บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การออกแบบแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

1) ผลการออกแบบ แบบจำลองแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทดสอบผลการวัด บันทึกและแสดงผล สามารถนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปแสดงเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการทำงาน อย่างถูกต้องและสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบจากการวัดค่าจากไพรานอมิเตอร์ที่ มีการส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ ใช้ NI-USB 6008 เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายข้อมูลจากไพรานอมิเตอร์ โดยจะมีการขยายแรงดันจากไพรานอมิเตอร์เพื่อให้ NI-USB 6008 รับค่าได้ ฮาร์ดแวร์ในส่วนของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้านั้น จากการทดสอบทำให้พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นความคลาดเคลื่อนจะมีแนวโน้มลดลง ค่าที่เชื่อถือได้ของแรงดันไฟฟ้านั้นจะอยู่ตั้งแต่ช่วง 3 มิลลิโวลต์ขึ้นไป ส่วนค่าความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์จะอยู่ช่วง 200 W/m^2 ขึ้นไป ส่วนของการออกแบบซอฟต์แวร์ โปรแกรมที่ออกแบบสามารถทำงานได้แบบตามเวลาจริง พร้อมทั้งแสดงผลการทำงานด้วยเว็บไซต์และบันทึกข้อมูลลงฮาร์ดดิสก์ได้ เพื่อตอบสนองแก่ผู้ที่ต้องการใช้ข้อมูลแบบกำหนดค่าเวลาในการเก็บข้อมูล โดยจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ .TDMS ซึ่งสามารถเปิดได้ด้วย Microsoft Excel ต่อเมื่อติดตั้ง TDM Excel Add-In แล้วเท่านั้น

2) ผลการออกแบบ แบบจำลองแหล่งพลังงานกังหันลม สรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมโหลดคงที่ จากการทดสอบสรรถนะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วลมต่ำประมาณ 4 m/s สามารถให้แรงดันไฟฟ้า 30 V และจ่ายกำลังไฟฟ้า 20 W ให้กับโหลดขนาด 900 W ที่ความเร็วลม 12 m/s สามารถให้แรงดันไฟฟ้า 95.5 V และจ่ายกำลังไฟฟ้า 105 W ให้กับโหลด จะเห็นว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังงานและจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น

2. การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดความเร็วลมคงที่ ที่พิกัด 14 m/s 750 rpm จากการทดสอบที่สภาวะ No Load ได้แรงดัน 161 V กระแส 0.4 A เมื่อปรับโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าพิกัดจะสังเกตเห็นว่า แรงดันจะลดลงเหลือ 156 V กระแส 3.2 A จะเห็นว่าเมื่อป้อนโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้นโหลดจะดึงกระแสและทำให้แรงดันไฟฟ้ารวมถึงความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง

5.1.2 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

ในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับนั้น แรงดันด้านออก (V_{dc}) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับ และมีอัตราการกระเพื่อมของแรงดันด้านออก (ΔV) น้อยกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับ นอกจากนั้นอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับยังสามารถรับแรงดันได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมน้อยนั่นเอง

1) ข้อดีของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

5.2.1 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสไม่เกิน 5%

5.2.2 ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

5.2.3 ความถี่ในการสวิตซ์คงที่เพราะเป็นการมอดูเลชั่นแบบพีดับบลิวเอ็ม (PWM)

5.2.4 ทำให้สามารถนำไปใช้ในพิกัดแรงดันที่สูงขึ้นได้เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลง

5.2.5 ทำให้ระบบกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2) ข้อบกพร่องของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

5.3.1 วงจรต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2 เท่าเมื่อเทียบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับ

5.3.2 ระบบควบคุมค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับมาก

5.3.3 หากนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์จะมีต้นทุนในการผลิตสูง

5.1.3 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

สรุปการจำลองและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการรับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยทำการยกระดับแรงดันด้วยวงจรทบระดับแรงดันโดยมีการตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับเพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลทำการประมวลผล และสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เพื่อไปควบคุมสวิตซ์ของวงจรทบระดับแรงดันให้คงที่ และใช้วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ

1) ผลของการทดสอบที่สภาวะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรคงที่

จากการทดสอบสภาวะแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างโดยรับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและทำการยกระดับแรงดันด้วยวงจรทบระดับโดยมีการตรวจจับแรงดันด้านออกด้วยเซนเซอร์เพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เพื่อไปควบคุมสวิตช์การทำงานของวงจรทบระดับให้มีแรงดันตามที่ออกแบบไว้คือ 110 Vdc และทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นด้วยวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ ไอซี TL494 สร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์ Mosfet ให้มีแรงดันด้านออกของวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ 600 Vdc

2) ผลการทดสอบที่สภาวะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อทดสอบการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรทบระดับแรงดันโดยทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่าแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับแรงดันที่มีการควบคุมนั้นยังคงรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้อยู่ช่วง 110 Vdc ตรงตามที่ออกแบบไว้ได้

5.1.4 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการทดสอบระบบด้วยคำสั่งที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดสอบดีและจากผลการวิเคราะห์ทำให้เราทราบถึงปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้แรงดันนิวทรัลเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย ขนาดของกระแสโหลด ดัชนีการมอดูเลตและตัวประกอบกำลังของโหลด โดยที่ถ้าตัวประกอบกำลังยิ่งมาก จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันนิวทรัลที่เร็วขึ้น ไม่ขึ้นกับชนิดว่าเป็นแบบล้าหลังหรือนำหน้า สำหรับวิธีการชดเชยค่าแรงดันนิวทรัล เพื่อแก้ปัญหาความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสโหลดในขณะที่มีการเปลี่ยนโหมดการทำงาน สำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการทำงานแบบพีดับเบิลยูเอ็มย่านเชิงเส้น จะมีข้อดีในการควบคุมและสามารถกรองความถี่ให้เหลือเฉพาะความถี่หลักมูลได้ง่าย แต่ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลจะปรับค่าได้ไม่มาก

5.1.5 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

การจำลองการทำงานจะกำหนดให้แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้มาจากกังหันลม และมีแรงดันสม่ำเสมอ ซึ่งการจำลองการทำงานจะมีแรงดันด้านเข้า 380 โวลต์ 3 เฟส 3 สาย 50 เฮิรตซ์ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับใช้ความถี่สวิตซ์ที่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ตัวเก็บประจุ 4,700 ไมโครฟารัด โหลดร้อยละ 50, 100 มีค่า 0.5 กิโลวัตต์ และ 1 กิโลวัตต์ตามลำดับ

จากการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับจะแบ่งการทำงานเป็นสองส่วนหลักๆคือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์สร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ ผลที่ได้คือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น ถึงแม้จะมีการเพิ่มและลดโหลดแต่ระบบควบคุมก็สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยรูปคลื่นของแรงดันเพิ่มขึ้นและรูปคลื่นกระแสก็มีสัญญาณรบกวนน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปคลื่นทางด้านเข้า ดังนั้นการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับนี้ได้ผลค่อนข้างดีซึ่งสามารถนำไปพัฒนาออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนอื่นต่อไป

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.2.1 การออกแบบแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

1) ผลการออกแบบ แบบจำลองแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์

ปัญหาในการวัดคือ เมื่อมีการขยายแรงดันขึ้นจากระดับมิลลิโวลต์เป็นโวลต์ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้าจากไพรานอมิเตอร์นั้นมีค่าน้อย หากเกิดความไม่เสถียรของแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้สูง ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยใช้ไพรานอมิเตอร์หรืออุปกรณ์ Data Acquisition ชนิดที่สามารถรับแรงดันในระดับเดียวกันได้

ส่วนการแสดงผลบนหน้าเว็บนั้น หากหน้าโปรแกรมที่ออกแบบมีขนาดใหญ่จะไม่สามารถแสดงให้เห็นได้ทั้งหมดในหน้าเว็บ ในบางครั้งการเรียกดูยังมีปัญหาในการติดต่อกับ Server อีกทั้งสามารถทำให้แสดงผลได้เพียงภายในวงเน็ตเวิร์คเดียวกันเท่านั้น หากต้องการแสดงผลการทำงานผ่านอินเทอร์เน็ตจำเป็นต้องใช้โปรแกรมออกแบบของ NI ซึ่งยังไม่สามารถหามาใช้ศึกษาได้

2) ผลการออกแบบ แบบจำลองแหล่งพลังงานกังหันลม

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและผลการจำลองการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีลักษณะเป็นเชิงเส้น มากกว่าผลที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากผลที่ได้จากการจำลองใช้ความเร็วลมอินพุตที่ไม่สม่ำเสมอ แต่การทดสอบในห้องปฏิบัติการใช้อินพุตคงที่ ซึ่งค่าเฉลี่ยโดยรวมอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ในการจ่ายโหลดทั้งสองแบบมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อจ่ายโหลดมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าตกและความเร็วรอบลดลง

5.2.2 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

5.2.2.1 ในการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน

5.2.2.2 การพัฒนาวงจรควบคุมเพื่อให้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

5.2.2.3 สามารถนำไปพัฒนาเป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับได้ (back-to-back three-level converter)

5.2.3 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

5.2.3.1 ไม่ควรออกแบบให้วงจรทบระดับ และวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ทำการยกระดับแรงที่สูงขึ้นมากเกินไปเพราะอาจทำให้สวิตช์ของวงจรทบระดับและพุช-พูลเกิดความเสียหายได้

5.2.3.2 ควรมีการตรวจจับกระแสเพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลหยุดการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากกระแสเกิน

5.2.3.3 ควรเพิ่มวงจรทอนระดับแรงดันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรักษาระดับแรงดันให้ดีขึ้น

5.2.4 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

1) ปัญหาและอุปสรรค์

1.1) การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มออกมาจาก DSP นั้นต้องใช้เวลาศึกษาและการสร้างที่นานเนื่องจากการไม่เข้าใจหลักการและทฤษฎีอย่างถ่องแท้

1.2) เมื่อทำการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มได้แล้วยังมีปัญหาที่วงจรขับเกตของ SKHI 22Bเนื่องจากสัญญาณที่ออกมาน้อยเกิดไปวงจรขับเกตไม่ทำงาน

1.3) เมื่อทำการสร้างวงจรบับเฟอร์แล้วลองจ่ายสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเข้าวงจรขับเกตแล้ววัดสัญญาณที่ออกจากวงจรขับเกต บางครั้งสัญญาณออกมาไม่ชัดเจนซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างมากซึ้งถ้าหากสัญญาณออกมาไม่ถูกต้อง ก็ไม่สามารถขับวงจรภาคกำลังได้ ถ้าหากขับวงจรภาคกำลังหากเกิดความผิดพร่องก็จะทำให้ลัดวงจรได้

2) ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

2.1) ควรศึกษาการหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และทดสอบการทำงานสวิตช์ใน โปรแกรม Matlab & Simulink ให้ลึกซึ้ง เพื่อการนำมาประยุกต์ใช้งานที่กว้างขึ้นและรวดเร็ว

2.2) แหล่งจ่ายไฟตรงซึ่งใช้ตัวเก็บประจุ 2 ตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อสร้างแรงดัน 3 ระดับนั้น มีส่วนเกี่ยวข้องกับวิธีการปรับความกว้างพัลส์ที่นำเสนอ ดังนั้น จึงควรที่จะมีการพิจารณาถึงผลของขนาดตัวเก็บประจุและพิจารณาในเรื่องของ Voltage Balance ด้วย

2.3) เนื่องจากการออกแบบและการสร้างอินเวอร์เตอร์มีข้อบกพร่องอยู่หากมีการพัฒนาควรจะคำนึงถึงขนาดอินเวอร์เตอร์ด้วยจะเป็นสิ่งที่ดี ออกแบบให้มีความเร็วในการทำงานและมีเสถียรภาพมากขึ้น วงจรอินเวอร์เตอร์ควรออกแบบให้ใช้กับแรงดันและกระแสได้สูงขึ้นอีก

2.4) ในวงจรขับเกต SKHI 22B ของ Semikron ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ แต่ที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ก็เพราะได้ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานอย่างดีแล้วว่าสร้างสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับได้ แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่คือ วงจรขับเกตในหนึ่งตัวสามรถขับไอจีบีทีได้สองตัวก็จริง แต่ไม่สามารถควบคุมให้ทำงานในลักษณะที่อิสระต่อกันได้

2.5) การใช้ TLP 250 แยกกราวด์ในวงจรขับเกต จะทำให้การควบคุมง่ายขึ้น

2.6) เพื่อการลดผลของสัญญาณรบกวน ที่อาจเกิดขึ้นกับตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิตอล ควรออกแบบวงจรให้มีการต่อโยงสายไฟให้น้อยที่สุดและเพื่อความสะดวกต่อการซ่อมแซมรวมทั้งเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบ

2.7) เนื่องจาก DSP เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง 5 โวลต์ และมีราคาแพง เพื่อความปลอดภัยเมื่อนำไปต่อใช้งานจริงควรมีวงจรป้องกัน (buffer) ด้วย

5.2.5 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันบริเวณ DC-Link มีลักษณะไม่เรียบหรือไม่เป็นเส้นตรงเท่าที่ควร ซึ่งอาจจะมีสาเหตุจากการที่ระดับแรงดันบริเวณตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 มีค่าไม่เท่ากัน อีกสาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับมีการสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ที่ยังอาจมีข้อบกพร่องอยู่ นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสที่ด้านออกจะมีสัญญาณรบกวนอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากวงจรกรองที่จะต้องคำนวณอย่างละเอียด และหาค่าที่เหมาะสมกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับนี้