

การออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

ปริญญานิพนธ์
ของ
บรรเทิง ศรีโสภณ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา
พฤษภาคม 2543
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอก
อุตสาหกรรมศึกษา ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

..... ประธาน
(อาจารย์ ดร.คทา ชื่นตา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)

คณะกรรมการสอบ

..... ประธาน
(อาจารย์ ดร.คทา ชื่นตา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร.อุปวิทย์ สุวคันธกุล)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ โอบาส สุขหวาน)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ วิศวลาภรณ์)

วันที่ ๕ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2543

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.คทา ชื่นตา อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร อาจารย์ ดร.อุปวิทย์ สุวคันทรกุล และอาจารย์โอภาส สุขหวาน ที่กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการวิจัยอย่างยิ่ง อันเป็นผลก่อให้เกิดความสำเร็จขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ แนะนำในด้านต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ เกษมสันต์ กิรติเลิศบุญ ที่กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือ และเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดสำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณณรงค์ ศรีนาวางศ์ ผู้อำนวยการกองงานวิศวกรรม องค์การเกษตรกรรม และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ อาจารย์สมกิจ กิจพูนวงศ์ และคุณนภา คุณยากร ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ อุดสาหกรรมศึกษา ที่ช่วยเหลือให้กำลังใจตลอดมา

ขอกราบเท้าคุณแม่ทองเจือ ศรีโสภณ ที่ช่วยเหลือ ปลอดภัย และให้กำลังใจอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณ คุณสุปราณี ศรีโสภณ ภรรยา และขอบใจ บุตรสาว นางสาวสุนันทา ศรีโสภณ ที่คอยเป็นกำลังใจ สนับสนุน และส่งเสริมต่อผู้วิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ ชิงศิลป์ คุณลลิตา ชิงศิลป์ และพี่ ๆ ทุกคน

ขอขอบใจ นางสาวสายฝน ศรีโสภณ และนางสาวสุดใจ ศรีโสภณ น้องทั้งสองที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ ที่ได้จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบพระคุณเป็นเครื่องบูชา พระคุณบิดา-มารดา ครู-อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

บรรเทิง ศรีโสภณ.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	2
ความสำคัญของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ	2
กรอบแนวคิดในการวิจัย	3
สมมติฐานการวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ทฤษฎีพื้นฐานของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ	4
การควบคุมแรงดันไฟฟ้า	8
การชดเชยกระแสไฟฟ้า 3 เฟสให้สมดุลเมื่อมีโหลดไม่สมมาตร	20
ชนิดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ	45
การควบคุมกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต	61
คุณสมบัติชนิดอุปกรณ์ที่ศึกษา	72
ทฤษฎีหลักการทำงานของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์ โหลด	80
หลักการทำงานของวงจร	80
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	85
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	91
วัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	91
สถานที่และเวลาในการวิจัย	92
การดำเนินการวิจัย	92

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	97
สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	97
การเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล	97
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	97
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	104
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	104
การดำเนินการวิจัย.....	104
สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	105
อภิปรายผล.....	105
ข้อเสนอแนะ.....	106
บรรณานุกรม	108
ภาคผนวก.....	110
ประวัติผู้วิจัย.....	163

บัญชีตาราง

ตารางที่	หน้า
1	แสดงค่ากระแสไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าและค่าสะสมพลังงานไฟฟ้า ของโหลดตู้อบไฟฟ้า เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด.....91
2	แสดงค่ากระแสไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าและค่าสะสมพลังงานไฟฟ้า ของโหลดตู้อบไฟฟ้า เมื่อไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด94
3	ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการใช้โหลดขดลวดความต้านทานในตู้อบที่วัดได้จาก การใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดและไม่ใช้ 96
4	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าที่วัดได้จากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลดกับไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้า97

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวคิดในการวิจัย	3
2 สัญลักษณ์วงจรไฟฟ้าเฟสเดียวแผนภาพเฟสเซอร์	6
3 สัญลักษณ์วงจรแผนภาพเฟสเซอร์การแก้ตัวประกอบกำลัง	7
4 สัญลักษณ์วงจรส่งจ่ายกำลังและแผนภาพเฟสเซอร์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกำลังรีแอกทีฟ	9
5 สัญลักษณ์ ภาพประกอบแรงดันของระบบจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลง ของโหลด	13
6 ภาพประกอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังรีแอกทีฟโดยประมาณ ...	17
7 สัญลักษณ์ ภาพประกอบการชดเชยกำลังรีแอกทีฟด้วยค่าความเหนี่ยวนำ	19
8 สัญลักษณ์ ภาพประกอบการชดเชยกำลังรีแอกทีฟด้วยประจุไฟฟ้า	20
9 สัญลักษณ์ การชดเชยโหลดด้านทานเฟสเดียวให้สมดุลย์	23
10 ภาพประกอบ การโหลดไฟฟ้า 3 เฟสทั่วไปแทนด้วยอิมพีแดนซ์เมื่อต่อแบบ y และ ข) แทนด้วยแอมิตอร์เมื่อต่อแบบเดลต้า	24
11 สัญลักษณ์ ภาพประกอบการชดเชยในส่วนของจินตภาพ B_{ab} ของ ค่าแอมิตอร์ Y_{ab} ด้วยค่าชีวเซบแทนซ์ B_{ab}	25
12 สัญลักษณ์ การชดเชยให้สมดุลย์ของโหลดความต้านทานเฟสเดียวด้วยความจุ ไฟฟ้า	26
13 สัญลักษณ์ ภาพประกอบเฟสเซอร์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโหลดเฟสเดียว	27
14 ภาพประกอบหลักการเบื้องต้นการชดเชยสามเฟสที่ไม่สมดุลย์	29
15 ภาพประกอบโหลดสามเฟสไม่สมดุลย์ แทนด้วยวงจรเทียบเคียงเดลตาคต่อการ ชดเชยแบบเดลตา	30
16 ภาพประกอบการชดเชยกำลังรีแอกทีฟเทอมของ 3 เฟสบวกและลำดับเฟสลบ ด้วยการต่อแอมิตอร์แบบเดลต้า	34
17 ภาพประกอบเฟสเซอร์ของการชดเชยในเทอมส่วนประกอบสมมาตร	37
18 ภาพประกอบการต่อไทรสเตอร์กับตัวเหนี่ยวนำและลูกคลื่นกระแสของ TCR	46
19 ภาพประกอบแสดงลูกคลื่นกระแสของ TCR ที่ทำมุมกระแส	48

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
20 ภาพประกอบ ชัสเซปแดนซ์หลักมูลของ TCR	49
21 ภาพประกอบ แสดงการเกิดกระแสฮาร์มอนิก TCR	50
22 ภาพประกอบ แสดงรูปคลื่นกระแสในสายและแอสเฟสของ TCR 3 เฟสต่อแบบเคลด้า	52
23 ภาพประกอบ การสวิตช์ตัวเก็บประจุ	53
24 ภาพประกอบ สืบคลานการตัวเก็บประจุในอุดมคติ	54
25 ภาพประกอบ วงจรการสวิตช์ตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติโดยต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรม กับตัวเก็บประจุ	55
26 ภาพประกอบ ขนาดของแรงดันและกระแสแปรผันตามค่าตัวประกอบ	57
27 ภาพประกอบ ขนาดของกระแสสั่น (Oscillatory) ที่ไทรสเตอร์สวิตช์ $V = V_{\infty}$	59
28 ภาพประกอบ ขนาดของกระแสแกว่ง (Oscillatory) ที่ไทรสเตอร์สวิตช์ ที่เวลา $dv/dt = 0$	60
29 ภาพประกอบ แรงดันตัวเก็บประจุหลังจากไทรสเตอร์หยุดนำกระแส	61
30 ภาพประกอบ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟในช่วง j th	62
31 ภาพประกอบ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟในช่วงเวลาที่ j th + 1	63
32 ภาพประกอบ ระบบที่ใช้พิจารณาการควบคุมแรงดัน	65
33 ภาพประกอบ แผนภาพกรอบของการควบคุมการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต	66
34 ภาพประกอบ การควบคุมแบบปิดของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต	66
35 ภาพประกอบ วงจรเทียบเคียงที่ใช้ในการควบคุมแรงดันตามภาพที่ 39	67
36 ภาพประกอบ การควบคุมแบบปิดของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตและ เพิ่มคุณสมบัติการป้องกันกระแสเพื่อปรับความชันของแรงดันอ้างอิง	70
37 ภาพประกอบ คุณสมบัติการควบคุมแรงดันของ SVC	70
38 ภาพประกอบ แผนภาพกรอบการควบคุมโหลดไม่สมดุลและแรงดันของ TCR/FC	71
39 สัญลักษณ์ความต้านทานคงที่	72
40 สัญลักษณ์ความต้านทานแบบปรับค่าได้	72
41 สัญลักษณ์และรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบคงที่	73
42 สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	73

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
43 สัญลักษณ์รูปร่างของไดโอด.....	74
43 สัญลักษณ์และรูปร่างของไดโอดเปล่งแสง	75
44 สัญลักษณ์และรูปร่างของบริดจ์ไดโอด	75
45 สัญลักษณ์และตัวทรานซิสเตอร์	76
46 สัญลักษณ์ของไครแอค	77
47 สัญลักษณ์รูปร่างของ IC	78
48 สัญลักษณ์รูปร่างของสวิทช์	78
49 สัญลักษณ์รูปร่างซีเล็กเตอร์สวิทช์	79
50 สัญลักษณ์รูปร่างของหม้อแปลงแกนเหล็ก	80
51 สัญลักษณ์รูปวงจรการทำงานของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานส์ โหลด.....	82
52 สัญลักษณ์รูปร่างการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงในแผ่นปรินต์	83
53 สัญลักษณ์รูปร่างแบบวงจรเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานส์ โหลด	84

ภูมิหลัง

พลังงานนับได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดของการพัฒนาและความเจริญของโลก นับแต่มนุษย์เริ่มใช้พลังงานของตนเองที่ได้จากอาหาร และต่อมาก็ใช้พลังงานสัตว์ ฟืน ถ่านไม้ พลังน้ำ พลังลม ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นลำดับมา ปัจจุบันนี้เครื่องกล เครื่องทุ่นแรง ตลอดจนสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน การอุตสาหกรรมหรือการสื่อสารโทรคมนาคม ก็ได้มีการออกแบบ และสร้างขึ้นโดยอาศัยแหล่งพลังงาน เช่น ไฟฟ้า น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น จะเห็นว่าพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สำคัญที่บ่งบอกระดับการพัฒนาประเทศ เพราะเป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคม อีกทั้งยังเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ใช้ในการสนับสนุนให้พัฒนาการพัฒนาด้านต่างๆ สามารถขยายตัวออกไปอย่างกว้างขวางและรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมสวัสดิการและความเป็นอยู่ที่ดีของประชาชนอีกด้วย ครรชนการใช้ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ยังคงบ่งบอกถึงความเจริญก้าวหน้าในทางเศรษฐกิจอย่างหนึ่ง ดังนั้นประเทศที่มีความเจริญก้าวหน้า เศรษฐกิจสูง จึงเป็นประเทศที่มีการพัฒนาพลังงานไฟฟ้าในระดับสูงเช่นกัน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. 2536 : 12) ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยมีเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งแบ่งเป็นอุตสาหกรรมหลายขนาดและหลายประเภท โรงงานอุตสาหกรรมแต่ละโรงงานมีการใช้พลังงานหลายรูปแบบแตกต่างกันไป เช่น พลังงานจากเชื้อเพลิง พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งปริมาณการใช้จะต่างกันตามขั้นตอนการใช้ และค่าใช้จ่ายของพลัง เม ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมหรือการจัดการในการใช้พลังงานของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆ (พุดิรัตน์ เปี่ยมวงศ์จิตต์. 2541 : 1) จากสถานการณ์วิกฤติทางเศรษฐกิจในช่วงปี พ.ศ. 2540 และพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2529 ทำให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเห็นความสำคัญเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงาน ทั้งนี้เพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีผลกำไรมากขึ้น (สมนึก ชีระกุล พิสุทธิ. 2529 : 26) จึงจำเป็นต้องจัดการในการใช้พลังงานอย่างประหยัด และมีประสิทธิภาพ แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคตการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงได้กำหนดแผนการจัดการด้านไฟฟ้า โดยจำแนกกลุ่มการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทย ออกเป็น ภาคอุตสาหกรรม ประมาณร้อยละ 45 ภาคธุรกิจ ประมาณ ร้อยละ 30 ภาคที่อยู่อาศัย ประมาณ ร้อยละ 25 (โครงการประชาร่วมใจประหยัดไฟฟ้าการไฟฟ้าฝ่ายผลิต. 2539 : 12)

จะเห็นได้ว่า ในสภาพปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้น แต่ทรัพยากรที่จำเป็นต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันมีอยู่อย่างจำกัด ถ้าความต้องการการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศมี

เพิ่มมากขึ้น (สถานภาพการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2538 : 12) ปริมาณการใช้ไฟฟ้าคิดจากค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าคูณด้วยค่ากระแสไฟฟ้าและค่าตัวประกอบทางไฟฟ้า การประหยัดพลังงานไฟฟ้ามีอยู่หลายรูปแบบ เช่น การปิด-เปิดไฟฟ้า เป็นเวลา ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวกับสวิตช์ควรใช้งานคราวเดียวพร้อม ๆ กัน เช่น รีดผ้า การดูแลทำความสะอาดอุปกรณ์ไฟฟ้าอยู่อย่างสม่ำเสมอ แต่การลดค่าพลังงานกระแสไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นว่าช่วยประหยัดได้ในส่วนหนึ่ง แต่ถ้าเป็นระบบภาคอุตสาหกรรมแล้วรูปแบบจะแตกต่างกันคือเป็นอุปกรณ์ในการผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีเครื่องอุปกรณ์ช่วยลดพลังงานกระแสไฟฟ้าเข้ามาต่อเข้ากับระบบของงาน

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจคิดออกแบบสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลดเพื่อใช้ลดกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะสามารถเห็นข้อแตกต่างในการใช้กระแสไฟฟ้าระหว่างที่มีเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด ต่อเข้ากับวงจร กับการไม่มีเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด ผู้วิจัยคาดว่าการทำงานของเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด จะสามารถช่วยในโรงงานอุตสาหกรรม ประหยัดพลังงานไฟฟ้า

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ตั้งความมุ่งหมาย ดังนี้

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

ความสำคัญของงานวิจัย

ได้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ที่สามารถนำไปใช้เพื่อประหยัดกระแสไฟฟ้าได้

ขอบเขตของการวิจัย

ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ใช้กับไฟฟ้า 3 เฟส แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ เพื่อใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะนำไปทดลองใช้กับตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ขนาด 9 กิโลวัตต์ 380 โวลต์ ขององค์การเกษตรกรรม กระทรวงสาธารณสุข

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. บาลานซ์โหลด หมายถึง การทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสเท่ากัน เพื่อเฉลี่ยให้แต่ละเฟสรับภาระโหลด
2. กระแสไฟฟ้า หมายถึง พลังงานรูปหนึ่งที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์

3.การออกแบบ หมายถึง การกำหนดรูปแบบวงจร รูปร่าง เครื่องมือ และส่วนประกอบของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

4.การสร้าง หมายถึง การนำอุปกรณ์ที่ได้จากการออกแบบมาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ให้สามารถทำงานได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด

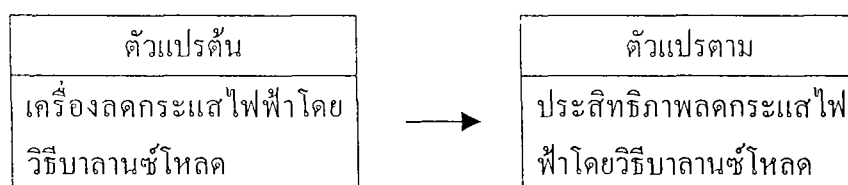
5.ประสิทธิภาพ หมายถึง ความสามารถของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ประหยัดกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าการทำงานของโหลดที่ไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

6.ตู้อบไฟฟ้า หมายถึง อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะ รูปทรงสี่เหลี่ยม และใช้ขดลวดความร้อน ขนาด 9 กิโลวัตต์ 380 โวลต์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับอบฆ่าเชื้อภาชนะต่างๆในระบบผลิตยา

7.เครื่องลดกระแสไฟฟ้า หมายถึง อุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับวงจรทำให้ค่าของกระแสไฟในขณะที่มีโหลดใช้งานลดลง

กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สร้างกรอบแนวคิดไว้ดังนี้



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

สมมติฐานในการวิจัย

เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด มีประสิทธิภาพโดยสามารถลดกระแสไฟฟ้าได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ ทำให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้ โดยนำเสนอข้อมูลจากการศึกษา ดังนี้

1. ทฤษฎีพื้นฐานของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ
2. การควบคุมแรงดัน
3. การชดเชยกระแส 3 เฟสให้สมดุลเมื่อมีโหลดไม่สมมูล
4. ชนิดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ
5. การควบคุมกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต
6. คุณสมบัติชนิดและอุปกรณ์ที่ศึกษา
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

ตัวประกอบกำลัง Power Factor (P.F.) และการแก้ไข [1] , [2]

พิจารณาวงจรไฟฟ้าเฟสเดียวตามภาพประกอบที่ 2 โหลด L ต่ออยู่กับไฟฟ้าแรงดัน V ตามแผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor Diagram) ภาพประกอบที่ 2 ให้แรงดัน V เป็นตัวอ้างอิง กระแส I_R มีเฟสตรงกับ (in phase) แรงดัน V และกระแส I_x ทำมุมกับแรงดัน V 90 องศา กระแสโหลด I_L จะมีเฟสต่างกับแรงดันเป็นมุม ϕ_L โดยแทนด้วยอิมพีแดนซ์ Z_L หรือแอดมิตแตนซ์ Y_L

$$\begin{aligned} Z_L &= R_L + jX_L \\ Y_L &= G_L - jB_L \end{aligned} \quad (2.1)$$

กระแสไฟฟ้าที่โหลด L

$$\begin{aligned} I_L &= V(G_L - jB_L) \\ &= VG_L - jVB_L \\ &= I_R - jI_x \end{aligned} \quad (2.2)$$

กำลังปรากฏว่า S ภาพประกอบที่ 2 ประกอบด้วยกำลังแอกทีฟ P ซึ่งเป็นกำลังที่นำไปใช้งาน โดยเปลี่ยนเป็นกำลังต่าง ๆ เช่น กำลังความร้อน กำลังกล เป็นต้น และกำลังรีแอกทีฟ Q ซึ่งไม่สามารถใช้ประโยชน์จากกำลังนี้ได้ แต่มันเป็นคุณสมบัติประจำตัวของโหลดนั้น ๆ เช่น ในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ Q จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก เป็นต้น

$$\begin{aligned} S_L &= VI_L^* \\ &= V^2 G_L + jV^2 B_L \\ &= P_L + jQ_L \end{aligned} \quad (2.3)$$

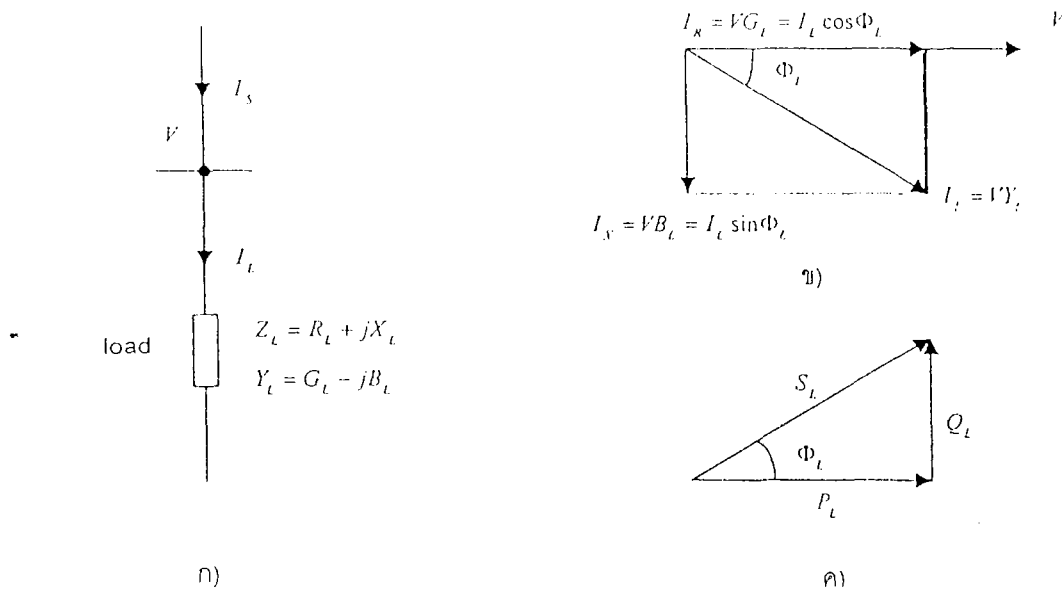
กระแส $I_S = I_L$ ซึ่งกระแสที่จ่ายจากแหล่งจ่าย จะมากกว่าที่ต้องการใช้ในกำลังแอกทีฟซึ่งเป็นไปตามตัวประกอบ

$$\frac{I_L}{I_R} = \frac{1}{\cos \phi_L} \quad (2.4)$$

$\cos \phi_L$ ก็คือค่าประกอบกำลัง เพราะเนื่องจาก

$$\cos \phi_L = \frac{P_L}{S_L} \quad (2.5)$$

หมายความว่า $\cos \phi_L$ คือ ตัวประกอบของกำลังปรากฏว่า S_L ที่สามารถเปลี่ยนเป็นกำลังที่นำไปใช้งาน P_L [1] ในขณะที่กำลังแอกทีฟคงที่ เราสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งจะถูกเพิ่มขึ้นโดยตัวประกอบ $\frac{1}{\cos \phi_L}$ ตามหลักการแล้วการชดเชยตัวประกอบกำลัง อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟจะต้องขนานกับโหลดและอยู่ใกล้กับตำแหน่งของโหลดมากที่สุด ซึ่งอุปกรณ์จะมีเฉพาะกำลังรีแอกทีฟเท่านั้นและจะต้องมีค่าตรงข้ามกับกำลังรีแอกทีฟของโหลด



ภาพประกอบ 2 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียวและแผนภาพเฟสเซอร์

ความต้องการชดเชยกำลังแอกทีฟขนาด Q_k ได้จากความแตกต่างระหว่างกำลังรีแอกทีฟที่เกิดจากโหลด Q_L และค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของกำลังรีแอกทีฟในระบบ Q_s เพื่อที่จะให้ค่าตัวประกอบกำลังอยู่ในค่าที่ยอมรับได้

$$Q_k = Q_s - Q_L \quad (2.6)$$

จากวงจรภาพประกอบที่ 3 กระแสจากแหล่งจ่ายจะเท่ากับผลรวมของกระแสโหลดและกระแสจากอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

$$I_s = I_L + I_k \quad (2.7)$$

ถ้าค่าตัวประกอบกำลังที่เกิดจากโหลด $\cos \phi_L$ ขณะที่ไม่มีกระแสชดเชยสามารถวัดได้ เพื่อที่จะชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้ได้ตามค่าที่ต้องการ ϕ_s ตามภาพประกอบที่ 3 ขนาดของกำลังรีแอกทีฟชดเชยหาได้จาก

$$Q_k = PL (\tan \phi_s - \tan \phi_L) \quad (2.8)$$

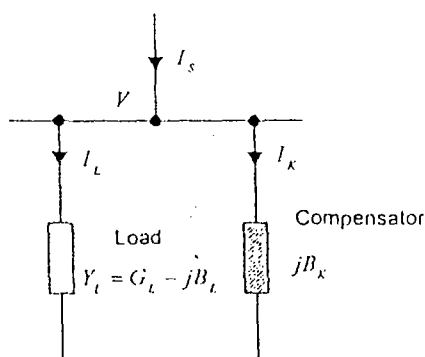
ถ้าต้องการชดเชยไว้ให้เฉพาะค่ากำลังแอกทีฟเท่านั้น ขนาดกำลังรีแอกทีฟที่ชดเชยจะเท่ากับขนาดกำลังแอกทีฟของโหลด $|B_K| = |B_L|$

$$\begin{aligned} I_S &= V(G_L - jB_L + jB_K) \\ &= VG_L \\ I_S &= I_R \end{aligned} \quad (2.9)$$

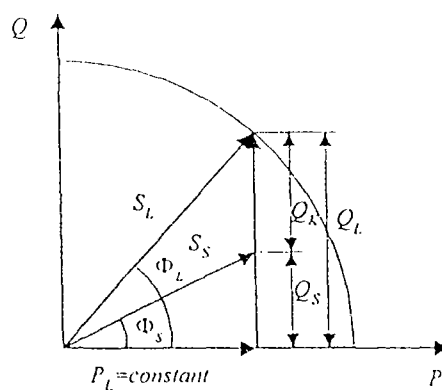
ซึ่ง I_S จะเหลือเฉพาะ I_R และ $\cos\phi_S$ เท่ากับ 1 แหล่งจ่าย สามารถจ่ายกำลังแอกทีฟให้กับโหลดได้เต็มที่ โดยกำลังรีแอกทีฟที่โหลดต้องการ Q_L จะได้รับการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ Q_K กระแสไฟฟ้าและกำลังของการชดเชยคือ

$$\begin{aligned} I_K &= VY_K = jVB_K \\ S_K &= P_K - jQ_K \\ &= VI_L^* \\ &= -jV^2B_K \end{aligned} \quad (2.10)$$

ดังนั้น $P_K = 0$ และ $Q_K = -V^2B_K = -Q_L$ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟไม่ต้องการพลังงานกล โดยทั่วไปโหลดจะมีกำลังรีแอกทีฟที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ ฉะนั้น การชดเชยจึงต้องการเก็บตัวประจุ (B_K เป็นบวกและ Q_K เป็นลบ เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ชดเชยเป็นโหลดด้วย)



ก)



ข)

ภาพประกอบ 3 วงจรและแผนภาพเฟสเซอร์ของการแก้ตัวประกอบกำลัง

กำลังรีแอกทีฟที่ซดเซชเพื่อให้ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 มีความสัมพันธ์กับกำลังรีแอกทีฟของโหลด

$$\begin{aligned} Q_L &= P_L \tan \phi_L \\ Q_K &= -P_L \tan \phi_L \end{aligned} \quad (2.11)$$

ความสัมพันธ์กับกำลังปรากฏ

$$\begin{aligned} Q_L &= S_L \sin \phi_L \\ Q_K &= -S_L \sin \phi_L \\ &= -S_L \sqrt{1 - \cos^2 \phi_L} \end{aligned} \quad (2.12)$$

และพิกัดกระแสของอุปกรณ์ซดเซชกำลังรีแอกทีฟ

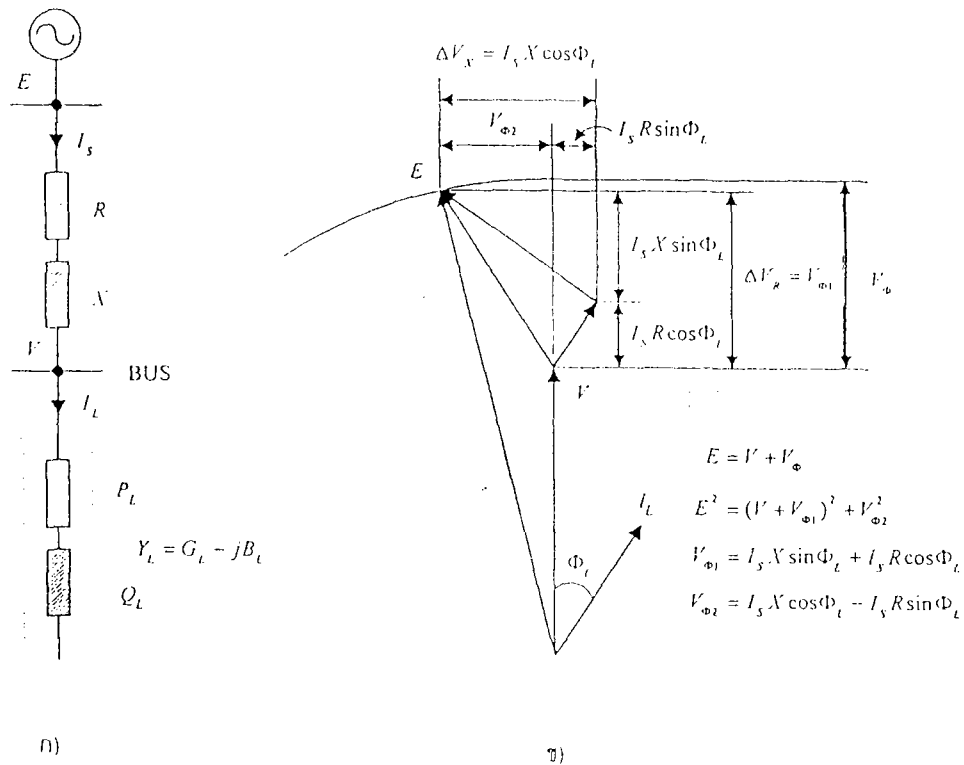
$$I_K = \frac{Q_K}{V} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติแล้ว อุปกรณ์ซดเซชกำลังรีแอกทีฟ เช่น ตัวเก็บประจุขนานกับระบบอาจจะแบ่งเป็นหลายชุด สวิตช์ระบบตามความต้องการของโหลดในแต่ละเวลา หรืออาจจะเป็นอุปกรณ์ซดเซชพิเศษ เช่น ซิงโครไนส์เตอร์มอเตอร์หรืออุปกรณ์ซดเซชกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตี ซึ่งสามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะกล่าวในภายหลัง

การควบคุมแรงดัน (Voltage Regulation)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ต้นทาง หรือการเพิ่มหรือลดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า ทำให้แรงดันปลายทางที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แรงดันของระบบสามารถแทนด้วยภาพประกอบที่ 4 ความต้องการการซดเซชกำลังรีแอกทีฟ Q_K เมื่อต้องการควบคุมแรงดัน จะได้จากความแตกต่างระหว่างกำลังรีแอกทีฟที่เกิดจากโหลดและค่าที่ต้องการให้กำลังรีแอกทีฟให้มีระบบเพื่อรักษาระดับแรงดัน

$$Q_K = Q_S - Q_L \quad (2.14)$$



ภาพประกอบ 4 วงจรส่งจ่ายกำลัง และแผนภาพเฟสเซอร์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกำลังรีแอกทีฟ

การหาค่ากำลังรีแอกทีฟ Q_K ต้องหาค่ากำลังรีแอกทีฟ Q_S ที่ระบบต้องการก่อน ซึ่งไม่ใช่ สำหรับการแก้ตัวประกอบกำลัง แต่เป็นค่า กำลังรีแอกทีฟที่ให้แรงดันไฟฟ้าของระบบเปลี่ยนแปลง ไป ΔV ที่ยอมรับได้

$$\Delta V = V_{Lmax} - V_{Lmax} \quad (2.15)$$

ถ้าให้แรงดันสูงสุดเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายหรือแรงดันที่บัส (Bus) ในกรณีที่ไม่มี โหลดคือ E และค่าแรงดันต่ำสุด เมื่อมีการชดเชยด้วยกำลังรีแอกทีฟคือค่า V

$$\Delta V = E - V \quad (2.16)$$

เพื่อที่จะคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง จะแทนด้วย โหลดเพียงกันเดียวต่ออยู่กับแหล่งจ่ายกำลังด้วยสายส่ง ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทาน R และความเหนี่ยวนำ X โดยโหลดแทนด้วยค่าของกำลังแอกทีฟ P_L และกำลังรีแอกทีฟ Q_L ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV และ Q_s ตามแผนภาพเฟสเซอร์ภาพประกอบที่ 11 ข) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E &= V + V_{\phi} \\ E^2 &= (V + V_{\phi_1})^2 + (V_{\phi_2})^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$V_{\phi_1} = LX \sin \phi_L + IR \cos \phi_L \quad (2.18)$$

$$V_{\phi_2} = LX \cos \phi_L - IR \sin \phi_L \quad (2.19)$$

จากสมการ (1.17) , (2.18) และ (2.19) จะได้

$$E^2 = V^2 + 2VI (R \cos \phi_L + X \sin \phi_L) + I^2(R^2 + X^2) \quad (2.20)$$

$$0 = E^2 - 2VI (R \cos \phi_L + X \sin \phi_L) - I^2(R^2 + X^2)$$

จากวงจรในภาพประกอบที่ 10 ก) อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

$$Z = R + jX$$

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

กำลังปรากฏของโหลด

$$S_L = P_L + jQ_L \quad (2.21)$$

$$S_L = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2}$$

$$\sin \phi_L = \frac{Q_L}{S_L}, \cos \phi_L = \frac{P_L}{S_L} \quad (2.22)$$

การเสไฟฟ้า

$$I = \frac{S_L^*}{V} = \frac{P_L - jQ_L}{V} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.20), (2.21), (2.22) และ (2.23) จะได้ว่า

$$E^2 - V^2 - 2V \frac{S_L}{V} \left(R \frac{P_L}{S_L} + X \frac{Q_L}{S_L} \right) - \left(\frac{S_L}{V} \right)^2 Z^2 = 0 \quad (2.24)$$

$$E^2 - V^2 - 2(RP_L + XQ_L) - \left(\frac{S_L}{V} \right)^2 Z^2 = 0$$

จากสมการที่ (2.24) ถ้ากำลังรีแอกทีฟ Q_L ทำให้แรงดันของระบบตกลง ถ้า Q_S เป็นกำลังรีแอกทีฟที่ทำให้ค่าแรงดันในระบบยอมรับได้หลังจากมีการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแล้ว แทน Q_L ด้วย Q_S จะได้

$$E^2 - V^2 - 2RP_L - 2XQ_S - \left(\frac{S_S Z}{V} \right)^2 = 0$$

$$E^2 - V^2 - 2RP_L - 2XQ_S - (P_L^2 + Q_S^2) \frac{Z^2}{V^2} = 0$$

$$Q_S^2 + \frac{V^2}{Z^2} 2XQ_S + \left(P_L^2 + 2RP_L \frac{V^2}{Z^2} + \frac{V^4}{Z^2} - \frac{E^2 V^2}{Z^2} \right) = 0 \quad (2.25)$$

จากสมการกำลังสองบริบูรณ์

$$Q_S = \frac{V}{Z} \left[\sqrt{\left(V \frac{X}{Z} \right)^2 + E^2 - V^2 - P_L \left(2R + P_L \frac{Z^2}{V^2} \right)} - V \frac{X}{Z} \right] \quad (2.26)$$

กำลังรีแอกทีฟที่ต้องชดเชยได้จากสมการ (2.14) เพื่อที่สามารถแทนค่าของแรงดัน V กับฟังก์ชันของโหลด (P_L และ Q_L) ใช้อัตราส่วน R/X ของสายส่ง

$$R \cos \phi_L + X \sin \phi_L = \sqrt{R^2 + X^2} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) \quad (2.27)$$

กำหนด กำลังปรากฏ ที่เกิดจากการลัดวงจรที่บัส V

$$S_{sc} = \frac{E^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.28)$$

มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสของโหลด

$$\phi_L = \arctan \frac{Q_L}{P_L} \quad (2.29)$$

สมการที่ (2.20) , (2.23) , (2.27) , (2.28) และ (2.29)

$$E^2 - V^2 - 2S_L \sqrt{R^2 + X^2} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) - \left(\frac{S_L}{V} \right)^2 (R^2 + X^2) = 0 \quad (2.30)$$

$$\frac{E^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} - \frac{V^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} - 2S_L \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) - \left(\frac{S_L}{V} \right)^2 \sqrt{R^2 + X^2} = 0$$

เอา $\frac{2E^2}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ หารตลอดสมการ (2.30)

$$\frac{1}{2} - \frac{V^2}{2E^2} - \frac{S_L}{S_{sc}} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) - \left(\frac{S_L}{V} \right)^2 \frac{1}{2S_{sc}} \sqrt{R^2 + X^2} = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{2} - \frac{S_L}{S_{sc}} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) - \frac{V^2}{2E^2} \left(\frac{S_L}{S_{sc}} \right)^2 \frac{1}{2} \frac{E^2}{V^2} = 0$$

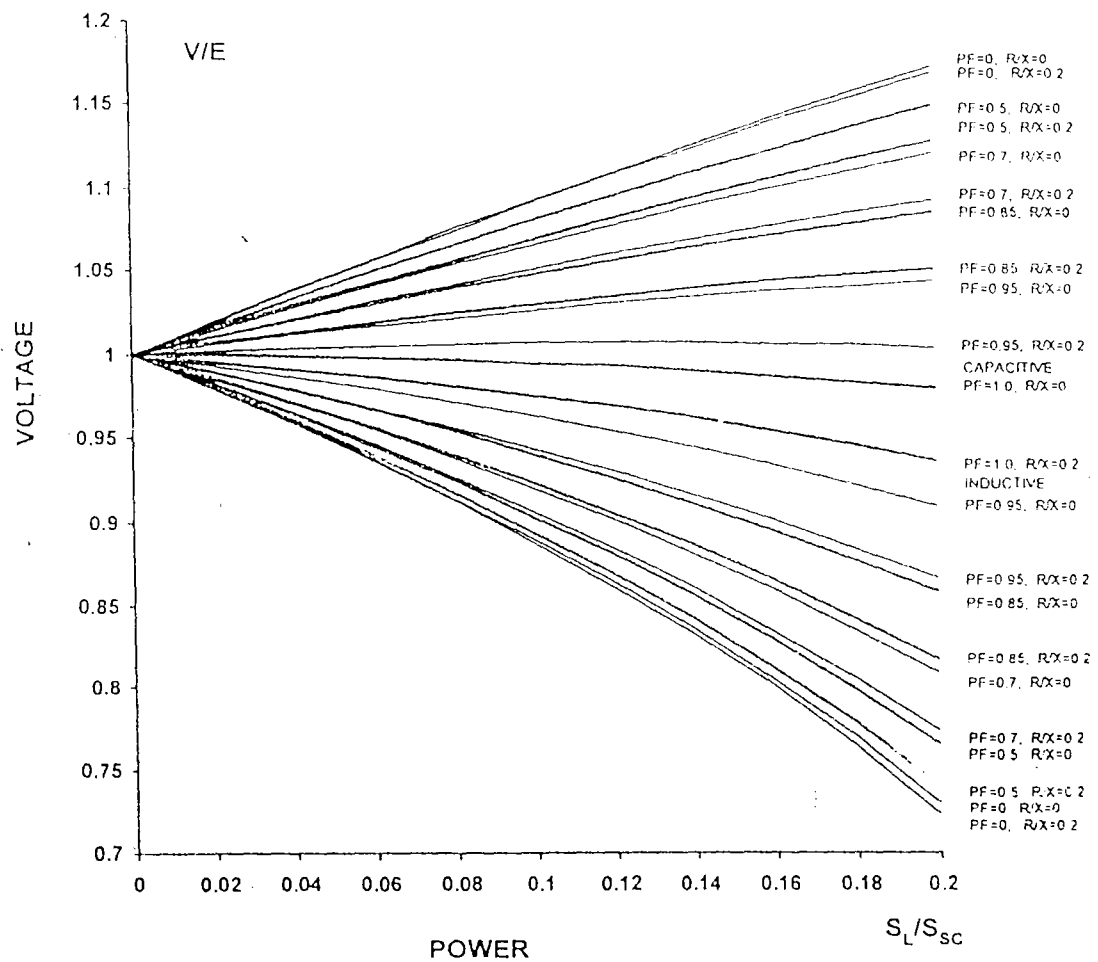
$$\text{กำหนด } K = \frac{1}{2} - \frac{S_L}{S_{sc}} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) \quad (2.32)$$

จาก (2.31) และ (2.32)

$$V^2 = E^2 \left[\sqrt{K^2 - \left(\frac{S_L}{S_{SC}} \right)^2} + K \right]$$

(2.33)

$$\frac{V}{E} = \sqrt{\sqrt{\left[\frac{1}{2} - \frac{S_L}{S_{SC}} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right) \right]^2 - \left(\frac{S'_L}{S_{SC}} \right)^2} + \frac{1}{2} - \frac{S_L}{S_{SC}} \sin \left(\phi_L + \arctan \frac{R}{X} \right)}$$



ภาพประกอบ 5 แรงดันของระบบจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด

การคุมครองแรงดัน (Voltage Regulation) กำหนดโดยสัดส่วนผลต่างของแรงดันขณะที่ไม่มีโหลดและแรงดันขณะมีโหลดกับแรงดันที่ขณะมีโหลด ซึ่งแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนี้ก็คือ แรงดันที่ตกคร่อมที่สายส่งเนื่องจากกระแสโหลดและอิมพีแดนซ์ของสายส่งตามภาพประกอบที่ 11

$$\text{Voltage Regulation} = \frac{|E| - |V|}{|V|} \quad (2.34)$$

$$\Delta V = E - V = I_s Z \quad (2.35)$$

จากสมการ (2.21) , (2.23) และ (2.35)

$$\begin{aligned} \Delta V &= (R + jX) \left[\frac{P_L - jQ_L}{V} \right] \\ &= \frac{RP_L + XQ_L}{V} + j \frac{XP_L - RQ_L}{V} \\ &= \Delta V_R + j\Delta V_X \end{aligned} \quad (2.36)$$

จากภาพประกอบที่ 4 แสดงให้เห็นว่าขนาดและมุมของแรงดัน V จะมีความสัมพันธ์กับแหล่งจ่าย E ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันกับประแสของโหลดทั้งขนาดและมุมต่างเฟส หรืออาจจะกล่าวได้ว่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับทั้งเฟสกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟ ถ้าอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟต่อขนานกับโหลดเพื่อต้องการให้แรงดัน $|E| = |V|$ ก็คือต้องการให้การคุมค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ เพื่อที่จะให้แรงดันคงที่โหลดเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย ดังนั้น กำลังรีแอกทีฟรวม $Q_s = Q_L + Q_K$ โดยที่ Q_K จะเป็นตัวที่ปรับมุมของเฟสเซอร์จันกระทั่ง $|E| = |V|$ จากสมการ (2.35) และ (2.36)

$$|E|^2 = \left[V + \frac{RP_L + XQ_s}{V} \right]^2 + \left[\frac{XP_L - RQ_s}{V} \right]^2 \quad (2.37)$$

การหาค่าขนาดของ Q_K ต้องหาค่า Q_s ก่อน โดยได้จากสมการ (2.25) หรืออาจจะใช้สมการ (2.37) แก้สมการกำลังสอง เมื่อได้ค่า Q_s แล้ว ใช้สมการ (2.14) หาค่า Q_K

อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟสามารถแก้ไขแรงดันตกที่เกิดขึ้นจากทั้งกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟของโหลดได้ ถ้าใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟสามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่องและมีขนาดใหญ่เพียงพอสามารถควบคุมได้ทั้งกำลังรีแอกทีฟด้านบวกและกำลังรีแอกทีฟด้านลบ

จะทำให้การควบคุมแรงดันสามารถทำได้ตามอุดมคติ คือการคุมค่าแรงดันเป็นศูนย์ แต่การควบคุมระดับแรงดันจะทำให้เฉพาะขนาดเท่านั้น ส่วนมุมนั้นจะเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด

ถ้าพิจารณาการใช้กำลังรีแอกทีฟแก้ไขตัวประกอบกำลัง เพื่อให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงสุดเท่ากับ 1, แทนค่า Q_L ด้วย $Q_S = 0$ ในสมการ (2.36)

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{RP_L + jXP_L}{V} \\ &= (R + jX) \frac{P_L}{V}\end{aligned}\tag{2.38}$$

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะไม่ขึ้นอยู่กับ Q_L และไม่สามารถที่จะควบคุมได้ ฉะนั้นการหาค่ากำลังรีแอกทีฟจะไม่สามารถควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่และแก้ไขตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ในเวลาเดียวกันได้ ยกเว้นแต่ในกรณีที่ P_L เท่ากับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะไม่ให้ความสนใจเนื่องจากไม่มีโหลด

การประมาณค่าของการคุมค่าแรงดัน [1]

สมมติวงจรในภาพประกอบที่ 4 บัสของโหนดลัดวงจรค่ากำลังปรากฏจะได้

$$S_{sc} = P_{sc} + jQ_{sc} = EI_{sc} = \frac{E^2}{Z_{sc}} = \frac{E^2}{Z}\tag{2.39}$$

โดย

$$Z_{sc} = Z = R + jX, |Z| = |Z|$$

จะได้ว่า

$$R = |Z| \cos \phi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \cos \phi_{sc}\tag{2.40}$$

$$X = |Z| \sin \phi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \sin \phi_{sc}\tag{2.41}$$

$$\tan \phi_{sc} = \frac{X}{R}\tag{2.42}$$

ซึ่ง $\tan \phi_{sc}$ คือ อัตราส่วน $X : R$ ของสายส่งจากแหล่งจ่าย ถ้าแทนค่าสมการ (2.40) ,
 (2.41) ใน สมการที่ (2.36) และ Normalizing ΔV_R และ ΔV_X ด้วย V โดยสมมติ $E \cong V$

$$\frac{\Delta V_R}{V} \cong \frac{1}{S_{sc}} \left[P_L \cos \phi_{sc} + q_L \sin \phi_{sc} \right] \quad (2.43)$$

$$\frac{\Delta V_X}{V} \cong \frac{1}{S_{sc}} \left[P_L \sin \phi_{sc} + q_L \cos \phi_{sc} \right] \quad (2.44)$$

ถ้าพิจารณา ΔV_X จะมีผลต่อขนาดของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยจะมีผลในเรื่องของมุมที่เปลี่ยนไป (ความสัมพันธ์กับ E) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันจะแทนโดย ΔV_R ถ้าต้องการให้สมการ (2.43) และ (2.44) มีความถูกต้องมากขึ้น ควรจะคูณด้วยค่า $\frac{E^2}{V^2}$

ในระนาบส่งกำลังแล้ว ค่าความต้านทานของสายส่ง R จะมีค่าน้อยกว่า ค่าความเหนี่ยวนำ X มาก ฉะนั้น ค่าแรงดันที่เปลี่ยนไป เนื่องจากค่า PL จึงมีค่าน้อยมากและสามารถละเลยได้ ฉะนั้น

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{1}{S_{sc}} Q \sin \phi_{sc} \cong \frac{Q_L}{S_{sc}} \quad (2.45)$$

จากสมการ (2.45) จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง ของกำลังรีแอกทีฟต่อกำลังปรากฏที่เกิดจากการลัดวงจรของระบบที่บัสของโหลด

$$V = E - \Delta V$$

$$V = E - \frac{Q_L}{S_{sc}} V \quad (2.46)$$

$$V = \frac{E}{1 + \frac{Q_L}{S_{sc}}} = E \left(1 - \frac{Q_L}{S_{sc} + Q_L} \right)$$

ถ้า $Q_L \ll S_{sc}$

$$V = E \left(1 - \frac{Q_L}{S_{SC}} \right) \quad (2.47)$$

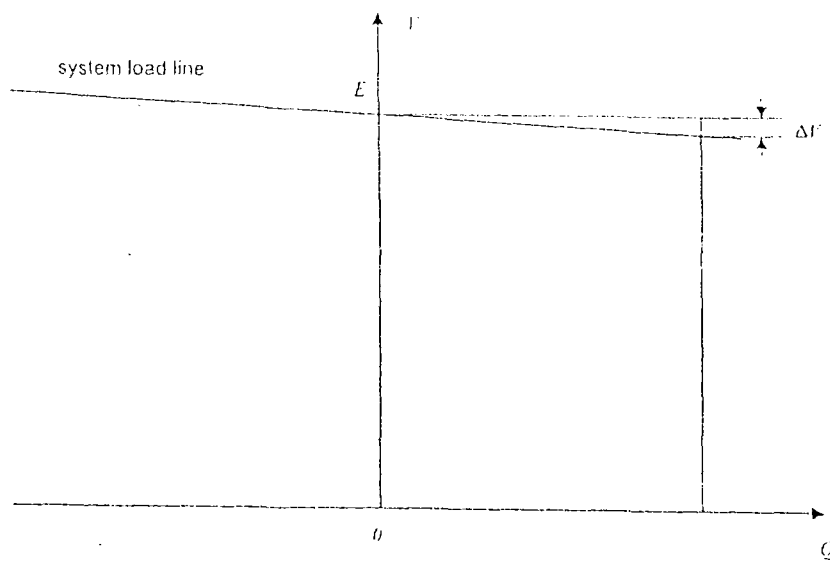
ความสัมพันธ์ของแรงดัน V และกำลังรีแอกทีฟของโหลด Q_L แม้ว่าเป็นเพียงค่าประมาณ แต่ก็ยังเป็นประโยชน์มากในการแสดงให้เห็นภาพของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟดังแสดงในภาพประกอบที่ 6 ถ้าระบบมีการชดเชยด้วยกำลังรีแอกทีฟ Q_K ค่ากำลังรีแอกทีฟในระบบ $Q_S = Q_L + Q_K$ แทน Q_S ในสมการ (2.45)

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q_S}{S_{SC}} \quad (2.48)$$

$$\text{และ } V \cong E \left[1 - \frac{Q_S}{S_{SC}} \right] \quad (2.49)$$

ถ้าการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ Q_K เป็นความเหนี่ยวนำที่สามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อควบคุม Q_S ให้คงที่ทำให้แรงดัน V จะคงที่ด้วย สมมติว่า

$$Q_S = Q_{L, \max} = \text{constant} \quad (2.50)$$



ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังรีแอกทีฟโดยประมาณ

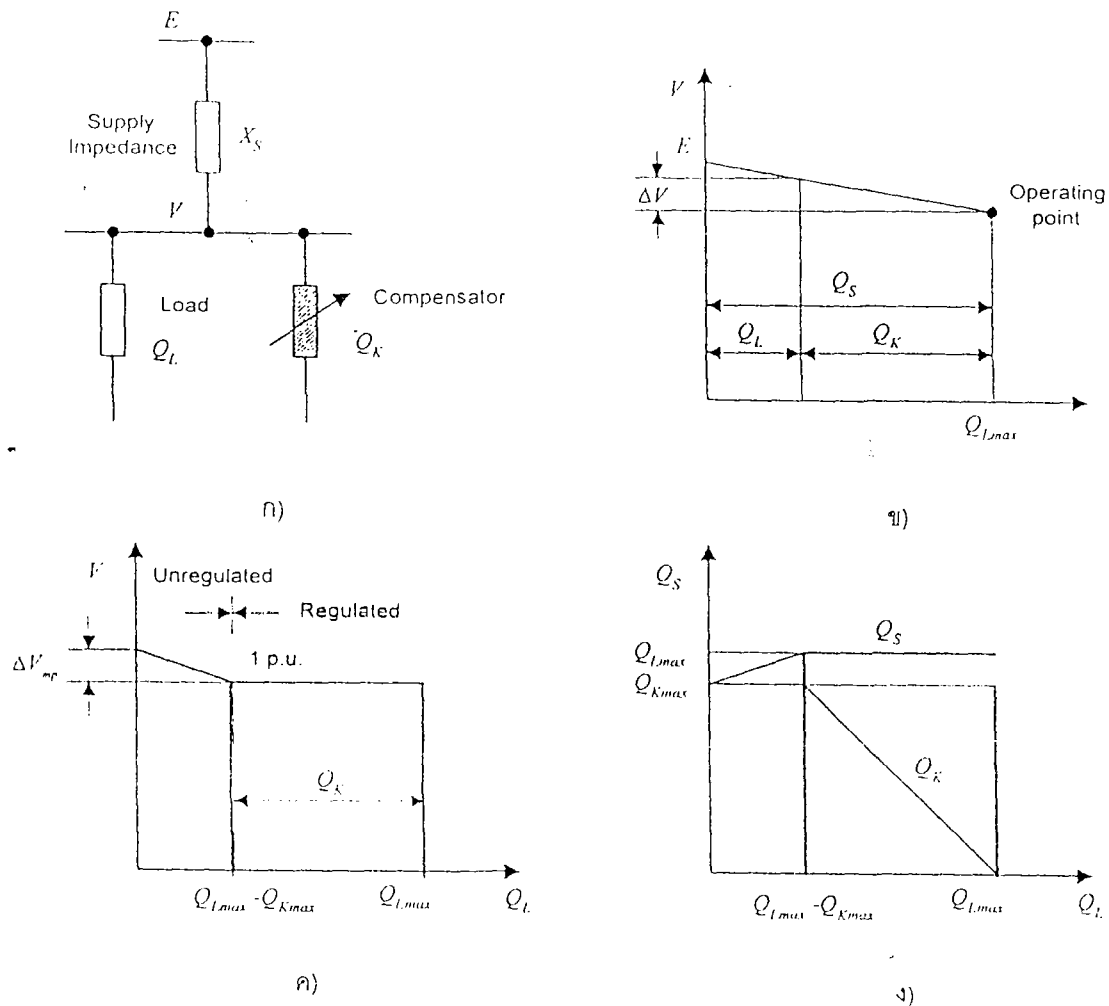
โดยให้ $Q_S = Q_{L \max}$ เป็นจุดที่ทำงานของระบบ ถ้า Q_L มีค่าลดลง Q_K จะเพิ่มขึ้น และถ้า $Q_L = 0$, Q_K จะมีค่าเต็มที่เท่ากับ $Q_{L \max}$ และเมื่อ Q_L มีค่าเท่ากับ $Q_{L \max}$ Q_K ก็จะลดลงเป็นศูนย์เพื่อรักษากำลังรีแอกทีฟของระบบ Q_S ให้คงที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 7

ซึ่งตามภาพประกอบที่ 7 เรียกได้ว่าการชดเชยกำลังรีแอกทีฟที่สมบูรณ์ เพราะว่าแรงดันจะมีค่าคงที่เนื่องจากค่าชดเชยกำลังรีแอกทีฟทำได้ถึงค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุดของโหลด การคุมค่าแรงดันจะเท่ากับ 0 ถ้าขนาดของกำลังรีแอกทีฟชดเชยมีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดกำลังรีแอกทีฟของโหลด $Q_{L \max}$ ถ้าขนาดของกำลังรีแอกทีฟชดเชยมีขนาด $Q_{K \max}$ ทำแรงดัน V สูงขึ้นเท่ากับ ΔV_{mp} ฉะนั้น ค่าการคุมค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้คือ $\frac{\Delta V_{mp}}{V}$ แสดงในภาพ 14 ก) เรียกว่าการชดเชยบางส่วน และการคุมค่าแรงดันเท่ากับ

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q_{L \max} - Q_{K \max}}{S_{SC}} \quad (2.51)$$

ในทางปฏิบัติแล้ว จะต้องคำนึงถึงทางเศรษฐศาสตร์ด้วยการคุมค่าแรงดันจะยอมรับได้ไม่เกินค่า ΔV_{mp} ดังนั้น ขนาดของกำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการชดเชยจะได้ว่า

$$Q_{K \max} = Q_{L \max} - S_{SC} \frac{\Delta V_{mp}}{V} \quad (2.52)$$



ภาพประกอบ 7 การชดเชย กำลังรีแอกทีฟด้วยค่าความเหนี่ยวนำ

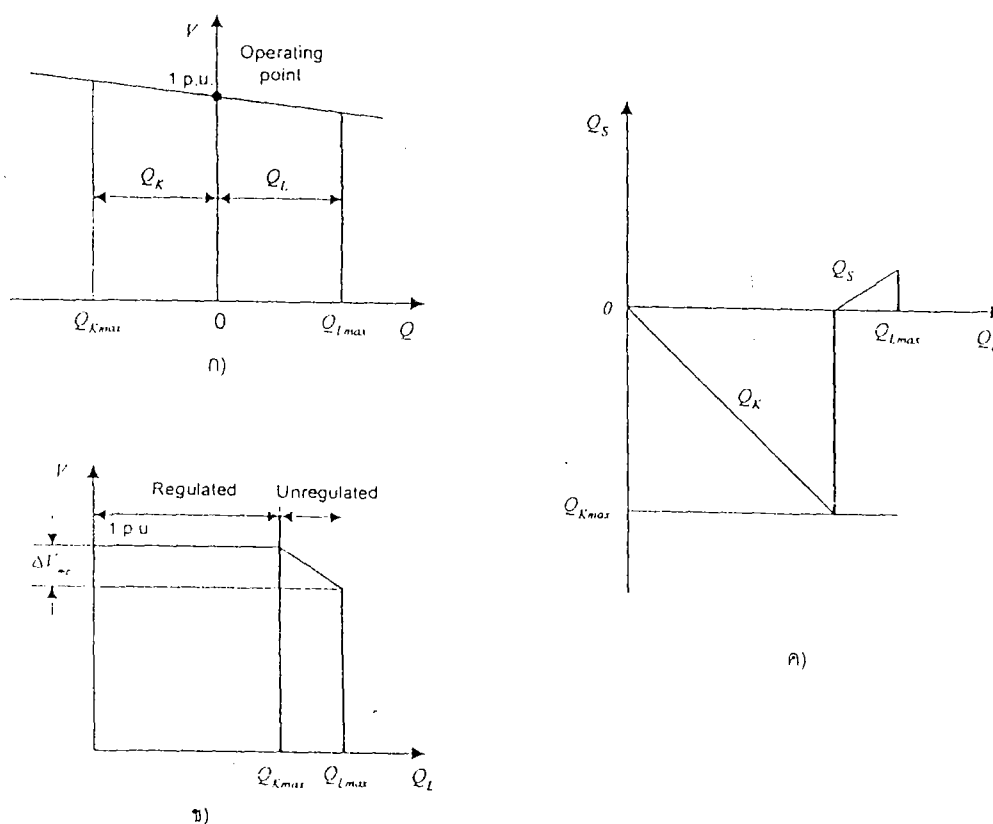
ภาพประกอบที่ 14 ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_L , Q_K , และ Q_S เมื่อ Q_L มีการเปลี่ยนแปลง Q_K จะทำการชดเชยให้ Q_S มีค่าคงที่จนกระทั่ง $Q_K = Q_{K,max}$ Q_K จะไม่สามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้ Q_S คงที่ได้ Q_S จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของ Q_L ซึ่งภาพประกอบที่ 14 ค) และ 14 ง) จะมีความสัมพันธ์กันคือถ้า Q_K ยังสามารถชดเชยให้ Q_S คงที่ $\frac{\Delta V}{V}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อ

$Q_K = Q_{K,max}$ Q_L ลดลง Q_S ก็จะลดลง ทำให้แรงดัน V สูงขึ้นจนกระทั่ง Q_L เท่ากับ 0 $\frac{\Delta V}{V}$ หรือแรงดัน V จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ $0 < Q_K < Q_{K,max}$

ถ้าเป็นไปได้ในการชดเชยกำลังรีแอกทีฟต้องการที่จะให้แรงดันมีค่าคงที่ และค่าตัวประกอบกำลังควรจะได้เท่ากับ 1 ดังนั้น ในการชดเชยจึงต้องการตัวเก็บประจุแทนที่จะให้ $Q_S = Q_{max} = \text{constant}$ ในสมการที่ (2.50) การชดเชยก็จะรักษา กำลังรีแอกทีฟ

$$Q_S = \text{constant} = 0 \quad (2.53)$$

ซึ่งจะได้ผลจากการชดเชยกำลังรีแอกทีฟโดยที่โหลดจะเป็นตัวรับ ตามภาพประกอบที่ 15 ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้ว การชดเชยกำลังรีแอกทีฟไม่สามารถทำให้ Q_s เป็นค่าคงที่ได้ เนื่องจากผลของโหลด P_L แต่โดยทั่วไปแล้ว Q_s ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมาก



ภาพประกอบ 8 การชดเชย กำลังรีแอกทีฟด้วยความจุไฟฟ้า

การชดเชยกระแส 3 เฟส ให้สมดุลเมื่อมีโหลดที่ไม่สมมูล (Balancing of Unbalanced Loads)

โหลดของผู้ใช้ไฟจำนวนมากเป็นโหลดประเภทเฟสเดียว (Single Phase) หรืออาจจะเป็นโหลดขนาดใหญ่เฟสเดียวต่ออยู่ระหว่างสองเฟส ตัวอย่างเช่น เตาหลอมไฟฟ้า (Arc Furnaces) รถไฟฟ้า (Electric Trains) , เครื่องเชื่อมไฟฟ้า (Welding Machines) , ฯลฯ โหลดไม่สมดุลนี้เป็นสาเหตุของการเกิดกระแสลำดับเฟสลบ (Negative Phase Sequence Current) หรือกระแสกลับ (Reversed Current System) และเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันลำดับเฟสลบ (Negative Phase Sequence Voltage) หรือแรงดันเฟสกลับ (Reversed Voltage System) ในระบบไฟฟ้า ซึ่งก็คือ แรงดันในระบบจะไม่สมดุล

ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ามีข้อเสียหลายประการ เช่น การสูญเสียในสายส่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก แรงดันตกคร่อมในสายส่งสูง และการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะมีค่าสูงมากกว่าปกติเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ยังมีผลทำให้เกิดความร้อนสูงในสายส่ง ในโหมดประเภทมอเตอร์ หรือโหมดอื่น ๆ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสที่ตัวโรเตอร์มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ระบบ ส่งผลให้เกิดความร้อนที่ตัวโรเตอร์ ดังนั้นกระแสลำดับเฟสลบจึงมีความสำคัญมากในเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุน (Rotating Machines) ซึ่งจะดองไม่เกินค่าจำกัดของความปลอดภัยโดยทั่ว ๆ ไปประมาณ 15% มอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีความไวต่อแรงดันที่ไม่สมดุล ซึ่งถ้าแรงดันไม่สมดุลเพียง 0.05 P.U. กระแสลำดับเฟสลบจะสูงถึง 30% ของกระแสฟลัก

ดังนั้น แรงดันที่ไม่สมดุลในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องลดให้น้อยที่สุด เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความสูญเสียหรือความเสียหายต่อระบบส่งและอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า แรงดันไม่สมดุล มักจะแทนด้วย อัตราส่วนระหว่างแรงดันลำดับเฟสลบ แรงดันลำดับเฟสบวก [4] , [5]

$$v = \frac{|V_-|}{|V_+|} = \frac{|Z|}{|Z + Z_L|} \approx \frac{|Z|}{|Z_L|} \quad (2.54)$$

ถ้าอิมพีแดนซ์ของลำดับเฟสลบและลำดับเฟสบวกเท่ากัน ($Z_- = Z_+ = Z$) และ Z_L คืออิมพีแดนซ์ของโหลดความสามัคคีของสมการ (2.54) สามารถเขียนได้

$$v_- \approx \frac{S_L}{S_{sc}} \quad (2.55)$$

ตามมาตรฐาน IEC เครื่องจักรไฟฟ้าแบบหมุน (Rotating Electrical Machine) จะต้องสามารถทนต่อความไม่สมดุลของแรงดัน

$$\frac{|v_-|}{|v_+|} = 0.02 \quad (2.56)$$

$$\text{หรือ } S_L = 0.02 S_{sc}$$

ตามมาตรฐานของอังกฤษ แนะนำว่า [5]

$$S_L \leq 0.013 S_{sc} \text{ สำหรับแรงดันต่ำกว่า 33 KV.}$$

$$S_L \leq 0.011 S_{AC} \text{ สำหรับแรงดัน 33 KV. และสูงกว่า}$$

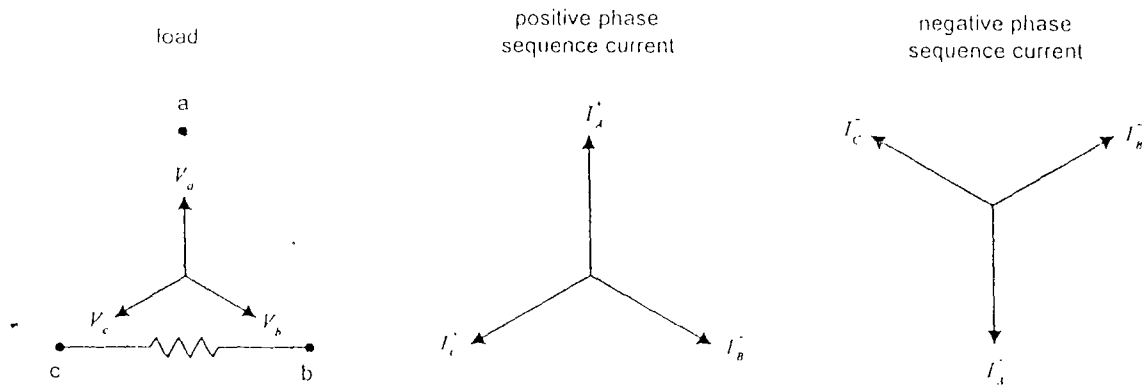
การใช้ค่าแฟกเตอร์ที่ต่ำกว่า (2.55) เนื่องจากยังมีโหลดอื่น ๆ ที่ต่อในระบบ ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังมีผลของฮาร์โมนิกอาจเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ทำให้เกิดการสูญเสียที่มากขึ้นโดยเฉพาะในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ฉะนั้น เราต้องการต่อโหลดเฟสเดียวเข้ากับระบบ จะต้องแน่ใจว่าระดับกำลังปรากฏลัดวงจร (Fault Level) ที่บัสต้องไม่น้อยกว่าดังกล่าวข้างต้น ถ้าระดับของระดับกำลังปรากฏลัดวงจรไม่เพียงพอโหลดจะต้องสมดุล

1. หลักการเบื้องต้นของการชดเชยโหมคไม่สมดุล

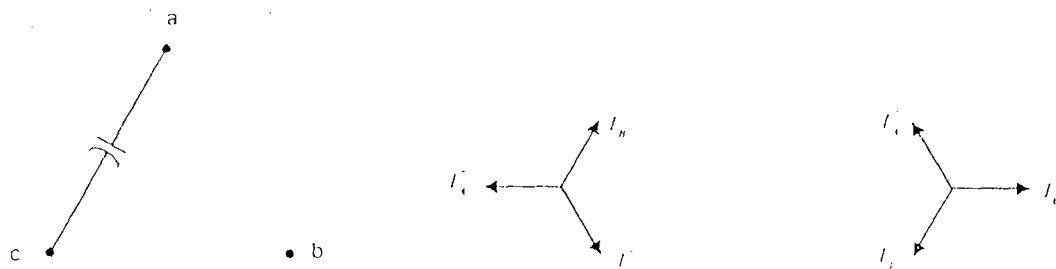
ถ้าต้องการทำให้โหมคเกิดความสมดุลจากโหมคเฟสเดียว สามารถทำได้โดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุซึ่งเป็นโหมคกำลังรีแอกทีฟต่อระหว่างเฟสที่เหลือ ทำให้เกิดกระแสลำดับเฟสลบไปหักล้างกับกระแสลำดับเฟสที่เกิดจากโหมคเฟสเดียว

ตามภาพประกอบที่ 9 แสดงโหมคความต้านทานระหว่างสองเฟส (B และ C) ทำให้เกิดกระแสลำดับเฟสบวกและกระแสลำดับเฟสลบ เพราะว่าโหมคต่อระหว่างเฟส B และ เฟส C เฟส A จะไม่มีกระแสไหล กระแสลำดับเฟสบวก I_A จะต้องถูกทำให้เกิดความสมดุลโดยกระแสลำดับเฟสลบของตัวมัน I_A ในการวิเคราะห์ระบบส่งโดยโหลดเฟสเดียวนี้อีกคืออิมพีแดนซ์ระหว่างสายความผิดปกติสูง (High Impedance line to line fault)

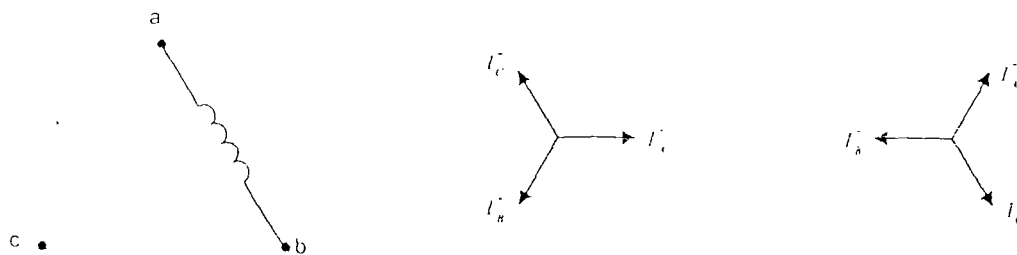
ถ้าต่อคาปาซิเตอร์ระหว่างเฟส A และ C ผลของระบบสมดุลตามภาพประกอบที่ 9 จะทำให้ผลของกระแสลำดับเฟสนำหน้าแรงดัน 90 องศา ในทุก ๆ เฟส และในทำนองเดียวกันต่อตัวเหนี่ยวนำระหว่างเฟส A และ B ผลของระบบสมดุล จะทำให้กระแสเฟสบวกล่าหลังแรงดัน 90 องศา ทุกเฟส



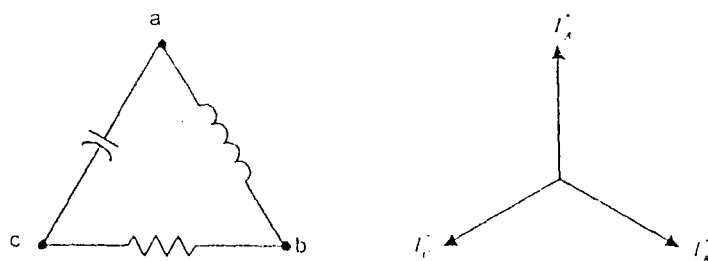
ก) โหลดตัวต้านทานเฟสเดียวต่อระหว่างเฟส B และ C



ข) ตัวเก็บประจุเฟสเดียวต่อระหว่างเฟส A และ C



ค) ตัวเหนี่ยวนำเฟสเดียว ต่อระหว่างเฟส A และ B



ง) โหลดเฟสเดียวสมมูลย์

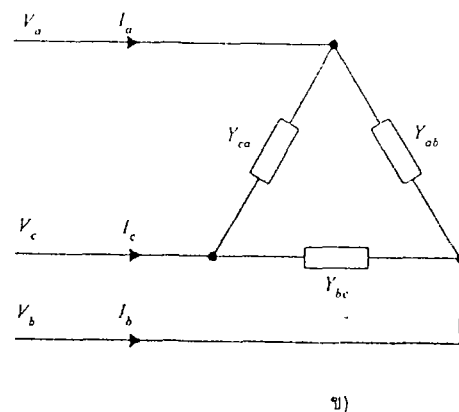
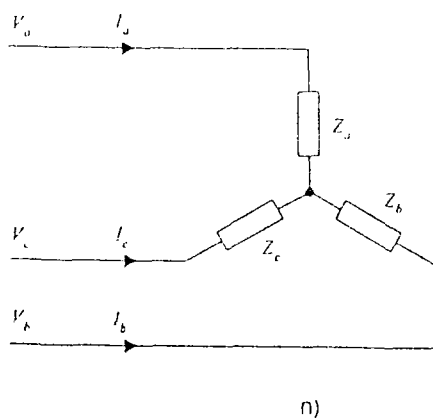
ภาพประกอบ 9 การชดเชยโหลดต้านทานเฟสเดียวให้สมดุลย์

ถ้าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $\sqrt{3}R_L$ หรือขนาดของกำลังเท่ากับ $P_L / \sqrt{3}$ กระแสลำดับเฟสลบจะถูกกำจัดออกไปให้หมด ทั้งนี้เนื่องจากกระแสลำดับเฟสลบที่เกิดจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะหักล้างกับกระแสลำดับเฟสที่เกิดจากโหลด R_L ซึ่งแสดงให้เห็นปริมาณทางเฟสเซอร์ตามภาพประกอบที่ 9 , ข) ค) ผลรวมจะได้ตามภาพ ง)

อย่างไรก็ตามผลของความสมดุลตามภาพประกอบที่ 9 ง) สามารถทำให้หลายวิธี โดยเพิ่มหรือการลดตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพื่อให้ระบบสมดุล ซึ่งเป็นไปได้ว่า การทำให้ระบบสมดุลด้วยเพียง ตัวเก็บประจุหรือตัวนำเท่านั้น

2. การชดเชยโหลดไม่สมดุล

การพิจารณาโหลดสามเฟสไม่มีกราวด์ (Ungrounded three phase load) สามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ Z_a, Z_b และ Z_c ตามลำดับ ต่ออยู่กับระบบที่สมดุล แรงดันเฟสเทียบกับนิวทรัล $V_u = V, V_b = V e^{-j2\pi/3}$ และ $V_c = V e^{-j4\pi/3}$ แสดงในภาพประกอบที่ 10 ก) หรือวงจรเทียบเคียงเดลตา (Delta) แทนด้วยแอดมิตแตนซ์ Y_{ab}, Y_{bc} และ Y_{ca} ตามภาพประกอบที่ 10 ข) อิมพีแดนซ์ Z_a, Z_b และ Z_c (หรือแอดมิตแตนซ์ Y_{ab}, Y_{bc} และ Y_{ca}) โดยทั่วไปจะเปลี่ยนไปตามเวลา เพื่อให้จะสามารถพิจารณาการชดเชยนี้ได้สมมุติว่าโหลดทั้งสามไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time - invariant) และมีอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน (Steady State Unbalanced Load)



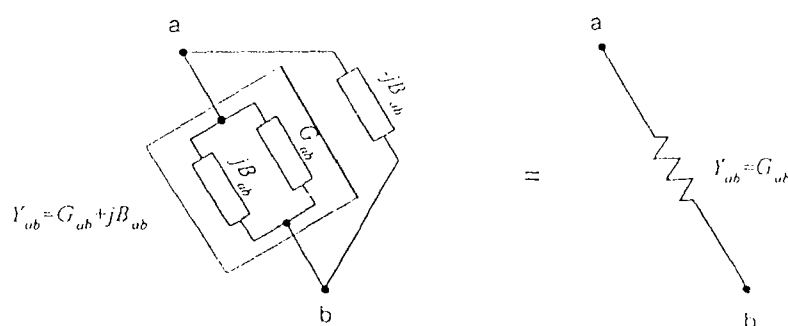
ภาพประกอบ 10 ก) โหลดระบบไฟฟ้า 3 เฟสทั่วไปแทนด้วยอิมพีแดนซ์ เมื่อต่อแบบ Y และ ข) แทนด้วยแอดมิตเตอร์ เมื่อต่อแบบเดลต้า

จากข้อกำหนดข้างต้นปัญหาของการชดเชย คือ การหาค่าแอดมิตเตอร์เมื่อรวมกับแอดมิตเตอร์ของโหลดแล้วทำให้ อิมพีแดนซ์ หรือ แอดมิตเตอร์ ที่จุดต่อของแหล่งจ่าย (Supply terminal) มองเห็นเป็นค่าความต้าน (ความนำ) และมีความสมดุล

โดยใช้วงจรเทียบเคียงแบบเดลตา ตามภาพประกอบที่ 10 ข) โหลดแอดมิตเตอร์สามารถที่จะชดเชยแยกกันอย่างอิสระในแต่ละเฟส ตัวอย่าง เช่น ถ้าพิจารณา ในเฟส AB ซึ่ง แอดมิตเตอร์ Y_{ab} ประกอบด้วยค่าจำนวนจริงความนำ (Conductance) และค่า จินตภาพชัลดเซปแทนซ์ (Susceptance)

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} \quad (2.57)$$

ถ้าดับแรกชดเชยให้ค่าของจินตภาพเป็นศูนย์โดยการต่อค่าชัลดเซปแทนซ์ $-B_{ab}$ ขนานกับแอดมิตเตอร์ Y_{ab} ดัง-าพที่ 11



ภาพประกอบ 11 การชดเชยในส่วนของจินตภาพ B_{ab} ของค่า แอดมิตเตอร์ Y_{ab} ด้วยค่าชัลดเซปแทนซ์ B_{ab}

กระแสที่ไหลในเฟส AB คือ

$$\begin{aligned} I_{ab} &= G_{ab} V_{ab} \\ &= \sqrt{3} G V_e^{j\pi/6} \end{aligned} \quad (2.58)$$

ลำดับที่สองต่อตัวเก็บประจุระหว่างเฟส B และ C โดยค่าความจุไฟฟ้ามีขนาด

$$B_{bc}^{(ab)} = \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2.59)$$

กระแสที่เกิดขึ้นในเฟส

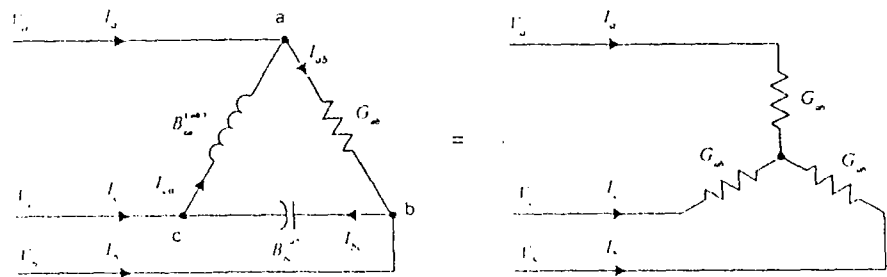
$$\begin{aligned} I_{BC} &= jB_{bc} V_{bc} \\ &= \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} e^{j\pi/2} \sqrt{3} V e^{-j\pi/2} \\ &= G_{ab} V \end{aligned} \quad (2.60)$$

และต่อความเหนี่ยวนำระหว่างเฟส C และ A โดยค่าความเหนี่ยวนำมีขนาด

$$B_{ca}^{(ab)} = -\frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2.61)$$

กระแสที่ไหลในเฟส CA คือ

$$\begin{aligned} I_{ca} &= -jB_{ca} V_{ca} \\ &= \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} e^{-j\pi/2} \sqrt{3} V e^{-j\pi/6} \\ &= G_{ab} V e^{j\pi/3} \end{aligned} \quad (2.62)$$



ภาพประกอบ 12 การหาค่าของโหนดความต้านทานเฟสเดียวด้วยความจุไฟฟ้า $B_{bc}^{(ab)}$ และความเหนี่ยวนำ $B_{ca}^{(ab)}$

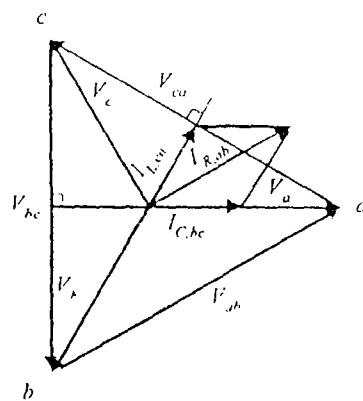
จากนั้น หาค่ากระแสที่ไหลในแต่ละเฟส

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{ab} - I_{ca} \\
 &= \sqrt{3}G_{ab}Ve^{j\pi/6} - G_{ab}Ve^{j\pi/3} \\
 &= G_{ab}V
 \end{aligned} \tag{2.63}$$

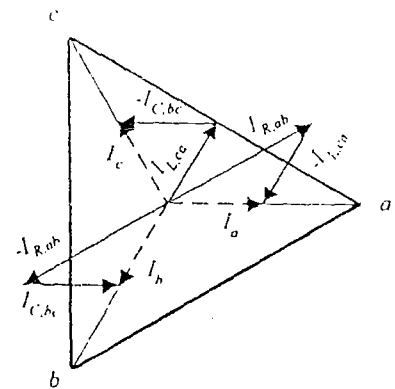
$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{bc} - I_{ab} \\
 &= G_{ab}Ve - \sqrt{3}G_{ab}Ve^{j\pi/6} \\
 &= G_{ab}Ve^{-j2\pi/3}
 \end{aligned} \tag{2.64}$$

$$\begin{aligned}
 I_c &= I_{ca} - I_{bc} \\
 &= G_{ab}Ve^{j\pi/3} - G_{ab}Ve \\
 &= G_{ab}Ve^{-j4\pi/3}
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

จากสมการทั้งสาม (2.63) , (2.64) และ (2.65) กระแสแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากัน และทำมุมกัน 120 องศา โดยเทียบกับแรงดันอ้างอิง V ทำให้ระบบมองเป็นโหลดที่สมดุล โดยที่กำลังไฟฟ้าของระบบยังคงเท่าเดิม



ก)



ข)

ภาพประกอบ 13 แผนภาพเฟสเซอร์ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสโหลดเฟสเดียว I_{Rab} และ

กระแสของ การชดเชย $I_{c,bc}$ และ I_{Lca} ซึ่งระบบจะมองเห็นเป็นกระแส I_a , I_b และ I_c

ในทำนองเดียวกัน การชดเชยในเฟส BC และเฟส CA ชั้นแรกจำกัด B_{bc} และ B_{ca} ด้วยชดเชยแดนซ์ $-B_{bc}$ และ $-B_{ca}$ ตามลำดับ และลำดับต่อไปจะทำให้โหลดสมดุลโดยคู่ของชดเชยแดนซ์ ความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำ

$$B_{ca}^{(bc)} = \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (2.67)$$

$$B_{ca}^{(bc)} = -\frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (2.68)$$

และ $B_{ab}^{(ca)} = \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (2.69)$

$$B_{bc}^{(ca)} = \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (2.70)$$

การชดเชยที่สมบูรณ์ของโหลด 3 เฟส โดยการเพิ่มชดเชยแดนซ์ในแต่ละเฟส ดังแสดงในภาพประกอบที่ 14 ผลของการชดเชยชดเชยแดนซ์ B_{kab} , B_{kbc} และ B_{kca} ตามลำดับ คือผลรวมของการชดเชยชดเชยแดนซ์ในแต่ละเฟส ซึ่งก็คือ

$$\begin{aligned} B_{Kab} &= -B_{ab} + B_{ab}^{(bc)} + B_{ab}^{(ca)} \\ B_{Kbc} &= -B_{bc} + B_{bc}^{(ca)} + B_{bc}^{(ab)} \\ B_{Kca} &= -B_{ca} + B_{ca}^{(ab)} + B_{ca}^{(bc)} \end{aligned} \quad (2.71)$$

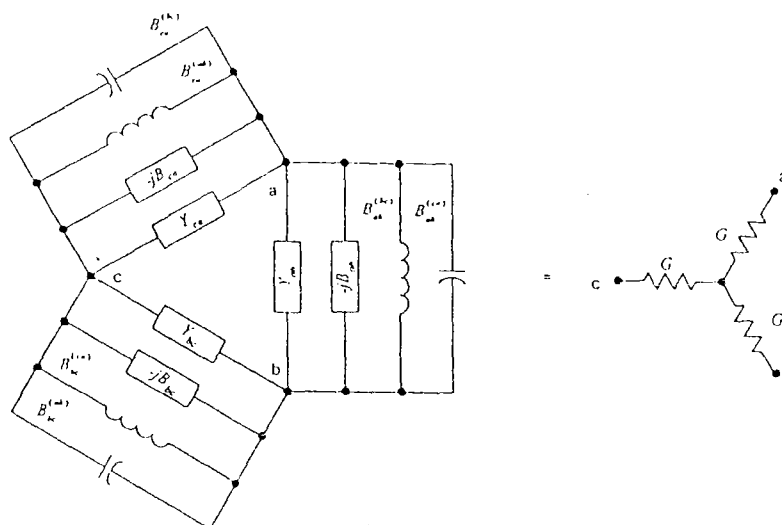
ซึ่ง () แทนการชดเชยชดเชยแดนซ์

จากสมการ (2.71) แทรมแรก แทนการชดเชยกำลังรีแอทีฟของโหลดในเฟสนั้น ๆ และในเทอมที่สองและสาม แทนการชดเชยเพื่อให้เกิดสมดุล สามารถแทนได้ดังสมการข้างล่าง [1] , [2]

$$\begin{aligned} B_{Kab} &= -B_{ab} + \frac{G_{ca} - G_{bc}}{\sqrt{3}} \\ B_{Kbc} &= -B_{bc} + \frac{G_{ab} - G_{ca}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$B_{Kca} = -B_{ca} + \frac{G_{bc} - G_{ab}}{\sqrt{3}}$$

จากสมการที่ (2.72) จะเห็นได้ว่า ถ้าโหนดสมมูลย์ $G = G_{ab} = G_{bc} = G_{ca}$ จะทำให้ส่วน
หลังของสมการถูกจำกัดออกไปเหลือเฉพาะส่วนของรีแอกทีฟ และถ้าชดเชยด้วยค่าซัลเซปแดนซ์
ในส่วนของรีแอกทีฟให้หมด โหลดก็สามารถแทนด้วยค่าความต้านทาน หรือ ความนำ (G) สามตัว
ที่มีขนาดเท่ากันต่อในแบบ Y ดังภาพประกอบที่ 21 ซึ่งค่าความนำ $G = G_{ab} + G_{bc} + G_{ca}$ กรชด
เชยดังกล่าวนี้ ค่าตัวประกอบกำลังจะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถที่จะปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็นนำ
หน้า หรือล้าหลังได้ตามต้องการ โดยเพิ่มค่า ความจุไฟฟ้า หรือ ความเหนี่ยวนำที่มีขนาดเท่ากันทั้ง 3
เฟส ลงไปในสมการที่ (2.72)



ภาพประกอบ 14 หลักการเบื้องต้นการชดเชยโหลดสามเฟสที่ไม่สมดุล

จากการพิจารณาดังกล่าวข้างต้นพอสรุปได้ดังนี้

- โหลดไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่มีกราวด์ สามารถเปลี่ยนให้มาเป็นโหลดสามเฟสที่สมดุลได้โดยที่ กำลังไฟฟ้าของโหลดและแหล่งจ่ายไม่เปลี่ยนแปลง
- การทำให้โหลดสมดุลโดยการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรีแอกทีฟ หรือ คือการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ
- การชดเชยกำลังรีแอกทีฟของโหลด สามารถกระทำเป็น 2 ส่วนที่แยกอิสระจากกัน คือ

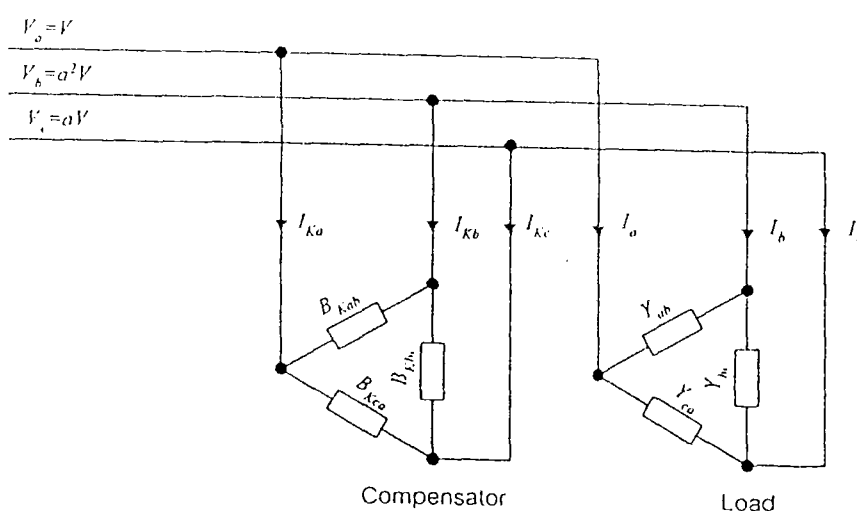
1. การชดเชยตัวประกอบกำลัง และ 2. การชดเชยโหลดไม่สมดุล และถ้าต้องการทั้ง 2 กรณีในเวลาเดียวกัน ก็โดยการรวมผลการชดเชยทั้ง 2 กรณี

- การชดเชยโหลดที่ไม่สมดุล ที่มีค่าคงที่ สามารถกระทำโดยการต่ออุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ (ตัวเก็บประจุ หรือ ตัวเหนี่ยวนำ) ค่าที่เหมาะสมในแต่ละเฟส
- กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ชดเชย ที่สามารถควบคุมได้ โดยการปรับให้เหมาะสมกับค่าที่โหลดเปลี่ยนแปลง

3. การชดเชยกำลังรีแอกทีฟโหลดไม่สมดุลในเทอมของส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)

การชดเชยโหลดสมดุลตามสมการที่ (2.72) เป็นหลักการเบื้องต้นในการอธิบายการชดเชย แต่ในการควบคุมการชดเชยนั้นทำได้ยาก เนื่องจากการชดเชยชดเชยแต่ละเฟสกำหนดในเทอมแอดมิตแตนซ์ของโหลดซึ่งไม่ง่ายนักที่จะแยกการวัดกระแสและแรงดัน การควบคุมการชดเชยแต่ละเฟสในรูปของกระแสและแรงดัน การควบคุมการชดเชยแต่ละเฟสในรูปของกระแสและแรงดันโดยตรงจะเป็นการสะดวกกว่า

พิจารณาโหลดสามเฟสไม่สมดุลรับแรงดันสามเฟสที่สมดุลจากแหล่งจ่าย (ไม่มีกราวด์) ตามภาพประกอบที่ 15 โดยแทนด้วยวงจรเทียบเคียงแบบเดลตา โหลดแทนด้วยแอดมิตแตนซ์ Y_{ab}, Y_{bc} และ Y_{ca} ตามลำดับ



ภาพประกอบ 15 โหลดสามเฟสไม่สมดุล แทนด้วยวงจรเทียบเคียงเดลตาต่อกับอุปกรณ์ชดเชยแบบเดลตา

สมมติว่าแรงดันของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับโหลดสมดุลจะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= a^2 V \\ V_c &= a V \end{aligned} \quad (2.73)$$

ซึ่ง $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ (2.74)

แรงดัน ระหว่างสาย

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = (1 - a^2)V \\ V_{bc} &= V_b - V_c = (a^2 - a)V \\ V_{ca} &= V_c - V_a = (a - 1)V \end{aligned} \quad (2.75)$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลในโหลดคือ

$$\begin{aligned} I_{ab} &= Y_{ab} (1 - a^2)V \\ I_{bc} &= Y_{bc} (a^2 - a)V \\ I_{ca} &= Y_{ca} (a - 1)V \end{aligned} \quad (2.76)$$

กระแสที่ไหลในสาย (Line Current) คือ

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca} = [Y_{ab} (1 - a^2) - Y_{ca} (a - 1)]V \\ I_b &= I_{bc} - I_{ab} = [Y_{bc} (a^2 - a) - Y_{ab} (1 - a^2)]V \\ I_c &= I_{ca} - I_{bc} = [Y_{ca} (a - 1) - Y_{bc} (a^2 - a)]V \end{aligned} \quad (2.77)$$

ส่วนประกอบสมมาตรในเทอมของกระแสกำหนดโดย

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2 I_c) \\
 I_2 &= \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + aI_c)
 \end{aligned}
 \tag{2.78}$$

ซึ่ง I_0 , I_1 และ I_2 แทนด้วยกระแสส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสศูนย์ (Zero Phase Sequence Current) ลำดับเฟสบวก และ ลำดับเฟสลบตามลำดับ แทนสมการที่ (2.77) ใน (2.78) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I_0 &= 0 \\
 I_1 &= (Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca})V \\
 I_2 &= -(a^2 Y_{ab} + Y_{bc} + aY_{ca})V
 \end{aligned}
 \tag{2.79}$$

ในการชดเชยกำลังรีแอกทีฟในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรคือ

1. การกำจัดกระแสลำดับเฟสลบจะได้หมดสมดุลย์
2. การลดค่าในส่วนของรีแอกทีฟ ของกระแสลำดับเฟสบวกจะเป็นการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

กระแสลำดับเฟสลบ (I_2) ในสมการที่ (2.79) คือ ส่วนที่เกิดจากโหลดที่ไม่สมดุลย์ การชดเชยให้โหลดไม่สมดุลย์โดยการกำจัดกระแสลำดับเฟสให้หมดไป ซึ่งจะได้ $Y_{ab} = Y_{bc} = Y_{ca} = Y$

$$I_2 = -Y(a^2 + 1 + a)V = 0 \tag{2.80}$$

การชดเชยในเทอมของกระแสส่วนประกอบสมมาตร โดยการต่อแบบ การชดเชยแทนในรูปของซัสเซปแตนซ์

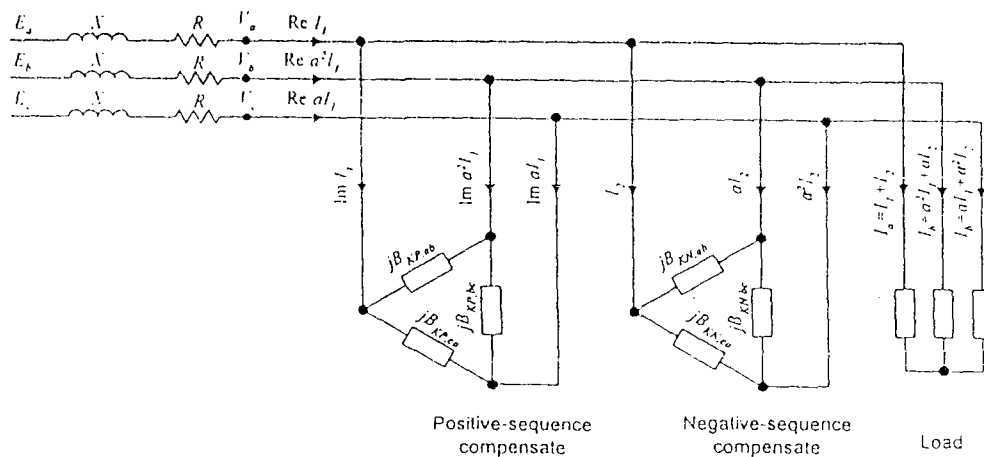
$$\begin{aligned}
 I_{K0} &= 0 \\
 I_{K1} &= j(B_{Kab} + B_{Kbc} + B_{Kca})V \\
 I_{K2} &= -j(a^2 B_{Kab} + B_{Kbc} + aB_{Kca})V
 \end{aligned}
 \tag{2.81}$$

การชดเชยให้โหลดสมดุลย์ โดยทำให้กระแสลำดับเฟสลบเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$B_{Kab} = -\frac{1}{3V} \left(\text{Im } I_1 + \text{Im } I_2 - \sqrt{3} \text{Re } I_2 \right)$$

$$B_{Kbc} = -\frac{1}{3V} \left(\text{Im } I_1 + 2 \text{Im } I_2 \right) \quad (2.89)$$

$$B_{Kca} = -\frac{1}{3V} \left(\text{Im } I_1 + \text{Im } I_2 - \sqrt{3} \text{Re } I_2 \right)$$



ภาพประกอบ 16 การขจัดเซย์กำลังรีแอกทีฟในเทอมของเฟสบวกและลำดับเฟสลบด้วยการต่อแอควิตแดนซ์แบบเคลตา

การสมการที่ (2.89) การขจัดเซย์อยู่ในรูปของกระแสส่วนประกอบสมมาตร (ลำดับเฟสบวกและลำดับเฟสลบ) ซึ่งสมการแสดงให้เห็นกระแสเฟสบวกเป็นจำนวนจินตภาพที่เท่ากันทั้งสามเฟส แต่ในส่วนของการกระแสลำดับเฟสลบแต่ละเฟสจะแตกต่างกัน ดังนั้นในการขจัดเซย์จึงสามารถแยกการขจัดเซย์ออกเป็น 2 ส่วน ออกจากกัน คือ ส่วนกระแสรีแอกทีฟของลำดับเฟสของโหลดและกระแสลำดับเฟสลบ ดังนั้น แหล่งจ่ายจะจ่ายเฉพาะกระแสลำดับเฟสที่ใช้งานจริง (Real Current) ให้กับโหลดเท่านั้น หลักการขจัดเซย์กระแสด้วยการต่อแอควิตแดนซ์ในเทอมของลำดับเฟสบวกและลำดับเฟสลบแสดงในภาพประกอบที่ 16

การขจัดเซย์ลำดับเฟสบวกและลำดับเฟสลบแบบเคลตา สามารถแทนด้วยจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพในเทอมของโหลดแอควิตแดนซ์

$$B_{PKab} = B_{PKbc} = B_{PKca} = -\frac{1}{3V}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) \quad (2.90)$$

ในสมการ (2.79)

$$I_2 = -(a^2 Y_{ab} + Y_{bc} + a Y_{ca})V$$

แทน $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, Y = G + jB$

จะได้ว่า

$$\text{Re } I_2 = \frac{1}{2}(G_{ab} - 2G_{bc} + G_{ca} - \sqrt{3}B_{ab} + \sqrt{3}B_{ca})V \quad (2.91)$$

$$\text{Im } I_2 = \frac{1}{2}(\sqrt{3}G_{ab} - \sqrt{3}G_{ca} + B_{ab} - 2B_{bc} + B_{ca})V$$

แทนสมการ (2.91) ในสมการ (2.89) ในส่วนของลำดับเฟสลบ

$$\begin{aligned} B_{NKab} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ca} - G_{bc}) + \frac{1}{3}(-2B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) \\ B_{NKbc} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ab} - G_{ca}) + \frac{1}{3}(B_{ab} - 2B_{bc} + B_{ca}) \\ B_{NKca} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{bc} - G_{ab}) + \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} - 2B_{ca}) \end{aligned} \quad (2.92)$$

P และ N แทนด้วยลำดับเฟสบวกและลำดับเฟสลบตามลำดับ ผลรวมของสมการ (2.90) และ (2.92) จะได้ผลเหมือนกับสมการ (2.72) เพียงแต่ชดเชยต่างวิธี ซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่แยกส่วนการชดเชย (ลำดับเฟสบวก และ ลำดับเฟสลบ) การชดเชยโดยการต่อแบบเดลตาด้วยการควบคุมชดเชยแบบเต็มๆ สามารถชดเชยได้ทั้งลำดับเฟสบวกและลำดับเฟสลบ โดยการควบคุมชดเชยแบบเต็มๆในแต่ละเฟสแยกกันโดยอิสระ

โดยส่วนใหญ่แล้วไม่ต้องการชดเชยกำลังรีแอกทีฟในส่วนของการคำนวณตามเงื่อนไขในสมการ (2.83) แต่ต้องการที่จะลดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่งเนื่องจากกระแสที่เฟสตรงกัน (In-Phase Voltage Drop) ให้เป็นศูนย์ จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถเขียนได้ว่า

$$\operatorname{Re}\left[(I_1 + I_{K1})(R + jX)\right] = 0 \quad (2.93)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left[(\operatorname{Re} I_1 + j \operatorname{Im} I_{K1} + j \operatorname{Im} I_{K1})(R + jX)\right] &= 0 \\ \operatorname{Re} I_1 R - \operatorname{Im} I_1 X - \operatorname{Im} I_{K1} X &= 0 \end{aligned} \quad (2.94)$$

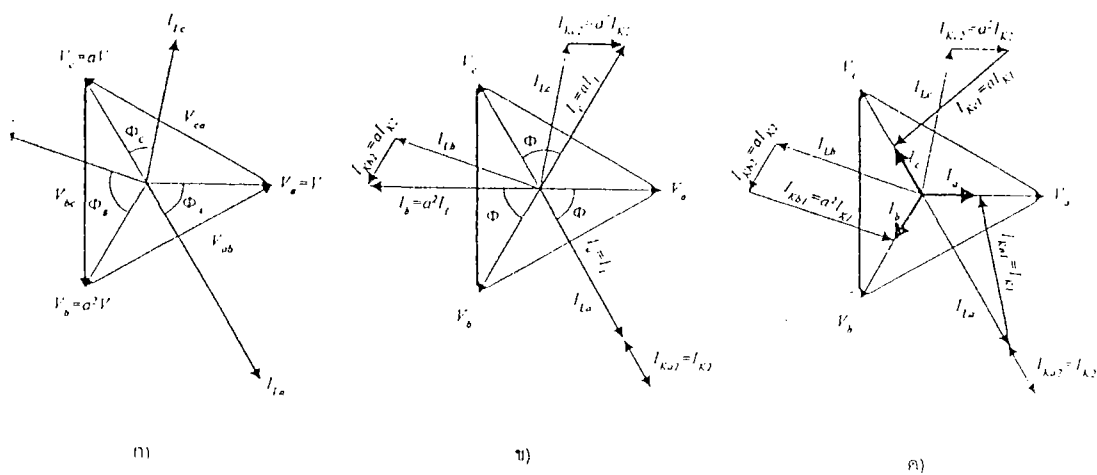
$$\operatorname{Im} I_{K1} = -\frac{R}{X} \operatorname{Re} I_1 - \operatorname{Im} I_1$$

โดยที่ $R + jX$ เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (ตามภาพประกอบที่ 16)

เงื่อนไขการชดเชยลำดับเฟสลงในสมการ (2.84) และ (2.85) ยังคงเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าแทนสมการ (2.81) ในสมการ (2.84) , (2.85) และ (2.94) การชดเชย ชั้สเชิงปฏิกิริยา สามารถแทนได้คล้ายกับสมการที่ (2.89) เพียงแต่ในเทอมของ $-\operatorname{Im} I$ แทนด้วย $(R/X) \operatorname{Re} I_1 - \operatorname{Im} I_1$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} B_{Kab} &= -\frac{1}{3V} \left(\operatorname{Im} I_1 - \frac{R}{X} \operatorname{Re} I_1 + \operatorname{Im} I_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} I_2 \right) \\ B_{Kbc} &= -\frac{1}{3V} \left(\operatorname{Im} I_1 - \frac{R}{X} \operatorname{Re} I_1 - 2 \operatorname{Im} I_2 \right) \\ B_{Kca} &= -\frac{1}{3V} \left(\operatorname{Im} I_1 - \frac{R}{X} \operatorname{Re} I_1 + \operatorname{Im} I_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} I_2 \right) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.95) แสดงเงื่อนไขของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์สายส่งเนื่องจากกระแสมีเฟสตรงกันแรงดันเป็นศูนย์ ทำให้กระแสของแหล่งจ่ายนำหน้าแรงดัน (ความจุไฟฟ้า) มีสัดส่วนที่พอเหมาะกับการแสดงจริงของโหลด แต่ก็จะทำให้เกิดค่าตัวประกอบกำลังที่จุดจ่ายของแหล่งนำหน้าเท่ากับ $\cos(\arctan R/X)$ แผนภาพเฟสเซอร์ในภาพประกอบที่ 24 แสดงถึงการชดเชยในเทอมของส่วนประกอบสมมาตร



ภาพประกอบ 17 แผนภาพเฟสเซอร์ของการชดเชยในเทอมส่วนประกอบสมมาตร

ก) กระแสไม่สมดุล ทั้งสามเฟส I_a , I_b และ I_c ที่เกิดจากโหลด

ข) การชดเชยให้โหมตสมดุล ด้วยกระแสชดเชยลำดับเฟสลบ I_{Ka2} , I_{Kb2} และ I_{Kc2}

ค) การชดเชยกระแสอีแอกทีฟ ลำดับเฟสบวกด้วย I_{Ka1} , I_{Kb1} และ I_{Kc1} เพื่อกำจัดกำลังรีแอกทีฟเพื่อให้ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

3.1 การชดเชยโหลดไม่สมดุลในเทอมของปริมาณกระแส

การชดเชยโหลดไม่สมดุลในเทอมของปริมาณกระแสส่วนประกอบ สมมาตรสามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกัน พื้นฐานของการชดเชย คือ สมการ (2.72) และ (2.89) จากสมการที่ (2.95) การชดเชยโหลดไม่สมดุลและแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง เนื่องจากเทอมของกระแสที่มีเฟสตรงกับแรงดันในเฟส AB คือ

$$B_{Kab} = -\frac{1}{3V} \left(\text{Im } I_1 - \frac{R}{X} \text{Re } I_1 + \text{Im } I_2 - \sqrt{3} \text{Re } I_2 \right)$$

หรือ

$$B_{Kab}(\sqrt{3}V) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{R}{X} \text{Re } I_1 - \text{Im } I_1 \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im } I_2 + \text{Re } I_2 \quad (2.96)$$

แทนสมการ (2.78) I_1 และ I_2 ในเทอมของ I_a I_b และ I_c (2.96) จะได้

$$B_{Kab}(\sqrt{3}V) = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{R}{3X} \right) \text{Im } I_b + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{R}{3X} \right) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \text{Re } I_a - \frac{1}{2} \text{Im } I_a \right) \quad (2.97)$$

แรงดันระหว่างเฟส

$$V_{ab} = V_a - V_b = (1 - a^2)V = \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) V$$

$$V_{ab}^* = \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) V \quad (2.98)$$

$$V_{bc}^* = (j\sqrt{3})V$$

$$V_{ca}^* = \left(-\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) V$$

ซึ่ง

$$V_{bc}^* I_b = \left(-\sqrt{3 \text{Im } I_b + j\sqrt{3} \text{Re } I_b} \right) V \quad \text{จะได้ว่า}$$

$$\text{Re} \left(\frac{V_{bc}^* I_b}{\sqrt{3}} \right) = \left(-\frac{\sqrt{3 \text{Im } I_b}}{\sqrt{3}} \right) V \quad (2.99)$$

และ

$$\begin{aligned}
 V_{ca}^* I_a &= -\left(-\frac{3}{2} \operatorname{Re} I_a + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} I_a\right) + j\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} I_a - \frac{3}{2} \operatorname{Im} I_a\right) V \\
 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{ca}^*}{\sqrt{3}} I_a\right) &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{3}{2} \operatorname{Re} I_a - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} I_a\right) V
 \end{aligned} \tag{2.100}$$

แทนสมการ (2.99) และ (2.100) ใน (2.97)

$$B_{Kab}(\sqrt{3}V) = -K_1 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{bc}^*}{\sqrt{3}V}\right) I_b - K_2 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{ca}^*}{\sqrt{3}V}\right) I_a \tag{2.101a}$$

$$\text{กำหนดให้ } K_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{R}{3X} \text{ และ } K_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{R}{3X}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$B_{Kbc}(\sqrt{3}V) = -K_1 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{ca}^*}{\sqrt{3}V}\right) I_c - K_2 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{ab}^*}{\sqrt{3}V}\right) I_b \tag{2.101b}$$

$$B_{Kca}(\sqrt{3}V) = -K_1 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{ab}^*}{\sqrt{3}V}\right) I_a - K_2 \operatorname{Re}\left(\frac{V_{bc}^*}{\sqrt{3}V}\right) I_c \tag{2.101c}$$

ซึ่ง $V_{ab}^* / \sqrt{3}V, V_{bc}^* / \sqrt{3}V$ และ $V_{ca}^* / \sqrt{3}V$ แทนด้วยเฟสเซอร์หนึ่งหน่วย สมการที่ (2.101) คือส่วนของจำนวนจริงของผลคูณระหว่างกระแสของโหลด กับแรงดันระหว่างสายหรือผลคูณของกระแสโหลดที่มีเฟสตรงกับแรงดันระหว่างสาย เช่น $\operatorname{Re}(V_{ab}^* I_a) / \sqrt{3}V$ ซึ่งก็คือ ส่วนของกระแสโหลด I_a ที่มีเฟสตรงกันกับแรงดัน V_{ab}

ถ้าต้องการหาคะชดั้สแซปเตนซ์ในเทอมก่าณัปลั้น (Instantaneous Values) ของแรงดันและกระแสโหลดพิจารณาเฟส A

$$I_a = (\operatorname{Re} I_a + j \operatorname{Im} I_a) \tag{2.102}$$

กระแสณัปลั้นของเฟส A

$$\begin{aligned}
i_a &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[\left(\operatorname{Re} I_a + j \operatorname{Im} I_a \right) e^{j\omega t} \right] \\
&= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[\left(\operatorname{Re} I_a + j \operatorname{Im} I_a \right) (\cos \omega t + j \sin \omega t) \right] \\
&= \sqrt{2} (\operatorname{Re} I_a \cos \omega t - \operatorname{Im} I_a \sin \omega t)
\end{aligned} \tag{2.103}$$

$\sqrt{2} \operatorname{Re} I_a$ จะเท่ากับ i_a ในสมการ (2.103) เมื่อ $\cos \omega t = 1$ และ $\sin \omega t = 0$ $\operatorname{Re} I_a = \frac{i_a}{\sqrt{2}}$
ถ้ากำหนดให้ V_{ab} เป็นตัวอ้างอิง

$$\begin{aligned}
v_{ab} &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[\left(\sqrt{3V} \right) e^{j\omega t} \right] \\
&= \sqrt{2} (\sqrt{3V}) \cos \omega t
\end{aligned} \tag{2.104}$$

จากสมการ (2.103) และ (2.104) (เมื่อ $\cos \omega t = 1$)

$$\operatorname{Re} \left(\frac{V_{ab}^*}{\sqrt{3V}} \right) I_a = \frac{1}{\sqrt{2}} i_a(t) \bigg|_{\substack{v_{ab} > 0 \\ dv_{ab}/dt = 0}} \tag{2.105}$$

ดังนั้นสมการ (2.101) ในเทอมของเฟสเซอร์ สามารถจัดอยู่ในเทอมกลับพล้นโดยใช้สมการ
ทำนองเดียวกันกับ (2.105) แทนใน (2.101)

$$\begin{aligned}
B_{kab}(\sqrt{3V}) &= \frac{-K_1}{\sqrt{2}} i_b(t) \bigg|_{\substack{v_{bc} > 0 \\ dv_{bc}/dt = 0}} - \frac{K_2}{\sqrt{2}} i_a(t) \bigg|_{\substack{v_{ca} > 0 \\ dv_{ca}/dt = 0}} \\
B_{kbc}(\sqrt{3V}) &= \frac{-K_1}{\sqrt{2}} i_c(t) \bigg|_{\substack{v_{ca} > 0 \\ dv_{ca}/dt = 0}} - \frac{K_2}{\sqrt{2}} i_b(t) \bigg|_{\substack{v_{ab} > 0 \\ dv_{ab}/dt = 0}} \\
B_{kca}(\sqrt{3V}) &= \frac{-K_1}{\sqrt{2}} i_a(t) \bigg|_{\substack{v_{ab} > 0 \\ dv_{ab}/dt = 0}} - \frac{K_2}{\sqrt{2}} i_c(t) \bigg|_{\substack{v_{bc} > 0 \\ dv_{bc}/dt = 0}}
\end{aligned} \tag{2.106}$$

ถ้า $i_b(t) \left| \frac{dv_{bc}}{dt} = 0 \right|^{v_{bc} > 0}$ คือค่ากระแสของ $ib(t)$ ที่เวลาการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของแรงดัน V_{bc}

(t) เป็น 0 และ V_{bc} เป็นบวก ก็คือช่วงเวลาที่แรงดัน $V_{bc}(t)$ เป็นค่าสูงสุด ฉะนั้นขนาดของกระแส $i_b(t)$ ที่ได้ จะมีเฟสตรงกับแรงดัน $V_{bc}(t)$ (การหาค่ากระแสสามารถทำในช่วงลบของแรงดัน ได้เช่นกัน โดยเครื่องหมายในสมการ (2.106) เปลี่ยนเป็นบวก)

ในสมการที่ (2.106) แสดงถึงการชดเชยขั้วเซปเตนซ์ในเทอมกระแสโหลดที่มีเฟสตรงกับแรงดันระหว่างสาย และ เช่นเดียวกันถ้าแทนสมการ (2.78) ในเทอมของ $I_a I_b$ และ I_c ในสมการ (2.89) จะได้

$$\begin{aligned} B_{Kab}(\sqrt{3}V) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\text{Im } I_a + \text{Im } I_b - \text{Im } a^2 I_c \right) \\ B_{Kbc}(\sqrt{3}V) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \left(-\text{Im } I_a + \text{Im } I_b + \text{Im } a^2 I_c \right) \\ B_{Kca}(\sqrt{3}V) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\text{Im } I_a - \text{Im } I_b + \text{Im } a^2 I_c \right) \end{aligned} \quad (2.107)$$

สมการที่(2.107) การชดเชยอยู่ในรูปของกระแสรีแอกทีฟ คือ กระแสจะทำมุมกับแรงดัน 90 องศาซึ่งกำหนดให้แรงดันเฟส A เป็นแรงดันอ้างอิง ฉะนั้นเฟสเซอร์ 1 หน่วย a และ a^2 สามารถเขียนได้

$$1 = V_a = V_a^* , \quad a = \frac{V_b^*}{V} , \quad a^2 = \frac{V_c^*}{V} \quad (2.108)$$

แทน (2.108) ในสมการ (2.107)

$$\begin{aligned} B_{Kab}(\sqrt{3}V) &= \frac{-1}{\sqrt{3}} \left[\text{Im} \left(\frac{V_a^*}{V} I_a \right) + \text{Im} \left(\frac{V_b^*}{V} I_b \right) - \text{Im} \left(\frac{V_c^*}{V} I_c \right) \right] \\ B_{Kbc}(\sqrt{3}V) &= \frac{-1}{\sqrt{3}} \left[\text{Im} \left(\frac{V_a^*}{V} I_a \right) + \text{Im} \left(\frac{V_b^*}{V} I_b \right) - \text{Im} \left(\frac{V_c^*}{V} I_c \right) \right] \end{aligned} \quad (2.109)$$

$$B_{Kca}(\sqrt{3}V) = \frac{-1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im} \left(\frac{V_a^*}{V} I_a \right) + \operatorname{Im} \left(\frac{V_b^*}{V} I_b \right) - \operatorname{Im} \left(\frac{V_c^*}{V} I_c \right) \right]$$

ถ้าต้องการหาค่าเฉลี่ยในเทอมของค่าจับพัดในทำนองเดียวกับสมการ (2.102) ถึง (2.105)

$$i_a = \sqrt{2} \left(\operatorname{Re} I_a \cos \omega t - \operatorname{Im} I_a \sin \omega t \right) \quad (2.110)$$

ซึ่งสมการ (2.109) อยู่ในเทอมของจินตภาพ ซึ่ง $\sqrt{2} \operatorname{Im} I_a$ จะเท่ากับ i_a เมื่อ $\sin \omega t = -1$ และ $\cos \omega t = 0$ ซึ่งกำหนดแรงดันเฟส A (A-N) เป็นเฟสเซอร์อ้างอิง

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2} \operatorname{Re} [V e^{j\omega t}] \\ &= \sqrt{2} V \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.111)$$

ซึ่งการหาค่าเฉลี่ยในเทอมของค่าจับพัดกำหนดโดย

$$v_a = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{dv_a}{dt} > 0 \quad (2.112)$$

ถ้าเงื่อนไขต้องการอัตราส่วนของแรงดันต่อเวลาเป็นบวก ดังนั้น เราสามารถจัดรูปแบบใหม่ เมื่อ $\cos \omega t = 0$ และ $\sin \omega t = +1$ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อครึ่งไซเคิลถัดไป

$$\operatorname{Im} I_a = \frac{i_a(t)}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0}} \quad (2.113)$$

ดังนั้น $\operatorname{Im} I_a$ สามารถวัดได้โดยการสุ่ม i_a เมื่อ $v_a = 0$ และ dv_a/dt เป็นบวก ซึ่งก็คือ แรงดันจากด้านลบผ่านจุดตัดศูนย์

$$B_{Kab} = -\frac{1}{3\sqrt{2}V} \left[i_a(t) \bigg|_{\substack{v_b=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0}} + i_b(t) \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0}} \right]$$

$$B_{Kbc} = -\frac{1}{3\sqrt{2}V} \left[-i_a(t) \Big|_{\substack{v_b=0 \\ dv_a/dt > 0}} + i_b(t) \Big|_{\substack{v_c=0 \\ dv_c/dt > 0}} \right] \quad (2.114)$$

$$B_{Kca} = -\frac{1}{3\sqrt{2}V} \left[i_a(t) \Big|_{\substack{v_b=0 \\ dv_a/dt > 0}} + i_b(t) \Big|_{\substack{v_c=0 \\ dv_c/dt > 0}} \right]$$

3.2 การชดเชยโหลดไม่สมดุลในเทอมของปริมาณกำลังแอกทีฟ หรือกำลังรีแอกทีฟ ตามสมการ (2.101) คูณด้วย $\sqrt{3}V$ ทั้งสองข้าง การชดเชยข้อเสปแทนจะแทนอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยถ้าไม่คิดการชดเชยแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์สายส่งสามารถแทนได้โดย

$$\begin{aligned} B_{Kab}(3V^2) &= -\text{Re}(V_{bc}^* I_h) - \text{Re}(V_{ca}^* I_a) \\ B_{Kbc}(3V^2) &= -\text{Re}(V_{ca}^* I_h) - \text{Re}(V_{ab}^* I_c) \\ B_{Kca}(3V^2) &= -\text{Re}(V_{ab}^* I_a) - \text{Re}(V_{bc}^* I_c) \end{aligned} \quad (2.115)$$

สมการ (2.115) สามารถเขียนอยู่ในเทอมของกระแสและแรงดันในฟังก์ชันของเวลาคือ

$$\begin{aligned} B_{Kab}(3V^2) &= -\frac{1}{T} \int_0^T v_{bc}(t) i_h(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T v_{ca}(t) i_a(t) dt \\ B_{Kbc}(3V^2) &= -\frac{1}{T} \int_0^T v_{ca}(t) i_c(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T v_{ab}(t) i_b(t) dt \\ B_{Kca}(3V^2) &= -\frac{1}{T} \int_0^T v_{ab}(t) i_a(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T v_{bc}(t) i_c(t) dt \end{aligned} \quad (2.116)$$

และในทำนองเดียวกันในสมการ (2.109) สามารถเขียนอยู่ในเทอมของกำลังรีแอกทีฟ โดยการคูณ $\sqrt{3}V$ ทั้งสองข้าง การชดเชยข้อเสปแทนคือ

$$\begin{aligned} B_{Kab}(3V^2) &= -\text{Im}(V_a^* I_a) - \text{Im}(V_b^* I_h) + \text{Im}(V_c^* I_c) \\ B_{Kbc}(3V^2) &= \text{Im}(V_a^* I_a) - \text{Im}(V_b^* I_h) - \text{Im}(V_c^* I_c) \\ B_{Kca}(3V^2) &= -\text{Im}(V_a^* I_a) + \text{Im}(V_b^* I_h) - \text{Im}(V_c^* I_c) \end{aligned} \quad (2.117)$$

สมการ (2.117) สามารถแทน $\text{Im}(V_a I_a^*)$ ด้วย

$$\text{Im}(V_a I_a^*) = \frac{1}{T} \int_{-T}^T v_a(-\pi/2)(t) i_a(t) dt \quad (2.118)$$

การเลื่อนมุมแรงดันไป $(-\pi/2)$ ควบคู่กับกระแสก็คือค่ากำลังรีแอกทีฟ ในสมการ (2.118) ไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากแรงดันเป็นแรงดันเฟส V_a , V_b และ V_c ซึ่งกำหนดให้เป็นชุดของแรงดันสมดุล ส่วนกระแส I_a , I_b และ I_c ไม่สมดุล ฉะนั้นจึงต้องให้แรงดันอยู่ในรูปแรงดันระหว่างสาย

$$\begin{aligned} V_a(-\pi/2) &= \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}} \\ V_b(-\pi/2) &= \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \\ V_c(-\pi/2) &= \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.119)$$

จากสมการ (2.117), (2.118) และ (2.119) การหาคะพจน์ในรูปของกำลังรีแอกทีฟในเทอมของเวลา

$$\begin{aligned} B_{kab}(3V^2) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{-T}^T [v_{bc}(t) i_a(t) + v_{ca}(t) i_b(t) - v_{ab}(t) i_c(t)] dt \\ B_{kbc}(3V^2) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{-T}^T [-v_{bc}(t) i_a(t) + v_{ca}(t) i_b(t) - v_{ab}(t) i_c(t)] dt \\ B_{kca}(3V^2) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{-T}^T [v_{bc}(t) i_a(t) - v_{ca}(t) i_b(t) + v_{ab}(t) i_c(t)] dt \end{aligned} \quad (2.120)$$

ชนิดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

1. ตัวเหนี่ยวนำขนาน (Shunt Reactor)

ตัวเหนี่ยวนำขนาน คือ การต่อตัวเหนี่ยวนำขนานกับระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีค่าคงที่ โดยต่อกับระบบตลอดเวลา หรือใช้อุปกรณ์ตัดตอนเป็นตัวตัดหรือต่อตัวเหนี่ยวนำกับระบบ ซึ่งมีราคาถูกกว่าการชดเชย แบบอื่นในการชดเชยแบบดูดกลืนกำลัง รีแอกทีฟเพื่อใช้ควบคุมระดับแรงดันไม่ให้สูงเกินไป โดยมักจะใช้กับระบบสายส่งในอากาศ แรงดันสูงมาก (EHV) หรือ ในระบบแรงดันสูงและแรงดันสูงมากในสายส่งใต้ดิน

2. ตัวเก็บประจุขนาน (Shunt Capacitor)

ตัวเก็บประจุขนาน คือ ตัวเก็บประจุต่อขนานกับระบบเพื่อทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟเมื่อใช้เป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบคงที่ หรือ ใช้อุปกรณ์ตัดต่อ ซึ่งมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับการชดเชยแบบอื่นในการชดเชยแบบจ่ายกำลังรีแอกทีฟ โดยใช้ควบคุมแรงดันไม่ให้ต่ำหรือใช้ชดเชยตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ตัวเก็บประจุขนานที่ใช้ในการชดเชยมีตั้งแต่ขนาด kvar จนถึงหลายร้อย Mvar โดยใช้ทั้งในระบบโรงงานอุตสาหกรรม ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า จนถึงระบบส่งกำลังไฟฟ้า ตัวเก็บประจุขนานมีโครงสร้างที่ซับซ้อนต่อภาคติดตั้งโดยการใช้คาปาซิเตอร์หน่วยเล็ก ๆ ต่อเป็นมอดูล (Modular) แต่ละมอดูล อาจจะต่อขนานหรืออนุกรม เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ และการสูญเสียจะมีค่าต่ำมาก

3. เครื่องชดเชยซิงโครนัส (Synchronous Compensators)

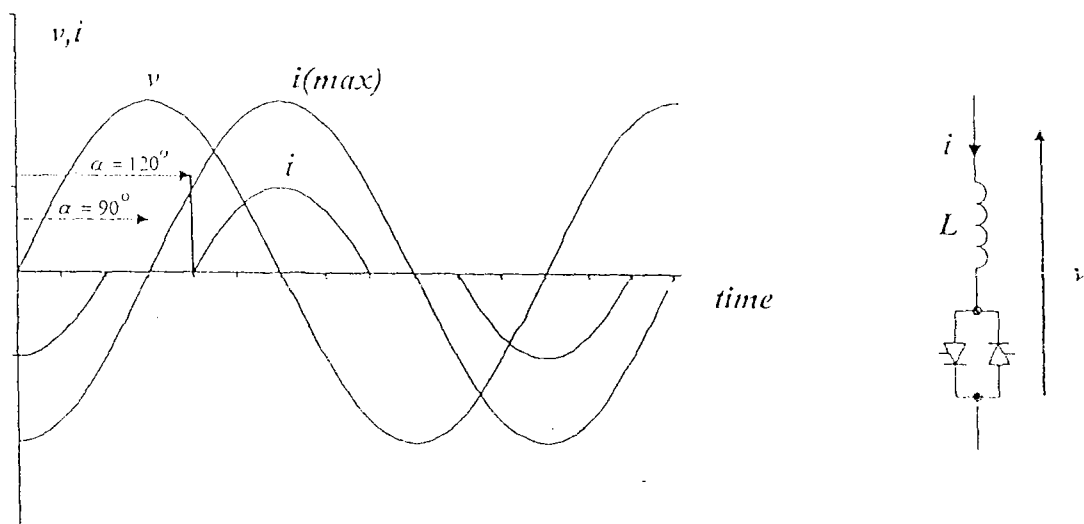
เครื่องชดเชยซิงโครนัสไม่ได้ใช้เป็นซิงโครนัสมอเตอร์ แต่ใช้สำหรับการจ่ายหรือดูดกลืนกำลังรีแอกทีฟซึ่งสามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องชดเชยซิงโครนัสถูกใช้ในระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่มีสายส่งยาว หรือในสถานีไฟฟ้าที่สำคัญ หรือเครื่องชดเชยซิงโครนัสขนาดเล็กที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม แต่ปัจจุบันมีใช้น้อยมาก ขนาดของเครื่องชดเชยซิงโครนัสตั้งแต่ขนาด Mvar จนถึงร้อย Mvar ขนาดของแรงดันมักจะต่ำกว่า 24 kV. เครื่องชดเชยซิงโครนัสแบบใหม่จะเป็นชนิดที่ควบคุมกระแสกระตุ้นได้รวดเร็ว (Fast Excitation) โดยใช้ตัวกระตุ้นแบบตัวเรียงกระแสชนิดควบคุมได้ (Rectifier Controlled Exciter) การทำงานแบบจ่ายกำลังรีแอกทีฟจะทำงานในช่วงเวลาสั้น ๆ แบบโหลดเกิน (Overload) โดยปกติแล้วจะทำงานแบบรับกำลังรีแอกทีฟที่ร้อยละ 60 ของพิกัด MVA ความเร็วในการตอบสนองมากกว่าสิบวินาที

ปัจจุบันเครื่องชดเชยเชิงโคจรนิวตริกแทนด้วย SVC ซึ่งมีราคาถูก ความสามารถและความเชื่อถือสูงกว่า ขกเว้นหนึ่งข้อ คือ ที่สถานีแปลงไฟกระแสสลับเป็นกระแสตรง (HVDC) สามารถที่จะเพิ่มขนาดของกำลังลัดวงจรได้ ซึ่ง SVC ไม่สามารถทำได้

4. รีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor – Controlled Reactor) TCR

รีแอคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (TCR) แบบเฟสเดียว เป็นอุปกรณ์สำคัญของอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟแบบสถิต (Static Var Compensator) ซึ่งให้คุณสมบัติการควบคุมอย่างต่อเนื่อง ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และไม่มีภาวะชั่วครู่ (Transients) แต่จะเป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิก (Harmonic)

ภาพประกอบที่ 18 แสดงวงจรและรูปคลื่นของ TCR เฟสเดียว ซึ่งจะประกอบด้วยรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมกับไทรสเตอร์ 2 ตัว ขนานกันหัวกัน (Antiparallel) เพื่อให้สามารถนำกระแสทั้งลูปกลับขึ้นบวกและลบ



ภาพประกอบ 18 การต่อไทรสเตอร์กับตัวเหนี่ยวนำและรูปคลื่นกระแสของ TCR.

กำหนดให้แรงดันของระบบที่ป้อนให้กับ TCR คือ v_s

$$v_s = V_m \sin \omega t \quad (2.121)$$

แรงดันที่ตกคร่อมรีแอคเตอร์ v_L

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.122)$$

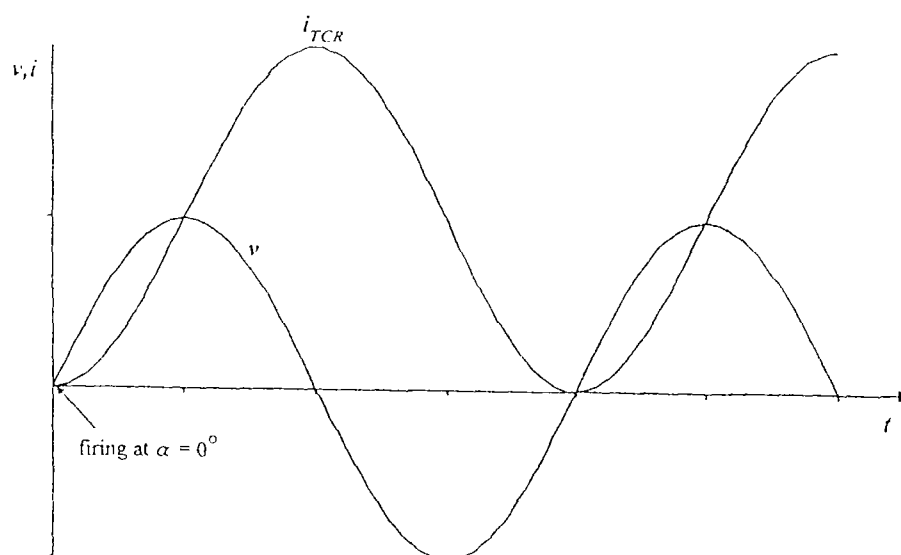
จากสมการ (2.121) และ (2.122)

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} - v_s &= 0 \\ i(t) &= \frac{1}{L} \int v_s dt \\ i(t) &= -\frac{V}{\omega L} \cos \omega t + c \end{aligned} \quad (2.124)$$

ถ้าพิจารณาขอบเขตเงื่อนไขของกระแส $i(\omega t = \alpha) = 0$

$$i(t) = \frac{V}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (2.124)$$

กระแส i_{TCR} เป็นตัวกำหนดค่าความเหนี่ยวนำ หรือ ชัลเซปแทนซ์ หรือ กำลังรีแอทีฟ กระแส i_{TCR} จะเริ่มไหลตั้งแต่มุม 180 องศา จนกระแสสูงสุดที่มุม 90 องศา เป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์ ฉะนั้น ช่วงนำกระแสของ TCR คืออยู่ระหว่าง 90 ถึง 180 องศา ($90 < \alpha < 180$) ถ้า TCR นำกระแสต่ำกว่า 90 องศา จะทำให้เกิดส่วนประกอบกระแสตรง (DC Components) ที่กระแส และทำให้การทำงานของ TCR ไม่ถูกต้อง ซึ่งจะพิจารณาว่าเป็นการนำกระแสของ TCR ที่ผิดพลาด (Misfiring) (8) ตามภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบ 19 รูปคลื่นกระแสของ TCR ที่นำกระแสที่มุม 0 องศา ($\alpha = 0^\circ$)

กระแส i_{TCR} ในสมการ (2.124) ประกอบด้วยฮาร์มอนิกต่าง ๆ สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแล้ว การขจัดเซ้าลิ่งรีแอกทีฟที่ต้องการที่ความถี่ของระบบเท่านั้น จากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ (Fourier Analysis) กระแสหลักมูล (Fundamental Current)

$$I_f = \alpha_f \cos \omega t + b_f \sin \omega t$$

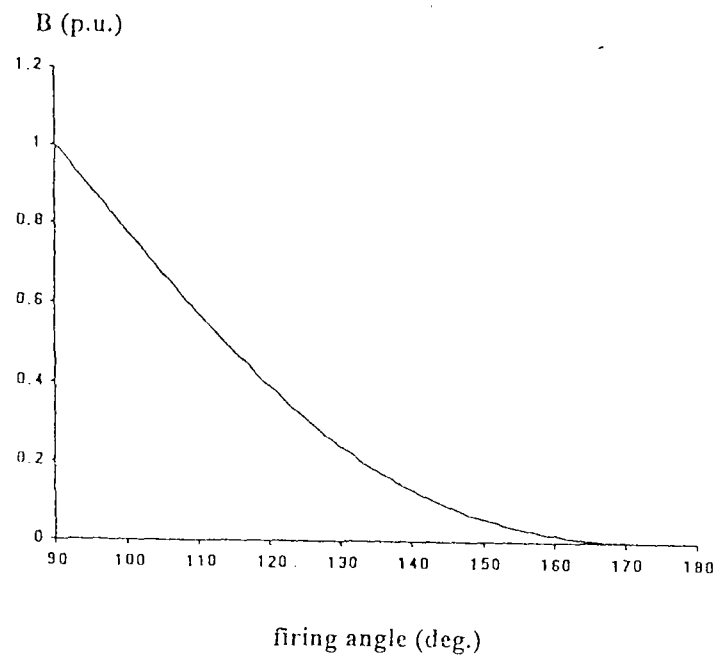
ในสมการ (2.124) $b_f = 0$ เนื่องจาก $f(x) = f(-x)$ ซึ่งจะไม่มีฮาร์มอนิกคู่

$$I_f = \frac{V}{\omega L} \left(\frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right) \quad (2.125)$$

ค่าเซปแลนซ์ของ TCR

$$\begin{aligned} B_{TCR} &= B_L \left(\frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right) \\ &= \frac{2}{\pi X_L} \left((\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \end{aligned} \quad (2.126)$$

สมการ (2.126) ซ้ำสแชนต์เด่นหลักมูลของ TCR แสดงในภาพประกอบที่ 20

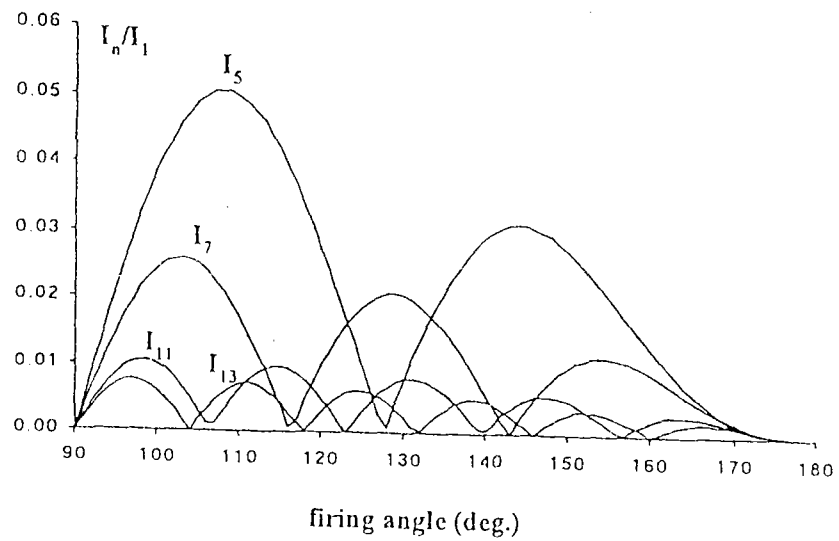


ภาพประกอบ 20 ซ้ำสแชนต์เด่นหลักมูลของ TCR

กระแสของ TCR ไม่เป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์จึงทำให้เกิดฮาร์โมนิก ซึ่ง TCR จะกำเนิดฮาร์โมนิกเลขคี่คือ 3, 5, 7, 9, 11, 13, ขนาดสูงสุดของฮาร์โมนิก คือ 13.8% , 5% , 2.5%, 1.6%, 1%, 0.7%, ของกระแสหลักมูล (1) . (8) ขณะที่ TCR นำกระแสสูงสุดตามลำดับ กระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจาก TCR โดยทั่วไปจะถือว่า

$$I_n = \frac{V}{\omega L} \frac{2}{\pi} \left[-\frac{2}{\pi} \cos \alpha \sin n\alpha + \frac{1}{n-1} \sin(n-1)\alpha + \frac{1}{n+1} \sin(n+1)\alpha \right] \quad (2.127)$$

สมการที่ (2.127) กระแสฮาร์โมนิก แสดงได้ในภาพประกอบที่ 21



ภาพประกอบ 21 กระแสฮาร์โมนิก ที่เกิดจาก TCR

การใช้งาน TCR ในระบบสามเฟสต่อในแบบเดลตาทั้งนี้เพื่อป้องกันฮาร์โมนิกที่ 3, 9, 15, ... (ฮาร์โมนิกที่ 3 เหวลงตัว) ที่เกิดจาก TCR ไม่ให้ไหลไปสู่ระบบ ซึ่งการต่อแบบเดลตาเป็นมาตรฐานโดยทั่วไป

ฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ถูกตัดไป สามารถอธิบายได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 i_{ah3} &= a_3 \cos(3\omega t + \Phi_3) \\
 i_{bc3} &= a_3 \cos\left(3\omega t + \Phi_3 + 3\frac{2\pi}{3}\right) \\
 &= a_3 \cos(3\omega t + \Phi_3 + 2\pi) \\
 i_{ca3} &= a_3 \cos\left(3\omega t + \Phi_3 + 3\frac{4\pi}{3}\right) \\
 &= a_3 \cos(3\omega t + \Phi_3 + 4\pi)
 \end{aligned} \tag{2.128}$$

ดังนั้น

$$i_{ah3} = i_{bc3} = i_{ca3}$$

กระแสทั้ง 3 เฟส จะไหลวนอยู่ในวงรอบ (Loop) ของเตลตาอยู่ในรูปของลำดับเฟสศูนย์ สามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายว่ากระแสฮาร์มอนิก ที่ตามไหลสู่ระบบเป็นศูนย์

$$i_{a3} = i_{ab3} - i_{ca3} = 0 \text{ และ } i_{b3} = 0, i_{c3} = 0$$

ในการทำงานเดียวกัน ฮาร์มอนิกที่ 3 หากลงตัวก็จะไม่สามารถไหลออกสู่ระบบได้ สำหรับฮาร์มอนิกเลขคู่จะไม่เกิดถ้าหาก TCR ทั้ง 3 เฟส สมดุล หากแรงดันของระบบ หรือการนำกระแส (Firing) ของ TCR ไม่สมดุลแล้วจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกดังกล่าวจำนวนมาก

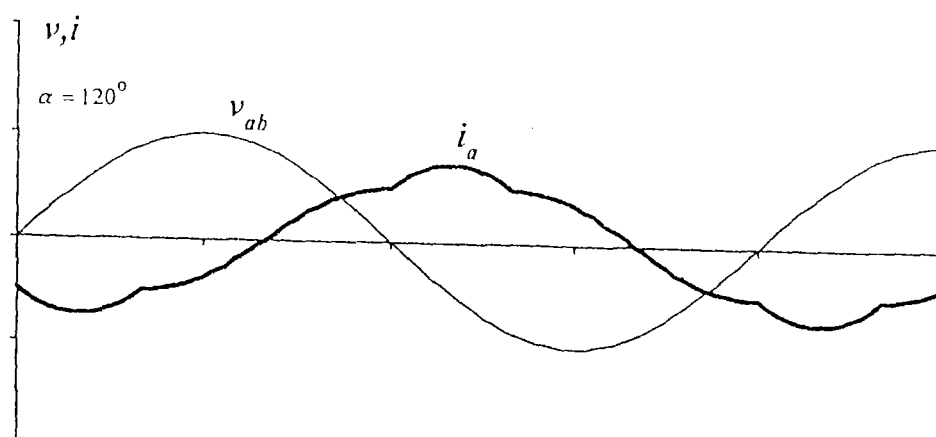
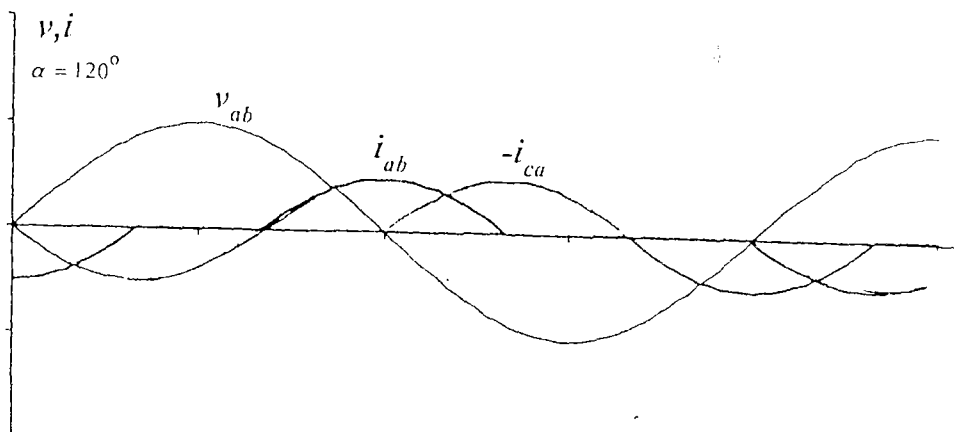
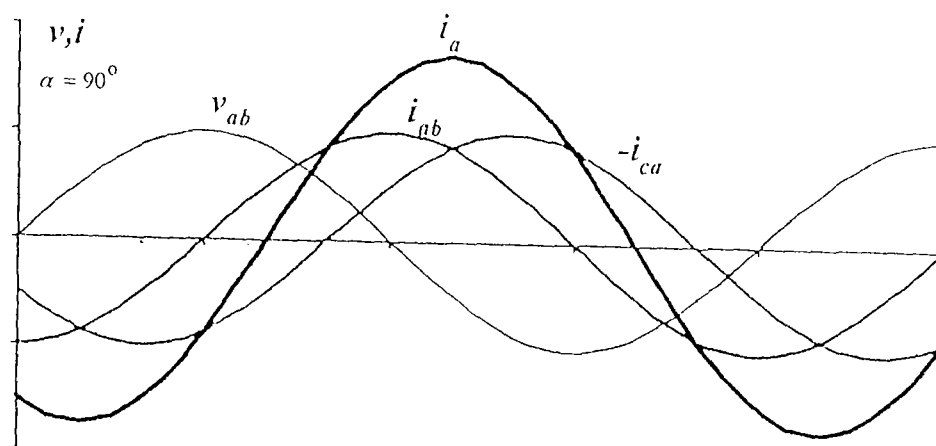
การวิเคราะห์ ฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 เช่นเดียวกับฮาร์มอนิกที่ 3

$$\begin{aligned} i_{ab5} &= a_5 \cos(5\omega t + \Phi_5) \\ i_{ab5} &= a_5 \cos\left(5\omega t + \Phi_5 + 5\frac{2\pi}{3}\right) = a_5 \cos\left(5\omega t + \Phi_5 + 4\frac{\pi}{3}\right) \\ i_{ab5} &= a_5 \cos\left(5\omega t + \Phi_5 + 5\frac{4\pi}{3}\right) = a_5 \cos\left(5\omega t + \Phi_5 + 2\frac{\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.129)$$

ในสมการ (2.129) ฮาร์มอนิกที่ 5 อยู่ในรูปของลำดับเฟสลบ ดังนั้น จึงไม่สามารถกำจัดออกไปได้

$$\begin{aligned} i_{ab7} &= a_7 \cos(5\omega t + \Phi_7) \\ i_{ab7} &= a_7 \cos\left(5\omega t + \Phi_7 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{ab7} &= a_7 \cos\left(5\omega t + \Phi_7 + \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.130)$$

สมการ (2.130) ฮาร์มอนิกที่ 7 อยู่ในรูปของ ลำดับเฟสบวก ซึ่งมันจะไหลเข้าสู่ระบบภาพประกอบที่ 29 แสดงรูปคลื่นของกระแส TCR ทั้งกระแสในสาย (Line Current) และกระแสเฟส (Phase Current)



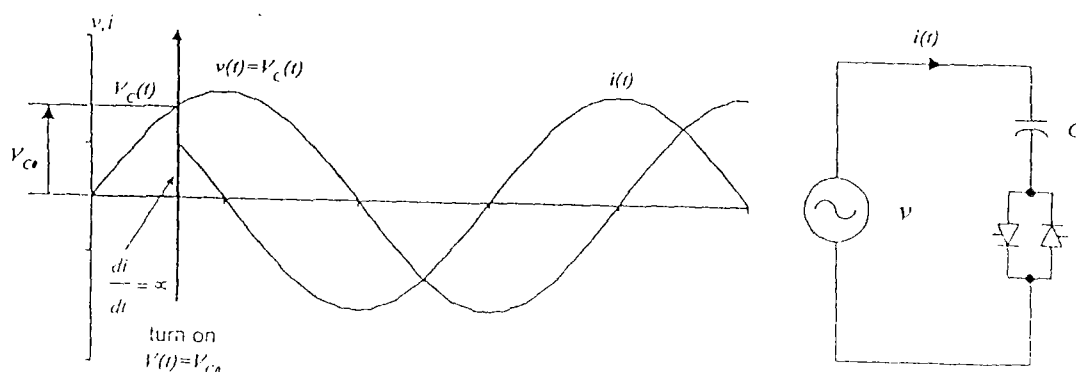
$$\begin{aligned} i_a &= i_{ab} - i_{ca} \\ i_b &= i_{bc} - i_{ab} \\ i_c &= i_{ca} - i_{bc} \end{aligned}$$

ภาพประกอบ 22 รูปคลื่นกระแสในสายและกระแสฟลักของ TCR 3 เฟส ต่อแบบเดลตา

5. ตัวเก็บประจุที่สวิตช์ด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Switched Capacitor) TSC

ภาพประกอบที่ 23 ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับไทรสเตอร์ต่อกับแหล่งจ่าย

แรงดัน สมมติว่าในวงจรไม่มีค่าความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำกระแส $i = C \frac{dv}{dt}$



V_{c0} = Capacitor voltage due to precharging

ภาพประกอบ 23 การสวิตช์ตัวเก็บประจุ

5.1 การวิเคราะห์กระแสชั่วครู่ (Transients Current) หลังจากการสวิตช์ แสดงได้ 3 กรณี

แรงดันของตัวเก็บประจุไม่เท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย เมื่อไทรสเตอร์สวิตช์กระแสอัดประจุจำนวนมหาศาลจะไหลอัดเข้าตัวเก็บประจุ เพื่อให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายในเวลาอันสั้น ไทรสเตอร์จะไม่สามารถทนต่อความเครียดนี้ได้ และจะพังทลาย

แรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย เมื่อไทรสเตอร์สวิตช์ ซึ่งกรณีนี้ กระแสจะกระโดดไปที่ค่ากระแสสถานะอยู่ตัว (Steady - State Current) อย่างทันทีทันใด ถึงแม้ว่า กระแสจะไม่มากกว่ากระแสปกติ แต่ไทรสเตอร์อาจจะเสียหายได้ ซึ่งไทรสเตอร์จะมีขีดจำกัดของ di/dt ตามภาพประกอบที่ 23

ซึ่งทั้ง 2 กรณีไม่สามารถใช้ได้ทางปฏิบัติ ถ้าพิจารณากรณีที่ไทรสเตอร์สวิตช์เกิดขึ้นที่จุดสูงสุดโดยแรงดันของแหล่งจ่าย $V = V_m \sin(\omega_0 t + \alpha)$ กระแสสามารถได้โดย

$$i = C \frac{dv}{dt} = V_m \omega_0 C \cos(\omega_0 t + \alpha) \quad (2.131)$$

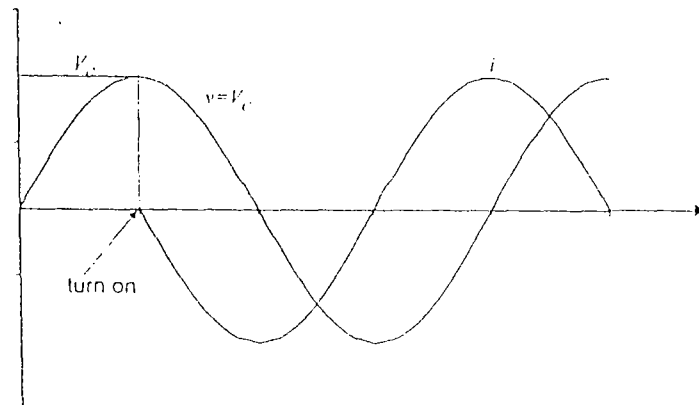
ซึ่ง $\alpha = \pm\pi/2$ และ $\omega_0 C = B_c$ ก็คือ รัศมีขั้วแกนที่ความถี่ของระบบและรีแอคแตนซ์

$$X_c = 1/B_c$$

$$i = \pm V_m B_c \sin \omega_0 t = \pm I_m \sin \omega_0 t \quad (2.132)$$

ซึ่ง I_m คือ กระแสสูงสุดของรูปคลื่น $I_m = V_m B_c = V_m/X_c$

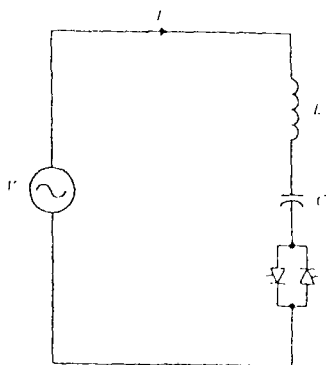
ถ้าในวงจรไม่มีอุปกรณ์อื่นต่ออยู่ แรงดันที่ตัวเก็บประจุก่อนมีการสวิตช์ $V_{co} = \pm V_m$ ซึ่งหมายความว่า จะต้องยึดค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุให้เท่ากับ $\pm V_m$ จากข้อกำหนด $dv/dt = 0$ และ $V_{co} = \pm V_m$ ที่เวลา $t = 0$ ซึ่งเป็นไปได้ในทางอุดมคติ การสวิตช์จะไม่มีภาวะชั่วครู่ แสดงในภาพประกอบที่ 31 ซึ่งเงื่อนไขนี้เป็นพื้นฐานในการสวิตช์ตัวเก็บประจุ



ภาพประกอบ 24 รูปคลื่นการสวิตช์ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติ

5.2 การสวิตช์ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น แก้ไขโดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวเก็บประจุ แสดงในภาพประกอบที่ 24 เพื่อที่จะให้ di/dt อยู่ในขีดความสามารถของไทรสเตอร์ทนได้ กรณีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำต่ออยู่ด้วยกันจะทำให้เกิดภาวะการสั่นชั่วครู่ (Transients Oscillate) ซึ่งความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของภาวะชั่วครู่จะเป็นแฟกเตอร์บอกขนาดของแรงดันและกระแส [1], [8] หลังจากการสวิตช์ แต่ก็ยังไม่พอสำหรับการออกแบบเพราะว่าความเหนี่ยวนำจะรวมความเหนี่ยวนำของระบบด้วย และถ้าใช้หม้อแปลงแปลงแรงดันให้ต่ำลงก็จะต้องรวมความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้วย ฉะนั้น การเลือกตัวเหนี่ยวนำจะไม่สามารถเลือกได้โดยอิสระ



ภาพประกอบ 25 วงจรการสวิตช์ตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติโดยต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวเก็บประจุ

ตามภาพประกอบที่ 25 สมการแรงดันของวงจรในเทอมของการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

$$V(s) = \left(Ls + \frac{1}{Cs} \right) I(s) + \frac{V_{C0}}{s} \quad (2.133)$$

แรงดันของแหล่งจ่ายกำหนดโดย

$$v_s = V_m \sin(\omega_0 t + \alpha) \quad (2.134)$$

เมื่อไทรสเตอร์สวิตช์ขุม จะสัมพันธ์กับรูปคลื่นของแรงดัน V ซึ่ง การแปลงกลับลาปลาซ (Inverse Laplace Transform) ของกระแสอยู่ในเทอมของเวลา

$$i(t) = I_m \cos(\omega_0 t + \alpha) - nBc \left[V_{C0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} V_m \sin \alpha \right] \sin \omega_n t - I_m \cos \alpha \cos \omega_n t \quad (2.135)$$

ซึ่ง ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติของวงจร

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = n\omega_0 \quad (2.136)$$

และ

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.137)$$

พิจารณาในเทอมของความถี่ระบบ ω_0 สถานะคงตัว (steady – state) กระแสจะนำหน้า
แรงดัน 90 องศา ขนาดของกระแสคือ

$$I_{AC} = V \frac{B_C B_L}{B_C + B_L} = V B_C \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (2.138)$$

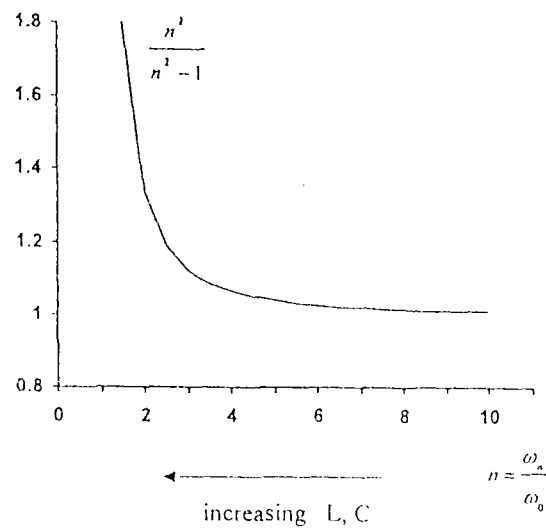
จะเห็นว่าตัวประกอบของขนาดกระแสคือ $\frac{n^2}{n^2 - 1}$ และเช่นเดียวกัน แรงดันที่ตัวเก็บ
ประจุคือ

$$V_C = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (2.139)$$

ผลของตัวประกอบ $\frac{n^2}{n^2 - 1}$ แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 33 วงจร LC ที่ความถี่เรโซแนนซ์

(Resonance) 3 เท่าของความถี่ระบบ และสูงกว่า ค่าตัวประกอบ $\frac{n^2}{n^2 - 1}$ จะเข้าใกล้ 1 และ สำหรับ

ค่าของ LC ที่ต่ำกว่าค่า 3 ω_0 จะทำให้ตัวประกอบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติค่า n จะ
ต้องเลือกให้สูงกว่า 3



ภาพประกอบ 26 ขนาดของแรงดันและกระแสแปรผันตามค่าตัวประกอบของ

พิจารณาเงื่อนไขไม่เกิดภาวะชั่วคราวเวลาสวิตช์เทอมการแกว่ง (Oscillate) ของกระแสใน สมการ (2.135) จะต้องเป็นศูนย์ ซึ่งต้องให้ทั้ง 2 เงื่อนไขเกิดขึ้นพร้อมกัน คือ

$$\cos \alpha = 0, \sin \alpha = \pm 1 \quad (2.140)$$

และ

$$V_{c0} = \pm V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} = \pm X_C I_m \quad (2.141)$$

- เงื่อนไขแรก เพื่อหลีกเลี่ยง ภาวะชั่วคราว (Transients) จะต้องสวิตช์ที่แรงดันสูงสุด ทาง ด้านบวก หรือ ทางด้านลบ

- เงื่อนไขที่สอง แรงดันของตัวเก็บประจุก่อนการสวิตช์จะต้องเท่ากับ $V_m \frac{n^2}{n^2 - 1}$ และมีขั้วเหมือนกัน

เงื่อนไขทั้งสองสำหรับการสวิตช์ไม่ให้เกิดภาวะชั่วคราว เงื่อนไขทั้งสองข้อสองไม่สามารถที่ควบคุมได้เพราะว่า V_{cm} , n และ V สามารถเปลี่ยนไปในขณะที่ทรานซิสเตอร์ยังไม่นำกระแสก่อนที่จะสวิตช์ ตัวเก็บประจุก็จะค่อย ๆ ปล่อยประจุแรงดัน V_{cm} ก็จะค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่แรงดันของระบบจะเปลี่ยนไปตามเวลา และ ความเหนี่ยวนำของระบบอาจจะเปลี่ยนไป ทำให้ค่า n เปลี่ยนไปด้วย นอกจากนี้แรงดันอาจจะไม่เป็นไซน์ที่สมบูรณ์ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะไม่เกิด กระแสชั่วคราวขณะสวิตช์ TSC

5.3 วิธีการสวิตช์ตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติแล้วจะเกิดภาวะชั่วคราวจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุแต่ต้องอยู่ในค่าที่ยอมรับได้บนพื้นฐานง่ายอุปกรณ์และวิธีการซึ่งมี 2 วิธี คือ

5.3.1 สวิตช์ตัวเก็บประจุเมื่อค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุก่อนสวิตช์มีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย ($V_{cm} = V(t)$)

$$V \sin \alpha = V_{co} \quad (2.142)$$

และมุมของการสวิตช์คือ

$$\alpha = \arcsin \frac{V_{co}}{V}$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{V_{co}}{V} \right)^2} \quad (2.143)$$

จากสมการ (2.135) ตามเงื่อนไขข้างต้น พิจารณานาในเทอมของการแกว่ง (oscillatory)

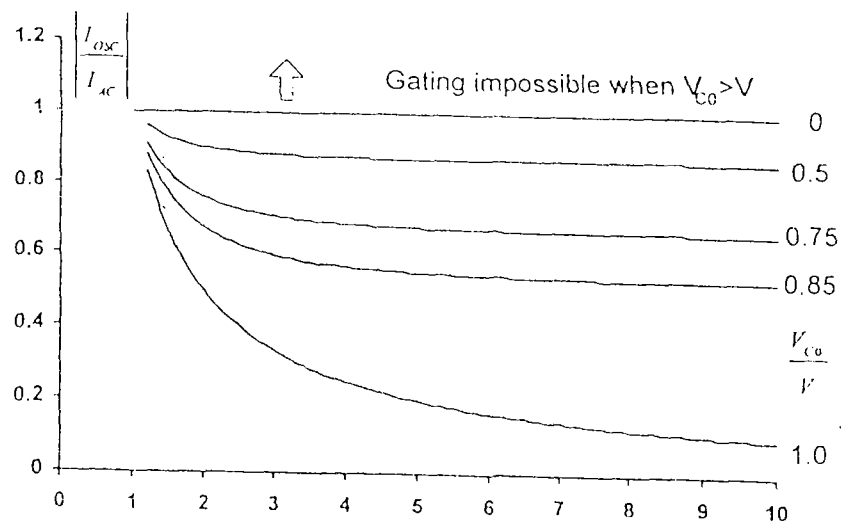
$$I_{ocs} = \sqrt{I_{AC}^2 \left(1 - \left(\frac{V_{co}}{V} \right)^2 \right) + \left(nB_c - \left(V_{co} - \frac{n^2}{n^2 - 1} V_{co} \right) \right)^2}$$

$$= \sqrt{I_{AC}^2 \left(1 - \left(\frac{V_{co}}{V} \right)^2 \right) + \left(B_c V \frac{n^2}{n^2 - 1} \right)^2 \left(\frac{V_{co}}{V} \right)^2 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} - 1 \right)^2}$$

$$= I_{AC} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{CO}}{V}\right)^2 + \left(\frac{V_{CO}}{V}\right)^2 \left(\frac{1}{n^2}\right)}$$

$$\frac{I_{OSC}}{I_{AC}} = \sqrt{1 - \left(\frac{V_{CO}}{V}\right)^2 \left(1 - \frac{V_{CO}}{V}\right)^2} \quad (2.144)$$

ภาพประกอบที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง n และเทอมของกระแสแกว่ง (Oscillatory) โดยเงื่อนไขแรงดันที่ตัวเก็บประจุก่อนสวิตช์แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าขนาดของกระแสแกว่งจะไม่มากกว่าขนาดของกระแสในคงตัว ขนาดของกระแสชั่วคราวมีขนาดเล็กถ้าแรงดันที่ตัวเก็บประจุสูง และถึงแม้ว่าในวงจร LC มีความถี่เรโซแนนซ์สูง (n มีค่ามาก) กระแสชั่วคราวก็จะเกิดขึ้นสูงถ้าตัวเก็บประจุไม่มีแรงดันเหลืออยู่เลย และวิธีนี้จะไม่สามารถใช้ได้ถ้าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ $V_{co} > V$

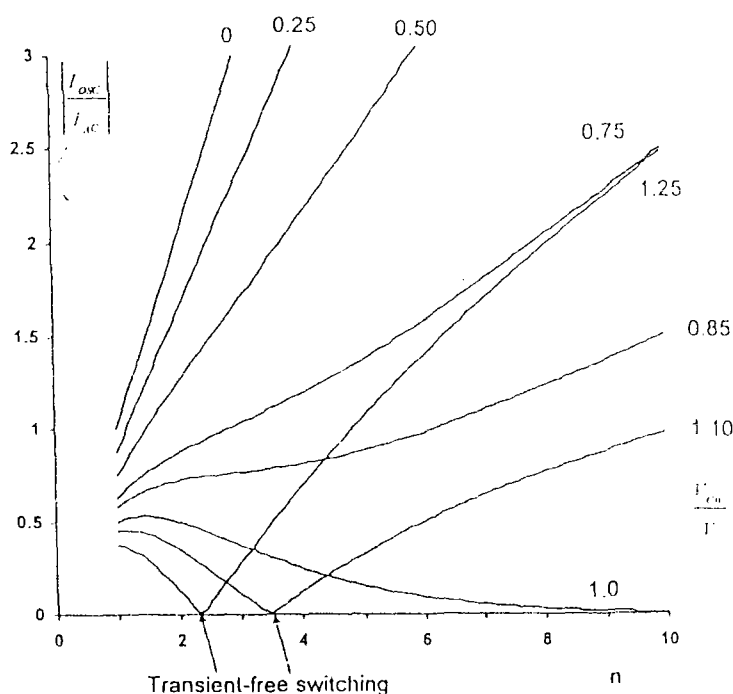


ภาพประกอบ 27 ขนาดของกระแสสั่น (Oscillatory) ที่ไทรสเตอร์สวิตช์ $V = V_{co}$

5.3.2 สวิตช์ตัวเก็บประจุที่ยอดของแรงดันแหล่งจ่าย ซึ่ง $\cos \alpha = 0$ คือ สวิตช์ตัวเก็บประจุ ที่จุดสูงสุดแรงดันของแหล่งจ่าย จากสมการ (2.135) และ (2.138) ในเทอมของกระแสแกว่ง

$$\begin{aligned}
 I &= nB_c \left(V_{c0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} V \right) \\
 &= VB_c \frac{n^2}{n^2 - 1} n \left(\frac{n^2 - 1V_{c0}}{n^2 V} - 1 \right) \\
 \frac{I}{I_{AC}} &= n \left(\frac{n^2 - 1V_{c0}}{n^2 V} - 1 \right)
 \end{aligned} \tag{2.145}$$

ภาพประกอบที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสแวงและ n โดยเงื่อนไข $\cos \alpha = 0$ สามารถใช้ได้ ถ้าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมากกว่าแรงดันแหล่งจ่าย (คือ $V_{c0}/V = 0.75$) กระแสชั่วครู่จะมีขนาดต่ำในช่วง $n = 2$ ถึง 5 และกรณีที่ $V_{c0}/V = 1$ จะให้ผลเหมือนกับกรณีแรก



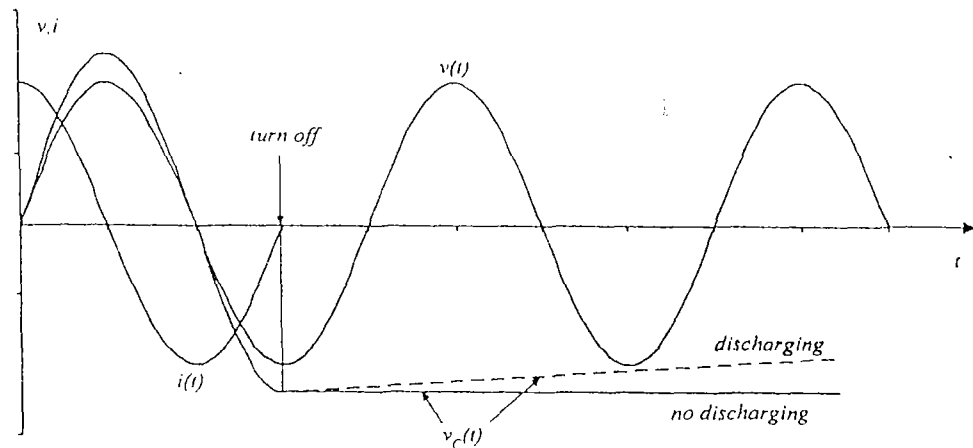
ภาพประกอบ 28 ขนาดของกระแสแวง (Oscillatory) ที่ไทรสเตอร์สวิตช์ที่เวลา $dv/dt =$

0

5.4 การหยุดไทรสเตอร์ไม่ให้นำกระแส

ไทรสเตอร์จะหยุดนำกระแสเมื่อกระแสที่ผ่านตัวมันเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 36 กระแสที่ผ่านจุดศูนย์เกิดขึ้นเวลาเดียวกับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงสุดแรงดันที่ตัวเก็บ

ประจุกับแรงดันแหล่งจ่ายจะแตกต่างกัน แรงดันที่ตัวเก็บประจุจะสูงกว่าแรงดันแหล่งจ่าย ดังแสดง
 ดังภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบ 36 แรงดันตัวเก็บประจุหลังจากไทรสเตอร์หยุดนำกระแส

การควบคุมการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

การควบคุมกำลังรีแอกทีฟก็คือ การควบคุมกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งก็คือการปรับ
 ชั้สเชปแดนซ์ การปรับชั้สเชปแดนซ์นี้กระทำได้ในแต่ละครึ่งรอบ (Cycle) ของลูกคลื่น ซึ่งหมาย
 ความเป็นว่าการให้ไทรสเตอร์นำกระแสแต่ละครั้งต้องให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสก่อน คือ กระแสจะ
 ต้องผ่านจุดศูนย์ (Natural Commutation) อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การควบคุมเป็นไปอย่างถูกต้องจะ
 ต้องมีการซิงโครไนซ์ (Synchronizing) กับแรงดันของระบบด้วย การควบคุมกำลังรีแอกทีฟแบบ
 สถิต (Static Var) ให้ทำหน้าที่จ่ายหรือดูดกลืนกำลังรีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว
 เหมาะสมกับสถานการณ์ เพื่อที่จะรักษาสภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ
 ระบบควบคุมจะต้องมีประสิทธิภาพพอสมควร ถ้าระบบควบคุมช้าเกินไป อาจเกิดผลกระทบกับ
 ระบบจนเกิดความเสียหายได้

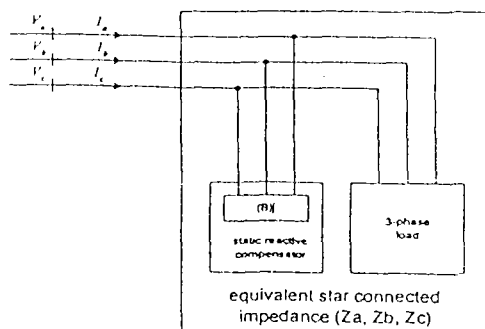
สำหรับระบบ 3 เฟส ต้องการให้ระบบอยู่ในภาวะที่สมดุล ซึ่งก็หมายความว่ากระแส
 ลำดับเฟสลบต้องทำให้ใกล้เคียงมากที่สุด ในขณะที่กระแสลำดับเฟสบวกจะต้องควบคุมให้อยู่ใน
 เกณฑ์ที่ต้องการแบบสถิต (Static) หรือ พลวัต (Dynamic) นั่นก็หมายความว่า การควบคุมแบ่งเป็น
 2 กรณี คือ การควบคุมลำดับเฟสลบ และ การควบคุมลำดับเฟสบวก

1. การควบคุมโพลไม่สมดุล

ภาพประกอบที่ 30 ปกรณั้ชดเชยกำลังรีแอกทีฟต่อขนานกับระบบระหว่างแหล่งจ่ายกับ
 โหลด 3 เฟส ถ้าสมมติว่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งทั้ง 3 เฟส เท่ากัน การชดเชยในเวลา $j\omega$ เมื่อแรง
 ดันของระบบเปลี่ยนไป อันเนื่องมาจาก การเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งถ้าสมมติว่าวงจรเทียบเคียง

เป็นแบบ y อิมพีแดนซ์ Z_a , Z_b และ Z_c แทนด้วยอิมพีแดนซ์ของโหลดและอุปกรณ์ชดเชยรวมกัน ดังนั้น กระแสที่ไหลในวงจรก็คือ I_a , I_b และ I_c ตามลำดับ

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{V_a}{I_a} \\ Z_b &= \frac{V_b}{I_b} \\ Z_c &= \frac{V_c}{I_c} \end{aligned} \quad (2.146)$$



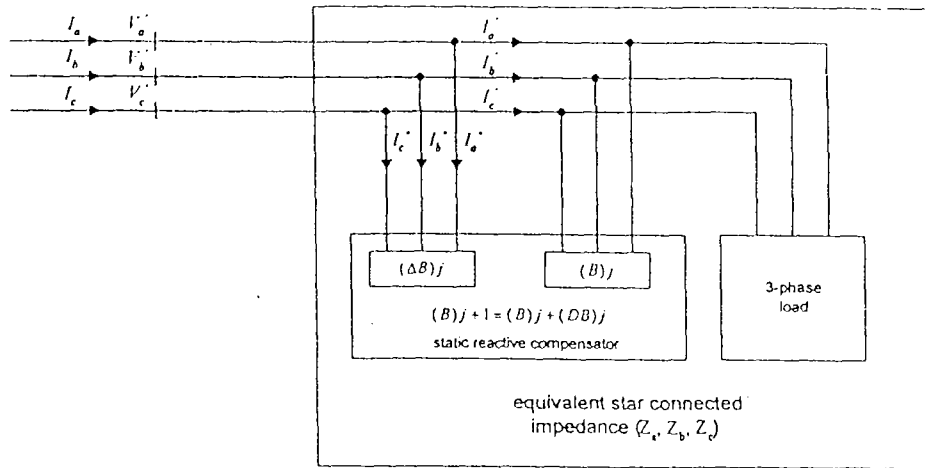
ภาพประกอบ 30 การชดเชยกำลังรีแอกทีฟในช่วง jth

เมื่อการควบคุมสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ มันก็จะปรับค่ากำลังรีแอกทีฟจาก B_j ไปเป็น B'_j หมายความว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะปกติ แสดงในภาพประกอบที่ 38 ถ้าสมมุติว่า อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟตอบสนองเฉพาะกรณีที่โหลดไม่สมดุลย์ไม่มีผลต่อการควบคุมแรงดัน ฉะนั้น แรงดันและกระแสของอิมพีแดนซ์ Z_a, Z_b และ Z_c จะเป็น V_a, V_b และ V_c และ I_a, I_b และ I_c ตามลำดับ แรงดันระบบก็จะประกอบเฉพาะลำดับเฟสบวกเท่านั้น V_a, V_b และ V_c ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.146) จะได้ว่า

$$I'_a = \frac{V'_a}{Z_a} = \frac{V_{a1} I_a}{V_a}$$

$$I'_h = \frac{V'_h}{Z_h} = \frac{V_{h1} I_h}{V_h} = \frac{a^2 V_{a1} I_h}{V} \quad (2.147)$$

$$I'_c = \frac{V'_c}{Z_c} = \frac{V_{c1} I_c}{V_c} = \frac{a V_{a1} I_c}{V_c}$$



ภาพประกอบ 31 การชดเชยกำลังรีแอกทีฟในช่วงเวลาที่ $j\text{th} + 1$

จากภาพประกอบที่ 31 เปลี่ยนแปลงเฉพาะ Bj ที่ชดเชยโหลดไม่สมดุลเท่านั้น ดังนั้น กระแสที่ชดเชย I'_{a1} เท่ากับ 0 (เนื่องจากการชดเชยไม่ตอบสนองต่อลำดับเฟสบวก) ระบบจะกลับสู่สภาวะสมดุล กระแสที่แหล่งจ่ายให้กับโหลดก็จะมีแต่ลำดับเฟสบวกเท่านั้น กระแสลำดับเฟสลบจะถูกกำจัดให้หมดไปโดยการชดเชย $(\Delta B)j$ ซึ่ง I'_{a2} จากกระแสลำดับเฟสลบ ให้กับ โหลด Z_a, Z_b และ Z_c

$$I'_{a1} = 0 \quad (2.148)$$

$$-I'_{a2} = \frac{1}{3} (I'_a + a^2 I'_b + a I'_c) \quad (2.149)$$

จากสมการ (2.147) และ (2.149) จะได้ว่า

$$-I'_{a2} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_{a1} I_a}{V_a} + \frac{a V_{a1} I_b}{V_b} + \frac{a^2 V_{a1} I_c}{V_c} \right) \quad (2.150)$$

ในสมการที่ (2.150) สามารถเขียนได้ว่า

$$I_{a2}^* = -YV_{a1} \quad (2.151)$$

โดยที่

$$Y = \frac{1}{3} \left(\frac{I_a}{V_a} + a \frac{I_b}{V_b} + a^2 \frac{I_c}{V_c} \right) \quad (2.152)$$

อุปกรณ์เซกเซกกำลังรีแอทีฟต่อแบบเคลตาถ้าใช้เซกเซกเฉพาะ โหลดไม่สมดุล
เท่านั้น $\{\Delta B_s\} = \{\Delta B_{ab}, \Delta B_{bc}, \Delta B_{ca}\}$ ดังนั้น กระแสลำดับเฟสบวก I_{a1}^* คือ

$$I_{a1}^* = j(\Delta B_{ab} + \Delta B_{bc} + \Delta B_{ca})V_{a1} \quad (2.153)$$

และกระแสลำดับเฟสลบ I_{a2}^* คือ

$$I_{a2}^* = j(a^2 \Delta B_{ab} + \Delta B_{bc} + \Delta B_{ca})V_{a1} \quad (2.154)$$

จากสมการที่ (2.151) และ (2.154) จะประกอบด้วยทั้งจำนวนจริง (Rc) และจำนวน
จินตภาพ (Im) ดังนั้น I_{a1}^* และ I_{a2}^* สามารถกำจัดให้หมดไปโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ
(2.148) , (2.151) , (2.153) และ (2.154) จะได้เซกเซกเฉพาะที่จะชดเชยให้กับระบบในแต่ละเฟส
คือ $\Delta B_{ab}, \Delta B_{bc}, \Delta B_{ca}$

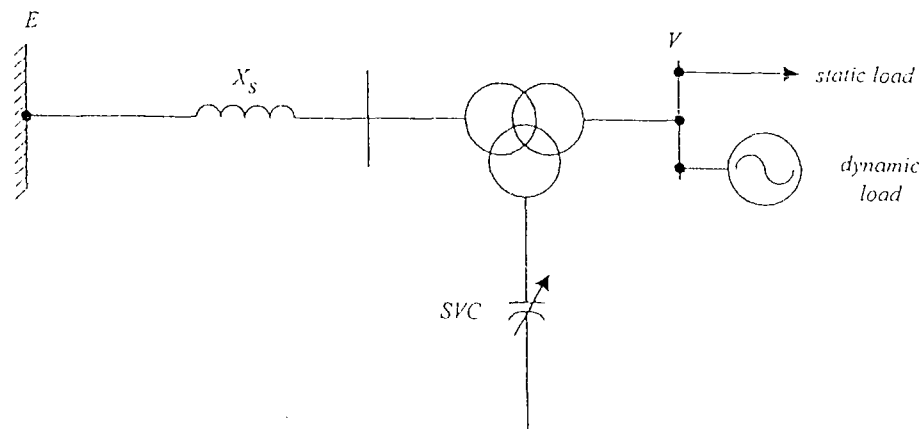
$$\begin{bmatrix} \Delta B_{ab} \\ \Delta B_{bc} \\ \Delta B_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & -1 \\ 0 & 2 \\ -\sqrt{3} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Rc}[Y] \\ \text{Im}[Y] \end{bmatrix} \quad (2.155)$$

สมการที่ (2.152) และ (2.155) ใช้สำหรับการควบคุมโหลดไม่สมดุล [9] โดยสร้างเซก
เซกเฉพาะ $\{\Delta B_s\}$ จากกระแสลำดับเฟสให้กับโหลด ซึ่งก็หมายความว่าแรงดันของระบบจะสม

คล้ายในช่วงถัดไป ส่วนการชดเชยด้านลำดับเฟสบวกจะขึ้นอยู่กับความต้องการ โดยกำหนดให้การชดเชยลำดับเฟสบวกคือ $\{B_p\} = \{B_1, B_2, B_3\}$ โดยจะรวมกับ $\{\Delta B_s\}$ จะได้การชดเชยทั้งหมดเป็น $\{B\}$

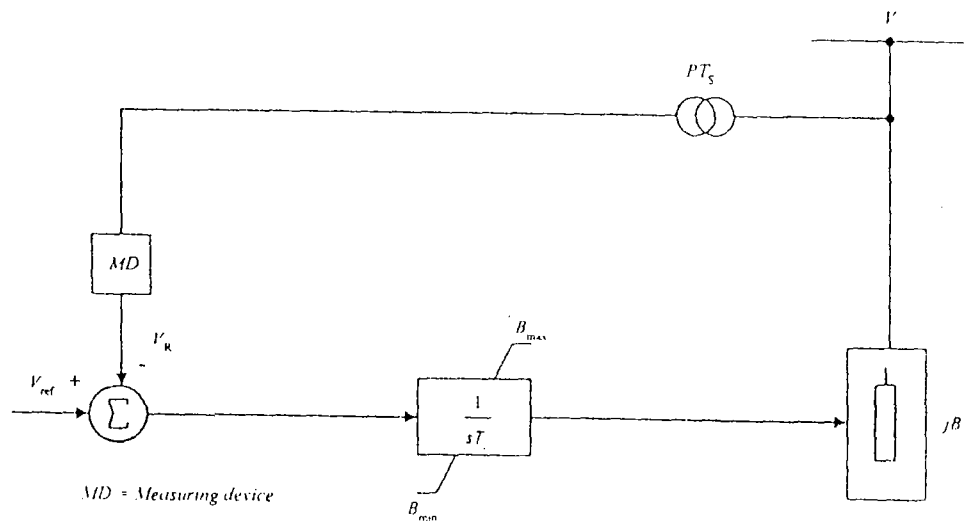
2. การควบคุมแรงดัน

ถ้าพิจารณาระบบตามภาพประกอบที่ 32 แหล่งจ่ายแทนด้วยบัสอนันต์ (Infinite bus) ต่ออยู่กับโหลดโดยสายส่งอิมพีแดนซ์ของสายส่งแทนด้วย X_s โหลดประกอบไปด้วยทั้งโหลดสถิตและโหลดพลวัต การพิจารณาในช่วงแรกให้โหลดอยู่ในเงื่อนไขสถานะคงตัว โดยที่อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตอยู่กับโหลดและทำให้แรงดันที่โหลดเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายบัสอนันต์



ภาพประกอบ 32 ระบบที่ใช้พิจารณาการควบคุมแรงดัน

การชดเชยกำลังรีแอกทีฟ เพื่อรักษาระดับแรงดันที่โหลด โดยใช้ไทรสเตอร์ควบคุมชัตเซปแทนซ์ B ซึ่งภาพประกอบที่ 32 แสดงแผนภาพกรอบ (Black Diagram) ของการควบคุม [10] โดยการควบคุมเป็นแบบเส้นตรง (Linear) และควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งชัตเซปแทนซ์ถูกควบคุมโดยตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulator) แบบตัวอินทิเกรต (Integrator) ด้วยค่าเวลาที่คงตัว (Time Constat) T_i การควบคุมเป็นแบบปิด โดยแรงดันระบบป้อนกลับถูกวัดโดยหม้อแปลงแรงดันและชุดวัด MD.

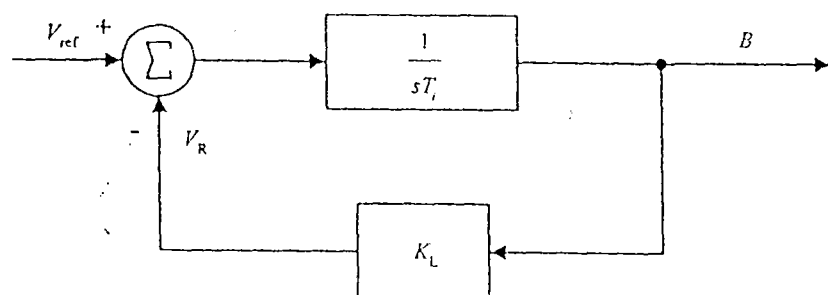


ภาพประกอบ 33 แผนภาพกรอบของการควบคุมการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

ถ้าพิจารณาการควบคุมกำลังรีแอกทีฟในภาพประกอบที่ 40 โดยระบบเป็นไปตามภาพประกอบที่ 39 การควบคุมแบบปิด (Closed Loop Control) สามารถแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 41 ซึ่งการป้อนกลับของระบบถูกเชื่อมโยงด้วยค่าคงที่ K_L (Feedback Link) ค่าการเชื่อมโยงป้อนกลับนี้จะเป็นแฟกเตอร์เปลี่ยนค่าแรงดันที่ต้องการควบคุมไปอยู่ในรูปของชดเชยแรงดัน นั่นก็คือเปลี่ยนแปลงแรงดันไปอยู่ในรูปการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

ซึ่ง K_L ในภาพประกอบที่ 34 สามารถแทนด้วย

$$K_L = \frac{dV_R}{dB} \quad (2.156)$$



ภาพประกอบ 34 การควบคุมแบบปิดของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต

ระบบกำลังในภาพประกอบที่ 32 สามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงได้ในภาพประกอบที่ 42 ซึ่ง

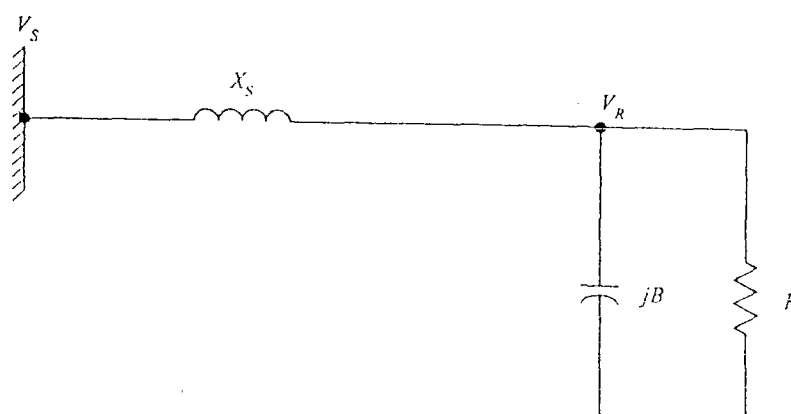
B แทนด้วย ชัศเชปแดนซ์ของโหลด และชัศเชปแดนซ์ของอุปกรณ์ชดเชย

R แทนด้วย ความต้านทานของโหลด

X_S แทนด้วย รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

V_S คือ แรงดันของแหล่งจ่ายดันทางต่อหน่วย (Per Unit)

V_R คือ แรงดันปลายทางต่อหน่วย (Per Unit)



ภาพประกอบ 35 วงจรเทียบเคียงที่ใช้ในการควบคุมแรงดันตามภาพประกอบที่ 39

จากภาพประกอบที่ 42 แรงดันปลายทางที่โหลดสามารถเขียนได้ว่า

$$V_R = V_S - jI_S X_S \quad (2.157)$$

และ

$$I_S = I_R + jI_X + \frac{V_R}{R} + jV_R B \quad (2.158)$$

แทน (2.158) ใน (2.157)

$$V_R = V_S - j \left(\frac{V_R}{R} + jV_R B \right) X_S$$

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{R}{R(1 - BX_s) + jX_s} \quad (2.159)$$

ถ้ากำหนดให้ V_s เป็นต่อหน่วยเท่ากับ 1

$$|V_R| = \frac{R}{\sqrt{R^2(1 - BX_s)^2 + X_s^2}} \quad (2.160)$$

กำหนดให้

$$|V_R| = \sqrt{R^2(1 - BX_s)^2 + X_s^2} \quad (2.161)$$

ดังนั้น

$$V_R = \frac{R}{|Z|} \quad (2.162)$$

อนุพันธ์ (Differential) ของสมการ (2.162)

$$1 = \frac{|Z| \frac{dR}{dV_R} - R \frac{d|Z|}{dV_R}}{|Z|^2} \quad (2.163)$$

โดยที่

$$\frac{d|Z|}{dV_R} = \frac{1}{2|Z|} \left[2R(1 - X_s B) \frac{dR}{dV_R} - 2R^2 X_s (1 - X_s B) \frac{dB}{dV_R} \right] \quad (2.164)$$

ดังนั้น

$$K_L = \frac{dV_R}{dB} = \frac{f_B}{|Z|^2 - f_R} \frac{dR}{dV_R} \quad (2.165)$$

ซึ่ง

$$f_R = |Z| - \frac{R^2(1 - X_s B)^2}{|Z|} \quad (2.166)$$

$$f_B = \frac{R^3 X_s}{|Z|} (1 - X_s B) \quad (2.167)$$

ดังนั้น จากแผนภาพกรอบ ภาพประกอบที่ 41 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของการควบคุมแบบป้อนจะได้ว่า

$$\frac{B}{V_{ref}} = \frac{1}{K_L} \cdot \frac{1}{1 + sT_{eq}} \quad (2.168)$$

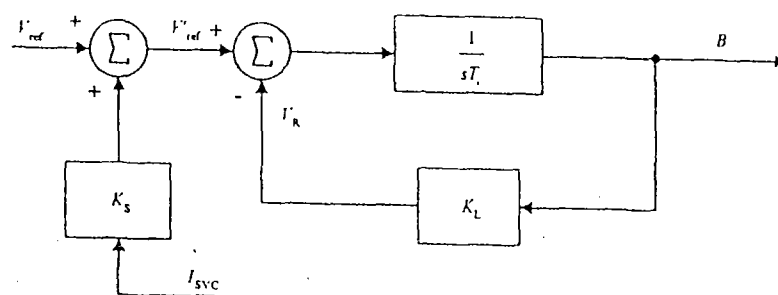
ซึ่ง T_{eq} คือ เวลาตอบสนอง (Response time delay) ของระบบ

$$T_{eq} = \frac{T_i}{K_L} \quad (2.169)$$

ซึ่งสมการ (2.169) ใช้ในการปรับค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) T_i เพื่อให้ได้เวลาตอบสนองของระบบที่เหมาะสม การควบคุมแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟจะเพิ่มคุณสมบัติของแรงดันตกจากกระแส (Current Droop) เพื่อปรับคุณสมบัติแนวระดับของการควบคุมแรงดันให้มีความเอียง หรือ ความชัน (Slope) การทำความชัน ทำได้โดยการปรับค่าแรงดันอ้างอิงให้แปรผันตามกระแสของ SVC

$$V_{ref} = V_{ref} + K_S I_{SVC} \quad (2.170)$$

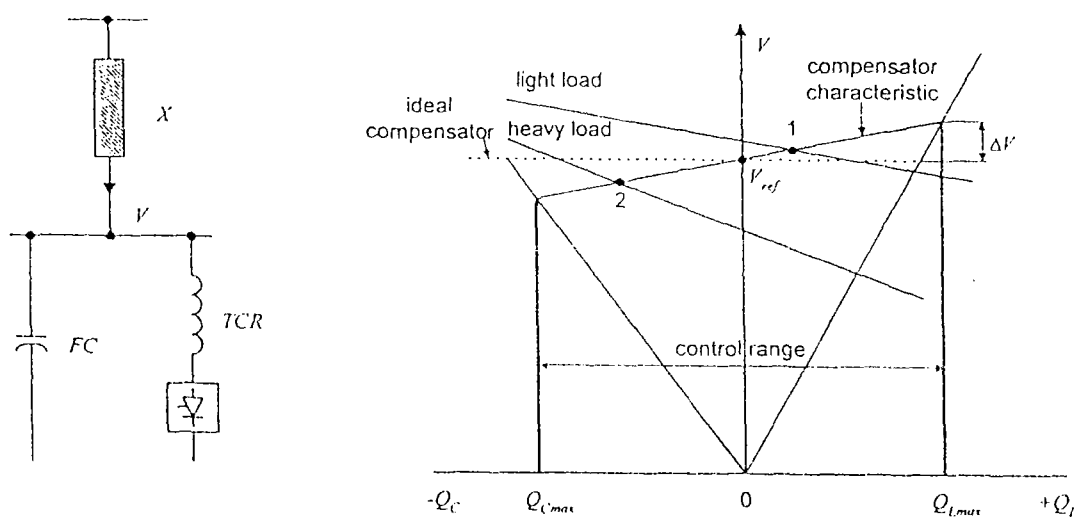
$$V'_{ref} = V_{ref} + K_S I_{SVC}$$



ภาพประกอบ 36 การควบคุมแบบปิดของการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตและเพิ่มคุณสมบัติการป้อน

กลับกระแสเพื่อปรับความชันของแรงดันอ้างอิง

ค่าแฟกเตอร์ K_S คือ ค่าปรับตั้งความชัน (Droop Setting) โดยทั่วไปแล้ว จะปรับให้อยู่ในช่วง 2 ถึง 5% ของแรงดันที่ควบคุม คุณสมบัติของความชัน แสดงในภาพประกอบที่ 37



ภาพประกอบ 37 คุณสมบัติการควบคุมแรงดันของ SVC

ภาพประกอบที่ 37 แสดงคุณสมบัติการควบคุมแรงดันในสถานะอยู่ตัวของ TCR/FC (Thyristor Control Reactor/Fixed Capacitor) SVC จะจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบซึ่งหมายความว่า

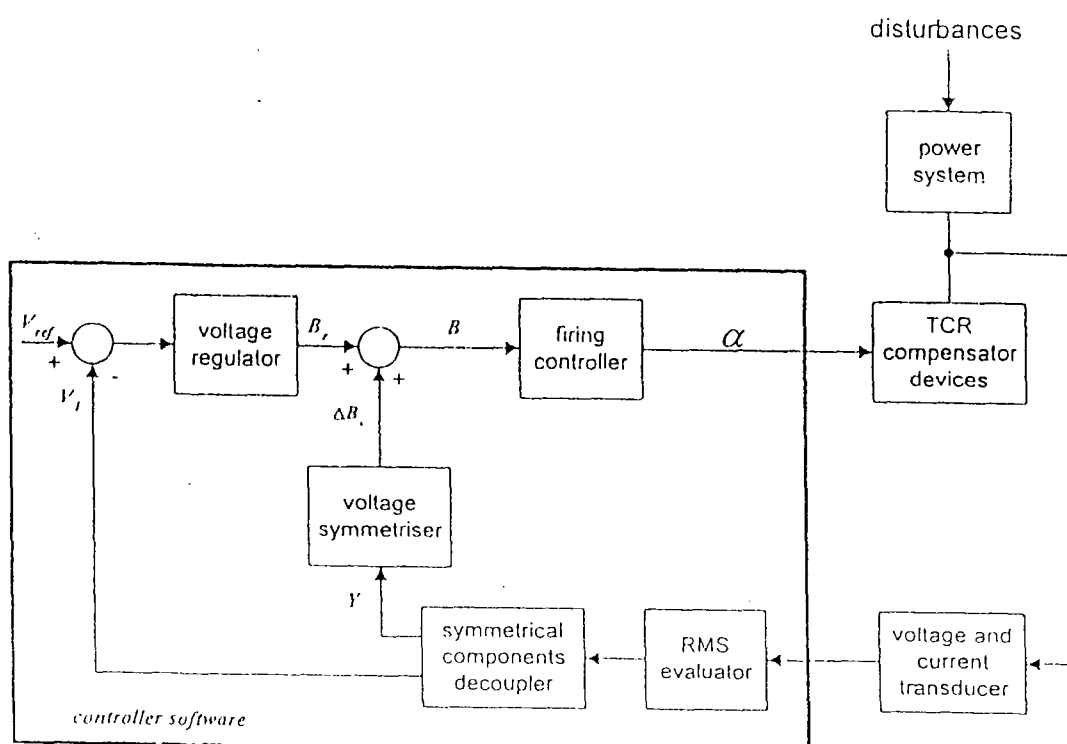
ว่าระบบมีกำลังรีแอกทีฟเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำมากทำให้แรงดันตกลง ซึ่งต้องชดเชยด้วยค่าความจุไฟฟ้า และในขณะที่ระบบมีกำลังรีแอกทีฟเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้ามากแรงดันในระบบจะสูง จึงต้องชดเชยด้วยกำลังรีแอกทีฟจากค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งการควบคุมแรงดันไม่จำเป็นต้องให้การคุมค่าแรงดันเท่ากับศูนย์แต่ควบคุมให้แรงดันของระบบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เพราะจะทำให้การคุมค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ถ้าเส้นโหลดของระบบ (System Load Line) เกือบจะเป็นแนวระดับ จะทำให้ขนาดของ SVC ใหญ่มาก ตามภาพประกอบที่ 37 จุดที่ 1 คือจุดที่ SVC ทำงานในกรณีที่โหลดน้อย (Light Load) SVC ชดเชยโดยการดูดกลืนกำลังรีแอกทีฟจากระบบ (ความเหนี่ยวนำ) ส่วนจุดที่ 2 SVC ทำงานขณะโหลดมาก (Heavy Load) SVC จะชดเชยโดยการจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบ (ความเก็บประจุ) โดยแรงดันอ้างอิงของการควบคุมคือ V_{ref}

3. การควบคุมโหลดสมดุลและการควบคุมแรงดัน

ภาพประกอบที่ 38 แสดงแผนภาพกรอบของการชดเชย TCR ซึ่งค่าชดเชยแปรผัน B ถูกควบคุมโดยมุมนำกระแส (Firing) โดยค่าชดเชยแปรผันได้จากสมการ (2.126)

$$B = \frac{2}{\pi X} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha) \right] \quad (2.171)$$

ซึ่งสมการ (2.169) ให้ผลเฉพาะปริมาณหลักมูล (Fundamental) เท่านั้นส่วนฮาร์โมนิกจะถูกดูดกลืนโดยตัวกรอง (Filters)



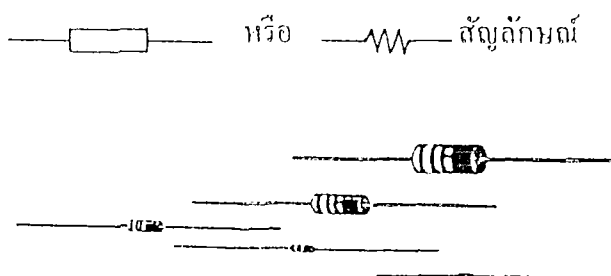
ภาพประกอบ 38 แผนภาพกรอบการควบคุมโหลดไม่สมดุลย์และแรงดันของ TCR/FC
คุณสมบัติ ชนิด และอุปกรณ์ที่ศึกษา

1.1 ตัวต้านทาน (Resistor)

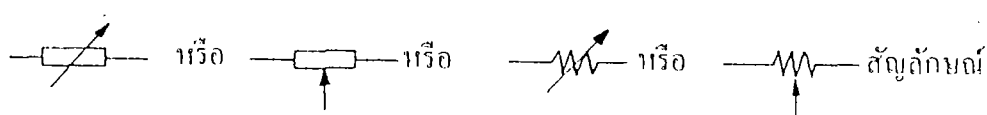
ตัวต้านทาน คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวหนึ่ง ที่ใช้ในการจำกัดกระแสเข้าในส่วนต่าง ๆ ของวงจร ซึ่งจัดว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้มากที่สุดในวงจร มีทั้งแบบคงที่และแบบปรับค่าได้ โดยแบบคงที่จะเรียกชื่อว่า R ส่วนแบบปรับค่าได้จะเรียกชื่อย่อว่า VR ตัวอย่างเช่น ตัวต้านทานแบบคงที่ค่า 10Ω จะเรียกชื่อตามท้องตลาดว่า R 10Ω และตัวต้านทานปรับค่าได้ค่า $10\text{ K}\Omega$ จะเรียกชื่อตามท้องตลาดว่า VR $\text{K}\Omega$ เป็นต้น

โดยที่ VR จะแยกออกอีกเป็น 2 แบบ คือ แบบเชิงเส้นหรือแบบลิเนียร์ ซึ่งนิยมเรียกว่าแบบ A ลักษณะคุณสมบัติของ VR แบบนี้ คือ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนเป็นสัดส่วนกับมุมของการปรับ อีกแบบหนึ่งก็คือ แบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งนิยมเรียกว่าแบบ B ลักษณะคุณสมบัติของ VR แบบนี้ คือ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไม่เป็นสัดส่วนกับมุมกับการปรับ

ตัวต้านทาน จะต้องบอกค่าความต้านทาน ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวต้านทานและบอกค่าผิดพลาดของตัวต้านทาน ซึ่งขนาดของตัวต้านทานก็มี $\frac{1}{8}\text{ W}$, $\frac{1}{4}\text{ W}$, $\frac{1}{2}\text{ W}$, 1 W , 2 W , 3 W , 4 W , 5 W , 10 W ไปจนถึงเป็นร้อย ๆ วัตต์ ค่าผิดพลาดของตัวต้านทานก็มี $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ และ $\pm 20\%$



ภาพประกอบ 39 สัญลักษณ์ ความต้านทานคงที่

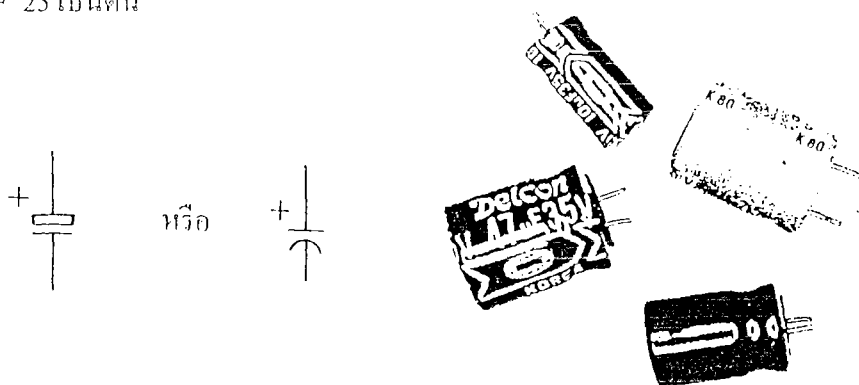


ภาพประกอบ 40 สัญลักษณ์ ความต้านทานแบบปรับค่าได้

1.2 คาปาซิเตอร์หรือตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่ กรองสัญญาณไฟตรงให้เรียบขึ้นในวงจรแหล่งจ่ายไฟซึ่งเรียกว่าตัวเก็บประจุฟิวดเตอร์ กรองความถี่หรือสัญญาณที่รบกวนทิ้ง ส่งผ่านสัญญาณซึ่งเรียกว่า ตัวเก็บประจุบายพาส และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจร ถ้าจะแบ่งตัวเก็บประจุโดยอาศัยข้อเป็นหลักจะแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบบไม่มีขั้ว ชนิดเซรามิก ชนิดไมลาร์ ชนิดไมก้า ชนิดกระดาษ และชนิดอากาศ อีกแบบหนึ่งก็คือ แบบมีขั้ว ซึ่งก็มีชนิดอิเล็กโทรไลต์ และชนิดแทนทาลัม ถ้าแบ่งโดยอาศัยค่าของตัวเก็บประจุแบ่งได้ 2 แบบ แบบคงที่ และแบบปรับค่าได้

ตัวเก็บประจุ ตามท้องตลาดเรียกชื่อว่า C การสั่งซื้อจะต้องบอกค่าของตัวเก็บประจุ ซึ่งมีหน่วยเป็นฟารัด (F) และบอกขนาดแรงดันที่ทนได้สูงสุดของตัวเก็บประจุ เช่น ต้องการที่จะซื้อตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลต์ค่า 10 μF ขนาดทนแรงดันคือ 25 V จะต้องสั่งซื้อว่า C อิเล็กโทรไลต์ 10 μF 25 เป็นต้น



ภาพประกอบ 41 สัญลักษณ์และรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบคงที่

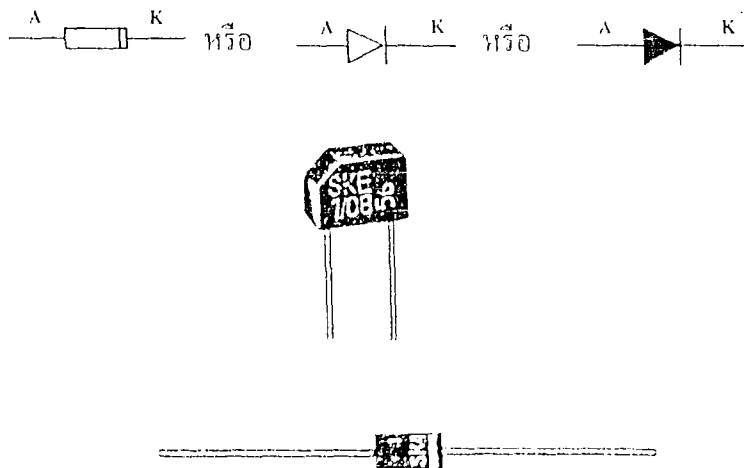


ภาพประกอบ 42 สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

1.3 ไดโอด (Diode)

ไดโอด คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จำกัดทิศทางของกระแสให้ไหลทางเดียว และทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟสลับให้เป็นไฟตรง งานที่ใช้คือ ให้ทำวงจรเรกติไฟเออร์ ใช้กับแรงดันกระชากและกับกระแสกระชากในวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำ

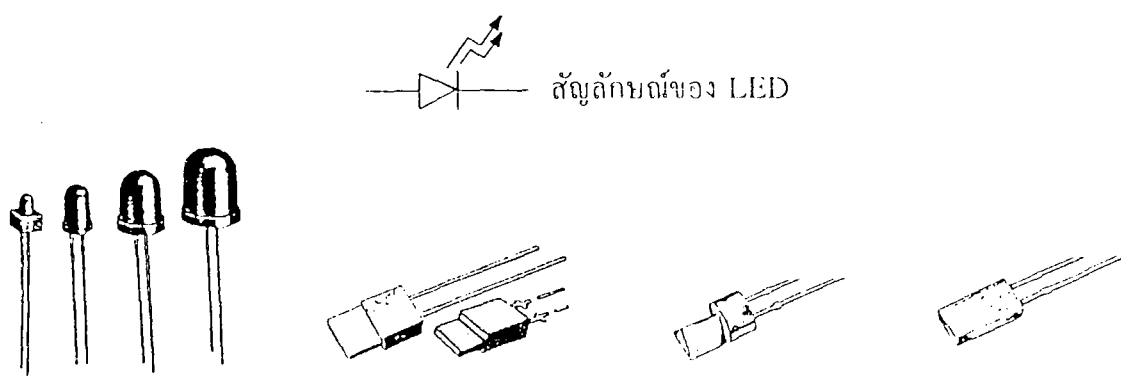
สัญลักษณ์และรูปร่างต่าง ๆ ของไดโอด จะมีลักษณะดังภาพประกอบ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีขา 2 ขา คือ ขาอาโนด ใช้ตัวย่อว่า A และขาคาทอด ใช้ตัวย่อว่า K หรือ C ตัวย่อนิยมใช้เรียกไดโอด คือ D



ภาพประกอบ 43 สัญลักษณ์และรูปร่างของไดโอด

ไดโอดเปล่งแสง

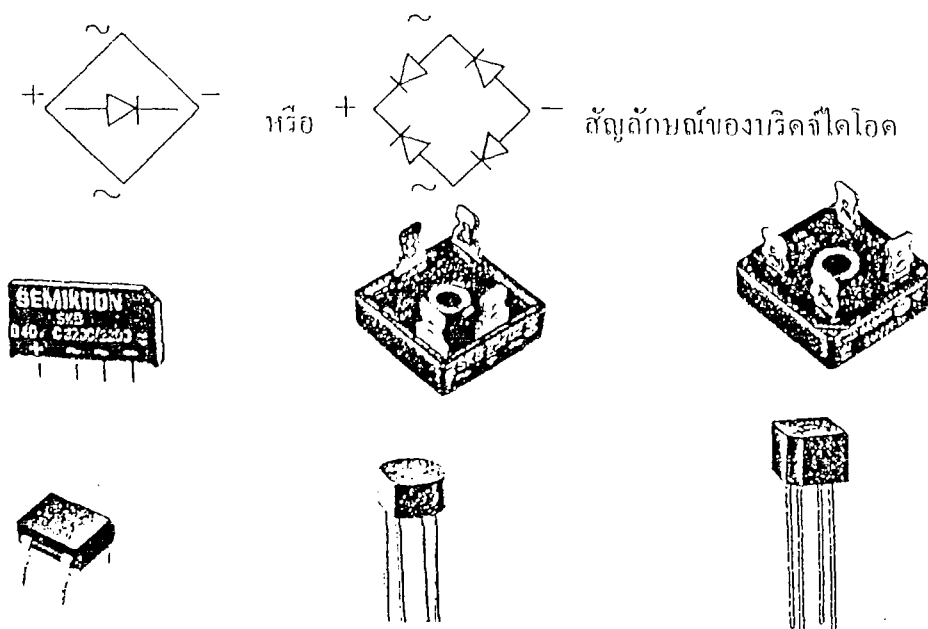
ไดโอดเปล่งแสง คือ ไดโอดที่ทำงานแล้วเปล่งแสงออกมา ซึ่งก็มีแสงสีต่าง ๆ หลายสีที่สามารถเปล่งออกมา คือ สีแดง สีเขียวและสีส้ม งานส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแสงสี เช่น ไฟวิ่ง ไฟกระพริบ และไฟที่แสดงสถานะการทำงาน เป็นต้น รูปร่างและสัญลักษณ์จะมีลักษณะดังภาพประกอบ 7 ซึ่งจะมีขาเหมือนไดโอดธรรมดา คือ ขาอาโนด (A) และขาคาทอด (K) นิยมเรียกชื่อว่า LED แต่มี LED บางอย่างมีขา 3 ขา โดยจะมีขา K เป็นขาร่วม และขา A 2 ขา และจะให้สีออกมา 2 สี



ภาพประกอบ 44 สัญลักษณ์และรูปร่างของไดโอดเปล่งแสง

บริดจ์ไดโอด (Bridge Diode)

บริดจ์ไดโอด คือ ไดโอด 4 ตัว ที่ต่อกันแบบบริดจ์ แล้วจับรวมเป็นอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียว
งานที่ใช้ คือ ใช้ทำเป็นวงจรเรกติไฟเออร์ในวงจรแหล่งจ่ายไฟ

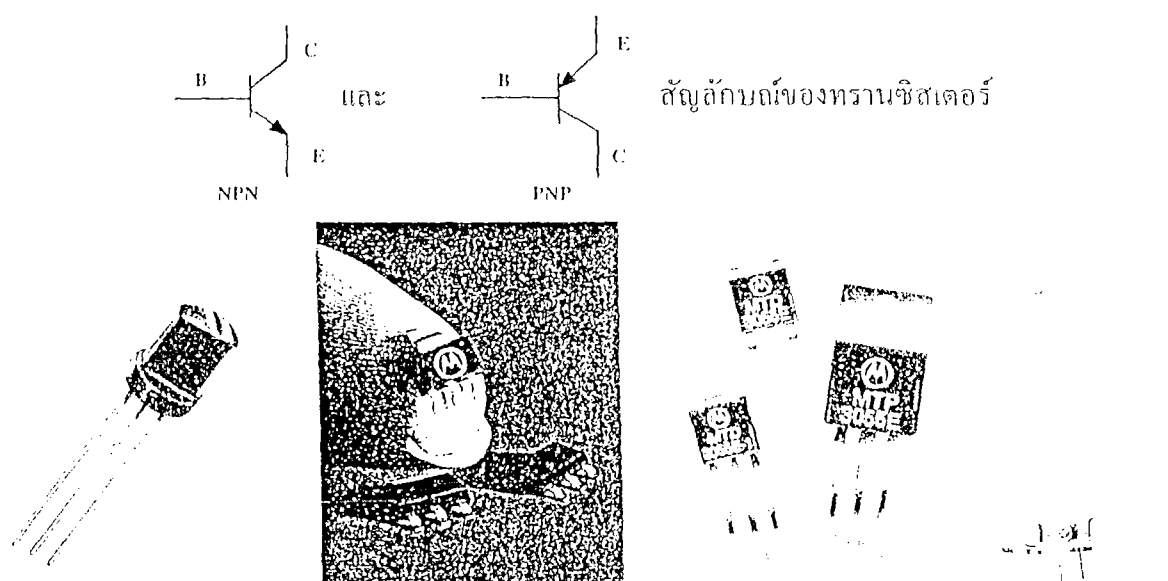


ภาพประกอบ 45 สัญลักษณ์และรูปร่างของบริดจ์ไดโอด

1.4 ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

ทรานซิสเตอร์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณทั้งไฟตรงและไฟสลับ งานที่ใช้ก็เช่น งานที่ใช้เกี่ยวกับเสียง และงานที่ต้องการเพิ่มขนาดของกระแสและแรงดัน เป็นต้น *

รูปร่างและสัญลักษณ์ของมันจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 9 จะเห็นได้ว่ามี 2 ชนิด คือ ชนิด NPN และชนิด PNP ซึ่งไม่ว่าจะเป็นชนิดไหนก็มี 3 ขา คือ ขาคอลเล็กเตอร์ ใช้ตัวย่อว่า C ขาเบส ใช้ตัวย่อว่า B และขาอีมิเตอร์ใช้ตัวย่อว่า E นิยมเรียกมันว่า TR การสั่งซื้อจะต้องบอกว่า TR เบอร์อะไร เช่น TR 2N3055 เป็นต้น

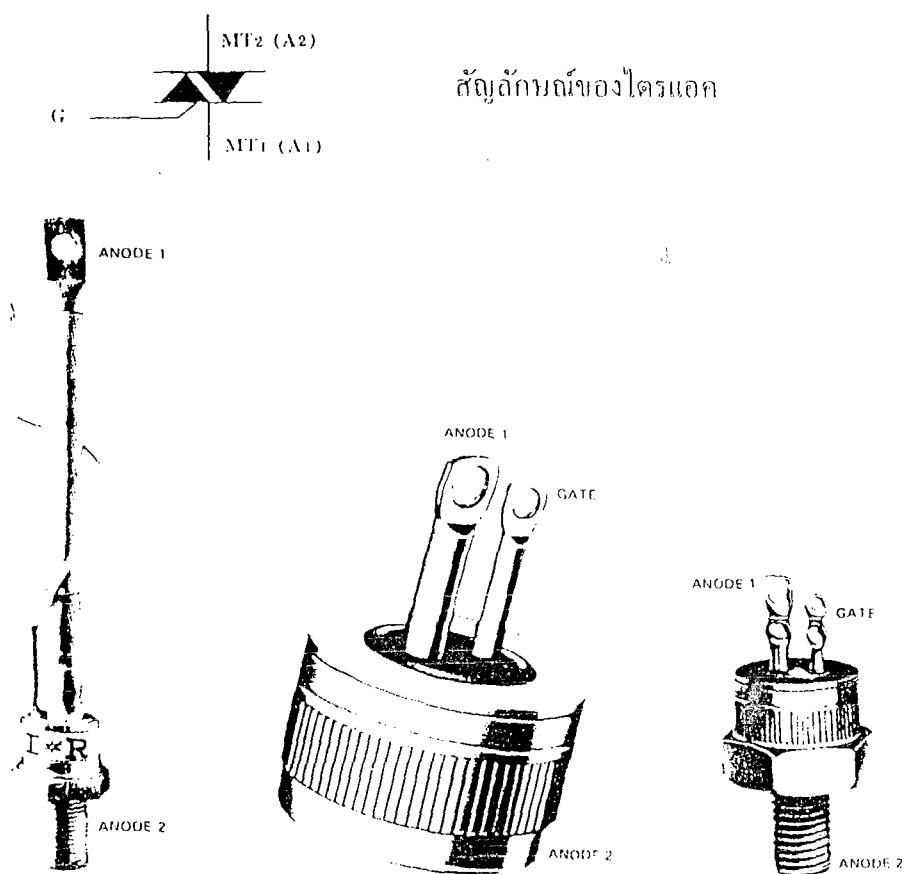


ภาพประกอบ 46 สัญลักษณ์และตัวทรานซิสเตอร์

1.5 ไตรแอค (Triac)

ไตรแอค คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ งานที่ใช้ เช่น วงจรหรี่ไฟ เป็นต้น คุณสมบัติจะเหมือนกับ SCR จะดีกว่าที่ตรงที่ขาเกทของไตรแอคสามารถทำงานได้ทั้งสัญญาณเชิงบวกและลบ ซึ่ง SCR จะทำงานได้เมื่อขาเกทได้รับสัญญาณเชิงบวกเท่านั้น

ไครแอจะมี 3 ขา คือ ขา MT 1 ขา MT 2 และขาเกต (G) ซึ่งมีรูปร่างและสัญลักษณ์ดังภาพประกอบ โดยขา ANODE 1 (A1) คือ MT 1 และขา ANODE 2 (A 2) คือ MT 2

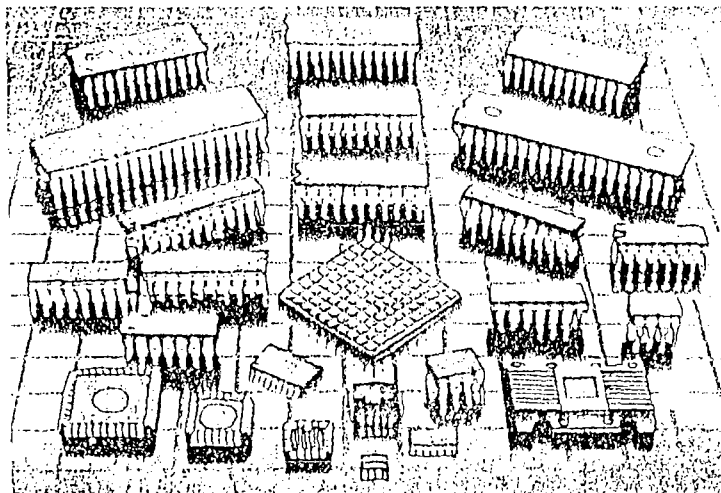


ภาพประกอบ 47 รูปร่างและสัญลักษณ์ของไครแอ

1.6 ไอซี (IC)

ไอซี คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวหนึ่ง ที่นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ ตัว เช่น R, L, C, TR และ FET เป็นต้น แล้วจับมารวมกันเป็นอุปกรณ์ตัวเดียว ใช้งานได้หลายประเภทมาก เช่น ไอซีเครื่องเสียงใช้งานสำหรับภาคเสียง ไอซีไทม์เมอร์ใช้สำหรับงานที่เกี่ยวกับเวลา ไอซีกำเนิดสัญญาณใช้ในการสร้างสัญญาณต่าง ๆ และไอซีดิจิทัลใช้ในงานดิจิทัล เป็นต้น รูปร่างต่าง ๆ ของไอซีจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 11 ซึ่งเวลาดูขาไอซีก็สังเกตจุดและรอยบากบนตัวไอซีโดยที่มีจุดคือ ขา 1 ของไอซีแล้วนับวนไปเรื่อย ๆ จนถึงขาสุดท้ายซึ่งจะอยู่ฝั่งตรงข้ามกับขาที่ 1 และถ้าไอซี

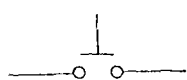
ที่มีรอยบากเวลาดูข้างก็นำรอยบากเข้าหาตัว ขา 1 จะเป็นขาแรกที่อยู่ทางฝั่งขวามือ และนับวนไปเรื่อย ๆ จนไปถึงขาสุดท้าย



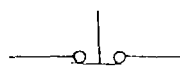
ภาพประกอบ 48 รูปร่างของ IC

1.7 สวิตช์(Switch)

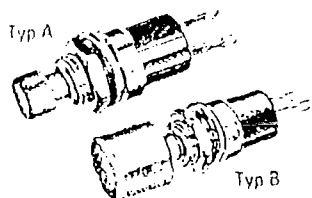
สวิตช์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวตัดต่อไฟเข้าวงจร หรือส่วนต่าง ๆ ของวงจร ซึ่งมีรูปร่างสัญลักษณ์ภาพประกอบ 12



สัญลักษณ์



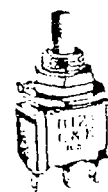
สัญลักษณ์



สวิตช์กดติด/ปล่อยดับ



สวิตช์กดดับ/ปล่อยติด

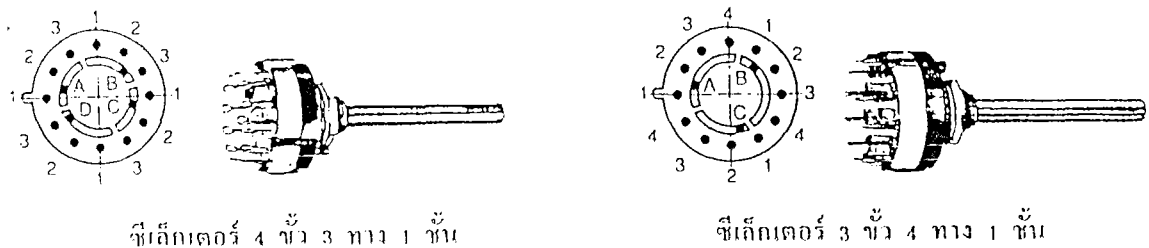


ภาพประกอบ 49 รูปร่างและสัญลักษณ์ของสวิตช์

สวิตช์เลือกหลายทางหรือซีเล็กเตอร์สวิตช์ (Selector Switch)

สวิตช์เลือกหลายทางเป็นสวิตช์ที่ประกอบด้วยสวิตช์ภายในหลายตัว ซึ่งสามารถเลือกให้สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในนั้นก็ได้ ซึ่งสวิตช์แต่ละตัวในนั้นจะเรียกว่า 1 ตำแหน่ง หรือ 1 ทาง ซึ่งภายในนั้นประกอบด้วยสวิตช์ 6 ตัว จะเรียกว่า ซีเล็กเตอร์ 6 ทาง ซึ่งสามารถปิดสวิตช์เลือกไปได้ 6 ครั้ง บางครั้งในนั้นอาจจะมีสวิตช์หลาย ๆ ชุด ก็ได้ เช่น สมมติว่าซีเล็กเตอร์มี 12 ขา อาจจะเป็นสวิตช์ 3 ชุด ชุดละ 4 ขาก็ได้ เป็นต้น ซึ่งจำนวนชุดจะเรียกว่าจำนวนขั้ว (Pole) และซีเล็กเตอร์สวิตช์อาจจะมีหลาย ๆ ชั้นซ้อนอยู่ในตัวเดียวกันก็ได้ เช่น 3 ชั้น เป็นต้น

ดังนั้น การสั่งซื้อจะต้องบอกชั้นของจำนวนทางเลือก และบอกจำนวนนั้น รูปร่างของมันมีลักษณะดังภาพประกอบ 13



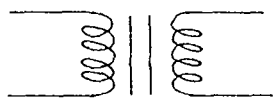
ซีเล็กเตอร์ 4 ขั้ว 3 ทาง 1 ชั้น

ซีเล็กเตอร์ 3 ขั้ว 4 ทาง 1 ชั้น

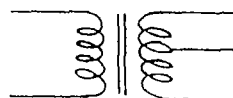
ภาพประกอบ 50 ซีเล็กเตอร์สวิตช์

1.8 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

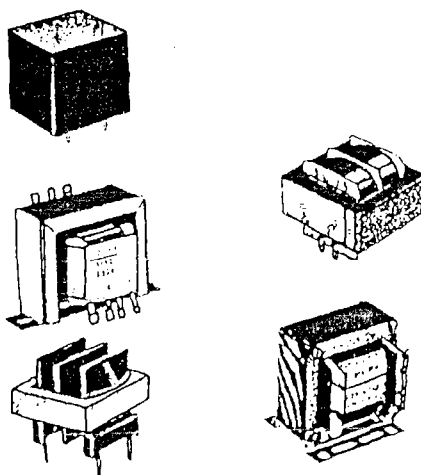
หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟสลับที่ค่า ๆ หนึ่ง (ซึ่งนิยมใช้ไฟบ้าน คือ 220V 50 Hz) ไปเป็นแรงดันไฟสลับอีกค่าหนึ่งด้วยความถี่เท่าเดิม การสั่งซื้อหม้อแปลงจะต้องบอกขนาดแรงดัน และขนาดกระแสไฟฟ้าของตัวมัน เช่น ต้องการหม้อแปลงที่จ่ายไฟได้ 9V , 12 V และ 6 V โดยใช้แรงดันอินพุตไฟบ้าน 220 V และกระแสขนาด 1 A จะต้องสั่งว่า หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1 A แดบแรงดัน 9V 12V 6V 0V เป็นต้น รูปร่างและสัญลักษณ์ของมันจะมีลักษณะดังภาพประกอบ



สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า



สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ป



ภาพประกอบ 51 หม้อแปลงแกนเหล็ก

ทฤษฎีหลักการทำงานของเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานส์ โหลด

2.1 หลักการทำงานของวงจร

การทำงานของวงจร คือ Ic3 Eeprom ในที่นี้เราใช้เบอร์ 8051 ขนาด 4KB ซึ่งเหลือพอสำหรับวงจรประหยัดไฟนี้ มีวงจรหน่วยความจำเพียง 256 ไบต์

Ic3 มีเอาต์พุตทั้งหมด 3 ขา ($D_0 - D_7$) แต่ในวงจรนี้เราเลือกใช้เพียง 4 ขาเท่านั้น โดยเราเลือกใช้เฉพาะขา $D_4 - D_7$ ด้วยเหตุผลเกี่ยวกับความสะดวกในการออกแบบแผ่นปริ้นเป็นสำคัญ

Ic1 จะทำหน้าที่เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยเราสามารถปรับความถี่ได้ด้วยการปรับที่ VA_1 หากความถี่ต่ำการทำงานของวงจรก็จะช้าตาม หากความถี่สูงการทำงานของวงจรก็จะสูงตาม

สัญญาณเอาต์พุตจากขา 3 ของ Ic3 จะข้อนเข้าวงจรไบนารีคอนเวอร์เตอร์ Ic2 ได้เอาต์พุตเป็นขาแอกเดรส $A_0 - A_7$ ของ Ic3

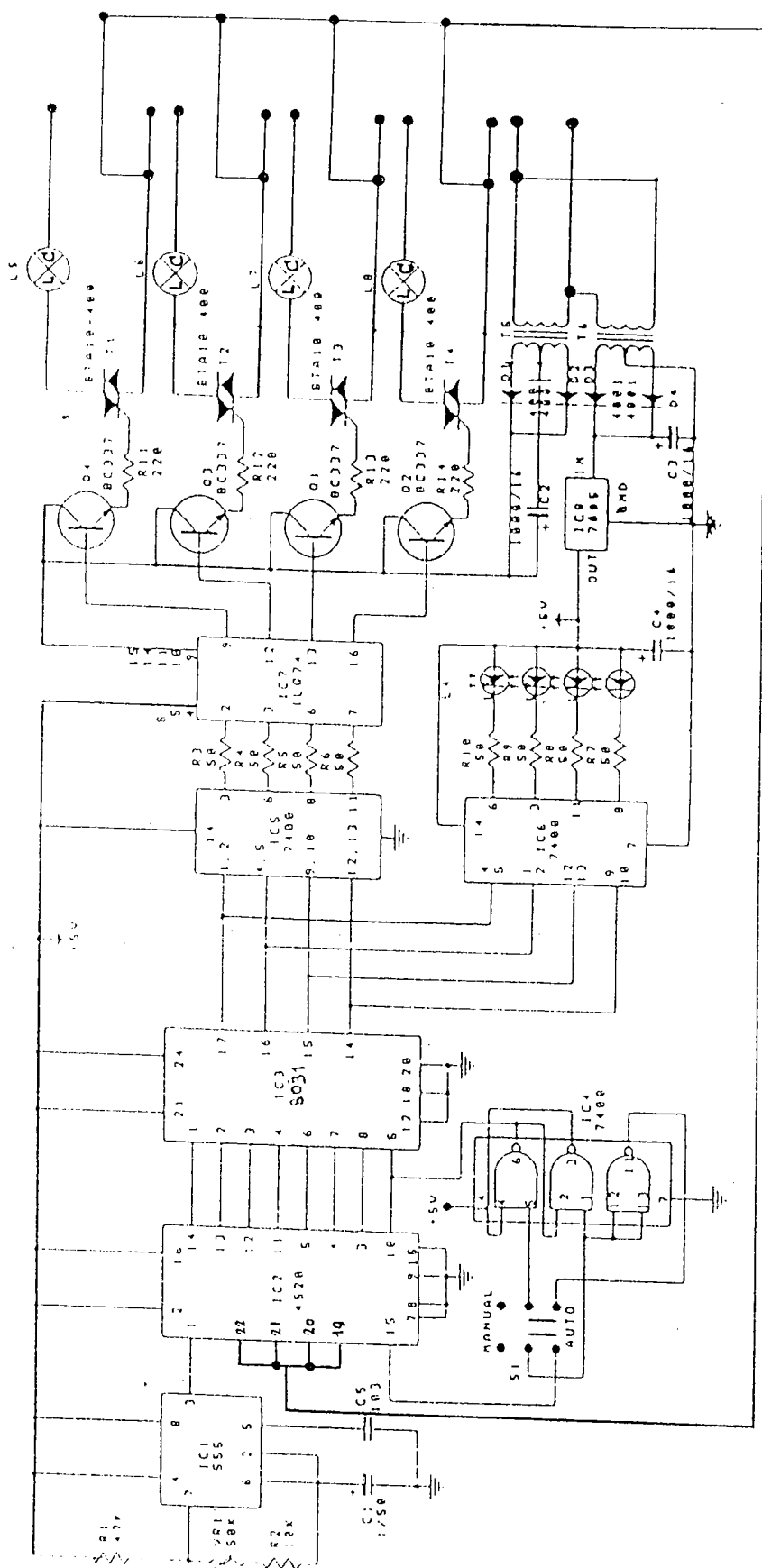
จะสังเกตว่า เ้าท์พุทที่ป้อนเข้าขา A3 (ขา5) ของ Ic3 นั้น จะป้อนผ่าน Ic4 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรควบคุมการทำงานของวงจรให้เป็นแบบอัตโนมัติ หรือเมมโมรี่ ในการวิ่งแบบเมมโมรี่ขา แอดเดรส A3 – A7 จะมีค่าที่คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นขา A0 – A2 เท่านั้นจะทำให้รูปแบบการวิ่ง คงซ้ำแบบเดิมอยู่ตลอดเวลา

เ้าท์พุทของไอซี 3 จะย้อนผ่านวงจรบัฟเฟอร์ Ic5 เพื่อขับ OPTO Ic7 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแยกกราวด์ ระหว่างวงจรควบคุมกับแรงดันไฟฟ้า Ac

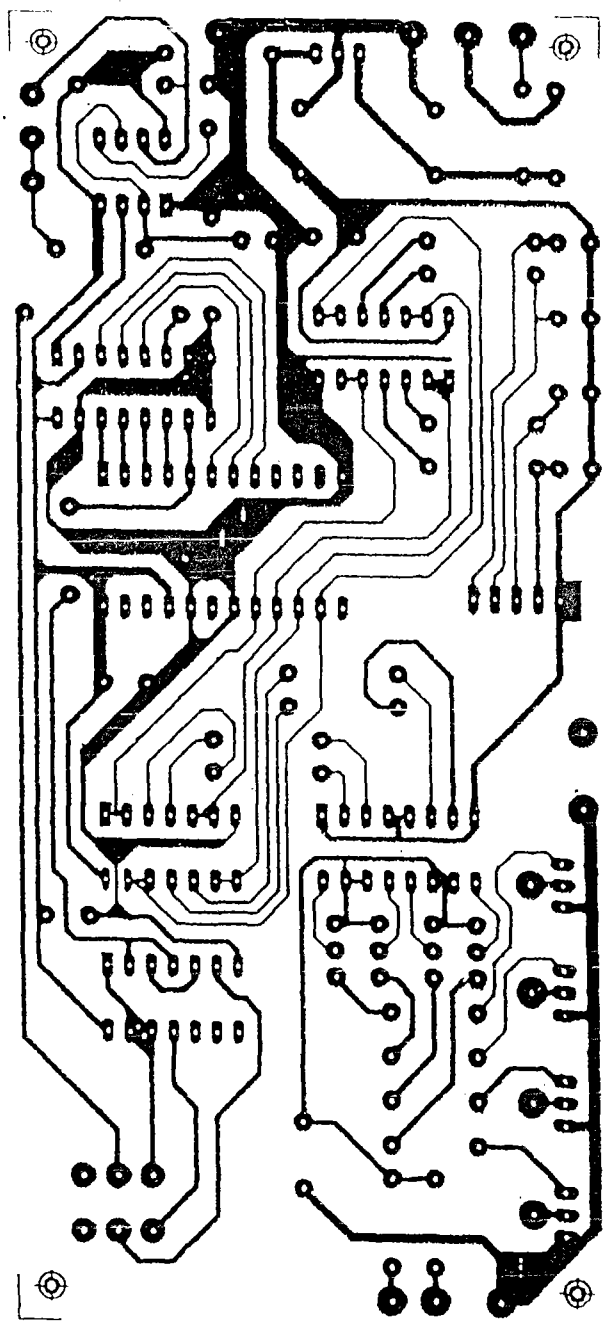
เ้าท์พุทที่ได้จาก Ic7 จะป้อนผ่านทรานซิสเตอร์ Q1 – Q4 เมื่อมีกระแสสูงพอที่จะขับ เกทของไทรแอก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ปิด – เปิด เข้าชุด L/C ตามจังหวะที่ต้องการ สวิตช์ S₁ เป็นตัวเลือกการทำงาน ในแบบเมมโมรี่และอัตโนมัติสำหรับ Ic6 ทำหน้าที่เป็นวงจรมอร์นิเตอร์สำหรับขับหลอด LED ให้แสดงรูปแบบในการทำงาน

วงจรเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้กับวงจรนี้แบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดแรกประกอบด้วย D₁, D₂, D₃ ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับวงจรเ้าท์พุท ส่วนชุดที่ 2 ประกอบด้วย D₃, D₄ และ 23 ทำหน้าที่เป็นวงจร จ่ายไฟกับวงจรควบคุมเพื่อให้การทำงานของวงจรควบคุมที่เสถียรภาพประกอบที่ดี ที่เราจึงใช้ Ic8 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรให้มีค่าคงที่

จะเห็นได้ว่ากราวด์ของวงจรจ่ายไฟทั้งสองแยกออกจากกันโดยเด็ดขาด ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ใช้สำหรับวงจรจ่ายไฟทั้งสองชุด จึงควรเป็นแบบแยกขดลวด และควรจ่ายกระแสได้ไม่น้อยกว่า 3000 มิลลแอมป์



ภาพประกอบที่ 52 วงจรการทำงานของเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานส์ โทเลด



ภาพประกอบที่ 54 แผงวงจรของเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานส์ โหลด

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Kritsadatan, 1984) ได้วิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานกระดาษบางปะอิน ขนาดกำลังผลิต 40 ton/วัน มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 5,700 บาท/tonกระดาษ เป็นพลังงานความร้อน 3,070/ton กระดาษ การวิเคราะห์พลังงานความร้อนของอุปกรณ์คือหม้อน้ำผลิตไอน้ำ ที่ 35 kg/cm^2 , 363°C โดย หม้อน้ำ 2 เครื่อง เดินเพียง 1 เครื่อง อีก 1 เครื่องเป็นเครื่องสำรอง ไอน้ำที่ใช้ที่ความดัน 10.3 kg/cm^2 พบว่าเครื่องที่ 1 มีประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ฎข้อที่ 1,2 และ ค่าย้อนกลับไม่ได้ คือ 76.7% , 76.1 % และ 62.2 % ตามลำดับ มีค่า ดัชนีการใช้พลังงานความร้อน เฉลี่ย 25.86 GJ/ton และค่า ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย $1,524.8 \text{ kW.h/ton}$ มีศักยภาพการประหยัดพลังงานโดยการผลิตไฟฟ้าใช้เอง สามารถประหยัดได้ 9.6 ล้านบาท/ปี

(บุญยงค์, 2530) ได้วิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานผลิตสบู่ ที่มีสายการผลิตย่อยๆ มาก มีเครื่องจักรส่วนมากเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 343 kW มีค่าตัวประกอบกำลัง 0.75 และตัวประกอบภาระ 0.79 ผู้วิจัยเสนอแนวทางประหยัดพลังงานคือ สลับสาย การผลิตในบางช่วงเพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดให้ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) ในสายการผลิตย่อยบางสายการผลิต และพยายามใช้แสงอาทิตย์ส่องสว่างในโกดังเก็บของแทนการใช้ไฟฟ้าแสงสว่างแนวทางทั้งหมดสามารถเพิ่มค่าตัวประกอบภาระเป็น 0.86 ลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 318,600 บาท/ปี

(ชัยยุทธ, 2533) ได้ศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจและศึกษาสภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนในโรงงานผลิตกระดาษขนาดใหญ่พร้อมหาแนวทางประหยัดพลังงานที่จะเป็นไปได้พบว่าโรงงานที่ใช้ศึกษามีการใช้พลังงานรวม 8.83 GJ/ton มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย/เดือน 843 MW.h มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด เฉลี่ย/เดือน 1678 kW มีสัดส่วนการใช้พลังงานจากไฟฟ้า, น้ำมันและน้ำมันเตา เฉลี่ยร้อยละ 27, 59 และ 14 ตามลำดับ มีสัดส่วนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานแต่ละประเภทร้อยละ 71, 23 และ 6 ตามลำดับ การวิเคราะห์ด้านไฟฟ้าพบว่าภาระด้านไฟฟ้ามีการเพิ่มสูงสุดในช่วงต้นของการทำงาน ผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวทางการลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้าโดยการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดคือควบคุมการปิด-เปิดเครื่องจักรขนาดใหญ่ไม่ให้งานพร้อมกัน เสนอให้ปรับปรุงระบบแสงสว่างภายในโรงงาน สำหรับค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อน ได้เสนอให้ลดความชื้นของซีเมนต์จากร้อยละ 21 เป็นร้อยละ 15 เพื่อการประหยัดเชื้อเพลิง และทางโรงงานควรศึกษาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Cogeneration) เพื่อช่วยประหยัดพลังงาน

(ศิริศักดิ์, 2528) ได้จัดทำข้อมูลพลังงานไฟฟ้าและ การประหยัดพลังงานไฟฟ้าในโรงงานผลิตอะไหล่รถยนต์ จากข้อมูลพบว่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่า 0.692 สำหรับระบบไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส และ มีค่า 0.711 สำหรับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 3 เฟส ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่จะใช้ในเตาหลอมโลหะไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำและเตาอบชุบไฟฟ้า ค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1, 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) มีค่า 27% และ 29% ตามลำดับ ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการประหยัดพลังงานโดยการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.95 จะมีระยะเวลาคืนทุน 11 เดือน ที่อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 15/ปี และเสนอให้เปลี่ยนเตาหลอมไฟฟ้าจากระบบที่มีความถี่ต่ำเป็นระบบที่มีความถี่สูง จะมีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 8 เดือน

(สุตสาคร, 2538) ได้ศึกษาแนวทางประหยัดไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในโรงงานปลาทูน่ากระป๋อง โดยทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้ของโรงงานจำนวน 6 วันพบว่า มีค่าพลังไฟฟ้าเฉลี่ย 981.3 kW มีค่าพลังงานไฟฟ้า 23,498 kW.h ซึ่งผู้วิจัยได้วางแนวทางการประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยลดพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในรูปแบบการลดตามลักษณะการคิดค่ากระแสไฟฟ้าชนิดคิดตามเวลาในแต่ละวัน (TOD rate) ที่แบ่งตามช่วงเวลานั้นพาสีลพีค (Partial Peak) , ออนพีค (On Peak), ออฟพีค (Off Peak) ซึ่งในช่วงออนพีค (On Peak) จะต้องเสียค่าพลังไฟฟ้าสูงสุด ผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวทางการประหยัดโดยให้มีการลดการใช้ไฟฟ้าในช่วง ออนพีค (On Peak) สำหรับมอเตอร์ของบ่อน้ำดีและน้ำเสียในช่วง พาสีล (Partial Peak) ให้ทำการลดโดยการย้ายการทำงานของเครื่องทำความเย็นใหม่และได้เสนอให้จัดเปลี่ยนบัลลาสต์ (Ballast) จากชนิดธรรมดาเป็นชนิดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) โดยมีระยะเวลาคืนทุนในการจัดเปลี่ยนนี้ประมาณ 4 ปี เสนอแนะให้ประหยัดพลังงานความร้อนโดยการลดปริมาณอากาศส่วนเกินที่ออกไปกับหม้อไอน้ำพร้อมให้มีการหุ้มฉนวนที่ผิวถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำ ผู้วิจัยได้แนะนำทางเพิ่มเติมคือแม้จะมีการลดความสูญเสียความร้อนในหม้อไอน้ำต่าง ๆ แล้ว ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำยังคงต่ำอยู่ ควรจัดเปลี่ยนเป็นหม้อไอน้ำชนิดใช้น้ำมันแทน

(เอกพันธุ์ 2539) ได้ศึกษาถึงแนวทางการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศ ของบ้านพักอาศัยแบบเรือนแถว โดยกรเก็บข้อมูลและวิเคราะห์การใช้พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ ของเครื่องปรับอากาศ ศึกษาแนวทางแนวทางในการลดภาระเข้าสู่อาคารด้วยวิธีต่าง ๆ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าผนังห้องทั้ง 6 ด้านเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดภาระทางความร้อนมากที่สุด โดยผนังทางทิศตะวันออกเป็นผนังที่เกิดภาระทางความร้อนมากที่สุดคือ ร้อยละ 36 ของภาระความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด ผู้วิจัยได้เสนอให้มีการปรับปรุงผนังห้องโดยการใส่ฉนวนกันความร้อนเช่นฉนวนยางชนิดแผ่น ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม (Polystyrene Foam) และฉนวนโพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam) โดยเฉลี่ยแล้วฉนวนสามารถลดความร้อนที่ผ่านเข้าสู่ตัวห้องได้ประมาณร้อยละ 13, 17, 22 และ 23

ตามลำดับ ซึ่งการลงทุนในฉนวนใยแก้วมีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุดคือ 1.73 ปี พร้อมทั้งเสนอแนะว่าถ้ามีการออกแบบที่פקอาศัยทั้งในด้านรูปแบบและวัสดุที่ใช้ประกอบเป็นตัวที่פקอาศัยจะช่วยประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศได้มาก

(จตุพร. 2529) ได้ศึกษาและวิจัยถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงแรมสยามอินเตอร์คอนดิเนนตัล และความร้อนเข้าสู่อาคารพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ ร้อยละ 60.63 ระบบ แสงสว่าง ร้อยละ 21.26 ระบบปั้มน้ำ ร้อยละ 4.22 ระบบทำน้ำร้อน ร้อยละ 2.44 ห้องครัว ร้อยละ 3.24 ระบบซักอบรีด ร้อยละ 1.12 และในอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ร้อยละ 7.07 คำนวณการใช้กำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ 33.9 W/m^2 ระบบแสงสว่าง 9.12 W/m^2 ในอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ 9.88 W/m^2 คำนวณใช้กำลังไฟฟ้ารวม 43.16 W/m^2 ข้อเสนอแนะ ด้านการประเมินความร้อนเข้าสู่อาคาร ควรประเมินความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากสภาวะอากาศภายนอกและเปรียบเทียบอัตราร้อยละ ความร้อนจากภายนอกอาคารกับภาระความเย็นของระบบปรับอากาศ

(พัฒนะ. 2530) ได้ศึกษาและจัดทำบัญชีพลังงานและประเมินความร้อนเข้าสู่อาคารของ โรงแรมขนาดใหญ่ กรณีศึกษาคือ โรงแรมวันนาเซอร์าดัน พิจารณาสัดส่วนของการใช้ไฟฟ้า พบว่า ระบบปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าร้อยละ 48.9 ระบบแสงสว่างใช้พลังงานไฟฟ้าร้อยละ 14.4 ระบบ ลิฟท์ใช้พลังงานไฟฟ้าร้อยละ 4.6 ส่วนที่เหลือเป็นส่วนของระบบอุปกรณ์อื่น ๆ หากพิจารณาจาก คำนวณการใช้กำลังงานไฟฟ้า/หน่วยพื้นที่ใช้งาน พบว่าภาระใช้พลังงานไฟฟ้ารวมมีค่า 49.5 W/m^2 ระบบปรับอากาศมีค่า 24.2 W/m^2 ระบบแสงสว่างมีค่า 7.0 W/m^2 นอกจากนี้ยังได้พิจารณาคำนวณ การใช้กำลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมดภายในอาคารพบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมมีค่า 41.2 W/m^2 ระบบปรับอากาศมีค่า 20.2 W/m^2 ระบบแสงสว่างมีค่า 5.9 W/m^2

(Hull, 1990) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเรื่อง “A Procedure to Group Residential Air Conditioning Load Profile During the Hottest Days in Summer” โดยทำการศึกษาจากกลุ่มบ้านพักอาศัยที่มีการใช้ระบบปรับอากาศในช่วงเวลากลางวัน ระหว่างวันที่ร้อนที่สุดในช่วงหน้าร้อนและ ได้ทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า (kW) และ ชั่วโมงในแต่ละวัน โดยทำการเก็บค่าเวลาตั้งแต่เวลา 2.00 ถึง 8.00 p.m. พบว่าบ้านพักอาศัยเกือบทุกหลังที่ทำการศึกษาค่าจะเกิดลักษณะของค่าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน

(Hunn, 1989) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง “Effectiveness of Shading Devices on Building in Heating Dominated Climates” ศึกษาผลของอุปกรณ์บังแดดที่มีต่อค่าความร้อน ความเย็นและพลังงานทั้งหมดที่รวมถึงค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์บังแดดแล้ว สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายของพลังงานต่อปีลงได้ร้อยละ 4 สำหรับบ้านพักอาศัย, ร้อยละ 5 สำหรับสำนักงานขนาดเล็ก และน้อยกว่าร้อยละ 1 สำหรับโรงเรียน รวมทั้งสามารถ

ลดความร้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงฤดูร้อนลงได้ร้อยละ 18 สำหรับบ้านพักอาศัย ร้อยละ 11 สำหรับสำนักงานขนาดเล็ก และ ร้อยละ 3 สำหรับโรงเรียน

(พูนลาภ, 2533) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการวิเคราะห์ภาระความเย็นสำหรับอาคารในประเทศไทย โดยเป็นการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์ภาระความเย็นที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลาต่าง ๆ ของแต่ละวัน สำหรับข้อมูลของภูมิอากาศที่มีให้เลือกใช้จะเป็นของกรุงเทพฯ และเชียงใหม่เท่านั้น โปรแกรมจะแสดงตัวประกอบต่าง ๆ บนจอภาพเป็นปฏิภาคกับผู้ใช้เพื่อให้สามารถเลือกค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น/การวิเคราะห์ภาระความเย็นได้โดยไม่ต้องอาศัยหนังสือคู่มือปรับอากาศ

(Chatkaewvorakul, 1990) ได้ศึกษาเรื่อง “A Flexibility Study on Ice Storage in An Office Building in Bangkok” ได้พบว่า การนำเอาระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) มาติดตั้งเข้าร่วมกับระบบปรับอากาศแบบเดิมที่มีอยู่แล้ว ทำให้ลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ถึงร้อยละ 18.7 และ ร้อยละ 15.3 เมื่อการเก็บความเย็นเป็นแบบพาเซิล (Partial) และดีมานด์ ลิมิต สตอเรจ (Demand-limited Storage) แต่จะเพิ่มการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นร้อยละ 11.3 และ 8.5 เมื่อการเก็บความเย็นเป็นแบบพาเซิล (Partial) และดีมานด์ ลิมิต สตอเรจ (Demand-limited Storage) ตามลำดับ และจะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าได้ถึง 322,000 และ 332,300 บาท/ปี

(Piette, 1988) ได้ศึกษาเรื่อง “Technology Assessment: Thermal Cool Storage in Commercial Building” โดยได้ทำการสำรวจในปี พ.ศ. 2530 พบว่าอาคารที่มีการใช้ระบบเก็บความเย็นทั้งในสหรัฐอเมริกาและในที่อื่น ๆ จำนวน 382 อาคาร ใช้ระบบน้ำเย็นร้อยละ 35 ใช้ระบบน้ำแข็งร้อยละ 42 ใช้ระบบสารเปลี่ยนสถานะร้อยละ 9 และไม่รู้แน่ชัดร้อยละ 14 พร้อมทั้งได้ตรวจวัดการใช้พลังงานของอาคารที่ใช้ระบบเก็บความเย็น 3 อาคาร โดยแยกเป็นระบบใช้น้ำแข็งแบบเก็บเต็มรูปแบบ 2 อาคาร และใช้น้ำเย็นแบบดีมานด์ ลิมิต (Demand-limited) 1 อาคาร ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อการทำความเย็น กรณีเป็นระบบใช้น้ำแข็งคือ 1.22-1.77 kW/ton ลดความร้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคารได้ร้อยละ 14.5-51 และประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่อปีร้อยละ 1.8-16.9 ส่วนใหญ่แล้วปัญหาที่พบในอาคารที่ใช้ระบบเก็บความเย็นในระยะเริ่มแรกคือ ขนาดของอุปกรณ์ไม่เหมาะสม ช่างเทคนิคที่ควบคุมขาดประสบการณ์ และควบคุมขนาดความหนาของน้ำแข็งที่ต้องการไม่ได้

(Mcniel, 1985) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) พบว่าหลังจากที่ติดตั้งระบบและมีการใช้ระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) แล้วสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านไฟฟ้าได้ถึงร้อยละ 11 ได้ในปี 1982 และร้อยละ 9 ในปี 1983 โดยระบบที่ได้ออกแบบไว้เป็นระบบปรับอากาศที่ใช้ เครื่องทำน้ำเย็น และระบบ ถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) ทำงานร่วมกันซึ่งการ

จ่ายความเย็นจากการละลายน้ำแข็งมาช่วยในการปรับอากาศในช่วงพาเชียลพีค (Partial Peak) พร้อมทั้งเดินเครื่องทำน้ำเย็นขนาดเล็กเพื่อตอบสนองบางส่วนของภาระความเย็นภายในอาคาร

(สมบุญ, 2540) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) ในอาคารโรงพิมพ์ไทยรัฐ โดยจากการสำรวจพบว่า ในอาคารโรงพิมพ์ไทยรัฐมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 1,653,333 kW.h/เดือน มีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ย/เดือนในช่วง ออนพีค (On Peak), พาเชียลพีค (Partial Peak), ออฟพีค (Off Peak) เป็น 2,647, 3,532, และ 4,508 kW ตามลำดับ มีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเฉลี่ย 2,855,592.5 บาท/เดือน มีสัดส่วนการใช้พลังงานในระบบเครื่องพิมพ์ร้อยละ 38 ในระบบปรับอากาศร้อยละ 35 ในระบบแสงสว่างและระบบอื่น ๆ ร้อยละ 27 หลังจากพิจารณาการติดตั้งระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำความเย็นแล้วพบว่า ถ้าคิดในกรณีหาระยะเวลาการคืนทุนจากมูลค่าการลงทุนจริงของระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนนานถึง 30.28 ปี และคิดตามอัตราผลตอบแทนการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์ถือว่าไม่สามารถคืนทุนได้ ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอแนะว่าระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) ไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์การประหยัดพลังงานเท่าที่ควรเนื่องจาก ระบบถังเก็บน้ำแข็ง (Ice Storage) ต้องมีการออกแบบที่เหมาะสมกับประเภทการใช้งานของธุรกิจอีกทั้งอาคารที่ใช้ศึกษามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยจ่ายไฟฟ้าในช่วงพีคโหลด (Peak Load) อยู่แล้ว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังรายละเอียดเป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. วัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย
2. สถานที่และเวลาในการวิจัย
3. การดำเนินการวิจัย
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยด้วยแบบทดลอง ซึ่งต้องใช้วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ส่วนใหญ่ ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. วัสดุ

- 1.1 กล่องเหล็กขนาด สูง 70 X 80 X25
- 1.2 สายไฟขนาด 0.1, 0.4, 0.5 ยาว 12 เมตร
- 1.3 โวลท์มิเตอร์ 0-500 VAC
- 1.5 สาย ที่เอช ดับเบิลยู สายวี เอ เอฟ และ สายวี เอฟ เอฟ
- 1.6 เทอร์มินอล ขนาด 12 X 500 A
- 1.7 ทรานฟอเมอร์ 1000 มิลลิแอมป์
- 1.8 สกรู น็อต และอื่น ๆ

2. เครื่องมือ

- 2.1 สว่านไฟฟ้ามือถือ
- 2.2 ดอกสว่าน
- 2.3 คีมปากจิ้งจก คีมตัด
- 2.4 ประแจปากตาย
- 2.5 ไขควง
- 2.6 หัวแรงไฟฟ้า
- 2.7 ตะไบแบน
- 2.9 เพาเวอร์มิเตอร์
- 2.10 ดิจิตอลมิลลิเมตร

- 2.11 คิวติคอลเคลปแอมมิเตอร์
- 2.12 ออสซิลอสโคป
- 2.13 ตู้อบ Hot Air Oven ขนาด 9 Kw.
- 2.14 ดี ซี พาวเวอร์ซัพพลาย
- 2.15 เอ ซี พาวเวอร์ซัพพลาย

3. อุปกรณ์

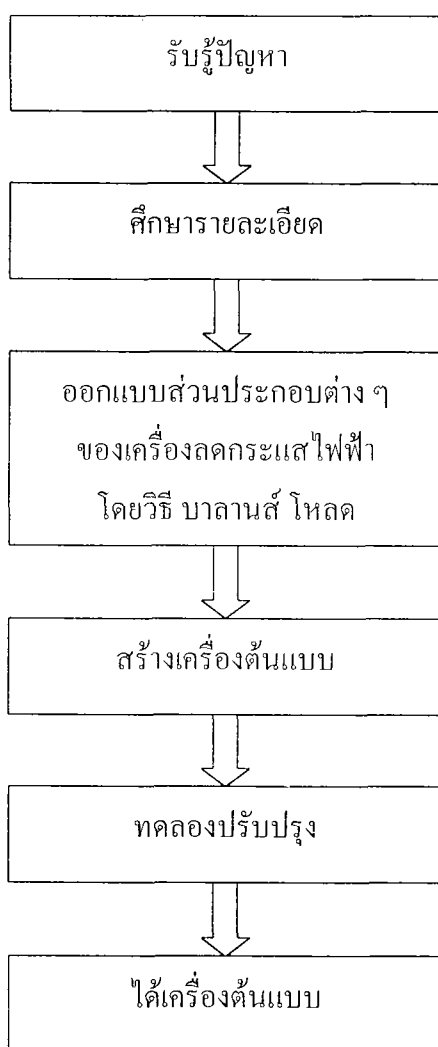
- 3.1 ไอซี
- 3.2 ทรานซิสเตอร์
- 3.3 คาปาซิเตอร์
- 3.4 ตัวความต้านทาน
- 3.5 ไคโอด
- 3.6 พาวเวอร์ไทรแอก
- 3.7 ขดลวดเหนี่ยวนำ

2. สถานที่และระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย

สถานที่สำหรับการทดลองงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองที่ ฝ่ายช่าง องค์การ เกสัฏกรรม กระทรวงสาธารณสุข ระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย 1 เดือน

3. การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนต่อไปนี้



ภาพประกอบ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นที่ 1 รับรู้ปัญหา ของระบบ คือ การชดเชยโหลดไม่สมดุล ทำงานไม่เต็มที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์โหลดบาลานส์ และผลของการชดเชยโหลดไม่สมดุล อาจทำให้การควบคุมแรงดันของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โหลด บาลานส์ ไม่มีเสถียรภาพ จึงต้องลดผลการชดเชยไม่สมดุลลง โดยการหน่วงเวลาและ/หรือลดอัตราขยายการควบคุมโหลดไม่สมดุล ให้น้อยกว่า 1 ดังนั้น การเลือกวิธีการควบคุมการชดเชยความไม่สมดุล โดยการควบคุมแรงดัน และการควบคุมการชดเชยโหลดไม่สมดุล จึงต้องเหมาะสมกับความต้องการของระบบ

ขั้นที่ 2 ศึกษารายละเอียดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โหลด บาลานซ์

2.1 ศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยเชิงทดลองที่เกี่ยวข้องกับการ
สร้างเครื่องอิเล็กทรอนิกส์บาลานซ์โหลด

2.2 ศึกษาคุณสมบัติ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดประหยัดพลังงานไฟฟ้า

2.3 ศึกษาส่วนประกอบของกระแสและแรงดัน

ขั้นที่ 3 ออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

3.1 การทำงานของวงจรคือ IC 3 EPROM ในที่นี้ใช้เบอร์ 8051 ซึ่งมีความจุ 4
กิโลไบต์ จึงมีเพียงพอสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์โหลดบาลานซ์ทั้งหมด

3.2 IC 3 มี Output ทั้งหมด 8 ขา (D0 ถึง D7) ในวงจรนี้ใช้เพียง 4 ขาเท่านั้น
โดยเลือกใช้เฉพาะ (D4 ถึง D7) ด้วยเหตุผลเกี่ยวกับความสะดวกในการ
ออกแบบแผ่นปริ้นท์เป็นสำคัญ

3.3 IC 1 ทำหน้าที่เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา โดยสามารถปรับความถี่ได้
ด้วยการปรับ VR1 หากความถี่ต่ำ ไฟ LED ที่แสดงการทำงานของวงจรก็
จะกระพริบช้า หากความถี่สูง ไฟ LED ที่แสดงการทำงานของวงจรก็จะ
กระพริบเร็วตามความถี่ที่ได้รับ

3.4 สัญญาณ Output จาก ขา 3 ของ IC3 จะป้อนเข้าวงจรไบনারีเคาท์เตอร์
IC 2 ได้ Output เป็นขาแอดเดรส A0 ถึง A7 ของ IC 3 จะสังเกตได้ว่า
Output ที่ป้อนมายังขา 5 (A3) ของ IC 3 นั้นจะป้อนผ่าน IC 4 ซึ่งทำหน้าที่
เป็นวงจรควบคุมการทำงานของวงจรให้เป็นแบบอัตโนมัติ หรือแบบควบคุม
ด้วยมือ ในการทำงานควบคุมด้วยมือ ขาแอดเดรส A3 ถึง A7 จะมีค่าคง
ที่ไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้น ขา A0 ถึง A2 เท่านั้น ทำให้รูปแบบการสั่งงาน
เป็นแบบเดิมตลอดเวลา

3.5 Output ของ IC 3 จะป้อนผ่านวงจรบัฟเฟอร์ของ IC 5 เพื่อขับไอซี Opto
IC 7 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรพาว
เวอร์ 3 เฟส 4 สาย Output ที่ได้จาก IC 7 จะป้อนผ่านทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง
Q4 เพื่อให้มีกระแสสูงพอที่จะขับขาเกทของไทรซิสเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็น
สวิตช์ เปิด-ปิด อุปกรณ์ควบคุมโหลดในกล่อง L/C ตามจังหวะที่
โปรแกรมสั่งไว้

3.6 IC 6 ทำหน้าที่เป็นวงจรมอนิเตอร์ สำหรับขับหลอด LED เพื่อแสดงการ
ทำงานของเครื่องวงจรพาวเวอร์ซัพพลายที่ใช้กับวงจรนี้แบ่งเป็น 2 ชุด คือ
ชุดแรก ประกอบด้วย D1 D2 และ C2 ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับวงจร Output

ส่วนที่ 2 ประกอบด้วย D3 D4 และ C3 ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับวงจรควบคุม เพื่อให้การทำงานของวงจรควบคุมมีเสถียรภาพที่ดี จึงใช้ IC 8 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรให้มีค่าคงที่สม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่ากราวด์ของวงจรจ่ายไฟทั้งสองแยกจากกันโดยเด็ดขาด ดังนั้นทรานฟอเมอร์ที่ใช้สำหรับวงจรจ่ายไฟทั้งสองชุดควรเป็นแบบขดลวดแยกและควรจ่ายกระแสไฟได้ไม่น้อยกว่า 1,000 มิลลิแอมป์

ขั้นที่ 4 สร้างเครื่องต้นแบบ

- 4.1 อุปกรณ์ตามวงจรทั้งหมดสามารถประกอบลงบนแผ่นปริ้นท์ ตามภาพประกอบ 53
- 4.2 นำแผงวงจรที่ประกอบแล้วและอุปกรณ์ทั้งหมดมาใส่ตู้โลหะตามขนาดที่เตรียมไว้ ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับตู้ แล้วเดินสายไฟฟ้าและสายสัญญาณต่าง ๆ ตามวงจรกำหนด หลังจากนั้นตรวจสอบความเรียบร้อยของการต่อสายไฟเข้ากับแผงวงจรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ระวังอย่าให้เกิดการผิดพลาดเนื่องจากเป็นอุปกรณ์เกี่ยวกับไฟฟ้ากระแสสูงอาจเกิดอันตรายได้

ขั้นที่ 5 ทดลองปรับปรุง

- 5.1 เมื่อสร้างเครื่องต้นแบบแล้วนำมาทดสอบเบื้องต้นโดยการใช้โหลดจากตู้อบ ต่อทดลองแล้ววัดกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสพร้อมจดบันทึกผลการทดสอบทุก ๆ 1 ชั่วโมง นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดโดยไม่ผ่านเครื่องต้นแบบ
- 5.2 จากการทดสอบพบว่าขณะแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ที่จะทำให้เครื่องไม่ปกติ โดยสังเกตจากหลอด LED สีเขียวกระพริบช้า ซึ่งหมายความว่า การทำงานไม่ปกติ วิธีแก้ไข ทำได้โดยการปรับ VR 1 ในวงจรให้หลอด LED กระพริบถี่เร็ว

ขั้นที่ 6 ได้เครื่องต้นแบบ

- 6.1 จากการที่ได้สร้างเครื่องต้นแบบแล้วนำไปทดสอบกับโหลดจริงพบความผิดปกติและการปรับปรุงจนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปทำการทดสอบกับโหลดที่เตรียมไว้พร้อมติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดตามกำหนดที่ฝ่ายช่างองค์การเกษตรกรรม จดและบันทึกผลแล้วนำมาวิเคราะห์

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล ได้ขออนุญาตเครื่องลดกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีบาลานซ์โหลด ทำการทดลองที่ฝ่ายกองช่างองค์การเกษตรกรรม เพื่อให้เป็นสถานที่ทดสอบเครื่องที่สร้างขึ้น โดยการทดสอบใช้โหลดตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ทดลอง 7 วัน ๆ ละ 6 ชั่วโมง บันทึกค่าที่ได้ลงตารางบันทึก

2. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 สถิติเชิงบรรยาย (Descriptive Statistion) ที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่

2.1.1 ค่าเฉลี่ย (Mean)

2.1.2 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

2.2 สถิติอ้างอิง (Inferential Statistic) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ T-test

เพื่อใช้ทดสอบความแตกต่างในการใช้กระแสไฟฟ้าของโหลดตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ขนาด 9 กิโลวัตต์ 380 โวลต์ ที่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดกับไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลครั้งนี้ เพื่อให้สื่อความหมายได้ตรงกันในการแปลความหมาย ผู้วิจัยได้กำหนด สัญลักษณ์และอักษรย่อที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

$\bar{X}$	แทน	ค่าเฉลี่ย
S.D.	แทน	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลและแปลความหมายของข้อมูล แบ่งเป็น 2 ตอน คือ
ตอนที่ 1 แสดงกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า จากโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ในระยะเวลา 7 วัน เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสโดยวิธีบาลานซ์โหลด

ตอนที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจากโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt ที่วัดได้จากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตอนที่ 1 แสดงกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า จากโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสโดยวิธีบาลานซ์โหลด

ตาราง 1 แสดงกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

วันที่	ชั่วโมงที่	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า
		แอมแปร์	วัตต์
1	1	227.0111	86264.2180
	2	226.8990	86221.6200
	3	226.9980	86259.2400
	4	226.4441	86048.7580
	5	226.4421	86047.9980
	6	226.5421	86085.9980
2	1	226.1622	85941.6360
	2	225.0011	85500.4180
	3	225.0001	85500.0380
	4	225.0122	85504.6360
	5	225.0022	85500.8360
	6	225.0063	85502.3940
3	1	225.0228	85508.6640
	2	224.8810	85454.7800
	3	224.8889	85457.7820
	4	225.1200	85545.6000
	5	225.0812	85530.8560
	6	225.0042	85501.5960
4	1	225.0820	85531.1600
	2	225.0663	85525.1940
	3	224.3120	85238.5600
	4	225.0240	85509.1200
	5	225.0240	85509.1200
	6	225.0246	85509.3480

ตาราง 1 (ต่อ)

วันที่	ชั่วโมงที่	กระแสไฟฟ้า แอมแปร์	กำลังไฟฟ้า วัตต์
5	1	225.0242	85509.1960
	2	225.0242	85509.1960
	3	225.0248	85509.4240
	4	225.1130	85542.9400
	5	225.0011	85500.4180
	6	225.0041	85501.5580
6	1	225.0046	85501.7480
	2	224.9899	85496.1620
	3	224.8864	85456.8320
	4	224.5138	85315.2440
	5	224.5122	85314.6360
	6	224.5002	85310.0760
7	1	224.3555	85255.0900
	2	224.5150	85315.7000
	3	224.4412	85287.6560
	4	224.1610	85181.1800
	5	224.0110	85124.1800
	6	224.0861	85152.7180
—		225.1243	85547.2268
X			
S.D.		0.7596	288.6327

จากตาราง 1 แสดงกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า กับโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด วัดค่าวันละ 6 ครั้ง จำนวน 7 วัน มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 225.1243 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า 85547.2268 วัตต์

ตาราง 2 แสดงกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เมื่อไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

วันที่	ชั่วโมงที่	กระแสไฟฟ้า	พลังงานไฟฟ้า
		แอมแปร์	วัตต์
1	1	236.0191	89687.2580
	2	236.1282	89728.7160
	3	236.2661	89781.1180
	4	236.5021	89870.7980
	5	236.8101	89987.8380
	6	236.9912	90056.6560
2	1	236.9981	90059.2780
	2	236.0002	89680.0760
	3	236.0019	89680.7220
	4	236.0188	89687.1440
	5	236.0089	89683.3820
	6	236.0812	89710.8560
3	1	236.1120	89722.5600
	2	236.0066	89682.5080
	3	236.0188	89687.1440
	4	236.4412	89847.6560
	5	236.5260	89879.8800
	6	236.5560	89891.2800
4	1	236.6810	89938.7800
	2	236.6660	89933.0800
	3	236.0188	89687.1440
	4	236.7420	89961.9600
	5	236.7420	89961.9600
	6	236.7442	89962.7960

ตาราง 2 (ต่อ)

วันที่	ชั่วโมงที่	กระแสไฟฟ้า	พลังงานไฟฟ้า
		แอมแปร์	วัตต์
5	1	236.7441	89962.7580
	2	236.7444	89962.8720
	3	236.7624	89969.7120
	4	236.8830	90015.5400
	5	236.8101	89987.8380
	6	236.8450	90001.1000
6	1	236.8464	90001.6320
	2	236.9911	90056.6180
	3	236.9138	90027.2440
	4	236.6581	89930.0780
	5	236.6787	89937.9060
	6	236.6766	89937.1080
7	1	236.6211	89916.0180
	2	236.8712	90011.0560
	3	236.9834	90053.6920
	4	236.8100	89987.8000
	5	236.6662	89933.1560
	6	236.9888	90055.7440
—			
X		236.5613	89893.2967
S.D.		0.3499	132.9498

จากตาราง 2 แสดงกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า กับ โหลดขดลวดความต้านทานในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ เมื่อไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด วัดค่าวันละ 6 ครั้ง จำนวน 7 วัน มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 236.5613 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้า 89893.2967 วัตต์

ตาราง 3 กระแสไฟฟ้าจากการใช้โหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วันที่วัดได้จากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้ เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

วันที่	ใช้เครื่องลดกระแส แอมแปร์	ไม่ใช้เครื่องลดกระแส แอมแปร์	ผลต่าง แอมแปร์	ร้อยละ
1	226.7227	236.4528	-9.7301	4.2916
2	225.1974	236.1849	-10.9875	4.8791
3	224.9997	236.2768	-11.2771	5.0121
4	224.9222	236.5990	-11.6768	5.1915
5	225.0319	236.7982	-11.7663	5.2287
6	224.7345	236.7941	-12.0596	5.3662
7	224.2616	236.8235	-12.5619	5.6014
เฉลี่ย	225.1243	236.5613	-11.4370	5.0815

จากตาราง 3 แสดงว่ากระแสไฟฟ้าจากการใช้โหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วัน เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดมีค่าน้อยกว่าไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด โดยมีค่าน้อยกว่าตั้งแต่ 9.7301 ถึง 12.5619 แอมแปร์ คิดเป็นอัตราส่วนลดลง ร้อยละ 4.2916 ถึง 5.6014 โดยเฉลี่ยทั้ง 7 วัน พบว่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วันเมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ใช้กระแสไฟฟ้าลดลงร้อยละ 5.0815

ตอนที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจากโหลดขวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt ที่วัดได้จากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ดังแสดงใน ตาราง 4

ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดและไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด กับ โหลดขวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วัน วัดค่าวันละ 6 ครั้ง

วิธีการ	จำนวนวัด (ครั้ง)	$\bar{X}$	S.D.	T	ระดับนัยสำคัญ
ใช้เครื่องลดกระแส	42	225.1243	0.7600	88.6300	.01
ไม่ใช้เครื่องลดกระแส	42	236.5613	0.3500		

จากตาราง 4 แสดงว่าค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าของโหลดขวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วัน วัดค่าวันละ 6 ครั้ง ค่าที่วัดได้เปรียบเทียบจากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องมือ ลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด

1. รับรู้ปัญหาของการใช้กระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะใช้กระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก
2. ศึกษารายละเอียดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด โดยการศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการประหยัดพลังงาน
3. ทำการออกแบบวงจรในส่วนต่าง ๆ ของการสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธี บาลานซ์โหลด
 - 3.1 ออกแบบวงจร Input / CT-V
 - 3.2 ออกแบบวงจร Controller and Program
 - 3.3 ออกแบบวงจร Output Power Electronics-Capacitor
4. อุปกรณ์วัสดุและเครื่องมือในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด ผู้วิจัยได้เลือกซื้อ ที่มีขายในประเทศไทย
5. กำหนดระยะเวลาสถานที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด
 - 5.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด เดือนมกราคม พ.ศ. 2543
 - 5.2 สถานที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด ทำการที่ ฝ่ายช่าง องค์การเกษตรกรรม กระทรวงสาธารณสุข

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า จากโหลดขดลวดความร้อนใน ตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ในระยะเวลา 7 วัน เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 225.1243 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า 85547.2268 วัตต์ต่อชั่วโมง
2. กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า จากโหลดขดลวดความร้อนใน ตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ เมื่อไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 236.5613 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า 89893.2967 วัตต์
3. กระแสไฟฟ้าจากการใช้โหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วัน เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดมีค่าน้อยกว่าไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด โดยเฉลี่ย 11.4370 แอมแปร์ คิดเป็นอัตราส่วนลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 5.0815
4. ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจากโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt การใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

อภิปรายผล

จากการที่ผู้วิจัยออกแบบและสร้างการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และทำการทดลองวัดกระแสไฟฟ้า และค่าพลังงานไฟฟ้าโดยต่อกับโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้งานในระยะเวลา 7 วัน วัดค่าวันละ 6 ครั้ง พบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ไม่เป็นค่าเดียวกันทุกครั้งเป็นเพราะ โหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำการควบคุมให้คงที่หากอุณหภูมิหรือความดันเกิดค่าที่กำหนดไว้ มอเตอร์ระบายอากาศร้อนภายในตัวตู้จะทำงาน ทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับการทำงานของมอเตอร์นั้น กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น แต่กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้งานจะไม่มากนักเพราะเป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก

ประสิทธิภาพของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดพิจารณาจากค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานของโหลดขดลวดความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) จำนวน 2 ชุด แต่ละชุดมีคุณสมบัติเช่นเดียวกันเพื่อความมั่นใจได้ว่าการใช้กระแสไฟฟ้าจะไม่ขึ้นอยู่กับโหลดเพราะถือได้ว่าโหลดต้องการกำลังไฟฟ้าเท่าเทียมกัน ซึ่งผลการทดลองที่ทำในเวลา 7 วัน วัดกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า วันละ 6 ครั้ง ผลพบ

ว่าค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ในกลุ่มโหลดควบคุมความร้อนในตู้อบ (Hot air oven) ที่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด มีค่าน้อยกว่ากลุ่มโหลดที่ไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ประสิทธิภาพของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ทำให้อัตราการใช้กระแสไฟฟ้าลดลงถึง ร้อยละ 5.0815 ซึ่งถ้านำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก จะช่วยให้ประหยัดค่ากระแสไฟฟ้าของโรงงานได้ และยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐ ไม่ต้องลงทุนในการสร้างโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังเป็นการประหยัดการใช้เชื้อเพลิงที่นำไปผลิตไฟฟ้า โดยเชื้อเพลิงเหล่านั้นต้องนำเงินตราของประเทศไปซื้อ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะทั่วไป

1. เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ควรมี แอมป์มิเตอร์ โวลท์มิเตอร์ วัตต์-ฮาวมิเตอร์ และพาวเวอร์แฟกเตอร์มิเตอร์ ติดตั้งไว้ เพื่อสามารถให้ผู้ใช้ตรวจสอบค่าต่าง ๆ ได้ในการใช้งาน
2. ควรนำเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีโหลดต่าง ๆ แบบ
3. ควรออกแบบกล่องใส่อุปกรณ์วงจรของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลดให้สะดวกในการประกอบ ติดตั้ง และบำรุงรักษา

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. ควรศึกษาโดยนำเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ไปทดลองใช้กับโหลดในรูปแบบอื่น ๆ เช่น ขดลวดเหนียวนำ อุปกรณ์ที่ประกบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าต่าง ๆ อุปกรณ์ประเภทหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)
2. ควรศึกษาโดยทดลองใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด ในช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด หรือในช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ เพื่อศึกษาว่าประสิทธิภาพของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด จะมีการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 25 ปี แห่งความมุ่งมั่น. นนทบุรี : ฝ่ายประชาสัมพันธ์การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ประเทศไทย, 2536.

_____. การจัดการด้านการใช้ไฟฟ้า. นนทบุรี : ฝ่ายประชาสัมพันธ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย , 2538

_____. แผนวิสาหกิจ ปีงบประมาณ 2540-2549. นนทบุรี : ฝ่ายประชาสัมพันธ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย , 2539. เอกสารเย็บเล่ม

จตุพร บุญชิต. “การใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงแรมสยามอินเตอร์คอนดิเนนตัล.”

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2529.

ชัยยุทธ ศรีเผด็จ. “การประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ”

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.

ทวี เวชพฤติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Gino

Romegialli Thyristor Controlled compensators Baden, Switzerland: BBC brown, Boven & Co.,Ltd. 1983

บุญยงค์ ลิ้มชูพรวิกุล. “การประหยัดพลังงานไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมสุญ”

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2530.

บุญยงค์ ลิ้มชูพงกิจ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2529.

พัฒนะ รักความสุข. “การทำบัญชีพลังงานและการประเมินความร้อนเข้าสู่อาคารโรงแรมขนาดใหญ่.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน และวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2530.

พุดธิรัตน์ เปี่ยมวงศ์จิตรต์. “การศึกษาการประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมย้อมผ้า”, รายงานปัญหาพิเศษหลักสูตรประกาศนียบัตรพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ : 2541 อัดสำเนา

บรรณานุกรม (ต่อ)

- พูนลาภ มณีนิล. โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการวิเคราะห์ภาระความเย็นสำหรับอาคารในประเทศไทย
หน้า 7-80 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- ยงยุทธ เชษฐเชาวลิต. การทำบัญชีพลังงานและการประหยัดพลังงานในโรงงานหนึ่งเทียมและใน
อาคารพาณิชย์. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
2528.
- ศิริศักดิ์ กิตติสารกุล. "การประหยัดพลังงานในโรงงานผลิตอะไหล่รถยนต์." วิทยานิพนธ์ปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2528.
- สุดสาคร น้อยดี. "การศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานและลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดใน
โรงงานปลาห่านกระป๋อง." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา
เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
2538.
- สุพจน์ เอียดประถม. "การประหยัดพลังงานไฟฟ้า", วารสารวิศวกรรมก้าวหน้า. 4 : สิงหาคม,
2526
- สุทธิพงษ์ ศรีธารมณ. หลักการงาน หาที่เสีย และซ่อมเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน . กรุงเทพฯ :
เม็ดทราย พรินต์ติ้ง, 2540
- สมคิด วิริยะประสิทธิ์ชัย และ อรรถพล มณีโชติ. การสร้างโครงงานอิเล็กทรอนิกส์ . กรุงเทพฯ :
สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2542
- สมจิต วัฒนาชยากุล. สถิติวิเคราะห์เบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ประกายพริ้ง, 2532.
- สมชาย พรชัยวิวัฒน์ ; กุสกันหา คูบาฮา ; และ วารุณี เตีย. การประหยัดและอนุรักษ์พลังงานใน
โรงงานอุตสาหกรรมสำหรับผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อม.
กรุงเทพมหานคร , 2541.
- สมนึก ธีระกุลพิสุทธ์. "การประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ", การสัมมนาเรื่องเทคโนโลยีการ
ประหยัดพลังงาน . ปัตตานี : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ , 2529
- สมบุญ ฤทธิ. "การศึกษาประสิทธิภาพของระบบ Ice Storage ในอาคารพาณิชย์ กรณีศึกษา :
โรงพิมพ์ไทยรัฐ." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยี
การจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.

เสรี ลาขโรจน์. หลักเกณฑ์และวิธีวัดผล . นนทบุรี : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัย สุโขทัยธรรมาธิราช,
2537

เอกพันธ์ มาลาศรี. "การประหยัดพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศของบ้านพักอาศัย."

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน
และวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.

อัศวเดช อัดสาระ. "การศึกษาพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการปั่นด้าย", รายงานปัญหาพิเศษหลัก
สูตรประกาศนียบัตรพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
กรุงเทพฯ : 2529 . อัดสำเนา

ภาษาอังกฤษ

A., Kritsadan. "Energy Conservation in Bang Paper Mill factory." For the
Degree of Master of Engineering Research Study, Asian Institute of Technology,
1984.

B,D., Hunn. "Effectiveness of Shading Devices on Buildings in Heating-Dominated
Climates." Ashrae Transaction 99 : 936-944.

D.A., Hull. "A Procedure to Group Residential Air Conditioning Load Profile During the
Hottest Days in Summer." Energy 15, (1990) : 1087-1097.

IES Lighting Handbook. Reference Volume , 1984

M.A., Picte. "Technology Assessment Thermal Cool Storage in Commercial Building."
Lawrence Berkeley Laboratory Report 25521 : 186-190.

Mills. Evan. "Advanced Energy Efficient Lighting Systems." Energy Efficient Lighting .
(1993) : 75-97.

Montgomery, Douglas. Design and Analysis of Experiments. 3 rd ed. John Wiley & Sons, 1992.

S., Chatkaewvorakul . "A Feasibility on Ice Storage in an Office Building in Bangkok" For the
Degree of Master of Engineering Energy Program. Asian Institute of Technology, 1990.

W.P., Mcniel. "Review of an Operating Ice Storage System Performance." Ashrae Technical
Data Bulletin (1985) : 124-138.

"VAR System. Model for TNA Simulation" IEEE Proceedings on Power Apparatus and
System. Vol. PAS-101, No.9 (September 1982) : 3413-3420.

บรรณานุกรม (ต่อ)

K.M Jones. "Introduction to Special Section : Static Compensation for AC Power System." EE Preceedings Vol.128 Pt.C, No.6 (November 1981) : 362-365.

S. Paul ; S.K. Basu; and R. Mondal, "A Microcomputer Controlled Static VAR Compensator for Power System Laboraatory Experiments" IEEE Transaction on Power System. Vol.7 No.1 (February 1992) : 370-376.

N.T. Fahlen, M.Sc. "EHV Series Capacitor Equipment Prostection and Control" IEE Proceedings Vol.128 Pt.C,No.6 Znovember 1981) : 394-401.

T.J.E. Miller. Reactive Power Control in Control in Electic System. New York: John Weley & Sons 1982

The 8051 Microcantroller Archiecture, Programming and Application Renneth J.Ayala, Western Carolina University, west Publishing Conpany,1991

MCS-51 Microcortroller Data book. Inlet corp.1988

Microcontrollers and Interfacing Programming and Hardware, 2 ne Edition, Douglas V.Hall, Mc Graw, Inc, 1992.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

หนังสือขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

ที่ ทม 1012/๐ ๔๗๖



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

1๘ มีนาคม 2543

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน หัวหน้าแผนกบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เนื่องด้วย นายบรรเทิง ศรีโรสภณ นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด" โดยมี อาจารย์ ดร.คทา ชื่นตา อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์เกษมสันต์ กิรติเลิศบุญ เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญท่าน เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจเครื่องมือการวิจัย

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์จากท่าน ได้โปรดพิจารณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายบรรเทิง ศรีโรสภณ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ วิศาลาภรณ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 258-4119, 664-1000 ต่อ 5664, 5644

โทรสาร. 258-4119

28 ธันวาคม 2542

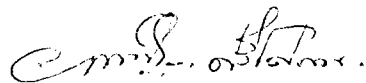
เรื่อง ขอบความอนุเคราะห์

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายช่าง องค์การเกษตรกรรม

ข้าพเจ้า นายบรรเทิง ศรีโสภณ นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด โดยมี อาจารย์ ดร.คทา ชื่นตา และ อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร เป็นกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ มีความประสงค์ที่จะขอใช้สถานที่ อุปกรณ์ตู้อบ Hot air oven ขององค์การเกษตรกรรม เป็นโหลดเพื่อทดลองเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และขอใช้เครื่องมือวัดต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูล เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน

จึงเรียนมาเพื่อขอบความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอแสดงความนับถือ



(นายบรรเทิง ศรีโสภณ)

ภาคผนวก ข.
รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์

1.2 ตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller ICs)

ในแต่ละบริษัทได้มีการผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์หลายตระกูลด้วยกัน ซึ่งในแต่ละตระกูลก็มีการผลิตออกมาหลายรุ่น ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 เป็น ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูลต่าง ๆ ของบริษัทอินเทลและ ในตารางที่ 1.2 เป็น ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูลต่าง ๆ ของบริษัทโมโตโรลา

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่าง ๆ ของบริษัทอินเทล (Intel Single Chip Microcontroller)

Function Family	ROM Type			ROM	RAM	Address Range	I/O				Inter- rupt
	Internal EPROM	Internal ROM	External EPROM				Timer / Counter	Parallel I/O	Serial I/O	A / D	
MCS-48	8748 8749 8760	8020	8036 8039 8040	1 KB	64 B	1 KB	1 × 8	1 × 8		2 × 8	2
		8021		2 KB	64 B	2 KB	1 × 8	1 × 8			
		8022		2 KB	64 B	2 KB	1 × 8	1 × 8			
		8048		1 KB	64 B	4 KB	1 × 8	2 × 8			
		8049		2 KB	128 B	4 KB	1 × 8	2 × 8			
		8060		4 KB	256 B	4 KB	1 × 8	2 × 8			
UPI-41	8741	8041		1 KB	64 B	4 KB	1 × 8	4 × 8			2
	8742	8042		2 KB	128 B	4 KB	1 × 8	4 × 8			2
MCS-61	8751	8061	8031	4 KB	128 B	64 KB	2 × 16	2 × 8	1		5
	87C262	8062	8032	8 KB	266 B	64 KB	3 × 16	2 × 8	1		6
		83C262		8 KB	266 B	64 KB	3 × 16	4 × 8	1		7
UPI-44	8744	8044	8344	4 KB	192 B	64 KB	2 × 16	4 × 8	SDLC		5
MCS-96	8796 87C196	8396	8096	8 KB	232 B	64 KB	2 × 16	3 × 8	1	8 × 10 4 × 10 8 × 10	8
		8394	8094	8 KB	232 B	64 KB	2 × 16	3 × 8	1		8
		8397	8097	8 KB	232 B	64 KB	2 × 16	3 × 8	1		8
		8396	8096	8 KB	232 B	64 KB	2 × 16	3 × 8	1		8
		83C196	80C196	8 KB	232 B	64 KB	2 × 16	3 × 8	1		8

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่าง ๆ ของบริษัทโมโตโรลา (Motorola Single Chip Microcontroller)
(โดย SCI คือ Serial Communication Interface และ SPI คือ Serial Peripheral Interface)

Function / Family	Model	ROM Type			ROM	RAM	Address Range	I/O				Interrupt
		Internal EPROM	Internal ROM	External				Timer / Counter (bits)	Parallel I/O (pins)	Serial I/O	A/D	
MC6801		68701	6801	6803	2 KB	128 B	64 KB	16	29	SCI		7
		68701 U ₄	6801 U ₄	6803 U ₄	4 KB	192 B	64 KB	16	29	SCI		7
		68701 U ₅				192 B	64 KB	16	29	SCI		7
MC68HC11		Internal 4 KB - 12 KB ROM and 512 B EEPROM				192-512 B	64 KB	16	38 / 22	SCI and SPI	8 x 8	18
MC6805	6804				0.5-2 KB	32-128 B	2-8 KB	8	16 / 20			3-4
	68HC04				1.7 KB	128 B	2-8 KB	8	20			1
	6805				1-4 KB	64-176 B	2-8 KB	8	16 / 32			3-5
	68HC05				2-7.7 KB	96-176 B	2-8 KB	8	32			2
	148805				0-2 KB	64-112 B		8	16 / 32			4

1.3 เหตุผลที่เลือกใช้ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 นี้ มีจุดที่สนใจหลายอย่างคือ

1. เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Intel ซึ่งเป็นผู้ผลิต Chip IC ไมโครโปรเซสเซอร์, ไมโครคอนโทรลเลอร์ รายใหญ่รายหนึ่งของโลก และยังเป็นที่ยอมรับกันมานาน จึงมีความเชื่อถือและไว้วางใจได้
2. มีการพัฒนาตามลำดับดังนี้
8080 -> 8085 -> 8048 -> 8051 -> 8096
8086 -> 80186 -> 80286 -> 80386 -> 80486 -> Pentium
3. สามารถประยุกต์ใช้งานได้ง่าย และยังมีข้อมูลพร้อมทั้งตัวอย่างในการประยุกต์ใช้งานมาก
4. มีเครื่องมือช่วยในการพัฒนาระบบ ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
5. มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการพัฒนาเพื่อควบคุมระบบขนาดเล็กและขนาดกลาง เช่น การควบคุมไฟวิ่งโฆษณา , การควบคุม Stepping Motor ฯลฯ

1.4 ภาพรวมของ MCS-51

Chip Microcontroller นั้น เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Computer in chip ซึ่ง MCS-51 ที่เราสนใจอยู่ในขณะนี้ มีหลักการคล้ายกับ Computer ดังต่อไปนี้

1. CPU : ใน MCS-51 นั้นมี CPU อยู่ในตัวเองและยังมีชุดคำสั่งสำหรับสั่งให้ CPU ทำงานเป็นของตัวเอง ซึ่งชุดคำสั่งดังกล่าวมีทั้งภาษา Assembly และภาษา Basic

2. ส่วนที่ใช้สำหรับเก็บชุดคำสั่ง : ใน Microcontroller MCS-51 บางเบอร์จะมีส่วนที่ใช้สำหรับเก็บชุดคำสั่งนี้อยู่ในตัวเองเช่น Eprom และบางเบอร์จะไม่มีส่วนนี้ สำหรับในหนังสือเล่มนี้ จะใช้ IC MCS-51 เบอร์ที่ไม่มี Eprom ภายใน แต่จะใช้ต่อ Eprom ภายนอกแทนเพื่อความสะดวกในการพัฒนาทางด้าน Software

3. ส่วนที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูล : ใน Microcontroller MCS-51 นี้จะมี หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลอยู่ภายในตัวเองขนาด 128 Byte หรือ 256 Byte ไม่เท่ากันในแต่ละเบอร์ถ้าหากไม่พอใช้เราสามารถต่อเพิ่มภายนอกได้

4. ส่วน Input/Output : ใน Microcontroller MCS-51 มี Port สำหรับติดต่อกับอุปกรณ์ ภายนอกถึง 4 Port คือ Port 0, Port 1, Port 2, Port 3, และสามารถสั่งการทำงานของแต่ละขาได้ โดยใช้คำสั่งควบคุมในระดับบิต (Bit Addressable)

5. นอกจากนั้น Microcontroller MCS-51 ยังมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม, การทำ Interrupt, การทำ Timer / Counter ฯลฯ ในบางขาของ MCS-51 นั้นสามารถทำหน้าที่ 2หน้าที่ โดยให้ขาสัญญาณเพียงขาเดียว ซึ่ง MCS-51 ในแบบ Dip 40 ขามีการกำหนดขาต่าง ๆ ดังรูปที่ 1.1

Port 1 Bit 0	1	P1.0	V _{CC}	40	+5V
Port 1 Bit 1	2	P1.1	(AD0)P0.0	39	Port 0 Bit 0 (Address/Data 0)
Port 1 Bit 2	3	P1.2	(AD1)P0.1	38	Port 0 Bit 1 (Address/Data 1)
Port 1 Bit 3	4	P1.3	(AD2)P0.2	37	Port 0 Bit 2 (Address/Data 2)
Port 1 Bit 4	5	P1.4	(AD3)P0.3	36	Port 0 Bit 3 (Address/Data 3)
Port 1 Bit 5	6	P1.5	(AD4)P0.4	35	Port 0 Bit 4 (Address/Data 4)
Port 1 Bit 6	7	P1.6	(AD5)P0.5	34	Port 0 Bit 5 (Address/Data 5)
Port 1 Bit 7	8	P1.7	(AD6)P0.6	33	Port 0 Bit 6 (Address/Data 6)
Reset Input	9	RST	(AD7)P0.7	32	Port 0 Bit 7 (Address/Data 7)
Port 3 Bit 0 (Receive Data)	10	P3.0(RXD)	(V _{PP})P2.7	31	External Enable (EPROM Programming Voltage)
Port 3 Bit 1 (XMIT Data)	11	P3.1(TXD)	(PROM)ALE	30	Address Latch Enable (EPROM Program Pulse)
Port 3 Bit 2 (Interrupt 0)	12	P3.2(INT0)	PSEN	29	Program Store Enable
Port 3 Bit 3 (Interrupt 1)	13	P3.3(INT1)	(A15)P2.7	28	PORT 2 Bit 7 (Address 15)
Port 3 Bit 4 (Timer 0 Input)	14	P3.4(T0)	(A14)P2.6	27	PORT 2 Bit 6 (Address 14)
Port 3 Bit 5 (Timer 1 Input)	15	P3.5(T1)	(A13)P2.5	26	PORT 2 Bit 5 (Address 13)
Port 3 Bit 6 (Write Strobe)	16	P3.6(WR)	(A12)P2.4	25	PORT 2 Bit 4 (Address 12)
Port 3 Bit 7 (Read Strobe)	17	P3.7(RD)	(A11)P2.3	24	PORT 2 Bit 3 (Address 11)
Crystal Input 2	18	XTAL2	(A10)P2.2	23	PORT 2 Bit 2 (Address 10)
Crystal Input 1	19	XTAL1	(A9)P2.1	22	PORT 2 Bit 1 (Address 9)
Ground	20	V _{SS}	(A8)P2.0	21	PORT 2 Bit 0 (Address 8)

รูปที่ 1.1 ตำแหน่งขาต่าง ๆ ของ MCS-51 แบบ DIP 40 ขา

หน้าที่การทำงานของแต่ละขามีดังนี้

- ขาที่ 1-8 ทำหน้าที่เป็น Input/Output Port 1
- ขาที่ 9 ทำหน้าที่รับสัญญาณ Reset จากภายนอก เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มต้นการทำงานใหม่ทั้งหมด
- ขาที่ 10-17 ทำหน้าที่เป็น Input/Output ของ Port 3 และนอกจากนี้แต่ละขายังสามารถทำหน้าที่อื่นได้อีกดังต่อไปนี้

- ขาที่ 10 รับข้อมูลแบบอนุกรมจากอุปกรณ์ภายนอก
- ขาที่ 11 ส่งข้อมูลแบบอนุกรมให้กับอุปกรณ์ภายนอก
- ขาที่ 12 รับสัญญาณ Interrupt 0 จากภายนอกโดยสัญญาณ Interrupt นี้จะทำงานเมื่อสัญญาณเป็น Logic Low
- ขาที่ 13 รับสัญญาณ Interrupt 1 จากภายนอกโดยสัญญาณ Interrupt นี้จะทำงานเมื่อสัญญาณเป็น Logic Low เหมือนกับขา 12
- ขาที่ 14 รับสัญญาณจากภายนอกให้กับเคาท์เตอร์ของ Timer 0
- ขาที่ 15 รับสัญญาณจากภายนอกให้กับเคาท์เตอร์ของ Timer 1
- ขาที่ 16 ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ตัวอื่น เมื่อต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์ตัวนั้น
- ขาที่ 17 ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ตัวอื่น เมื่อต้องการอ่านข้อมูลจาก อุปกรณ์ตัวนั้น
- ขาที่ 18-19 เป็นขาสำหรับรับสัญญาณจาก CRYSTAL เพื่อกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับ Microcontroller โดยภายในตัว Microcontroller เองจะมีวงจร Oscillator อยู่ในตัวด้วยอยู่แล้ว
- ขาที่ 20 ใช้อัด ground 0 Volt ของระบบ
- ขาที่ 21-28 ทำหน้าที่เป็น Input / Output ของ Port 2 หรือทำหน้าที่ส่งคำสั่งเป็น High Byte Address Bus เพื่อต่อหน่วยความจำภายนอกสำหรับเก็บข้อมูล หรือเก็บชุดคำสั่ง หรือเชื่อมต่อ กับอุปกรณ์และไอซีอื่น ๆ ภายนอก Microcontroller
- ขาที่ 29 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อส่งให้หน่วยความจำภายนอกชิปซึ่งเก็บชุดคำสั่งไว้ทำงาน
- ขาที่ 30 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมการ Latch ค่า Low Byte Address Bus จาก Port 0 ในการติดต่อกับส่วนที่ใช้สำหรับเก็บชุดคำสั่งภายนอก
- ขาที่ 31 ผู้ใช้สามารถเลือกให้ Microcontroller นี้ทำงานจากชุดคำสั่งภายในหรือภายนอก Microcontroller ก็ได้ โดยเมื่อต่อขานี้กับ Logic High (+5 Volt) Microcontroller ก็จะทำงานจากโปรแกรมภายใน Microcontroller เอง และเมื่อต่อเข้ากับ Logic Low (0 Volt, ground) Microcontroller ก็จะทำงานจากโปรแกรมภายนอกตัว Microcontroller
- ขาที่ 32-39 ทำหน้าที่เป็น Input/Output ของ Port 0 หรือทำหน้าที่เป็น Low Byte Address Bus สลับกับทำหน้าที่เป็น Data Bus ด้วย
- ขาที่ 40 ใช้อัด +5 Volt. เพื่อจ่ายพลังงานให้กับ Microcontroller

1.5 ลักษณะเด่นของ MCS-51

จากหัวข้อที่ 1.3 และหัวข้อที่ 1.4 ซึ่งกล่าวถึงเหตุผลที่เลือกใช้ MCS-51 และภาพโดยรวมของ MCS-51 จะเห็นว่า ลักษณะเด่นของ MCS-51 มีดังต่อไปนี้

1.5.1 หน่วยความจำภายใน (Internal Memory)

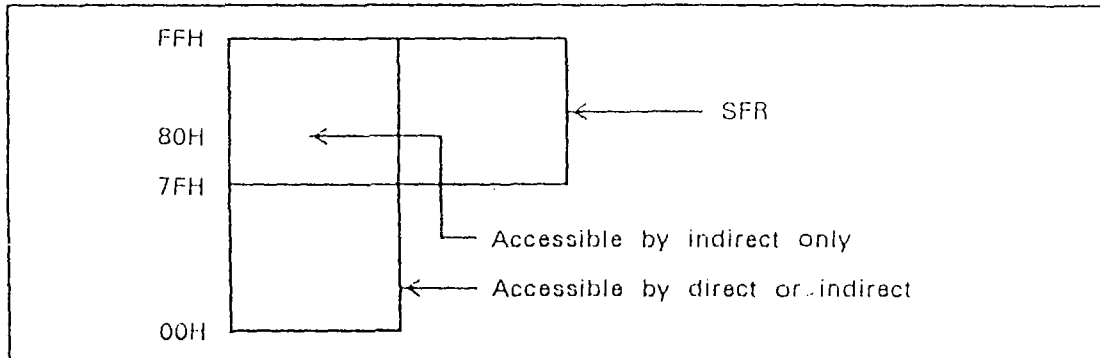
ในคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไปนั้น ต้องมีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมเพื่อสั่งงานให้ CPU ทำงานหรือหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล ซึ่งอาจอยู่ใน ROM (Read Only memory) หรืออยู่ใน RAM (Random Access Memory) ก็ได้ สำหรับ MCS-51 จะมี หน่วยความจำภายในสำหรับเก็บโปรแกรม และ หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 หน่วยความจำภายนอกและภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

Device	ROM less Version	Eprom Version	INTERNAL	
			ROM Bytes	RAM Bytes
8051	8031	-	4 K	128
8051AH	8031AH	8751H 8751BH	4 K	128
8052AH	80C32AH	875213H	4 K	256
80C51BH	80C51BH	87C51	4 K	128
83C51FA	80C51FA	87C51FA	8 K	256
83C51FB	80C51FA	87C51FB	16 K	256
83C51GA	80C51GA	87C51GA	4 K	128
83C152JA	83C152JA	-	8 K	256
-	83C152JB	-	-	256
83C152JC	80C152JC	-	8 K	256
-	80C152JD	-	-	256
83C451	80C451	-	4 K	128
83C452	80C452	87C452P	8 K	256

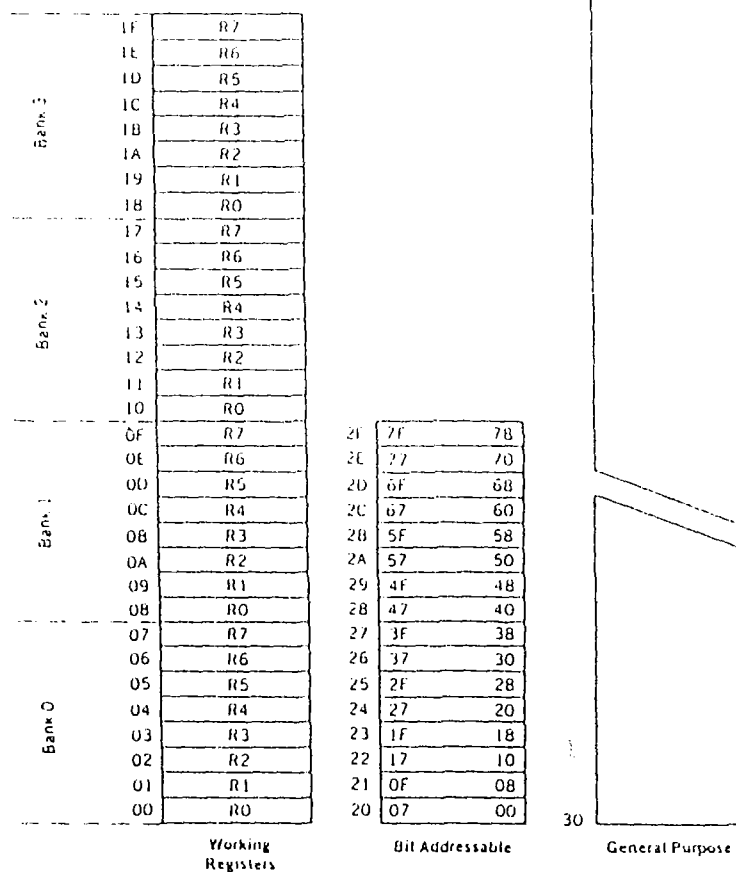
อย่างไรก็ตาม ถ้าหากหน่วยความจำภายในที่ให้นี้ไม่พอใช้ ผู้ใช้นั้นสามารถต่อหน่วย ความจำภายนอกเพิ่มให้กับ MCS-51 นี้ได้ ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้มากที่สุดถึง 64 KByte

หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในชิปจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ส่วนต่าง ๆ ของหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนที่ 1 หน่วยความจำภายใน (Internal RAM) ตั้งแต่ Address 00H ถึง 7FH ใช้สำหรับเก็บข้อมูลทั่วไปจำนวน 128 byte ซึ่งมี Memory Mapping ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงหน่วยความจำภายใน (Internal RAM) ตั้งแต่ Address 00H ถึง 7FH (Courtesy of INTEL Corp.)

และในส่วนนี้แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. Working Register Address 00H ถึง 1FH เป็นจำนวน 32 byte ถูกแบ่งให้เป็นกลุ่มของ register ใช้งานทั่วไป 4 ชุด ชุดละ 8 ตัวคือ R0-R7 register ทั้ง 4 ชุด การใช้งานจะถูกเลือก โดยการกำหนดใน Register Program Status Word ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

CY	AC	F0	RS1	RS0	OV	-	P	
			0	0	เลือกใช้รีจิสเตอร์กลุ่มที่ 1			
			0	1	เลือกใช้รีจิสเตอร์กลุ่มที่ 2			
			1	0	เลือกใช้รีจิสเตอร์กลุ่มที่ 3			
			1	1	เลือกใช้รีจิสเตอร์กลุ่มที่ 4			

ชื่อย่อ

RS1 ใช้เลือกกลุ่มรีจิสเตอร์ R0 - R7

RS0 ใช้เลือกกลุ่มรีจิสเตอร์ R0 - R7

CY Carry Flag

AC Auxillary Carry Flag

F0 Flag 0 เป็นบิตบอกสถานะที่ผู้ใช้สามารถกำหนดการใช้งานเองได้

OV บิตแสดงการเกิด Overflow

- บิตที่ผู้ใช้กำหนดการใช้งานเองได้

P Parity Flag ถูกเซตหรือเคลียร์โดยวงจรภายใน MCS-51 ในแต่ละไซเคิลของคำสั่งแต่ละ คำสั่ง ใช้เป็นตัวบอกให้ทราบว่าในรีจิสเตอร์ ACC มีข้อมูลเป็น 1 เป็นจำนวนคู่ หรือคี่

รูปที่ 1.4 แสดง Register Program Status Word

2. หน่วยความจำที่สามารถเข้าถึงในระดับบิตได้ (Bit Addressable) ที่ Address 20H ถึง 2FH เป็นจำนวน 16 byte แต่ละบิตของหน่วยความจำบริเวณนี้ จะมีการกำหนด Address ของแต่ละบิตไว้แน่นอน เพื่อใช้สำหรับการทำงานของชุดคำสั่งที่ประมวลผลแบบบิตได้

3. หน่วยความจำสำหรับการใช้งานทั่ว ๆ ไป หน่วยความจำส่วนนี้จะอยู่ที่ Address ตั้งแต่ 30H ถึง 7FH เป็นจำนวน 80 byte โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะกำหนด Address เริ่มต้นของ Data ที่ Address 30H นี้

ส่วนที่ 2 มีตั้งแต่ Address 80H-FFH เป็นส่วนของหน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลของ Register ใช้งานเฉพาะสำหรับ Register ที่ใช้สำหรับงานเฉพาะบางตัว (SFR Special function Register) ซึ่งสามารถเข้าถึงโดยวิธีโดยตรงเท่านั้น

Address ต่าง ๆ ของ SFR มีดังรูปที่ 1.5

8 Bytes							
F8							FF
F0	B						F7
E8							EF
E0	ACC						E7
D8							DF
D0	PSW						D7
C8	T2CON		RCAP2L	RCAP2H	TL2	TH2	CF
C0							C7
B8	IP						BF
B0	P3						B7
A8	IE						AF
A0	P2						A7
98	SCON	SBUF					9F
90	P1						97
88	TCON	TMOD	TL0	TL1	TH0	TH1	8F
80	P0	SP	DPL	DPH			PCON

↑

Bit

Addressable

รูปที่ 1.5 แสดง Address ต่าง ๆ ของ SFR (Special function Register) (Courtesy of INTEL Corp.)

ส่วนที่ 3 มีตั้งแต่ Address 80H ถึง FFH ซึ่งจะเห็นว่าซ้ำกับส่วนที่ 2 แต่การเข้าถึงข้อมูล จะใช้วิธีโดยทางอ้อมเท่านั้น ซึ่ง MCS-51 จะทราบเองว่าจะเข้าถึงข้อมูลในตำแหน่งใดและต้องใช้วิธีไหน

จากคุณสมบัติในเรื่องหน่วยความจำภายในของ MCS-51 นี้ ถ้ายังไม่เพียงพอกับความต้องการใช้งาน ผู้ใช้ก็ยังสามารถเชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอกได้ถึง 64 kBytes ได้อีกด้วย

1.5.2 การติดต่อและควบคุมอุปกรณ์ภายนอก (I/O Interface Driving Power)

I/O D.C. CHARACTERISTICS ของ MCS-51 มีได้ตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 แสดง I/O D.C. CHARACTERISTICS ของ MCS-51 (Courtesy of INTEL Corp.)

D.C. CHARACTERISTICS $T_A = 0^\circ\text{C to } 70^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5\text{V} \pm 10\%$, $V_{SS} = 0\text{V}$

Symbol	Parameter	Min	Max	Units	Test Conditions
V_{IL}	Input Low Voltage (Except $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8)	-0.5	0.8	V	
V_{IL1}	Input Low Voltage to $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8	0	0.7	V	
V_{IH}	Input High Voltage (Except XTAL2, RST)	2.0	$V_{CC} + 0.5$	V	
V_{IH1}	Input High Voltage to XTAL2, RST	2.5	$V_{CC} + 0.5$	V	$XTAL1 = V_{SS}$
V_{OL}	Output Low Voltage (Ports 1, 2, 3)*		0.45	V	$I_{OL} = 1.6\text{ mA}$
V_{OL1}	Output Low Voltage (Port 0, ALE, $\overline{PSEN}$)*				
	8751H, 8751H-8		0.60 0.45	V V	$I_{OL} = 3.2\text{ mA}$ $I_{OL} = 2.4\text{ mA}$
	All Others		0.45	V	$I_{OL} = 3.2\text{ mA}$
V_{OH}	Output High Voltage (Ports 1, 2, 3, ALE, $\overline{PSEN}$)	2.4		V	$I_{OH} = -80\text{ }\mu\text{A}$
V_{OH1}	Output High Voltage (Port 0 in External Bus Mode)	2.4		V	$I_{OH} = -400\text{ }\mu\text{A}$
I_{IL}	Logical 0 Input Current (Ports 1, 2, 3, RST) 8032AH, 8052AH All Others		-800 -500	μA μA	$V_{IH} = 0.45\text{V}$ $V_{IH} = 0.45\text{V}$
I_{IL1}	Logical 0 Input Current to $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8 Only		-15	mA	$V_{IH} = 0.45\text{V}$
I_{IL2}	Logical 0 Input Current (XTAL2)		-3.2	mA	$V_{IH} = 0.45\text{V}$
I_{LI}	Input Leakage Current (Port 0) 8751H & 8751H-8 All Others		± 100 ± 10	μA μA	$0.45 \leq V_{IH} \leq V_{CC}$ $0.45 \leq V_{IH} \leq V_{CC}$
I_{IH}	Logical 1 Input Current to $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8		500	μA	$V_{IH} = 2.4\text{V}$
I_{IH1}	Input Current to RST to Activate Reset		500	μA	$V_{IH} < (V_{CC} - 1.5\text{V})$
I_{CC}	Power Supply Current: 8031/8051 8031AH/8051AH 8032AH/8052AH 8751H/8751H-8		160 125 175 250	mA mA mA mA	All Outputs Disconnected; $\overline{EA} = V_{CC}$
C_{IO}	Pin Capacitance		10	pF	Test freq = 1 MHz

จะเห็นได้ว่าความสามารถทางด้าน I/O Interface ของ MCS-51 นี้ สามารถนำไปใช้งานได้เลย แต่ถ้าไม่เพียงพอกับการใช้งานก็สามารถต่ออุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตเพิ่มได้

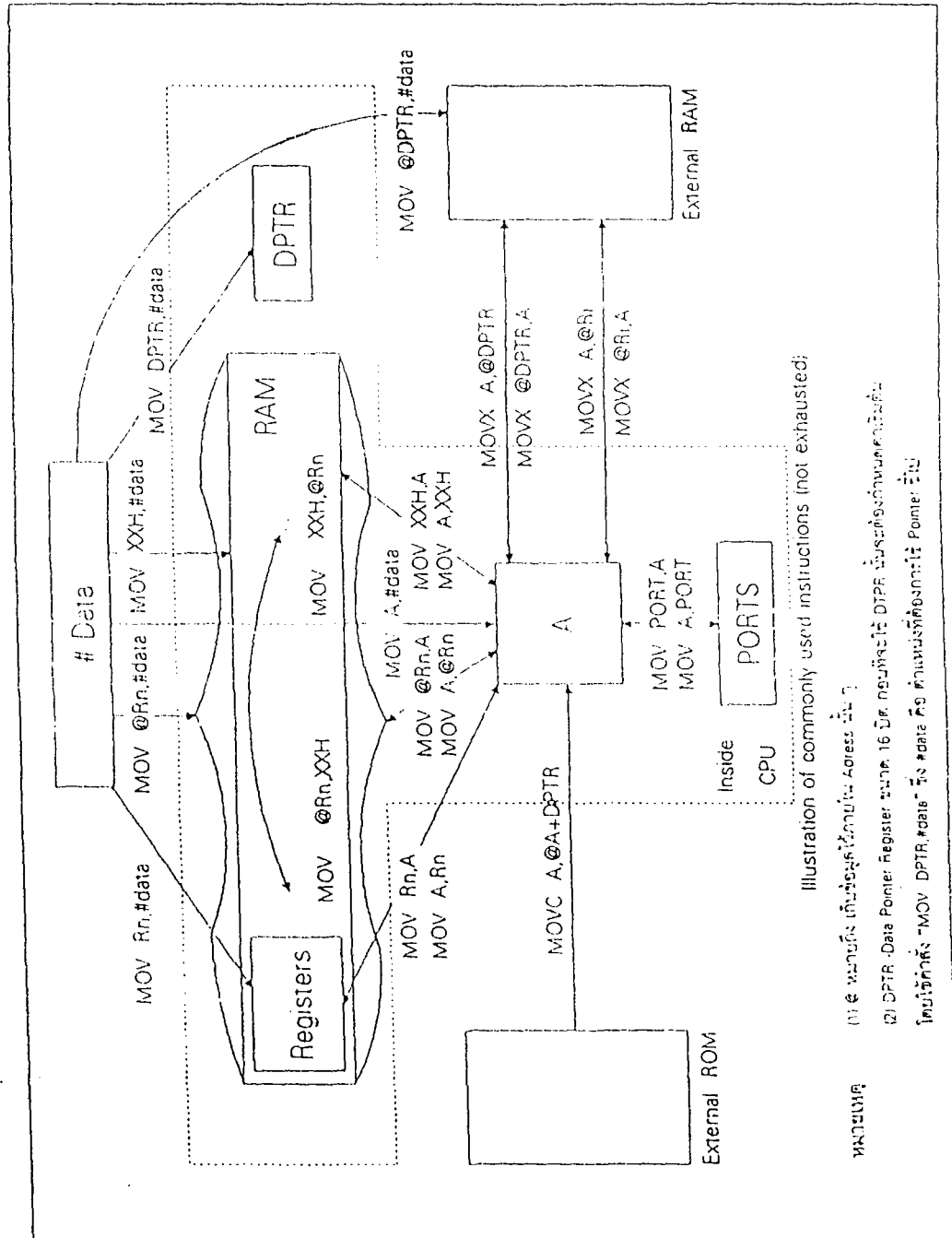
1.5.3 การขัดจังหวะ (Interrupt)

ใน MCS-51 มีการเตรียมรองรับสัญญาณ Interrupt ได้ถึง 5 สัญญาณคือ

- External Interrupt 0
- External Interrupt 1
- Timmer Flag Interrupt 0
- Timmer Flag Interrupt 1
- Serial Port Interrupt

1.6 กฎเกณฑ์นำไปสู่ชุดคำสั่งของ MCS-51

ชุดคำสั่งของ MCS-51 นั้น มีความคล้ายคลึงกับชุดคำสั่งของ Microprocessor ทั่ว ๆ ไป จุดที่น่าสนใจเกี่ยวกับการใช้ชุดคำสั่งของ MCS-51 คือ การทำความเข้าใจ Instruction Addressing Mode หรือการทำความเข้าใจในเรื่องการเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่าง Accumulator, Register, หน่วยความจำภายใน, หน่วยความจำภายนอก, หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายนอก ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แสดงแผนภาพการใช้คำสั่งของ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล COP400 และ COP800 (Family of National Semiconductor)

Function Model	Internal Memory		Parallel I/O	Timer / Counter	Serial I/O	A/D	PWM	DMA	Inter- rupt
	ROM	RAM							
COP413C	0.5 KB	32 x 4	16						
COP413CH	0.5 KB	32 x 4	16						
COP410C	0.5 KB	32 x 4	19						
COP411C	0.5 KB	32 x 4	16						
COP424C	1 KB	64 x 4	23	Y					1
COP425C	1 KB	64 x 4	20	Y					
COP426C	1 KB	64 x 4	16	Y					
COP444C	2 KB	128 x 4	23	Y					1
COP445C	2 KB	128 x 4	20	Y					
COP820C	1 KB	64 B	3 x 8	1 x 16					3
COP821C	1 KB	64 B	5 x 4	1 x 16					3
COP822C	1 KB	64 B	2 x 8	1 x 16					3
COP8/20C	1 KB	64 B	3 x 8	1 x 16					3
COP8/21C	1 KB	64 B	5 x 4	1 x 16					3
COP8/22C	1 KB	64 B	2 x 8	1 x 16					3

แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล COP800, HPC16040 (Family of National Semiconductor)

Function Model	Internal Memory		Parallel I / O	Timer / Counter	Serial I / O	A / D	PWM	DMA	Inter- rupt
	ROM	RAM							
COP840C	2 KB	128 B	3 x 8	1 x 16					3
COP841C	2 KB	128 B	5 x 4	1 x 16					3
COP888CF	4 KB	128 B	36 / 40	2 x 16		8	2		10
COP888CG	4 KB	192 B	36 / 40	2 x 16	1		2		12
COP888CK	4 KB	192 B	36 / 40	2 x 16	1	8	2		13
COP8788CKMH	4 KB	192 B	36 / 40	2 x 16	1	8	2		13
COP8073	2.5 KB	64 B	36 / 40		1				
HPC16003		256 B	52	8 x 16			Y		8
HPC16083	8 KB	256 B	52	8 x 16			Y		8
HPC16084	8 KB	253 B	52	8 x 16		8 x 8	Y		8
HPC16400		256 B	52	4 x 16	12 x HDLC		Y	4	8
HPC16900		256 B	52						
HPC16083MH	8KBEPROM	256 B	52	8 x 16			Y		8
HPC16084MH	8KBEPROM	256 B	52	8 x 16		8 x 8	Y		8

แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Zilog (Single Chip Microcontroller)

Serial	Model	Package		Memory		I / O				Inter- rupt
		DIP	PGA	ROM	RAM	I/O (pins)	Serial I/O	Timer / Counter	DMA	
Z8	Z860x	Z8601	Z8602	2 KB	128 B	32	1	2 x 8	/	6
	Z861x	Z8611	Z8612	4 KB	128 B	32	1	2 x 8	/	6
	Z867x	Z8671		Burn in BASIC	128 B	32	1	2 x 8	/	6
Z-UPC	Z809x	Z8090		2 KB	256 B	32	By	2 x 8	/	
	Z859x	Z8590		2 KB	256 B	32	Software	2 x 28	/	
Super 8	Super 8			8 - 16 KB	256 B	32	1	2 x 16	Yes	7

ตารางที่ ก1.3 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล NEC (Single Chip Microcontroller)

Function Family			Internal Memory		I / O (pins)	Timer / Counter	A / D	Inter- rupt	Fully duplex Serial	Watch dog
			ROM	RAM						
8 Bit	Pre- liminary	μ PD7800		128 B	32	1 x 12		5	Yes	
		μ PD7801	4 KB	128 B	48	1 x 12		5	Yes	
		μ PD7802	6 KB	64 B	48	1 x 12		5	Yes	
		μ PD78C05		128 B	46	1 x 12		3	Yes	
		μ PD78C06	4 KB	128 B	46	1 x 12		3	Yes	
	En- hanced	μ PD7807		256	36	2 x 8		11	Yes	Y
		μ PD7809	8 KB	256	48	1 x 16		11	Yes	Y
		μ PD7810		256	32	1 x 16	8 x 8	11	Yes	
		μ PD7811	4 KB	256	44	1 x 16	8 x 8	11	Yes	
	16 Bit	783 x x	8 KB	256	48	2 x 16	4 x 8	15	Yes	Y

แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล TMS7000

Function Company Model		Internal Memory		Timer / Counter	Parallel I / O	Serial I / O	Interrupt
		ROM	RAM				
TI	7000		128 B	1 x 16	4 x 8		4
	7001		128 B	2 x 16	4 x 8	1	2
	7020	2 KB	128 B	1 x 16	4 x 8		4
	7040	4 KB	128 B	1 x 16	4 x 8		4
	7041	4 KB	128 B	2 x 16	4 x 8	1	6
	70P161	16 KB EPROM	128 B	2 x 16	4 x 8	1	6
	70C00			1 x 16	4 x 8		4
	70C20	2 KB	128 B	1 x 16	4 x 8		4
	70C40	4 KB	256 B	2 x 16	4 x 8		4
	70C02		128 B	1 x 16	4 x 8	1	6
	07C42	4 KB	128 B	2 x 16	4 x 8	1	6
	70C82	8 KB EPROM	256 B	2 x 16	4 x 8	1	6
Scag	72720	2 KB E ² PROM	256 B	2 x 16	4 x 8		4
GI	7060	6 KB	256 B	2 x 16	4 x 8		4
	7080	8 KB	256 B	2 x 16	4 x 8		4
	70100	10 KB	256 B	2 x 16	4 x 8		4
	70122	12 KB	256 B	2 x 16	4 x 8		4

Company	Model	Internal Memory		I / O				Interrupt
		ROM	RAM	Timer / Counter	Parallel I / O	Serial I / O	A / D	
Rockwell	6500 / 1	2 KB	64 B	1 x 16	4 x 8			4
	6500 / 11	3 KB	192 B	2 x 16	4 x 8	1		8
	6500 / 12	3 KB	192 B	2 x 16	7 x 8	1		8
	6500 / 13	256 B	192 B	2 x 16	4 x 8	1		8
	R65F11	3 KB	192 B	2 x 16	4 x 8	1		9
	R65F12	3 KB	192 B	2 x 16	7 x 8	1		9
	6500 / 41	1.5 KB	64 B	1 x 16	2 x 8 1 x 7			6
	6500 / 42	1.5 KB	64 B	1 x 16	5 x 8 1 x 7			6
	6500 / 43	256 B	64 B	1 x 16	2 x 8 1 x 7			7
Mitsu- bishi	50700	8 KB	512 B	2 x 16	7 x 8	1	8 bit	8
	37740	16 KB	512 B	8 x 16	7 x 8	2	7 x 8 bit	8
WDC	65C124					token-		
	65C134					passing		
	65C254							

แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 3870 (F8) (Family of Fairchild and Mostek)

Function Model	Internal Memory			Timer / Counter	Parallel I / O	Serial I / O	Interrupt
	ROM	EPROM	RAM				
3870	1K / 4K	2 K	64 B	1 x 8	4 x 8	Half Duplex	1
38E70			64 B	1 x 8	4 x 8		1
38P70			64 B + 64 B	1 x 8	4 x 8		1
3870 / 42			64 B + 64 B	1 x 8	4 x 8		1
3871	4 K			1 x 8	2 x 8		
3873				1 x 8	3 x 8 1 x 5		1
3875 / 42				1 x 8	4 x 8		1
2870				1 x 8	2 x 8 1 x 4		1

แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC1600 (Family of General Instrument)

Model	Internal Memory		I / O (pins)	Package (pins)
	ROM	RAM		
1650	512 x 12	32 B	8 x 4	40
1655	512 x 12	32 B	20	28
1670	1024 x 12	39 B	8 x 4	40
1645	256 x 12	16 B	3 x 4	18
16C52	256 x 12	32 B	3 x 4	18
16C54	512 x 12	32 B	3 x 4	18
16C53	256 x 12	32 B	20	28
16C55	512 x 12	32 B	20	28



MCS-51 INSTRUCTION SET

Table 10. 8051 Instruction Set Summary

Interrupt Response Time Refer to Hardware Description Chapter.									
Instructions that Affect Flag Settings ⁽¹⁾									
Instruction	Flag			Instruction	Flag				
	C	OV	AC		C	OV	AC		
ADD	X	X	X	CLR C	0				
ADDC	X	X	X	CPL C	X				
SUBB	X	X	X	ANL C,bit	X				
MJL	0	X		ANL C,/bit	X				
DIV	0	X		ORL C,bit	X				
DA	X			ORL C,/bit	X				
RRC	X			MOV C,bit	X				
RLC	X			CJNE	X				
SETB C	1								

⁽¹⁾Note that operations on SFR byte address 208 or bit addresses 209-215 (i.e., the PSW or bits in the PSW) will also affect flag settings

Note on instruction set and addressing modes:

Rn -- Register R7-R0 of the currently selected Register Bank.

direct -- 8-bit internal data location's address. This could be an Internal Data RAM location (0-127) or a SFR (i.e., I/O port, control register, status register, etc. (128-255)).

@Ri -- 8-bit internal data RAM location (0-255) addressed indirectly through register Ri or R0.

#data -- 8-bit constant included in instruction.

#data 16 -- 16-bit constant included in instruction.

addr 16 -- 16-bit destination address. Used by LCALL & LJMP. A branch can be anywhere within the 64K-byte Program Memory address space.

addr 11 -- 11-bit destination address. Used by ACALL & AJMP. The branch will be within the same 2K-byte page of program memory as the first byte of the following instruction.

rel -- Signed (two's complement) 8-bit offset byte. Used by SJMP and all conditional jumps. Range is -128 to +127 bytes relative to first byte of the following instruction.

bit -- Direct Addressed bit in Internal Data RAM or Special Function Register.

Mnemonic	Description	Byte	Oscillator Period
ARITHMETIC OPERATIONS			
ADD A,Rn	Add register to Accumulator	1	12
ADD A,direct	Add direct byte to Accumulator	2	12
ADD A,@Ri	Add indirect RAM to Accumulator	1	12
ADD A,#data	Add immediate data to Accumulator	2	12
ADDC A,Rn	Add register to Accumulator with Carry	1	12
ADDC A,direct	Add direct byte to Accumulator with Carry	2	12
ADDC A,@Ri	Add indirect RAM to Accumulator with Carry	1	12
ADDC A,#data	Add immediate data to Acc with Carry	2	12
SUBB A,Rn	Subtract Register from Acc with borrow	1	12
SUBB A,direct	Subtract direct byte from Acc with borrow	2	12
SUBB A,@Ri	Subtract indirect RAM from ACC with borrow	1	12
SUBB A,#data	Subtract immediate data from Acc with borrow	2	12
INC A	Increment Accumulator	1	12
INC Rn	Increment register	1	12
INC direct	Increment direct byte	2	12
INC @Ri	Increment direct RAM	1	12
DEC A	Decrement Accumulator	1	12
DEC Rn	Decrement Register	1	12
DEC direct	Decrement direct byte	2	12
DEC @Ri	Decrement indirect RAM	1	12

All mnemonics copyrighted ©Intel Corporation 1980



Table 10. 8051 Instruction Set Summary (Continued)

Mnemonic	Description	Byte	Oscillator Period	Mnemonic	Description	Byte	Oscillator Period
ARITHMETIC OPERATIONS (Continued)				LOGICAL OPERATIONS (Continued)			
INC DPTR	Increment Data Pointer	1	24	RL A	Rotate Accumulator Left	1	12
MUL AB	Multiply A & B	1	48	RLC A	Rotate Accumulator Left through the Carry	1	12
DIV AB	Divide A by B	1	48	RR A	Rotate Accumulator Right	1	12
DA A	Decimal Adjust Accumulator	1	12	RRC A	Rotate Accumulator Right through the Carry	1	12
LOGICAL OPERATIONS				DATA TRANSFER			
ANL A,Rn	AND Register to Accumulator	1	12	MOV A,Rn	Move register to Accumulator	1	12
ANL A,direct	AND direct byte to Accumulator	2	12	MOV A,direct	Move direct byte to Accumulator	2	12
ANL A,@Ri	AND indirect RAM to Accumulator	1	12	MOV A,@Ri	Move indirect RAM to Accumulator	1	12
ANL A,#data	AND immediate data to Accumulator	2	12	MOV A,#data	Move immediate data to Accumulator	2	12
ANL direct,A	AND Accumulator to direct byte	2	12	MOV Rn,A	Move Accumulator to register	1	12
ANL direct,#data	AND immediate data to direct byte	3	24	MOV Rn,direct	Move direct byte to register	2	24
ORL A,Rn	OR register to Accumulator	1	12	MOV Rn,#data	Move immediate data to register	2	12
ORL A,direct	OR direct byte to Accumulator	2	12	MOV direct,A	Move Accumulator to direct byte	2	12
ORL A,@Ri	OR indirect RAM to Accumulator	1	12	MOV direct,Rn	Move register to direct byte	2	24
ORL A,#data	OR immediate data to Accumulator	2	12	MOV direct,direct	Move direct byte to direct	3	24
ORL direct,A	OR Accumulator to direct byte	2	12	MOV direct,@Ri	Move indirect RAM to direct byte	2	24
ORL direct,#data	OR immediate data to direct byte	3	24	MOV direct,#data	Move immediate data to direct byte	3	24
XRL A,Rn	Exclusive-OR register to Accumulator	1	12	MOV @Ri,A	Move Accumulator to indirect RAM	1	12
XRL A,direct	Exclusive-OR direct byte to Accumulator	2	12	All mnemonics copyrighted ©Intel Corporation 1980			
XRL A,@Ri	Exclusive-OR indirect RAM to Accumulator	1	12				
XRL A,#data	Exclusive-OR immediate data to Accumulator	2	12				
XRL direct,A	Exclusive-OR Accumulator to direct byte	2	12				
XRL direct,#data	Exclusive-OR immediate data to direct byte	3	24				
CLR A	Clear Accumulator	1	12				
CPL A	Complement Accumulator	1	12				

Courtesy of INTEL Corp



Table 10. 8051 Instruction Set Summary (Continued)

Mnemonic	Description	Byte	Oscillator Period
DATA TRANSFER (Continued)			
MOV @Ri, direct	Move direct byte to indirect RAM	2	24
MOV @Ri, #data	Move immediate data to indirect RAM	2	12
MOV DPTR, #data16	Load Data Pointer with a 16-bit constant	3	24
MOVC A, @A + DPTR	Move Code byte relative to DPTR to Acc	1	24
MOVC A, @A + PC	Move Code byte relative to PC to Acc	1	24
MOVX A, @Ri	Move External RAM (8-bit addr) to Acc	1	24
MOVX A, @DPTR	Move External RAM (16-bit addr) to Acc	1	24
MOVX @Ri, A	Move Acc to External RAM (8-bit addr)	1	24
MOVX @DPTR, A	Move Acc to External RAM (16-bit addr)	1	24
PUSH direct	Push direct byte onto stack	2	24
POP direct	Pop direct byte from stack	2	24
XCH A, Rn	Exchange register with Accumulator	1	12
XCH A, direct	Exchange direct byte with Accumulator	2	12
XCH A, @Ri	Exchange indirect RAM with Accumulator	1	12
XCHD A, @Ri	Exchange low-order Digit indirect RAM with Acc	1	12
BOOLEAN VARIABLE MANIPULATION			
CLR C	Clear Carry	1	12
CLR bit	Clear direct bit	2	12
SETB C	Set Carry	1	12
SETB bit	Set direct bit	2	12
CPL C	Complement Carry	1	12
CPL bit	Complement direct bit	2	12
ANL C, bit	AND direct bit to CARRY	2	24
ANL C, /bit	AND complement of direct bit to Carry	2	24
ORL C, bit	OR direct bit to Carry	2	24
ORL C, /bit	OR complement of direct bit to Carry	2	24
MOV C, bit	Move direct bit to Carry	2	12
MOV bit, C	Move Carry to direct bit	2	24
JC rel	Jump if Carry is set	2	24
JNC rel	Jump if Carry not set	2	24
JB bit, rel	Jump if direct Bit is set	3	24
JNB bit, rel	Jump if direct Bit is Not set	3	24
JBC bit, rel	Jump if direct Bit is set & clear bit	3	24
PROGRAM BRANCHING			
ACALL addr11	Absolute Subroutine Call	2	24
LCALL addr16	Long Subroutine Call	3	24
RET	Return from Subroutine	1	24
RETI	Return from interrupt	1	24
AJMP addr11	Absolute Jump	2	24
LJMP addr16	Long Jump	3	24
SJMP rel	Short Jump (relative addr)	2	24

All mnemonics copyrighted ©Intel Corporation 1980



Table 10. 8051 Instruction Set Summary (Continued)

Mnemonic		Description	Byte	Oscillator Period
PROGRAM BRANCHING (Continued)				
JMP	@A + DPTR	Jump indirect relative to the DPTR	1	24
JZ	rel	Jump if Accumulator is Zero	2	24
JNZ	rel	Jump if Accumulator is Not Zero	2	24
CJNE	A, direct, rel	Compare direct byte to Acc and Jump if Not Equal	3	24
CJNE	A, #data, rel	Compare immediate to Acc and Jump if Not Equal	3	24

Mnemonic		Description	Byte	Oscillator Period
PROGRAM BRANCHING (Continued)				
CJNE	Rn, #data, rel	Compare immediate to register and Jump if Not Equal	3	24
CJNE	@Ri, #data, rel	Compare immediate to indirect and Jump if Not Equal	3	24
DJNZ	Rn, rel	Decrement register and Jump if Not Zero	2	24
DJNZ	direct, rel	Decrement direct byte and Jump if Not Zero	3	24
NOP		No Operation	1	12

All mnemonics copyrighted ©Intel Corporation 1980



PRELIMINARY

MCS[®]-51
8-BIT CONTROL-ORIENTED MICROCOMPUTERS
8031/8051
8031AH/8051AH
8032AH/8052AH
8751H/8751H-8

- High Performance HMOS Process
- Internal Timers/Event Counters
- 2-Level Interrupt Priority Structure
- 32 I/O Lines (Four 8-Bit Ports)
- 64K Program Memory Space
- Security Feature Protects EPROM Parts Against Software Piracy
- Boolean Processor
- Bit-Addressable RAM
- Programmable Full Duplex Serial Channel
- 111 Instructions (64 Single-Cycle)
- 64K Data Memory Space

The MCS[®]-51 products are optimized for control applications. Byte-processing and numerical operations on small data structures are facilitated by a variety of fast addressing modes for accessing the internal RAM. The instruction set provides a convenient menu of 8-bit arithmetic instructions, including multiply and divide instructions. Extensive on-chip support is provided for one-bit variables as a separate data type, allowing direct bit manipulation and testing in control and logic systems that require Boolean processing.

The 8051 is the original member of the MCS-51 family. The 8051AH is identical to the 8051, but it is fabricated with HMOS II technology.

The 8751H is an EPROM version of the 8051AH, that is, the on-chip Program Memory can be electrically programmed, and can be erased by exposure to ultraviolet light. It is fully compatible with its predecessor, the 8751-8, but incorporates two new features: a Program Memory Security bit that can be used to protect the EPROM against unauthorized read-out, and a programmable baud rate modification bit (SMOD). The 8751H-8 is identical to the 8751H but only operates up to 8 MHz.

The 8052AH is an enhanced version of the 8051AH. It is backwards compatible with the 8051AH and is fabricated with HMOS II technology. The 8052AH enhancements are listed in the table below. Also refer to this table for the ROM, ROMless, and EPROM versions of each product.

Device	Internal Memory		Timers/ Event Counters	Interrupts
	Program	Data		
8052AH	8K x 8 ROM	256 x 8 RAM	3 x 16-Bit	6
8051AH	4K x 8 ROM	128 x 8 RAM	2 x 16-Bit	5
8051	4K x 8 ROM	128 x 8 RAM	2 x 16-Bit	5
8032AH	none	256 x 8 RAM	3 x 16-Bit	6
8031AH	none	128 x 8 RAM	2 x 16-Bit	5
8031	none	128 x 8 RAM	2 x 16-Bit	5
8751H	4K x 8 EPROM	128 x 8 RAM	2 x 16-Bit	5
8751H-8	4K x 8 EPROM	128 x 8 RAM	2 x 16-Bit	5

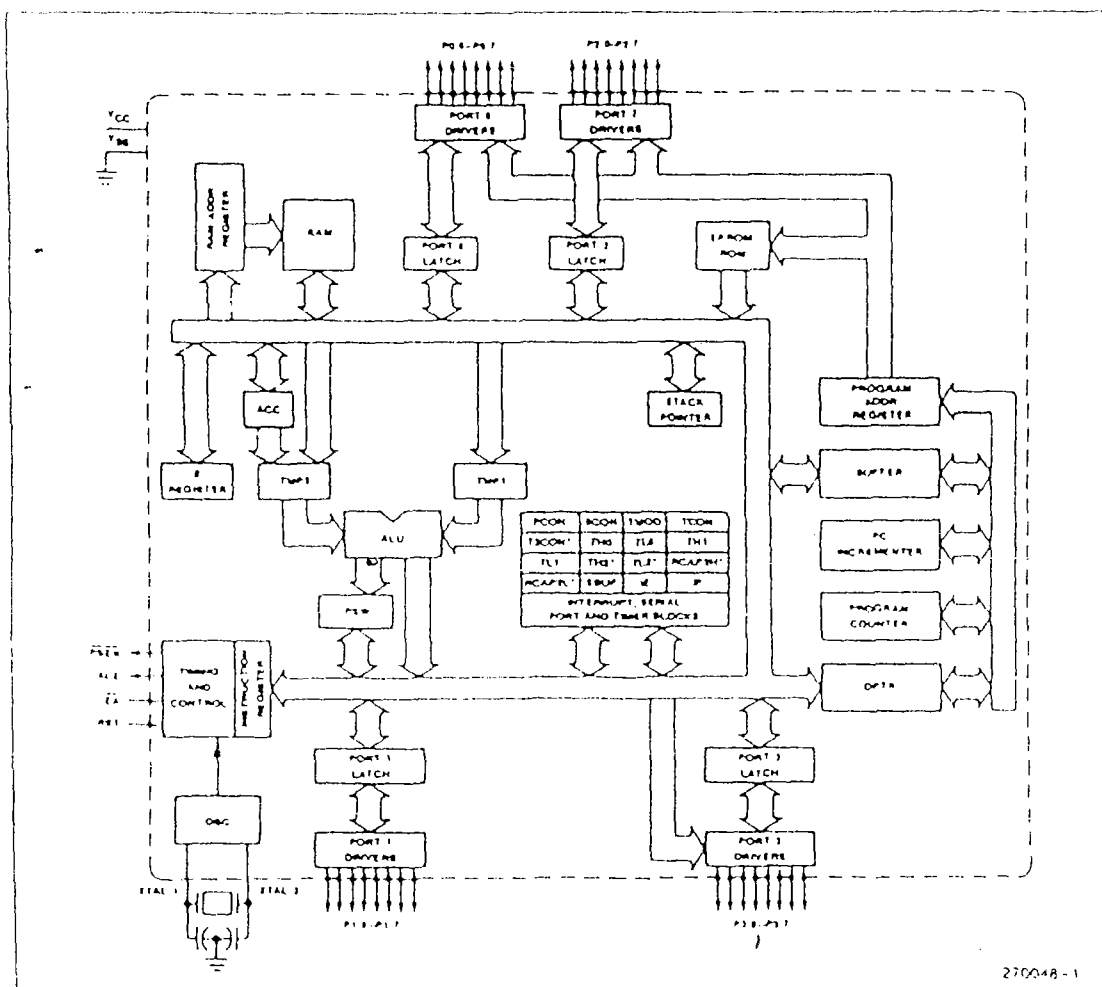


Figure 1. MCS[®]-51 Block Diagram

PACKAGES

Part	Prefix	Package Type
8051AH/ 8031AH	P D N	40-Pin Plastic DIP 40-Pin Cerdip 44-Pin PLCC
8052AH/ 8032AH	P D N	40-Pin Plastic DIP 40-Pin Cerdip 44-Pin PLCC
8751H/ 8751H-8	D R	40-Pin Cerdip 44-Pin LCC

PIN DESCRIPTIONS

V_{CC}: Supply voltage.

V_{SS}: Circuit ground.

Courtesy of INTEL Corp.

Port 0: Port 0 is an 8-bit open drain bidirectional I/O port. As an output port each pin can sink 8 LS TTL inputs.

Port 0 pins that have 1s written to them float, and in that state can be used as high-impedance inputs.

Port 0 is also the multiplexed low-order address and data bus during accesses to external Program and Data Memory. In this application it uses strong internal pullups when emitting 1s and can source and sink 8 LS TTL inputs.

Port 0 also receives the code bytes during programming of the EPROM parts, and outputs the code bytes during program verification of the ROM and EPROM parts. External pullups are required during program verification.

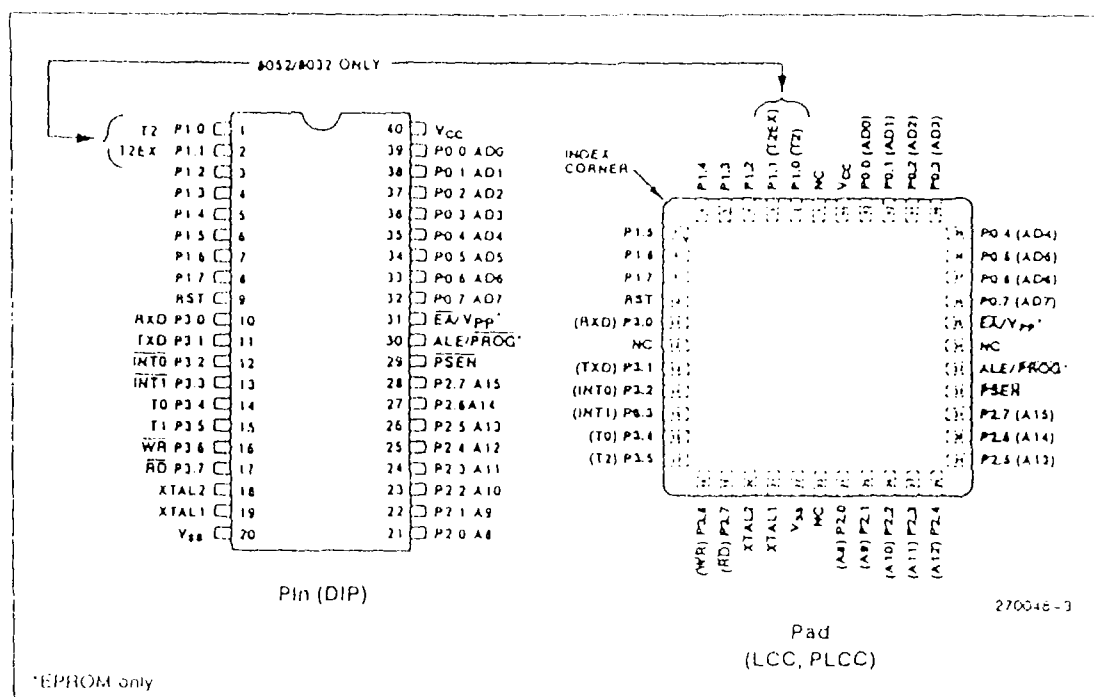


Figure 2. MCS-51 Connections

Port 1: Port 1 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 1 output buffers can sink/source 4 LS TTL inputs. Port 1 pins that have 1s written to them are pulled high by the internal pullups, and in that state can be used as inputs. As inputs, Port 1 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL} on the data sheet) because of the internal pullups.

Port 1 also receives the low-order address bytes during programming of the EPROM parts and during program verification of the ROM and EPROM parts.

In the 8032AH and 8052AH, Port 1 pins P1.0 and P1.1 also serve the T2 and T2EX functions, respectively.

Port 2: Port 2 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 2 output buffers can sink/source 4 LS TTL inputs. Port 2 pins that have 1s written to them are pulled high by the internal pullups, and in that state can be used as inputs. As inputs, Port 2 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL} on the data sheet) because of the internal pullups.

Port 2 emits the high-order address byte during fetches from external Program Memory and during accesses to external Data Memory that use 16-bit addresses (MOVX @DPTR). In this application it uses strong internal pullups when emitting 1s. Dur-

ing accesses to external Data Memory that use 8-bit addresses (MOVX @Ri). Port 2 emits the contents of the P2 Special Function Register.

Port 2 also receives the high-order address bits during programming of the EPROM parts and during program verification of the ROM and EPROM parts.

Port 3: Port 3 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 3 output buffers can sink/source 4 LS TTL inputs. Port 3 pins that have 1s written to them are pulled high by the internal pullups, and in that state can be used as inputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL} on the data sheet) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the MCS-51 Family, as listed below:

Port Pin	Alternative Function
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	INT0 (external interrupt 0)
P3.3	INT1 (external interrupt 1)
P3.4	T0 (Timer 0 external input)
P3.5	T1 (Timer 1 external input)
P3.6	WR (external data memory write strobe)
P3.7	RD (external data memory read strobe)

RST: Reset input. A high on this pin for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

ALE/ $\overline{\text{P}}\overline{\text{R}}\overline{\text{O}}\overline{\text{G}}$: Address Latch Enable output pulse for latching the low byte of the address during accesses to external memory. This pin is also the program pulse input ($\overline{\text{P}}\overline{\text{R}}\overline{\text{O}}\overline{\text{G}}$) during programming of the EPROM parts.

In normal operation ALE is emitted at a constant rate of $\frac{1}{6}$ the oscillator frequency, and may be used for external timing or clocking purposes. Note, however, that one ALE pulse is skipped during each access to external Data Memory.

$\overline{\text{P}}\overline{\text{S}}\overline{\text{E}}\overline{\text{N}}$: Program Store Enable is the read strobe to external Program Memory.

When the device is executing code from external Program Memory, $\overline{\text{P}}\overline{\text{S}}\overline{\text{E}}\overline{\text{N}}$ is activated twice each machine cycle, except that two $\overline{\text{P}}\overline{\text{S}}\overline{\text{E}}\overline{\text{N}}$ activations are skipped during each access to external Data Memory.

$\overline{\text{E}}\overline{\text{A}}/\text{V}_{\text{PP}}$: External Access enable $\overline{\text{E}}\overline{\text{A}}$ must be strapped to V_{SS} in order to enable any MCS-51 device to fetch code from external Program memory locations starting at 0000H up to FFFFH. $\overline{\text{E}}\overline{\text{A}}$ must be strapped to V_{CC} for internal program execution.

Note, however, that if the Security Bit in the EPROM devices is programmed, the device will not fetch code from any location in external Program Memory.

This pin also receives the 21V programming supply voltage (V_{PP}) during programming of the EPROM parts.

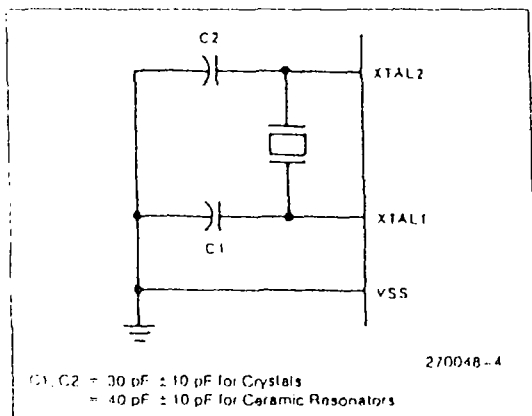


Figure 3. Oscillator Connections

XTAL1: Input to the inverting oscillator amplifier.

XTAL2: Output from the inverting oscillator amplifier.

OSCILLATOR CHARACTERISTICS

XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 3. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. More detailed information concerning the use of the on-chip oscillator is available in Application Note AP-155, "Oscillators for Microcontrollers."

To drive the device from an external clock source, XTAL1 should be grounded, while XTAL2 is driven, as shown in Figure 4. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum high and low times specified on the Data Sheet must be observed.

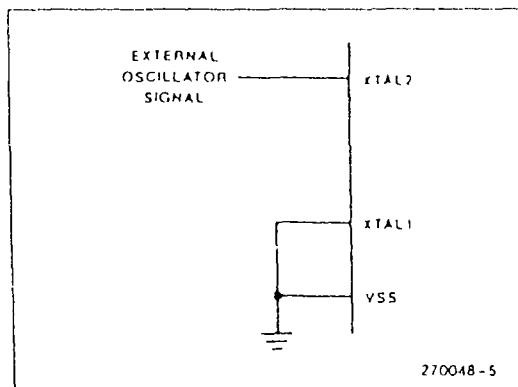


Figure 4. External Drive Configuration

DESIGN CONSIDERATIONS

If an 8751BH or 8752BH may replace an 8751H in a future design, the user should carefully compare both data sheets for DC or AC Characteristic differences. Note that the V_{IH} and I_{IH} specifications for the $\overline{\text{E}}\overline{\text{A}}$ pin differ significantly between the devices.

Exposure to light when the EPROM device is in operation may cause logic errors. For this reason, it is suggested that an opaque label be placed over the window when the die is exposed to ambient light.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Ambient Temperature Under Bias 0°C to 70°C
 Storage Temperature - 65°C to + 150°C
 Voltage on $\overline{EA}/V_{PP}$ Pin to V_{SS} ... - 0.5V to + 21.5V
 Voltage on Any Other Pin to V_{SS} ... - 0.5V to + 7V
 Power Dissipation 1.5W

*Notice: Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

D.C. CHARACTERISTICS $T_A = 0^\circ\text{C to } 70^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V \pm 10\%$, $V_{SS} = 0V$

Symbol	Parameter	Min	Max	Units	Test Conditions
V_{IL}	Input Low Voltage (Except $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8)	0.5	0.8	V	
V_{IL1}	Input Low Voltage to $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8	0	0.7	V	
V_{IH}	Input High Voltage (Except XTAL2, RST)	2.0	$V_{CC} + 0.5$	V	
V_{IH1}	Input High Voltage to XTAL2, RST	2.5	$V_{CC} + 0.5$	V	XTAL1 = V_{SS}
V_{OL}	Output Low Voltage (Ports 1, 2, 3)*		0.45	V	$I_{OL} = 1.6 \text{ mA}$
V_{OL1}	Output Low Voltage (Port 0, ALE, $\overline{PSEN}$)*				
	8751H, 8751H-8		0.60	V	$I_{OL} = 3.2 \text{ mA}$
	All Others		0.45	V	$I_{OL} = 2.4 \text{ mA}$
V_{OH}	Output High Voltage (Ports 1, 2, 3, ALE, $\overline{PSEN}$)	2.4		V	$I_{OH} = -80 \mu\text{A}$
V_{OH1}	Output High Voltage (Port 0 in External Bus Mode)	2.4		V	$I_{OH} = -400 \mu\text{A}$
I_{IL}	Logical 0 Input Current (Ports 1, 2, 3, RST) 8032AH, 8052AH All Others		-800 -500	μA μA	$V_{IN} = 0.45V$ $V_{IN} = 2.45V$
I_{IL1}	Logical 0 Input Current to $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8 Only		-15	mA	$V_{IN} = 0.45V$
I_{IL2}	Logical 0 Input Current (XTAL2)		-3.2	mA	$V_{IN} = 0.45V$
I_{LI}	Input Leakage Current (Port 0) 8751H & 8751H-8		± 100	μA	$0.45 \leq V_{IH} \leq V_{CC}$
	All Others		± 10	μA	$0.45 \leq V_{IH} \leq V_{CC}$
I_{IH}	Logical 1 Input Current to $\overline{EA}$ Pin of 8751H & 8751H-8		500	μA	$V_{IN} = 2.4V$
I_{IH1}	Input Current to RST to Activate Reset		500	μA	$V_{IN} < (V_{CC} - 1.5V)$
I_{CC}	Power Supply Current:				
	8031/8051		160	mA	All Outputs Disconnected; $\overline{EA} = V_{CC}$
	8031AH/8051AH		125	mA	
	8032AH/8052AH		175	mA	
	8751H/8751H-8		250	mA	
C_{IQ}	Pin Capacitance		10	pF	Test freq = 1 MHz

*NOTE:

Capacitive loading on Ports 0 and 2 may cause spurious noise pulses to be superimposed on the V_{OL} s of ALE and Ports 1 and 3. The noise is due to external bus capacitance discharging into the Port 0 and Port 2 pins when these pins make 1-to-0 transitions during bus operations. In the worst cases (capacitive loading > 100 pF), the noise pulse on the ALE line may exceed 0.8V. In such cases it may be desirable to qualify ALE with a Schmitt Trigger, or use an address latch with a Schmitt Trigger STROBE input.



A.C. CHARACTERISTICS $T_A = 0^\circ\text{C to } +70^\circ\text{C}$; $V_{CC} = 5V \pm 10\%$; $V_{SS} = 0V$;
Load Capacitance for Port 0, ALE, and PSEN = 100 pF;
Load Capacitance for All Other Outputs = 80 pF

Symbol	Parameter	12 MHz Oscillator		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
1/TCLCL	Oscillator Frequency			3.5	12.0	MHz
TLHLL	ALE Pulse Width	127		2TCLCL - 40		ns
TAVLL	Address Valid to ALE Low	43		TCLCL - 40		ns
TLLAX	Address Held after ALE Low	48		TCLCL - 35		ns
TLLIV*	ALE Low to Valid Instr In 8751H		183		4TCLCL - 150	ns
	All Others		233		4TCLCL - 100	ns
TLLPL	ALE Low to PSEN Low	58		TCLCL - 25		ns
TPLPH	PSEN Pulse Width					
	8751H	190		3TCLCL - 60		ns
	All Others	215		3TCLCL - 35		ns
TPLIV	PSEN Low to Valid Instr In 8751H		100		3TCLCL - 150	ns
	All Others		125		3TCLCL - 125	ns
TPXIX	Input Instr Hold after PSEN	0		0		ns
TPXIZ	Input Instr Float after PSEN		63		TCLCL - 20	ns
TPXAV	PSEN to Address Valid	75		TCLCL - 8		ns
TAVIV	Address to Valid Instr In 8751H		267		5TCLCL - 150	ns
	All Others		302		5TCLCL - 115	ns
TPLAZ	PSEN Low to Address Float		20		20	ns
TRLRH	RD Pulse Width	400		6TCLCL - 100		ns
TWLWH	WR Pulse Width	400		6TCLCL - 100		ns
TRLDV	RD Low to Valid Data In		252		5TCLCL - 165	ns
TRHDZ	Data Hold after RD	0		0		ns
TRHDZ	Data Float after RD		97		2TCLCL - 70	ns
TLLDV	ALE Low to Valid Data In		517		8TCLCL - 150	ns
TAVIDV	Address to Valid Data In		585		9TCLCL - 165	ns
TLLVL	ALE Low to RD or WR Low	200	300	3TCLCL - 50	3TCLCL + 50	ns
TAVWL	Address to RD or WR Low	203		4TCLCL - 130		ns
TOVWX	Data Valid to WR Transition					
	8751H	13		TCLCL - 70		ns
	All Others	23		TCLCL - 60		ns
TOVWH	Data Valid to WR High	433		7TCLCL - 150		ns
TWHQX	Data Hold after WR	33		TCLCL - 50		ns
TRLAZ	RD Low to Address Float		20		20	ns
TWHLL*	RD or WR High to ALE High					
	8751H	33	133	TCLCL - 50	TCLCL + 50	ns
	All Others	43	123	TCLCL - 40	TCLCL + 40	ns

NOTE:

* This table does not include the 8751-B A.C. characteristics (see next page).

Courtesy of INTEL Corp.

This Table is only for the 8751H-8

A.C. CHARACTERISTICS $T_A = 0^\circ\text{C to } +70^\circ\text{C}$; $V_{CC} = 5V \pm 10\%$; $V_{SS} = 0V$;
Load Capacitance for Port 0, ALE, and PSEN = 100 pF;
Load Capacitance for All Other Outputs = 80 pF

Symbol	Parameter	8 MHz Oscillator		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
1/TCLCL	Oscillator Frequency			3.5	8.0	MHz
TLHLL	ALE Pulse Width	210		2TCLCL - 40		ns
TAVLL	Address Valid to ALE Low	85		TCLCL - 40		ns
TLLAX	Address Hold after ALE Low	90		TCLCL - 35		ns
TLLIV	ALE Low to Valid Instr In		350		4TCLCL - 150	ns
TLLPL	ALE Low to PSEN Low	100		TCLCL - 25		ns
TPLPH	PSEN Pulse Width	315		3TCLCL - 60		ns
TPLIV	PSEN Low to Valid Instr In		225		3TCLCL - 150	ns
TPXIX	Input Instr Hold after PSEN	0		0		ns
TPXIZ	Input Instr Float after PSEN		105		TCLCL - 20	ns
TPXAV	PSEN to Address Valid	117		TCLCL - 8		ns
TAVIV	Address to Valid Instr In		475		5TCLCL - 150	ns
TPLAZ	PSEN Low to Address Float		20		20	ns
TRLRH	RD Pulse Width	650		6TCLCL - 100		ns
TWLWH	WR Pulse Width	650		6TCLCL - 100		ns
TRLDV	RD Low to Valid Data In		460		5TCLCL - 165	ns
TRHDX	Data Hold after RD	0		0		ns
TRHDZ	Data Float after RD		180		2TCLCL - 70	ns
TLLDV	ALE Low to Valid Data In		850		8TCLCL - 150	ns
TAVDV	Address to Valid Data In		960		9TCLCL - 165	ns
TLLWL	ALE Low to RD or WR Low	325	425	3TCLCL - 50	3TCLCL + 50	ns
TAVWL	Address to RD or WR Low	370		4TCLCL - 130		ns
TQVWX	Data Valid to WR Transition	55		TCLCL - 70		ns
TQVWH	Data Valid to WR High	725		7TCLCL - 150		ns
TWHQX	Data Hold after WR	75		TCLCL - 50		ns
TRLAZ	RD Low to Address Float		20		20	ns
TWHLH	RD or WR High to ALE High	75	175	TCLCL - 50	TCLCL + 50	ns

Courtesy of INTEL Corp.

[illegible]

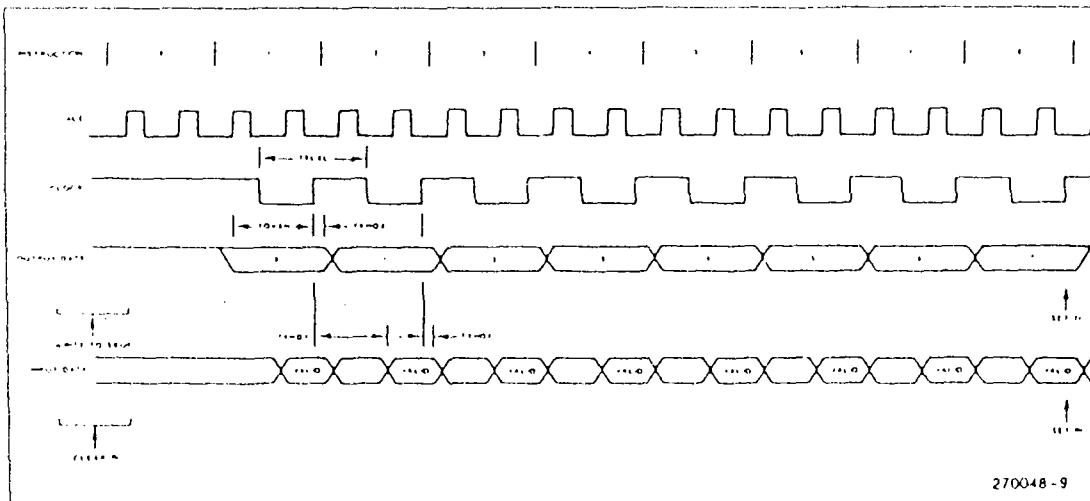
Courtesy of INTEL Corp.

SERIAL PORT TIMING—SHIFT REGISTER MODE

Test Conditions: $T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C ; $V_{CC} = 5\text{V} \pm 10\%$; $V_{SS} = 0\text{V}$; Load Capacitance = 80 pF

Symbol	Parameter	12 MHz Oscillator		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
TXLXL	Serial Port Clock Cycle Time	1.0		12TCLCL		μs
TDVXH	Output Data Setup to Clock Rising Edge	700		10TCLCL - 133		ns
TXHOX	Output Data Hold after Clock Rising Edge	50		2TCLCL - 117		ns
TXHOX	Input Data Hold after Clock Rising Edge	0		0		ns
TXHDV	Clock Rising Edge to Input Data Valid		700		10TCLCL - 133	ns

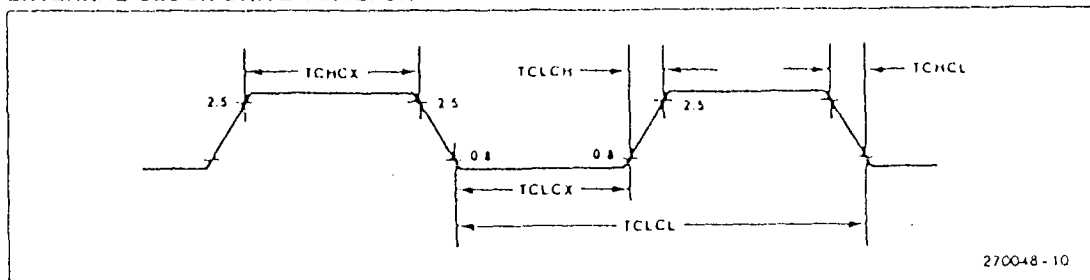
SHIFT REGISTER TIMING WAVEFORMS



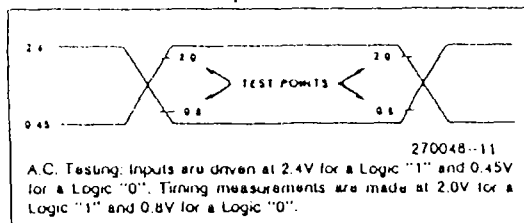
EXTERNAL CLOCK DRIVE

Symbol	Parameter	Min	Max	Units
1/TCLCL	Oscillator Frequency (except 8751H-8)	3.5	12	MHz
		3.5	8	MHz
TCHCX	High Time	20		ns
TCLCX	Low Time	20		ns
TCLCH	Rise Time		20	ns
TCHCL	Fall Time		20	ns

EXTERNAL CLOCK DRIVE WAVEFORM



A.C. TESTING INPUT, OUTPUT WAVEFORM



EPROM Security

The security feature consists of a "locking" bit which when programmed denies electrical access by any external means to the on-chip Program Memory. The bit is programmed as shown in Figure 7. The setup and procedure are the same as for normal EPROM programming, except that P2.6 is held at a logic high. Port 0, Port 1, and pins P2.0-P2.3 may be in any state. The other pins should be held at the "Security" levels indicated in Table 3.

Once the Security Bit has been programmed, it can be cleared only by full erasure of the Program Memory. While it is programmed, the internal Program Memory can not be read out, the device can not be further programmed, and it can not execute out of external program memory. Erasing the EPROM, thus clearing the Security Bit, restores the device's full functionality. It can then be reprogrammed.

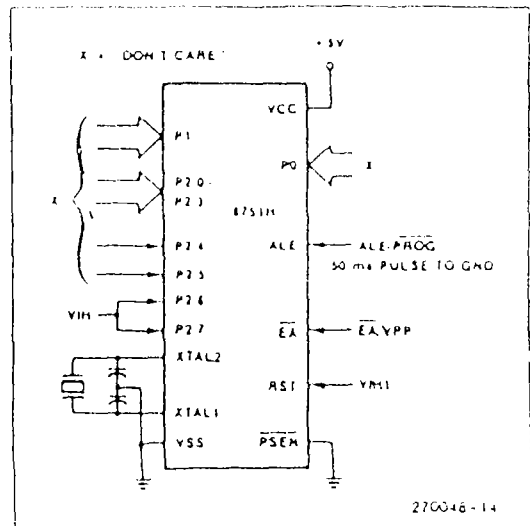


Figure 7. Programming the Security Bit

Erasure Characteristics

Erasure of the EPROM begins to occur when the chip is exposed to light with wavelengths shorter than approximately 4,000 Angstroms. Since sunlight and fluorescent lighting have wavelengths in this range, exposure to these light sources over an extended time (about 1 week in sunlight, or 3 years in room-level fluorescent lighting) could cause inadvertent erasure. If an application subjects the device to this type of exposure, it is suggested that an opaque label be placed over the window.

The recommended erasure procedure is exposure to ultraviolet light (at 2537 Angstroms) to an integrated dose of at least 15 W-sec/cm². Exposing the EPROM to an ultraviolet lamp of 12,000 μ W/cm² rating for 20 to 30 minutes, at a distance of about 1 inch, should be sufficient.

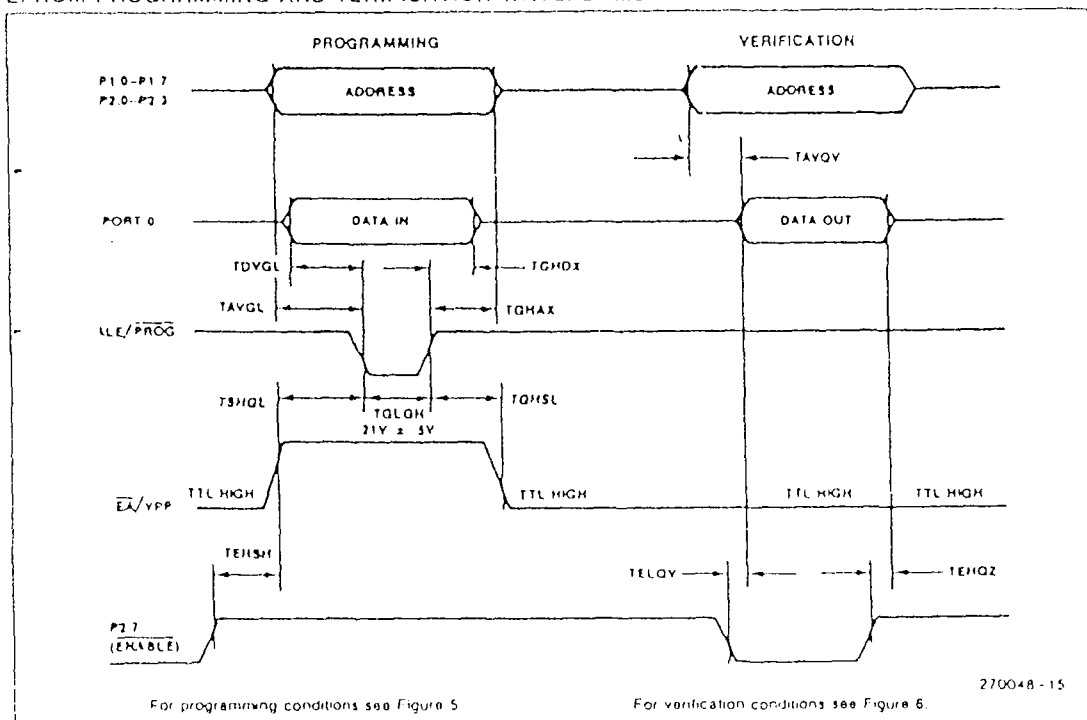
Erasure leaves the array in an all 1s state.

EPROM PROGRAMMING AND VERIFICATION CHARACTERISTICS

T_A = 21°C to 27°C; VCC = 5V $\pm$ 10%; VSS = 0V

Symbol	Parameter	Min	Max	Units
VPP	Programming Supply Voltage	20.5	21.5	V
IPP	Programming Supply Current		30	mA
1/TCLCL	Oscillator Frequency	4	6	MHz
TAVGL	Address Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	48TCLCL		
TGHAX	Address Hold after $\overline{\text{PROG}}$	48TCLCL		
TDVGL	Data Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	48TCLCL		
TGHDX	Data Hold after $\overline{\text{PROG}}$	48TCLCL		
TEHSH	P2.7 ($\overline{\text{ENABLE}}$) High to VPP	48TCLCL		
TSHGL	VPP Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	10		μ s
TGHSL	VPP Hold after $\overline{\text{PROG}}$	10		μ s
TGLGH	$\overline{\text{PROG}}$ Width	45	55	ms
TAVQV	Address to Data Valid		48TCLCL	
TELQV	$\overline{\text{ENABLE}}$ Low to Data Valid		48TCLCL	
TEHQZ	Data Float after $\overline{\text{ENABLE}}$	0	48TCLCL	

EPROM PROGRAMMING AND VERIFICATION WAVEFORMS

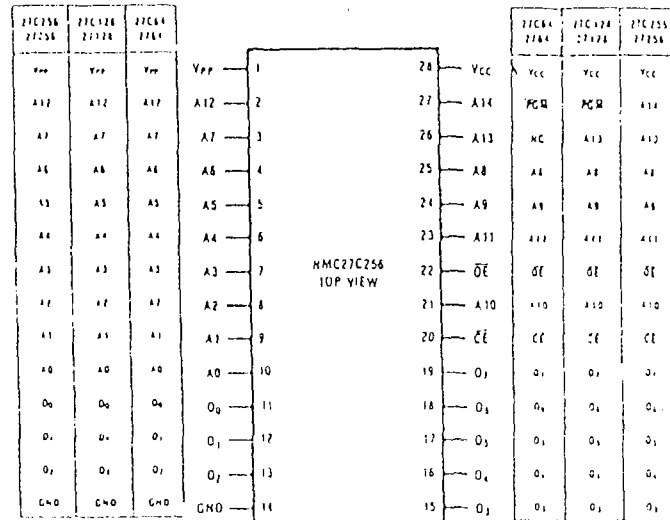


DATA SHEET REVISION SUMMARY

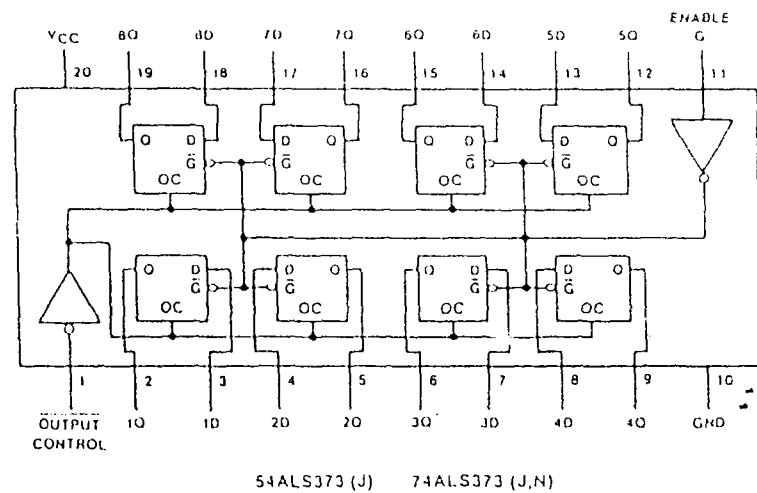
The following are the key differences between this and the -003 version of this data sheet:

1. Introduction was expanded to include product descriptions.
2. Package table was added.
3. Design Considerations added.
4. Test Conditions for I_{IL1} and I_{IH} specifications added to the DC Characteristics.
5. Data Sheet Revision Summary added.

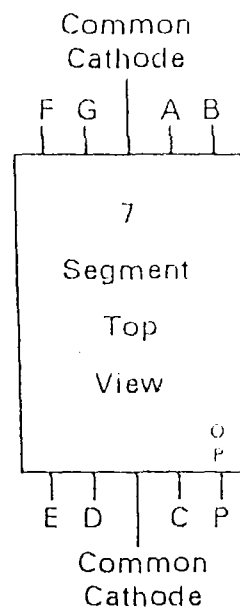
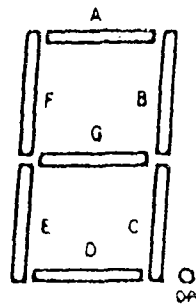
(A) Eprom Pin Configuration



(B) 74LS373 Pin Configuration



(C) Common Cathode 7 Segment Pin Configuration



MC14495-1**CMOS MSI**

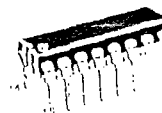
(LOW POWER COMPLEMENTARY MOS)

**HEXADECIMAL-TO-SEVEN
SEGMENT LATCH/DECODER
LED DRIVER**

The MC14495-1 is constructed with CMOS enhancement-mode devices and *NPN* bipolar output drivers in a monolithic structure. The circuit provides the functions of a 4-bit storage latch. The decoder is implemented utilizing a mask-programmable ROM. With a 5-volt power supply, it can be used without resistor interface to drive seven segment LEDs. The series output resistors of, typically, 290 ohms are internal to the device.

Applications include MPU systems display driver, instrument display driver, computer/calculator display driver, clock/display driver, and various clock, watch, and timer uses.

- Low Logic-Circuit Power Dissipation
- High Current Sourcing Outputs with Internal Limiting Resistors
- Latch Storage of Code
- Supply Voltage Range = 4.5 to 18 V
- CMOS Input Switching Levels
- Standard ROM Provides Hex to Seven Segment Decoding
- Other ROM Options Available Upon Request (Contact your Motorola Sales Office)
- Chip Complexity: 102 FETs plus 9 *NPN*s or 49 Equivalent Gates



P SUFFIX
PLASTIC DIP
CASE 648



OW SUFFIX
SOG
CASE 750

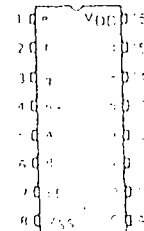
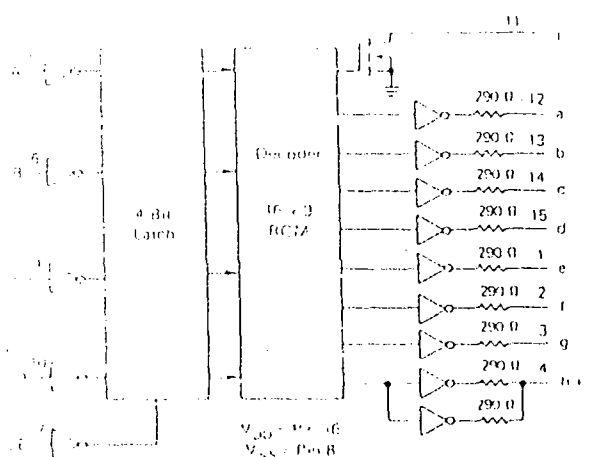
ORDERING INFORMATION

MC14495P1

MC14495OW1

Plastic DIP

SOG Package

Block Diagram**ALPHANUMERIC DISPLAY**

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E F
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

TRUTH TABLE (LE = Low)

INPUTS				OUTPUTS				DISPLAY
D	C	B	A	a	b	c	d	
0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	1	0	1	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	1	0
0	1	1	0	1	0	1	1	1
0	1	1	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	1	1	1	0	1
1	0	1	0	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	1	1	0
1	1	1	0	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	1

MOTOROLA CMOS APPLICATION-SPECIFIC DIGITAL-ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

MC14495-1

MAXIMUM RATINGS (voltages referenced to V_{SS})

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V_{DD}	0.5 to 18	V
Input Voltage—All Inputs	V_{in}	0.5 to $V_{DD} + 0.5$	V
DC Current Drain per Input Pin	I_{in}	10	μA
Operating Temperature Range	T_A	-40 to +85	$^{\circ}C$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^{\circ}C$
Maximum Continuous Output Power (Source) per Output @ 25 $^{\circ}C$ Pins 1, 2, 3, 12, 13, 14, 15 Pin 4	$P_{O(max)}$	50 100	mW

$$P_{O(max)} = I_{OH}(V_{DD} - V_{OH})$$

This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields. However, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For proper operation it is recommended that V_{in} and V_{out} be constrained to the range $V_{SS} - 0.5V$ to $V_{DD} + 0.5V$.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (voltages referenced to V_{SS})

Characteristic	Symbol	V_{DD} V	-40 $^{\circ}C$		25 $^{\circ}C$		85 $^{\circ}C$		Unit
Input Voltage—1 Level	V_{IL}	5	—	1.5	—	2.25	1.5	—	V
$(V_{OL} = 0.4 \text{ or } 0.5 \text{ V})$		10	—	3.0	—	4.50	3.0	—	V
$(V_{OL} = 0.8 \text{ or } 1.0 \text{ V})$		15	—	4.0	—	6.00	4.0	—	V
Input Voltage—1 Level	V_{IH}	5	3.5	—	3.5	2.75	—	3.5	V
$(V_{OL} = 0.5 \text{ or } 0.8 \text{ V})$		10	7.0	—	7.0	5.50	—	7.0	V
$(V_{OL} = 1.0 \text{ or } 8.8 \text{ V})$		15	11.0	—	11.0	8.25	—	11.0	V
Output Voltage— $a = g, h, i$ $V_{in} = V_{DD}$ or 0, $I_{out} = 0 \mu A$	V_{OL}	5	—	0.1	—	0	0.05	—	V
		10	—	0.1	—	0	0.05	—	V
		15	—	0.1	—	0	0.05	—	V
Output Drive Voltage— $a = g, h, i$ $I_{OHL} = 0 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 5 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 10 \text{ mA}$	V_{OHL}	5	4.0	—	4.0	4.8	—	4.0	V
		10	2.45	—	2.4	3.0	—	2.05	V
		15	1.3	—	0.8	1.7	—	—	V
$I_{OHL} = 0 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 5 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 10 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 15 \text{ mA}$		10	9.0	—	9.0	9.8	—	9.0	V
		15	7.4	—	7.2	8.0	—	6.3	V
		15	6.4	—	5.8	6.7	—	5.0	V
		15	5.3	—	4.4	5.3	—	3.5	V
$I_{OHL} = 0 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 5 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 10 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 15 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 20 \text{ mA}$ $I_{OHL} = 25 \text{ mA}$		15	14.0	—	14.0	14.8	—	14.0	V
		15	12.2	—	12.0	13.0	—	11.2	V
		15	10.9	—	10.4	11.7	—	9.8	V
		15	9.7	—	8.8	10.3	—	7.45	V
		15	8.5	—	7.2	8.8	—	5.75	V
		15	7.4	—	5.6	7.1	—	3.0	V
Output Sink Current— $(V_{OL} = 0.4 \text{ V})$ $(V_{OL} = 0.5 \text{ V})$ $(V_{OL} = 1.5 \text{ V})$	I_{OL}	5	—	—	0.3	1.00	—	—	mA
		10	—	—	—	—	—	—	mA
		15	—	—	0.5	1.25	—	—	mA
Input Current (L Device)	I_{in}	15	—	± 0.1	—	± 0.00001	± 0.1	—	μA
Input Current (P Device)	I_{in}	15	—	± 0.3	—	± 0.00001	± 0.3	—	μA
Input Capacitance	C_{in}	—	—	—	—	5.0	7.5	—	pF
Quiescent Current— $V_{in} = 0$ or V_{DD} , $I_{out} = 0 \mu A$ Per Package	I_{DD}	5	—	0.3	—	0.08	0.25	—	μA
		10	—	1.5	—	0.40	1.25	—	μA
		15	—	3.0	—	0.85	2.50	—	μA
Total Supply Current*** Dynamic plus Quiescent Per Package	I_T	5	$I_T = 0.9 \mu A/MHz + 100$				—		
		10	$I_T = 13.8 \mu A/MHz + 100$				—		
		15	$I_T = 15.7 \mu A/MHz + 100$				—		

† To calculate total supply current at loads other than 50 pF, $I_T(C_L = 10 \text{ pF}) + 1.5 \times 10^{-3}(C_L - 50)(V_{DD})$

where I_T is in μA per package, C_L in pF, V_{DD} in V, and f in MHz & input frequency

** The formulas given are for the typical characteristics only at 25 $^{\circ}C$.

†† Data labelled "Typ" is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance

MOTOROLA CMOS APPLICATION-SPECIFIC DIGITAL-ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

Courtesy of MOTOROLA Inc.

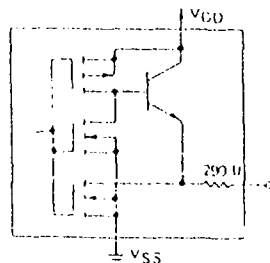
MC14495-1

SWITCHING CHARACTERISTICS (C_L = 50 pF, T_A = 25°C)

Characteristic	Symbol	V _{DD} V	Min	Typ ¹	Max	Unit
Output Rise Time, a-q, h-r Outputs (Figure 11)	t _{PLH}	5 10 15	— — —	210 145 90	450 300 200	ns
Output Fall Time, a-q, h-r Outputs (Figure 11)	t _{PLL}	5 10 15	— — —	1.5 1.3 1.1	3.5 2.25 2.25	μs
Output Fall Time, j Output (Figures 3 and 4)	t _{FLF}	5 10 15	— — —	105 80 30	250 100 75	ns
Propagation Delay Time, A-B, C-D to a-q, h-r Outputs (Figure 2)	t _{PLH}	5 10 15	— — —	935 340 230	2400 900 500	ns
	t _{PLL}	5 10 15	— — —	7.0 3.5 2.0	18.0 5.0 5.0	μs
Propagation Delay Time, A-B, C-D to j Output (Figures 3 and 4)	t _{PLJ}	5 10 15	— — —	11.0 8.0 4.0	25.0 20.0 10.0	μs
	t _{PJL}	5 10 15	— — —	800 400 200	1500 1000 500	ns
Propagation Delay Time, LE to a-q, h-r Outputs (Figure 5)	t _{PLH}	5 10 15	— — —	1300 500 350	3000 1500 1000	ns
	t _{PLJ}	5 10 15	— — —	15.0 6.0 5.0	30.0 15.0 10.0	μs
Propagation Delay Time, LE to j Output (Figures 4 and 6)	t _{PLJ}	5 10 15	— — —	14.0 8.0 6.0	30 20 15	μs
	t _{PJL}	5 10 15	— — —	10.0 5.0 4.0	25 15 10	μs
Setup Time, A, B, C, D to LE (Figure 7)	t _{su}	5 10 15	100 65 65	35 25 25	—	ns
Hold Time, LE to A, B, C, D (Figure 7)	t _h	5 10 15	125 75 75	45 30 25	—	ns
Excess Bias Pulse Width, LE (Figure 7)	t _{ex}	5 10 15	525 200 140	240 80 75	—	ns

¹Typical value. Typ. is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance.

OUTPUT CIRCUIT
(See Pin 11)



MOTOROLA CMOS APPLICATION-SPECIFIC DIGITAL-ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

Courtesy of MOTOROLA Inc

INPUT/OUTPUT FUNCTIONS

SEGMENT DRIVER (a, b, c, d, e, f, g, h + i, PINS 12, 13, 14, 15, 1, 2, 3, 4)

The segment drivers are emitter-follower *NPN* transistors. To limit the output current, a resistor, typically 290 ohms, is integrated internally at each output. Therefore, external resistors are not necessary when driving an LED at the supply voltage of $V_{DD} = 5.0$ volts.

OUTPUT (j; PIN 11)

This open drain output is activated (goes low) whenever inputs A, B, C, and D are all set to a logic one. Otherwise the output is in the high impedance state. See the truth table.

INPUT DATA (A, B, C, D; PINS 5, 6, 9, 10)

The inputs A, B, C, and D are fed to a 4-bit latch which is controlled by the Latch Enable input.

LATCH ENABLE (LE; PIN 7)

The data on inputs A, B, C and D will pass through the latch and will be decoded immediately when LE is low. In this mode of operation the circuit is performing the function of a conventional decoder/driver. The data may be loaded into the latch when LE = low and will be latched with the rising edge of LE. The data will remain stored as long as LE is high.

SWITCHING WAVEFORMS

Figure 1

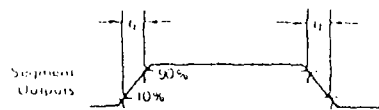


Figure 3

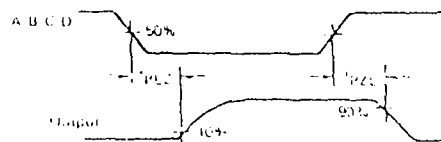


Figure 4

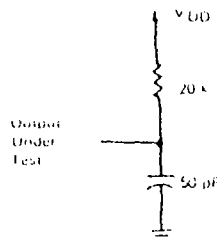


Figure 2

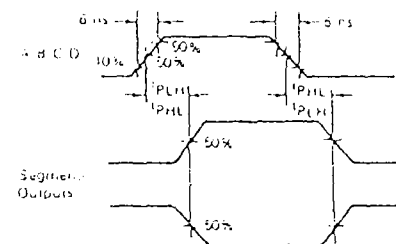
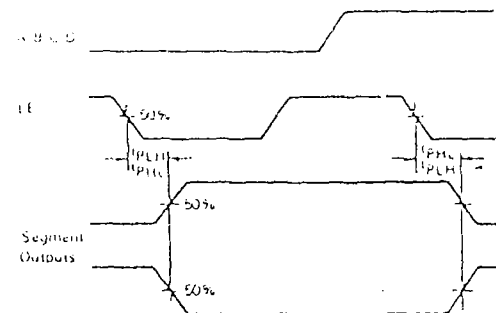


Figure 5



MC14495-1

SWITCHING WAVEFORMS

Figure 6

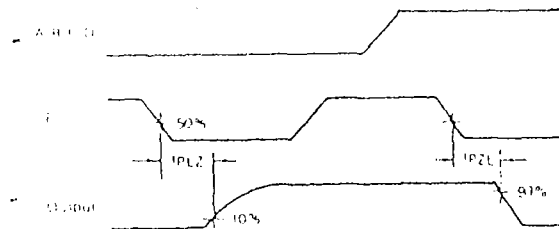
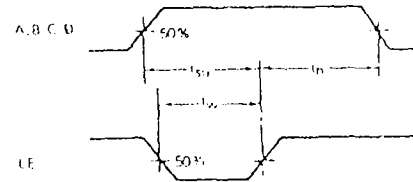
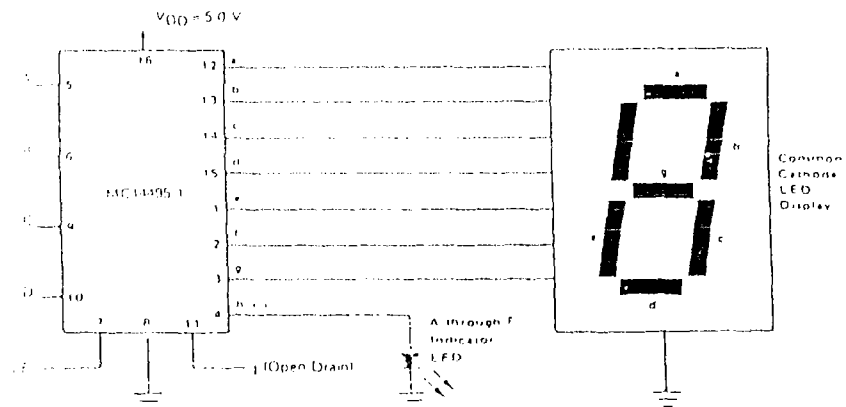


Figure 7



TYPICAL CIRCUIT @ $V_{DD} = 5.0\text{ V}$

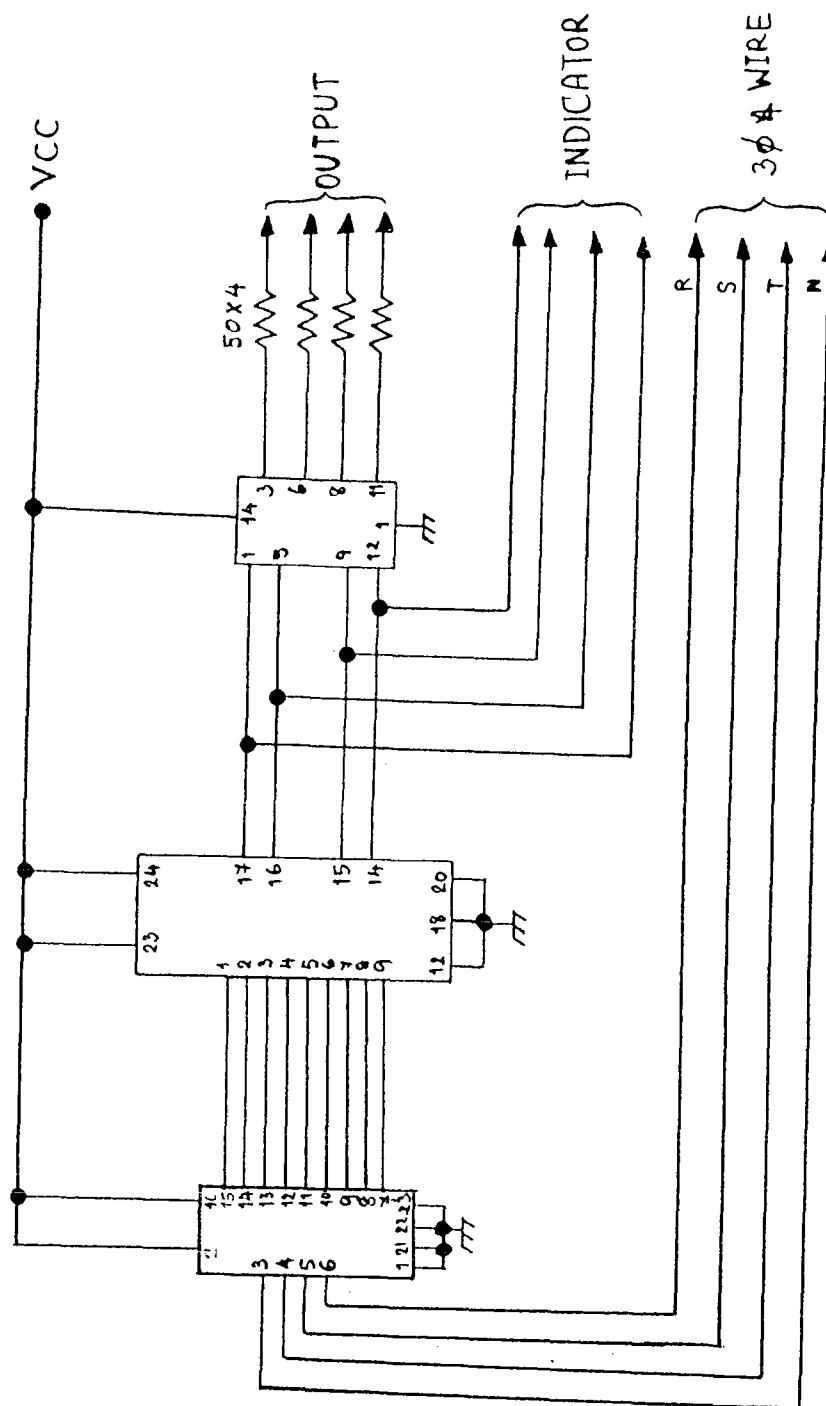


MOTOROLA CMOS APPLICATION-SPECIFIC DIGITAL-ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

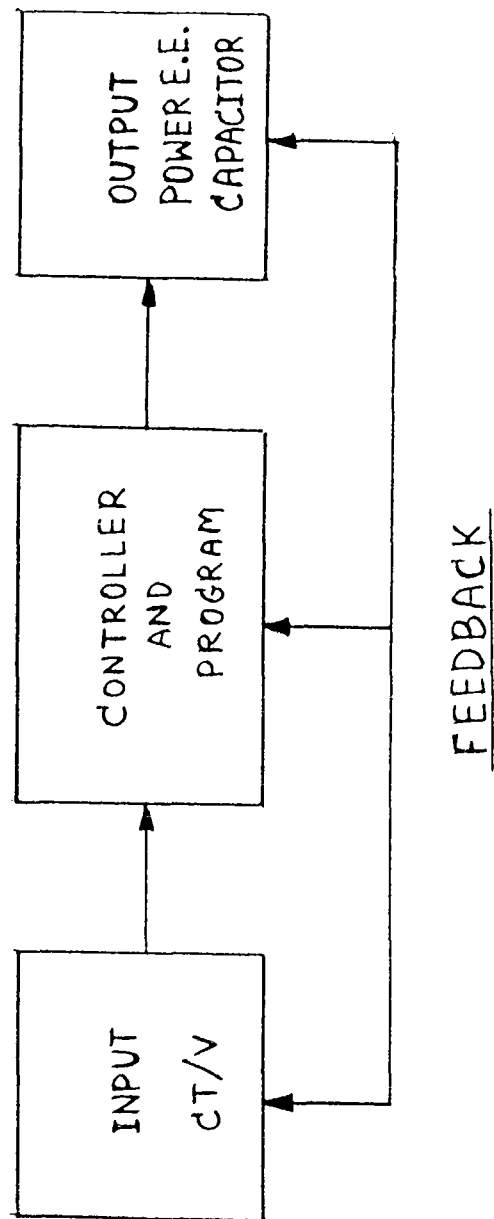
Courtesy of MOTOROLA Inc

ภาคผนวก ค.

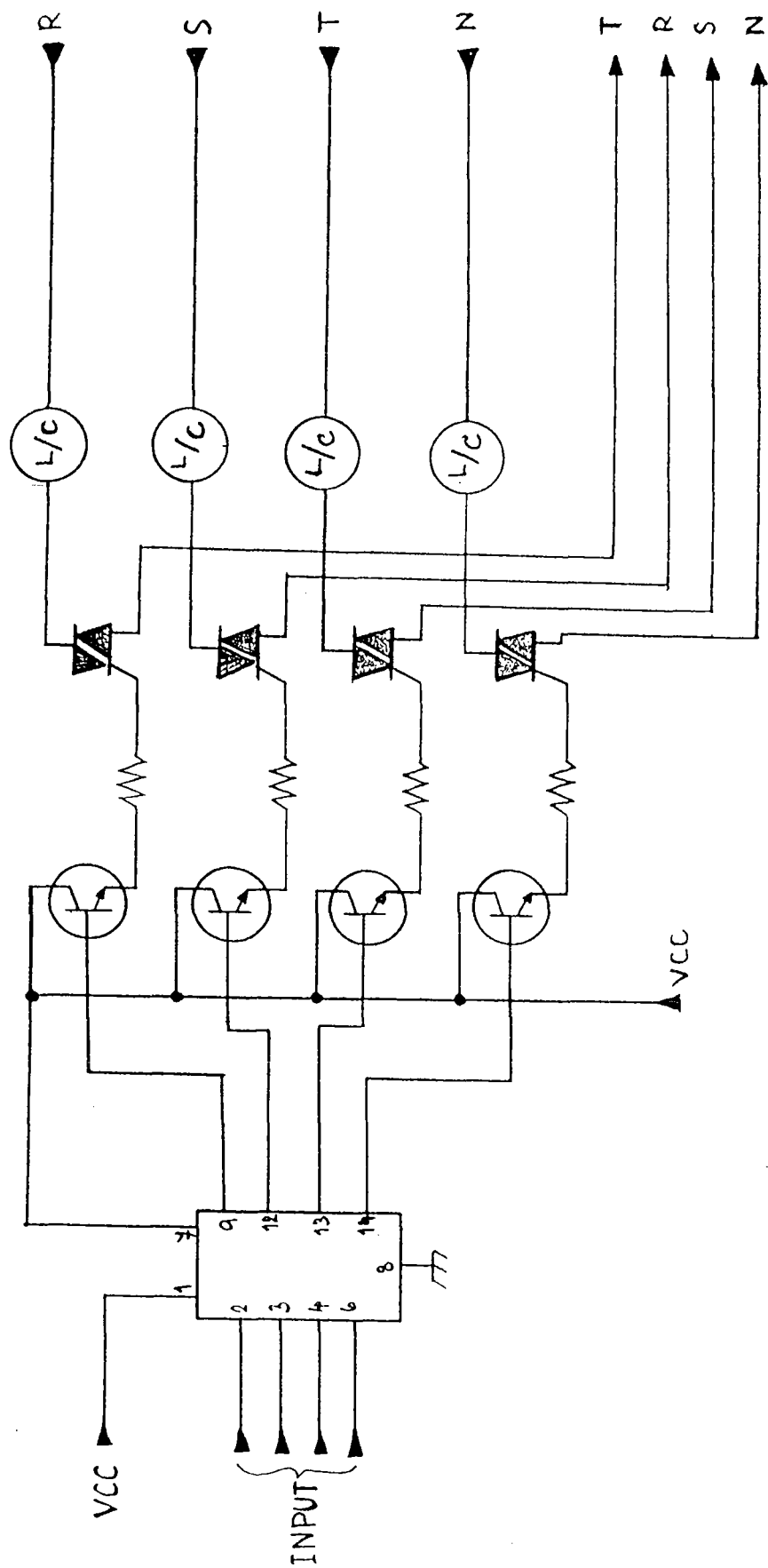
ภาพประกอบการออกแบบและสร้าง



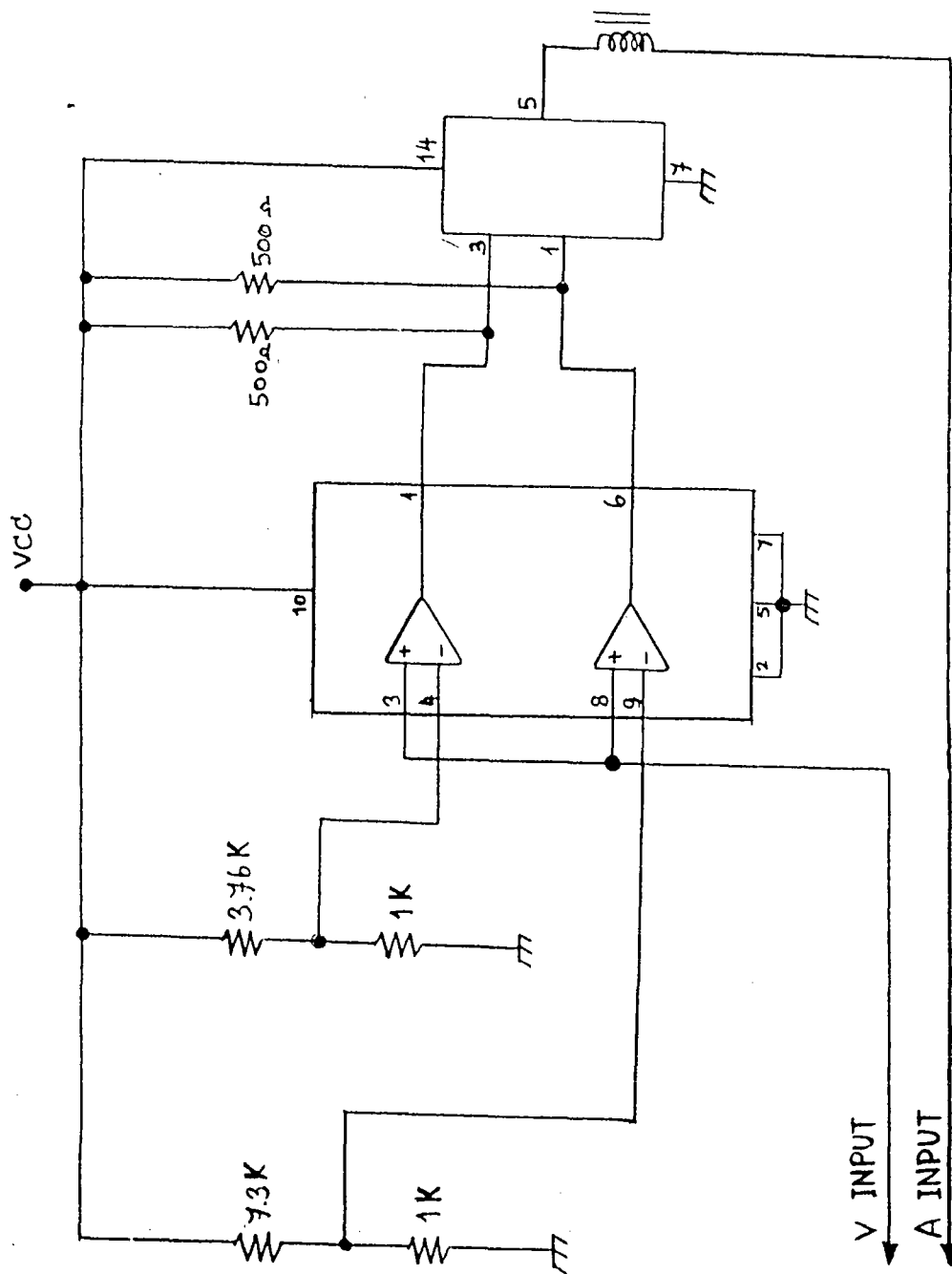
ภาพประกอบ 55 CONTROLLER AND PROGRAM



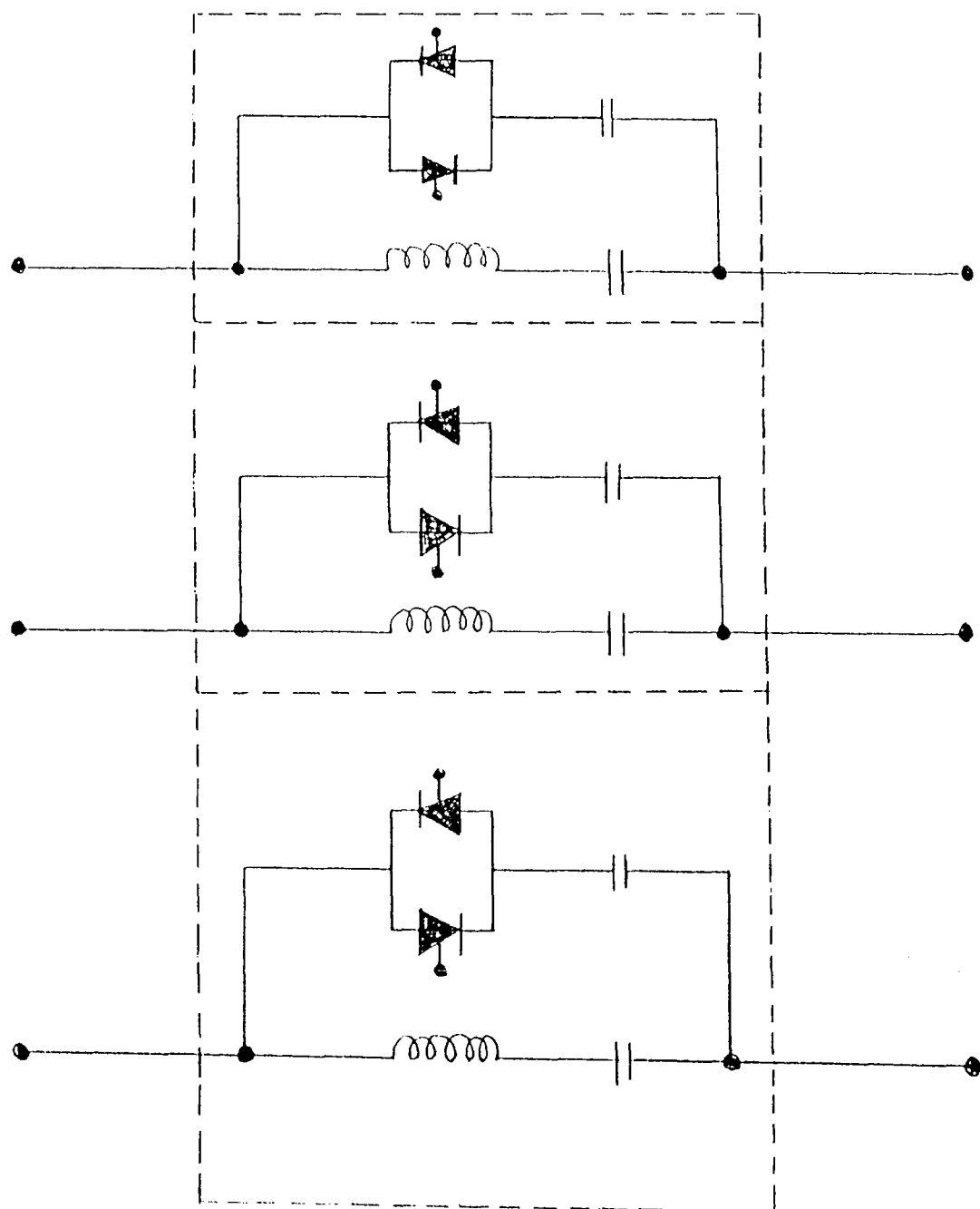
ภาพประกอบ 56 BLOCK DIRAGRAM



ภาพประกอบ 57 OUTPUT



ภาพประกอบ 58 INPUT



ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายบรรเทิง ศรีโสภณ
วัน เดือน ปีเกิด	18 เดือน สิงหาคม พุทธศักราช 2496
สถานที่เกิด	2 หมู่ 6 อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	80/6 หมู่ 1 ติวานนท์ 18 ตลาดขวัญ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
ตำแหน่งหน้าที่	ช่างระดับ 7
สถานที่ทำงาน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางกรวย อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2513	มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนมัธยมฐานบินกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2516	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ ช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคนครปฐม (โรงเรียนการช่าง) จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2537	ประกาศนียบัตรครูเทคนิคชั้นสูง (ปทส) แผนกช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พ.ศ. 2543	ปริญญาการศึกษาศึกษามหาบัณฑิต (กศ.ม.) สาขา อุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด

บทคัดย่อ

ของ

บรรเทิง ศรีโสภณ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา

พฤษภาคม 2543

ความมุ่งหมายของการวิจัยนี้เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด การดำเนินการวิจัย ออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด โดยรับรู้ปัญหาของการใช้กระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะใช้กระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ศึกษารายละเอียดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด โดยการศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการประหยัดพลังงาน ทำการออกแบบวงจรในส่วนต่าง ๆ ของการสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด อุปกรณ์วัสดุและเครื่องมือในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด ผู้วิจัยได้เลือกซื้ออุปกรณ์ที่มีขายในประเทศไทย

การวิจัยนี้พบว่า โหลดขดลวดความต้านทานใน ตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ เมื่อใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้า โดยวิธีบาลานซ์โหลด มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 225.1243 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยการใช้กำลังไฟฟ้า 85547.2268 กิโลวัตต์ เมื่อไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 236.5613 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยการใช้กำลังไฟฟ้า 89893.2967 กิโลวัตต์ เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าจากการใช้โหลดขดลวดความต้านทานในตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 9 kW. 380 Volt จำนวน 10 ตู้ ใช้ในระยะเวลา 7 วัน จากการใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด และไม่ใช้เครื่องลดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีบาลานซ์โหลด มีค่าลดลงโดยเฉลี่ย 11.4376 แอมแปร์ คิดเป็นอัตราส่วนลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 5.0815 เมื่อเปรียบเทียบผลต่างทางสถิติ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF ELECTRIC CURRENT REDUCE DEVICE
BY LOAD BALANCE METHOD

AN ABSTRACT
BY
BANTHOENG SRISOPON

Presented in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Education degree in Industrial Education
at Srinakharinwirot University
May 2000

This study was experimental research of method to design and construction of electric current reduce device by Load balance method. The purposes of this study were to : 1) Design and construction of electric current reduce device by Load balance method and, 2) Determine the competence of electric current reduce device by Load balance method.

The Instrumental used of study were electric current reduce by Load balance method which conducted by researcher, and the 10 of load Heaters in Hot air oven : 9 kilowatt, 380 Volt. An experiment of this study were operated for gathering data in 7 days under 6 hrs./day.

The statistical treatment of data were the use of both descriptive and Inferential statistics, Such as the Mean ($\bar{X}$) and Standard Deviation (S.D.) to describe the level of electric curreneces, electric power in the Periodically of used on 10 of load heaters in Hot air oven 9 kilowatt. 380 volt. The t-test also testing the different between electric current of used and non-used the electric current reduce device by Load balance method

The finding indicated that :

1. There were averages of electric current 225.1243 Amp., and electirc power 85547.2268 watts of the 10 of load heaters in Hot air oven 9 kilowatt 380 volt with controled by electric current reduce device by Load balance method.
2. There were averages of electric current at 236.5613 Amp., and electric power 89893.2967 watts of the 10 of Load heaters in Hot air oven 9 kilowatt 380 Volt without controlled by electric current reduce device by Load balance method.
3. The electric current of the 10 of load heaters in Hot air oven 9 kilowatt 380 volt with controlled by electric current reduce device by Load balance method, less than the electric current of the 10 of load heaters in Hot air oven 9 kilowatt 380 volt. without controlled by electric current reduce device by Load balance method, in average of electric current 11.4370 Amp. or reduced 5.0815 Percentage.
4. There was significant defferent between the electric current used of the 10 of load heaters in Hot air oven 9 kilowatt 380 volt. with controlled, and without controlled by the electric current reduce device by Load balance method at .01 level