

# บทความเข้าใจกับเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ

สัญญา พิณกุล.

เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ เป็นอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นอย่างขาดเสียมิได้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเรกกูเลเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่นักออกแบบจะต้องพิจารณาว่าเป็นหลัก แต่ก็ต้องระวังการอวดอ้างสรรพคุณจากผู้ผลิตเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำจากบริษัทต่างๆ บางครั้งอาจจะมีการโอ้อวดความสามารถของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ ว่ามีแรงดันตกคร่อมต่ำเพียงแค่ 150 มิลลิโวลต์ และกินกระแสเพียง 100 มิลลิแอมป์เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำในปัจจุบัน มิได้จำเป็นที่จะต้องการแรงดันตกคร่อมต่ำเพียงอย่างเดียว นักออกแบบจะต้องมองรวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่ปนออกมากับแรงดันเอาต์พุตจะต้องมีค่าน้อยในระดับที่ยอมรับได้ (Low Output Noise) มีอัตราการจัดสัญญาณรบกวนที่ปนเข้ามาที่แรงดันอินพุตสูง (High Ripple Rejection) และใช้กระแสเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ ในบางผลิตภัณฑ์ที่มีการกระชากกระแสเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ก็จะต้องมองไปถึงความสามารถในการฉีดกระแสหรือพร้อมที่จะทำงานได้อย่างทันท่วงทีที่ได้รับแรงดันอินพุต เพื่อให้การใช้งานเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำเกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึง

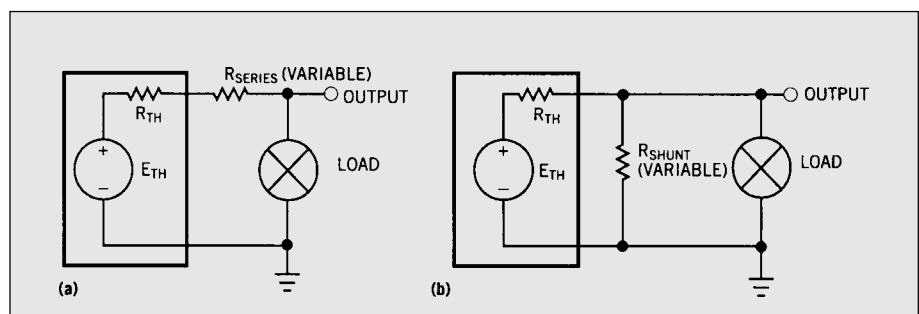
มีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจในหลักการทำงานของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ เพื่อจะได้ทราบว่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวมอย่างไร

## เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ- ต้องเป็นเรกกูเลเตอร์ประเภทอนุกรม

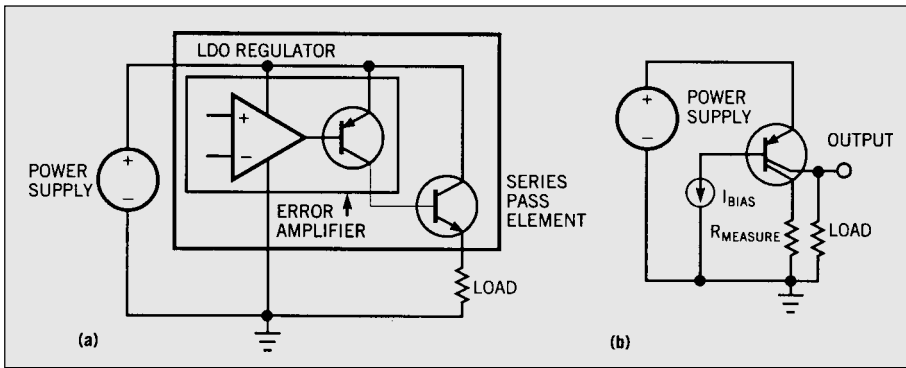
เรกกูเลเตอร์แบบลิเนียร์จะให้แรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าอินพุต นักออกแบบเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ สามารถสร้างเรกกูเลเตอร์ประเภทนี้ได้หลายวิธี เช่นสร้างเป็นค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ต่ออนุกรมอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับโหลดเรียกว่า เรกกูเลเตอร์แบบอนุกรม (Series Regulator) (ดูได้ในรูปที่ 1a) หรืออาจจะสร้างเป็นค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ต่อขนานอยู่กับโหลดจะเรียกเรกกูเลเตอร์ชนิดนี้ว่าเรกกูเลเตอร์แบบ-

ชัณฑ์ (Shunt Regulator) (ดูได้ในรูปที่ 1b) เรกกูเลเตอร์แบบชัณฑ์จะไม่ค่อยได้รับความนิยมเท่าไร แต่จะสามารถนำไปใช้งานได้ดีกับแหล่งจ่ายไฟประเภทกระแสคงที่ เช่น โซลาร์เซลล์จึงทำให้เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้จึงเป็นแบบอนุกรมเกือบทั้งหมด

ค่าความต้านทานหรือ กลุ่มอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายไฟที่อยู่ในตัวเรกกูเลเตอร์แบบอนุกรมจะทำหน้าที่ในการรักษาผลต่างของแรงดันอินพุตกับเอาต์พุต การคำนวณกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของพลังงานความร้อนที่กลุ่มอุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำได้ง่าย เนื่องจากกระแสที่ผ่านกลุ่มอุปกรณ์เหล่านี้ จะมีค่าเท่ากับกระแสโหลด ดังนั้น พลังงานความร้อนสูญเสีย  $P_{LOSS} = (V_{IN} - V_{OUT}) \times I_{OUT}$  ผลต่างของ-



รูปที่ 1 : a) Series Regulator มีความต้านทานต่ออนุกรมอยู่ระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายไฟ b) Shunt Regulator มีความต้านทานต่อขนานอยู่ระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 2 : สถาปัตยกรรมโครงสร้างพื้นฐานของเรกกูเลเตอร์ a) ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN โดยได้รับกระแสขั้วมาจากทรานซิสเตอร์ชนิด PNP b) ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม VBE

**PNP เป็นตัวควบคุมกระแสไหลต**

แรงดันตกคร่อมสูงที่ตัวเรกกูเลเตอร์อันเกิดเนื่องจากการต่อโหลดเข้าที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN สามารถลดได้โดยการกลับขั้วทรานซิสเตอร์ และหันมาใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP แทน และพยายามทำให้แรงดันขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP มีค่าเข้าใกล้แรงดันอินพุทสูงสุด วิธีการนี้ทำให้ไม่ต้องใช้แรงดันแหล่งจ่ายไฟเพิ่มเติมและการจัดการไบอัสทรานซิสเตอร์นี้สามารถจะระบายกระแสเลี้ยงให้ลงกราวด์ได้โดยตรง (ดูรูปที่ 2b) วิธีการนี้สามารถทำให้แรงดันตกคร่อมในขณะอิมิตต์มีค่าลดลงอย่างมาก และสามารถควบคุมได้ง่าย เพราะกระแสเบสถูกดึงลงกราวด์ตรงไปตรงมา ถ้าเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่หาค่าเกณฑ์ขยายสูงๆ แรงดันตกคร่อมตัวเรกกูเลเตอร์ในรูปที่ 2b นั้นอาจมีค่าน้อยถึง 60 มิลลิโวลท์ ที่กระแสไหลต 100 มิลลิแอมป์ได้ (ต่างกับวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN) เรกกูเลเตอร์นี้มีค่าแรงดันตกคร่อม  $V_{CE(SAT)}$  (หรือ  $R_{DS(ON)} \times I_B$  ในกรณีที่เป็นมอสเฟต) ค่ากระแสกราวด์ที่ออกจากขาเบสในรูปที่ 2a มีค่าน้อยมากจนไม่กระทบถึงปริมาณกระแสไหลต ค่ากระแสกราวด์นี้เป็นหนึ่งในคุณสมบัติทั่วไปของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำชนิดไบโพลาร์ ค่ากระแสกราวด์ขึ้นตรงกับเกณฑ์ขยายของทรานซิสเตอร์ที่เลือกใช้ แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์ PNP ชนิดมัลติคอลเล็กเตอร์ (มีขาคอลเล็กเตอร์มากกว่า 1 ขา) โดยที่ขาที่เหลือนี้จะใช้ในการวัดกระแสที่ไหลตตั้งไป เพื่อให้เป็นข้อมูลกับวงจรส่วนป้องกันความเสียหาย ค่ากระแสนี้จะทำให้แรงดันเอาต์พุตตกลงเพียงเล็กน้อย

เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำส่วนมากจะต้องมีส่วนประกอบที่เรียกว่าแรงดันแก๊ปอ้างอิง (Bandgap Reference Voltage) และวงจรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier) ซึ่งให้เอาต์พุตไปขับ

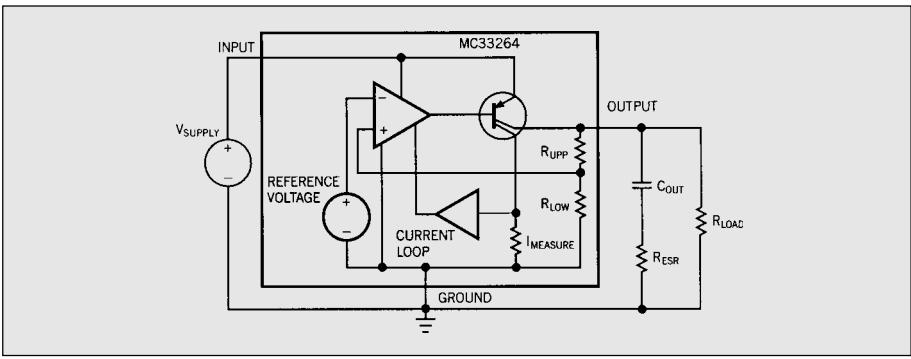
แรงดันอินพุท และเอาต์พุท ( $V_{IN} - V_{OUT}$ ) ถูกเรียกว่าแรงดันตกคร่อม (Dropout Voltage) แรงดันตกคร่อมสูงสุดและกระแสสูงสุดของเรกกูเลเตอร์จะเป็นตัวบอถึงกำลังความร้อนสูญเสียมากที่สุดที่เรกกูเลเตอร์จะทนได้และระบายได้ในแพ็คเกจชนิดนั้นโดยไม่เสียหาย กลุ่มตัวต้านทานที่ปรับค่าได้นี้สามารถประยุกต์สร้างได้ทั้งจากอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์หรือแบบมอสเฟตก็ได้ ขอยกตัวอย่างวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ดังรูปที่ 2a ซึ่งเป็นวงจรในยุคแรกที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ชนิด NPN เป็นตัวขับกระแสไหลตโดยได้รับกระแสเบสมาจากทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ซึ่งเป็นภาคเอาต์พุทของวงจรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier)

ลองพิจารณาว่าทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ได้รับกระแสเบสมาจากแหล่งจ่ายไฟแหล่งเดียวกัน โดยผ่านมาทางทรานซิสเตอร์ชนิด PNP กระแสเบสนี้จะทำให้เกิดการขยายให้เบสไหลตได้ แต่การทำงานทั้งหมดจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ แรงดันที่ขาเบสมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

เมื่อผลต่างของแรงดันระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทมีค่ามาก ก็จะไม่เกิดปัญหาอะไรตามมานอกจากความร้อนที่สูงเกินไปขึ้น แต่ถผลต่างของแรงดันระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทมีค่าลดลงเรื่อยๆ วงจรควบคุมก็จะ

พยายามปรับค่าความต้านทานกลุ่มนี้ให้มีค่าลดลงเรื่อยๆเช่นกัน แต่ก็ติดปัญหาตรงที่ว่าทรานซิสเตอร์แบบ NPN จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อ  $V_B - V_E > V_{BE}$  กลุ่มความต้านทานกลุ่มนี้จึงอยู่ในสถานะอิมิตต์ ไม่สามารถลดค่าความต้านทานลงได้อีก จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตตกลง (ก็คล้ายกับวงจรที่มีภาคควบคุมกระแสหลักเป็นมอสเฟตชนิดแซนเนล N ปัญหาไม่สามารถแก้ไขได้โดยการบูตแรงดันไฟเลี้ยงของออปแอมป์ให้ลอยตัวสูงขึ้นกว่าแรงดันอินพุทด้วยวงจรบูตแอสตรป (Boot Strap Technique) แต่ก็ก่อให้เกิดปัญหาที่ยุงยากและต้นทุนสูงขึ้นตามมา ดังนั้น ผลต่างแรงดันตกคร่อมที่น้อยที่สุดของเรกกูเลเตอร์ชุดนี้จึงมีค่าเท่ากับ  $V_{CE(SAT)(PNP)} + V_{BE(NPN)}$  ถ้าค่า  $V_{CE(SAT)(PNP)}$  มีค่าเท่ากับ 200 มิลลิโวลท์ และ  $V_{BE(NPN)}$  มีค่าเท่ากับ 600 มิลลิโวลท์ แรงดันตกคร่อมของเรกกูเลเตอร์ตัวนี้จะมีความเท่ากับ 800 มิลลิโวลท์ ซึ่งถือว่ามากเกินไปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ไอซีประเภทนี้ยกตัวอย่างเช่นไอซีเรกกูเลเตอร์ยอदनนิยมตระกูล 78XX ซึ่งเป็นเรกกูเลเตอร์แบบอนุกรม (แต่ก็มีค่าความต้านทานต่อขั้วตัวไว้ภายในเหมือนกัน เพื่อทำหน้าที่ป้องกันกระแสเกิน เมื่อวงจรส่วนป้องกันกระแสเกินทำงาน ความต้านทานที่ขั้วตัวไว้จะส่งผลให้เห็นได้จากแรงดันเอาต์พุทที่ลดลง)

**เรกกูเลเตอร์ต้องมีทรานซิสเตอร์ชนิด**



รูปที่ 3 : บล็อกไดโอดแอมป์ของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำจะช่วยให้การวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น

ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ตัวที่กล่าวถึง **รูปที่ 3** แสดงบล็อกไดโอดแอมป์พื้นฐานของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ที่ทำหน้าที่เรกกูเลทนั้นสามารถมองให้เป็นวงจรขยายชนิดทรานคอนดักแตนซ์ (Transconductance Amplifier) ได้ โดยมีค่าเกนขยายเป็น  $g_m = IC/V_{BE}$  จะสามารถทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Deriving for Transfer Function) โดยไม่นำวงจรขยายความผิดพลาดมาคิดรวมด้วย จากรูปที่ 3 ดังนี้

$$V_{OUT} = \frac{g_m \cdot R_{LOAD} \cdot (1 + sZ_1)}{(1 + sP_1)} \cdot \frac{R_{UPP}}{(R_{UPP} + R_{LOW})}$$

โดยที่  $Z_1 = R_{ESR} \cdot C_{OUT}$  และ  $P_1 = (R_{LOAD} + R_{ESR}) \cdot C_{OUT}$  สมการง่าย ๆ นี้สามารถที่จะวิเคราะห์ถึงความเสถียรของระบบและทำให้ทราบได้ว่าค่าตำแหน่งโพลและซีโรจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางด้านสัญญาณรบกวนเพียงใด สมการนี้ยังสามารถบอกได้ว่าตัวระบบมีค่าโพลเพียงค่าเดียวที่เกิดจาก  $C_{OUT}$  ซึ่งเป็นโพลที่สำคัญมาก ถ้าหากขาดตัวเก็บประจุตัวนี้แล้ว จะทำให้ระบบมีความเสี่ยงที่จะทำการควบคุมสัญญาณรบกวนไม่ได้ ค่า ESR ของตัวเก็บประจุนี้มีค่าสำคัญมากเช่นกัน ค่า ESR บางค่าจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ถ้าค่านี้มีค่ามากเกินไปประสิทธิภาพของระบบก็จะลดลง บริษัทไมโครโรลามักจะแนะนำค่า ESR ของตัวเก็บประจุให้อยู่ในช่วงไม่กี่สิบลิลลิโอห์มจนถึงห้าโอห์ม

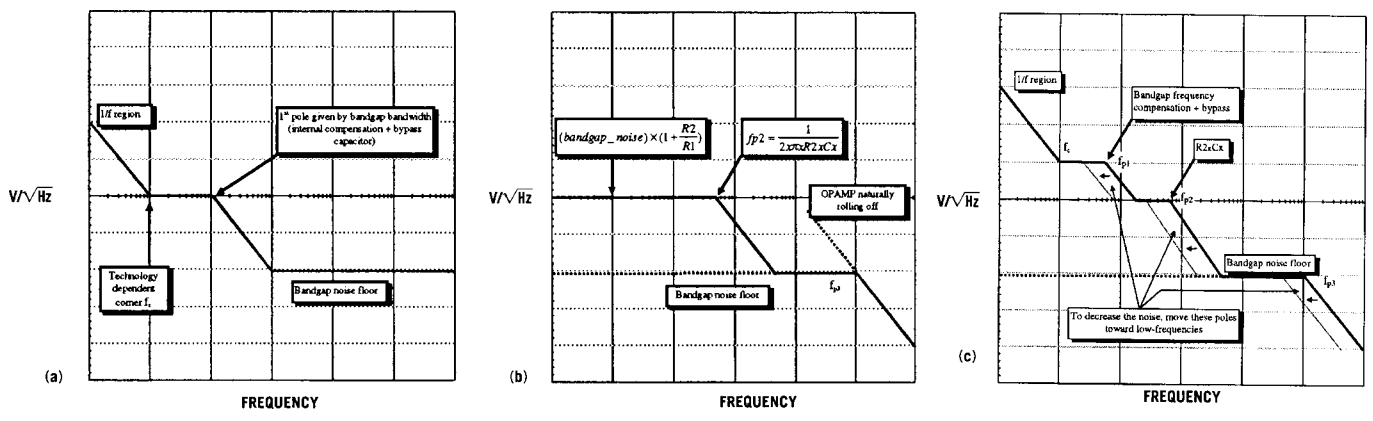
หรือในตาข่ายซีพของเรกกูเลเตอร์จะบอกวิธีการชดเชยค่าต่างๆให้กับตัวเรกกูเลเตอร์ในการนำไปใช้งานที่ค่อนข้างละเอียดเพื่อให้ระบบสามารถจ่ายไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ขึ้นกับประสิทธิภาพของโหลด

