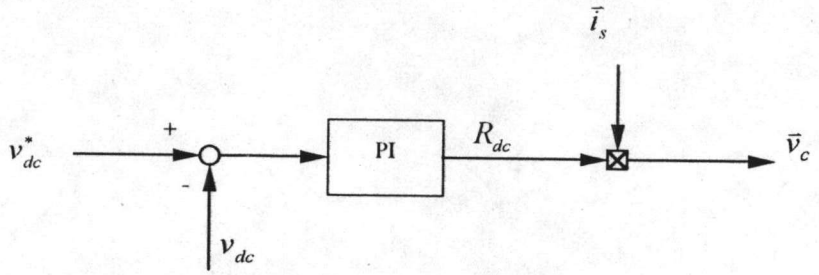
บทที่ 4

อินเวอร์เตอร์แบบไร้ส่วนป้อนแรงดันบัสไฟตรง

จากหลักการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม สำหรับการลดกระแสฮาร์มอนิกและการชดเชยค่าระดับแรงดันที่ตกคร่อมโหลดที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนนี้สรุปได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะกระทำตัวต่อกระแสฮาร์มอนิกเสมือนตัวต้านทาน และกระทำตัวต่อความถี่หลักมูลเสมือนตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำ ในส่วนการชดเชยแรงดันตกคร่อมโหลดนั้น เนื่องจากเวกเตอร์แรงดัน $\bar{v}_c$ ที่สร้างจะตั้งฉากกับเวกเตอร์กระแส $\bar{i}_c$ จึงทำให้ค่ากำลังงาน ณ เวลาใดๆ (instantaneous power) เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าจะไม่มีกำลังเข้าหรือออกจากอินเวอร์เตอร์เลย อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เพียงโอนย้ายกำลังงานรีแอกทีฟจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นระดับแรงดันบัสไฟตรงจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในส่วนนี้ สำหรับในส่วนการลดกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะมีกำลังงานไหลเข้าออกอินเวอร์เตอร์จริง กล่าวคือค่ากำลังงานณ เวลาใดๆไม่เป็นศูนย์ แต่ถ้าคิดค่ากำลังงานที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมใน 1 คาบเวลา จะได้ค่าเท่ากับศูนย์ จากหลักการดังกล่าวจึงทำให้วงจรในส่วนของอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมไม่จำเป็นต้องมีส่วนของวงจรเรียงกระแสสำหรับป้อนแรงดันบัสไฟตรงเหมือนอินเวอร์เตอร์ทั่วไป ในการสร้างแรงดันบัสไฟตรงที่จำเป็นในการทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะอาศัยการควบคุมพลังงานที่ถ่ายเทเข้าออกจากระบบ โดยในช่วงเริ่มต้นหรือในช่วงที่ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมก็จะถูกควบคุมให้ดึงพลังงานป้อนกลับเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ โดยที่อินเวอร์เตอร์จะทำการสร้างแรงดันให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมกระทำตัวต่อความถี่หลักมูลเสมือนค่าความต้านทาน R_{dc} เพื่อที่จะดึงพลังงานเข้าสู่ระบบ พลังงานที่ถูกดึงเข้าสู่ระบบจะถูกนำไปสะสมในตัวเก็บประจุทำให้ค่าระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงขึ้น ในขณะเดียวกันถ้าค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมก็จะกระทำตัวต่อความถี่หลักมูลเสมือนค่าความต้านทานที่เป็นลบ เพื่อที่จะจ่ายพลังงานออกไปจากอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าลดลง ดังนั้นเราสามารถที่จะเขียนส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะทำการป้อนกลับค่าแรงดันบัสไฟตรง v_{dc} เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง v_{dc}^{*} และทำการควบคุมผ่านตัวควบคุม PI ซึ่งการออกแบบค่าอัตราขยายนั้นจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

<u>การออกแบบส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง</u>

จากระบบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เราสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้โดยอาศัยหลักการทางด้านพลังงาน โดยค่าพลังงานที่ไหลเข้าสู่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะไหลเข้าไปเก็บยังตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ทำให้ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้น จากสมการพลังงานจะได้ว่า

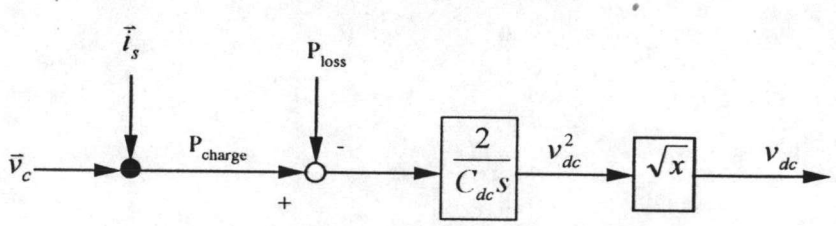
$$P_{charge} - P_{loss} = v_{dc}(t).i_{dc}(t) = v_{dc}(t).C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{C_{dc}}{2}\frac{d(v_{dc}^2)}{dt} \qquad (4.1)$$

ในที่นี้ P_{charge} = ค่ากำลังงานที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์

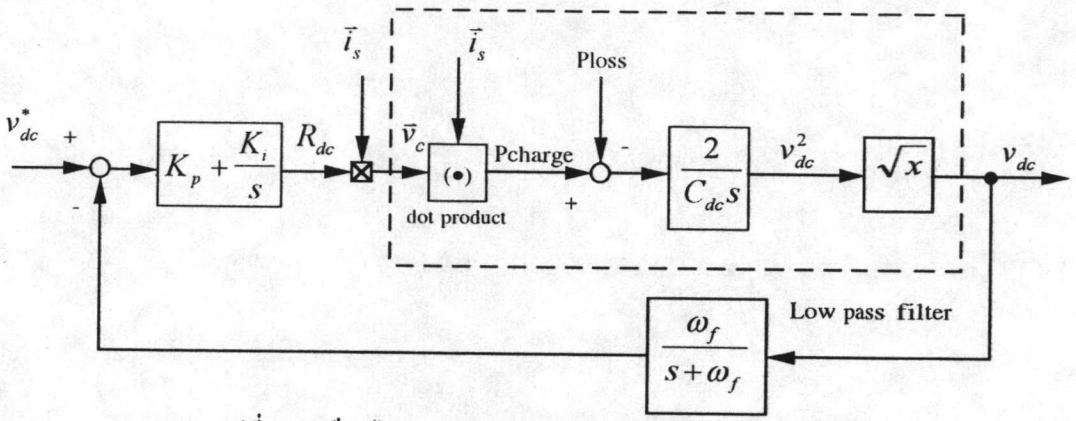
P_{loss} = ค่ากำลังงานสูญเสียต่างๆของอินเวอร์เตอร์

i_{dc} = ค่ากระแสที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์

จากสมการ (4.1) เราสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เป็นบล็อกไดอะแกรมตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 และเมื่อนำส่วนควบคุม วงจรกรองสัญญาณรบกวน และระบบอื่น ๆ รวมเข้าด้วยกันแล้วก็สามารถที่จะเขียนแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

จากส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง จะเห็นได้ว่ามีส่วนของการถอดรากที่สอง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ทำให้การออกแบบส่วนควบคุม PI มีความยุ่งยาก ดังนั้นเราจึงทำการแปลงส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น (linear) โดยจะทำการประมาณการถอดรากที่สองเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ณ จุดทำงานที่ v_{dc} = 200 (V) หรือ x_o=40000 (V^2) ซึ่งจะได้ว่า

$$y(x) = \sqrt{x} = \sqrt{x_0 + \Delta x} \approx \sqrt{x_0} + \left.\frac{d\sqrt{x}}{dx}\right|_{x=x_0} \cdot \Delta x$$

$$\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot \Delta x$$

$$y(x) \approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}}(x - x_0) \qquad (4.2)$$

