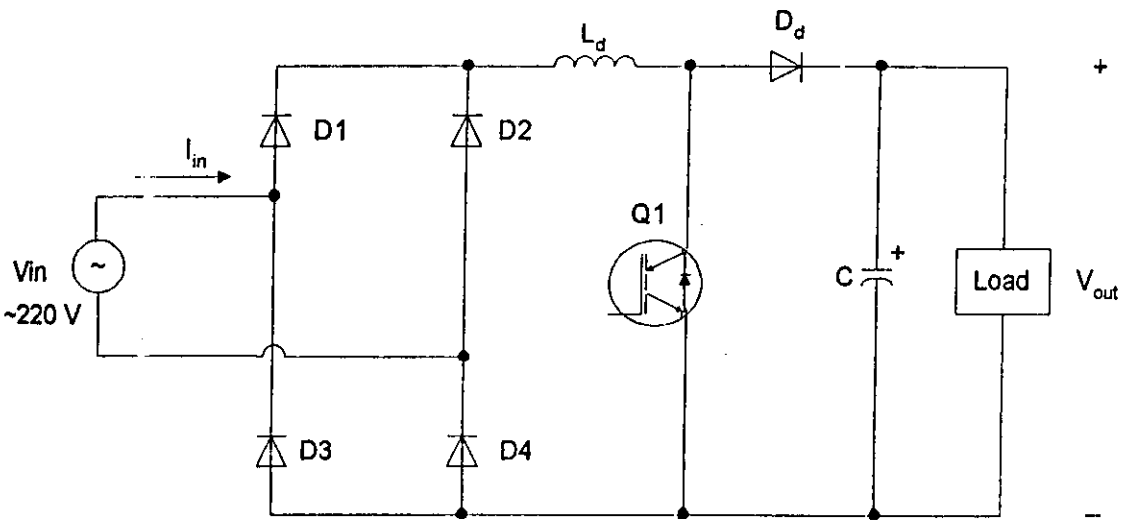
บทที่ 3
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
(AC to DC Converter)

วงจรเรียงกระแสที่ใช้กันในแหล่งจ่ายไฟต่อเนื่องนั้นมักเป็นวงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bride Rectifier) โดยใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดันด้านออก ทั้งเนื่องด้วยวงจรชนิดนี้มีข้อดีคือ ค่าของแรงดันริปเปิ้ลมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังมีข้อเสียในเรื่องค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าของวงจรมีค่าประมาณ 0.5 – 0.7 ทำให้เกิดความสูญเสียของกำลังทางด้านเข้ามาก จึงได้แนวคิดที่ต้องทำการปรับปรุงค่าของตัวประกอบกำลังด้านเข้าให้มีค่าใกล้เคียง 1



ภาพประกอบ 3.1 วงจรเรียงกระแสชนิดทบระดับแรงดันที่มีค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าใกล้เคียง 1

ในวงจรเรียงกระแสปกติทั่ว ๆ ไป จะรับกำลังด้านเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และผ่านวงจรกรองกระแสซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุประเภทอิเล็กทรอไลต์ที่มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งขบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์สะสมพลังงาน จึงส่งผลให้เกิดการลดทอนของรูปคลื่นกระแสทางด้านเข้าก่อให้เกิดฮาร์มอนิกจำนวนมาก ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้ามีค่าต่ำ ดังนั้นกระแสด้านเข้าจึงมีรูปร่างเป็นพัลส์แคบๆ การลดค่าฮาร์มอนิกของกระแสด้านเข้าและ

การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าในการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์และสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายนั้นมีผลทำให้ค่าความสูญเสียทางด้านเข้ามีค่าลดลง การคุมค่าแรงดันแบบสวิตชิ่งเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นและลดฮาร์มอนิกของกระแสด้านเข้า โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีการที่นิยมคือการใช้วงจรเรียงกระแสชนิดทบระดับแรงดัน (boost regulator) ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.1 แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อเสีย คือ

