



บทที่ 3

การวิเคราะห์ชุด D-STATCOM ด้วย MATLAB/SIMULINK

การศึกษการวิจัยในส่วนนี้เป็นการออกแบบ และทดสอบชุด D-STATCOM โดยเริ่มต้นศึกษา และวิเคราะห์ตามหลักการทางทฤษฎีต่างๆเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาสร้างระบบชุดควบคุมดังกล่าวใน MATLAB/SIMULINK ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำผลมาทำการวิเคราะห์และหาความเป็นไปได้ในการสร้างอุปกรณ์จริง และช่วยลดความเสี่ยงในการสร้างอุปกรณ์จริง อีกทั้งยังเพื่อง่ายต่อการเพิ่มหรือขยายชุดควบคุมดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น โดยงานหลักตัวอุปกรณ์งานวิจัยนี้มุ่งแก้ปัญหาการเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน หรือการเกิดสภาวะแรงดันตกขึ้นในระบบจำหน่ายนั้น ด้วยการทดสอบใน MATLAB/SIMULINK เราสามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายประเด็นบนตัวโปรแกรมดังกล่าว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์ผลการควบคุมคุณภาพการเกิดปัญหาการเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และสถานะความไม่สมมาตรของแรงดันขึ้นในระบบขึ้นด้วยเพื่อง่ายต่อการพัฒนาต่อไป

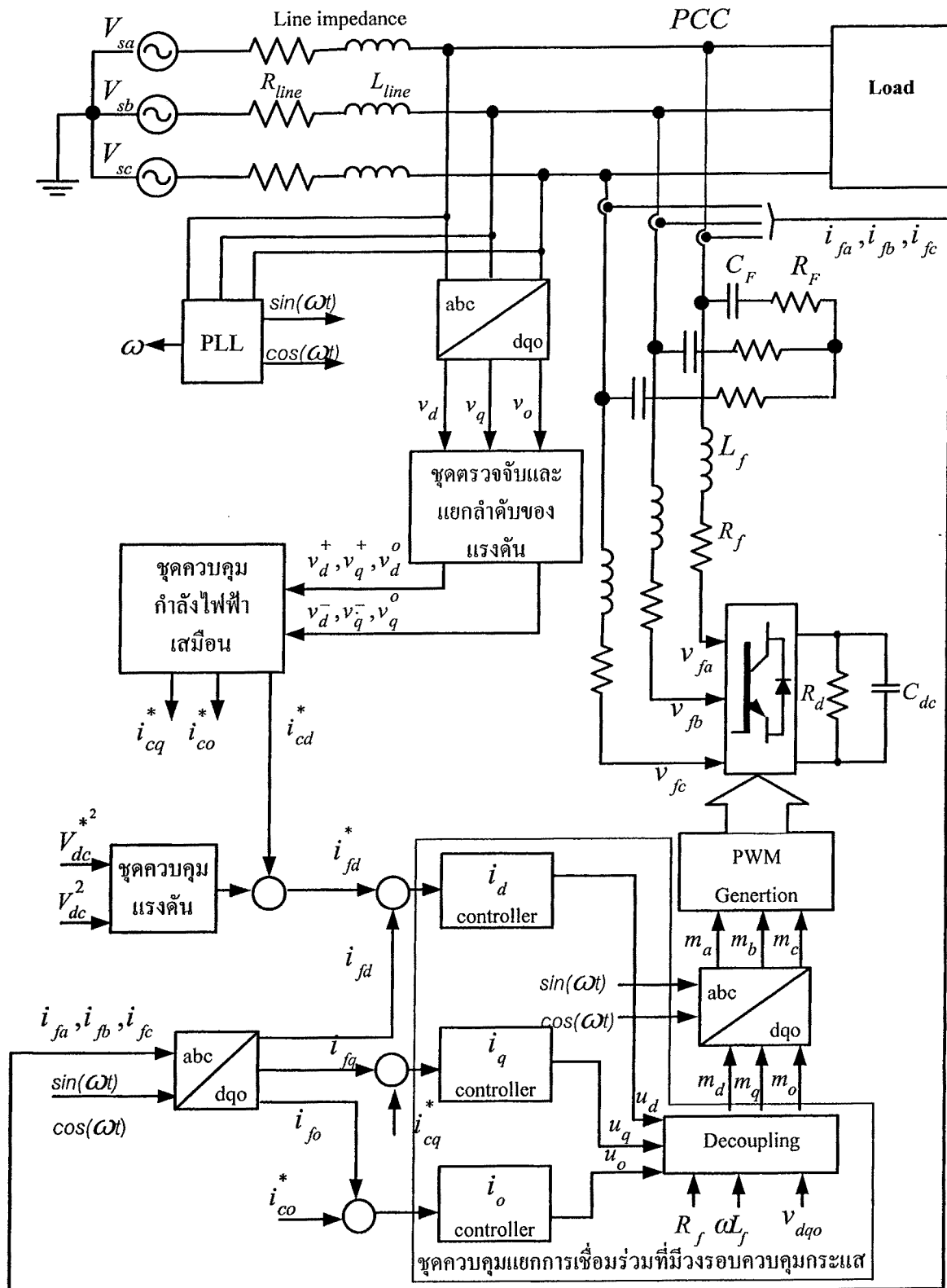
จากการศึกษาถึงการควบคุมการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้า ในสภาวะการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ และความไม่สมมาตรของแรงดันขึ้นในระบบไฟฟ้า ในการทดลองในระบบนี้จึงได้เลือกวิธีการควบคุมการชดเชยแรงดันขนานเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า D-STATCOM [26] ดังนั้นในบทนี้จึงได้อธิบายถึงหลักการวิเคราะห์ การออกแบบและผลการทดสอบเบื้องต้น ในส่วนงานต่างๆของชุดควบคุมการจ่ายหรือฉีดค่ากำลังไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า ในสภาวะที่ในระบบเกิดความผิดพร่องขึ้นในช่วงของแรงดันตกชั่วขณะ[27] รวมถึงการเกิดความไม่สมมาตรขึ้นของแรงดันด้วย ดังนั้นจะได้อธิบายถึง แนวคิดในการควบคุมระบบของชุดD-STATCOM การออกแบบวงจรกรองแบบจำลองชุดแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส และ การออกแบบชุดควบคุมการชดเชยแรงดันซึ่งประกอบไปด้วย ชุดตรวจจับและแยกลำดับของแรงดัน ชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และชุดควบคุมบัลลัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



โดยทำการทดสอบชุดควบคุมในส่วนต่างๆของ D-STATCOM บน MATLAB/SIMULINK ด้วยระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ 380 โวลต์ เพื่อทดสอบการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้มีความสมมาตรขึ้น

3.1 แนวคิดในการออกแบบและการสร้างระบบควบคุม D-STATCOM

วัตถุประสงค์ของการควบคุมของชุด D-STATCOM ในงานวิจัยนี้ เพื่อช่วยแก้ปัญหาในการเกิดสถานะความไม่สมมาตรของแรงดันตกชั่วขณะขึ้นในระบบ รูปที่ 3.1 เป็นกรอบการแสดงแนวคิดในการออกแบบการควบคุมซึ่งประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (VSC) ตัวเก็บประจุในส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (C_{dc}) และค่าเหนี่ยวนำในส่วนในส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของตัวแปลงผันแรงดัน (L_F) และค่าความต้านทาน (R_F) ในการควบคุมระบบนี้ใช้แนวคิดในการรักษาค่าแรงดัน โดยการฉีดค่ากระแสไฟฟ้าผ่านค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อให้เกิดค่าแรงดันเข้าไปชดเชยในระบบ และมีการนำตัวกรองแบบ LRC ต่อไว้เพื่อแก้สัญญาณรบกวนที่เกิเกิดขึ้นให้สัญญาณมีความเรียบขึ้น โดยคิดให้ในระบบไฟฟ้า หรือ กริด เป็นการใช้แหล่งจ่ายแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ในทางอุดมคติซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้ประกอบไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำของสาย (L_{line}) และ ค่าความต้านทานของสาย (R_{line}) ตามคุณสมบัติของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าในการวิเคราะห์และออกแบบชุด D-STATCOM โดยการควบคุมเวกเตอร์ของแรงดันจากเฟส a, b และเฟส c ด้วยวิธีการของสเปสเวกเตอร์ โดยการแปลงแกนของเวกเตอร์ หรือควบคุมแกนของแรงดันและกระแสบนแกนหมุน(dqo) [14] นั่นคือชุด D-STATCOM จะต้องทำให้ระบบคืนสู่สภาวะการสมมาตรของแรงดันขึ้น โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า เพื่อรักษาค่าแรงดันในระบบ โดยพิจารณาที่ขนาด และมุมของเฟสของแรงดัน

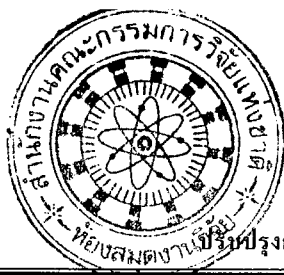


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม D-STATCOM



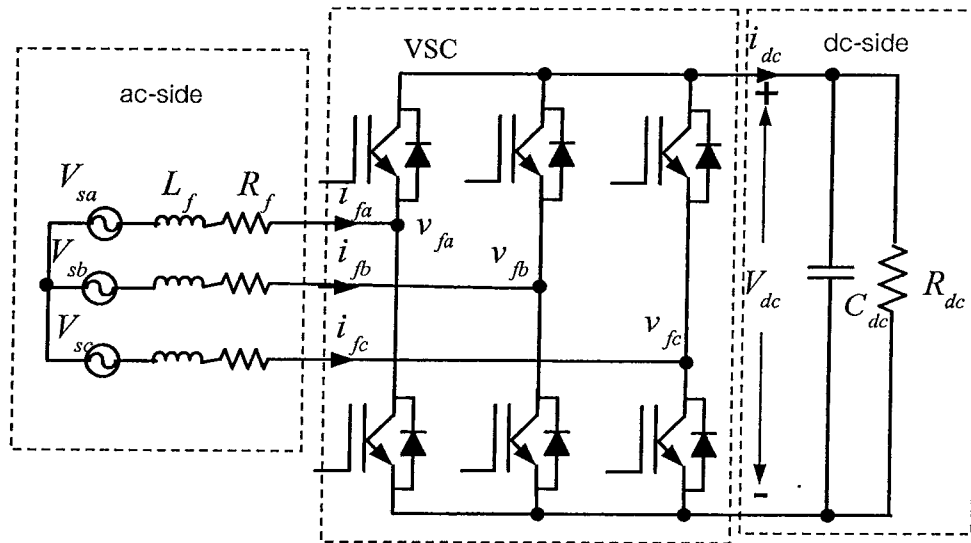
จากรูปที่ 3.1 เมื่อในระบบเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้น จึงทำให้แรงดันในสายส่งในแต่ละเฟส นั้นเปลี่ยนไปแล้วแต่กรณีของการเกิดความผิดปกติพร้อมกันดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 จากนั้นในส่วน ของชุดตรวจจับแรงดันจะทำการตรวจจับแรงดันที่เกิดขึ้นโดยใช้การควบคุมโดยการแปลงแกนทาง เวกเตอร์(SRF: Stationary reference frame) [14] นั่นคือทำการแปลงแกนเวกเตอร์จาก เฟส abc ให้ เป็น แกนนิ่ง ซึ่งเวกเตอร์อยู่บนแกน $\alpha - \beta$ แล้วจึงแปลงให้อยู่บนแกนหมุนคือ $d-q$ จากนั้นทำการ แยกองค์ประกอบลำดับของแรงดัน ให้เป็นลำดับบวก และลบ เพื่อควบคุมการเกิดความไม่ สมมาตรของแรงดันถ้าเกิดขึ้นในระบบ ด้วยวิธีการควบคุมนี้ใช้วิธีการแปลงแกนของเวกเตอร์โดย ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ วิธีการรีเคอร์ซีฟทีโอเพที พร้อมๆ กันในส่วนของเฟสล้อยกูป มีการดึงค่า ของความเร็วเชิงมุม ที่เกิดขึ้นไว้เพื่อนำไปใช้ในส่วนของการควบคุมการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ต่อไป เมื่อในระบบการควบคุมทำการแยกลำดับองค์ประกอบของแรงดันที่เกิดขึ้นได้แล้วนั้น จึง เข้าสู่ขบวนการสั่งค่ากระแสเปรียบเทียบ หรือค่าคอมมานด์(i_{cd}^*) โดยเรียกชุดนี้ว่าชุดควบคุมค่า กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ซึ่งในวงจรการควบคุมนี้ได้ตั้งค่าจริงของการคำนวณค่าการเกิดความไม่ สมมาตรของแรงดันขึ้นซึ่งแยกเป็นลำดับบวก ลบ และศูนย์ ตามลำดับซึ่งจะได้แสดงในส่วนของการชุด ควบคุมค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟต่อไป

ดังที่ทราบแล้วว่าการขนาน VSC เข้ากับระบบไฟฟ้า นั้น เราต้องทำการควบคุมค่ากระแส เพื่อ รักษาค่าแรงดันให้ปกติ ในการควบคุมค่ากระแสนี้ทำการควบคุมค่ากระแสในแกนของ dq ทำโดย การดึงค่าของกระแสในระบบที่เปลี่ยนแปลง i_{fd} และ i_{fq} มาทำการเปรียบเทียบกับค่ากระแสควบคุม i_{id}^* และ i_{iq}^* โดยที่ค่าของกระแส i_{id}^* ได้มาจากการควบคุมค่าแรงดันของตัวเก็บพลังงาน V_{dc}^2 กับ ค่ากระแสคอมมานด์ที่ออกจากชุดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ วัตถุประสงค์ของการควบคุมวงรอบของ แรงดัน V_{dc}^2 เพื่อทำการปรับค่าของแรงดันให้มีขนาดมากพอที่จะจ่ายค่ากระแสได้ จากนั้นค่ากระแส ที่สามารถควบคุมได้แล้วจึงเข้าสู่ขบวนการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกแยะ (Decoupling vector) เพื่อ ใช้เป็นสัญญาณมอดูเลชัน m_a, m_b และ m_c สำหรับการสร้าง PWM ในการสั่งการให้สวิทชิง ของอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันเข้าสู่ระบบต่อไป

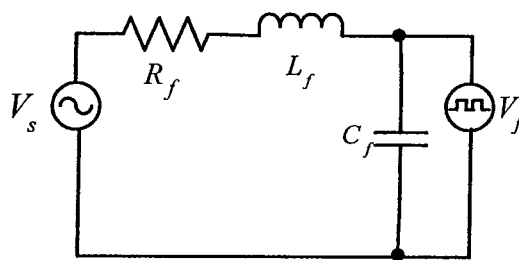


3.2 แบบจำลองแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

ส่วนนี้จะอธิบายและวิเคราะห์ถึงแบบจำลองในส่วนของแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส แบบพัลส์วิธมอดูเลชันหรือพีดับเบิลยูเอ็ม(PWM) โดยมีคาร์แรกเตอร์และอินคัตเตอร์ในระบบสายส่งร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 3.3 วงจรเทียบเคียงแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส กับแรงดันในระบบ

รูปที่ 3.2 วงจรประกอบด้วย IGBT 6 ตัว และมี C ต่อขนานเพื่อเป็นตัวกรองสัญญาณรบกวน (C_{dc}) ณ ตำแหน่งบัสแรงดันกระแสตรง (dc-link) โดยมีค่า R_{dc} ต่อขนานกับ C_{dc} เพราะว่าการให้ C_{dc} มีการสูญเสียค่ากำลังไฟฟ้าบ้างเล็กน้อยเพื่อให้ประยุกต์ใช้กับงานจริงได้ แรงดันแหล่งจ่ายคือ V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} อยู่ในส่วน of สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีตัวความต้านทาน R_f และ ตัวเหนี่ยวนำ L_f ต่ออนุกรมอยู่ เมื่อกระแสไฟฟ้า i_{fa} , i_{fb} , i_{fc} ผ่าน L_f เข้าไปยังจุดต่อของ VSC แรงดันตกคร่อม ณ จุดนั้นคือ v_{fa} , v_{fb} , v_{fc} จากแบบจำลอง สามารถเขียนวิเคราะห์เป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้



ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟ (KVL) ในส่วนของด้านกระแสสลับได้ดังนี้

$$V_{sa} - v_{fa} = R_f i_{fa} + L_f \frac{di_{fa}}{dt} \quad \dots\dots\dots 3.1$$

$$V_{sb} - v_{fb} = R_f i_{fb} + L_f \frac{di_{fb}}{dt} \quad \dots\dots\dots 3.2$$

$$V_{sc} - v_{fc} = R_f i_{fc} + L_f \frac{di_{fc}}{dt} \quad \dots\dots\dots 3.3$$

ในการคำนวณนี้คิดในเชิงอุดมคติ จึงทำให้ไม่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่อาจเกิดขึ้นที่ VSC ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าด้านกระแสสลับ และ ด้านกระแสตรง จึงมีความสมดุลกันแสดงโดยสมการที่ 3.4

$$v_{fa} i_{fa} + v_{fb} i_{fb} + v_{fc} i_{fc} = V_{dc} i_{dc} \quad \dots\dots\dots 3.4$$

ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ (KCL) ในส่วนของ dc-side ของตัวแปลงผันแรงดัน

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_{dc}} \quad \dots\dots\dots 3.5$$

$$v_{fa} i_{fa} + v_{fb} i_{fb} + v_{fc} i_{fc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \quad \dots\dots\dots 3.6$$

VSC ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สัญญาณไซน์แบบพัลส์วidthมอดดูเลชั่น (PWM) จากนั้นหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง v_{Fa} , v_{Fb} , v_{Fc} และสัญญาณมอดดูเลชั่น (m_a, m_b, m_c) ของแรงดันทั้ง 3 เฟส ได้สมการดังนี้

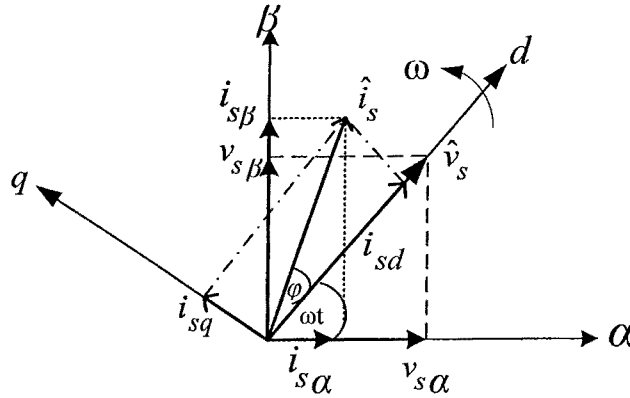
$$v_{fa} = m_a \frac{V_{dc}}{2}, v_{fb} = m_b \frac{V_{dc}}{2}, v_{fc} = m_c \frac{V_{dc}}{2} \quad \dots\dots\dots 3.7$$

สำหรับสมการในการแปลงแรงดันอินพุทจากสัญญาณในรูปสามเฟสไปอยู่ในแกนนิ่ง เขียนได้ดังสมการที่ 3.8 และในแกนหมุน ดังสมการที่ 3.9 ร่วมกับการพิจารณาทางเวกเตอร์ในรูปที่ 3.4

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.8$$



$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad \text{.....3.9}$$



รูปที่ 3.4 เวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์การแปลงแกนนิ่ง และแกนหมุน
ได้สมการกระแสและแรงดันในรูปของสเปซเวกเตอร์ ดังสมการที่ 3.10 และ 3.11

$$V_{sd} = v_{fd} + R_f i_{fd} + L_f \frac{di_{fd}}{dt} - \omega L_f i_{fq} \quad \text{.....3.10}$$

$$V_{sq} = v_{fq} + R_f i_{fq} + L_f \frac{di_{fq}}{dt} + \omega L_f i_{fd} \quad \text{.....3.11}$$

โดยที่ i_{fd}, i_{fq}, i_{fo} คือ องค์ประกอบแกน dqo ของกระแสด้านกระแสกลับใน SRF

V_{sd}, V_{sq} คือ องค์ประกอบของแกน d และ q ของแหล่งจ่ายแรงดันใน SRF

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของแรงดันที่แหล่งจ่ายในระบบ rad/s

จากสมการที่ 3.7 แปลงกลับให้อยู่ในรูป SRF ได้ดังสมการที่ 3.12

$$v_{fd} = m_d \frac{V_{dc}}{2}, v_{fq} = m_q \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{.....3.12}$$

โดยที่ m_d, m_q คือ องค์ประกอบของแกน dq ของการมอดดูเลชันสัญญาณ

แทนสมการที่ 3.12 ใน สมการที่ 3.10 และ 3.11

$$\frac{di_{fd}}{dt} + \frac{R_f}{L_f} i_{fd} = \frac{1}{L_f} V_{sd} - m_d \frac{V_{dc}}{2L_f} + \omega i_{fq} \quad \text{.....3.13}$$

$$\frac{di_{fq}}{dt} + \frac{R_f}{L_f} i_{fq} = -m_d \frac{V_{dc}}{2L_f} - \omega i_{fd} \quad \text{.....3.14}$$



ค่าของกำลังไฟฟ้าใน ac-side สามารถเขียนในรูปของ SRF ได้คือ

$$v_{fa}i_{fa} + v_{fb}i_{fb} + v_{fc}i_{fc} = \frac{3}{2}(v_{fq}i_{fq} + v_{fd}i_{fd}) \quad \text{.....3.15}$$

เราจะละเลยค่าแรงดันตกคร่อมที่ R_F และ L_F ใน ac-side ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$v_{fa}i_{fa} + v_{fb}i_{fb} + v_{fc}i_{fc} = \frac{3}{2}(v_{fq}i_{fq} + v_{fd}i_{fd}) \approx \frac{3}{2}V_{sd}i_{fd} \quad \text{.....3.16}$$

แทนค่าสมการที่ 3.16 ใน 3.6 ดังนั้นจึงได้สมการที่ 3.17

$$V_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{1}{R_{dc}C_{dc}}V_{dc}^2 = \frac{3V_{sd}}{2C_{dc}}i_{fd} \quad \text{.....3.17}$$

ได้สมการแบบจำลองของแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่สมบูรณ์ในรูปของ SRF ดังแสดงในสมการที่ 3.13 , 3.14 และ 3.17

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้ นำสมการที่ 3.1 – 3.3 แปลงให้อยู่ในรูปของ dqo

$$L_f \frac{d}{dt}(i_{fd} + ji_{fq}) + j\omega(i_{fd} + ji_{fq}) + R_f(i_{fd} + ji_{fq}) = ((V_{fd} + jV_{fq}) - (V_{sd} + jV_{sq})) \quad \text{..3.18}$$

แยกสมการที่ 3.18 ออกเป็น 3 แกน(axis) คือ o-axis , d-axis และ q-axis จะได้สมการ 3.19-3.21

แกน d

$$L_f \frac{d}{dt}i_{fd} - \omega i_{fd} + R_f i_{fd} = V_{fd} - V_{sd} \quad \text{.....3.19}$$

$$L_f \frac{d}{dt}i_{fd} - L_f \omega i_{fq} + R_f i_{fd} = V_{fd} - V_{sd} \quad \text{.....3.20}$$

แกน q

$$L_f \frac{d}{dt}i_{fq} + \omega i_{fq} + R_f i_{fq} = V_{fq} - V_{sq} \quad \text{.....3.21}$$

$$L_f \frac{d}{dt}i_{fq} - L_f \omega i_{fd} + R_f i_{fq} = V_{fq} - V_{sq} \quad \text{.....3.22}$$

แกน o

$$L_f \frac{d}{dt}i_{fo} + R_f i_{fo} = V_{fo} - V_{so} \quad \text{.....3.23}$$



$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{fd} - V_{sd} + L_f \omega \cdot i_{fq} - R_f \cdot i_{fd}) \quad \dots\dots\dots 3.24$$

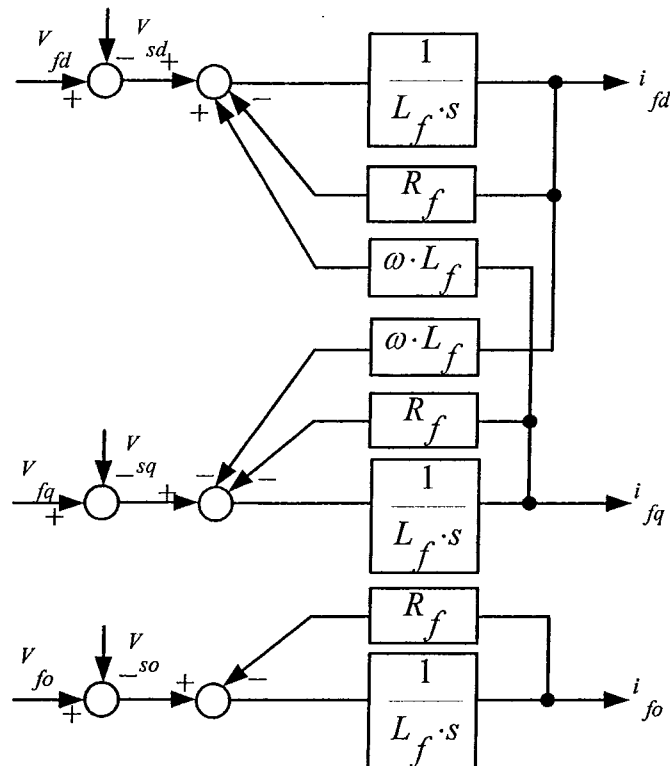
นำค่าที่ได้จากสมการที่ 3.20 ,3.22 และ 3.24 หาค่ากระแสในแต่ละแกนของ dqo

$$i_{fd} = \frac{1}{L_f \cdot s} (V_{fd} - V_{sd} + L_f \omega \cdot i_{fq} - R_f \cdot i_{fd}) \quad \dots\dots\dots 3.25$$

$$i_{fq} = \frac{1}{L_f \cdot s} (V_{fq} - V_{sq} + L_f \omega \cdot i_{fd} - R_f \cdot i_{fq}) \quad \dots\dots\dots 3.26$$

$$i_{fo} = \frac{1}{L_f \cdot s} (V_{fo} - V_{so} - R_f \cdot i_{fo}) \quad \dots\dots\dots 3.27$$

นำสมการ 3.25 - 3.27 ที่ได้ สร้าง แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5

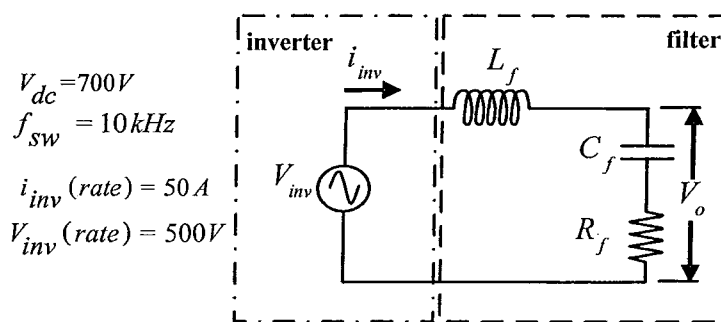


รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์คอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



3.3 การออกแบบวงจรกรองผ่านตัวการสวิตช์ด้านออก

เนื่องจากแรงดันที่ได้จากการสร้างโดยอินเวอร์เตอร์จะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตช์ปะปนอยู่มากดังนั้นทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องมีวงจรกรอง [18] เพื่อให้กรองระลอกแรงดันความถี่การสวิตช์ที่เกิดขึ้นนี้ทิ้งก่อนจ่ายแรงดันเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้วงจรกรอง R ต่ออนุกรมกับ C ต่อขนานเข้ามาในระบบ วงจรสมมูลต่อเฟสของระบบเมื่อมีการต่อวงจรกรองความถี่การสวิตช์เพิ่มเข้ามา วงจรกรอง R-C สามารถทำงานได้ดีเนื่องจากแหล่งจ่ายมีอิมพีแดนซ์เป็นตัวแทนเหนี่ยวนำซึ่งทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่การสวิตช์ เพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ

3.3.1 กำหนดให้ค่ายอดของกระแสกระแสเพื่อมสูงสุด ที่ผ่านวงจรกรองมีค่าไม่เกิน 10 % ของกระแสฟักัดอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.28 โดยพิจารณาจากแรงดันขณะที่วัฏจักรงาน (Duty cycle) 50 % ซึ่งจะมีค่ายอดของกระแสกระแสเพื่อมสูงสุด

$$L_f \geq \frac{V_{L_f}}{2\Delta i_{inv} f_\lambda} \quad \dots\dots\dots 3.28$$

$$L_f \geq \frac{700}{2 \times 0.1 \times 50 \times \sqrt{2} \times 10 \times 10^3} = 5mH$$

กำหนดให้กระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 A ในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้ ดังสมการที่ 3.29



$$\frac{V_{inv} - V_s}{2\pi f L_f} = 50 A \quad \dots\dots\dots 3.29$$

โดยที่ $V_{inv} = \frac{700}{\sqrt{2}} \approx 495.05 V_{rms}$ และ $V_s = 380 V_{rms}$

ดังนั้น
$$L_f \leq \frac{V_{inv} - V_s}{2\pi f \cdot 50}$$

$$L_f \leq \frac{495.05 - 380}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 50 A} = 7.3 \text{ mH}$$

3.3.2 กำหนดค่าความถี่เรโซแนนท์ ให้มีค่าเท่ากับ 750Hz ที่ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 6mH เพื่อ
คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ 3.30

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \dots\dots\dots 3.30$$

$$C \cdot 6 \text{ mH} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 750 \text{ Hz}} \right)^2 = 2.533 \times 10^{-8}$$

$$C_f = 7.499 \mu F$$

3.3.3 กำหนดค่า damping factor เท่ากับ 1 จากรูปที่ 3.5 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่าง
แรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังสมการที่ 3.31

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad \dots\dots\dots 3.31$$

จากสมการที่ 3.31 สามารถหาค่า damping factor ได้ดังสมการ 3.32



$$\xi_f = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad \dots\dots\dots 3.32$$

ดังนั้น

$$R_f = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad \dots\dots\dots 3.33$$

3.3.4 กำหนดการลดทอนแรงดันกระแสเพื่อม ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 15 เท่าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ (10 kHz) และเมื่อแทนค่า R_f สมการที่ 3.33 ลงในสมการที่ 3.32 จะได้สมการที่ 3.34

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{C_f L_f} s + 1}{C_f L_f s^2 + 2\sqrt{C_f L_f} s + 1} \quad \dots\dots\dots 3.34$$

จากข้อกำหนดที่ 1 และ 2 เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองเท่ากับ

$$L_f = 6mH$$

ดังนั้นจะได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองเท่ากับ

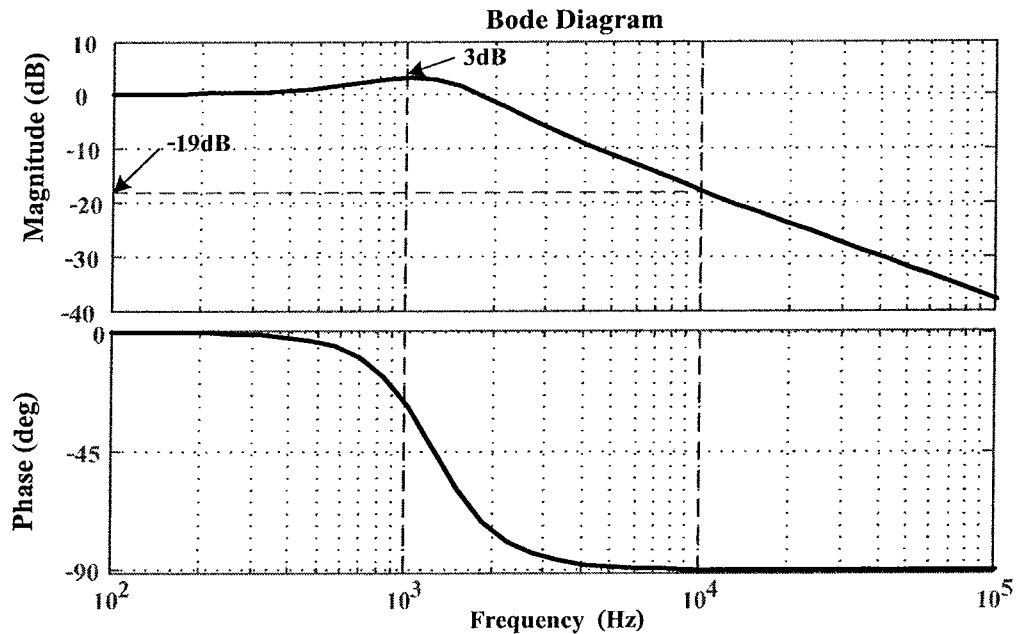
$$C_f = 8 \mu F$$

และจากสมการที่ 3.33 แทนค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f และตัวเก็บประจุ C_f จะได้ค่าตัวต้านทานของวงจรกรองเท่ากับ

$$R_f = 30 \Omega$$

ดังนั้น เลือกใช้ $R_f = 80 \Omega$ เนื่องจากต้องการความถี่เรโซแนนซ์มีอัตราขยายไม่เกิน 3 dB

จากรูปที่ 3.5 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่ได้ออกแบบ ที่ความถี่ฮาร์โมนิก 10 kHz มีอัตราการลดทอนเท่ากับ $9.5(10^{(-19/20)})$ เท่าและที่ความถี่เรโซแนนซ์มีอัตราขยาย 3 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง

3.4 การออกแบบชุดควบคุมการขับเคลื่อน

3.4.1 หลักการควบคุมแรงดันของสเปซเวกเตอร์

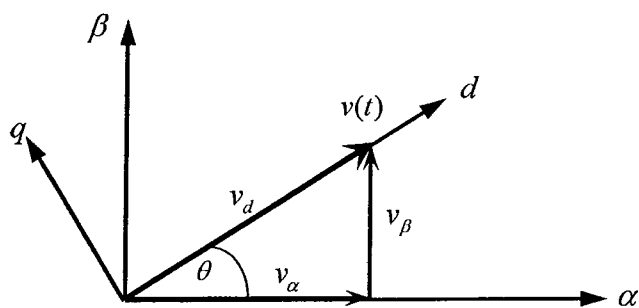
แรงดันตกชั่วขณะที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่มีความดันลำดับศูนย์ (Zero sequence voltage) เนื่องจากการต่อหม้อแปลงแบบ Dy ในระบบไฟฟ้า การแปลงแรงดันสเปซเวกเตอร์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ การแปลงให้อยู่บนแกนนิ่งหรือบนระนาบ α - β และบนแกนหมุนหรือบนระนาบ d-q ดังสมการที่ 3.35 และ 3.36 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} \quad \text{.....3.35}$$

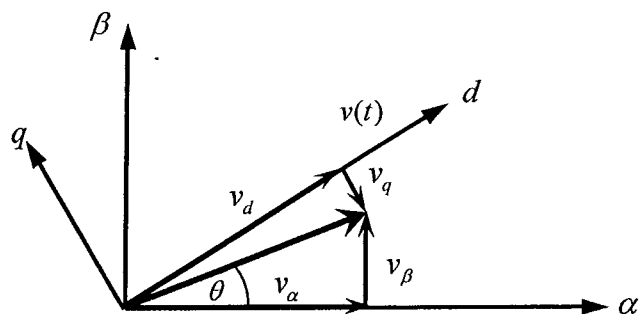
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad \text{.....3.36}$$



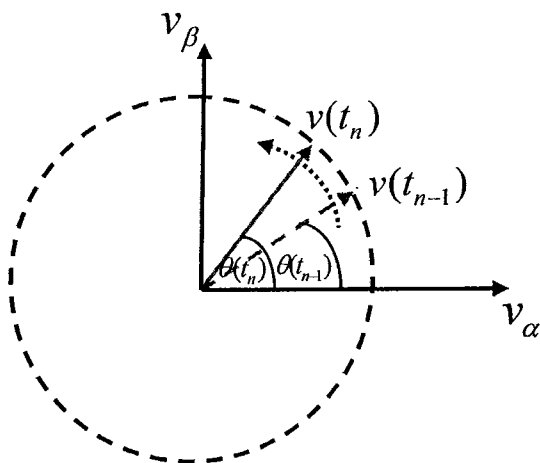
ซึ่งแรงดันสเปซเวกเตอร์ทั้งในกรณีแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตรและไม่สมมาตรเป็น
เวกเตอร์เดียวกันทั้งบนระนาบ α - β และบนระนาบ d - q ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 แรงดันสเปซเวกเตอร์ขณะที่แรงดัน 3 เฟสมีความสมมาตร



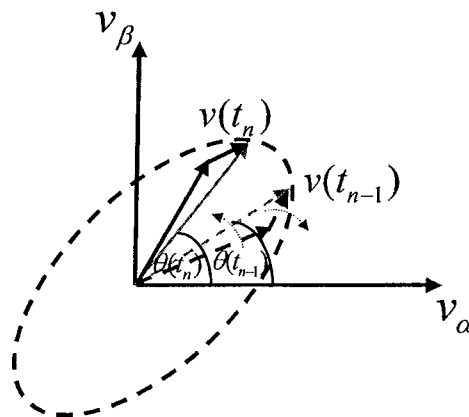
รูปที่ 3.9 แรงดันสเปซเวกเตอร์ขณะที่แรงดัน 3 เฟสมีความไม่สมมาตร



รูปที่ 3.10 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของแรงดันบนระนาบ α - β ขณะแรงดันสมมาตร



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์บนระนาบ α - β ในกรณีแรงดันสมมาตร เส้นโคจรจะมีลักษณะเป็นวงกลม แต่ในกรณีแรงดันไม่สมมาตรเส้นโคจรจะมีลักษณะเป็นวงรี ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เนื่องจากแรงดันขณะไม่สมมาตรจะประกอบด้วยแรงดันที่สมมาตร 2 แรงดัน ดังสมการที่ 3.37 คือ แรงดันลำดับบวกและแรงดันลำดับลบ ซึ่งทั้ง 2 แรงดันมีทิศทางการหมุนที่ตรงข้ามกัน



รูปที่ 3.11 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของแรงดันบนระนาบ α - β ขณะแรงดันไม่สมมาตร

$$V(t) = V_p(t) + V_n(t) \quad \text{.....3.37}$$

และเมื่อนำแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมมาตร (สมการที่ 2.2) มาแปลงให้ เป็นแรงดันสเปซเวกเตอร์จะได้ดังสมการที่ 3.38

$$V(t) = \left(\frac{V_1 + V_2'}{2} \right) e^{j\theta} + \left(\frac{V_1 - V_2'}{2} \right) e^{-j\theta} \quad \text{.....3.38}$$

โดยที่ V_1 คือ ขนาดของแรงดันที่เฟส A

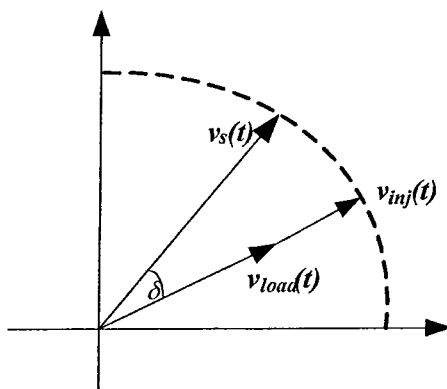
V_2' คือ ขนาดของแรงดันที่เฟส B หรือ C คูณด้วย $\sin(2/3 + \varphi)$

จากสมการที่ 3.37 และ สมการที่ 3.38 จะได้ว่า

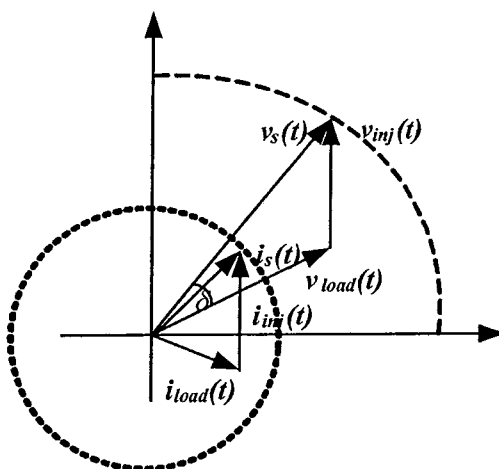


$$V_p(t) = \left(\frac{V_1 + V_2'}{2} \right) e^{j\theta} \quad \text{.....3.39}$$

$$V_n(t) = \left(\frac{V_1 - V_2'}{2} \right) e^{-j\theta} \quad \text{.....3.40}$$



รูปที่ 3.12 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของแรงดันขณะไม่สมดุล โดยพิจารณาขนาดแรงดัน



รูปที่ 3.13 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของการฉีดกระแสเพื่อรักษาแรงดันให้สมดุล

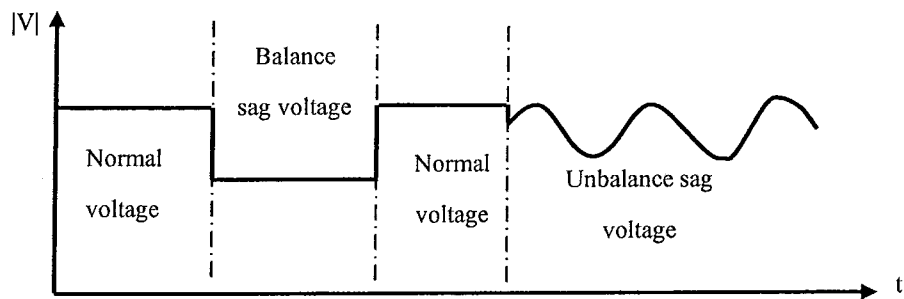
ขนาดของแรงดันสเปซเวกเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.41 ขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมาตรขนาดของแรงดันมีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.42 แต่ในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมมาตรขนาดของแรงดันจะมีการแกว่งด้วยความถี่ 100 Hz ซึ่งประกอบด้วย ขนาดของแรงดันลำดับบวกสามารถหาค่าได้โดยการหาค่าเฉลี่ยหรือสามารถหาได้จากสมการที่ 3.42 และขนาดของแรงดันลำดับลบซึ่งแกว่งบนแรงดันลำดับบวก สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.43



$$|V(t)| = \sqrt{V_\alpha^2(t) + V_\beta^2(t)} \quad \dots\dots\dots 3.41$$

$$|V_p| = \left| \frac{V_1 + V_2'}{2} \right| \quad \dots\dots\dots 3.42$$

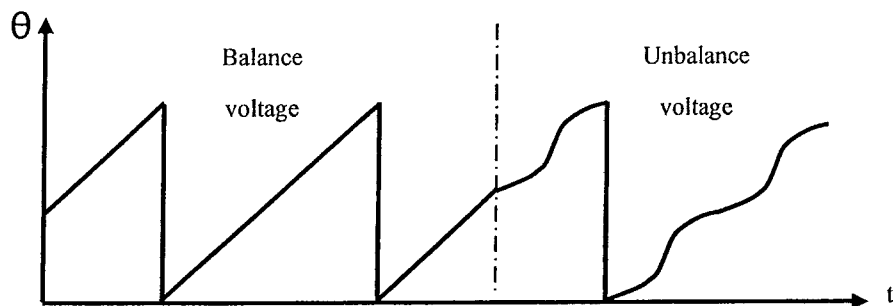
$$|V_n| = \left| \frac{V_1 - V_2'}{2} \right| \quad \dots\dots\dots 3.43$$



รูปที่ 3.14 ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมาตรและไม่สมมาตร
มุมเฟสของแรงดันสเปซเวกเตอร์สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.44

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta(t)}{V_\alpha(t)} \right) \quad \dots\dots\dots 3.44$$

ลักษณะของมุมเฟสของแรงดันทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.14 มุมเฟสของแรงดัน ขณะเกิดแรงดันตกแบบสมมาตรจะเหมือนกับขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ แบบ ไม่สมมาตรมุมเฟสแกว่งที่ความถี่ 100Hz บนมุมเฟสปกติเช่นเดียวกับขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ

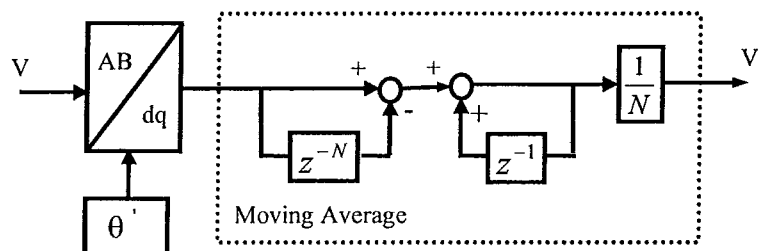


รูปที่ 3.15 มุมเฟสของแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมาตรและไม่สมมาตร



3.4.2 ชุดตรวจจับและแยกลำดับของแรงดัน

เมื่อในระบบเกิดสถานะความไม่สมมาตรขึ้น ดังนั้นชุดตรวจจับแรงดันต้องทำหน้าที่ตรวจจับสถานะการเกิด การเปลี่ยนแปลงของแรงดันให้รวดเร็วและแม่นยำเพื่อสั่งการให้ชุดควบคุมการชดเชยกำลังไฟฟ้าทำงานให้รวดเร็วด้วยเช่นกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการตรวจจับด้วยวิธีการ dq (Synchronous frame) ด้วยการตรวจจับขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์และมุม θ ซึ่งถ้าสถานะแรงดันเกิดความไม่สมมาตรขึ้นในระบบชุดตรวจจับแรงดันต้องสามารถแยกการลำดับของแรงดันที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงเลือกวิธีการของ รีเคอร์ซีฟดีเอฟที ด้วยการตรวจจับขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์อย่างเฉื่อยและใช้เกณฑ์ในการพิจารณาการเกิดแรงดันตกชั่วขณะมีค่าคงที่ โดยใช้วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที เนื่องจากมีความแม่นยำมากและง่ายในการปฏิบัติจริง โดยที่รูปที่ 3.16 แสดงการหาขนาดแรงดันลำดับบวก โดยเริ่มจากการแปลงแรงดัน 3 เฟสให้อยู่บนระนาบ d-q ซึ่งการตรวจจับด้วยวิธีการ dq นี้เป็นวิธีการที่มีความเร็วในการตรวจจับเนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้นแล้วนั้น พบว่าวิธีการตรวจจับแบบ dq มีความเร็วในการตรวจจับ ที่ 0.101 วินาที [16] ด้วยการตรวจจับแรงดันต้องการทั้งขนาดแรงดันและมุม θ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เฟสล็อกูปเพื่อหา θ เพื่อใช้ในการแปลงแกนทางเวกเตอร์ แต่เนื่องจากขณะเกิดแรงดันไม่สมมาตรจะมีการแกว่งของแรงดันและในระบบไฟฟ้าไม่ได้มีเพียงแรงดันที่มีความถี่หลักมูล ดังนั้นจึงต้องนำแรงดันที่ได้มาผ่านตัวกรองแบบ Moving average ที่ระยะเวลา 1 คาบก่อนแล้วจึงนำไปหาขนาดของแรงดันต่อไป

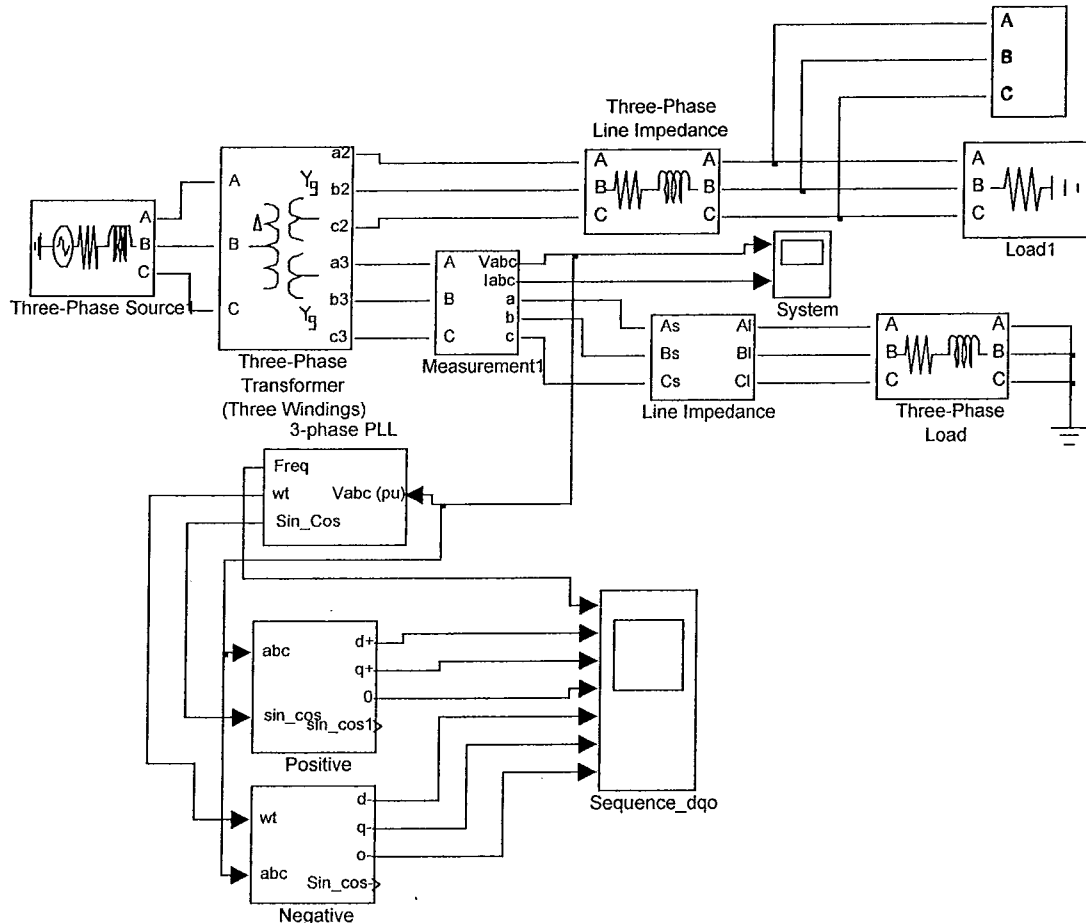


รูปที่ 3.16 วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

จากสมการที่ 3.42 แสดงให้เห็นว่าแรงดันลำดับบวกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงแรงดันของเฟสที่ลดลงมากที่สุดได้และทำให้ตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะไม่ได้ในบางกรณี แต่ถ้าคิดผลของแรงดันลำดับลบด้วย ก็จะทำให้ตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะได้ทุกกรณี โดยการนำขนาดของแรงดันลำดับบวกกลับด้วยขนาดของแรงดันลำดับลบ ซึ่งวิธีการหาค่าขนาดแรงดันลำดับลบจะเหมือนการหาขนาดแรงดันลำดับบวกเพียงแต่เปลี่ยน θ เป็น $-\theta$

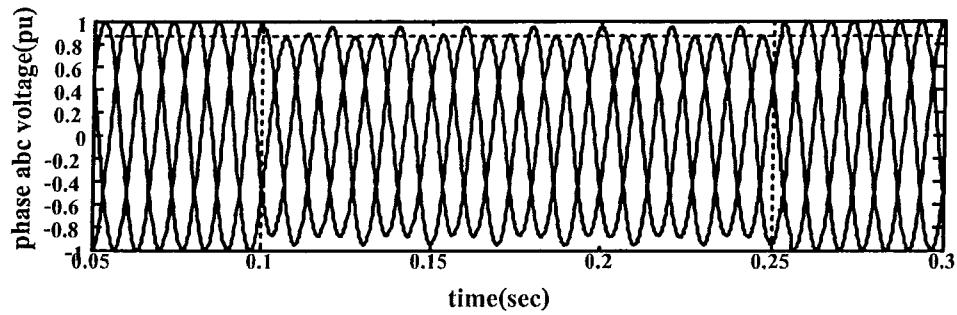


จากนั้นนำบล็อกการแยกลำดับแรงดันที่สร้างขึ้น ไปทดสอบเบื้องต้นกับระบบเพื่อ
ศึกษาการทำงานของการทำงานการลำดับแรงดันในสถานะแกนนิ่ง



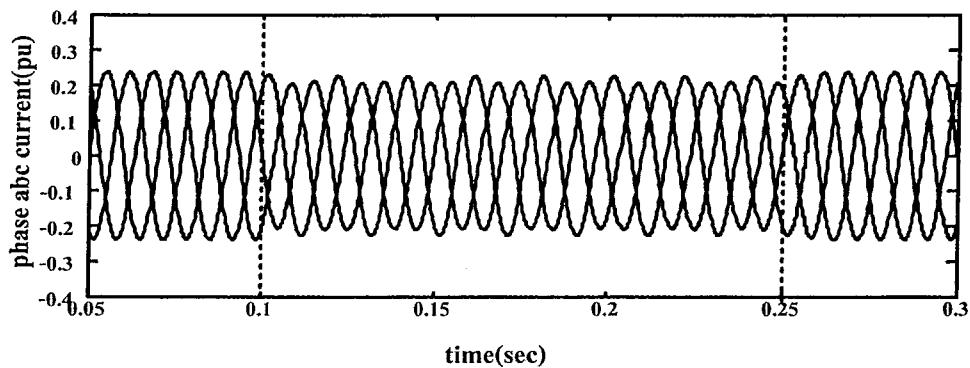
รูปที่ 3.17 การต่อวงจรทดสอบการแยกลำดับแรงดัน abc เป็นแรงดันในรูปแบบของแกน dqo

จากการนำชุดแยกลำดับแรงดันทดสอบกับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเป็นเปอร์ยูนิต เริ่มทำงานที่เวลาเริ่มต้น จนถึง 0.3 วินาที พบว่าเมื่อในระบบเกิดฟอลต์ แบบสองเฟส (double line to ground fault) ที่เวลา 0.1 ถึงเวลา 0.25 วินาที นั่นคือในระบบเกิดความไม่สมมาตรของแรงดันขึ้น และในช่วงก่อน 0.1 วินาที และหลังจาก 0.25 วินาที ในระบบมีความสมมาตรของแรงดันและกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ รูปคลื่นแรงดันในแกนนิ่ง dqo ดังแสดงในรูปที่ 3.19



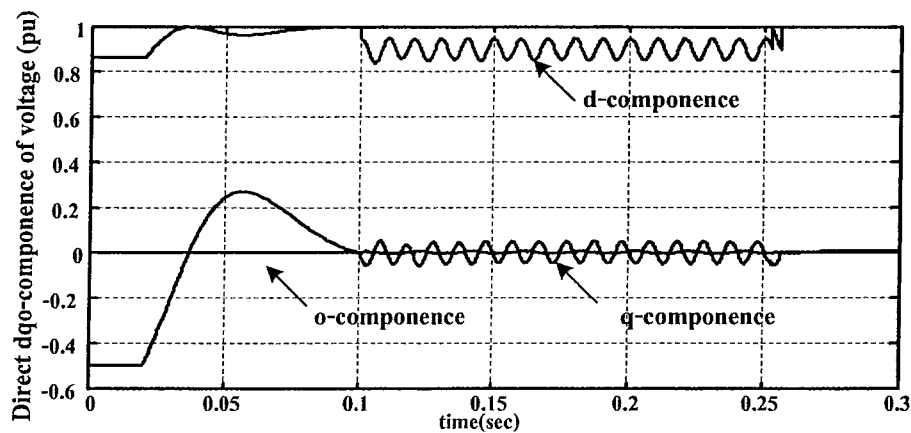
(ก) รูปคลื่นแรงดันเฟส a,b และ c

รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อเกิดสภาวะความไม่สมมาตรขึ้นในระบบ



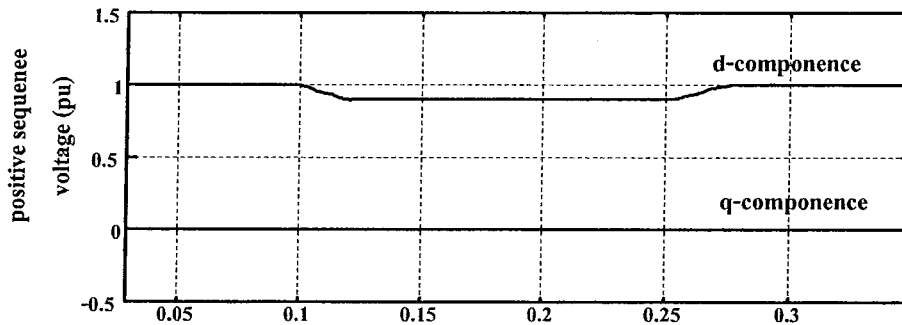
(ข) รูปคลื่นกระแสเฟส a,b และ c

รูปที่ 3.18(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อเกิดสภาวะความไม่สมมาตรขึ้นในระบบ

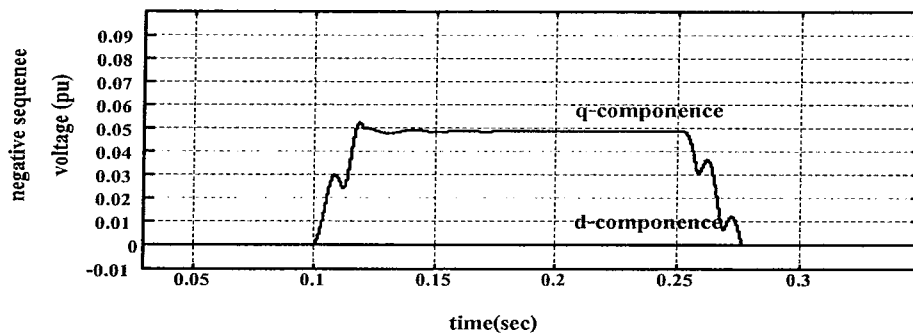


รูปที่ 3.19 รูปคลื่นแรงดันในแกนนิ่ง dqo

ผลการทดสอบชุดลำดับแรงดันแสดงให้เห็นจากการวัดรูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งผลดังกล่าวจะนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการควบคุมชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนต่อไป