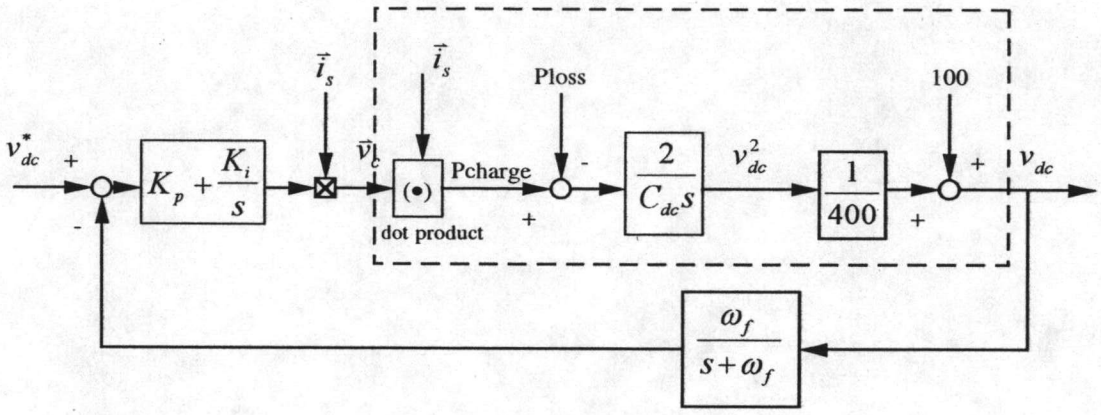
เมื่อแทนค่า x_o=40000 V^2 ลงในสมการที่ (4.2) จะได้ว่า

$$y(x) \approx 200 + \frac{1}{400}(x - 40000)$$

$$\approx 100 + \frac{1}{400}x \qquad (4.3)$$

ดังนั้นเราจะได้บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรงหลังจากทำการประมาณให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นแล้วตามแสดงในรูปที่ 4.4

เมื่อเราได้แบบจำลองของระบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการออกแบบตัวควบคุม PI เพื่อให้ได้คุณสมบัติของการควบคุมตามต้องการต่อไป



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันไฟตรงหลังจากทำการประมาณเป็นระบบเชิงเส้น

ในการหาค่า K_p, K_i เราจะพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมของระบบตามรูปที่ 4.4 ซึ่งจากรูปเราจะหาฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดซึ่งมีสมการเป็น

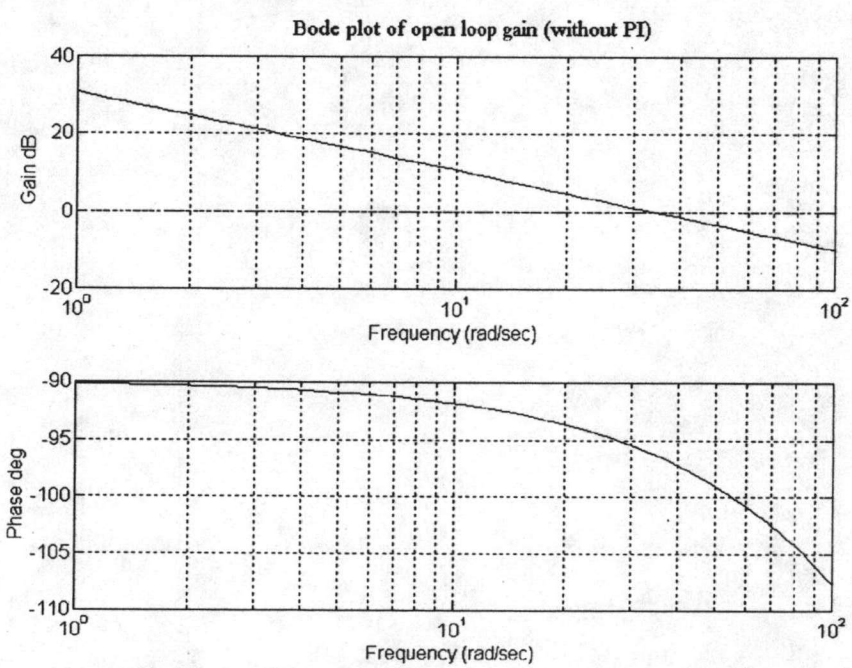
$$G_0(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) \times |\vec{i}_s|^2 \times (\frac{1}{200 s C_{dc}}) \times (\frac{\omega_f}{s+\omega_f}) \qquad (4.4)$$

