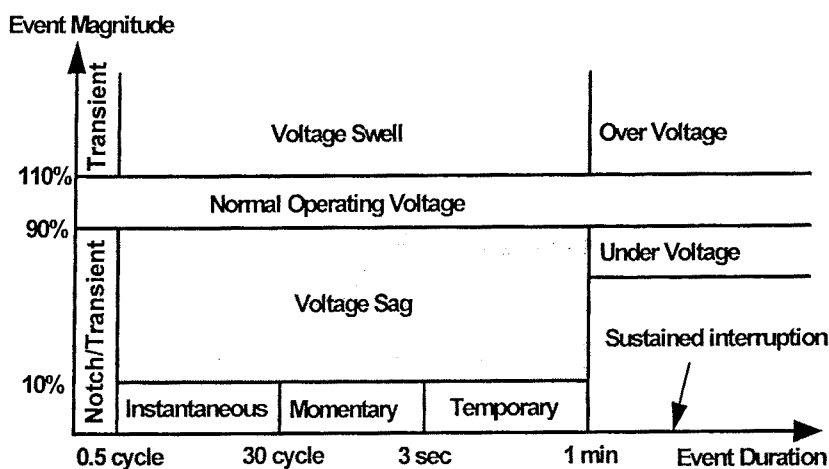




บทที่ 2

ทฤษฎี

จากแนวคิดในการสร้างชุด D-STATCOM เพื่อใช้ในการชดเชยแรงดันตกชั่วคราว ส่วนที่ต้องศึกษานั้นคือ หลักการควบคุมการทำงานของ D-STATCOM ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงได้ไปศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE1159-1995 [2] คุณภาพกำลังไฟฟ้าคือ คุณลักษณะกระแสแรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสถานะต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอันส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือเกิดการเสียหาย ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวสำคัญสาเหตุหนึ่ง คือการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าโดยมาตรฐาน IEEE Std 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิดคือการเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในเวลาทันทีทันใด(Instantaneous) ที่เวลาการเกิด 0.5 Cycle – 30 Cycle ชั่วขณะ (Momentary) ที่เวลาการเกิด 30 Cycle – 3 Sec. และชั่วคราว(Temporary) ระยะเวลาการเกิด 3 Sec.- 1 Min. ดัง รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995.

โดยในโครงการนี้ได้มีแนวคิดในการสร้างชุดชดเชยแรงดันแบบขนานเบื้องต้น โดยการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบขนานเบื้องต้นนี้ จะควบคุมกระแสเพื่อรักษาแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อควบคุมค่ายอดแรงดัน ความถี่ และเฟส ที่จุดต่อกริด (Grid) เพื่อให้แรงดันที่โหลดได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันมาตรฐาน



2.1 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

ปัจจุบันคำว่า คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) เป็นคำที่พูดถึงบ่อยในเรื่องของความมั่นคงการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าฯ และกรณีเมื่อเกิดปัญหาอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงานจากผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเห็นได้ว่าคำนิยามของคำว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้า ระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าจะพูดถึงในกรณีที่แตกต่างกันไปแต่ในความเป็นจริงแล้วมีความหมายเดียวกันซึ่งนิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้า ตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE ให้ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ คุณลักษณะกระแสแรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงาน ผิดพลาดหรือเกิดการเสียหาย

2.1.1 เหตุผลหลักที่ทำให้มีการพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

2.1.1.1 เนื่องจากในปัจจุบันในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีเทคโนโลยีสูงขึ้น ซึ่งจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังเช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC), Adjustable Speed Drive (ASD) และรีเลย์บางชนิด ฯ

2.1.1.2 การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้า ดังเช่น ตัวอย่างของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้อุปกรณ์ ASD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตซึ่ง ASD เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้ และถ้ามีคาปาซิเตอร์ติดตั้งอยู่ในระบบ เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้า ก็ยังทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์รุนแรงมากยิ่งขึ้น

2.1.1.3 ผู้ใช้ไฟทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้ามากขึ้น ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น ดังเช่น ปัญหาจากแรงดันตกชั่วระยะสั้น (Voltage Sag) ทำให้การไฟฟ้าหาแนวทางและวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น

2.1.1.4 ระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อถึงกัน ถ้าส่วนใดของระบบเกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าก็จะทำส่วนอื่นๆของระบบได้รับผลกระทบจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามไปด้วย ดังเช่น โรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์และฮาร์มอนิกส์นั้นอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า อาจทำให้โรงงานบริเวณข้างเคียงได้รับผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกส์ด้วยเช่นกัน



2.1.2 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุใหญ่

2.1.2.1 จากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น พายุ

2.1.2.2 จากการเกิดสภาวะความผิดปกติ (fault) ทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

2.1.2.3 จากการกระทำการสวิตชิงอุปกรณ์ในระบบ

2.1.2.4 จากการใช้อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม

2.1.2.5 จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

2.1.3 มาตรฐานของแรงดันตกชั่วครู่

ในการให้ความหมายของแรงดันตกชั่วขณะนั้นยังไม่มี ความชัดเจนเท่าที่ควร โดยทั้งในส่วนระยะเวลาที่เกิดขึ้นและขนาดที่ใช้จะบอกถึงความรุนแรงของปัญหาแรงดันตก จึงพบว่าหลายๆมาตรฐานมีการกำหนดคำนิยามที่แตกต่างกันดังกรณีของมาตรฐาน IEC Standard และ IEEE Standard

2.1.3.1 IEC Standard แรงดันตกชั่วขณะ คือ ปรากฏการณ์ที่แรงดันลดลงจากระดับปกติ อย่างทันทีทันใดและคืนกลับสู่สภาวะปกติภายในระยะเวลา 0.5 Cycle ถึง ประมาณ 2-3 วินาที โดยระดับแรงดันที่ลดลง จะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับระดับแรงดันปกติ

2.1.3.2 IEEE Standard แรงดันตกชั่วขณะคือระดับแรงดันที่ลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 pu.จากระดับแรงดัน RMS ปกติภายในระยะเวลา 0.5 Cycle ถึง 1 นาที ตามประเภทของแรงดันตกดังนี้

ก) Instantaneous : 0.5 - 30 Cycles

ข) Momentary : 30 Cycles - 3 Sec.

ค) Temporary : 3 Sec. - 1 Min

นอกจากนี้มาตรฐาน IEEE Standard และ IEC Standard ยังแบ่งออกเป็นมาตรฐานย่อยๆอีกหลายมาตรฐาน ดังตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 มาตรฐานย่อยของ IEC และ IEEE

Standard	Area Of Applicability	Subject
IEEE 493	Industrial and Commercial System	Criteria to reliability Evaluations
IEEEp 1346	Electrical System	General Guide and Methodology to voltage Sag Evaluations
IEEE 446	Industrial and Commercial System	Range of sensibility Load (CBEMA)
IEEE 1159	General Power System	Voltage Sag Definitions and Monitoring
IEEE 1100	General Power System	Voltage Sag Monitoring
IEEE 1250	Equipment	Guide to Electronic Equipment
IEC 1000-2-2	Unity Power System	-
IEC 1000-2-4	Industrial and Commercial System Power System	Limits of Compatibility
IEC 1000-4-11	Equipment	Immunity Tests

ที่มา : <http://th.wikipedia.org>

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดันระยะสั้น(Short Duration Voltage Variation)

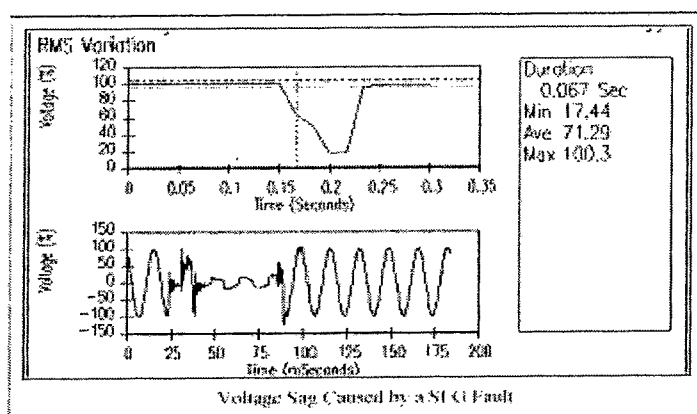
การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน rms ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดปกติ (fault) ทางไฟฟ้าทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Voltage Sag หรือ Voltage Dip) แรงดันเกิน (Voltage Swell) และไฟดับ (Interruptions) มาตรฐาน IEEE Std 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิดขึ้นคือเวลาทันที ทันใด (Instantaneous) ชั่วขณะ (Momentary) และชั่วคราว (Temporary) ดังตารางที่ 2.2



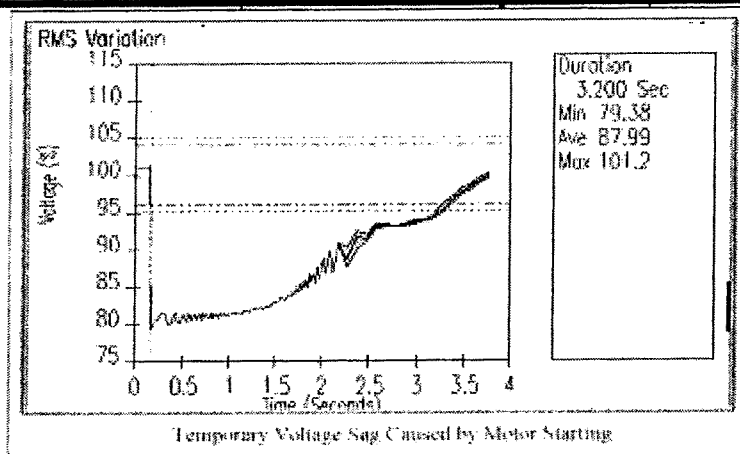
ตารางที่ 2.2 แสดงระยะเวลาการเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับในช่วงเวลาสั้นๆ

ช่วงระยะเวลาสั้น (Short Duration)		ช่วงระยะเวลาการเกิด (Typical duration)	ขนาดแรงดัน (Voltage magnitude)
แบบทันทีทันใด (Instantaneous)	Sag	0.5-30 คาบ (10 มิลลิวินาที-1 วินาที)	0.1-0.9 p.u.
	Swell	0.5-30 คาบ (10 มิลลิวินาที-1 วินาที)	1.1-1.8 p.u.
แบบชั่วขณะ (Momentary)	Interruption	0.5 คาบ-3 วินาที(10 มิลลิวินาที-3วินาที)	< 0.1 p.u.
	Sag	30 cycles-3 s (1 - 3 วินาที)	0.1-0.9 p.u.
	Swell	30 cycles-3 s (1 - 3 วินาที)	1.14-1.4 p.u.
แบบชั่วคราว (Temporary)	Interruption	3 s-1 min (3 วินาที – 1 นาที)	< 0.1 p.u.
	Sag	3 s-1 min (3 วินาที – 1 นาที)	0.1-0.9 p.u.

แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag) คือ ค่าแรงดัน rms มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms - 1min ดังรูปที่ 2.1 มีสาเหตุส่วนใหญ่ เกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดปกติของไฟฟ้าดังรูปที่ 2.2 ทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 pu. ของแรงดันปกติ (80% sag) ในช่วงเวลา 3 ไซเคิล และรูปที่ 2.3 แรงดันมีค่าลดลงจากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์อินดักชันขณะสตาร์ทจะมีกระแสสูงสูงถึง 6-10 เท่าของกระแสโหลดปกติ ผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟ มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



รูปที่ 2.2 Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของไฟฟ้าลงดิน



รูปที่ 2.3 Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้าลงดิน

2.1.5 ช่วงระยะยาว

ช่วงระยะยาว(Long Duration Voltage Variations) คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดขนาดใหญ่ โดยมีระยะเวลามากกว่า 1 นาที โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เหตุการณ์ด้วยกัน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะยาว

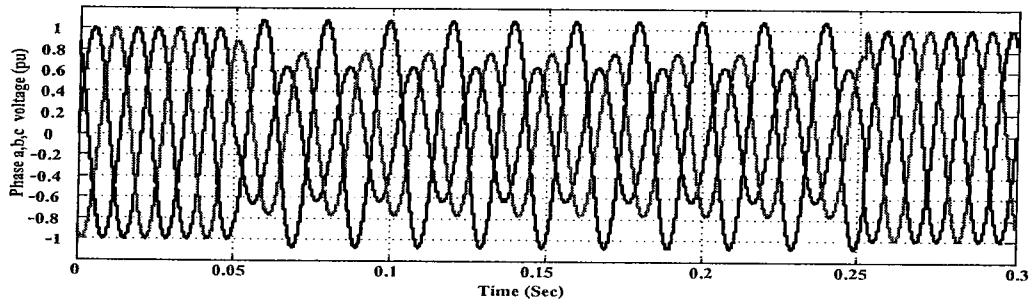
ช่วงระยะยาว (Long Duration)	ช่วงระยะเวลาการเกิด (Typical duration)	ขนาดแรงดัน (Voltage magnitude)
Interruption, Sustained	>1 min	0.0 pu
Under Voltage	>1 min	0.8-0.9 pu
Over Voltage	>1 min	1.1-1.2 pu

2.2 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะคือ ระดับแรงดันที่ลดลงระหว่าง 0.1- 0.9 p.u. จากระดับแรงดันประสิทธิผลปกติ ภายในช่วงเวลา 0.5 คาบ (10 มิลลิวินาที) ถึง 1 นาที และมีองค์ประกอบที่สำคัญคือขนาดความลึกของแรงดันช่วงเวลาในการเกิด และการเลือนเฟสเป็นตัวบ่งชี้ระดับความรุนแรงของปัญหา และสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะมาจากการความผิดปกติ (Fault) ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหรือการเริ่มเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลในการทำให้อุปกรณ์ที่มีความไว



ต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Voltage sensitive equipment) ต้องปลดวงจรออกจากระบบหรือ
ทำงานผิดพลาด



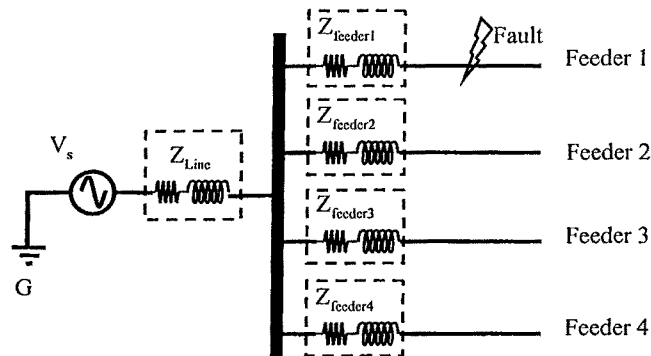
รูปที่ 2.4 คลื่นแรงดันเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะชนิด 2 เฟส ลงกราวด์

2.2.1 สาเหตุการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุหลักนั้นเกิดจากการเกิด
ความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้าที่บัสข้างเคียงหรือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ตัวอย่างของการเกิด
แรงดันตกชั่วขณะแสดงดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สายจ่ายไฟฟ้าที่ 1 (Feeder1)
ไฟฟ้าดับจะเกิดขึ้นที่สายจ่ายไฟฟ้านี้ แต่สายจ่ายไฟฟ้าอีกสามสายที่ต่อขนานอยู่นั้นจะเกิดแรงดัน
ตกชั่วขณะ เนื่องจากกระแสโดยส่วนใหญ่จะไหลผ่านสายจ่ายไฟฟ้าที่ 1 โดยแรงดันที่บัสนี้หรือ
แรงดันตกชั่วขณะที่ตกคร่อมสายจ่ายไฟฟ้าที่ 2 (Feeder2) ,3 (Feeder3) และ 4 (Feeder4) สามารถ
หาได้จากทฤษฎีการแบ่งแรงดัน (Voltage divider) [3] ดังสมการที่ 2.1 ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ
ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายจ่ายไฟฟ้าที่ 1 (Z_{Feeder1}) หรือก็คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งของ
ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับบัสรวม (Common bus)

$$V_{\text{Feeder } 2,3,4} = V_s \frac{Z_{\text{Feeder } 1}}{Z_{\text{Line}} + Z_{\text{Feeder } 1}} \quad \dots\dots\dots 2.1$$

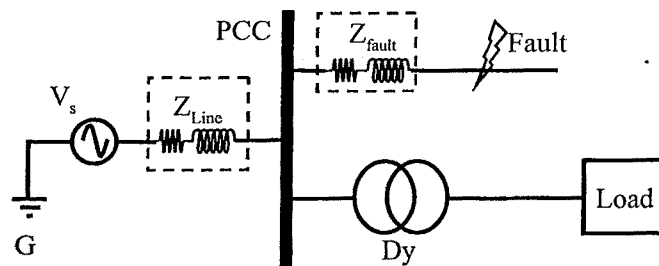
- เมื่อ $V_{\text{Feeder } 2,3,4}$ คือ ลำดับของสายไฟฟ้า
 Z_{Line} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้นสาย
 Z_{Feeder} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อรวม กับจุดต่อรวมที่เกิดความผิดปกติ



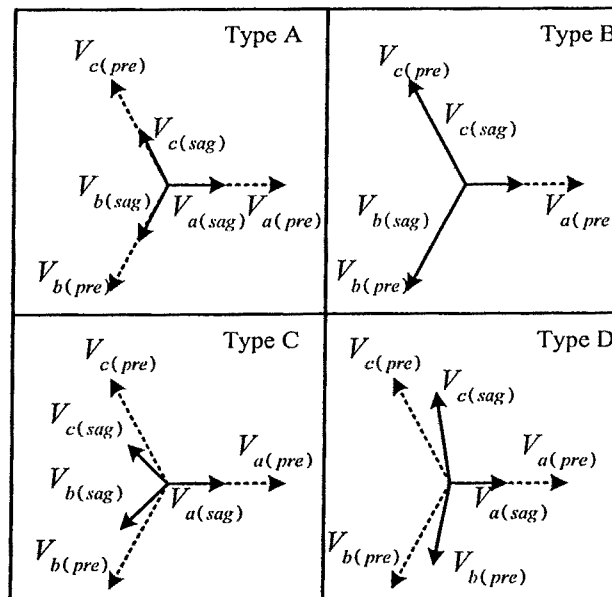
รูปที่ 2.5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ

2.2.2 ลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะมีได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับ ประเภทและตำแหน่งของความผิดปกติในระบบไฟฟ้า รวมทั้งประเภทของการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้ลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะมีการเปลี่ยนแปลง

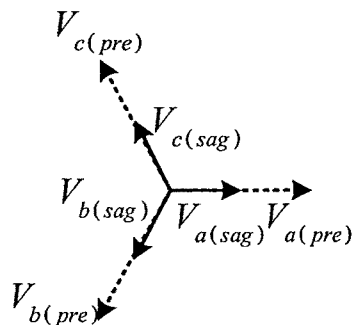


รูปที่ 2.7 เฟสเซอร์ของแรงดันตกชั่วขณะทั้ง 4 ประเภท



รูปที่ 2.7 แสดงภาพเฟสเซอร์ของแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งแบ่งตามการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ชนิด เดลตา/วาย(D/Y) ต่ออยู่ในระบบ ดังนั้นจึงแบ่งชนิดของแรงดันตกชั่วขณะ ได้เป็น 4 ประเภทที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ เส้นปะเป็นเฟสเซอร์แรงดันก่อนเกิดความผิดปกติ และเส้นทึบเป็นเฟสเซอร์แรงดันขณะเกิดความผิดปกติบนแรงดัน 3 เฟส

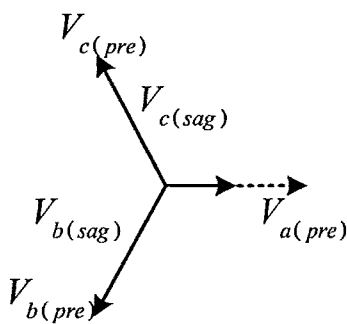
1. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส ชนิด A มีลักษณะของแรงดันที่ขนาดลดลงจากปกติแบบสมมาตรและไม่มีการกระโดดของมุมเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.8



$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ V_c &= -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2.2$$

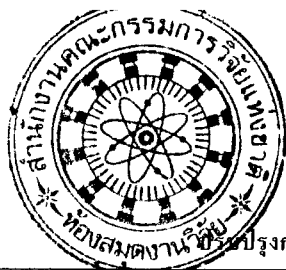
รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส

2. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส ชนิด B เป็นแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติลงดินเส้นเดียวซึ่งเป็นผลให้แรงดันมีขนาดลดลงหนึ่งเฟส แรงดันตกชั่วขณะชนิดนี้เกิดจากการต่อหม้อแปลงแบบวายต่อลงดิน(Wye-Ground) ซึ่งมีผลของส่วนประกอบลำดับศูนย์มากที่สุดที่จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์สามเฟสในระบบส่วนใหญ่จะต่อใช้งานเป็นแบบเดลตา (Delta) หรือ แบบวายไม่ต่อลงดิน (Wye-Unground) เพราะการต่อแบบนี้ทำให้ผลรวมของกระแสที่จุดนิวทรัลเป็นศูนย์แสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และสมการ 2.3

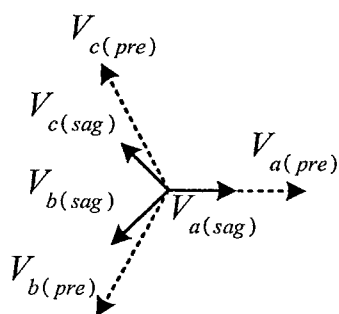


$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ V_c &= -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2.3$$

รูปที่ 2.9 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติลงดินเส้นเดียว



3. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส ชนิด C เป็นแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติระหว่างสายในระบบที่ต่อลงดิน (Phase to ground) เมื่อเกิดความผิดปกติระหว่างสายขึ้น ระดับแรงดันจะลดลงทั้งสองเฟสและมีผลทำให้มีมุมเลื่อนเฟสเกิดขึ้นด้วย นอกจากนี้ระบบที่ไม่ต่อลงดินก็สามารถก่อให้เกิดรูปแบบชนิดนี้ได้เช่นกัน หากเกิดความผิดปกติแบบลงดินเส้นเดียวขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.4



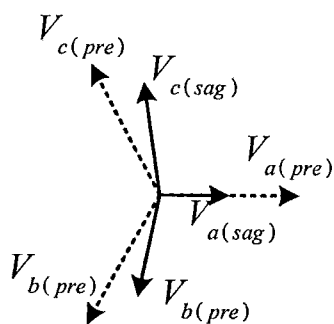
$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad \dots\dots\dots 2.4$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

รูปที่ 2.10 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติระหว่างสายในระบบที่ต่อลงดิน

4. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส ชนิด D เป็นแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติระหว่างสาย ซึ่งเป็นผลให้แรงดันมีขนาดลดลงหนึ่งเฟสและเกิดมุมเลื่อนเฟสขึ้นด้วย โดยทั่วไปจะเกิดกับระบบที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อใช้งานเป็นแบบไม่ต่อลงดินแสดงดังสมการที่ 2.5



$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad \dots\dots\dots 2.5$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

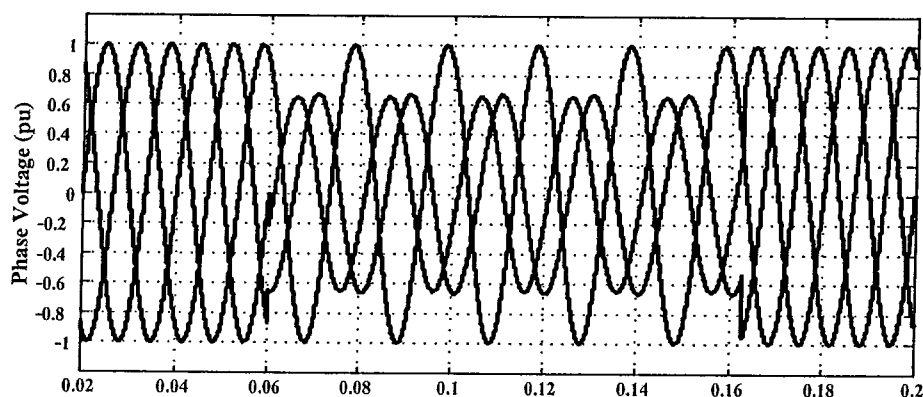
รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติระหว่างสาย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่..... 3	พ.ค. 2554
เลขทะเบียน.....	237111
เลขเรียกหนังสือ.....	



2.3 ความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตร(Voltage Unbalance)[4] คือความไม่สมมาตรกันในระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่ว่าจะเป็นส่วนของขนาด,มุมต่างเฟส (แต่ละเฟสห่างกัน 120°)และองค์ประกอบของสัญญาณไฟฟ้า ทั้งลำดับบวก (Positive sequence) ลำดับลบ (Negative sequence) และลำดับศูนย์ (Zero sequence) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าหรือการสาร์ทโหลดขนาดใหญ่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ระดับค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลไม่สมมาตรหาได้จากสมการดังนี้

$$\text{แรงดัน ไม่สมมาตร} = \frac{\text{ค่าสูงสุดของแรงดันเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยของแรงดันทั้ง 3 เฟส}}{\text{ค่าแรงดันเฉลี่ยแรงดันทั้ง 3 เฟส}} \quad \dots\dots\dots 2.6$$

$$\text{เมื่อ ค่าแรงดันเฉลี่ย} = \frac{\text{ผลรวมของค่าแรงดันแต่ละเฟส}}{3} \quad \dots\dots\dots 2.7$$

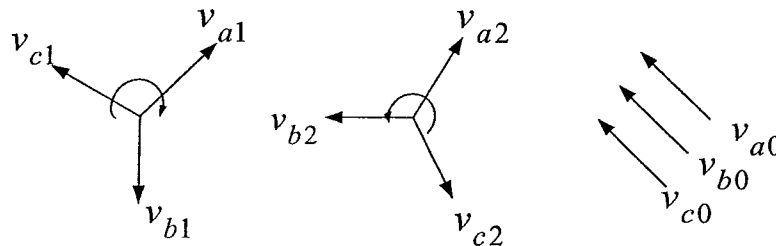
การเกิดสภาวะไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส (V_a , V_b และ V_c) สามารถทำให้องค์ประกอบของแรงดันมีความแตกต่างกันด้วย ดังนี้

1. องค์ประกอบลำดับบวก (Positive – sequence components) นั่นคือ V_{a1} , V_{b1} และ V_{c1} ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันทั้ง 3 เฟส มีขนาดแรงดันเท่ากัน มีมุมต่างกัน 120° ในแต่ละเฟส และมีการลำดับเฟสเหมือนกันกับแรงดันเริ่มต้น(Original)



2. องค์ประกอบลำดับลบ (Negative –sequence components) นั่นคือ V_{a2} , V_{b2} และ V_{c2} ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันทั้ง 3 เฟส มีขนาดแรงดันเท่ากัน มีมุมต่างกัน 120° ในแต่ละเฟส และการลำดับเฟสตรงกันข้ามกับ แรงดันเริ่มต้น

3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero –sequence components) นั่นคือ V_{a0} , V_{b0} และ V_{c0} ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันทั้ง 3 เฟส มีขนาดแรงดันเท่ากัน และมีเฟสไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของความไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad \dots\dots\dots 2.8$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad \dots\dots\dots 2.9$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad \dots\dots\dots 2.10$$

จากสมการด้านบนสามารถเขียนในรูปของเมทริกได้ดังสมการที่ 2.6

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 2.11$$

โดยที่ V_a, V_b และ V_c คือ ค่าแรงดันระหว่าง เฟสกับนิวตรอน
 V_a^0, V_b^+, V_c^- หรือ v_a^0, v_a^+, v_a^- คือ ค่าองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ ลำดับบวก และลำดับลบ ที่แสดงนี้เป็นแรงดันที่เฟสเอ
 $\alpha = e^{j2\pi/3}$ คือ ตัวแปรของการเลื่อนเฟส (phase-shift)

2.4 วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

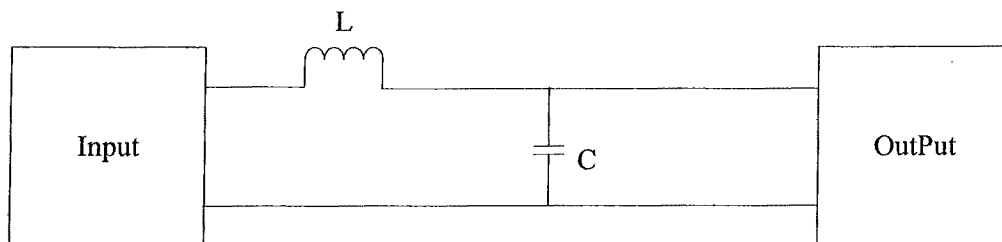
วงจรกรองสัญญาณ ไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ ไปจนถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ความถี่ที่กำหนดขึ้นไปจะถูกตัดทิ้งวงจร Low Pass Filter มีลักษณะการต่อคือ ใช้ตัวเหนี่ยวนำ อนุกรมกับวงจรและตัวเก็บประจุขนานกับวงจรคุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ต่ำเข้าตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ต่ำตัวเก็บประจุจะมีค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์สูง ทำให้ความถี่ต่ำผ่านตัวเหนี่ยวนำได้สะดวกระดับสัญญาณ Output



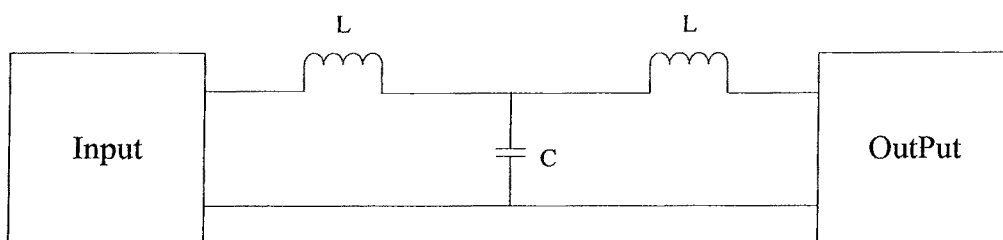
จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนดค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์จะมากขึ้นค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์จะลดลง ทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลงบางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูกตัวเก็บประจุคิงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก แสดงดังรูปที่ 2.14 สามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ T-Type และ Pi-Type และช่วงเวลาทำงานแสดงดังรูปที่ 2.17

วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter แบบ T-Type วงจรนี้จะใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว จึงไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมดตรงจุด Cut Off ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้ จึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรอีกชุดเมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T เราจึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบที่การกรองความถี่ถ้าต้องการประสิทธิภาพจะใช้วงจรนี้หลายชุด แสดงดังรูปที่ 2.15

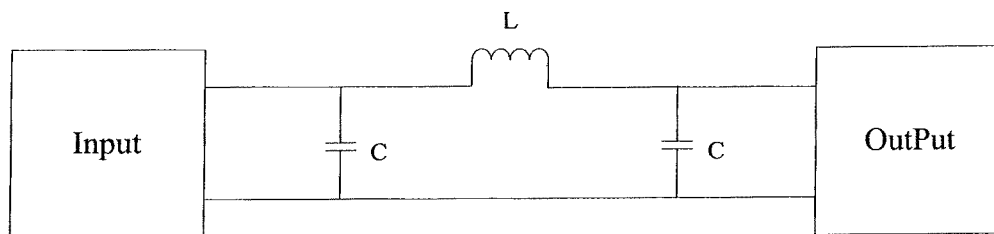
วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter แบบ Pi-Type วงจรนี้จะใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัวและตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัวต่อกันดังรูปที่ 2.16 รูปร่างคล้ายตัว Pi (พาย) จึงเรียกกันว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพายวงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟและวงจร Regulator



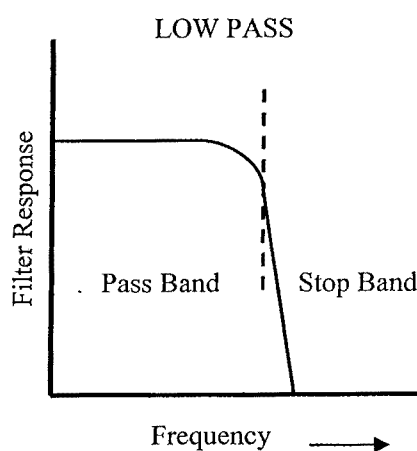
รูปที่ 2.14 วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter



รูปที่ 2.15 วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter T-Type



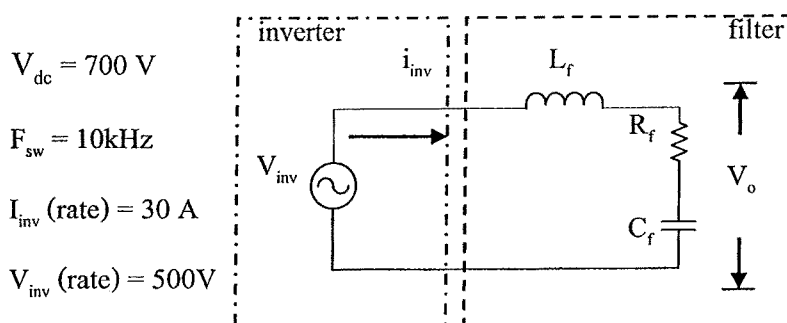
รูปที่ 2.16 วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter Pi-Type



รูปที่ 2.17 ช่วงเวลาทำงานของ Low Pass Filter

2.5 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน(Low Pass Filter)

เพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ



2.5.1 กำหนดให้ค่ายอดของกระแสกระแสเพื่อมสูงสุด ที่ผ่านวงจรกรองมีค่าไม่เกิน 20 % ของกระแสพิกัดอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.12 โดยพิจารณาจากแรงดันขณะที่วัฏจักรงาน (Duty cycle) 50 % ซึ่งจะมีค่ายอดของกระแสกระแสเพื่อมสูงสุด

$$L_f \geq \frac{V_{L_f}}{2\Delta i_{inv} f} \quad \dots\dots\dots 2.12$$

$$L_f \geq \frac{700}{2 \times 0.2 \times 30 \times \sqrt{2} \times 10 \times 10^3} = 4.1 \text{mH}$$

กำหนดให้กระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 30A ในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้ ดังสมการที่ 2.13

$$\frac{V_{inv} - V_s}{2\pi f L_f} = 30A \quad \dots\dots\dots 2.13$$

โดยที่ $V_{inv} = \frac{700}{\sqrt{2}} \approx 495.05V_{rms}$ และ $V_s = 380V_{rms}$

ดังนั้น $L_f \leq \frac{V_{inv} - V_s}{2\pi f \cdot 30}$

$$L_f \leq \frac{495.05 - 380}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 30A} = 12.2\text{mH}$$

2.5.2 กำหนดค่าความถี่โซแนนท์ ให้มีเท่ากับ 750 Hz ที่ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 4.5 mH เพื่อคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ 2.14

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \dots\dots\dots 2.14$$

$$C \cdot 4.5\text{mH} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 750\text{Hz}}\right)^2 = 4.503 \times 10^{-8}$$

$$C_f = 10.01 \mu F$$



2.5.3 กำหนดค่า damping factor ให้มีค่าเท่ากับ 1 จากรูปที่ 2.8 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังสมการที่ 2.15

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad \dots\dots\dots 2.15$$

จากสมการที่ 2.4 สามารถหาค่า damping factor ได้ดังสมการ 2.16

$$\xi_f = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad \dots\dots\dots 2.16$$

ดังนั้น

$$R_f = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad \dots\dots\dots 2.17$$

2.5.4 กำหนดการลดทอนแรงดันกระเพื่อม ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 15 เท่าที่ความถี่ฮาร์มอนิก (10 kHz) และเมื่อแทนค่า R_f สมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.16 จะได้สมการที่ 2.18

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{C_f L_f} s + 1}{C_f L_f s^2 + 2\sqrt{C_f L_f} s + 1} \quad \dots\dots\dots 2.18$$

จากข้อกำหนดที่ 2.5.1 และ 2.5.2 เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองเท่ากับ

$$L_f = 4.5 \text{ mH}$$

ดังนั้นจะได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองเท่ากับ

$$C_f = 10 \text{ } \mu\text{F}$$

และจากสมการที่ 2.5 แทนค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_f) และตัวเก็บประจุ (C_f) จะได้ค่าตัวต้านทานของวงจรกรองเท่ากับ

