

บทที่ 5

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์

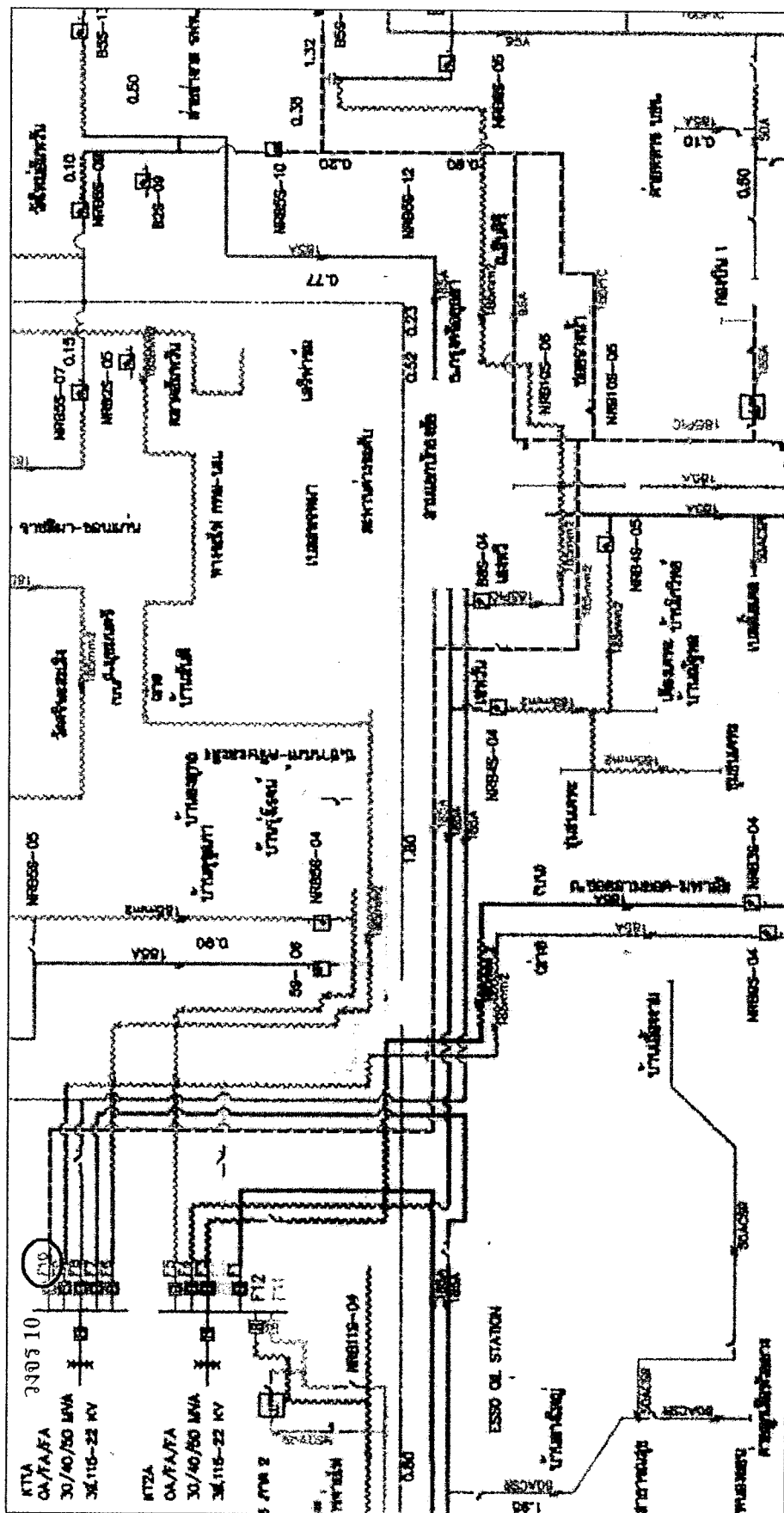
5.1 ความนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรในสถานะชั่วคราว โดยใช้ระบบทดสอบตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ซึ่งจากการดำเนินการที่ผ่านมาทั้ง 2 วิธีนี้สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ในสถานะผิดปกติ

