

การวิเคราะห์และจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น Analysis and Simulation of Three Phase Boost Rectifier

จีระพงศ์ ศรีวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง
133 หมู่ 3 ถ.พหลโยธิน-วาริชภูมิ ต.พหลโยธิน อ.พหลโยธิน จ.สระบุรี 47160 E-mail: geerapongs@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาค่าแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิ่งของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ในบทความแสดงรายละเอียดของสมการต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองและแบบจำลองจะถูกจำลองบนโปรแกรม Matlab Simulink ซึ่งจะทำให้การจำลองหาค่าแบบจำลองวงจรเฉลี่ยเปรียบเทียบกับแบบจำลองวงจรสวิตชิ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวกรณีศึกษาต่างๆ จะถูกนำเสนอไว้ตอนท้ายของบทความ

คำสำคัญ: แบบจำลองวงจรเฉลี่ย, แบบจำลองวงจรสวิตชิ่ง, วงจรเรียงกระแสแบบแปลงขึ้น

Abstract

This research paper presents computer simulations for determining the averaged circuit model and switching circuit model of ThreePhase Boost Rectifier. The equations used in the model are explained. The model is implemented using Matlab Simulink and the averaged circuit model is compared with the switching circuit model. The results of the model in many cases are presented at last.

Keywords: Average Model, Switching Circuit, Boost Rectifier

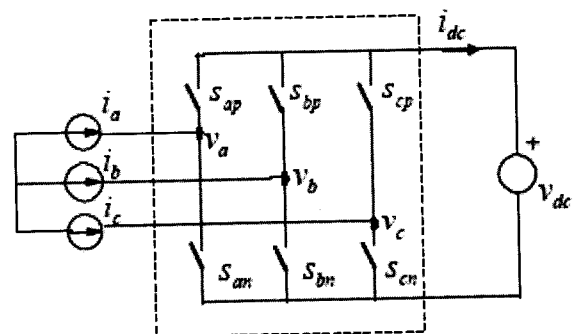
1. คำนำ

ปัจจุบันการจัดการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในกลุ่มวิชาชีพบังคับนั้นถือว่ามีความสำคัญโดยเฉพาะรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งมีเนื้อหาสาระครอบคลุมในหลายหัวข้อ ดังนั้นผู้เรียนต้องศึกษาให้เกิดความเข้าใจอย่างถ่องแท้ จึงจะสามารถนำเอาความรู้ไปใช้ได้อย่างจริงจังและถูกต้อง ดังเช่นในหัวข้อเรื่องวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ผู้เรียนจะต้องศึกษาทั้งด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมที่ถูกต้องซึ่งจะสัมฤทธิ์ผลได้นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดลองเพื่อศึกษาค้นคว้าและพิสูจน์ว่าถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ ส่วนโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงโปรแกรม Matlab Simulink [1] มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้คำนวณเชิงตัวเลข และกราฟฟิคที่ซับซ้อน ปัจจุบันมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆมากมาย ในส่วนของ SIMULINK เป็นเครื่องมือที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาไม่

ว่าจะเป็นระบบเชิงเส้น และระบบไม่เชิงเส้น รวมถึงระบบแบบเวลาต่อเนื่อง และแบบเวลาไม่ต่อเนื่องในการจำลองระบบ SIMULINK จะติดต่อกับผู้ใช้แบบกราฟฟิค อาศัยการคลิกและการลากเมาส์เมื่อต้องการวิเคราะห์สมการโดยใช้ SIMULINK เพื่อวิเคราะห์และตั้งค่า การทำงานจะนำเอาอุปกรณ์ใน Library มาต่อกัน ซึ่งสามารถนำเอาสมการทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์เมื่อต่ออุปกรณ์เสร็จถ้าการต่อมีความถูกต้องก็จะได้ผลลัพธ์ออกมาซึ่งถือว่ามีความสะดวกในการวิเคราะห์อย่างมาก ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอการศึกษาและจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการศึกษารูปแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิ่ง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้ถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม Matlab Simulink อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรม Matlab Simulink ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์ด้านการเรียนการสอนในวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่อไป

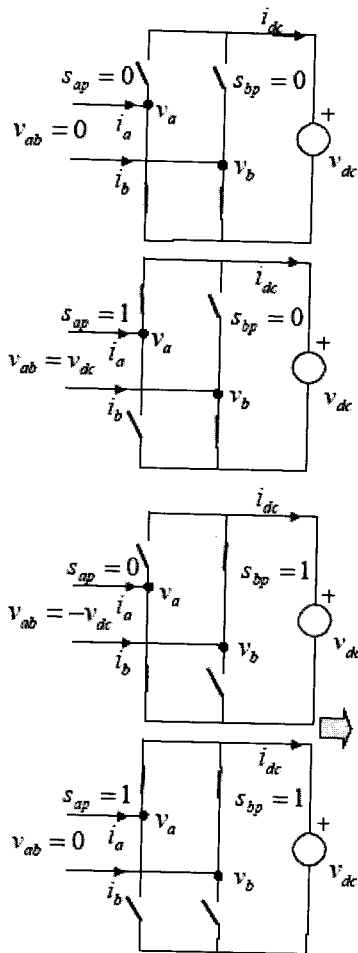
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ซึ่งแสดงแบบจำลองวงจรสวิตชิ่งได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น

