

บทที่ 4

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

แบบไม่สมมาตร

4.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสถานะชั่วครู่ของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร เพื่อนำไปใช้กับเทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ประกอบด้วยวิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไคล การแปลงพาร์กและการแปลงฟิควอร์ ลำดับต่อมา กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน รวมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 ประเภท คือ การลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ

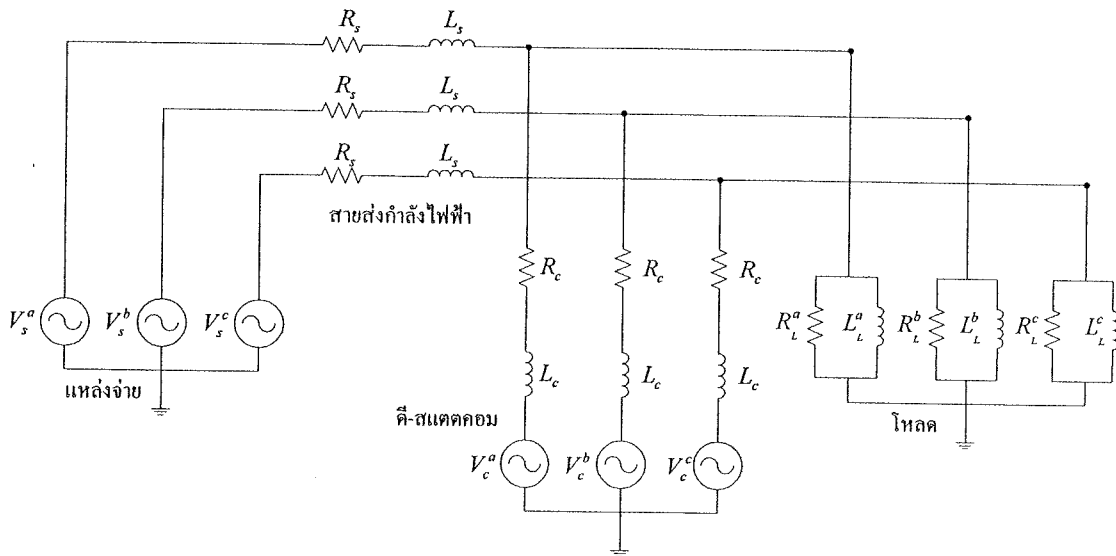
4.2 แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

แบบจำลองของดี-สแตตคอมที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วครู่ ซึ่งจะไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วครู่จากการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงดีซี สามารถพิจารณาได้เป็นแบบจำลองดังรูปที่ 4.1 เมื่อ I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส และ I_s คือ กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย กำหนดให้โหลดที่พิจารณาเป็นโหลดชนิดความต้านทานขนานกับความเหนี่ยวนำ R_c และ L_c คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในตัวขงดี-สแตตคอม ส่วน R_s และ L_s คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า

กำหนดให้อินเวอร์เตอร์มีการออกแบบตัวกรองที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่จะกรองฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ ได้ และหลังจากการกรองฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ แล้วจะเหลือแต่ความถี่มูลฐานเท่านั้น ดังนั้นเราจึงสามารถละทิ้งผลจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ออกไปได้ ซึ่งเพียงพอที่จะนำเสนอในสถานะคงตัว ดังนั้นแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ นิยามได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_c^a \\ V_c^b \\ V_c^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_c^a \sin(\omega t + \delta_c) \\ V_c^b \sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta_c) \\ V_c^c \sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta_c) \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

โดยที่ V_s^a, V_s^b และ V_s^c คือ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ
 V_c^a, V_c^b และ V_c^c คือ ขนาดของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ
 δ_c คือ มุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตคคอม



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

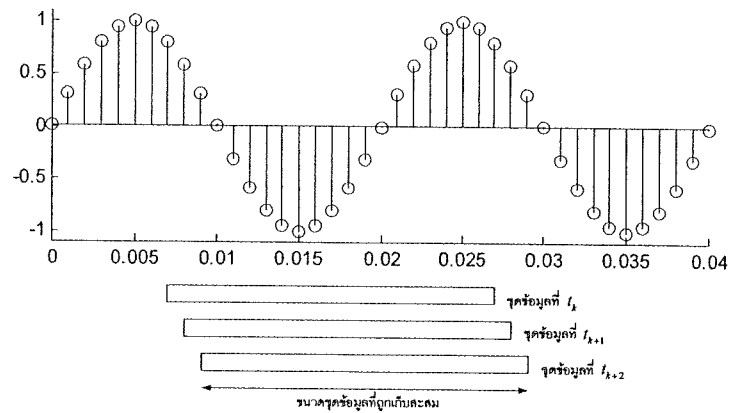
4.3 เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะต้องมีความรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโหลด โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการที่แรงดันตกชั่วขณะในระหว่างเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จะต้องการการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่รวดเร็วและแม่นยำมากกว่าโหลดชนิดอื่น ๆ ซึ่งถ้าไม่ใช่วิธีที่รวดเร็วและแม่นยำแล้ว อาจเกิดผลกระทบอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรมนั้น ๆ วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้านั้นมีมากมาย แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน [8] งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธี คือ วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล (sliding root mean square: rms) วิธีการแปลงปาร์ก (park transformation) และวิธีการแปลงฟิควาร์ (pqr transformation)

4.3.1 วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล

ปัญหาหลักประการหนึ่งในการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ การคำนวณเฟสเซอร์แรงดันซึ่งถูกนิยามให้มีค่าขนาดแรงดัน (ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย) และมุมเฟส ต้องใช้การเก็บข้อมูลของสัญญาณแรงดันในหนึ่งคาบเวลา ทำให้การชดเชยแรงดันหย่อนพลวัตเป็นไปไม่ได้โดยหลักการ อย่างไรก็ตาม โดยการใช้เทคนิคการสะสมข้อมูลแบบหน้าต่างเลื่อน (sliding-window

storage technique) ที่ดำเนินการเก็บข้อมูลจากการชักตัวอย่างในหนึ่งคาบด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่แน่นอน เมื่อมีข้อมูลการชักตัวอย่างในลำดับถัดไป ข้อมูลที่ถูกเก็บสะสมไว้ตัวที่มีลำดับเก่าที่สุดจะถูกลบทิ้งไป และเลื่อนดัชนีข้อมูลที่ถูกสะสมดังกล่าวให้มีค่าลดลงหนึ่งลำดับ จะได้ที่ว่างในตำแหน่งล่าสุด ซึ่งจะถูแทนที่ด้วยข้อมูลการชักตัวอย่างล่าสุดนั่นเอง ด้วยหลักการนี้ร่วมกับเทคนิคการหาจุดตัดศูนย์ของข้อมูลส่งผลให้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยและค่ามูเมฟสามารถคำนวณได้ทุก ๆ จุดการชักตัวอย่างนั่นเอง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเก็บสะสมข้อมูลในหนึ่งคาบแบบหน้าต่างเลื่อน

ในกรณีของการ sampling n จุดต่อคาบเวลา T สูตรการคำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ยคำนวณได้ดังนี้ [5]

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n V^2(k)} \quad (4-2)$$

4.3.2 วิธีการแปลงปาร์ก

การแปลงปาร์ก (park transformation) หรือที่ส่วนใหญ่เรียกกันว่าการแปลงซีโรดีคิว (0dq transformation) ซึ่งประกอบด้วยแกนดี (direct axis) และแกนคิว (quadrature axis) ส่วนใหญ่จะใช้ในเครื่องจักรกลเชิงโรตารีและเครื่องจักรกล 3 เฟสอื่น ๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สำหรับ decouple control ของอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าวงรอบ decouple control สำหรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถสร้างได้โดยการควบคุมปริมาณของแต่ละแกน

กำหนดให้ V_{abc} เป็นแรงดันแต่ละเฟสของพิกัด $a-b-c$ และ V_{0dq} เป็นแรงดันในพิกัด $0-d-q$ จะได้

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad V_{0dq} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

ดังนั้น แรงดันในพิกัด $a-b-c$ สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $0-d-q$ ได้ดังสมการที่ (4-3)

$$V_{0dq} = R(\theta)P(0)V_{abc} \quad (4-3)$$

โดยที่ $\theta = \omega t = 2\pi ft$

$$\text{Coordinate axis transformation } P(0) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad abc \Rightarrow 0dq \quad (4-4)$$

เมื่อนำมาพิจารณาที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame) จึงต้องมีการย้ายตัวแปรที่อยู่บนสเตเตอร์ให้ไปอยู่บนโรเตอร์โดยอาศัยหลักการทฤษฎีกรอบอ้างอิง (reference frame theory) ซึ่งการย้ายแกนจะทำมุมห่างกันเท่ากับ θ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (4-3) (4-4) และ (4-5) สามารถแปลงแรงดันในพิกัด $a-b-c$ ให้อยู่ในพิกัด $0-d-q$ ได้ดังสมการที่ (4-6) [21]

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

4.3.3 วิธีการแปลงพิกัด

วิธีการแปลงพิกัดนั้นมาจากทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (instantaneous power theory) โดยพินัยมาจากกำลังไฟฟ้าแอคทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous active power) ส่วนกิตัวกับอาร์

นั้นจะมาจากกำลังไฟฟ้ารีแอทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) ซึ่งจะใช้พิจารณาในระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยทั้ง 3 องค์ประกอบนี้จะอิสระเชิงเส้นต่อกัน [17] ซึ่งในการใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ แรงดันอ้างอิงทั้ง 3 ในพิกัด $p-q-r$ จะกลายเป็นรูปแบบที่ง่ายโดยจะกลายเป็นค่าคิซี ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมในพิกัด $p-q-r$ ก็จะง่ายตามไปด้วย โดยอัลกอริทึมในการควบคุมการชดเชยนั้นสามารถใช้ได้ครอบคลุมความผิดปกติของแรงดันชนิดต่าง ๆ ได้ และสามารถอธิบายวิธีการแปลงฟิควาร์ได้ดังนี้

แรงดันเฟสของพิกัด $a-b-c$ ของระบบ 3 เฟส สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ได้ดังสมการที่ (4-7)

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

ถ้าแรงดันสมดุล V_{aREF}, V_{bREF} และ V_{cREF} จะเป็นแรงดันอ้างอิงในพิกัด $a-b-c$ ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ได้ดังสมการที่ (4-8)

$$V^{REF} = \begin{bmatrix} V_{aREF} \\ V_{bREF} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aREF} \\ V_{bREF} \\ V_{cREF} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

เมื่อแรงดันอ้างอิงเป็นแรงดันสมดุล จะไม่มีองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ (V_{0REF}) จะมีเพียงแรงดันอ้างอิง V_{aREF}, V_{bREF} ที่ตั้งจากบนระนาบ $\alpha-\beta$ ดังนั้นเราจะใช้แรงดันอ้างอิง V_{aREF}, V_{bREF} ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ในการเชื่อมโยงเมทริกซ์ ซึ่งแรงดันในพิกัด $0-\alpha-\beta$ สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $p-q-r$ โดยสมการที่ (4-9)

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{V_{aREF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{bREF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 0 & -\frac{V_{bREF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{aREF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

โดยที่

$$V_{\alpha\beta REF} = \sqrt{V_{aREF}^2 + V_{bREF}^2}$$

จากสมการที่ (4-7) และ (4-9) แรงดันในพิกัด $a-b-c$ สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $p-q-r$ ได้ดังสมการที่ (4-10)

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

โดยที่

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 0 & -\frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

และสามารถแปลงกลับจากพิกัด $p-q-r$ ให้อยู่ในพิกัด $a-b-c$ ได้ดังสมการที่ (4-12)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

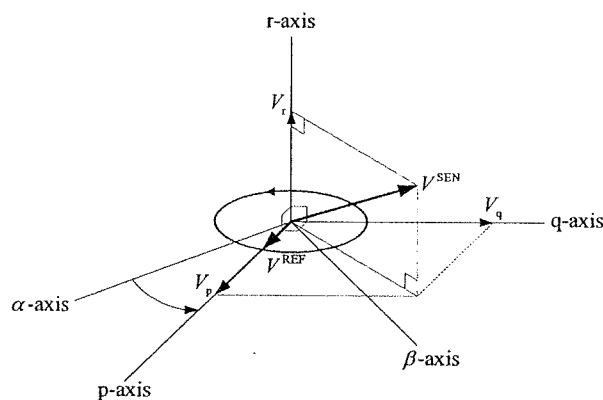
โดยที่

$$[C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & -\frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & 0 \\ \frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

ความหมายทางกายภาพของการแปลงพีคิวอาร์ (pqr transformation) แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 รูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} จะหมุนบนระนาบ $\alpha-\beta$ โดยทำมุมขณะหนึ่ง $\theta(t) = \tan^{-1}(V_{\beta REF}(t)/V_{\alpha REF}(t))$ จากแกน α โดยแกน p จะอยู่แนวเดียวกับรูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} แกน q จะตั้งฉากกับแกน p บนระนาบ $\alpha-\beta$ และแกน r จะเท่ากับแกน 0 ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ดังนั้นแกน p และแกน q จะหมุนบนระนาบ $\alpha-\beta$ โดยทำมุมขณะหนึ่ง $\theta(t)$ จากแกน α และแกน β ตามลำดับ โดยแกน r จะกลายเป็นหมุนอยู่ในพิกัด $p-q-r$

นอกจากนั้นปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} สามารถแยกเป็นองค์ประกอบพี (p-component) V_p องค์ประกอบคว (q-component) V_q และองค์ประกอบอาร์ (r-component) V_r โดยวิธีการแปลงพีคิวอาร์ในสมการที่ (4-10) โดยปกติ V_p และ V_q จะประกอบด้วยองค์ประกอบดีซี (dc-component) และองค์ประกอบเอซี (ac-component) ในขณะที่ V_r จะมีแต่องค์ประกอบเอซีเท่านั้น องค์ประกอบดีซีของ V_p และ V_q นั้นจะมาจากองค์ประกอบลำดับบวกของแรงดันที่ส่งเข้ามาทั้ง 3 เฟส องค์ประกอบเอซีของ V_p และ V_q นั้นจะมาจากสภาพแรงดันที่ผิดปกติ เช่น ความไม่สมดุล หรือฮาร์โมนิกส์ ส่วนองค์ประกอบเอซีของ V_r จะมาจากองค์ประกอบลำดับศูนย์ของแรงดันที่ส่งเข้ามาทั้ง 3 เฟส

เมื่อแรงดันทั้ง 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์และสมดุล ตำแหน่งของปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} จะอยู่ในพื้นที่วงกลมบนระนาบ $\alpha-\beta$ ถ้าแรงดันทั้ง 3 เฟสอินเฟสกับรูปคลื่นอ้างอิงทั้ง 3 เฟส ปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} จะอยู่ในแนวเดียวกันกับรูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} ในกรณีนี้ V_q และ V_r จะไม่มีค่าในขณะที่ V_p จะประกอบด้วยองค์ประกอบดีซีเท่านั้นและจะมีค่าเท่ากับ $|V^{SEN}|$ [16] ซึ่งสภาพของแรงดันนี้จะเป็นจุดมุ่งหมายสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้าโดยดี-สแตตคอม



รูปที่ 4.3 แผนภาพเวกเตอร์ขององค์ประกอบแปลงพีคิวอาร์

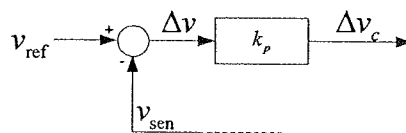
4.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอมนั้นขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมระดับแรงดันโหลด โดยการรักษาระดับแรงดันโหลดนั้นจะใช้ข้อมูลจากการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่โหลดแต่ละเฟส ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่ได้กล่าวมาแล้วมีทั้งสิ้น 3 วิธี คือ วิธีคาร์ากกำลังสองเฉลี่ยแบบใดล วิธีแปลงพาร์กและวิธีการแปลงพีคิวอาร์ ซึ่งแต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดสภาวะการทำงานผิดปกติหรือเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่โหลดตกชั่วขณะ แรงดันไฟฟ้านี้จะถูกแปลง

แรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วส่งขนาดแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม เพื่อปรับสภาพสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมไปให้ดี-สแตคคอมสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ นอกจากนั้นตัวควบคุมจะต้องมีความไวในการตรวจจับความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง และสามารถสั่งให้ดี-สแตคคอมทำงานได้อย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมจะต้องมีความแม่นยำในการปรับระดับแรงดันที่ไปชดเชยให้พอเหมาะกับสถานะผิดปกติ นั้น ซึ่งเทคนิคการควบคุมแรงดันนั้นใช้หลักการควบคุมแบบพี รายละเอียดมีดังนี้

4.4.1 ตัวควบคุมแบบพี (P-controller)

ตัวควบคุมแบบพี จะเป็นการควบคุมเอาต์พุตของตัวควบคุมโดยการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมหรือค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบพี (k_p) เพื่อให้เอาต์พุตของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ไวตามความต้องการและทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ข้อเสียซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของตัวควบคุมแบบพี คือไม่สามารถกำจัดค่าผิดพลาดสถานะคงตัว (steady-state error) ที่เกิดขึ้นหลังจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ซึ่งจะเกิดขึ้นกับตัวควบคุมแบบพีในทุก ๆ ค่า k_p ในทางทฤษฎีค่าผิดพลาดสถานะคงตัวสามารถกำจัดได้โดยการปรับค่าสัญญาณควบคุมอีกครั้งหลังจากที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่ได้เป็นวิธีการที่ดีที่สุด เนื่องจากต้องอาศัยผู้มีความชำนาญในการปรับแต่ง การแก้ไขปัญหานี้ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวควบคุมแบบไอ (I-controller) เข้ามาช่วยซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น เนื่องจากการควบคุมแบบไอจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าการควบคุมเพื่อลดค่าผิดพลาดสถานะคงตัวจนกระทั่งค่าความผิดพลาดนั้นเป็นศูนย์ ในการควบคุมระบบบางระบบที่ไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดค่าผิดพลาดสถานะคงตัว ตัวควบคุมแบบพีก็มีความเหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 อย่างไรก็ตามตัวควบคุมพีจะสามารถทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อได้รับการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม [9] ในงานวิจัยนี้เราจะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคชาญฉลาด (intelligent optimization technique) วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms: GA)



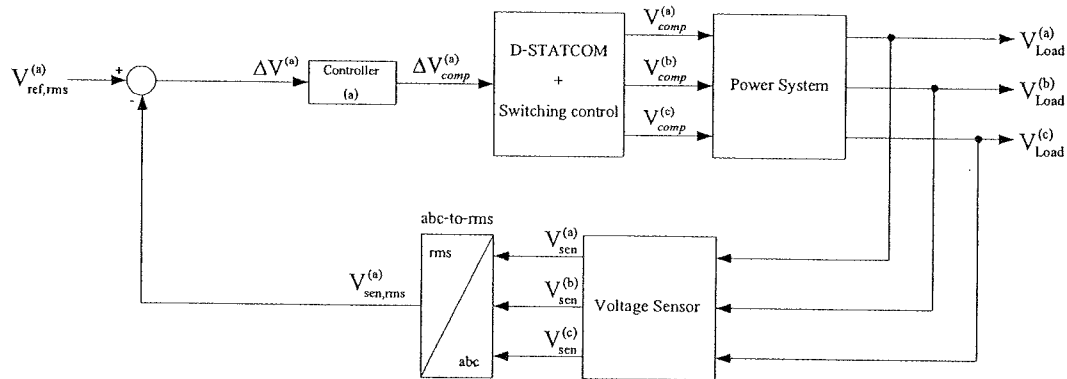
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี

จากรูปที่ 4.4 สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี ได้ดังนี้

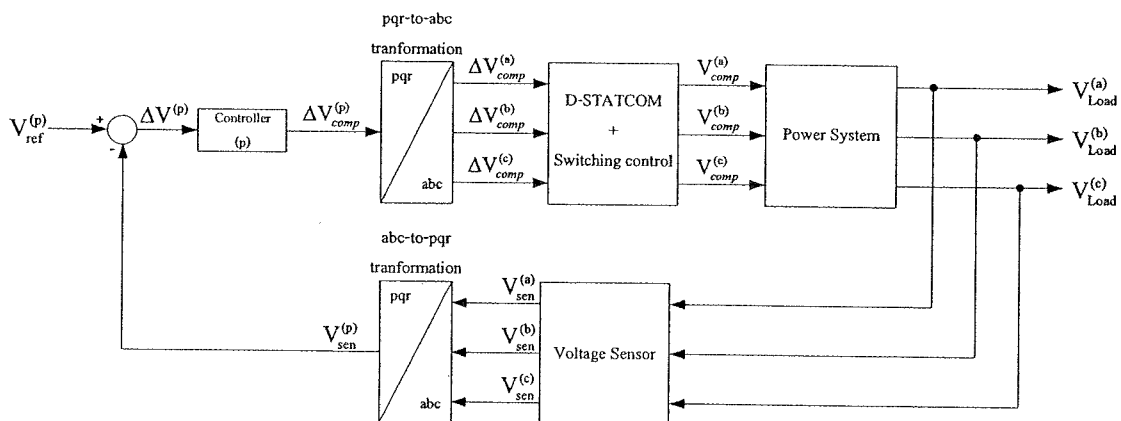
$$\Delta v_c = k_p \Delta v \quad (4-14)$$

เทคนิคการควบคุมระดับแรงดันที่นำเสนอนี้ใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control) ซึ่งเป็นหลักการควบคุมที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยจะใช้หลักการนี้หาขนาดและมุมเฟสของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติในขณะเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี (k_p) นั้น ใช้เทคนิคขบวนการลดวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม โดยจำลองสถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท คือ การลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร ซึ่งจะมีความรุนแรงมากที่สุด และชนิดเฟสเดียวลงดิน ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติมากที่สุด โดยแต่ละชนิดจะมีเทคนิคการควบคุมแรงดันดังนี้ [1],[2]

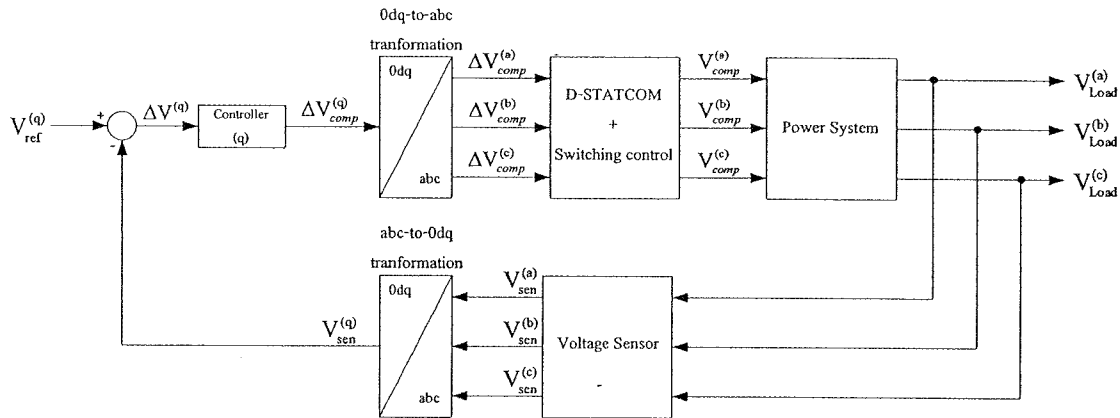
1. ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.5 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไคเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



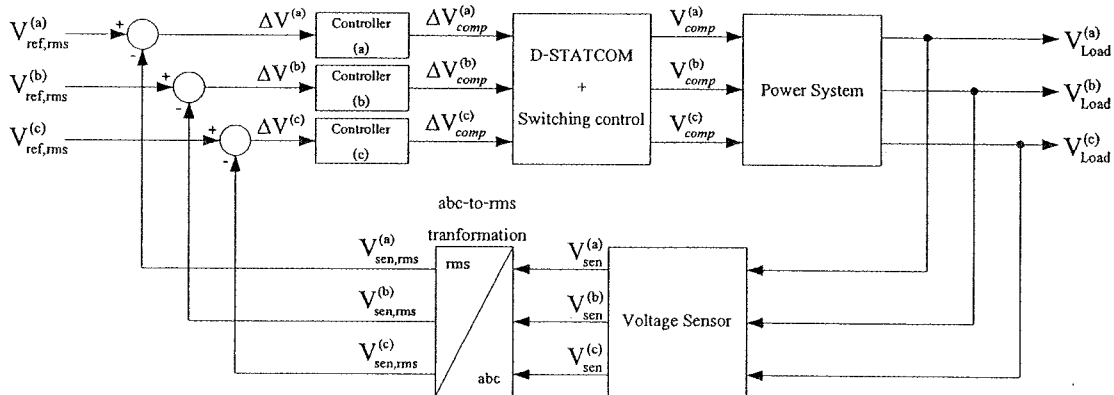
รูปที่ 4.6 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงพีคิวอาร์เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



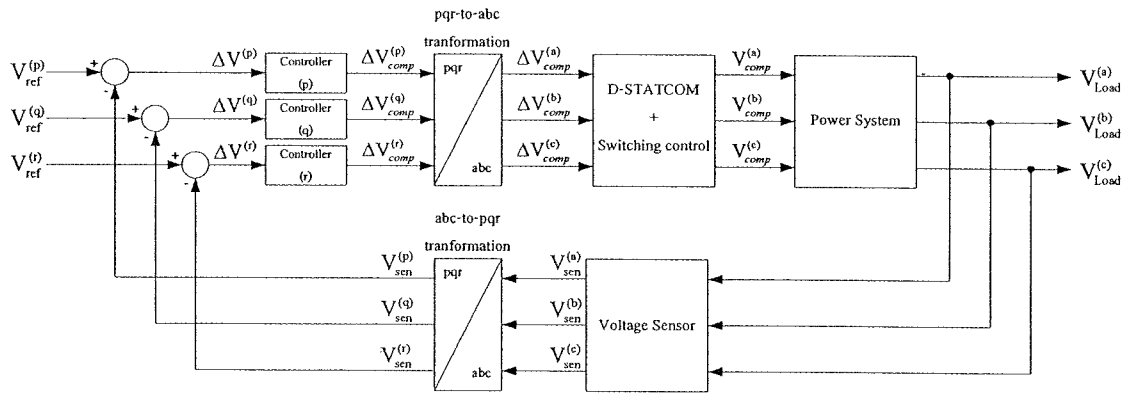
รูปที่ 4.7 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงพาร์ก
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

จากวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีจะพบว่าการควบคุมด้วยเทคนิคทั้งสามใช้ตัวควบคุมเพียงชุดเดียวเท่านั้น คือ เทคนิคการกำลังสองเฉลี่ยแบบโวลใช้ตัวควบคุมเฟสไดคี่ได้เฟสหนึ่ง เทคนิคการแปลงพาร์กใช้ตัวควบคุมสำหรับองค์ประกอบคิว ส่วนเทคนิคการแปลงฟิควาร์ใช้ตัวควบคุมสำหรับองค์ประกอบพี เพราะว่าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นเป็นชนิดสามเฟสแบบสมมาตร ซึ่งเราทำการปรับค่าตัวควบคุมเพียงตัวเดียวจะทำให้เกิดผลการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 เฟส ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้ตัวควบคุมเพียงชุดเดียวก็เพียงพอที่จะชดเชยระบบให้เป็นปกติได้

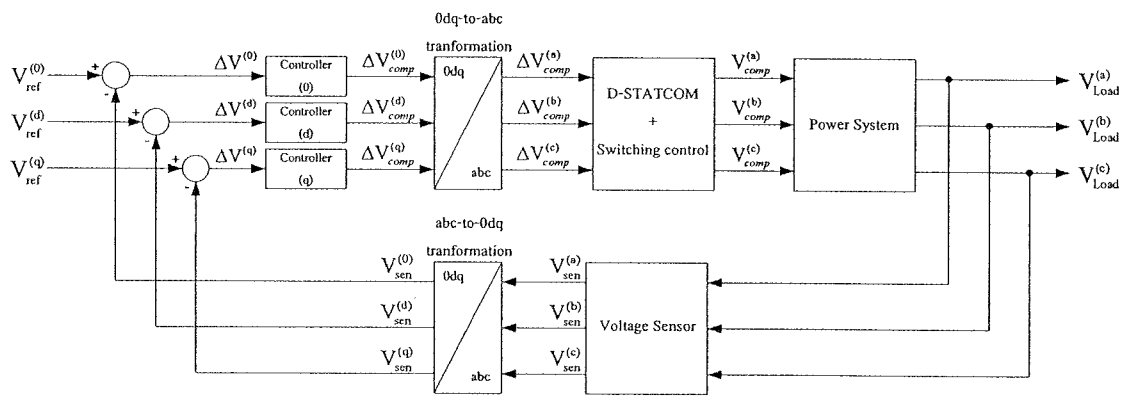
2. ลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.8 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีกำลังสองเฉลี่ยแบบโวล
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.9 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงฟิควาร์
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.10 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงปาร์ก
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

เทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเหมือนกับเทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร จะต่างกันตรงที่จำนวนชุดของตัวควบคุมเท่านั้น โดยเทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินทั้ง 3 วิธีจะใช้ตัวควบคุมทั้ง 3 ชุดควบคุมทั้ง 3 เฟส

4.4.2 จินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นการจำลองกระบวนการวิวัฒนาการในระดับยีน [13],[20] โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย จากนั้น ประชากรในกลุ่มจะแข่งขันกันเพื่อความอยู่รอด โครโมโซมที่ถูกเลือกในแต่ละรุ่นการถ่ายทอด (generation) เท่านั้นที่มีสิทธิ์สร้างลูกหลานหรือทายาทในรุ่นถัดไป การสร้างลูกหลานจะใช้การดำเนินการทางสายพันธุ์ ซึ่งประกอบด้วย คrossover

เวอร์และการผ่าเหล่า ลูกหลานหรือทายาทที่ถูกสร้างขึ้นจะแทนที่โครโมโซมต้นแบบโดยสมบูรณ์ โดยใช้หลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Darwin's natural selection) สามารถสร้างผลเฉลยที่ดีได้จาก กระบวนการนี้

งานวิจัยนี้ดำเนินการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดต่อไปนี้โดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX [23]

$$\text{- Minimize } f(x) = \sum (V_{ref}^{abc} - V_{sen}^{abc})^2$$

4.5 ผลการทดสอบ

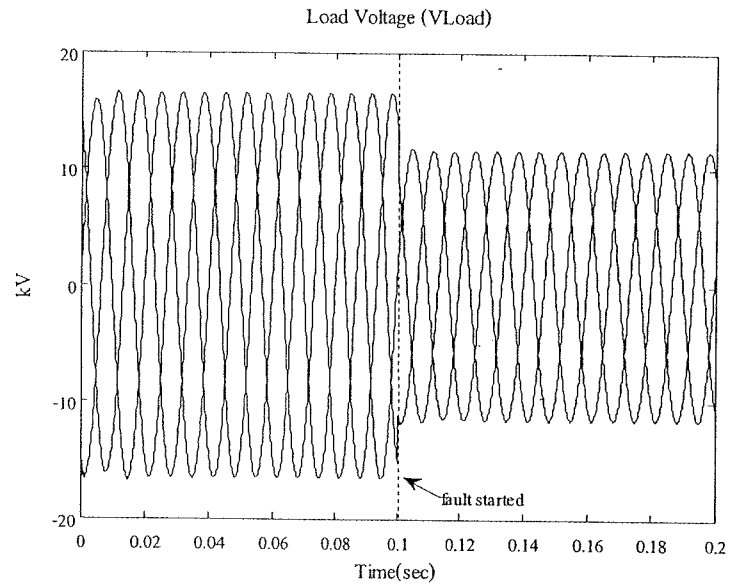
ในการจำลองผลดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร จะใช้ระบบ ทดสอบ 4 บัส มาทำการทดสอบ ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 โดยจำลอง สถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท คือ ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 และชนิดเฟส เดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ที่เวลา 0.1 วินาที และใช้เวลาในการจำลองผลทั้งสิ้น 0.2 วินาที ซึ่ง ผลทดสอบแสดงได้ดังนี้

4.5.1 ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

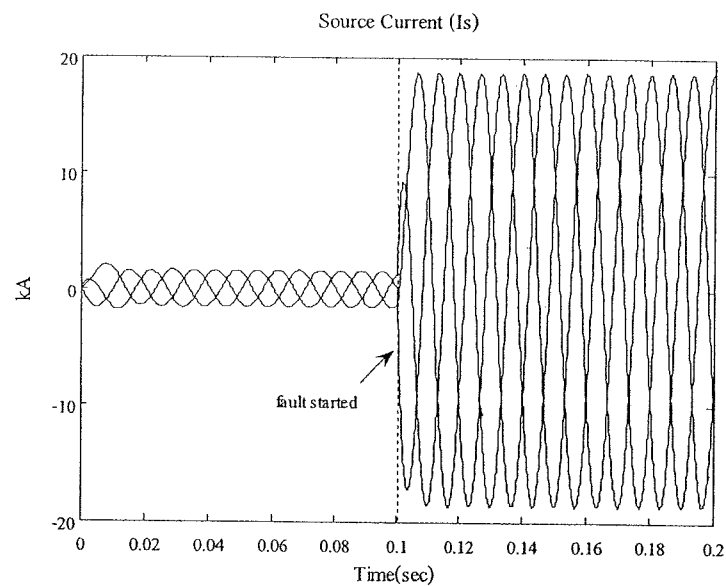
ผลการทดสอบกับระบบทดสอบ 4 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟส แบบสมมาตรที่บัส 4 สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจาก แหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

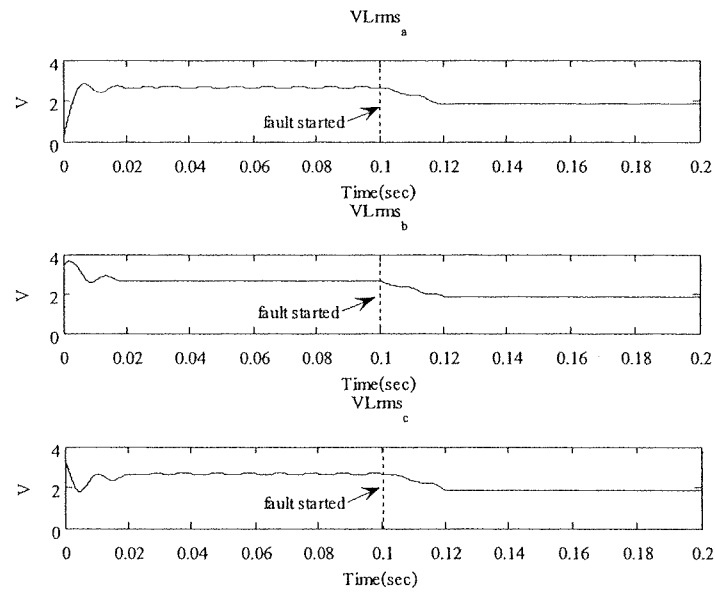
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดัง รูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 4 ทั้ง 3 เฟส ลดลงจากสภาวะปกติ และกระแสเฟสของ แหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟส มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบ สมมาตรที่บัส 4 และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติ สามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15



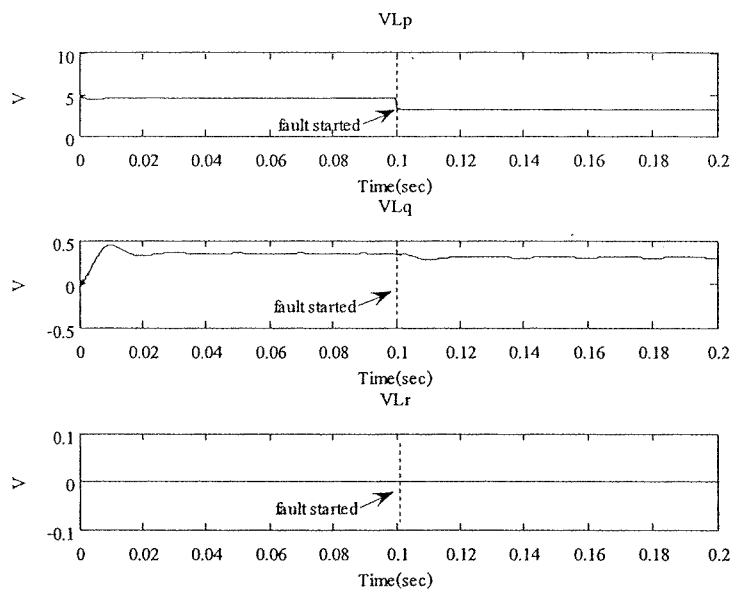
รูปที่ 4.11 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



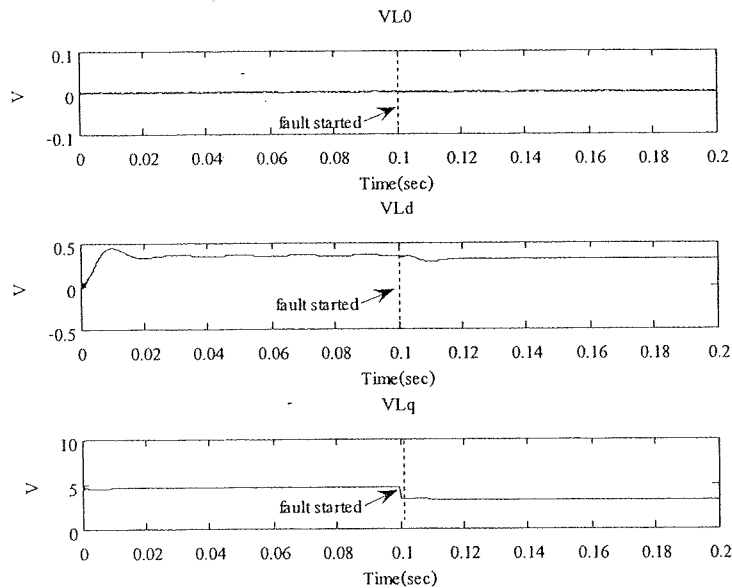
รูปที่ 4.12 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.13 แรงดัน rms ที่โหลด กรณี ไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.14 แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณี ไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.15 แรงดันโวลต์ที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 แสดงแรงดันโวลต์ที่ได้จากการใช้วิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล วิธีการแปลงฟิสิกส์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะเกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 4.13 แรงดันทั้ง 3 เฟสมีค่าลดลง รูปที่ 4.14 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ p จะเห็นชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงฟิสิกส์ จะให้แรงดันจากองค์ประกอบ p เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ ในรูปที่ 4.15 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ q จะเห็นชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงปาร์ก จะใช้แรงดันจากองค์ประกอบ q เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีเงินเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีดีที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโวลต์ และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