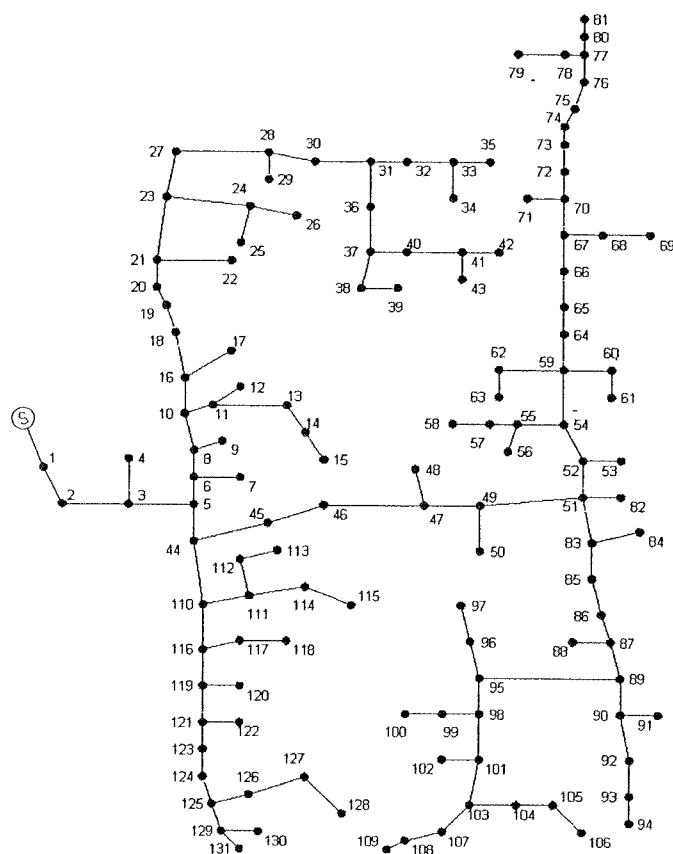
ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) จำนวน 131 บัส ที่นำมาทำการทดสอบนี้เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร ดังนั้นเทคนิคการออกแบบตัวชดเชยของการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร เบื้องต้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 พร้อมทั้งกล่าวถึงเทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบชุดควบคุมดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ

5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10)

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 นั้นมีทั้งสิ้น 12 วงจร วงจรที่ 6-10 จ่ายผ่านหม้อแปลง KT1A ในขณะที่วงจรที่ 1-5 และ 11-12 จ่ายผ่านหม้อแปลง KT2A งานวิจัยนี้พิจารณาเพียงวงจรเดียวเท่านั้น คือ วงจร 10 จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 เดินสายไปทางทิศตะวันออกผ่านถนนมิตรภาพประมาณ 5 กิโลเมตร ลากสายไฟทางทิศใต้สู่การเคหะ จากนั้นสายจ่ายแยกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งไปทางทิศใต้สิ้นสุดที่กองบิน 1 อีกทางหนึ่งลากไปทางทิศตะวันออกตามถนนสัปปะสีและซอยรางน้ำ จนกระทั่งสิ้นสุดที่ถนนพิบูลสงคราม ดังแสดงในรูปที่ 5.1 วงจรนี้มีบัสทั้งหมด 131 บัส มีโหลดทั้งสิ้น 57 โหลด รวมทั้งสิ้น 3339.593 กิโลวัตต์ 1847.735 กิโลวาร์ ข้อมูลของระบบแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ของสถานีนครราชสีมา 2

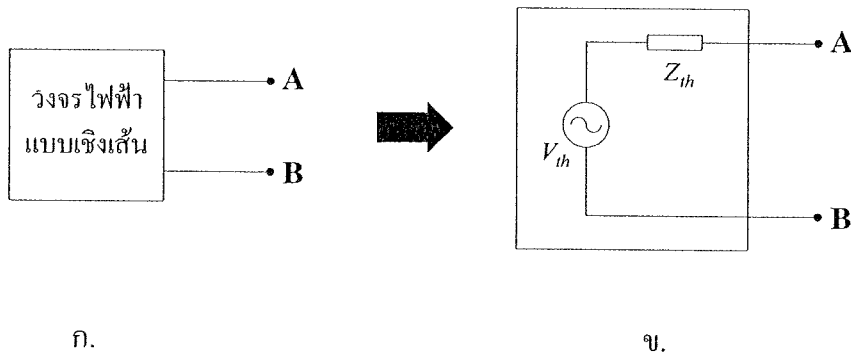


รูปที่ 5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10)

5.3 เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากระบบทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ การจำลองผลทั้งระบบโดยสมบูรณ์ใช้เวลานาน ดังนั้นการนำเทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังเข้ามาช่วยในการจำลองผลเพื่อให้ใช้เวลาในการจำลองผลน้อยลง เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการทฤษฎีของเทวินิน (Thevenin's theorem) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ในวงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้น (linear network) ใด ๆ สามารถยุบรวมวงจรไฟฟ้าใหม่ได้ ให้กลายเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตัวหนึ่งต่ออนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์ตัวหนึ่ง” แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าของเทวินิน (Thevenin's voltage) แทนด้วย V_{th} และค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมกับแรงดันไฟฟ้าของเทวินิน เรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของเทวินิน (Thevenin's impedance) แทนด้วย Z_{th} [14] ดังรูปที่ 5.3 ในงานวิจัยนี้การหาค่า V_{th} และ Z_{th} ใช้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน [6] ส่งผลให้ลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังจากทั้งหมด 131 บัส เหลือเพียง 2 บัส เท่านั้น โดยระบบไฟฟ้าถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ โหนด k ที่ตำแหน่งติดตั้งดี-สแตคคอม โหนดที่อยู่หลังตำแหน่งติดตั้งพิจารณาเป็นกลุ่มโหนดที่ถูกป้องกัน

การศึกษาแรงดันสมมูลและอิมพีแดนซ์ของเทวินินทำได้โดยการปลดโหลดที่อยู่หลังตำแหน่งติดตั้งดี-สแตคคอมออก จากนั้นคำนวณผลเฉลยจากโปรแกรมการไหลกำลังไฟฟ้า แรงดันที่บัสติดตั้งดี-สแตคคอม V_k จะมีค่าเท่ากับ V_{th} และอิมพีแดนซ์ $Z_{k,k}$ ที่พิจารณาที่บัสติดตั้งดี-สแตคคอม จะมีค่าเท่ากับ Z_{th}

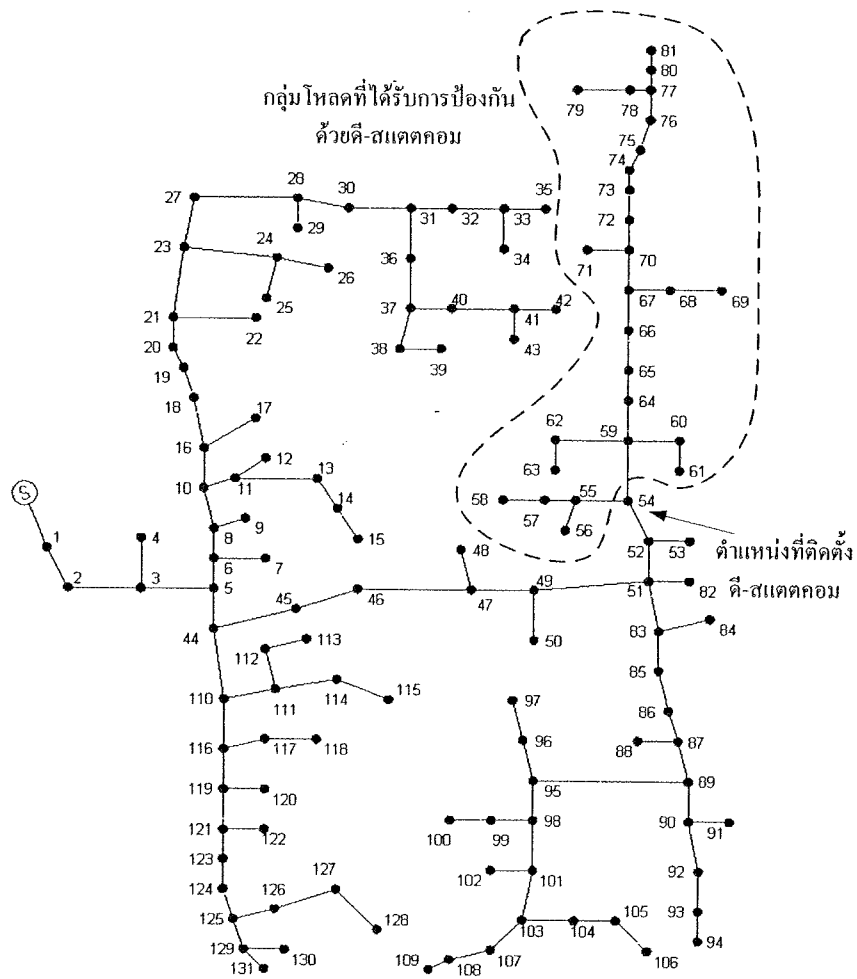
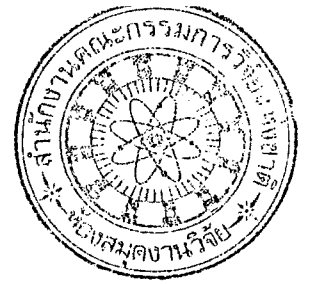


รูปที่ 5.3 วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นใด ๆ และวงจรสมมูลของเทวินิน

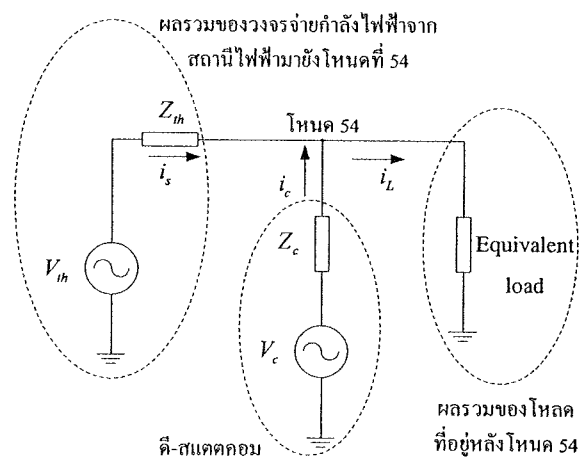
5.4 การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร

การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ใช้หลักการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยใช้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) เป็นระบบทดสอบ และกำหนดให้ติดตั้งดี-สแตคคอมไว้ที่บัส 54 ดังรูปที่ 5.4 โดยใช้เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.3 ระบบไฟฟ้ากำลังสมมูลที่ถูกลดทอนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 โหลดที่พิจารณาเป็นการรวมโหลดตั้งแต่บัสที่ 54 เป็นต้นไป จนถึงบัสที่ 81 ดังรูปที่ 5.5 เมื่อรวมโหลดแล้วจะได้โหลดรวมที่บัส 54 มีค่าเท่ากับ 286.806 กิโลวัตต์ 158.685 กิโลวาร์

V_{th} และ Z_{th} ของวงจรสมมูลเทวินินของระบบที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร แสดงดังรูปที่ 5.5 สามารถหาค่าได้จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ค่า V_{th} เท่ากับ $1.0159 \angle -0.1206^\circ$ pu. และค่า Z_{th} เท่ากับ $0.0165 + j0.0310$ โอห์ม การทดสอบจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมมาตรที่โหลด คือ บัสที่ 54 เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีแรงดันที่บัสโหลดลดลง การติดตั้งดี-สแตคคอมที่บัสโหลด เพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดและกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสถานะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ดังนี้

