

**การประยุกต์ใช้งานวงจรควบคุมการป้อนกลับโดยใช้การควบคุมค่าเฉลี่ยของโหมตกระแสที่มีความ
ความคงทนสำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ**
**Application of the Feedback Control Circuit using the
Robust-ACMC Strategy for Three-Level Converter**

จรัสศักดิ์ ส่งบุญแก้ว¹, ประสพโชค โห้ทองคำ²

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี¹

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี²

Jirasak Songboonkaew¹, Prasopchok Hothongkham²

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University, BKK¹

E-mail: Jirasak1163@gmail.com

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology²

Rattanakosin, BKK. E-mail: Prasopchok_h@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรควบคุมการป้อนกลับแบบการควบคุมค่าเฉลี่ยของโหมตกระแสที่มีความคงทน (Robust-ACMC) โดยวงจรควบคุมที่ประยุกต์ใช้ประกอบไปด้วยวงจรช่วยที่ใส่เข้าไปในลูกระแสและแรงดัน ผลจากการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่มีการสวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ โดยสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของวงจรให้ดีขึ้นโดยใช้การวิเคราะห์แบบสัญญาณเล็กๆ และแสดงผลการตอบสนองจากการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณเอาต์พุตของวงจร

คำสำคัญ: การควบคุมค่าเฉลี่ยของโหมตกระแส, การควบคุมค่าเฉลี่ยของโหมตกระแสที่มีความคงทน, การวิเคราะห์สัญญาณเล็กๆ

Abstract

This paper presents the application of feedback control circuit of average current robust-average current mode control (Robust-ACMC) strategy. The Robust-ACMC strategy consists of auxiliary controller which is used for current and voltage loops. From the small-signal analysis point of view, robust performance can be achieved, preserving the stability on the application of a zero-voltage and zero-current switching Three-Level converter. In addition, the large-signal response of the converter under a transient state is shown in order to validate the concept.

Keywords: robust-average current mode control (Robust-ACMC), small-signal analysis

บทนำ

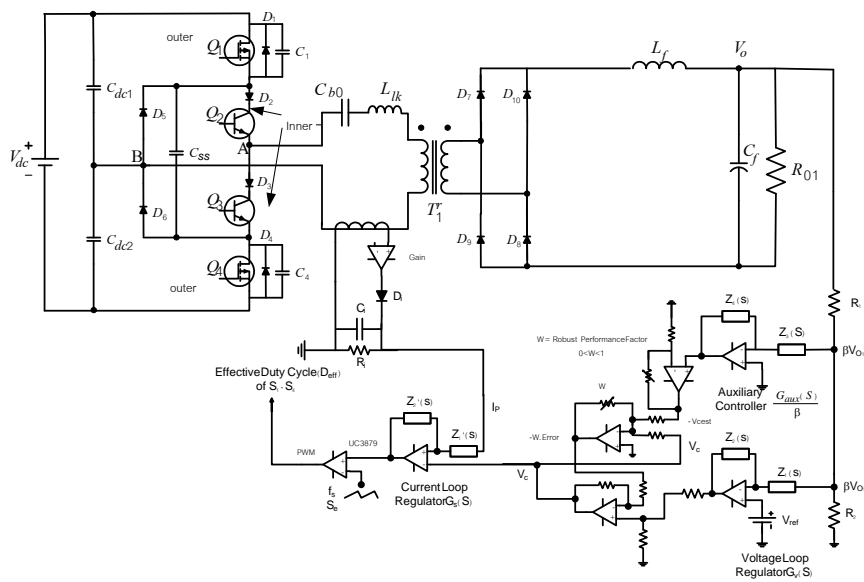
บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมแบบวงจรปิดที่อาศัยวิธีการแบบ Robust Average Current – Mode Control (Robust – ACMC) ซึ่งวิธีการแบบนี้จะมีวงจรควบคุมช่วยให้กับวงจรควบคุมแบบเดิม (Average Current – Mode Control : ACMC) โดยวงจรควบคุมแบบ Robust – ACMC นี้จะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่

มีลักษณะการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ ซึ่งวงจรถูกควบคุมจะประกอบไปด้วยรูปในที่เป็นกระแสและรูปนอกเป็นแรงดัน โดยที่รูปนอกจะเป็นรูปของแรงดันเอาต์พุตซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ผลต่างของแรงดันนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่เป็นกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงจะมีผลตอบสนองเร็วกว่ากระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ประมาณ 10 เท่า ก่อนที่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์นำกระแสภายใต้เงื่อนไขของการควบคุมแรงดันให้คงที่ (Regulation) ซึ่งสวิตช์ที่มีการนำกระแสนั้นจะนำกระแสจนถึงค่ากระแสลิมิต[1] ในบทความนี้กระแสปฐมภูมิที่ตรวจจับจะไม่เหมือนกับลักษณะการตรวจจับกระแสเอาต์พุตของตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ โดยที่กระแสที่ตรวจจับได้ทางด้านปฐมภูมิจะถูกควบคุมด้วยวงจรรภายในตัว IC #UC3879 [2] เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสไม่ให้สูงเกินค่าที่ตั้งไว้

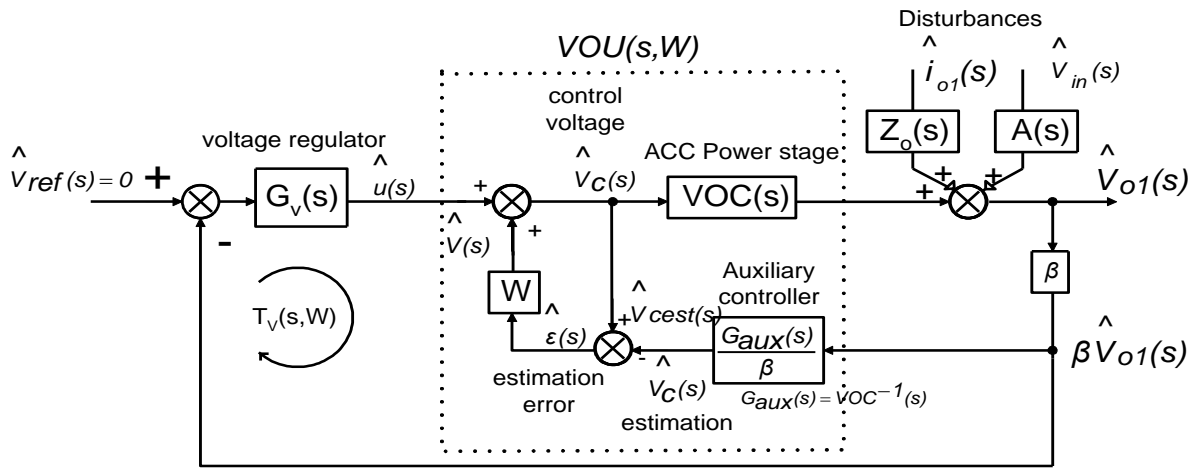
ในส่วนของวงจรถูกควบคุมนั้นจะได้อธิบายและวิเคราะห์ในรูปแบบสัญญาณเล็ก ๆ (small-signal) โดยอาศัยการจำลองระบบจากการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการเขียนโบลทพล็อต เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรถตามที่ได้ออกแบบไว้

ทฤษฎีวงจรถูกควบคุมแบบ Robust - ACMC

ในการพิจารณาวงจรถูกควบคุมนี้จะพิจารณาในแง่ของผลิตภัณฑ์และในแง่ของการออกแบบดังนี้ การลดลงของประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในการใช้งานของผู้ใช้และการลดลงของประสิทธิภาพของอุปกรณ์ภายในวงจรถคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ[3] ในระบบการออกแบบวงจรถถูกควบคุมแบบนี้จะต้องออกแบบให้ทนต่อสถานะที่กล่าวมาทั้งสองหรืออีกนัยหนึ่งคือจะต้องให้แบนวิดธ์ของระบบกว้างและให้ระบบเกิดเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงแรงดันและโหลดและให้คุณสมบัติของการกำจัดสัญญาณรบกวนดีขึ้น ในรูปที่ 1 แสดงถึงวงจรถถูกควบคุม Robust - ACMC [4] ที่ใช้งานร่วมกับวงจรถคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ โดยที่การมองอยู่ในลักษณะบล็อกไดอะแกรมแสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรถคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ที่มีวงจรถถูกควบคุมแบบ Robust - ACMC



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC

ในส่วนทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรควบคุมช่วย ($G_{aux}(s)$) ที่เพิ่มเติมเข้าไปในส่วนวงจรควบคุม ACMC นั้น จะเป็นส่วนกลับของระบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ ($VOC(s)$) ซึ่งจะได้เป็น

$$G_{aux}(s) = \frac{1}{VOC_{ob}(s)} \quad (1)$$

จากรูปที่ 2 ซึ่งอยู่ภายในส่วนของเส้นประแรงดันควบคุมโดยประมาณ ($\hat{V}_c(s)$) จะนำไปหักลบจากค่าจริง ($\hat{V}_{cest}(s)$) จะได้ค่าคลาดเคลื่อนโดยประมาณ ($\hat{\epsilon}(s)$) แล้วนำไปคูณกับค่าตัวแปร W ซึ่งอยู่ในช่วง 0-1 สัญญาณนี้จะนำไปรวมกับเอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดัน ($\hat{u}(s)$) ทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้ของระบบที่มีตัวแปร W และวงจรควบคุมช่วยจะอยู่ในรูปของ $VOU(s, W)$ ตามเส้นประดังรูปที่ 2

$$VOU(s, W) = \frac{VOC(s) VOC_{ob}(s)}{(1-W)VOC_{ob}(s) + W VOC(s)} \quad (2)$$

เมื่อสมมติให้ $|(1-W)VOC_{ob}(j\omega)| \ll |W VOC(j\omega)|$, then $VOU(s, W) \approx \frac{VOC_{ob}(s)}{W}$ จะได้

$$VOU(s, W) = \frac{1}{W G_{aux}(s)} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 จะเห็นได้ว่าขอบเขตของย่านความถี่ของ $VOU(s, W)$ จะมีลักษณะเหมือนกันกับ $VOC_{ob}(s) / W$ ซึ่งย่านความถี่นี้จะขึ้นอยู่กับวงจรควบคุมช่วยและจะไม่มีผลกับตัวแปรในวงจรหลัก เมื่อทำการปรับค่า W ให้เข้าใกล้ 1 จะทำให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันวงจรควบคุมช่วย ($G_{aux}(s)$) จะมีผลตอบสนองกับความถี่สูงมากสำหรับเปิดความถี่สวิตช์ของแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นก่อนที่จะให้สัญญาณความถี่สวิตช์ไปขับนำตัวสวิตช์จำเป็นจะต้องมีการกำหนดขีดจำกัดนี้ด้วยเกท

ความถี่สูงเพื่อที่จะควบคุมค่าสูงสุดของ W เพื่อให้มีสภาวะเป็นปกติที่เป็นผลสืบเนื่องจากสัญญาณรบกวนและริบเปิดของแรงดันเอาต์พุต จากสาเหตุนี้จะทำให้สัญญาณเล็ก ๆ มีเสถียรภาพมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3 จะพบว่าเมื่อปรับค่า W ให้มีค่าเข้าใกล้ 1 จะได้ $VOU(s,W) \approx VOC_{ob}(s) / W \approx VOC_{ob}(s)$ จะได้เป็นตามสมการที่ 4

$$T_{vob}(s) = \beta G_{vob}(s) \frac{VOC_{ob}(s)}{W} \approx \beta G_{vob}(s) VOC_{ob}(s) \quad (4)$$

สำหรับ $T_{vob}(s)$ ออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์ที่จะให้ลูปเกทมีเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของแหล่งหรือแรงดันเอาต์พุต ซึ่งผลของลูปเกทจะได้ออกมาดังสมการที่ 5 ที่มีลักษณะการออกแบบคล้ายกับ $T_{vob}(s)$

$$T_v(s,W) = \beta G_{vob}(s) VOU(s,W) \quad (5)$$

ดังนั้นวงจรควบคุมช่วย ($G_{aux}(s)$) ที่มีอยู่ในวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC ของวงจรคอนเวอร์เตอร์จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ออกไป โดยจะได้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ลูปปิด ($Z_{ocl}(s,W)$) และ Audio - Susceptibility $A_{cl}(s,W)$ (ดังนี้

$$Z_{ocl}(s,W) = \frac{Z_o(s)}{1 + VOC(s) \frac{\beta G_v(s) + W G_{aux}(s)}{1 - W}} \quad (6)$$

$$A_{cl}(s,W) = \frac{A_o(s)}{1 + VOC(s) \frac{\beta G_v(s) + W G_{aux}(s)}{1 - W}} \quad (7)$$

การทดสอบ

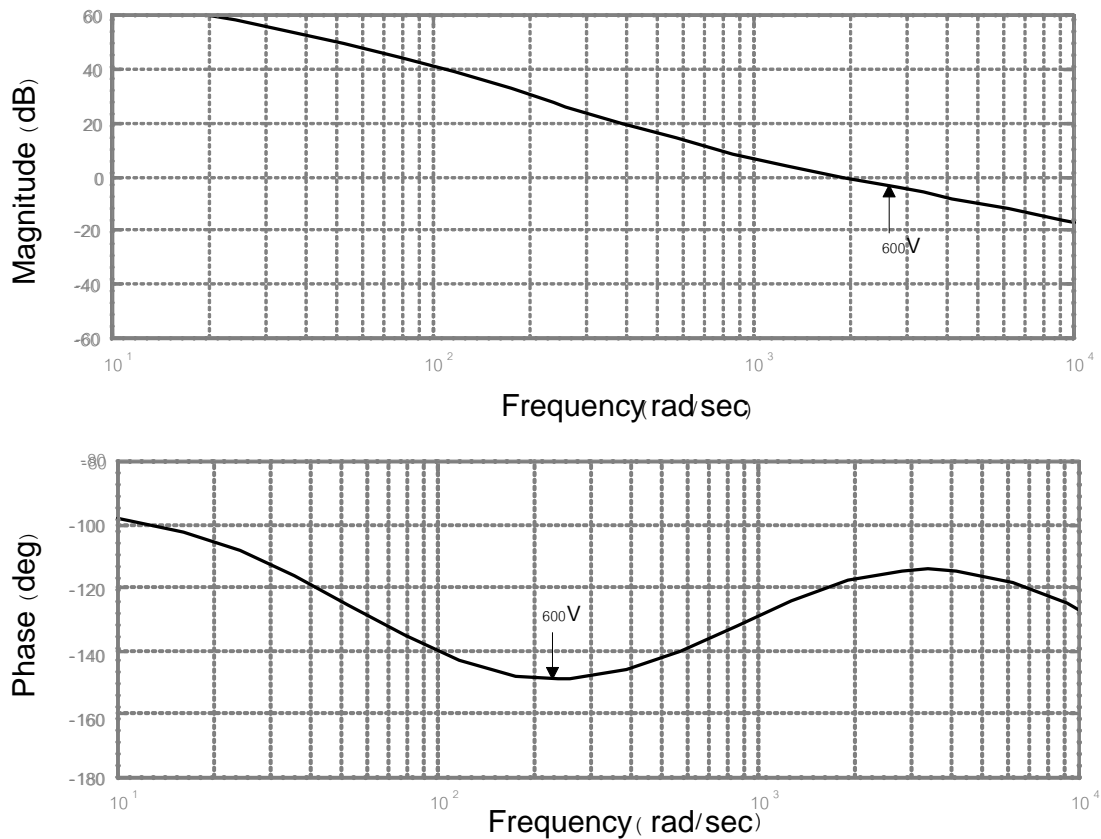
ในการทดสอบวงจรควบคุมจะใช้น่านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ย่าน 600 โวลต์ ส่วนแรงดันเอาต์พุตกำหนดให้คงที่ ที่ 42 โวลต์ โดยที่มีค่ากระแสสูงสุด 24 แอมป์ (ค่าความต้านทานโหลด $R_{01} = 1.76 \Omega$) ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ (L_f) มีค่า 30 μH ส่วนตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ (C_f) มีค่า 330 μF (ค่าความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ : ESR มีค่า 14 $m\Omega$) และค่า $R_i = 0.25 \Omega$, $F_m = 0.5 V^{-1}$, $\beta = 0.06$, $V_{ref} = 2.5 V$ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 1 ในการทดสอบจะต้องพิจารณาตัวแปรต่างๆเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรในส่วนของวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC

ลูปเกทวงจรถูกช่วย	ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน	ลูปเกทแรงดัน
$G_{aux}(s) = \frac{1 + \frac{s}{3400}}{7.94 \left(1 + \frac{s}{150000} \right)}$	$VOC_{ob}(s) = \frac{7.94 \left(1 + \frac{s}{150000} \right)}{1 + \frac{s}{3400}}$	$G_{vrob}(s) = \frac{5700 \left(1 + \frac{s}{6000} \right)}{s \left(1 + \frac{s}{250000} \right)}$

ในส่วนของการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้วงจรควบคุมแบบ ACMC และวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC ($W = 0.95$) โดยที่คุณสมบัติของสัญญาณจะอยู่ในรูปของผลตอบสนองของความถี่ที่แสดงเป็นโบดพลอตที่ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง

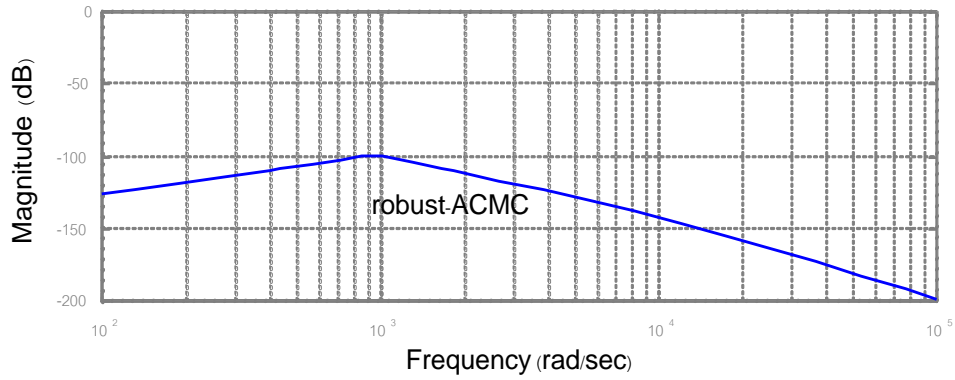
ในรูปที่ 8 แสดงถึงโบดพลอตของรูปเกท $T_v(j\omega, W)$ ของวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC ซึ่งจะได้ความถี่ของรูปเกทที่แรงดันไฟตรงอินพุต 600 V มีค่าเท่ากับ 2 kHz ส่วนมุมเฟสจะมีค่าประมาณ 61° จะเห็นได้ว่าวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC จะทำให้ระบบเกิดเสถียรภาพมากกว่าวงจรควบคุมแบบ ACMC



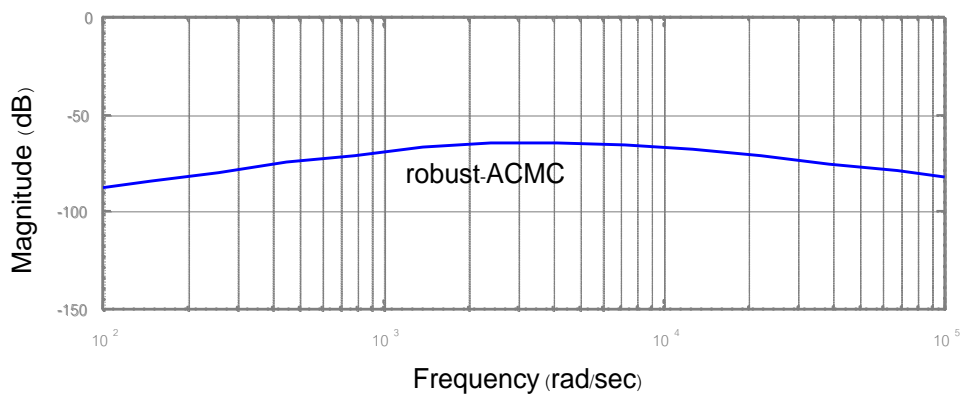
รูปที่ 3 รูปเกท (T_v) สำหรับวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC (a) ขนาด (b) เฟส

รูปที่ 4 จะแสดงขนาดของลูปเปิดของ Audio - Susceptibility สำหรับวงจรควบคุมแบบ ACMC ($Acl(j\omega)$) และวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC ($Acl(j\omega, W)$) เห็นว่าวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC จะมีค่าที่ดีกว่าอยู่ที่ประมาณ 25 dB

รูปที่ 5 จะแสดงขนาดของลูปเปิดของค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ สำหรับวงจรควบคุมแบบ ACMC ($Zocl(j\omega)$) และวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC ($Zocl(j\omega, W)$) เห็นว่าวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC จะมีค่าที่ดีกว่าอยู่ที่ประมาณ 26 dB

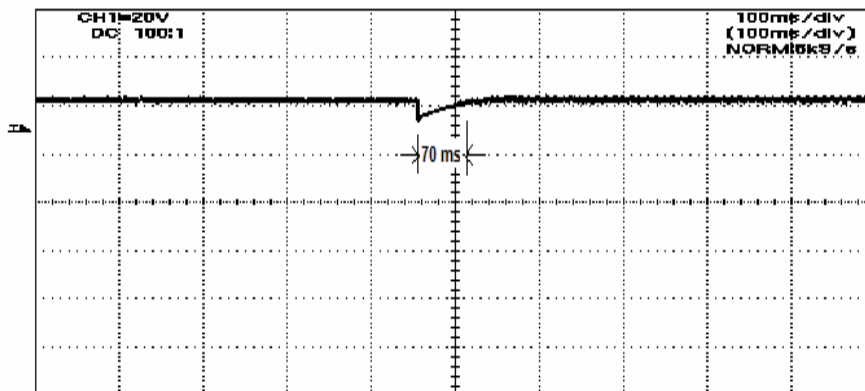


รูปที่ (9) 4 ลูปเปิดของ Audio – Susceptibility สำหรับวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC



รูปที่ 5 ลูปเปิดของค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ สำหรับวงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC

รูปที่ 6 แสดงถึงผลตอบสนองชั่วขณะของกระแสโหลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 12 A เป็น 24 A ที่ใช้วงจรควบคุมแบบ Robust – ACMC ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโหลดในรูปที่ 6 ช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าอยู่ประมาณ 70 ms เห็นได้ว่าผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ใช้วงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC จะใช้เวลาไม่นานมาก



รูปที่ 6 ผลตอบสนองชั่วขณะของกระแสโหลดเมื่อเปลี่ยนโหลดจาก 12 A เป็น 24 A ที่ใช้วงจรควบคุมแบบ Robust - ACMC

สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์วงจรป้อนกลับแบบลูปิดของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสมรรถนะที่สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์สามารถใช้หลักการควบคุมแบบ Robust-ACMC ได้ โดยผลของการควบคุมแบบ Robust-ACMC จะให้ผลของเฟสมาจิ้นของลูปิด T มากกว่าโดยสังเกตได้จากโบเดพล็อต สำหรับการวิเคราะห์ผลของลูปิดของ audio susceptibility A_{ct} และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ Z_{oct} ซึ่งบ่งบอกถึงเสถียรภาพของวงจรควบคุมแบบ Robust-ACMC จะเห็นว่าวงจรควบคุมแบบ Robust-ACMC ให้ผลอยู่ในเงื่อนไขที่ดี โดยอาศัยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB[®] นอกจากนี้การพิจารณาค่าการตอบสนองของสัญญาณขนาดใหญ่ของกระแสที่สภาวะชั่วขณะ ซึ่งได้จากการปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ Robust-ACMC ก็ให้ค่าผลของการตอบสนองของสัญญาณได้เร็วเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Mohan, T. M. (1995). *Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics, Converters, Applications, and Design*. 2nd ed. John Wiley & Sons.
- [2] L. Balogh, (2000). "The New UC3879 Phase-Shifted PWM Controller Simplifies the Design of Zero Voltage Transition Full-Bridge Converters," Unitrode Corporation, pp. 1-8.
- [3] Ting Ting Song, Nianci Huang, A Ioinovici. (2004). A Zero Voltage and Zero Current Switching Three-Level DC-DC Converter with Reduced Rectifier Voltage Stress, in proc. *IEEE of APEC*, 2, pp. 1071-1077.
- [4] G. Garcefa, M. Pascual, and E. Figueres. (1999) "Robust Average Current Mode Control of DC-DC PWM Converters based on a Three Controller Scheme," Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 596-600.