โดยที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบมีค่าดังนี้คือ

$|\vec{i}_s| = \sqrt{3} \times 1.7 \quad A \qquad , \qquad \omega_f = 314 \quad rad/s$

$C_{dc} = 1260 \quad \mu F$

จากฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบในขณะที่ยังไม่รวมส่วนควบคุม PI จะสามารถเขียนแสดงเป็นแผนภูมิโบเดได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภูมิโบเดของระบบเมื่อยังไม่รวมส่วนควบคุม PI

ในที่นี้เราจะเลือกออกแบบให้ระบบมีค่าความถี่ตัดข้าม (cross over frequency) ω_o= 3.5 rad/s เพื่อให้ระบบวงรอบปิดมีความเร็วในการตอบสนองประมาณ 1.5 วินาที และ จากแผนภูมิโบเดตามรูปที่ 4.5 เราจะเลือกค่าความถี่หักมุม (corner frequency) ของ PI (K_i/K_p) ω_c = 4 rad/s เพื่อให้ระบบให้ช่วงปลอดภัยเชิงเฟส (phase margin) ที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม ดังนั้นเราจะได้ว่า

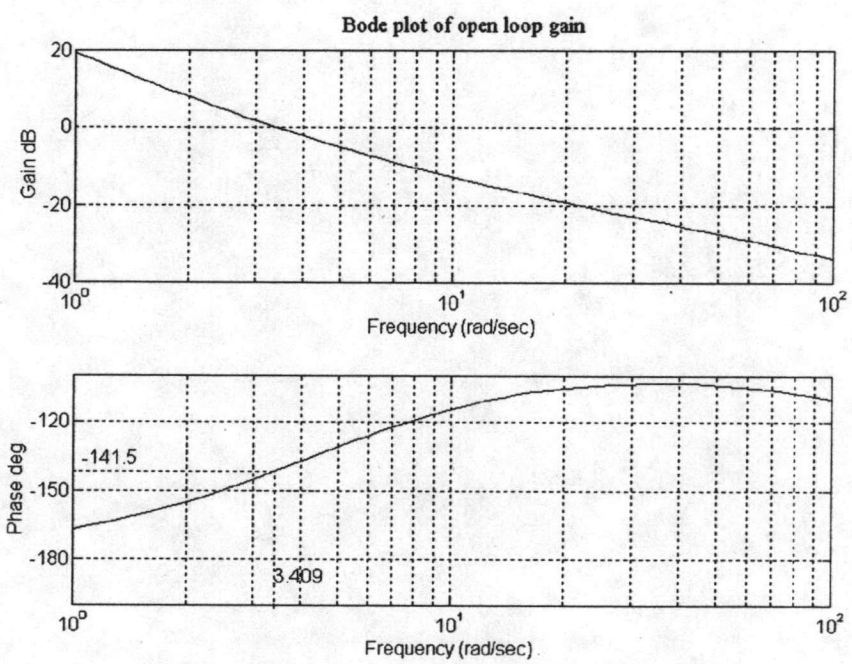
$$\frac{K_i}{K_p} = 4 \qquad \text{หรือ} \qquad K_p = \frac{K_i}{4} \tag{4.5}$$

และ ณ จุดความถี่ตัดข้าม ω_0 จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\left|G_0(j\omega_o)\right| = 1 \tag{4.6}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.4) และสมการที่ (4.5) เราสามารถคำนวณหาค่า K_p, K_i ได้ดังนี้คือ

$$K_p = 0.0625$$
$$K_i = 0.262 \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.6 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบ

จากค่า K_p, K_i ที่ได้ เมื่อทำการคำนวณหาแผนภูมิโบเดจะได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจากรูปเราจะพบว่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย (gain margin) และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบ มีค่าดังนี้คือ

Gain margin = infinity

Phase margin = 38.5 deg

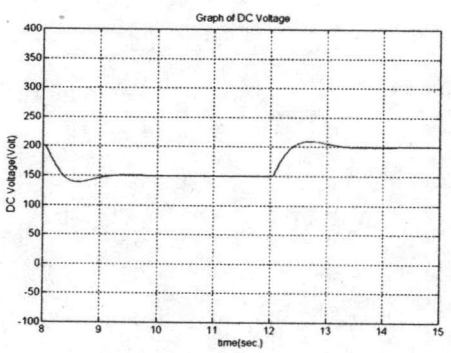
<u>ผลการจำลองและทดสอบระบบรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรง</u>

ในส่วนนี้เราจะทำการจำลองการทำงานของระบบตามที่ได้ออกแบบไว้ในข้างต้นโดยในการจำลองการทำงานของระบบจะใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบเป็น

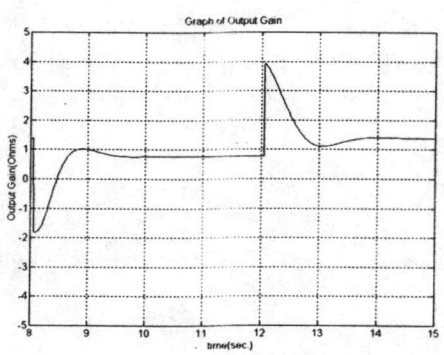
$|\vec{i}_s| = \sqrt{3} \times 1.7 \quad A$, $C_{dc} = 1260$ uF $P_{loss} = 15$ watt

$\omega_f = 314$ rad/s , $K_p = 0.0625$ $K_i = 0.262$

ซึ่งในการจำลองการทำงานของระบบในส่วนนี้ เราจะทำการจำลองการทำงานโดยการเปลี่ยนค่าคำสั่งของระดับแรงดันบัสไฟตรงไปมาระหว่างค่า 150 และ 200 V โดยลักษณะของคำสั่งจะเป็นแบบขั้น ซึ่งผลการจำลองการทำงานของระบบแสดงได้ตามรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมให้ค่าระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าตามต้องการได้ และมีความเร็วในการตอบสนองใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้คือประมาณ 1.5 วินาที