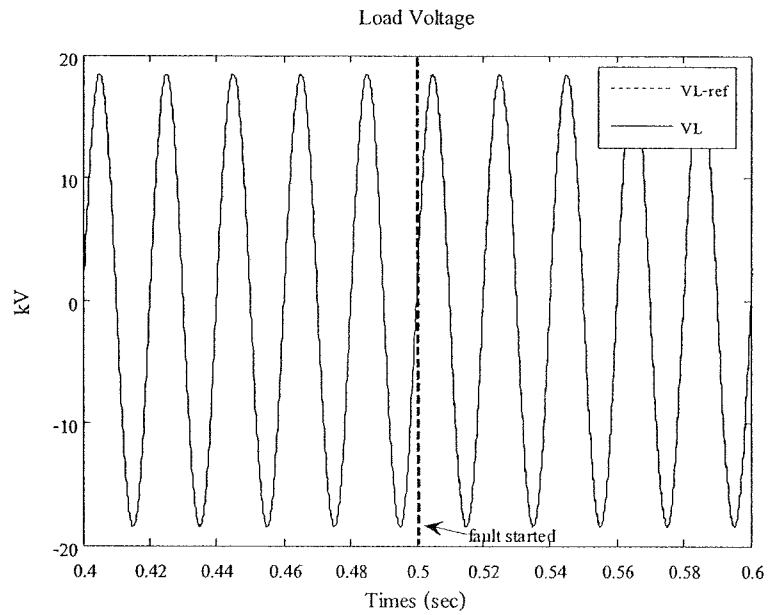


รูปที่ 5.4 การรวมโหนดที่บัส 54

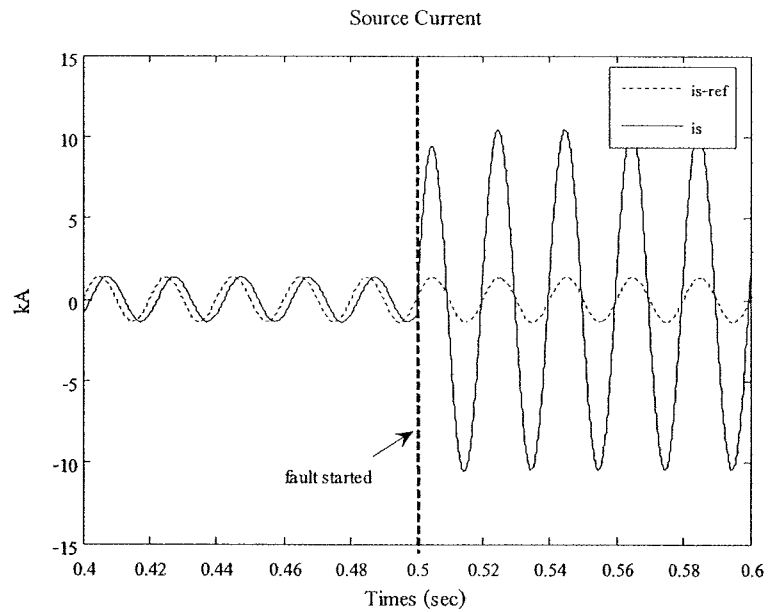


รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

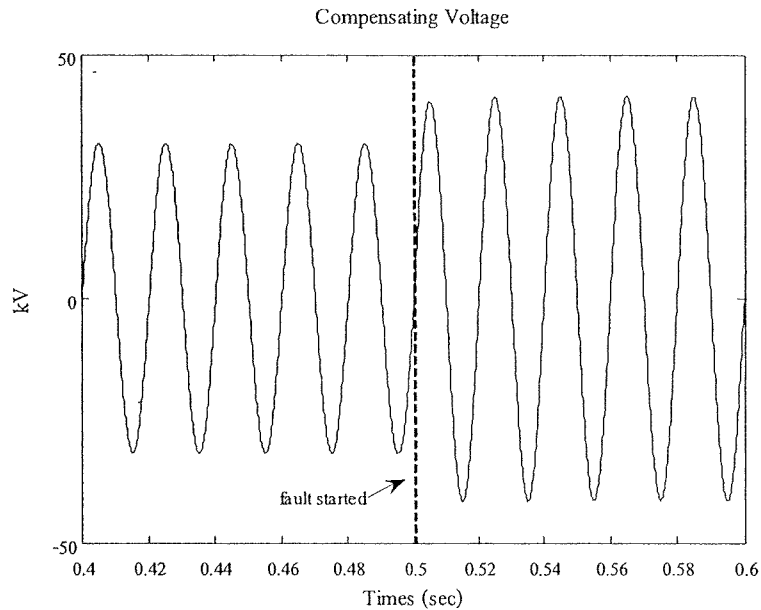
5.4.1 สภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



