



เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับ

ระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

(A Fast Voltage Sag Compensator for
Distributed Generation System)

โดย

ผศ. ดร. ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์

รศ. ธนบูรณ์ ศศิภาณุเดช

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สิงหาคม 2558

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงที่นำเสนอประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter), ตัวสะสมพลังงานหรือตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (Super Capacitor), สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลัก (Main Static Transfer Switch), และสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรอง (Alternate Static Transfer Switch)

ในสภาวะปกติสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลัก (STS1) จะต่อวงจรเพื่อให้โหลดได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายหลัก (Grid voltages) ในขณะที่ สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรอง (STS2) จะต้องตัดวงจรเมื่อตัวควบคุม (Controller) ตรวจสอบได้ว่าเกิดแรงดันตกชั่วขณะถึงระดับที่ตั้งไว้จะต้องสั่งให้ สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลักตัดวงจรทันที แล้วจึงจะสั่งให้สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรองต่อวงจรเพื่อถ่ายโอนโหลดให้ได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายสำรอง (Alternate Source) ซึ่งก็คืออินเวอร์เตอร์แทนทันทีเพื่อไม่ให้โหลดได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะนี้ เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะที่นำเสนอนี้ถูกออกแบบให้ใช้ได้กับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีฮาร์มอนิกของแรงดัน

จากผลการทดลองเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสามารถชดเชยแรงดันภายในระยะเวลา 3ms ในกรณีที่เกิดแรงตกชั่วขณะที่มีมม POW 315 องศา สามารถสามารถชดเชยแรงดันภายในระยะเวลา 2.4 ms ในกรณีที่เกิดแรงตกชั่วขณะที่มีมม POW 345 องศา และสามารถสามารถชดเชยแรงดันภายในระยะเวลา 0.8 ms ในกรณีที่เกิดแรงตกชั่วขณะที่มีมม POW 70 องศา

Abstract

In this paper, a fast voltage sag compensator for distributed generation system is presented. The proposed voltage sag compensator consists of the inverter, the energy storage device or super capacitor, the main static transfer switch and the alternate static transfer switch.

In the normal incident, the main static transfer switch (STS1) is closed to connect the critical load and the grid voltages and the alternate static transfer switch (STS2) must be opened. Whenever the controller detects the voltage sag, STS1 is opened and STS2 is then immediately closed to connect the critical load and the alternate voltages (inverter output) instead of the faulty grid voltages. This proposed voltage sag compensator is designed for using in distorted grid voltages such as distributed generation system.

From the experimental results, the proposed voltage sag compensator can compensates voltage sag (POW = 315 degree) within 3 ms, when the voltage sag occurs at POW of 345 degree, the load voltage can be compensated within 2.4ms and finally, the load voltage can be compensated within 0.8ms when the voltage sag occurs at POW of 70 degrees.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (A Fast Voltage Sag Compensator for Distributed Generation System)” นี้เป็นโครงการวิจัยของห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สาขาวิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จากเงินงบประมาณประจำปี 2558 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรของคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทุกอย่างในการเอื้ออำนวยให้โครงการวิจัยนี้เป็นไปอย่างราบรื่นมา ณ ที่นี้ด้วย

ผศ. ดร. ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์

รศ. ธนบูรณ์ ศรีสุภาคุณ

สิงหาคม 2558

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	3
2.2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ (อินเวอร์เตอร์) แบบวิธีสวิตช์	3
2.3 ทรานซิสเตอร์ IGBT	10
2.4 สวิตช์ถ่ายไอออนแบบสถิตที่ใช้ไทรสเตอร์	15
2.5 เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงที่นำเสนอ	18
2.6 การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูง	19
2.7 แรงดันตกชั่วขณะกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	20
3. การออกแบบ	
3.1 บทนำ	22
3.2 2 การออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Energy storage device)	22
3.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์	23
3.4 การออกแบบสวิตช์ถ่ายไอออนแบบสถิต	31
3.3 การออกแบบการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ	33
4. การทดลอง	
4.1 บทนำ	34
4.2 ระบบที่ใช้ในการทดลอง	34
4.3 การทดลองการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ – กรณีใช้แรงดันไฟสลับอีกแหล่งเป็นแหล่งจ่ายสำรอง	35
4.4 การทดลองการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ – กรณีใช้แรงดันจากอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายสำรอง	43
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 บทนำ	47
5.2 สรุปผลการทดลอง	47
5.3 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	49

สารบัญรูป

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 1	รูปที่ 1.1 ระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed generation)	1
รูปที่ 2	รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ	3
รูปที่ 3	รูปที่ 2.2 การใช้เทคนิค PWM กับวงจรทอนระดับ	5
รูปที่ 4	รูปที่ 2.3 อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์หนึ่งเฟส	6
รูปที่ 5	รูปที่ 2.4 แรงดันด้านออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์หนึ่งเฟส	7
รูปที่ 6	รูปที่ 2.5 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟส	7
รูปที่ 7	รูปที่ 2.6 แรงดันด้านออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟสเมื่อสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว	9
รูปที่ 8	รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์สามเฟส	10
รูปที่ 9	รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ IGBT	11
รูปที่ 10	รูปที่ 2.9 คุณสมบัติและสัญลักษณ์ของ IGBT	11
รูปที่ 11	รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของ IGBT	12
รูปที่ 12	รูปที่ 2.11 SOA ของ IGBT	13
รูปที่ 13	รูปที่ 2.12 วงจรขั้วนำไอจีบีทีแบบอย่าง	13
รูปที่ 14	รูปที่ 2.13 วงจรขั้วนำไอจีบีทีแบบแยกโคด โดยใช้หม้อแปลง	14
รูปที่ 15	รูปที่ 2.14 วงจรขั้วนำไอจีบีทีแบบแยกโคดเชื่อมโยงผ่านแสง	14
รูปที่ 16	รูปที่ 2.15 วงจรขั้วนำไอจีบีทีแบบแยกโคดเชื่อมโยงผ่านแสงที่ใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว	14
รูปที่ 17	รูปที่ 2.16 คลื่นแรงดันและคลื่นกระแส กรณีโหลดเชิงเส้น (อินดักทีฟโหลด)	16
รูปที่ 18	รูปที่ 2.17 สวิตช์ไทรสเตอร์ถ่ายโอน โหลด ณ ช่วงจุด t1 และช่วงจุด t2	17
รูปที่ 19	รูปที่ 2.18 สวิตช์ไทรสเตอร์ถ่ายโอน โหลด ณ ช่วงจุด t3 และช่วงจุด t4	18
รูปที่ 20	รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่นำเสนอ	18
รูปที่ 21	รูปที่ 2.20 การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูง	19
รูปที่ 22	รูปที่ 3.1 วงจรของระบบแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะที่นำเสนอ	22
รูปที่ 23	รูปที่ 3.2 วงจรบริดจ์สามเฟส, วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสแบบแยกโคด	24
รูปที่ 24	รูปที่ 3.3 ลักษณะของทรานซิสเตอร์ IGBT และตำแหน่งขา	24
รูปที่ 25	รูปที่ 3.4 วงจรภายในของทรานซิสเตอร์ IGBT และตำแหน่งขา	24
รูปที่ 26	รูปที่ 3.5 ลักษณะของวงจรขั้วนำเกตของ Semikron รุ่น Skyper32R	25
รูปที่ 27	รูปที่ 3.6 โครงสร้างภายในของวงจรขั้วนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R	26

สารบัญรูป (ต่อ)

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 28	รูปที่ 3.7 การต่อใช้งานวงจรขับนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R	26
รูปที่ 29	รูปที่ 3.8 ไอซีตรวจจับแรงดันแบบแยก โคลด LV25-P	27
รูปที่ 30	รูปที่ 3.9 หน้าที่ของแต่ละขาของไอซี LV-25P	27
รูปที่ 31	รูปที่ 3.10 วงจรใช้งานแบบพื้นฐานของไอซี LV25-P	28
รูปที่ 32	รูปที่ 3.11 ลักษณะของไอซีตรวจจับกระแสแบบแยก โคลด LTSR 15-NP ของ LEM	29
รูปที่ 33	รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่วัดด้านเข้ากับแรงดัน ด้านออก	30
รูปที่ 34	รูปที่ 3.13 การต่อใช้งานของไอซีตรวจจับกระแสแบบแยก โคลด LTSR 15-NP ของ LEM	31
รูปที่ 35	รูปที่ 3.14 สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตที่ใช้ไทรสเตอร์	32
รูปที่ 36	รูปที่ 3.15 สัญญาณจุดชนวนของไทรสเตอร์ที่ใช้ในสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต	32
รูปที่ 37	รูปที่ 3.16 การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ในงานวิจัยนี้	33
รูปที่ 38	รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบชดเชยแรงดันตกที่นำเสนอ	34
รูปที่ 39	รูปที่ 4.2 การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ โดยใช้แหล่งจ่ายสำรองมาจากแหล่ง จ่ายไฟสลับอีกแหล่งหนึ่ง	35
รูปที่ 40	รูปที่ 4.3 รูปคลื่นในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 108 องศาและ โหลด เป็นตัวต้านทาน	36
รูปที่ 41	รูปที่ 4.4 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 108 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน	36
รูปที่ 42	รูปที่ 4.5 รูปคลื่นในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 144 องศาและ โหลด เป็นตัวต้านทาน	37
รูปที่ 43	รูปที่ 4.6 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 144 องศา และ โหลดเป็นตัวต้านทาน	37
รูปที่ 44	รูปที่ 4.7 รูปคลื่นในขณะแรงดันตกชั่วขณะหายไป POW = 110 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน	38
รูปที่ 45	รูปที่ 4.8 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะแรงดันตกชั่วขณะหายไป POW = 110 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน	38

สารบัญญรูป (ต่อ)

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 46	รูปที่ 4.9 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 54 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ	39
รูปที่ 47	รูปที่ 4.10 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 54 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ	40
รูปที่ 48	รูปที่ 4.11 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 108 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ	40
รูปที่ 49	รูปที่ 4.12 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 108 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ	41
รูปที่ 50	รูปที่ 4.13 รูปคลื่นในขณะแรงดันตกชั่วขณะหายไปและโหลดเป็นตัวต้านทาน ขนานกับตัวเก็บประจุ	42
รูปที่ 51	รูปที่ 4.14 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะแรงดันตกชั่วขณะหายไปและ โหลด เป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ	42
รูปที่ 52	รูปที่ 4.15 การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่ง จ่ายสำรอง	43
รูปที่ 53	รูปที่ 4.16 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 315 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน	43
รูปที่ 54	รูปที่ 4.17 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 315 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทาน	44
รูปที่ 55	รูปที่ 4.18 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 345 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน	44
รูปที่ 56	รูปที่ 4.19 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 345 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทาน	45
รูปที่ 57	รูปที่ 4.19 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 70 องศาและ โหลด เป็นตัวต้านทาน	45

สารบัญตาราง

ลำดับตาราง	ชื่อตาราง	หน้า
ตารางที่ 1	ตารางที่ 3.1 การปรับเปลี่ยนย่านกระแสที่วัด	30

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาเรื่องพลังงานเป็นประเด็นใหญ่ที่ทุกคนควรตระหนัก เพราะทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันได้ และที่สำคัญคือพลังงานไฟฟ้าที่จำเป็นต่อการดำรงชีพของมนุษย์ก็มักจะได้มาจากการแปลงพลังงานที่ได้จากถ่านหิน, น้ำมัน, และแก๊ส ซึ่งพลังงานเหล่านี้คาดว่าจะหมดไปจากโลกนี้ในระยะเวลาอีกไม่เกิน 64 ปีสำหรับก๊าซธรรมชาติ และอีกเพียง 42 ปีเท่านั้นสำหรับน้ำมัน [1] ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์, พลังงานจากลม, พลังงานจากน้ำ, พลังงานจากน้ำทะเล, พลังงานจาก Fuel Cells เป็นต้น ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานสะอาด โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มักจะมีขนาดเล็ก (Small-Scale Generation) ซึ่งพลังงานเหล่านี้เมื่อแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วมักจะต่อเชื่อมเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าในลักษณะของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation System) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed generation) [2]

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีข้อดีมากมาย เช่นเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ, ลดการสูญเสียของสายส่งกำลัง, ลดต้นทุนการผลิต [3] แต่อย่างไรก็ตามระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัวก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาของแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ได้

แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) เป็นปัญหาหลักของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยร้อยละ 92 ของปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้นเกิดจากปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ [4] แรงดันตกชั่วขณะนี้ก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน โดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าสมัยใหม่ที่พบเห็นได้ทั่วไปตาม โรงงาน, อาคาร หรือบ้านที่อยู่อาศัย เช่น อุปกรณ์สื่อสาร, อุปกรณ์ควบคุม

อัตโนมัติ, อุปกรณ์ในภาคการผลิต, หรือคอมพิวเตอร์เป็นต้น โดยแรงดันตกชั่วขณะนี้จะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาด, ทำงานผิดปกติ, หรือแม้กระทั่งหยุดทำงาน ซึ่งล้วนแล้วแต่ก่อให้เกิดการเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในแง่เศรษฐศาสตร์เป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูง โดยการใช้วงจรกำเนิดแหล่งไฟฟ้าสำรองร่วมกับการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่มีความเร็วสูง โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดปัญหาอันเกิดมาจากแรงดันตกชั่วขณะ ทำให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพมากขึ้น

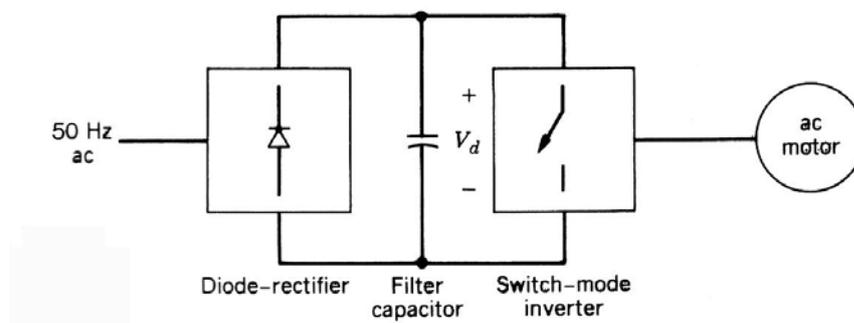
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้จะได้กล่าวถึงแนวความคิด, วงจร และอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการออกแบบเครื่องชดเชยแรงดันชั่วขณะความเร็วสูงที่น่าเสนอ

2.2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ (อินเวอร์เตอร์) แบบวิธีสวิตซ์ [5], [6]

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับ หรืออินเวอร์เตอร์ มีบทบาทต่องานอุตสาหกรรมและงานทั่วไปเป็นอย่างมาก ตัวอย่างงานที่มีการใช้อินเวอร์เตอร์อย่างแพร่หลายได้แก่ งานขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับและแหล่งจ่ายไฟไม่ขาดตอน (Uninterruptible Power Supplies : UPS) โดยที่แรงดันและความถี่ด้านออกสามารถควบคุมได้ ดังเช่นตัวอย่างที่กล่าวมา ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ ดังรูปที่ 2.1 แรงดันด้านออกจะต้องปรับได้ทั้งขนาดและความถี่ (Variable Voltage and Variable Frequency : VVVF) แรงดันไฟตรงด้านเข้าจะได้จากวงจรเรียงกระแสที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 ในกรณีที่แหล่งจ่ายด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จะเรียกอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งแรงดัน (Voltage source inverter : VSI) และในกรณีที่แหล่งจ่ายด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งกระแส (ที่มักได้จากการใช้ตัวเหนี่ยวนำค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งแรงดัน) จะเรียกอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งกระแส (Current source inverter : CSI) แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้งานที่จำกัดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายกระแส จึงจะขอกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันเพียงชนิดเดียว



รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ

อินเวอร์เตอร์แบบ VSI จำแนกออกได้เป็นสามแบบ

1. อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation inverters)

แรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์จะเป็นแรงดันที่คงที่และอินเวอร์เตอร์จะสามารถคุมขนาดและความถี่ของแรงดันด้านออกได้ ซึ่งมีหลายวิธีที่จะใช้ในการควบคุมแรงดันด้านออกให้เป็นรูปไซน์

2. อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นเหลี่ยม (Square wave inverters)

อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะมีแรงดันด้านเข้าที่ควบคุมขนาดได้เพื่อการปรับขนาดแรงดันไฟสลับด้านออก ดังนั้นอินเวอร์เตอร์แบบนี้จะสามารถคุมได้แต่ความถี่ของแรงดันด้านออกเท่านั้น โดยแรงดันด้านออกจะเป็นรูปคลื่นเหลี่ยม

3. อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ใช้วิธีหักล้างแรงดัน (Single phase inverters with voltage cancellation) ถ้าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับหนึ่งเฟส ก็เป็นไปได้ที่เราจะสามารถคุมทั้งขนาดและความถี่ของแรงดันด้านออก แม้ว่าแรงดันด้านเข้าเป็นแรงดันไฟตรงค่าคงตัวและไม่ได้ใช้วิธีมอดูเลตความกว้างพัลส์ก็ตาม

2.2.1 วิธีการสวิตช์แบบ PWM

- การเฉลี่ยเฉพาะที่

เมื่อพิจารณาถึงวงจรทอนระดับ แรงดันด้านออก v_o สามารถแปรได้ระหว่าง 0 ถึง V_s โดยการแปรค่า D ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนั้นถ้าเราให้ D เป็นฟังก์ชันของเวลา $d(t)$ และแปรค่าอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับคาบเวลาของการสวิตช์ ก็จะทำให้สามารถควบคุมแรงดันด้านออกให้เป็นไปตามฟังก์ชันของ $d(t)$ ซึ่งค่าเฉลี่ยจะเป็นฟังก์ชันของเวลาและมีค่าเท่ากับ $d(t)V_s$ ซึ่งเวลาในการเฉลี่ย v_o จะต้องนานเมื่อเทียบกับคาบเวลาการสวิตช์ T แต่จะต้องน้อยกว่าเมื่อเทียบกับคาบเวลาของ $d(t)$ การเฉลี่ยเช่นนี้เรียกว่าการเฉลี่ยเฉพาะที่ (Local Averaging) โดยใช้สัญลักษณ์ $\overline{v_o(t)}$ ส่วนสัญลักษณ์ $\langle v_o \rangle$ คือค่าเฉลี่ยจริงซึ่งเป็นค่าคงตัว หรือกล่าวได้ว่าค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ได้จากการกรองด้วยวงจรผ่านต่ำ (Low pass filter) โดยกรองความถี่สูง ๆ ออกเหลือไว้แต่ความถี่ต่ำ ๆ ที่ต้องการ เช่น องค์ประกอบหลักมูล 50 Hz ส่วนค่าเฉลี่ยนั้นจะได้ออกจากการกรองทุกความถี่เหลือไว้แต่องค์ประกอบไฟตรง

- การสวิตช์แบบ PWM

ในกรณีวงจรทอนระดับ หากให้ $d(t)$ เป็นฟังก์ชันไซน์ก็จะได้แรงดันออกที่เป็นองค์ประกอบไฟตรงบวกกับไซน์ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ถ้า} \quad d(t) &= 0.5 + m_a \sin \omega_a t \\ v_o(t) &= 0.5V_s + m_a V_s \sin \omega_a t \quad ; m_a \leq 0.5 \end{aligned} \quad (2.1)$$

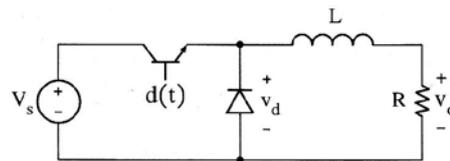
$$\text{โดยมีเงื่อนไขดังนี้} \quad T \ll \frac{L}{R} \ll \frac{2\pi}{\omega_a} \quad (2.2)$$

โดยที่วงจรนี้ทำงานที่ความถี่การสวิตช์ f_s สัญญาณ PWM ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความสูง v_T ที่มีความถี่ f_s (อาจจะเรียกว่าความถี่พาห้ก็ได้; Carrier frequency) กับสัญญาณควบคุม v_C ที่มีความถี่ f_1 โดยที่ความถี่ f_1 จะเท่ากับความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกที่ต้องการ (อาจจะเรียก f_1 ว่าความถี่มอดูเลตก็ได้)

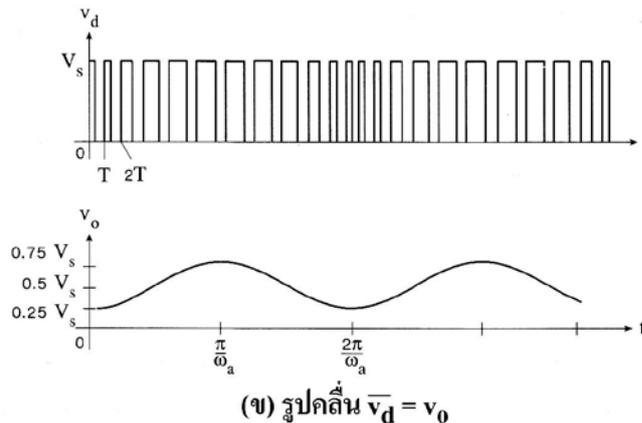
โดย $ma =$ ค่ายอดของ v_C / ค่ายอดของ $v_T =$ อัตราการมอดูเลตแอมพลิจูด

โดยทั่วไปค่ายอดของ v_T จะคงตัว

อัตราการมอดูเลตความถี่ $m_f = \frac{f_s}{f_1}$ และ $\omega_a =$ ความถี่การมอดูเลต



(ก) วงจร



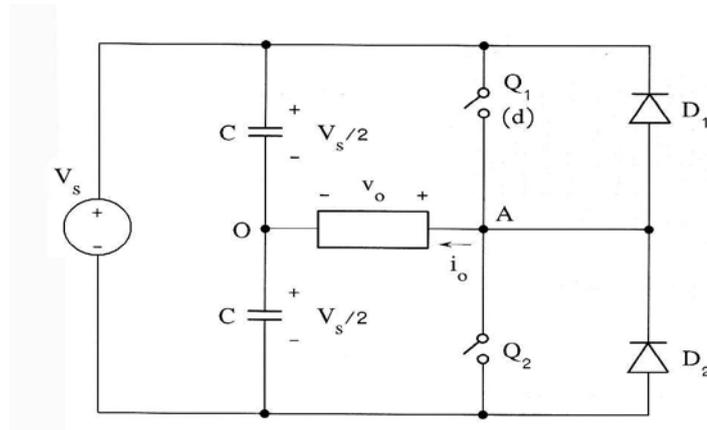
(ข) รูปคลื่น $\bar{v}_d = v_o$

รูปที่ 2.2 การใช้เทคนิค PWM กับวงจรทอนระดับ

แรงดัน v_d เป็นพัลส์ความถี่ $\frac{1}{T}$ แต่มีความกว้างพัลส์ที่ไม่คงตัว รูปคลื่นที่วัฏจักรงานเป็นฟังก์ชันของเวลาเรียกว่ารูปคลื่น PWM ค่าเฉลี่ยเฉพาะของรูปคลื่น PWM หรือ \bar{v}_d จะเป็นฟังก์ชันของเวลา ถ้าทำการกรอง v_d ด้วยวงจรกรองผ่านตัว L และ R โดยพารามิเตอร์เป็นไปตามเงื่อนไขที่ (2.2) องค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์จะถูกกรองออกไป แต่องค์ประกอบที่ความถี่ ω_a จะไม่ถูกลดทอน รูปที่ 2.2 (ข) v_o คือค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM เนื่องจาก $d(t)$ เป็นฟังก์ชันไซน์ ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM จึงเป็นรูปไซน์ และ $d(t)$ อาจจะเป็นฟังก์ชันของเวลาใด ๆ ก็ได้แต่ต้องอยู่ในเงื่อนไข (2.2)

2.2.2 อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์หนึ่งเฟสที่ทำงานแบบ PWM

แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์จะแปรค่าได้ระหว่าง $-\frac{V_s}{2}$ ถึง $\frac{V_s}{2}$ โดยวัฏจักรงานแปรค่าระหว่าง 0 ถึง 1



รูปที่ 2.3 อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์หนึ่งเฟส

โดยใช้หลักคูลอมบ์-วินาที $(V_s - \langle v_o \rangle)DT = (V_s + \langle v_o \rangle)D'T$ ดังนั้นอัตราการแปลงผันเท่ากับ

$$M = \frac{\langle v_o \rangle}{V_s/2} = 2D - 1 \quad (2.3)$$

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ จะมีแหล่งจ่ายสองแหล่งที่มีแรงดันเท่ากัน ซึ่งจะได้จากการใช้ตัวเก็บประจุค่าสูงที่มีค่าเท่ากันสองตัวต่ออนุกรมกัน โดยค่าของตัวเก็บประจุนี้ต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าคงที่เมื่อสวิตช์ต้องจรและจ่ายพลังงานให้ยังไหลตลอด ตัวเก็บประจุทั้งสองยังทำหน้าที่เหมือนกับเป็นตัวเก็บประจุที่ปิดกั้นแรงดันไฟตรง ซึ่งทำให้ไม่เกิดปัญหาการอิมพัลส์ของหม้อแปลง (ในกรณีที่ใช้หม้อแปลงในการแยกโคด) นอกจากนี้ยังตัดปัญหาเรื่องตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงอีกด้วย

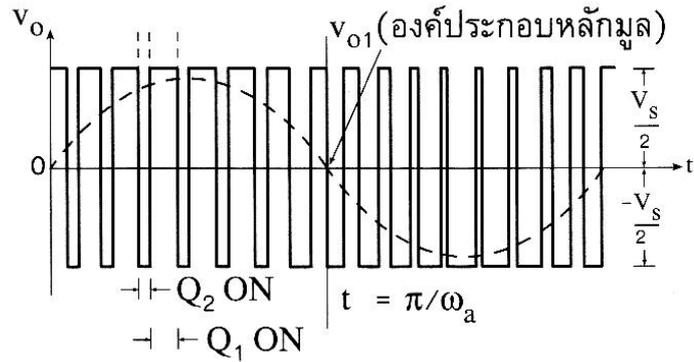
จากสมการ (2.3) หากต้องการแรงดัน v_o เป็นรูปไซน์ ดังนั้น

$$d(t) = 0.5 + m_a \sin \omega_a t \quad \text{โดย } m_a \leq 0.5 \quad (2.4)$$

แทนค่า $d(t)$ จาก (2.4) ลงใน (2.3) จะได้ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของ v_o ดังนี้

$$\bar{v}_o = \frac{V_s}{2} 2m_a \sin \omega_a t = V_s m_a \sin \omega_a t \quad (2.5)$$

การสวิตช์แรงดันของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ เรียกว่า การสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว (Bipolar Voltage Switching) เนื่องจาก v_o มีแรงดันทั้งค่าบวกและลบนั่นเอง

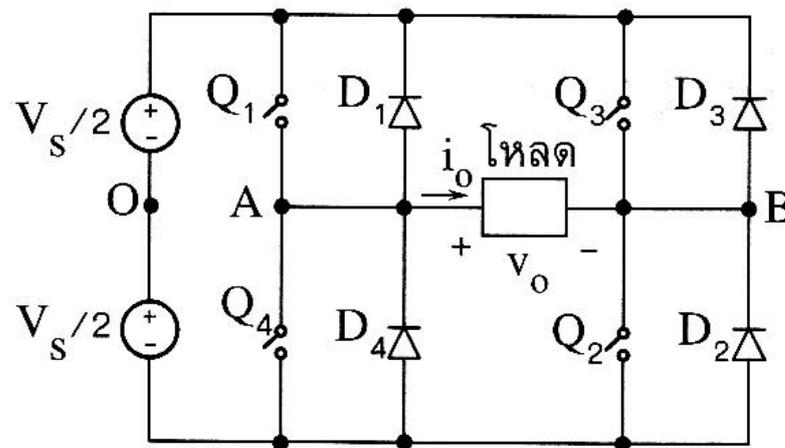


รูปที่ 2.4 แรงดันด้านออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์หนึ่งเฟส

2.2.3 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟสที่ทำงานแบบ PWM

อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์มีอิสระในการทำงานมากกว่าอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์เนื่องจากทำงานได้ทั้งการสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว และแบบขั้วเดียวซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟสทำงานแบบ PWM ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว



รูปที่ 2.5 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟส

การสวิตช์แรงดันแบบสองขั้วทำได้โดยการสั่งให้สวิตช์คู่ทแยงมุม (Q_1 กับ Q_2 หรือ Q_3 กับ Q_4) ตัดต่อในเวลาเดียวกัน เพื่อทำให้เกิดแรงดันที่เป็นค่าบวกกับค่าลบโดยที่คู่ Q_1 กับ Q_2 หรือ Q_3 กับ Q_4 จะต้องไม่ต่อวงจรพร้อมกัน ดังนั้นหาก Q_1 กับ Q_2 ทำงานที่วิญจักรงาน D , Q_3 กับ Q_4 ก็ จะทำงานที่ $(1-D)$ หรือ D'

$$M = \frac{\langle v_o \rangle}{V_s} = 2D - 1 \quad (2.6)$$

ถ้าหากให้ $d(t) = 0.5 + m_a \sin \omega_a t$; $ma \leq 0.5$ (2.7)

และ $f_a \ll f_c \ll f$ (2.8)

ดังนั้น $\overline{v_o} = 2V_s m_a \sin \omega_a t$ (2.9)

แรงดันด้านออกที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์หนึ่งเฟส ต่างที่ขนาดของแรงดันที่จะแปรค่าอยู่ระหว่าง $-V_s$ ถึง V_s

2.2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟสทำงานแบบ PWM ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว

การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียวจะเป็นการสวิตช์ของ Q_1, Q_2 และ Q_3, Q_4 ที่เป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้ได้แรงดันด้านออกที่เป็นค่าบวกกับค่าศูนย์ครึ่งคาบ และค่าลบกับค่าศูนย์อีกครึ่งคาบ

แรงดัน v_{AO} จะเป็นแรงดันที่ถูกควบคุมโดย Q_1 มีค่าเท่ากับ $\frac{\langle v_{AO} \rangle}{V_s} = D_1 - 0.5$ (2.10)

แรงดัน v_{BO} จะเป็นแรงดันที่ถูกควบคุมโดย Q_3 มีค่าเท่ากับ $\frac{\langle v_{BO} \rangle}{V_s} = D_3 - 0.5$ (2.11)

โดยที่ D_1 คือวัฏจักรงานของ Q_1 และ D_3 คือวัฏจักรงานของ Q_3

หากให้ $d_1(t) = 0.5 + m_a \sin \omega_a t$ (2.12)

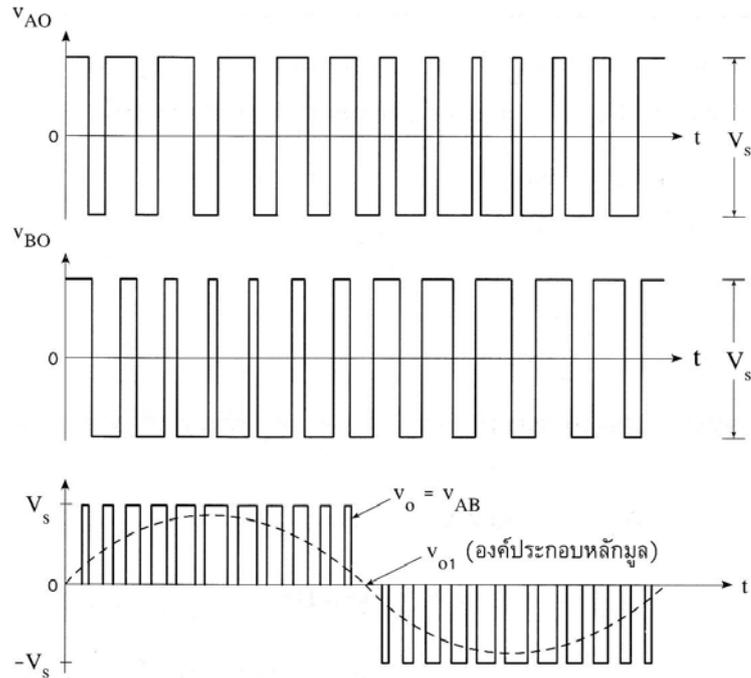
$d_3(t) = 0.5 - m_a \sin \omega_a t$ (2.13)

ดังนั้น $\frac{v_{AO}}{V_s} = m_a \sin \omega_a t$ (2.14)

$\frac{v_{BO}}{V_s} = -m_a \sin \omega_a t$ (2.15)

และ $\frac{v_{AB}}{V_s} = \frac{v_{AO}}{V_s} - \frac{v_{BO}}{V_s} = \frac{v_o}{V_s} = 2m_a \sin \omega_a t$ (2.16)

รูปคลื่นที่ได้จากการสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว แสดงดังรูป 2.6 ข้อดีที่ได้จากการสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียวคือความถี่การสวิตช์ที่ปรากฏยังโหลดจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า



รูปที่ 2.6 แรงดันด้านออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หนึ่งเฟสเมื่อสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว

2.2.4 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์สามเฟส

งานส่วนใหญ่ เช่น แหล่งจ่ายกำลังแบบไม่หยุดชะงัก หรือการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับจะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสในการจ่ายกำลังให้กับโหลดสามเฟส อินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยสวิตช์ตัว 3 กิ่ง ดังรูปที่ 2.7 (ก)

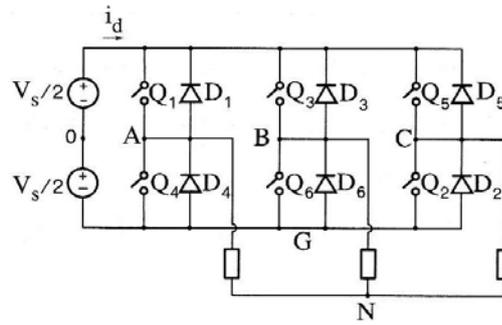
การกำเนิดไฟสลับ 3 เฟสทำได้โดยสั่งให้ Q_1 กับ Q_4 , Q_3 กับ Q_6 และ Q_5 กับ Q_2 ทำงานแบบคู่ประกอบและมีสัญญาณมอดูเลตที่ต่างเฟส 120°

$$d_1 = 0.5 + m_a \sin \omega_a t \quad d_4 = 0.5 - m_a \sin \omega_a t \quad (2.17)$$

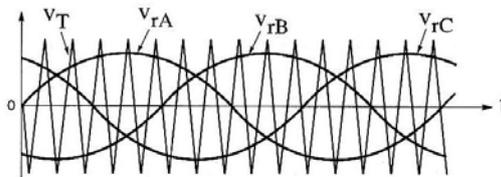
$$d_3 = 0.5 + m_a \sin(\omega_a t - 120^\circ) \quad d_6 = 0.5 - m_a \sin(\omega_a t - 120^\circ) \quad (2.18)$$

$$d_5 = 0.5 + m_a \sin(\omega_a t + 120^\circ) \quad d_2 = 0.5 - m_a \sin(\omega_a t + 120^\circ) \quad (2.19)$$

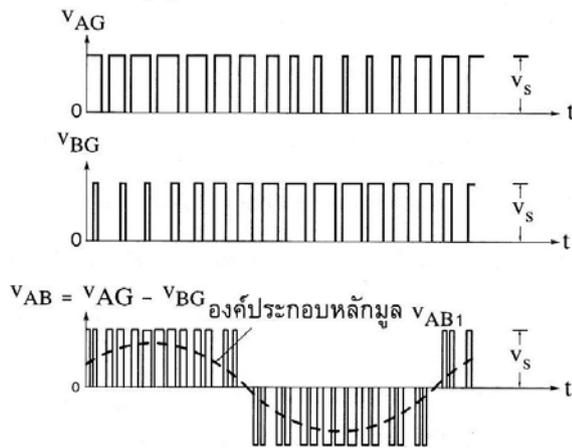
และแรงดันที่ได้จากการสวิตช์แสดงดังรูป 2.7 (ค)



(ก) วงจร



(ข) ไซน์ตัดสามเหลี่ยม



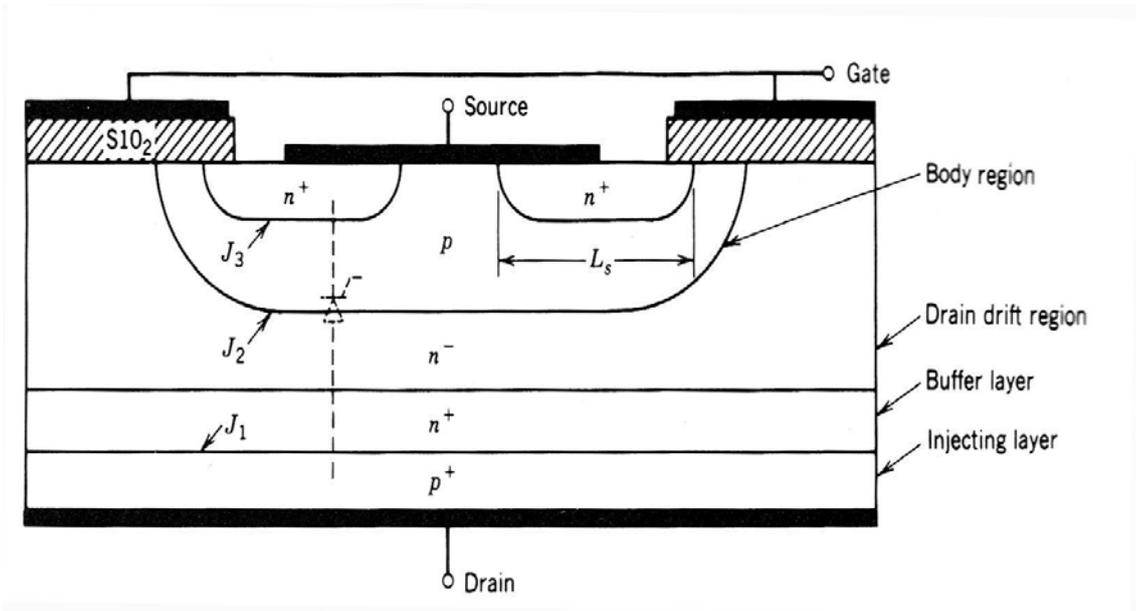
(ค) แรงดันด้านออก

รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์สามเฟส

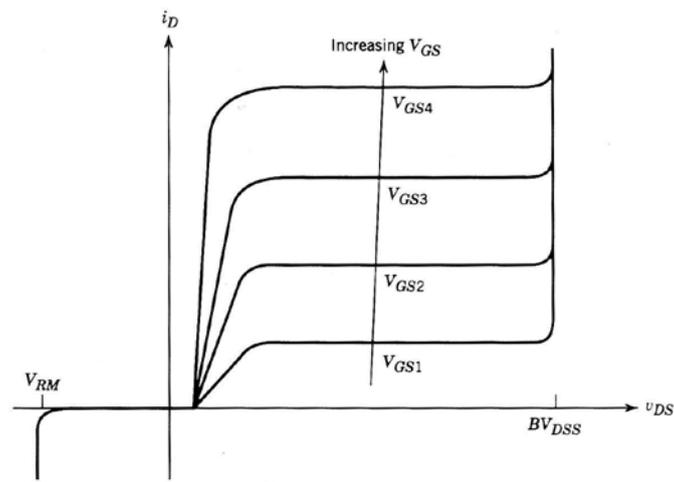
2.3 ทรานซิสเตอร์ IGBT [6]

ทั้ง BJT กำลังและมอสเฟตกำลัง ต่างก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน BJT กำลังมีพิกัดแรงดันและกระแสที่สูงกว่า, กำลังสูญเสียในสถานะนำกระแสต่ำกว่า ในขณะที่มอสเฟตกำลังใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะเร็วกว่า, ขับนำสวิตช์ด้วยแรงดัน และไม่มีปัญหาการพังทลายแบบที่สอง

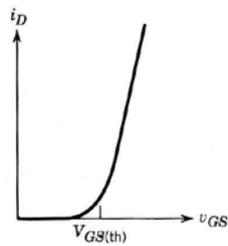
IGBT เป็นสิ่งประดิษฐ์ ที่รวมข้อดีของอุปกรณ์ทั้งสองไว้ กล่าวคือมีความต้านทานด้านเข้าสูง, เปลี่ยนสถานะได้รวดเร็ว ในขณะที่มีกำลังสูญเสียในสถานะนำกระแสต่ำ, ไม่มีปัญหาการพังทลายแบบที่สอง และมีพิกัดกำลังสูง



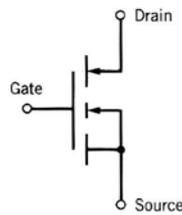
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ IGBT



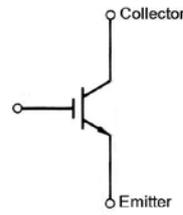
(ก) คุณลักษณะ V-i ของ IGBT



(ข) คุณลักษณะการโอนย้าย



(ค) สัญลักษณ์ของ IGBT

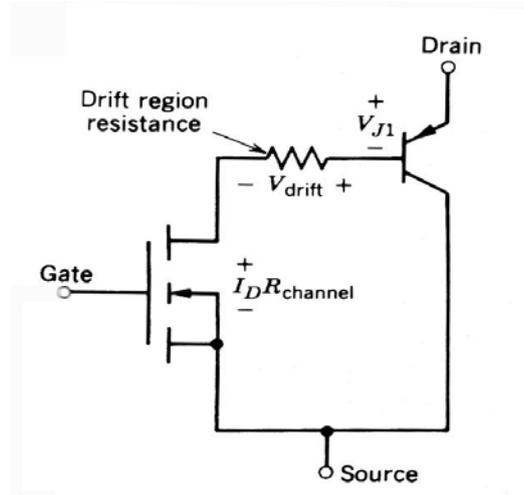


(ง) สัญลักษณ์ของ IGBT อีกแบบ

รูปที่ 2.9 คุณลักษณะและสัญลักษณ์ของ IGBT

โครงสร้างพื้นฐาน

รูปที่ 2.8 แสดงถึงภาพตัดขวางของ IGBT โดยที่ IGBT ถูกสร้างจากสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้น PNPN จึงมีโครงสร้างด้านออกคล้าย ๆ ไทริสเตอร์ที่สามารถนำกระแสค้างได้ในเงื่อนไขที่ระบุ $(\alpha_{NPN} + \alpha_{PNP}) > 1$ โดย $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$ ชั้นสารกึ่งตัวนำ n^+ และ n^-eqi จะทำให้อัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ NPN ลดลง เพื่อหลีกเลี่ยงการนำกระแสค้าง



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของIGBT

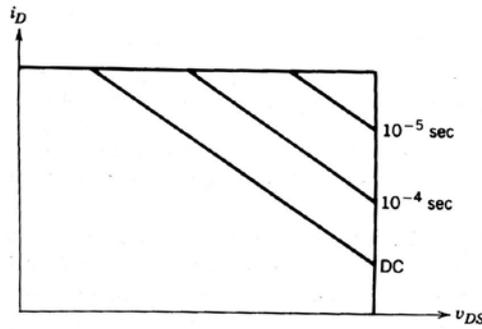
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรสมมูลของ IGBT จากวงจรสมมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า IGBT เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันเหมือนมอสเฟต ในขณะที่มีกำลังสูญเสียขณะนำกระแสน้อยกว่ามอสเฟต ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะจะรวดเร็วกว่า BJT กำลัง แต่อย่างไรก็ตามก็ยังช้ากว่ามอสเฟต เนื่องจากมีวงจรด้านออกเป็นทรานซิสเตอร์

IGBT นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากพิกัดกำลังมีค่าสูงและความเร็วในการเปลี่ยนสถานะเพียงพอต่อการใช้งานส่วนใหญ่ ($\approx 20kHz$) เช่น อินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นต้น

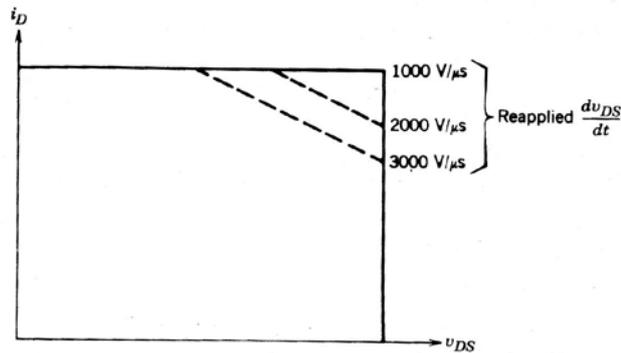
พื้นที่ทำงานปลอดภัย

กระแสเดรนของ I_{GBT} , I_D จะต้องถูกจำกัดไม่เกินค่าค่าหนึ่ง ไม่เช่นนั้น ไทริสเตอร์ในวงจรสมมูลของ IGBT อาจจะนำกระแส เมื่อ IGBT ตัดต่อวงจร และจะเกิดการนำกระแสติดค้าง (Latch Up) ทำให้เกิดหมดสภาพการควบคุม แต่อย่างไรก็ตาม IGBT ได้พัฒนาทำให้ R_{BE} มีค่าต่ำ ๆ ทำให้แก้ปัญหานี้ไปได้

รูปที่ 2.11 แสดงพื้นที่ทำงานปลอดภัย โดยพื้นที่ทำงานเมื่อไบแอสกลับ (FBSOA) มีลักษณะคล้ายกับมอสเฟต แต่พื้นที่ทำงานเมื่อไบแอสกลับ (RBSOA) จะมีขีดจำกัดเพิ่มเติม คืออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน dV_{DS} / dt จะต้องถูกจำกัดค่าเพื่อป้องกันการนำกระแสติดค้าง แต่อย่างไรก็ตามขีดจำกัดของ dV_{DS} / dt เป็นค่าที่สูงมากจนแทบจะไม่มีปัญหาใด ๆ



(ก) FBSOA ของ IGBT

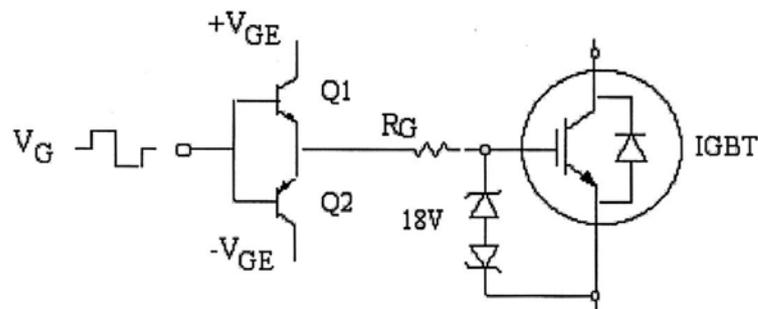


(ข) RBSOA ของ IGBT

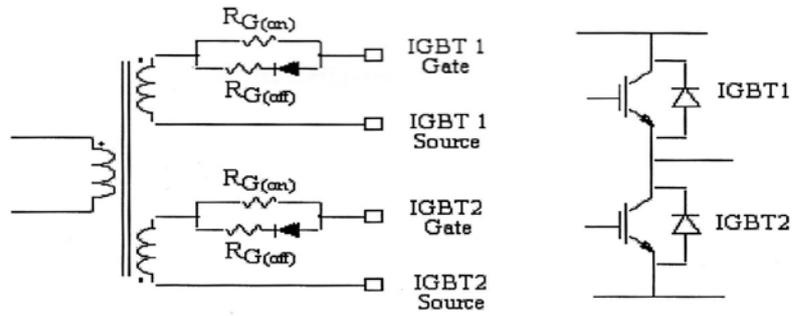
รูปที่ 2.11 SOA ของ IGBT

2.3.1 การขั้มนำทรานซิสเตอร์ไอจีบีทีกำลัง

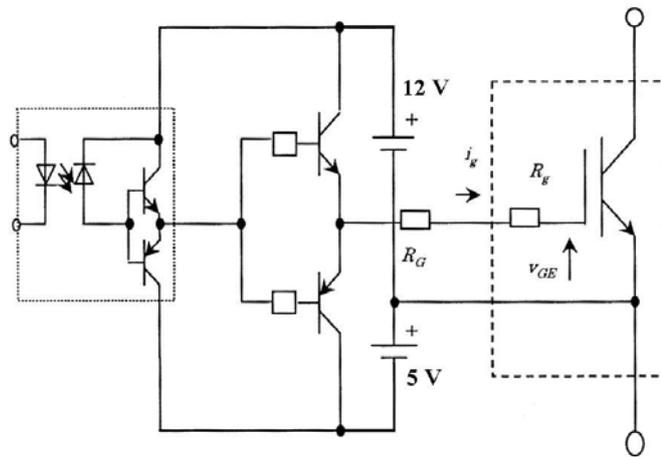
ไอจีบีทีที่มีข้อดีในเรื่องการขั้มนำเกตเช่นเดียวกับมอสเฟต เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ประเภทควบคุมด้วยแรงดัน แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยไอจีบีทีที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกับทรานซิสเตอร์ บีเจทีรวมกับมอสเฟต ดังนั้นวงจรขั้มนำจะยุ่งยากกว่าของมอสเฟตเล็กน้อย โดยเฉพาะในช่วง Turn-off โดยวงจรขั้มนำเกตไอจีบีที แบบอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.12 ในงานที่ต้องการการแยกโคตระหว่างวงจรควบคุมกับไอจีบีที ก็อาจจะใช้หม้อแปลงในการแยกโคตได้ดังรูปที่ 2.13 หรืออาจจะใช้การแยกโคตแบบเชื่อม โยงผ่านแสงตามรูปที่ 2.14 ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้แหล่งจ่ายไฟทั้งบวกและลบ ก็สามารถใช้วงจรดังรูปที่ 2.15



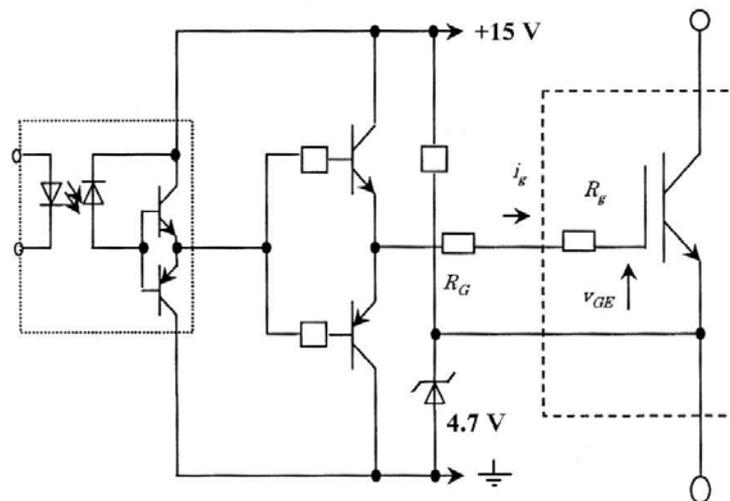
รูปที่ 2.12 วงจรขั้มนำไอจีบีทีแบบอย่าง



รูปที่ 2.13 วงจรขับนำไอจีบีทีแบบแยกโคตโดยใช้หม้อแปลง



รูปที่ 2.14 วงจรขับนำไอจีบีทีแบบแยกโคตเชื่อม โยงผ่านแสง



รูปที่ 2.15 วงจรขับนำไอจีบีทีแบบแยกโคตเชื่อม โยงผ่านแสงที่ใช้แหล่งจ่ายไฟเดี่ยว

2.4 สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตที่ใช้ทรานซิสเตอร์ [7]

โครงสร้างของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนโหลดสามเฟส ระหว่าง 2 แหล่งจ่าย เมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ แสดงได้ดังรูปที่ 1 รายละเอียดประกอบด้วย ชุดสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต T1 (Main static transfer switch: MSTS), แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก (Preferred supply), ชุดสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต T2 (Auxiliary static transfer switch: ASTS), แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง (Alternate supply) และภาควงจรควบคุม ในภาวะปกติ MSTS T1 จะต่อวงจรเพื่อให้โหลดได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก ในขณะที่ ASTS T2 จะต้องตัดวงจร เมื่อภาควงจรควบคุมตรวจสอบพบที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นในระบบไฟฟ้าถึงระดับค่าที่ตั้งไว้ตัวควบคุมจะทำหน้าที่สั่งให้ MSTS T1 ตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักออกจากวงจรทันที หลังจากนั้นจึงจะสั่งให้ ASTS T2 ต่อวงจรเพื่อถ่ายโอนโหลดให้ได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง แทนทันทีเพื่อไม่ให้โหลดได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะ โดยที่บางกรณี สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตจะสามารถถ่ายโอนโหลดได้อย่างทันทีทันใด แต่มีบางกรณีที่ไม่สามารถกระทำได้เพราะจะต้องรอเวลาเพื่อให้ MSTS T1 หยุดนำกระแสเสียก่อน ผลที่ตามมาก็คือจะเกิดเวลาประวิงค้างที่จะได้วิเคราะห์ถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.4.1 การวิเคราะห์กระบวนการหยุดนำกระแสของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต

การทำงานของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตนั้นสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็น 2 โหมดการทำงาน คือ 1) โหมดปกติ 2) โหมดถ่ายโอน

1) การทำงานในโหมดปกติ

การทำงานในโหมดนี้จะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ 1) ช่วงภาวะแรงดันปกติ และ 2) ช่วงภาวะแรงดันตก โดยที่ช่วงภาวะแรงดันปกตินั้น MSTS T1 จะต่อวงจรตามปกติเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักไปยังโหลด ในขณะที่ช่วงภาวะแรงดันตกนั้น ASTS T2 จะทำหน้าที่เป็นตัวต่อวงจรเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองไปยังโหลดแทน

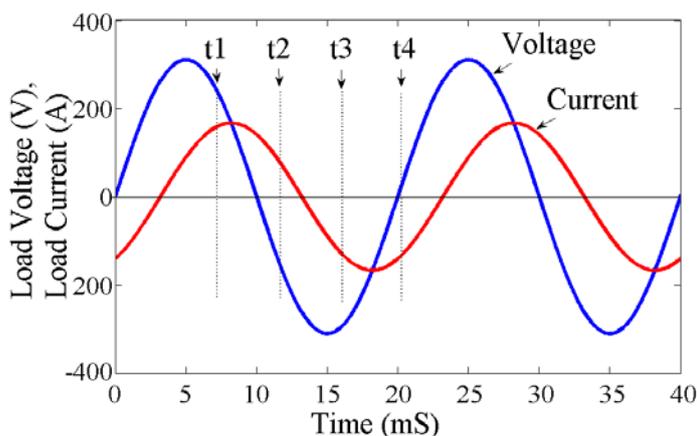
2) การทำงานในโหมดถ่ายโอน

การทำงานในโหมดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกัน คือ 1) ช่วงที่ถ่ายโอนโหลดไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง ในกรณีที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (ช่วงนี้ MSTS T1 จะต้องหยุดการทำงาน และ ASTS T2 ถึงจะเริ่มต้นการทำงาน) ในทำนองเดียวกัน 2) ช่วงเวลาที่ถ่ายโอนโหลดกลับมายังแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก ในกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักกลับมามีค่าเป็นปกติแล้ว (ช่วงนี้ ASTS T2 จะต้องหยุดการทำงาน และ MSTS T1 ถึงจะเริ่มการทำงานได้)

การทำงานของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตในช่วงเวลาของการถ่ายโอนนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือการควบคุมให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส สาเหตุเพราะทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่สามารถสั่งให้หยุดนำกระแสได้ทันทีขาด โดยที่โครงสร้างของ MSTS และ ASTS ตามรูปที่ 1 สวิตช์ทรานซิสเตอร์จะต้อง

หยุดนำกระแสเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวสวิตช์ มีค่าตกสู่ศูนย์โดยธรรมชาติ (Natural commutation) ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้สวิตช์ไทรสเตอร์ตัวที่กำลังนำกระแสอยู่นั้นหยุดนำกระแสด้วยการหยุดสัญญาณขั้วนำเกตและเมื่อกระแสลดลงเป็นศูนย์ ไทรสเตอร์จะหยุดกระแสได้เองโดยธรรมชาติ แล้วจึงจะสามารถจุดชนวนไทรสเตอร์ตัวต่อไปให้นำกระแสได้ ซึ่งเรียกวธีการถ่ายโอนที่ใช้วิธีหยุดนำกระแสแบบนี้ว่าการถ่ายโอนกระแสศูนย์ (Zero current transition) หรือ ตัดก่อนต่อ (Break before make)

สำหรับกรณีที่กระแสไหลผ่านตัวสวิตช์ไทรสเตอร์ยังไม่ตกสู่ศูนย์ จะต้องหยุดนำกระแสด้วยวิธีบังคับ ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้การหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์เป็นไปด้วยความรวดเร็วโดยการบังคับให้กระแสของไทรสเตอร์ตกสู่ศูนย์ด้วยค่าแรงดันไปแอสกลับ โดยการจุดชนวนให้ไทรสเตอร์ตัวอื่นนำกระแส วิธีการถ่ายโอนที่ใช้วิธีหยุดนำกระแสแบบนี้จะเรียกว่าการถ่ายโอนแบบบังคับ (Forced transition) หรือต่อก่อนตัด (Make before break) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติโหลดส่วนใหญ่จะเป็นอินดักทีฟ เช่น โหลดมอเตอร์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังจะทำให้ทิศทางของกระแสไหลกลับชั่วขณะแรงดันโหลดไม่ได้เหมือนกันตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ณ เวลาใดๆ ของคาบไฟสลับ สวิตช์ถ่ายโอนจะต้องทำงานได้ทั้งแบบวิธีธรรมชาติและ วิธีบังคับหยุด โดยสามารถการแบ่งวิเคราะห์ให้ออกเป็น 4 กรณี ดังแสดงได้จากรูปที่ 2.16 มีรายละเอียดต่อไปนี้



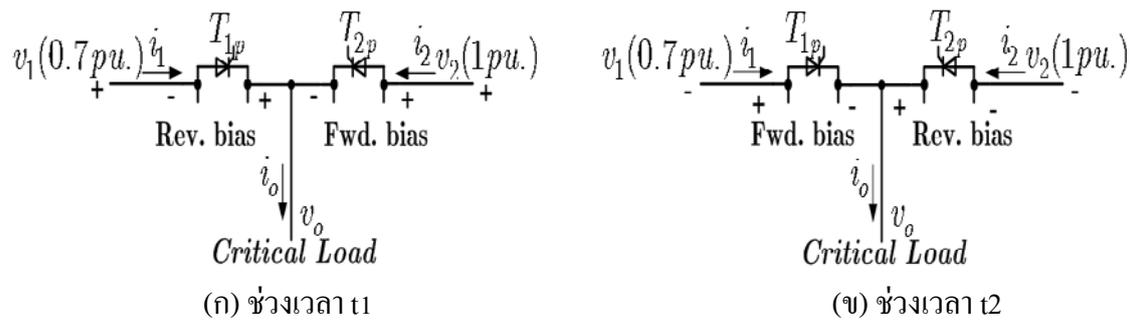
รูปที่ 2.16 คลื่นแรงดันและคลื่นกระแส กรณีโหลดเชิงเส้น (อินดักทีฟโหลด)

พิจารณาจากคลื่นแรงดันและคลื่นกระแส ในกรณีโหลดเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแบ่งการพิจารณาได้เป็น 4 ช่วงเวลา กล่าวคือ

ก. กรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะช่วงจุด t1

ช่วงนี้ชั่วขณะของแรงดันและทิศทางของกระแสเป็นบวกทั้งคู่ โดยเขียนเป็นวงจรสมมูลการทำงานของสวิตช์ไทรสเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.17 (ก) ลำดับแรกเมื่อทำการหยุดป้อนสัญญาณจุดชนวนสวิตช์ T1p ที่กำลังนำกระแสอยู่ แต่เนื่องจากค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักมีค่าต่ำกว่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง (สาเหตุเพราะเกิดแรงดันตก) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 (ก) แรงดันตกชั่วขณะมีค่า 0.7 pu. ซึ่ง

ภาคควบคุมจะทำการจุดชนวนสวิตช์ T_{2p} ซึ่งขณะนี้อยู่ในภาวะไบแอสไปหน้า โดยจะเห็นได้ว่าสวิตช์ T_{2p} สามารถนำกระแสได้ทันที ค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองจะไปบังคับให้สวิตช์ T_{1p} หยุดนำกระแสด้วยแรงดันไบแอสกลับ กล่าวคือเกิดการสับเปลี่ยนกระแสจากสวิตช์ T_{1p} ไปยังสวิตช์ T_{2p} ซึ่งเรียกการทำงานช่วงนี้ว่าการทำงาน โหมดถ่ายโอน เมื่อกระแสตกสู่ศูนย์แล้วจึงจะมีการจุดชนวนสวิตช์ T_{2n} ต่อไป



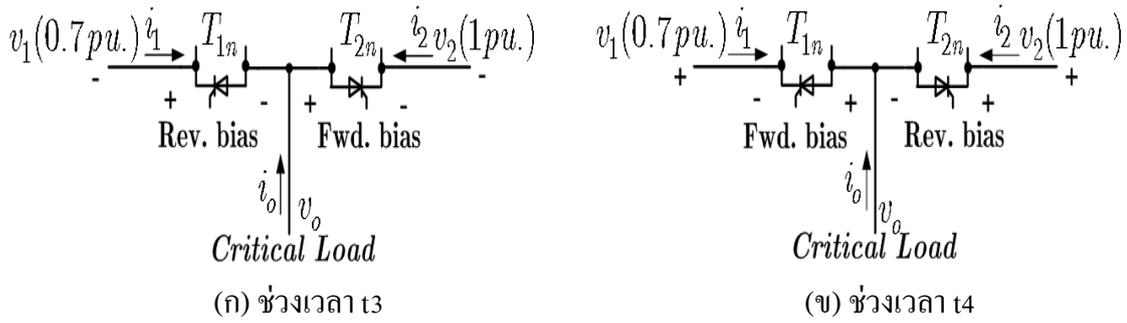
รูปที่ 2.17 สวิตซ์ไทรสเตอร์ถ่ายโอน โหลด ณ ช่วงจุด t_1 และช่วงจุด t_2

ข. กรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะช่วงจุด t_2

จุดการทำงานของสวิตซ์ถ่ายโอน ณ ช่วงจุด t_2 นี้ ขั้วของแรงดันจะมีค่าเป็นลบแต่ทิศทางการไหลของกระแสยังคงมีค่าเป็นบวก ในกรณีนี้สวิตซ์ T_{1p} จะยังนำกระแสอยู่ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 (ข) แต่เนื่องจากแรงดันมีค่าเป็นลบทำให้ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวสวิตซ์ T_{2p} เป็นลักษณะไบแอสกลับ ณ เงื่อนไขของการทำงานนี้จึงไม่สามารถจุดชนวนสวิตซ์ T_{2p} ให้นำกระแสได้ ดังนั้นภาคควบคุมจะต้องหยุดจ่ายสัญญาณจุดชนวน สวิตซ์ T_{1p} ก่อน และรอจนกระทั่งคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวสวิตซ์ T_{1p} ตกสู่ศูนย์เองโดยวิธีธรรมชาติ และเมื่อกระแสนี้ตกสู่ศูนย์แล้ว จึงจะสามารถส่งจ่ายสัญญาณจุดชนวนให้กับสวิตซ์ T_{2n} เพื่อถ่ายโอน โหลดเข้าสู่โหมดการทำงานปกติ จะเห็นได้ว่าการรอให้กระแสตกสู่ศูนย์จะทำให้เกิดเวลาประวิงเกิดขึ้น

ค. กรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะช่วงจุด t_3

ในทำนองเดียวการทำงานของช่วงจุด t_3 จะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกันกับการทำงานของช่วงจุด t_1 เพียงแต่จะแตกต่างกันในส่วนองขั้วของแรงดันและทิศทางการไหลของกระแส ซึ่งจะมีค่าเป็นลบทั้งคู่ดังแสดงได้ตามรูปที่ 2.18 (ก) ลำดับขั้นตอนการทำงาน กล่าวคือหยุดสัญญาณจุดชนวน T_{1n} และจุดชนวน T_{2n} ทันที ซึ่งจะเกิดการสับเปลี่ยนกระแสจาก T_{1n} ไปยัง T_{2n} (การทำงาน โหมดถ่ายโอน) เมื่อกระแสตกสู่ศูนย์แล้วจึงจะมีการจุดชนวน T_{2p} ต่อไปตามปกติ



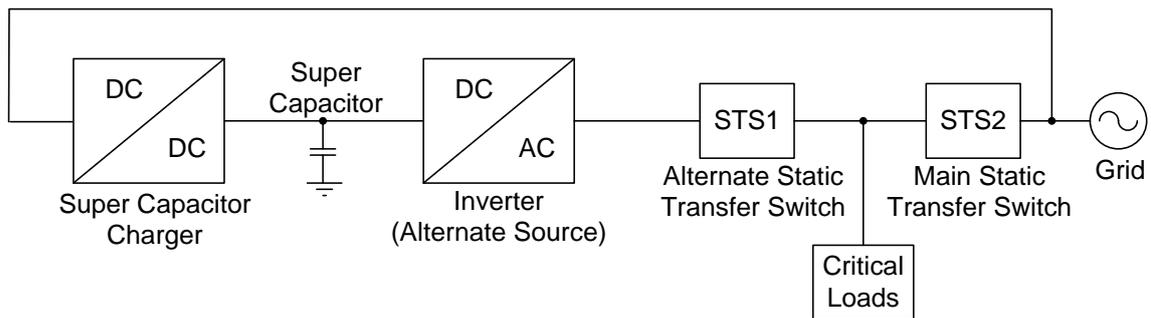
รูปที่ 2.18 สวิตซ์ไทรสเตอร์ถ่ายโอนโหลด ณ ช่วงจุด t3 และช่วงจุด t4

ง. กรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะช่วงจุด t4

ในช่วงการทำงานสุดท้าย ณ ช่วงจุด t4 ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงาน ณ ช่วงจุด t2 เช่นเดียวกัน แต่แรงดันมีชั่วเป็นบวกส่วนกระแส มีทิศทางเป็นลบดังรูปที่ 2.18 (ข) ดังนั้นจะต้องหยุดสัญญาณจุดชนวนสวิตซ์ T1n และรอให้กระแสตกสู่ศูนย์โดยธรรมชาติ (การทำงานโหมดถ่ายโอน) และเมื่อกระแสตกสู่ศูนย์จึงสั่งให้สวิตซ์ T2p นำกระแสต่อไปตามปกติ (การทำงานโหมดปกติ)

อย่างไรก็ตาม สำหรับโหลดที่เป็น โหลดเชิงเส้นที่เป็นตัวต้านทานหรือโหลดไม่เชิงเส้น (เช่น โหลดที่ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสที่มีวงจรกรองแรงดันเป็นตัวประจุ) จะมีชั่วของแรงดันและทิศทางของกระแสตรงกันตลอดเวลาแล้วนั้น การทำงานจะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีช่วงจุด t1 กับช่วงจุด t3 เท่านั้น ซึ่งจะไม่เกิดปัญหาการประวิงเวลาจากการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์

2.5 เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงที่นำเสนอ



รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่นำเสนอ

รูปที่ 2.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมของของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จากบล็อกไดอะแกรมดังกล่าวจะเห็น

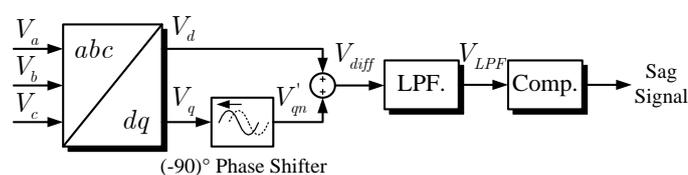
ได้ว่าระบบจะประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายรอง, ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Super Capacitor), วงจรควบคุมการประจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Super Capacitor Charging Controller), สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลัก (Main Static Transfer Switch), และสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรอง (Alternate Static Transfer Switch)

ในสภาวะปกติ STS1 หรือสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลักจะต่อวงจรเพื่อให้โหลดได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายหลัก (Grid) ในขณะที่ STS2 หรือสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรองจะต้องตัดวงจร

เมื่อตัวควบคุม (Controller) ตรวจสอบได้ว่าเกิดแรงดันตกชั่วขณะถึงระดับที่ตั้งไว้จะต้องสั่งให้สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลักตัดวงจรทันที แล้วจึงจะสั่งให้สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรองต่อวงจรเพื่อถ่ายโอนโหลดให้ได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายสำรอง (Alternate Source) แทนทันทีเพื่อไม่ให้โหลดได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะนี้

ในอดีตสวิตช์ถ่ายโอนจะเป็นลักษณะของสวิตช์ทางกลที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้การถ่ายโอนไม่สามารถเป็นไปด้วยความรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ทรินสเตอร์แทนการใช้สวิตช์ทางกลที่ควบคุมด้วยไฟฟ้าซึ่งจะมีความเร็วในการทำงานสูงมาก โดยทรินสเตอร์ที่ใช้ในวงจรคือ Silicon Controlled Rectifier หรือ SCR โดยมันเป็นอุปกรณ์ที่มีสามขา ได้แก่ แอโนด (Anode), แคโทด (Cathode) และ เกต (Gate) โดยการจ่ายแรงดันที่ขาแอโนดให้มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อกับขาแคโทดและจ่ายแรงดันบวกเข้าขาเกต ก็สามารถทำให้มันนำกระแสได้ แต่ทว่าไม่สามารถใช้ขาเกตนี้ในการสั่งให้ SCR หยุดนำกระแสได้ซึ่งนับว่าเป็นข้อเสียข้อหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมันมีข้อดีที่ทนทาน, ราคาไม่แพง, และมีพิคตกำลังสูงสุดในกลุ่มอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่ควบคุมที่เกตได้ จึงทำให้มันยังเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจอยู่จนถึงปัจจุบัน [7]

2.6 การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูง [8]



รูปที่ 2.20 การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูง

รูปที่ 2.20 แสดงการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงนี้สามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะภายใต้โครงข่ายไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่ในแรงดันกริด ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าคืนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

การตรวจจับวิธีนี้จะใช้พื้นฐานของการแปลงแกน D-Q (D-Q Transformation) โดยการแปลงปริมาณไฟฟ้าสามเฟสจากแรงดันกริดมาเป็นแรงดันไฟตรง V_d และ V_q

ในสถานะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะหนึ่งเฟส หรือแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมดุล (Unbalance) (ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นมากที่สุด) นั้น แรงดัน V_d และ V_q จะมีแรงดันความถี่สองเท่าของความถี่แรงดันกริด (2ω) ปนมาด้วย โดยทั้ง V_d และ V_q จะมีแรงดันความถี่สองเท่าของความถี่แรงดันกริดนี้ที่มีขนาดเท่ากันแต่ต่างเฟสกัน

ด้วยการเลื่อนเฟส V_q ออกไป -90 องศา ทำให้ได้ V'_q โดย

$$V'_q = -2\omega V_{qm} \sin(2\omega t) \quad (2.20)$$

และทำให้ค่านี้เป็นค่าปทัสสถาน (Normalization value) โดยสมการดังต่อไปนี้

$$V'_{qm} = \frac{V'_q}{2\omega} = -V_{qm} \sin(2\omega t) \quad (2.21)$$

ดังนั้นค่า V'_{qm} และ V_d จะมีขนาดเท่ากันแต่จะต่างกันกัน 180 องศา ดังนั้นเมื่อนำแรงดันทั้งสองมาบวกกันจะทำให้แรงดันความถี่สองเท่าของความถี่แรงดันกริดจะหายไปตามสมการ

$$V_{diff} = V_d + V'_{qm} \quad (2.22)$$

สุดท้าย V_{diff} จะถูกกรองด้วยวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low pass filter) เพื่อกรองแรงดันองค์ประกอบความถี่สูงออกไป (แรงดันความถี่สูงนี้เกิดจากการทำงานของ Differentiator แบบ Discrete และมาจากการขยายแรงดันฮาร์มอนิกที่มาจากแหล่งจ่ายไฟสลับ) และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะต่อไป

2.7 แรงดันตกชั่วขณะกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า [9]

แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sags) เป็นสิ่งที่เราประสบกันได้ประจำโดยเฉพาะต่างจังหวัดในช่วงฝนตกหรือมีพายุลมแรง โดยสิ่งที่สังเกตได้ก็คือหลอดไฟอาจจะกระพริบ, เครื่องใช้ไฟฟ้าเช่นโทรทัศน์อาจจะดับ หรืออาจจะไม่ดับแต่ก็สังเกตได้ว่าไฟตกจากการดูจอภาพเป็นต้น โดยแรงดันตกชั่วขณะคือแรงดันอาร์เอ็มเอสที่มีขนาดลดลงชั่วคราว ตั้งแต่ 0.5 คาบไฟสลับ จนถึง 1 นาที และขนาดแรงดันลดลงอยู่ในช่วง 0.1 PU. จนถึง 0.9 PU. โดย 1 คาบไฟสลับมีค่าเท่ากับ 20 ms ในกรณีระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz เช่นประเทศไทย

แรงดันตกชั่วขณะเป็นหนึ่งในสาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power quality problems) ที่ภาคอุตสาหกรรมต้องประสบ และมีส่วนทำให้เกิดการสูญเสียอื่นๆตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

แรงดันตกชั่วขณะมีผลกระทบในแง่เศรษฐศาสตร์กล่าวคือ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะกับโหลดที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดัน เช่น โหลดที่เป็นอินเวอร์เตอร์ หรือคอนเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายกำลังให้กับมอเตอร์ในงานอุตสาหกรรม, คอมพิวเตอร์ในออฟฟิต เป็นต้น โดยสถานที่ที่สำคัญได้แก่ โรงงานผลิตรถยนต์, อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ, อุปกรณ์ถ่ายทอสัญญาณ, อาคารสำนักงาน, และโรงพยาบาล หรือศูนย์การแพทย์ เป็นต้น ซึ่งจากการสำรวจในสหรัฐอเมริกาพบว่าแรงดันตกชั่วขณะคิดเป็น 92% ของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) [10]

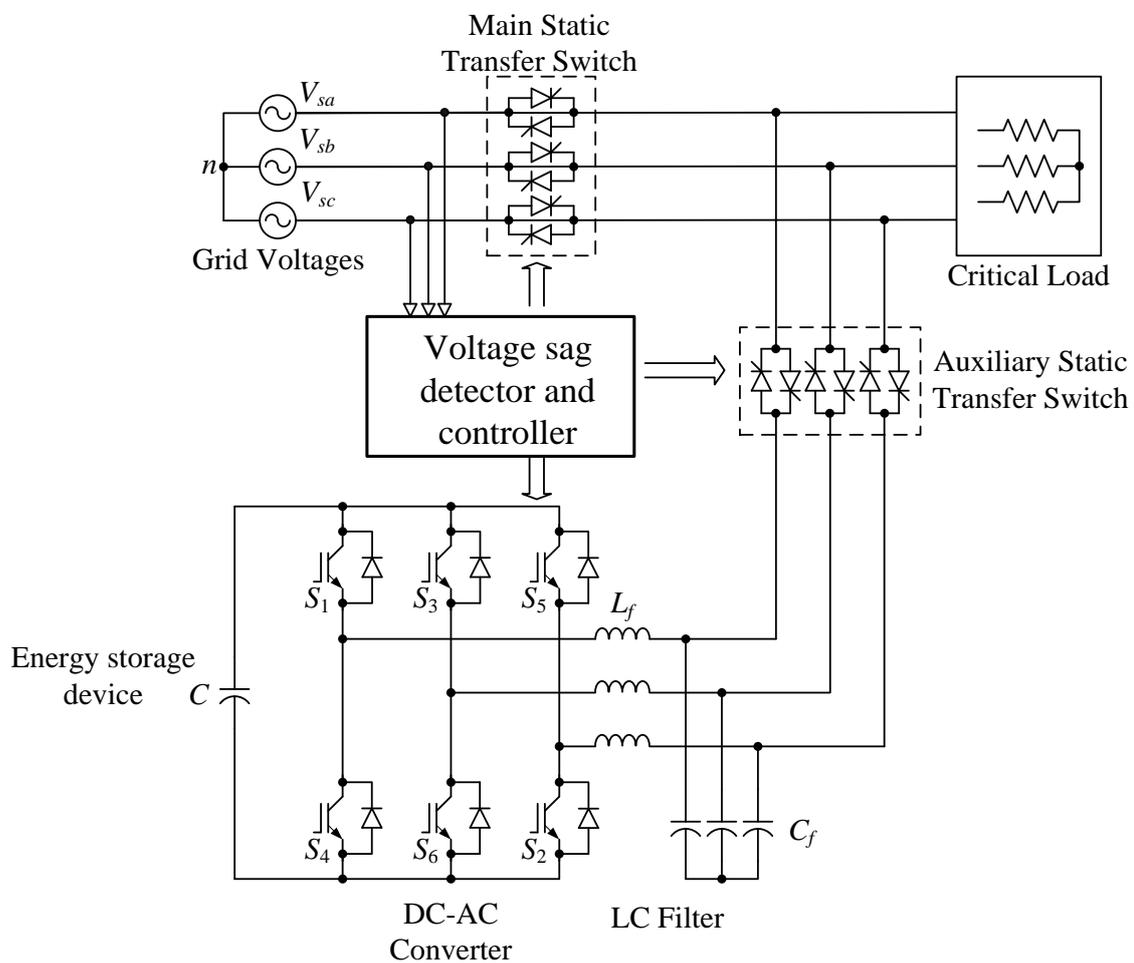
ในประเทศไต้หวัน เฉพาะที่ Hsinchu Science-based Industrial Park (HSIP) ได้มีการศึกษาและพบว่าในแต่ละครั้งที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะจะเกิดการสูญเสียทางการเงินมูลค่ามากถึง 100,000 เหรียญสหรัฐ จนถึง 1,000,000 เหรียญ [10] ส่วนในประเทศสหรัฐอเมริกา สถาบัน EPRI (Electronic Power Research Institute) ได้พบว่าการสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์เฉพาะในสหรัฐอเมริกาที่เกิดจากคุณภาพไฟฟ้าที่แย่นี้ซึ่งมีแรงดันตกชั่วขณะเป็นสาเหตุที่สำคัญที่สุดเป็นจำนวนสูงถึง 400,000,000,000 (สี่แสนล้าน) เหรียญสหรัฐต่อปี[11] และถึงแม้ว่าจะยังไม่มีผลการศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงดันตกในประเทศไทย แต่ก็ประมาณได้ว่ามีมูลค่าหลายล้านบาทต่อปี[12]

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบระบบของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะที่น่าเสนอ โดยการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามรูปที่ 3.1 คือ 1) การออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Energy storage device หรือ Super capacitor) 2) การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 3) การออกแบบสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต และ 4) การออกแบบการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ



รูปที่ 3.1 วงจรของระบบแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะที่น่าเสนอ

3.2 การออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Energy storage device)

การออกแบบตัวเก็บประจุสำหรับเก็บพลังงานนั้นจำเป็นต้องกำหนดหรือทราบค่าแรงดันค่าระลอกของตัวเก็บประจุ, เวลาที่ทำให้เกิดแรงดันค่าระลอกนั้น, และกระแสคายประจุ (Discharge current) [6]

ก. แรงดันค่าระลอกของตัวเก็บประจุ

กรณีนี้จะยอมให้เกิดแรงดันค่าระลอกไม่เกิน 3% ของแรงดันพิกัดของแรงดันไฟตรงที่ Dc-link ของอินเวอร์เตอร์

โดยแรงดันไฟตรงที่ Dc-link มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $380 \cdot \sqrt{2} = 537 \text{ V}$

ดังนั้นแรงดันค่าระลอกมีค่าสูงสุดไม่เกิน $537 \cdot 5\% = 26.85 \text{ V}$

ข. เวลาที่ทำให้เกิดค่าระลอกนั้น

เวลาที่ทำให้เกิดค่าระลอกนี้จะออกแบบมาจากเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ยอมรับได้ ซึ่งหากพิจารณาจากนิยามของแรงดันตกชั่วขณะที่ยอมให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะได้ถึง 1 นาที่ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงมาก ดังนั้นในกรณีนี้จะออกแบบให้สามารถรับแรงดันตกชั่วขณะในระยะเวลา 2 วินาที หรือ 40 คาบไฟสลับ

ค. กระแสที่คายประจุ

ค่านี้สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะได้ โดยออกแบบให้สามารถชดเชยโหลดที่มีขนาด 1000W ได้ภายในระยะเวลา 2วินาที (โดยถือว่าอินเวอร์เตอร์ไม่มีการสูญเสีย)

ดังนั้นกระแสมีค่าเท่ากับ $1000/537 = 1.86 \text{ A}$

ค่าของตัวเก็บประจุคำนวณได้จาก

$$\Delta V_{\text{dc-link}} = iC \cdot \Delta t / C$$

$$C = iC \cdot \Delta t / (\Delta V_{\text{dc-link}}) = 1.86 \cdot 26.85 / 537 = 93\text{mF}$$

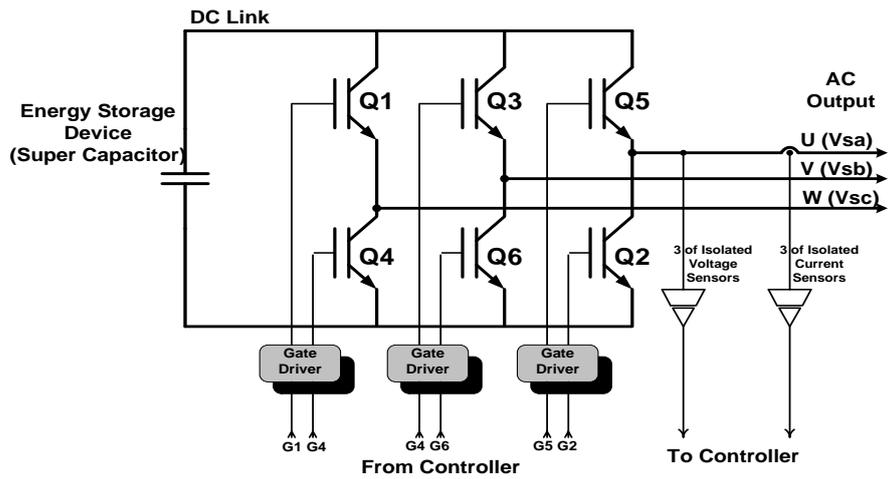
3.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือวงจรบริดจ์สามเฟสที่มีทรานซิสเตอร์ไอจีบีทีเป็นสวิตช์กำลัง โดยมีวงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับด้านออกแบบแยกโคด และวงจรตรวจจับกระแสไฟสลับด้านออกแบบแยกโคด แสดงดังรูปที่ 3.2

3.3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้

ก. ทรานซิสเตอร์ IGBT

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ IGBT แบบโมดูลขนาด 50 A 1200 V ของ Fuji ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยที่ IGBT โมดูลนี้มี IGBT สองตัวต่อในลักษณะกึ่งบริดจ์ในตัวถังเดียวกันดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.4 โดยจะสังเกตได้ว่า IGBT ได้มีการต่อไดโอดในลักษณะ Anti-parallel แล้ว

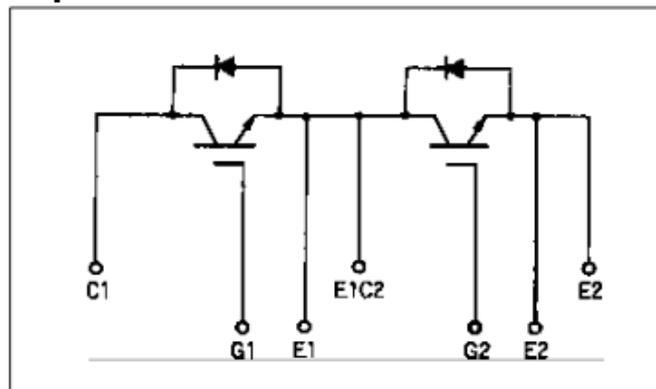


รูปที่ 3.2 วงจรบริดจ์สามเฟส, วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสแบบแยกโดด



รูปที่ 3.3 ลักษณะของทรานซิสเตอร์ IGBT และตำแหน่งขา

Equivalent Circuit Schematic



รูปที่ 3.4 วงจรภายในของทรานซิสเตอร์ IGBT และตำแหน่งขา

ข. วงจรขั้วนำเกต

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรถับนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R [13] ที่มีจุดเด่นที่มีการแยกโหนด และมีวงจรถองกันในตัว สามารถเชื่อมต่อกับระดับสัญญาณ TTL หรือ 24V ได้ดี รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของวงจรถับนำเกตของ Semikron รุ่น Skyper32R



รูปที่ 3.5 ลักษณะของวงจรถับนำเกตของ Semikron รุ่น Skyper32R

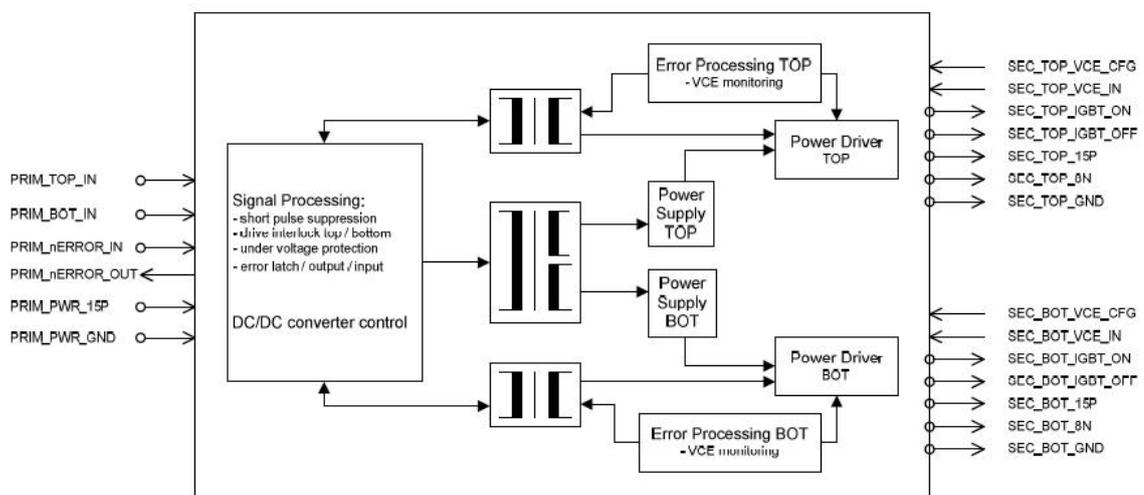
วงจรถับนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R มีรายละเอียดดังนี้

- ใช้กับแรงดันบัลไฟตรงได้ถึง 1,200 V
- สามารถขับนำ IGBT ได้สองตัวในลักษณะกึ่งบริดจ์ หรือบริดจ์ (ใช้สองตัว)
- มีการป้องกันไม่ให้ IGBT ทั้งสองตัวนำกระแสพร้อมกันโดยมีเดดไทม์ระหว่างสัญญาณขับนำ IGBT ตัวบนกับตัวล่าง = 3 μ S
- มีการป้องกันแรงดันต่ำเกิน
- มีการป้องกันการลัดวงจรของ IGBT
- มีอินพุตสำหรับหยุดการทำงาน
- แรงดันแหล่งจ่าย = 15 V
- กระแส (ไร้โหลด) = 80 mA, (มีโหลด) = 450mA
- แรงดันอินพุต = 15 V
- แรงดันเซตโวลอินพุตที่จะสั่ง IGBT ให้ทำงาน = 12.3 V
- แรงดันเซตโวลอินพุตที่จะสั่ง IGBT ให้หยุดทำงาน ช 4.6 V
- แรงดันเอาต์พุต ที่จะไปสั่งให้ IGBT นำกระแส = 15V
- แรงดันเอาต์พุต ที่จะไปสั่งให้ IGBT หยุดนำกระแส = -7V
- เวลาประวิงระหว่างอินพุต-เอาต์พุต ช่วงสั่งให้ IGBT นำกระแส = 1 μ S
- เวลาประวิงระหว่างอินพุต-เอาต์พุต ช่วงสั่งให้ IGBT หยุดนำกระแส = 1 μ S

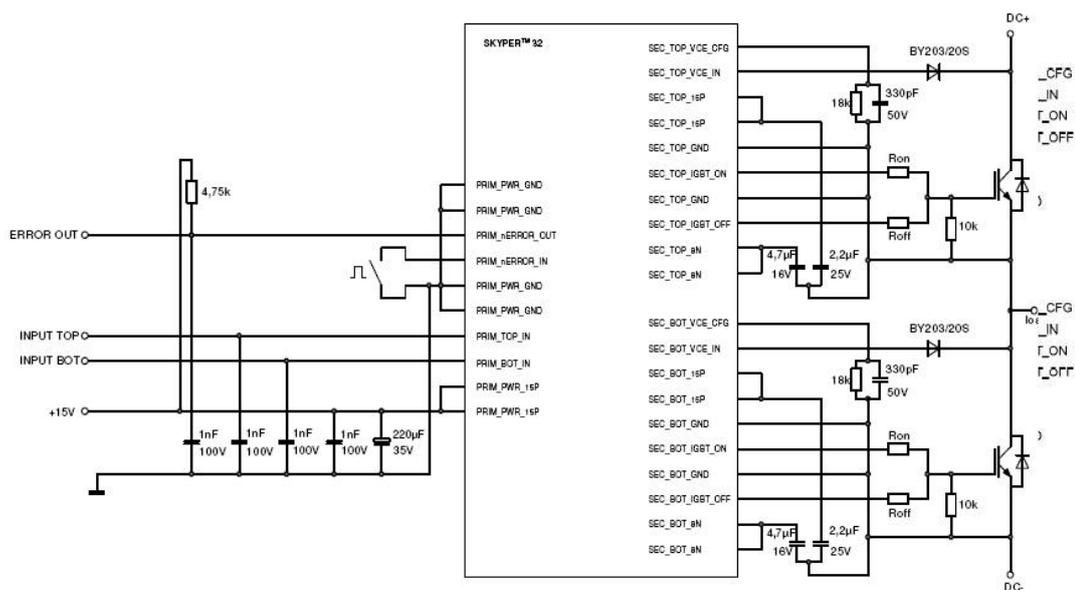
- เวลาประวิงระหว่างอินพุต-เอาต์พุต ของสัญญาณผิดพลาด = 5.4 - 7.9 uS

รูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในของวงจรขั้วนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าการแยกโคดอย่างเด็ดขาดระหว่างด้านเข้าที่ต่อกับวงจรควบคุมหรือวงจรสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์และด้านออกที่ต่อกับสวิตช์ไอจีบีที นอกจากนี้วงจรขั้วนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R ยังมีแหล่งจ่ายแรงดันอีก 2 ตัว สำหรับขั้วนำสวิตช์ภายในตัวอีกด้วย จึงทำให้ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายเพิ่มเติมอีก 2 ตัวดังเช่นวงจรขั้วนำแบบทั่วไป

รูปที่ 3.7 แสดงการต่อใช้งานวงจรขั้วนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R โดยจะมีอุปกรณ์เพิ่มเติมอีกไม่มาก เช่นตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, และไดโอด



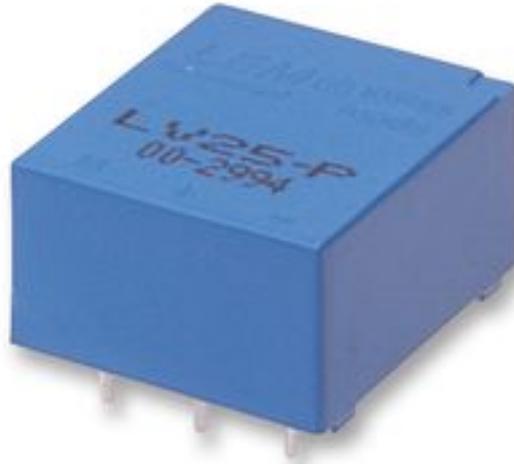
รูปที่ 3.6 โครงสร้างภายในของวงจรขั้วนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R



รูปที่ 3.7 การต่อใช้งานวงจรขั้วนำเกต Semikron รุ่น Skyper32R

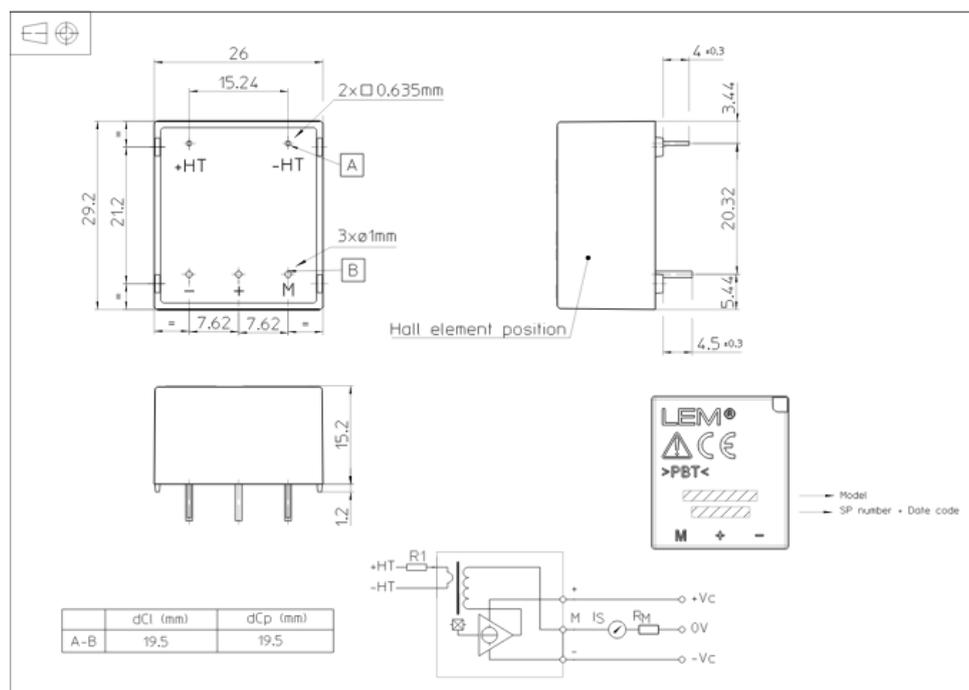
ก. วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับด้านออกแบบแยกโคด

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีตรวจจับแรงดันแบบแยกโคด LV25-P ของ LEM [14] เพื่อนำมาใช้ในวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงด้านเข้าแบบแยกโคด รูปที่ 3.8 แสดงไอซีตรวจจับแรงดันแบบแยกโคด LV25-P



รูปที่ 3.8 ไอซีตรวจจับแรงดันแบบแยกโคด LV25-P

ไอซีตรวจจับแรงดันแบบแยกโคด LV25-P นี้ต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดันแบบบวก-ลบ 12-15V รูปที่ 3.9 แสดงหน้าที่ของแต่ละขาของไอซี LV25-P

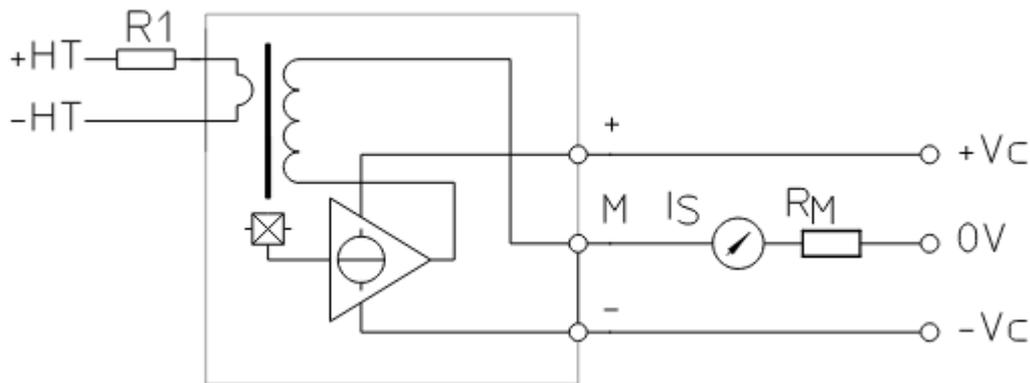


รูปที่ 3.9 หน้าที่ของแต่ละขาของไอซี LV-25P

ไอซี LV-25P มีรายละเอียดดังนี้

- กระแส Primary ค่าปกติ rms 10mA

- กระแส Primary, ย่านการวัด 0 - +/- 14mA
- ตัวต้านทานด้านออกสำหรับการวัดกระแส
 - ที่แหล่งจ่าย +/- 12V @ +/-10mA 30-190 Ohm
 - @ +/-14mA 30-100 Ohm
 - ที่แหล่งจ่าย +/- 15V @ +/-10mA 100-350 Ohm
 - @ +/-14mA 100-190 Ohm
- กระแส Secondary ค่าปกติ rms 25mA
- อัตราส่วนการแปลง 2500:1000
- แหล่งจ่ายแรงดัน (5%) +/-12-15V
- ความแม่นยำโดยรวม @แหล่งจ่าย +/-12-15V 0.9%
- @แหล่งจ่าย +/-15V (+/-5%) 0.8%
- ค่าผิดพลาดความเป็นเชิงเส้น <0.2%
- เวลาการตอบสนอง 40uS
- เป็นอุปกรณ์วัดกระแสแบบใช้ Hall effect วงรอบปิด (Closed loop)
- แรงดันแยกโคด 2500V



รูปที่ 3.10 วงจรใช้งานแบบพื้นฐานของไอซี LV25-P

สำหรับวงจรใช้งานของไอซี LV25-P สามารถออกแบบตามรายละเอียดได้ดังนี้

- ออกแบบให้ใช้แหล่งจ่ายไฟ +/-15V
- ออกแบบให้กระแสด้านเข้ามีค่า 10mA rms ดังนั้นคำนวณ R1 ได้ดังนี้
 - ที่การวัดแรงดันด้านเข้า 600Vdc ใช้ $R1 = 600/10e-3 = 60k\Omega$ (ใช้ 62kOhm)

- ออกแบบให้แรงดันด้านออกเท่ากับ 3.3V @ กระแสด้านออก 25mA ดังนั้นใช้ $R_M = 132 \text{ Ohm}$ (เลือกใช้ 120 Ohm)

ง. วงจรตรวจับกระแสไฟสลับด้านออกแบบแยกโคด

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีตรวจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM [14] เพื่อนำมาใช้ในวงจรตรวจับกระแสไฟสลับด้านออกแบบแยกโคด โดยไอซีตรวจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM นี้เป็นไอซีที่ใช้หลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect current transducer) ที่สามารถตรวจับกระแสได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ โดยตรวจับกระแสได้ทั้งสองทิศทาง และตรวจับกระแสที่มีความถี่ได้สูงถึง 100kHz รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของไอซีตรวจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM



รูปที่ 3.11 ลักษณะของไอซีตรวจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM

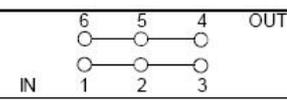
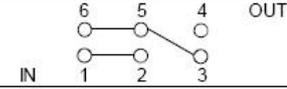
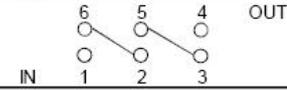
ไอซีตรวจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เป็นไอซีที่ทำงานแบบวงรอบปิด (มีการชดเชย) ทำให้มีค่าผิดพลาดต่ำมาก
- ใช้แรงดันแหล่งจ่ายแบบขั้วเดียว = 5V
- ตรวจับกระแสได้ถึง 15 A
- ให้แรงดันด้านออกที่แปรผันตามกระแสที่วัดตามสมการ $2.5 \pm (0.625 \cdot I) \text{ V}$
- ความต้านทานโหลดมากกว่า 2 k Ω
- เวลาการตอบสนองต่อกระแสที่วัดไม่เกิน 400ns
- วัดกระแสได้สูงถึง 100 kHz
- สามารถปรับเปลี่ยนย่านกระแสที่วัดได้ 3 ย่าน คือ +/-15A, +/- 7.5A, และ +/-5A

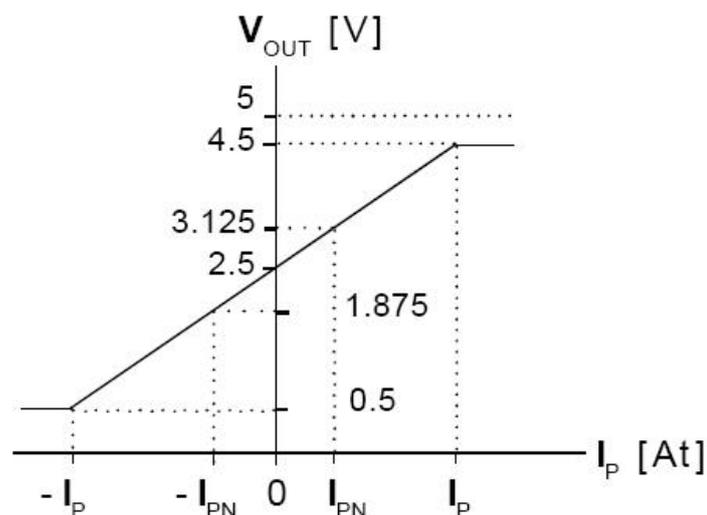
ตารางที่ 3.1 แสดงการปรับเปลี่ยนย่านกระแสที่วัดของไอซีตรวจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่ากระแสปรุ้มภูมิเท่ากับ +/- 5A. จึงต้องใช้

รอบค้ำปลงมภูมิจำนวน 3 รอบ ซึ่งสามารถทำได้โดยการต่อขา 6 เข้ากับขา 2, ขา 5 เข้ากับขา 3 และ
ป้อนกระแสที่จะทำการวัดเข้าขา 1 และออกทางขา 4 ตามตาราง

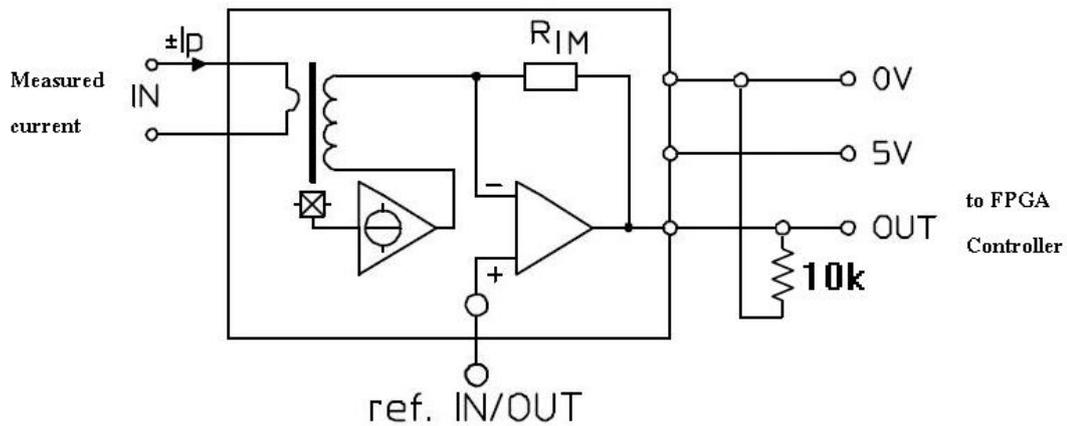
ตารางที่ 3.1 การปรับเปลี่ยนย่านกระแสที่วัด

Number of primary turns	Primary nominal current rms I_{PN} [A]	Nominal ⁹⁾ output voltage V_{OUT} [V]	Primary resistance R_P [m Ω]	Primary insertion inductance L_P [μ H]	Recommended connections
1	± 15	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 7.5	2.5 ± 0.625	0.81	0.05	
3	± 5	2.5 ± 0.625	1.62	0.12	

ไอซีตรวจจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM นี้ให้ผลการวัดกระแสเป็นแรงดัน โดยแรงดันนี้จะมีค่าออฟเซตเท่ากับ 2.5 Vdc และแรงดันด้านออกจะเพิ่มขึ้นจาก 2.5 Vdc เมื่อกระแสด้านเข้าเป็นบวก โดยจะเพิ่มขึ้น 0.625 V หรือเท่ากับ 3.125 V เมื่อกระแสด้านเข้ามีค่าบวกเท่ากับค่าพิกัก (กรณีนี้คือ +5 A) ในขณะที่แรงดันด้านออกจะลดลงจาก 2.5 Vdc เมื่อกระแสด้านเข้าเป็นลบ โดยจะลดลง 0.625 V หรือเท่ากับ 1.875 V เมื่อกระแสด้านเข้ามีค่าลบเท่ากับค่าพิกัก (กรณีนี้คือ -5 A) โดยความสัมพันธ์ของกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกแสดงดังรูปที่ 3.12 และวงจรการต่อใช้งานของไอซีตรวจจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่วัดด้านเข้ากับแรงดันด้านออก



รูปที่ 3.13 การต่อใช้งานของไอซีตรวจจับกระแสแบบแยกโคด LTSR 15-NP ของ LEM

3.4 การออกแบบสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต

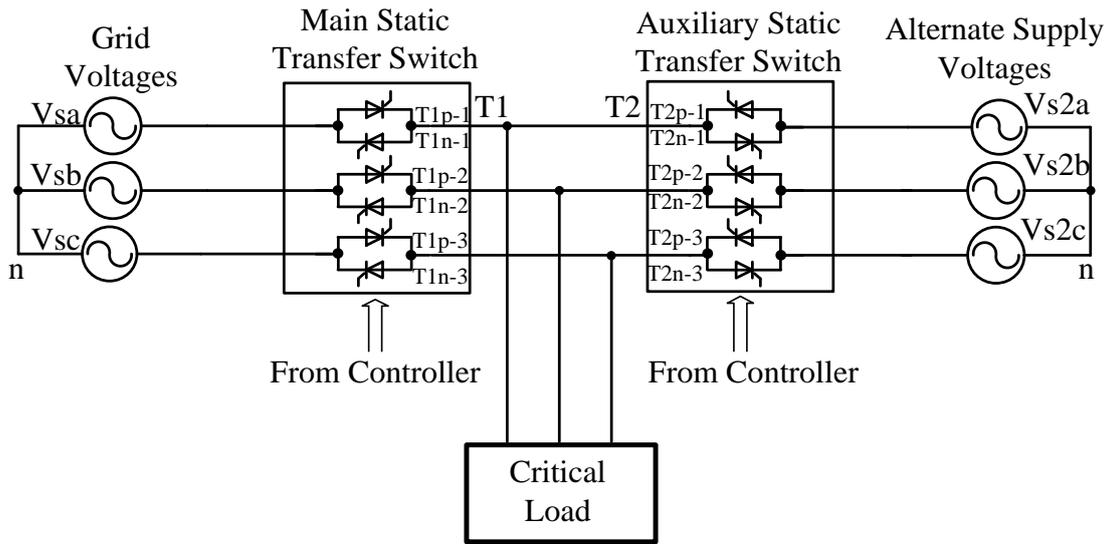
สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตจะประกอบไปด้วยไทรสเตอร์จำนวน 6 ชุด (1 ชุดมี SCR สองตัว โดยต่อวงจรแบบกลับหัวกลับหาง (Anti-parallel)) ดังรูปที่ 3.14

ในรูป 3.14 (ก) แสดงวงจรของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตที่ใช้ไทรสเตอร์ โดยแสดงครบทั้ง 3 เฟส สังเกตได้ว่าในแต่ละเฟสจะมีวงจรที่เหมือนกัน ดังนั้นสามารถเขียนวงจร 1 เฟสได้ตามรูปที่ 3.14 (ข)

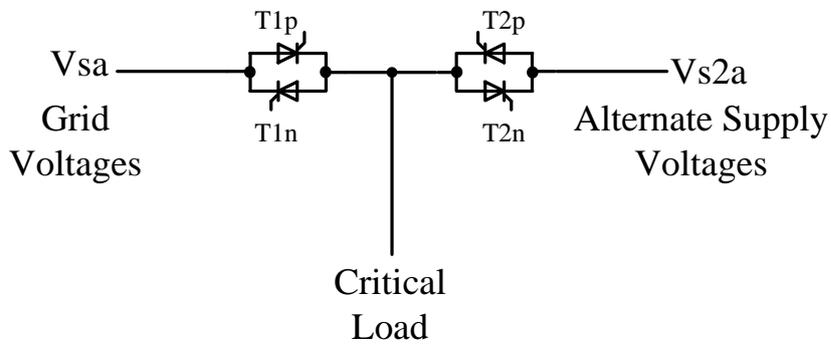
ลำดับการจุดชนวนไทรสเตอร์ทั้ง 12 ตัวแสดงรูปที่ 3.14 โดยแสดงสัญญาณจุดชนวนของไทรสเตอร์เพียง 6 ตัว (T1p-1 – T1n-3) ในฝั่งสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลัก (Main static transfer switch) เนื่องจากอีก 6 ตัวที่เหลืออยู่ในฝั่งสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลัก หลัก (Auxiliary static transfer switch) จะมีสัญญาณจุดชนวนที่เหมือนกัน

อย่างไรก็ดีเพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตทั้ง 2 ชุด ดังนั้นในช่วงของการถ่ายโอนโหลดจะออกแบบให้มีเวลาดตาย (Dead time) ของการขับนำสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลักกับตัวรองเท่ากับ 200 μ s กล่าวคือในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะและตัวควบคุมตรวจจับได้ ดังนั้นจะต้องมีการสั่งให้ไทรสเตอร์ทั้ง 6 ของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลักหยุดนำกระแสเสียก่อน แล้วหลังจากนั้นอีก 200 μ s ต่อมาจึงจะสั่งให้ไทรสเตอร์ทั้ง 6 ของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรองทำงานตามปกติ

ในทำนองกลับกันเมื่อแรงดันไฟสลับกลับมาปกติและตัวควบคุมตรวจจับได้ ดังนั้นจะต้องมีการสั่งให้ไทรสเตอร์ทั้ง 6 ของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวรองหยุดนำกระแสให้หมดเสียก่อน ต่อมาอีก 200 μ s จึงจะสามารถสั่งให้ไทรสเตอร์ทั้ง 6 ของสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตตัวหลักทำงานตามปกติ

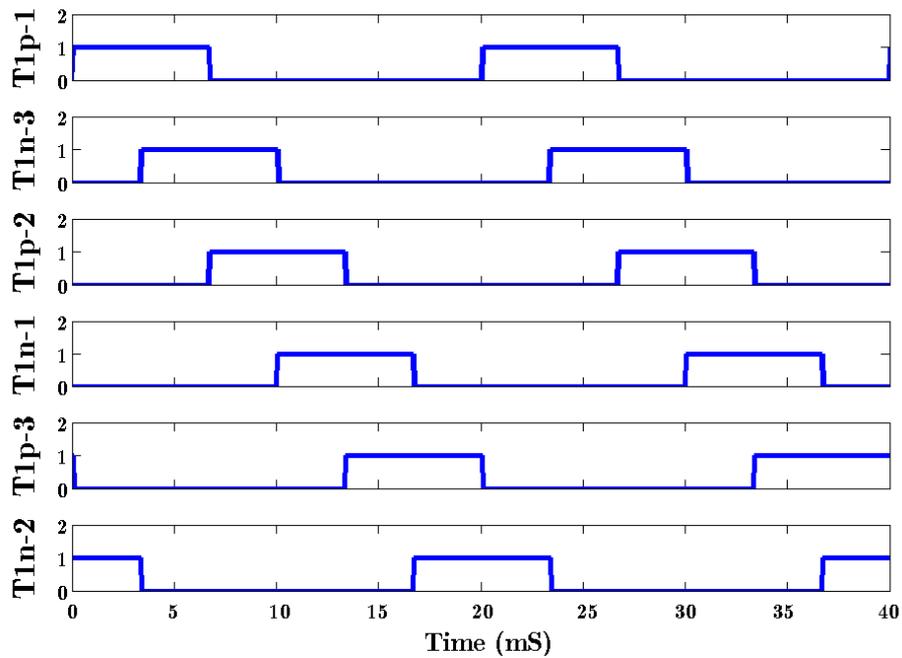


(ก) วงจรสมบูรณสามเฟส



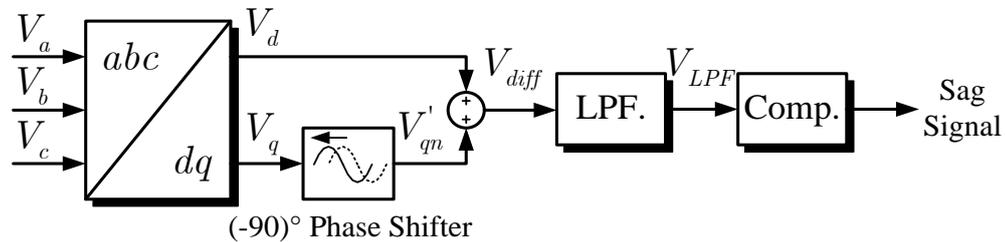
(ข) วงจร 1 เฟส

รูปที่ 3.14 สวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิตที่ใช้ไทรสเตอร์



รูปที่ 3.15 สัญญาณจุดชนวนของไทรสเตอร์ที่ใช้ในสวิตช์ถ่ายโอนแบบสถิต

3.5 การออกแบบการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ



รูปที่ 3.16 การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ในงานวิจัยนี้

หัวใจของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะที่นำเสนอคือการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ โดยมีบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.16 ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบ MSRRF (Modified synchronously rotating reference frame)-based [8] ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 แล้ว อัลกอริทึมของการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะจะถูก Implement ด้วยการใส่คอนโทรลเลอร์โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- 1) ค่าเวลาในการสุ่มสัญญาณ (รวมไปถึงค่าเวลาในการคำนวณค่า Derivative เพื่อทำเป็น Differentiator แบบ Discrete) เท่ากับเวลา 100uS
- 2) ค่าแถบระดับการเปรียบเทียบแบบฮิสเทอเรซิส (Comparator hysteresis band) เท่ากับ 0.9pu สำหรับขีดจำกัดล่าง (Lower limit) และ 1.0pu สำหรับขีดจำกัดบน (Upper limit)
- 3) ความถี่ตัด (Cut-off frequency) ของวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low pass filter) ที่ใช้สำหรับกรองความถี่สูงที่ได้จากการใช้ Discrete differentiator และรวมไปถึงฮาร์มอนิกของแรงดันไฟสลับมีค่าเท่ากับ 150Hz

บทที่ 4

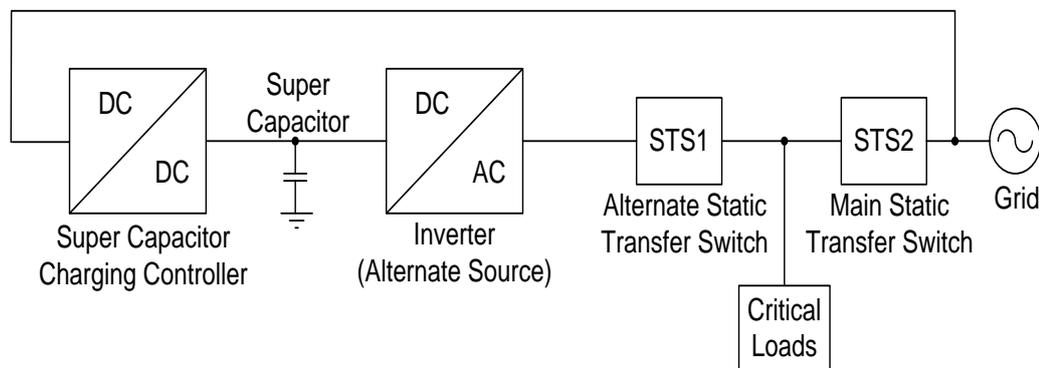
การทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการทดลองการทำงานของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงที่นำเสนอเพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวความคิดที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 โดยการทดลองการทำงานนี้จะใช้เครื่องมือวัดดังต่อไปนี้

1. 4-Channels oscilloscope - Agilent
2. Current probe - Yokogawa
3. Current measurement systems – Tektronix AM503S
4. Differential probe – Yokogawa

4.2 ระบบที่ใช้ในการทดลอง



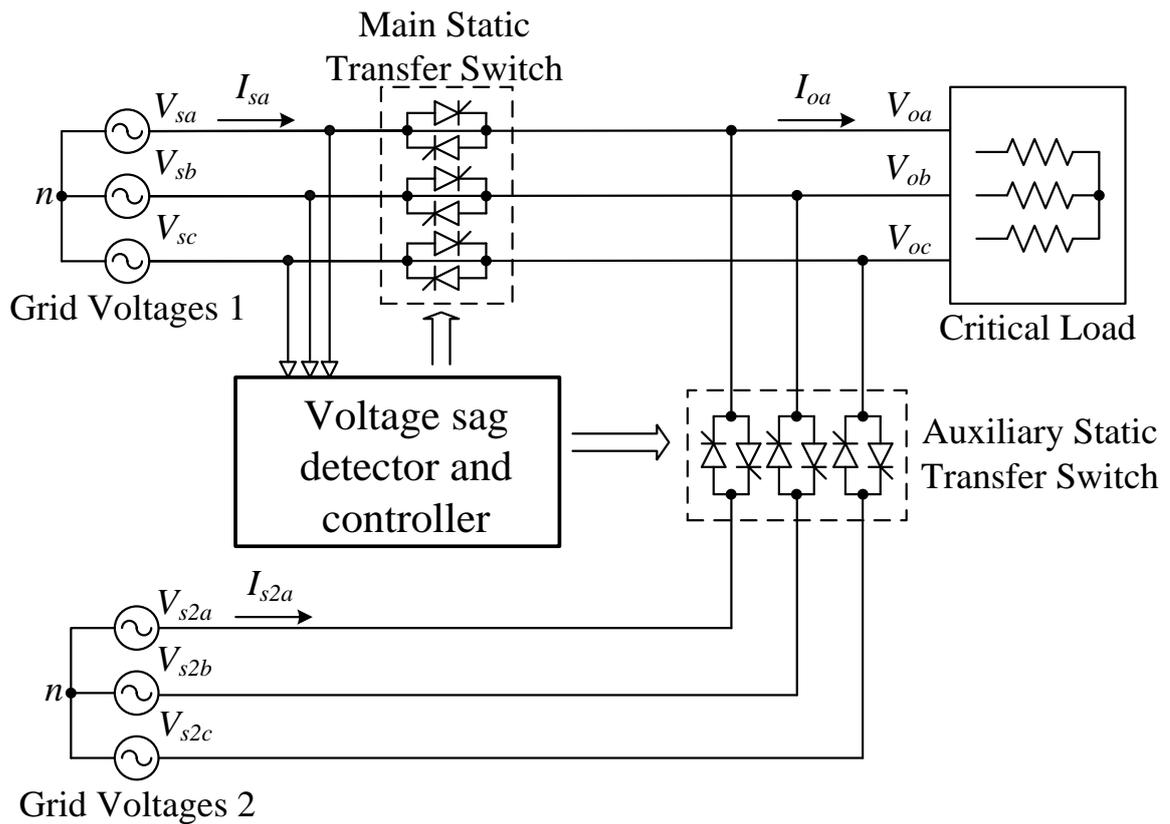
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบชดเชยแรงดันตกที่นำเสนอ

ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ 1) กรณีใช้แรงดันไฟสลับอีกแหล่งที่จากไฟฟ้าทำหน้าที่แหล่งจ่ายสำรอง หรือ Alternate source และ 2) กรณีใช้อินเวอร์เตอร์ในการสร้างแรงดันไฟสลับเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำรอง ดังนั้นทั้งสองกรณีจะมีบล็อกไดอะแกรมที่เหมือนกันต่างกันเพียงแหล่งจ่ายไฟสำรองเท่านั้น และเนื่องจากการสร้างแรงดันตกชั่วขณะ (0.1 pu – 0.9 pu) จะไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์สร้างแรงดันตกชั่วขณะ ดังนั้นจะใช้วิธีตัดแรงดันด้วยการใช้สวิตช์ (แรงดันจะลดลงเหลือ 0 pu) ซึ่งเรียกว่าไฟดับชั่วขณะแทนการสร้างแรงดันตกชั่วขณะ ดังนั้นต่อไปในการทดลองจะใช้คำว่าแรงดันตกชั่วขณะแทนคำว่าไฟดับชั่วขณะเพื่อป้องกันการสับสน

การทดลองทั้งหมดจะนี้จะมีการตั้งค่า Deadtime ของสวิตช์ถ่ายโอน (Static transfer switches) ไว้ที่ 200 μ S ทั้งนี้เพื่อป้องกันการลัดวงจรในระหว่างการชดเชยแรงดันเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้ว

4.3 การทดลองการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ – กรณีใช้แรงดันไฟสลับอีกแหล่งเป็นแหล่งจ่ายสำรอง

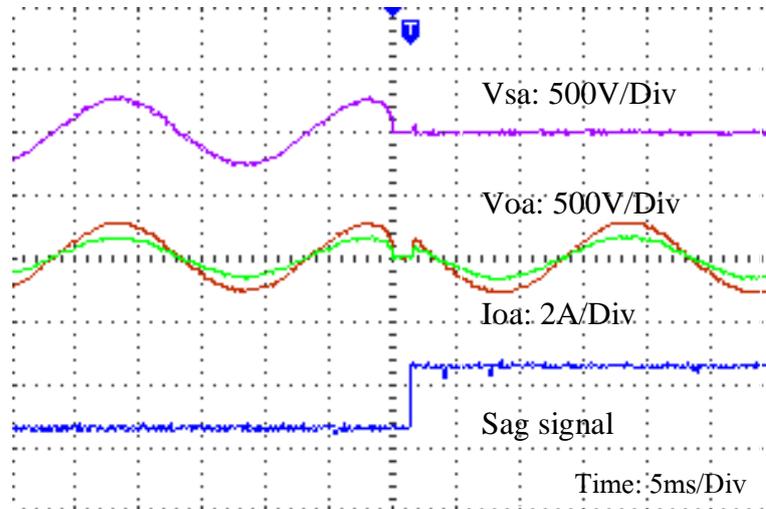
ได้มีการทดลองการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้วงจรตามรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าในกรณีนี้จะใช้แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับอีกแหล่งหนึ่งหรือ Grid voltages 2 (ได้จากไฟของการไฟฟ้าฯ แต่ต่อผ่านหม้อแปลงกำลัง) ดังนั้นเราจะได้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีเฟสตรงกันกับแหล่งจ่ายไฟหลัก (Grid voltages 1) และมีแรงดันใกล้เคียงกัน ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำรอง โดยแบ่งการทดลองออกตามชนิดของโหลด ดังนี้คือ 1) โหลดตัวต้านทาน 2) โหลดตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ และในแต่ละกรณีของโหลด จะมีการทดสอบทั้งกรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะ หรือ Sag entry และกรณีไฟกลับมาปกติ หรือ Sag end



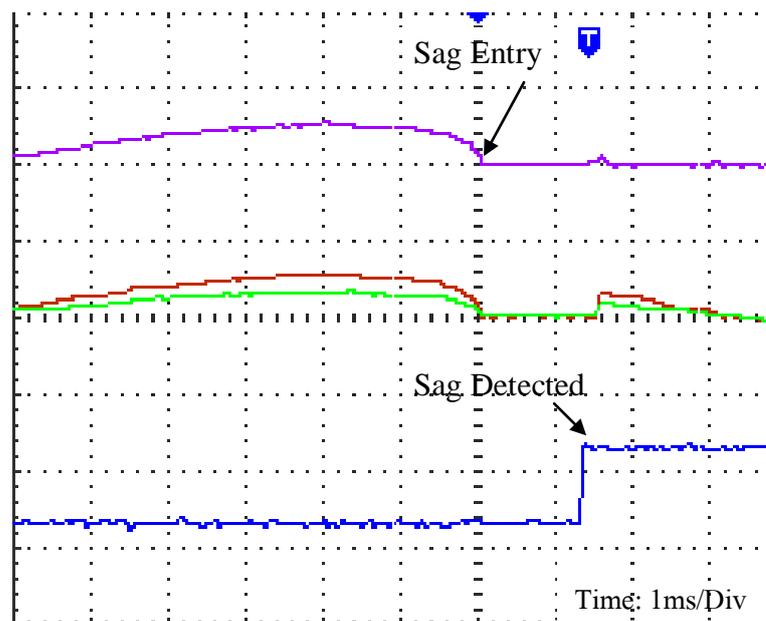
รูปที่ 4.2 การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้แหล่งจ่ายสำรองมาจากแหล่งจ่ายไฟสลับอีกแหล่งหนึ่ง

4.3.1 การทดลองการชดเชยโหลดกรณีโหลดตัวต้านทาน

ก) กรณีเกิด Sag ที่มุม POW = 108 องศา จะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 108 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทาน

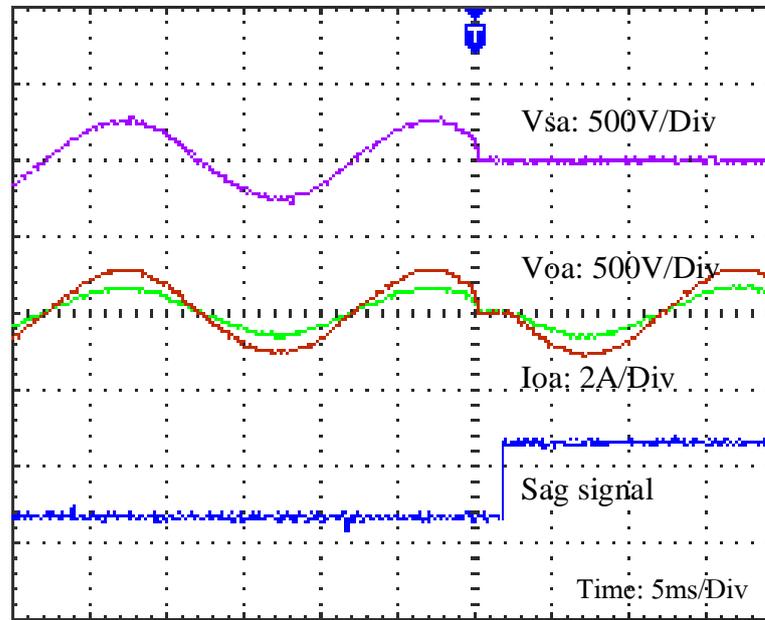


รูปที่ 4.4 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 108 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทาน

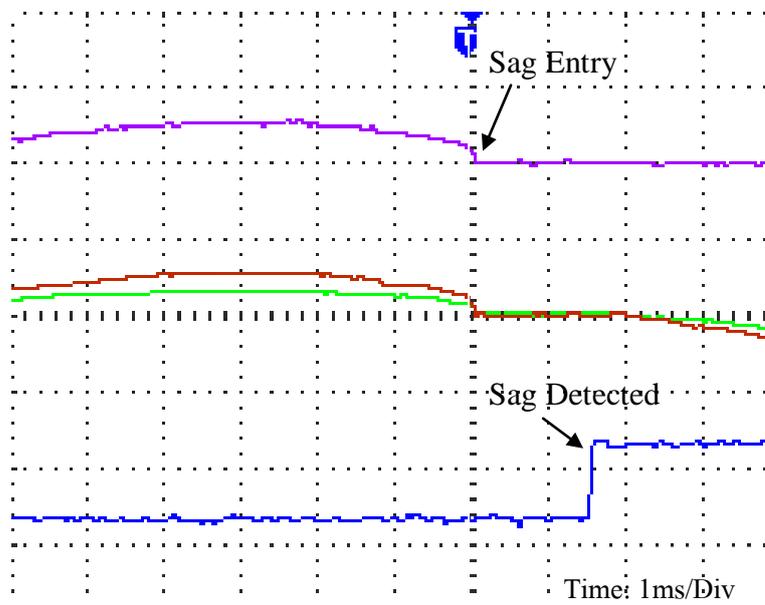
กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นที่มุม POW ประมาณ 121 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 1.3ms หลังจากนั้นสวิตช์จ่ายโอนสามารถถ่าย

โอนโพลดิให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 1.55ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะประมาณ 0.25ms หรือ 250uS)

ข) กรณีเกิด Sag ที่มุม POW = 144 องศา จะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.5 และ 4.6



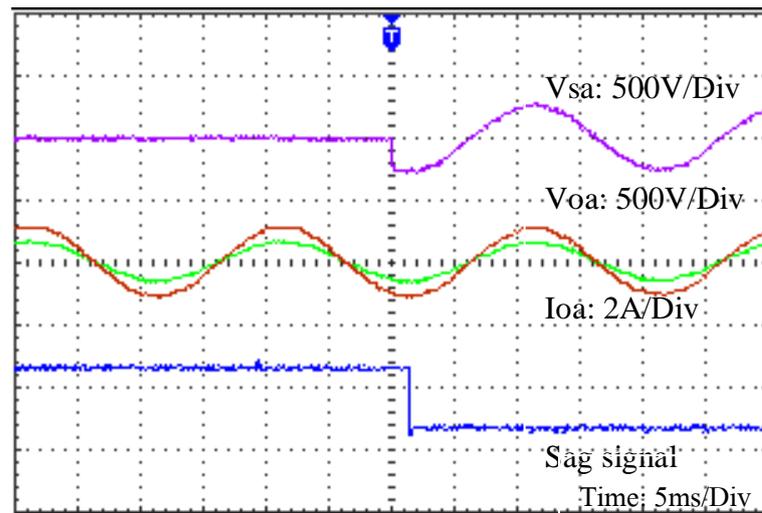
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 144 องศาและโพลดิเป็นตัวด้านทาน



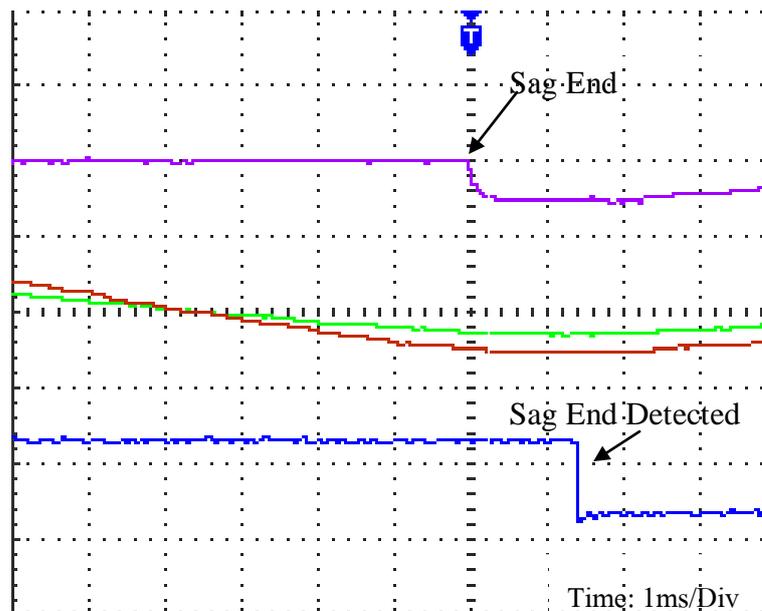
รูปที่ 4.6 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 144 องศาและโพลดิเป็นตัวด้านทาน

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นที่มุม POW ประมาณ 144 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 1.55ms หลังจากนั้นสวิตซ์ถ่ายโอนสามารถถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 2 ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะประมาณ 0.45ms หรือ 450uS)

ค) กรณีไฟกลับมามีค่าปกติ หรือ Sag end ที่มุม POW = 110 องศา



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นในขณะแรงดันตกชั่วขณะหายไป POW = 110 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทาน



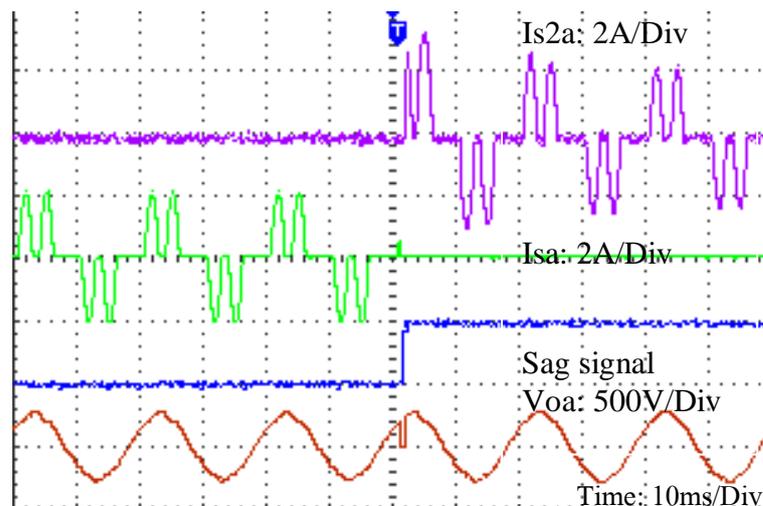
รูปที่ 4.8 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะแรงดันตกชั่วขณะหายไป POW = 110 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทาน

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะหายไปทีมุ่ม POW ประมาณ 110 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 1.4ms หลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนจะถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายไฟหลักได้โดยที่ไม่สามารถสังเกตได้ (เพราะแรงดันจากแหล่งจ่ายหลักและแหล่งจ่ายรองมีค่าเท่ากัน ซึ่งต่างจากช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่แรงดันทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือแรงดันแหล่งจ่ายหลักมีค่าเท่ากับ 0pu)

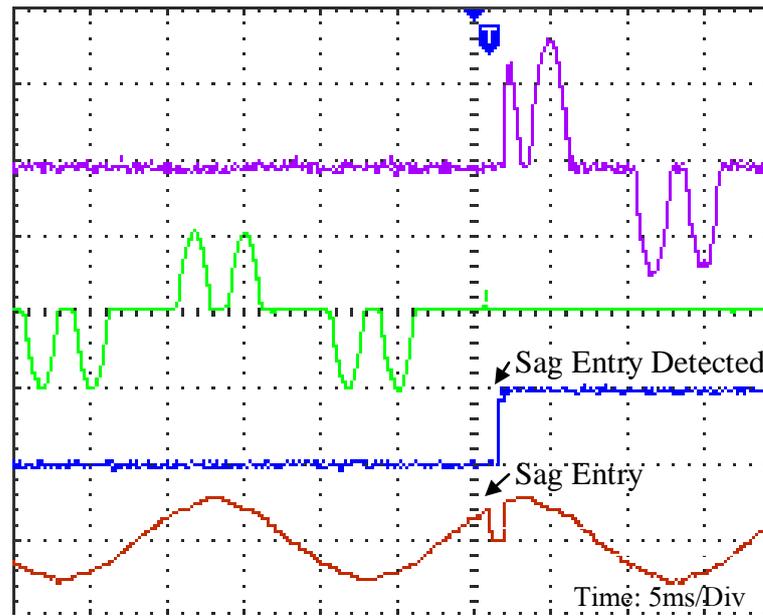
4.3.2 การทดลองการชดเชยโหลดกรณีโหลดตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

ก) กรณีเกิด Sag ทีมุ่ม POW = 54 องศา

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นทีมุ่ม POW ประมาณ 54 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 0.6ms หลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนสามารถถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 1 ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะประมาณ 0.4ms หรือ 400uS)

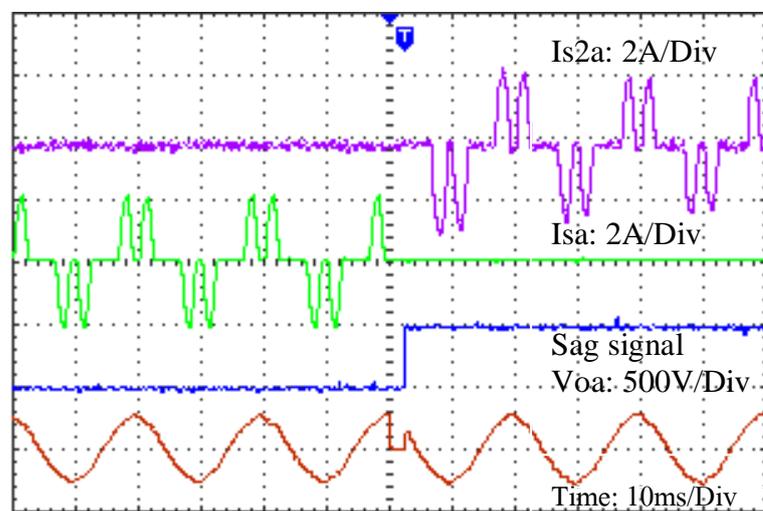


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 54 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

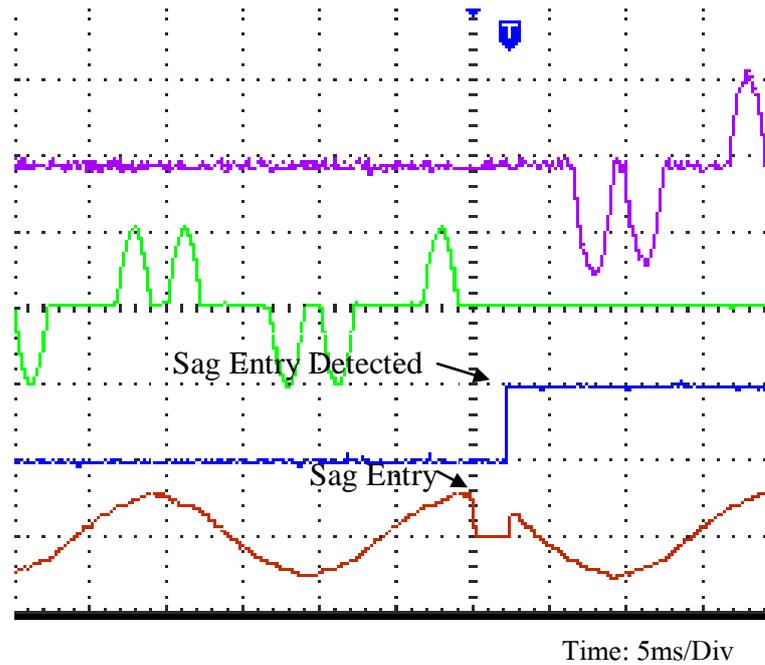


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 54 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

ข) กรณีเกิด Sag ที่มุม POW = 108 องศา



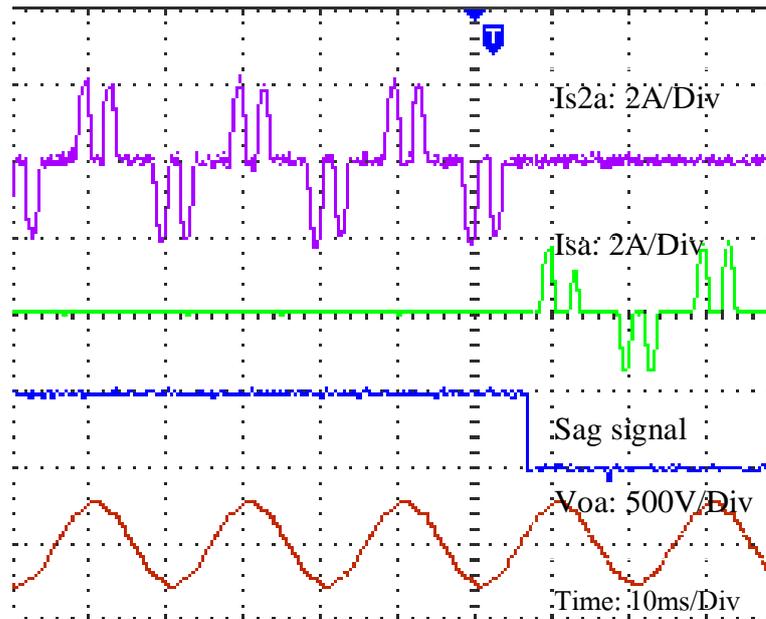
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 108 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ



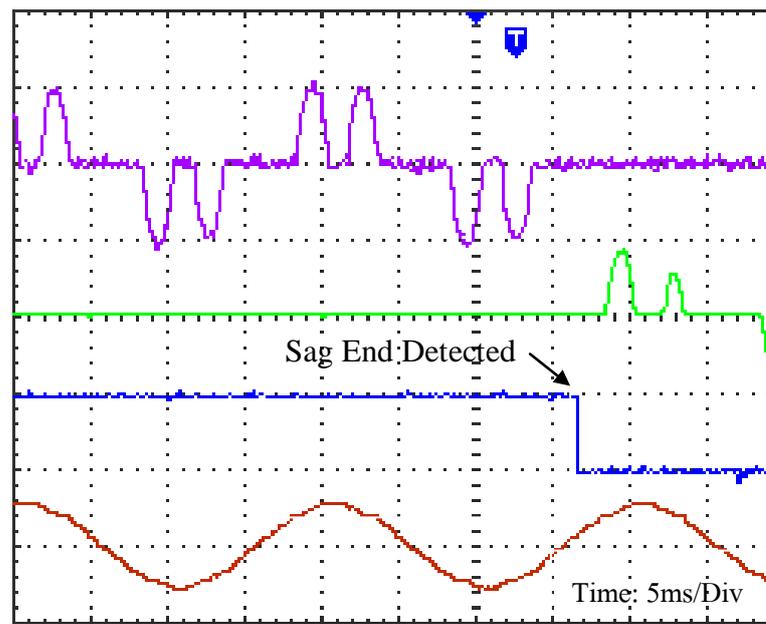
รูปที่ 4.12 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 108 องศาและโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นที่มุม POW ประมาณ 108 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 2.1ms หลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนสามารถถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 2.5 ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะประมาณ 0.4ms หรือ 400uS)

ค) กรณีไฟกลับมาที่มีค่าปกติ หรือ Sag end



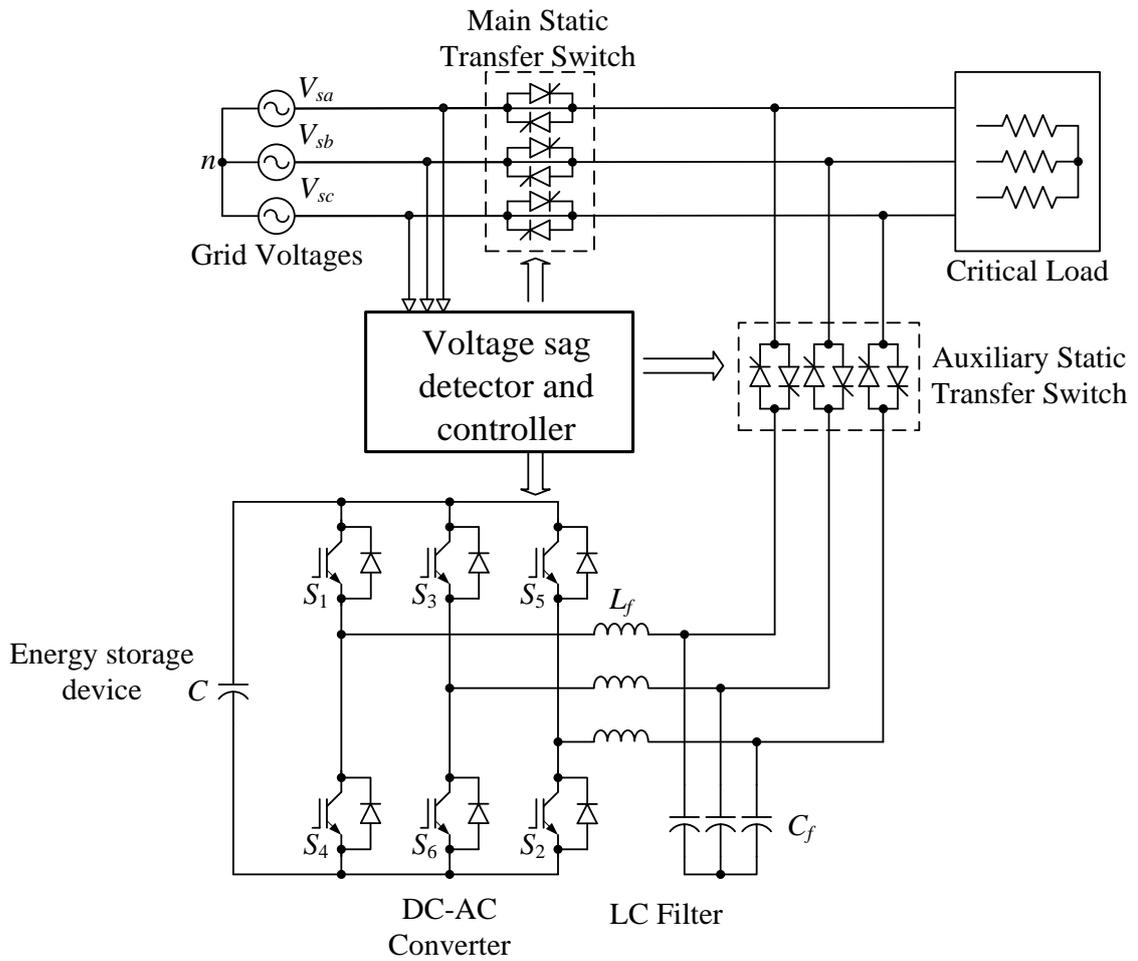
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นในขณะที่แรงดันตกชั่วขณะหายไปและโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.14 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่แรงดันตกชั่วขณะหายไปและโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

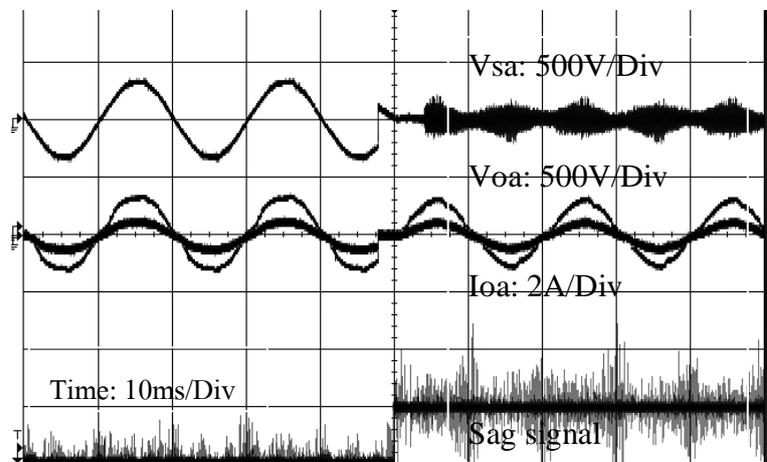
กรณีนี้จะเห็นว่าเมื่อแรงดันตกชั่วขณะหายไปแล้วระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ และหลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนจะถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายไฟหลักได้โดยที่ไม่สามารถสังเกตได้ (เพราะแรงดันจากแหล่งจ่ายหลักและแหล่งจ่ายรองมีค่าเท่ากัน ซึ่งต่างจากช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่แรงดันทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือแรงดันแหล่งจ่ายหลักมีค่าเท่ากับ 0pu)

4.4 การทดลองการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ – กรณีใช้แรงดันจากอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายสำรอง

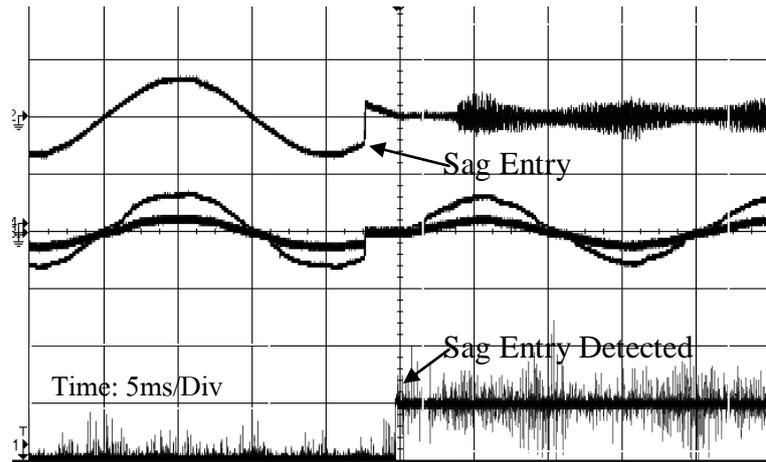


รูปที่ 4.15 การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสำรอง

4.4.1 การทดลองการชดเชยโหลดกรณี POW = 315 อกต



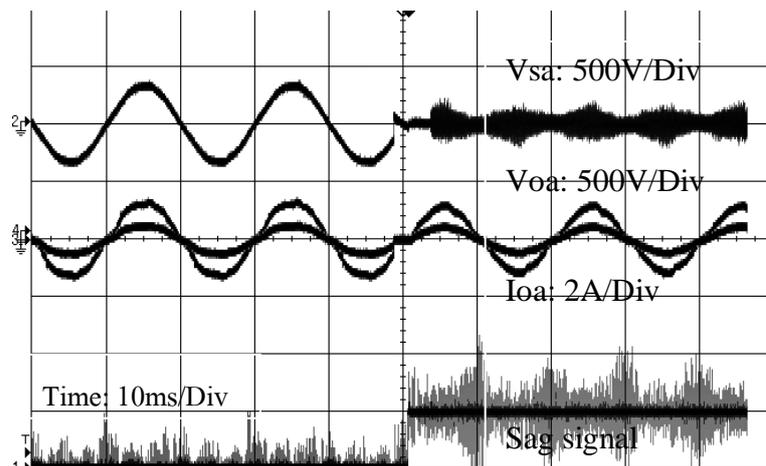
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 315 อกตและโหลดเป็นตัวต้านทาน



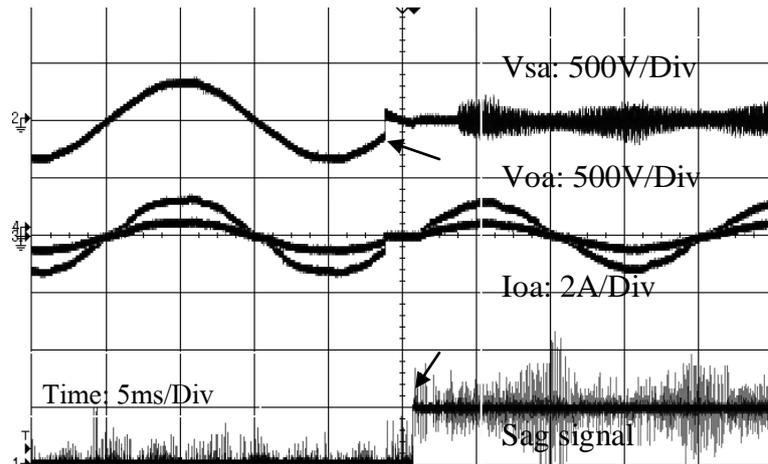
รูปที่ 4.17 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 315 อกศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นที่มุม POW ประมาณ 315 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 2.1ms หลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนสามารถถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 3 ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะประมาณ 0.9ms หรือ 900uS)

4.4.2 การทดลองการชดเชยโหลดกรณี POW = 345 องศา



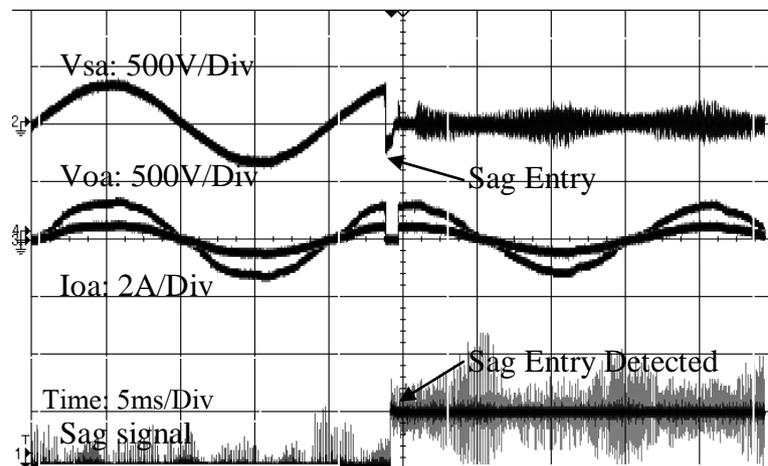
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่มี POW = 345 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 4.19 รูปขยายของรูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 345 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นที่มุม POW ประมาณ 345 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 1.95ms หลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนสามารถถ่ายโอนโหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 2.4 ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะประมาณ 0.45ms หรือ 450uS)

4.4.3 การทดลองการชดเชยโหลดกรณี POW = 70 องศา



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ POW = 70 องศาและ โหลดเป็นตัวต้านทาน

กรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นที่มุม POW ประมาณ 70 องศา และระบบสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะนี้ได้ภายในเวลา 0.32ms หลังจากนั้นสวิตช์ถ่ายโอนสามารถถ่ายโอน

โหลดให้มาต่อกับแหล่งจ่ายสำรองได้ในระยะเวลา 0.8 ms (หลังจากตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะ ประมาณ 0.48ms หรือ 480uS)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูงสำหรับระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยการใช้ระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวมักจะหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกไม่พื่นเนื่องจากการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หัวใจของเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะที่นำเสนอคือการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะแบบ MSRRF-based ซึ่งมีหลักพื้นฐานอยู่ที่การใช้วงจร Differentiator ซึ่งในวิจัยนี้เลือกใช้แบบ Discrete หรือเป็นระบบดิจิทัลซึ่งโดยปกติจะให้ผลการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่รวดเร็ว แต่จะประสบกับปัญหาการสร้างแรงดันองค์ประกอบความถี่สูงอันการทำงานของ Differentiator แบบ Discrete และมาจากการขยายแรงดันฮาร์มอนิกที่มาจากแหล่งจ่ายไฟสลับ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบวงจรแบบผ่านต่ำให้เหมาะสมจึงทำให้ได้เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบความเร็วสูง

5.2 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้วงจรแบบผ่านต่ำการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะมีค่าที่ 150 Hz เพื่อที่จะทำหน้าที่กรองแรงดันองค์ประกอบความถี่อื่นเนื่องมาจากการทำงานของ Differentiator แบบ Discrete และมาจากการขยายแรงดันฮาร์มอนิกที่มาจากแหล่งจ่ายไฟสลับ ผลที่ได้คือการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่รวดเร็วและส่งผลให้การชดเชยแรงดันเป็นไปได้อย่างรวดเร็วด้วย

ในกรณีที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 0pu (เรียกว่าไฟดับ) หนึ่งเฟส ที่มุม POW = 315 องศา เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะสามารถชดเชยแรงดันที่โหลดได้ในระยะเวลาไม่เกิน 3 ms (รวมค่าเวลา Dead time ของ STS ที่มีค่า 200uS แล้ว)

ในกรณีที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 0pu หนึ่งเฟส ที่มุม POW = 345 องศา เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะสามารถชดเชยแรงดันที่โหลดได้ในระยะเวลาไม่เกิน 2.4 ms (รวมค่าเวลา Dead time ของ STS ที่มีค่า 200uS แล้ว)

สุดท้ายในกรณีที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 0pu (เรียกว่าไฟดับ) หนึ่งเฟส ที่มุม POW = 70 องศา เครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะสามารถชดเชยแรงดันที่โหลดได้ในระยะเวลาไม่เกิน 0.8 ms (รวมค่าเวลา Dead time ของ STS ที่มีค่า 200uS แล้ว)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเวลาในการตรวจจับจะขึ้นอยู่กับมุม POW ที่เกิดแรงดันตก แต่อย่างไรก็ตามเครื่องชดเชยแรงดันตกชั่วขณะที่นำเสนอสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะได้ในระยะเวลาอันรวดเร็วและโหลดแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะนี้เลย

5.3 ข้อเสนอแนะ

สามารถพัฒนาให้เป็นเครื่องในเชิงพาณิชย์ได้

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (1 เมษายน 2554). พลังงานและทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th/doc/doc-AlterFuel.html>
- [2] [Online]. Available: <http://www.11thhourproject.org/images/grantees/Clean-Coalition-2.jpg>
- [3] W.G. Morsi and M.E. El-Hawary, “Effect of Distributed Generation on Voltage Flicker in Distribution System: A Case Study,” *CCECE 2008 Canadian Conference on*, Canada, 4-7 May, 2008.
- [4] D.Sabin, “An Assessment of Distribution System Power Quality, Volume 2: Statistical Summary Report,” Palo Alto, CA. EPRI Final Report TR-106294-V2, May 1996.
- [5] โศทม อารียา. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2”. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2544.
- [6] ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์. “เอกสารประกอบการสอนวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง”. ปทุมธานี : ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. 2548.
- [7] Y.Sillapawicharn and Y.Kumsuwan, “Commutation Process of Thyristor-Based Static Transfer Switch for Voltage Sensitive Load Against Voltage Sags,” *The 34th Electrical Engineering Conference (EECON-34)*, Thailand, 2011.
- [8] Y. Sillapawicharn and Y. Kumsuwan, “An improvement of synchronously rotating reference frame based voltage sag detection for voltage sag compensation applications under distorted grid voltages,” *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on*, pp.100-103, Singapore, 5-8 Dec. 2011
- [9] ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์. 2552. แรงดันตกชั่วขณะกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Voltage Sags and Power Quality Problems). **Industrial Technology Review**. ปีที่ 15, ฉบับที่ 188 (มกราคม): หน้า 116 – 119.
- [10] P. Cheng, C.Huang, C.Pan, and S. Bhattacharya, “Design and Implementation of a Series Voltage Sag Compensator Under Practical Utility Conditions”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, pp. 844 – 853, May-June 2003.
- [11] D.M. Lee, T.G. Habetler, R.G. Harley, T.L. Keister, and J.R.Rostron, “A Voltage Saq Supporter Utilizing a PWM-Switched Autotransformer”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, pp. 626 – 635, March 2007.
- [12] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, “ข้อเสนอโครงการพัฒนาเครื่องต้นแบบอุปกรณ์แก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 9 หน้า, 2546.
- [13] [Online]. Available: [http:// www.semikron.com](http://www.semikron.com)

[14] [Online]. Available: <http://www.lem.com>