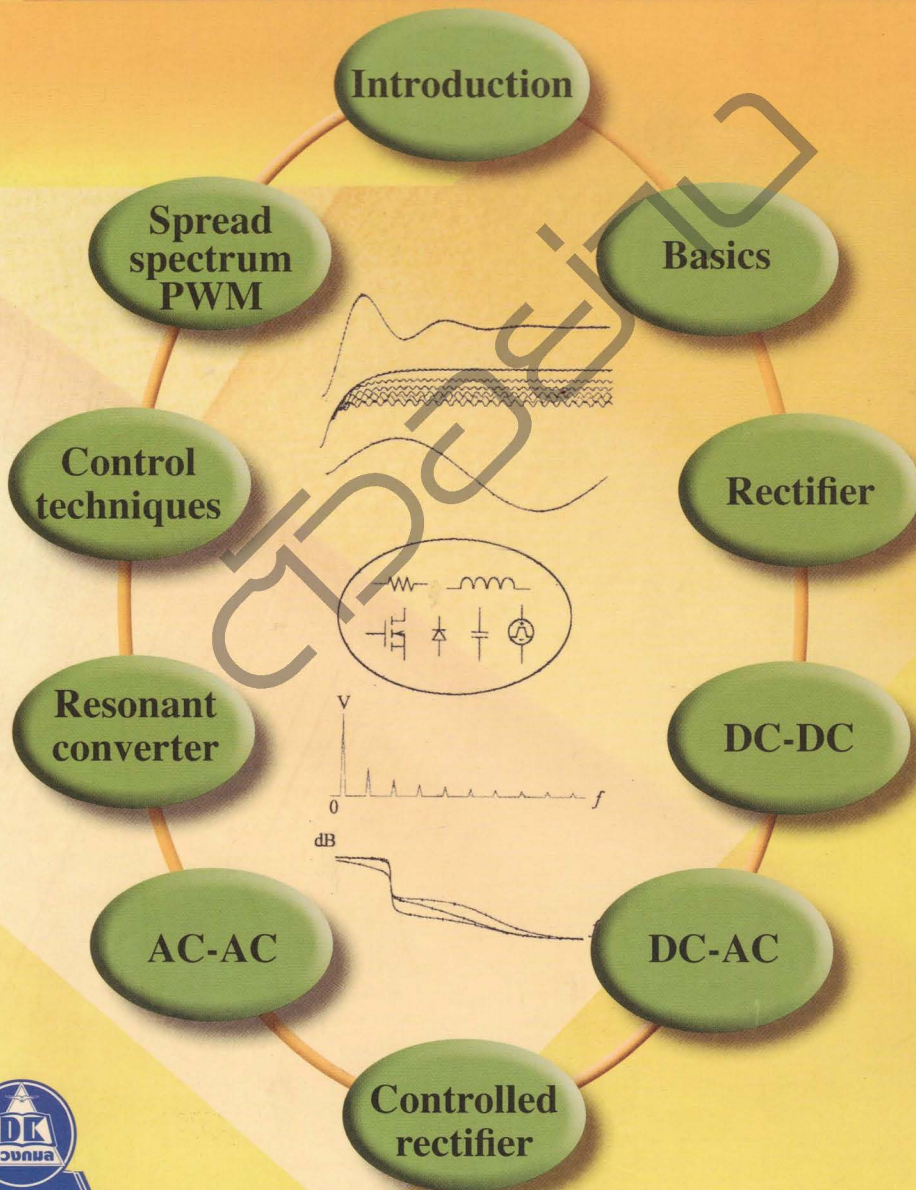


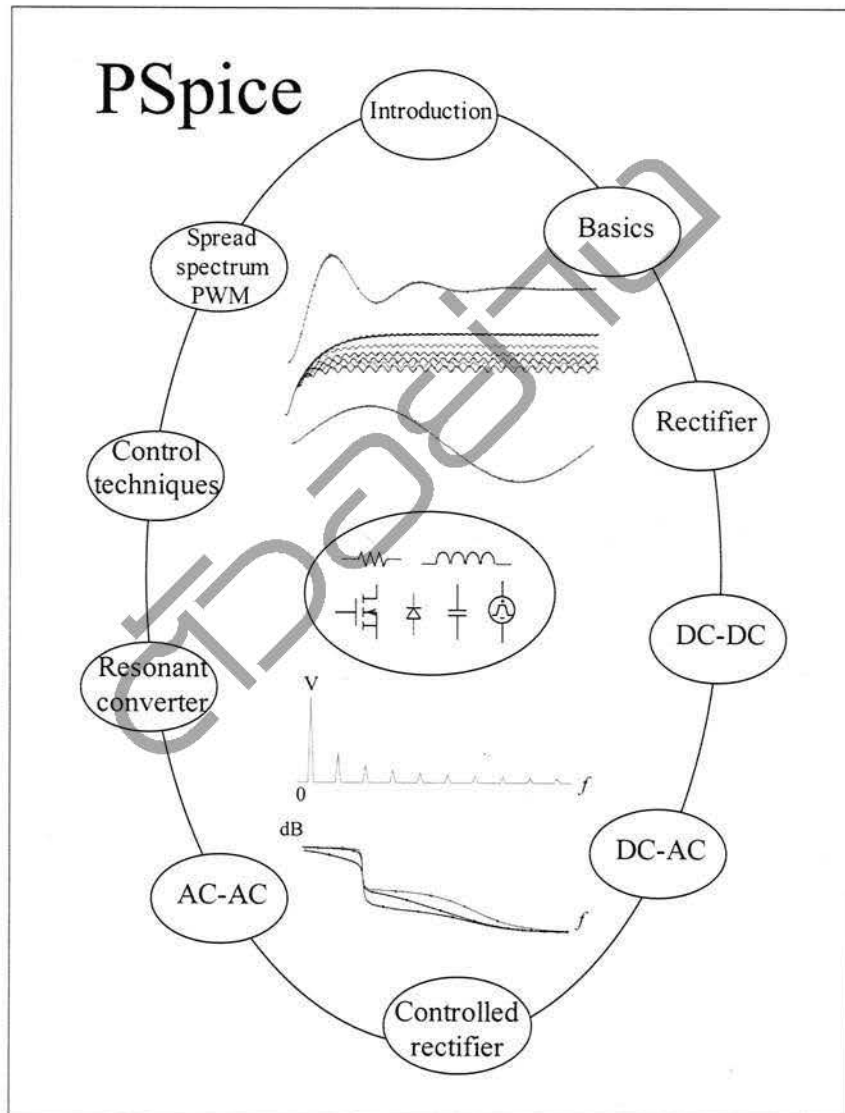
# PSpice

สำหรับวงจรแปลงพลังงานกำลัง



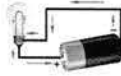
# *PSpice*

## สำหรับวงจรแปลงพ่นกำลัง



พศ.ดร.อภิวัฒน์ อุดโสภณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



## 1.1 พื้นฐาน

Spice (Simulation program with integrated-circuit emphasis) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย-เบิร์กลีย์ (University of California, Berkeley) ในปี ค.ศ. 1975 ซึ่งเป็นงานวิทยานิพนธ์ของ L. Nagel "Spice: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits" โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแอนะล็อก โปรแกรม PSpice ซึ่งเป็นอีกเวอร์ชันหนึ่งของ Spice โดยมีลักษณะเป็นกราฟิกโปรแกรมทำให้ง่ายต่อผู้ใช้ เช่น การเลือกและการกำหนดค่าอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งความสามารถในการพล็อตค่าแรงดัน-กระแส PSpice สามารถใช้ในการจำลองวงจรได้หลายลักษณะ เช่น

1. การวิเคราะห์ดีซี (DC analysis)
2. การวิเคราะห์สภาวะชั่วครู่ (Transient analysis)
3. การวิเคราะห์เอซี (AC analysis)
4. การวิเคราะห์ฟูริเยร์ (Fourier analysis)
5. การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน (Noise analysis)
6. การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)
7. การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยน (Distortion analysis)
8. การวิเคราะห์ห่มอลทรีคาร์โล (Monte Carlo analysis)

ภายในโปรแกรม PSpice ประกอบด้วยโมเดลคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการจำลองวงจรต่างๆ จำนวนมาก เช่น

1. แหล่งจ่ายแรงดันและกระแสทั้งอิสระและไม่อิสระ (Independent and dependent voltage and current sources)
2. ตัวต้านทาน (Resistors)
3. ตัวเก็บประจุ (Capacitors)
4. ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors)
5. ออปแอมป์ (Operational amplifiers)



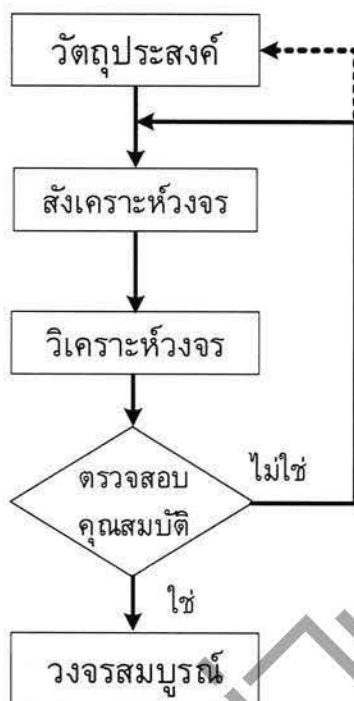
6. สวิตช์ (Switches)
7. ไดโอด (Diods)
8. ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar transistors)
9. ทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟต (MOS transistors)

นอกจากโมเดลคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์เหล่านี้แล้ว ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดเพิ่มเติมได้ฟรีจากเว็บไซต์ [1] และนอกจากโมเดลของอุปกรณ์พวกแอนะล็อกแล้ว PSpice ยังมีโมเดลของอุปกรณ์ประเภทดิจิตอลด้วย เช่น พวกเกตลอจิกต่างๆ ฟลิป-ฟลอป จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ PSpice เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับนักอิเล็กทรอนิกส์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบ วงจรทั้งแอนะล็อกและดิจิตอล

## 1.2 กระบวนการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในหัวข้อนี้ผู้เขียนจะอธิบายให้เห็นความสำคัญของการใช้โปรแกรมสำหรับจำลองวงจรในกระบวนการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 1.1 แสดงกระบวนการออกแบบวงจร [2] ซึ่งขั้นตอนแรกคือเราต้องทำความเข้าใจโจทย์ ปัญหาและความต้องการ พร้อมกับทำการกำหนดคุณสมบัติของวงจร หลังจากนั้นจึงทำการสังเคราะห์วงจร โดยทำการพิจารณา เลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เลือกวงจรที่เหมาะสมแล้วจึงทำการวิเคราะห์วงจรเพื่อเลือกค่าและคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ทำงานได้ตามความต้องการ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบวงจรว่าทำงานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้หรือไม่ หากไม่ก็กลับไปยังขั้นตอนที่หนึ่งซึ่งอาจจำเป็นต้องลดข้อกำหนดคุณสมบัติของวงจรลงหรือทำการสังเคราะห์วงจรใหม่ หรืออาจทำการวิเคราะห์วงจรให้ละเอียดอีกครั้ง ดังจะเห็นว่านี่อาจสร้างความยุ่งยากและอาจเป็นไปได้หากจะต้องวิเคราะห์และทดสอบวงจรในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการใช้โปรแกรมช่วยจำลองการทำงานสำหรับสังเกตพฤติกรรม สังเกตผลลัพธ์เบื้องต้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อนักออกแบบ รวมทั้งทำให้ช่วยประหยัดเวลาเป็นอย่างมาก ซึ่งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถช่วยนักออกแบบได้ดังนี้

1. ทำให้สามารถเลือกค่าอุปกรณ์ของวงจร เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ รวมทั้งพวกอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ได้อย่างอิสระ
2. ทำให้สามารถดูผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนและการบิดเบี้ยวของสัญญาณ โดยปราศจากการใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาแพงๆ
3. สามารถวิเคราะห์ความไวของอุปกรณ์ต่างๆ โดยการกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้
4. สามารถใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์เพื่อดูสัญญาณในโดเมนความถี่ ปราศจากการใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัม
5. ช่วยให้เราสามารถออกแบบค่าตัวแปรของวงจรที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการสร้างวงจรจริง



รูปที่ 1.1 โฟรชาทสำหรับขั้นตอนการออกแบบวงจร

### 1.3 รูปแบบและข้อจำกัด

รูปแบบ (Platform) ของโปรแกรม PSpice ขึ้นอยู่กับเวอร์ชันของ Spice ซึ่งมีอยู่ด้วยกันทั้งหมดสามรูปแบบ

1.3.1 PSpice A/D OrCAD (เวอร์ชัน 9.1 หรือสูงกว่า) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ในรูปแบบนี้ วงจรและชนิดการวิเคราะห์จะถูกแทนที่ด้วยคำสั่ง การจำลองโปรแกรมสามารถทำได้โดยเลือกจากแถบเมนูซึ่งผลลัพธ์สามารถแสดงได้เป็นรูปกราฟิก

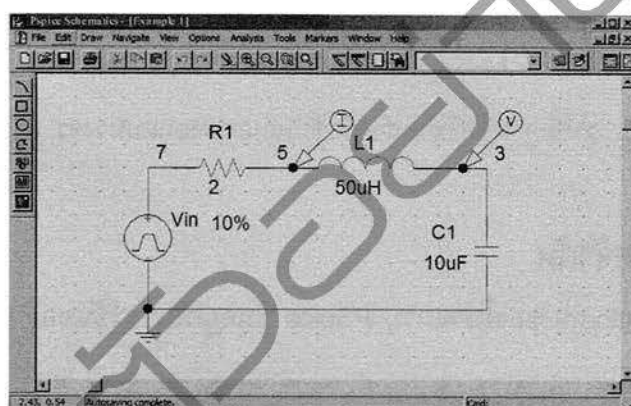
1.3.2 PSpice Schematics (เวอร์ชัน 9.1 หรือสูงกว่า) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 วงจรจะถูกแทนที่ด้วยสัญลักษณ์ การจำลองและการเลือกชนิดการวิเคราะห์ทำได้โดยการเลือกจากแถบเมนู เมื่อทำการรันโปรแกรมหน้าต่างแสดงผลจะถูกเปิดโดยอัตโนมัติ

1.3.3 OrCAD Capture (เวอร์ชัน 9.2 หรือสูงกว่า) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 รูปแบบการทำงานจะคล้ายกับ PSpice Schematics วงจรจะถูกวาดและถูกแทนที่ด้วยสัญลักษณ์ การจำลองและการเลือกชนิดการวิเคราะห์ทำได้โดยการเลือกจากแถบเมนู หลังจากทำการรันโปรแกรมหน้าต่างผลลัพธ์จะถูกเปิดโดยอัตโนมัติ

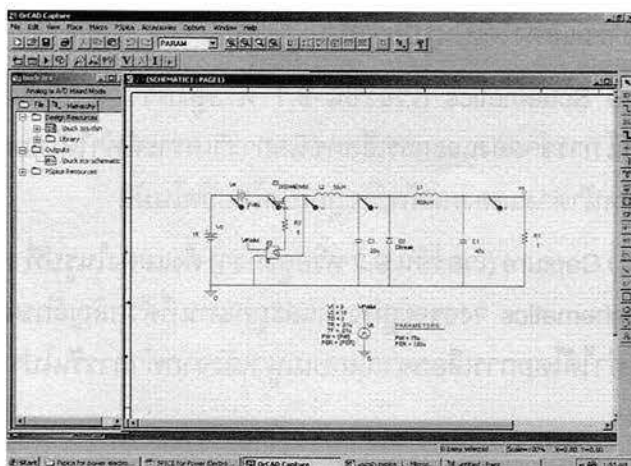
#### 4 ◇ PSpice สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง



รูปที่ 1.2 OrCAD PSpice A/D [4]



รูปที่ 1.3 PSpice Schematics [4]



รูปที่ 1.4 OrCAD Capture



รูปแบบที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้คือ OrCAD Capture (Student version 9.1) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดฟรีได้ที่เว็บไซต์ [1] แต่มีข้อจำกัดคือวงจรหนึ่งจะมีอุปกรณ์ได้ไม่เกิน 50 ตัว และมีจำนวนโนดไม่เกิน 64 โนด

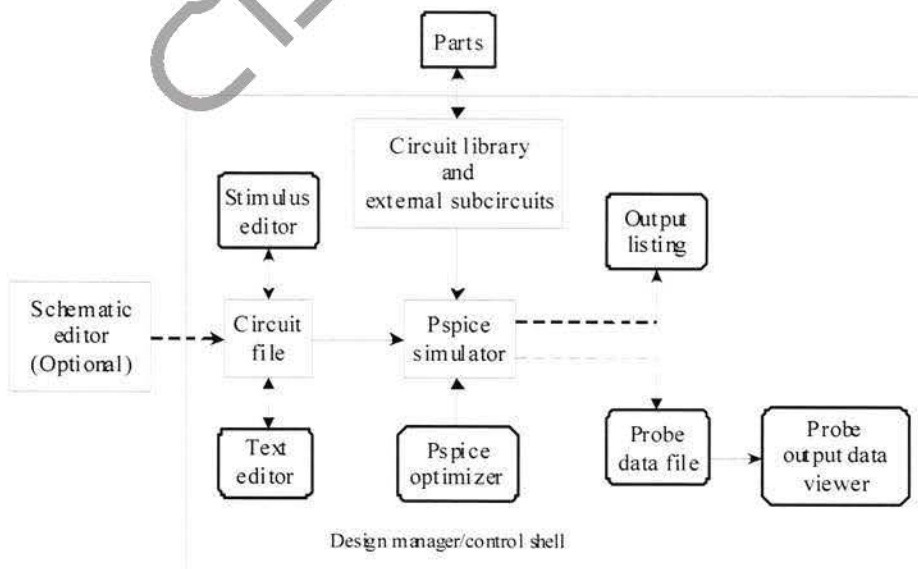
## 1.4 แผนผังของกระบวนการจำลอง

รูปที่ 1.5 แสดงแผนผังของกระบวนการจำลองของโปรแกรม PSpice ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมย่อยสามส่วน [3]

1. โปรแกรมแบบแผน (Schematics) ทำหน้าที่เขียนแบบทางวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะถูกเก็บอยู่ในไฟล์ .sch โดยมีไฟล์ย่อยสามไฟล์คือ ไฟล์วงจรย่อย (Circuit: .cir) เพื่อแสดงรายละเอียดวงจร ไฟล์เก็บค่าอุปกรณ์ (Netlist: .net) และไฟล์แสดงขาววงจร (Alias: .als) โดยที่ไฟล์วงจรสามารถสร้างได้จาก text editor หรือ graphic schematic editor ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ PSpice สำหรับ Microsoft WINDOWS

2. โปรแกรมวิเคราะห์ (PSpice) ทำหน้าที่วิเคราะห์วงจร ซึ่งข้อมูลถูกเก็บในไฟล์ .out หากวงจรไฟล์ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นโมเดล (Component model) จากภายนอก PSpice จะรับข้อมูลจากไฟล์คลังอุปกรณ์ .olb (Capture library file) ซึ่งบรรจุอุปกรณ์เป็นหมวดหมู่ เมื่อเริ่มต้นทำงาน ไฟล์ข้อความ (Text file) ที่อยู่ในส่วนรายการด้านนอก (Output listing) จะถูกสร้างขึ้นเพื่อรายงานความผิดพลาด

3. โปรแกรมแสดงผล (Probe) ทำหน้าที่แสดงผลการวิเคราะห์ ข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไฟล์ .dat โดยที่ผลลัพธ์จะถูกแสดงคล้ายกับการแสดงผลของออสซิลอโคป และที่หน้าจอแสดงผลยังสามารถใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์คำนวณผลลัพธ์เพิ่มเติมได้



รูปที่ 1.5 แผนผังของกระบวนการจำลองโปรแกรม PSpice

## 1.5 เอกสารอ้างอิง

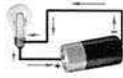
- [1] เว็บไซต์ “<http://www.cadence.com>, <http://www.orcad.com>, <http://www.pspice.com> and <http://www.ema-eda.com>”
- [2] Joseph G. Tront, 2007, “PSpice for Basic Circuit Analysis,” McGRAW-HILL international edition.
- [3] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์, 2549, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง” ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง
- [4] Muhammad H. Rashid and Hasan M. Rashid, 2006, “SPICE for Power Electronics and Electric Power,” CRC Press Taylor & Francis group.



Copyright



## การใช้งานโปรแกรม PSpice

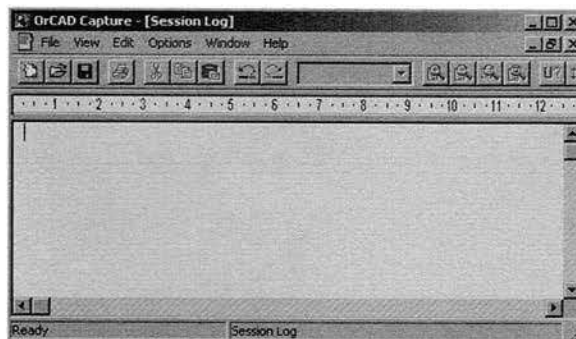


### 2.1 แนะนำ

หนังสือเล่มนี้ผู้เขียนอธิบายขั้นตอนการจำลองวงจรแปลงผันแบบต่างๆ ด้วยการจำลองแบบการวิเคราะห์ดีซี การวิเคราะห์เอซี รวมทั้งการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ภายใน Libraries เช่น แอนาล็อก ดิจิตอล สวิตช์กำลัง และฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่อยู่ใน Libraries ชื่อ ABM ซึ่งเหล่านี้จะถูกแสดงตัวอย่างพร้อมอธิบายขั้นตอนการจำลองไว้ในแต่ละบท อย่างไรก็ตามเนื้อหาในบทนี้ผู้เขียนขอแนะนำพื้นฐานการจำลองโปรแกรม PSpice เบื้องต้น เช่น การเข้าสู่โปรแกรม การวาดวงจร การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการจำลอง การแสดงผลลัพธ์ โดยใช้การจำลองแบบการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวซึ่งเป็นพื้นฐานการจำลอง รวมทั้งแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ฟูเรียร์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับงานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เหล่านี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้่านที่เริ่มต้นกับการใช้ OrCAD Capture

### 2.2 เริ่มต้นกับ PSpice

เริ่มต้นเข้าสู่โปรแกรมโดยการเลือก Capture CIS  ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ด้านบนจะเป็นแถบเมนูสำหรับการไฟล์ต่างๆ จากนั้นทำการเลือก File > New > Project จะปรากฏหน้าต่างในการสร้าง Project ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำการตั้งชื่อและเลือก Directory สำหรับเก็บไฟล์ข้อมูลโปรแกรม เช่น OrCAD Project file (\*.opi) Capture design file (\*.dsn) Pspice circuit file (\*.cir) Output file (\*.out) และ Probe data file (\*.dat) แล้วทำการเลือก Analog Mixed-Signal Circuit Wizard [1]

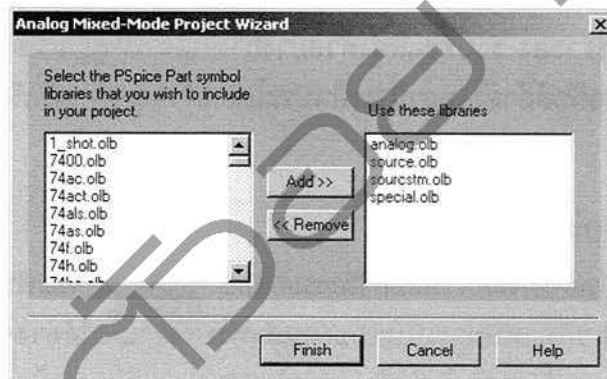


รูปที่ 2.1 หน้าต่างโปรแกรม



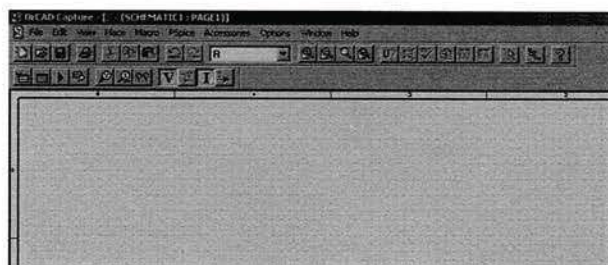
รูปที่ 2.2 การสร้าง Project

เลือก Libraries ซึ่งเป็นไฟล์คลังอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ไฟล์ analog.olb เป็นที่เก็บอุปกรณ์ประเภทแอนะล็อก อุปกรณ์ประเภทแหล่งจ่ายชนิดต่างๆ เลือกได้จาก source.olb หรือหากต้องการ Libraries อื่นๆ ก็สามารถทำได้ด้วยการ Add Libraries ที่อยู่โฟลเดอร์ OrCAD > Capture > Libraries (Libraries สามารถดาวน์โหลดได้จาก [1])

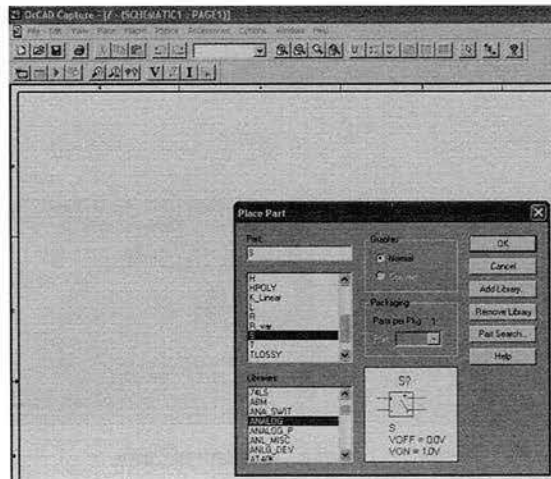


รูปที่ 2.3 Libraries สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

กดปุ่ม Finish จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างสำหรับเขียนวงจรดังรูปที่ 2.4 คลิกที่ปุ่ม  ซึ่งอยู่ด้านขวาบนหรือจากเมนู Place > part สำหรับเลือกอุปกรณ์ต่างๆ จาก Libraries ดังรูปที่ 2.5 กราวด์อ้างอิงได้จากการคลิกที่ปุ่ม  จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมต่ออุปกรณ์โดยคลิกที่ปุ่ม 

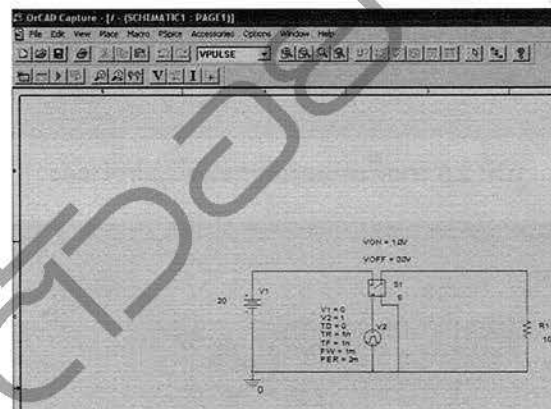


รูปที่ 2.4 หน้าต่างสำหรับเขียนวงจร



รูปที่ 2.5 การเลือกอุปกรณ์

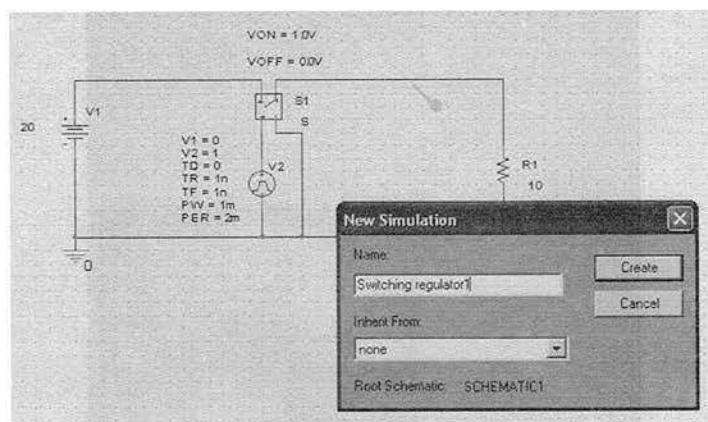
การตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ ทำได้โดยการดับเบิลคลิกที่ตัวหนังสือแสดงค่าของตัวมัน ถ้าหากต้องการหมุนตัวอุปกรณ์ก็ทำได้ด้วยการคลิกตัวอุปกรณ์ให้เป็นสีแดงแล้วทำการกดปุ่ม **Ctrl + R**



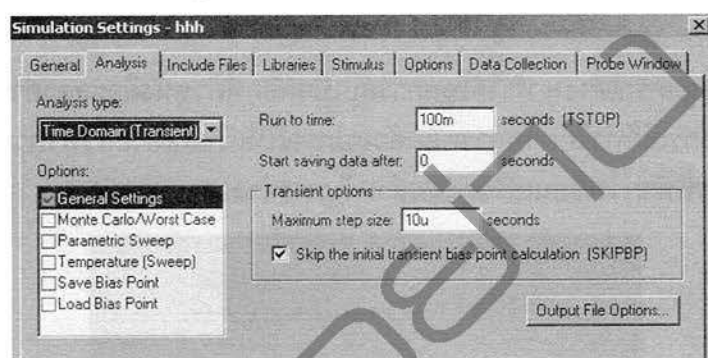
รูปที่ 2.6 วงจรพร้อมสำหรับการจำลอง

## 2.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการจำลองวงจร

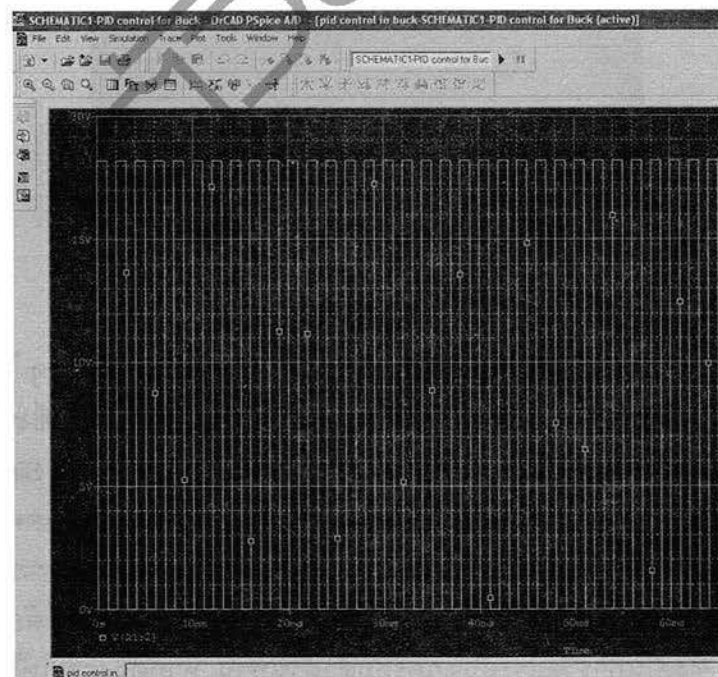
หลังจากวาดวงจรเสร็จขั้นตอนต่อไป ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองวงจร เริ่มต้นที่เมนูด้านบนเลือก **PSpice > New Simulation** ทำการตั้งชื่อไฟล์ ซึ่งจะเป็นไฟล์สำหรับเก็บผลลัพธ์ในการจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.7 หลังจากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง **Simulation Settings** ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทำการเลือก **Time Domain (Transient)** และกำหนดค่าเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดในการจำลองตามรูป ต่อจากนั้นทำการกดปุ่ม **►** เพื่อรันโปรแกรม หากต้องการวัดแรงดันหรือกระแสที่จุดใด ให้เราทำการคลิกที่ปุ่ม **🔍** แล้วนำมาวางยังจุดที่ต้องการวัด ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน หากต้องการให้โปรแกรมแสดงผลเป็นตัวเลขให้เลือกปุ่ม **V** หรือ **I** (แสดงผลในกรณีวงจรเข้าสู่สภาวะคงตัว)



