

การใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน

จีระพงศ์ ศรีวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
199 หมู่ 3 ถนนพังโคน-วาริชภูมิ ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160
โทรศัพท์ 042-734724-5 โทรสาร 042-734723 E-mail: geerapongs@gmail.com

บทคัดย่อ

ในการศึกษาและวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์จะเริ่มจากการวิเคราะห์คุณลักษณะชิ้นส่วนในวงจรซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้อธิบายได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการของวงจร แล้วทำการหาผลเฉลยของสมการ บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาค่าแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตซ์ ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) ในบทความจะแสดงรายละเอียดของสมการต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองและแบบจำลองจะถูกจำลองบนโปรแกรม MATLAB / SIMULINK ซึ่งจะทำให้การจำลองหาค่าแบบจำลอง วงจรเฉลี่ยเปรียบเทียบกับแบบจำลองวงจรสวิตซ์ ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวกรณีศึกษาต่างๆ จะถูกนำเสนอไว้ตอนท้ายของบทความ

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน, แบบจำลองวงจรเฉลี่ย, แบบจำลองวงจรสวิตซ์

1. บทนำ

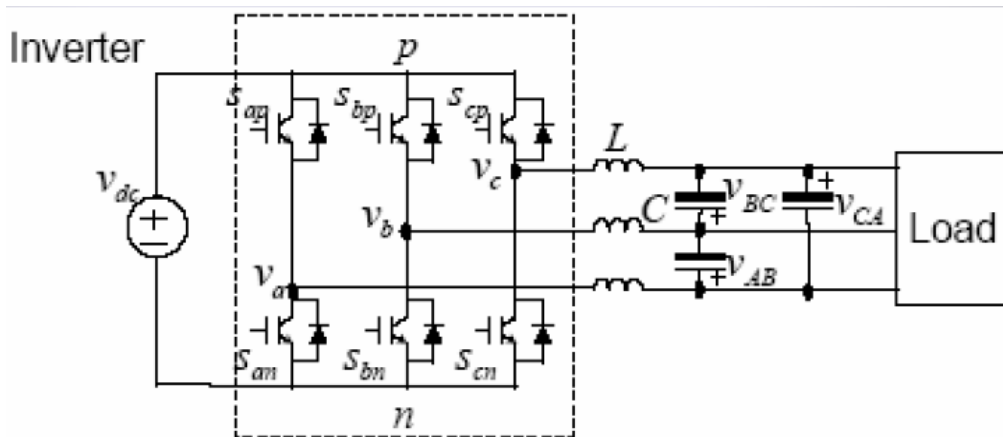
การจัดการเรียนการสอนระดับปริญญาตรีในกลุ่มวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีเนื้อหาสาระครอบคลุมในหลายหัวข้อ ซึ่งผู้เรียนต้องศึกษาให้เกิดความเข้าใจอย่างถ่องแท้ จึงจะสามารถนำเอาความรู้ไปใช้ได้จริงจังและถูกต้อง ดังเช่นในหัวข้อเรื่องวงจรอินเวอร์เตอร์ ผู้เรียนจะต้องศึกษาทั้งด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมที่ถูกต้องซึ่งจะสัมฤทธิ์ผลได้นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดลองเพื่อศึกษาค้นคว้าและพิสูจน์ว่าถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ ส่วนโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงโปรแกรม MATLAB / SIMULINK [1] มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้คำนวณเชิงตัวเลข และกราฟฟิคที่ซับซ้อน ปัจจุบันมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ มากมาย ในส่วนของ SIMULINK เป็นเครื่องมือที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาไม่ว่าจะเป็นระบบเชิงเส้น และระบบไม่เชิงเส้น รวมถึงระบบแบบเวลาต่อเนื่องและแบบเวลาไม่ต่อเนื่องในการจำลองระบบ SIMULINK จะติดต่อกับผู้ใช้แบบกราฟฟิค อาศัยการคลิกและการลากเมาส์เมื่อต้องการวิเคราะห์สมการโดยใช้ SIMULINK เพื่อวิเคราะห์และตั้งค่า การทำงานจะนำเอาอุปกรณ์ใน Library มาต่อกัน ซึ่งสามารถนำเอาสมการทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์

เมื่อต่ออุปกรณ์เสริมถ้าการต่อมีความถูกต้องก็ จะได้ผลลัพธ์ออกมา ซึ่งถือว่ามีความสะดวกในการวิเคราะห์อย่างมาก

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ จึงนำเสนอการ จำลองวงจร อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบจ่ายแรงดัน โดยจะทำการศึกษาแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตซ์ ซึ่งแบบจำลอง ดังกล่าวนี้จะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรม MATLAB / SIMULINK Version 7.0.4 (R14SP2) ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์ด้านการเรียนการสอนใน วิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่อไป

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

บทความวิจัยนี้ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟส ดังแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสที่มี LC เป็นตัวกรองผ่านต่ำ

ในการวิเคราะห์ห้วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [2] เมื่อพิจารณา รูปที่ 1 สามารถเขียนสมการสถานะที่อยู่บนแกน abc (abc axis) ได้ดังสมการที่ 1 ถึง 3

$$\frac{d\bar{i}_{l-l}}{dt} = \frac{1}{3L} \bar{S}_{l-l} \cdot v_{dc} - \frac{1}{3L} \bar{v}_{L-L}$$

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

$$\frac{d\bar{v}_{L-L}}{dt} = \frac{1}{C} \bar{i}_{l-l} - \frac{1}{RC} \bar{v}_{L-L} \quad (2)$$

$$i_{dc} = \bar{S}_{l-l}^T \cdot \bar{i}_{l-l}$$

$$i_{dc} = \bar{d}_{l-l}^T \cdot \bar{i}_{l-l} \tag{3}$$

เมื่อ
$$\bar{v}_{L-L} = \begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{bmatrix}, \bar{v}_{l-l} = \begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix}, \bar{i}_{l-l} = \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix}, \bar{S}_{l-l} = \begin{bmatrix} S_{ab} \\ S_{bc} \\ S_{ca} \end{bmatrix}, \bar{d}_{l-l} = \begin{bmatrix} d_{ab} \\ d_{bc} \\ d_{ca} \end{bmatrix}$$

v_{l-l} คือ แรงดันระหว่างเฟสหน่วยเป็นโวลต์

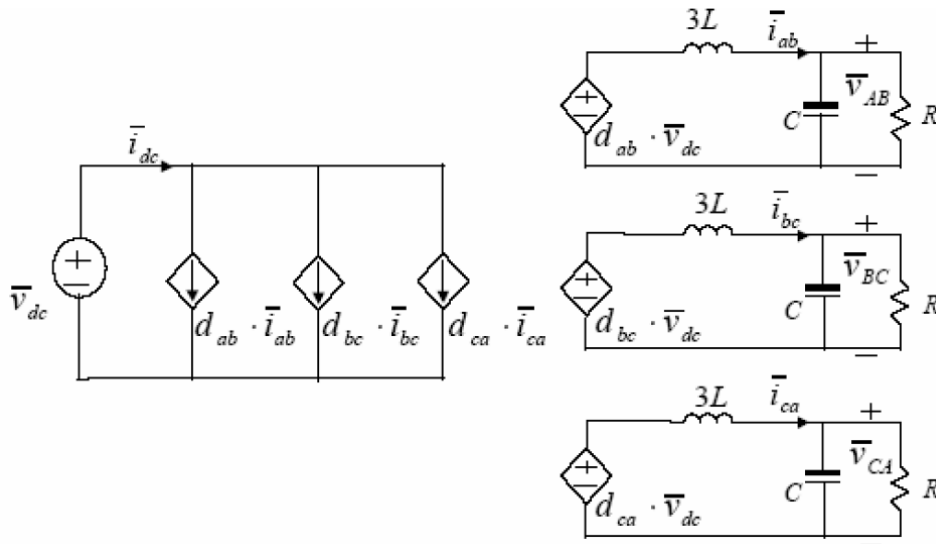
i_{l-l} คือ กระแสระหว่างเฟสหน่วยเป็นแอมป์

S_{l-l} คือ การสวิตช์ระหว่างเฟส

d_{l-l} (line to line duty cycle) คืออัตราส่วนของช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ต่อคาบเวลาการสวิตช์

ระหว่างเฟส ($d_{ab} = \bar{S}_{ab}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t S_{ab}(\tau) d\tau = d_a - d_b$)

เมื่อนำวงจรในรูปที่ 1 มาเขียนเป็นวงจรสมมูลในพิกัดบนแกน abc (abc axis) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสอ้างอิงบนแกน abc (abc axis)

การแปลงค่าตัวแปรเพื่อลดความซับซ้อนในสมการแรงดันและกระแส สามารถทำได้โดยแปลงกระแสและแรงดันสามเฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกน (α, β) [3]

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

หลังจากแปลงกระแสและแรงดันไปเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกน α, β ต่อไปจะแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสและแรงดันบนแกน α, β ไปอยู่บนแกน d, q ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz โดยคูณเวกเตอร์กระแสและแรงดันด้วย $e^{-j\omega t}$ เมื่อ ω คือ ค่าความถี่หลักมูลฐานในหน่วย rad/s เราสามารถเขียนสมการการแปลงให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

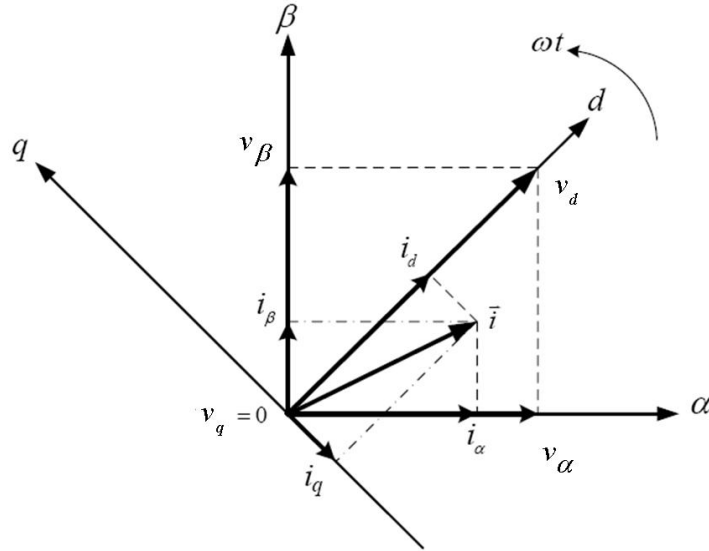
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

และการแปลงกระแสและแรงดันบนแกน d, q กลับไปเป็นสเปซเวกเตอร์ของกระแสและแรงดันบนแกน α, β โดยการคูณด้วย $e^{-j\omega t}$ ซึ่งสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

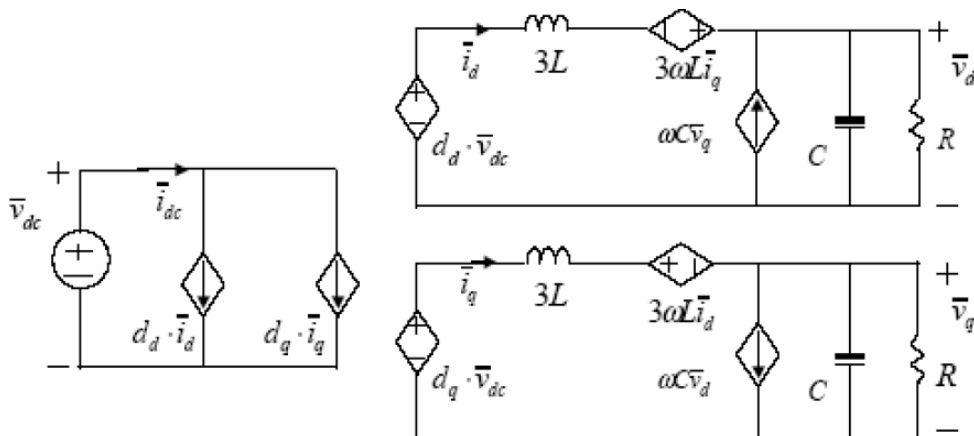
$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

จากวิธีการคำนวณองค์ประกอบของกระแสและแรงดันในระบบสามเฟสสามสาย ดังกล่าวข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เวกเตอร์กระแสและแรงดันบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความเร็ว ω

ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการสถานะที่อ้างอิงบนแกนนิ่ง (Stationary reference frame) แล้วนำมาเขียนวงจรสมมูลในพิกัดบนแกน d, q (d, q axis) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสอ้างอิงบนแกน d, q (d, q axis)

เมื่อนำสมการที่ 1 ถึง 3 ย้ายมาอ้างอิงบนแกน d,q (d,q axis) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4 ถึง 6

$$\frac{d\bar{i}_{dq}}{dt} = \frac{1}{3L} \bar{d}_{dq} \cdot \bar{v}_{dc} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{i}_{dq} - \frac{1}{3L} \bar{v}_{dq} \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{v}_{dq}}{dt} = \frac{1}{C} \bar{i}_{dq} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{v}_{dq} - \frac{1}{RC} \bar{v}_{dq} \quad (5)$$

$$\bar{i}_{dc} = \bar{d}_{dq}^T \cdot \bar{i}_{dq} \quad (6)$$

3. ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับบทความวิจัยนี้จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบแหล่งจ่ายแรงดันในรูปที่ 1 และ รูปที่ 3 กรณีศึกษาเพื่อใช้ในการจำลองและกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองดังนี้

- วงจรกรอง LC สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด $100\mu H$ /เฟส และตัวเก็บประจุไฟสลับขนาด $500\mu F$ /เฟส

- โหลดเป็นตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1 โอห์ม

- แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) มีค่าเท่ากับ 400V

3.1 กรณีศึกษาแบบวงจรเฉลี่ย (Averaged Circuit Model) อ้างอิงบนแกน d,q (d,q axis) และ abc (abc axis)

3.1.1 หาจุดทำงาน(Steady – State Operating Point) ของวงจรในรูปที่ 3 เมื่อใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law : KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์(Kirchhoff's Current Law : KCL) มาวิเคราะห์ห้วงจรเฉลี่ยในรูปที่ 3 จะได้ [4]

$$d_d \bar{v}_{dc} + 3\omega L i_q = \bar{v}_d \quad (7)$$

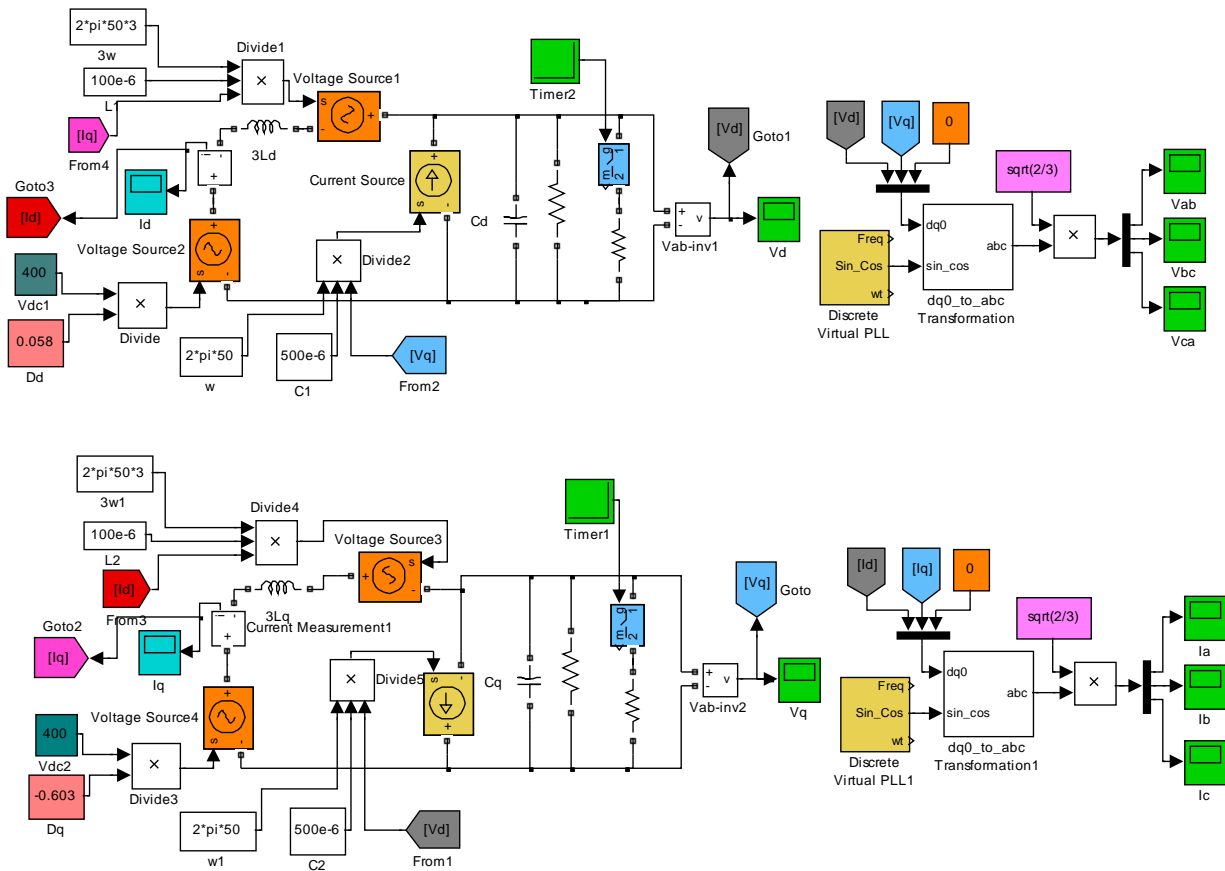
$$d_q \bar{v}_{dc} + 3\omega L i_d = \bar{v}_q \quad (8)$$

$$\bar{i}_d + \omega C \bar{v}_q = \bar{v}_d / R \quad (9)$$

$$\bar{i}_q + \omega C \bar{v}_d = \bar{v}_q / R \quad (10)$$

พิจารณาสมการสถานะที่อ้างอิงบนแกนนิ่งพิกัดบนแกน d,q (d,q axis) จะได้ $\bar{v}_d = 0$ และ $\bar{v}_q = -\sqrt{3/2} \cdot V_{BC} = -244.949V$ แทนค่า \bar{v}_d และ \bar{v}_q ลงในสมการ (9),(10) จะได้ $\bar{i}_d = 38.476A$ และ $\bar{i}_q = -244.949A$ แทนค่า \bar{i}_d และ \bar{i}_q ลงในสมการ (7) และ (8) จะได้ $d_d = 0.05771$ และ $d_q = -0.60331$ หลังจากนั้นทำการจำลองวงจรเฉลี่ยโดยจะอาศัยวงจรสมมูลในรูปที่ 3 บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อหาคำตอบเปรียบเทียบกับค่าจุดทำงานใช้ช่วง Steady State กับค่าที่คำนวณได้ในหัวข้อ 3.1.1

3.1.2 จำลองวงจรเฉลี่ยโดยจะอาศัยวงจรสมมูลในรูปที่ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ดังนี้



รูปที่ 5 แบบจำลองวงจรเฉลี่ยอินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจากโหลด $R = 1\Omega$ เป็น $R = 0.5\Omega$ เพื่อหาผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด (Load Step Response) และวาดรูปคลื่น $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$ โดยที่สภาวะคงตัว (Steady State):

$$V_{ab}(t) = V_{AB} \sin(\omega t), V_{bc}(t) = V_{BC} \sin(\omega t - 2\pi/3), V_{ca} = V_{CA} \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 200V, \omega = 100\pi \text{ rad} / s$$

3.1.3 การตอบสนองของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าดัชนีการมอดูเลชัน (Modulation Index : M) จาก 0.4 เป็น 0.8 โดยที่ให้คงค่า $R = 1\Omega$

a) คำนวณหาค่า d_d และ d_q ที่ค่าดัชนีการมอดูเลชันเท่ากับ 0.4 ($M = 0.4$) โดยที่

$$v_{L-L} = \frac{\sqrt{3} \cdot m_a \cdot v_{dc}}{2} = 138.56V, v_{ab} = v_{bc} = v_{ca} = 138.56V \text{ สามารถหาจุดทำงาน (Steady - State}$$

Operating Point) พิจารณาจากข้อกำหนดข้างต้นจะได้ $\bar{v}_d = 0$ และ $\bar{v}_q = -\sqrt{3/2} \cdot V_{BC} = -169.70V$ แทนค่า

\bar{v}_d และ \bar{v}_q ลงในสมการ (9),(10) จะได้ $\bar{i}_d = 26.66A$ และ $\bar{i}_q = -169.70A$ แทนค่า \bar{i}_d และ \bar{i}_q ลงใน

สมการ (7) และ (8) จะได้ $d_d = 0.03998$ และ $d_q = -0.4305$ พิจารณาค่าดัชนีการมอดูเลชันเท่ากับ 0.8

$$(M = 0.8) \text{ โดยที่ } v_{L-L} = \frac{\sqrt{3} \cdot m_a \cdot v_{dc}}{2} = 277.128V, v_{ab} = v_{bc} = v_{ca} = 277.128V \text{ สามารถหาจุดทำงาน}$$

(Steady - State Operating Point) พิจารณาจากข้อกำหนดข้างต้นจะได้ $\bar{v}_d = 0$ และ

$$\bar{v}_q = -\sqrt{3/2} \cdot V_{BC} = -339.411V \text{ แทนค่า } \bar{v}_d \text{ และ } \bar{v}_q \text{ ลงในสมการ (9),(10) จะได้ } \bar{i}_d = 53.31A \text{ และ}$$

$\bar{i}_q = -339.411A$ แทนค่า \bar{i}_d และ \bar{i}_q ลงในสมการ (7) และ (8) จะได้ $d_d = 0.07997$ และ

$$d_q = -0.8610$$

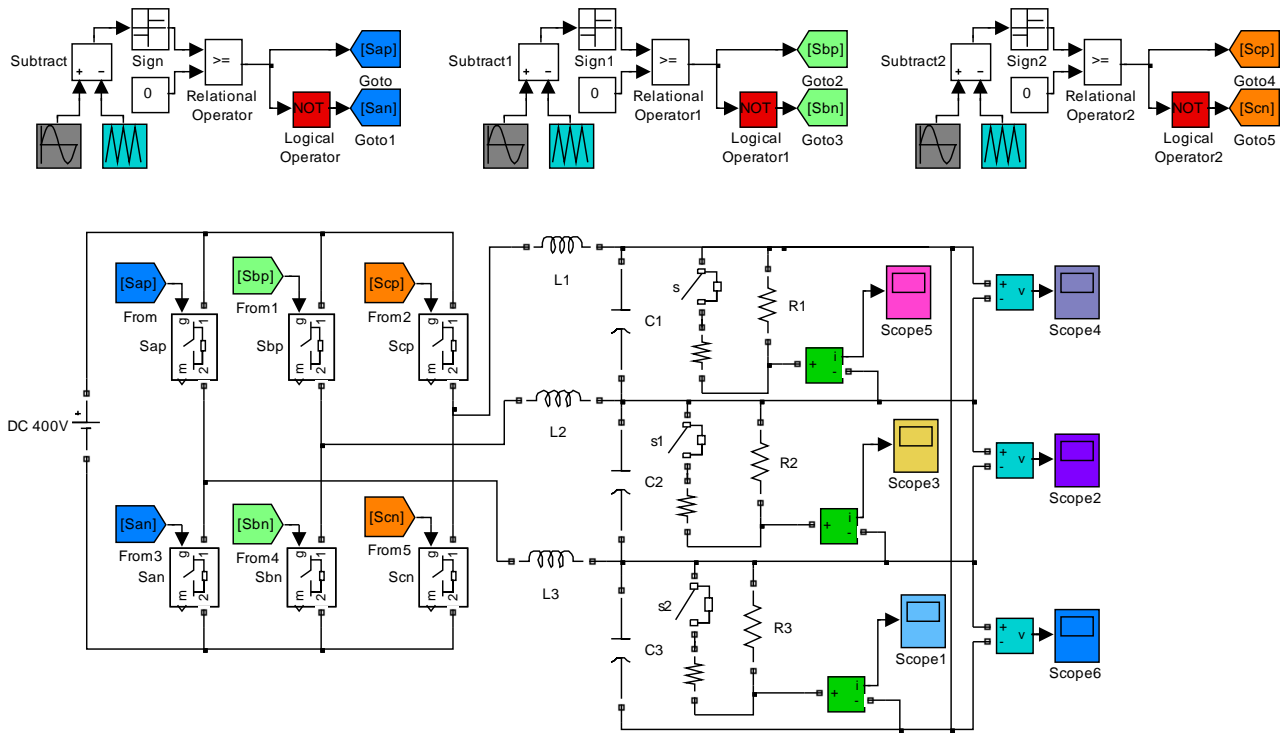
b) จำลองวงจรเฉลี่ยโดยจะอาศัยวงจรสมมูลในรูปที่ 3 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลชัน จาก 0.4 เป็น 0.8 โดยที่ให้คงค่า $R = 1\Omega$ เพื่อหาการตอบสนองของวงจรวาดรูปคลื่น $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$

3.2 กรณีศึกษาแบบจำลองวงจรสวิตชิง (Switching Circuit Model)

3.2.1 จำลองการทำงานของวงจรอาศัยวงจรในรูปที่ 1 โดยใช้สวิตซ์อุดมคติและใช้การมอดูเลชัน ความกว้างพัลส์แบบ SPWM ด้วยความถี่สวิตซ์ (switching frequency) เท่ากับ 20 kHz หลังจากนั้นทำการ จำลองผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด (Load Step Response) จาก $R = 1\Omega$ เป็น $R = 0.5\Omega$ และ วาดรูปคลื่น $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$ โดยที่สภาวะคงตัว (Steady State):

$$V_{ab}(t) = V_{AB} \sin(\omega t), V_{bc}(t) = V_{BC} \sin(\omega t - 2\pi / 3), V_{ca} = V_{CA} \sin(\omega t + 2\pi / 3)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 200V, \omega = 100\pi \text{ rad / s}$$



รูปที่ 6 แบบจำลองวงจรสวิตชิงอินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

3.2.2 จำลองการทำงาน ในรูปที่ 6 แบบจำลองวงจรสวิตชิง อินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสบน โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลชั่น จาก 0.4 เป็น 0.8 โดยที่ให้งค่า $R = 1\Omega$ เพื่อหาผลตอบสนองของวงจรและวาดรูปคลื่น $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$

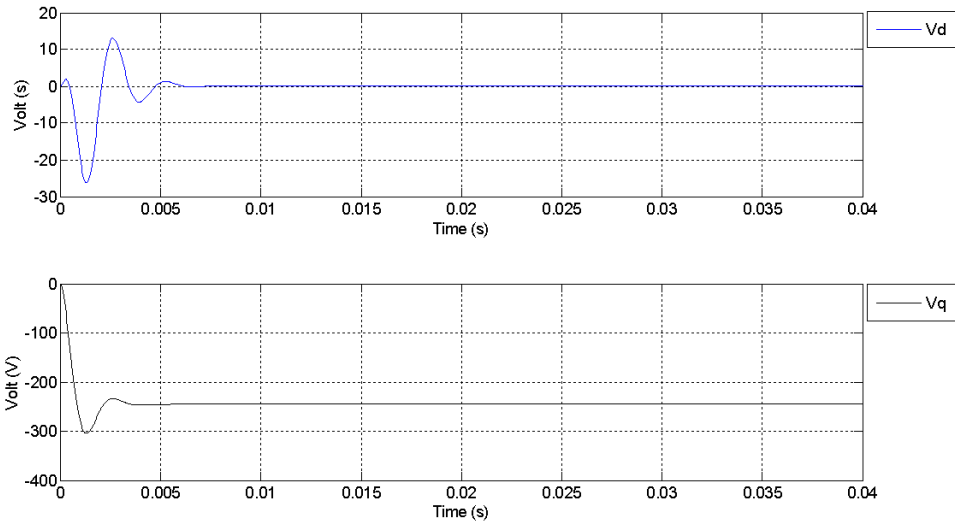
3.3 กรณีศึกษาเปรียบเทียบการจำลองระหว่างแบบวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิง

ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองจากทั้งสองแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขการศึกษาต่างๆ และการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ให้เหมือนกันทั้งสองแบบจำลอง หลังจากนั้นนำผลการจำลองไปสรุปในตารางแล้วทำการเปรียบเทียบกัน

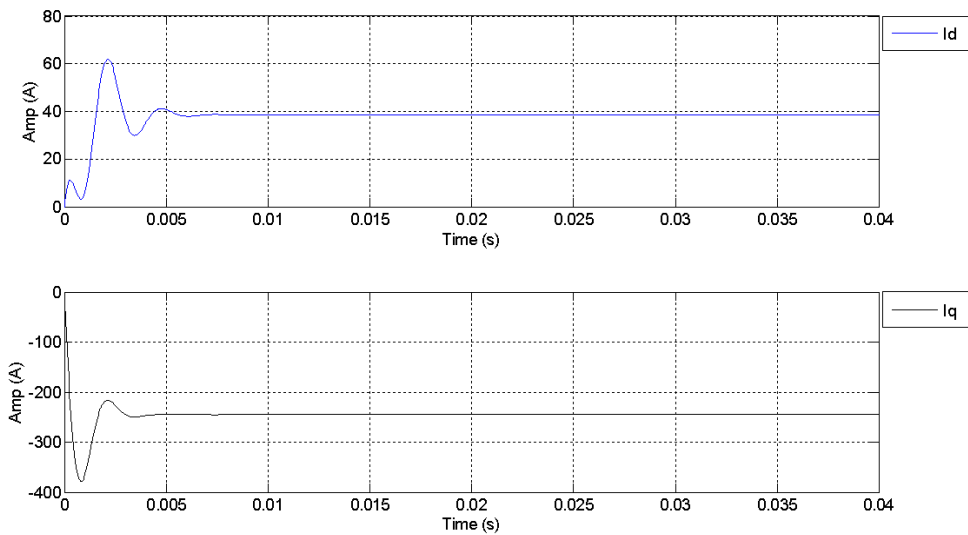
4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 ผลการศึกษากฎการจำลองวงจรเฉลี่ยอ้างอิงบนแกน d,q (d,q axis) และ abc (abc axis)

4.1.1 ผลการ จำลองแบบจำลอง วงจรเฉลี่ย บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อหาคำตอบเปรียบเทียบค่าจุดทำงานในช่วง Steady State กับค่าที่คำนวณ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8



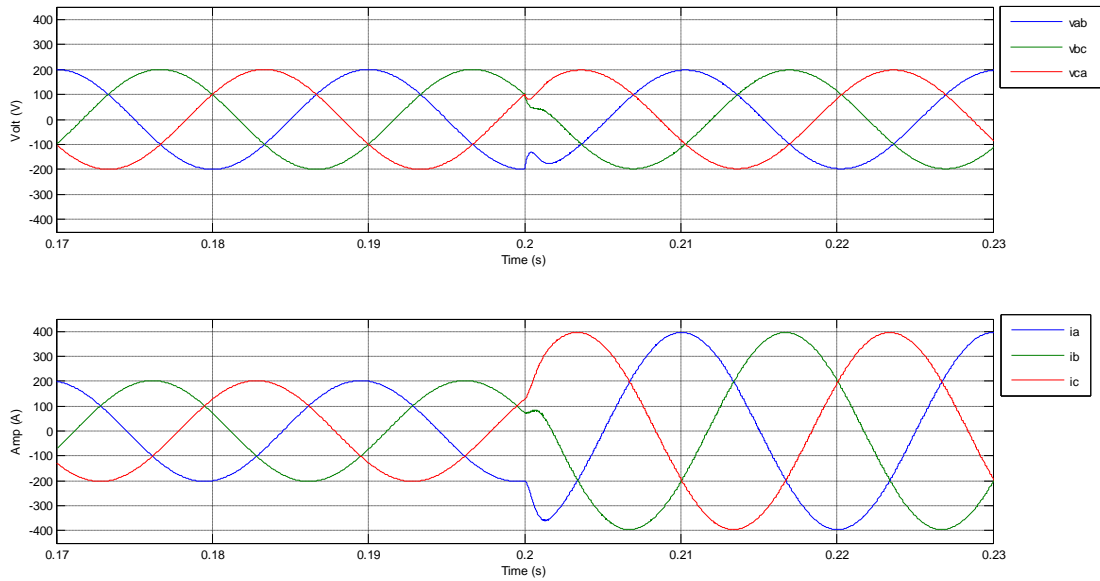
รูปที่ 7 รูปคลื่นแสดงค่า v_d และ v_q ที่ได้จากการจำลองของแบบจำลองวงจรเฉลี่ย



รูปที่ 8 รูปคลื่นแสดงค่า i_d และ i_q ที่ได้จากการจำลองของแบบจำลองวงจรเฉลี่ย

จากผลการจำลองการทำงาน ของแบบจำลอง วงจรเฉลี่ย ข้างต้น เมื่อสังเกตจาก รูปคลื่นที่ 7 และ 8 พบว่าในสภาวะเริ่มต้นการทำงานนั้น ขนาดของ v_d , v_q และ i_d , i_q จะเกิด overshoot ขึ้นและจะกลับเข้าสู่สภาวะคงที่หรืออยู่ในช่วง Steady State และจะเห็นว่าค่าของ v_d , v_q และ i_d , i_q ในช่วงนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ ส่วนค่าผิดพลาดนี้อาจเกิดจากตัวโปรแกรมที่นำค่าจริงที่เกิดจากการทำ cross couple และในวงจรมีการต่อ L และ C เข้าไปด้วยจึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนนี้ได้

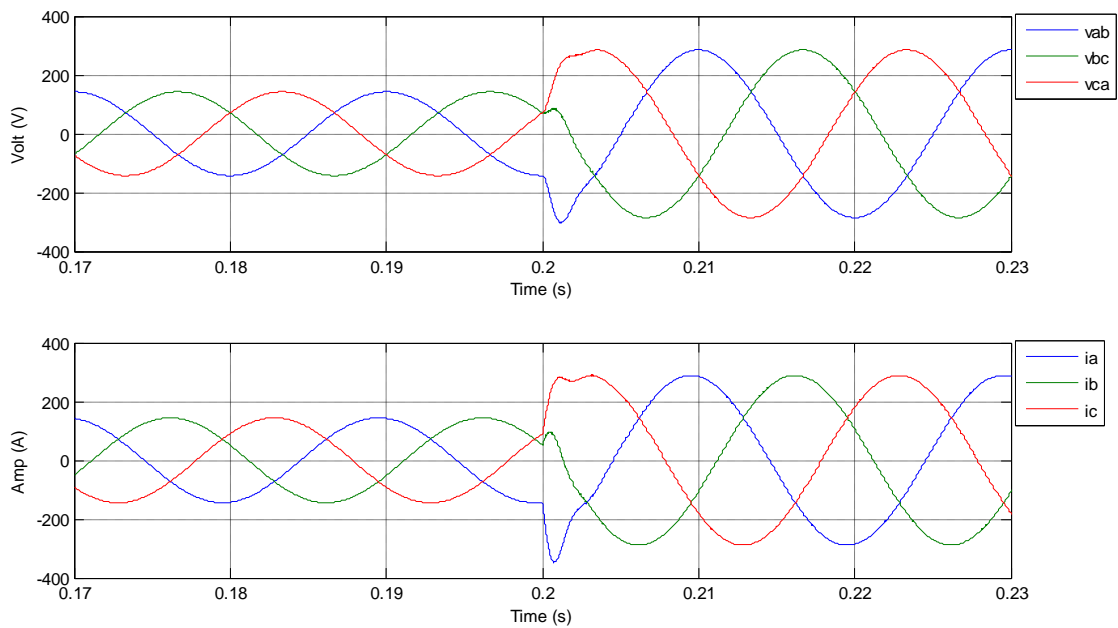
4.1.2 ผลการ จำลองผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ของโหลด (Load Step Response) จาก $R = 1\Omega$ เป็น $R = 0.5\Omega$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ และกระแส $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$

จากรูปที่ 9 เป็นการจำลองผล ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ของ โหลดกรณีโหลดเปลี่ยน จาก $R = 1\Omega$ เป็น $R = 0.5\Omega$ ณ เวลา $t = 0.2s$ ซึ่งจะเห็นว่า กระแส $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$ เพิ่มขึ้นเป็น สองเท่า แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่นของแรงดัน $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ และ $v_{ca}(t)$ จะยังคงสมดุลและคงที่อยู่ตลอดเวลา

4.1.3 ผลการจำลองการตอบสนองของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าดัชนีการมอดูเลชัน (Modulation Index : M) จาก 0.4 เป็น 0.8 โดยที่ให้คงค่า $R = 1\Omega$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10

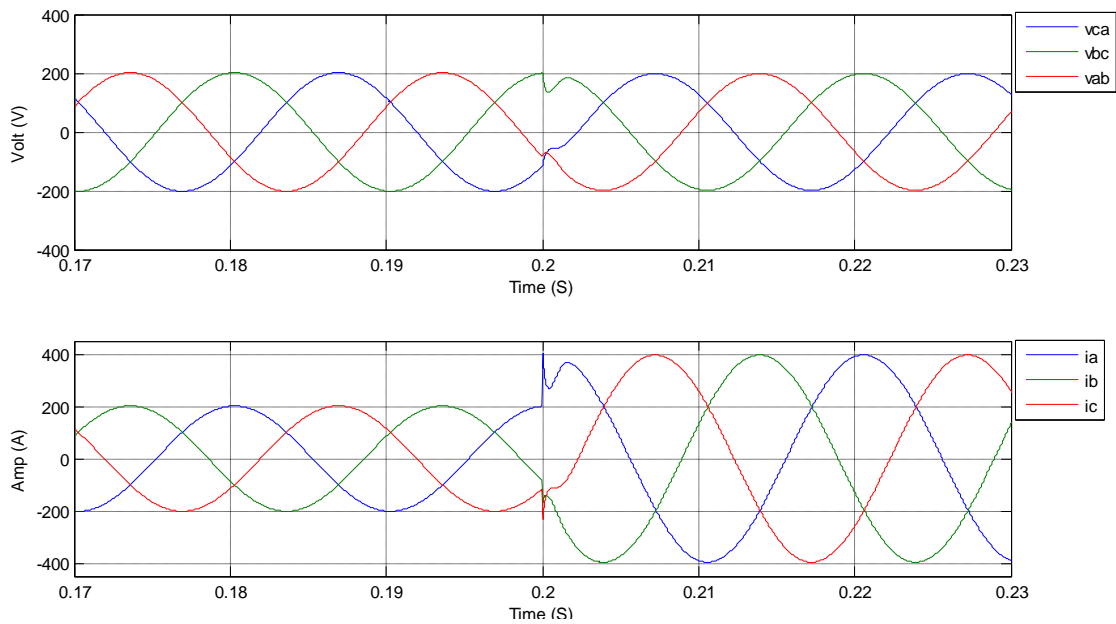


รูปที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ และกระแส $i_a(t)$ $i_b(t)$ $i_c(t)$

จากผลการจำลองรูปที่ 10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลชันจาก 0.4 เป็น 0.8 ณ เวลา $t=0.2s$ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลชันนี้มีอิทธิพลต่อขนาดแรงดันและกระแสทางด้านออกเปลี่ยนแปลงไปและพบว่าค่าแรงดันและกระแสในช่วงนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ข้างต้น

4.2 ผลการศึกษากรณีจำลองแบบวงจรสวิตชิง

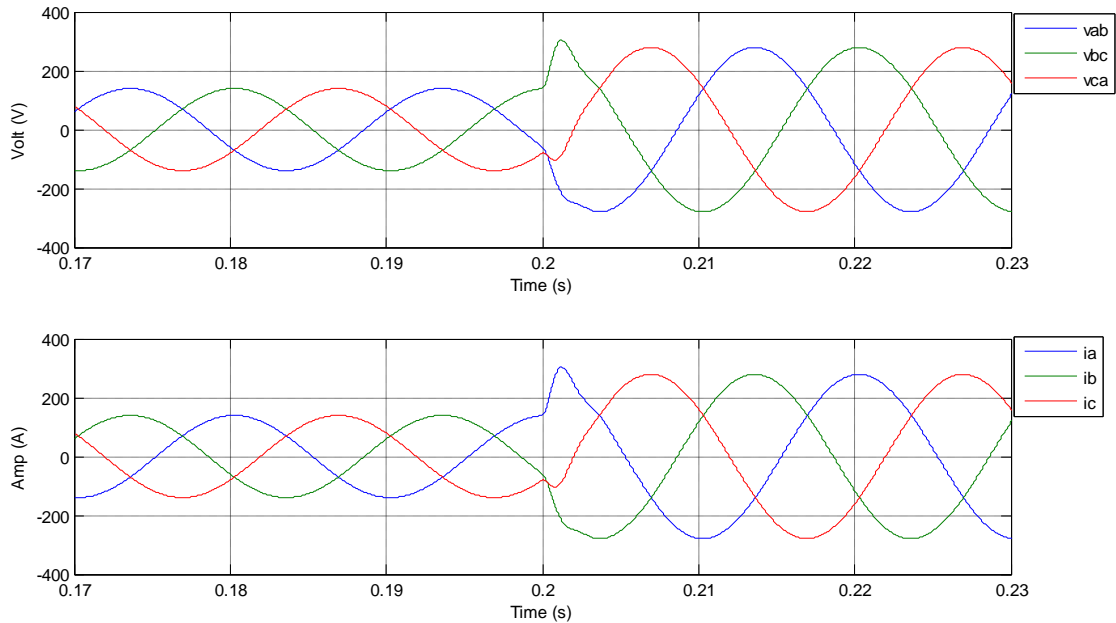
4.2.1 ผลการจำลองผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด (Load Step Response) จาก $R = 1\Omega$ เป็น $R = 0.5\Omega$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ และ กระแส $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$

จากรูปที่ 11 เป็นการจำลองแบบจำลองวงจรสวิตชิง กรณีศึกษาผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยเปลี่ยน โหลดจาก $R = 1\Omega$ เป็น $R = 0.5\Omega$ ณ เวลา $t = 0.2s$ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ณ เวลา $t = 0.2s$ ทำให้กระแส $i_a(t)$ $i_b(t)$ และ $i_c(t)$ เพิ่มมากขึ้นเป็นสองเท่า ซึ่งสัญญาณรูปคลื่นของแรงดัน $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ และ $v_{ca}(t)$ นี้จะมีสัญญาณรบกวนจากการสับสาย (High Switching Noise) ปรากฏบนรูปคลื่นสัญญาณร่วมด้วย

4.2.2 ผลการจำลองการตอบสนองของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าดัชนีการมอดูเลชัน (Modulation Index : M) จาก 0.4 เป็น 0.8 โดยที่ให้คงค่า $R = 1\Omega$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน $v_{ab}(t)$ $v_{bc}(t)$ $v_{ca}(t)$ และกระแส $i_a(t)$ $i_b(t)$ $i_c(t)$

ผลการจำลองรูปที่ 12 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลชันจาก 0.4 เป็น 0.8 ณ เวลา $t=0.2s$ โดยที่ให้คงค่า โหลด $R = 1\Omega$ ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลชันนี้มีอิทธิพลต่อขนาดแรงดันและกระแสทางด้านออกเปลี่ยนแปลงไป

3. ผลการศึกษาเปรียบเทียบการจำลองระหว่างแบบวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิง

ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองจากทั้งสองแบบจำลอง ภายใต้เงื่อนไขการณศึกษาต่างๆ และการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ให้เหมือนกันทั้งสองแบบจำลอง สามารถแสดงตารางสรุปการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตารางสรุปการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองแบบ

กรณีศึกษา	แบบจำลองวงจรเฉลี่ย						แบบจำลองวงจรสวิตชิง					
	แรงดัน (V)			กระแส (A)			แรงดัน (V)			กระแส (A)		
	$v_{ab}(t)$	$v_{bc}(t)$	$v_{ca}(t)$	$i_a(t)$	$i_b(t)$	$i_c(t)$	$v_{ab}(t)$	$v_{bc}(t)$	$v_{ca}(t)$	$i_a(t)$	$i_b(t)$	$i_c(t)$
เปลี่ยนโหลด												
$R = 1\Omega$	200.82	202.34	201.09	200.09	201.11	200.46	204.65	201.98	202.52	201.26	200.95	200.32
$R = 0.5\Omega$	201.29	200.33	201.02	401.23	402.74	401.18	202.14	202.43	202.53	400.69	402.92	401.37
การมอดูเลชัน												
$M = 0.4$	147.21	149.73	149.13	146.52	148.92	147.44	148.98	149.23	148.43	145.22	149.32	148.32
$M = 0.8$	275.95	279.42	277.54	279.23	278.41	279.02	279.08	280.01	279.91	278.22	279.56	279.89

จากตารางที่ 1 เป็นการสรุปผลการจำลองกรณีศึกษาต่าง ๆ ของแบบจำลองทั้งสองแบบจากการประเมินผลการเปรียบเทียบการจำลองระหว่างแบบจำลองวงจรเฉลี่ยและแบบจำลองวงจรสวิตชิง กล่าวสรุปโดยรวมแล้วผลของการจำลองทั้งสองแบบ มีค่าใกล้เคียงกัน

5. สรุปผลการศึกษา

บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลอง ทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาค่าแบบจำลอง วงจรเฉลี่ย และแบบจำลองวงจรสวิตชิงของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) ซึ่งจะถูกจำลองบน โปรแกรม MATLAB / SIMULINK จากผลการจำลองทั้งสองแบบตามเงื่อนไขต่าง ๆ ขึ้นต้นแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกันและมีความถูกต้องกับค่าที่คำนวณไว้ ดังนั้นแนวทางของบทความวิจัยในครั้งต่อไปจะมีการเพิ่มในส่วนของการควบคุมป้อนกลับให้กับระบบ เพื่อให้การจำลองนี้สมบูรณ์ขึ้น อย่างไรก็ตามบทความวิจัยนี้จะประโยชน์สำหรับการจัดการเรียนการสอนในกลุ่มวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้านปฏิบัติการการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรม สามารถพิสูจน์ว่ามีความถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎี

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระยุทธ บุญรอง. (2547). การวิเคราะห์ระบบควบคุมป้อนกลับด้วย Matlab/Simulink. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [2] ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ. (ม.ป.ป). เอกสารประกอบการสอน การจำลองและการควบคุมเครื่องแปลงผันสามเฟสแบบอาศัยการมอดูเลตความกว้างพัลส์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] H. Kim , H. Akagi. (1999). The Instantaneous Power Theory on the Rotating p-q-r Reference Frames. International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Hong Kong.
- [4] William, H. Jack, E. and Steven, M. (2007). Engineering Circuit Analysis. McGraw-Hill.

ประวัติเจ้าของบทความ



นายจิระพงศ์ ศรีวิชัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน และระดับปริญญาโท วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ . ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร

บทความนี้ส่งเข้ามาเมื่อ 14 มีนาคม 2553 และได้รับพิจารณาให้ตีพิมพ์ใน JPEE เมื่อ 21 มิถุนายน 2553