(ก) แรงดันบัสไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุ

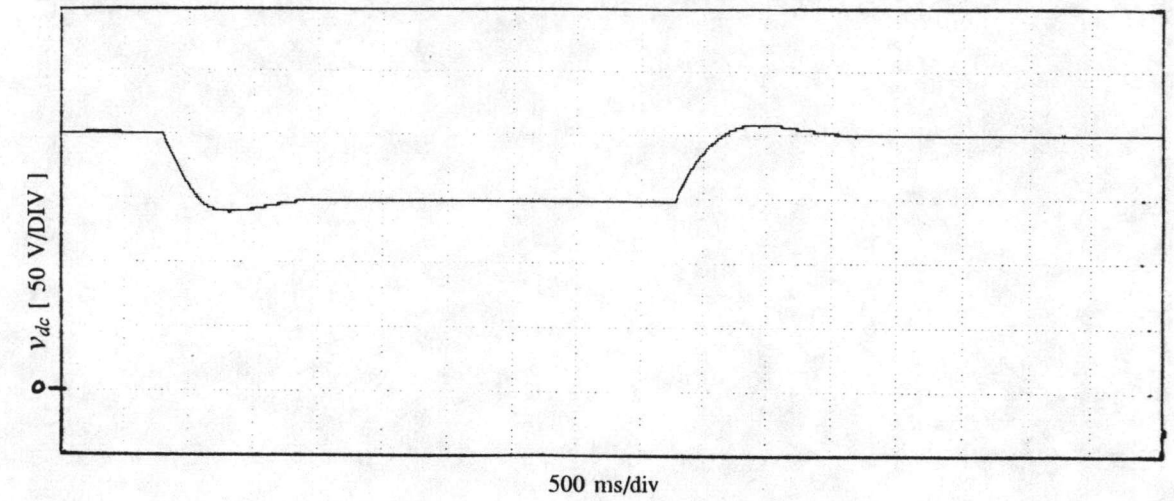


(ข) สัญญาณขาออกของส่วนควบคุม PI

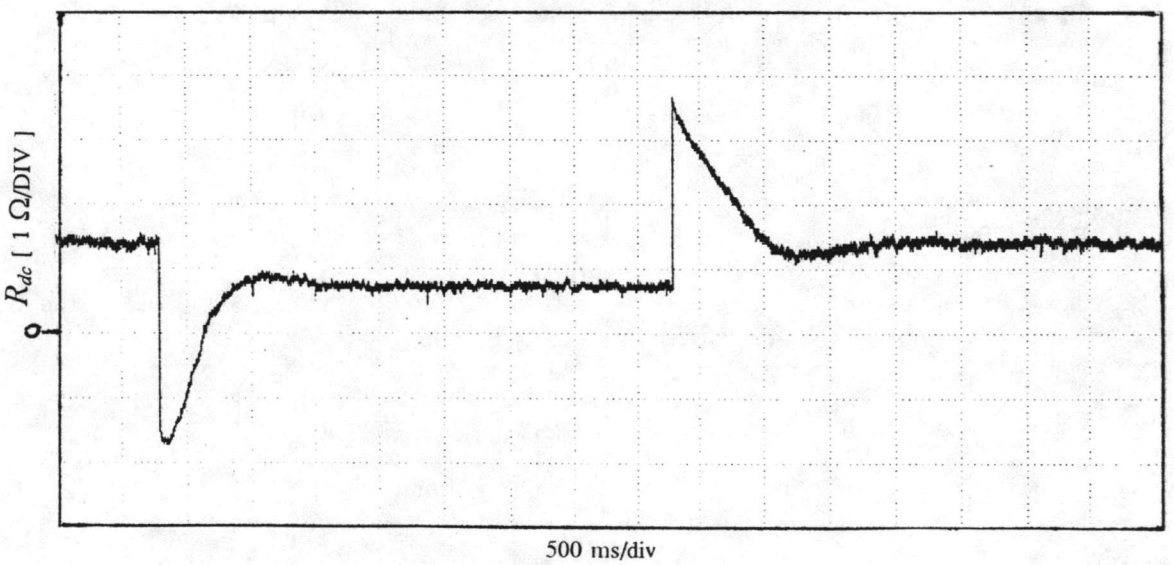
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานของการควบคุมค่าระดับแรงดันบัสไฟตรง

หลังจากนั้นเราก็ได้ทำการทดสอบกับระบบจริงที่ได้สร้างขึ้น โดยในที่นี้จะทดสอบเฉพาะส่วนของการรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนค่าคำสั่งของระดับแรงดันบัสไฟตรงไปมาระหว่างค่า 150 และ 200 V โดยลักษณะของคำสั่งจะเป็นแบบขั้น ซึ่งผลในการทดสอบแสดงได้ตามรูปที่ 4.7 โดยในรูปที่ 4.7(ก) แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของระบบควบคุมต่อคำสั่งแบบขั้น และในรูปที่ 4.7(ข) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณขาออกของ

ส่วนควบคุม PI ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของระดับแรงดันบัสไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าระดับแรงดันอยู่ในระดับที่ต้องการถูกต้องสอดคล้องตามผลที่ได้จากการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.6(ก) ซึ่งจากผลการทดสอบและจากผลการจำลองการทำงานระบบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถที่จะควบคุมรักษาค่าระดับแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้เป็นอย่างดี



v_{dc} = แรงดันบัสไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุ



R_{dc} = สัญญาณขาออกของส่วนควบคุม PI

รูปที่ 4.7 ผลการทดลองการทำงานของระบบรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรง