

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ที่มีโหลดเป็นตัว ต้านทานโดยวิธีตีคิ่ว

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง¹⁾ กองพัน อารีรักษ์²⁾ และ กองพล อารีรักษ์³⁾

บทคัดย่อ

แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีตีคิ่ว ซึ่งวิธีดังกล่าวจะกำจัดผลของการสวิตช์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมของระบบ สำหรับระบบที่ศึกษาเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสและวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ซึ่งมีโหลดเป็นตัวต้านทาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะเปรียบเทียบด้วยผลการจำลองสถานการณ์ ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์จากวิธีตีคิ่วกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ วิธีตีคิ่ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000, อีเมล: koson_ee@hotmail.com

²⁾ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000, อีเมล: kongpan@sut.ac.th

³⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000, อีเมล: kongpol@sut.ac.th

* Corresponding Author

Modeling of Three-phase Controlled Rectifier with a Resistive Load using a DQ Method

kosol Chaicharoenudomrung¹⁾ kongpan Areerak^{*2)} and konspol Areerak³⁾

Abstract

Power converter models are normally time-varying due to the switching actions of power electronic devices. This paper presents the mathematical model of the power electronic based system derived from the dq method. The dq method can eliminate the switching action to achieve the time-invariant model. This model can be easily used with the conventional method for the system analysis and design. The considered system in the paper is a three-phase power system and a controlled rectifier feeding a resistive load. The intensive time-domain simulation is used to validate the purposed model. The simulation results show that a good agreement between the dq model and the benchmark model is achieved.

Keywords: Three-phase controlled rectifier, dq method, mathematical model

¹⁾ Post graduated Students, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: koson_ee@hotmail.com

²⁾ Lecturer, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: kongpan@sut.ac.th

³⁾ Assistance Professor, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: kongpol@sut.ac.th

* Corresponding Author

1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรถิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาใช้ใน งานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลง ผันกำลัง ซึ่งวงจรจะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กำลัง แบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงเป็น สิ่งจำเป็น เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบรวมถึงการ ออกแบบตัวควบคุม โดยทั่วไปแบบจำลองของวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้าจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์ ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีพื้นฐานมา วิเคราะห์ระบบได้ การกำจัดผลของสวิตช์ จะทำให้ได้ แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา(time-invarying model) จึงเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ย ปริภูมิสถานะ(generalized state-space averaging method: SSA) วิธีดีคิว(DQ method) เป็นต้น วิธีค่าเฉลี่ย ปริภูมิสถานะ ส่วนมากใช้ในการวิเคราะห์วงจรแปลงผัน กำลังในระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Mahdavi, et al., 1997, Emadi, 2004, and Jalla, et al., 2004) เช่น วงจรแปลง ผันแบบบัค (buck conveter) วงจรแปลงผันแบบบูสต์ (boot conveter) เป็นต้น สำหรับวิธีดีคิวจะมีความ เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถ แทนวงจรแปลงผันกำลังได้ด้วยหม้อแปลง(Areerak, et al., 2008, Areerak, et al., 2008, Rim, et al., 1994, and Han, et al., 1998) ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอ วิธีดีคิวสำหรับหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร เรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยไทรสเตอร์เป็น อุปกรณ์ในการสวิตช์ ซึ่งการนำวิธีดีคิวมาใช้ในการหา แบบจำลองของระบบดังกล่าว เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน

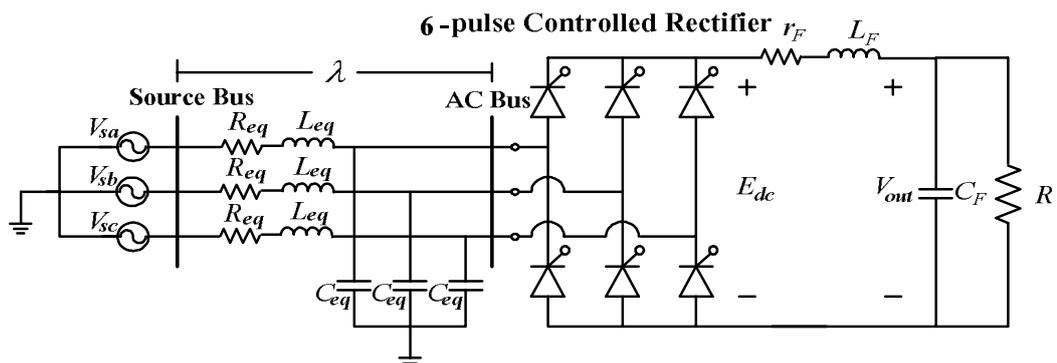
ยังไม่ปรากฏมาก่อนหน้านี้ ดังนั้น แบบจำลองที่ได้ใน บทความนี้ จึงสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบและ ออกแบบตัวควบคุม สำหรับงานวิจัยในอนาคตได้