เมื่อพิจารณา แบบจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ในรูปที่ 1 สามารถแสดงสถานการณ์เปิด-ปิดของสวิตช์และความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สถานการณ์เปิด-ปิดของสวิตช์และความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

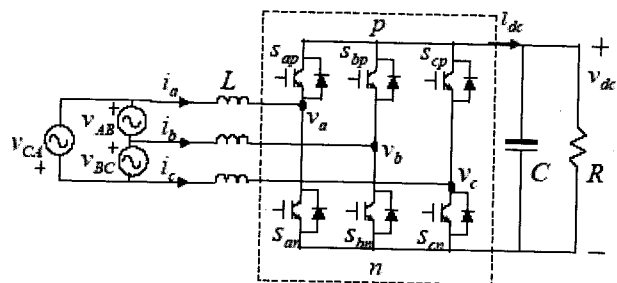
จากรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงขึ้น 1 เฟส ซึ่ง

เมื่อรวมเอาสวิตช์ที่ 5 และ 6 เข้าด้วยกันก็สามารถสรุปการทำงานของวงจรดังกล่าวลงเป็นตารางความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 1 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรงได้ดังนี้ [2]

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} v_{dc} = \begin{bmatrix} S_{ab} \\ S_{bc} \\ S_{ca} \end{bmatrix} v_{dc} \quad (1)$$

$$i_{dc} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ab} & S_{bc} & S_{ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (2)$$

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ที่นำเสนอในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ที่นำเสนอในบทความนี้

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของสวิตช์กับกระแสและแรงดัน

S_a	S_b	S_c	$S_a - S_b$	$S_b - S_c$	$S_c - S_a$	i_{dc}	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	1	i_c	0	$-v_{dc}$	v_{dc}
0	1	0	-1	1	0	i_b	$-v_{dc}$	v_{dc}	0
0	1	1	-1	0	1	$i_b + i_c$	$-v_{dc}$	0	v_{dc}
1	0	0	1	0	-1	i_a	v_{dc}	0	$-v_{dc}$
1	0	1	1	-1	0	$i_a + i_c$	v_{dc}	$-v_{dc}$	0
1	1	0	0	1	-1	$i_a + i_b$	0	v_{dc}	$-v_{dc}$
1	1	1	0	0	0	$i_a + i_b + i_c$	0	0	0

พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้นที่นำเสนอในบทความนี้
ในรูปที่ 3 เราสามารถเขียนสมการบรรยายพฤติกรรมของแบบวงจร
สวิตซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a - i_b \\ i_b - i_c \\ i_c - i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a - v_b \\ v_b - v_c \\ v_c - v_a \end{bmatrix}$$

$$= 3L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix}$$

(3)

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix}$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} - \frac{v_{dc}}{RC}$$

(6)

ใช้ตัวปฏิบัติการเฉลี่ยในสมการ (5) และ (6) เพื่อหาแบบจำลองวงจรเฉลี่ย
ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \frac{d\bar{i}_{l-l}(\tau)}{dt} d\tau$$

$$= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\frac{1}{3L} \bar{v}_{l-l}(\tau) - \frac{1}{3L} \bar{S}_{l-l}(\tau) v_{dc}(\tau) \right) d\tau$$

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \frac{dv_{dc}(\tau)}{dt} d\tau$$

$$= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\frac{1}{C} \bar{S}_{l-l}(\tau) \bar{i}_{l-l}(\tau) - \frac{v_{dc}(\tau)}{RC} \right) d\tau \quad (7)$$

ดังนั้น

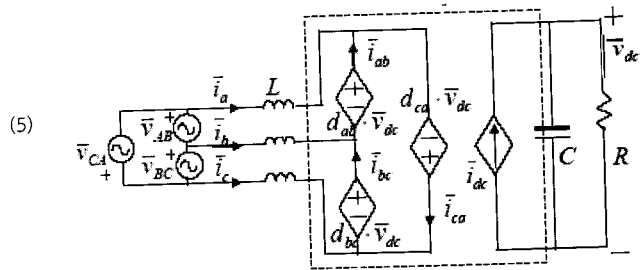
$$\frac{d\bar{i}_{l-l}}{dt} = \frac{1}{3L} \bar{v}_{l-l} - \frac{1}{3L} \bar{d}_{l-l} \bar{v}_{dc} \quad (8)$$

$$\frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \bar{d}_{l-l} \bar{i}_{l-l} - \frac{\bar{v}_{dc}}{RC} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } \bar{d}_{l-l} = \begin{bmatrix} d_{ab} \\ d_{bc} \\ d_{ca} \end{bmatrix}$$

(4)

จากสมการที่ (8) และ (9) แบบจำลองวงจรเฉลี่ย สามารถเขียนวงจร
แบบจำลองวงจรเฉลี่ยได้ดังรูปที่ 4 ดังนี้



(6)

รูปที่ 4 แบบจำลองวงจรเฉลี่ยพิกัด abc

เนื่องจากวงจรดังกล่าวเป็นวงจรสามเฟส การควบคุมในพิกัด dq0 สามารถ
ทำให้การควบคุมง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เริ่มต้นด้วยการแปลง
แบบจำลองเฉลี่ยพิกัด abc เป็นแบบจำลองเฉลี่ยพิกัด dq0 อาศัย
ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$X_{dq0} = T \cdot X_{abc}$$

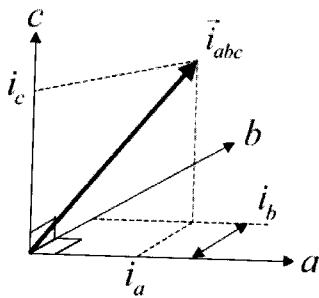
$$X_{abc} = T^{-1} \cdot X_{dq0} \quad (10)$$

เมื่อ $T = T_{dq0/abc}$ โดยที่ T คือการแปลงเมทริกซ์ของพาร์ค (Park's
Transformation Matrix) [3]

จุดประสงค์การแปลงของพาร์คคือการแปลงพารามิเตอร์ในพิกัด abc ไป
เป็นพิกัด dq0 ซึ่งมีข้อดีคือในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลพารามิเตอร์
สามเฟสกระแสสลับสามารถที่จะแทนด้วยพารามิเตอร์สองเฟสกระแสตรง

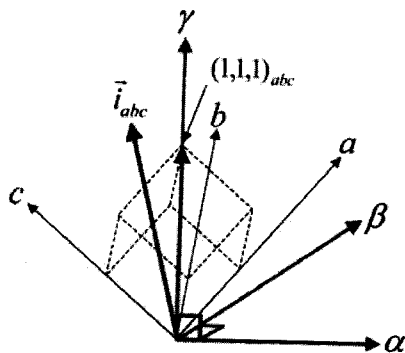
ข้อดีข้อที่ 1 คือ จำนวนพารามิเตอร์ลดลงทำให้ระบบมีความซับซ้อนลดลง และข้อที่ 2 คือพารามิเตอร์ได้จากการแปลงจะอยู่ในรูปแบบกระแสดตรง ดังนั้นระบบการควบคุมแบบฉบับสามารถประยุกต์ใช้ในกระแสสลับได้ พิกัด abc สามารถแทนด้วยเวกเตอร์ที่พุ่งออกจากจุดกำเนิดไปยังพิกัด นั้นๆ อย่างเช่น กระแสในระบบสามเฟสเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการ (11)

$$\vec{i}_{abc}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$



รูปที่ 5 เวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ แทนกระแสสามเฟสขณะหนึ่ง

จะเห็นว่ารูปที่ 5 อธิบายถึงเวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ ในปริภูมิ abc ชั้นแรกของการแปลงพิกัด เริ่มต้นที่ การนิยามพิกัดระหว่างกลางที่เรียกว่า พิกัด $\alpha\beta\gamma$ โดยตำแหน่งของแกน $\alpha\beta\gamma$ ในปริภูมิ abc แสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือ แกน γ มีทิศทางในแนวเวกเตอร์ (1,1,1) ในปริภูมิ abc



รูปที่ 6 พิกัด $\alpha\beta\gamma$ ในปริภูมิ abc

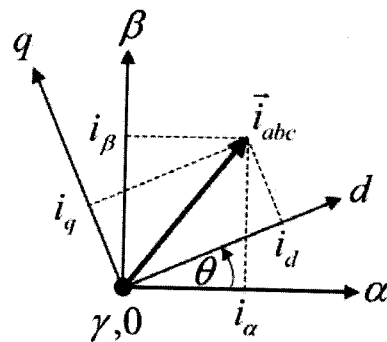
ด้วยความสัมพันธ์สองพิกัดนี้เราสามารถแปลงเวกเตอร์ที่อยู่ในปริภูมิ abc ให้อยู่ในปริภูมิ $\alpha\beta\gamma$ ได้ด้วยความสัมพันธ์ข้างล่างนี้

$$\vec{i}_{\alpha\beta\gamma}(t) = \vec{T}_{\alpha\beta\gamma/abc} \cdot \vec{i}_{abc}(t) \quad (12)$$

โดยที่

$$\vec{T}_{\alpha\beta\gamma/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

สังเกตจากเมทริกซ์ $\vec{T}_{\alpha\beta\gamma/abc}$ จะเห็นได้ว่าในกรณีที่กระแสทั้งสามเฟส สมดุลกันองค์ประกอบ γ ของเวกเตอร์กระแสจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น เวกเตอร์กระแส $\vec{i}_{\alpha\beta\gamma}(t)$ จะอยู่บนระนาบ $\alpha\beta$ และหมุนรอบแกน γ ด้วยเหตุนี้เองเวกเตอร์ของพารามิเตอร์สามเฟสในพิกัด abc สามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์ของพารามิเตอร์สองเฟสในพิกัด $\alpha\beta\gamma$ จากจุดนี้เอง หากทำให้ระนาบ $\alpha\beta$ หมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับเวกเตอร์กระแส $\vec{i}_{\alpha\beta\gamma}(t)$ องค์ประกอบ $\vec{i}_\alpha(t)$ และ $\vec{i}_\beta(t)$ ก็จะมีค่าคงที่ ด้วยหลักการดังกล่าวพิกัด $dq0$ จึงถูกนิยามขึ้นในรูปที่ 7



รูปที่ 7 เวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}(t)$ ในพิกัด $dq0$ และ $\alpha\beta\gamma$

จะเห็นว่าจากรูปที่ 7 แสดงเวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ ในพิกัด $dq0$ และ $\alpha\beta\gamma$ แกน d และ q หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω หรือ $2\pi f$ โดยที่ f คือความถี่ที่สาย (Line Frequency) อาศัยแนวคิดเบื้องต้นเมทริกซ์การแปลงของปาร์ค $\vec{T}_{dq0/abc}$ ที่ใช้ในบทความนี้จึงถูกนิยามขึ้นและใช้เป็นตัวดำเนินการในการแปลงพารามิเตอร์ในพิกัด abc ให้อยู่ในพิกัด $dq0$ ได้โดยตรง (ไม่ต้องผ่านพิกัด $\alpha\beta\gamma$) การแปลงของปาร์คตามสมการที่ (12) ส่วนเมทริกซ์การแปลงของปาร์คแสดงดังสมการที่ (13)

$$\vec{i}_{dq0} = \vec{T}_{dq0/abc} \cdot \vec{i}_{abc} \quad (13)$$

$\vec{T}_{dq0/abc}$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{โดยที่ } \theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$$

สำหรับการแปลงพารามิเตอร์หรือเวกเตอร์ในพิกัด $dq0$ กลับไปยังพิกัด abc ดังสมการที่ (15) นั้น จะอาศัยเมทริกซ์ผกผันการแปลงของปาร์ค (Park's Transformation Matrix)

$\vec{T}_{abc/dq0}$

$$\vec{i}_{abc}(t) = \vec{T}_{dq0/abc}^{-1} \cdot \vec{i}_{dq0} \quad (15)$$

โดยที่

$$\vec{T}_{dq0/abc}^{-1} = \vec{T}_{abc/dq0}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (10) และความสัมพันธ์แบบจำลองวงจรเฉลี่ย abc ตามสมการที่ (8) และ (9) จะได้ว่า

$$\frac{d(T^{-1} \cdot \vec{i}_{dq0})}{dt} = \frac{1}{3L} T^{-1} \cdot \vec{v}_{dq0} - \frac{1}{3L} T^{-1} \cdot \vec{d}_{dq0} \cdot \vec{v}_{dc}$$

$$\frac{d\vec{v}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \vec{d}_{l-l}^T \cdot T^{-1} T \cdot \vec{i}_{l-l} - \frac{\vec{v}_{dc}}{RC}$$

$$T \frac{dT^{-1}}{dt} \cdot \vec{i}_{dq0} + \frac{d\vec{i}_{dq0}}{dt} = \frac{1}{3L} \vec{v}_{dq0} - \frac{1}{3L} \vec{d}_{dq0} \cdot \vec{v}_{dc}$$

$$\frac{d\vec{v}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \vec{d}_{dq0}^T \cdot \vec{i}_{dq0} - \frac{\vec{v}_{dc}}{RC}$$

เมื่อ

$$T \cdot \frac{dT^{-1}}{dt} = T \cdot \frac{dT^T}{dt}$$

$$= T \cdot \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \right)$$

$$= T \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\omega \sin \omega t & \omega \cos \omega t & 0 \\ -\omega \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\omega \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\omega \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\omega \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \right) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\omega \sin \omega t & \omega \cos \omega t & 0 \\ -\omega \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\omega \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\omega \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\omega \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นผลลัพธ์ของ $T \cdot \frac{dT^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

จะได้ว่า

$$\frac{d\bar{i}_{dq0}}{dt} = \frac{1}{3L} \bar{v}_{dq0} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{i}_{dq0} - \frac{1}{3L} \bar{d}_{dq0} \cdot \bar{v}_{dc}$$

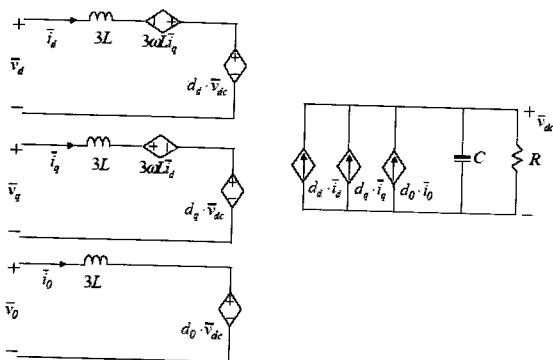
$$\frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \bar{d}_{dq0} \cdot \bar{i}_{dq0} - \frac{\bar{v}_{dc}}{RC}$$

ดังนั้นแบบจำลองพิกัด $dq0$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} \bar{v}_d \\ \bar{v}_q \\ \bar{v}_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} \cdot \bar{v}_{dc}$$

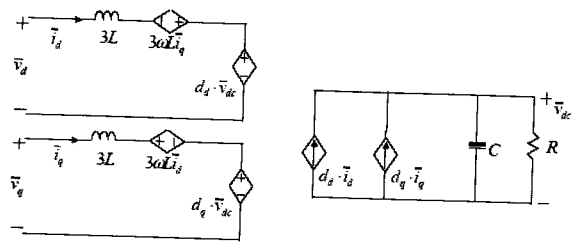
$$\frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} [d_d \ d_q \ d_0] \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} - \frac{\bar{v}_{dc}}{RC} \quad (17)$$

เราสามารถเขียนวงจรสมมูลในพิกัด $dq0$ ได้ดังนี้



รูปที่ 8 แบบจำลองวงจรเฉลี่ยพิกัด $dq0$

อย่างไรก็ตามเนื่องจากในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น เป็น วงจรสามเฟสที่สมดุล ดังนั้น d_0 มีค่าเป็นศูนย์ตลอดทุกช่วงการทำงาน



รูปที่ 9 แบบจำลองวงจรเฉลี่ยพิกัด $dq0$ ที่ใช้ในบทความนี้

3. ขั้นตอนการศึกษา

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น จะใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ในรูปที่ 3 และแบบจำลองวงจรเฉลี่ยพิกัด $dq0$ ในรูปที่ 9 เพื่อศึกษา วิเคราะห์และจำลองวงจรดังกล่าว ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองคือ แรงดันกระแสสลับด้านขาเข้าสามเฟส $380V_{L-L}$ แรงดันกระแสตรงขา ออกพิกัด $1kV$ วงจรกรอง LC สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด $10\mu H$ ต่อเฟส และตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาด $100\mu F$ โหลดเป็นตัวต้านทาน 100 โอห์ม

3.1 กรณีศึกษาแบบวงจรเฉลี่ย (Averaged Circuit Model)

อ้างอิงบนแกน d, q (d, q axis) และ แกน abc (abc axis)

3.1.1 หาจุดทำงาน (Steady - State Operating Point) ของวงจรในรูปที่ 9 เมื่อใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) เพื่อวิเคราะห์วงจรเฉลี่ยในรูปที่ 9 จะได้ [4]

จาก KVL :

$$v_d + 3\omega L i_q - d_d v_{dc} = 0$$

$$d_d v_{dc} - 3\omega L i_q = v_d \quad (18)$$

$$v_q + 3\omega L i_d - d_q v_{dc} = 0$$

$$d_q v_{dc} - 3\omega L i_d = v_q \quad (19)$$

จาก KCL :

$$d_d i_d + d_q i_q = \frac{v_{dc}}{R} \quad (20)$$

พิจารณาสมการสถานะที่อ้างอิงกับบนแกน d, q จะได้

$$v_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot v_m \text{ (เมื่อ } v_m : \text{max line - to - line voltage),}$$

$$v_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2} \cdot 380 = 658.18, v_0 = 0,$$

$$i_d = \frac{v_{dc}}{R \cdot dq} = 15.197, i_q = 0, d_d = \frac{v_d}{v_{dc}} = 0.658,$$

$$d_q = \frac{-3\omega L i_d}{v_{dc}} = -0.00014$$

หลังจากนั้น จำลองวงจรเฉลี่ย อาศัยวงจรสมมูลในรูปที่ 9 บนโปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อหาคำตอบเปรียบเทียบค่าจุดทำงานในช่วง Steady State กับค่าที่คำนวณได้ในหัวข้อ 3.1.1

3.1.2 ทำการจำลองวงจรเฉลี่ย อาศัยวงจรสมมูลในรูปที่ 9 เพื่อจำลองวงจรเฉลี่ย บนโปรแกรม MATLAB SIMULINK และทำการเปรียบเทียบค่าจุดทำงานในช่วง Steady State กับค่าที่คำนวณได้ในหัวข้อการหาจุดทำงาน (Steady - State Operating Point)

3.1.3 ทำการจำลองเหตุการณ์แรงดันขาเข้า (AC) ตกจาก 100% เป็น 80% ของแรงดันปกติ กำหนดให้ค่า Duty คงที่

3.2 กรณีศึกษาแบบจำลองวงจรสวิตชิง (Switching Circuit Model)

3.2.1 จำลองการทำงานของวงจรสวิตชิงอาศัยวงจรในรูปที่ 4 ใช้สวิตช์อุดมคติแทนไอจีบีที (IGBT) จำลองวงจรสวิตชิงบนโปรแกรม MATLAB SIMULINK และใช้การมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบ SPWM ด้วยความถี่สวิตช์ 20kHz

3.2.2 ทำการจำลองเหตุการณ์แรงดันขาเข้า (AC) ตกจาก 100% เป็น 80% ของแรงดันปกติ กำหนดให้ค่า Duty คงที่

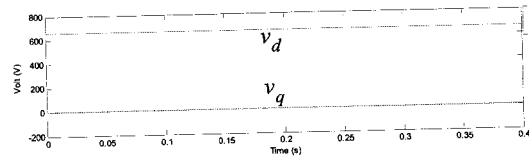
3.3 กรณีศึกษาเปรียบเทียบการจำลองระหว่างแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิง

ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองทั้งสองแบบ แล้วจำลองภายใต้เงื่อนไขกรณีศึกษาต่างๆ และปรับตั้งพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ให้เหมือนกันทั้งสองแบบจำลอง หลังจากนั้นนำผลการจำลองสรุปในตารางแล้วทำการเปรียบเทียบกัน

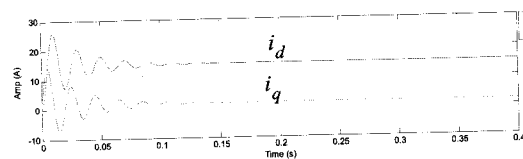
4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 ผลการศึกษารณิจำลองวงจรเฉลี่ยอ้างอิงบนแกน d, q

4.1.1 ผลการจำลองแบบจำลองวงจรเฉลี่ยบนโปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อหาคำตอบเปรียบเทียบค่าจุดทำงานในช่วง Steady State กับค่าที่คำนวณ สามารถแสดงได้ดังนี้

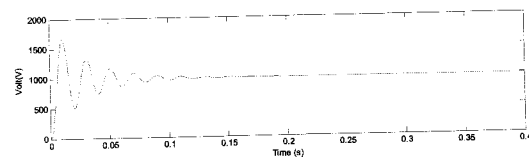


(ก)

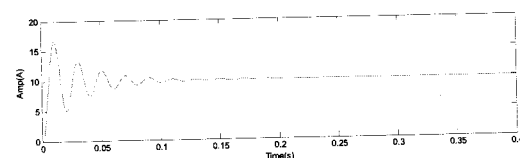


(ข)

รูปที่ 10 รูปคลื่น (ก) v_{dq} และ (ข) i_{dq} ที่ได้จากการจำลองของแบบจำลองวงจรเฉลี่ย



(ก)



(ข)

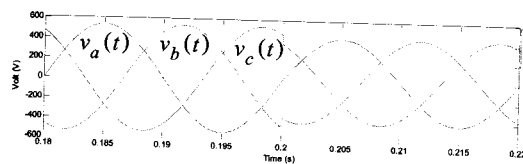
รูปที่ 11 รูปคลื่น (ก) แรงดัน v_{dc} และ (ข) กระแส i_{dc} ทางด้านขาออกของแบบจำลองวงจรเฉลี่ย

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่ได้จากการจำลองวงจรเฉลี่ย

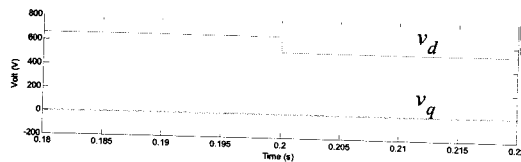
	v_d	v_q	i_d	i_q
ค่าที่คำนวณ	658.18 V	0 V	15.197A	0 A
ค่าจากการจำลอง	660.02 V	0.11 V	15.250A	0.17 A

หมายเหตุ: ค่าที่ได้จากผลการจำลองเป็นค่าเฉลี่ย

4.1.2 ผลการจำลองเหตุการณ์แรงดันขาเข้า (AC) ตกจาก 100% เป็น 80% ของแรงดันพิกัด กำหนดให้ค่า Duty คงที่ กรณีนี้จะทำการเปลี่ยนแรงดันขาเข้าที่ 100 % เป็น 80% ณ เวลา $t = 0.2$ s แสดงได้ดังนี้

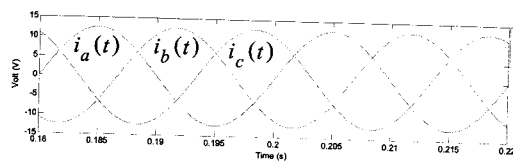


(ก)

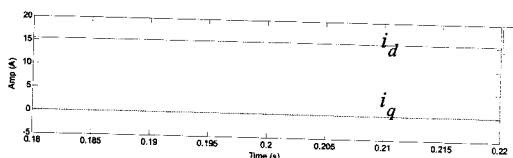


(ข)

รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันขาเข้า (ก) v_{abc} และ (ข) v_{dq}

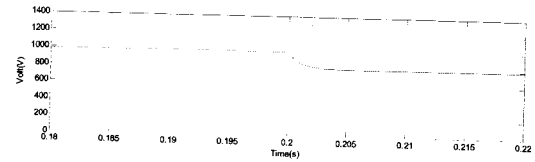


(ก)

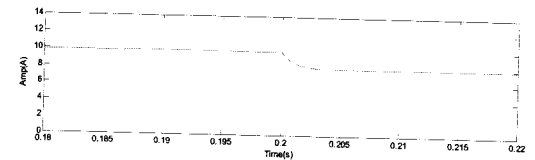


(ข)

รูปที่ 13 รูปคลื่นกระแสขาเข้า (ก) i_{abc} และ (ข) i_{dq}



(ก)

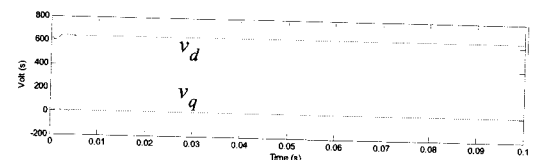


(ข)

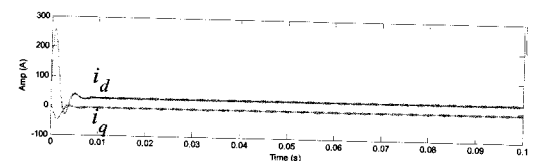
รูปที่ 14 รูปคลื่น (ก) แรงดัน v_{dc} และ (ข) กระแส i_{dc} ขาออกของแบบจำลองวงจรเฉลี่ย

4.2 ผลการศึกษากรณีจำลองแบบวงจรสวิตชิง

4.2.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรสวิตชิงที่ใช้การมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบ SPWM ด้วยความถี่สวิตซ์ 20kHz แสดงได้ดังนี้

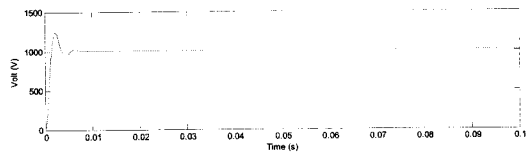


(ก)

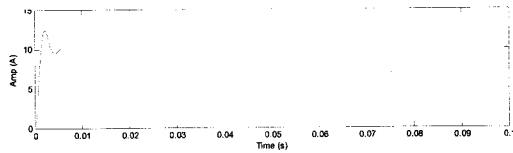


(ข)

รูปที่ 15 รูปคลื่น (ก) แรงดัน v_{dq} และ (ข) กระแส i_{dq} ที่ได้จากการจำลองของแบบจำลองวงจรสวิตชิง



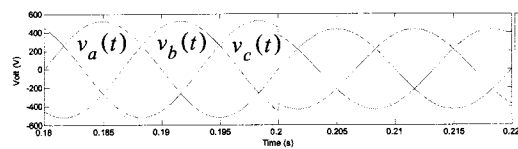
(ก)



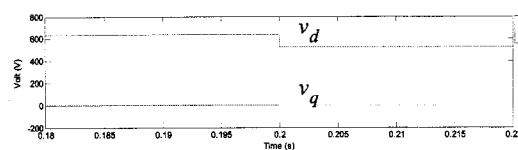
(ข)

รูปที่ 16 รูปคลื่น (ก) แรงดัน v_{dc} และ (ข) กระแส i_{dc} ขาออกของ
แบบจำลองวงจรสวิตชิง

4.2.2 ผลการจำลองเหตุการณ์แรงดันขาเข้า (AC) ตกจาก 100% เป็น
80% ของแรงดันพิกัด โดยให้ค่า Duty คงที่ กรณีนี้จะทำการเปลี่ยน
แรงดันขาเข้าที่ 100 % เป็น 80% ณ เวลา $t = 0.2$ s ดังรูปที่ 17

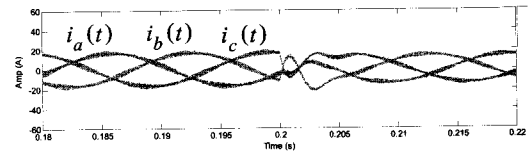


(ก)

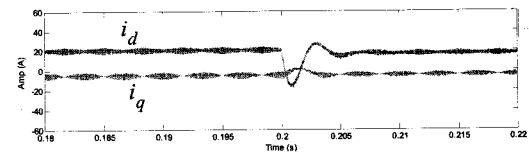


(ข)

รูปที่ 17 รูปคลื่นแรงดันขาเข้า (ก) v_{abc} และ (ข) v_{dq}

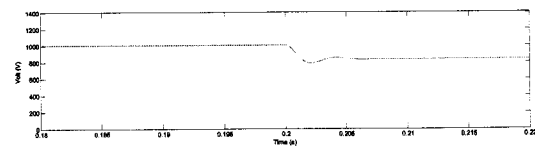


(ก)

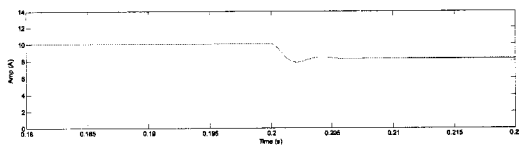


(ข)