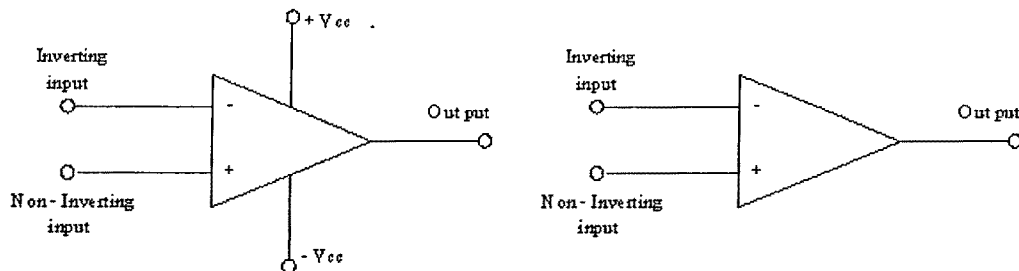
$$R_f = 7.07 \text{ } \Omega$$

ดังนั้น เลือกใช้ $R_f = 23.5 \text{ } \Omega$



2.6 Op-amp

ออปแอมป์ (Op - Amp) เป็นชื่อย่อสำหรับเรียกวงจรขยายที่มาจาก Operating Amplifier เป็นวงจรขยายแบบต่อตรง (Direct coupled amplifier) ที่มีอัตราขยายสูงมากใช้การป้อนกลับแบบลบไปควบคุมลักษณะการทำงาน ทำให้ผลการทำงานของวงจรไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ภายในของออปแอมป์ วงจรภายในประกอบด้วยวงจรขยายที่ต่ออนุกรมกัน ภาควิทยาวงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียลด้านทางเข้าวงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียลภาคที่สอง วงจรเลื่อนระดับและวงจรขยายกำลังด้านทางออก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนออปแอมป์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม ไอซีออปแอมป์เป็นไอซีที่แตกต่างไปจากลิเนียร์ไอซีทั่วไปคือ ไอซีออปแอมป์มีขาอินพุต 2 ขา เรียกว่าขาเข้าไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) หรือ ขา + และขาเข้ากลับเฟส (Inverting Input) หรือขา - ส่วนทางด้านออกก็มีเพียงขาเดียว เมื่อสัญญาณป้อนเข้าขาไม่กลับเฟสสัญญาณทางด้านออกจะมีเฟสตรงกับทางด้านเข้า แต่ถ้าป้อนสัญญาณเข้าที่ขาเข้ากลับเฟส สัญญาณทางด้านออกจะมีเฟสต่างไป 180 องศาจากสัญญาณทางด้านเข้า



รูปที่ 2.19 แสดงสัญลักษณ์ออปแอมป์

2.6.1 คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางอุดมคติ

- 2.6.1.1 อัตราขยายมีค่าสูงมากเป็นอนันต์หรือ อินฟินิตี้
- 2.6.1.2 อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมากเป็นอนันต์
- 2.6.1.3 เอาท์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากเท่ากับศูนย์
- 2.6.1.4 ความกว้างของแบนด์วิธ (Bandwidth) ในการขยายสูงมาก
- 2.6.1.5 สามารถขยายสัญญาณได้ทั้งสัญญาณ AC และ DC
- 2.6.1.6 การทำงานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เมื่อศึกษาคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติแล้ว พบว่าออปแอมป์ได้รวมข้อดีของวงจรขยายไว้ได้อย่างครบถ้วน เนื่องจากมีอัตราขยายเป็นอนันต์และสามารถขยายสัญญาณได้ทั้งไฟกระแสดับและไฟ กระแสตรง การนำไปใช้งานในบางครั้งเมื่อต้องการลดอัตราขยายก็สามารถกระทำได้โดยการ ป้อนกลับ (Feed Back) เพื่อมาลดอัตราขยายลง และข้อดีอีกประการ

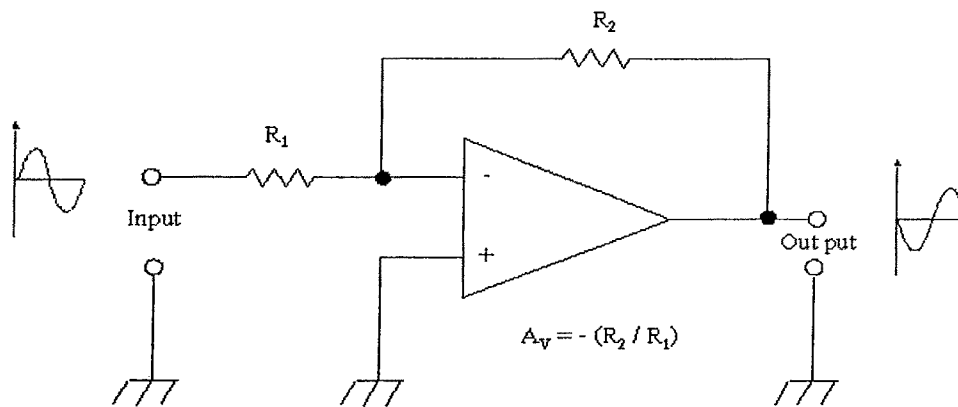


หนึ่งก็คือ อิมพีแดนซ์ทางอินพุตมีอิมพีแดนซ์สูงมาก จึงทำให้เหมือนไม่มีกระแสอินพุตไหลเลย ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้วงจรทางอินพุต ไม่ไหลดวงจรส่งกำลังในส่วนหน้า เช่นเดียวกันที่เอาท์พุตมีอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์สามารถนำไปเชื่อมต่อกับวงจรอื่นได้

2.6.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

ในวงจรขยายของออปแอมป์นั้นสามารถที่จะกำหนดอัตราการขยายของวงจรได้ โดยการใช้วงจรเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) เมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าทางขากลับเฟส (ขา -) แรงดันด้านทางออกจะมีมุมเฟสต่างไปจากแรงดันทางเข้า 180 องศา ซึ่งมีลักษณะตรงข้าม สัญญาณตรงกันข้ามนี้จะถูกป้อนกลับผ่าน R_2 เข้ามายังขาอินเวอร์ตอีกครึ่งหนึ่ง ตรงจุดนี้จะทำให้สัญญาณเกิดการหักล้างกันอัตราการขยายก็จะลดลง ถ้าตัวต้านทานที่เป็นตัวป้อนกลับมีค่ามาก จะทำให้สัญญาณป้อนกลับมีขนาดเล็กอัตราการขยายออกจึงสูง ถ้าตัวต้านทานที่ป้อนกลับมีค่าน้อยสัญญาณป้อนกลับไปได้มากอัตราการขยายก็จะลดลง ฉะนั้นอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 และ R_2 จะเป็นตัวกำหนดอัตราการขยายของวงจรโดยไม่ขึ้นกับอัตราการขยายของออปแอมป์ ซึ่งสามารถหาอัตราการขยายแรงดันได้จากสูตร

$$AV = -\frac{R_2}{R_1} \quad \dots\dots\dots 2.19$$



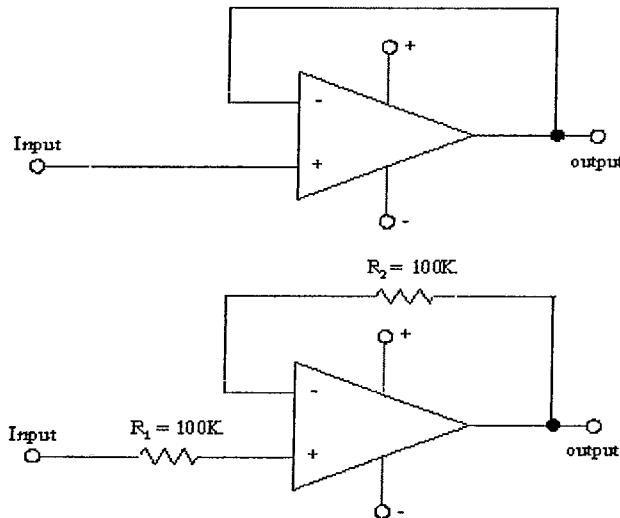
รูปที่ 2.20 วงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

2.6.3 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)

วงจรบัฟเฟอร์หรือวงจรกันชน ใช้เป็นวงจรเชื่อมวงจรสองวงจรเข้าด้วยกันเช่น ระบบไอซีที่ต่างตระกูลกันหรือทรานซิสเตอร์ที่ไม่แมทซ์อิมพีแดนซ์กัน คือวงจรที่จำเป็นต้องใช้บัฟเฟอร์



เพราะคุณสมบัติของออปแอมป์ทางเอาต์พุตมีพีเคแอนด์ต่ำ เมื่อ เชื่อมต่อกับวงจรอื่นแล้วจะไม่ทำให้วงจรอื่นมีผลแตกต่างไปจากเดิมวงจรบัฟเฟอร์นั้นจะมีอัตราขยายเท่ากับ 1



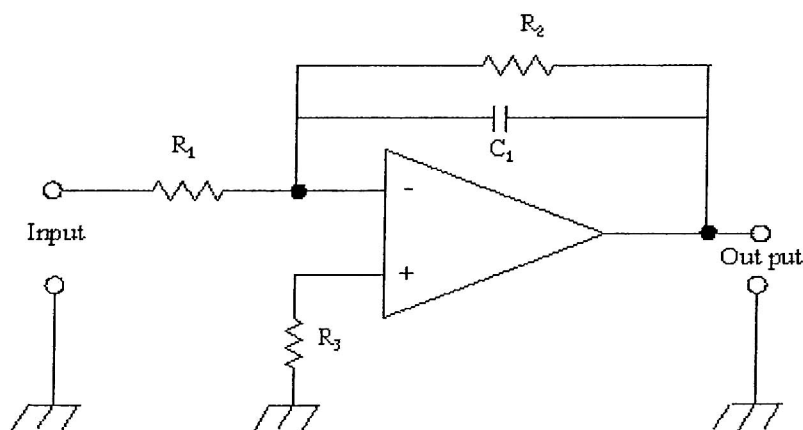
รูปที่ 2.21 วงจรบัฟเฟอร์

2.6.4 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)

การใช้วงจรกรองแบบอาร์ซี (RC Filter) เข้ามาเป็นเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) การขยายสัญญาณของออปแอมป์จะกรองเอาความถี่เฉพาะบางความถี่ออกไปเท่านั้นซึ่ง สามารถหาความถี่ที่ใช้งานได้จากสูตร

$$F = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \text{ (Hz)} \quad \dots\dots\dots 2.20$$

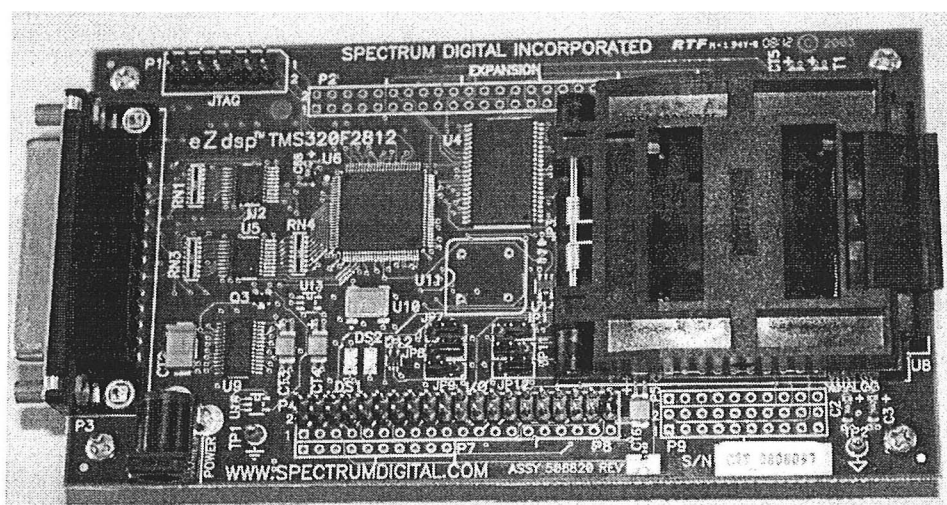
และสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานวงจรนี้ในวงจรกรองความถี่ต่างๆได้ เช่น ภาครองความถี่ ไอเอฟ วงจรคัทจับความถี่ วงจรออสซิลเลเตอร์ และในเครื่องเสียงก็ยังใช้เป็นระบบแยกความถี่ของเครื่องขยายแบบไบแอมป์และไตรแอมป์ ซึ่งวงจรแยกความถี่แบบนี้เป็นวงจรขั้นสูงขึ้นไป เราเรียกววงจรแยกความถี่ว่า “แอคทีฟฟิลเตอร์” (Active Filter) ซึ่งสามารถจัดวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.12



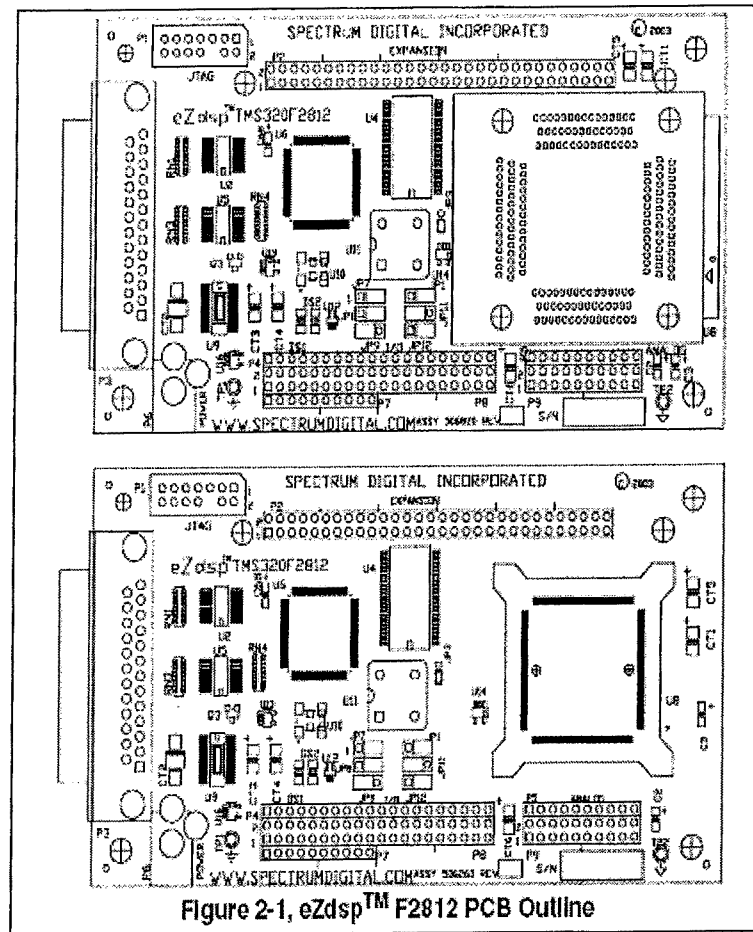
รูปที่ 2.22 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์

2.7 ตัวประมวลผล (DSP board)

DSP(Digital Signal Processing) เป็นบอร์ดที่ใช้ควบคุมการสร้างกระแส เพื่อรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรงให้คงที่ โดยรับสัญญาณมาจาก ส่วนวัดกระแส ส่วนวัดแรงดัน AC และ ส่วนวัดแรงดัน DC จากนั้นจะทำการประมวลผลตามที่โปรแกรมที่เขียนไว้ โดยมีการรับส่งสัญญาณจากตัวตรวจจับตลอด เวลา เมื่อเจอค่าแรงดันที่ผิดปกติเกิดขึ้นในระบบตัวประมวลผลจะส่งสัญญาณผ่านชุดInterface เพื่อแปลงสัญญาณคำสั่งจากตัวประมวลผลเป็นสัญญาณสั่งงานให้ชุด IPM ทำงาน และลักษณะของบอร์ดดังรูปที่2.23 และ 2.24 และคู่มือการใช้งาน DSP boardแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 2.23 รูปจริงของตัวบอร์ด DSP



รูปที่ 2.24 ลักษณะลายวงจรบนบอร์ด DSP

2.8 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การประมวลผลดิจิทัลที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าดีเอสพี (DSP- digital signal processing) เป็นการศึกษาการประมวลผลสัญญาณที่อยู่ในรูปดิจิทัล (digital) โดยทั่วไป การประมวลผลสัญญาณ อาจแบ่งได้ตาม

2.8.1 รูปแบบของตัวแทนสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing) และ การประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก (analog signal processing)

2.6.2 คุณสมบัติของสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณไม่สุ่ม (deterministic signal processing) และ การประมวลผลสัญญาณสุ่ม (stochastic/statistical signal processing)

2.6.2 ลักษณะการประมวลผลสัญญาณ

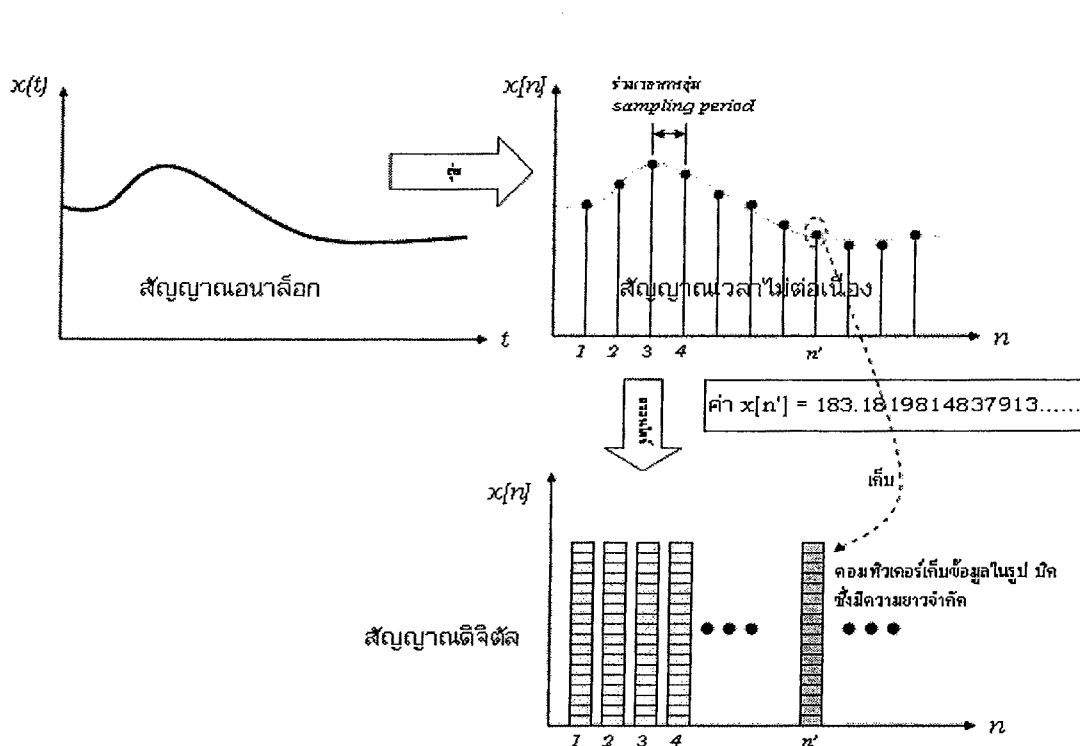
เชิงเส้น (linear signal processing) และ ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear signal processing)



2.6.2 แบ่งตามคุณลักษณะเฉพาะของสัญญาณ

การแบ่งตามลักษณะเฉพาะของการประมวลผล เช่น adaptive signal processing, chaotic signal processing, mutlirate/multiresolution signal processing ฯลฯ

ดีเอสพีนี้อาจแบ่งออกได้เป็นในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ หรือ ตามการประยุกต์ เป็น การประมวลผลสัญญาณเสียง (audio signal processing) การประมวลผลภาพดิจิทัล (digital image processing) และการประมวลผลคำพูด (speech processing) ถึงแม้ว่าในดีเอสพีนั้น สัญญาณที่เราพิจารณากันจะเป็นดิจิทัล แต่โดยทั่วไปสัญญาณเหล่านี้จากแหล่งกำเนิดจะอยู่ในรูปเดิมที่เป็นแอนะล็อก การได้มาซึ่งสัญญาณดิจิทัลซึ่งเป็นตัวแทนสัญญาณแอนะล็อกที่เราสนใจนี้จะต้องผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Conversion - ADC) หรือการดิจิไทซ์ (digitization) ซึ่งประกอบด้วยการสุ่มตัวอย่าง (sampling) (อย่าสับสนกับคำว่า สุ่ม ที่มาจาก random หรือ stochastic) และการควอนไทซ์ (quantization) ให้อยู่ในรูปดิจิทัลก่อนที่จะทำการประมวลผลต่อไป



รูปที่ 2.25 แสดงกระบวนการชักตัวอย่างสัญญาณและควอนไทซ์



2.9 ระบบส่งกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ (FACTS: Flexible ac transmission systems)

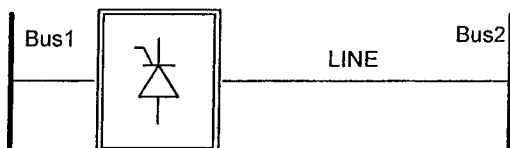
นิยามของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ตามมาตรฐาน IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) หมายถึงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมแบบสถิต (static controller devices) อย่างอื่น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและส่งเสริมการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง ความสามารถหลักของอุปกรณ์คือ การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การควบคุมแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถควบคุมได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชดเชยอย่างเดิม เช่น คาปาซิเตอร์แบบค ีรีแอกเตอร์ขนาน และชิงโครไนส์คอนเดนเซอร์ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้สามารถทำงานได้หลายฟังก์ชันในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น ทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และสามารถทำงานร่วมกับการควบคุมระดับสูงของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้เป็นที่ยอมรับในการพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่งเสริมเสถียรภาพทั้งแบบสถิตและแบบพลวัต และนอกจากนี้ยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ถูกติดตั้งเข้าไปในระบบเพิ่มมากขึ้นในทุกๆ ปี โดยทั่วไปแล้วระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้สามารถจำแนกออกตามโครงสร้าง ได้ดังนี้

2.9.1 ตัวควบคุมแบบอนุกรม

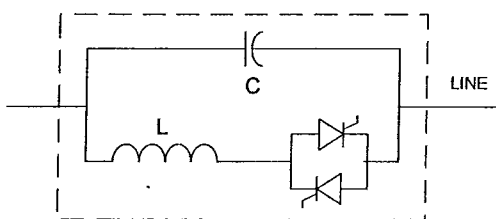
ตัวควบคุมแบบอนุกรม (series controller) จะต่ออนุกรมกับสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) อุปกรณ์จำพวกนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งคาปาซิทีฟ รีแอกทีฟหรือบางครั้งอาจเรียกว่าแหล่งจ่ายอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ การทำงานหลักของอุปกรณ์ที่ต่อในลักษณะนี้จะเป็นการฉีดแรงดันที่อนุกรมกับสายส่ง การทำงานของอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรม จึงเหมือนกับเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งได้ จุดประสงค์หลักของอุปกรณ์นี้คือการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง โดยการเปลี่ยนแปลงรีแอกแตนซ์ของสายส่งนั่นเอง ตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ในจำพวกตัวควบคุมแบบอนุกรมคือตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (TCSC: Thyristor-Controlled Series Capacitor) วงจรพื้นฐาน TCSC ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์อนุกรม และรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข) TCSC จะต่ออนุกรมกับสายส่ง เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมนี้ นอกจากนี้ตัวชดเชยอนุกรมแบบสถิต (SSSC: Static Synchronous Series Compensator) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สำคัญในจำพวกของตัวควบคุมแบบอนุกรม โดยส่วนใหญ่แล้วการทำงานของ SSSC อาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดัน (VSC : Voltage sourced



converter) ซึ่งจะต่ออนุกรมกับสายส่งผ่านหม้อแปลงอนุกรมซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ค) แรงดันที่ถูกผลิตขึ้นโดย SSSC นี้จะถูกฉีดเข้าไปในสายส่งโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมในสายส่ง และนอกจากนี้อุปกรณ์ SSSC ยังสามารถใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้อีกด้วย

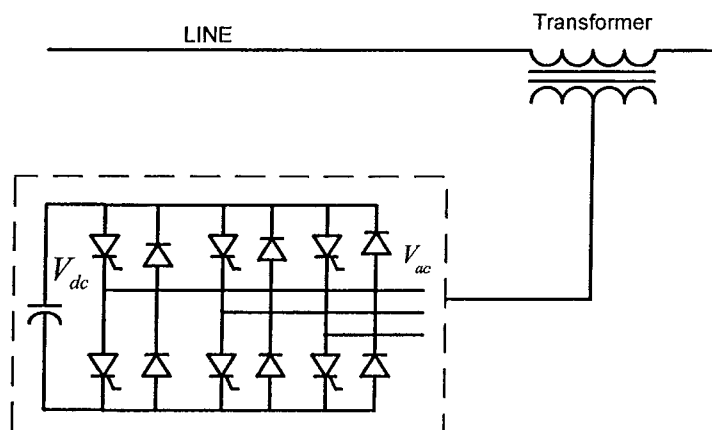


(ก) ลักษณะการเชื่อมต่อตัวควบคุมแบบอนุกรมกับระบบ



(ข) ตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์

รูปที่ 2.26 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม



(ค) ตัวชดเชยอนุกรมแบบแบบสถิต

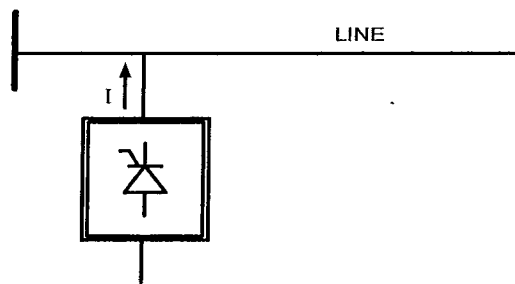
รูปที่ 2.26 (ต่อ) โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม

2.9.2 ตัวควบคุมแบบขนาน

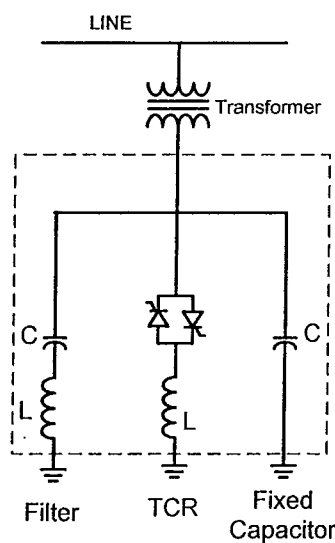
ตัวควบคุมแบบขนาน(shunt controller) จะต่อขนานกับระบบที่บัสเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ก) อุปกรณ์ชนิดนี้อาจมองว่าเป็น อิมพีแดนซ์หรือแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ หรือบางครั้งอาจเป็นทั้งสองอย่างพร้อมกัน หลักการทั่วไปของอุปกรณ์จำพวกตัวควบคุมแบบขนาน



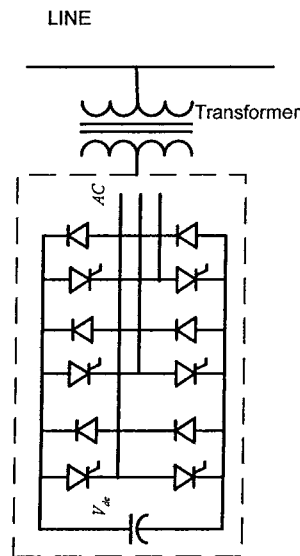
ทั้งหมดจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรักษาระดับแรงดันรอบ ๆ จุดที่เชื่อมต่อโดยอาศัยหลักการฉีดหรือดึงกระแสรีแอกทีฟเพียงอย่างเดียว แต่ในบางกรณีอาจต้องการทั้งกระแสรีแอกทีฟและกระแสจริงเพื่อผลของการควบคุมแรงดันที่ดีขึ้นและเพื่อลดการแกว่งของแรงดัน ตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต (SVC) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์จำพวกของตัวควบคุมแบบขนาน โดยทั่วไป SVC ประกอบด้วยตัวรีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (TCR) ต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่ (FC) หรืออาจต่อขนานกับคาปาซิเตอร์สวิตช์ด้วยไทรสเตอร์ (TSC) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ข) นอกจากนี้อุปกรณ์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของอุปกรณ์ในจำพวกของตัวควบคุมแบบขนาน คือตัวชดเชยแบบสถิต หรือที่นิยมเรียกกันว่า D-STATCOM ซึ่งการทำงานอาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดัน เช่นเดียวกันกับ SSSC แต่จะแตกต่างกันตรงที่จะเชื่อมต่อแบบขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ค)



(ก) ลักษณะการเชื่อมต่อตัวควบคุมแบบขนานเข้ากับระบบ



(ข) ตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต



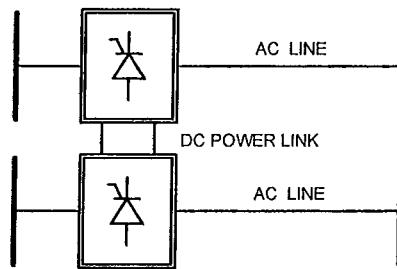
(ค) ตัวชดเชยแบบสถิต

รูปที่ 2.27 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบขนาน

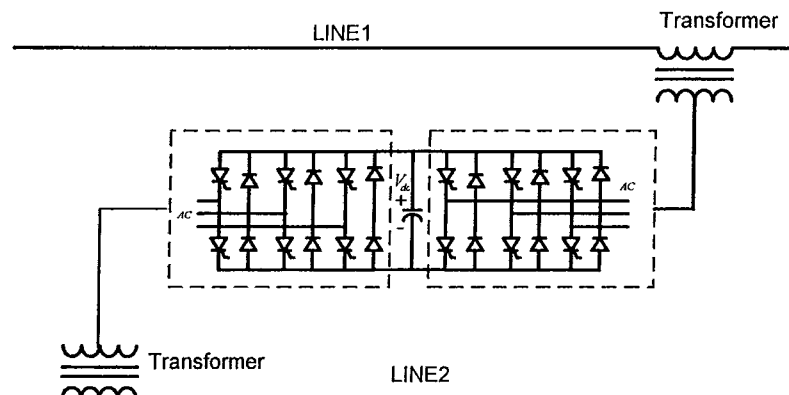


2.9.3 ตัวควบคุมแบบผสม

ก. ตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-อนุกรม (combined series-series controller) เป็นอุปกรณ์ที่รวมอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมที่แยกกันอยู่เข้าด้วยกัน โดยการควบคุมอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมที่ติดตั้งบนสายส่งแต่ละเส้นร่วมกัน บางครั้งเรียกอุปกรณ์นี้ว่าตัวควบคุมแบบรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ก) จากรูปอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมแต่ละตัวจะชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำหรับสายส่งแต่ละเส้นแยกอิสระจากกัน แต่จะส่งกำลังไฟฟ้าจริงถึงกันโดยผ่านสายส่งบัลไฟฟ้ากระแสตรง (dc power link) ที่เชื่อมต่อถึงกัน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าระหว่างสาย (interline power flow controller: IPFC) เป็นอุปกรณ์ที่นำเสนอแนวคิดใหม่ของอุปกรณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ที่อยู่ในจำพวกของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-อนุกรม เพื่อใช้ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งหลายเส้น IPFC ประกอบด้วย SSSC สองตัวที่ต่ออนุกรมกับสายส่งแต่ละเส้น แต่จะเชื่อมต่อกันโดยผ่านระบบเชื่อมต่อกระแสตรงเพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกัน โครงสร้างของ IPFC แสดงไว้ในรูปที่ 2.28 (ข) จากรูป SSSC แต่ละตัวจะต่อกับสายส่งที่แตกต่างกันโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งแต่ละตัวจะทำการควบคุมการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแยกอิสระจากกัน



(ก) ลักษณะการเชื่อมต่อของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-อนุกรมเข้ากับระบบ

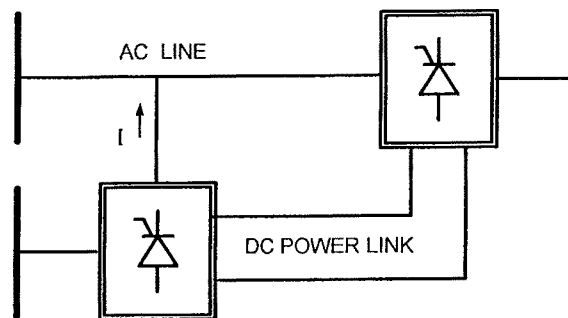


(ข) ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าระหว่างสาย

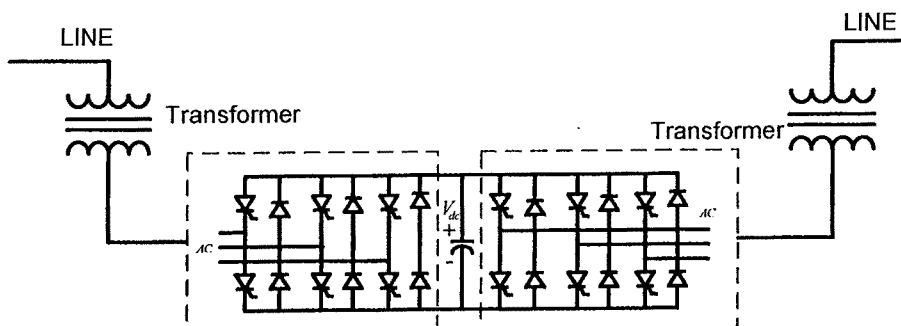
รูปที่ 2.28 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม - อนุกรม



ข. ตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนาน (combined series-shunt controller) เป็นอุปกรณ์ที่รวมอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมและ ตัวควบคุมแบบขนานเข้าด้วยกันโดยการควบคุมอุปกรณ์ทั้งสองร่วมกัน หรือที่เรียกว่าตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (UPFC) ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์นี้กับระบบดังแสดงรูปที่ 2.29(ก) อุปกรณ์นี้จะใช้ตัวควบคุมแบบขนานควบคุมแรงดันรอบ ๆ จุดเชื่อมต่อและตัวควบคุมแบบอนุกรมจะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้น อย่างไรก็ตามเมื่อตัวควบคุมแบบอนุกรมและแบบขนานถูกรวมเข้าด้วยกันอุปกรณ์ทั้งสองจะแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกันผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกัน ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวมเป็นอุปกรณ์หนึ่งในจำพวกของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนาน ซึ่งเป็นการรวมเอาข้อดีของ STATCOM และ SSSC มาทำงานร่วมกัน โดยในส่วนของ STATCOM จะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันรอบ ๆ บัสเชื่อมต่อและในขณะที่ SSSC ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง อุปกรณ์ทั้งสองตัวนี้จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านระบบเชื่อมต่อกระแสตรงเพื่อแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งกันและกัน โครงสร้างของ UPFC ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ข)



(ก) ลักษณะการเชื่อมต่อตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม-ขนานกับระบบ



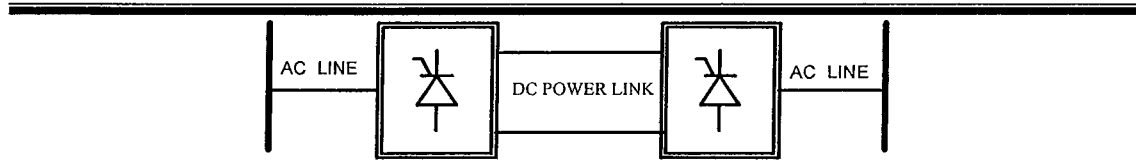
(ข) ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม

รูปที่ 2.29 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม - ขนาน

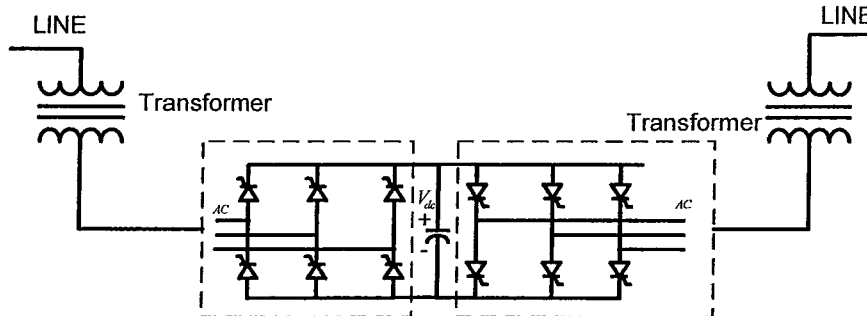


ก. ตัวควบคุมแบบผสมขนาน- ขนาน(combined shunt-shunt controller)

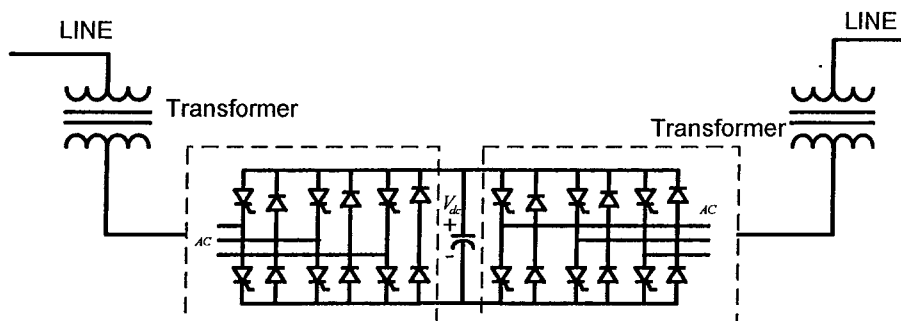
ประกอบด้วยตัวควบคุมที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าสองตัวและเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้า กระแสตรง ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์นี้กับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ก) ในสายส่งกำลังไฟฟ้า กระแสตรงนี้จะส่งผ่านเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น ในส่วนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะแลกเปลี่ยนกัน ระหว่าง ตัวคอนเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้า ดังนั้น ตัวควบคุมแบบขนานจะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงไปยังตัวควบคุมอีกด้านหนึ่งได้โดยการส่งผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC) ถูกจัดให้เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ ที่มีตัวแปลงผันทั้งสองตัวต่อขนานกับระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ข) จากรูปตัวแปลงผัน ทั้งสองของ HVDC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำงาน ตัวแปลงผันทั้งสองตัวจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอาจจะยาวเพียงไม่กี่เมตรหรืออาจเป็นหลายร้อยกิโลเมตรก็ได้ ตัวแปลงผันที่สถานีส่งจะทำหน้าที่เป็นสถานีเรียงกระแส ในขณะที่สถานีรับจะทำหน้าที่เป็นสถานีอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปแล้วระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานีเรียงกระแส ในส่วนของสถานีอินเวอร์เตอร์จะกำหนดให้ทำงานที่มุมจุดชนวนสูงสุดและที่แรงดันกำหนด ปัจจุบันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวแปลงผันแบบไทรสเตอร์ยังคงมีใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบที่มีกำลังไฟฟ้าสูงในย่านหลายร้อย MW ข้อดีของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงคือ มีประสิทธิภาพและมีความมั่นคงสูง แต่อย่างไรก็ตามระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงยังมีข้อเสียคือ มีกระแสฮาร์มอนิกทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรง นอกจากนี้การนำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ อาจได้รับผลกระทบจากการเกิดความผิดปกติของการสับเปลี่ยนการนำกระแสในอุปกรณ์ไทรสเตอร์ ความผิดปกตินี้เกิดขึ้นที่สถานีอินเวอร์เตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีความผิดปกติหรือเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าตก ซึ่งความผิดปกตินี้อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้ อย่างไรก็ตามปัญหานี้แก้ไขได้โดยการนำอุปกรณ์สวิตช์กำลังหยุดนำกระแสด้วยตัวเอง มาใช้งานแทนอุปกรณ์ ไทรสเตอร์ ดังนั้นปัจจุบันจึงได้มีการนำอุปกรณ์จำพวก GTO และ IGBT มาใช้งานเป็นตัวแปลงผันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเบา (HVDC-Light) โดยส่วนใหญ่ตัวแปลงผันเหล่านี้จะเป็นตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ค) ข้อดีของตัวแปลงผันแบบนี้คือ มีฮาร์มอนิกดีกว่าแบบเดิม และยังสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังสามารถรักษาการทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติทางด้านกระแสสลับได้อีกด้วย



(ก) ลักษณะการเชื่อมต่อตัวควบคุมแบบผสมขนาน-ขนานกับระบบ



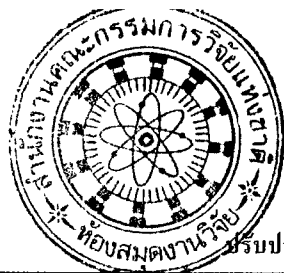
(ข) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



(ค) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบเบ

รูปที่ 2.30 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมขนาน - ขนาน

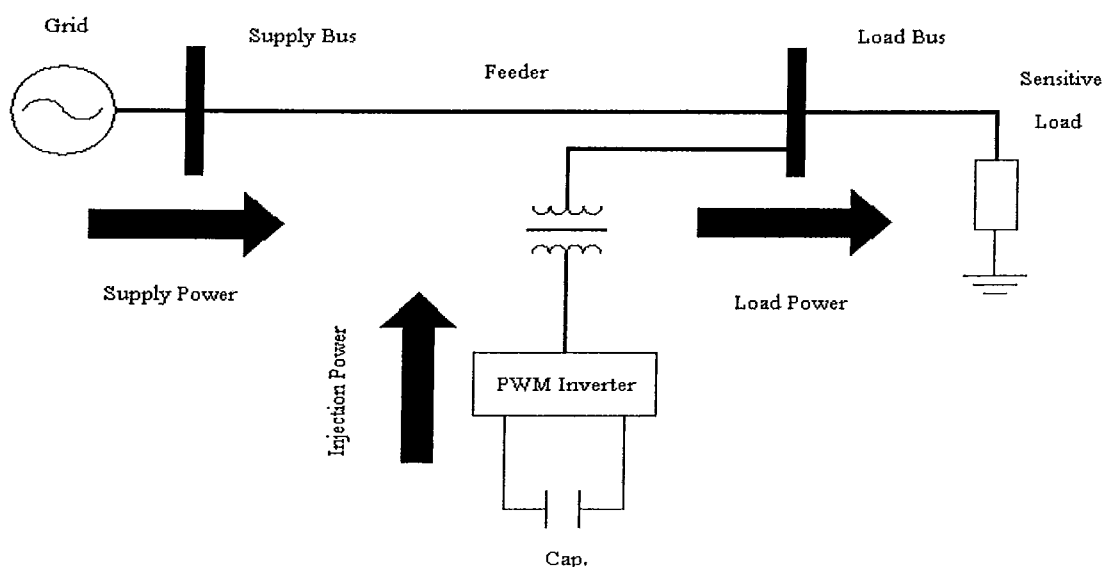
โดยทั่วไปตัวควบคุมแบบขนานจะถูกออกแบบเพื่อควบคุมแรงดันที่บัสที่เชื่อมต่อ ซึ่งจะผลิตกระแสรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่ตัวควบคุมแบบอนุกรมจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมการไหลของกระแส หรือการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เนื่องจากสามารถฉีดแรงดันเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์สายส่งได้ จึงเป็นเหตุให้ตัวควบคุมแบบอนุกรมสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามในกรณีที่แรงดันตกคร่อมที่สายส่งมีมากทำให้เกิดแรงดันตกที่บัส ตัวควบคุมแบบอนุกรมสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัสได้เช่นกัน



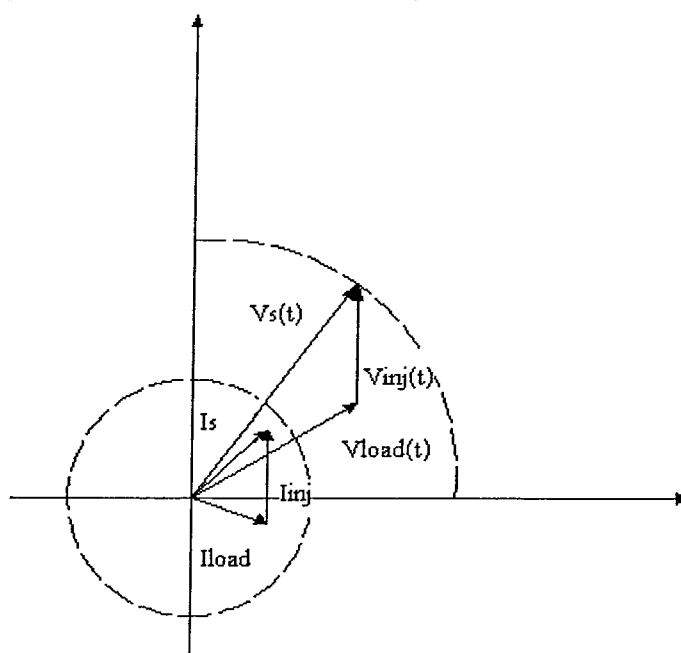
2.10 หลักการการชดเชยแรงดันและการจำลองชุดชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบสถิต

2.10.1 หลักการชดเชยแรงดันแบบสถิต(D-STATCOM)

การทำงานชุดควบคุมการชดเชยแรงดัน จะทำการควบคุมกระแสเพื่อรักษาแรงดันระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อควบคุมค่ายอดแรงดันความถี่และเฟสที่จุดต่อกริด (Grid) เพื่อให้แรงดันที่โหลดได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันมาตรฐาน โครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบขนานแสดงได้ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ วงจรกรองแรงดัน หม้อแปลง และแหล่งเก็บสะสมพลังงาน



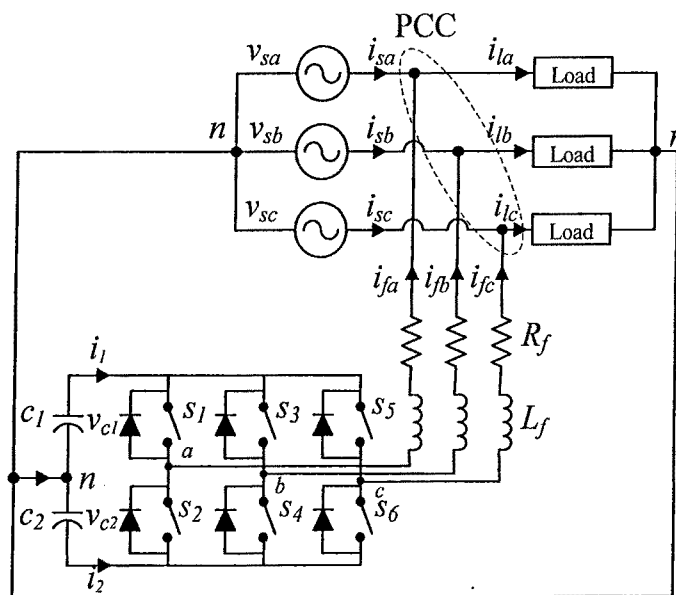
รูปที่ 2.31 ไคอะแกรมเส้นเดียวของชุดชดเชยแรงดันแบบขนาน



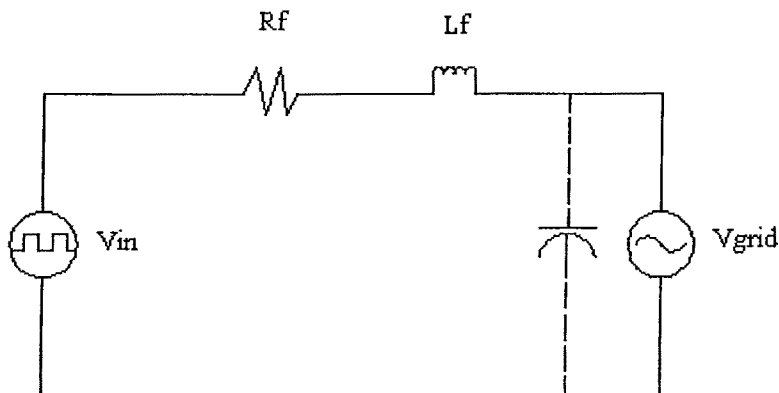
รูปที่ 2.32 เฟสเซอร์แสดงกระบวนการชดเชยแรงดันที่กริด



จากรูปที่ 2.31 แสดงวงจรอุปกรณ์ชุดเซยแรงดันแบบขนาน ซึ่งสามารถเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถควบคุมค่าขอด ความถี่และเฟสได้ โดยปกติจะใช้ชุดเซยแรงดันตกชั่วครู่ เมื่อการพิจารณาถึงการควบคุมแรงดันตกชั่วครู่แล้ว การตรวจจับมีความจำเป็นมาก เพราะต้องมีการเฝ้าระวังอยู่ตลอดเวลา เราไม่รู้ว่แรงดันจะเมื่อเวลาใด รูปที่ 2.32 แสดงเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแส เมื่อเกิดการผิดปกติเกิดขึ้น องค์ประกอบของแรงดันและกระแส จะเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจำเป็นต้องให้อุปกรณ์ชุดเซยแรงดันแบบขนานสร้างแรงดันเท่ากับแรงดันส่วนที่หายไป



รูปที่ 2.33 วงจรการต่อชุดเซยแรงดันขนานเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 2.34 วงจรเทียบเคียงการเซยแรงดันเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จากวารสารวิชาการ วารุณี ศรีสงคราม, และคณะ [5] จะได้สมการการตรวจจับแรงดันด้วยวิธีการ Synchronous frame method (dq detection method) ดังต่อไปนี้



สมการการแปลง แรงดัน abc ให้เป็นแกนหมุน หรือ $V_{abc} \Rightarrow V_{dqo}$

$$\begin{bmatrix} \frac{V_\alpha}{V_\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad \text{.....2.21}$$

ได้สมการกระแสและแรงดันในรูปของสเปซเวกเตอร์ ดังสมการที่ 2.22 และ 2.23

$$V_{sd} = v_{fd} + R_f i_{fd} + L_f \frac{di_{fd}}{dt} - \omega L_f i_{fq} \quad \text{.....2.22}$$

$$V_{sq} = v_{fq} + R_f i_{fq} + L_f \frac{di_{fq}}{dt} + \omega L_f i_{fd} \quad \text{.....2.23}$$

จากการหามุม Phase Lock Loop (Phase Lock Loop เป็นระบบควบคุมความถี่โดยวิธีการเปรียบเทียบเฟสของความถี่ทางด้าน Output กับเฟสความถี่อ้างอิงซึ่งถูกป้อนทางด้าน Input ของระบบ) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$L_f = \frac{d}{dt}(i_{fd} + j i_{fq}) + j \omega (i_{fd} + j i_{fq}) + R_f (i_{fd} + j i_{fq}) = ((V_{fd} + j V_{fq}) - (V_{sd} + j V_{sq})) \quad \text{.....2.24}$$

แยกสมการที่ 2.24 ออกเป็น 3 แกน(axis) คือ o-axis , d-axis และ q-axis จะได้สมการ 2.25-2.30

แกน d

$$L_f \frac{d}{dt} i_{fd} - \omega i_{fq} + R_f i_{fd} = V_{fd} - V_{sd} \quad \text{.....2.25}$$

$$L_f \frac{d}{dt} i_{fd} - L_f \omega i_{fq} + R_f i_{fd} = V_{fd} - V_{sd} \quad \text{.....2.26}$$

แกน q

$$L_f \frac{d}{dt} i_{fq} + \omega i_{fd} + R_f i_{fq} = V_{fq} - V_{sq} \quad \text{.....2.27}$$

$$L_f \frac{d}{dt} i_{fq} - L_f \omega i_{fd} + R_f i_{fq} = V_{fq} - V_{sq} \quad \text{.....2.28}$$

แกน o

$$L_f \frac{d}{dt} i_{fo} + R_f i_{fo} = V_{fo} - V_{so} \quad \text{.....2.29}$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{fd} - V_{sd} + L_f \omega i_{fq} - R_f i_{fd}) \quad \text{.....2.30}$$

เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.26 ,2.28 และ 2.30 หาค่ากระแสในแต่ละแกนของ dqo

$$i_{fd} = \frac{1}{L_f s} (V_{fd} - V_{sd} + L_f \omega i_{fq} - R_f i_{fd}) \quad \text{.....2.31}$$

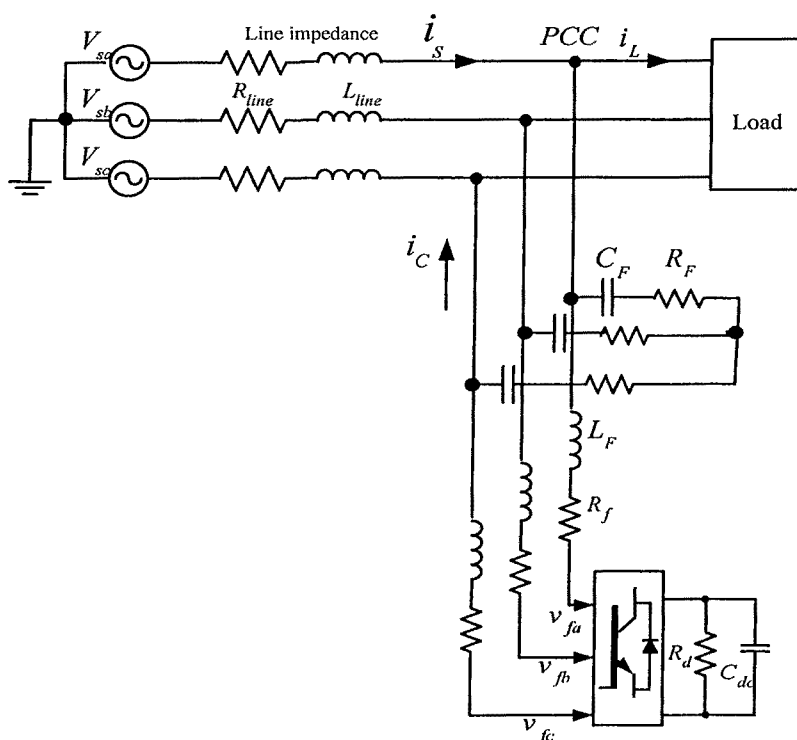


$$i_{fq} = \frac{1}{L_f \cdot s} (V_{fq} - V_{sq} + L_f \omega \cdot i_{fd} - R_f \cdot i_{fq}) \quad \dots\dots\dots 2.32$$

$$i_{fo} = \frac{1}{L_f \cdot s} (V_{fo} - V_{so} - R_f \cdot i_{fo}) \quad \dots\dots\dots 2.33$$

2.10.2 การจำลองชุดชดเชยแบบสถิต (D-STATCOM)

ตัวชดเชยแรงดันแบบสถิตหรือที่นิยม เรียกว่า D-STATCOM (Distribution-Static synchronous compensator) วารุณี ศรีสงคราม[6] เป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟที่ต่อขนานกับระบบสามารถกำเนิดและดูดกลืนกำลังรีแอกทีฟได้ โดยกำลังรีแอกทีฟนี้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยทั่วไปแล้ว D-STATCOM ถูกใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่บัสเชื่อมต่อ นอกจากนี้ D-STATCOM ยังสามารถนำไปใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบได้อีกด้วย โครงสร้างและการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของ D-STATCOM แสดงในรูปที่ 2.35 จากรูปชุดแปลงผันของ D-STATCOM จะมีลักษณะเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าได้รับจากคาปาซิเตอร์กระแสตรงD-STATCOM จะผลิตแรงดัน-ไฟฟ้า กระแสสลับสมดุล 3 เฟสเป็นแรงดันขาออกโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าของระบบที่จุดเชื่อมต่อ (V_{PCC}) การเชื่อมต่อระหว่างชุดแปลงผันกับระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อผ่านรีแอกเตอร์เชื่อมต่อ (L_F) ส่วน R_F แทนการสูญเสียภายในของชุดแปลงผัน



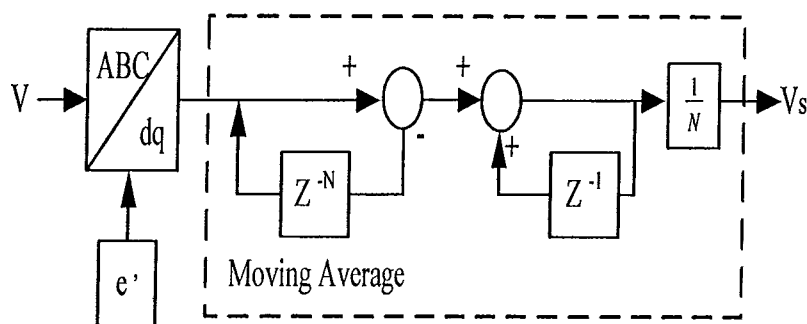
รูปที่ 2.35 โครงสร้างและการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของ D-STATCOM



ในกรณีนี้ D-STATCOM จะสามารถแลกเปลี่ยนได้เฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับระบบเท่านั้น ในส่วนการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงนั้นไม่สามารถทำได้ แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ D-STATCOM สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟก็สามารถทำได้โดยนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เช่น แบตเตอรี่มาเป็นแหล่งจ่ายแทนคาปาซิเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ D-STATCOM สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

2.11 วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

หลังจากที่มีการตรวจจับและคำนวณองค์ประกอบของแรงดันหลักมูลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสและทำให้อยู่ในแกนอ้างอิงของ dq ดังแสดงในสมการที่ 2.21 แล้วนั้น จะใช้วิธีการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันโดยวิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที บนแกนอ้างอิงหมุนที่ความถี่หลักมูล ดังรูปที่ 2.36 ซึ่งเป็นวิธีการอย่างง่ายในทางปฏิบัติจริงและมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วเพียงพอ หลังจากแรงดันที่ตรวจจับได้ถูกแปลงอยู่ในรูปของ dq ซึ่งเดิมมีความถี่ 50 Hz จะกลายเป็นสัญญาณไฟตรง ส่วนความถี่อื่นๆที่ไม่ใช่ 50 Hz ยังคงอยู่ในรูปแบบของสัญญาณ Sine Wave กระแสสลับ จากนั้นนำแรงดันที่ได้มาผ่านตัวกรองแบบมูฟวิงเอฟเวอร์เรจ (Moving Average) (ตัวกรองแบบมูฟวิงเอฟเวอร์เรจ จะทำหน้าที่เฉลี่ยค่าสัญญาณอื่นๆที่ไม่ใช่ 50 Hz ให้อยู่ในรูปของกระแสตรงเพื่อนำไปรวมกับค่าสัญญาณไฟตรงของความถี่ที่ 50 Hz) ดังสมการที่ 2.34 [7] ที่ความยาวครึ่งคาบของความถี่หลักมูล เพื่อแยกเอาเฉพาะสัญญาณไฟตรง นั่นคือขนาดของแรงดันหลักมูลที่ตรวจจับได้นั่นเอง



รูปที่ 2.36 วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad \dots\dots\dots 2.34$$



สรุป

จากการศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE1159-1995 พบว่าแรงดันในระบบไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของความรุนแรงของการเกิดความผิดปกติ สำหรับงานวิจัยนี้เรามุ่งประเด็นแก้ปัญหาการเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกชั่วขณะ แบบไม่สมมาตร หรือการเกิดความไม่สมมาตรขึ้นของแรงดันแต่ละเฟส โดยตามมาตรฐานระบุไว้ว่า ช่วงระยะเวลาเกิดแรงดันตกชั่วขณะ อยู่ที่เวลา 3 วินาที จนถึง 1 นาที ซึ่งมีผลของการเกิดแรงดันตกที่ 0.1 ถึง 0.9 pu. ส่วนสาเหตุของการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ส่งผลให้แรงดันเกิดความไม่สมมาตรขึ้น แบ่งได้เป็น 3 ประเภท นั่นคือ 1 เฟสลงกราวด์ 2 เฟสลงกราวด์ และ ระหว่างเฟสกับเฟส ผลของการเกิดความไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส ทำให้องค์ประกอบของแรงดันมีความแตกต่างกันด้วย นั่นคือ องค์ประกอบลำดับบวก ลบ และ ศูนย์ ในส่วนการควบคุมการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้านั้น งานวิทยานิพนธ์นี้เรามุ่งประเด็นที่จะควบคุมกระแสเพื่อรักษาแรงดันในระบบ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการของ D-STATCOM ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ควบคุมได้ สามารถกำเนิดและดูดกลืนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ตามต้องการโดยการควบคุมการทำงานของชุดแปลงผัน เพื่อนำไปต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า แบบ 3 เฟสต่อไป