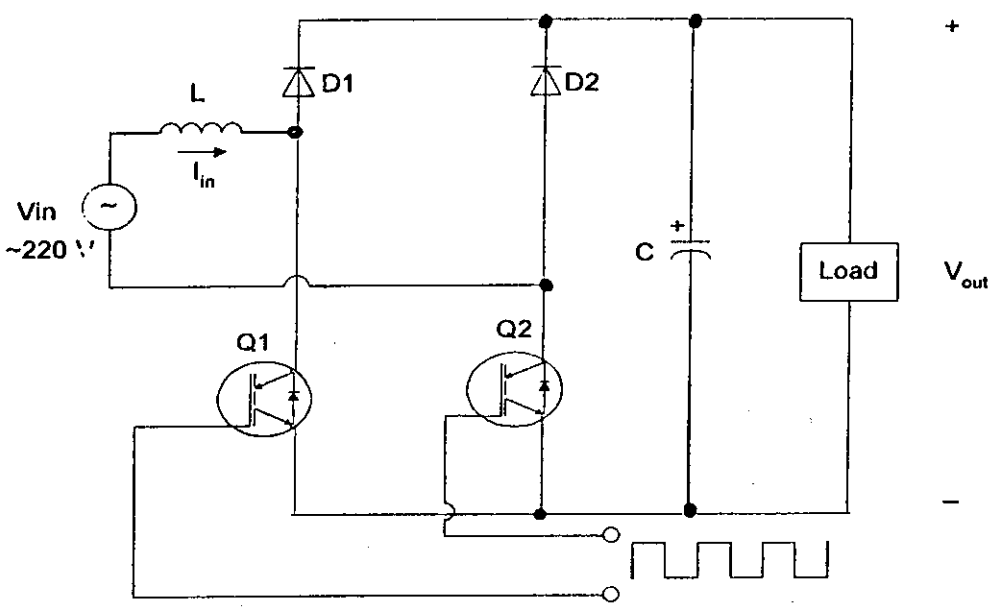
1. ต้องใช้ความถี่ในการสวิตช์ที่สูงมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในขณะสวิตช์สูงและวงจรมีประสิทธิภาพต่ำ

2. ไดโอด D_d ที่ต่ออนุกรมอยู่ในทิศทางการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมไดโอด D_d ทำให้เกิดกำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้นและเป็นการลดความหน้าเชื่อถือของวงจรลง

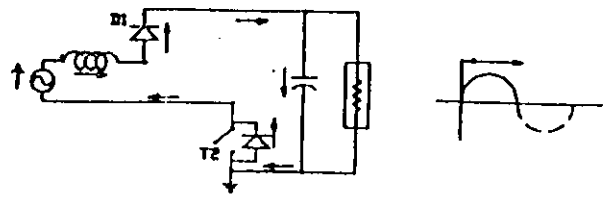
3. จะต้องออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_d เป็นพิเศษเพื่อที่จะให้ตัวเหนี่ยวนำสามารถนำกระแสตรงได้ดีเหมือนกับกระแสสลับที่ความถี่สูง

4. ที่ช่วงเวลาใด ๆ ทิศทางการส่งผ่านพลังงานจะต้องผ่านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ 3 ตัว

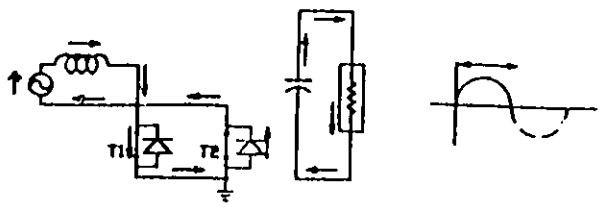
จากผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบเพื่อให้วงจรมีค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าใกล้เคียง 1 และลดฮาร์มอนิกของกระแสด้านเข้าดังภาพประกอบ 3.2 [23]



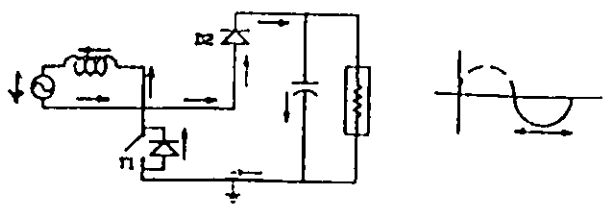
ภาพประกอบ 3.2 วงจรเรียงกระแสชนิดทบระดับแรงดันที่ได้ทำการปรับปรุงจากภาพประกอบ 3.1



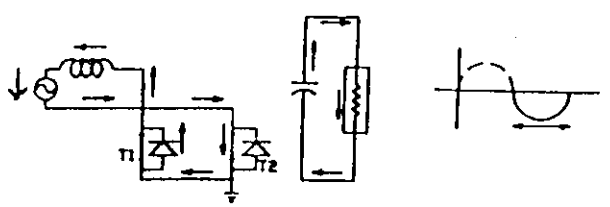
ก) mode ที่ 1



ข) mode ที่ 2



ค) mode ที่ 3



ง) mode ที่ 4

ภาพประกอบ 3.3 แสดงวงจรการทำงานในแต่ละโหมด [23]

จากภาพประกอบ 3.3 สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกเป็น 4 โหมดคือ

โหมดที่ 1 เป็นช่วงครึ่งไซเคิลบวกของแรงดันด้านเข้า เมื่อสวิตช์ทั้งสองตัว (S_1 และ S_2) ยังไม่นำกระแสอยู่นั้น กระแสจากทางด้านเข้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด D_1 , ตัวเก็บประจุ , โหลด และไหลกลับมาผ่านทางไดโอด D_3 ซึ่งในโหมดนี้โหลดจะได้รับพลังงานจากทางด้านเข้าโดยตรง

โหมดที่ 2 ก็ยังคงอยู่ในช่วงไซเคิลบวกแต่สวิตช์ทั้งสองนำกระแส ทำให้กระแสไม่ไหลผ่านโหลดคือจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ , สวิตช์ S_1, S_2 โดยที่ไม่ไปจ่ายกำลังให้แก่โหลดเลย ซึ่งในช่วงนี้เองตัวเก็บประจุที่ได้รับการประจุในช่วงโหมดที่ 1 จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลดเอง

โหมดที่ 3 เป็นช่วงครึ่งไซเคิลลบของแรงดันด้านเข้า เมื่อสวิตช์ทั้งสองหยุดนำกระแสอยู่นั้นทิศทางของกระแสไหลผ่านไดโอด D_2 , ตัวเก็บประจุ , โหลดและไหลผ่านไดโอด D_3 แล้วจึงไหลกลับเข้าสู่ตัวเหนี่ยวนำ

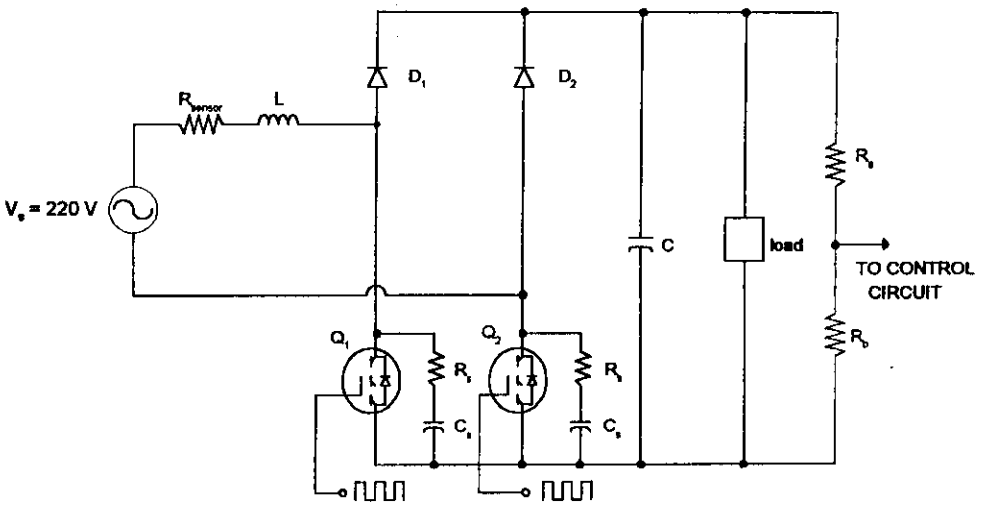
โหมดที่ 4 มีลักษณะที่คล้ายกับในโหมดที่ 2 คือตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสให้โหลด แต่มีค่าของแรงดันด้านเข้าอยู่ในครึ่งไซเคิลลบ

จากการทำงานทั้ง 4 โหมด นั้นพบว่าในโหมด ที่ 1 ,3 และโหมดที่ 2 , 4 มีการทำงานที่คล้ายกันต่างกันในช่วงการทำงานในแต่ละครึ่งของไซเคิล [23]

นอกจากการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าให้มีค่าใกล้เคียง 1 แล้วนั้น สังเกตได้ว่าค่าของกระแสที่ใช้สำหรับการไบอัสสวิตช์ S_1 และ S_2 นั้นมีค่าต่ำ รวมทั้งการเกิดของ EMI นั้นมีค่าลดลงเนื่องจากมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่ลดการเกิดของ EMI และในส่วนของวงจรควบคุมสวิตช์ S_1 และ S_2 นั้นใช้เพียงชุดเดียวก็ได้แล้ว

โครงงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่ต้องการสร้างแหล่งจ่ายไฟต่อเนื่องที่มีค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.9 ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรที่ได้รับการปรับปรุงที่ได้กล่าวในข้างต้นนี้,

3.1 วงจรกำลัง (Power Circuit)



ภาพประกอบ 3.4 วงจรเรียงกระแสชนิดทบระดับแรงดันที่ได้ทำการออกแบบ

อธิบายการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวในวงจรได้ดังนี้

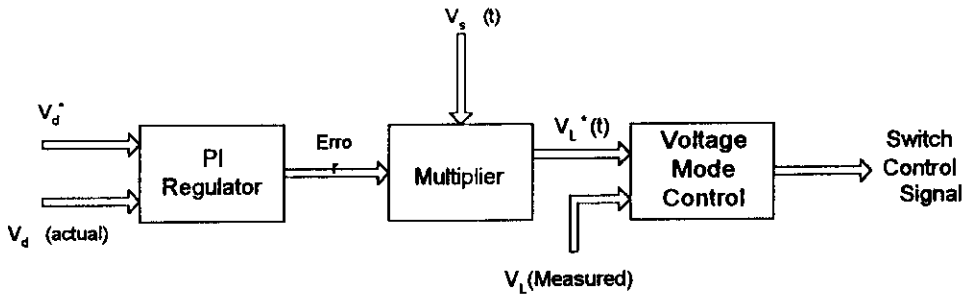
- IGBT Q_1 และ Q_2 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตชิง เพื่อให้การทำงานของวงจรมาอยู่ในสวิตช์โหมด ซึ่งจะช่วยทำให้วงจรมีตัวประกอบกำลังทางด้านเข้าสูงใกล้เคียง 1
- ไดโอด D_1 และ D_2 ทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแส โดยไดโอดทั้งสองตัวจะสลับกันทำงานในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันด้านเข้า
- ตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่เป็นตัวทบระดับแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น และช่วยให้กระแสด้านเข้ามีลักษณะต่อเนื่อง
- ตัวเก็บประจุ C ทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดันทางด้านออกให้มีลักษณะเป็นแรงดันกระแสตรงที่มีแรงดันกระเพื่อมน้อยที่สุด
- R_s และ C_s ทำหน้าที่เป็นวงจรสนับเบอร์ เพื่อป้องกัน IGBT ในขณะทำการสวิตชิง

- R_{sensor} ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับกระแสด้านเข้า เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ที่ได้จากวงจรคูณสัญญาณ

3.2 วงจรควบคุม IGBT

จุดประสงค์ในการควบคุมการทำงานของ IGBT ทั้งสองเพื่อที่จะทำให้วงจรเรียงกระแสชนิดทบระดับแรงดันสามารถทบระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 โวลต์ 50 Hz เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 โวลต์ และสามารถคุมค่าแรงดันทางด้านออกให้มีค่า 400 โวลต์ตลอดเวลา ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันทางด้านอินพุทอยู่ในช่วง ± 10% หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าของโหลดตั้งแต่ไม่มีโหลดจนกระทั่งโหลดเต็มพิกัด

วงจรควบคุม IGBT สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพประกอบ 3.5



ภาพประกอบ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุม IGBT

จากภาพประกอบ 3.5 เป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุม IGBT ซึ่งวงจรควบคุม IGBT จะประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ

1. ส่วนของวงจรคุมค่าแบบพีไอ (PI Regulator) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าระหว่าง V_{actual} กับ V_i ซึ่งจะได้แรงดันออกเป็นค่าความคลาดเคลื่อน(Error) ซึ่งมีลักษณะคล้ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอยู่ตลอดเวลา

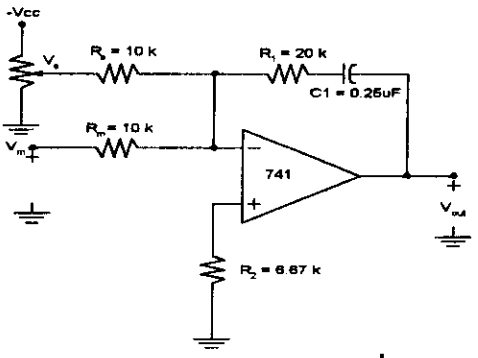
2. ส่วนของวงจรคูณ (Multiplier Circuit) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เอาค่าความคลาดเคลื่อนจากวงจรคุมค่าแรงดันแบบพีไอไปคูณกับสัญญาณไซน์ที่สร้างขึ้นจากการลดทอนแรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้าผ่านวงจรค่าสัมบูรณ์ซึ่งจะได้แรงดันด้านออกเป็นสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยในโครงงานนี้เลือกใช้วงจรคูณสัญญาณแบบอนาล็อก (Analog Multipliers)

3. ส่วนของ Current Mode Control เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรคอมพาราเตอร์ที่มีฮีสเตอร์ริซิส ซึ่งจะเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณด้านออกของวงจรคูณกับสัญญาณที่ได้จากแรงดันตกคร่อม R_{sensor} ผ่านวงจรแยกโดด ซึ่งขยายสัญญาณรวมอยู่ด้วยก็จะได้สัญญาณออกเป็นสัญญาณพัลส์ไปควบคุม IGBT ต่อไป

3.3 วงจรคุมค่าแบบพีไอ

วงจรคุมค่าแรงดัน (Regulator) ทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าจริงที่วัดกับค่าที่ตั้งไว้เพื่อให้แรงดันด้านออกที่เรียกว่า แรงดันคลาดเคลื่อน (Error Voltage) นอกจากนี้วงจรคุมค่ายังมีหน้าที่ทำให้ระบบควบคุมป้อนกลับมีเสถียรภาพอีกด้วย วงจรคุมค่าชนิดที่เป็นมาตรฐานทางอุตสาหกรรม ได้แก่วงจรพีไอ (Proportional-Integrator) และวงจรพีไอดี (Proportional-Integrator-Differentiator) องค์ประกอบหลักของวงจรคุมค่า ได้แก่ ออปแอมป์ ซึ่งอัตราขยายขึ้นอยู่กับวงจรป้อนกลับของออปแอมป์

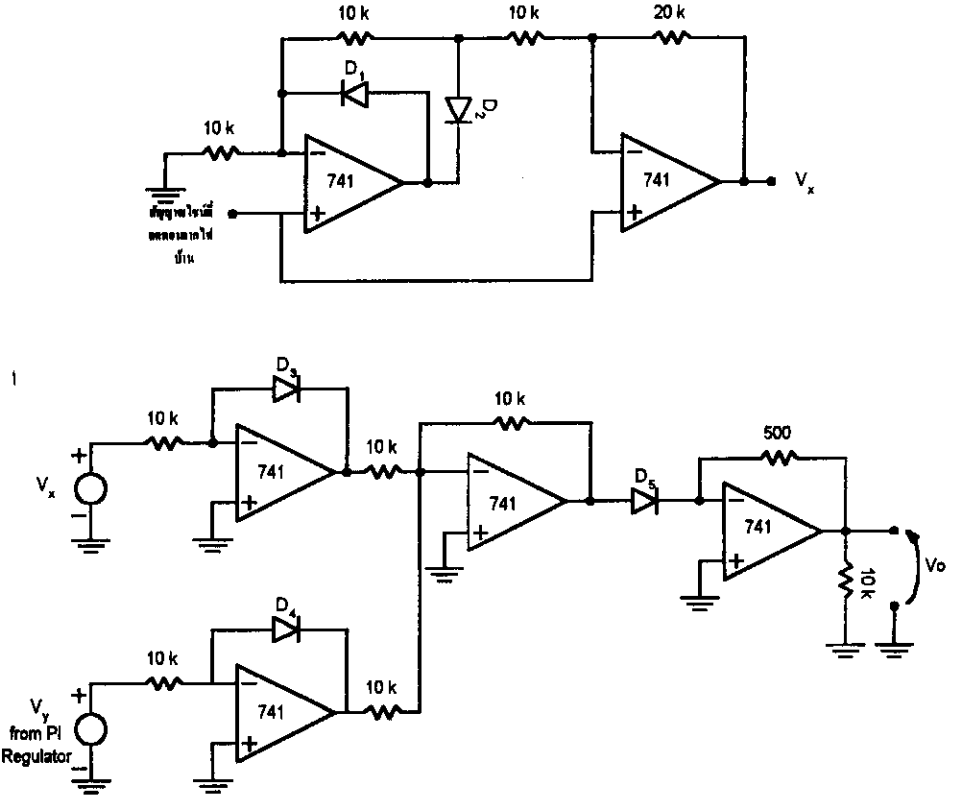
โดยทั่วไปเราสามารถปรับอัตราขยายของออปแอมป์ได้ โดยการปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ที่มีในวงจรป้อนกลับของออปแอมป์ เราปรับอัตราขยายเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับระบบที่กำลังมีการคุมค่าอยู่ อย่างไรก็ดี เมื่อปรับแล้วอัตราขยายก็จะคุมค่าที่ปรับนั้นไว้ แต่ถ้าจุดทำงานของระบบเปลี่ยนไป ค่าที่ปรับไว้ย่อมไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดอีกต่อไป ในหลายกรณีก็ไม่เป็นปัญหานัก แต่ในกรณีที่จุดทำงานของระบบ มีพิกัดที่จะเปลี่ยนแปลงได้อย่างกว้างขวาง ที่จุดทำงานบางจุด การหน่วงของระบบอาจไม่เพียงพอ หรือแม้กระทั่งอาจจะเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพ ในกรณีเช่นนี้ เราอาจใช้วงจรคุมค่าแบบปรับตัวได้ (Adaptive) ซึ่งอัตราขยายของวงจรคุมค่าเป็นฟังก์ชันของแรงดันควบคุม และแรงดันนี้ขึ้นอยู่กับจุดทำงานของระบบ



