \quad (4.9)$$

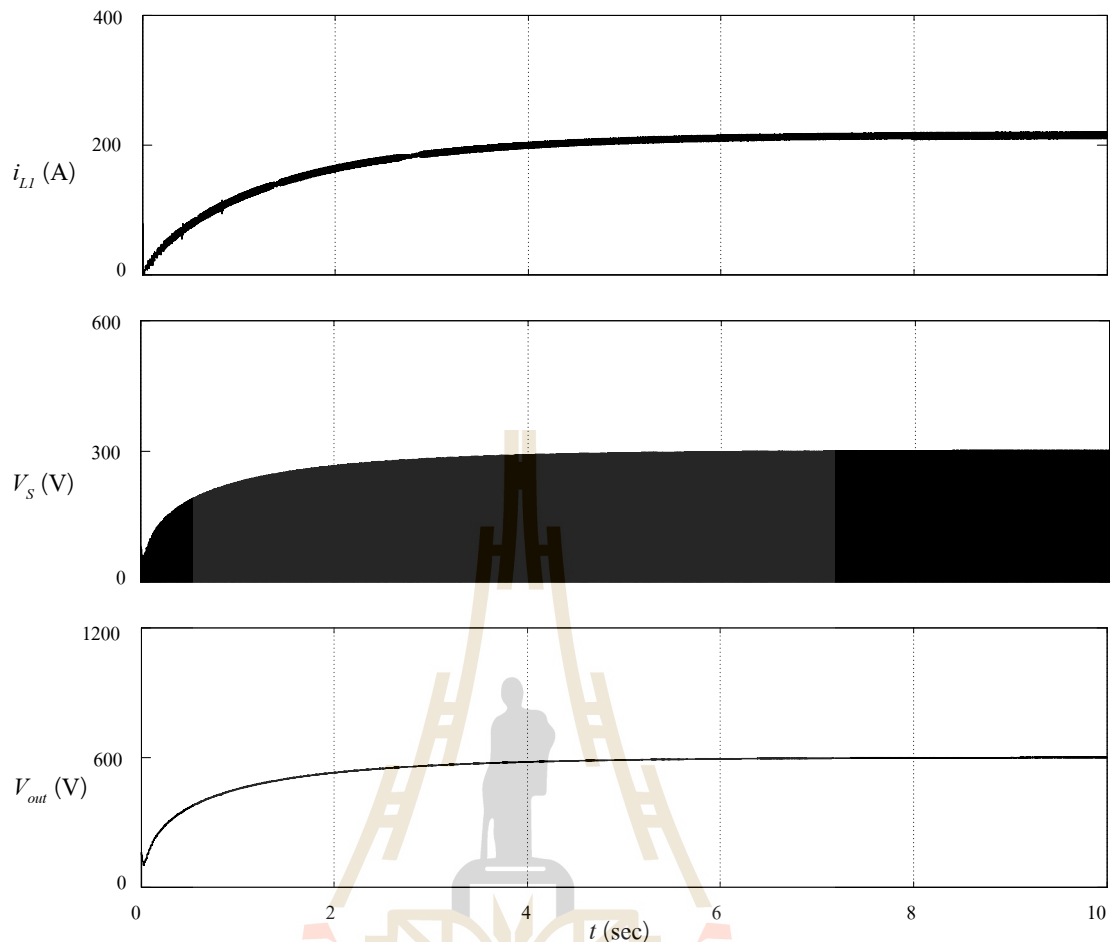
จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอทั้งวงแรงดันและวงกระแสที่ได้ อธิบายไว้ข้างต้น สามารถนำตัวควบคุมชนิดพีไอที่ทำการออกแบบมาประยุกต์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงโครงสร้างภาพรวมในการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีตัวควบคุมชนิดพีไอควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

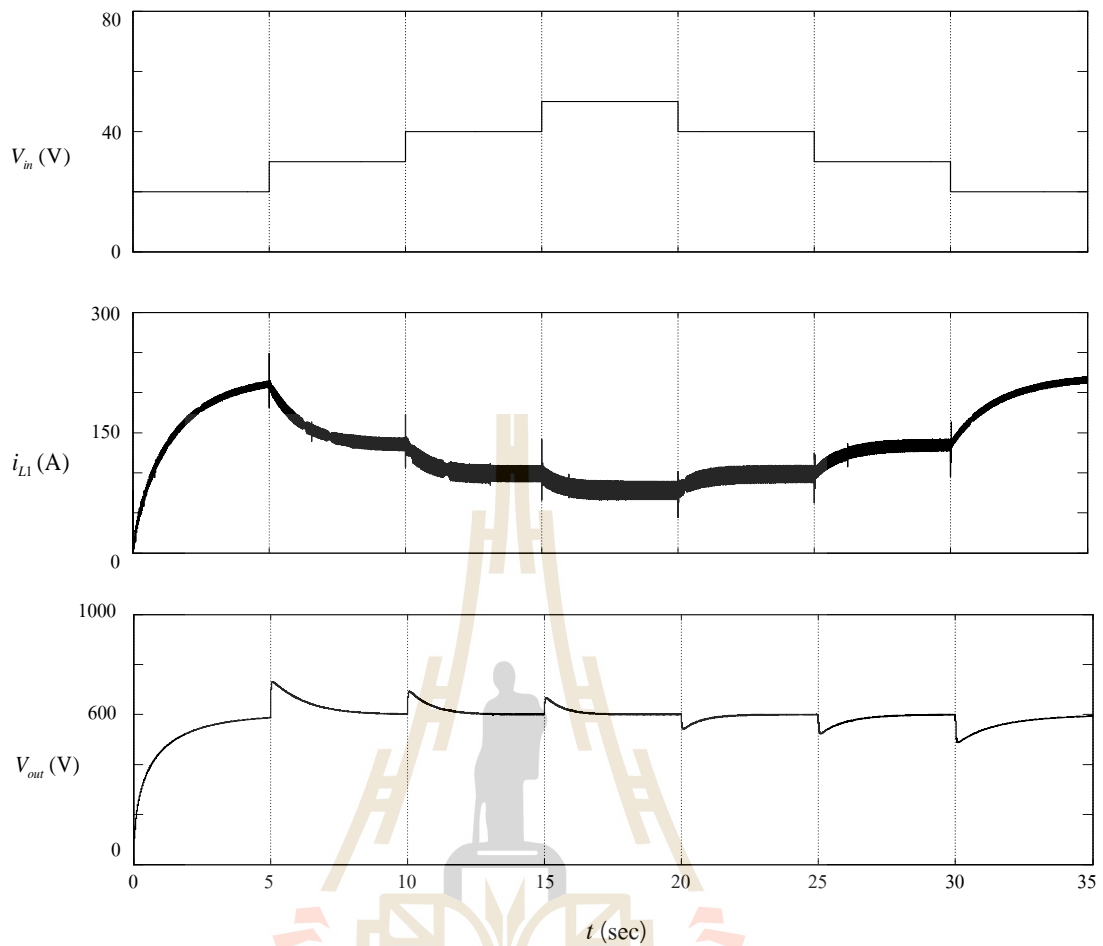
4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

เพื่อพิจารณาถึงสมรรถนะของวงจรการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ ดังโครงสร้างในรูปที่ 4.6 ดำเนินการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น R2013a ด้วย Intel(R) Core(TM) i5 CPU RAM 8.00GB 64 bit โดยให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นรับแรงดันอินพุตขอบเขตต่ำสุดที่ $20 V_{dc}$ สำหรับทดสอบสมรรถนะของวงจรในกรณีที่รับค่าแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันอินพุตของวงจรโดยที่วงจรยังคงสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง $600 V_{dc}$ และถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ที่ $600 V_{dc}$ ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอได้แล้วนั้น สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่รับแรงดันอินพุตค่าอื่น ๆ ที่สูงกว่าขอบเขตต่ำสุดที่ทำการทดสอบ วงจรสามารถทำงาน และเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง $600 V_{dc}$ ได้เช่นกัน ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อวงจรได้รับแรงดันอินพุตคงที่ที่ $20 V_{dc}$ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง $600 V_{dc}$ และถูกควบคุมให้คงที่ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ณ วินาทีที่ 6 โดยมีขนาดของกระแสอินพุต (i_{L1}) ของวงจรอยู่ที่ประมาณ 200 A แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง (V_s) อยู่ที่ประมาณ $300 V_{dc}$



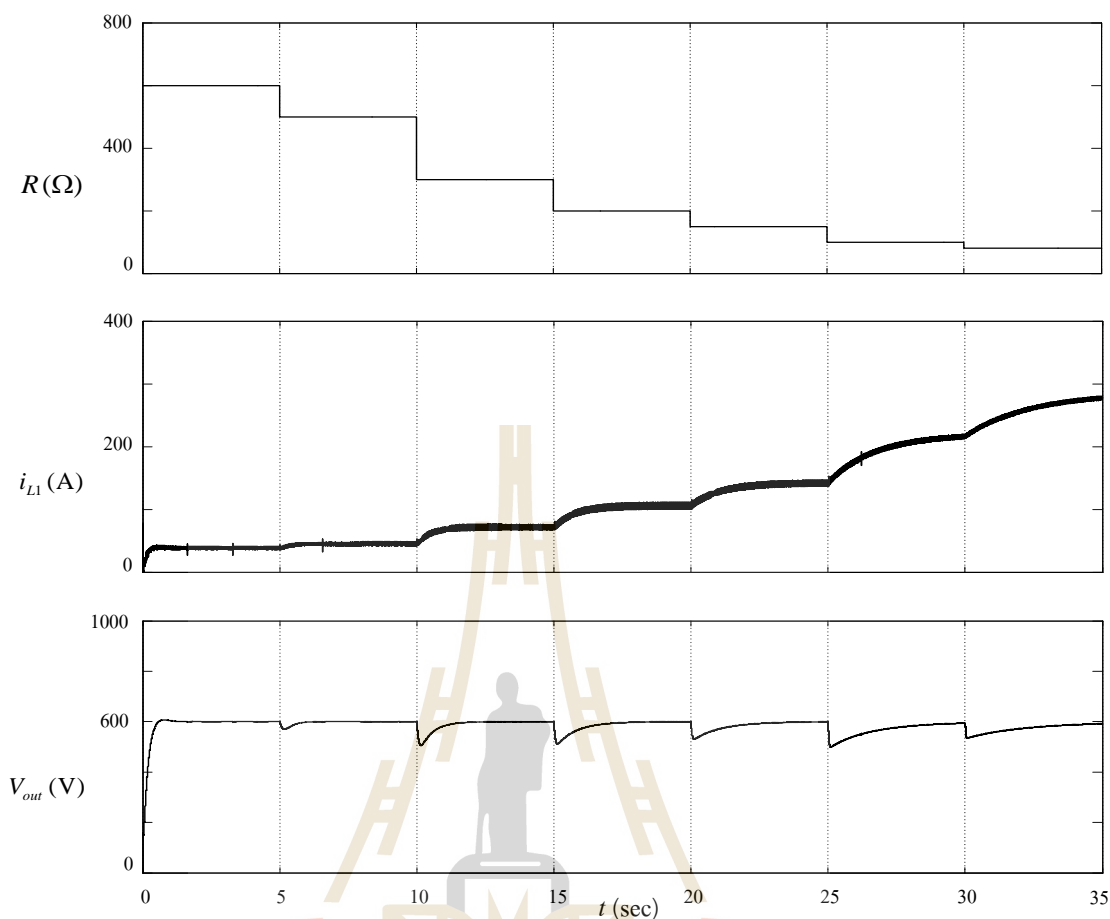
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อแรงดันอินพุต 20 V_{dc}

การจำลองสถานการณ์เมื่อวงจรมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตในช่วง 20-50 V_{dc} แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 เพื่อยืนยันความสามารถของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยกำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตเริ่มต้นของวงจรอยู่ที่ 20 V_{dc} และมีความเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 V_{dc} ณ วินาทีที่ 5, 10 และ 15 จากนั้นกำหนดให้แรงดันอินพุตลดลงครั้งละ 10 V_{dc} ณ วินาทีที่ 20, 25 และ 30 ตามลำดับ พบว่าเมื่อวงจรได้รับแรงดันอินพุตในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} และถูกควบคุมให้คงที่ที่ 600 V_{dc} ซึ่งจะเกิดแรงดันตก และแรงดันพุ่งเกินในช่วงเวลาที่มีความเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต จากนั้นตัวควบคุมชนิดพีไอจะควบคุมให้แรงดันคงที่ตามต้องการ และในส่วนของกระแสอินพุต (i_{L1}) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอินพุต กล่าวคือ เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าน้อย กระแสอินพุตของวงจรจะมีค่าสูง และเมื่อแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าสูง กระแสอินพุตของวงจรจะมีค่าต่ำตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าอินพุตกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเท่ากับ 3.6 kW



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

นอกจากการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตให้กับวงจร ยังสามารถทดสอบสมรรถนะการทำงาน และสะท้อนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปตามโหลดของวงจรได้อีกด้วย โดยการจำลองสถานการณ์ให้แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นคงที่ 20 V_{dc} โหลดความต้านทานเริ่มต้นอยู่ที่ 600Ω จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานลดลงเป็น 500, 300, 200, 150, 100 และ 80Ω ในทุก ๆ 5 วินาที ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นทำงานร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ที่ 600 V_{dc} ได้ โดยจะเกิดแรงดันตกในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน จากนั้นแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับ 600 V_{dc} และกระแสอินพุต (i_{L1}) ของวงจรจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนโหลดความต้านทาน ตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าอินพุต และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน

4.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ทำการออกแบบ จึงได้ทำการจำลองสถานการณ์ให้วงจรมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะต่าง ๆ คือ วงจรมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และวงจรมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นทำงานร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} และตัวควบคุมชนิดพีไอที่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรคงที่ที่ 600 V_{dc} ได้ ถึงแม้่วงจรมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานเงื่อนไขต่าง ๆ

บทที่ 5

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มแรงดันสูงยิ่ง สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

5.1 บทนำ

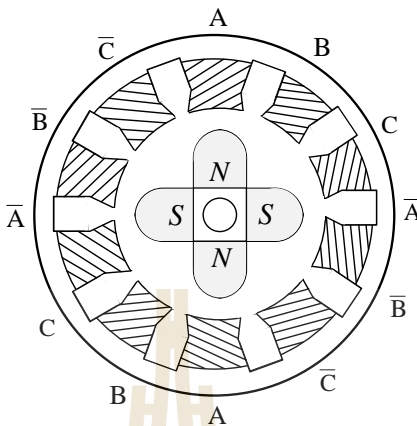
จากการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มค่าแรงดันสูงยิ่ง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ใน บทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับแล้วนั้นนำมาสู่การประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับ โหลดชนิดต่าง ๆ ในบทนี้จึงมุ่งเน้นที่การประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบ ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งเนื้อหาภายในบทจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าสาม เฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส การออกแบบตัว ควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสรวมไปถึงการจำลองสถานการณ์ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ กัน

5.2 มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)

โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแสดงดังรูปที่ 5.1 เป็น มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วหรือ 2 คู่ขั้วประกอบด้วยขดลวดที่อยู่กับที่เรียกว่าขดลวดส เตเตอร์ (Stator Winding) และส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรโดยมีช่อง อากาศ (Air gap) คั่นกลางระหว่างทั้งสองส่วนซึ่งโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสทั่วไปคือมีขดลวดสเตเตอร์ สามเฟสพันอยู่ในร่องสลอต (Slot) โดยที่ขดลวดมีการวางให้มีการกระจายเป็นไซน์ (Sinusoidal Distribution) เพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าให้หมุนเป็นวงกลม ขณะที่ขดลวดโรเตอร์ถูกแทน ด้วยแม่เหล็กถาวร มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจะมีตัวโรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient Pole Rotor) ซึ่งมีช่องว่างอากาศไม่สม่ำเสมอพลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศตำแหน่งต่างๆ จะมีการกระจายตัวไม่เท่ากันเนื่องจากความไม่สมมาตรของช่องอากาศใน 2 แกนหลักคือแกนแม่เหล็ก ของโรเตอร์ (Direct Axis) และแกนที่ตั้งฉากกัน (Quadrature Axis) ดังนั้นแรงดันที่ขั้วจึงถูก เหนี่ยวนำขึ้นใน 2 แกนหลักคือ V_d และ V_q มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมีข้อดี กว่ามอเตอร์ชนิดอื่นคือในมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเหนี่ยวนำ กระแสสเตเตอร์จะประกอบด้วยกระแส

สนามแม่เหล็กในแกนซึ่งเป็นองค์ประกอบในการสร้างสนามแม่เหล็กแต่ในมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรไม่จำเป็นต้องมีกระแสสนามแม่เหล็กในแกนให้กับสเตเตอร์



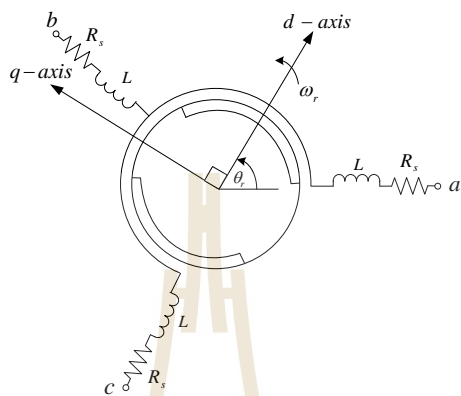
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว

จากลักษณะดังกล่าวมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่กำลังงานเท่าๆกันมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจะทำงานที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power Factor) สูงกว่าทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสทั่วไปที่จะต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับโรเตอร์ดังนั้นในมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดธรรมดาจึงต้องมีแปรงถ่านกับสลีปริงซึ่งนั่นทำให้มีการสูญเสียที่โรเตอร์และต้องการการบำรุงรักษาแปรงถ่านจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีการพัฒนาเป็นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ไม่ต้องมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Field Coil) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและวงแหวนสลีปริงเพราะถูกแทนที่ด้วยแม่เหล็กถาวรมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (Back EMF) ที่เป็นสัญญาณไซน์ (Sinusoidal) ดังนั้นจึงต้องการกระแสสเตเตอร์เป็นสัญญาณไซน์เพื่อสร้างแรงบิดให้คงที่เช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสทั่วไป นอกจากนั้นมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรยังมีน้ำหนักเบา ขนาดเล็กและแรงเฉื่อยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่ค่าพิกัดเดียวกันแต่มีราคาแพง เนื่องจากราคาของแม่เหล็กถาวรและคุณสมบัติของแม่เหล็กที่แปรผันตามอุณหภูมิและเปลี่ยนแปลงตามเวลา

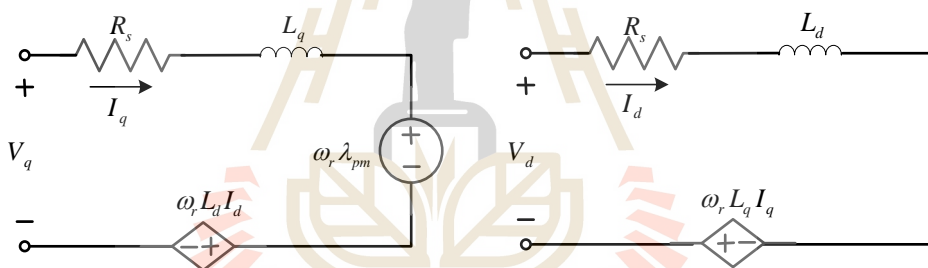
5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ PMSM

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรูปที่ 5.2 แสดงขดลวดสเตเตอร์สามเฟส (abc) ที่วางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าและจุดต่อแต่ละเฟสของ a, b และ c จะมีความต้านทานต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำโดยเทียบกับแกนอ้างอิงโรเตอร์ (dq-

axis) ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_r) ที่ตำแหน่งเชิงมุม (θ_r) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์ของแกนเอ (a-axis) และขดลวดโรเตอร์ของแกนดี (d-axis) ส่วนรูปที่ 5.3 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนส์ชนิดแม่เหล็กถาวรที่เขียนบนแกนอ้างอิงโรเตอร์โดยที่ R_s คือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส λ_{pm} คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์นำกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนส์ชนิดแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เทียบกับแกนอ้างอิงโรเตอร์

จากแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนส์ชนิดแม่เหล็กถาวรในรูปที่ 5.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแรงดันสามเฟส (5.1)

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d}{dt} (L i_{abc} + \lambda_{pm}(\theta)) \tag{5.1}$$

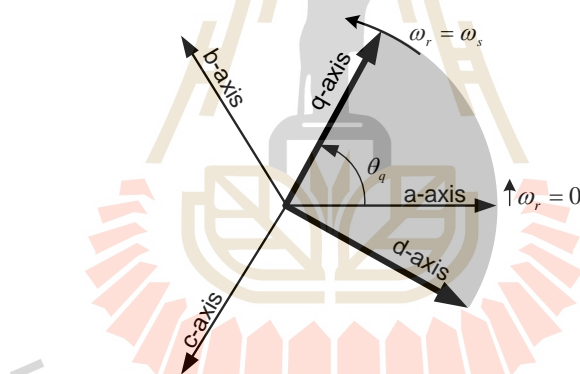
โดยที่ $\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือค่า Back EMFสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt} = -\omega_r \lambda_{pm} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

ทำการแทน (5.2) ลงใน (5.1) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าที่อยู่บน ปริมาณสามเฟส ดังนี้

$$\begin{aligned} V_a &= R_s i_a + L \frac{d}{dt} i_a - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r) \\ V_b &= R_s i_b + L \frac{d}{dt} i_b - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ V_c &= R_s i_c + L \frac{d}{dt} i_c - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (5.3)$$

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสมีการควบคุมค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้การควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะแปลงมอเตอร์ไฟฟ้า สามเฟสให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม และวิธีดังกล่าวสามารถทำได้โดยการ โอนย้ายตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสให้มาอยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ (dq-axis) ของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน qd และแกน abc



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแกน qd และ abc

แกนอ้างอิงของโรเตอร์ (dq-axis) ยังสามารถพิจารณาให้เป็นแกนที่อยู่กับที่หรือเป็นแกนที่ หมุนได้ด้วยความเร็วเชิงมุมซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของ มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่หยุดนิ่งอยู่กับที่สัญญาณ แรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนอสชนิดแม่เหล็กถาวรจึงถูกอธิบายในมุมมองของกรอบอ้างอิง โรเตอร์ (dq Frame) โดยใช้สมการการแปลงจากปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณสองเฟส (Park's Transformation) แสดงดัง (5.4) และ (5.5) กรณีสามเฟสแบบสมดุลปริมาณ v_0 , i_0 จะมีค่าเป็นศูนย์ สมการการแปลงค่าปริมาณจากสามเฟสเป็นปริมาณสองเฟสที่เขียนบนแกนอ้างอิงคือ

$$[i_{abc}] = [T_{qdo}(\theta_q)] [i_{qdo}] \quad (5.4)$$

โดยที่ $[T_{qd0}(\theta_q)]$ ในรูปของเมตริกซ์ มีค่าเท่ากับ

$$[T_{qd0}(\theta_q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_q) & \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_q) & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

จาก (5.4) และ (5.5) จะได้สมการแรงดันของการแปลงค่าจากปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณสองเฟสดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - 120^\circ) & \sin(\theta_r + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

การควบคุมกระแสจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสอ้างอิงกับสัญญาณกระแสจริงในแต่ละเฟสเนื่องจากสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรอธิบายในมุมมองของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ (v_q, v_d) ทำให้สัญญาณกระแสจริงที่ได้จะอยู่ในมุมมองของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ด้วย (i_q, i_d) จึงต้องทำการแปลงค่าสัญญาณกระแสจริงสองเฟสเป็นสัญญาณกระแสจริงสามเฟสเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงในแต่ละเฟสต่อไปโดยใช้สมการการแปลงจากปริมาณสองเฟสเป็นปริมาณสามเฟส (Inverse Park's Transformation) ดัง (5.7) และ (5.8) สมการของการแปลงค่าปริมาณจากสองเฟสเป็นปริมาณสามเฟสที่เขียนบนแกนอ้างอิง qd

$$[i_{abc}] = [T_{qd0}(\theta_q)]^{-1} [i_{qd0}] \quad (5.7)$$

โดยที่ $[T_{qd0}(\theta_q)]^{-1}$ ในรูปของเมตริกซ์ มีค่าเท่ากับ

$$[T_{qd0}(\theta_q)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_q) & \sin(\theta_q) & 1 \\ \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

จาก (5.7) และ (5.8) จะได้สมการกระแสของการแปลงค่าจากปริมาณสองเฟสเป็นปริมาณสามเฟสดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) & 1 \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \sin(\theta_r - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \sin(\theta_r + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่เทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์ในรูปที่ 5.3 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงคิว (q-axis) และแกนอ้างอิงดี (d-axis) ได้ดังนี้

$$v_q = R_s i_q + \omega_r \lambda_d + \frac{d}{dt} \lambda_q \quad (5.10)$$

$$v_d = R_s i_d + \omega_r \lambda_q + \frac{d}{dt} \lambda_d \quad (5.11)$$

ค่าฟลักซ์คัลลิ่งในแกนอ้างอิงบนแกนคิว (q-axis) และแกนอ้างอิงบนแกนดี (d-axis) แสดงดัง (5.12) และ (5.13)

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (5.12)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{pm} \quad (5.13)$$

ทำการแทน (5.12) และ (5.13) จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการแรงดันในแกนอ้างอิงบนแกนคิว (q-axis) และในแกนอ้างอิงบนแกนดี (d-axis) ดังสมการ

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r (L_d i_d + \lambda_{pm}) \quad (5.14)$$

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_r L_q i_q \quad (5.15)$$

นอกจากสมการแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรทำการพิจารณาสมการแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลต่างๆของมอเตอร์สมการแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสแสดงดัง (5.16)

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_d i_q - \lambda_q i_d] \quad (5.16)$$

แทน (5.12) และ (5.13) ในสมการที่ (5.16) จะได้

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_{pm} i_q - (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5.17)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ (T_e) ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ (ω_m) และตำแหน่งเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ (θ_m) แสดงดัง (5.18) ถึง (5.22)

$$T_e = T_L + B\omega_m + J \frac{d}{dt} \omega_m \quad (5.18)$$

$$\omega_m = \int \left(\frac{T_e - T_L - B\omega_m}{J} \right) dt \quad (5.19)$$

$$\omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r \quad (5.20)$$

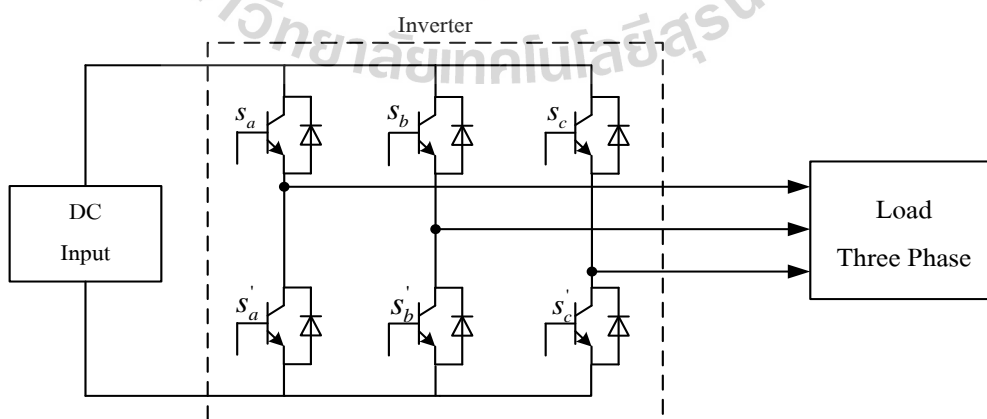
$$\omega_m = \omega_r \left(\frac{2}{P} \right) \quad (5.21)$$

$$\theta_m = \theta_r \left(\frac{2}{P} \right) \quad (5.22)$$

โดยที่ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก T_L คือ แรงบิดของโหลด B คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานและ J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์และโหลด

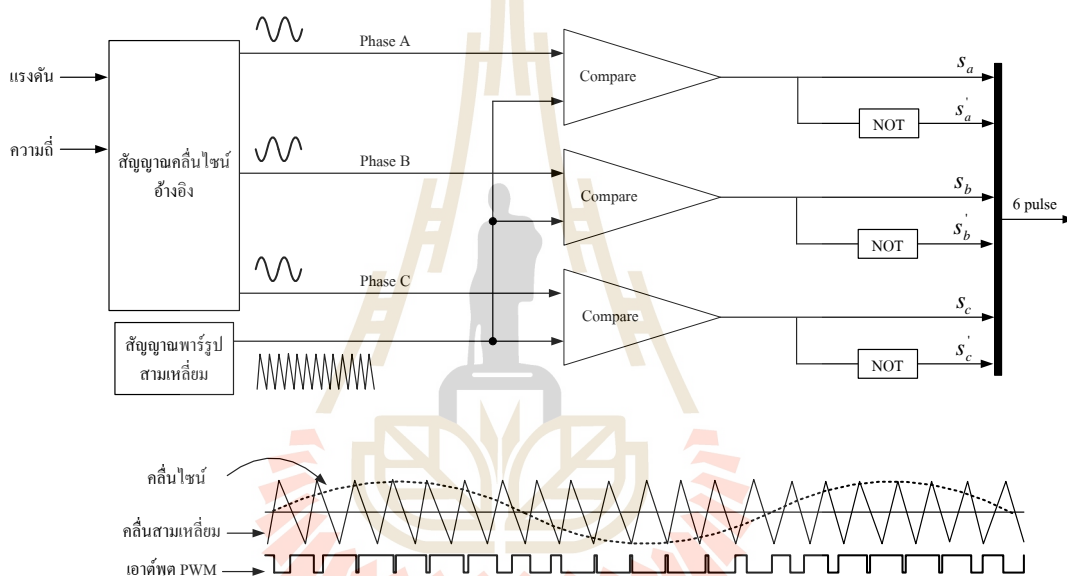
5.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟส

อินเวอร์เตอร์สามเฟส ทำหน้าที่ในการที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส โดยองค์ประกอบภายในวงจรประกอบด้วยสวิตช์กำลัง 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.5 สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่อยู่ในกิ่งเดียวกันต้องไม่ปิดวงจรพร้อมกัน เพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจร คือ ถ้าสวิตช์กำลัง S_a ทำงาน สวิตช์ S'_a จะไม่ทำงาน และถ้าสวิตช์ S'_a ไม่ทำงาน สวิตช์ S_a จะทำงาน ดังนั้นสวิตช์กำลัง 2 ตัวในกิ่งเดียวกันจะทำให้เกิดสองสถานะ คือ สถานะเปิดวงจร และปิดวงจร ซึ่งสวิตช์กำลังจะทำให้เกิดทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะเกิดการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม

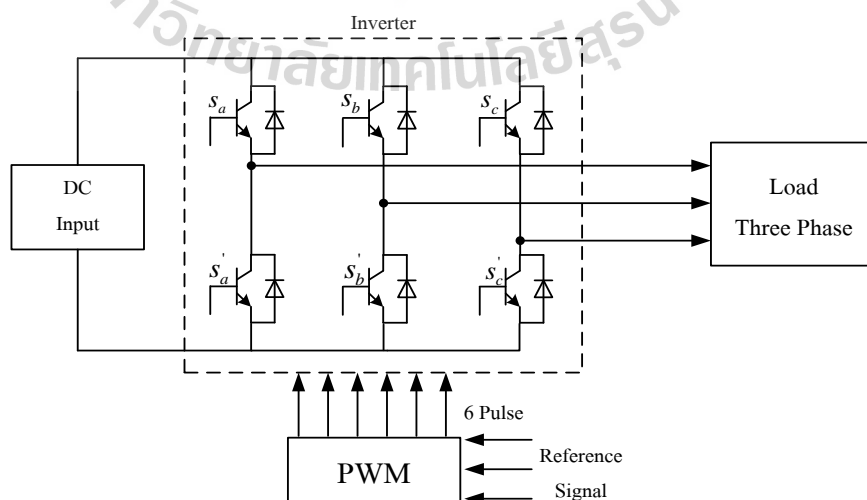


รูปที่ 5.5 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เทคนิคการสร้างสัญญาณพัลส์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation : PWM) ใช้หลักการ คือ นำสัญญาณคลื่นไซน์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมผ่านวงจรเปรียบเทียบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 เอาต์พุตที่ได้จะเป็นรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมหรือสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างไม่เท่ากัน พัลส์ดังกล่าวจะถูกส่งไปจุดชนวนขาเกตสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยสวิตช์กำลังชุดบน S_a, S_b, S_c จะทำงานด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม และสวิตช์กำลังชุดล่าง S'_a, S'_b, S'_c จะทำงานเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มของสวิตช์กำลังชุดบน ระบบแหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม ใช้สำหรับกำเนิดแรงดันสามเฟสจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส รูปแบบแหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



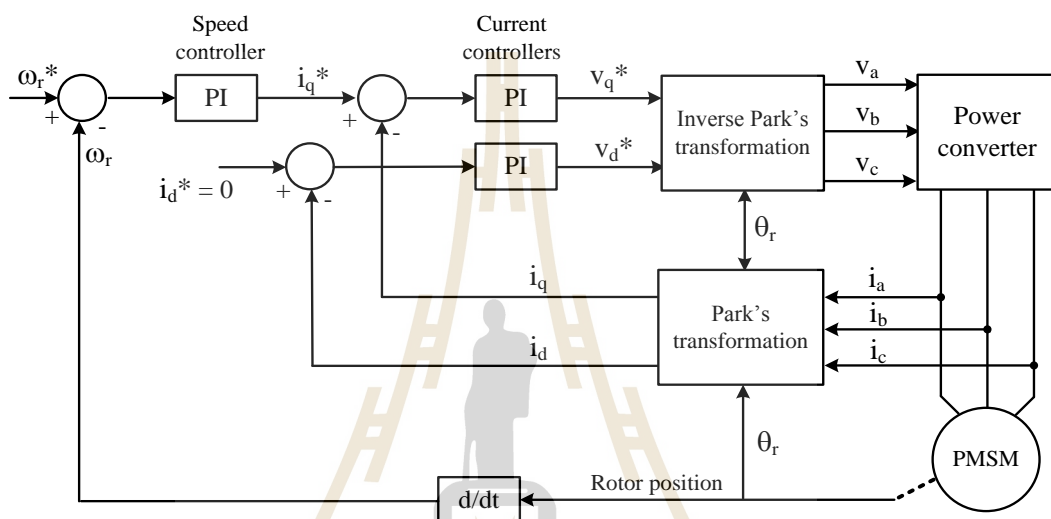
รูปที่ 5.6 เทคนิคการสร้างสัญญาณพัลส์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 5.7 แหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม

5.5 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับ PMSM

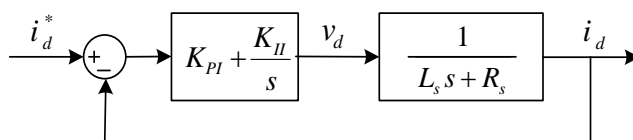
การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมีโครงสร้างการออกแบบและการควบคุมระบบแสดงดังรูปที่ 5.8 จากรูปจะพบว่าการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรประกอบด้วย การควบคุมสองวง คือ การควบคุมวงของกระแส และการควบคุมวงของความเร็วรอบ ดังนั้นในกระบวนการการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอจึงแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน มีการนำเสนอต่อไปนี้



รูปที่ 5.8 แผนภาพการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

5.5.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแส

ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแส จากพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่กล่าวไว้ในข้างต้น โดยมีแผนภาพในการควบคุมกระแสแสดงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งในที่นี้พิจารณาการควบคุมกระแสที่แกนอ้างอิงดี (d-axis) โดยมีพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้ คือ ค่าความต้านทานขดลวด และค่าความเหนี่ยวนำบนแกนดี จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ



รูปที่ 5.9 แผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในระบบควบคุม โดยกำหนดให้ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอ $G_c(s) = K_{PI} + K_{II}/s$ และฟังก์ชันมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส $G_p(s) = 1/(L_s s + R_s)$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูประบบควบคุมวงปิดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} &= \frac{\left(K_{PI} + \frac{K_{II}}{s}\right)\left(\frac{1}{L_s s + R_s}\right)}{1 + \left(K_{PI} + \frac{K_{II}}{s}\right)\left(\frac{1}{L_s s + R_s}\right)} \\ &= \frac{(L_s s + R_s)s}{L_s s^2 + (R_s + K_{PI})s + K_{II}} \\ &= \frac{\left(s + \frac{R_s}{L_s}\right)s}{s^2 + \left(\frac{R_s + K_{PI}}{L_s}\right)s + \frac{K_{II}}{L_s}} \end{aligned} \quad (5.23)$$

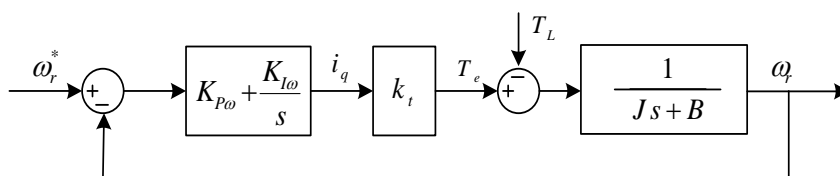
พิจารณาสัมประสิทธิ์ของระบบฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเทียบกับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน จะได้สมการค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแส ได้ดัง (5.25) และ (5.26) โดยกำหนดให้ค่า $\omega_n \geq 200 \text{ Hz}$ และ $\zeta = 0.8$

$$K_{PI} = 2\zeta\omega_n L_s - R_s \quad (5.24)$$

$$K_{II} = L_s \omega_n^2 \quad (5.25)$$

5.5.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโครนิสชนิดแม่เหล็กถาวร มีแผนภาพการควบคุมความเร็วรอบแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แผนภาพการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบดำเนินการเช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแส โดยกำหนดให้ $G_p(s) = k_t/(Js+B)$ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูประบบควบคุมวงปิดได้ดัง (5.26)

$$\begin{aligned} \frac{\Omega_r(s)}{\Omega_r^*(s)} &= \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} = \frac{\left(K_{P\omega} + \frac{K_{\omega I}}{s}\right)\left(\frac{k_t}{Js+B}\right)}{1+\left(K_{P\omega} + \frac{K_{\omega I}}{s}\right)\left(\frac{k_t}{Js+B}\right)} \\ &= \frac{\left(s + \frac{B}{J}\right)s}{s^2 + \left(\frac{B+k_t K_{P\omega}}{J}\right)s + \frac{k_t K_{I\omega}}{J}} \end{aligned} \quad (5.26)$$

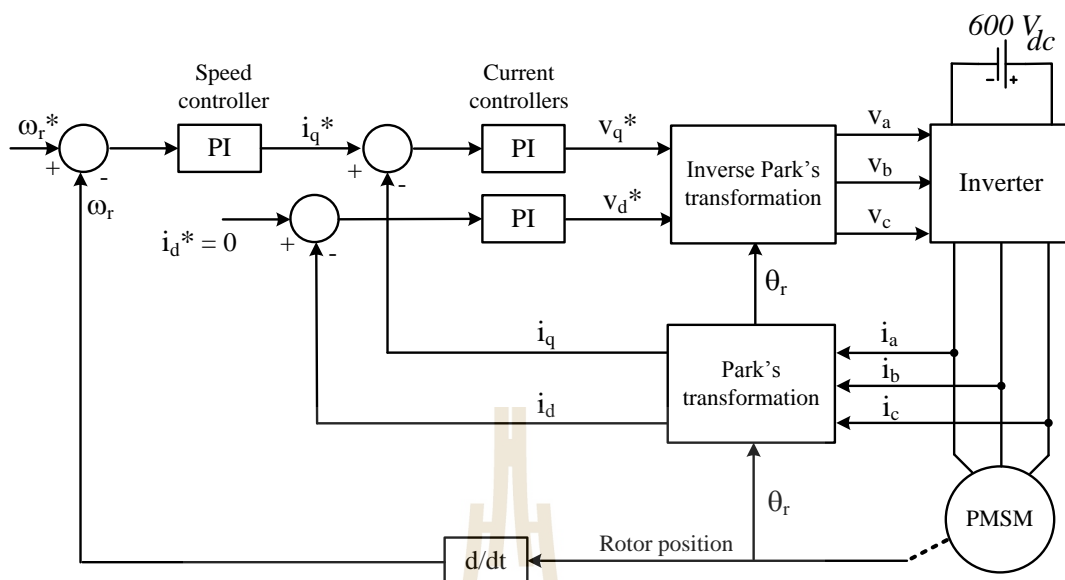
พิจารณาสัมประสิทธิ์ของระบบฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเทียบสัมประสิทธิ์กับของระบบอันดับสองมาตรฐาน สามารถหาค่าพารามิเตอร์ $K_{P\omega}$ และ $K_{I\omega}$ ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงควบคุมความเร็วรอบได้ดัง (5.27) และ (5.28) ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $\omega_n \leq 20 \text{ Hz}$, $k_t = \frac{3}{2} \frac{p}{\lambda_{pm}}$ และ $\zeta = 0.8$

$$K_{P\omega} = \left(2\zeta\omega_n - \frac{B}{J}\right) \frac{J}{k_t} \quad (5.27)$$

$$K_{I\omega} = \frac{J}{k_t} \omega_n^2 \quad (5.28)$$

5.6 ผลการจำลองสถานการณ์

จากการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 30 เท่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นรับแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำประมาณ 20-50 V_{dc} นำมาสู่การประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส เพื่อให้เข้าใจพื้นฐานการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร จะทำการจำลองสถานการณ์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ดังแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 5.11 โดยที่วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสมีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ 600 V_{dc} สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้มีขนาด 1.1kW ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในหัวข้อก่อนหน้านี้ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.11 โครงสร้างการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรถึงอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งมีขนาดแม่เหล็กถาวรขนาด 1.1 kW

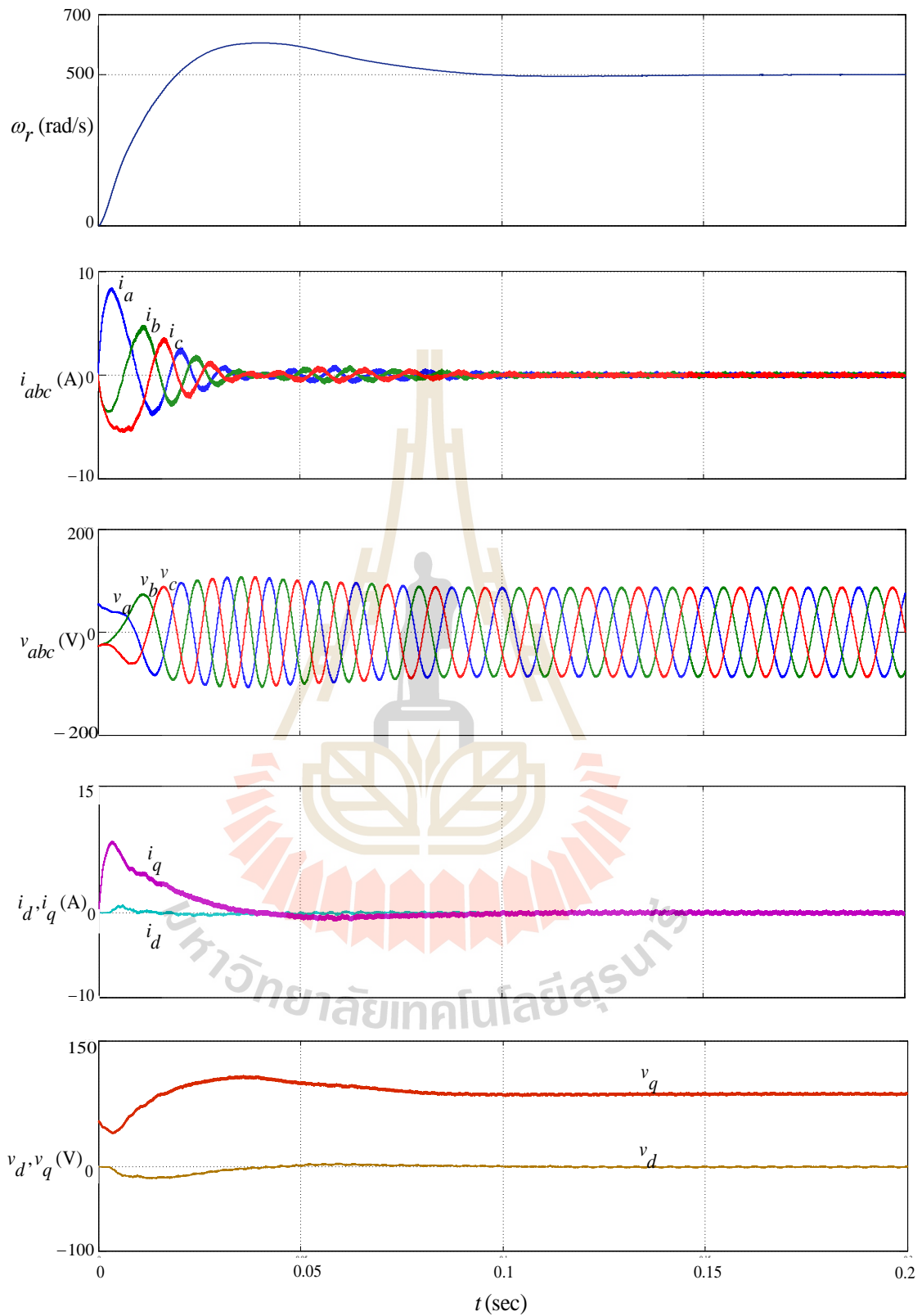
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
N	พิกัดความเร็วรอบ	3000 rpm
R_s	ความต้านทานสเตเตอร์	2.875 Ω
L_d	ตัวเหนี่ยวนำบนแกนดี	0.0085 H
L_q	ตัวเหนี่ยวนำบนแกนคว	0.0085 H
λ_{pm}	ฟลักซ์แม่เหล็ก	0.175 Wb
J	โมเมนต์แรงเฉื่อย	0.0008 kg.m^2
P	จำนวนขั้ว	4

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

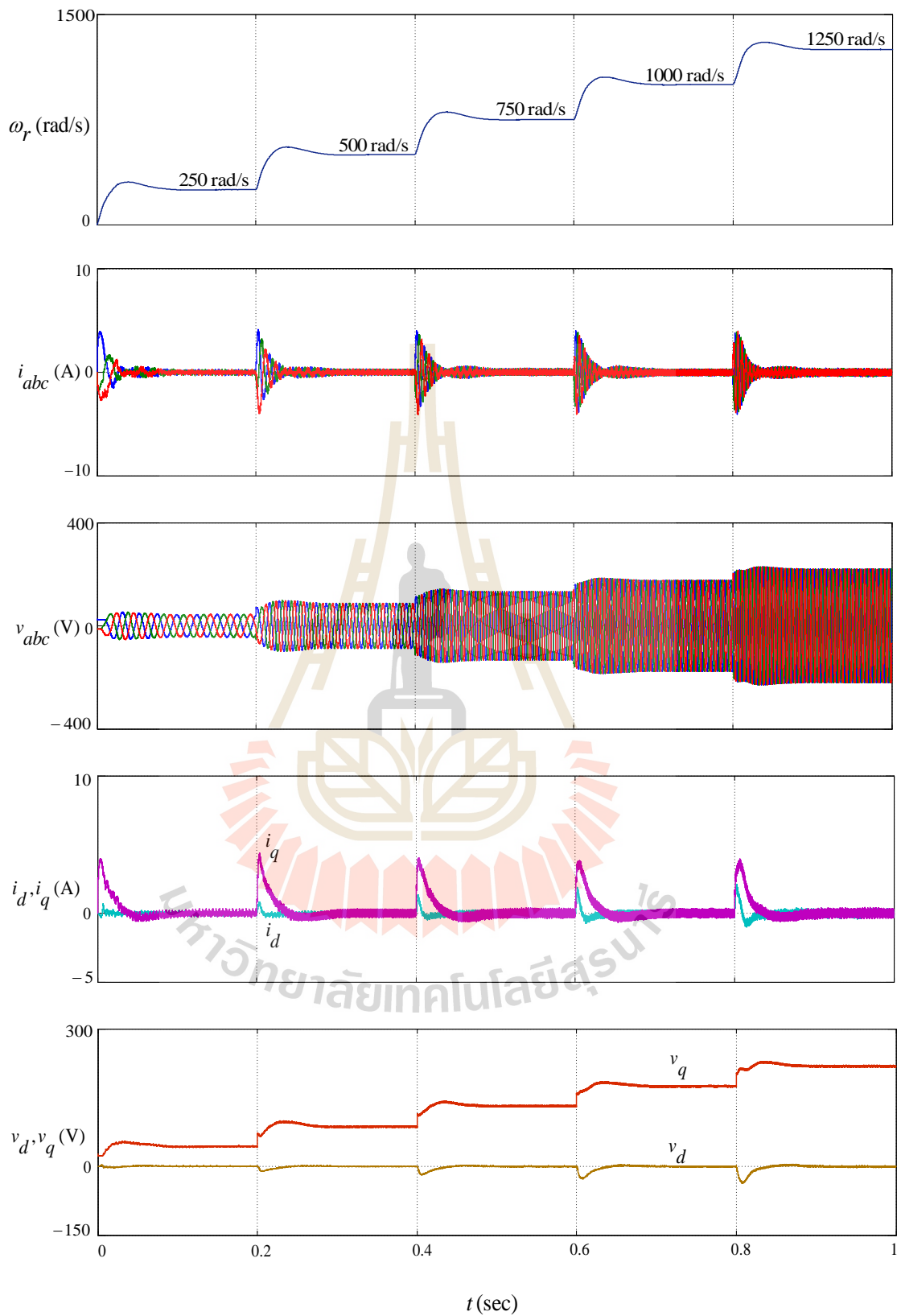
สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
$K_{P\omega}$	0.019
$K_{I\omega}$	0.75
K_{pi}	5.67
K_{II}	3354.4
ω_n	62.82
ω_{ni}	628.2

จำลองสถานการณ์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่ $600 V_{dc}$ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส สำหรับเป็นพื้นฐานในการพิจารณาาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยทำการจำลองสถานการณ์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ที่รับแรงดันอินพุตจากแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่ $600 V_{dc}$ ทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ที่ 500 rad/s ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 แสดงปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ประกอบด้วย ความเร็วรอบของมอเตอร์ (ω_r) กระแสสามเฟส (i_{abc}) แรงดันสามเฟส (v_{abc}) กระแสบนแกนดีคิว (i_{dq}) และแรงดันบนแกนคิวดี (v_{dq}) พบว่าระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ตัวควบคุมชนิดพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ที่ 500 rad/s โดยมีการพุ่งเกินในช่วงแรกของการจำลองสถานการณ์จนถึงวินาทีที่ 0.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสจะคงที่ที่ 500 rad/s เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสสามเฟส (i_{abc}) และปริมาณกระแสบนแกนคิวดี (i_q) จะมีค่ากระแสดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงมอเตอร์เริ่มหมุนเพื่อสร้างแรงบิดเริ่มต้น จากนั้นเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสหมุนที่ความเร็วคงที่ที่ 500 rad/s กระแสดังกล่าวจะมีค่าประมาณศูนย์เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสไม่มีโหลดแรงบิดในระบบตามความสัมพันธ์ดัง (5.16) ในส่วนของปริมาณแรงดันสามเฟส (v_{abc}) และปริมาณแรงดันบนแกนคิวดี (v_d) จะมีค่าประมาณ 100 V เป็นแรงดันในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส แต่ปริมาณแรงดันบนแกนคิวดี (v_q) จะมีค่าประมาณศูนย์

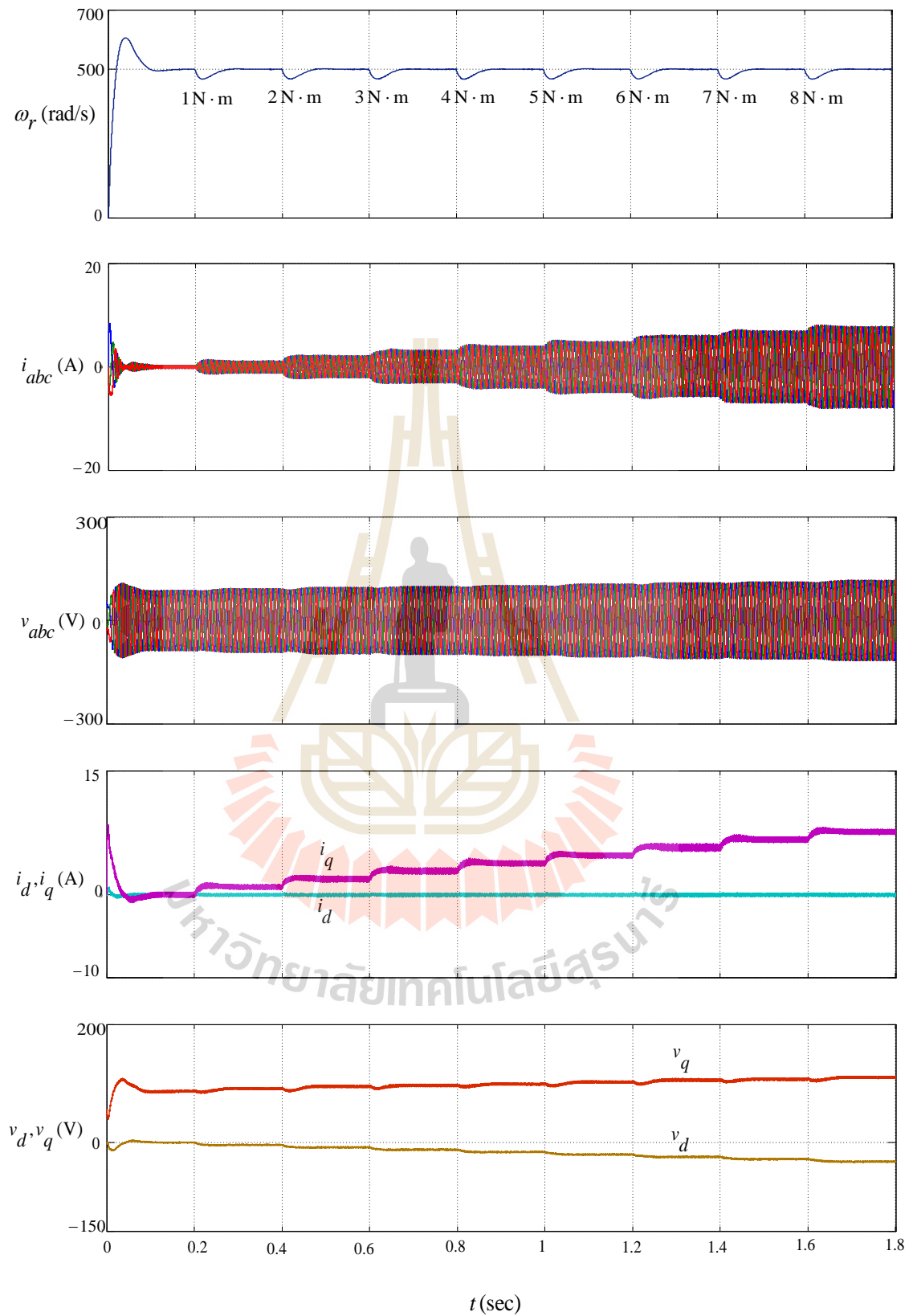
จากนั้นพิจารณาพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส จากการจำลองสถานการณ์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่มีการเปลี่ยนแปลงการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 เมื่อทำการกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสให้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 250 rad/s เป็น $500, 750, 1000$ และ 1250 rad/s ณ วินาทีที่ $0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ พบว่าตัวควบคุมชนิดพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งปริมาณกระแสสามเฟส (i_{abc}) และปริมาณกระแสบนแกนดีคิว (i_{dq}) จะมีค่าประมาณศูนย์ โดยจะเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนของปริมาณแรงดันสามเฟส (v_{abc}) และปริมาณแรงดันบนแกนคิวดี (v_q) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.12 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อความเร็วคงที่ที่ 500 rad/s



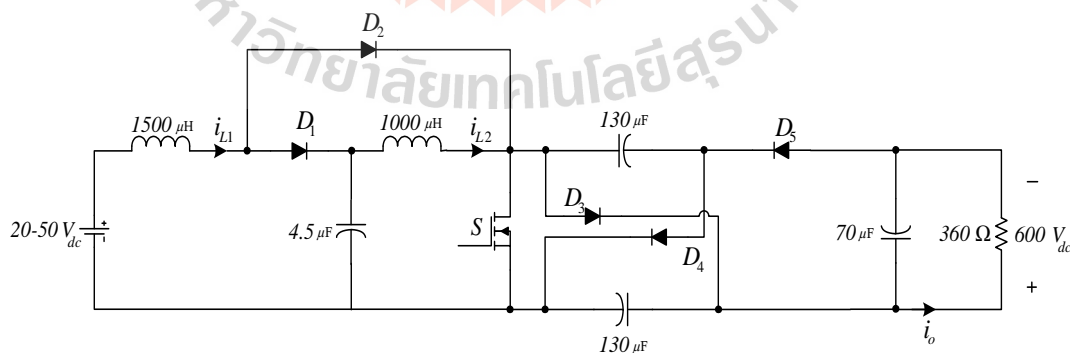
รูปที่ 5.13 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเมื่อมีความเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



รูปที่ 5.14 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส เมื่อมีความเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด

จากนั้นดำเนินการศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส จากการจำลองสถานการณ์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรถูกอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดให้กับระบบขนาด $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ในวินาทีที่ 0.2 จากนั้นทำการเพิ่มโหลดแรงบิดครั้งละ $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ในทุก ๆ 0.2 วินาทีจนถึง $8 \text{ N}\cdot\text{m}$ ในวินาทีที่ 1.6 โดยควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ที่ 500 rad/s ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 พบว่าเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด ตัวควบคุมชนิดพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ที่ 500 rad/s ได้ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความเร็วรอบเล็กน้อย ในช่วงเริ่มต้นที่ทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ที่ 500 rad/s โดยที่ไม่มีโหลดแรงบิด ปริมาณกระแสสามเฟส (i_{abc}) และปริมาณกระแสบนแกนดีคิว (i_{dq}) จะมีค่าประมาณศูนย์ จากนั้นเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดในวินาทีที่ 0.2 ปริมาณกระแสจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของโหลดแรงบิดในระบบส่วนปริมาณแรงดันสามเฟส (v_{abc}) และปริมาณแรงดันบนแกนดีคิว (v_{dq}) จะมีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยแปรผันตามขนาดของโหลดแรงบิด

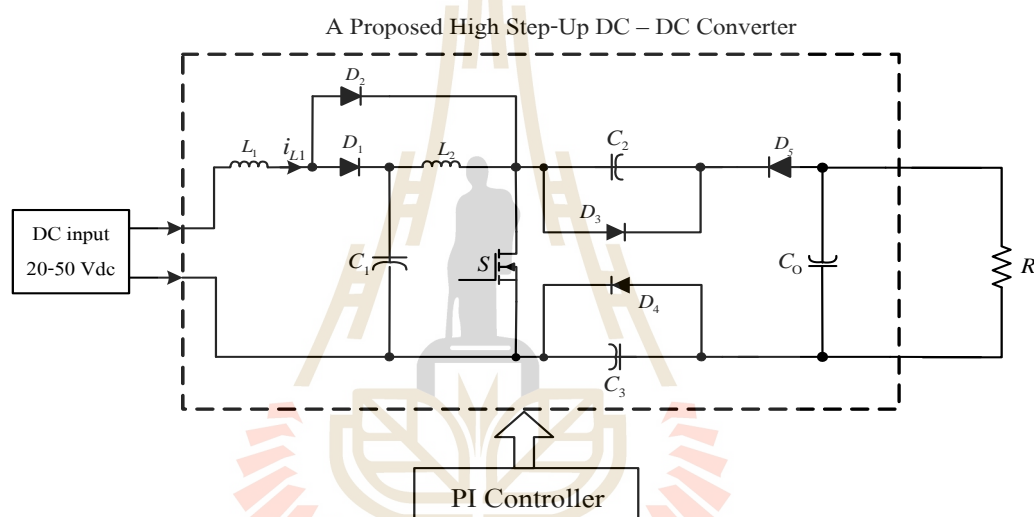
จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งคอนสตรัคชันแม่เหล็กถาวรด้วยวงจรถูกอินเวอร์เตอร์สามเฟสนำมาสู่การประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งคอนสตรัคชันแม่เหล็กถาวรขนาด 1.1 kW ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ให้สอดคล้องกับขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่เลือกใช้งาน คือ ขนาด 1.1 kW ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่ได้ทำการออกแบบใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 จากพารามิเตอร์ชุดใหม่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอได้ดังตารางที่ 5.3 โดยมีโครงสร้างการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่ทำการออกแบบใหม่

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นชุดใหม่

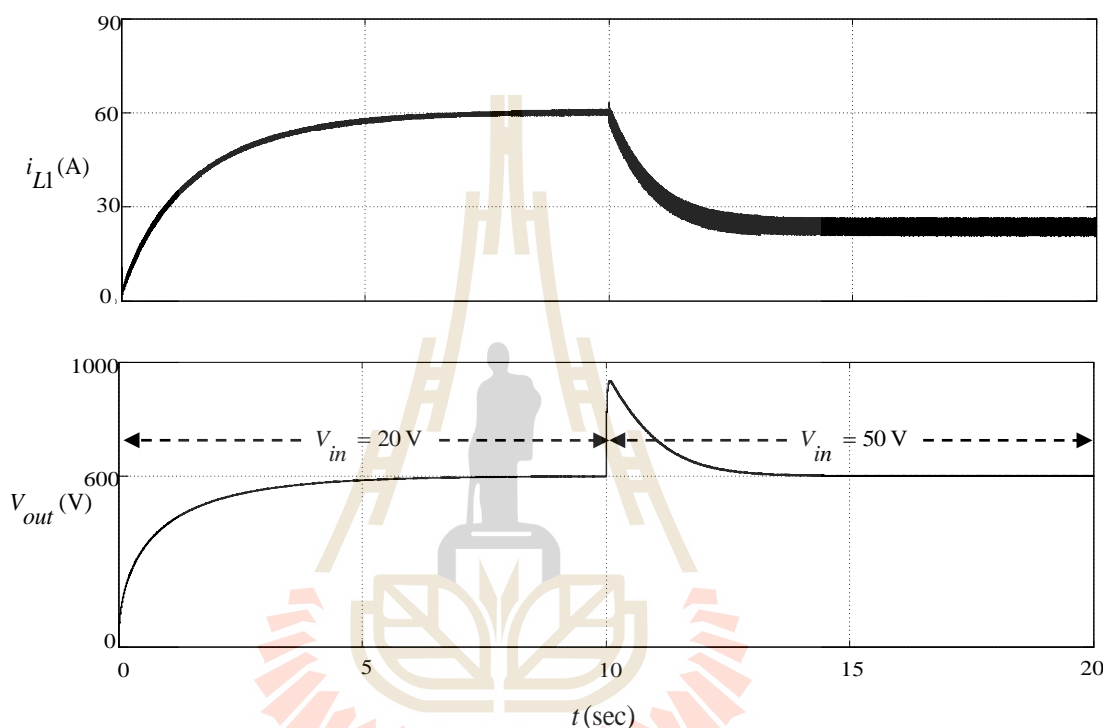
สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
K_{PV}	0.0027
K_{IV}	0.11
K_{PC}	5.95
K_{IC}	118102.8
ω_n	39.68
ω_{ni}	39682.54



รูปที่ 5.16 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับโพลความต้านทาน

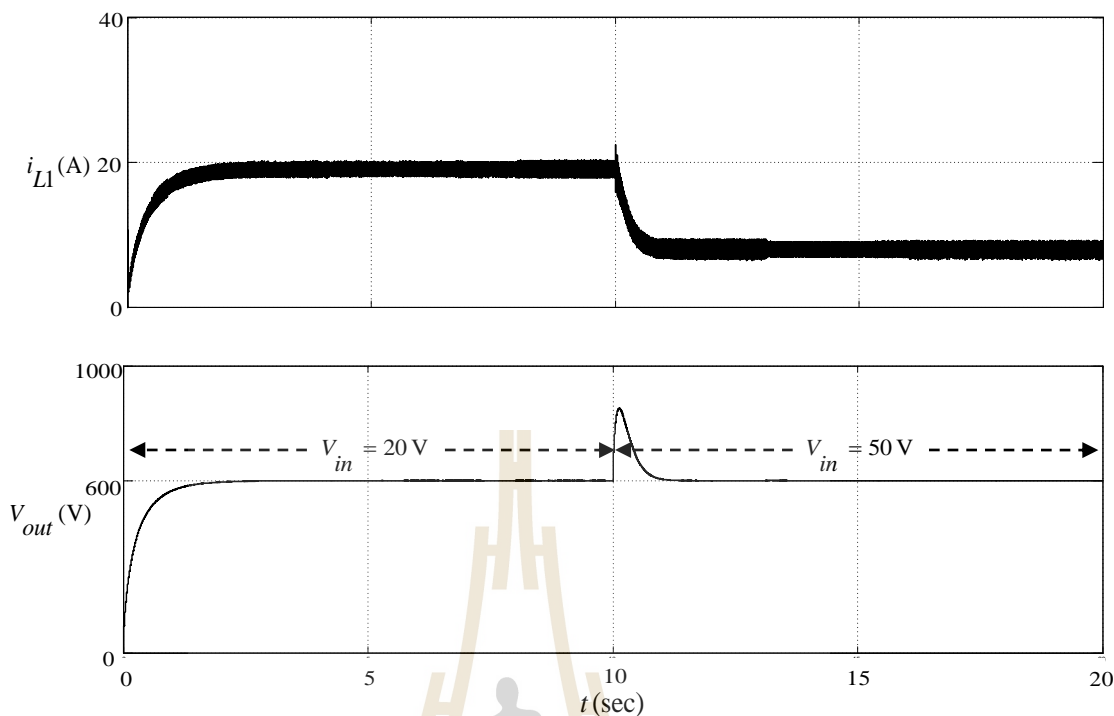
จำลองสถานการณ์ดังโครงสร้างในรูปที่ 5.16 เพื่อทดสอบพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอที่ทำการออกแบบจากโพลความต้านทานขนาด 360Ω โดยที่มีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ขนาด $20-50 V_{dc}$ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงวินาทีที่ 0-10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นรับแรงดันอินพุตคงที่ขนาด $20 V_{dc}$ พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง $600 V_{dc}$ และถูกควบคุมให้คงที่ที่ $600 V_{dc}$ โดยที่กระแสอินพุต (i_{L1}) ในช่วงเวลานี้มีค่าประมาณ $60 A$ และช่วงวินาทีที่ 10-20 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นรับแรงดันอินพุตคงที่ขนาด $50 V_{dc}$ โดยในช่วงเวลาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $20 V_{dc}$ เป็น $50 V_{dc}$ อย่างฉับพลัน ส่งผลให้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจากนั้นแรงดันเอาต์พุตจะคงที่ที่ $600 V_{dc}$ ใน

ขณะเดียวกันกระแสอินพุต (i_{L1}) มีค่าประมาณ 25A สัมพันธ์กับปริมาณแรงดันอินพุตที่เพิ่มจาก 20 V_{dc} เป็น 50 V_{dc} จากผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงได้ว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมชนิดพีไอ สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นอย่างดี โดยเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงถึง 600 V_{dc} อีกทั้งสามารถควบคุมให้คงที่ที่ 600 V_{dc} ได้



รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อโหลดความต้านทาน 360Ω

จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดของโหลดความต้านทานจาก 360Ω เป็น 1500Ω หากควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตประมาณ 240 W ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 จากรูปพบว่ากระแสอินพุต (i_{L1}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น มีค่าประมาณ 20A และ 10A เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 20 V_{dc} และ 50 V_{dc} ตามลำดับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} ดังนั้นจึงสามารถนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นไปขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสต่อไป

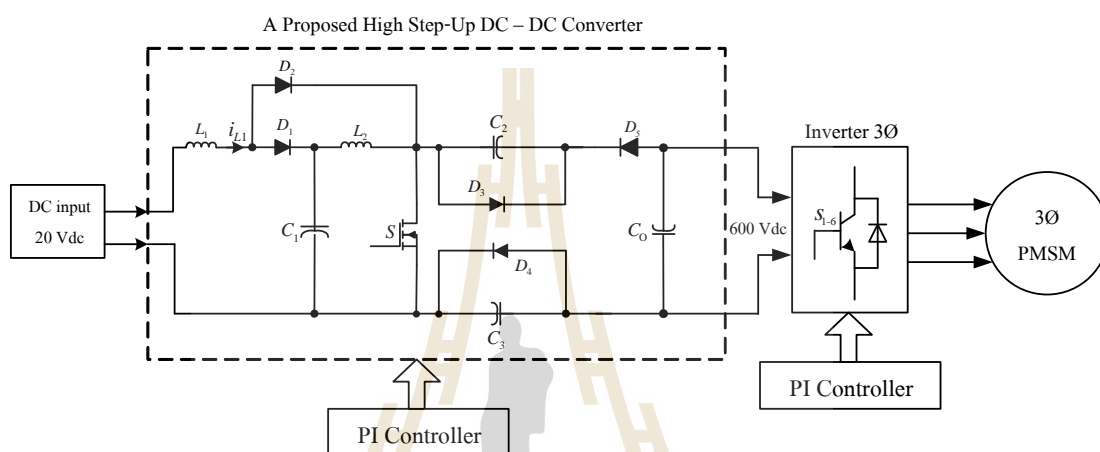


รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อโหลดความต้านทาน 1500 Ω

จากการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ และออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ในขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น จึงนำมาสู่การจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อพิจารณาการทำงานร่วมกันของระบบทั้งหมด โดยระบบที่ทำการจำลองสถานการณ์ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ขนาด 20 V_{dc} สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} และถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส แสดงโครงสร้างการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 5.19

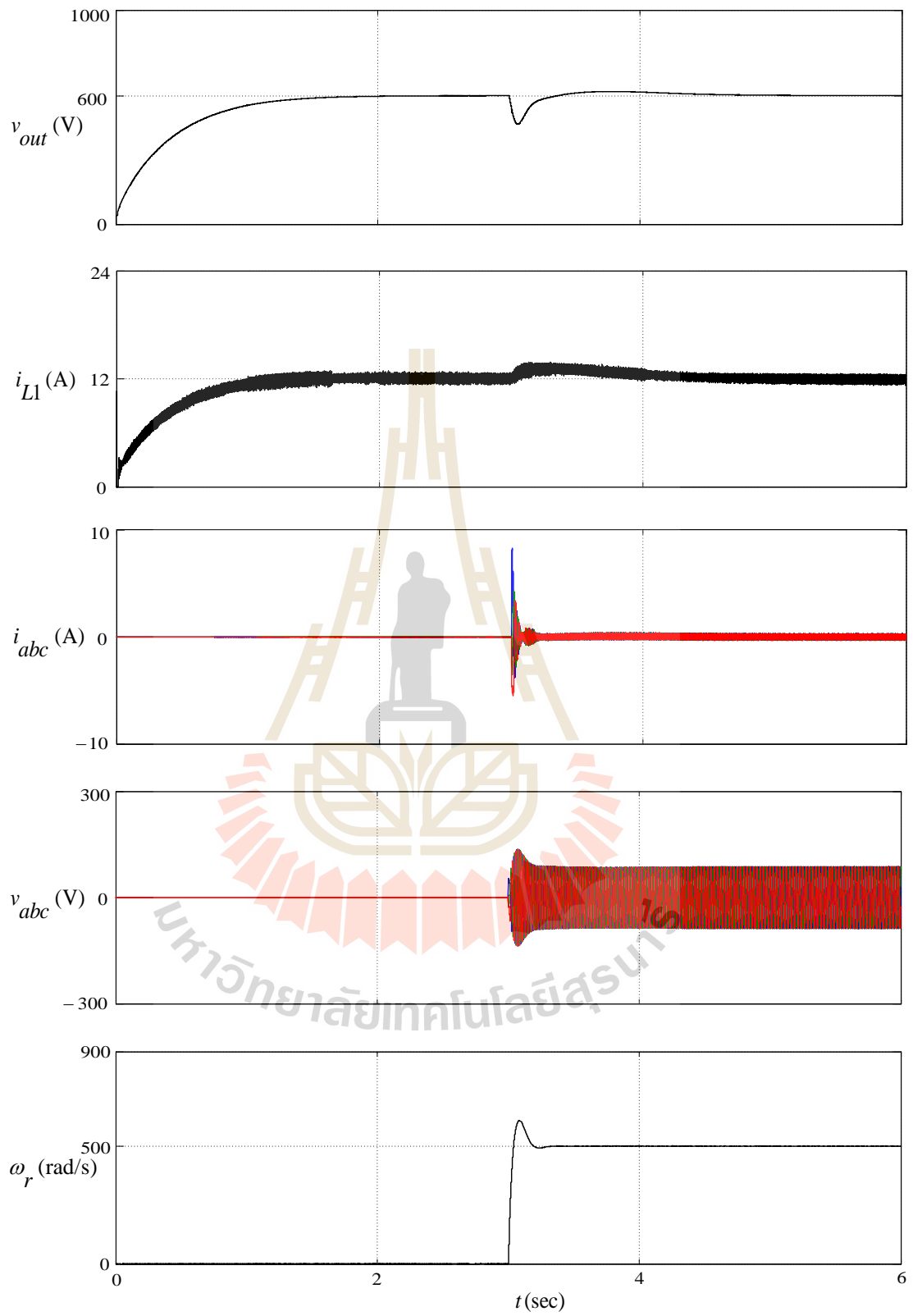
การจำลองสถานการณ์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จะทำการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 3 สถานการณ์ คือ เมื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ที่ 500 rad/s ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 พบว่าในช่วงวินาทีที่ 0-3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้ถึง 600 V_{dc} และถูกควบคุมให้คงที่ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบมีค่าประมาณ 12A โดยในช่วงเริ่มต้นมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสยังไม่ทำงานจากนั้นวินาทีที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสถูกควบคุมให้ทำงานที่ความเร็วรอบเท่ากับ 500 rad/s ส่งผลให้ปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) และแรงดันเอาต์พุต (v_{out}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงใน

ช่วงเวลาที่มอเตอร์เริ่มหมุนจากนั้นตัวควบคุมชนิดพีไอจะสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้กลับเข้าสู่แรงดัน 600 V_{dc} ได้เช่นเดิมในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสจะถูกควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ที่ 500 rad/s ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ปริมาณกระแสสามเฟส (i_{abc}) ในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณศูนย์เนื่องจากมอเตอร์ไม่โหลดแรงบิด และปริมาณของแรงดันสามเฟส (v_{abc}) มีค่าประมาณ 100 V แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสได้

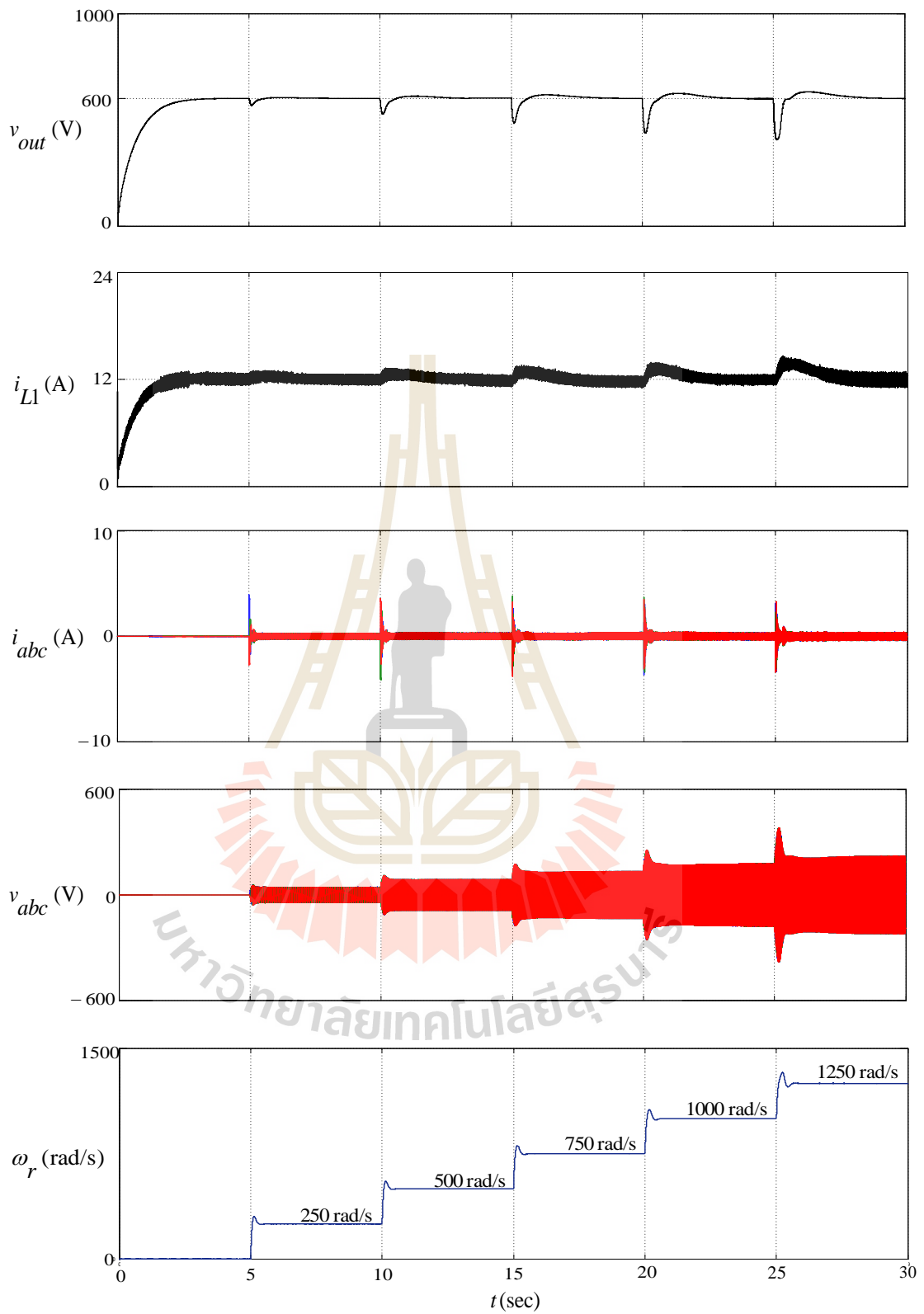


รูปที่ 5.19 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อน PMSM

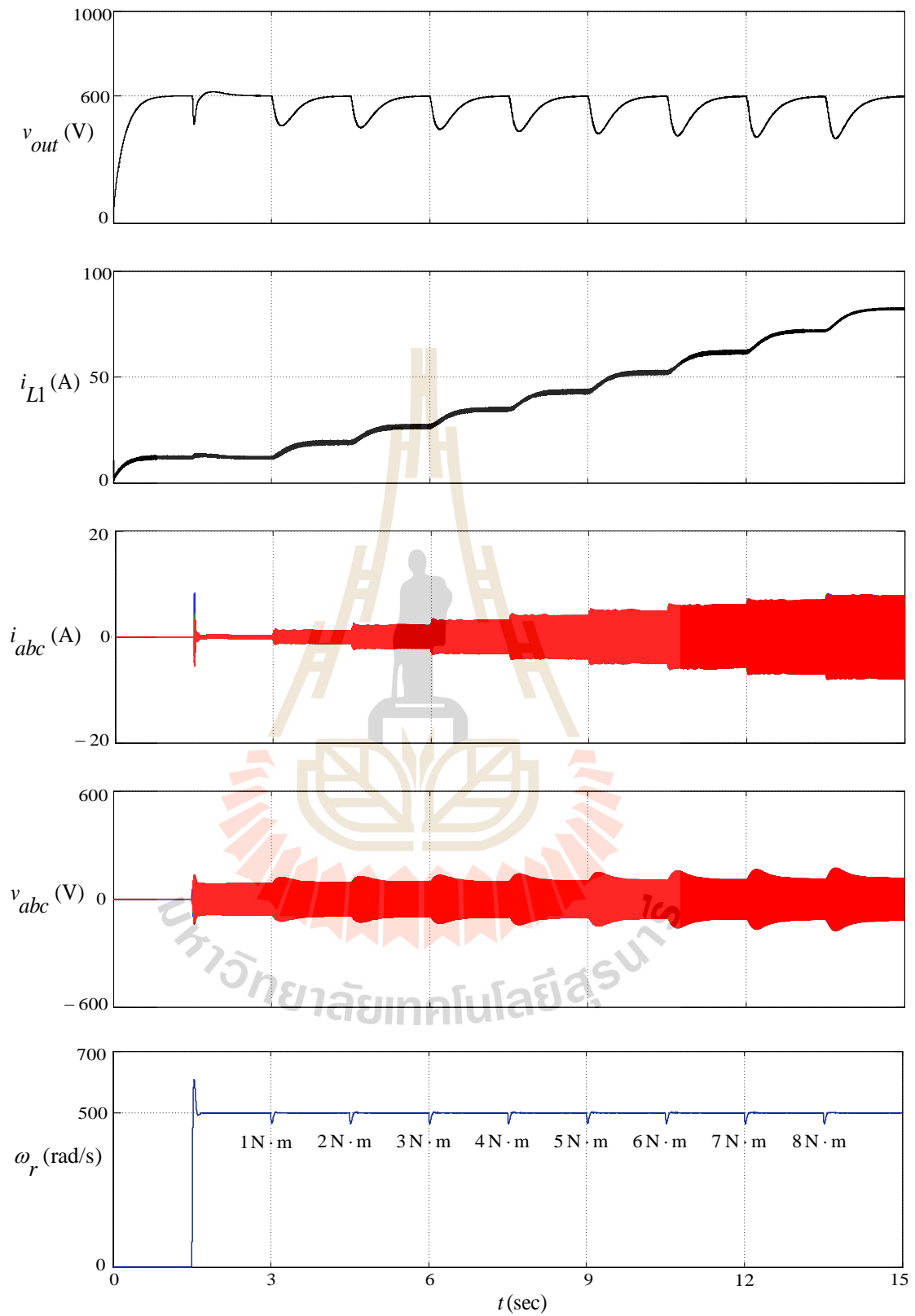
ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.21 เป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในย่านต่าง ๆ ซึ่งเริ่มต้นให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 600 V_{dc} และถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ จากนั้นในวินาทีที่ 5 เริ่มควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่ 250 rad/s และทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ทำการควบคุมเป็น $500, 750, 1000$ และ 1250 rad/d ณ วินาทีที่ 10, 15, 20, 25 ตามลำดับพบว่าตัวควบคุมชนิดพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 600 V_{dc} ได้ตลอดย่านการทำงานของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบโดยมีกระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบอยู่ที่ประมาณ 12 A ในส่วนของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ตัวควบคุมชนิดพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบได้ตามที่ต้องการปริมาณกระแสอินพุตสามเฟส (i_{abc}) และปริมาณแรงดันสามเฟส (v_{abc}) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ทำการควบคุม โดยที่ปริมาณแรงดันสามเฟส (v_{abc}) ในระบบจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.20 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรถูกพัฒนาขึ้นเมื่อความเร็วรอบคงที่ที่ 500 rad/s



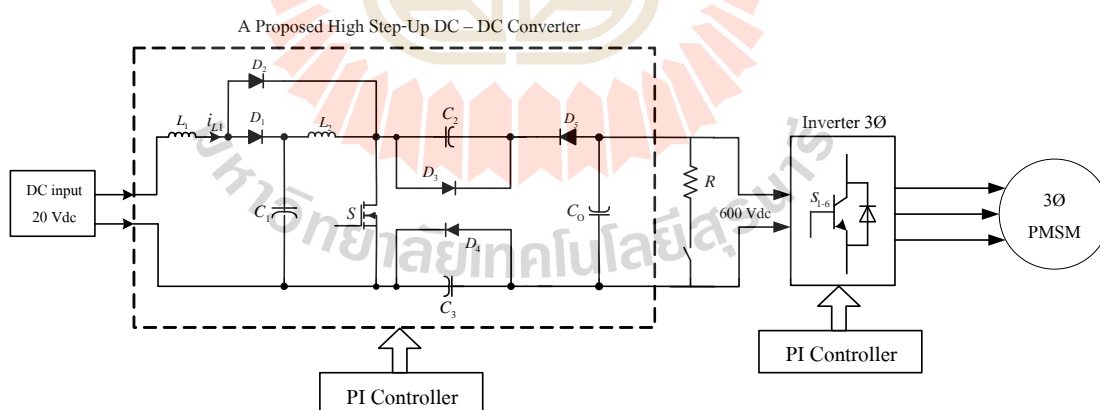
รูปที่ 5.21 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



รูปที่ 5.22 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด

สถานการณ์ที่สาม เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดในขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ถูกควบคุมให้คงที่ที่ 500 rad/s โดยกำหนดให้เริ่มป้อนโหลดแรงบิดขนาด 1 N.m ให้กับระบบ ณ วินาทีที่ 1.5 จากนั้นทำการเพิ่มโหลดแรงบิดครั้งละ 1 N.m ในทุก ๆ 1.5 วินาที จนถึงวินาทีที่ 13.5 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.22 พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} และถูกควบคุมให้คงที่ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ในขณะที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของโหลดแรงบิดที่เพิ่มเข้ามาในระบบ พิจารณาการทำงานของมอเตอร์สามเฟสที่ความเร็วรอบคงที่ที่ 500 rad/s พบว่าปริมาณกระแสสามเฟส (i_{abc}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบตามขนาดของโหลดแรงบิดแต่ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{abc}) จะมีค่าคงที่ประมาณ 100V และเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่มีการเพิ่มโหลดแรงบิดให้กับระบบ

เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จึงทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับขับเคลื่อนโหลดแบบขนาน ซึ่งประกอบไปด้วย โหลดความต้านทานขนาด 1500 Ω และโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาด 1.1 kW ต่อขนานกันผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยที่แหล่งจ่ายแรงดันของระบบมีขนาด 20 V_{dc} และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จะทำหน้าที่เพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้สูงถึง 600 V_{dc} สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ดังแสดงโครงสร้างการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 5.23

