

บทที่ 4

การควบคุมฟลักซ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

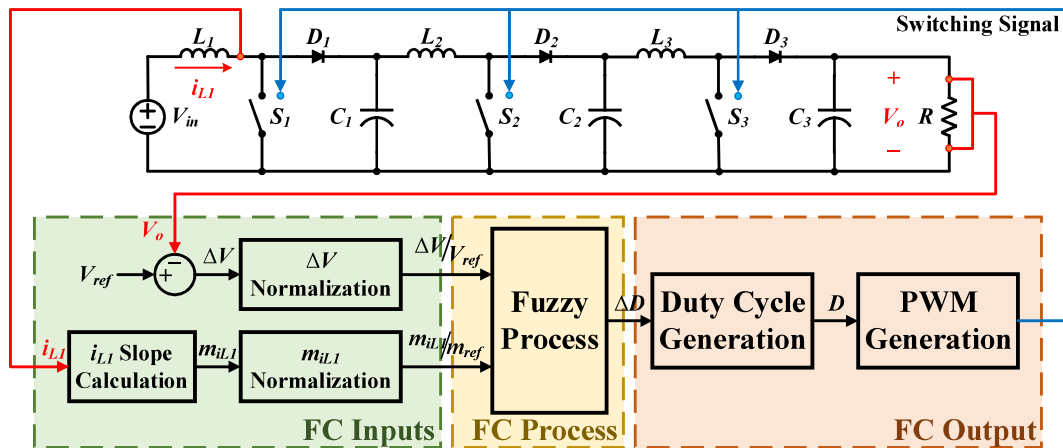
4.1 บทนำ

จากการศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 นั้น ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรขณะไม่มีตัวควบคุมแสดงให้เห็นถึงการพุ่งเกินของแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลให้อุปกรณ์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเสียหายจนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นจำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุมที่เหมาะสม เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการและมีสมรรถนะที่ดี ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัวภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานวงจร ในบทที่ 4 นี้จะนำเสนอการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมฟลักซ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเพื่อให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ที่เหมาะสม สามารถควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยโครงสร้างตัวควบคุมฟลักซ์ การออกแบบตัวควบคุมฟลักซ์ และการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟลักซ์ โดยประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้นพิจารณาได้จากผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อวงจรทำงานภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของวงจรเมื่อใช้ตัวควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีไอ ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานเดียวกัน ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

4.2 การออกแบบตัวควบคุมฟลักซ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

ตัวควบคุมฟลักซ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะอาศัยตัวตรวจจับแรงดันวัดค่า V_o และตัวตรวจจับกระแสวัดค่า i_{L1} เพื่อส่งค่าที่วัดได้ไปยังตัวควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้น ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุมฟลักซ์เป็นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ที่เหมาะสมให้กับสวิตช์

ทั้งสามตัว เพื่อให้การควบคุมฟัซซีที่มีประสิทธิภาพจึงพิจารณาค่าอินพุตสองค่าก่อนเข้าสู่กระบวนการฟัซซีได้แก่ค่าความผิดพลาดของแรงดัน (ΔV) และความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง (m_{iL1}) โดยวัตถุประสงค์ของการเลือกอินพุต ΔV คือเพื่อควบคุมให้ผลตอบสนองมีความถูกต้องในสถานะอยู่ตัว ส่วนอินพุต m_{iL1} จะถูกพิจารณาเพื่อควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบมีความรวดเร็วยิ่งขึ้นในสภาวะชั่วคราว หากพิจารณาอินพุตค่าที่สองเป็นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง (i_{L2}) อาจจะทำให้ผลตอบสนองที่ได้ไม่รวดเร็วเท่ากับการใช้อินพุตเป็น i_{L1} เนื่องจากโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นนั้น ค่า i_{L2} แปรผันตรงกับ v_{C1} ดังสมการ (3.4) ในบทที่ 3 โดยที่ v_{C1} ได้จากการชาร์จกระแส และคายประจุ จากกระแส i_{L1} โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นประกอบด้วยอินพุตสำหรับตัวควบคุมฟัซซี (FC Inputs) กระบวนการควบคุมฟัซซี (FC Process) และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี (FC Output) แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

จากโครงสร้างการควบคุมฟัซซีดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอินพุตสำหรับตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือแรงดันเอาต์พุต (V_O) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (i_{L1}) โดยอินพุตค่าแรกของตัวควบคุมฟัซซีคือค่าความผิดพลาดของแรงดัน (ΔV) เป็นค่าผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิง V_{ref} และ V_O แสดงดังสมการ (4.1)

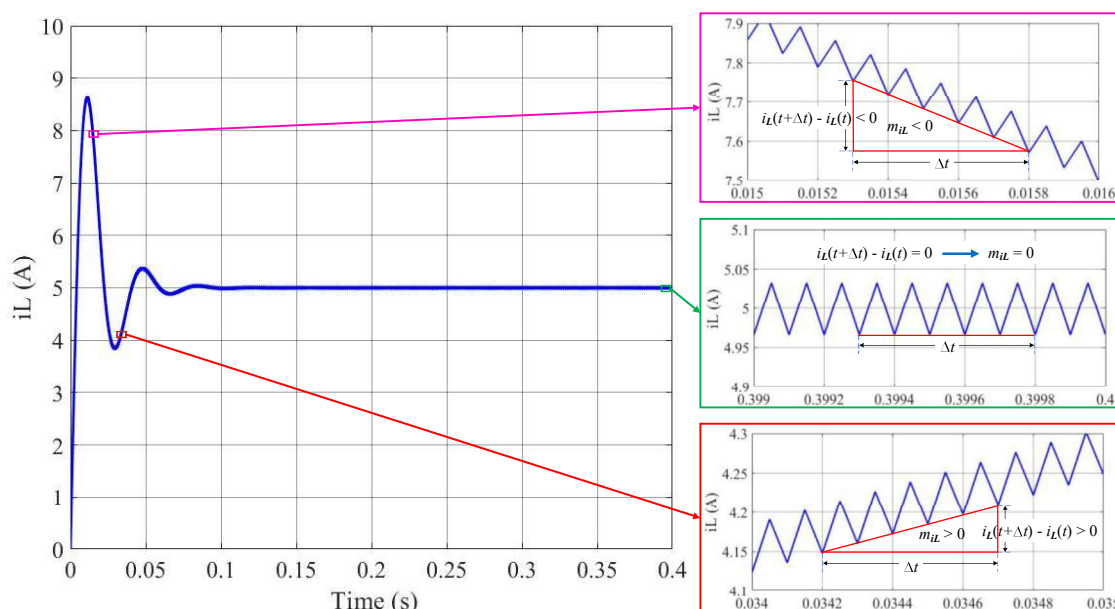
$$\Delta V = V_{ref} - V_O \quad (4.1)$$

ก่อนนำค่า ΔV เข้าสู่กระบวนการฟิชชี ได้ดำเนินการปรับค่าสเกล หรือเรียกว่าการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) เพื่อให้ค่า ΔV อยู่ภายในขอบเขตที่การควบคุมฟิชชี สามารถทำงานได้อย่างครอบคลุม โดยหารค่า ΔV ด้วย V_{ref} แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการฟิชชีต่อไป

ส่วนอินพุตค่าที่สองของตัวควบคุมฟิชชีคืออัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา หรือความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง (m_{iL1}) ดังแสดงสมการ (4.2) ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง ณ เวลาใด ๆ ($i_{L1}(t)$) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งในอดีต ($i_{L1}(t-\Delta t)$) ส่วนด้วยการเปลี่ยนแปลงของเวลา (Δt)

$$m_{iL1} = \frac{i_{L1} t - i_{L1} t - \Delta t}{\Delta t} \quad (4.2)$$

ทั้งนี้การพิจารณาค่า Δt จะกำหนดให้มีค่ามากกว่าคาบการสวิตช์ T_s โดยรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสวิตช์ ($u(t)$) และ i_{L1} โดยเมื่อสวิตช์นำกระแส (ON) พบว่าค่ากระแส i_{L1} จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากการสะสมพลังงาน ดังนั้น m_{iL1} จะเป็นบวก และหากสวิตช์หยุดนำกระแส (OFF) จะทำให้ค่ากระแส i_{L1} มีค่าลดลงจากการคายพลังงาน ดังนั้น m_{iL1} จะเป็นลบ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1

ก่อนนำค่า m_{iL1} เข้าสู่กระบวนการฟิชชีจะดำเนินการปรับค่าสเกล เพื่อให้ m_{iL1} อยู่ภายในขอบเขตการควบคุมฟิชชี สามารถทำงานได้อย่างครอบคลุม โดยทำการหารด้วยค่าความชันอ้างอิง (m_{ref}) แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการฟิชชีต่อไป จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ค่า m_{ref} สามารถพิจารณาได้จาก Δi_{L1} ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังแสดงในสมการที่ (3.43) ที่ได้จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และค่า Δt ที่พิจารณาไว้ ดังแสดงในสมการที่ (4.3) โดยที่ D คือค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามที่ทำงานพร้อมกัน

$$m_{ref} \geq \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{DV_{in}}{\Delta t f_s L_1} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) หากค่า m_{ref} มีค่าน้อยจะส่งผลให้การทำงานของวงจรเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้า จะได้ค่ากระแสอ้างอิง (I_{ref}) ดังสมการที่ (4.4) ซึ่งจะนำไปใช้ในการอธิบายหลักการออกแบบกฎทางฟิชชีในขั้นถัดไป

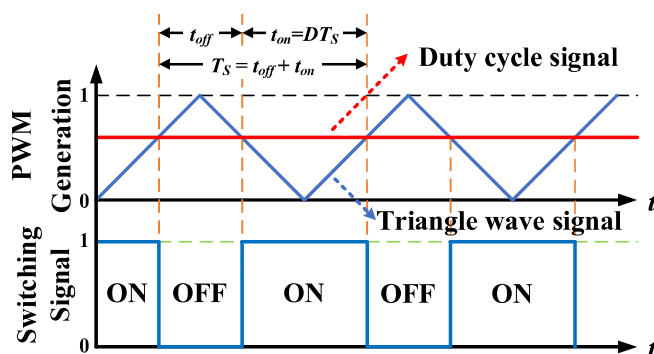
$$I_{ref} = m_{ref} \Delta t \quad (4.4)$$

เอาต์พุตของตัวควบคุมฟิชชีคือการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (ΔD) จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการสร้างค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (Duty cycle generation) โดยค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ในปัจจุบัน (D_n) จะได้จากการนำค่าวัฏจักรหน้าที่ก่อนหน้า (D_{n-1}) บวกกับการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ปัจจุบัน (ΔD) ดังสมการที่ (4.5)

$$D_n = D_{n-1} + \Delta D \quad (4.5)$$

เอาต์พุตของตัวควบคุมฟิชชี ΔD อาจมีค่าเป็นบวก ศูนย์ หรือลบ เพื่อปรับค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์เพิ่มขึ้นหรือลดลงเหมาะสมต่อการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นโดยจะขึ้นอยู่กับการออกแบบกฎในระบบฟิชชีของผู้เชี่ยวชาญ สุดท้ายจะเข้าสู่กระบวนการสร้างสัญญาณการสวิตช์ (Pulse width modulation generation) สำหรับสวิตช์ทั้งสามตัว โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่า D กับสัญญาณรายคาบรูปฟันเลื่อย (Sawtooth wave signal) หรือสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม (Triangle wave signal) โดยหากค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์มากกว่า หรือเท่ากับ

สัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมจะให้สัญญาณการสวิตช์ที่เป็นเปิด (ON) หรือสวิตช์นำกระแส ในทางตรงกันข้ามหากค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์น้อยกว่าสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมจะให้สัญญาณการสวิตช์ที่เป็นปิด (OFF) หรือสวิตช์หยุดนำกระแส ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณการสวิตช์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กระบวนการสร้างสัญญาณการสวิตช์ (PWM generation)

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นพบว่าเมื่อค่า D เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ i_{L1} และ V_O เพิ่มขึ้น ในตรงกันข้ามหากค่า D ลดลง ส่งผลให้ i_{L1} และ V_O ลดลงเช่นกัน

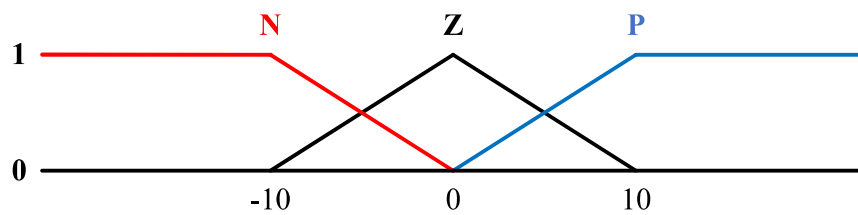
จุดประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีคือต้องการให้ผลตอบสนองของ V_O ไม่เกิดการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราว และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องควบคุม i_{L1} ให้มีความชันตามต้องการ ด้วยการปรับค่า D ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีนี้นได้นิยามความหมายของ ΔV ในรูปของภาษา “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ซึ่งหมายถึง $V_O > V_{ref}$, $V_O = V_{ref}$ และ $V_O < V_{ref}$ ตามลำดับ ในส่วนของ m_{iL1} ถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปของภาษา “Negative Large: NL”, “Negative Medium: NM” “Zero: Z” “Positive Medium: PM” และ “Positive Large: PL” รายละเอียดตัวแปรทางภาษานั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.1 ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function)

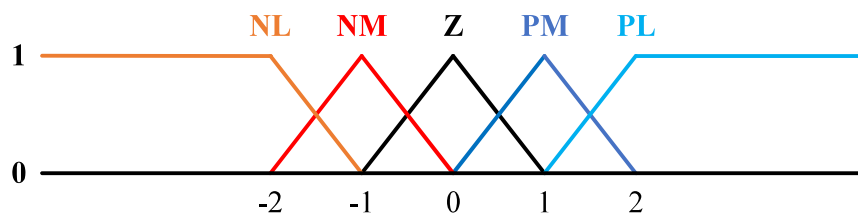
จากพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกระหว่างฟัซซีเซตของค่า ΔV และ m_{iL1} ที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้วให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

สำหรับฟังก์ชันสมาชิกของ $\Delta V/V_{ref}$ และ m_{iL1}/m_{ref} ใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular) และรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้มีขอบเขตระหว่างเซตที่มีการทับซ้อนแสดงด้วยเส้นตรงที่มีความชัน ซึ่งทำให้ค่าของตัวแปรสามารถมีค่าความเป็นสมาชิกทับซ้อนระหว่างสองเซตได้ ฟังก์ชันสมาชิกนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบฟัซซี

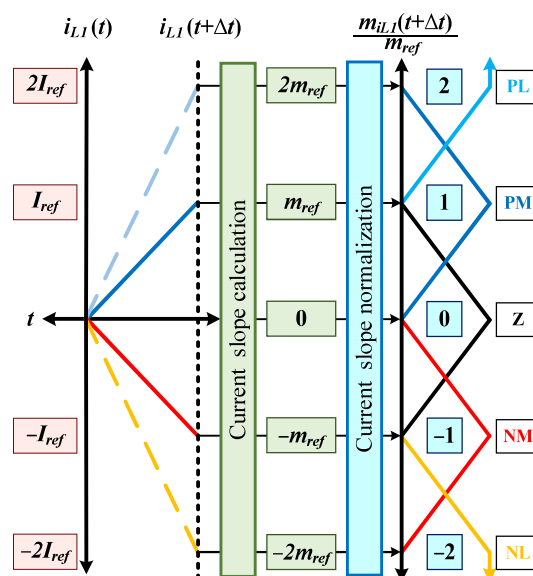
ลอจิกสามารถจำลองความรู้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานต่าง ๆ ของวงจร ในการออกแบบ ขอบเขตระหว่างเซตจะพิจารณาวจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีแหล่งจ่าย ไฟฟ้า 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตเป็น 400V สำหรับโหลดตัวต้านทาน 1600Ω ซึ่งจะได้ กำลังไฟฟ้าเป็น 100W อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน ซึ่งจุดการทำงานที่เปลี่ยนไปนั้น ส่งผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตให้เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันสมาชิกนอร์มัลไลซ์ของความผิดพลาดของแรงดัน ($\Delta V/V_{ref}$)



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันสมาชิกนอร์มัลไลซ์ของความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{IL1}/m_{ref})



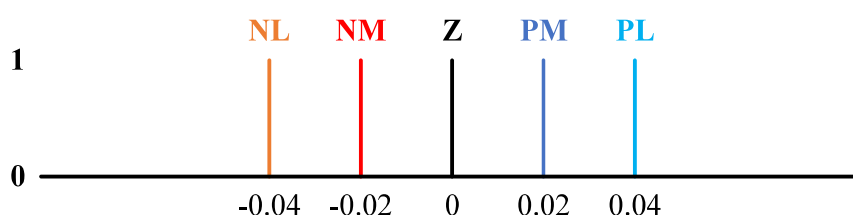
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ และฟังก์ชันสมาชิก m_{IL1}/m_{ref}

เมื่อพิจารณา i_{L1} ณ เวลาใด ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ร่วมกับฟังก์ชันสมาชิกของ m_{iL1}/m_{ref} ในช่วง Δt ที่พิจารณา ร่วมกับค่า I_{ref} ในสมการที่ (4.4) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 5 กรณี ดังนี้

- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = 2I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = 2$ ที่เป็นสมาชิกของเซต PL
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = 1$ ที่เป็นสมาชิกของเซต PM
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = 0$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = 0$ ที่เป็นสมาชิกของเซต Z
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = -I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = -1$ ที่เป็นสมาชิกของเซต NM
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = -2I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = -2$ ที่เป็นสมาชิกของเซต NL

จากความสัมพันธ์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ และฟังก์ชันสมาชิก m_{iL1}/m_{ref} แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ส่วนฟังก์ชันสมาชิกของ ΔD จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงทอน ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (ΔD)

4.2.2 ตัวแปรภาษา (Linguistic variable)

ระบบฟัซซีลอจิกประกอบไปด้วยฟัซซีเซตที่ทำหน้าที่ระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรภายในระบบ จะสังเกตได้ว่าฟัซซีเซตประกอบไปด้วยตัวแปรภาษา (Linguistic variable) ตัวแปรดังกล่าวสามารถเรียกว่าเป็นตัวแปรฟัซซี ตัวแปรฟัซซีจะให้ค่าเป็นคำพูดที่มีความหมายตามที่ต้องการที่เป็นภาษาคำพูดของมนุษย์ ไม่ใช่คอมพิวเตอร์ หรือเครื่องจักร ดังนั้นระบบฟัซซีลอจิกจึงเป็นระบบที่จำลองการสื่อสารของมนุษย์ เช่น ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) มีการใช้ตัวแปรภาษาในการกำหนดกฎเกณฑ์ภายในระบบ

จากโครงสร้างการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อปริมาณในระบบมีการเปลี่ยนแปลง ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในส่วนที่เป็นฟัซซีจะต้องมีการควบคุมให้มีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมด้วย โดยตัวแปรที่ใช้สำหรับคำสั่งของระบบคือค่า ΔV และ m_{iL1} หลังจากนั้นอินพุตดังกล่าวจะถูกนอร์มัลไลซ์ให้อยู่ในขอบเขตที่

ต้องการก่อนเข้าสู่กระบวนการฟัซซี ดังนั้นระบบในที่นี่จึงมี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุตที่เป็น ΔD แสดงในตารางที่ 4.1 โดยตัวแปรภาษา และค่าเชิงภาษามีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรภาษาของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ความหมาย	ตัวแปรภาษา	ความหมายตัวแปร
อินพุตที่ 1	$\Delta V/V_{ref}$	ค่าออร์มัลไลซ์ของ ความผิดพลาดของ แรงดัน	Negative: N Zero: Z Positive: P	ลบ ศูนย์ บวก
อินพุตที่ 2	m_{iL1}/m_{ref}	ค่ามัลไลซ์ของ ความชันกระแสที่ ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำตัวที่ 1	Negative Large: NL Negative Medium: NM Zero: Z Positive Medium: PM Positive Large: PL	ลบมาก ลบปานกลาง ศูนย์ บวกปานกลาง บวกมาก
เอาต์พุต	ΔD	การเปลี่ยนแปลง ของค่าวัฏจักร หน้าที่สวิตช์	Negative Large: NL Negative Medium: NM Zero: Z Positive Medium: PM Positive Large: PL	ลบมาก ลบปานกลาง ศูนย์ บวกปานกลาง บวกมาก

4.2.3 กฎของฟัซซี (Fuzzy Rule)

กฎของฟัซซีเป็นวิธีการนำเอาความเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของวงจรจากผู้สังเกตการณ์มาออกแบบให้อยู่ในระบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือส่วนถ้า (IF) และส่วนแล้ว (THEN) เมื่อค่าเงื่อนไขใน IF เป็นจริง ส่วน THEN จะถูกประเมิน ในทฤษฎีฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้น ๆ ด้วย ค่าเงื่อนไขในส่วนของ IF ยังสามารถมีได้หลายค่าเช่นเดียวกันกับส่วน THEN ทุกเงื่อนไขในส่วน IF จะถูกประเมินพร้อม ๆ กัน และรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต โดยปกติมักจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้น การควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นซึ่งมี

สองอินพุต ได้แก่ $\Delta V/V_{ref}$ และ m_{iL1}/m_{ref} และเอาต์พุตคือ ΔD สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 รูปแบบการแสดงกฎของฟัซซีดังกล่าวเรียกว่าหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ (Fuzzy associative memory) ซึ่งการออกแบบกฎของฟัซซีระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

1 st	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PL$	THEN $\Delta D = NL$
2 nd	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PM$	THEN $\Delta D = NL$
3 rd	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = Z$	THEN $\Delta D = NM$
4 th	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NM$	THEN $\Delta D = Z$
5 th	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NL$	THEN $\Delta D = PM$
6 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PL$	THEN $\Delta D = NL$
7 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PM$	THEN $\Delta D = NM$
8 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = Z$	THEN $\Delta D = Z$
9 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NM$	THEN $\Delta D = PM$
10 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NL$	THEN $\Delta D = PL$
11 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PL$	THEN $\Delta D = NM$
12 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PM$	THEN $\Delta D = Z$
13 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = Z$	THEN $\Delta D = PM$
14 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NM$	THEN $\Delta D = PL$
15 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NL$	THEN $\Delta D = PL$

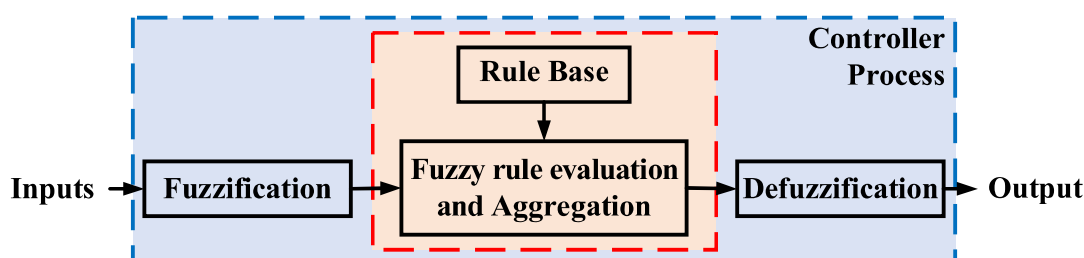
ตารางที่ 4.2 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่พัฒนาขึ้น

$\Delta V/V_{ref}$ m_{iL1}/m_{ref}	N	Z	P
PL	NL	NL	NM
PM	NL	NM	Z
Z	NM	Z	PM
NM	Z	PM	PL
NL	PM	PL	PL

กฎฟuzzy ทั้ง 15 กฎนี้จะใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อกระบวนการควบคุม

4.2.4 การอนุมานฟuzzy (Fuzzy Inference)

การอนุมานฟuzzy สามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (Mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาต์พุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟuzzy แบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference) ถูกใช้สำหรับการควบคุมฟuzzy สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การทำฟuzzy การประเมินกฎของฟuzzy การรวมกฎ และการทำดีฟuzzy ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของการควบคุมแบบฟuzzy

การทำฟuzzy (Fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟuzzy จะต้องทำการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตดังกล่าวของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ในระบบ จะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข หลังจากนั้นแล้วค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้น ๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟuzzy ของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟuzzy ด้วยเช่นกัน เนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่ง ๆ จะมีผลต่อกฎของฟuzzy บางข้อเท่านั้น

การควบคุม (Controller) ประกอบด้วยสองส่วนประกอบด้วยส่วนที่หนึ่งคือการการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟuzzy (Fuzzy rule evaluation) จะเป็นขั้นตอนถัดไปหลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมด ซึ่งจะเป็นส่วน IF จุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องกระทำในส่วน THEN ต่อไป ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อม ๆ กัน เนื่องจากมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟuzzy เซต เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าส่วน THEN ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป ส่วนที่สองคือการรวมกฎ (Aggregation) เป็นกระบวนการหลังจากกฎ

ต่าง ๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า หรือปรับขนาดทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต การรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน ในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดียวเพื่อนำเอาไปใช้ในการประมวลผลต่อไป

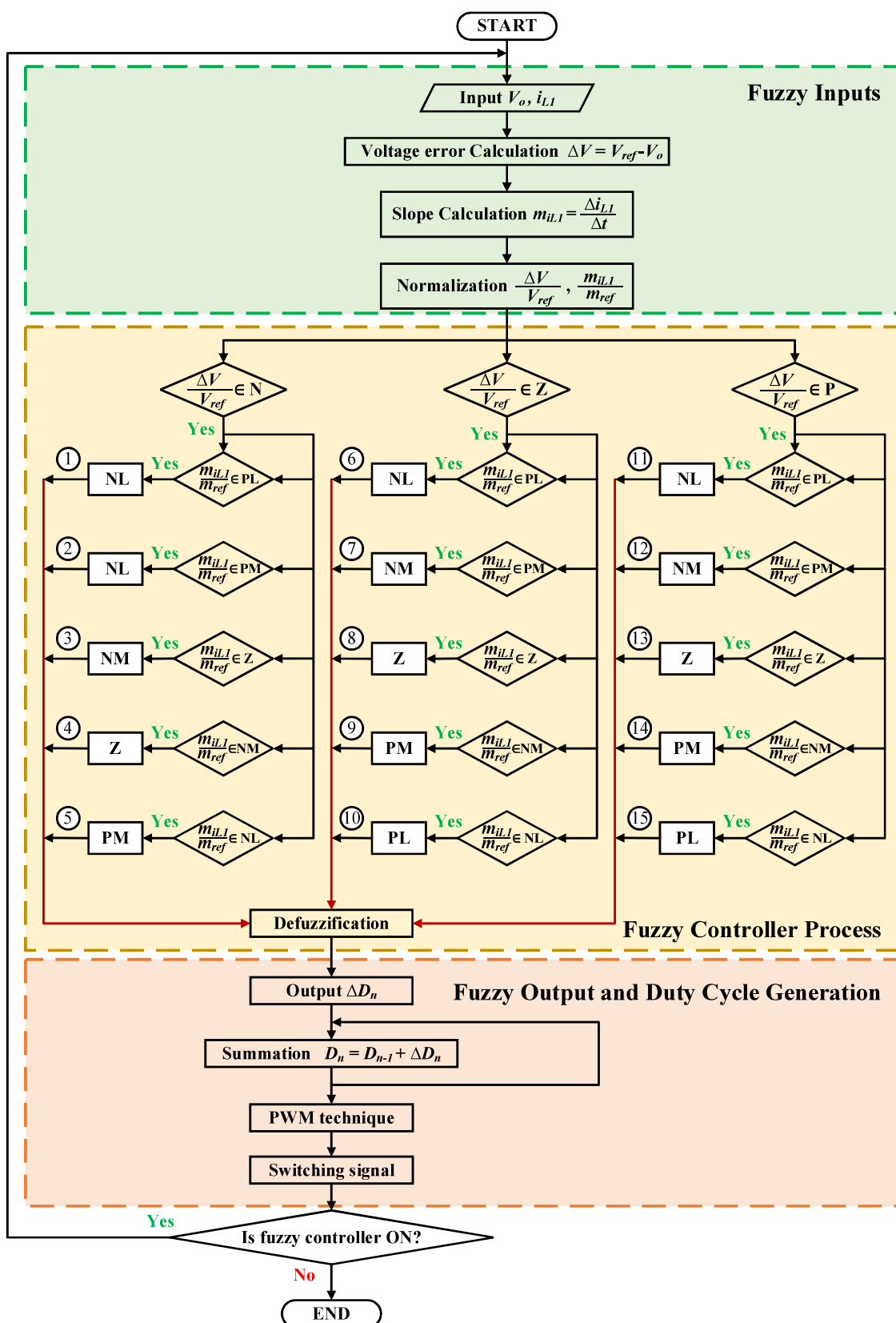
การทำดีฟัซซี (Defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่าง ๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่าง ๆ หรือเอาต์พุต ค่าของเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (Crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

สำหรับการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference) ค่าเอาต์พุตของแต่ละกฎจะเป็นเส้นตรงโทน ดังรูปที่ 4.7 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีนี้นี้เรียกว่าค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weighted average: WA) ดังสมการที่ (4.6)

$$\Delta D = \frac{\sum_{i=1}^N y_i u_i}{\sum_{i=1}^N u_i} \quad (4.6)$$

โดยที่ y_i คือ เอาต์พุตจากแต่ละกฎ
 u_i คือ เอาต์พุตของแต่ละสมาชิกฟังก์ชัน
 N คือ จำนวนกฎ

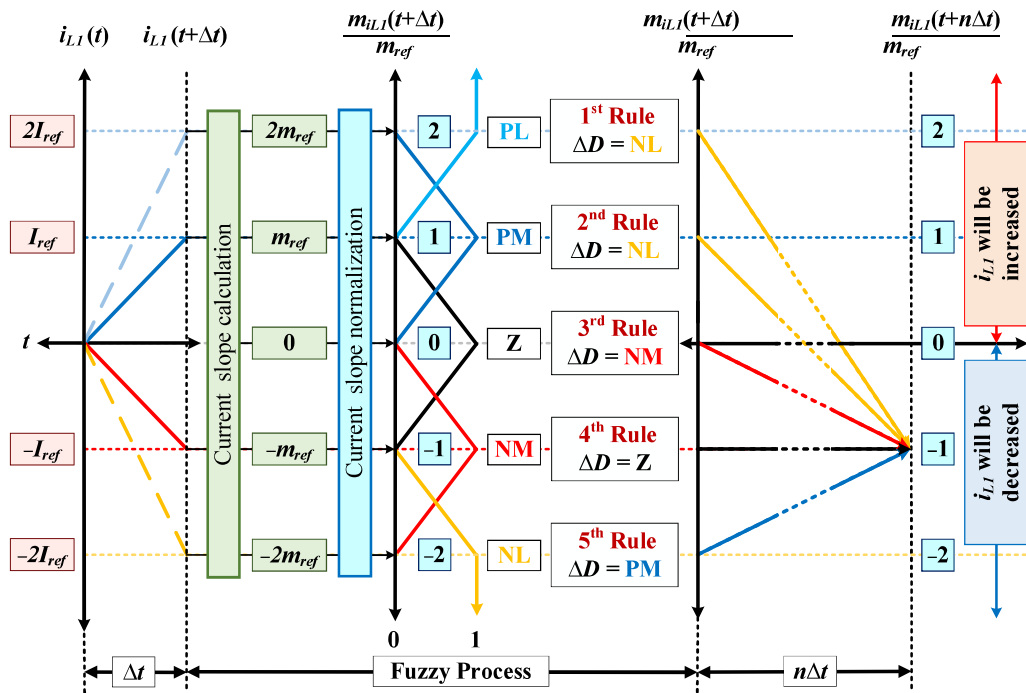
จากการออกแบบการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่กล่าวมาข้างต้น สามารถอธิบายด้วยโครงสร้างการควบคุมฟัซซีดังรูปที่ 4.9 โดยค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ในปัจจุบัน (D_n) จะได้จากการนำค่าวัฏจักรหน้าที่ก่อนหน้า (D_{n-1}) บวกกับการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ปัจจุบัน (ΔD)



รูปที่ 4.9 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

4.2.5 กระบวนการควบคุม (Control Process)

จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถออกแบบการควบคุมฟัซซี โดยพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกของ $\Delta V/V_{ref}$ อีกทั้งหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.2 สามารถแยกกระบวนการควบคุมออกได้เป็น 3 กรณี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

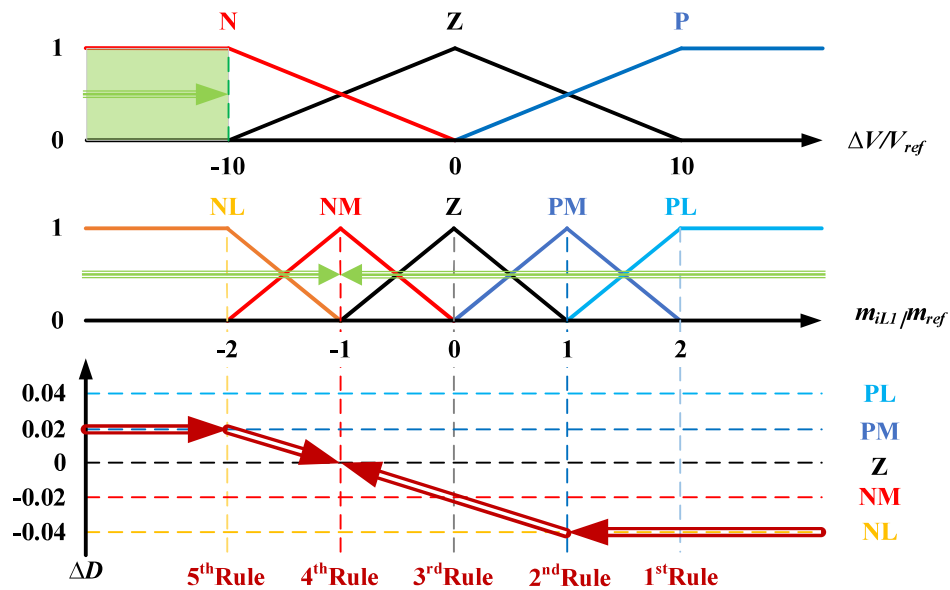


รูปที่ 4.10 กระบวนการฟัซซีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in N$

กรณีที่ 1 $\Delta V/V_{ref}$ เป็นสมาชิกของเซตลบ ($\Delta V/V_{ref} \in N$) ก็ต่อเมื่อ V_o มีค่ามากกว่า V_{ref} กระบวนการฟัซซีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟัซซีข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 5 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟัซซีข้อที่ 1 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} เป็นบวกค่ามากอยู่ในเซต PL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบมาก (NL) เพื่อทำให้ค่า m_{iL1} ลดลงมากเข้าหา $-m_{ref}$
- 2) กฎฟัซซีข้อที่ 2 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบมาก (NL) เพื่อทำให้ค่า m_{iL1} ลดลงมากเข้าหา $-m_{ref}$

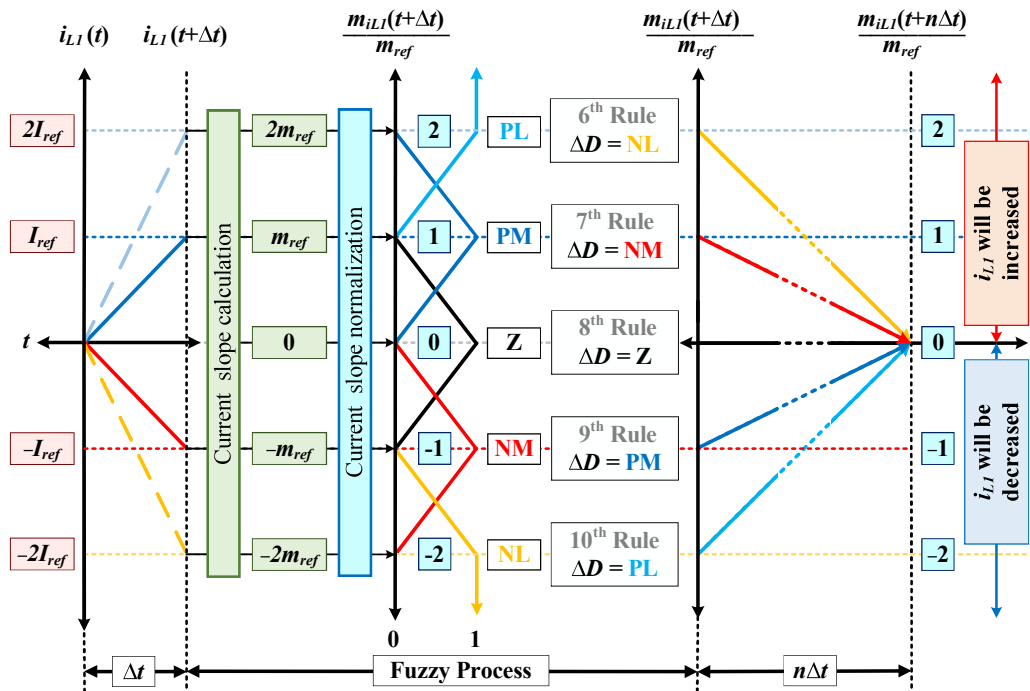
- 3) กฎฟuzzyข้อที่ 3 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าประมาณศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบปานกลาง (NM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงไม่มากนักเข้าหา $-m_{ref}$
- 4) กฎฟuzzyข้อที่ 4 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบปานกลางอยู่ในเซต NM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องคงค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่เป็นศูนย์ (Z) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} มีค่าลบพอดีประมาณ $-m_{ref}$
- 5) กฎฟuzzyข้อที่ 5 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบมากอยู่ในเซต NL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกปานกลาง (PM) เพื่อจะทำให้ค่า m_{iL1} มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเข้าหา $-m_{ref}$
- จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_O มีค่ามากกว่า V_{ref} ส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzyจะสร้าง ΔD ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าเข้าหา $-m_{ref}$ เพื่อให้ i_{L1} มีค่าลดลง ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ V_O มีค่าลดลงเข้าหา V_{ref} โดยกระบวนการฟuzzyข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และจากกระบวนการฟuzzyข้างต้นสามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in N$

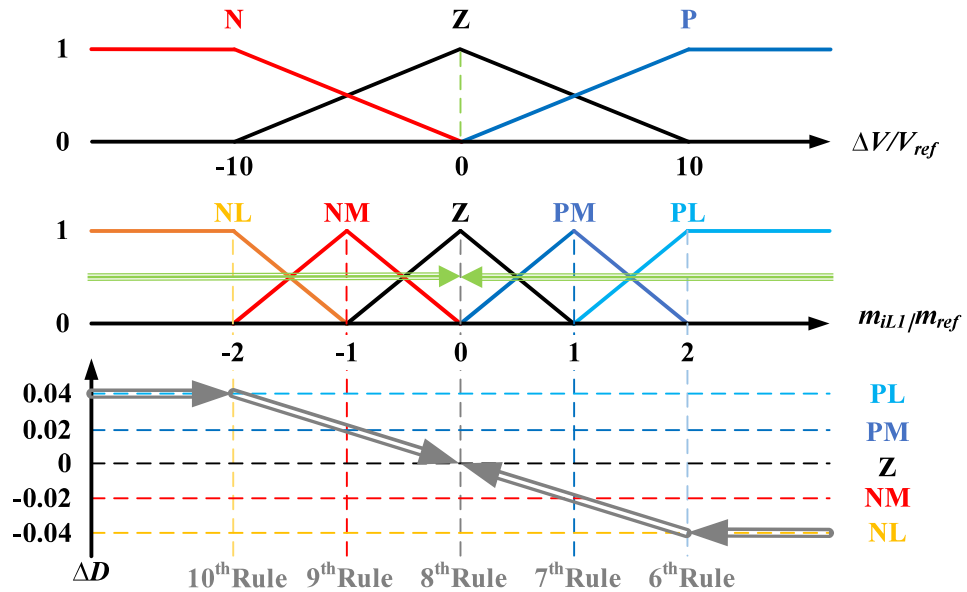
กรณีที่ 2 $\Delta V/V_{ref}$ เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($\Delta V/V_{ref} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ V_O มีค่าประมาณ V_{ref} กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟuzzyข้อที่ 6 ถึงกฎที่ 10 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 6) กฎฟuzzyข้อที่ 6 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่ามากอยู่ในเซต PL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบมาก (NL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงมาก ๆ เข้าหาศูนย์
- 7) กฎฟuzzyข้อที่ 7 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบปานกลาง (NM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงไม่มากนัก เข้าหาศูนย์
- 8) กฎฟuzzyข้อที่ 8 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าประมาณศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องคงค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่เป็นศูนย์ (Z) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} คงค่าที่ประมาณศูนย์
- 9) กฎฟuzzyข้อที่ 9 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบปานกลางอยู่ในเซต NM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกปานกลาง (PM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นไม่มากนักเข้าหาศูนย์
- 10) กฎฟuzzyข้อที่ 10 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบมากอยู่ในเซต NL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกมาก (PL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นมากเข้าหาศูนย์



รูปที่ 4.12 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in Z$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_O มีค่าประมาณ V_{ref} ส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzyจะสร้าง ΔD ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าเข้าหาศูนย์ เพื่อให้ i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลง หลังจากนั้นจะคงค่ากระแส ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ V_O มีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลง หลังจากนั้นจะคงค่าแรงดันที่ V_{ref} โดยกระบวนการฟuzzyข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และสามารถพิจารณาในรูปฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD แสดงดังรูปที่ 4.13



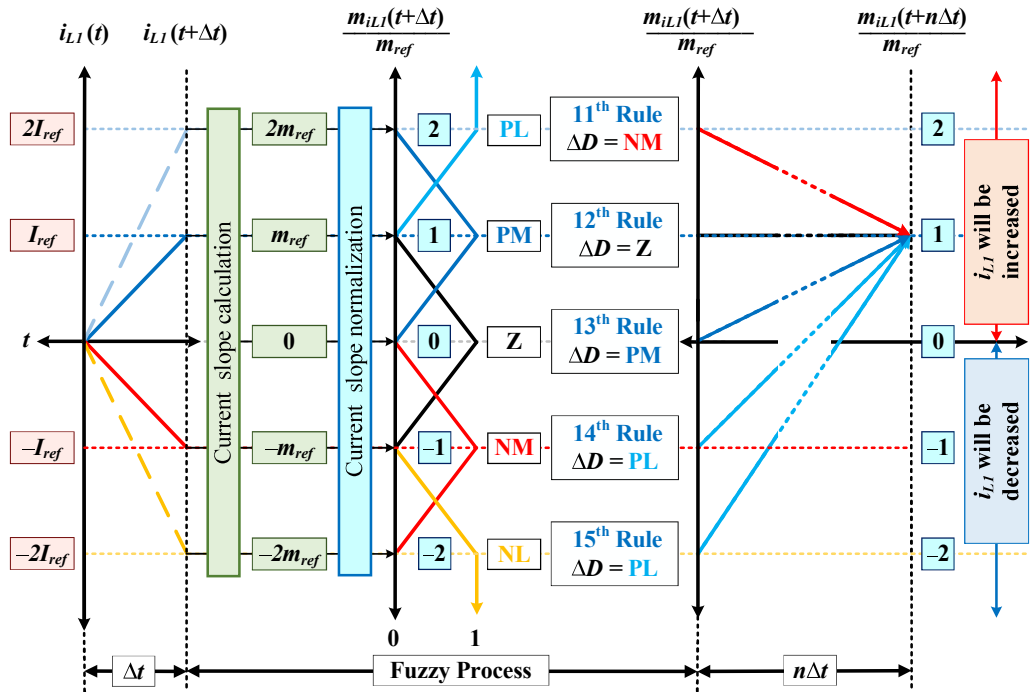
รูปที่ 4.13 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in Z$

กรณีที่ 3 $\Delta V/V_{ref}$ เป็นสมาชิกของเซตบวก ($\Delta V/V_{ref} \in P$) ก็ต่อเมื่อ V_O มีค่าน้อยกว่า V_{ref} กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟuzzyข้อที่ 11 ถึงกฎที่ 15 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 11) กฎฟuzzyข้อที่ 11 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีบวกค่ามากอยู่ในเซต PL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบปานกลาง (NM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงไม่มากนักเข้าหา m_{ref}
- 12) กฎฟuzzyข้อที่ 12 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องคงค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่เป็นศูนย์ (Z) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} คงค่าที่ m_{ref}
- 13) กฎฟuzzyข้อที่ 13 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าประมาณศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการ

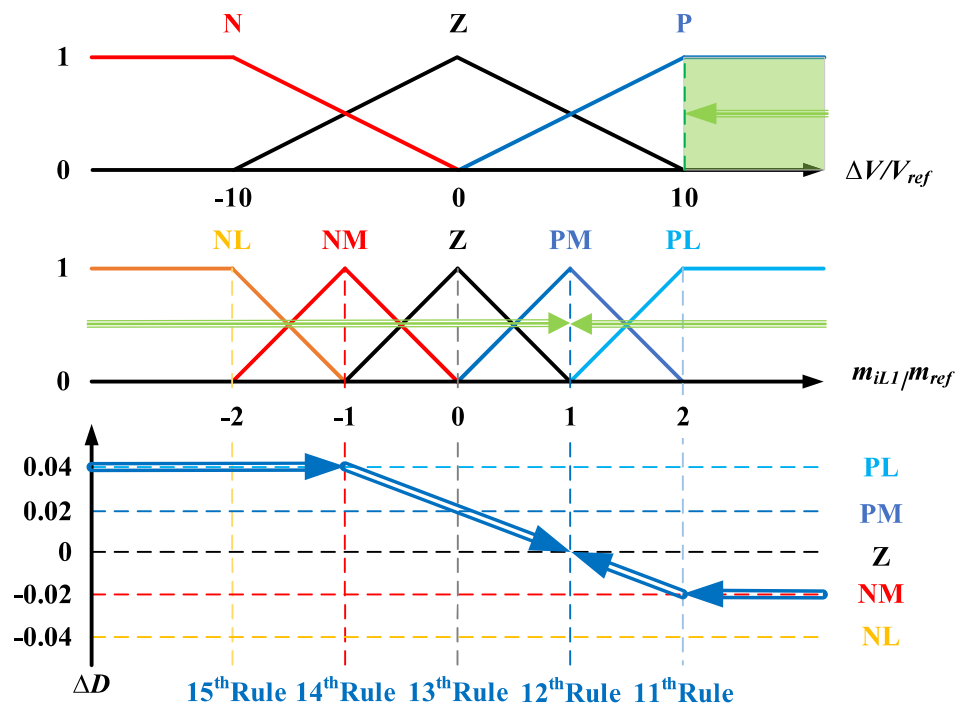
สร้าง ΔD ที่เป็นบวกปานกลาง (PM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นไม่มากนักเข้าหา m_{ref}

- 14) กฎฟuzzyข้อที่ 14 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบปานกลางอยู่ในเซต NM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกมาก (PL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นมากเข้าหา m_{ref}
- 15) กฎฟuzzyข้อที่ 15 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบมากอยู่ในเซต NL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกมาก (PL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นมากเข้าหา m_{ref}



รูปที่ 4.14 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in P$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_O มีค่าน้อยกว่า V_{ref} ส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzyจะสร้าง ΔD ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าเข้าหา m_{ref} เพื่อให้ i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ V_O มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} โดยกระบวนการฟuzzyข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และสามารถพิจารณาในรูปฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{IL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in P$

จากการออกแบบฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$ ที่มีการทับซ้อนกันระหว่างเซต ดังนั้น $\Delta V/V_{ref}$ ที่ได้สามารถเป็นสมาชิกของ เซตลบ ร่วมกับ เซตศูนย์ ($\Delta V/V_{ref} \in N \& Z$) และเซตศูนย์ ร่วมกับ เซตบวก ($\Delta V/V_{ref} \in Z \& P$) อีกทั้งฟังก์ชันสมาชิก m_{IL1}/m_{ref} ที่มีการทับซ้อนกันระหว่างเซต เช่นกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่ค่าอินพุตทั้งสองจะเข้าเงื่อนไขกฎฟัซซีได้มากที่สุด 4 ข้อ อย่างไรก็ตามการทำให้ฟัซซีจะทำหน้าที่แปลงค่าจากผลการรวมกฎฟัซซีให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน นั่นคือ ΔD ที่เหมาะสม เพื่อควบคุมให้ V_O มีค่าเท่ากับ V_{ref} ในสถานะอยู่ตัว

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจร นำไปสู่กระบวนการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นได้ดังตารางที่ 4.3

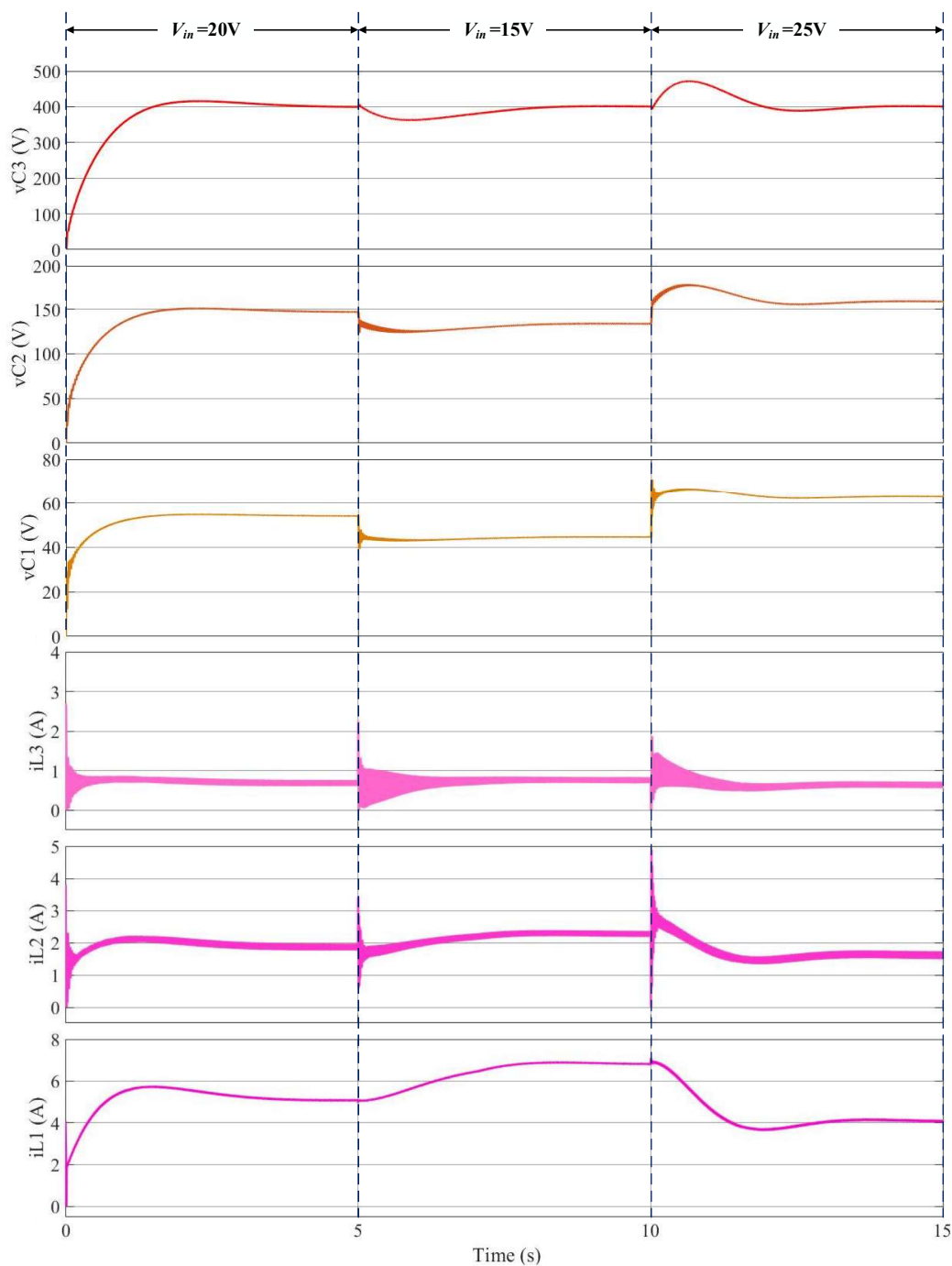
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
การเปลี่ยนแปลงของเวลา	Δt	500	μs
ความชันอ้างอิง	m_{ref}	100	A/s

4.3 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น

จากการออกแบบการควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นดังที่อธิบายข้างต้น สามารถยืนยันประสิทธิภาพ ด้วยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซี่ อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์รวมเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V, 15V และ 25V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{ref} ที่ 400V และ R ที่ 1600Ω ผลการจำลองสถานการณ์ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.16 ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน โดยที่มี V_{in} เป็น 20V จ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง สังเกตเห็นว่า V_O หรือ V_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400 V โดยใช้เวลาประมาณ 2s ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะคงที่ประมาณ 5A, 1.85A และ 0.6875A ตามลำดับ หลังจากนั้น ณ เวลาที่ 5s แรงดัน V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นว่า V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} มีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของ V_{in} หลังจากนั้น V_{C3} ถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ที่ 400V โดยที่ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อคงค่ากำลังไฟฟ้าไว้ที่ 100W โดย i_{L1} มีค่าคงที่ประมาณ 6.67A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2.5s และ ณ เวลาที่ 10s แรงดัน V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V จะเห็นว่าหลังจากเปลี่ยนจุดการทำงาน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการพุ่งเกิน หลังจากนั้น V_{C3} ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ 400V ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าลดลงเพื่อคงค่ากำลังไฟฟ้าไว้ที่ 100W โดย i_{L1} มีค่าคงที่ประมาณ 4A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2s



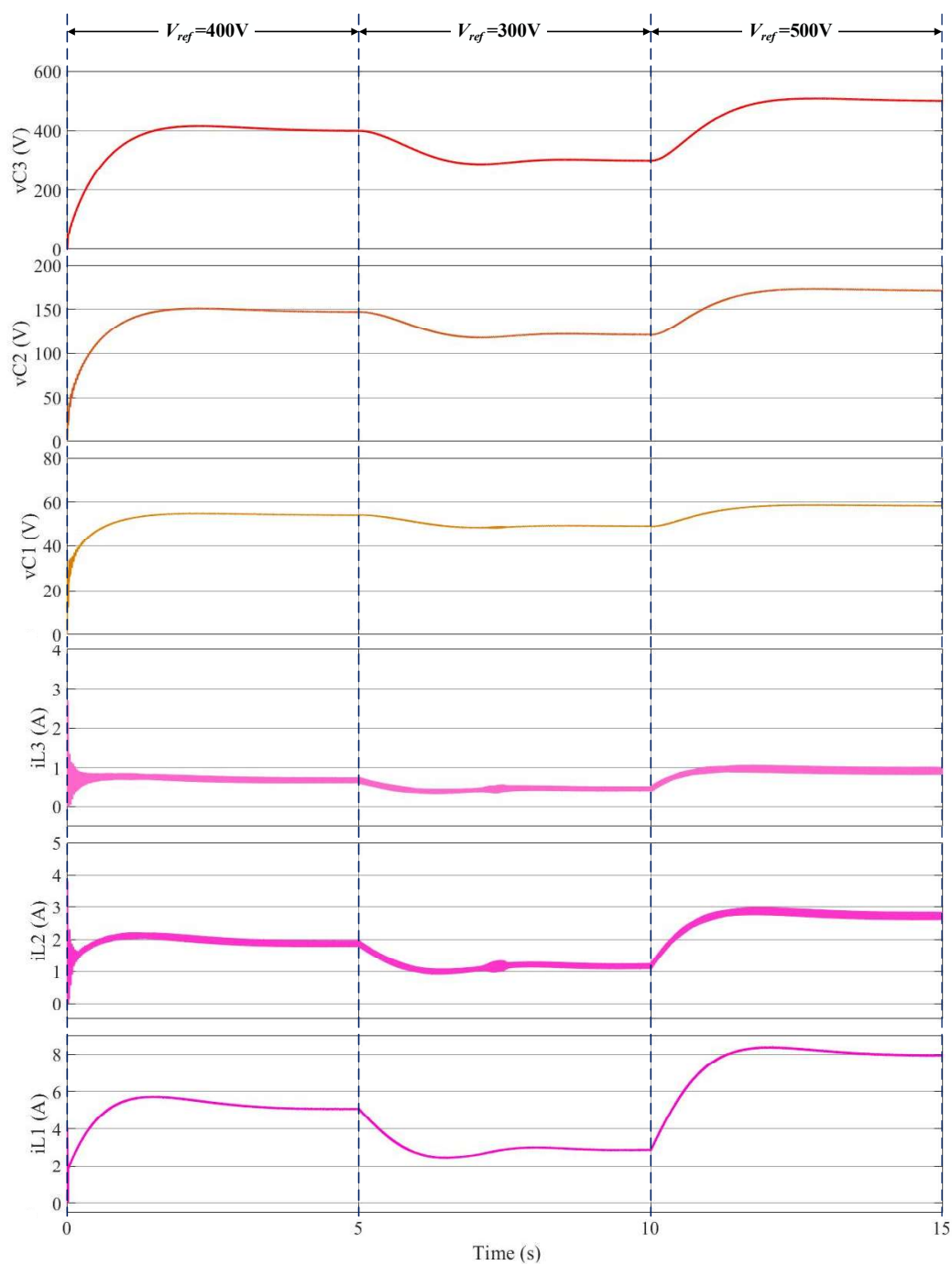
รูปที่ 4.16 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรณี
เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V และ 500V
ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω ผลการจำลอง

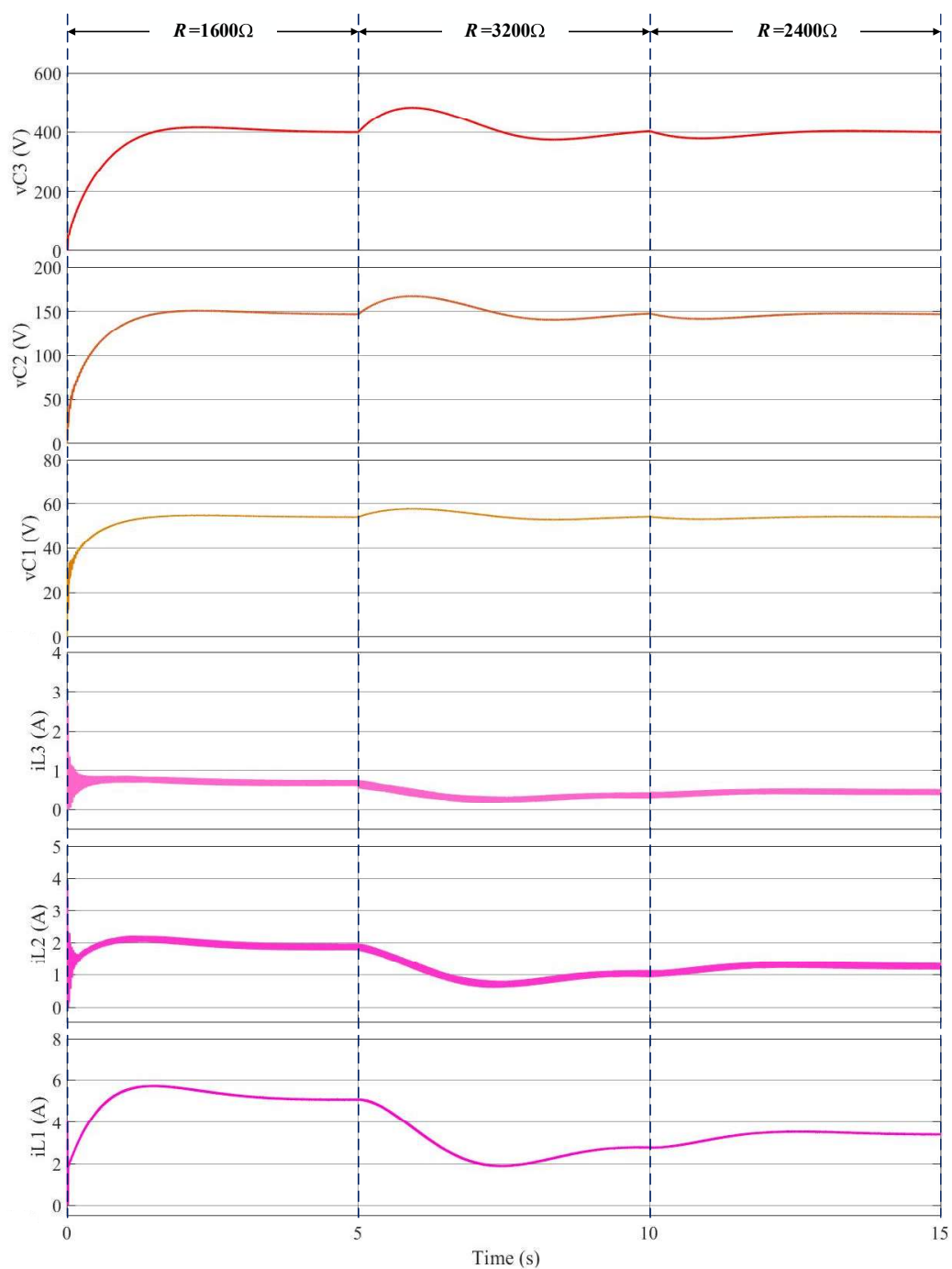
สถานการณ์แรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เมื่อมี V_{in} เป็น 20V จ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า สังเกตเห็นได้ว่า V_O หรือ v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400V โดยใช้เวลาประมาณ 2s ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ และคงที่ประมาณ 5A, 1.85A และ 0.6875A ตามลำดับ หลังจากนั้น V_{ref} จะเปลี่ยนเป็น 300V และ 500V ณ เวลาที่ 5s และ 10s ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษา v_{C3} มีค่าตาม V_{ref} โดยที่ i_{L1} ถูกควบคุมให้มีความชันตาม m_{ref} โดยที่ไม่เกิดการฟุ้งเกิน และใช้เวลาเข้าที่ประมาณ 2s

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω, 3200Ω และ 2400Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V จากผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.18 ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เมื่อมี V_{in} เป็น 20V จะเห็นได้ว่า V_O หรือ v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400 V โดยใช้เวลาประมาณ 2s ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ และคงที่ประมาณ 5A, 1.85A และ 0.6875A ตามลำดับ หลังจากนั้น R ถูกเปลี่ยนจาก 1600Ω เป็น 3200Ω ณ เวลาที่ 5s นั่นคือกำลังไฟฟ้ามมีการเปลี่ยนแปลงจาก 100W เป็น 50W จะเห็นได้ว่าหลังจากเปลี่ยนจุดการทำงาน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} เกิดการฟุ้งเกิน และลดลง โดย v_{C3} ลดลงเข้าหา V_{ref} ที่ 400 โดยที่ i_{L1} ถูกควบคุมให้มีความชันตาม $-m_{ref}$ มีค่าคงที่ประมาณ 2.5A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s และ ณ เวลาที่ 10s R ถูกเปลี่ยนจาก 3200Ω เป็น 2400Ω จะเห็นได้ว่าหลังจากเปลี่ยนจุดการทำงาน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} ลดลงกะทันหัน หลังจากนั้นถูกควบคุมให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{ref} ที่ 400V โดยที่ i_{L1} มีความชันตาม m_{ref} และมีค่าคงที่ประมาณ 3.33A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2s

จากผลการจำลองสถานการณ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพของการควบคุมที่ดี โดยสามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว และเกิดการฟุ้งเกินที่ไม่มากนัก



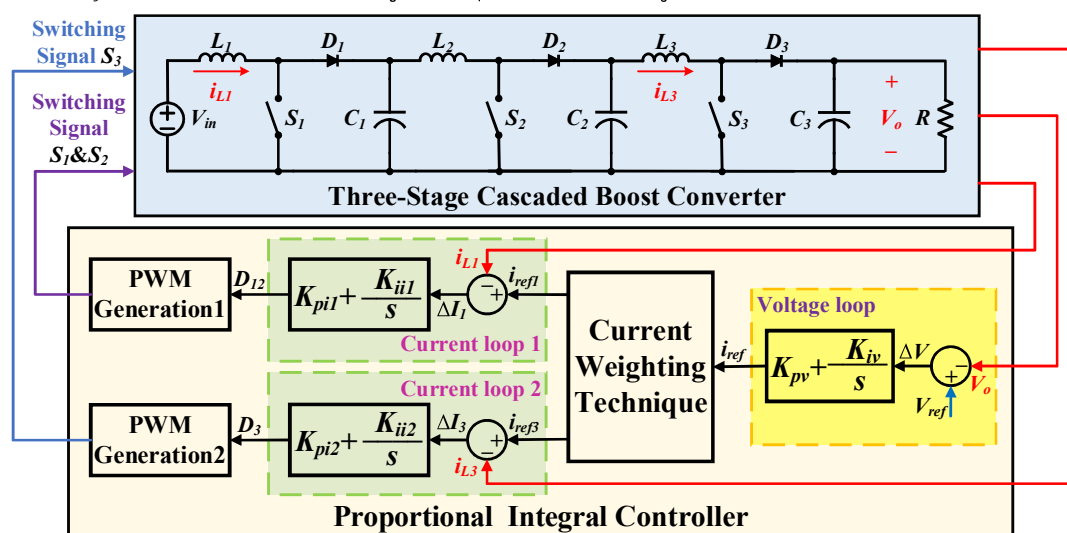
รูปที่ 4.17 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรณี
เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 4.18 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรนี้
เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

4.4 การออกแบบการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

บทนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมพีซีซีทีที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมจะวัดค่ากระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต สำหรับใช้ในการควบคุมลูปกระแสและลูปแรงดัน ไม่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Khwan-on and Diewsurin, 2018) ดังนั้นจึงพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีซีซีทีที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ การออกแบบการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม โดยมีการตรวจวัดค่าแรงดัน V_o และตรวจวัดกระแส i_{L1} และ i_{L3} เพื่อส่งค่าที่ตรวจวัดได้ไปยังตัวควบคุมพีไอ ซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งลูป (PI Voltage Loop) และลูปควบคุมกระแสสองลูป (PI Current Loops) เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสวิตช์ (S_1, S_2, S_3) ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังอาศัยการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วยปรับค่ากระแสอ้างอิง (i_{ref}) ให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป



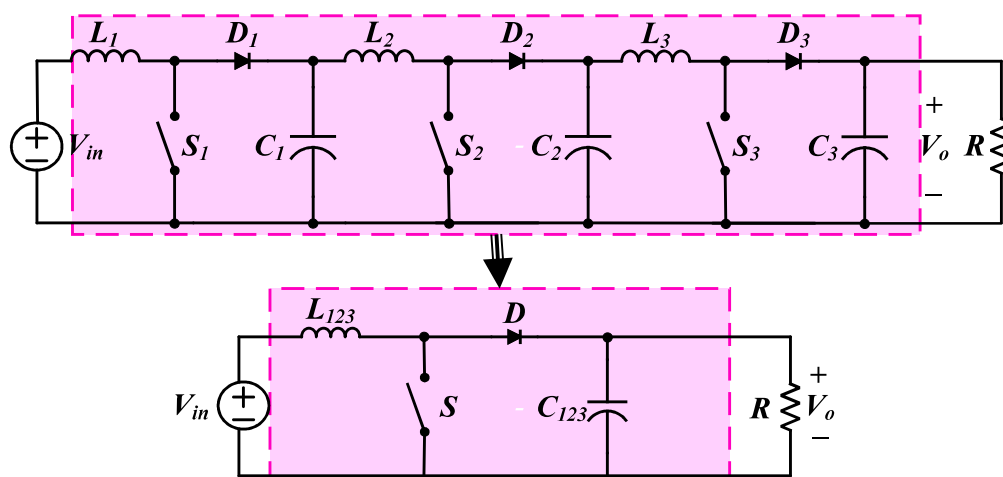
รูปที่ 4.19 โครงสร้างการควบคุมพีไอควบคู่กับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

กระบวนการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเริ่มจากการตรวจวัด V_o เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ V_{ref} ก่อนนำเข้าสู่ลูปควบคุมแรงดัน ที่ได้รับการออกแบบ

จากพารามิเตอร์ (K_{pv} , K_{iv}) ของตัวควบคุมพีไอ หลังจากนั้นลูปควบคุมแรงดันจะสร้างสัญญาณ i_{ref} สำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสอง โดยจะอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current weighting technique) กระบวนการดังกล่าวจะทำหน้าที่ปรับแก้กระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสอง (i_{ref1} , i_{ref3}) หลังจากนั้นค่ากระแสอ้างอิงทั้งสองจะถูกส่งไปให้ลูปควบคุมกระแสทั้งสองเพื่อเปรียบเทียบกับค่า i_{L1} และ i_{L3} ที่ตรวจวัดได้ตามลำดับ โดยลูปควบคุมกระแสจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ตัวควบคุม (K_{p1} , K_{i1} , K_{p2} , K_{i2}) จากการออกแบบ โดยลูปควบคุมกระแสแต่ละลูปจะสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์เปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Signal) โดยลูปควบคุมกระแสที่หนึ่งที่มีอินพุตเป็นผลเปรียบเทียบระหว่าง i_{ref1} และ i_{L1} เอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวที่ 1 และ 2 (S_1 , S_2) ส่วนลูปควบคุมกระแสที่สองที่มีอินพุตเป็นผลเปรียบเทียบระหว่างค่า i_{ref3} และ i_{L3} เอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวที่ 3 (S_3) การออกแบบตัวควบคุมพีไอประกอบด้วย 2 ส่วน คือการออกแบบการควบคุมลูปแรงดัน และการออกแบบการควบคุมลูปกระแส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.19

4.4.1 การออกแบบลูปควบคุมแรงดัน (PI Voltage Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นได้อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม ดังรูปที่ 4.20 โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม



รูปที่ 4.20 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับลูปควบคุมแรงดัน

$$L_{123} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (4.7)$$

$$C_{123} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4.8)$$

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสดังรูปที่ 3.13 จะได้ความชันแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุดังสมการที่ (3.22) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ (4.9)

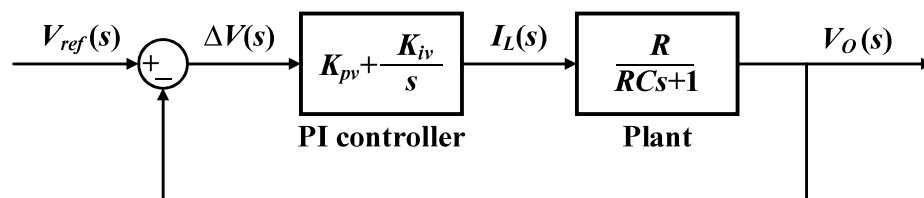
$$CsV_o s = I_L s - \frac{V_o s}{R} \quad (4.9)$$

ดังนั้นจะได้พลานต์ของระบบจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4.10) และตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปควบคุมแรงดันแสดงดังสมการที่ (4.11)

$$\frac{V_o s}{I_L s} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (4.10)$$

$$G_{CV} s = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \quad (4.11)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปควบคุมแรงดันที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนภาพการควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.21 และสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (4.12)



รูปที่ 4.21 แผนภาพการควบคุมพีไอลูควบคุมแรงดัน

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอในลูปควบคุมแรงดัน (K_{pv} , K_{iv}) จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ดังสมการที่ (4.12) กับพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (4.13) เมื่อ ζ คืออัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) และ ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติ โดยกำหนดให้ $\omega_n = 1/RC$ rad/s

$$\frac{V_O}{V_{ref}} \frac{s}{s} = \frac{K_{pv}Rs + K_{iv}Rs}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R + 1}{RC} \right)s + \frac{K_{iv}R}{RC}} \quad (4.12)$$

$$G \frac{s}{s} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.13)$$

ดังนั้นจะได้สมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับลูปแรงดันดังสมการที่ (4.14) และ (4.15) ตามลำดับ

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - 1/R \quad (4.14)$$

$$K_{iv} = \omega_n^2 C \quad (4.15)$$

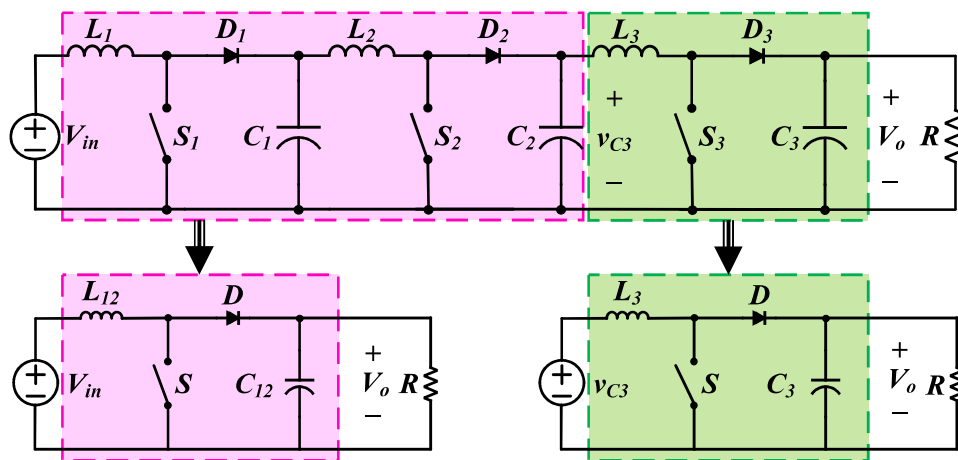
4.4.2 การออกแบบลูปควบคุมกระแส (PI Current Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นได้อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมดังรูปที่ 4.22 ซึ่งประกอบด้วยสองลูปควบคุมกระแส โดยลูปควบคุมกระแสที่หนึ่งจะพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ขั้นที่หนึ่งและสอง โดยพิจารณาจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุตัวทั้งสองขั้นรวมกันดังสมการที่ (4.16) และ (4.17) ส่วนลูปควบคุมกระแสที่สองจะพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

แบบบัสต์ขั้นที่สาม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุตัวที่สามเท่านั้น เมื่อแรงดันอินพุตคือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวที่สอง

$$L_{12} = L_1 + L_2 \quad (4.16)$$

$$C_{12} = C_1 + C_2 \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.22 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับรูปควบคุมกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสดังรูปที่ 3.12 จะได้ความชันของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (3.16) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ (4.18)

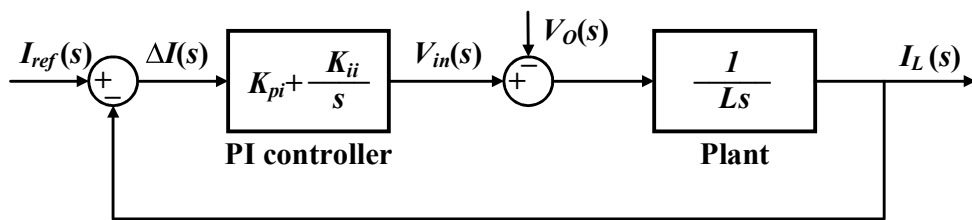
$$Ls I_L s = V_{in} s - V_o s \quad (4.18)$$

ดังนั้นจะได้พลานต์ของระบบจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4.19) และตัวควบคุมพีโอสำหรับรูปควบคุมกระแสแสดงดังสมการที่ (4.20)

$$\frac{V_o s}{I_L s} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (4.19)$$

$$G_{Cl} s = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (4.20)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมกระแสที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนภาพการควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.23 และสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (4.21)



รูปที่ 4.23 แผนภาพลูปควบคุมกระแสของการควบคุมพีไอ

$$\frac{I_L s}{I_{ref} s} = \frac{K_{pi} V_{in} s + K_{ii} V_{in}}{s^2 + K_{pi} \frac{V_{in}}{L} s + K_{ii} \frac{V_{in}}{L}} \quad (4.21)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ลูปควบคุมแรงดัน (K_{pi} , K_{ii}) ของการควบคุมพีไอ จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ของโพลระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ดังสมการที่ (4.12) กับพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (4.22) เมื่อ ω_{ni} คือค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแส มีค่าเท่ากับ $\omega_{ni} = N\omega_n$ rad/s และ N คือจำนวนเท่าความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสเมื่อเทียบกับลูปแรงดัน

$$G s = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (4.22)$$

จะได้สมการออกแบบค่าพารามิเตอร์การควบคุมพีไอ สำหรับลูปแรงดันดังสมการที่ (4.23) และ (4.24) ตามลำดับ

$$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{in}} \quad (4.23)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}} \quad (4.24)$$

ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมพีไอสำหรับสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับรูปแรงดันและลูกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.22 ตามลำดับ ดังนั้นจะสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอได้ดังตารางที่ 4.4

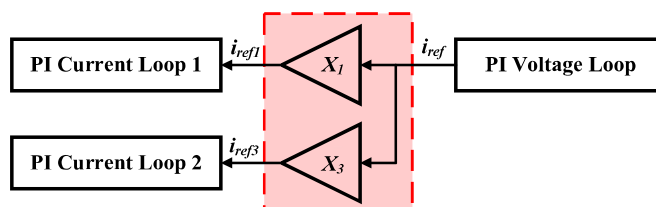
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น
$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - 1/R$	$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C_1 + C_3 + C_2 - 1/R$
$K_{iv} = \omega_n^2 C$	$K_{iv} = \omega_n^2 C_1 + C_3 + C_2$
$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{in}}$	$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_1 + L_2}{V_{in}}$
	$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_3}{V_{C2}}$
$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}}$	$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L_1 + L_2}{V_{in}}$
	$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L_3}{V_{C2}}$

4.4.3 เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique)

การควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ประกอบด้วยลูควบคุมกระแสสองลู แต่สัญญาณ i_{ref} ที่ได้จากลูควบคุมแรงดันยังมีค่าไม่เหมาะสม

สำหรับลูปควบคุมแรงดันทั้งสอง ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current weighting technique) เพื่อช่วยปรับแก้กระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสอง (i_{ref1} , i_{ref3}) ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภาพเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสของตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพรูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยที่สัญญาณ i_{ref} จากลูปควบคุมแรงดันถูกปรับแก้กระแสโดยการคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสอง (X_1 , X_3) เพื่อให้ได้ i_{ref1} และ i_{ref3} ดังสมการที่ (4.25) และ (4.26) ตามลำดับ และค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิงทั้งสองสามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (4.27) และ (4.28) ตามลำดับ

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref} \quad (4.25)$$

$$i_{ref3} = X_3 i_{ref} \quad (4.26)$$

$$X_1 = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}} \quad (4.27)$$

$$X_3 = \frac{i_{L3}}{i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}} \quad (4.28)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
D_1	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_1	0.6	—
D_2	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_2	0.6	—
D_3	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_3	0.6785	—

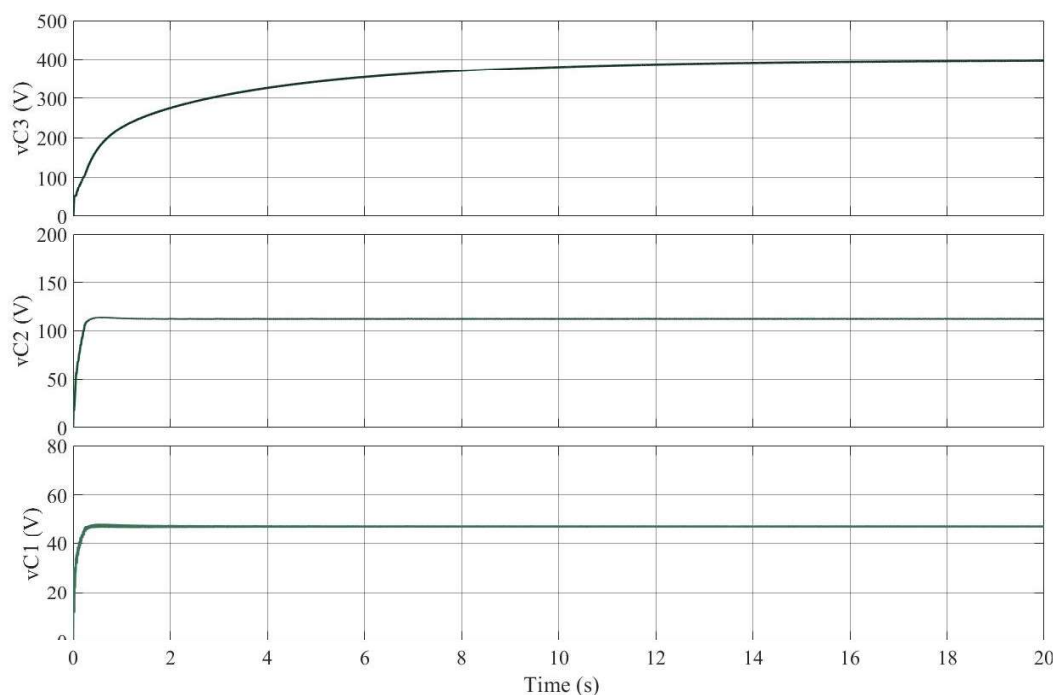
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (ต่อ)

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
i_{L1}	กระแสไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำ	5	A
i_{L2}		2	A
i_{L3}		0.8	A
V_{C1}	แรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ	50	V
V_{C2}		125	V
V_{C3}		400	V

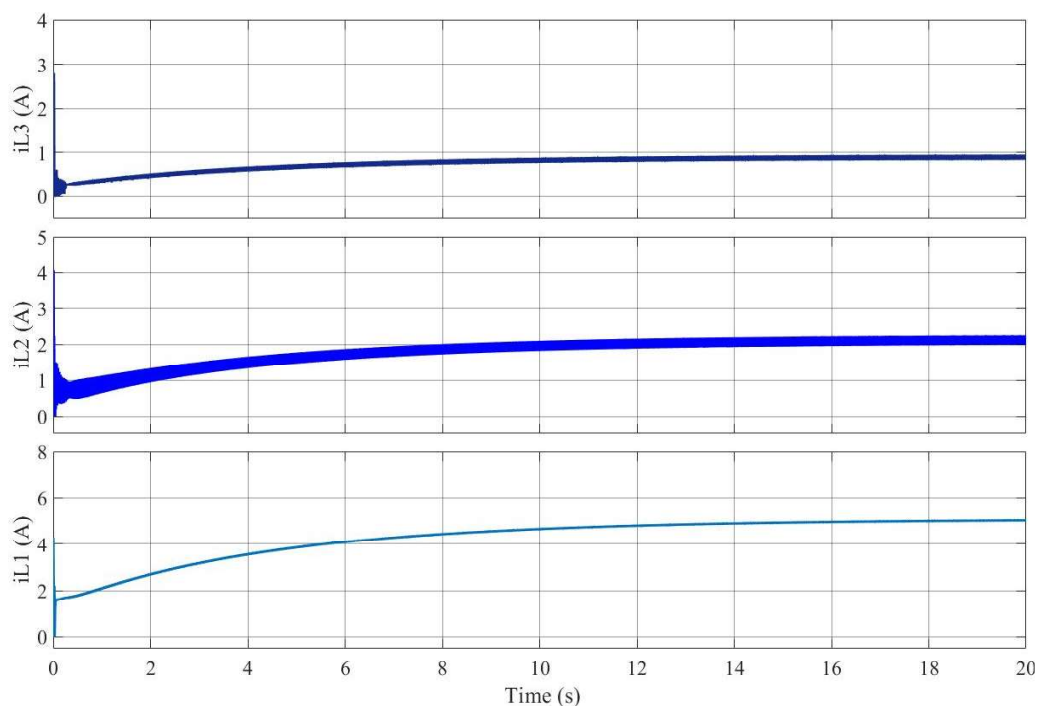
จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถคำนวณเพื่อออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ รวมถึงค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสตารางที่ 4.5 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมพีไอทั้งลูประดัน สองลูกระแส และค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง แสดงดังตารางที่ 4.6 โดยผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

สัญลักษณ์	ขนาด	สัญลักษณ์	ขนาด
ζ	0.9	N	100
ω_n	2.083	ω_{ni}	208.33
K_{pv}	0.005	K_{pi1}	1.27
K_{iv}	0.0065	K_{ii1}	292.97
X_1	0.85	K_{pi2}	0.42
X_3	0.15	K_{ii2}	97.22



รูปที่ 4.25 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุภายใต้การควบคุมพีไอ



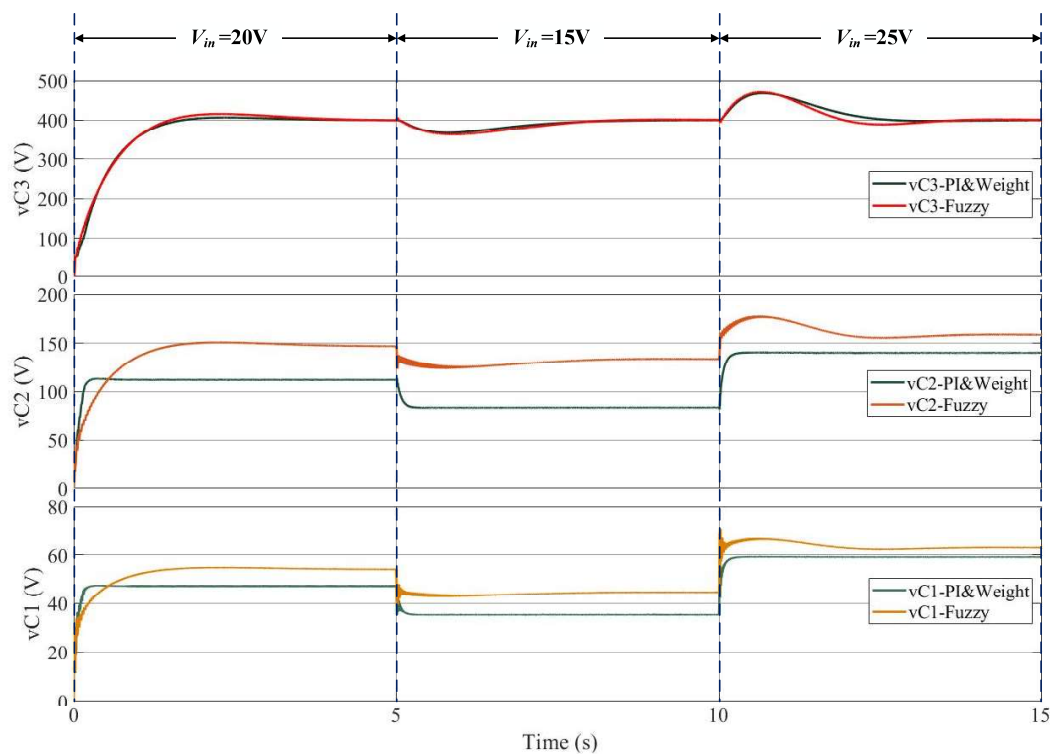
รูปที่ 4.26 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายใต้การควบคุมพีไอ

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.25 และ 4.26 จะเห็นได้ว่า V_O หรือ V_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400V โดยใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 14s เนื่องจากลูปควบคุมแรงดันของการควบคุมพีไอสร้าง i_{ref} ที่มีผลตอบสนองที่ช้า เมื่อพิจารณาโครงสร้างการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า i_{ref} เป็นเอาต์พุตของลูปแรงดัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ K_{pv} และ K_v ถูกพิจารณาจากการประมาณวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นแบบบัสต์ดั้งเดิมที่แสดงในรูปที่ 4.20 ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ลูปควบคุมแรงดัน (K_{pv} , K_v) มีค่าไม่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_v ให้มีค่าเหมาะสม เพื่อให้ i_{ref} มีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น โดยทำการจูน K_v ด้วย 5.5 จะทำให้ผลตอบสนองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เร็ว และไม่เกิดการฟุ้งเกิน

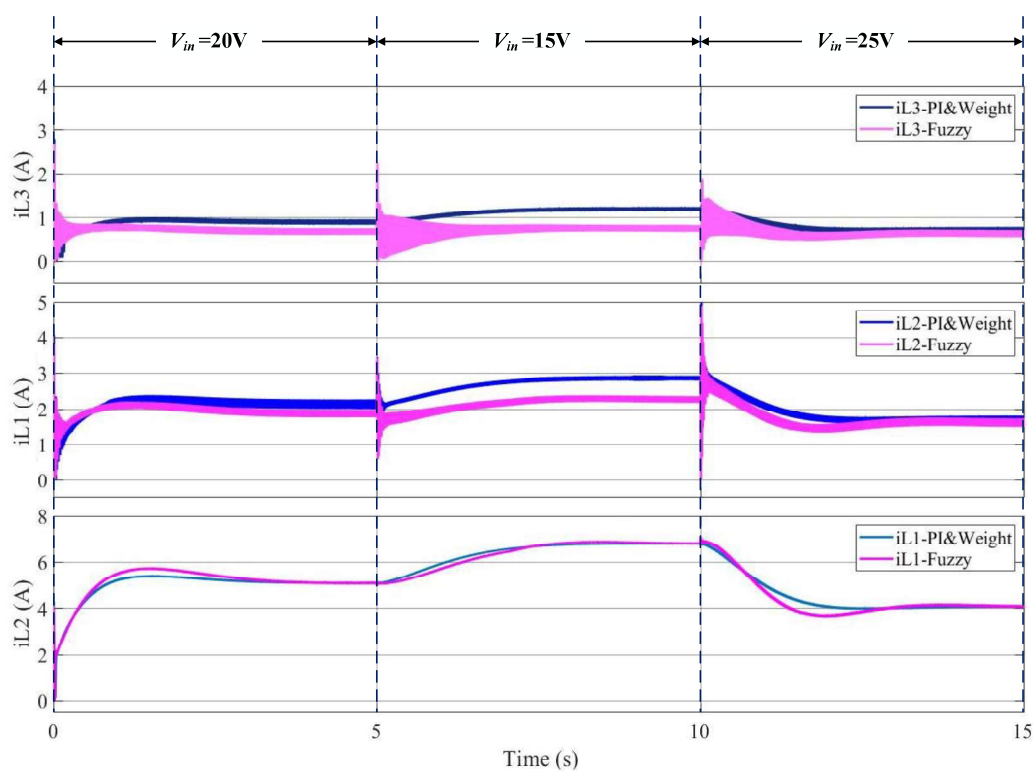
4.4.4 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

จากการออกแบบการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะด้วยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมทั้งสอง โดยพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)

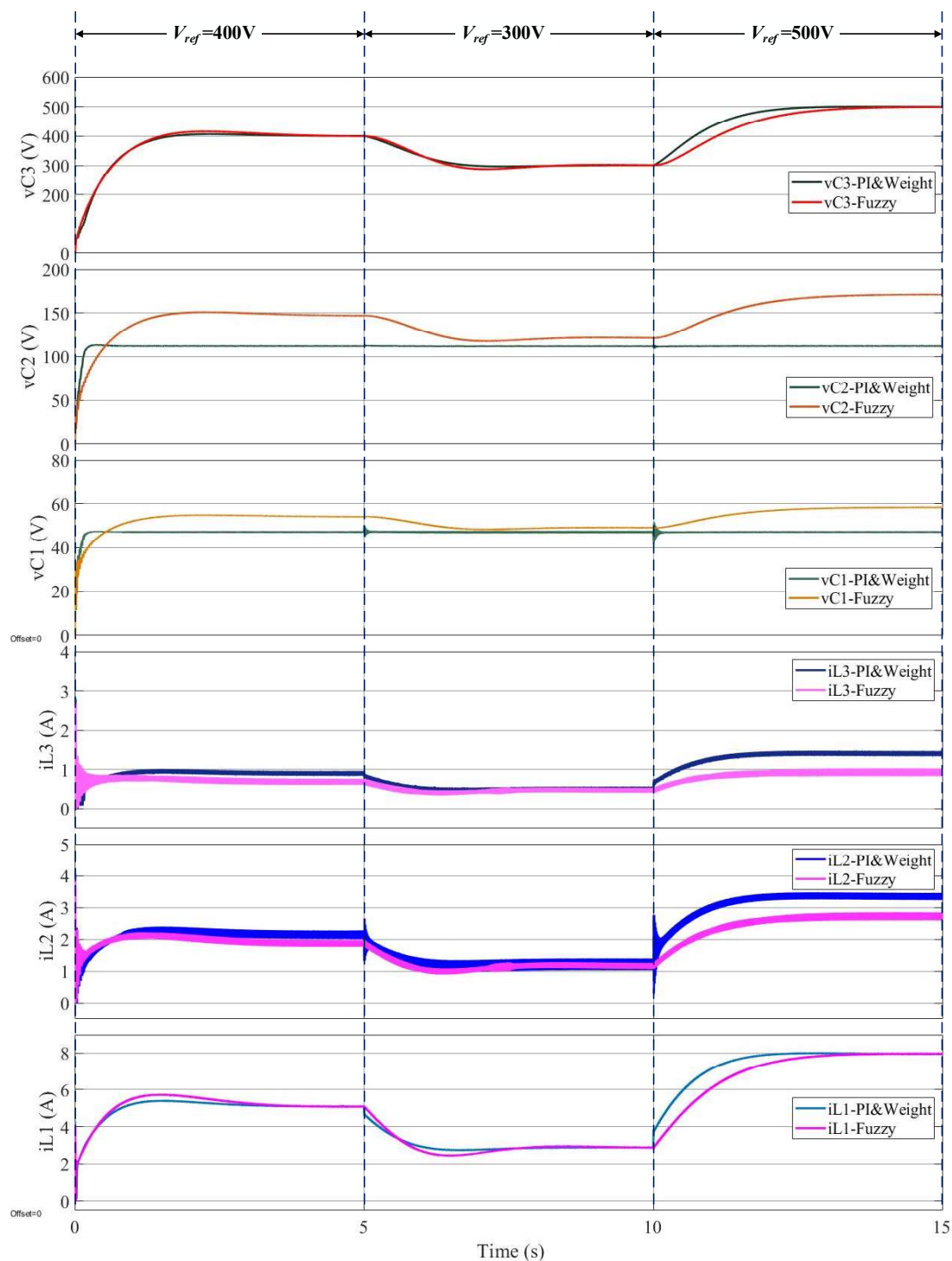
จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมทั้งสองกรณีเปลี่ยนแปลง V_{in} จะเห็นได้ว่าทั้งตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถรักษา V_O หรือ V_{C3} มีค่าคงที่เท่ากับ V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าที่ใกล้เคียงกันประมาณ 2s หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของ V_{in} ที่ส่งผลให้เกิดการลดลง และฟุ้งเกินของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ทั้งนี้ V_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} ในสภาวะอยู่ตัวโดยใช้เวลาไม่เกิน 3s อย่างไรก็ตามค่า i_{L3} ภายใต้ตัวควบคุมฟuzzyมีการสั่นไกวมากกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.27 ผลการจำลอง v_{C1} , v_{C2} , v_{C3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



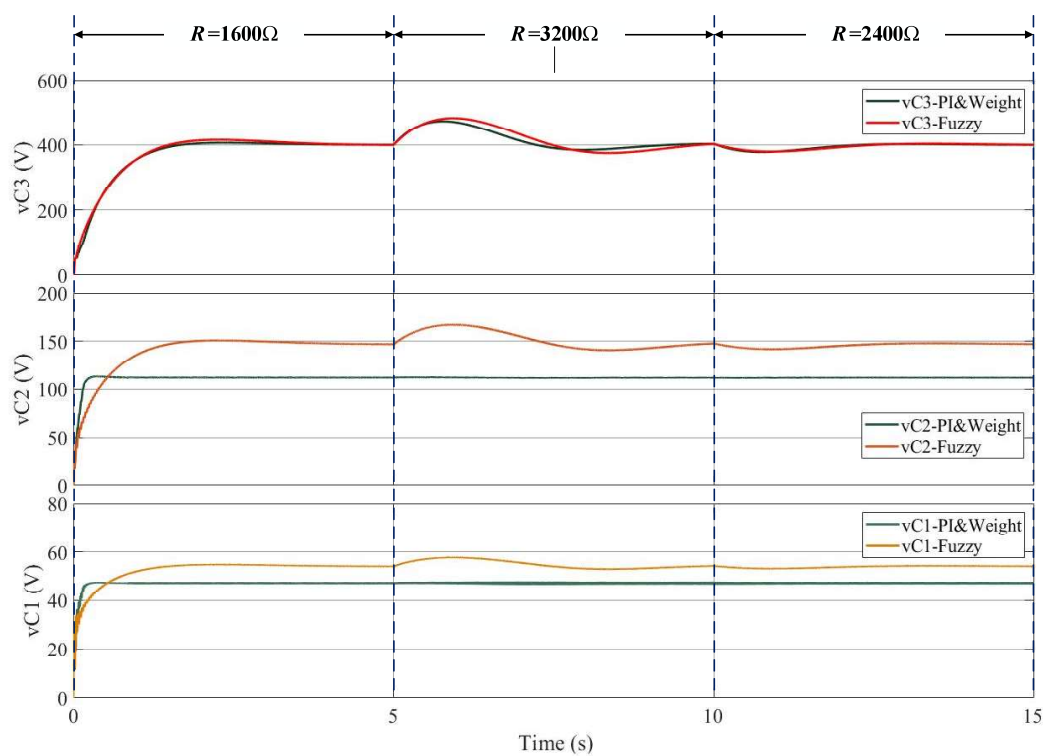
รูปที่ 4.28 ผลการจำลอง i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



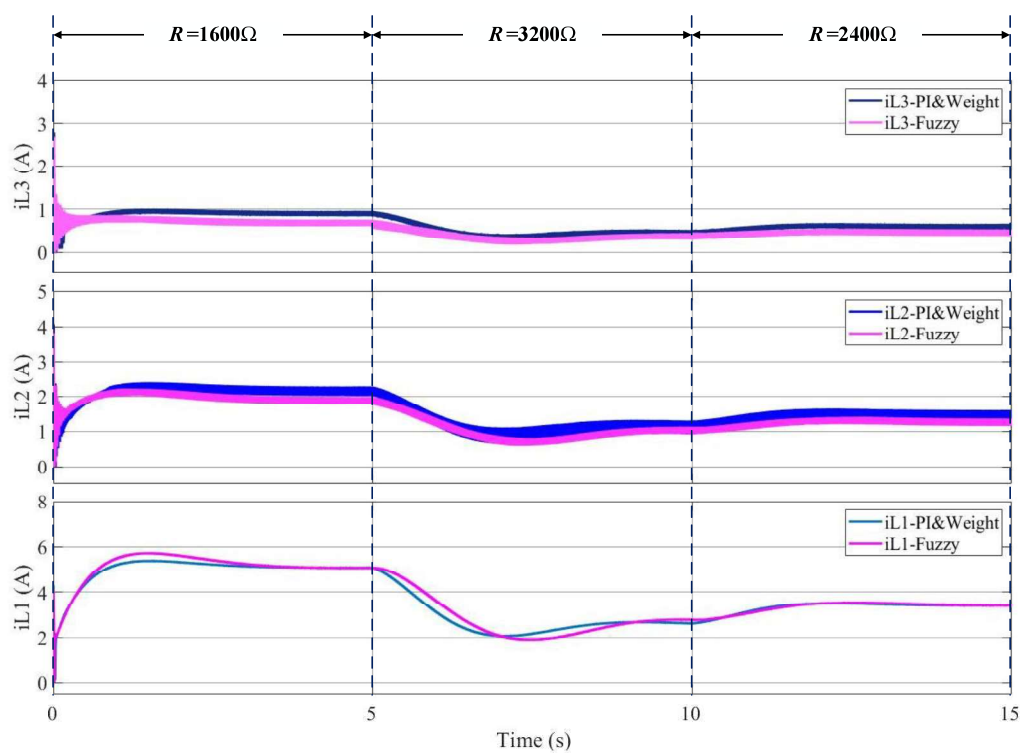
รูปที่ 4.29 ผลการจำลองแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำกรณีเพื่อ
เปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V และ 500V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} โดยที่ไม่เกิดการพุ่งเกิน อีกทั้งยังใช้เวลาเข้าที่ไม่เกิน 3s อย่างไรก็ตามค่า v_{C3} และกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ภายใต้การควบคุมพีไอมีการสั่นไกวมากกว่า เมื่อเทียบกับการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนค่า V_{ref} จะส่งผลให้ขนาดค่า ΔV มีค่ามาก อีกทั้งยังส่งผลให้ค่า i_{ref} มีขนาดที่มากตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงหลังเปลี่ยนจุดการทำงาน ส่งผลให้ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} เพิ่มขึ้น และลดลงกะทันหัน จากการเปลี่ยน V_{ref} ซึ่งเมื่อเทียบกับกระบวนการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถรักษา m_{iL1} ให้มีค่าตาม $-m_{ref}$ ในช่วงเวลา 0s ถึง 5s ส่วนช่วงเวลา 10s ถึง 15s ตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นจะควบคุมให้ m_{iL1} ให้มีค่าตาม m_{ref} เพื่อเพิ่มระดับกระแสและแรงดันตามลำดับ

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω, 3200Ω และ 2400Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนจุดการทำงานโดยการเพิ่มค่า R จะส่งผลให้ v_{C3} เกิดการพุ่งเกิน และลดค่า R จะส่งผลให้ v_{C3} ลดลงในช่วงแรก จากนั้นตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} โดยระยะเวลาเข้าที่นั้นจะขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่า R จาก 1600Ω เป็น 3200Ω นั่นคือการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 100W เป็น 50W ส่งผลให้เวลาเข้าที่ผลตอบสนองของ v_{C3} ช้ากว่าเมื่อเทียบกับกรณีลดค่า R จาก 3200Ω เป็น 2400Ω นั่นคือการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 50W เป็น 66.67W



รูปที่ 4.30 ผลการจำลอง v_{C1} , v_{C2} , v_{C3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 4.31 ผลการจำลอง i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมทั้งสองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าคงที่เท่ากับ V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมพีโอจะอาศัยการประมาณค่าของค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม จึงส่งผลให้การออกแบบค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นนั้นไม่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการประมาณวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นแบบบัสต์ดั้งเดิม ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ลู่วควบคุมแรงดัน (K_{pv} , K_v) มีค่าไม่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_v ให้มีค่าเหมาะสม จนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และไม่เกิดการฟุ้งเกิน

4.5 สรุป

การควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นถูกนำเสนอในบทนี้ โดยที่ตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ รวมทั้งไม่มีการฟุ้งเกินของค่าแรงดัน และกระแส เพื่อยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น ได้อาศัยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟuzzy พบว่าสามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน อีกทั้งยังได้นำเสนอผลเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น กับตัวควบคุมพีโอ ผ่านการจำลองสถานการณ์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานเดียวกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าทั้งตัวควบคุมฟuzzyและตัวควบคุมพีโอที่ใช้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ใกล้เคียงกับค่าแรงดันอ้างอิงอ้างอิง และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมพีโอต้องอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นแบบบัสต์ดั้งเดิม ทำให้ค่าพารามิเตอร์ลู่วควบคุมแรงดันที่ได้อาจไม่เหมาะสม ส่งผลให้การตอบสนองของระบบไม่ดีนัก จึงต้องมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม ในบทต่อไปจะนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบ

สวิตช์เปิดวงจร เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานต่อในสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