รูปที่ 2.7 ตั้งชื่อไฟล์ในการจำลอง



รูปที่ 2.8 การตั้งค่าและเลือกชนิดในการจำลอง



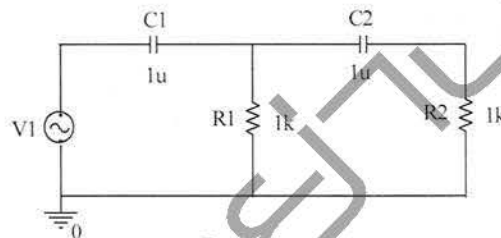
รูปที่ 2.9 หน้าต่างผลลัพธ์



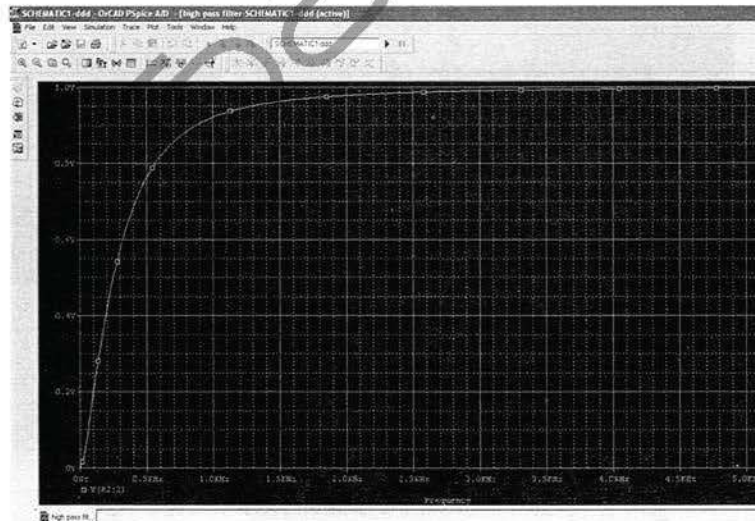
## 2.4 การวิเคราะห์โดเมนความถี่

### 2.4.1 ผลตอบสนองทางความถี่

ในการวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนอกจากต้องพิจารณาในโดเมนเวลาแล้ว จำเป็นต้องวิเคราะห์วงจรในโดเมนความถี่ด้วย ซึ่งในโปรแกรม PSpice มีฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ เช่น การหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรและการวิเคราะห์ฟูเรียร์ของสัญญาณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีทั้งขนาดและเฟส เริ่มต้นกับการหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังแสดงในรูปที่ 2.10 ต่อวงจรตามรูปโดยที่แหล่งจ่ายแรงดัน V1 ใช้อุปกรณ์ที่ชื่อ VAC จาก source.olb เข้าโหมด Simulation Setting เลือก Analysis type เป็น AC Sweep/Noise จากนั้น AC Sweep type เลือก Linear โดยที่ Start frequency เท่ากับ 1, End frequency เท่ากับ 5,000 และ Total Points 200 ทำการกดปุ่มรัน ▶ ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 2.11

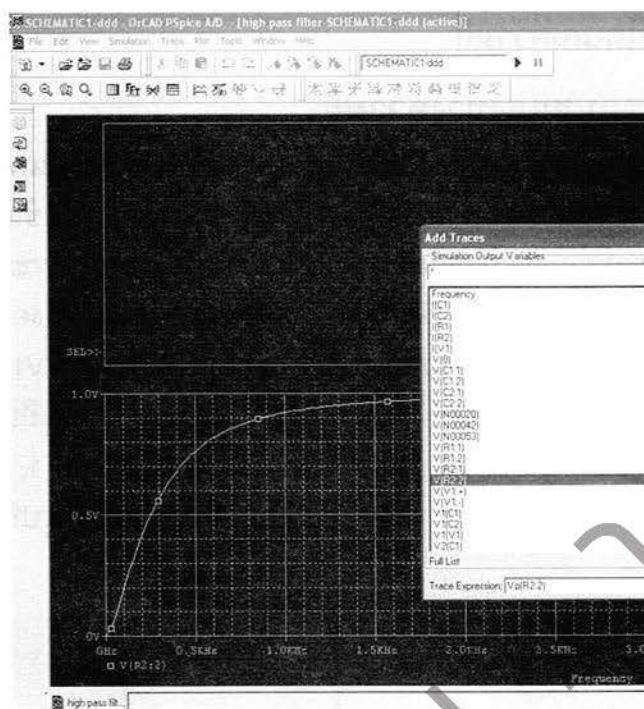


รูปที่ 2.10 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

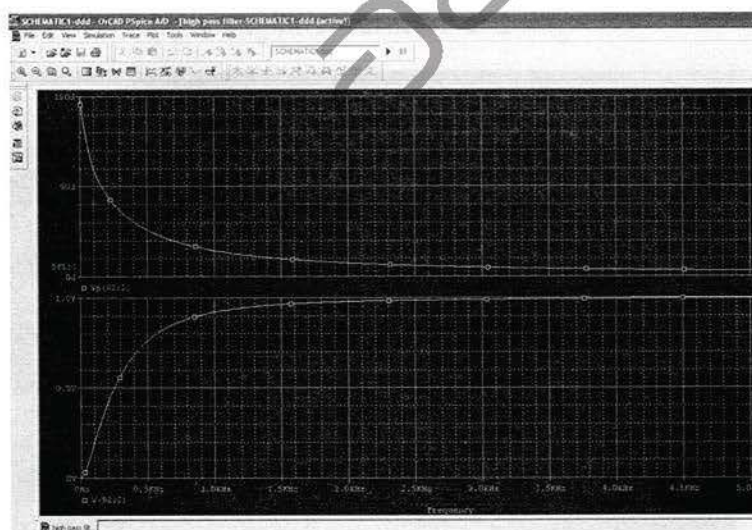


รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในรูปที่ 2.10

หากต้องการพล็อตเฟสเปรียบเทียบขนาดก็สามารถทำได้ ที่หน้าต่างผลลัพธ์ทำการเลือกเมนู Plot > Add Plot to Window จะปรากฏหน้าต่างแสดงผลขึ้นมา จากนั้นเลือก Trace > Add Trace จะปรากฏหน้าต่างตั้งค่างดังรูปที่ 2.12 ใส่พจน์ Vp (R2:2) ที่ด้านล่าง ซึ่งหมายถึงเฟสของแรงดันที่ตกคร่อม R2 ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 หน้าต่างการตั้งค่าการแสดงผลกราฟ



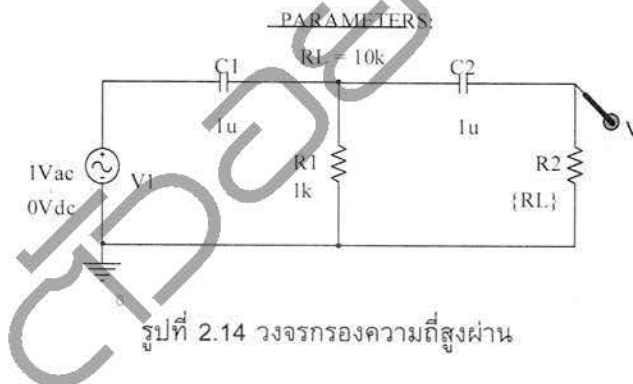
รูปที่ 2.13 แสดงเฟสและขนาดของแรงดันตกคร่อม R2

จากหัวข้อด้านบนแสดงการพล็อตผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร ซึ่งแสดงขนาดเปรียบเทียบกับเฟส หากต้องการดูผลกระทบของค่าอุปกรณ์ที่มีผลกระทบต่อการตอบสนองความถี่ของวงจรเราก็สามารถทำได้ ดังตัวอย่างดังนี้ รูปที่ 2.14 แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่าน สมมุติต้องการสังเกตผลกระทบของค่าความต้านทาน R2 ที่มีต่อความถี่ของวงจร เริ่มต้นตามขั้นตอนดังนี้

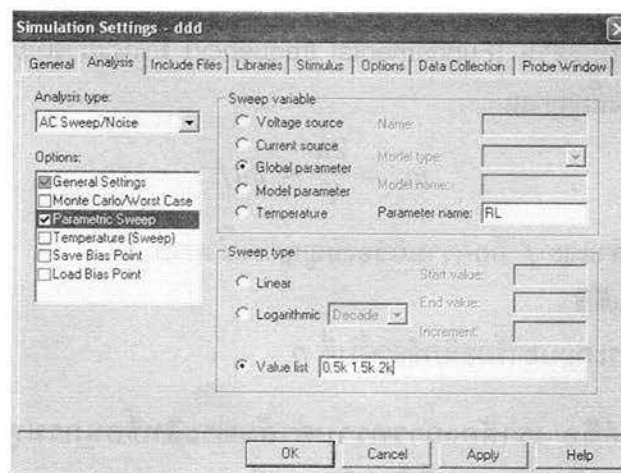
1. ต่อยวงจรองความถี่สูงผ่านตามรูป โดยที่แหล่งจ่ายแรงดัน V1 ให้ใช้อุปกรณ์ที่ชื่อ VAC จาก source.olb โดยเปลี่ยนค่า R2 จาก 1 k $\Omega$  เป็น {RL} นำเอาอุปกรณ์ที่ชื่อ PARAM จาก special.olb วางไว้ใกล้กับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดับเบิลคลิกที่ PARAM เพื่อทำการเซ็ค่าพารามิเตอร์คลิกที่ New ตั้งชื่อตัวแปรที่จะทำการเปลี่ยนค่าในที่นี้คือ RL คลิกด้านล่างของ RL ใส่ค่า 10 k $\Omega$

2. เข้าโหมด Simulation Setting Analysis type เป็น AC Sweep/Noise จากนั้น AC Sweep type เลือก Logarithmic โดยที่ Start frequency เท่ากับ 1, End frequency เท่ากับ 5000 และ Total Points 200

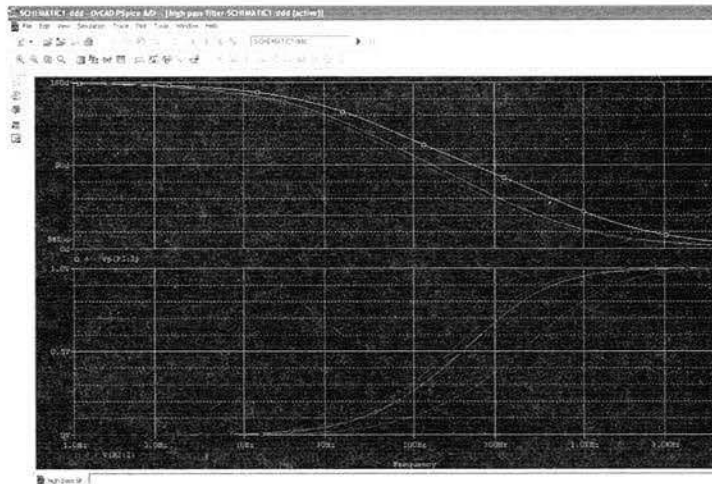
3. เซทค่าตามรูปที่ 2.15 ที่ Options เลือก Parametric Sweep จากนั้น Sweep variable เลือก Global parameter ที่ Parameter name ใส่ค่าตัวแปรที่เราจะทำการปรับเปลี่ยนคือ จากนั้น Sweep type ที่ Value list ใส่ค่า 0.5, 1.5 และ 2 k $\Omega$  กดปุ่ม OK ทำการกดปุ่มรัน ▶ ที่หน้าต่างแสดงผลหากลเราต้องการดูขนาดและเฟสเราก็สามารถทำได้เหมือนกับตัวอย่าง ซึ่งได้แสดงดังในหัวข้อที่ผ่านมา ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 2.16 (Vp (R2:2) แสดงเฟสของแรงดันตกคร่อม R2 และ db (V (R2:2)) แสดงขนาดในรูปของสเกลลอการิทึม)



รูปที่ 2.14 วงจรองความถี่สูงผ่าน



รูปที่ 2.15 การตั้งค่าในโหมด Parametric Sweep



รูปที่ 2.16 ผลการจำลองวงจรในรูปที่ 2.14

## 2.4.2 การเปลี่ยนโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่

การพิจารณาสเปกตรัมของกระแส-แรงดันในวงจรแปลงผันกำลัง รวมทั้งการหาค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกสรวม (Total harmonic distortion,  $(THD)_{i,v}$ ) ของรูปคลื่นต่างๆ เหล่านี้ล้วนจำเป็นต้องแปลงกระแส-แรงดันที่อยู่ในโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ ซึ่งภายในโปรแกรม PSpice ได้มีฟังก์ชันฟูเรียร์ไว้สำหรับความต้องการเหล่านี้ เริ่มต้นพิจารณาพื้นฐานของสัญญาณซ้ำคาบที่อยู่ในโดเมนเวลา แท้จริงแล้วเกิดจากการรวมกันของสัญญาณไซน์หลายๆ ความถี่ สำหรับเครื่องมือพื้นฐานที่อธิบายความสัมพันธ์เหล่านี้คือ Fourier series สมการที่ 2.1 แสดง Fourier series ของฟังก์ชัน  $f(t)$  [2] - [3]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega_o t + \theta_n) \quad (2.1)$$