**สัญญาณรบกวนชนิดต่างๆและวิธีการลดสัญญาณรบกวน**

การศึกษาลักษณะของสัญญาณรบกวนในเรกกูเลเตอร์ ทำได้ด้วยการแยกตัวเรกกูเลเตอร์ออกเป็นสองส่วน คือส่วนอ้างอิงแรงดันแบนด์แคป และส่วนวงจรขยายความผิดพลาด สัญญาณรบกวนแบ่งได้สองชนิดตามลักษณะกระแสไฟคือ สัญญาณรบกวนชนิดไฟตรง จะถูกส่งป้อนออกไปกับแรงดันเอาต์พุต ส่วนสัญญาณรบกวนชนิดไฟสลับซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่สำคัญที่ป้อนออกไปกับแรงดันเอาต์พุตเหมือนกัน และจะส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

วงจรวจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อสัญญาณรบกวนที่แผ่มาจากแรงดันไฟเลี้ยงสูง คือวงจรวจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันในย่านความถี่คลื่นวิทยุ (RF Voltage Controlled Oscillator :RF VCO) เนื่องจากความถี่ที่กำเนิดโดย วงจร RF VCO นั้น จะขึ้นกับแรงดันที่ใช้ควบคุม ถ้าหากแรงดันนี้มีสัญญาณรบกวนปนอยู่ ความถี่ที่วงจรวจรกำเนิดออกมา จะมีความถี่ที่รบกวนปนออกมาด้วย สัญญาณรบกวนเหล่านี้มีที่มาจากหลายแหล่งต่างกัันดังนี้

- - สัญญาณรบกวนจอนั่นสั้น หรือ
- สัญญาณรบกวนขาวหรือ สัญญาณรบกวนความรอน (Johnson Noise or White Noise or Thermal Noise) เกิดจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มตามอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านไปมาตามตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้าของส่วนใด ๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น กระแสที่ผ่านเข้าออกขาเบสของทรานซิสเตอร์หรือกระแสในตัวต้านทานที่ใช้ไบอัสทรานซิสเตอร์ สเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum) ของสัญญาณรบกวนนี้จะมีลักษณะที่เรียบอย่างต่อเนื่องไปจนถึงความถี่ที่พอค่าหนึ่ง หรือกล่าวได้ว่าทุกๆฮาร์โมนิกของสัญญาณรบกวนจะมีค่าพลังงานเท่ากันอย่างต่อเนื่องตลอดย่านสเปกตรัมไปจนถึงความถี่ที่ระบบยังทำงานได้อยู่
- - สัญญาณรบกวนฟลิคเกอร์ (Flicker Noise) หรือ สัญญาณรบกวน 1/f (1/f Noise) จะให้ระดับสัญญาณรบกวนเป็นเส้นกราฟที่มีความชัน 1/f มีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ระดับของสัญญาณรบกวนนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพในกระบวนการการผลิต
- - สัญญาณรบกวนช็อต (Shot noise) เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อสารกึ่งตัวนำอย่างไม่ต่อเนื่อง ค่ากระแสไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่ากระแสเฉลี่ยอยู่เสมอ สัญญาณรบกวนแบบช็อตนี้ถือได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวนแบบขาวชนิดหนึ่งที่ทำให้สเปกตรัมกำลังที่ต่อเนื่องและคงที่ แต่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆตามเวลา
- สำหรับเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำที่นำไปใช้งานในวงจรที่มีย่านความถี่ต่ำ สัญญาณรบกวนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือสัญญาณรบกวน 1/f ซึ่งมีผลมากที่สุด แต่เทคโนโลยีมีความเจริญก้าวหน้าจนวงจรวจรอิเล็กทรอนิกส์มีความถี่ในการทำงาน fC (Technology Dependent Corner Frequency) กว้างออกไปมาก ก็จะเริ่มเห็น



รูปที่ 4 : สเปกตรัมสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากส่วนอ้างอิงแรงดันแบนด์แก๊ป a) แสดงสเปกตรัมที่ลดลงด้วยความชัน 1/f, จุดหักมุมที่ความถี่  $f_c$  และค่าโพลของวงจรแรงดันอ้างอิงแบนด์แก๊ป b) แสดงโพลที่เพิ่มเข้าไป  $f_{p2}$  และ  $f_{p3}$  ที่เกิดมาจากวงจรรบายความผิดพลาด c) สเปกตรัมรวมของสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำที่เกิดจากการรวมรูปสเปกตรัมของ a และ b เข้าด้วยกัน

ความสำคัญของสัญญาณรบกวนขาวที่เด่นชัดกว่าสัญญาณรบกวน 1/f

รูปที่ 4a แสดงให้เห็นลักษณะของสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากส่วนของแรงดันอ้างอิงแบนด์แก๊ปของเรกกูเลเตอร์ สัญญาณรบกวนจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆตามความถี่จนถึงค่า  $f_c$  ส่วนค่าโพล  $f_{p1}$  ที่เกิดจากแบนด์วิดท์ของวงจรรองแรงดันแก๊ป ซึ่งนำออกแบบเรกกูเลเตอร์จะออกแบบเพื่อกำหนดจุดนี้ไว้ภายในตัวเรกกูเลเตอร์อยู่แล้ว และจะต้องควบคุมเพิ่มเติมโดยมักออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ตัวเก็บประจุต่อบายพาสไว้ภายนอกเพื่อปรับค่าตำแหน่งโพลให้อยู่ในความถี่ที่เหมาะสม ถ้าหากใช้ตัวเก็บประจุบายพาสด้วยค่าที่มากเพียงพอ ตัวเก็บประจุ

จะลดแบนด์วิดท์การทำงานของเรกกูเลเตอร์ ทำให้สัญญาณรบกวนมีกำลังลดน้อยลงไม่ได้ ส่วนที่สำคัญที่สุดของสเปกตรัมสัญญาณรบกวนคือ ระดับพื้นของสัญญาณรบกวนของแรงดันอ้างอิงแบนด์แก๊ป (Band Gap Noise Floor)

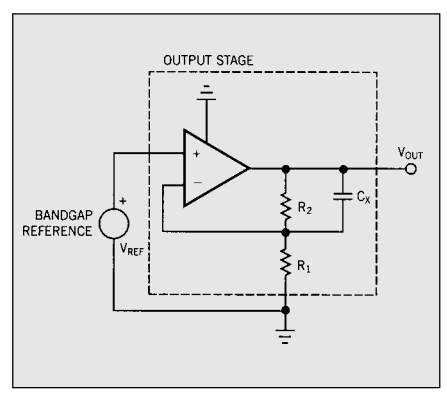
ควรวีล่องมาดูสัญญาณรบกวนที่ภาคเอาต์พุตทุกกันบ้าง ในรูปที่ 5 แสดงถึงการต่อแรงดันอ้างอิงเข้ากับวงจรรบายแบบง่ายๆ ภาคขยายที่ใช้วงจรรบายความผิดพลาดแบบง่ายๆ มีเกนขยาย  $1+R_2/R_1$  ก็จะไปขยายสัญญาณรบกวนด้วย แต่ตอนนี้จะให้กำลังใจในอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภทความถี่ต่ำ เกนขยายจึงไม่มีความจำเป็นต้องทำงานในความถี่ที่สูงมากนัก การใช้  $C_x$  ต่อรวมกับ  $R_2$  จะทำให้เกิดโพลที่สอง ณ ตำแหน่ง  $f_{p2}$  ทำให้เกนขยายมีค่าลดลง ดังในรูปที่ 4b หรืออาจจะอธิบายได้ง่ายๆ ว่าที่ความถี่สูงกว่า  $1/2PR_2C_x$  ตัวออปแอมป์จะทำหน้าที่เหมือนวงจรติดตามแรงดัน (Voltage Follower Circuit) (มีเกนขยายเท่ากับ 1) และโดยโครงสร้างของออปแอมป์ที่นำมาใช้จะสามารถทำงานได้ถึงย่านความถี่ที่สูงได้ไม่เกินค่าหนึ่งค่าเอาต์พุตจึงหักตกลงมา เกิดเป็นจุดโพลที่สาม  $f_{p3}$  ขึ้นมา สเปกตรัมของสัญญาณรบกวนทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถดูได้ในรูปที่ 4b

ส่วนรูปที่ 4c เป็นการรวมเอาสเปกตรัมสัญญาณรบกวนของแรงดันแก๊ปอ้างอิงในรูปที่ 4a เข้ากับสเปกตรัมสัญญาณรบกวนของภาคขยายเอาต์พุต รูปที่ 4b เข้าด้วยกันเป็นกราฟรูปเดียวกัน

จากเส้นกราฟสเปกตรัมสัญญาณรบกวนนี้ สามารถทำให้นักออกแบบพอมิแนวทางที่จะจัดการกับสัญญาณรบกวนให้มีค่าน้อยลงได้ เช่น

- การลดค่าความถี่  $f_c$  นานี้เสียด้วยวิธีการนี้ทำไม่ได้ในเชิงปฏิบัติ เพราะค่า  $f_c$  ถูกกำหนดโดยกรรมวิธีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ปัจจุบันยังใช้กระบวนการทางสารกึ่งตัวนำอยู่ ถ้าหากในอนาคตมีกระบวนการผลิตอื่นที่ดีกว่าในปัจจุบันนี้ ค่า  $f_c$  ก็จะมีค่าลดลงได้

- ลดระดับสัญญาณรบกวนที่ปนออกมาจากส่วนของแรงดันแก๊ปอ้างอิง วิธีการนี้ไม่มีประโยชน์กับผู้ทำไอซีเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำไปใช้ เพราะขั้นตอนนี้เป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบไอซี ซึ่งผู้ออกแบบไอซีจะต้องให้ความเอาใจใส่ต่อขั้นตอนของการออกแบบและเลือกสรรคแบบโมดูลทรานซิสเตอร์จิวที่มีคุณภาพมาใช้เป็นส่วนประกอบทางขาเบส ณ จุดทำงานต่ำ และชาคอลลีเกเตอร์มีความสามารถรับกระแสสูงทั้งในวงจร



รูปที่ 5 : วงจรเสมือนอย่างง่ายที่ใช้วิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณรบกวน โดยวงจรรบายความผิดพลาดจะขยายสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบนด์แก๊ปด้วยเกน  $1+R_2/R_1$  ส่วน ค่า  $C_x/R_2$  จะเป็นตัวที่สร้างโพล  $f_{p2}$

กำเนิดแรงดันเก็บอย่างอิง และวงจรรักษาเอาท์พุท

- ลดแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแรงดันเก็บอย่างอิงให้น้อยลง โดยใช้วิธีการต่อคาปาซิเตอร์บายพาสไว้ภายในเพื่อชดเชยความถี่

- ขยับโพล  $f_{P2}$  ไปทางด้านความถี่ต่ำด้วยการเพิ่มค่าคงที่เวลา (Time Constant)  $C_1 R_1$  แต่ถ้านักออกแบบเลือกใช้วิธีการเพิ่มค่า  $R_2$  ให้มีคามากจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal Noise) มากขึ้นจึงควรที่จะใช้วิธีการเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์จะดีกว่า แต่วิธีการเพิ่มค่า  $C_1$  ในไอซีก็ยังติดข้อจำกัดเช่นกัน

เนื่องจากกินพื้นที่ในไอซีมาก และสิ้นเปลืองต้นทุนสูง วิธีการนี้ถ้าหากจะทำได้ก็ทำได้เพียงแค่นำความถี่ขยับไปไม่กี่สิบกิโลเฮิรส์ก็ยากแล้ว จึงมักจะนิยมให้คำแนะนำในการต่อคาปาซิเตอร์บายพาสเพิ่มเติมไว้ภายนอก

- พยายามเลือกใช้โอปอแอมป์ในตัวเรกกูเลเตอร์ที่มีแบนด์วิดท์แคบ โดยเฉพาะเมื่อต้องนำไอซีเรกกูเลเตอร์ ไปจ่ายไฟให้กับระบบที่มีแบนด์วิดท์กว้างกว่า 500 กิโลเฮิรส์ แต่ถ้านักออกแบบมีแบนด์วิดท์แคบกว่า 100 กิโลเฮิรส์ ก็ไม่มีความจำเป็นต้องใช้เรกกูเลเตอร์ที่มีส่วนประกอบเป็นโอปอแอมป์แบนด์วิดท์แคบ

การบอกสเปคของสัญญาณรบกวน คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนขาวอย่างหนึ่งคือ พลังงานที่มีอยู่ในตัวสัญญาณรบกวนจะมีค่าเท่าๆ กันตลอดย่านความถี่ที่สนใจ ซึ่งในทางทฤษฎีจะพบว่า ถ้าหากนำพาวเวอร์มิเตอร์มาทำการวัดที่ความถี่ต่างๆ ก็จะได้พบว่ามีสัญญาณรบกวนในระดับเท่าๆ กัน แต่ถ้าสัญญาณรบกวนนั้นมิใช่สัญญาณรบกวนขาวเพียงอย่างเดียว อาจจะเป็นเพราะมีสัญญาณรบกวนอย่างอื่นปนมาด้วย ค่าความแรงของสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่างๆ ตลอดย่านสเปคตรัมที่สนใจจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นกำลังของสัญญาณรบกวนรวมจะทราบได้ ก็ต่อเมื่อต้องกำหนดย่านแบนด์วิดท์ที่สนใจไว้ด้วย โดยวิธีการนี้ การบอกขนาดของสัญญาณรบกวนจะบอกเป็นความหนาแน่นกำลังสัญญาณรบกวน (Noise Power Density) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเฮิรส์ (W/Hz) หรือถ้าได้เห็นสัญญาณรบกวนที่ชัดเจนสมบูรณ์ในโดเมนเวลา กำลังของสัญญาณรบกวนหาได้จากค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Value) (MSV) โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$MSV = \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt$$

เมื่อ  $f(t)$  เป็นขนาดแรงดันสัญญาณรบกวน

ดังนั้นการบอกปริมาณสัญญาณรบกวน มีจุดสำคัญอยู่ 3 ประการคือ

ประการแรก เนื่องจากความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่าไม่คงที่ตลอดช่วงสเปคตรัมที่ใช้งาน ดังนั้น การบอกความหนาแน่นสัญญาณรบกวนของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ จะต้องบอกความถี่ให้มาด้วย เช่น “ระบบนี้ต้องการเรกกูเลเตอร์ที่มีความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนไม่เกิน 200 nV/Hz ที่ความถี่ 1 kHz”

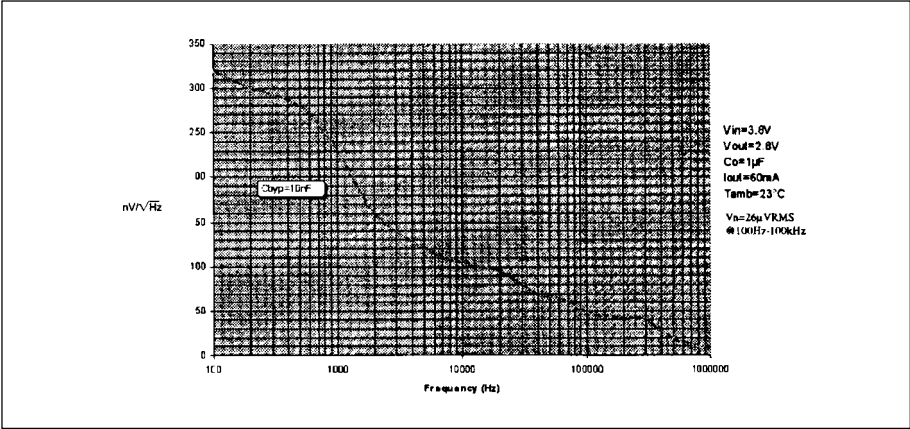
ประการที่สอง การบอกระดับกำลัง RMS ของสัญญาณรบกวนโดยไม่บอกแบนด์วิดท์และขีดจำกัดต่ำสุดให้ จะทำให้คลุ้มเคลือวาระดับความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนมี

ค่าที่เท่าไร ซึ่งข้อมูลนี้สำคัญต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แบนด์วิดท์กว้าง เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำควรจะให้ระดับสัญญาณรบกวนได้ที่ “ 100 pVRMS ที่แบนด์วิดท์น้อยกว่า 100 Hz จนถึง 1 MHz ที่ขนาดกระแสเอาท์พุท 50 mA”

ประการที่สาม กราฟพล็อตระหว่างความหนาแน่นสัญญาณรบกวนกับความถี่สามารถที่จะประมาณกำลังสัญญาณรบกวนของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำได้ แต่ไม่ว่าจะเป็นกราฟรูปแบบใด ถ้าหากว่าไม่มีการโด่งขึ้นมาของเส้นกราฟที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งก็เป็นสิ่งที่บอถึงคุณภาพของเรกกูเลเตอร์ได้ว่าค่อนข้างดีเป็นอย่งน้อย เช่นในรูปที่ 6 เป็นกราฟแสดงความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำเบอร์ MC33263

**เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำเป็นสิ่งที่กำหนดประสิทธิภาพของ VCO**

วงจรรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator) (VCO) เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อการส่งคลื่นวิทยุ ประสิทธิภาพของ VCO ที่เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนอยู่ในส่วนของความบริสุทธิ์ของสัญญาณที่ส่งออกอากาศหรือความไวของภาครับในเครื่องรับ หรือสัญญาณรบกวนหรือฮัมที่ปรากฏในเครื่องรับ



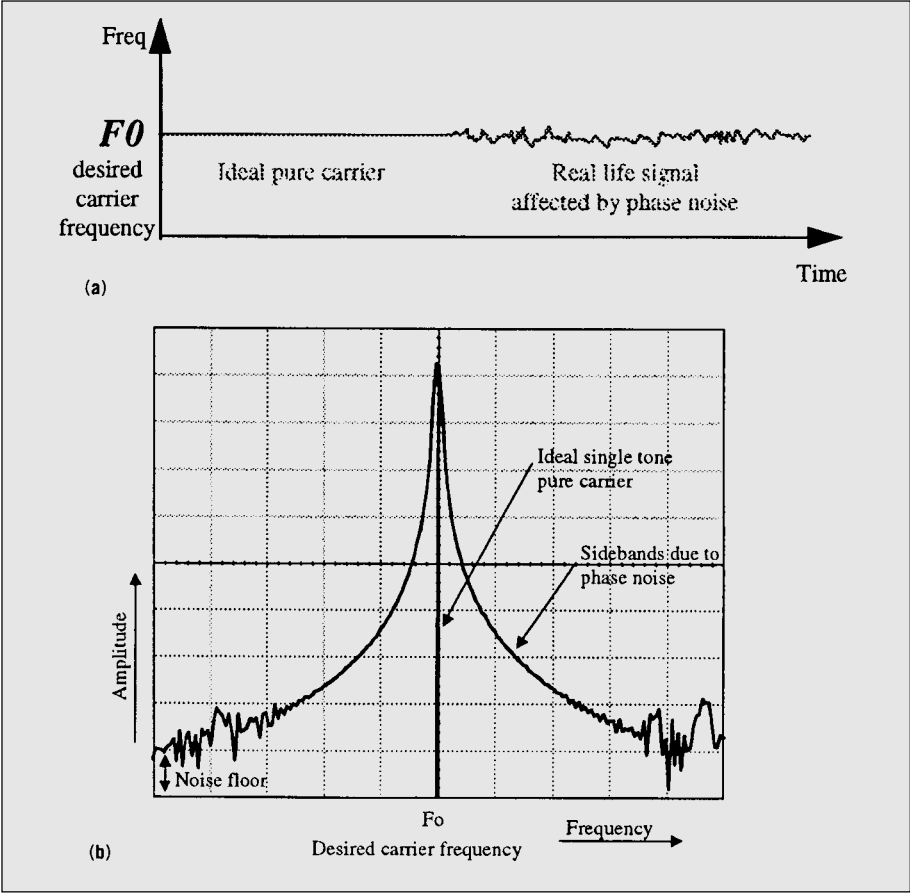
รูปที่ 6 : กราฟแสดงความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนของ เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ เบอร์ MC33263 ของบริษัทโมโตโรล่าสำหรับใช้ในอุปกรณ์สื่อสาร

ส่งนาฬิกา หรือความผิดพลาดการมอดูเลชันทางเฟสในระบบดิจิทัล นักออกแบบบางคนเลือกที่จะใช้ VCO ที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวนภายนอกสูง เพื่อสร้างวงจรรีฟิเตอร์สัญญาณราคาประหยัดหรือสร้างเครื่องรับความไวสูง ถ้าต้องการเข้าใจว่าสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของ VCO หรือสัญญาณรบกวนสามารถทำลายระบบสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุได้อย่างไร จะต้องศึกษากันเป็นเรื่องราวใหญ่โตแต่เราก็ไม่ได้ยากที่จะสรุปเป็นเรื่องสั้นๆให้เข้าใจได้

สัญญาณรบกวนสามารถส่งผลต่อเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณที่ออกมาจาก VCO หรือกล่าวง่ายๆคือ การมอดูเลตสัญญาณความถี่ที่ออกมาจากออสซิลเลเตอร์ใน VCO ด้วยสัญญาณรบกวนแบบสุ่มทั้งแบบ เอเอ็ม และ เอฟเอ็ม รูปที่ 7a แสดงให้เห็นว่า สัญญาณที่ออกมาจากออสซิลเลเตอร์จะมีความถี่ไม่คงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงไปรอบๆ ความถี่ค่าๆ หนึ่ง หรือรูปที่ 7b แสดงให้เห็นถึงสัญญาณเดียวกันแต่มองในโดเมนความถี่ ถ้าสัญญาณที่ออกมาจากออสซิลเลเตอร์ไม่มีสัญญาณรบกวนทางเฟสเข้ามา ภาพที่ได้ก็จะเป็นเส้นตรงแนวตั้งเพียงเส้นเดียวที่ความถี่ของออสซิลเลเตอร์ แต่ถ้ามีสัญญาณรบกวนทางเฟสเข้ามา ก็จะปรากฏให้เห็นเป็นเส้นความชันที่มีลักษณะเป็นภูเขาโดยมีจุดยอดของภูเขาอยู่ที่ตำแหน่งความถี่ออสซิลเลเตอร์

**ผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อ VCO**

VCO เป็นวงจรมีแหล่งกำเนิดแอมพลิจูดอยู่ในหมวกมากมายไม่ว่าจะเป็นสัญญาณรบกวนความรอน, สัญญาณรบกวนฟลิคเกอร์ หรือ สัญญาณรบกวนเฟส ซึ่งจะให้สัญญาณรบกวนมอดูเลตออกมากับคลื่นพาหะที่เป็นเอาท์พุท การศึกษาสัญญาณรบกวนประเภทนี้ด้วยกรรมวิธีเชิงเส้น สามารถศึกษาได้ด้วย



รูปที่ 7 : ความถี่ขาออกของออสซิลเลเตอร์ที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่ผ่านเข้ามาทางไฟเลี้ยงโดยมองในรูปของ a) โดเมนเวลา b) โดเมนความถี่

ชุดสมการของลีสัน (Leeson's Equation) ส่วนชุดโมเดลของลีสันแบบใหม่ (Enhance Leeson's Equation) จะใช้วิธีการศึกษาด้วยวิธีที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณรบกวนประเภทฟลิคเกอร์ ซึ่งเกิดมาจากอุปกรณ์แบบแอ็คทีฟ หรือบางครั้งก็มาจากอุปกรณ์แบบพาสซีฟก็ได้เช่นกัน โมเดลของลีสันแบบใหม่สามารถแสดงให้เห็นถึงสัญญาณรบกวนแบบ  $1/f$ ,  $1/f^2$  และ  $1/f^3$  ได้ และยังใช้ความสัมพันธ์ของผลกระทบอย่างรุนแรงที่สัญญาณรบกวนมีต่อค่า Q ที่ความถี่เรโซแนนซ์ในวงจรมีการป้อนกลับ และใช้ผลกระทบที่มีต่อกำลังเอาท์พุทจากสัญญาณรบกวนแบบฟลิคเกอร์

ในย่อหน้านี้ สัญญาณรบกวนที่สำคัญในวงจรขยายคือสัญญาณรบกวนจากวาเรกเตอร์ไดโอด (Varactor Diode) และสัญญาณรบกวนพูซซิง (Pushing Noise)

(จะได้กล่าวต่อไป) การออกแบบ VCO ปริมาณมากๆ เช่น VCO ที่ใช้ในโทรศัพท์ไร้สายหรือ โทรศัพท์มือถือ จะต้องออกแบบให้ได้ราคาถูกและมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดได้ ซึ่งจุดที่จะใช้รับความเหมาะสมระหว่างราคาและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนคือพารามิเตอร์ในส่วนของวงจรรزونที่เรียกว่าอัตราจูน (Tuning Slope) ซึ่งปกติจะมีค่าราวๆ 100 MHz/V หมายความว่าเพียงแต่ใช้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงเพียงแค่ 1 โวลท์ก็จะสามารถควบคุมความถี่ให้เปลี่ยนไปได้ถึง 100 เมกะเฮิร์ต ซึ่งดีกว่า VCO สมัยก่อนที่ต้องใช้แรงดันถึง 10 โวลท์ ทำให้มีความต้องการใช้วงจร DC/DC Converter ที่เป็นการสิ้นเปลือง แต่อย่างไรก็ดี ถ้าออกแบบให้มีค่าเกณฑ์ขยายมากเกินไป ก็อาจจะโดนรบกวนจาก สัญญาณรบกวนภายนอกที่แผ่มาทับ

แรงดันควบคุมความถี่ได้โดยง่าย

วาระคเตอร์ไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของ VCO เป็นไดโอดที่มีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ประจุไฟฟ้าภายในไปตามแรงดันเพื่อเป็นพื้นฐานการสร้างความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันของ VCO ได้ วาระคเตอร์ไดโอดก็มีค่าความต้านทานเสมือนโดยมีค่าประมาณหลักสิบกิโลโอห์ม ซึ่งก็จะสร้างสัญญาณรบกวนความร้อนออกมาเช่นกัน โดยเฉพาะการใช้นวาระคเตอร์ไดโอดมีความจำเป็นต้องต่อตัวต้านทานทำการไบอัสกระแสภายนอกด้วย จุดนี้ก็ต้องระวังเพราะว่าถ้าหากการออกแบบไม่ดี สัญญาณรบกวนความร้อนจะเสริมกันอย่างไม่เห็นได้ชัด

ตอนนี้ขอแนะนำสัญญาณรบกวนในระบบซิงเกิลไซด์แบนด์ (N) โดยเป็นสัญญาณรบกวนวัดที่ความถี่ที่ออกมาจากความถี่พาหะหรือออฟเซ็ท  $f_m$  มีหน่วยเป็นเดซิเบลเทียบกับความแรงคลื่นพาหะ (dBc) ดังนี้

$$N(f_m) = 20 \log \left[ \frac{K_0 \sqrt{4KT_0R}}{\omega^2 f_m} \right]$$

โดย  $K_0$  เป็นค่าเกณฑ์ของ VCO ในหน่วย  $H_z/V$

$K$  เป็นค่าคงที่โบลต์ซมาน (Boltzmann's Constant)

$T_0$  เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

ยกตัวอย่างเช่น ใน VCO มีค่าความต้านทานในระบบทั้งหมด  $R=10KW$ ,  $f_m=100kHz$  และ  $K_0=20 MHz/V$  ดังนั้น  $N(100kHz) = -115dBc/H_z$  ซึ่งเป็นค่าที่มากเกินไปในการนำไปใช้กับระบบโทรศัพท์ GSM ดังนั้นการเลือกใช้ VCO ที่มีค่าอัตราจูนที่ไม่สูงมากจนเกินไปจะทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนให้น้อยลงได้

คราวนี้ลองกลับมาพิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่มีสัญญาณรบกวนปนออกมา เมื่อนำ

แหล่งจ่ายไฟนี้ไปใช้กับ VCO ก็จะทำให้สัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟปนออกมาทางเอาต์พุตของ VCO สิ่งสำคัญที่สุดที่ทำให้สัญญาณรบกวนที่ออกมาจากแหล่งจ่ายไฟมีผลต่อ VCO ที่สุดคือ ผลของสัญญาณรบกวนที่ปนมากับไฟเลี้ยงในรูปแบบของการมอดูเลชันแบบ AM จะแปรเปลี่ยนเป็นความถี่ที่เปลี่ยนไปมาในรูปของการมอดูเลชันแบบ FM หรือเรียกว่า สัญญาณรบกวนเฟส (เรียกปรากฏการณ์ว่า ปรากฏการณ์พุชชิง Pushing Effect) โดยมีค่าเกณฑ์พุชชิง  $P$  (Pushing Gain) มีหน่วยเป็น  $H_z/V$  หมายความว่าค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปของ VCO เมื่อได้รับสัญญาณรบกวนผ่านเข้ามาทางไฟเลี้ยง 1 โวลท์ และ  $Sf_m$  คือปริมาณสัญญาณรบกวนที่ปนมากับแรงดันไฟเลี้ยงที่ความถี่  $f_0$  (ซึ่งออฟเซ็ทห่างจากความถี่พาหะอยู่  $f_m$  Hz) ก็จะสามารถทราบความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปมาของความถี่เอาต์พุตต่อแบนด์วิดท์จาก VCO ได้ดังนี้

$$D \cdot f_{rms} = P \cdot Sf_m$$

และสามารถเชื่อมโยงไปถึงความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดในหน่วยเรเดียนสำหรับแบนด์วิดท์ 1 เฮิรสต์ ได้ดังนี้

$$qf_m = \frac{\omega \cdot P \cdot Sf_m}{f_m}$$

และก็สามารถคำนวณหาสัญญาณรบกวนเฟสที่ความถี่ออฟเซ็ทห่างจากความถี่พาหะ  $f_m$  ได้

$$N(f_m) = 20 \log \frac{P \cdot Sf_m}{2 \cdot f_m}$$

จะเห็นได้ว่า การจะทำให้  $N(f_m)$  มีค่าลดลงจำเป็นต้องลดสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟ ( $Sf_m$ ) โดยการใช้วงจรกรอง RC เพื่อลดแรงดันริบเบิลที่มาจากไฟเลี้ยง แต่การใช้วงจร RC จะส่งผลถึงความเร็วในการตอบสนองต่อการกระชากกระแส ดังนั้น VCO จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่ เรกกูเล-

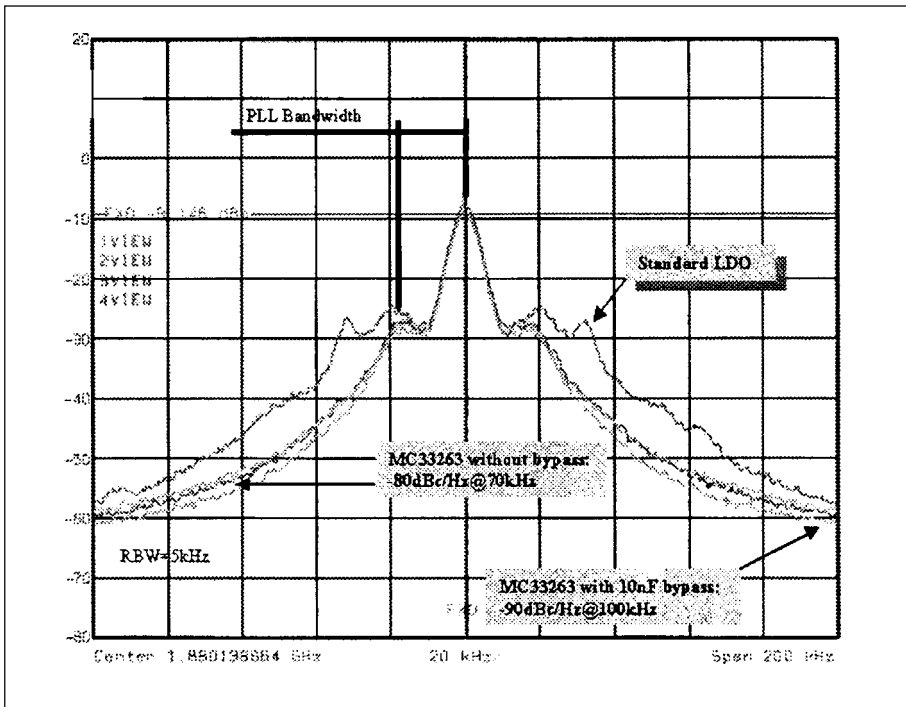
เตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำอย่างดี จึงจะเหมาะสมกว่า

### ผลกระทบที่ไฟเลี้ยงมีต่อเฟสล็อกลูป (Phase Locked Loop) (PLL)

วิธีการบอกคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนอีกวิธีหนึ่ง คือการบอกค่าคุณสมบัติของรูปร่างสัญญาณรบกวนในแบนด์วิดท์ที่ตรงกับความถี่แอสเตนบายด์ (Free Running Frequency) ของเฟสล็อกลูป (ซึ่งมี VCO เป็นส่วนประกอบอยู่ข้างใน) ที่ความถี่ใกล้เคียงความถี่แอสเตนบายด์นี้แน่นอนว่าระดับของสัญญาณรบกวนจะมีค่าอย่างต่ำที่ระดับพื้น สัญญาณรบกวนนี้ที่เกิดมาจากอุปกรณ์ต่างๆไปทำให้สัญญาณรบกวนออกมา แต่ที่ความถี่แอสเตนบายด์ควรจะเป็นความถี่ที่สะอาด คือเป็นเส้นดิ่งเพียงเส้นเดียวดังในรูปที่ 7b การเลือกใช้เรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำที่มีคุณภาพมาจ่ายไฟเลี้ยงให้กับ PLL ที่มี VCO เป็นส่วนประกอบอยู่ข้างใน จะทำให้เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะที่แคบและชันกว่า เนื่องจากมีแรงดันไฟที่เรียกว่า จึงทำให้ความถี่แอสเตนบายด์ของ PLL เบี่ยงเบนไปไม่มาก

ยกตัวอย่างในรูปที่ 8 เป็นการวัดระหว่างนำเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำไปใช้งานในโทรศัพท์ไร้สายระบบ DECT (Digital Enhance Cordless System) เป็นกราฟแสดงปริมาณสัญญาณรบกวนของเรกกูเลเตอร์

แรงดันตกคร่อมต่ำของโมโตโลรา MC33263 ซึ่งดูแล้วจะให้ค่าสัญญาณรบกวนที่น้อยกว่าเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าหากได้ต่อคาปาซิเตอร์บายพาสแล้วค่าของสัญญาณรบกวนก็จะลดน้อยลงไปอีก VCO ตัวนี้มีพุชชิงเกณฑ์ที่ 40  $MHz/V$  และมีค่าจูนหนึ่งเกณฑ์ 80  $MHz/V$  ที่ความถี่ 100  $kHz$  ได้รับความหนาแน่นสัญญาณรบกวนขนาด  $50nV/H_z^{1/2}$  จากไอ-



รูปที่ 8 : สัญญาณรบกวนเฟสที่กระจายออกจากความถี่แสดงขนาดไปรอบข้างต่างๆกัน ขึ้นกับคุณสมบัติทางด้านสัญญาณรบกวนของเรกกูเลเตอร์ที่เลือกใช้

ซีเรกกูเลเตอร์ MC33263 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากไฟเลี้ยงและวอแรกเตอร์ไดโอดจะมีค่าเท่ากับ  $-95 \text{ dBc}/\text{Hz}$  และ  $-103 \text{ dBc}/\text{Hz}$  ตามลำดับที่ความถี่ออฟเซ็ท  $100 \text{ kHz}$  ห่างจากความถี่พาหะ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเฟส  $-92 \text{ dBc}/\text{Hz}$  หรือ  $-55 \text{ dBc}/\text{Hz}$  ในมุมมองแบนด์วิดท์  $5 \text{ kHz}$  ซึ่งก็ตรงกับค่า  $-53 \text{ dBc}/\text{Hz}$  ในรูปที่ 8

ส่วนค่า Q ที่ถูกโหลดให้ลดต่ำลงหรือ สัญญาณรบกวน ฟลิคเกอร์ ที่คำนวณโดยชุดสมการใหม่ของลีสัน ก็สามารถให้ตัวเลขเป็นที่ยอมรับได้ ดังนั้นในอุปกรณ์สื่อสารไร้สายจึงต้องเอาใจใส่ต่อไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับ VCO โดยให้แน่ใจว่ามีแรงดันราบเรียบพอเพื่อจะไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการอีกได้

**แรงดันตกคร่อมและการวัดสัญญาณรบกวน**

กล่าวถึงเรื่องสัญญาณรบกวนของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำมากพอสมควร นอกเหนือจากเรื่องสัญญาณรบกวน

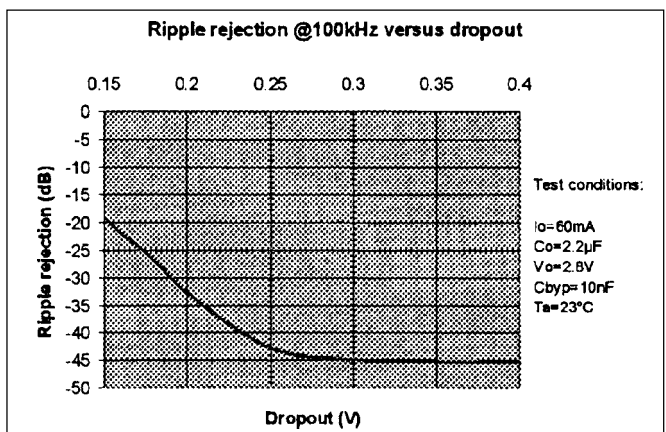
ที่เป็นเรื่องสำคัญสำหรับเรกกูเลเตอร์มากแล้วยังมีเรื่องของการขจัดสัญญาณรบกวนและความไวในการตอบสนองทางเวลา การขจัดสัญญาณรบกวนก็เป็นหนึ่งในเรื่องที่สำคัญสำหรับเรกกูเลเตอร์ทุกตัว ไม่ว่าจะเป็นเรกกูเลเตอร์ตัวนั้นจะเป็นชนิดแรงดันตกคร่อมต่ำหรือเป็นแบบที่มีสัญญาณรบกวนต่ำหรือไม่ โดยเฉพาะระบบที่ใช้งานจากพลังงานแบตเตอรี่ ซึ่งก็เห็นวงจรประเภทคอนเวอร์เตอร์กระแสตรง (DC/DC Converter) ไม่ได้ วงจรพวกนี้จะมีการกระชากกระแสเป็นช่วงๆ และให้เอาท์พุทที่มีริปเปิลเช่นกัน ถ้าหากมีการใช้เรกกูเลเตอร์กับแรงดันไฟ ไม่ว่าจะก่อนหรือหลังวงจรคอน

เวอร์เตอร์ หรือ ต่อหลังจากภาคฟิลเตอร์ในส่วนพาวเวอร์ซัพพลายปกติ ค่าแรงดันริปเปิลที่อินพุทของเรกกูเลเตอร์ ก็ไม่ควรจะไปปรากฏที่ส่วนเอาท์พุทของเรกกูเลเตอร์ ถ้าเรกกูเลเตอร์มีการขจัดริปเปิลที่ดีแล้วก็จะส่งผลไปถึงวงจรส่วนอื่นๆเหมือนกับได้ซีลด์สัญญาณรบกวนที่มาจากภาคจ่ายไฟไปในตัว

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งของเรกกูเลเตอร์คือ แรงดันตกคร่อมใช้งาน พารามิเตอร์ตัวนี้มีผลต่อเนื่องไปถึงพารามิเตอร์ตัวแรกหรือการขจัดสัญญาณรบกวนรบกวนรบกวน ดังนั้นการบอกพารามิเตอร์การขจัดสัญญาณรบกวนรบกวนรบกวน จำเป็นต้องบอกด้วยว่าในขณะที่ทำการวัดนั้น ใช้แรงดันตกคร่อมตัวเรกกูเลเตอร์เท่าใด เนื่องจากเรกกูเลเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานอนุกรมที่แปรค่าได้ ดังนั้นการใช้งานในลักษณะแรงดันตกคร่อมสูงจะเสมือนว่าความต้านทานค่านี้นี้จะมีค่ามากกว่าลักษณะการใช้งานแบบแรงดันตกคร่อมต่ำ จึงทำให้สามารถสกัดกันหรือแบ่งแรงดันริปเปิลไม่ให้ผ่านไปทางเอาท์พุทได้ดีกว่าการใช้งานแบบแรงดันตกคร่อมต่ำดังในรูปที่ 9

**อย่าไปหลงติดกับความเร็วยกเรกกูเลเตอร์มากเกินไป**

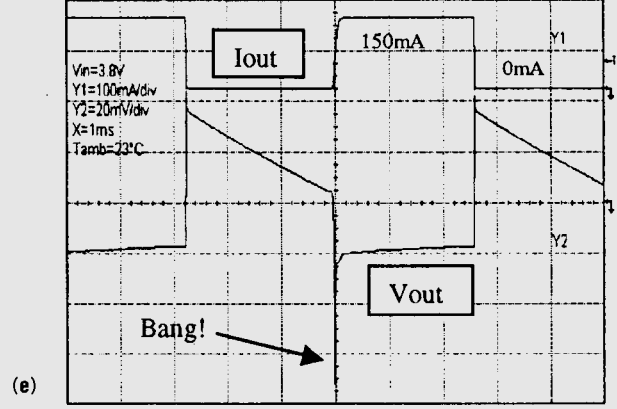
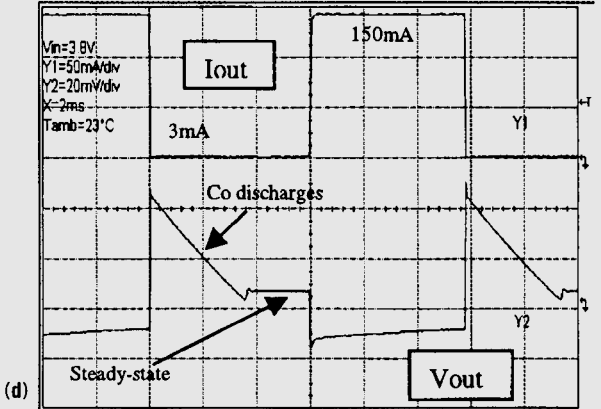
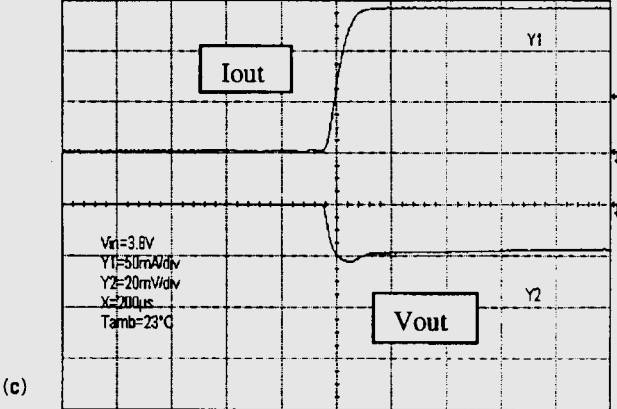
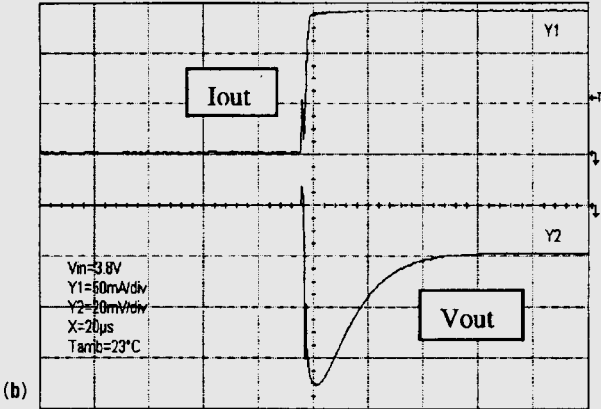
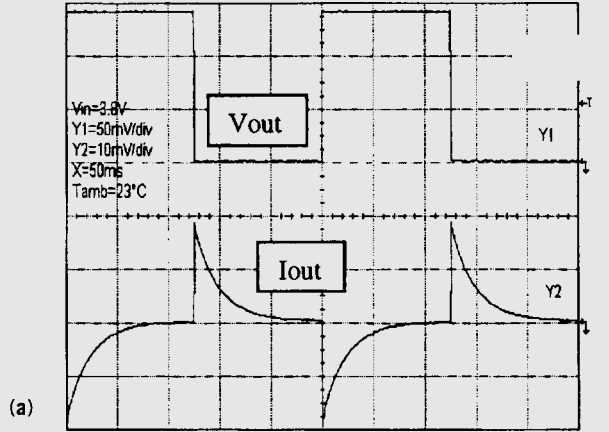
คุณสมบัติการตอบสนองทางเวลาของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ มาจากพารามิเตอร์หลายตัว เช่น แบนด์วิดท์ลูปปิด (Closed Loop Bandwidth) และ มาร์จิ้นเฟส (Phase Margin) และยังมี



รูปที่ 9 : การใช้งานเรกกูเลเตอร์ที่แรงดันตกคร่อมต่ำทำให้การขจัดสัญญาณรบกวนรบกวนรบกวนที่มีความถี่ 100 KHz มีค่าเฉลี่ย



รูปที่ 10 : ผลตอบสนองทรานส์เซียนของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำ  
 a) รูปคลื่นการตอบสนองปกติ b) ผลตอบสนองขณะมีการกระชากกระแส 100 mA/μs  
 c) ผลตอบสนองขณะมีการกระชากกระแส 2 mA/μs  
 d) ผลตอบสนองของเรกกูเลเตอร์ที่ได้ออกแบบกระแสเลี้ยงวงจรไว้ 3mA  
 e) ผลตอบสนองของเรกกูเลเตอร์ที่ไม่ได้ออกแบบกระแสเลี้ยงวงจรไว้ 3mA และถูกดึงกระแสในช่วงเวลาดีสชาร์จ ทำให้เกิดอันเดอร์ชูทตามลพิษขึ้น



พารามิเตอร์ตัวรองที่มีความสำคัญอีกเช่น จุดอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเรกกูเลเตอร์, ปริมาณกระแสกระชากจากโหลด รวมไปถึงความไวของวงจรรขยายความผิดพลาดที่ไปอัสให้กับทรานซิสเตอร์

ในกรณีที่ต้องจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น (โหลดมีความต้านทานลดลง) กระแสที่เข้าที่เอาต์พุตของเรกกูเลเตอร์ วงจรรขยายความผิดพลาด

จะปลดการปรับการไปอัสไปสู่โหมดลูปเปิดก่อน ทำให้แรงดันเอาท์พุตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนวงจรรขยายความผิดพลาดจับความผิดพลาดได้ก็จะลดแรงดันเอาท์พุตอย่างรวดเร็ว และค่อยๆปรับค่าจนได้แรงดันที่ต้องการ เหตุการณ์ทำนองเดียวกัน แต่ไปกันคนละทิศทางเกิดขึ้นเมื่อปลดโหลด หรือลดโหลดที่ต่ออยู่กับ เรกกูเลเตอร์ลงเช่นกัน ดังในรูปที่ 10a

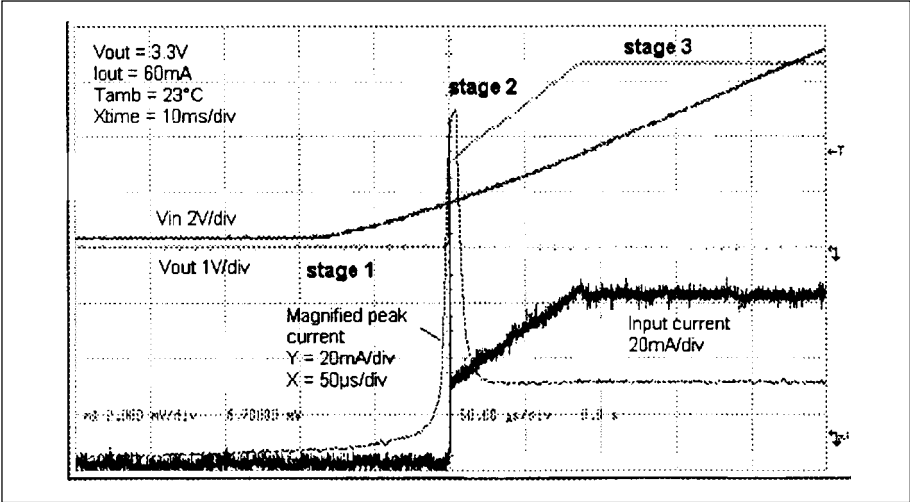
โดยกระแสส่วนเกินที่เกิดจากการชัตตาวานไม่ทันจะไปชาร์จคาปาซิเตอร์ที่ต่อบายพาสอยู่ทำให้เกิดเป็นแรงดันค้างที่มากกว่าแรงดันเรกกูเลต วงจรรขยายความผิดพลาดจึงคอยตัดกระแสที่ไปอัสทรานซิสเตอร์

วิธีการจะบอกคุณสมบัติการตอบสนองของทรานส์เซียน จะพิจารณากันที่ความชันของแรงดันเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงไป ความ

ชั้นยิ่งมากก็จะมีมีความไวในการตอบสนองที่ดี แต่ก็หมายความว่าในช่วงเวลานั้น จะมีฮาร์โมนิกของสัญญาณรบกวนออกมามากมาย ตรงนี้เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และไม่ใช่น้ำหนักรวมของเรกกูเลเตอร์ที่จะกำจัดสัญญาณเหล่านี้ เป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบวงจรเรกกูเลเตอร์ที่ต้องเพิ่มอุปกรณ์มาดูดซับฮาร์โมนิกสัญญาณรบกวนเหล่านี้ หรือจัดการกับโหลดเพื่อไม่ให้ดึงกระแสกระชากมากเกินไป **รูปที่ 10b และ 10c** โชว์ผลตอบสนองต่อกระแสที่กระชากที่ความชันน้อยและมาก

ส่วนรูปที่ 10d เป็นรูปสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสจาก 3mA ไปเป็น 150mA สลับกันไปมา โดยการตัดต่อที่โหลดกลับไปกลับมา กระแส 3 mA เป็นกระแสเฉลี่ยที่เกิดจากการต่อตัวต้านทานคร่อมเอาท์พุทของเรกกูเลเตอร์ กระแสเฉลี่ยนี้จะช่วยให้วงจรภายในเรกกูเลเตอร์ปรับตัวเข้าสู่สถานะคงตัวได้เร็วขึ้น และพร้อมที่จะสแตร์ทอีกครั้งเพราะว่าทรานซิสเตอร์ภายในได้รับการไบอัสไว้อย่างอ่อนๆ รอไว้อยู่แล้ว ส่วนสัญญาณรบกวนตอนปลดโหลดออกหรือลดกระแสจาก 150 mA เป็น 3 mA ก็ยังได้รูปสัญญาณในสเป็คที่ยอมรับได้

แต่ถ้าหากไม่มีกระแสเฉลี่ย 3mA นี้แล้ว ตัวเรกกูเลเตอร์จะต้องใช้เวลาดีสชาร์จแรงดันออกจากคาปาซิเตอร์ที่ต่อบายพาสอยู่เป็นเวลานานกว่าที่วงจรขยายความผิดพลาดจะเริ่มไบอัสทรานซิสเตอร์อ่อนๆ อีกครั้ง และถ้าหากว่ามีกระแสกระชากของโหลดเข้ามาตอนนี้ ก็จะเกิดอันเดอร์ชูทที่ดันลบขึ้น (เป็นสัญญาณรบกวนดังในรูปที่ 10e) เนื่องจากตอนที่เพิงปลดโหลดครั้งล่าสุดทำให้แรงดันเอาท์พุทสูงกว่าแรงดันเรกกูเลต และ เรกกูเลเตอร์ยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว วงจรขยายความผิดพลาดจะหยุดจ่ายกระแสให้กับทรานซิสเตอร์นั่นเอง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดอันเดอร์ชูท เมื่อมีการกระชากกระแสในช่วงเวลานี้



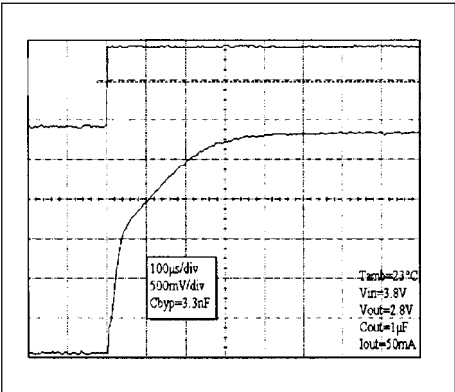
รูปที่ 11 : ช่วงการสแตร์ทสามช่วงของเรกกูเลเตอร์ปกติและแสดงให้เห็นถึงลักษณะของกระแสในขณะเข้าสู่ช่วงที่สอง

**ช่วงสแตร์ทของการจ่ายไฟเลี้ยงเข้าสู่เรกกูเลเตอร์**

เมื่อบ่อนไฟเลี้ยงเข้าสู่อินพุทของเรกกูเลเตอร์ที่มีคาปาซิเตอร์ต่อบายพาสอยู่ทางด้านเอาท์พุท และต่อโหลดไว้เรียบร้อยแล้ว การทำงานของเรกกูเลเตอร์ จะประกอบด้วยสามช่วงคือ ช่วงแรกจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเนื่องจากยังไม่มีบ่อนอินพุทให้กับเรกกูเลเตอร์ ในช่วงที่ 2 เมื่อเรกกูเลเตอร์ได้รับแรงดันอินพุทแล้ว เรกกูเลเตอร์จะทำหน้าที่เป็นวงจรติดตามแรงดันจะให้เอาท์พุทที่มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ไปตามอินพุท จนถึงค่าค่าหนึ่งที่เป็นค่าแรงดันเรกกูเลต ค่าแรงดันก็จะเริ่มคงที่ไปเรื่อยๆ แต่ในช่วงรอยต่อเวลาระหว่างช่วงที่ 1 กับ 2 จะมีกลิทซ์ (สัญญาณแคบๆ สูงๆ) ของกระแสเกิดขึ้น กระแสส่วนนี้เป็นกระแสที่นำไปชาร์จคาปาซิเตอร์บายพาส **รูปที่ 11** แสดงระดับสัญญาณของการสแตร์ทเรกกูเลเตอร์เบอร์ MC33263

**ช่วงสแตร์ทขณะออกจากโหมดชัตดาวน์**

เรกกูเลเตอร์บางตัวสามารถที่จะชัตดาวน์ได้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ในโหมดชัตดาวน์วงจรกำเนิดแรงดันเก็บอองอิงก็จะไม่ทำงานด้วย เมื่อเรกกูเลเตอร์ได้รับสัญญาณลลอกจากส่วนใดๆ ในระบบมาปลุก



รูปที่ 12 : ช่วงการสแตร์ทของเรกกูเลเตอร์แรงดันตกคร่อมต่ำจะขึ้นกับคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อเป็นบายพาสเป็นหลัก

ให้ออกจากโหมดชัตดาวน์ เรกกูเลเตอร์ต้องเสียเวลาในการรอให้ค่าแรงดันเก็บอองอิงเข้าสู่แรงดันคงตัวจึงจะเริ่มให้แรงดันที่คงที่ได้ **ในรูปที่ 12** แสดงรายละเอียดการสแตร์ทของ MC33263

เรกกูเลเตอร์ที่สามารถสแตร์ทได้เร็ว จะได้เปรียบและเป็นประโยชน์ต่อระบบที่ต้องการประหยัดพลังงานและมีการเปิดปิดเรกกูเลเตอร์บ่อยๆ เช่น VCO ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