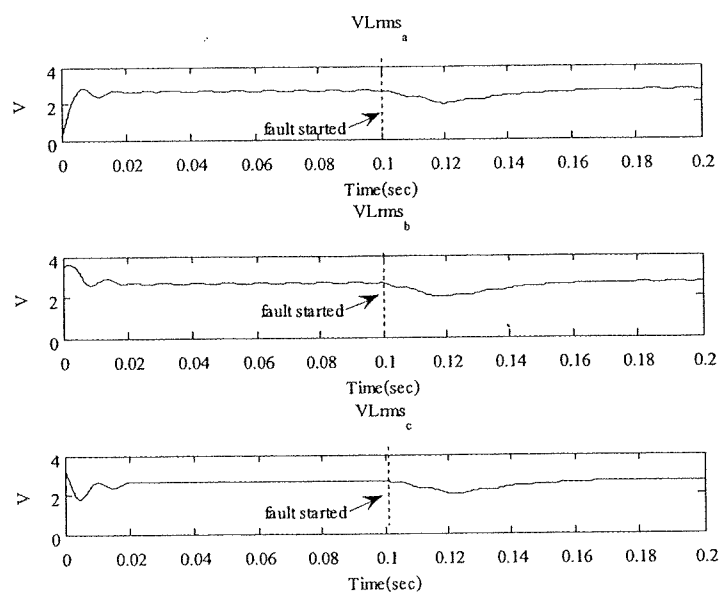
Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^{abc} \in [0, 0.1]$, $k_p^{pqr} \in [5, 15]$, $k_p^{0dq} \in [5, 15]$

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

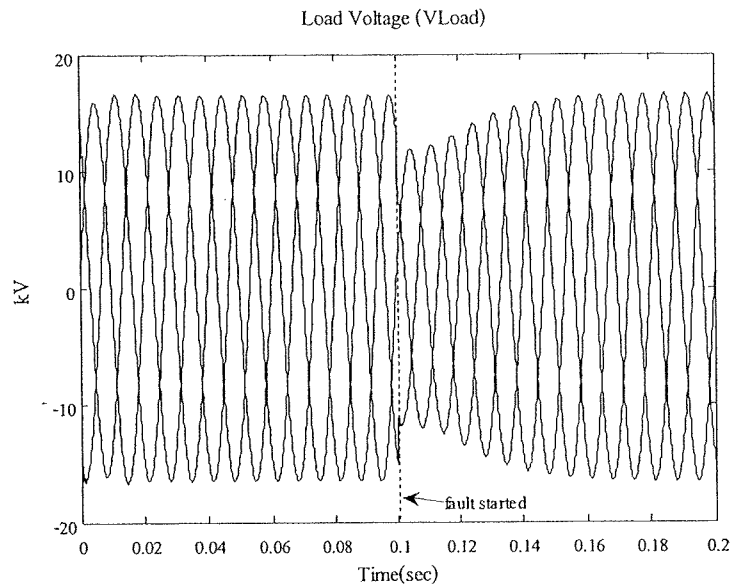
เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่ารากลำดับสองเฉลี่ยแบบไถล	$k_p^{abc} = 0.056$
- การแปลงฟิควาร์	$k_p^{pqr} = 11.7770$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^{0dq} = 11.7643$

- วิธีค่ารากลำดับสองเฉลี่ยแบบไถล

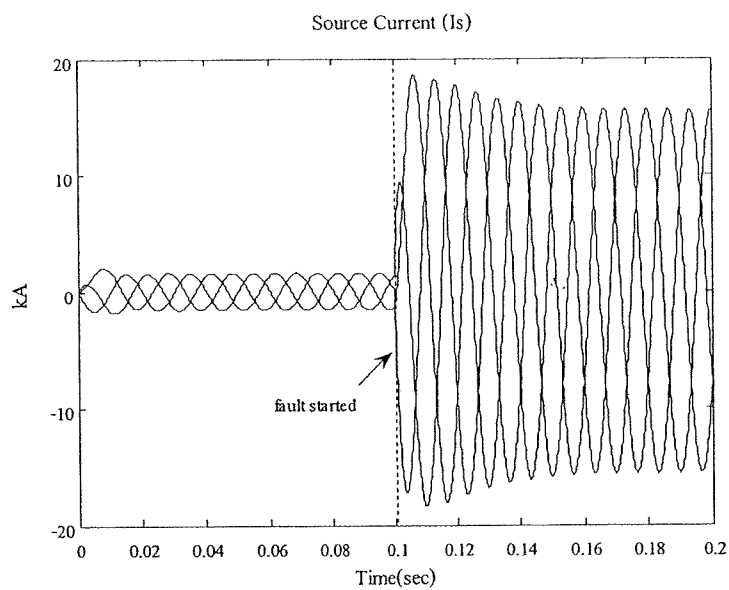


รูปที่ 4.16 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

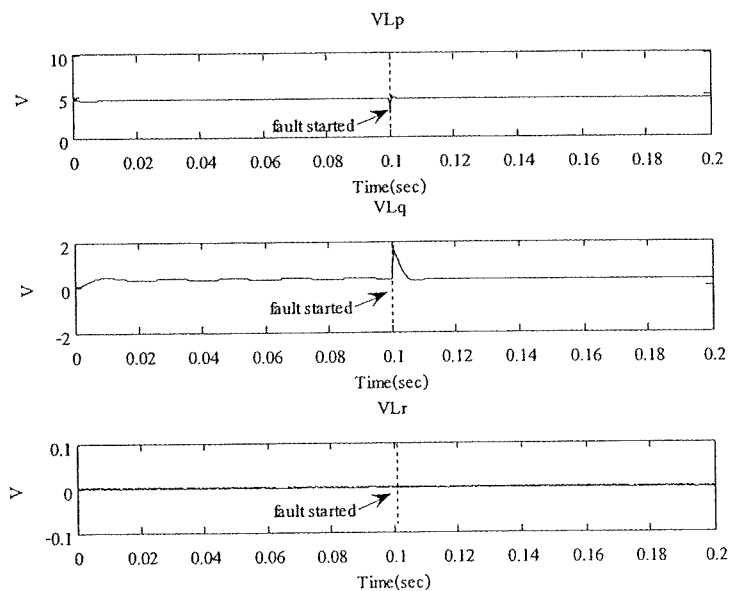


รูปที่ 4.17 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

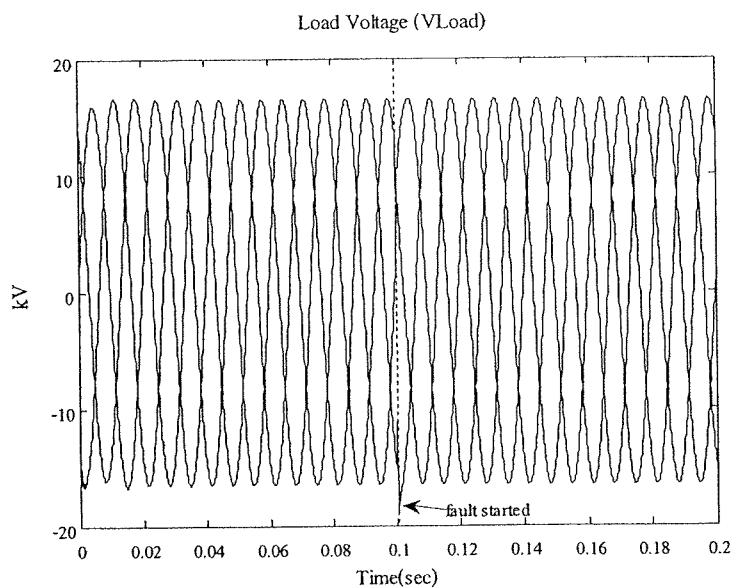


รูปที่ 4.18 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

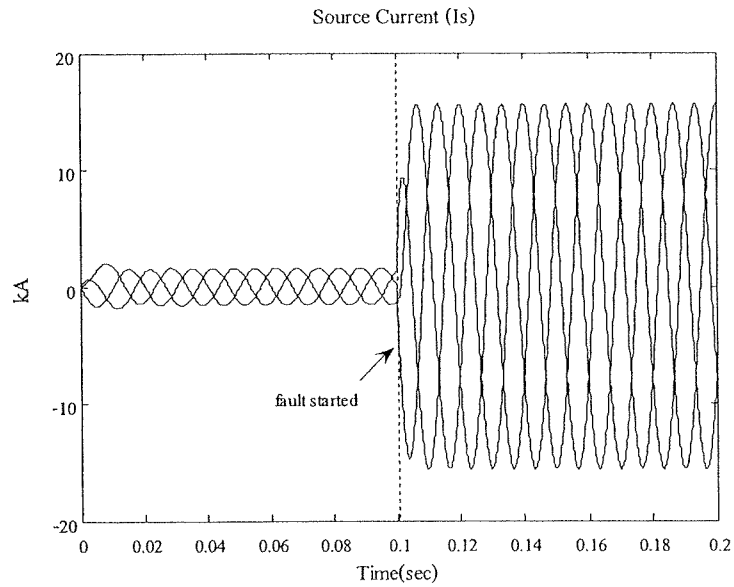
- วิธีการแปลงฟิควาร์



รูปที่ 4.19 แรงดันโวลต์ที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

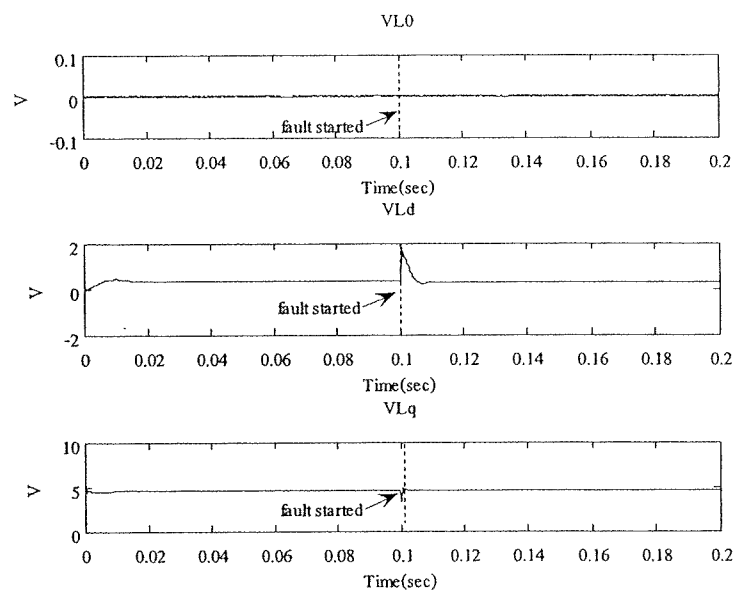


รูปที่ 4.20 แรงดันเฟสที่โวลต์เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

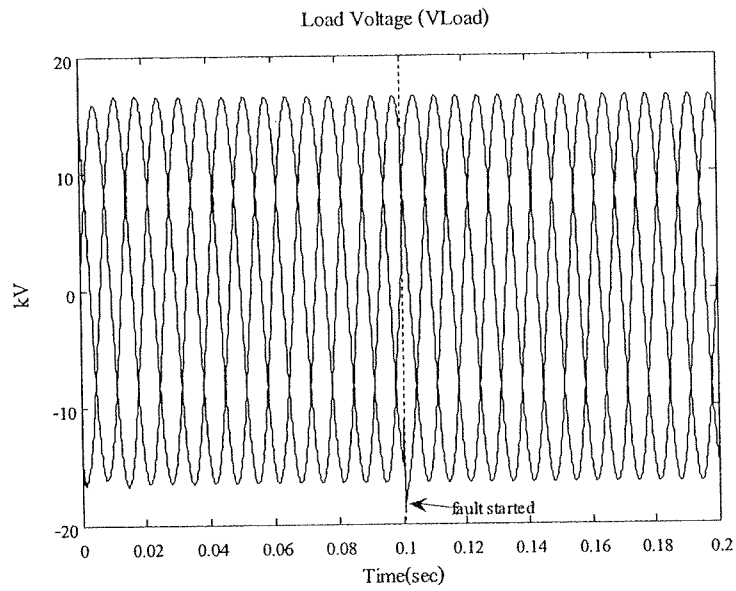


รูปที่ 4.21 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

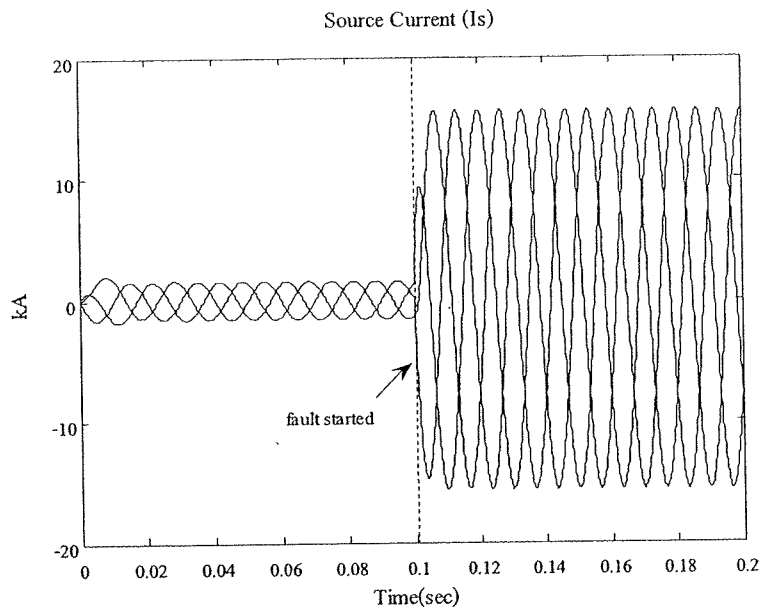
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 4.22 แรงดันโวลต์ที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.23 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.24 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

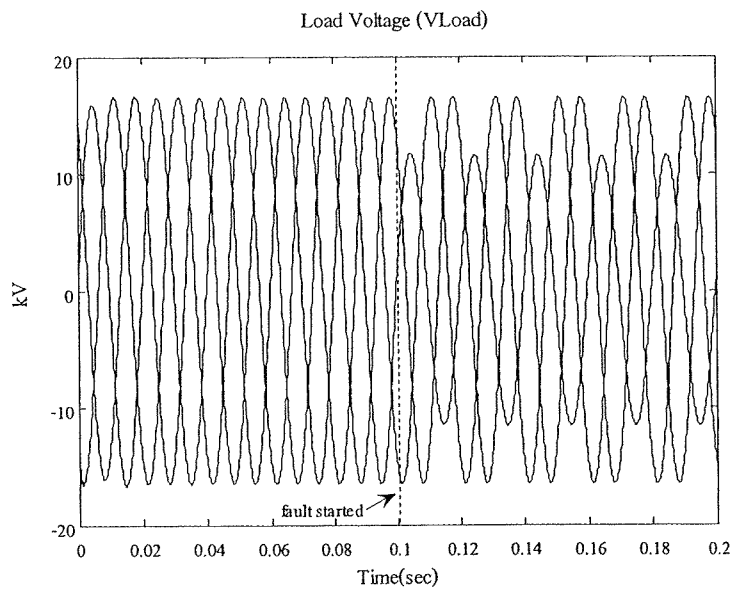
ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ติดคร่อมโหลด แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 4.19 และ 4.22 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรที่บัส 4 ทำให้แรงดัน rms ที่โหลดตก แรงดันโหลดขององค์ประกอบ p-q ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ดี-สแตคคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไถลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 64.3 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงฟิวดอร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ใช้เวลาในการชดเชยแรงดันเท่ากัน คือ 1.8 มิลลิวินาทีเท่านั้น รูปที่ 4.17 4.20 และ 4.23 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไถล เทคนิคการแปลงฟิวดอร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของแรงดันเล็กน้อยในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม ส่วนรูปที่ 4.18 4.21 และ 4.24 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไถล เทคนิคการแปลงฟิวดอร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด อีกทั้งกระแสเฟสของแหล่งจ่ายในกรณีที่มีตัวชดเชย มีค่าลดลงจากเดิม ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม โดยจะสังเกตได้ว่าเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไถลจะเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด

4.5.2 ลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

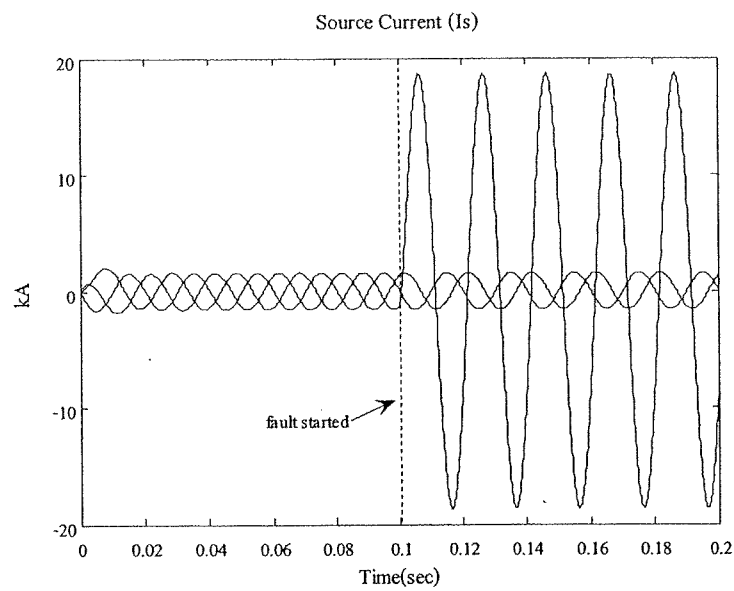
ผลการทดสอบกับระบบทดสอบ 4 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

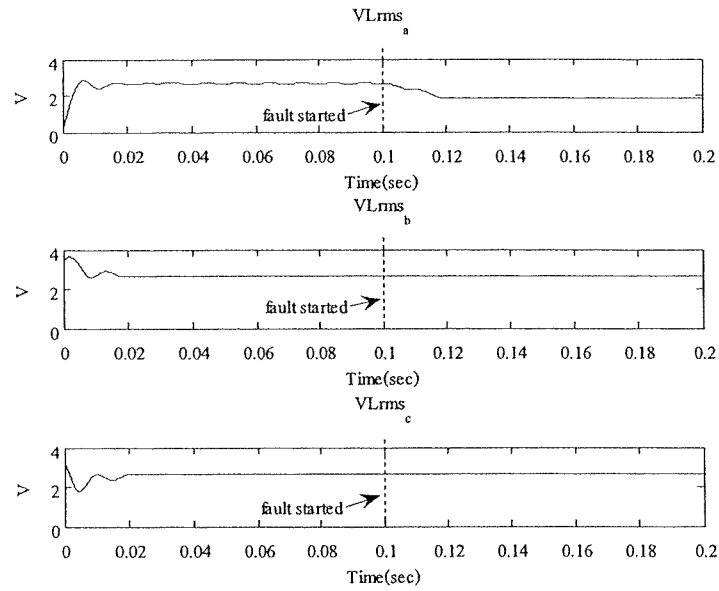
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 4 เฟส a ลดลงจากสภาวะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเฟส a มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติ สามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.27 4.28 และ 4.29



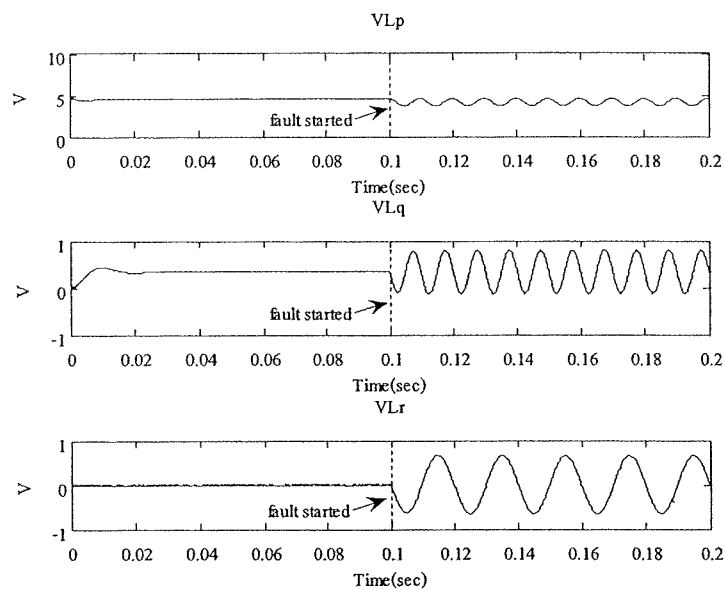
รูปที่ 4.25 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



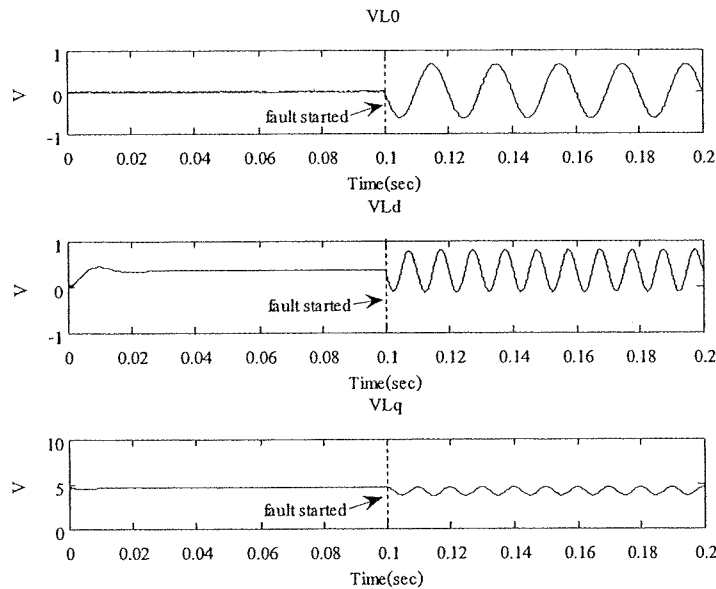
รูปที่ 4.26 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.27 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.28 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.29 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 4.27 4.28 และ 4.29 แสดงแรงดัน โหลดที่ได้จากการใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไกล วิธีแปลงพิกิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะเกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 4.27 แรงดันที่เฟส a มีค่าลดลง รูปที่ 4.28 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสสลับ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้ รูปที่ 4.29 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q จะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังเช่นวิธีการแปลงพิกิวอาร์ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้เช่นกัน

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีจีนเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีดีที่ดีที่สุดของแต่่วิธี แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

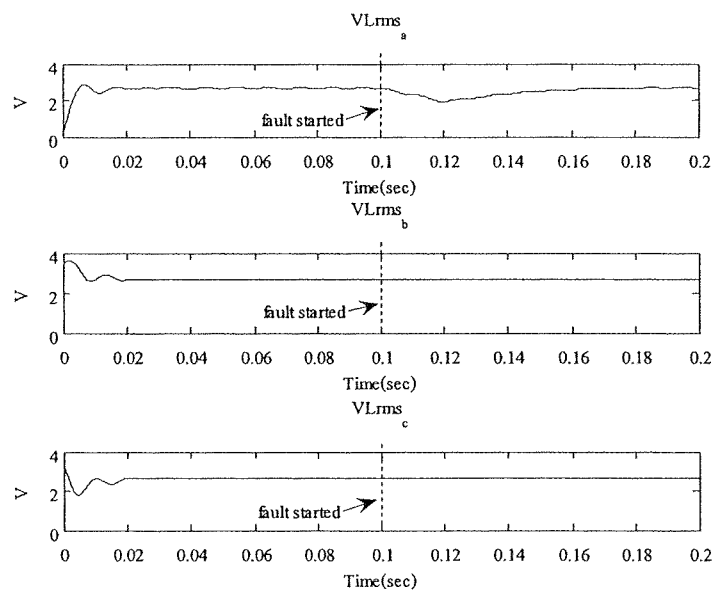
Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^a \in [0, 0.1]$, $k_p^{pqr} \in [0, 0.5]$, $k_p^{0dq} \in [0, 0.5]$

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร

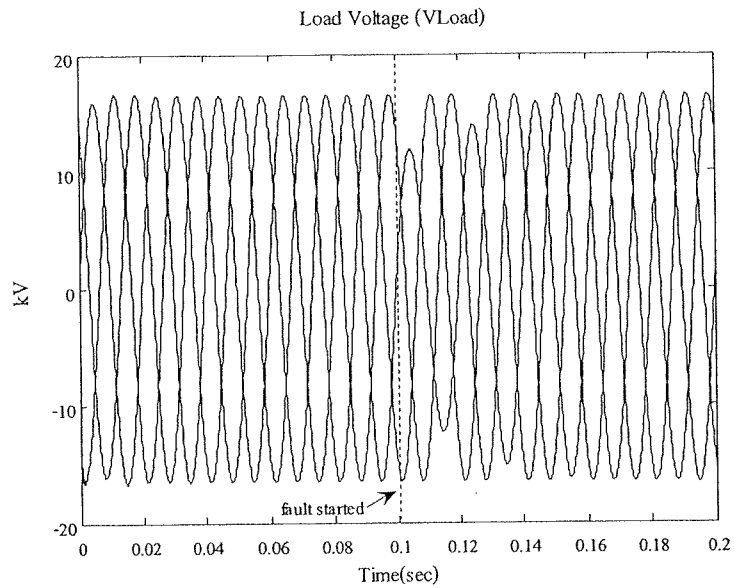
ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่ารากลำดับสองเฉลี่ยแบบไถล	$k_p^a = 0.056$
- การแปลงพิกัดอาร์	$k_p^p = 0.15796$, $k_p^q = 0.28130$, $k_p^r = 0.22188$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^0 = 0.22378$, $k_p^d = 0.25697$, $k_p^q = 0.18165$

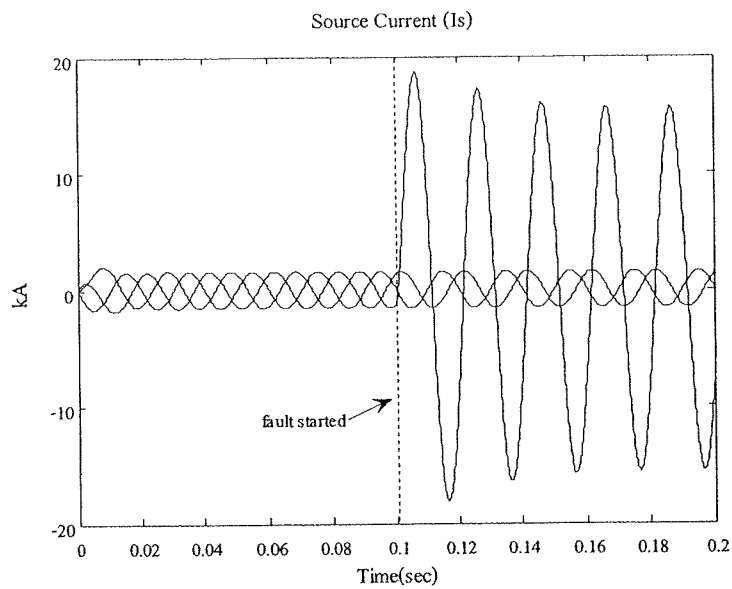
- วิธีค่ารากลำดับสองเฉลี่ยแบบไถล



รูปที่ 4.30 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

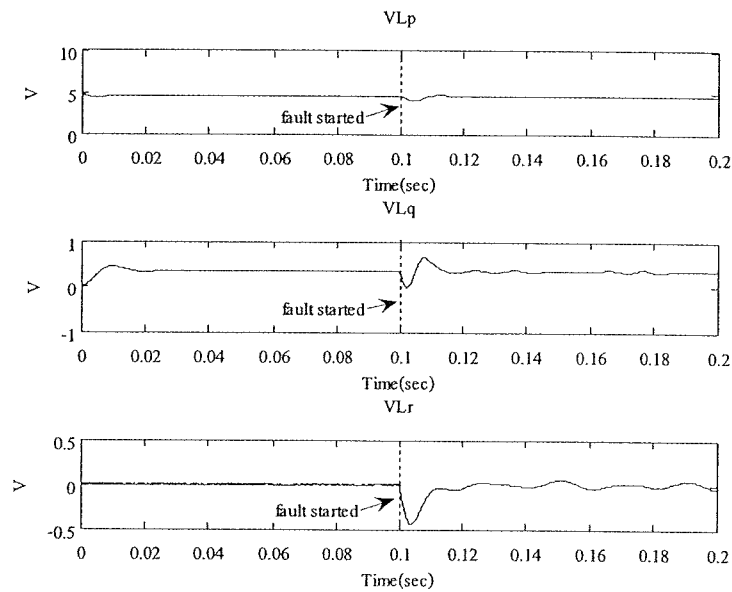


รูปที่ 4.31 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำจัดสองเฟสแบบโกล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