บทความนี้ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะ นำเสนอในส่วนที่ 2 และในส่วนที่ 3 จะอธิบายถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์จากวิธีดีคิว การคำนวณหาค่าที่สถานะอยู่ตัวจะอยู่ในส่วนที่ 4 และใน ส่วนที่ 5 เป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ของ ระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และใน ส่วนสุดท้าย จะกล่าวถึงบทสรุปและประเด็นสำคัญที่ได้ จากบทความวิจัยนี้

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียง กระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้ไทรสเตอร์เป็น อุปกรณ์ในการสวิตช์ วงจรกรองสัญญาณทางด้านไฟฟ้า กระแสตรง และโหลดความต้านทาน

จากรูปที่ 1 สมมติแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสาม เฟส เป็นแบบสมดุล R_{eq} L_{eq} และ C_{eq} แทนพารามิเตอร์ของ สายส่ง ส่วนพารามิเตอร์วงจรกรองแทนด้วย r_F L_F และ C_F ในขณะที่ E_{dc} และ V_{out} เป็นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียง กระแส และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_F ของวงจร กรอง ตามลำดับ โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน R มุมการ เลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (Source Bus) และบัส แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ(AC Bus) แทนด้วยค่า λ ซึ่ง แสดงในรูปที่ 1

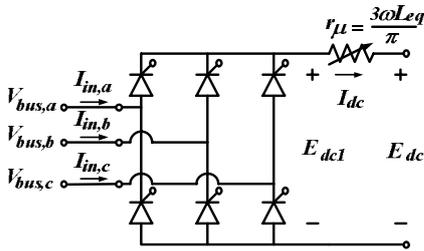


รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

ผลจาก L_{eq} ด้านไฟฟ้ากระแสสลับส่งผลให้เกิดมุมความเหลื่อม μ (Overlap angle) ซึ่งทำให้แรงดันขาออกของวงจรเรียงกระแสลดลง ผลกระทบนี้สามารถพิจารณาแทนด้วยความต้านทานปรับค่าได้ r_μ (Mohan, et al., 2003) ที่บริเวณด้านไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังนี้

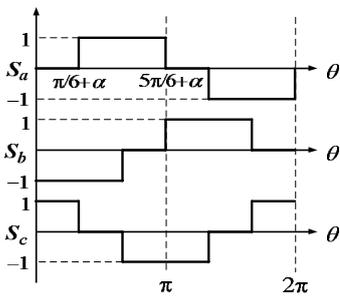
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (1)$$

เมื่อ ω เป็นความถี่ของแหล่งจ่าย



รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้และความต้านทานมุมความเหลื่อม

จากรูปที่ 2 E_{dc1} แทนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม ในขณะที่ E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรที่พิจารณาผลกระทบของมุมเหลื่อม และเนื่องจากการพิจารณาผลกระทบของมุมเหลื่อมด้วย r_μ แล้วดังนั้น สัญญาณสวิตชิงของวงจรดังกล่าวจะเป็นดังรูปที่ 3 เมื่อ α คือ มุมจุดชนวนของไทรสเตอร์



รูปที่ 3 สัญญาณสวิตชิงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

สัญญาณสวิตชิง ในรูปที่ 3 กรณีที่ไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{S}_{abc} = S \begin{bmatrix} \sin(\alpha + \phi - \alpha) \\ \sin(\alpha - \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) \\ \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ S คือ ค่ายอดของฟังก์ชันการสวิตช์ สำหรับองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\sqrt{3}/\pi$

ϕ คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

α คือ มุมจุดชนวนของไทรสเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ แสดงได้ดังสมการ (3)

และ สมการ (4) ดังนี้

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \quad (3)$$

$$E_{dc1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } \mathbf{I}_{in,abc} = \begin{bmatrix} I_{in,a} \\ I_{in,b} \\ I_{in,c} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_{abc} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}_{bus,abc} = \begin{bmatrix} V_{bus,a} \\ V_{bus,b} \\ V_{bus,c} \end{bmatrix}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่แสดงดังรูปที่ 1 จะอาศัยวิธีการแปลงดีคิวภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

- วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ทำงานที่โหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM)
- แหล่งจ่ายสามเฟสเป็นแบบสมดุล
- ไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิว ซึ่งสามารถเปลี่ยนวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ให้อยู่ในรูปแบบของแกนหมุนดีคิว สมการใช้ในการแปลงเป็นดังนี้

$$\mathbf{T}[\theta(t)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \cos(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta(t)) & -\sin(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ $\theta(t) = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1$

นำสมการ (2), สมการ (3), และ สมการ (4) มาแปลงเพื่อให้อยู่ในรูปของแกนตีคว ด้วยสมการ (5) สามารถเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\mathbf{I}_{in,dq} = \mathbf{S}_{dq} I_{dc} \quad (6)$$

$$E_{dc1} = \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq} \quad (7)$$

เมื่อ $\mathbf{I}_{in,dq} = \begin{bmatrix} I_{in,d} \\ I_{in,q} \end{bmatrix}$ $\mathbf{S}_{dq} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix}$ $\mathbf{V}_{bus,dq} = \begin{bmatrix} V_{bus,d} \\ V_{bus,q} \end{bmatrix}$

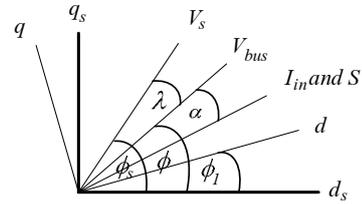
ฟังก์ชันการสวิตช์ในสมการ (2) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนตีคว (\mathbf{S}_{dq}) ด้วยสมการ (5) ดังที่ปรากฏอยู่ในสมการ (6) และ สมการ (7) รายละเอียดของ \mathbf{S}_{dq} แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{S}_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 - \phi + \alpha) \\ -\sin(\phi_1 - \phi + \alpha) \end{bmatrix} \quad (8)$$

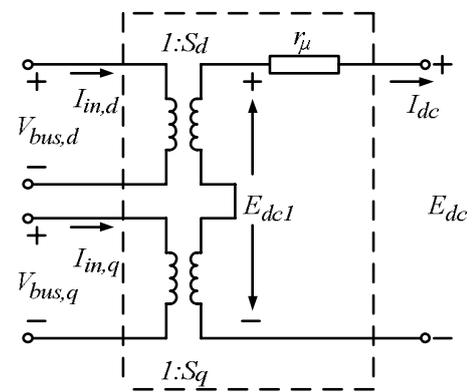
แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงตีคว แสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยที่ V_S คือ ค่ายอดแรงดันเฟสที่แหล่งจ่าย I_{in} คือ ค่ายอดกระแสอินพุตที่ไหลเข้าสู่วงจรเรียงกระแส V_{bus} คือ ค่ายอดแรงดันที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และ S คือ ค่ายอดของฟังก์ชันการสวิตช์ ซึ่งมีค่าเท่า $2\sqrt{3}/\pi$ ดังแสดงไว้ในสมการ (3)

จากสมการ (6), สมการ (7), และ สมการ (8) สังเกตได้ว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ สามารถแทนด้วยหม้อแปลง ที่อยู่บนแกนตีและแกนคว อัตราส่วนของหม้อแปลง \mathbf{S}_{dq} จะขึ้นอยู่กับมุมการหมุนของแกนตีคว (ϕ_1) เฟสของ V_{bus} (ϕ) และมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ (α)

ดังนั้น แบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ เมื่อใช้วิธีตีคว แสดงได้ดังรูปที่ 5

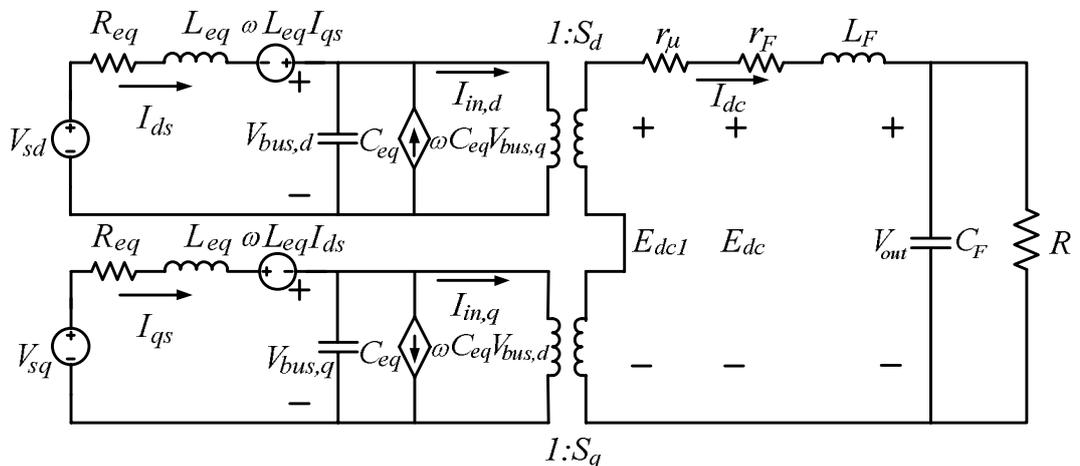


รูปที่ 4 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงตีคว

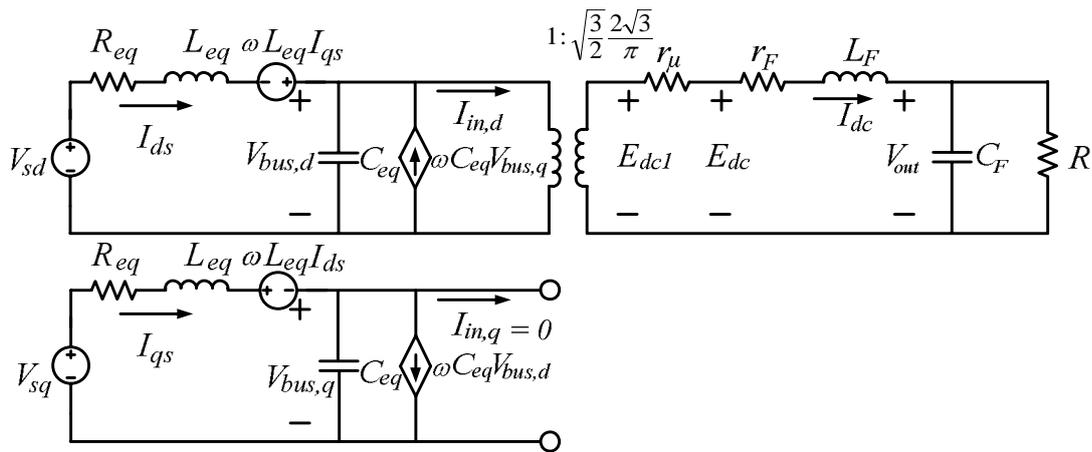


รูปที่ 5 แบบจำลองสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกนตีคว

จากระบบในรูปที่ 1 ส่วนของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนตีคว ด้วยสมการ (5) (Areerak, et al., 2008, and Rim, et al., 1990) ดังนั้น ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลในรูปของแกนหมุนตีคว ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของระบบบนแกนหมุนตีคว



รูปที่ 7 วงจรสมมูลเมื่อกำหนดให้ $\phi_1 = \phi - \alpha$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 6 สามารถทำให้เป็นวงจรอย่างง่ายได้ โดยการกำหนดมุมเฟสการหมุนของการแปลงดีคิว ϕ_1 เท่ากับ $\phi - \alpha$ ดังนั้น วงจรสมมูลในรูปที่ 6 จะเปลี่ยนเป็นวงจรสมมูลในรูปอย่างง่าย ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยอาศัยกฎแรงดันไฟฟ้าและกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้

- $$I_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd}$$
- $$I_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq}$$
- $$V_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc}$$
- $$V_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs}$$
- $$I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_{out}$$
- $$V_{out} = \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{RC_F}$$

จากสมการ (9) สามารถเขียนเป็นแบบจำลองในรูปตัวแปรสถานะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Dx} \end{aligned} \tag{10}$$

เมื่อ กำหนดให้

ตัวแปรสถานะ: $\mathbf{x} = [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{out}]^T$

อินพุต: $\mathbf{u} = [V_m]$

เอาต์พุต: $\mathbf{y} = [V_{out}]$

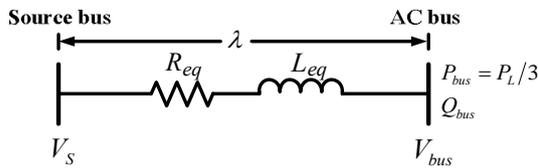
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & -\frac{1}{RC_F} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda_o + \alpha)}{L_{eq}} \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda_o + \alpha)}{L_{eq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{6 \times 1}, \mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6}, \mathbf{D} = [0]_{1 \times 1}$$

4. การคำนวณค่าที่สถานะอยู่ตัว

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการ (10) สังเกตได้ว่าแบบจำลองมีค่า λ_o ประกอบอยู่ในสมการ การคำนวณค่าดังกล่าวในบทความนี้จะอาศัยทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า วิเคราะห์ระบบด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 1 และเนื่องจากระบบดังกล่าวเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ดังนั้น การพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า จึงพิจารณาเพียงแค่หนึ่งเฟสเท่านั้น โดยแผนภาพการไหล

ของกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 (ตัวเก็บประจุของสายส่งมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา) เนื่องจากชนิดสายส่งของระบบในบทความนี้ เป็นสายส่งระยะสั้น



รูปที่ 8 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 8 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} = P_L \quad (11)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \quad (12)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟส(rms) ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ λ คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง V_s และ V_{bus} และ $Z \angle \gamma$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าปรากฏ พิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_{bus} = V_{bus} I_{bus} \cos \alpha = (P_L / 3) \quad (13)$$

$$Q_{bus} = V_{bus} I_{bus} \sin \alpha \quad (14)$$

โดยที่

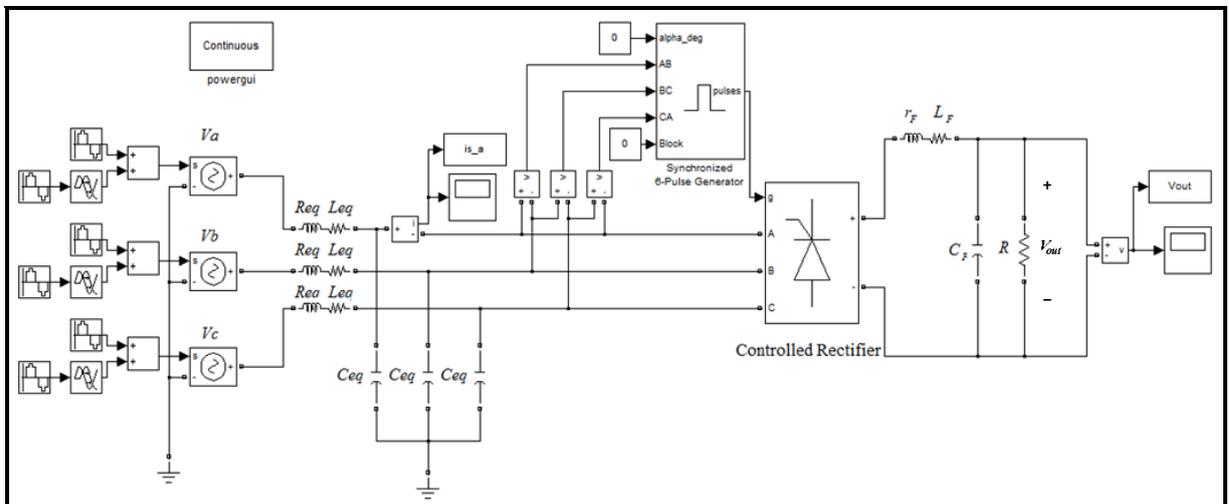
$$P_L = \frac{V_{O,rms}^2}{R}$$

$$V_{O,rms} = \sqrt{3} V_m \left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha \right)^{1/2}$$

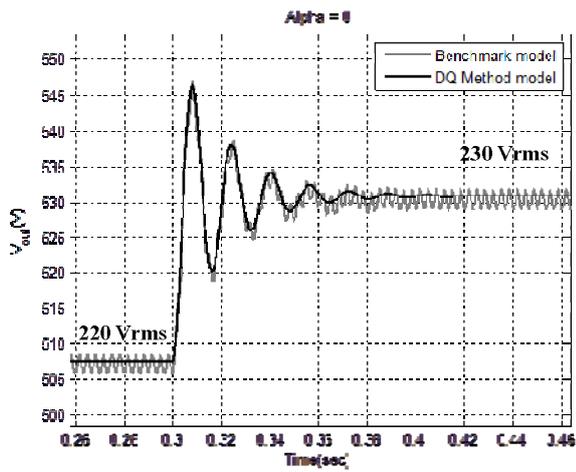
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

5. ผลการจำลองสถานการณ์

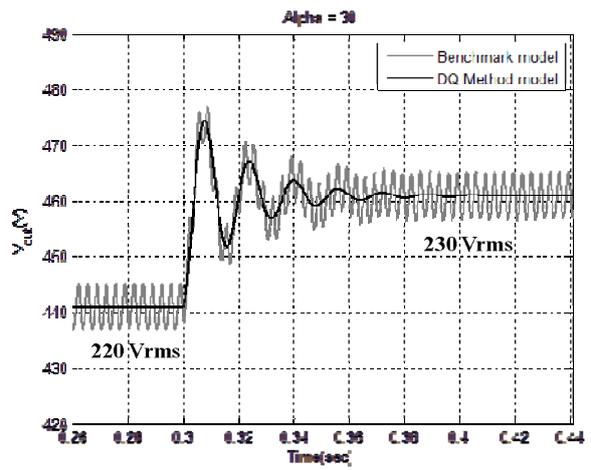
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตีคว ดังสมการ (10) เป็นแบบจำลองของระบบในรูปที่ 1 โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $V_s = 230 \text{ V}_{rms/phase}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $R_{eq} = 0.1 \ \Omega$, $L_{eq} = 24 \ \mu\text{H}$, $C_{eq} = 2 \ \text{nF}$, $C_F = 1000 \ \mu\text{F}$, $r_F = 0.01 \ \Omega$, $L_F = 6.5 \ \text{mH}$ และ $R = 15 \ \Omega$ รูปที่ 9 แสดงบล็อกไดอะแกรมประกอบการจำลองสถานการณ์ของคอมพิวเตอรื ในโปรแกรม SimPowerSystem™ ของ SIMULINK ซึ่งในบทความนี้จะเรียกว่า Benchmark model รูปที่ 10 แสดงผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งคำนวณจากสมการ (10) เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบสามเฟส (Benchmark model) ด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า V_s จาก 220 เป็น 230 V_{rms} ที่เวลา $t = 0.3 \text{ s}$ สำหรับมุม α เท่ากับ 0 องศา และรูปที่ 11-16 สำหรับมุม α เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 70 องศา ตามลำดับ การดำเนินการเปลี่ยนค่า V_s ในช่วงเวลาดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงในสภาวะชั่วคราว



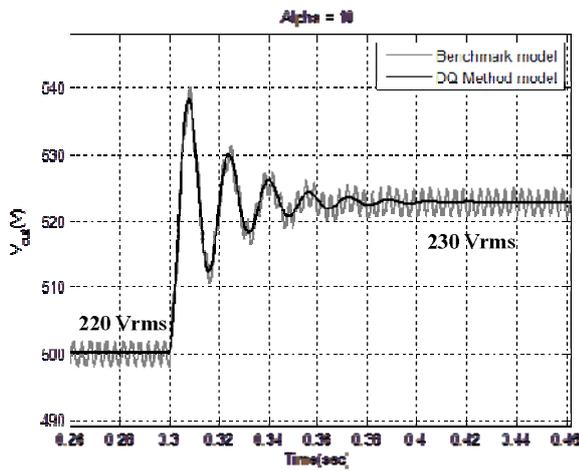
รูปที่ 9 การจำลองสถานการณ์วงจรรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้



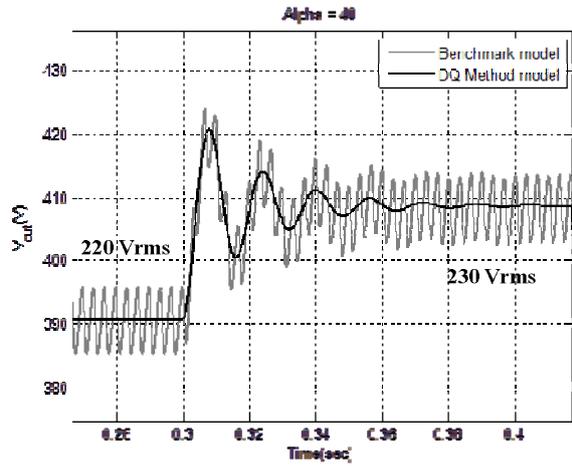
รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 0 องศา



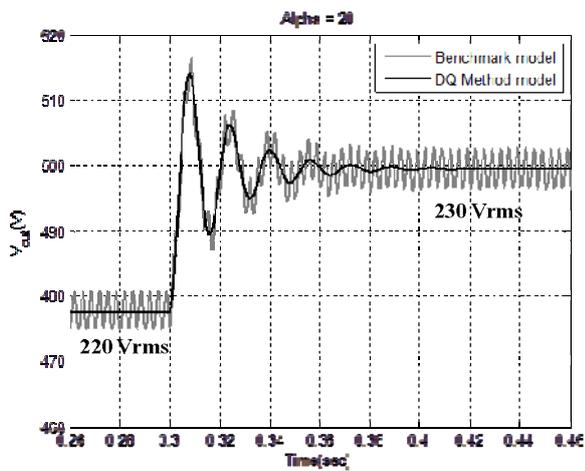
รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 30 องศา



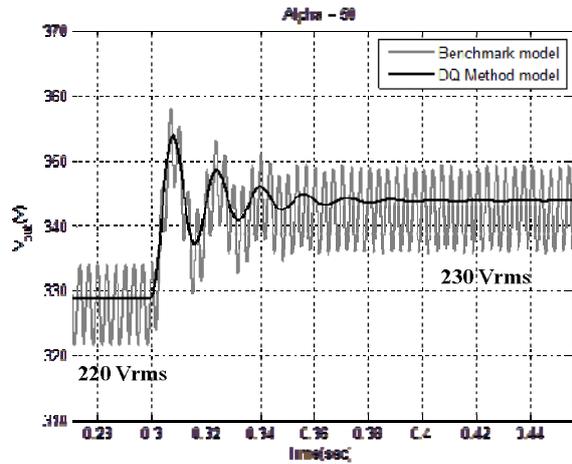
รูปที่ 11 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 10 องศา



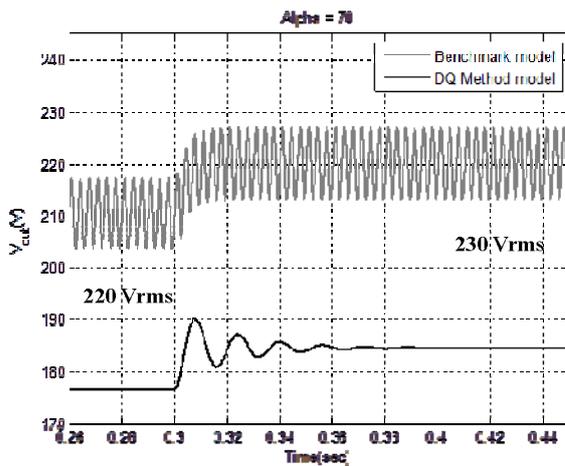
รูปที่ 14 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 40 องศา



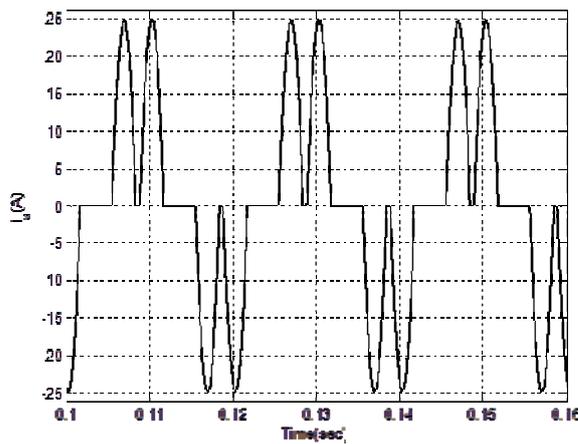
รูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 20 องศา



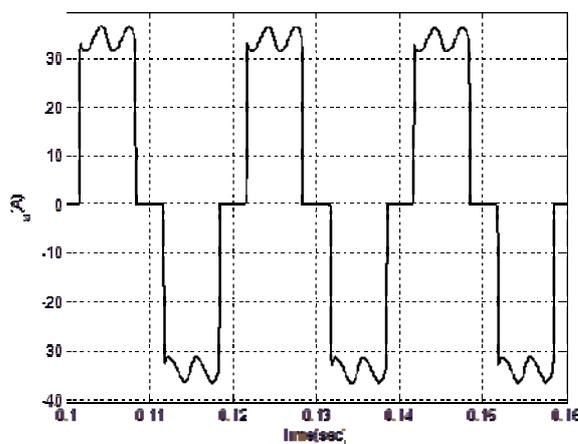
รูปที่ 15 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 50 องศา



รูปที่ 16 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมุม α เท่ากับ 70 องศา (กรณีโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง)



รูปที่ 17 รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส a สำหรับโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 18 รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส a สำหรับโหมดนำกระแสต่อเนื่องต่อเนื่อง

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดีคิว ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 มีความถูกต้องแม่นยำสูงทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกรณีที่มีมุม α มีค่ามากกว่า 60 องศา (ในที่นี้ แสดงค่า α เท่ากับ 70 องศา) จะมีค่าไม่ตรงกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 16 เนื่องจากในสภาวะการทำงานดังกล่าว วงจรเรียงกระแสทำงานในโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode: DCM) ซึ่งอยู่นอกเหนือสมมติฐานที่ตั้งไว้ โหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่องจะมีรูปสัญญาณของกระแสสามเฟส(สำหรับเฟส a) ดังแสดงในรูปที่ 17 สำหรับมุม α ในช่วง 0 องศา ถึง 60 องศา วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้จะทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง ซึ่งรูปสัญญาณของกระแสสามเฟส (สำหรับเฟส a) แสดงได้ดังรูปที่ 18 จากผลการเปรียบเทียบ แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้มีความแม่นยำ ดังนั้น แบบจำลองในบทความนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบ การออกแบบตัวควบคุมของระบบที่คำนึงถึงพลวัตของวงจรแปลงผันกำลังต่อไปในอนาคต

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามเฟส และวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพิสูจน์จากวิธีดีคิว ค่าในสถานะอยู่ตัวที่ใช้ในแบบจำลองคำนวณจากทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า การจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดีคิว กำหนดให้แหล่งจ่าย (V_s) มีการเปลี่ยนแปลงที่เวลาใดเวลาหนึ่งนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการนำการตอบสนองจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรม SimPowerSystem™ ใน SIMULINK ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทความนี้ มีความถูกต้องแม่นยำสูงทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ระบบได้ต่อไปในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method, in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, 19-24.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P. (2008). DQ-Transformation Approach for Modelling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled PWM Rectifier and Constant Power Loads," in *Proc. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*, Poznan, Poland, September 1-3.
- Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 3, pp. 661-668.
- Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., Cho, G.H. (1998). Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 13, No. 2, pp.323-336.
- Jalla, M.M., Emadi, A., Williamson, G.A., Ahimi, B. (2004). Modeling of Multi-Converter More Electric Ship Power Systems Using the Generalized State Space Averaging Method, in *Proc. The 30th Annual Conf. of the IEEE Indus. Elect. Soc.*, Busan, Korea, 508-513.
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach, *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, Vol. 44, 767-770.
- Mohan N. Underland T.M. Robbins W.P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Son, USA.
- Rim, C.T., Hu, D.Y., Cho, G.H. (1990). Transformers as Equivalent Circuits for Switches: General Proofs and D-Q Transformation-Based Analyses, *IEEE Trans. on Indus. Appl.*, Vol. 26, No. 4, 777-785.
- Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., Cho, G.H. (1994). A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, 390-396.