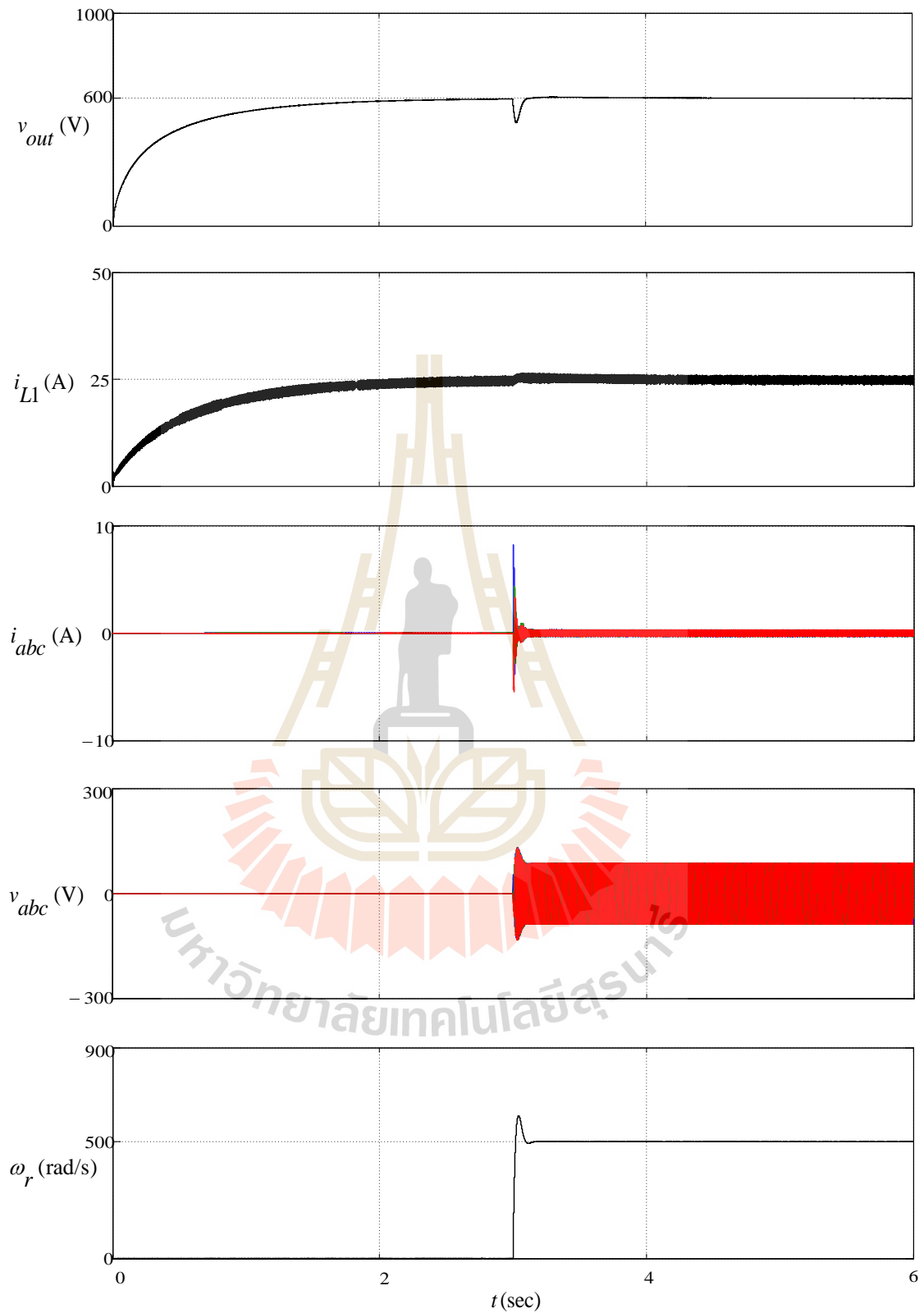


รูปที่ 5.23 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนโหลดแบบขนาน

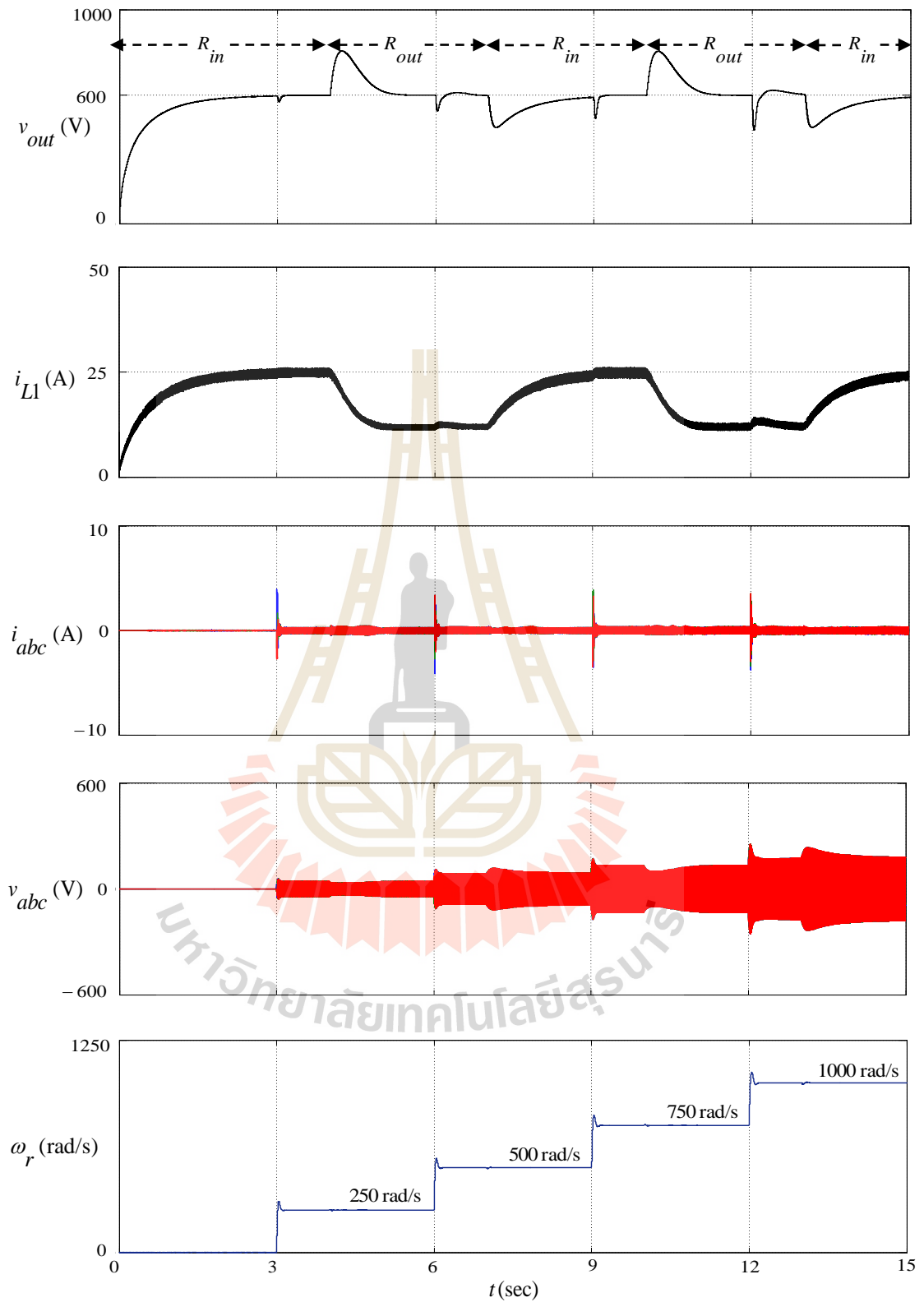
การจำลองสถานการณ์ระบบขับเคลื่อนโหลดขนานด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จะทำการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 3 สถานการณ์ คือ ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนโหลดขนาน เมื่อกำหนดให้ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสคงที่ที่ 500 rad/s ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.24 ในช่วงแรกของการจำลอง

สถานการณ์ ณ วินาทีที่ 0-3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} และถูกควบคุมให้คงที่ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยที่ระบบมีกระแสอินพุต (i_{L1}) อยู่ที่ประมาณ 25A สังเกตได้ว่าปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบขับเคลื่อนโหลดขนานจะสูงกว่ากระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส เนื่องจากโหลดขนานประกอบไปด้วยโหลดความต้านทานขนาด 1500 Ω และโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส จึงทำให้ต้องการกำลังไฟฟ้าจากทางด้านแหล่งจ่าย จากนั้นในช่วงวินาทีที่ 3-6 ทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสให้คงที่ที่ 500 rad/s ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนกระแสสามเฟส (i_{abc}) และแรงดันสามเฟส (v_{abc}) จะเพิ่มขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดเริ่มต้นให้กับมอเตอร์ จากนั้นเมื่อมอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่ที่ 500 rad/s กระแสสามเฟส (i_{abc}) และแรงดันสามเฟส (v_{abc}) จะมีค่าประมาณศูนย์ และ 100V ตามลำดับ ดังนั้นการจำลองสถานการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่สามารถขับเคลื่อนโหลดแบบขนานได้เป็นอย่างดี

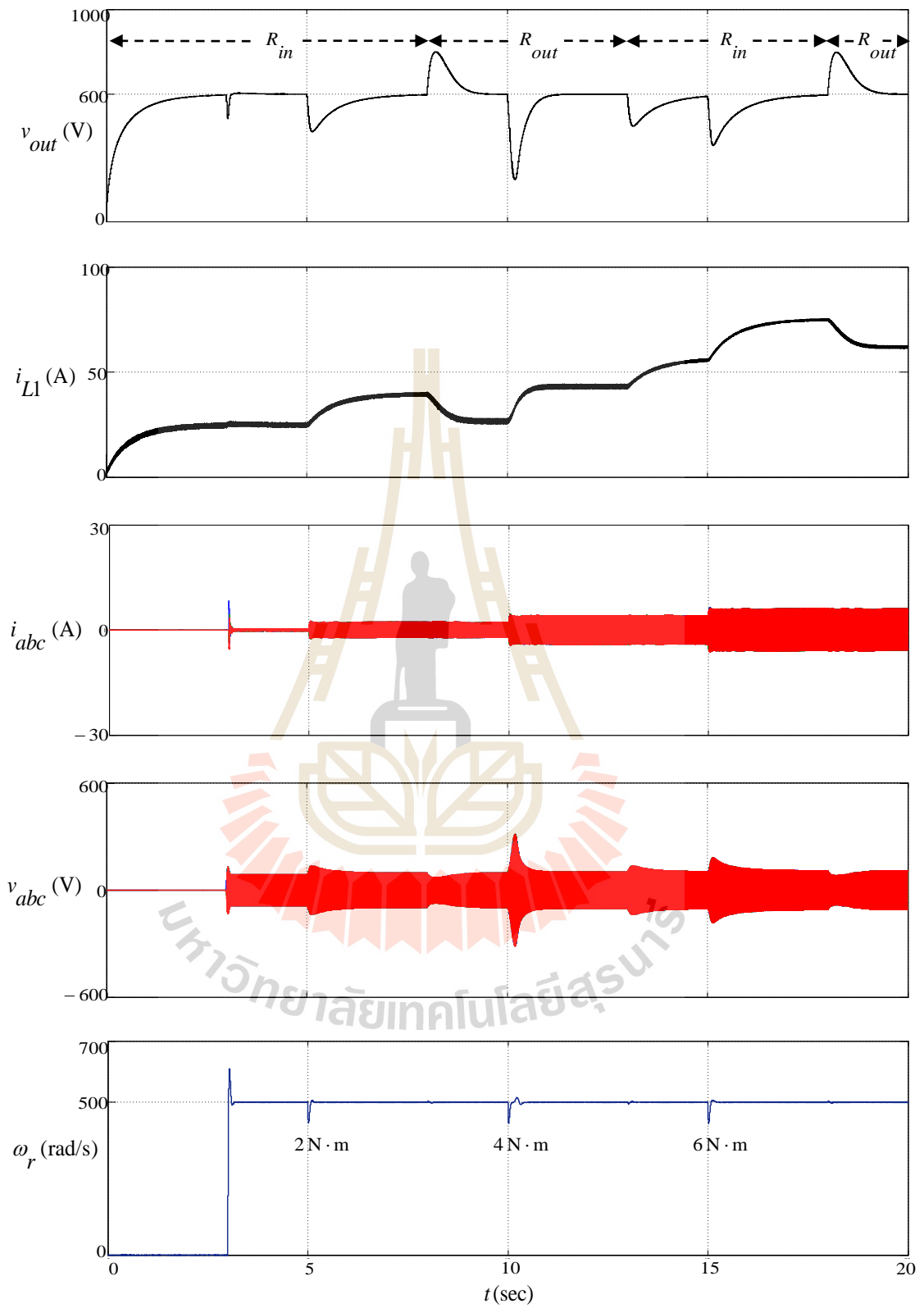
สถานการณ์ที่สอง ให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขับเคลื่อนโหลดแบบขนานโดยกำหนดให้มีการปลดออก (R_{out}) และต่อเข้า (R_{in}) ของโหลดความต้านทานที่เวลาต่างๆ พร้อมทั้งควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.25 เริ่มต้นให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงถึง 600 V_{dc} ปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบอยู่ที่ประมาณ 25A จากนั้นทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสให้คงที่ที่ 250 rad/s ปริมาณกระแสสามเฟส (i_{abc}) จะเพิ่มขึ้นและลดระดับลงจนมีค่าประมาณศูนย์ แรงดันสามเฟส (v_{abc}) จะมีขนาดและความถี่คงที่ในสถานะอยู่ตัว ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ถูกควบคุมให้คงที่ที่ 250 rad/s ขณะที่ ณ วินาทีที่ 4 ทำการปลดโหลดความต้านทานขนาด 1500 Ω ออกจากระบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นยังคงสามารถทำงานได้กล่าวคือสามารถเพิ่มแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc} ด้วยปริมาณกระแสที่ลดลงเหลือประมาณ 10 A เนื่องจากระบบมีเพียงโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสอย่างเดียว จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ทำงานอยู่ที่ 500 rad/s ปริมาณของแรงดันสามเฟส (v_{abc}) มีค่าเปลี่ยนแปลงจากเดิม และ ณ วินาทีที่ 7 ทำการต่อโหลดความต้านทาน 1500 Ω กลับเข้าสู่ระบบอีกครั้ง จะพบความเปลี่ยนแปลงของกระแสอินพุต (i_{L1}) ของระบบที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 25A เพื่อขับโหลดสองชนิด จากนั้นกำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบ 750 และ 1000 rad/s ณ วินาทีที่ 9 และ 12 ตามลำดับ พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน 1500 Ω ณ วินาทีที่ 10 และ 13 พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถขับเคลื่อนโหลดแบบขนานได้ ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 5.24 การขับเคลื่อนโหลดแบบขนานด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อความเร็วรอบคงที่ที่ 500 rad/s



รูปที่ 5.25 การขับเคลื่อนโหลดแบบขนานด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและ โหลดความต้านทาน



รูปที่ 5.26 การขับเคลื่อนโหลดแบบขนานด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด

และโหลดความต้านทาน

สถานการณ์ที่สาม วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนโหลดแบบขนานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส รวมทั้งมีการปรับเปลี่ยนสถานการณ์การต่อโหลดความต้านทานให้กับระบบผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.26 พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้ถึง $600 V_{dc}$ โดยที่แรงดันเอาต์พุตถูกควบคุมให้คงที่ที่ $600 V_{dc}$ ตลอดย่านการทำงานด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอซึ่งปริมาณกระแสอินพุตของวงจรมีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 25A และจะมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสนี้ตามสถานการณ์การต่อโหลดความต้านทาน รวมถึงขึ้นอยู่กับค่าโหลดแรงบิดที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ที่เวลา $t = 3$ วินาที ทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสให้ทำงานอยู่ที่ 500 rad/s จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแส และแรงดัน จากนั้นที่เวลา $t = 5$ วินาที ทำการเพิ่มโหลดแรงบิดขนาด 2N.m ให้กับมอเตอร์ พบว่าปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) มีค่าสูงขึ้นอยู่กับที่ประมาณ 40 A ตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับโหลด จากนั้นที่เวลา $t = 8.5$ วินาที ทำการปลดโหลดความต้านทาน 1500 Ω ออกจากระบบพบว่า ปริมาณกระแสอินพุต (i_{L1}) มีค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ 30A จากนั้นเพิ่มโหลดแรงบิดขนาด 4 และ 6 N.m ณ วินาทีที่ 10 และ 15 ตามลำดับ พร้อมทั้งการเปลี่ยนแปลงสถานการณ์การตัดต่อโหลดความต้านทาน 1500 Ω วินาทีที่ 13.5 และ 18.5 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.26 ซึ่งจะแสดงถึงสมรรถนะการทำงานของระบบโหลดแบบขนานที่ขับเคลื่อนด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นยังสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี

5.7 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสซึ่งโครนิสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบที่แหล่งจ่ายมีแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำประมาณ 20-50 V_{dc} กับโหลดที่ต้องการแรงดันค่อนข้างสูงระดับที่ $600 V_{dc}$ เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส และโหลดแบบขนานซึ่งเป็นโหลดตัวต้านทานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถขับเคลื่อนโหลดทั้ง 2 ลักษณะได้อย่างน่าพอใจ ผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง $600 V_{dc}$ ในขณะที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส โหลดแรงบิด และโหลดความต้านทาน อีกทั้งแสดงถึงความสามารถของตัวควบคุมชนิดพีไอที่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมให้คงที่ที่ $600 V_{dc}$ ได้เป็นอย่างดี และยังแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ร่วมกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสได้

บทที่ 6

บทสรุป

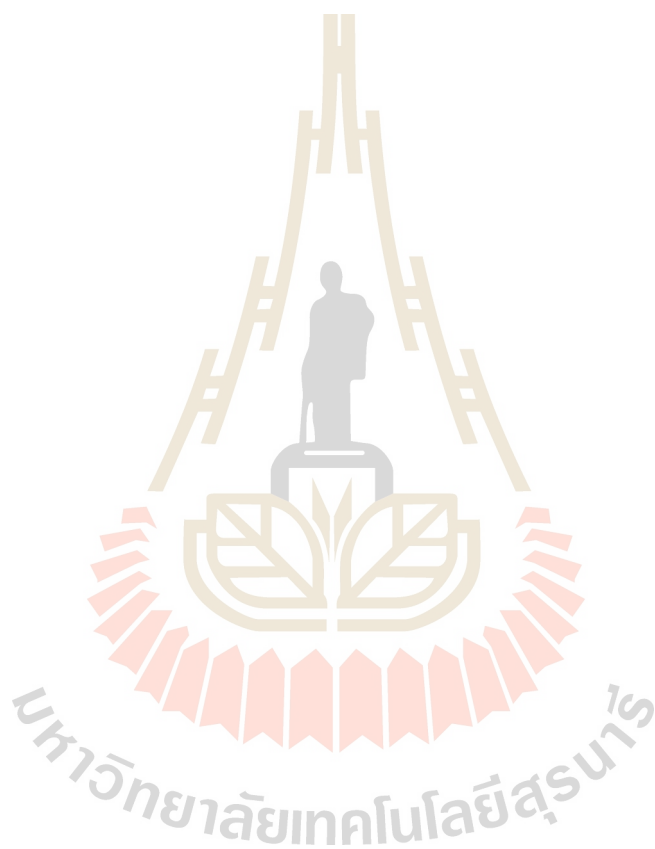
6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายสูงยิ่งสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อประมวลข้อดีข้อด้อยของวงจร จากการค้นคว้าพบว่าโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยมีการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจากงานในอดีตอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งรายละเอียดการค้นคว้าต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงยิ่งที่พัฒนาขึ้น เป็นการผสมผสานโครงสร้างของวงจรที่สำคัญสองวงจร คือ วงจรทบระดับแรงดันกำลังสอง (Conventional Quadratic Boost Converter) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบชุก (High-Voltage Cuk-Derived Converter) ซึ่งการผสมผสานโครงสร้างของวงจรทั้งสอง เป็นการเพิ่มความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นให้สูงยิ่งอยู่ที่ประมาณ 30 เท่าภายใต้การทำงานของสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของวงจร และอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสวิตช์กำลังหลายตัว รายละเอียดของโครงสร้าง และหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

การพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มระดับแรงดันได้สูงยิ่งประมาณ 30 เท่า สำหรับประยุกต์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสที่ต้องการแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่ จึงต้องทำการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ ที่ $600 V_{dc}$ โดยอาศัยแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอจากวงจรทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิม เมื่อกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นทำงานในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน เป็นต้น ดังแสดงผลการจำลองสถานการณ์ไว้ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงสมรรถนะของตัวควบคุมชนิดพีไอที่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ได้

จากการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการเพิ่มค่าแรงดันสูงยิ่ง
รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น นำมาสู่การ
ประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสเชิงโครนัส
ชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงไว้ในบทที่ 5 สามารถแสดงให้เห็นถึง
สมรรถนะวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 600 V_{dc}
อีกทั้งยืนยันความสามารถของตัวควบคุมชนิดพีไอที่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้



รายการอ้างอิง

- [1] A. W. N. Husna, S. F. Siraj, and M. Z. Muin, "Modelling of DC-DC Converter for Solar Energy Applications," in *Proc. IEEE Computer and Informatics*, 2012, pp. 125-129.
- [2] T. Shimizu, K. Wada, and N. Nakamura, "Flyback-Type Single-Phase Utility Interactive Inverter with Power Pulsation Decoupling on the DC Input for AC Photovoltaic Module System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, January 2006, pp. 1264-1272.
- [3] J-S. Yoo, J-Y. Choi, M-K. Yang and W-Y. Choi, "Dual Active-Clamped Step-Up DC-DC Converter with Reduced Voltage Stress for Low-DC Renewable Sources," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012, pp. 1303-1306.
- [4] F. Locment, M. Sechilariu, and I. Houssamo, "DC Load and Batteries Control Limitations for Photovoltaic Systems; Experiment Validation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, September 2012, pp. 4030-4038.
- [5] L-W. Zhou, B-X. Zhu and Q-M. Luo, "High Step-Up Converter with Capacity of Multiple Input," *IET Power Electron.*, vol. 5, no. 5, 2012, pp. 524-531.
- [6] J-P. Lee, B-D. Min, D-W. Yoo, T-J. Kim, and J-Y. Yoo, "A New Topology for PV DC/DC Converter with High Efficiency under Wide Load Range," in *Proc European Power Electronics and Applications*, 2007, pp. 1-6.
- [7] Y. Park, B. Jung, and S. Choi, "Nonisolated ZVZCS Resonant PWM DC-DC Converter for High Step-Up and High-Power Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, August 2012, pp. 3568-3575.
- [8] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, April 2011, pp. 1239-1250.

- [9] K. I. Hwu and Y. T. Yau, "An Interleaved AC-D Converter Based on Current Tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, May 2009, pp. 1456-1463.
- [10] B. R. Lin, H. H. Lu, and Y. L. Hou, "Single-Phase Power Factor Correction Circuit with Three-Level Boost Converter," in *Proc. IEEE Industrial Electronics 1999*, pp. 445-450.
- [11] S. Vighetti, J-P. Ferrieux, and Y. Lembeye, "Optimization and Design of a Cascade DC/DC Converter Devoted to Grid-Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, April 2014, pp. 2018-2027.
- [12] Q. Zhao, and F. C. Lee, "High-Efficiency, High Step-Up DC-DC Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 1, January 2003, pp. 65-73.
- [13] T. F. Wu, Y. S. Lai, J. C. Hung, and Y. M. Chen, "Boost Converter with Coupled Inductors and Buck-Boost Type of Active Clamp," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, January 2008, pp. 154-162.
- [14] H. S. Chung, A. Ioinovici, and W. L. Cheung, "Generalized Structure of Bi-Directional Switched-Capacitor DC/DC Converters," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 50, no. 6, June 2003, pp. 743-753.
- [15] F. Peng, F. Zhang, and Z. Qian, "A magnetic-less DC-DC Converter for Dual Voltage Automotive Systems," *IEEE Trans. Indust. Applic.*, vol. 39, no. 2, March-April 2003, pp. 511-518.
- [16] R. D. Middlebrook, "Transformerless DC-to-DC Converters with Large Conversion Ratios," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, October 1988, pp. 484-488.
- [17] R. J. Wai, and R. Y. Duan, "High-Efficiency Power Conversion for Low Power Fuel Cell Generation System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, July 2005, pp. 847-856.
- [18] R. Gules, L. L. Pfitscher, and L. C. Franco, "An Interleaved Boost DC-DC Converter with Large Conversion Ratio," in *Proc. IEEE Industrial Electronics*, 2003, pp. 411-416.

- [19] E.H. Ismail, M.A. Saffar, Sabzali and A.J. Fardoun (2008) "A family of single-switch PWM converters with High Step-Up Conversion Ratio" *IEEE Trans. Circuit and systems I: Regular Paper*, pp. 1159-1171.
- [20] G. R. Walker and P. C. Sernia, "Cascade DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules," in *Proc. IEEE Power Electronic Specialists 2002*, pp. 24-29.
- [21] L. C. Franco, L. L. Pfitscher, and R. Gules, "A New High Static Gain Nonisolated DC-DC Converter," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists 2003*, pp. 1367-1372.
- [22] S. V. G. Oliveira, and I. Barbi, "A Three-Phase Step-Up DC-DC Converter with a Three-Phase High Frequency Transformer," in *Proc. Industrial Electronics 2005*, pp. 571-576.
- [23] M. Prudente, L.L. Pfitscher and R. Gules (2005) "A boost converter with Voltage multiplier cells" in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2716-2721.
- [24] H. Broeck, and I. Tezcan, "1KW Dual Interleaved Boost Converter for Low Voltage Applications," in *Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control 2006*, pp. 1-5.
- [25] S. V. Araujo, P. Zacharias, B. Sahan, R. P. Torrico, and F. Antunes, "Analysis and Proposition of a PV Module Integrated Converter with High Voltage Gain Capability in a Non-Isolated Topology," in *Proc. Power Electronics 2007*, pp. 511-517.
- [26] R-J. Wai, W-H. Wang and C-Y. Lin, "High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, January 2008, pp. 240-250.
- [27] B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici (2008) "Switched-Capacitor/Switched-Inductor Structures for Getting Transformerless Hybrid DC-DC PWM Converters" in *Proc. IEEE Circuits and Systems I: Regular Papers*, pp. 687 – 696.

- [28] M. Prudente, L. L. Pfitscher, G. Emmendoerfer, E. F. Romaneli, and R. Gules (2008) "Voltage Multiplier Cells Applied to Non-Isolated DC-DC Converters" in *Proc. IEEE Power Electronics*, pp. 871-877.
- [29] J-M. Kwon, B-H. Kwon, and K-H. Nam, "High-Efficiency Module-Integrated Photovoltaic Power Conditioning System," *IEE Power Electron 2009*, pp. 410-420.
- [30] J-H. Lee, J-H. Park, and J. H. Jeon, "Series-Connected Forward-Flyback Converter for High-Step-Up Power Conversion," *IEEE Power Electron.*, vol. 26, no. 12, December 2011, pp. 3629-2641.
- [31] G. Spiazzi, P. Mattavelli, and A. Costabeber, "High Step-Up Ratio Flyback Converter with Active Clamp and Voltage Multiplier," *IEEE Power Electron.*, vol. 26, no. 11, November 2011, pp. 3205-3214.
- [32] W. Li, and X. He (2011) "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," in *Proc. IEEE Industrial Electronics*, pp. 1239-1250.
- [33] K-J. Lee, B-G. Park, R-Y. Kim and D-S. Hyun, "Nonisolated ZVT Two-Inductor for High Step-Up Applications," *IEEE Power Electron.*, vol. 27, no. 4, April 2012, pp. 1966-1973.
- [34] Y. Park, B. Jung and S. Choi, "Nonisolated ZVZCS Resonant PWM DC-DC Converter for High Step-Up and High-Power Applications," *IEEE Power Electron.*, vol. 27, no. 8, August 2012, pp. 3568-3575.
- [35] S. M. Chen, T. J. Liang, L. S. Yang, and J. F. Chen (2013) "A Boost Converter With Capacitor Multiplier and Coupled Inductor for AC Module Applications" in *Proc. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1503-1511.
- [36] M.S.S.Andrade, L. Schuch, and M. L. S. Martins (2015), "Very high voltage step-up integrated Quadratic-Boost-Zeta converter" in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 422-427.

ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2545 และ 2548 ตามลำดับ จากนั้นสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก ทางด้าน Electrical and Electronic Engineering จาก The University of Nottingham ประเทศอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2554 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า การขับเคลื่อนเครื่องจักรกล ระบบที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด วิธีการตรวจจับความผิดพลาด และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์



ภาคผนวก

บทความที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย

1. Sudarat Khwan-on and Kuagoon Kongkanjana, "A Multi-Input High Step-Up Converter for Renewable Energy-Drive Systems" ICPEA2019 (2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications during April 27-30, 2019 in Singapore) (Submitted)