รูปที่ 18 รูปคลื่นกระแสขาเข้า (ก) i_{abc} และ (ข) i_{dq}



(ก)



(ข)

รูปที่ 19 รูปคลื่น (ก) แรงดัน v_{dc} และ (ข) กระแส i_{dc} ขาออกของ
แบบจำลองวงจรสวิตชิง

4. 3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการจำลองระหว่างแบบวงจรเฉลี่ยและ แบบจำลองวงจรสวิตชิง

เปรียบเทียบผลการจำลองจากทั้งสองแบบจำลอง ภายใต้เงื่อนไข
ต่างๆ และปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ให้เหมือนกันทั้งสองแบบจำลอง
สามารถแสดงตารางสรุปการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองแบบ

แรงดันขาเข้า	แบบจำลองวงจรเฉลี่ย						แบบจำลองวงจรสวิตชิง					
	v_d	v_q	i_d	i_q	v_{dc}	i_{dc}	v_d	v_q	i_d	i_q	v_{dc}	i_{dc}
100 %	658.18V	0	15.28A	0	1005.62V	10.06A	660.15V	0	18.01A	0	1012.04V	10.14A
80 %	526.54V	0	15.28A	0	804.50V	8.50A	532.12V	0	17.96A	0	811.24V	8.11A

จากผลการศึกษาการณีสั่งกล่าว สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองในการจำลองครั้งนี้ได้ดังนี้

1. กรณีจำลองแบบวงจรเฉลี่ย ในโปรแกรม MATLAB SIMULINK และเปรียบเทียบค่าจุดทำงานในช่วง Steady State กับค่าที่คำนวณได้ผลลัพธ์ของการจำลองอธิบายได้ในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 ซึ่งพบว่าค่าของแรงดันและกระแสในช่วงนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ ส่วนค่าผิดพลาดนี้อาจเกิดจากตัวโปรแกรมที่นำค่าจริงที่เกิดจากการทำ cross couple และในวงจรมีการต่อ L และ C เข้าไปด้วยจึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนนี้ได้

2. กรณีจำลองแบบวงจรเฉลี่ย ซึ่งจำลองเหตุการณ์แรงดันขาเข้า ตกจาก 100% เป็น 80% ของแรงดันพิกัด กำหนดให้ค่า Duty คงที่ กรณีนี้จะทำการเปลี่ยนแรงดันขาเข้าที่ 100 % เป็น 80% ณ เวลา $t = 0.2$ s จะเห็นได้ในรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 14 กรณีนี้เมื่อพิจารณาารูปคลื่นดังกล่าวพบว่าแรงดันตกมีผลต่อแรงดันขาออก แต่เมื่อพิจารณาารูปคลื่นกระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

3. กรณีจำลองแบบวงจรสวิตชิงซึ่งผลการจำลองจะเห็นได้ในรูปที่ 15 และรูปที่ 16 จำลองเหตุการณ์แรงดันขาเข้าตกจาก 100% เป็น 80% ของแรงดันพิกัด กำหนดให้ค่า Duty คงที่ กรณีนี้จะทำการเปลี่ยนแรงดันขาเข้าที่ 100 % เป็น 80% ณ เวลา $t = 0.2$ s จะเห็นได้ดังรูปที่ 20 ถึงรูปที่ 22 เมื่อพิจารณาารูปคลื่นดังกล่าวพบว่ารูปคลื่นเกิดสัญญาณรบกวนจากการสับสาย (High Switching Noise) ปรากฏบนรูปคลื่นสัญญาณร่วมด้วย

4. กรณีศึกษาเปรียบเทียบการจำลองระหว่างแบบวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 จากผลการประเมินเปรียบเทียบกันทั้งสองแบบจำลอง สามารถสรุปโดยรวมได้ว่าผลของการจำลองทั้งสองแบบ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งถือว่ายอมรับได้ เนื่องจากมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 %

5. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาค่าแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิง ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบแปลงขึ้น ซึ่งถูกจำลองบนโปรแกรม MATLAB SIMULINK จากผลการจำลองทั้งสองแบบตามเงื่อนไขกรณีต่าง ๆ ขึ้นต้นแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกันและมีความถูกต้องกับค่าที่คำนวณไว้ ดังนั้นแนวทางของบทความในครั้งต่อไปจะศึกษาในส่วนของการควบคุมแบบป้อนกลับให้กับระบบ เพื่อให้การจำลองนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าบทความนี้เป็นประโยชน์สำหรับการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้านปฏิบัติการการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมมีความเชื่อถือพอที่จะสามารถพิสูจน์ว่ามีความถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎี

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. 2543. คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส, กรุงเทพฯ.
- [2] ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ. (ม.ป.ป). เอกสารประกอบการสอน Modeling and Control of Three Phase Pulse Width Modulation Converters. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] L.P. Singh. 2006. Advanced Power System Analysis and Dynamic. Fourth Edition. New Age International.
- [4] William, H. Jack, E. and Steven, M. (2007). Engineering Circuit Analysis. McGraw-Hill