(ก) รูปคลื่นแรงดันบนแกนนิ่ง dq ในองค์ประกอบลำดับบวก

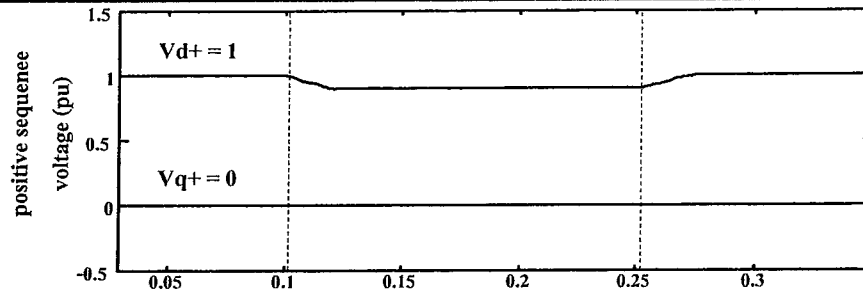


(ข) รูปคลื่นแรงดันบนแกนนิ่ง dqo ในองค์ประกอบลำดับลบ

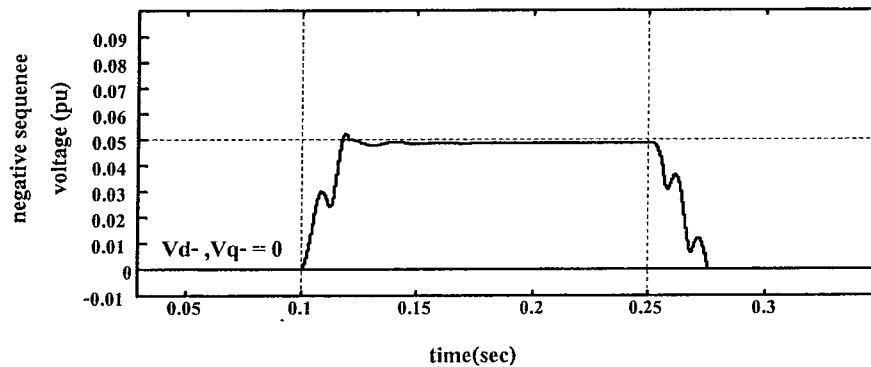
รูปที่ 3.20 ผลการทดสอบชุดแยกการลำดับแรงดันบวกและลบ

3.4.3 ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

ในส่วนนี้เป็นการออกแบบ การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนหรือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [19] หลังจากทำการแปลงแรงดัน a, b, c เป็น dq ซึ่งอยู่บนแกนนิ่งแล้วนั้น ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้านี้จะทำหน้าที่สร้างกระแสเพื่อนำไปทำการควบคุมต่อไป ซึ่งค่ากระแสที่ได้นั้นได้จากสร้างชุดควบคุมกำลัง ไฟฟ้าเสมือนดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งค่าแรงดันที่เข้ามายังชุดควบคุมเป็นค่าแรงดันที่ตรวจจับมาได้จากระบบ เรียบร้อยแล้วดังแสดงใน 3.4.2 จากนั้นทำการกำหนดค่า V_d^* และ V_q^* ในสถานะแรงดันสมมาตรในรูปของแกนนิ่ง ดังรูป 3.21 แล้วทำการควบคุม PI ในระบบ เพื่อให้ได้ค่าของกระแสอ้างอิงแกน dq i_{cd}^* i_{cq}^*



(ก) ผลการจำลองการตรวจจับสัญญาณแรงดันลำดับบวก



(ข) ผลการจำลองการตรวจจับสัญญาณแรงดันลำดับลบ

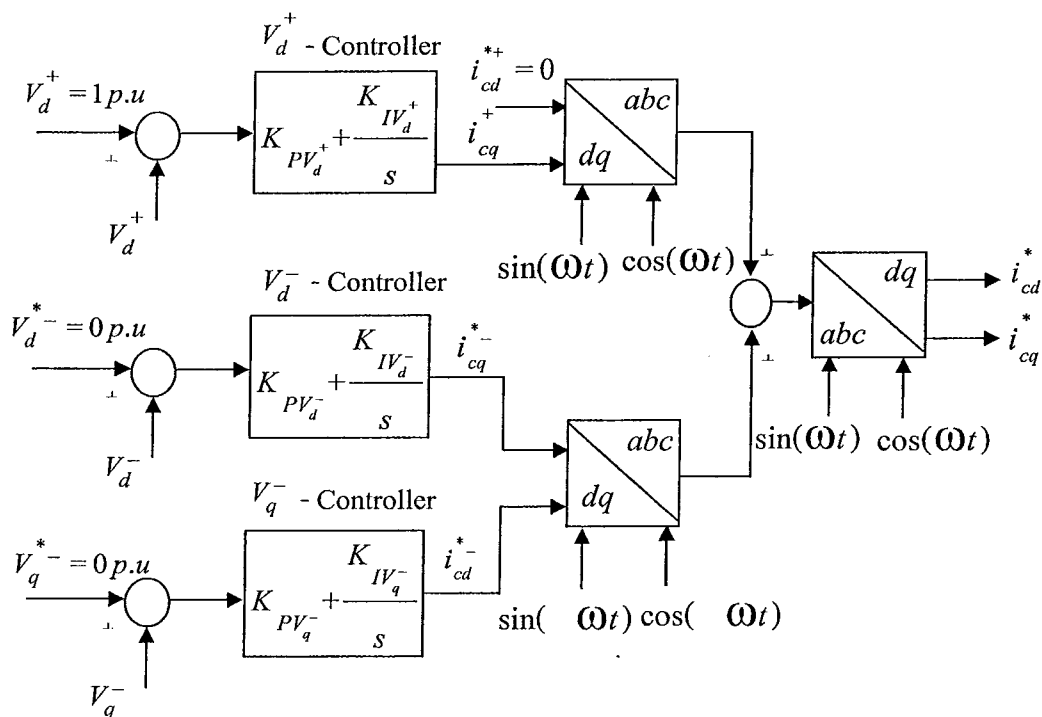
รูปที่ 3.21 ผลการจำลององค์ประกอบแรงดัน dq ลำดับบวก และลบ

จากผลการจำลองขององค์ประกอบ dq ในลำดับบวก และลบ ในสถานะที่แรงดันในระบบเกิดความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.21 กำหนดให้มีขนาดเป็น 1 หรือ หนึ่งหน่วย ตามผลการเกิดในรูปปริมาณของแรงดันในแกนนิ่ง สามารถกำหนดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$V_d^+ = 1 \text{ p.u.}, \quad V_q^+ = 0 \text{ p.u.} \quad \dots\dots\dots 3.45$$

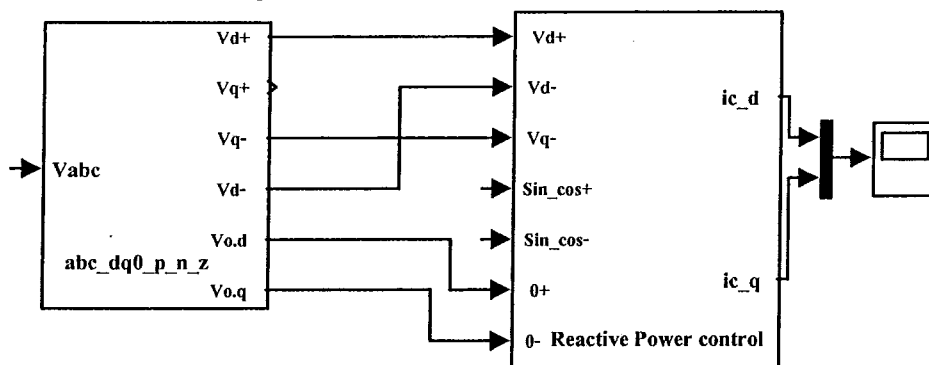
$$V_d^- = 0 \text{ p.u.}, \quad V_q^- = 0 \text{ p.u.} \quad \dots\dots\dots 3.46$$

จากรูปที่ 3.21 (ข) เมื่อในระบบเกิดสภาวะความไม่สมมาตร ค่า V_q^- จะมีค่าเป็น 0.05 p.u ส่วนสภาวะความสมมาตรในระบบเป็นไปตามสมการที่ 3.45 และ 3.46 นั้นหมายถึงเมื่อเกิดแรงดันตก หรือการเกิดสภาวะความไม่สมมาตรขึ้นในระบบ สามารถทำการปรับค่า องค์ประกอบ dq ในลำดับบวก และลบ ได้ให้ถึงค่าความสมมาตรของแรงดันได้ดังสมการด้านบน การควบคุมนี้แสดงดังแสดงในรูปที่ 3.22

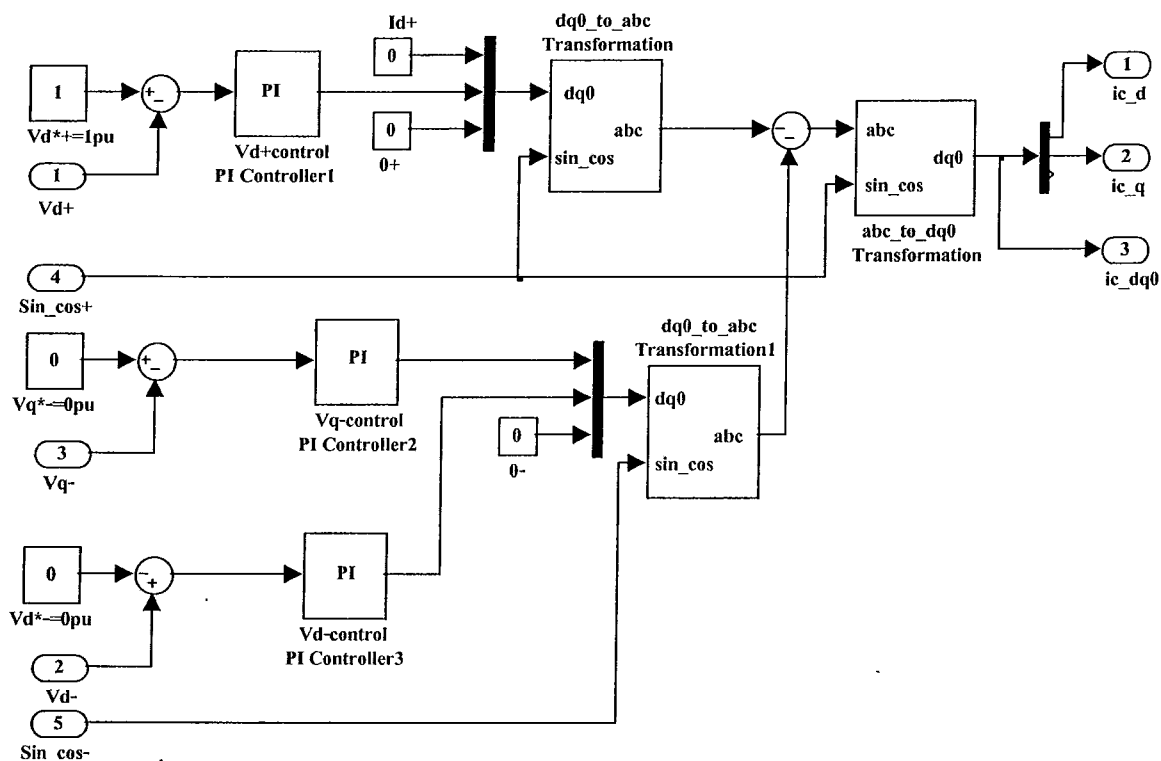


รูปที่ 3.22 แบบแผนผังของการควบคุมกำลังไฟฟ้าสามเฟส สำหรับ ดี- สเตทคอม

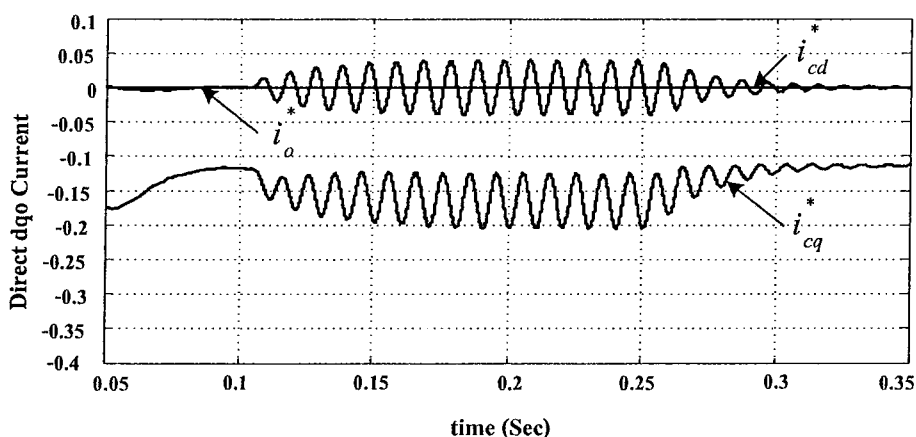
จากรูปที่ 3.22 ทำการปรับค่า V_d^+ ที่ 1.0 p.u ทำให้ได้ค่า i_d^{*+} ในลำดับบวก และปรับค่า V_d^- และ V_q^- ไปที่ค่า 0 ในลำดับลบ จากนั้นทำการแปลงกลับ องค์ประกอบ dq ในลำดับบวก และลบ ในรูปขององค์ประกอบแกน abc แล้วทำการรวมค่ากระแสที่ได้ เพื่อให้ได้ค่ากระแสคอมมานด์คือ ค่า i_{cd}^* และ i_{cq}^*



รูปที่ 3.23 นำสัญญาณที่แยกการลำดับเรียบร้อยแล้วต่อเข้ากับส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ



รูปที่ 3.24 แบบจำลองชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน



รูปที่ 3.25 ผลการทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

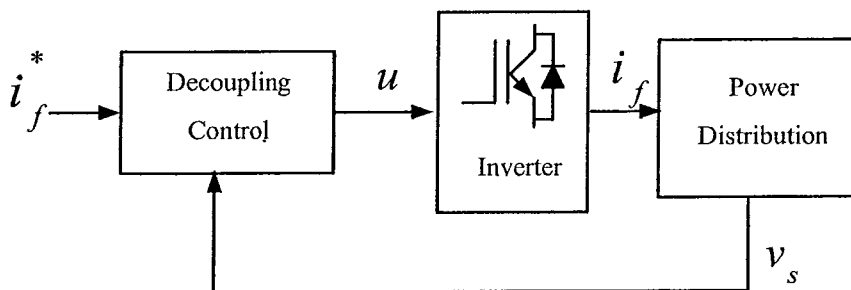
3.4.4 ชุดควบคุมกระแส

หลักการควบคุมกระแสในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมด้วยวงรอบควบคุมกระแส (Decoupling vector control) [20] ซึ่งเป็นการควบคุมแบบป้อนไปหน้า (Feed forward control) ดังนั้นจึงได้อ้างอิงจากหลักการ การปรับปรุงการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมด้วยวงรอบควบคุมกระแส [21] โดยนำมาประยุกต์การควบคุมดังนี้

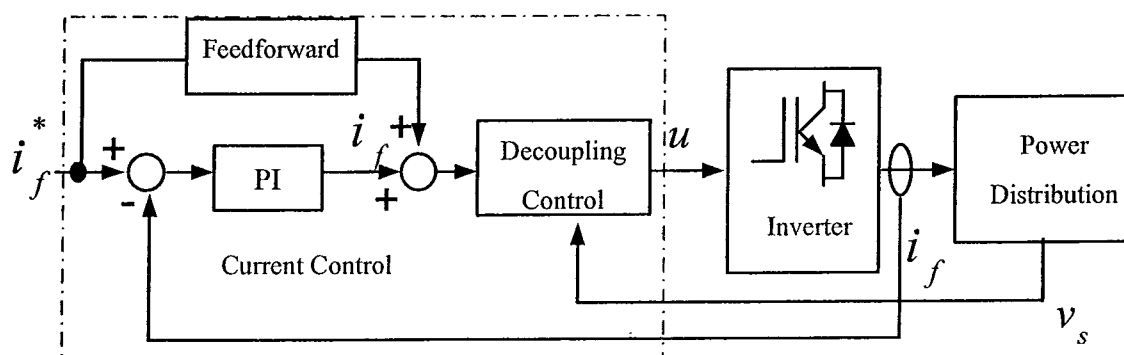


3.4.4.1 หลักการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมด้วยวงรอบควบคุมกระแส

แม้การควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันด้วยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม จะมีสมรรถนะ ที่ดีในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ การทำงานที่ความเร็วสูง แต่เนื่องจากการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมเป็นการควบคุมแบบป้อนไปหน้าดังแสดงในรูปที่ 3.27 โดยคำนวณค่าแรงดันคำสั่งสำหรับอินเวอร์เตอร์ แต่แรงดันจริงที่จ่ายให้กับระบบจะมีค่าผิดพลาดไปจากแรงดันคำสั่ง เนื่องมาจากการประวิงเวลาของการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์และแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง ทั้งนี้ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถชดเชยความผิดพลาดดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อการควบคุม อีกสาเหตุหนึ่งคือความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งทำให้แรงดันคำสั่งที่คำนวณโดยตัวควบคุมมีค่าผิดพลาดไป ความผิดพลาดที่เกิดจากเหตุปัจจัยทั้งสองนี้จะทำให้กระแสควบคุมเกิดความเพี้ยนและคลาดเคลื่อนไปจากค่าคำสั่ง ด้วยเหตุนี้เพื่อปรับปรุงให้กระแสควบคุมมีค่าคำสั่งในสถานะแม้จะมีการรบกวนจากปัจจัยดังกล่าว



รูปที่ 3.26 ระบบควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



รูปที่ 3.27 ระบบควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีวงรอบควบคุมกระแส

3.4.4.2 การชดเชยแบบป้อนไปหน้าสำหรับระบบควบคุมกระแส (Feed forward)

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างค่ากระแสและค่าแรงดันในแต่ละแกน จากสมการที่ 3.18 เราพบว่าแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับจะเกิดจากความถี่ของระบบและกระแส

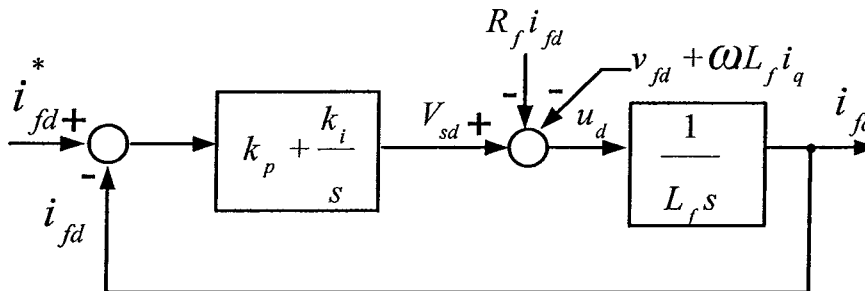


ที่ต่างแกนกันทำให้ไม่สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้อย่างอิสระ เราจึงเขียนสมการในอีกลักษณะหนึ่งเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังสมการที่ 3.55 และ 3.56 โดยจะแยกแอมพลิจูดของแรงดันตกคร่อมความต้านทานและแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับออก โดยมองเป็นสัญญาณที่เข้ามาในระบบ เพราะฉะนั้นฟังก์ชัน โดยย้ายระหว่างกระแสและแรงดันของระบบจะเหลือเพียงแอมพลิจูดเหนี่ยวนำไว้

$$u_d = L_f \frac{di_{fd}}{dt} = V_{sd} - v_{fd} - R_f i_{fd} + \omega L_f i_{fq} \quad \text{.....3.47}$$

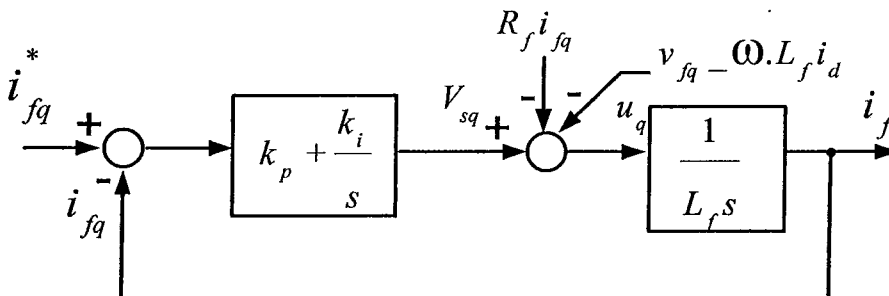
$$u_q = L_f \frac{di_{fq}}{dt} = V_{sq} - v_{fq} - R_f i_{fq} - \omega L_f i_{fd} \quad \text{.....3.48}$$

โดยอาศัยการแปลงลาปลาซสำหรับสมการ 3.47 และ 3.48 เราสามารถแสดงระบบควบคุมกระแสในแกน d และ q ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.28 และ 3.29 ตามลำดับ ซึ่งในที่นี้ถือว่าฟังก์ชันโอนย้ายของส่วนการสร้างความถี่ PWM และอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนสมการที่ 3.49 และ 3.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของกระแสกับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ



รูปที่ 3.28 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสในแกน d

$$e_{id} = \frac{s}{L_f s^2 + k_p s + k_i} \mathcal{Z}[v_{fd} + \omega L_f i_{fq}] \quad \text{.....3.49}$$



รูปที่ 3.29 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสในแกน q



$$e_{iq} = \left(\frac{s}{L_f s^2 + k_p s + k_i} \right) \text{Laplace}[v_{fq} - \omega \cdot L_f i_{fd}] \quad \dots\dots\dots 3.50$$

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เราจะทำการชดเชยในส่วนแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับและแรงดันตกคร่อมความต้านทาน โดยอาศัยหลักการป้อนไปหน้า ซึ่งนอกจากจะทำให้ค่าผิดพลาดของกระแสเท่ากับศูนย์แล้วยังเป็นการช่วยลดภาระของวงจรควบคุมกระแสลง[22] ผลตอบสนองของกระแสจึงดีขึ้น สมการที่ 3.51 และ 3.52 แสดงส่วนชดเชยแบบป้อนไปหน้าในแกน d และ q ตามลำดับ

ชดเชยแบบป้อนไปหน้าในแกน d (Fd)

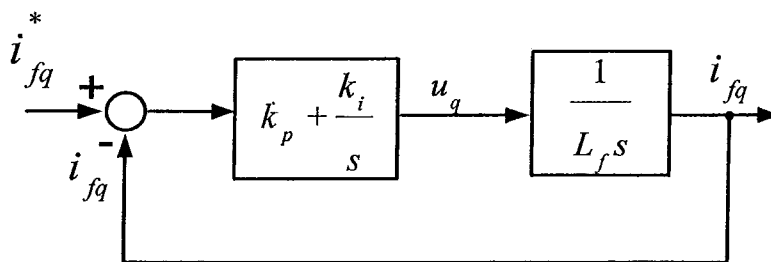
$$R_f i_{fd} + v_{fd} u_d + \omega \cdot L_f i_{fq} \quad \dots\dots\dots 3.51$$

ชดเชยแบบป้อนไปหน้าในแกน q (Fq)

$$R_f i_{fq} + v_{fq} u_q - \omega \cdot L_f i_{fd} \quad \dots\dots\dots 3.52$$

3.4.4.3 แนวทางการออกแบบอัตราขยายตัวควบคุม PI

เมื่อรวมส่วนชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับและแรงดันตกคร่อมความต้านทานเข้ากับระบบควบคุมกระแสในรูปที่ 3.28 และ 3.29 เราจะได้ระบบควบคุมกระแสที่ใช้ในการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.29 และการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.53 และ 3.54 โดยให้เงื่อนไขอัตราขยายวงรอบเปิดที่ความถี่ตัดข้าม ω_c (Cross over frequency) มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนสมการและค่าความถี่หักมุม ω_{cn} (Corner frequency) ของตัวควบคุม PI จะต้องน้อยกว่าความถี่ตัดข้าม



รูปที่ 3.30 แผนผังระบบควบคุมกระแสที่ใช้ในการออกแบบ

ในการหาค่า K_p และ K_i กระทำโดยการเขียนโปรแกรมใน M_file ใน MATLAB ดังโปรแกรมเบื้องต้นด้านล่าง โดยกำหนดให้ ค่า $L_f = 6mH$ ดังที่ได้ออกแบบมา โดยหลักการเลือก



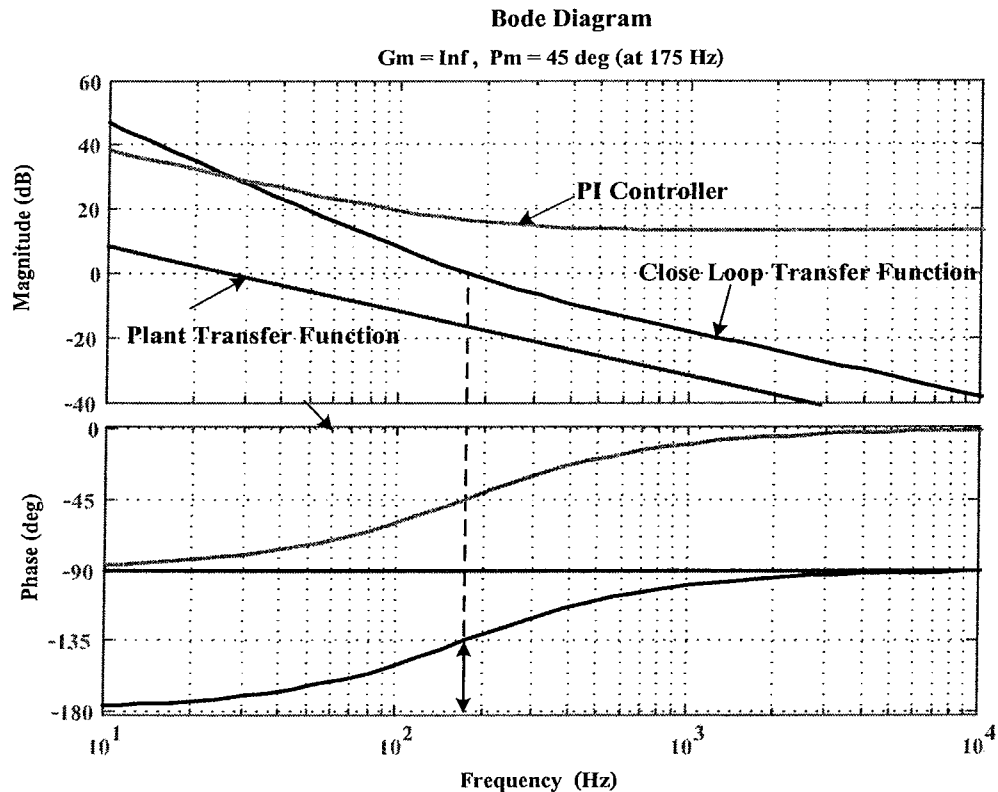
ค่าความถี่ตัดข้ามนั้น จะพิจารณาจากผลตอบสนองของกระแสเป็นสำคัญเนื่องจากในงานวิจัย ลักษณะการควบคุมจะเป็นแบบต่อทอดเนื่อง (Cascade) โดยมีการควบคุมความเร็วอยู่รอบนอก และใช้ความถี่ตัดข้ามมีค่าประมาณ 50 rad/s [23] (ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ได้ผลตอบสนองชั่วขณะรวดเร็ว และเพียงพอสำหรับใช้ในระบบอุตสาหกรรมทั่วไป) ส่วนการควบคุมกระแสจะเป็นวงรอบในซึ่ง ต้องมีผลตอบสนองที่ไวกว่าวงรอบนอก ดังนั้นเราจะต้องเลือกให้ความถี่ตัดข้ามมีค่ามากกว่า จะต้องไม่มากจนเกินไป เพราะอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของสัญญาณรบกวนได้ถ้าให้เวลาขึ้น t_r (Rise time) มีค่าประมาณ 2 ms เราสามารถประมาณความถี่ตัดข้ามได้เท่ากับ 1100 rad/s โดยอาศัย ความสัมพันธ์โดยประมาณที่ว่า $\omega \approx \frac{2.2}{t_r}$ สำหรับการเลือกค่าความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI เรา จะพิจารณาจากเสถียรภาพเป็นหลักโดยระบบจะต้องมีส่วนเฟสที่เพียงพอ โดยนำค่าพารามิเตอร์ ไปใส่ในสมการคำนวณ ดังนั้นจึงได้อัตราขยายตัวควบคุม PI ในแกน dq คือ ซึ่งได้จากสมการที่ 3.62 และ 3.63

$$K_p = 4.6669 \text{ (V/A)} \quad K_i = 5.1336 \times 10^3 \text{ (V/As)}$$

ตัวอย่าง การเขียนโปรแกรมหาค่า K_p และ K_i

```
Pmc = 45; fcc = 1100;
GTFC = 1/L;
Gct = tf([GTFC],[1 0]);
Gco = Gct;
Gcw = evalfr(Gco,j*fcc);
Gcwa = abs(Gcw);
zetac = angle(Gcw);
zeta_c = (-pi + Pmc/57.296 -(zetac));
ดั่งนั้นจะได้ KP_c = cos(zeta_c)/Gcwa .....3.53
KI_c = ((-fcc)*sin(zeta_c))/Gcwa .....3.54
```

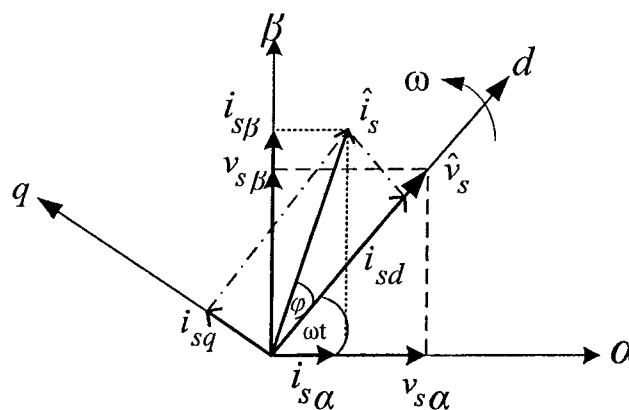
รูปที่ 3.31 แสดงแผนภาพโพลของระบบควบคุมกระแสที่ได้ทำการออกแบบ พบว่ามีส่วนเฟสเท่ากับ 45° ซึ่งเพียงพอสำหรับเสถียรภาพของระบบควบคุม



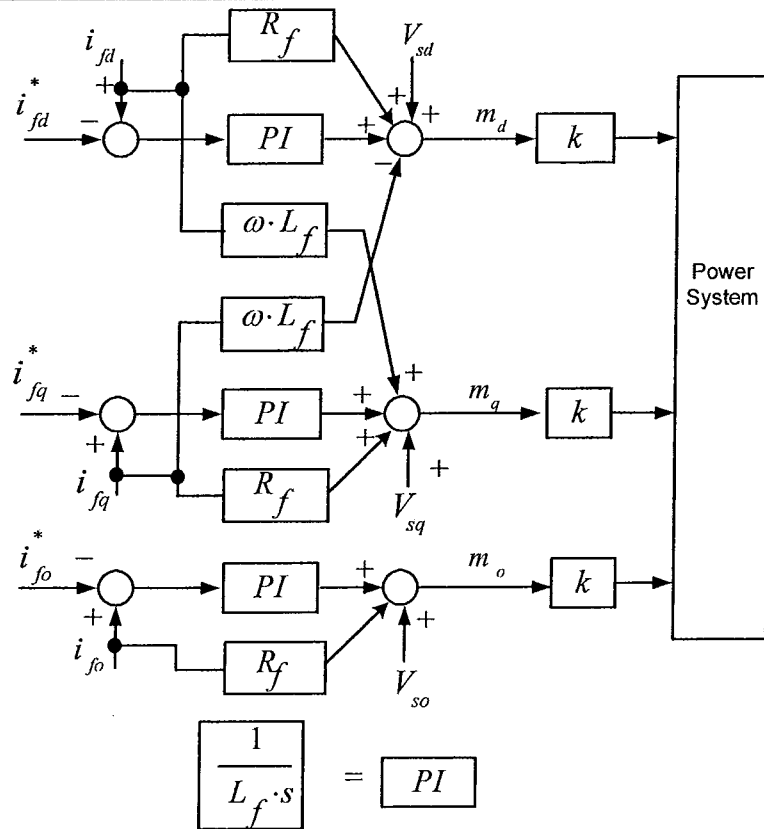
รูปที่ 3.31 แผนภาพโบคของระบบควบคุมกระแสวงรอบปิดที่ได้ทำการออกแบบ

3.4.4.4 แบบการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

การแยกการเชื่อมร่วมทางเวกเตอร์ หรือ Decoupling Control กระทำเพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันสำหรับการควบคุมในชุดการสร้างความดันของอินเวอร์เตอร์ โดยการแปลงกลับของรูปสมการที่ 3.25-3.27 จากความสัมพันธ์ของการแปลงแกนทางเวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.32 จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชุดแยกการเชื่อมร่วม ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.33

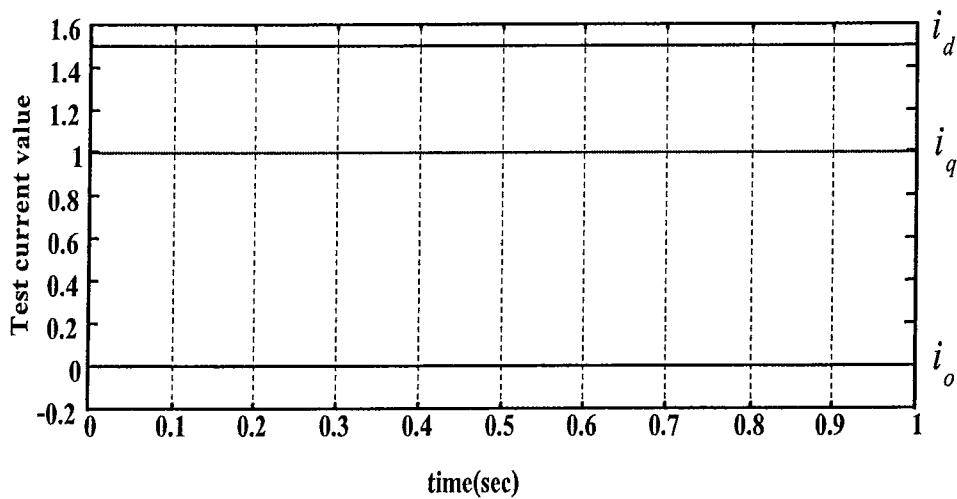


รูปที่ 3.32 เวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ของการแยกการเชื่อมร่วมทางเวกเตอร์



รูปที่ 3.33 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชุดแยกการเชื่อมร่วม

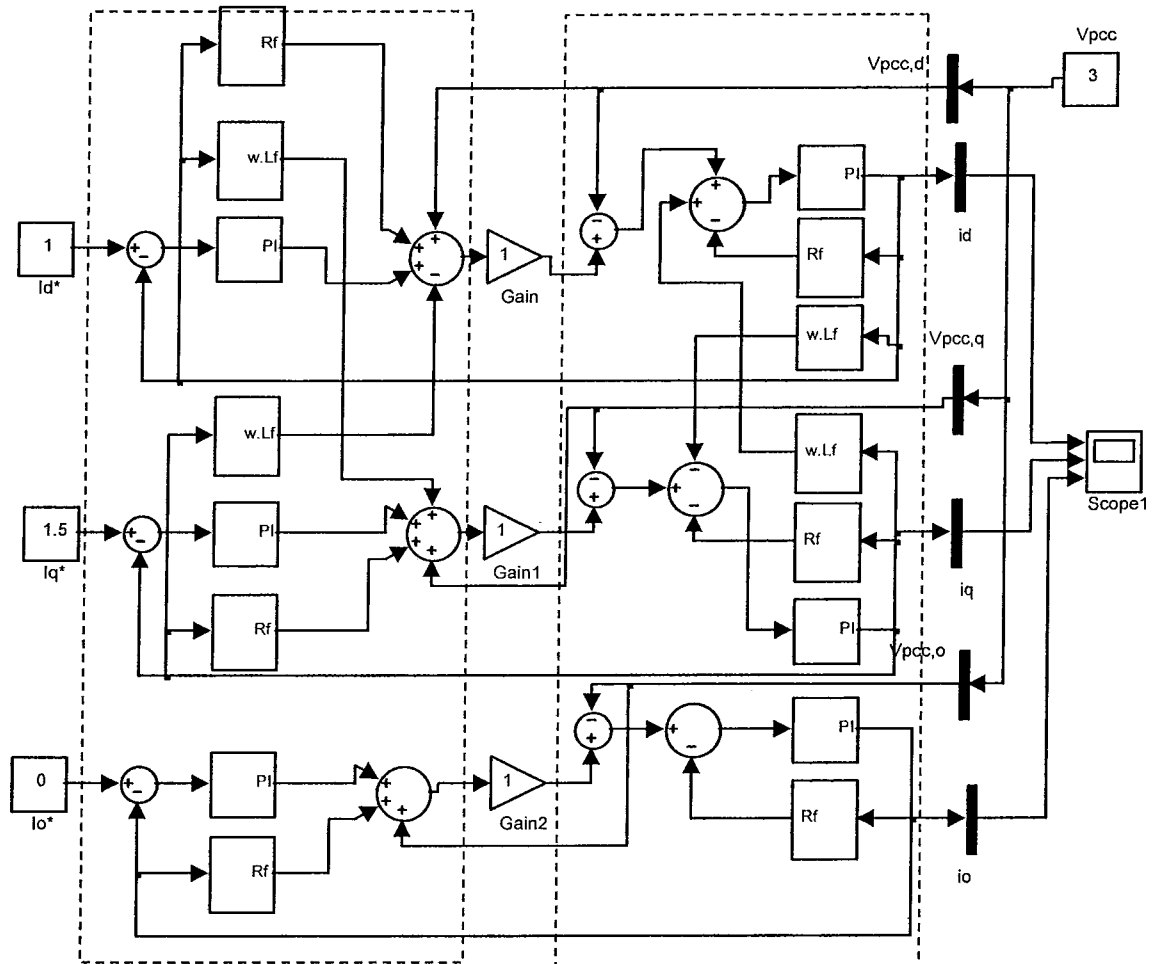
จากนั้นนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการทดสอบระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดควบคุมกระแส ทำโดยการตั้งค่าคำสั่งของกระแส I_d เท่ากับ 1, I_q เท่ากับ 1.5 I_o เท่ากับ 0 และ สมมุติค่าแรงดันเข้ามาในระบบเท่ากับ 3



รูปที่ 3.34 ผลการทดสอบชุดควบคุมกระแส



ผลการทดสอบกระแสด้านนอกจากระบบพบว่าค่ากระแสยังงมีค่าเท่ากับกระแส
คำสั่ง หรือค่ากระแสจริงที่ต้องการ นั่นหมายถึงในระบบมีสมรรถนะที่ดี แสดงการวัดรูปคลื่นดัง
แสดงในรูปที่ 3.34



ชุดแยกการเชื่อมร่วม

ชุดแบบจำลองคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 3.35 แบบจำลองการนำชุดแยกการเชื่อมร่วมเข้ากับชุดแบบจำลองคอนเวอร์เตอร์

3.4.5 ชุดควบคุมบัสแรงดันไฟตรง

ถ้าในระบบมีการชดเชยแรงดัน หรือ วงจรอินเวอร์เตอร์ในทางปฏิบัติเกิดกำลังการ
สูญเสีย อันเนื่องมาจากสาเหตุจากการสวิตช์ หรือกำลังสูญเสียขณะนำกระแสของสวิตช์ขึ้น ทำให้
แรงดันไฟตรงที่ตัวเก็บประจุมีค่าลดลงได้ ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดึงเอากำลังงานจาก
แหล่งจ่ายของในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้ามา เพื่อชดเชยกำลังสูญเสียและทำให้เราสามารถควบคุม



แรงดันไฟตรงให้มีค่าเฉลี่ยคงที่และสูงเพียงพอต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยอินเวอร์เตอร์ จะทำการสร้างแรงดันเพื่อให้วงจรกรองแอกที่ฟสร้างกระแสที่ความถี่มูลฐานที่มีเฟสเดียวกันกับ แรงดัน เพื่อที่จะดึงพลังงานเข้าสู่ระบบ พลังงานที่ถูกดึงเข้าสู่ระบบจะถูกนำไปสะสมในตัวเก็บ ประจุทำให้ค่าระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงขึ้น ในขณะเดียวกันถ้าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่า ค่าที่กำหนด วงจรกรองแอกที่ฟจะสร้างกระแสที่ความถี่มูลฐานที่มีเฟสตรงกันข้ามกับแรงดัน เพื่อที่จะจ่ายพลังงานออกไปจากอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าลดลง ดังนั้นเราสามารถ เขียนส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ดังนี้ [24]

จากสมการที่ 3.17 คือ $V_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{1}{R_{dc} C_{dc}} V_{dc}^2 = \frac{3V_{sd}}{2C_{dc}} i_{fd}$ เป็นค่าความสัมพันธ์

ระหว่างค่า V_{dc} และ i_{fd} ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นเราสามารถทำการปรับสมการโดยใช้ ทฤษฎีควบคุมเชิงเส้นดังนี้

นำ 2 คูณเข้าไปยังสมการที่ 3.17

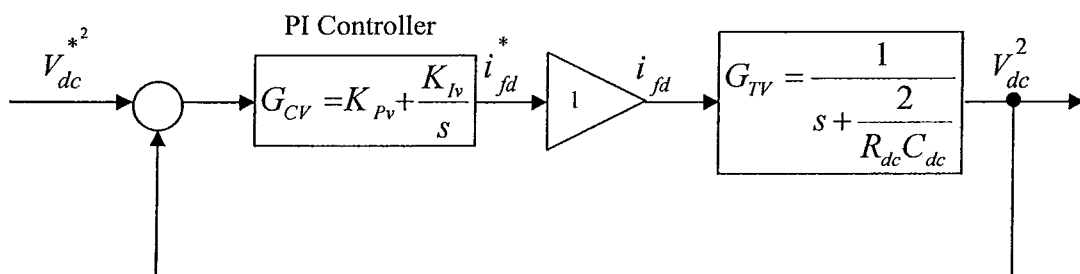
$$\frac{d}{dt} (V_{dc})^2 + \frac{2}{R_{dc} C_{dc}} (V_{dc})^2 = p \quad \dots\dots\dots 3.55$$

$$\text{เมื่อ } p = \frac{3e_{sd}}{C_{dc}} i_{fd}$$

เขียนให้อยู่ในรูปของ S-domain

$$G_{TV} = \frac{V_{dc}^2(S)}{P(S)} = \frac{1}{s + 2 / R_{dc} C_{dc}} \quad \dots\dots\dots 3.56$$

ในสมการที่ 3.54 ค่าของ V_{dc}^2 แทนค่าด้วย V_{dc} ใช้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น สำหรับการออกแบบการควบคุม แบบแผนผังของวงรอบการควบคุมแรงดันดังแสดงในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 แบบแผนผังวงรอบการควบคุมบัสแรงดันไฟตรง

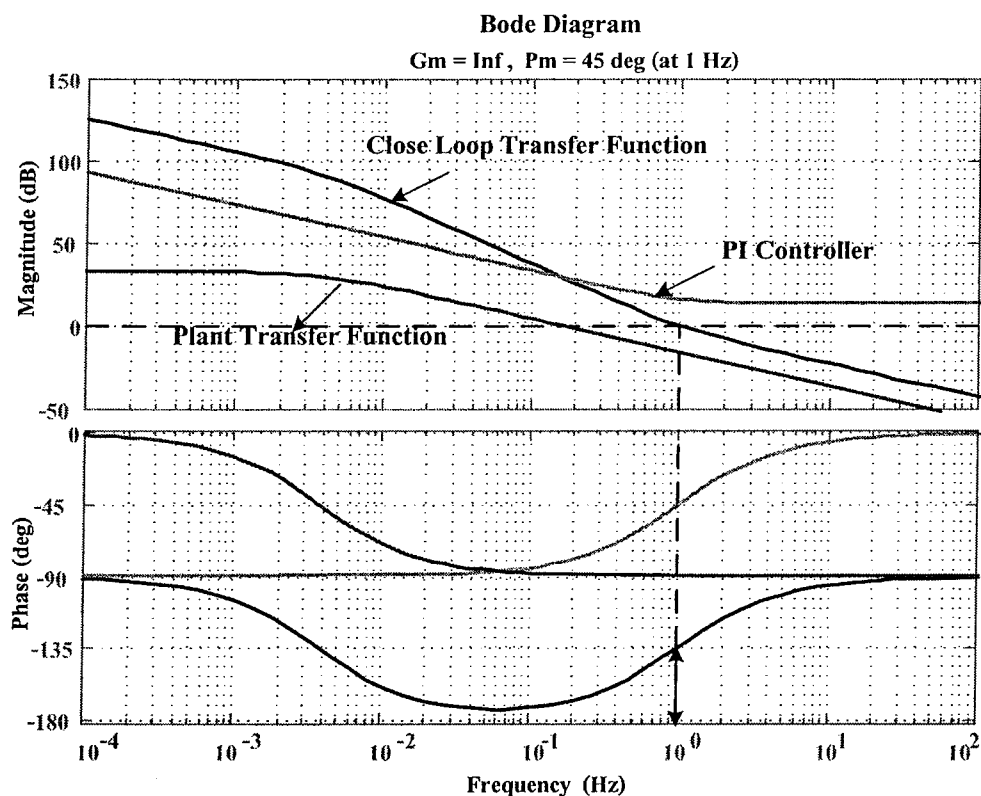


รูปที่ 3.36 กระทำโดยการป้อนการป้อนค่าแรงดันบัลไฟตรง V_{dc}^2 เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง V_{dc}^{*2} และควบคุมผ่านตัวควบคุม PI ซึ่งจะกำหนดค่ากระแสคำสั่ง i_{fd}^* ที่จำเป็นในการควบคุมแรงดัน โดยกระแส i_{fd}^* นี้จะเป็นองค์ประกอบในแกน d ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ระหว่างการออกแบบในส่วนการควบคุมนี้

ฟังก์ชันการแปลงกลับของวงรอบปิดของแรงดันด้านออกของวงรอบ (G_{dc_loop}) เป็นไปตามสมการที่ 3.57

$$G_{dc_loop}(s) = \frac{G_{CV}G_{TV}}{1 + G_{CV}G_{TV}} = \frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s^2 + \left(\frac{2}{R_{dc}C_{dc}} + K_{PV}\right)s + K_{IV}} \quad \text{.....3.57}$$

โดยเลือกใช้ค่า C_{dc} และ R_{dc} เท่ากับ $8,250 \mu F$ และ $10k\Omega$ ได้ค่า K_P และ K_I เท่ากับ 4.42 และ 28.02 เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบคของฟังก์ชันโอนย้าย ดังรูป 3.37 จะสามารถหาค่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย (gain margin) และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบได้เป็นอนันต์ และ 45 องศา ตามลำดับ

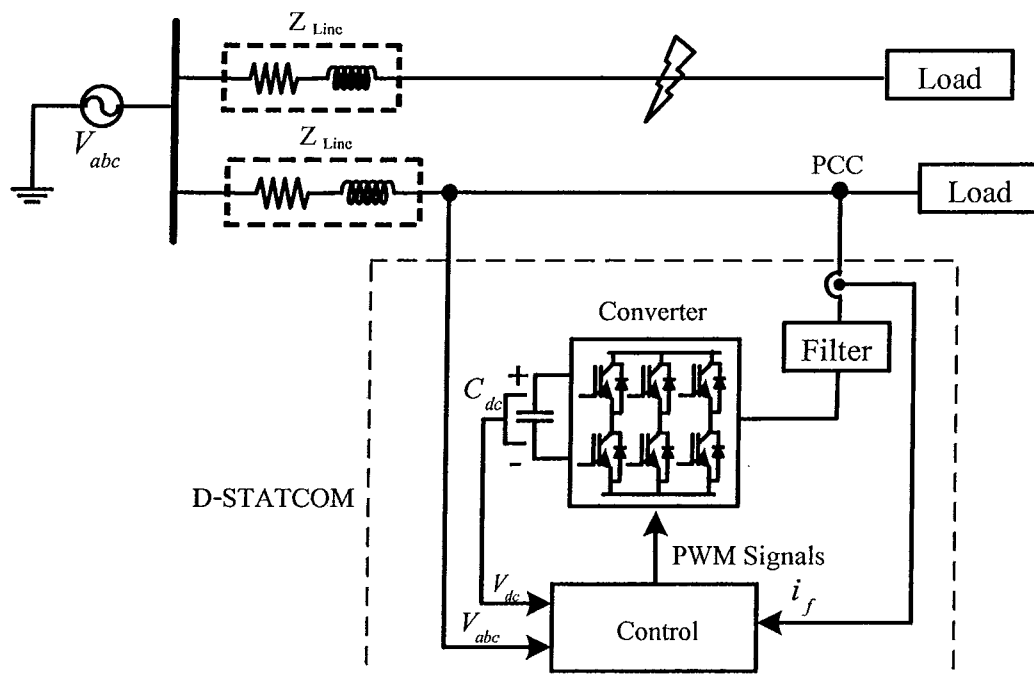


รูปที่ 3.37 แผนภาพ โบคของระบบควบคุมควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ได้ทำการออกแบบ

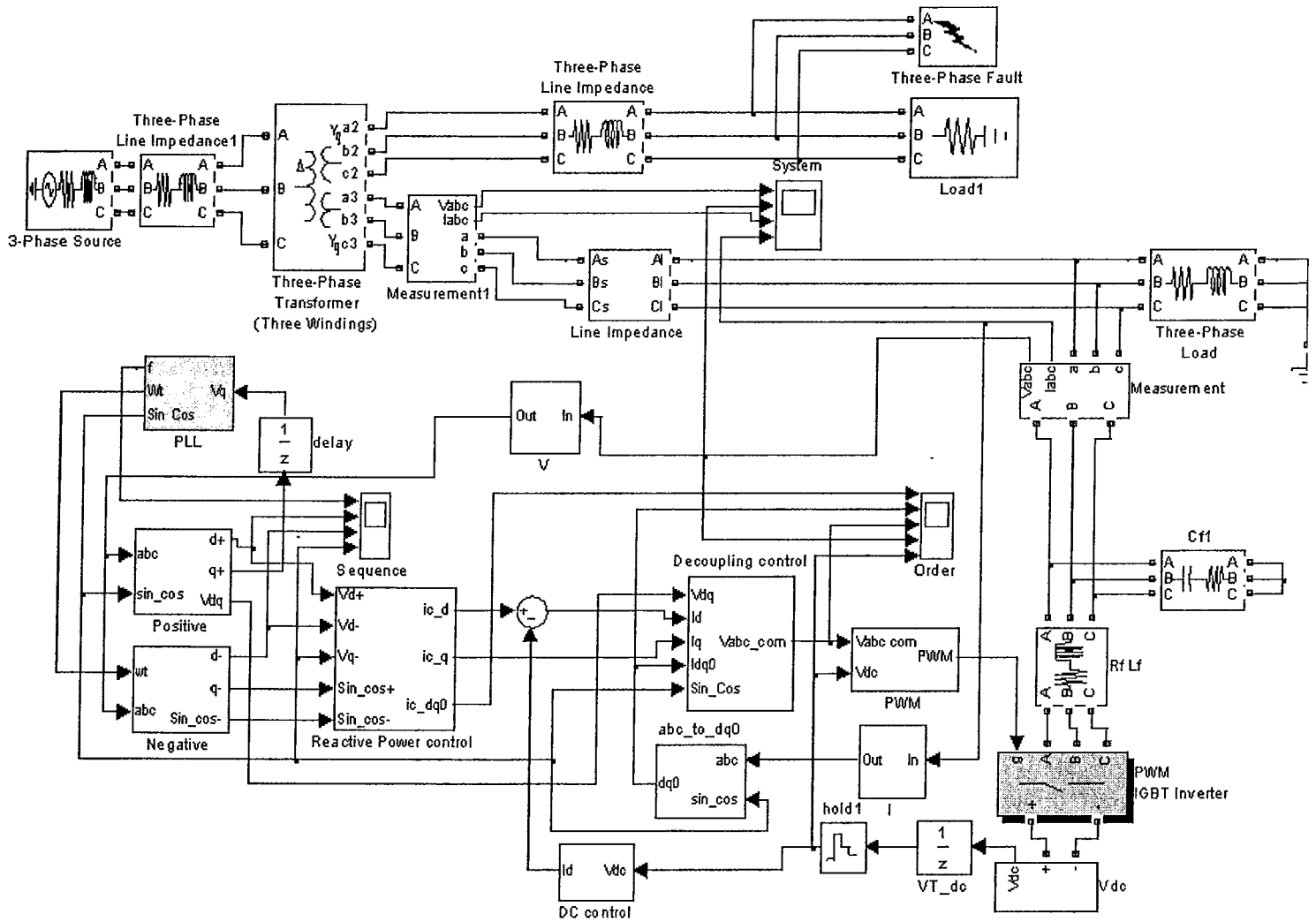


3.5 การจำลองการทำงานในระบบไฟฟ้า

การจำลองการทำงานใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.38 โดยกำหนดให้การผลิตพียงในระบบไฟฟ้าเกิดที่วินาทีที่ 0.05 ถึงระยะเวลา 0.25 วินาที เป็นระยะเวลา 0.20 วินาที และมีพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่า 380 V ที่ความถี่ 50 Hz ใช้สวิตช์แบบอุดมคติมีความถี่การสวิตช์ 10 kHz, ตัวเก็บประจุวงจรกรอง $C_f = 8\mu F$, ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง $L_f = 6mH$, ตัวต้านทานวงจรกรอง $R_f = 80\ \Omega$, ตัวเก็บประจุเก็บพลังงาน $C_{dc} = 8,250\mu F$, ความถี่การสุ่มข้อมูล 10 kHz, เงื่อนไขในการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ในกรณีของขนาดแรงดัน $|V|$ ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 198 V และใช้โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีค่า 5 โอห์ม และ 1 mH ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.38 วงจรการจำลองการควบคุม D-STATCOM



รูปที่ 3.39 วงจรการจำลองของระบบ D-STATCOM ใน MATLAB/SIMULINK



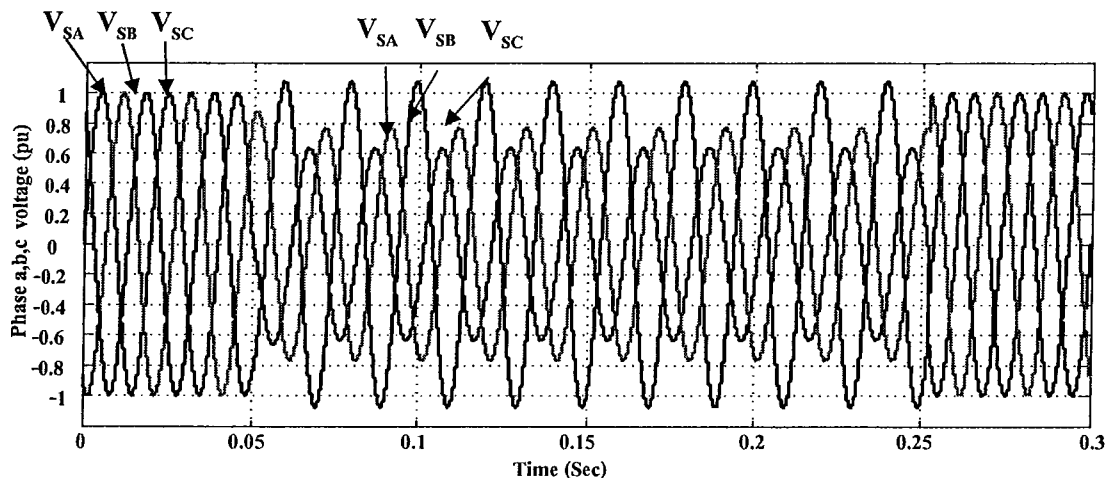
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ D-STATCOM ใน MATLAB/SIMULINK

รายการ	ค่า
แรงดันต่อเฟส ที่แหล่งจ่าย 3 เฟส (V_s) = (rms)	220 V = 1 pu, 50 Hz
ความถี่การสุ่มข้อมูล (f_s)	10 kHz
ความถี่การสวิตช์ ของ คอนเวอร์เตอร์ (f_{ws})	10 kHz
แรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc})	700 V
ตัวเก็บประจุบัสไฟฟ้ากระแสตรง (C_{dc})	8,250 μ F
ความเหนี่ยวนำที่สายส่ง (L_{line})	11 H
ความเหนี่ยวนำด้าน ac ของคอนเวอร์เตอร์ (L_f)	6 mH
ตัวกรองสัญญาณ (C_F), (R_F)	8 μ F , 80 Ω
ตัวควบคุม PI ของชุดควบคุมกระแส	$K_p = 4.42$, $K_i = 28.02$
ตัวควบคุม PI ของชุดควบคุมแรงดัน	$K_p = 4.67$, $K_i = 5133.6$

3.6 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันแต่ละกรณี

จากการทดลองการควบคุมการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ 3 เฟส ในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ แบบไม่สมมาตร ตามวงจรการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.39 แบ่งได้เป็น 3 กรณี [25]

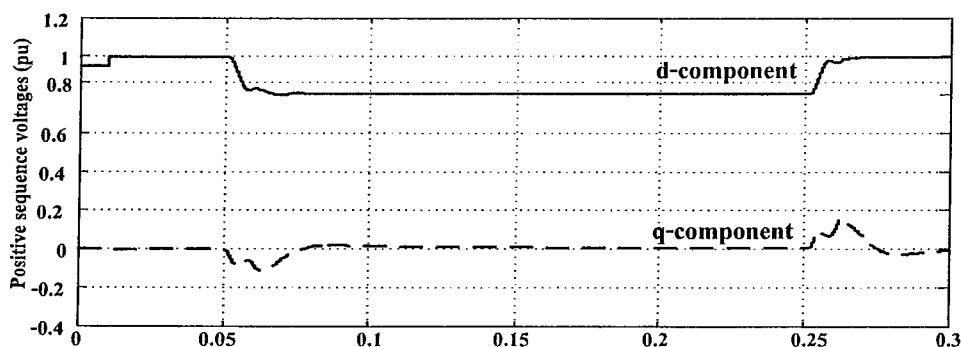
3.6.1 การจำลองการชดเชยแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟส ลงกราวด์



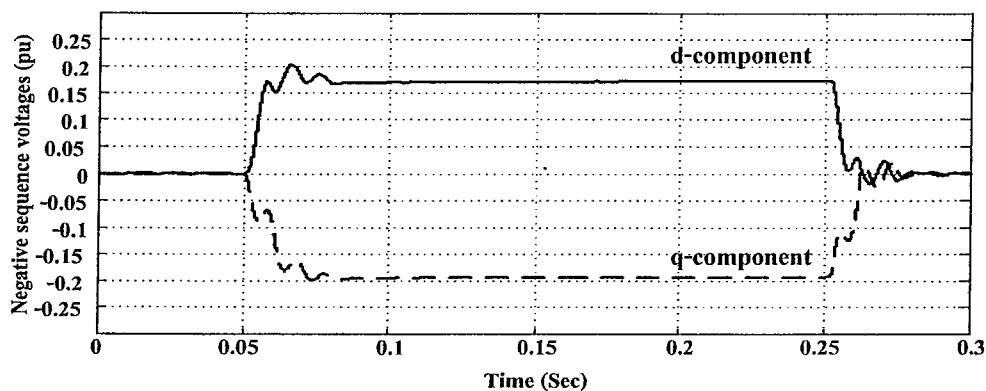
รูปที่ 3.40 ผลการจำลองแรงดันในระบบเมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงกราวด์



จากรูป แสดงแรงดันแหล่งจ่ายด้านทฤษฎีของหม้อแปลงซึ่งเกิดจากความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงกราวด์ ที่เฟส A จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ เฟส A และ B ส่วนเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

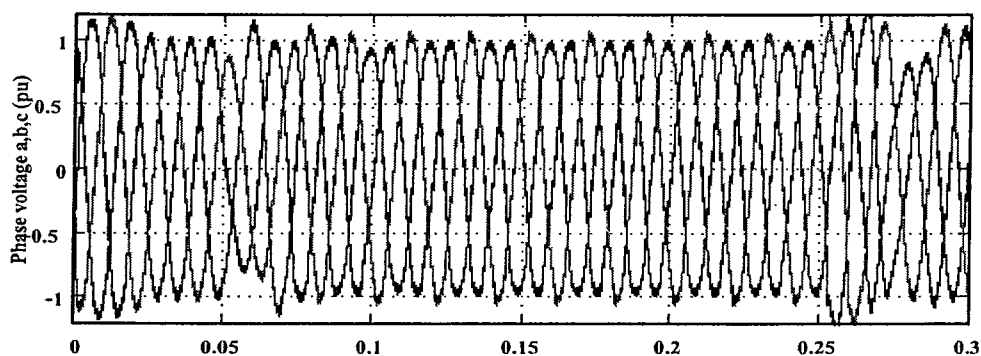


(ก) ผลการจำลองลำดับแรงดันบวกใน แกน dq

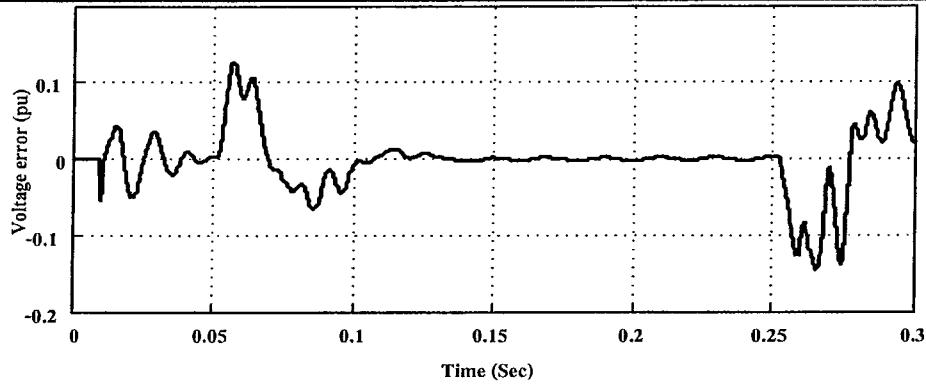


(ข) ผลการจำลองลำดับแรงดันลบใน แกน dq

รูปที่ 3.41 ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dq ลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 20%

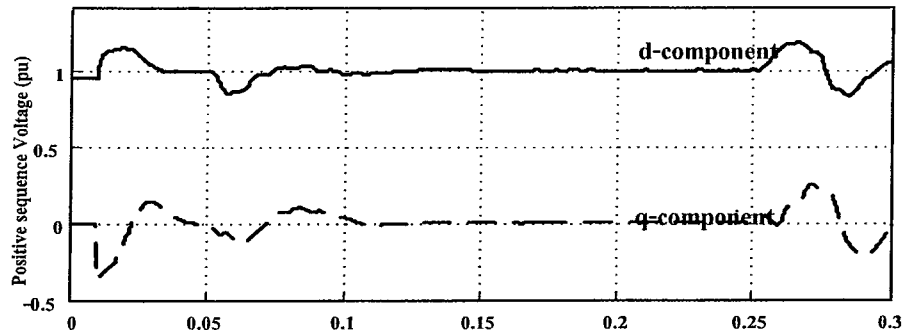


(ก) ผลการชดเชยแรงดันที่จุด PCC ของระบบ

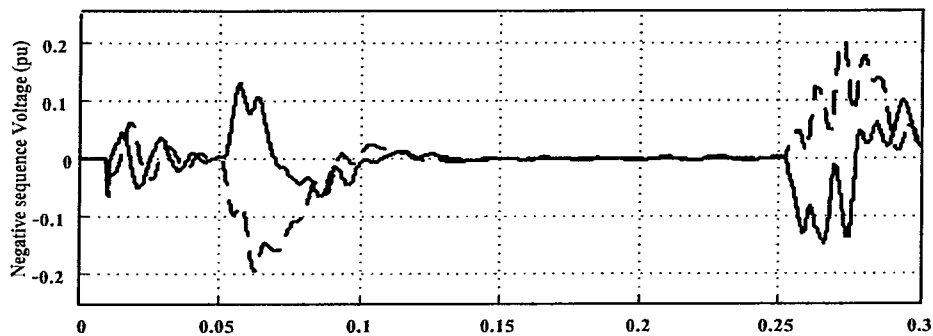


(จ) ผลความผิดพลาดของแรงดันเมื่อในระบบเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แบบไม่สมดุล

รูปที่ 3.42 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงกราวด์

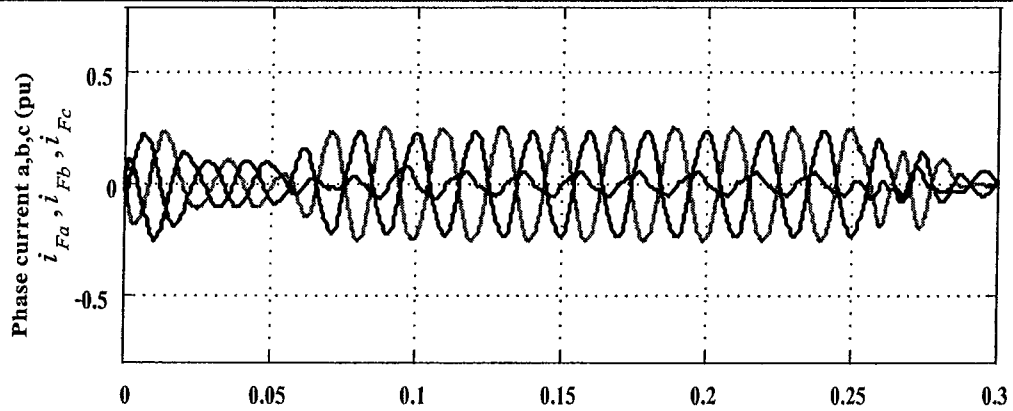


(ก) ผลการชดเชยแรงดันลำดับแรงดันบวกใน แกน dq

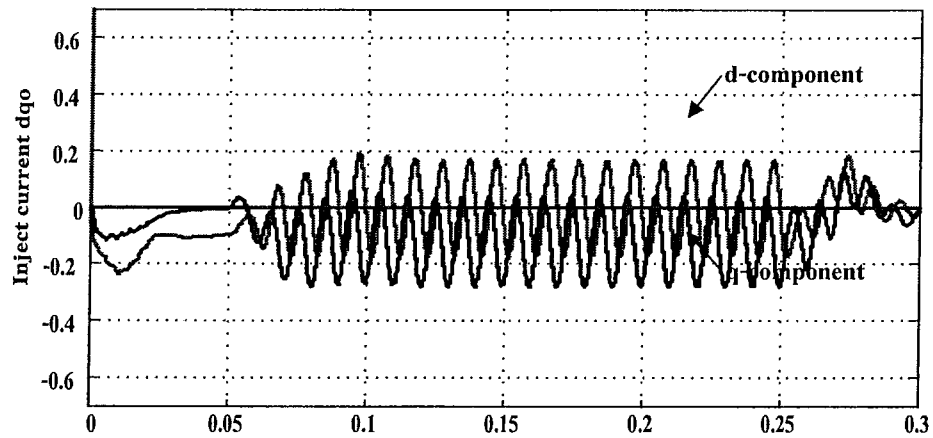


(ข) ผลการชดเชยแรงดันลำดับแรงดันลบใน แกน dq

รูปที่ 3.43 ผลการชดเชยแรงดันในแกน dq เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงกราวด์

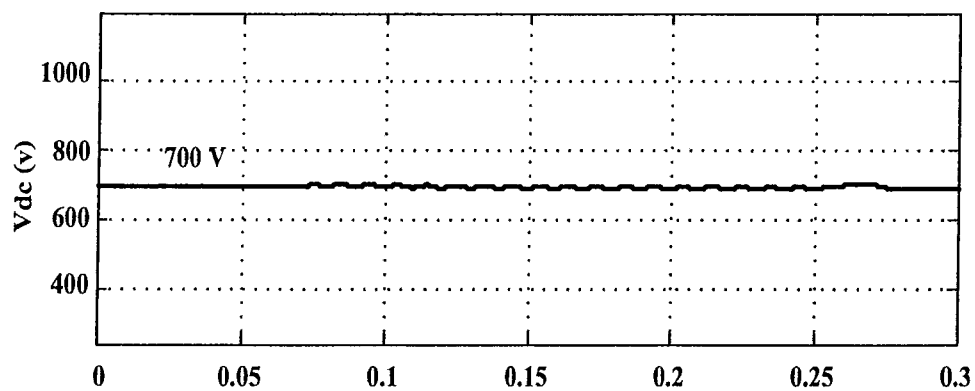


(ก) ผลการชดเชยกระแสเฟส a,b ที่จุด PCC ในระบบ



(ข) ผลการชดเชยกระแสในแกน d,qo

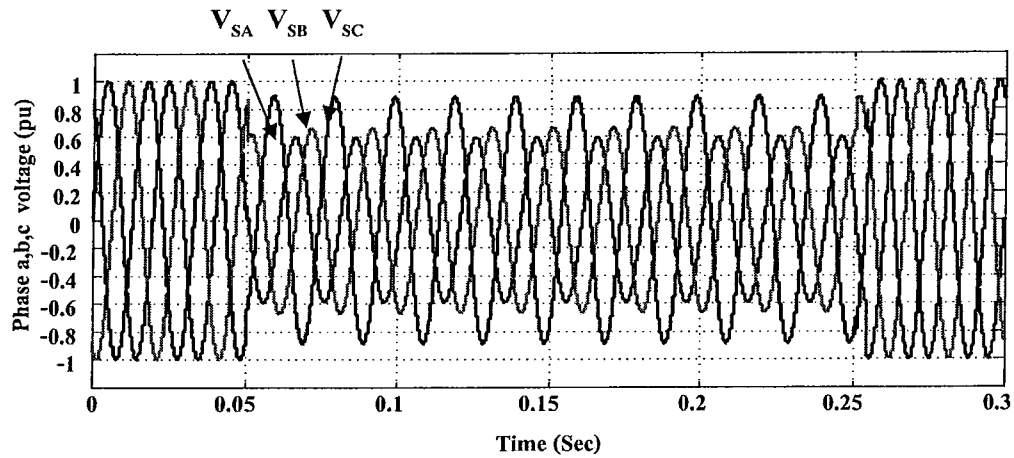
รูปที่ 3.44 ผลการชดเชยกระแสเข้าในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่ 1 เฟสลงกราวด์



รูปที่ 3.45 ผลของการจ่ายแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง

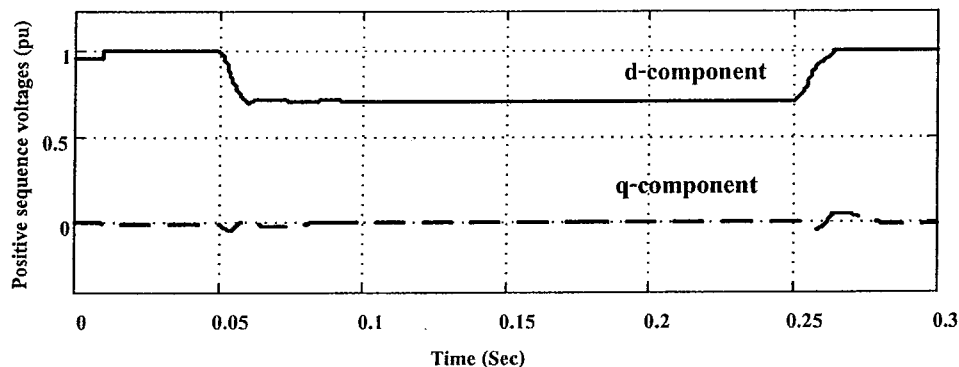


3.6.2 การจำลองการชดเชยแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟส ลงกราวด์



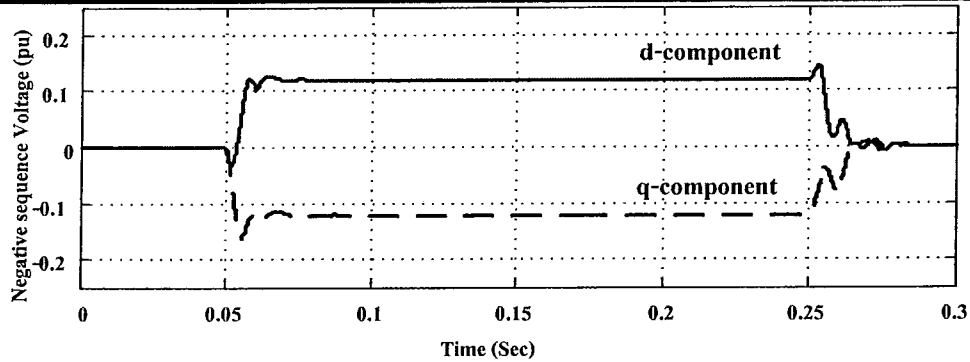
รูปที่ 3.46 ผลการจำลองแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงกราวด์

รูปที่ 3.46 แสดงแรงดันแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟส A และ B ลงกราวด์ จะเห็นได้ว่ามีแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 เฟส โดยเฟส B และ C จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและมุมเฟส ส่วนเฟส A จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงขนาดเท่านั้นและมีขนาดน้อยที่สุด



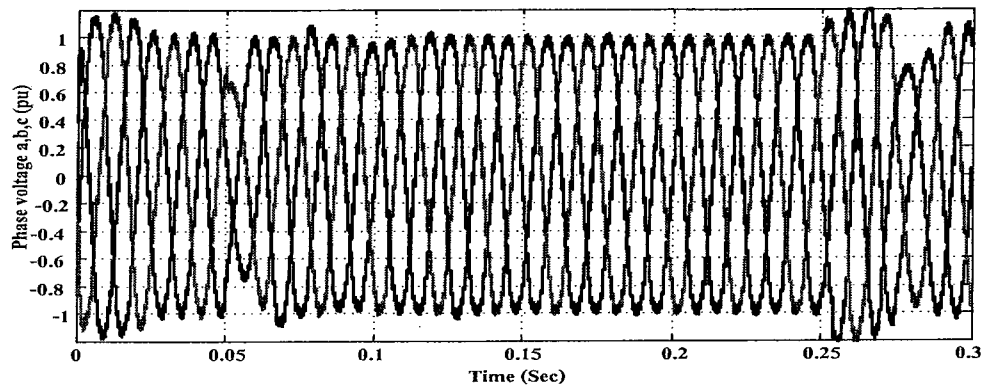
(ก) ผลการจำลองลำดับแรงดันบวกใน แกน dq

รูปที่ 3.47 ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dqลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 30%

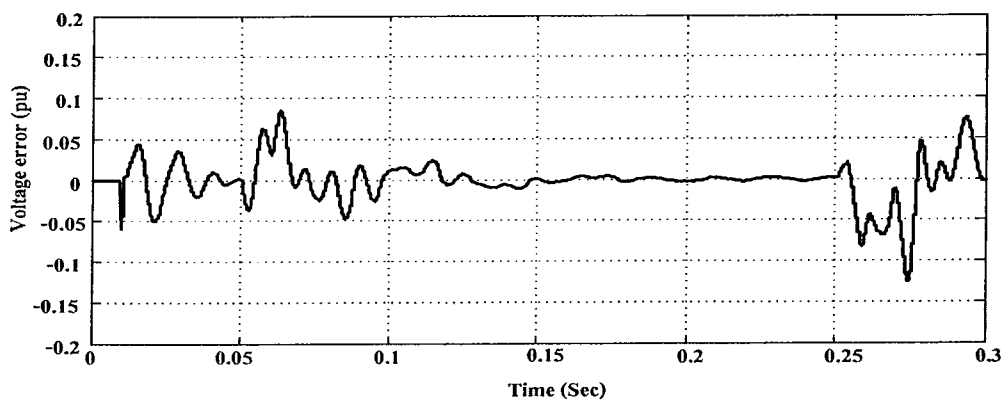


(ข) ผลการจำลองลำดับแรงดันลบใน แกน dq

รูปที่ 3.47(ต่อ) ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dqลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 30%

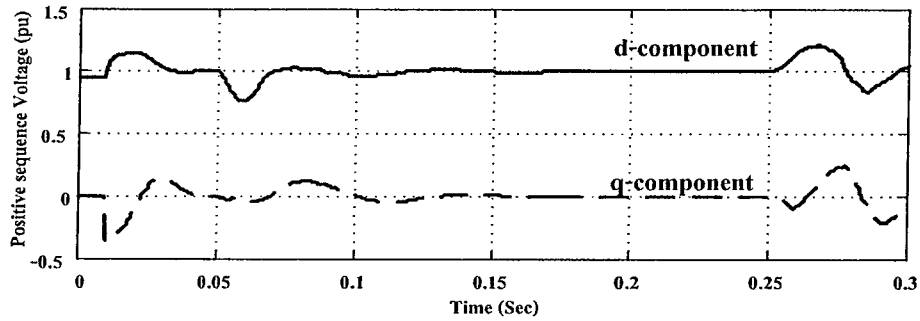


(ก) ผลการชดเชยแรงดันที่จุด PCC ของระบบ

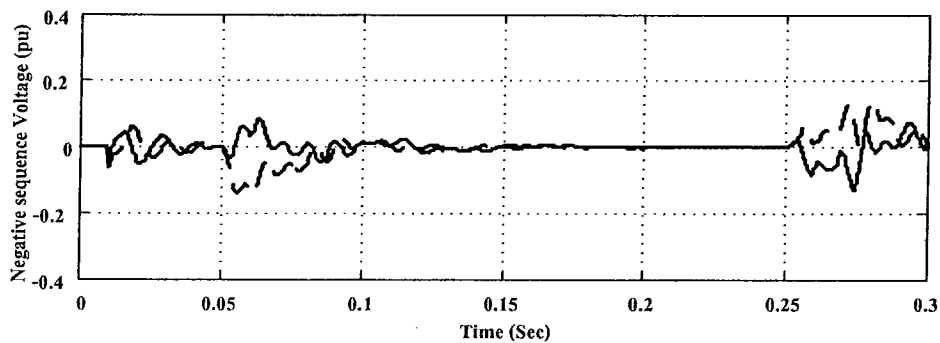


(ข) ผลความผิดพร่องของแรงดันเมื่อในระบบเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แบบไม่สมมาตร

รูปที่ 3.48 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงกราวด์

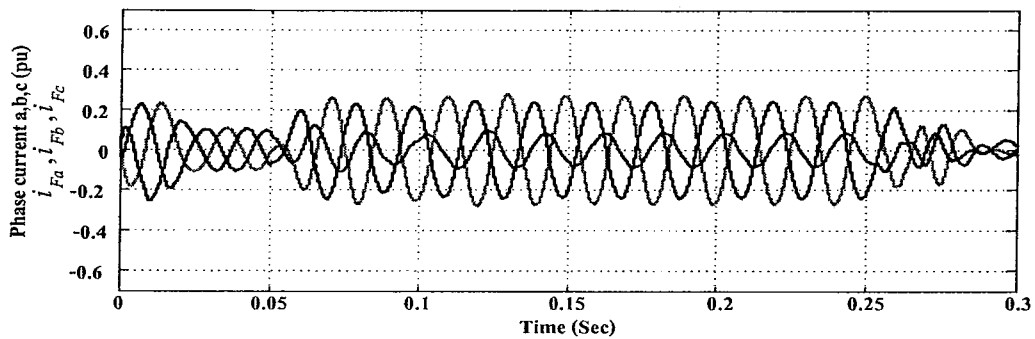


(ก) ผลการจำลองลำดับแรงดันบวกใน แกน dq

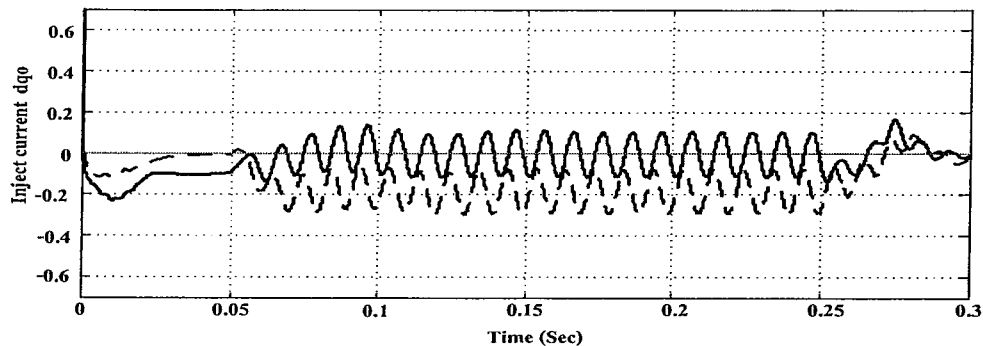


(ข) ผลการชดเชยแรงดันลำดับแรงดันลบใน แกน dq

รูปที่ 3.49 ผลการชดเชยแรงดันในแกน dq เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงกราวด์

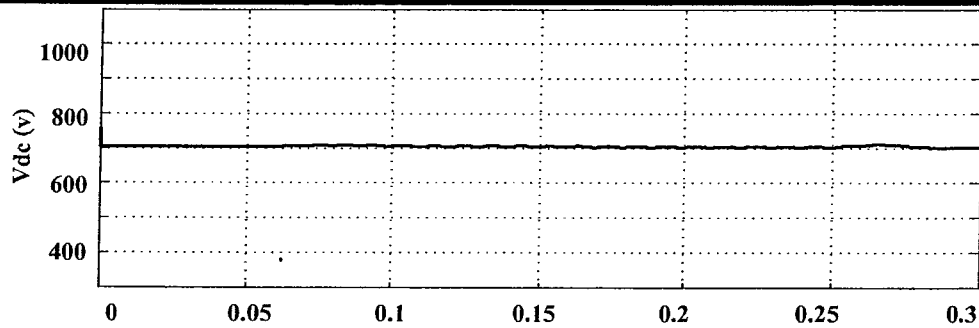


(ก) ผลการชดเชยกระแสเฟส a และ b ที่จุด PCC ในระบบ



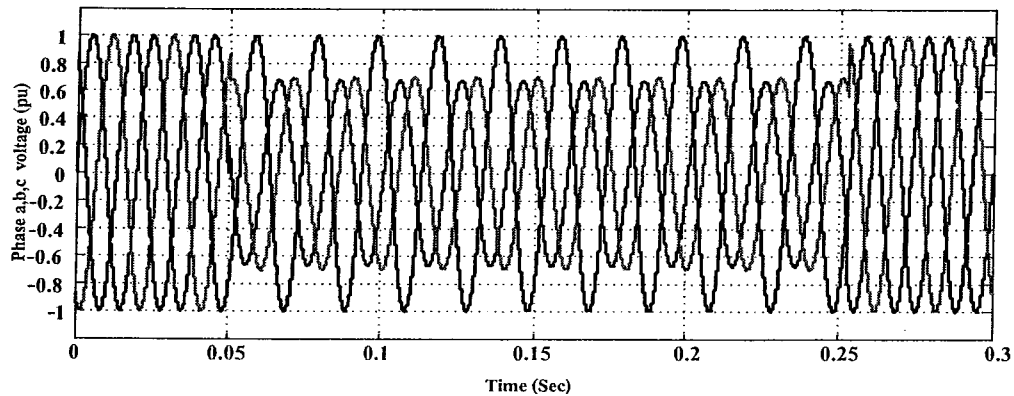
(ข) ผลการชดเชยกระแสในแกน dq0

รูปที่ 3.50 ผลการชดเชยกระแสเข้าในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่ 2 เฟสลงกราวด์



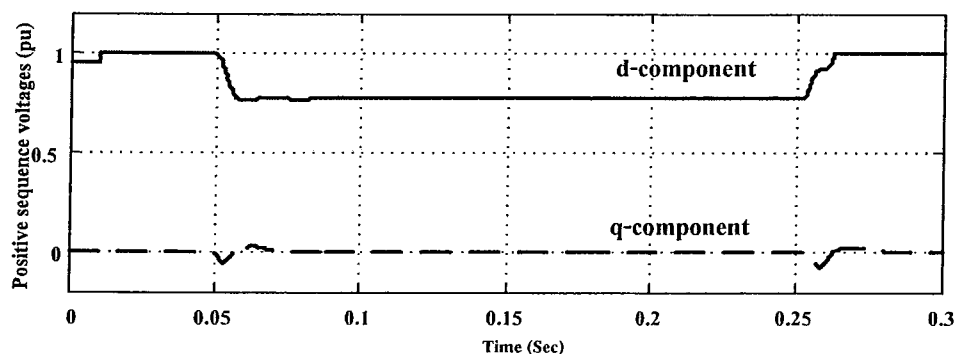
รูปที่ 3.51 ผลของการจ่ายแรงดันที่บัลไฟฟ้ากระแสตรง

3.6.3 การจำลองการชดเชยแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟส



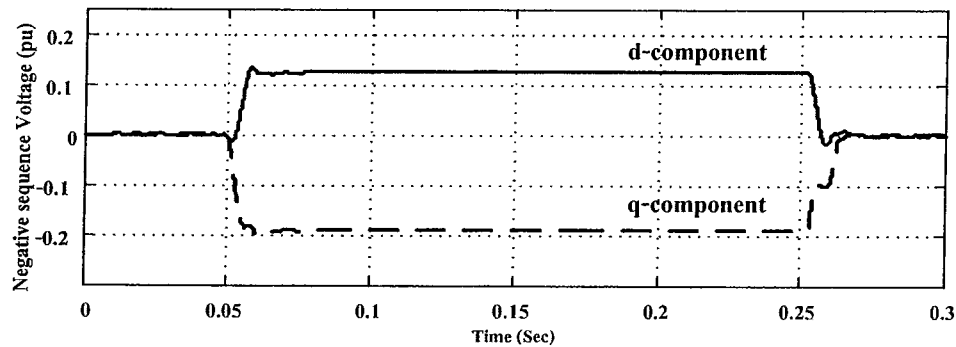
รูปที่ 3.52 ผลการจำลองแรงดันในระบบเมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงกราวด์

จากรูป 3.42 แสดงแรงดันแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟส จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ เฟส A และ B ส่วนเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



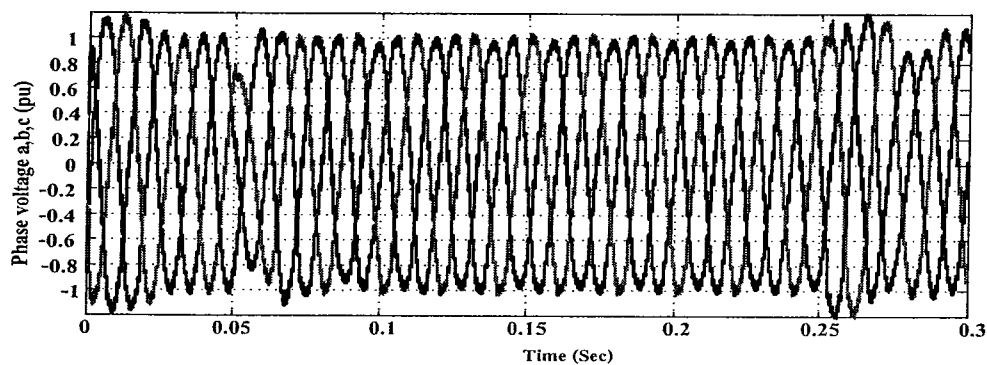
(ก) ผลการจำลองลำดับแรงดันบวกใน แกน dq

รูปที่ 3.53 ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dq ลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 25%

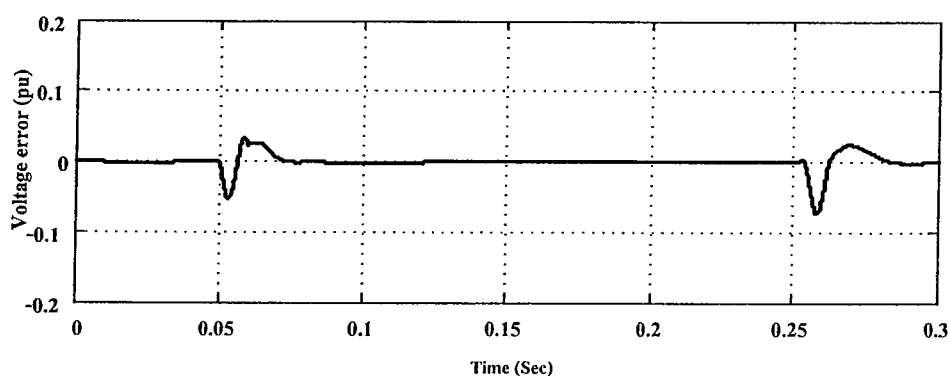


(ข) ผลการจำลองลำดับแรงดันลบใน แกน dq

รูปที่ 3.53(ต่อ) ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dqลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 25%

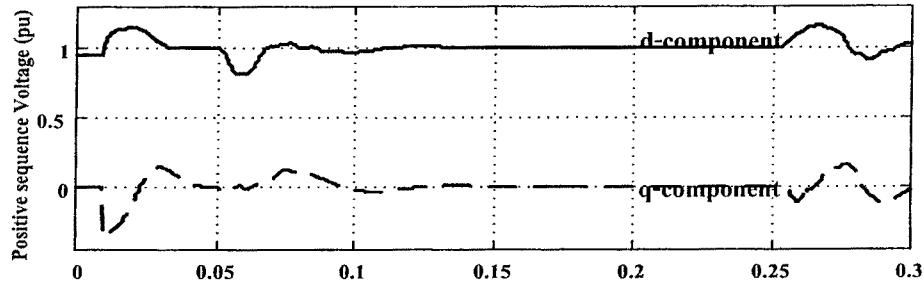


(ก) ผลการชดเชยแรงดันที่จุด PCC ของระบบ

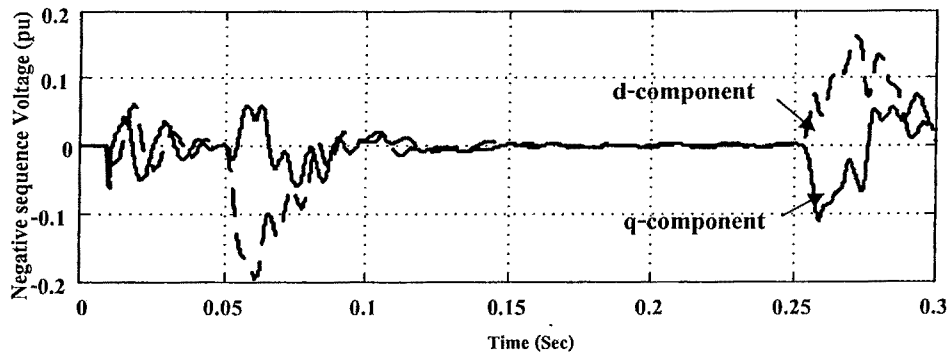


(ข) ผลความผิดพลาดของแรงดันเมื่อในระบบเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แบบ ไม่สมมาตร

รูปที่ 3.54 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพลาดแบบ 2 เฟส

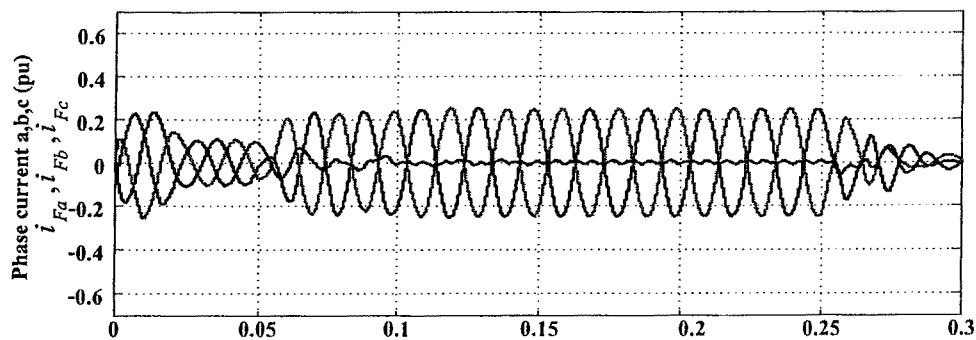


(ก) ผลการชดเชยแรงดันลำดับแรงดันบวกใน แกน dq

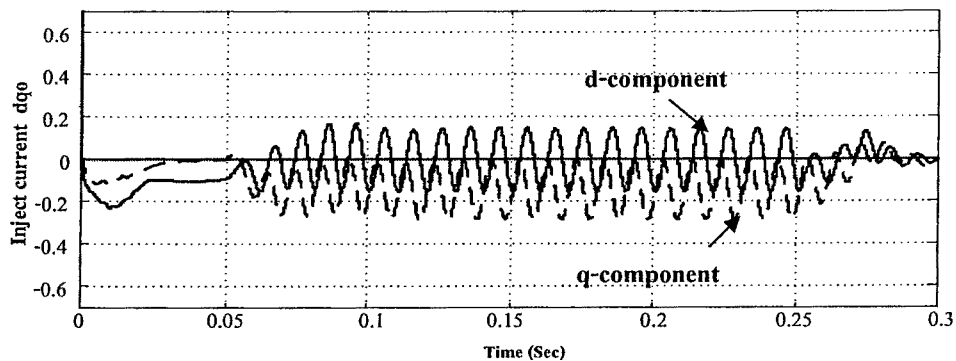


(ข) ผลการชดเชยแรงดันลำดับแรงดันลบใน แกน dq

รูปที่ 3.55 ผลการชดเชยแรงดันในแกน dq เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟส

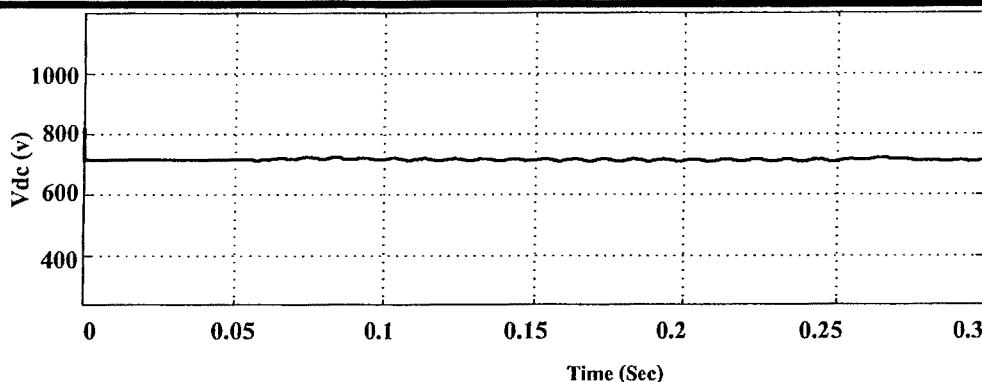


(ก) ผลการชดเชยกระแสเฟส a,b ที่จุด PCC ในระบบ



(ข) ผลการชดเชยกระแสในแกน d,q

รูปที่ 3.56 ผลการชดเชยกระแสเข้าในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่ 2 เฟส



รูปที่ 3.57 ผลของการจ่ายแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง

3.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการออกแบบ สร้าง ชุดควบคุมในส่วนต่างๆ ของ D-STATCOM เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ และแบบจำลองชุดควบคุม ซึ่งผ่านการทดสอบเบื้องต้นแล้วนั้น จากนั้นจึงนำชุดควบคุมดังกล่าวไปทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการสร้างสถานะความผิดพลาดในระบบขึ้นเพื่อให้แรงดันตกชั่วครู่ แบบไม่สมมาตร และทำการแก้ปัญหาโดยการนำชุดควบคุม D-STATCOM ไปทำการชดเชยแรงดันให้ระบบมีความปกติ

เมื่อในระบบมีความผิดพลาดของแรงดันที่หนึ่งเฟสลงกราวด์ขึ้น ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมมาตรของแรงดัน ขนาดของแรงดันทั้ง 2 เฟส ลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.40 ส่วนความผิดพลาดของแรงดันที่สองเฟสลงกราวด์ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันทั้ง 3 เฟส ทำให้ขนาดของแรงดันเฟส A ลดลงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.48 และถ้าเกิดความผิดพลาดของแรงดันแบบสองเฟส ทำให้ขนาดของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง 2 เฟสมีขนาดลดลง 30 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองในรูปของการลำดับแรงดันบวก และ ลบ ในแกนของ dqo ของการเกิดความผิดพลาดทั้ง 3 กรณี แสดงดังในรูปที่ 3.41 , 3.43 และ 3.47 พบว่า ขนาดการลำดับแรงดันบวกขององค์ประกอบ d ลดลง 0.75 pu. และองค์ประกอบ q มีค่าเท่ากับ 0 pu. ส่วนค่าลำดับแรงดันลบขององค์ประกอบ d มีค่าเท่ากับ 0.17 pu. และองค์ประกอบ q มีค่าเท่ากับ -0.2 pu. ในสถานะความผิดพลาดของแรงดันที่หนึ่งเฟสลงกราวด์ ส่วนอีก 2 กรณีมีขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.43 และ 3.47

สำหรับผลการชดเชยแรงดันที่จุด PCC ในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่เวลา 0.05 ถึง 0.25 ดังแสดงในรูปที่ 3.42 ที่สถานะความผิดพลาดของแรงดันที่หนึ่งเฟสลงกราวด์ พบว่า STATCOM สามารถชดเชยแรงดันได้ภายในครึ่งไซเคิลหรือใช้เวลา 0.012 วินาที สำหรับเริ่มการชดเชยแรงดัน



เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น และเมื่อในระบบหมดความผิดปกติของแรงดันที่เวลา 0.25 วินาที พบว่าแรงดันมีค่าสูงขึ้นเป็นเวลา 0.025 วินาทีจากนั้นแรงดันจึงเข้าสู่ภาวะปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.43 ส่วนการชดเชยแรงดันที่สภาวะการเกิดความผิดปกติ 2 เฟส และ 2 เฟสลงกราวด์นั้น พบว่า STATCOM ยังคงสามารถชดเชยแรงดันได้ภายในครึ่งวินาทีหรือใช้เวลา 0.012 วินาที เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.48 และ 3.54 ตามลำดับ

ผลการฉีดกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.44 ,3.50 และ 3.56 พบว่าก่อน และหลังการเกิดความผิดปกติในระบบมีค่าของกระแสเกิดขึ้นเนื่องจากต้อง เรานำชุด STATCOM เข้าไปต่อขนานเข้ากับระบบดังนั้นจึงมีค่าของกระแสที่ไหลไปยัง Load ขึ้น และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นทำให้มีการฉีดค่ากระแสเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของการเกิดความผิดปกติในระบบ

ในรูปที่ 3.45, 3.51 และ 3.57 แสดงให้เห็นถึงค่าบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ โดยมิได้รับผลกระทบจากการเกิดความไม่สมดุลขึ้นในระบบ