ภาพประกอบ 3.6 แสดงวงจรคุมค่าแบบพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบ

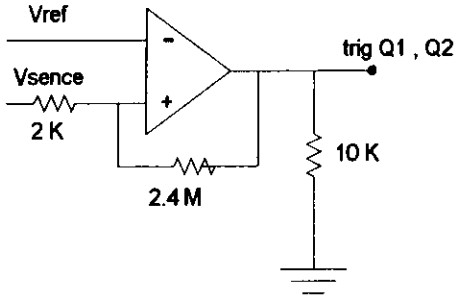
3.4 วงจรคูณแบบอนาล็อก (Analog Multipliers)

วงจรคูณแบบอนาล็อก (Analog Multiplier) เป็นการนำสัญญาณอินพุทสองตัวที่จะคูณกันไปเข้าวงจรลอกการิทึม (Logarithmic Amplifier) และนำเอาสัญญาณเอาท์พุททั้งสองมารวมกันโดยผ่านวงจรรวม (Summing Amplifier) จากนั้นจึงนำเอาสัญญาณเอาท์พุทของวงจรรวมไปผ่านวงจรแอนตี้ลอกการิทึม(Analogarithmic Amplifier) ก็จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นผลคูณ สามารถออกแบบวงจรได้เป็นวงจรดังแสดงในภาพประกอบ3.7



ภาพประกอบ 3.7 วงจรคูณสัญญาณ

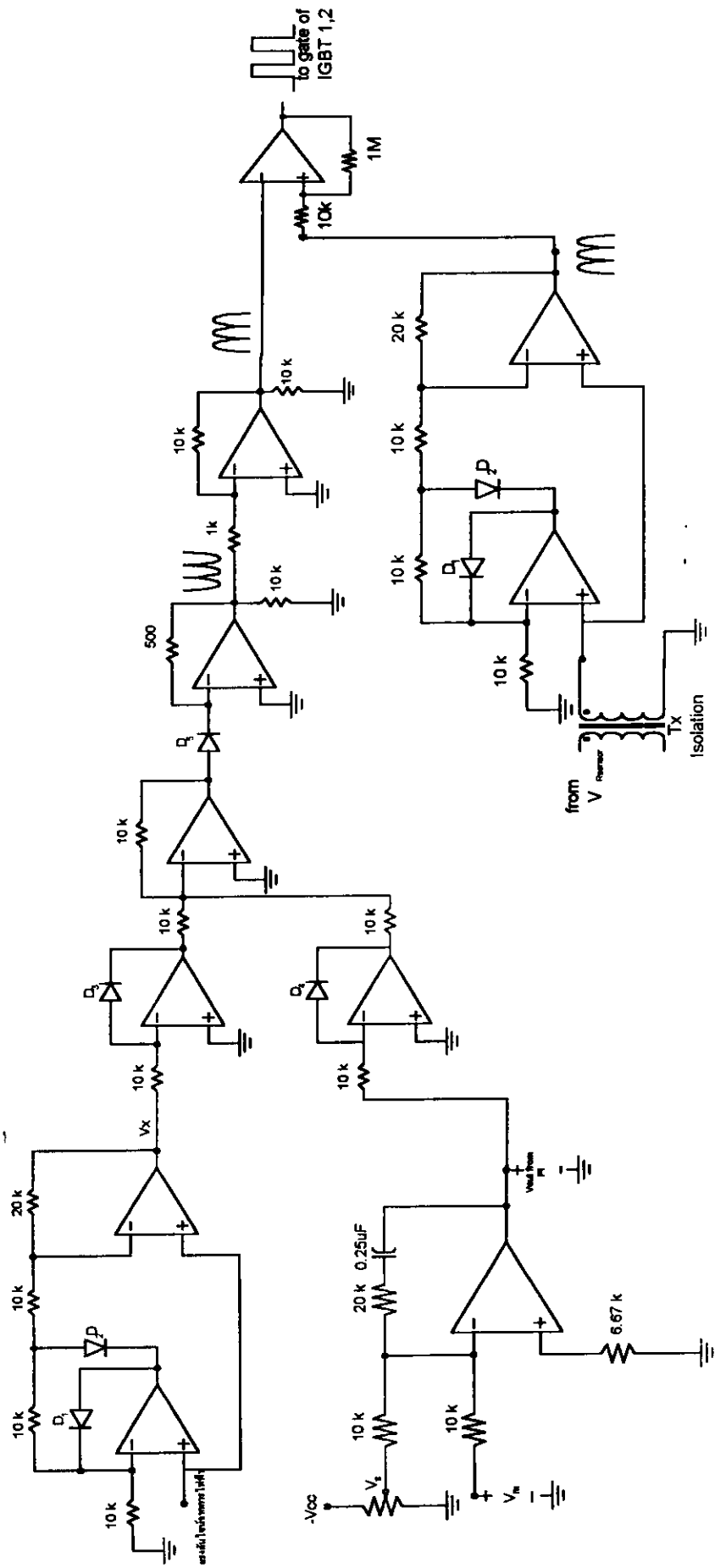
3.5 วงจรคอมพาราเตอร์ที่มีฮีสเตอร์รีซิสแบบไม่กลับขั้ว



ภาพประกอบ 3.8 วงจรคอมพาราเตอร์ที่มีฮีสเตอร์รีซิสแบบไม่กลับขั้ว

จากวงจรในภาพประกอบ 3.8 ตัวต้านทานที่ใช้ป้อนกลับแบบบวกต่ออยู่ระหว่างขาเอาท์พุทและขาอินพุทบวก ทำให้วงจรนี้มีคุณสมบัติเป็นฮีสเตอร์รีซีสป้อนสัญญาณอินพุท E_i ให้โดยต่อผ่านทาง R เข้าที่ขาบวก และแรงดันเปรียบเทียบป้อนให้ที่อินพุทขาลบที่ออปแอมป์

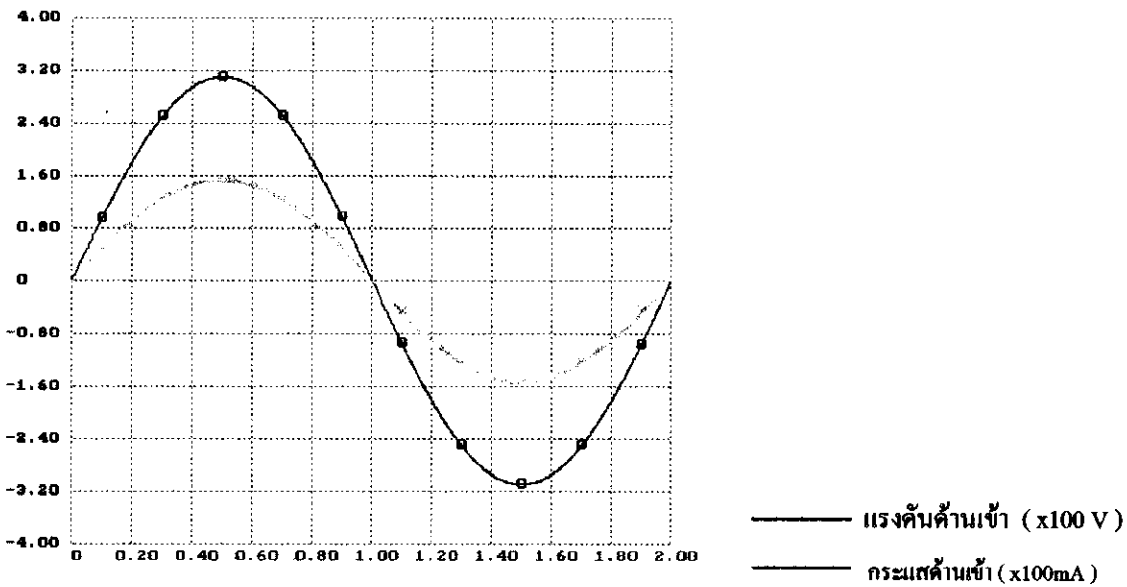
วงจรควบคุมที่ใช้ในการควบคุมวงจรเรียงกระแสชนิดทบระดับแรงดันนั้น ได้มีการทำการออกแบบวงจรควบคุม แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.9



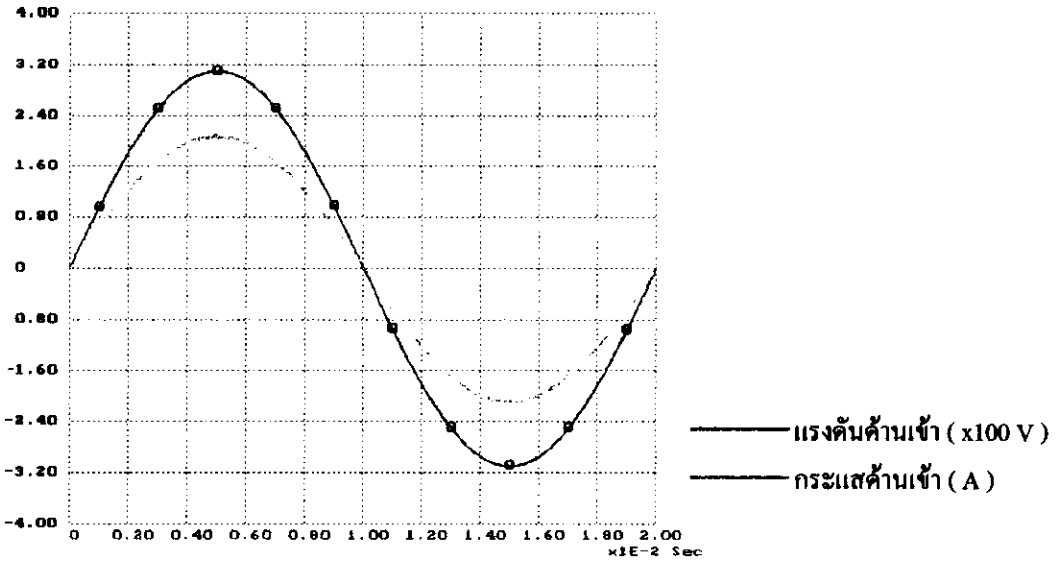
ภาพประกอบ 3.9 วงจรควบคุมวงจรเรียงกระแสซินโครนัสระดับแรงดัน

3.6 การจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกม Tlek

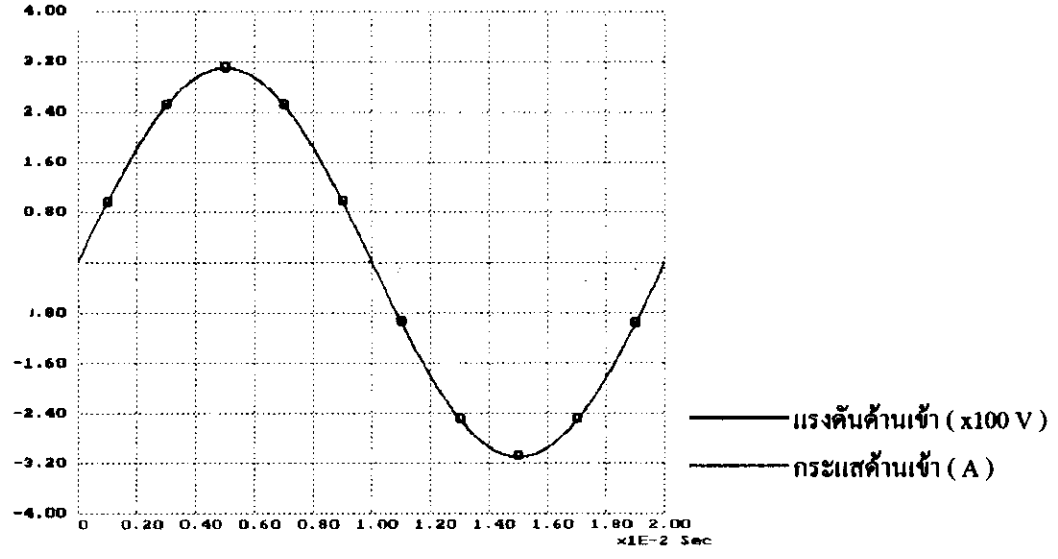
เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของวงจร ออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บ จะใช้การจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Tlek ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้า จากการจำลองการทำงานในสภาวะโหลดค่าต่างๆแสดงในภาพประกอบ 3.10 ถึง 3.12 จะเห็นได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้



ภาพประกอบ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสด้านเข้าเมื่อจ่ายโหลด 5 เปอร์เซ็นต์ (จำลองด้วยโปรแกรม Tlek)



ภาพประกอบ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสด้านเข้าเมื่อจ่ายโหลด 50 เปอร์เซ็นต์ (จำลองด้วยโปรแกรม Tlek)



ภาพประกอบ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสด้านเข้าเมื่อจ่ายโหลด 100 เปอร์เซ็นต์ (จำลองด้วยโปรแกรม Tlek)