

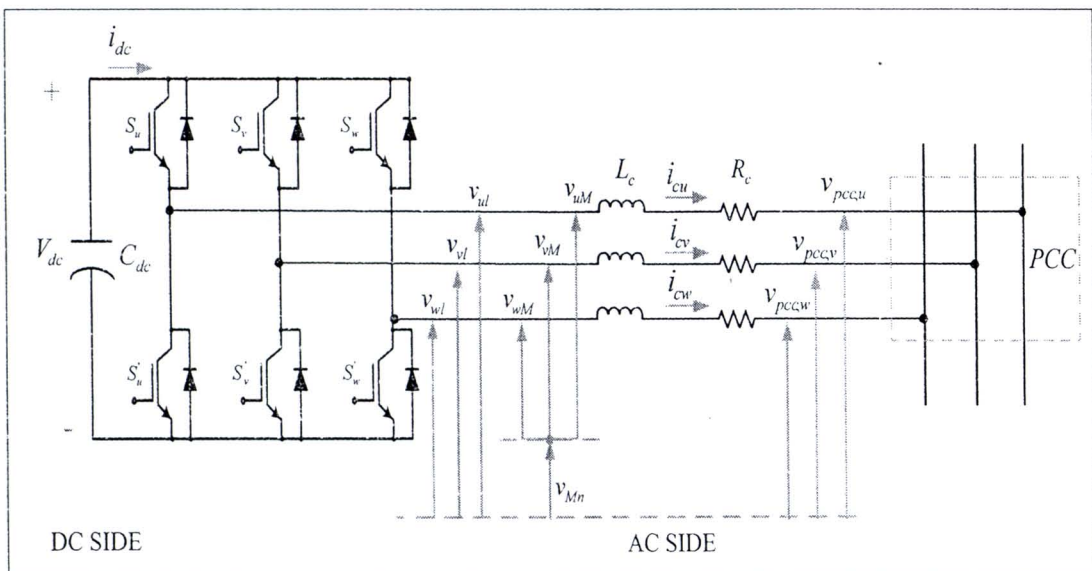
บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนาน

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนาน โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อออกแบบโครงสร้างการควบคุม และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการฉีดกระแสชดเชย และควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนาน การหาแบบจำลองในงานวิจัยนี้คำนึงถึงการออกแบบระบบควบคุมบนแกนดีคิวเพื่อให้รองรับกับการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิว ดังนั้นจึงต้องเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอทไฟบนแกนสามเฟส จากนั้นดำเนินการแปลงแบบจำลองดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคิว โดยใช้หลักการแปลงของปาร์ค นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบผลกับการจำลองสถานการณ์ที่พึ่งพาโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนสามเฟส



รูปที่ 4.1 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานที่เป็นอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน

จากรูปที่ 4.1 วงจรกรองกำลังแอททิฟแบบขนาน ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายแรงดันใช้ไอจีบีทีทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทางด้านเอซี (AC SIDE) ของวงจรมักจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_c) และตัวต้านทาน (R_c) ทั้งสามเฟส โดยมีแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{ul}, v_{vl}, v_{wl}) ที่มีผลโดยตรงต่อการบิดกระแสชดเชยไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{cu}, i_{cv}, i_{cw}) ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้ค่ากระแสดังกล่าวมีลักษณะรูปสัญญาณใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิง ($i_{cu}^*, i_{cv}^*, i_{cw}^*$) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF เมื่อพิจารณาทางด้านดีซี (DC SIDE) พบว่า ตัวเก็บประจุ (C_{dc}) มีบทบาทหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน เพื่อใช้สำหรับการบิดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ รวมถึงแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ที่ตกคร่อม C_{dc} จะต้องได้รับการควบคุมเพื่อให้ได้จุดการทำงานที่เหมาะสม นอกจากนี้ในงานวิจัยได้เลือกใช้การสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม สำหรับควบคุมการทำงานของไอจีบีทีเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เริ่มต้นจากการพิจารณากฎของแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ทางด้านเอซี เพื่อหาสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสชดเชย จะได้ดังสมการที่ (4-1) ถึงสมการที่ (4-3)

$$v_{ul} = L_c \frac{di_{cu}}{dt} + R_c i_{cu} + v_{pcc,u} \quad (4-1)$$

$$v_{vl} = L_c \frac{di_{cv}}{dt} + R_c i_{cv} + v_{pcc,v} \quad (4-2)$$

$$v_{wl} = L_c \frac{di_{cw}}{dt} + R_c i_{cw} + v_{pcc,w} \quad (4-3)$$

โดยที่ $v_{ul} = v_{uM} + v_{Mn}$, $v_{vl} = v_{vM} + v_{Mn}$ และ $v_{wl} = v_{wM} + v_{Mn}$ ค่าดังกล่าวคือ แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ของเฟส u, v, w ตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ตั้งขอบเขต ที่จะพิจารณาเฉพาะระบบกำลังไฟฟ้าสามเฟสสามสายสมดุลเท่านั้น ดังนั้น ในการวิเคราะห์จะไม่กล่าวถึงปริมาณไฟฟ้าลำดับศูนย์ จึงส่งผลให้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่จุด PCC และกระแสชดเชยทั้งสามเฟส เป็นดังสมการที่ (4-4) และสมการที่ (4-5) ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวร่วมกับสมการที่ (4-1) ถึงสมการที่ (4-3) ในสภาวะคงตัว จะสามารถจัดความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4-6)

$$v_{pcc,u} + v_{pcc,v} + v_{pcc,w} = 0 \quad (4-4)$$

$$i_{cu} + i_{cv} + i_{cw} = 0 \quad (4-5)$$

$$v_{Mn} = -\frac{1}{3}(v_{uM} + v_{vM} + v_{wM}) = -\frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} v_{jM} \quad (4-6)$$

แทนความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ (4-6) ลงในสมการที่ (4-1) ถึงสมการที่ (4-3) จะได้ดังสมการที่ (4-7) ถึงสมการที่ (4-9) ตามลำดับ และเมื่อจัดเทอมของสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปทั่วไป จะได้ดังสมการที่ (4-10) โดยตัวแปร k แทน เฟส u, v, w

$$\frac{di_{cu}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{cu} + \frac{1}{L_c} (v_{uM} - \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} v_{jM}) - \frac{1}{L_c} v_{pcc,u} \quad (4-7)$$

$$\frac{di_{cv}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{cv} + \frac{1}{L_c} (v_{vM} - \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} v_{jM}) - \frac{1}{L_c} v_{pcc,v} \quad (4-8)$$

$$\frac{di_{cw}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{cw} + \frac{1}{L_c} (v_{wM} - \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} v_{jM}) - \frac{1}{L_c} v_{pcc,w} \quad (4-9)$$

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{ck} + \frac{1}{L_c} (v_{kM} - \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} v_{jM}) - \frac{1}{L_c} v_{pcc,k} \quad (4-10)$$

ลำดับถัดมาเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตของแรงดันและกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะได้ดังสมการที่ (4-11) และสมการที่ (4-12) ตามลำดับ โดยที่ค่า c_k คือ ฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function : c_k) ของไอจีบีที โดยมีลักษณะการทำงานดังสมการที่ (4-13) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-11) แทนลงในสมการที่ (4-10) จะได้ดังสมการที่ (4-14)

$$v_{kM} = c_k V_{dc} \quad (4-11)$$

$$i_{dc} = \sum_{k=u,v,w} c_k i_{ck} \quad (4-12)$$

$$c_k = \begin{cases} 1, & \text{if } S_k (\text{on}), S'_k (\text{off}) \\ 0, & \text{if } S_k (\text{off}), S'_k (\text{on}) \end{cases} \quad (4-13)$$

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{ck} + \frac{1}{L_c} (c_k - \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} c_j) V_{dc} - \frac{1}{L_c} v_{pcc,k} \quad (4-14)$$

จากสมการที่ (4-14) สามารถจัดเทอมฟังก์ชันการสวิตช์ เป็นฟังก์ชันสถานะการสวิตช์ (switching state function : d_k) ได้ดังสมการที่ (4-15) เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่ (4-16) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (4-14) จะได้ดังสมการที่ (4-17)

$$d_k = (c_k - \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} c_j) \quad (4-15)$$

$$d_k = \begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_u \\ c_v \\ c_w \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{ck} + \frac{1}{L_c} d_k V_{dc} - \frac{1}{L_c} v_{pcc,k} \quad (4-17)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสขดลวดบนแกนสามเฟส แสดงได้ดังสมการที่ (4-17) ในขั้นตอนต่อไปเป็นการหาสมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันบัสไฟตรง โดยวิเคราะห์จากการพิจารณากฎของกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ทางด้านดีซี อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตของกระแสตามสมการที่ (4-12) จะได้ดังสมการที่ (4-18)

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (-i_{dc}) = -\frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=u,v,w} c_k i_{ck} = -\frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=u,v,w} d_k i_{ck} \quad (4-18)$$

จากการอธิบายแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานบนปริมาณไฟฟ้าสามเฟสในข้างต้น สามารถเขียนเป็นแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ ดังสมการที่ (4-19)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cu} \\ i_{cv} \\ i_{cw} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & 0 & 0 & \frac{d_u}{L_c} \\ 0 & -\frac{R_c}{L_c} & 0 & \frac{d_v}{L_c} \\ 0 & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & \frac{d_w}{L_c} \\ -\frac{d_u}{C_{dc}} & -\frac{d_v}{C_{dc}} & -\frac{d_w}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cu} \\ i_{cv} \\ i_{cw} \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_c} \begin{bmatrix} v_{pcc,u} \\ v_{pcc,v} \\ v_{pcc,w} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนดีคิว

โครงสร้างการควบคุมการฉีดกระแสสลับและโครงสร้างการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงในงานวิจัยนี้มีแนวทางการควบคุมอยู่บนแกนดีคิว ดังนั้นการดำเนินงานในขั้นตอนต่อไป คือ การนำแบบจำลองเชิงพลวัตบนแกนสามเฟส ผ่านเมตริกซ์การแปลงของปาร์ก ดังสมการที่ (4-20) เพื่อให้แบบจำลองอยู่บนแกนดีคิว จากสมการดังกล่าว กำหนดให้ f_u , f_v และ f_w คือ ปริมาณทางไฟฟ้าของเฟส u , v และ w ตามลำดับ ในขณะที่ f_d และ f_q คือ ปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว ทั้งนี้หากต้องการแปลงปริมาณบนแกนดีคิวกลับไปอยู่บนแกนไฟฟ้าสามเฟสสามารถทำได้ ดังสมการที่ (4-21) สำหรับเมตริกซ์ $\mathbf{K}$ แสดงไว้ในสมการที่ (4-22) โดยมีค่ามุมเฟส ($\theta = \omega t$) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ω rad/s

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = [\mathbf{K}] \cdot \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

$$\begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \end{bmatrix} = [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

$$[\mathbf{K}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟบนแกนดีคิว เริ่มต้นจากการพิจารณาฟังก์ชันสถานะการสวิตช์บนแกนสามเฟส (d_k) ดังสมการที่ (4-23) จากสมการดังกล่าว ค่า ϕ คือ มุมเฟสเริ่มต้นของฟังก์ชันสถานะการสวิตช์ โดยมีขนาดของฟังก์ชัน d_k อธิบายด้วยค่าดัชนีการมอดูเลต (modulation index: M) (Rim, Hu and Cho, 1990)

$$\begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix} = \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

จากสมการที่ (4-23) ทำการแปลงฟังก์ชัน d_k ให้อยู่บนแกนคิคลิคว ด้วยการแทนลงในสมการที่ (4-20) จะได้ดังสมการที่ (4-24) โดยที่ ค่า ϕ_1 คือ มุมเฟสเริ่มต้นของแกนหมุนคิคลิคว จากสมการดังกล่าวเมื่อใช้คุณสมบัติทางตรีโกณมิติ จะได้ดังสมการที่ (4-25)

$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_1) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \\ -\sin(\omega t + \phi_1) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

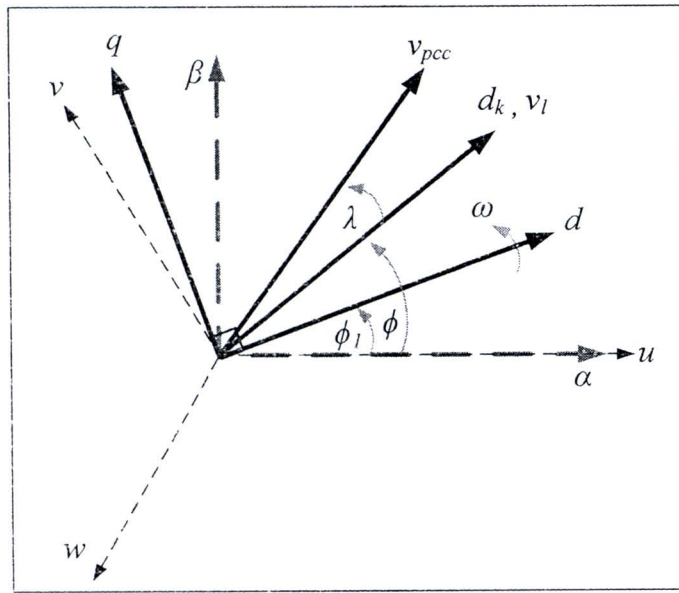
$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

การวิเคราะห์ในส่วนถัดมา คือ การหาแรงดัน v_{pcc} ที่พิจารณาอยู่บนแกนคิคลิคว ดังสมการที่ (4-26) โดยเมื่อใช้คุณสมบัติทางตรีโกณมิติ จะได้ดังสมการที่ (4-27) จากสมการดังกล่าว ค่า λ คือ ค่ามุมเลื่อนระหว่างเวกเตอร์ของแรงดันเอาต์พุตกับเวกเตอร์แรงดันที่จุด PCC (v_{pcc})

$$\begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_1) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \\ -\sin(\omega t + \phi_1) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

$$\begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} v_m \cos(\omega t + \phi + \lambda) \\ v_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi + \lambda) \\ v_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi + \lambda) \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

จากการอธิบายข้างต้นเกี่ยวกับเวกเตอร์ของแบบจำลองในระบบ พบว่า เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตมีมุมเฟสเริ่มต้นเดียวกันกับเวกเตอร์ฟังก์ชันสถานะการสวิตช์ เท่ากับ ϕ ซึ่งทำมุมต่างเฟสกับมุมเฟสเริ่มต้นของเวกเตอร์แรงดันที่จุด PCC (v_{pcc}) เท่ากับ λ และแกนดิกิวหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ω rad/s ที่มีมุมเฟสเริ่มต้น เท่ากับ ϕ_1 ดังนั้น เวกเตอร์ของแบบจำลองบนแกนดิกิวในระบบที่พิจารณา สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพเฟสเซอร์ไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพเฟสเซอร์ของระบบที่พิจารณา

จากรูปดังกล่าวผู้วิจัยกำหนดให้มุมเฟสเริ่มต้นของเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุต (v_l) ทำมุมเดียวกันกับมุมเฟสเริ่มต้นของแกนหมุนดิกิว ($\phi = \phi_1$) และไม่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม (λ) ซึ่งเกิดขึ้นจากพาราเตอร์ในสายส่ง ผลจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สมการที่ (4-25) และสมการที่ (4-27) แสดงได้ใหม่ดังสมการที่ (4-28) และสมการที่ (4-29) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

$$\begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot v_m \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

ตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ดังสมการที่ (4-19) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อแปลงแบบจำลองไปอยู่บนแกนดิกิว คือ ส่วนการควบคุมกระแสดเซช แสดงไว้ในแถวที่ 1 ถึงแถวที่ 3

ของสมการ และส่วนการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ในแถวที่ 4 ของสมการ โดยจะดำเนินการวิเคราะห์ในแต่ละส่วน ดังนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว

การวิเคราะห์เริ่มต้นจากสมการที่ (4-19) ในแถวที่ 1 ถึง 3 เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสถานะ จะได้ดังสมการที่ (4-30) จากสมการดังกล่าวอธิบายด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (4-21) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-31)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cu} \\ i_{cv} \\ i_{cw} \end{bmatrix} = -\frac{R_c}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} i_{cu} \\ i_{cv} \\ i_{cw} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix} \cdot V_{dc} - \frac{1}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} v_{pcc,u} \\ v_{pcc,v} \\ v_{pcc,w} \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}) &= -\frac{R_c}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}) + \frac{1}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \cdot V_{dc}) \\ &\quad - \frac{1}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix}) \end{aligned} \quad (4-31)$$

เทอม $\frac{d}{dt} ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix})$ ที่ปรากฏในสมการที่ (4-31) จะต้องใช้กฎอนุพันธ์ของผลคูณเมตริกซ์ ดังสมการที่ (4-32) เพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวลงในสมการที่ (4-31) จะได้ดังสมการที่ (4-33)

$$\frac{d}{dt} ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}) = [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \left(\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \right) + \left(\frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1} \right) \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (4-32)$$

$$\begin{aligned} [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \left(\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \right) + \left(\frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1} \right) \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} &= -\frac{R_c}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}) \\ &\quad + \frac{1}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \cdot V_{dc}) - \frac{1}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix}) \end{aligned} \quad (4-33)$$

ภายหลังจากการแทนค่าด้วยกฎอนุพันธ์ของผลคูณเมตริกซ์ ดังสมการที่ (4-33) ทำให้สามารถจัดรูปสมการดังกล่าว โดยการคูณด้วยเมตริกซ์ $[\mathbf{K}]$ ตลอดสมการ ดังสมการที่ (4-34) จากเมตริกซ์ $[\mathbf{K}]$ ในช่วงต้น ใช้คุณสมบัติความเป็นเมตริกซ์ออร์ทอโกนอล (orthogonal matrix) นั่นคือเมตริกซ์ $[\mathbf{K}]^{-1}$ เท่ากับเมตริกซ์ $[\mathbf{K}]^T$ ($[\mathbf{K}]^{-1} = [\mathbf{K}]^T$) ดังนั้น ผลคูณของเมตริกซ์ $[\mathbf{K}]$ กับเมตริกซ์ $[\mathbf{K}]^T$ จึงเท่ากับเมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) ($[\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{K}]^T = \mathbf{I}$) จากคุณสมบัติดังกล่าวถูกแทนลงในสมการที่ (4-34) จะได้ดังสมการที่ (4-35)

$$[\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \left(\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \right) + ([\mathbf{K}] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1}) \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = -\frac{R_c}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}) \quad (4-34)$$

$$+ \frac{1}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \cdot V_{dc}) - \frac{1}{L_c} \cdot ([\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = -\frac{R_c}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \cdot V_{dc} - \frac{1}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix} - ([\mathbf{K}] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1}) \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (4-35)$$

จากสมการที่ (4-35) แยกพิจารณาเฉพาะเทอม $[\mathbf{K}] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1}$ ซึ่งผลการดำเนินการในส่วนนี้ แสดงดังสมการที่ (4-36) และสมการที่ (4-37) เพื่อแทนกลับลงในสมการที่ (4-35) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-38) สมการดังกล่าว คือ สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสขดลวดบนแกนดีคิว

$$[\mathbf{K}] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4-36)$$

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

$$[\mathbf{K}] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{K}]^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \omega \cdot \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} \sin(0) & -\frac{3}{2} \cos(0) & 0 \\ \frac{3}{2} \cos(0) & \frac{3}{2} \sin(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-37)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \cdot V_{dc} - \frac{1}{L_c} \cdot \begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \end{bmatrix} \quad (4-38)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดีคิว

การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการพิจารณาสมการที่ (4-19) ในแถวที่ 4 โดยเขียนอยู่ในสมการตัวแปรสถานะ ดังสมการที่ (4-39) หรือจัดเทอมให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ ดังสมการที่ (4-40) จากสมการดังกล่าวเมื่ออธิบายด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (4-21) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-41)

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = -\frac{1}{C_{dc}} \cdot (d_u i_{cu} + d_v i_{cv} + d_w i_{cw}) \quad (4-39)$$

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = -\frac{1}{C_{dc}} \cdot \left(\begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} i_{cu} \\ i_{cv} \\ i_{cw} \end{bmatrix} \quad (4-40)$$

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = -\frac{1}{C_{dc}} \cdot \left([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \right)^T \cdot \left([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \right) \quad (4-41)$$

จากสมการที่ (4-41) เมื่อใช้คุณสมบัติความเป็นเมตริกออกทอโกนอล จะได้ว่า $([\mathbf{K}]^{-1})^T = [\mathbf{K}]$ และ $[\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{K}]^{-1} = I$ ดังนั้น ถ้าจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่ จะได้ดังสมการที่ (4-42)

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = -\frac{d_d i_{cd}}{C_{dc}} - \frac{d_q i_{cq}}{C_{dc}} \quad (4-42)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega & \frac{d_d}{L_c} \\ -\omega & -\frac{R_c}{L_c} & \frac{d_q}{L_c} \\ -\frac{d_d}{C_{dc}} & -\frac{d_q}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_c} \begin{bmatrix} v_{pcc,d} \\ v_{pcc,q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-43)$$

จากแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนานบนแกนสามเฟสแปลงมาอยู่บนแกนดิกิว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะได้ ดังสมการที่ (4-43) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน เพื่อนำมาใช้อธิบายระบบที่พิจารณาอยู่บนแกนดิกิว คือ ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดี และแกนคิว ในเมตริกซ์แถวที่ 1 และแถวที่ 2 ของสมการ และส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดิกิว ในเมตริกซ์แถวที่ 3 ของสมการ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดิกิวจะสามารถนำมาใช้ออกแบบระบบได้นั้น จำเป็นจะต้องมีการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.4

4.4 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดิกิวที่ได้ดำเนินการมาทั้งหมดในข้างต้น เมื่อได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง (model validation) จะทำให้แบบจำลองดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นสำหรับการนำไปใช้เพื่อออกแบบระบบควบคุม ดังนั้น ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองตามสมการที่ (4-44) บน m-file ในโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการสร้างระบบที่พิจารณาตามรูปที่ 4.1 บนโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems โดยมีรายละเอียดการจำลองสถานการณ์ของทั้ง 2 ส่วน ดังนี้

การจำลองสถานการณ์ระบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดิกิว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดิกิวของวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนาน มีแนวทางการจำลองสถานการณ์ เริ่มต้นจากการนำแบบจำลองในสมการที่ (4-43) จัดให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันสถานะ (state function) ดังสมการที่ (4-44) หลังจากนั้นทำการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equation: ODE) ด้วยการเขียนคำสั่งบน m-file ในโปรแกรม MATLAB

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (4-44)$$

โดยที่ $\dot{\mathbf{x}}$ คือ ตัวแปรสถานะเชิงพลวัต ($\dot{\mathbf{x}} = [\frac{d}{dt}i_{cd} \quad \frac{d}{dt}i_{cq} \quad \frac{d}{dt}V_{dc}]^T$)

$\mathbf{x}$ คือ ตัวแปรสถานะ ($\mathbf{x} = [i_{cd} \quad i_{cq} \quad V_{dc}]^T$)

u คือ อินพุตของแบบจำลอง ($u = v_m$)

$\mathbf{y}$ คือ เอาต์พุตของแบบจำลอง ($\mathbf{y} = [i_{cd} \quad i_{cq} \quad V_{dc}]^T$)

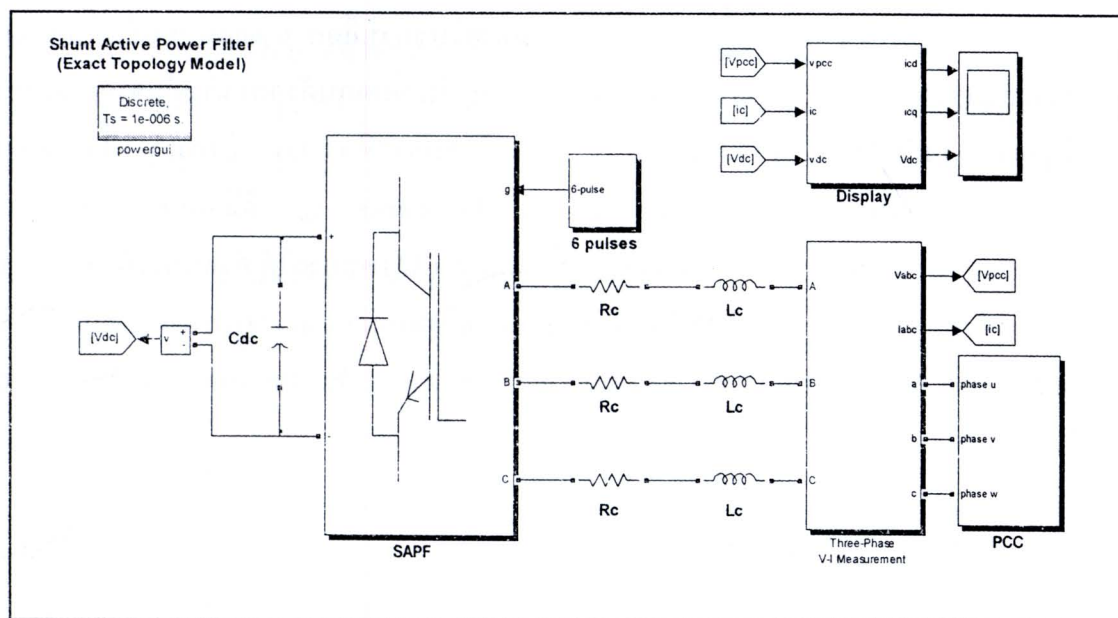
และเมตริกซ์ $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ และ $\mathbf{D}$ ของแบบจำลอง คือ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega & \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \cos(\phi - \phi_1) \\ -\omega & -\frac{R_c}{L_c} & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \sin(\phi - \phi_1) \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_{dc}} \cdot \cos(\phi - \phi_1) & \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_{dc}} \cdot \sin(\phi - \phi_1) & 0 \end{bmatrix}$$

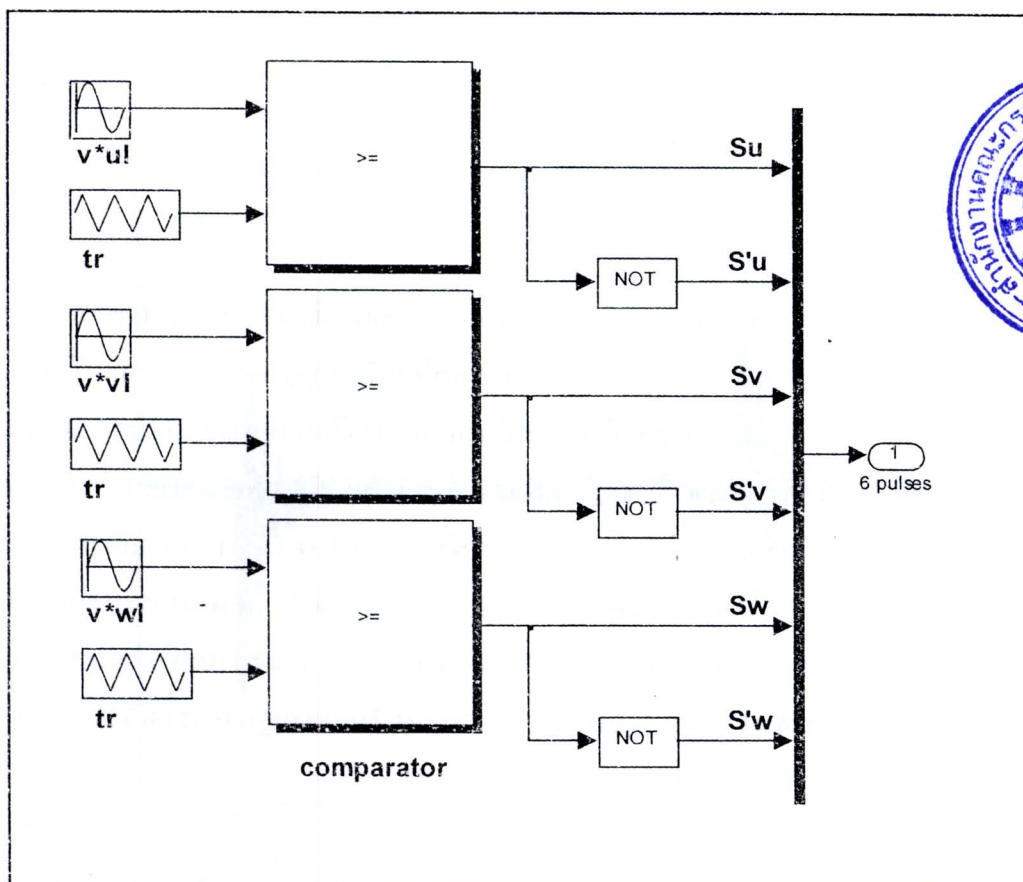
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \cos(\phi - \phi_1 + \lambda) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \sin(\phi - \phi_1 + \lambda) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = [0]$$

การจำลองสถานการณ์ระบบโดยอาศัยชุดบล็อกสำเร็จรูป

การจำลองสถานการณ์ระบบตามการพิจารณาในรูปที่ 4.1 จะใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างระบบ ดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าว ประกอบด้วย ชุดบล็อก SAPF ทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส มีอุปกรณ์การสวิตช์ คือ สารกึ่งตัวนำ IGBT/Diodes 6 ตัว ที่รับสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์จากบล็อก 6 pulses ซึ่งรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.4 ส่วนองค์ประกอบทางด้านคิซีของวงจรดังกล่าวถูกต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ส่วนทางด้านเอซีของวงจรต่อเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (L_c) อนุกรมกับตัวต้านทาน (R_c) ทั้งสามเฟสต่อร่วมกับจุด PCC ที่กำหนดเป็นแหล่งจ่ายแรงดันรูปสัญญาณไซน์สามเฟสสมดุล การแสดงผลด้วยบล็อก Display มีการรับค่ากระแสขั้วทั้งสามเฟส (i_{cu}, i_{cv}, i_{cw}) ผ่านการแปลงของปาร์ก ในขณะเดียวกันก็รับค่าแรงดันที่จุด PCC เพื่อใช้คำนวณค่ามุม (θ) ให้กับเมตริกซ์การแปลงของปาร์กเช่นกัน จนกระทั่งได้ค่ากระแสบนแกนดีคิว (i_{cd}, i_{cq}) และรับค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) เพื่อแสดงผลการจำลองสถานการณ์ร่วมกันอีกด้วย



รูปที่ 4.3 ระบบที่พิจารณาบนโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems



รูปที่ 4.4 โครงสร้างภายในบล็อก 6 pulses

จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างการทำงานภายในของบล็อก 6 pulses ซึ่งเป็นขั้นตอนการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม ขั้นตอนดังกล่าวเริ่มต้นจากการกำหนดสัญญาณแรงดันอ้างอิงทั้งสามเฟส ($v_{ul}^*, v_{vl}^*, v_{wl}^*$) ดังสมการที่ (4-45) ถึงสมการที่ (4-47) เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier: v_{tr}) ที่มีแอมพลิจูด ($|v_{tr}|$) และความถี่ ($|f_{tr}|$) คงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้น ค่าดัชนีการมอดูเลต (M) อธิบายได้ ดังสมการที่ (4-48) จากสมการดังกล่าวสังเกตได้ว่าค่า M มีผลต่อแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรรอกกำลังแอกทีฟ การออกแบบค่า M จึงมีความสำคัญด้วยเช่นกัน รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการออกแบบได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

$$v_{ul}^* = |v_{ul}^*| \sin(\omega t) \quad (4-45)$$

$$v_{vl}^* = |v_{vl}^*| \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (4-46)$$

$$v_{wl}^* = |v_{wl}^*| \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (4-47)$$

$$M = \frac{|v_{kl}^*|}{|v_{tr}|} \quad ; k = u, v, w \quad (4-48)$$

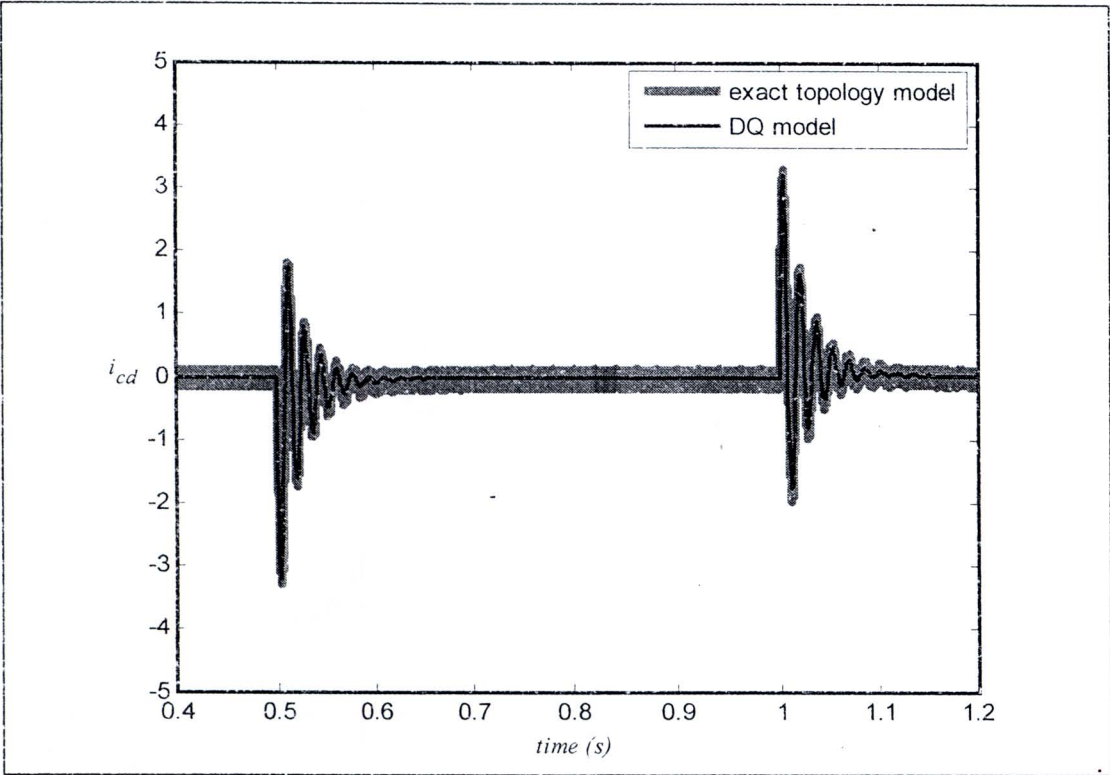
ลักษณะของการใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ ตามรูปที่ 4.4 สังเกตได้ว่า v_{ul}^*, v_{vl}^* และ v_{wl}^* เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม (v_{tr}) ด้วยบล็อก comparator ยกตัวอย่างกรณีเฟส u พบว่า เงื่อนไขการสวิตช์พิจารณาเมื่อสัญญาณ v_{ul}^* มากกว่าสัญญาณ v_{tr} จะทำให้สวิตช์ S_u มีค่าเท่ากับ 1 คือ นำกระแส และสวิตช์ S_u' ที่ผ่านบล็อก NOT ให้ค่าเท่ากับ 0 คือ หยุดนำกระแส ในทางกลับกันหากผลการเปรียบเทียบสัญญาณ v_{ul}^* น้อยกว่าสัญญาณ v_{tr} จะทำให้สวิตช์ S_u หยุดนำกระแส และสวิตช์ S_u' นำกระแส ผลที่เกิดขึ้นทำให้พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์ ในแต่ละเฟสทำงานสัมพันธ์กันตลอดย่านการทำงานโดยไม่เกิดปัญหาการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การจำลองสถานการณ์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 4.1 ผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ดังตารางที่ 4.1 การทดสอบมีวัตถุประสงค์

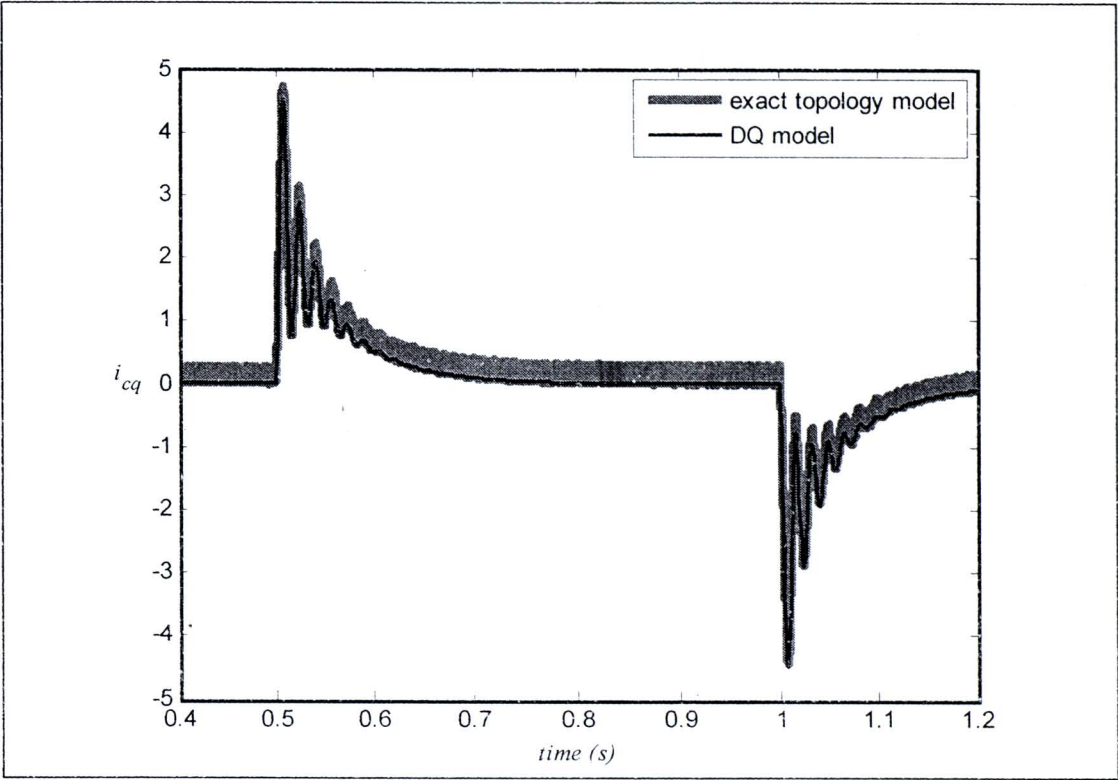
คือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว ด้วยการเปรียบเทียบรูปสัญญาณของ i_{cd} , i_{cq} และ V_{dc} กับกรณีอาศัยชุดบล็อกสำเร็จรูป ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์

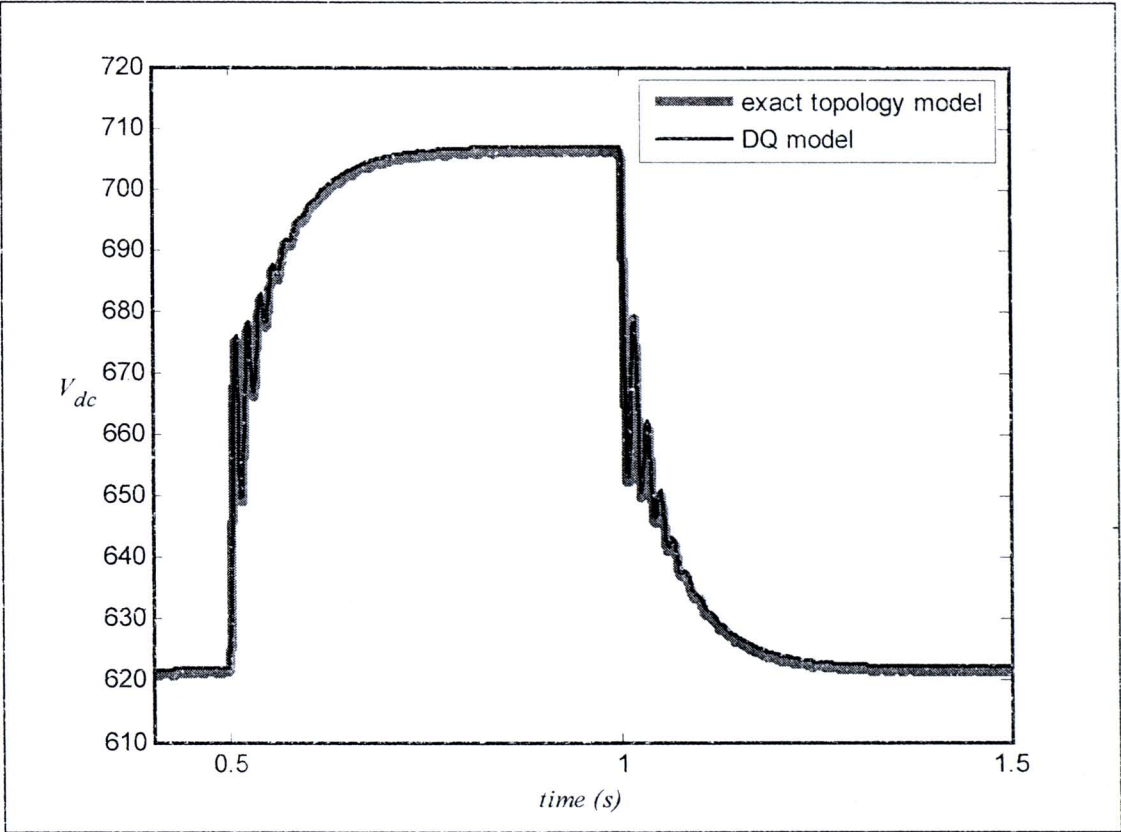
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
แรงดันที่จุด PCC	$v_{pcc} = 220 \text{ V}_{\text{rms}}, 250 \text{ V}_{\text{rms}}$
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50 \text{ Hz}$
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 200 \text{ }\mu\text{F}$
ความต้านทานในสายส่งของวงจร	$R_L = 2 \text{ }\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_c = 39 \text{ mH}$
ความถี่ของสัญญาณพาห้รูปสามเหลี่ยม	$f_{tr} = 5000 \text{ Hz}$
ดัชนีการมอดูเลต	$M = 1$



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{cd}



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{cq}



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า V_{dc}

จากผลการจำลองสถานการณ์ เป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองของค่า i_{cd} , i_{cq} และ V_{dc} จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว (DQ model) แสดงด้วยเส้นสีดำ และผลที่ได้จากชุดบล็อกสำเร็จรูป (exact topology model) แสดงด้วยเส้นสีเทา สังเกตได้ว่าการจำลองสถานการณ์พิจารณาในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.4 วินาที ถึง 1.2 วินาที สำหรับรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ส่วนในรูปที่ 4.7 พิจารณาในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.4 วินาที ถึง 1.5 วินาที เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอินพุตของแบบจำลอง คือ ค่า v_{pcc} จาก $220 V_{rms}$ เป็น $250 V_{rms}$ ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 1 วินาที และปรับค่า v_{pcc} จาก $250 V_{rms}$ เป็น $220 V_{rms}$ ตั้งแต่เวลา 1 วินาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในสถานะอยู่ตัว (steady state) ควบคู่ไปกับการตรวจสอบในสภาวะการตอบสนองชั่วคราว (transient response) จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่า ผลตอบสนองการเข้าสู่สถานะคงตัวอยู่ในช่วงก่อนเวลา 0.5 วินาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุด PCC ที่เวลาเท่ากับ 0.5 วินาที และ 1.0 วินาที ส่งผลให้การตอบสนองของค่า i_{cd} และ i_{cq} มีลักษณะสั้นๆ จนค่อยๆ เข้าสู่สถานะคงตัวอีกครั้ง ส่วนในรูปที่ 4.7 สังเกตได้ว่า ค่า V_{dc} จะเริ่มคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 620 V เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของค่า v_{pcc} ที่เวลาเท่ากับ 0.5 วินาที ค่า V_{dc} มีแนวโน้มปรับตัวเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ประมาณ 705 V ซึ่งหลังจากเวลา 1.0 วินาที ค่า v_{pcc} มีการเปลี่ยนแปลงลดลงเท่ากับ $220 V_{rms}$ อีกครั้ง ค่า V_{dc} จึงมีการตอบสนองโดยปรับตัวลดลงกลับมามากที่เท่ากับ 620 V เช่นเดิม จากผลการตอบสนองทั้งหมด พบว่า รูปสัญญาณที่ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีลักษณะเป็นเส้นเรียบ ให้ผลการตอบสนองทั้งสภาวะคงตัว และในสภาวะชั่วคราว มีแนวโน้มคล้ายตามรูปสัญญาณจากชุดบล็อกสำเร็จรูป ที่มีลักษณะสัญญาณเป็นสีเทาแถบหนา เนื่องจากผลของพฤติกรรมการณ์การสวิตช์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลดังกล่าวข้างต้นจึงช่วยยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีความถูกต้อง

4.5 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน ที่นำเสนอในบทนี้ ใช้กฎกระแส และแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองบนปริมาณสามเฟส รวมถึงการแปลงแบบจำลองดังกล่าวอยู่บนแกนดีคิว ด้วยหลักการแปลงของปาร์ก ซึ่งผลเฉลยของแบบจำลองที่ได้ ผู้วิจัยมีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง เพื่อประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมให้กับวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน โดยรายละเอียดการออกแบบได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5