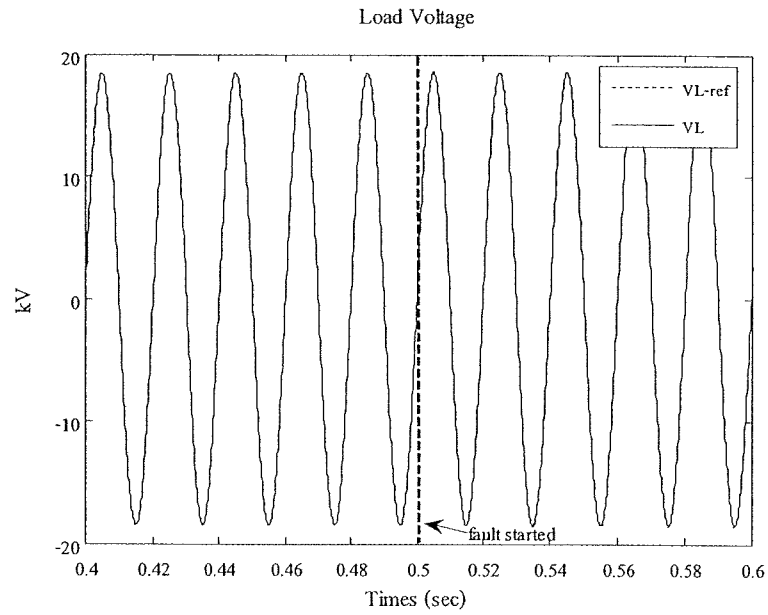
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



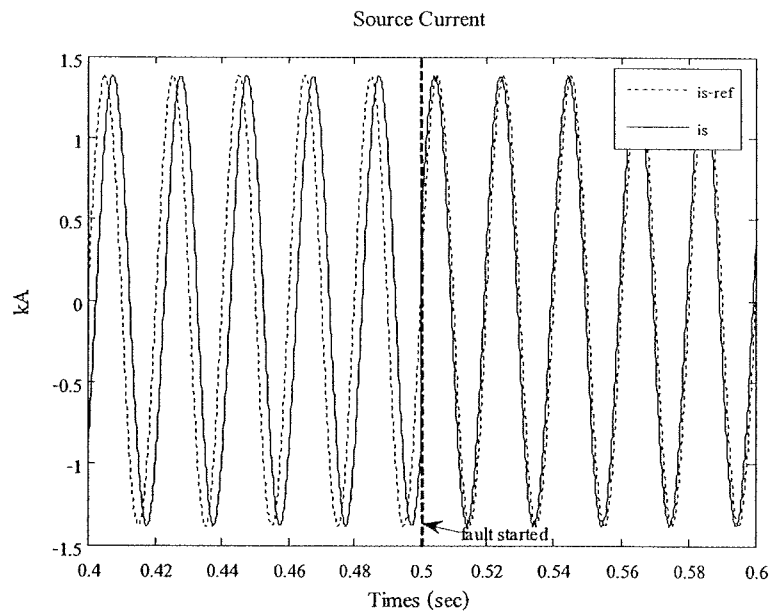
รูปที่ 5.8 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)

รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันโวลต์อ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ทำให้เกิดแรงดันตกเพียงเล็กน้อยเนื่องมาจากเกิดการลัดวงจร รูปที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง และรูปที่ 5.8 แสดงแรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบจะมีขนาดแรงดันมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ไม่มาก เพราะเนื่องจากไม่มีตัวควบคุม ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด

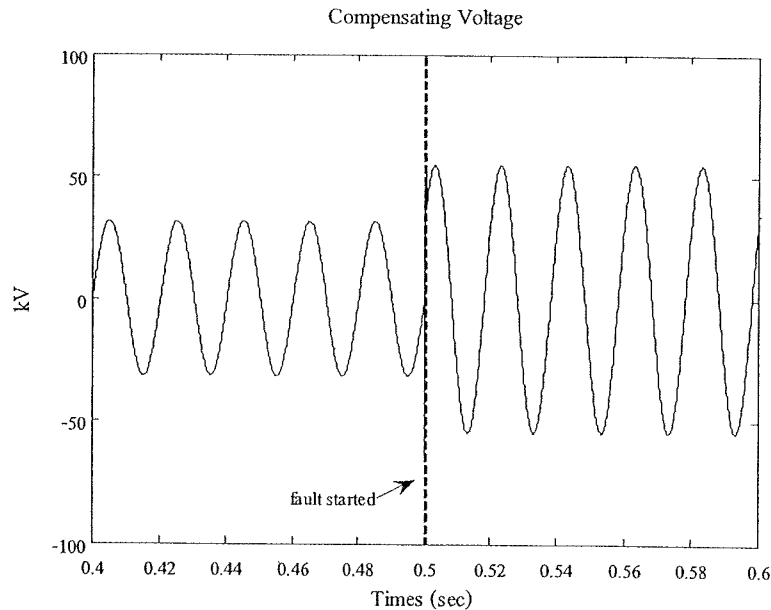
5.4.2 สภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.11 แรงดันที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)

รูปที่ 5.9 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ตัวควบคุมสามารถช่วยลดแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร ได้เป็นอย่างดี รูปที่ 5.10 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง แต่มุมเฟสไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงมุมเฟสแต่อย่างใด รูปที่ 5.11 แสดงแรงดันที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุมสังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบมีการกระเพื่อมของแรงดันมากในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม

จากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดและกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

สถานะ	แรงดันที่บัสโหลด RMS (kV)	
	ไม่มีตัวควบคุม	มีตัวควบคุม
ปกติ	13.183	13.183
ผิดปกติ	13.114	13.208

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

สถานะ	กระแสจากแหล่งจ่าย RMS (kA)	
	ไม่มีตัวควบคุม	มีตัวควบคุม
ปกติ	0.985	0.985
ผิดปกติ	7.423	0.984

ผลการทดสอบนี้มีค่าอัตราขยายป้อนกลับ $k_{11} = 0.1150$, $k_{12} = -0.8206$, $k_{13} = -730$, $k_{14} = 34$ และอัตราขยายของตัวควบคุม $k_p = 0.4$

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น พิจารณาจากความสามารถควบคุมได้ และความสามารถสังเกตได้หรือพิจารณาจากค่าเฉพาะของเมทริกซ์ A' ของระบบในสมการปริภูมิสถานะ ดังสมการที่ (3-13) โดยรายละเอียดของแต่ละวิธีได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้นแสดงได้ดังนี้

- ตรวจสอบความสามารถควบคุมได้

ระบบจะสามารถควบคุมได้นั้นก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ความควบคุมได้ (controllability matrix) C มีอันดับ (rank) เท่ากับ n ในการตรวจสอบความสามารถควบคุมได้นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน *ctrb* ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเมทริกซ์ความควบคุมได้และสามารถหาอันดับได้โดยใช้ฟังก์ชัน *rank* ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{controllability matrix} = \begin{bmatrix} 10142 & 0 & -3.1154 \times 10^{10} & -3.2208 \times 10^8 \\ 1.7115 \times 10^7 & 1.7702 \times 10^5 & -1.5227 \times 10^{14} & -1.588 \times 10^{12} \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมทริกซ์ A' มี n เท่ากับ 2 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความควบคุมได้เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถควบคุมได้”

- ตรวจสอบความสามารถสังเกตได้

ระบบจะสามารถสังเกตได้นั้นก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ความสังเกตได้ (observability matrix) O มีอันดับ (rank) เท่ากับ n ในการตรวจสอบความสามารถควบคุมได้นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน *obsv* ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเมทริกซ์ความสังเกตได้และสามารถหาอันดับได้โดยใช้ฟังก์ชัน *rank* ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{observability matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1333.2 & -1819.5 \\ 1.2591 \times 10^8 & -8.9711 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมทริกซ์ A' มี n เท่ากับ 2 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถสังเกตได้”

- ตรวจสอบค่าเจาะจง

วิธีการตรวจสอบนี้เป็นวิธีการตรวจสอบจากค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' ของระบบในสมการปริภูมิสถานะ ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าเจาะจงที่ได้เป็นจำนวนจริงลบทุกสมาชิกสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน *eig* ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{eigenvalues} = \begin{bmatrix} -26947 \\ -8.9455 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมื่อหาค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' จะได้เป็นจำนวนจริงลบทุกสมาชิกแสดงว่า “ระบบมีเสถียรภาพ”

5.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังเข้ามาช่วยในออกแบบชุดควบคุม การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรได้แสดงแบบจำลองในสถานะชั่วครู่ของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยใช้การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตตคอม พร้อมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสโหลด ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตตคอมที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานตามปกติได้เป็นอย่างดี และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตตคอมซึ่งจากการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบทั้ง 3 วิธี จะเห็นว่า ระบบเมื่อติดตั้งตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตตคอมมีความสามารถควบคุมได้ สามารถสังเกตได้และมีสมาชิกทุกตัวจากการหาค่าเจาะจงเป็นลบทุกตัวแสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