โดยที่

$\omega_o$  คือความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) มีหน่วยวัดคือ เรเดียนต่อวินาที ซึ่งสัมพันธ์กับคาบเวลาของสัญญาณ

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.2)$$

$T$  คือคาบเวลาและ  $f$  คือความถี่ของสัญญาณซ้ำคาบ

$a_0$  คือแรงดันดีซี

$a_n$  คือองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่  $n$

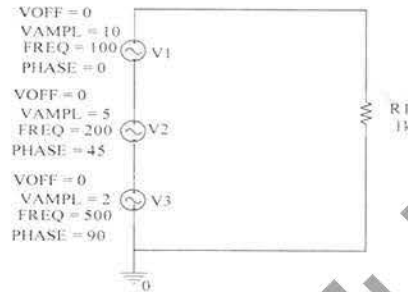
วัตถุประสงค์คือ เราต้องการทราบค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์  $a_0, a_1, a_2, \dots, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  ซึ่งใน PSpice สามารถใช้การวิเคราะห์ Fourier series และสามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปของกราฟที่แสดงทั้งขนาดและเฟส หรือแสดงในรูปสัมประสิทธิ์ Fourier series ดัง



สมการที่ (2.1) ตัวอย่างสมมุติว่าเรามีสัญญาณ ที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณไซน์สามสัญญาณ ดังนี้

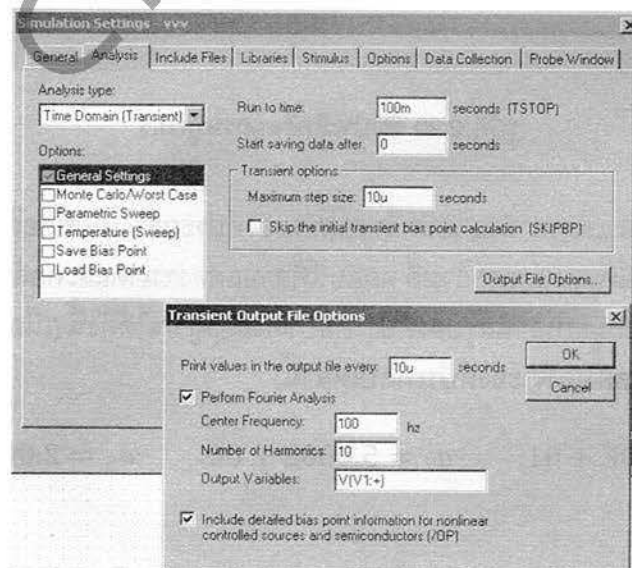
$$f(t) = 10 \sin(2\pi \times 100t) + 5 \sin(2\pi \times 200t + 45^\circ) + 2 \sin(2\pi \times 500t + 95^\circ) \text{ V} \quad (2.3)$$

เริ่มต้นทำการสร้างสัญญาณจากแหล่งจ่าย VSIN และทำการเซตค่าตามสมการที่ (2.3) ซึ่งแสดงการสร้างวงจรดังรูปที่ 2.17

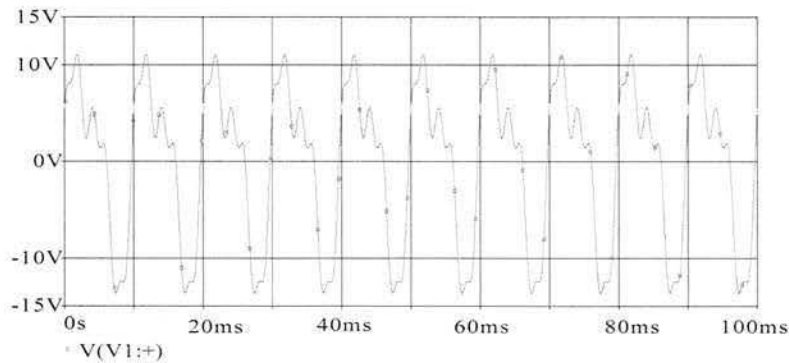


รูปที่ 2.17 สัญญาณในโดเมนเวลา  $f(t)$

เข้าโหมด Simulation Setting แล้วทำการเซตค่าดังรูปที่ 2.18 โดยที่ Run to time ใส่ค่า 100 ms (ควรเซตค่าเวลา Run to time ให้เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ในกรณีนี้ความถี่มูลฐานคือ 100 Hz มีคาบเวลาเท่ากับ 10 ms ดังนั้น ค่าเวลา Run to time จึงเท่ากับ 10 เท่าของคาบเวลา มูลฐาน แต่ในกรณีที่เราไม่ทราบความถี่มูลฐานเราควรเซตค่าเวลา Run to time ให้มากๆ เพื่อลดความผิดพลาดของ Fourier series) จากนั้นเลือก Output File Options และทำการเซตค่าดังรูปที่ 2.18 ทำการรัน ที่หน้าต่างผลลัพธ์จะแสดงผลแรงดันตกคร่อม R1 หรือ ฟังก์ชัน  $f(t)$  ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 การเซตค่าในโหมดการวิเคราะห์ฟูเรียร์



รูปที่ 2.19 แรงดันตกคร่อม R1 ในโดเมนเวลา

สัมประสิทธิ์ Fourier series ดูได้จากการเลือก View ที่แถบเมนูในหน้าต่างแสดงผล แล้วทำการเลือก Output Files ซึ่งจะปรากฏผลลัพธ์ดังนี้

| DC COMPONENT = -4.075727E-07                     |                |                   |                      |             |                        |
|--------------------------------------------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| HARMONIC NO                                      | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
| → 1                                              | 1.000E+02      | 1.000E+01         | 1.000E+00            | 5.425E-06   | 0.000E+00              |
| → 2                                              | 2.000E+02      | 5.000E+00         | 5.000E-01            | 4.500E+01   | 4.500E+01              |
| → 3                                              | 3.000E+02      | 5.820E-06         | 5.820E-07            | 8.455E+01   | 8.455E+01              |
| → 4                                              | 4.000E+02      | 7.333E-06         | 7.333E-07            | 4.738E+01   | 4.738E+01              |
| → 5                                              | 5.000E+02      | 2.000E+00         | 2.000E-01            | 9.000E+01   | 9.000E+01              |
| → 6                                              | 6.000E+02      | 9.363E-06         | 9.363E-07            | 1.510E+02   | 1.510E+02              |
| → 7                                              | 7.000E+02      | 6.403E-06         | 6.403E-07            | 1.347E+02   | 1.347E+02              |
| → 8                                              | 8.000E+02      | 5.424E-06         | 5.424E-07            | 1.277E+02   | 1.277E+02              |
| → 9                                              | 9.000E+02      | 5.021E-06         | 5.021E-07            | 1.208E+02   | 1.208E+02              |
| → 10                                             | 1.000E+03      | 4.777E-06         | 4.777E-07            | 1.177E+02   | 1.177E+02              |
| TOTAL HARMONIC DISTORTION = 5.385093E+01 PERCENT |                |                   |                      |             |                        |

รูปที่ 2.20 สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์

จากรูปที่ 2.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละองค์ประกอบ โดยที่คอลัมน์ที่หนึ่งแสดงลำดับของฮาร์โมนิกส์ คอลัมน์ที่สองแสดงความถี่ คอลัมน์ที่สามแสดงขนาดและคอลัมน์ที่ห้าแสดงเฟสของแต่ละฮาร์โมนิกส์ จากข้อมูลเหล่านี้สรุปองค์ประกอบของสัญญาณได้ดังนี้ (เนื่องด้วยค่าองค์ประกอบอื่นๆ มีค่าน้อยมากจึงแสดงเฉพาะองค์ประกอบเหล่านี้)

$$a_1 = 1.000E + 01, \quad a_2 = 5.000E + 00, \quad a_5 = 2.000E + 00$$

และมุมเฟส

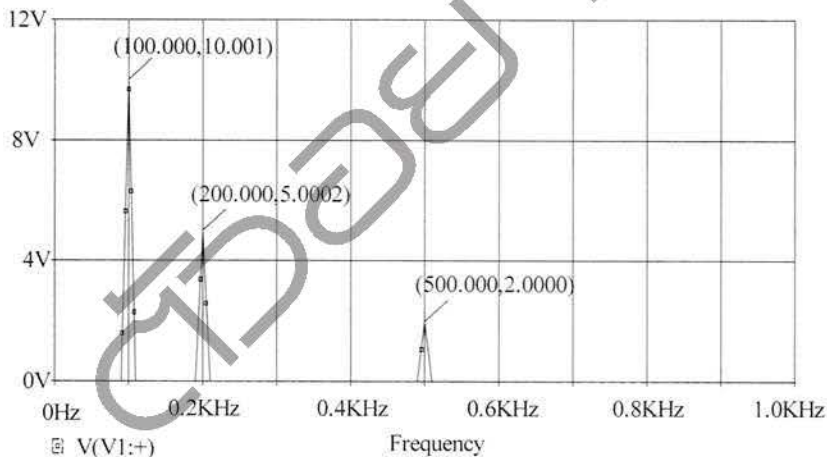
$$\theta_1 = 0.000E + 00, \quad \theta_2 = 4.500E + 01, \quad \theta_5 = 9.000E + 01$$

นำมาเขียนสมการ Fourier series ในรูป  $f(t)$  ได้ดังนี้ ซึ่งคำตอบที่ได้จะเท่ากับสมการที่ (2.3)

$$f(t) = 10 \sin(2\pi \times 100t) + 5 \sin(2\pi \times 200t + 45^\circ) + 2 \sin(2\pi \times 500t + 95^\circ) \text{ V}$$

เหตุที่คำตอบไม่มีค่าคลาดเคลื่อนเพราะคาบเวลาทั้งหมด 100 ms ที่เรานำเอามาใช้ในการวิเคราะห์ Fourier series นั้น เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณรายคาบทั้งสาม

การแสดงผล Fourier series อีกวิธีหนึ่ง สามารถทำได้โดยที่หลังจากทำการรันโปรแกรมเสร็จ เข้าไปที่หน้าต่างแสดงผลแล้วเลือกปุ่ม **FFT** (Fast Fourier Transform) จะปรากฏรูปสัญญาณในโดเมนความถี่ แกนตั้งเป็นขนาด แกนนอนเป็นความถี่ (หากต้องการปรับสเกลให้เข้าโหมด Plot > Axis Settings แล้วทำการเซท) หากเราต้องการดูขนาดและความถี่ให้กดปุ่ม **TC** (Toggle Cursor) แล้วลากไปยังจุดที่ต้องการแสดงค่า หลังจากนั้นกดปุ่ม **Q** จะปรากฏตัวเลขแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของสัญญาณ  $f(t)$

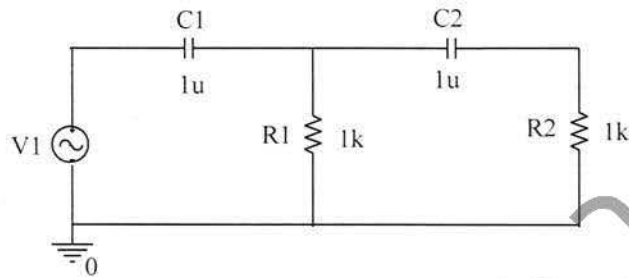
## 2.5 เอกสารอ้างอิง

- [1] Joseph G. Tront, 2007, "PSpice for Basic Circuit Analysis," McGRAW-HILL international edition.
- [2] Ronald Bracewell, 1999, "Fourier transform and its applications," McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 3 edition.
- [3] Muhammad H. Rashid and Hasan M. Rashid, 2006, "SPICE for Power Electronics and Electric Power," CRC Press Taylor & Francis group.

## 2.6 แบบฝึกหัด

2.1 จากวงจรในรูปที่ 2.22 ใช้ PSpice (ก) พล็อตผลตอบสนองทางความถี่ ขนาดและเฟส ต่อกะโอม R2 และ (ข) หาจุดตัดความถี่ (Cut off frequency)

2.2 จากวงจรในรูปที่ 2.22 ใช้ PSpice พิจารณาผลกระทบทางความถี่ เมื่อนำโหลด RL 0.1-5 k $\Omega$  ต่อขนานกับ R2



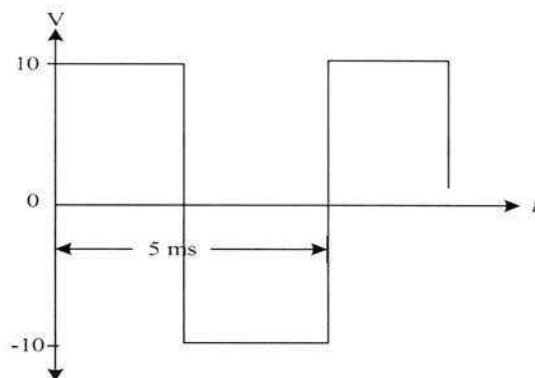
รูปที่ 2.22 วงจรสำหรับแบบฝึกหัดที่ 2.1

2.3 กำหนดสัญญาณ  $f(t)$  ดังสมการด้านล่างใช้ฟังก์ชัน FFT พล็อตสัญญาณในโดเมนความถี่ กรณีใช้คาบเวลาสำหรับคำนวณ FFT (ก) 100 ms (ข) 150 ms (ค) 500 ms พร้อมอธิบายและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นใน (ก) - (ค)

$$f(t) = 10 \sin(2\pi \times 50t) + 5 \sin(2\pi \times 150t + 45^\circ) + 2 \sin(2\pi \times 200t + 95^\circ) \text{ V}$$

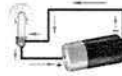
2.4 จากสัญญาณ  $f(t)$  ในข้อที่ 2.3 ใช้ PSpice คำนวณหา THD โดยกำหนดให้ใช้ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1-10

2.5 ใช้ VPULSE จาก source.olb สร้างสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.23 (แนะนำอ่านวิธีใช้ในหัวข้อที่ 4.2.1) ใช้ PSpice คำนวณหา THD โดยกำหนดให้ใช้ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1-10



รูปที่ 2.23 สัญญาณสำหรับแบบฝึกหัดที่ 2.5





### 3.1 แนะนำ

วงจรเรียงกระแสคือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current, AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) หรือเรียกว่าวงจรเรกติไฟเออร์ (Rectifier circuit) โดยใช้อุปกรณ์จำพวกไดโอด ไทริสเตอร์ หรือทรานซิสเตอร์เพื่อกำหนดให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งในบทนี้ผู้เขียนจะอธิบายถึง 1) หลักการวัดองค์ประกอบกำลังซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของวงจรเรกติไฟเออร์ 2) ตัวอย่างและขั้นตอนการจำลองวงจรเรกติไฟเออร์แบบต่างๆ 3) การปรับปรุงองค์ประกอบกำลังสำหรับวงจรเรกติไฟเออร์ทั้งแบบใช้วงจรกรองความถี่ชนิดพาสซีฟและแอคทีฟ

### 3.2 ดัชนีการวัดองค์ประกอบกำลัง

ในทางอุดมคติแล้วแรงดันเอาต์พุตไฟตรงของวงจรเรกติไฟเออร์ต้องคงที่และไม่มีแรงดันริบเบิล (Ripple voltage,  $v_{rip(p-p)}$ ) ในขณะที่กระแสอินพุตต้องมีรูปร่างเป็นไซน์ และไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยความต้องการไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันริบเบิลน้อย ดังนั้นที่เอาต์พุตของวงจรเรกติไฟเออร์จึงต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ สำหรับทำหน้าที่กรองกระแสไฟให้เรียบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระแสอินพุตมีรูปร่างไม่เป็นไซน์และมีมูมเฟสต่างจากมูมเฟสของแรงดัน นี่จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งดัชนีที่ใช้วัดผลกระทบนี้คือองค์ประกอบกำลัง (Power factor,  $PF_i$ ) โดยมีหลักในการวัดดังนี้

$$PF_i = \frac{V_{rms}}{V_{rms}} \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos \phi = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos \phi = K_p \cos \phi \quad (3.1)$$

โดยที่

$\phi$  คือมุมระหว่างกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่หนึ่งเทียบกับมูมของแรงดันอินพุต

$I_{1,rms}$  ค่าอาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบพื้นฐานของกระแสอินพุต

$I_{rms}$  ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสอินพุต

$K_p$  คือความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกส์อินพุตรวม ( $K_p = I_{1,rms} / I_{rms}$   $K_p \in [0,1]$ )

จากสมการที่ (3.1) ใช้ในการกำหนดองค์ประกอบกำลังจะเห็นว่าค่า  $K_p$  คือค่าที่ใช้วัดความผิดเพี้ยนของกระแสอินพุตหรือที่เรียกว่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกส์อินพุตรวม (Total current harmonic distortion,  $THD_i$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้ [1]

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad THD_i \in [0,1] \quad (3.2)$$

ดังนั้น  $K_p$  หาได้ดังนี้

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (3.3)$$

สมการที่ (3.1) – (3.3) ใช้สำหรับการคำนวณค่า  $PF_i$  ซึ่งในโปรแกรม PSpice สามารถดูผลลัพธ์ของ  $THD_i$  และ  $\phi$  ได้ที่ Output File ซึ่งผู้เขียนจะอธิบายพร้อมแสดงตัวอย่างการจำลองประกอบ

### 3.3 การจำลองวงจรเรกติไฟเออร์

ในหัวข้อนี้ผู้เขียนจะแสดงการจำลองวงจรเรกติไฟเออร์ทั้งแบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสและสามเฟส ซึ่งผู้อ่านจะได้เรียนรู้จากตัวอย่าง โดยที่แต่ละตัวอย่างจะแสดงการตั้งค่าในการจำลองและแสดงวิธีการคำนวณคุณสมบัติของวงจรเรกติไฟเออร์แบบต่างๆ

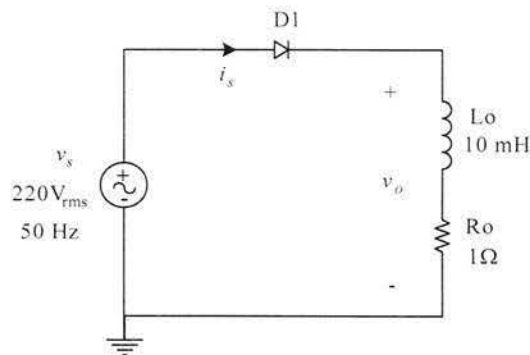
#### ตัวอย่างที่ 3.1 PSpice สำหรับวงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น (Half wave rectifier circuit)

จากวงจรในรูปที่ 3.1 แสดงวงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไซน์  $220\text{ V}_{rms}$  ความถี่  $50\text{ Hz}$  และมีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด  $10\text{ mH}$  ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $1\Omega$  จงใช้โปรแกรม PSpice

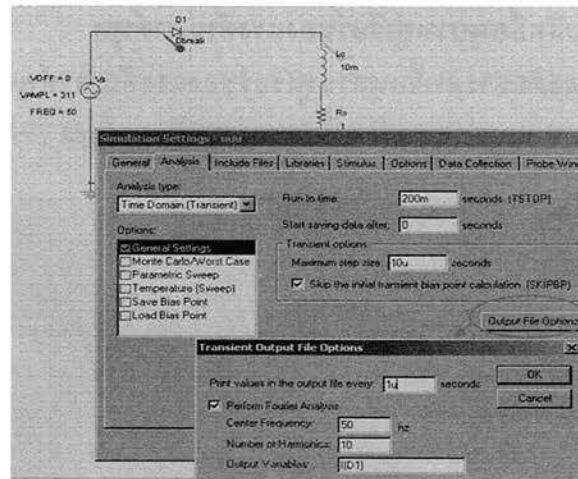
(ก) พล็อตกระแสอินพุต  $i_s$  แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  และค่าเฉลี่ย หรือไฟตรงของแรงดันเอาต์พุต  $V_{odc}$

(ข) หาสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ของแรงดันเอาต์พุต

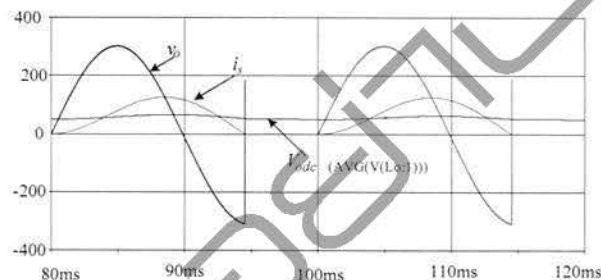
(ค) หาดองค์ประกอบกำลังอินพุต



รูปที่ 3.1 วงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น



รูปที่ 3.2 วงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่นและการตั้งค่าการจำลองวงจร



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นของกระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุตและค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต

### วิธีทำ

แหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับ  $220 V_{rms}$  ความถี่  $50 \text{ Hz}$  ดังนั้นจะได้ค่ายอดคลื่นของแรงดันไซน์เท่ากับ  $220 \times \sqrt{2} = 311 \text{ V}$

### (ก) พล็อตกระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุตและค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต

ทำการต่อวงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่นบนหน้าต่างโปรแกรมและทำการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.2 ผลลัพธ์การจำลองโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในขณะที่แรงดันแหล่งจ่าย  $v_s$  เป็นบวก ไดโอดจะได้รับไบอัสตรงทำให้กระแสสามารถไหลจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดได้ ดังนั้นที่แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  จะปรากฏแรงดันด้านบวก เมื่อกระแสอินพุต  $i_s$  เริ่มลดลงไดโอดจะยังคงได้รับไบอัสตรงถึงแม้ว่าแรงดันแหล่งจ่ายจะเป็นลบนี้ก็เพราะว่าขั้วของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความลาดชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน ดังนั้นจะทำให้ที่เอาต์พุตปรากฏแรงดันด้านลบ เหตุการณ์นี้จะสิ้นสุดเมื่อกระแสอินพุตตกลงเท่ากับศูนย์ (การพล็อตค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต > ที่หน้าต่างแสดงผลเลือก Trace > Add Trace... จะปรากฏหน้าต่างตัวแปรและฟังก์ชันคณิตศาสตร์ให้เลือก > ทำการใส่สมการที่ช่อง Trace Expression)

## (ข) หาสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของแรงดันเอาต์พุต

รูปที่ 3.4 แสดงสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของแรงดันเอาต์พุต โดยมีค่าเฉลี่ยแรงดันเอาต์พุต  $V_{odc} = 51.11 \text{ V}$  และค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันเอาต์พุต  $THD_v$  สูงถึง 46 เปอร์เซ็นต์

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(V\_o)

DC COMPONENT = 5.111786E+01

| HARMONIC NO | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
|-------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| 1           | 5.000E+01      | 2.214E+02         | 1.000E+00            | 1.422E+01   | 0.000E+00              |
| 2           | 1.000E+02      | 7.965E+01         | 3.598E-01            | -1.425E+02  | -1.709E+02             |
| 3           | 1.500E+02      | 4.839E+01         | 2.186E-01            | -7.225E+01  | -1.149E+02             |
| 4           | 2.000E+02      | 2.325E+01         | 1.051E-01            | 1.902E+01   | -3.786E+01             |
| 5           | 2.500E+02      | 1.761E+01         | 7.957E-02            | 1.408E+02   | 6.967E+01              |
| 6           | 3.000E+02      | 1.911E+01         | 8.633E-02            | -1.241E+02  | -2.094E+02             |
| 7           | 3.500E+02      | 1.544E+01         | 6.975E-02            | -3.727E+01  | -1.368E+02             |
| 8           | 4.000E+02      | 1.101E+01         | 4.975E-02            | 6.522E+01   | -4.855E+01             |
| 9           | 4.500E+02      | 1.085E+01         | 4.903E-02            | 1.732E+02   | 4.524E+01              |
| 10          | 5.000E+02      | 1.091E+01         | 4.929E-02            | -9.419E+01  | -2.364E+02             |

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.628783E+01 PERCENT

รูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของแรงดันเอาต์พุต

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(D\_1)

DC COMPONENT = 5.119009E+01

| HARMONIC NO | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
|-------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| 1           | 5.000E+01      | 6.711E+01         | 1.000E+00            | -5.812E+01  | 0.000E+00              |
| 2           | 1.000E+02      | 1.253E+01         | 1.867E-01            | 1.367E+02   | 2.529E+02              |
| 3           | 1.500E+02      | 5.104E+00         | 7.606E-02            | -1.560E+02  | 1.832E+01              |
| 4           | 2.000E+02      | 1.842E+00         | 2.745E-02            | -6.597E+01  | 1.665E+02              |
| 5           | 2.500E+02      | 1.115E+00         | 1.661E-02            | 5.488E+01   | 3.455E+02              |
| 6           | 3.000E+02      | 1.015E+00         | 1.513E-02            | 1.491E+02   | 4.978E+02              |
| 7           | 3.500E+02      | 7.016E-01         | 1.046E-02            | -1.239E+02  | 2.830E+02              |
| 8           | 4.000E+02      | 4.355E-01         | 6.490E-03            | -2.204E+01  | 4.429E+02              |
| 9           | 4.500E+02      | 3.875E-01         | 5.775E-03            | 8.601E+01   | 6.091E+02              |
| 10          | 5.000E+02      | 3.440E-01         | 5.127E-03            | 1.789E+02   | 7.600E+02              |

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.052186E+01 PERCENT

รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุต

## (ค) หาองค์ประกอบกำลังอินพุต

เพื่อที่จะทำการหาองค์ประกอบกำลังอินพุต  $PF_i$  เราจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุต ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านไดโอด I (ID1) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

จากสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์สรุปได้ว่า

- กระแสอินพุตเฉลี่ย  $I_{s(DC)} = 51.19 \text{ A}$

- ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสอินพุตของฮาร์มอนิกลำดับที่หนึ่ง  $I_{1,rms} = \frac{67.11}{\sqrt{2}} = 47.45 \text{ A}$



- ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสอินพุตรวม  $THD_i = 20.52\% = 0.2052$
- มุมระหว่างกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่หนึ่งเทียบกับมุมของแรงดันอินพุต  $\phi = -58.12^\circ$

จากข้อมูลข้างต้นนำมาคำนวณหาค่า  $PF_i$  ได้ดังนี้

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.2052^2}} = 0.98$$

ดังนั้น

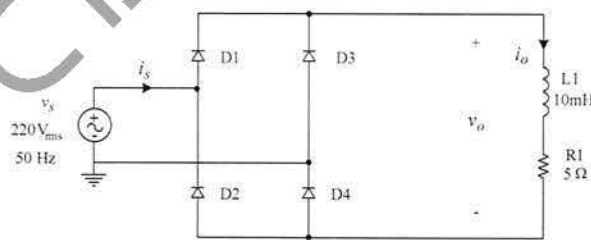
$$PF_i = K_p \cos \phi = 0.98 \cos(-58.12^\circ) = 0.52 \text{ (ล้าหลัง)}$$

ข้อสังเกตจะเห็นว่าในขณะไดโอดหยุดทำงานกระแสเอาต์พุตจะไหลไม่ต่อเนื่องและเกิดแรงดันทรานเซียนซ์ขึ้นที่โหลด ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการใส่ไดโอดต่อขนานกับโหลด (Free-wheeling diode) ซึ่งจะทำให้กระแสเอาต์พุตไหลได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้นและทำให้องค์ประกอบกำลังเพิ่มขึ้นด้วย

### ตัวอย่างที่ 3.2 PSpice สำหรับวงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น (Full wave rectifier circuit)

จากรูปที่ 3.6 แสดงวงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่นหรือวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์มีแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตไซน์  $220 V_{rms}$  ความถี่  $50 \text{ Hz}$  และมีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด  $10 \text{ mH}$  ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $5 \Omega$  จึงใช้โปรแกรม PSpice

- พล็อตกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  และค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต  $V_{odc}$
- สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ของกระแสอินพุตและองค์ประกอบกำลังอินพุต

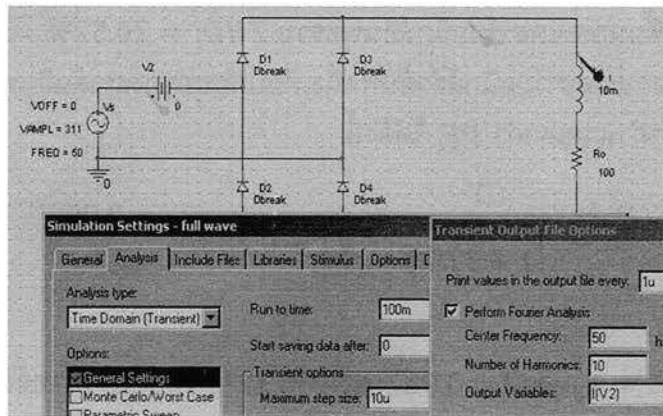


รูปที่ 3.6 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์กับโหลด RL

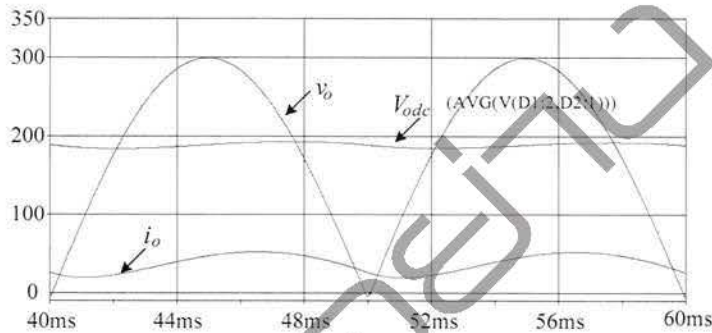
วิธีทำ

แหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับ  $220 V_{rms}$  ความถี่  $50 \text{ Hz}$  ดังนั้นจะได้ค่ายอดคลื่นของแรงดันไซน์เท่ากับ  $220 \times \sqrt{2} = 311 \text{ V}$

(ก) พล็อตกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  และค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต  $V_{odc}$  ทำการต่อวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์บนหน้าต่างโปรแกรมและทำการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.7 ผลลัพธ์การจำลองแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์และการตั้งค่าการจำลองวงจร



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์

(ข) สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุตและองค์ประกอบกำลังอินพุต เพื่อที่จะทำการหาองค์ประกอบกำลังอินพุต  $PF_i$  เราจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุต ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านแหล่งจ่าย V2 (I(V2))

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(V2)

DC COMPONENT = -9.071915E-05

| HARMONIC NO | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
|-------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| 1           | 5.000E+01      | 5.370E+01         | 1.000E+00            | -1.224E+01  | 0.000E+00              |
| 2           | 1.000E+02      | 4.722E-05         | 8.795E-07            | 9.044E+00   | 3.352E+01              |
| 3           | 1.500E+02      | 9.813E+00         | 1.828E-01            | 2.931E+01   | 6.603E+01              |
| 4           | 2.000E+02      | 1.645E-04         | 3.063E-06            | -5.183E+01  | -2.869E+00             |
| 5           | 2.500E+02      | 6.383E+00         | 1.189E-01            | 1.857E+01   | 7.977E+01              |
| 6           | 3.000E+02      | 4.065E-05         | 7.571E-07            | -1.660E+02  | -9.254E+01             |
| 7           | 3.500E+02      | 4.672E+00         | 8.701E-02            | 1.349E+01   | 9.917E+01              |
| 8           | 4.000E+02      | 1.665E-05         | 3.102E-07            | 1.454E+02   | 2.433E+02              |
| 9           | 4.500E+02      | 3.671E+00         | 6.837E-02            | 1.057E+01   | 1.207E+02              |
| 10          | 5.000E+02      | 4.719E-05         | 8.789E-07            | -9.064E+01  | 3.176E+01              |

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.444907E+01 PERCENT

รูปที่ 3.9 สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุต

จากสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ในรูปที่ 3.9 สรุปได้ว่า

- กระแสอินพุตเฉลี่ย  $I_s(DC) = 0$  A
- ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสอินพุตของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่หนึ่ง  $I_{1,rms} = \frac{53.7}{\sqrt{2}} = 37.97$  A
- ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์อินพุตรวม  $THD_i = 24.44\% = 0.244$
- มุมระหว่างกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่หนึ่งเทียบกับมุมของแรงดันอินพุต  $\phi = -12.24^\circ$

จากข้อมูลข้างต้นนำมาคำนวณหาค่า  $PF_i$  ได้ดังนี้

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.244^2}} = 0.97$$

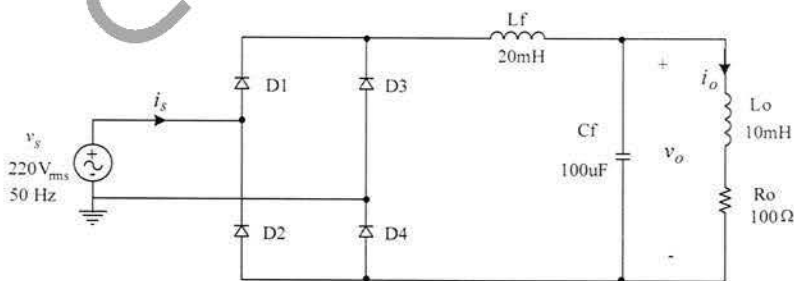
ดังนั้น

$$PF_i = K_p \cos \phi = 0.97 \cos(-12.24^\circ) = 0.95 \text{ (ล้าหลัง)}$$

### ตัวอย่างที่ 3.3 PSpice สำหรับวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์กับวงจรกรองความถี่

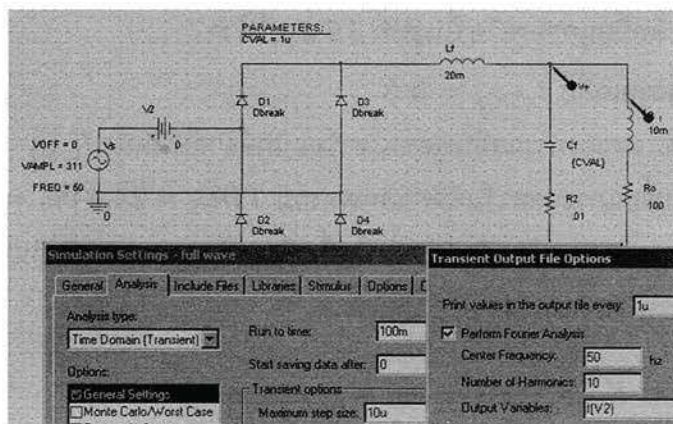
จากรูปที่ 3.10 แสดงวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์กับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตไซน์ 220 V<sub>rms</sub> ความถี่ 50 Hz และมีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 mH ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 100 Ω จงใช้โปรแกรม PSpice

- (ก) พล็อตกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  และค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต  $V_{odc}$
- (ข) สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุตและองค์ประกอบกำลังอินพุต
- (ค) พล็อตแรงดันเอาต์พุตเมื่อ  $C_f = 10, 100$  และ  $320 \mu\text{F}$

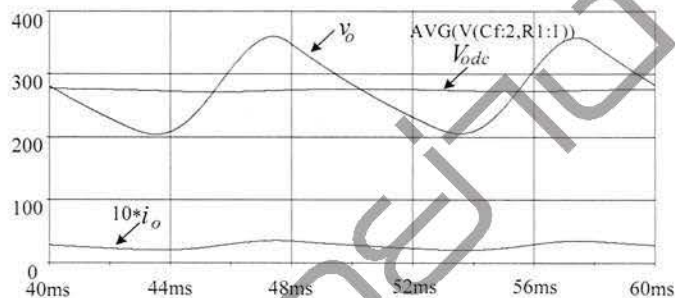


รูปที่ 3.10 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์กับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

- (ก) พล็อตกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  และค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต  $V_{odc}$  ทำการต่อวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์บนหน้าต่างโปรแกรมและทำการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.11 ผลลัพธ์การจำลองแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์กับวงจรกรองความถี่และการตั้งค่าการจำลองวงจร



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์กับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

(ข) สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุตและองค์ประกอบกำลังอินพุต เพื่อที่จะทำการหาองค์ประกอบกำลังอินพุต  $PF_i$  เราจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุต ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านแหล่งจ่าย V2 ( $I(V_2)$ )

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(V\_2)

DC COMPONENT = 2.515611E-04

| HARMONIC NO | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
|-------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| 1           | 5.000E+01      | 5.214E+00         | 1.000E+00            | -1.141E+01  | 0.000E+00              |
| 2           | 1.000E+02      | 4.645E-04         | 8.910E-05            | -7.123E+01  | -4.842E+01             |
| 3           | 1.500E+02      | 3.232E+00         | 6.199E-01            | 1.437E+02   | 1.779E+02              |
| 4           | 2.000E+02      | 2.637E-04         | 5.058E-05            | 1.130E+02   | 1.587E+02              |
| 5           | 2.500E+02      | 9.977E-01         | 1.914E-01            | -7.520E+01  | -1.816E+01             |
| 6           | 3.000E+02      | 1.545E-05         | 2.962E-06            | -1.538E+02  | -8.534E+01             |
| 7           | 3.500E+02      | 3.279E-01         | 6.290E-02            | -2.602E+01  | 5.384E+01              |
| 8           | 4.000E+02      | 7.823E-05         | 1.501E-05            | -6.958E+01  | 2.169E+01              |
| 9           | 4.500E+02      | 2.297E-01         | 4.407E-02            | 7.664E+01   | 1.793E+02              |
| 10          | 5.000E+02      | 9.163E-06         | 1.757E-06            | -4.678E+01  | 6.731E+01              |

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 6.532467E+01 PERCENT

รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุต



จากสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ในรูปที่ 3.13 สรุปได้ว่า

- กระแสอินพุตเฉลี่ย  $I_{s(DC)} = 0 \text{ A}$
- ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสอินพุตของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่หนึ่ง  $I_{1,rms} = \frac{5.21}{\sqrt{2}} = 3.68 \text{ A}$
- ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์อินพุตรวม  $THD_i = 65.32\% = 0.65$
- มุมระหว่างกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่หนึ่งเทียบกับมุมของแรงดันอินพุต  $\phi = -11.4^\circ$

จากข้อมูลข้างต้นนำมาคำนวณหาค่า  $PF_i$  ได้ดังนี้

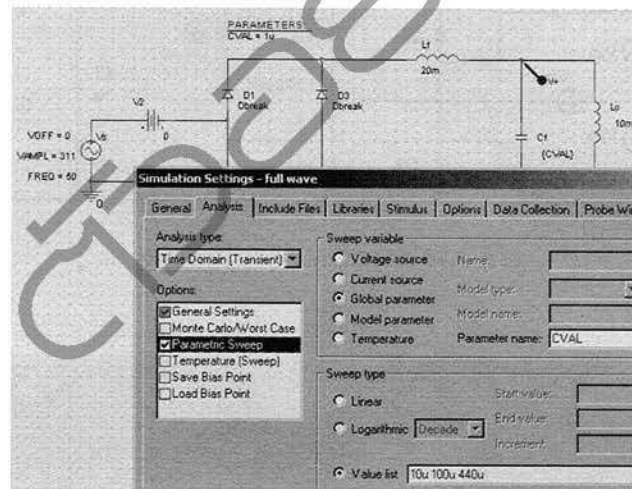
$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.65^2}} = 0.84$$

ดังนั้น

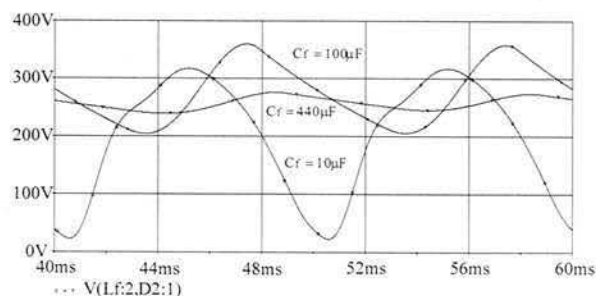
$$PF_i = K_p \cos \phi = 0.84 \cos(-11.4^\circ) = 0.82 \text{ (ล้าหลัง)}$$

(ค) พล็อตแรงดันเอาต์พุตเมื่อ  $C_f = 10, 100$  และ  $320 \mu\text{F}$

รูปที่ 3.14 แสดงการตั้งค่าการจำลองโปรแกรม โดยที่  $C_f$  จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปร CVAL จากผลการจำลองจะเห็นว่าเมื่อค่าความจุของ  $C_f$  มากขึ้นแรงดันรีปเปิลจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 การตั้งค่าสำหรับการจำลองวงจร



รูปที่ 3.15 แรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากผลกระทบของตัวเก็บประจุ  $C_f$

### ตัวอย่างที่ 3.4 PSpice สำหรับวงจรเรกติไฟเออร์สามเฟส

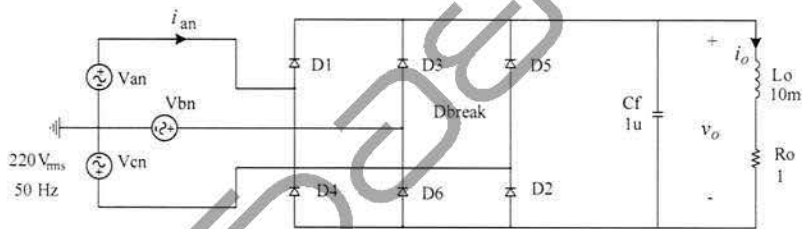
วงจรเรกติไฟเออร์สามเฟสแสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งถูกจ่ายด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสแบบสมดุล โดยที่แต่ละเฟสมีแรงดัน  $220\text{ V}_{rms}$  ความถี่  $50\text{ Hz}$  และมีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด  $10\text{ mH}$  ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $1\ \Omega$  จงใช้โปรแกรม PSpice

- (ก) พล็อตกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_o$
- (ข) พล็อตค่าอาร์เอ็มเอสและค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D1
- (ค) พล็อตกำลังเอาต์พุตเฉลี่ย
- (ง) หาสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูเรียร์ของกระแสอินพุตและองค์ประกอบกำลังอินพุต

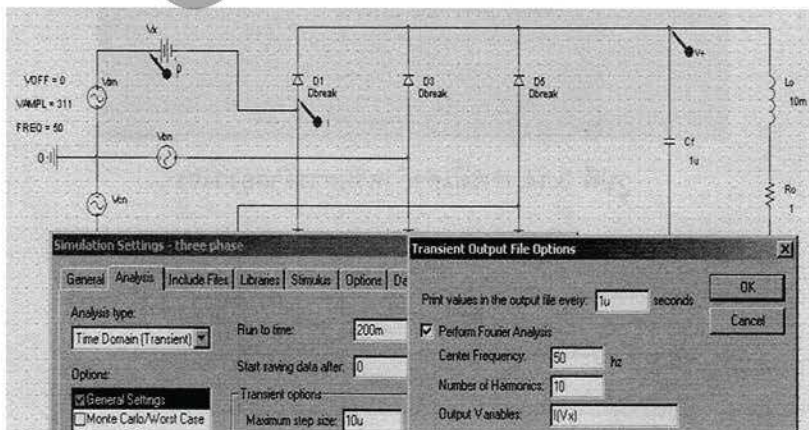
วิธีทำ

- (ก) พล็อตกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_o$

ทำการต่อวงจรเบรติจเรกติไฟเออร์บนหน้าต่างโปรแกรมและทำการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.17 ผลลัพธ์การจำลองวงจรแสดงดังรูปที่ 3.18 – 3.20



รูปที่ 3.16 วงจรเรกติไฟเออร์สามเฟส



รูปที่ 3.17 วงจรเรกติไฟเออร์สามเฟสกับการตั้งค่าการจำลองวงจร



# PSpice

## สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง

- ▶ แนะนำโปรแกรม PSpice
- ▶ การใช้งานโปรแกรม PSpice
- ▶ วงจรเรียงกระแส
- ▶ วงจรแปลงผันไฟตรง
- ▶ วงจรแปลงผันดีซี-เอซี
- ▶ วงจรเรียงกระแสแบบควบคุมแรงดันเอาต์พุต
- ▶ วงจรแปลงผันกำลังไฟสลับ
- ▶ วงจรแปลงผันแบบเรโซแนนท์
- ▶ การควบคุมวงจรแปลงผัน
- ▶ PWM สำหรับการกระจายสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์