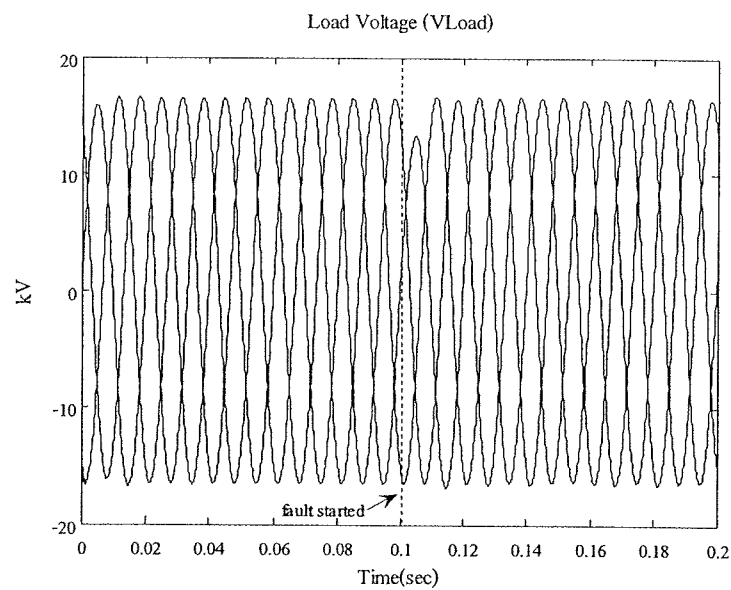


รูปที่ 4.32 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำจัดสองเฟสแบบโกล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

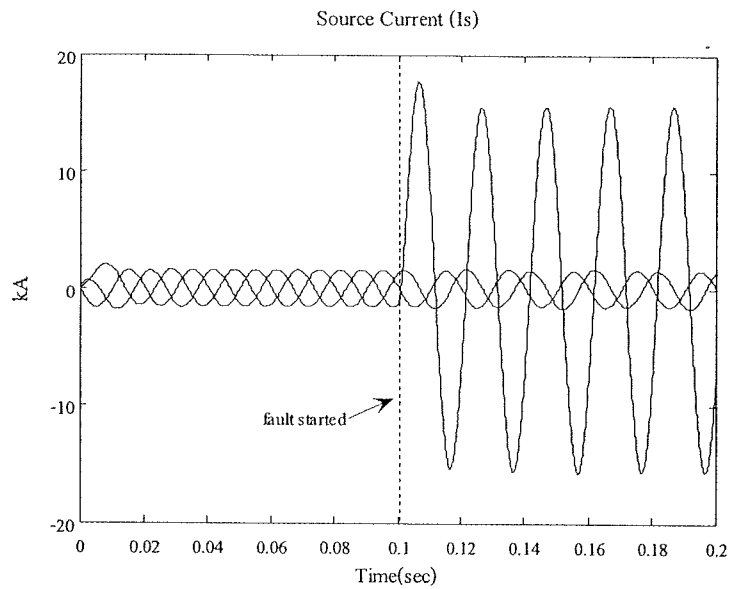
- วิธีการแปลงฟิควาร์



รูปที่ 4.33 แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

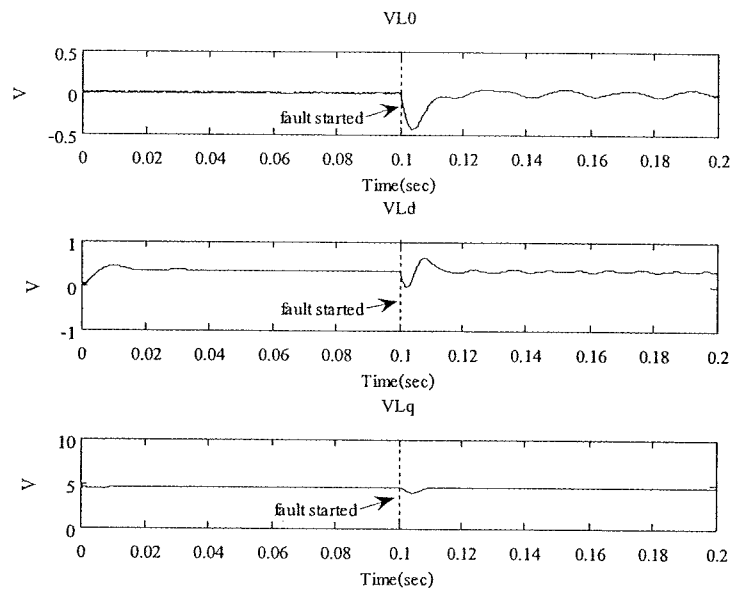


รูปที่ 4.34 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

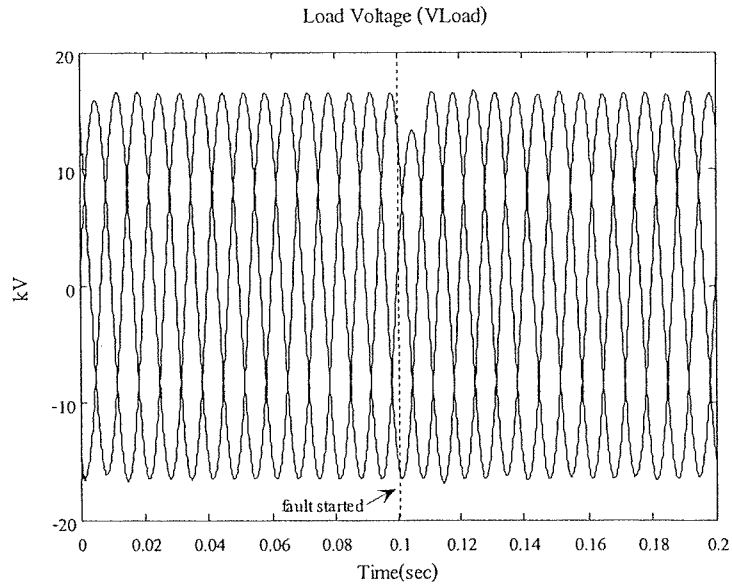


รูปที่ 4.35 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

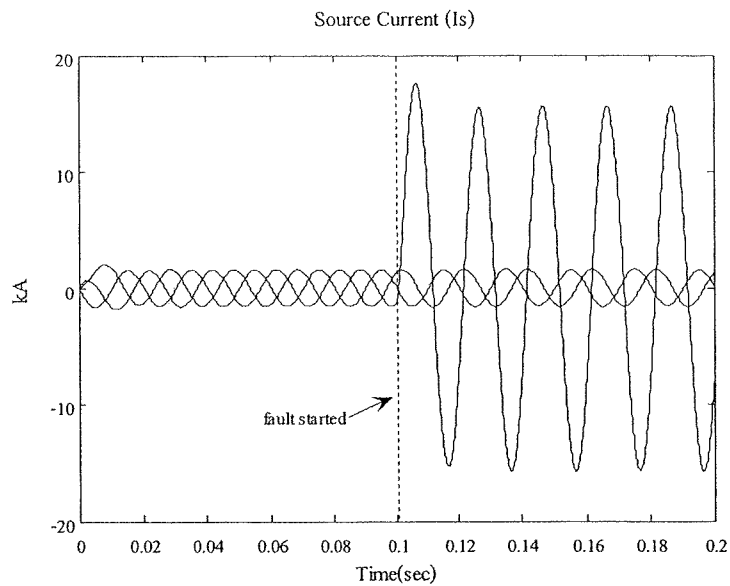
- วิธีการแปลงปาร์ก



รูปที่ 4.36 แรงดันโหนดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.37 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.38 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติของแรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ติดกร่อมโหลด แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที

กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ทำให้แรงดัน rms เฟส a ที่โหลดตก แรงดันโหลดขององค์ประกอบ p-q-r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0-d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q ลดลง ทำให้ดี-สแตคคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเทคนิคการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 70 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์กใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 8.8 มิลลิวินาทีเท่านั้น แต่องค์ประกอบ r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0 ในกรอบอ้างอิง 0-d-q มีการแกว่งของแรงดันเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ รูปที่ 4.31 4.34 และ 4.37 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจร จากรูปกราฟทั้งสามจะเห็นว่าแรงดันที่เฟส a ตกลง และเกิดการกระเพื่อมของแรงดันเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม ส่วนรูปที่ 4.32 4.35 และ 4.38 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจร รูปกราฟทั้งสามจะเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด อีกทั้งกระแสเฟสของแหล่งจ่ายในกรณีที่มีตัวชดเชย มีค่าลดลงจากเดิม ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม โดยสังเกตได้ว่าเทคนิคการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮลเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด เหมือนกับในกรณีการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร

4.6 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงแบบจำลองในสภาวะชั่วครู่ของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี คือ วิธีการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮล วิธีการแปลงฟิควาร์ และวิธีการแปลงปาร์ก โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินในระบบทดสอบ 4 บัส ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ จากการดำเนินงานพบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรหรือเฟสเดียวลงดินดี-สแตคคอมสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุดเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร คือ วิธีการแปลงฟิควาร์และวิธีการแปลงปาร์ก สำหรับวิธีการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮลให้ผลตอบแทนที่ช้า เมื่อเทียบกับ 2 วิธีดังกล่าว และเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน วิธีที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุด คือ วิธีการแปลงฟิควาร์ วิธีการแปลงปาร์ก และวิธีการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไฮลตามลำดับ