

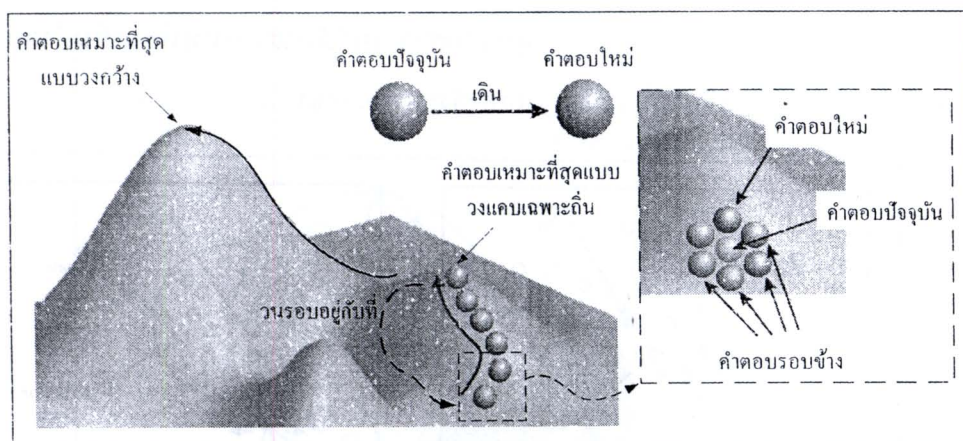
บทที่ 6

การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมพีไอโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

6.1 บทนำ

การปรับปรุงระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ให้มีสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด เป็นสิ่งที่ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่ง ในบทนี้จึงได้มุ่งเน้นการปรับปรุงระบบดังกล่าว โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) (Puangdownreong, Areerak, Srikaew, Sujitjorn, and Totarong, 2002) วิธีการดังกล่าวถูกใช้เป็นเครื่องมือในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุมแบบพีไอบนแกนดิจิทัล นอกจากนี้ในบทนี้ได้มีการทบทวนขั้นตอนการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว การกำหนดขอบเขตการค้นหา แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว รวมไปถึงนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผลการออกแบบไว้ในบทนี้

6.2 ทบทวนการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว



รูปที่ 6.1 แนวคิดพื้นฐานของการค้นหาแบบตาบู่

การค้นหาแบบตาบู่ (tabu search) (Glover, 1989) มีแนวคิดพื้นฐานมาจากการค้นหาคำตอบโดยการตัดสินใจเลือกคำตอบใหม่ในเส้นทางที่คาดว่าจะนำไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด วิธีการดังกล่าวมีองค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหา ดังรูปที่ 6.1 จากรูปสังเกตได้ว่า พื้นที่ที่กำหนดมี

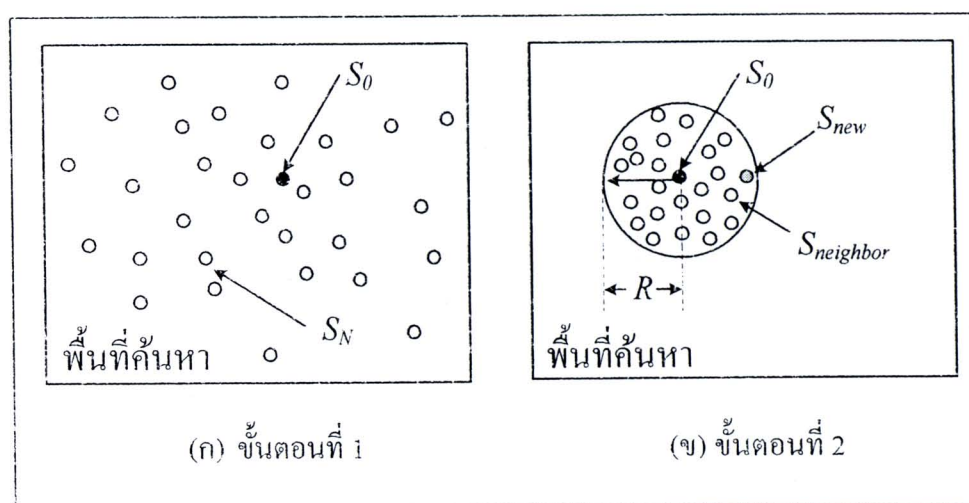
จุดหมาย คือ การหาค่าสูงสุดของพื้นที่ผิว เริ่มต้นการค้นหาคำตอบจากจุดคำตอบปัจจุบันใด ๆ จะใช้หลักการเดิน (move operator) เพื่อทำการเลือกคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน โดยอาศัยการประเมินค่าจากคำตอบรอบข้าง (neighborhood search) ภายในรัศมีเริ่มต้นที่กำหนด แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดขึ้นมาเป็นคำตอบใหม่ต่อไป จนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุด

จากขั้นตอนข้างต้น วิธีการค้นหาแบบตาบู่ได้เพิ่มเติมเงื่อนไขการเดิน ได้แก่ เงื่อนไขการเดินไปยังคำตอบใหม่ที่ค่าการประเมินไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน และเงื่อนไขหลีกเลี่ยงเส้นทางที่วนซ้ำ (cycle avoidance) ทั้งนี้เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบที่หลุดพ้นจากคำตอบเหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum avoidance) ไปยังเส้นทางที่ค้นหาคำตอบเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (global optimum)

วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) ได้รับการพัฒนาในปี พ.ศ. 2545 โดย กองพัน อาริรักษ์ และ สราวุธ สุจิตจร ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะปรับปรุงสมรรถนะการค้นหาคำตอบ ด้วยการเพิ่มกลไกการค้นหาเข้าไปในอัลกอริทึม คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive search radius) ขั้นตอนการค้นหาด้วยวิธี ATS มีรายละเอียดสรุปได้ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา ($\text{count}_{\max}$) กำหนดขนาดพื้นที่ค้นหาคำตอบ (S) และทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้นภายในพื้นที่ค้นหาจำนวน S_N คำตอบ จากนั้นประเมินคำตอบที่ดีที่สุดเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) แสดงดังรูปที่ 6.2 (ก)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มเลือกจำนวนคำตอบรอบข้าง (S_{neighbor}) และกำหนดรัศมีเริ่มต้น (R) เพื่อประเมินคำตอบที่ดีที่สุดภายในรัศมีดังกล่าว จนได้คำตอบที่ดีที่สุดเป็นคำตอบใหม่ (S_{new}) สำหรับรอบการค้นหาปัจจุบัน (count_n) แสดงดังรูปที่ 6.2 (ข)



รูปที่ 6.2 การกำหนดจำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และรัศมีเริ่มต้น

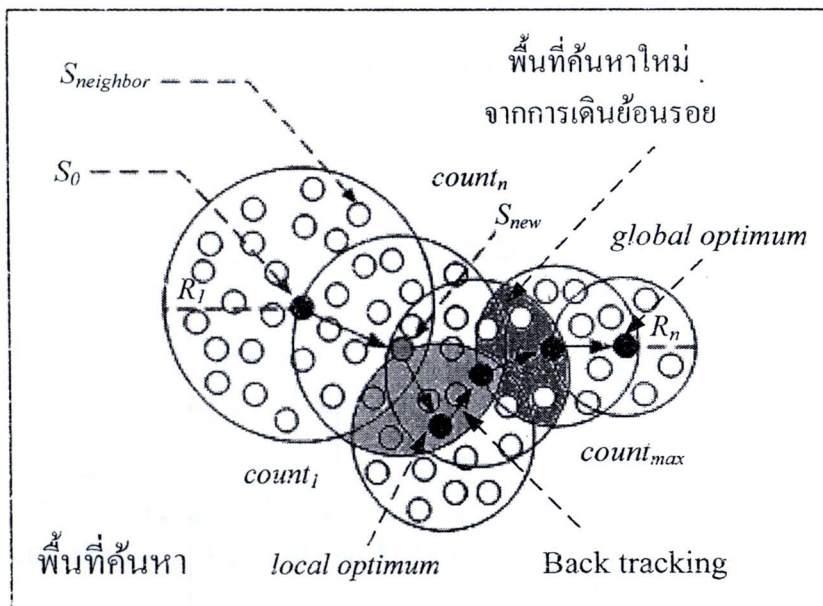
ขั้นตอนที่ 3 คำตอบใหม่ (S_{new}) ในรอบปัจจุบันจะเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) สำหรับรอบการค้นหาดังไป โดยเมื่อ $count_n < count_{max}$ อัลกอริทึมจะดำเนินการค้นหาดังแต่ขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง จนกระทั่งได้คำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนด หรือ $count_n > count_{max}$ จึงยุติการค้นหา

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินค่าจนกระทั่งอัลกอริทึมแบบตามูไม่สามารถหาคำตอบใหม่ (S_{new}) ที่ดีกว่าคำตอบเริ่มต้น (S_0) ในรอบการค้นหาปัจจุบัน นั่นคือ คำตอบดังกล่าวอาจจะไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้น จึงเข้าสู่ขั้นตอนการเดินย้อนรอย ที่มีเงื่อนไขการอนุญาตให้กลับไปค้นหาในพื้นที่คำตอบเก่า ซึ่งผลจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดพื้นที่การค้นหาใหม่ ซึ่งมีโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้

ขั้นตอนที่ 5 การปรับรัศมีการค้นหา ดังสมการที่ (6-1) จะทำการลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้คำตอบจากการค้นหามีความละเอียดมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม หากการปรับลดรัศมีการค้นหามีขนาดเล็กเกินไป การค้นหาอาจไม่ครอบคลุมคำตอบที่ต้องการ ดังนั้น การปรับรัศมีให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาจึงมีความสำคัญ กระบวนการทั้งหมดสำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี ATS ได้อธิบายเป็นแผนภาพไว้ดังรูปที่ 6.3

$$Radius_{new}(R_n) = \frac{Radius_{old}}{DF} \quad (6-1)$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบการลดของรัศมี (Decreasing Factor)



รูปที่ 6.3 การค้นหาแบบตามูชนิดปรับตัวได้

6.3 การกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} บนแกนคิควด้วยวิธี ATS มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการค้นหาในช่วงที่ไม่สามารถใช้งานได้จริงจะไม่เกิดประโยชน์ต่องานภาคปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานร่วมกับบอร์ด field programmable gate arrays (บอร์ด FPGAs) โดยพิจารณาจากสมรรถนะของ FPGA module, APEX DSP Development Board (starter Version) of Altera Co., Ltd The Quartus II Limited Edition 40 kHz 16 bit ประกอบการกำหนดขอบเขตเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์

การกำหนดขอบเขตเริ่มต้นพิจารณาสมการที่ใช้ออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีโอโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามสมการที่ (5-26) และสมการที่ (5-27) ในบทที่ 5 เพื่อหาอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง K_{PC} และ K_{IC} ดังสมการที่ (6-2)

$$\frac{K_{IC}}{K_{PC}} = \frac{\omega_{ni}}{2\xi} \quad (6-2)$$

จากอัตราส่วนความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถหาขอบเขตสูงสุดของค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} ดังสมการที่ (6-3) และสมการที่ (6-4) ตามลำดับ โดยที่ T คือ ช่วงเวลาการชักตัวอย่างของบอร์ด (sampling time) จากนั้นแทนค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_{ni}) และค่าอัตราส่วนการเข้าสู่สถานะคงตัว (ξ) ลงในสมการที่ (6-3) และสมการที่ (6-4) ซึ่งค่าดังกล่าวถูกกำหนดไว้ในบทที่ 5 ดังนั้น ขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของ K_{PC} และ K_{IC} แสดงได้ดังสมการที่ (6-5) และสมการที่ (6-6) ตามลำดับ ขอบเขตดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นพื้นที่ค้นหาคำตอบสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอด้วยวิธี ATS ต่อไป

$$K_{PC} + \left(\frac{\omega_{ni}}{2\xi} K_{PC} \right) T = 65535 \quad (6-3)$$

$$\left(\frac{2\xi}{\omega_{ni}} K_{IC} \right) + K_{IC} T = 65535 \quad (6-4)$$

$$K_{PC} + \frac{2\pi \times 2500}{2(\sqrt{2}/2)} K_{PC} (25 \times 10^{-6}) = 65535 \quad ; K_{PC} \in [0, 51.30 \times 10^3] \quad (6-5)$$

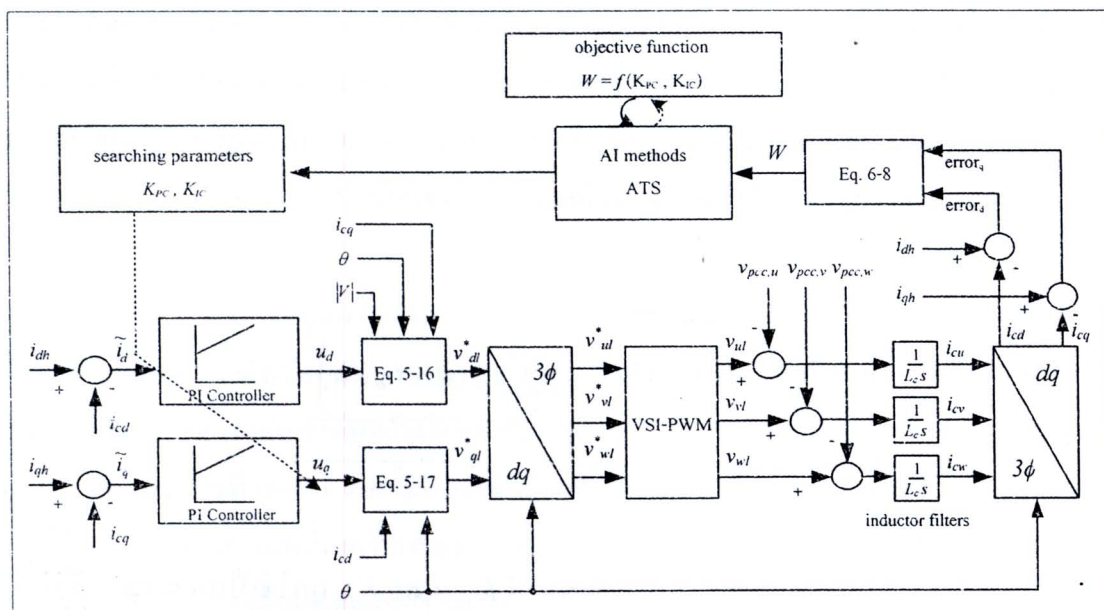
$$\frac{2(\sqrt{2}/2)}{2\pi \times 2500} K_{IC} + K_{IC} (25 \times 10^{-6}) = 65535 \quad ; K_{IC} \in [0, 569.72 \times 10^6] \quad (6-6)$$

การออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธี ATS ภายในขอบเขตการค้นหาที่กำหนดในข้างต้น ผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายการประเมินค่าอยู่ด้วยกัน 2 แนวทาง กล่าวคือ แนวทางแรก ประเมินจากผลต่างระหว่างค่ากระแสชดเชยกับค่ากระแสอ้างอิง ด้วยกรณีการค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์ และแนวทางที่สอง ประเมินจากผลต่างระหว่างค่ากระแสชดเชยกับค่ากระแสอ้างอิง ด้วยกรณีการค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.4 และหัวข้อที่ 6.5 ตามลำดับ

6.4 การค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ

การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว หรือ วิธี ATS ดังที่ได้อธิบายหลักการทำงานตามหัวข้อที่ 6.2 หัวข้อนี้จะดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ 2 ค่า ได้แก่ ค่า K_{PC} และค่า K_{IC} บนแกนดิจิทัล โดยมีกระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อควบคุมการผิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS ที่พิจารณาได้จากรูปที่ 6.4

6.4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว



รูปที่ 6.4 แผนภาพไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธี ATS

กระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอ ดังรูปที่ 6.4 เริ่มต้นจากการนำค่ากระแสอ้างอิง (i_{dh}, i_{qh}) หักลบกับค่ากระแสชดเชย (i_{cd}, i_{cq}) เป็นผลต่างของค่ากระแสทั้งสองบนแกนดีคิว ($\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$) สำหรับใช้เป็นอินพุตป้อนให้กับตัวควบคุมแบบพีไอ โดยค่าเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมดังกล่าว (u_d, u_q) จะนำมาแทนในสมการที่ (5-16) และสมการที่ (5-17) เพื่อคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์บนแกนดีคิว (v_{di}^*, v_{qi}^*) หลังจากนั้นแปลงค่าดังกล่าวให้อยู่บนปริมาณไฟฟ้าสามเฟส ($v_{ui}^*, v_{vi}^*, v_{wi}^*$) เพื่อผ่านชุดบล็อกอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมการสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม จนกระทั่งได้เป็นแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ (v_{ui}, v_{vi}, v_{wi}) ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_c) ออกเป็นค่ากระแสชดเชย ดังสมการที่ (6-7) ซึ่งค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยจะถูกใช้เป็นค่าอินพุตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ

$$\frac{di_{ck}}{dt} = \frac{v_{kl} - v_{pcc,k}}{L_c} \quad (6-7)$$

โดยที่ v_{kl} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (V); $k =$ เฟส u, v, w
 $v_{pcc,k}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (V); $k =$ เฟส u, v, w

สำหรับในแนวทางแรก ผู้วิจัยมีความมุ่งหวังที่จะสามารถควบคุมกระแสชดเชย ให้ใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงมากที่สุด โดยประเมินผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่า W_{err} ดังสมการที่ (6-8) คำนวณได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากผลรวมค่าผลต่างระหว่าง i_{dh} กับ i_{cd} ($error_d$) และผลต่างระหว่าง i_{qh} กับ i_{cq} ($error_q$) กำลังสองเฉลี่ยหารด้วยจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด (N) ดังนั้น ในกรณีที่กระแสชดเชยมีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิง แนวโน้มของค่า W จะลดลง และส่งผลให้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักเฉลี่ยลดลงด้วยเช่นกัน

$$W_{err} = \frac{\sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^N |i_{dh}(i) - i_{cd}(i)|\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N |i_{qh}(i) - i_{cq}(i)|\right)^2}{2}}}{N} \quad (6-8)$$

การจำลองสถานการณ์เพื่อให้ K_{PC} และ K_{IC} ถูกใช้เป็นพารามิเตอร์ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา อธิบายด้วยการประมาณค่าอนุพันธ์แบบย้อนกลับ (backward

difference approximation) เพื่อเป็นการเทียบเคียงระบบบนโปรแกรม simulink ลงในโปรแกรม m-file เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม m-file สามารถประมวลผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้รวดเร็วกว่าการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม simulink โดยเริ่มต้นจากการรับค่าความผิดพลาดของค่ากระแสอ้างอิงกับค่ากระแสชดเชยบนแกนดักคิว เป็นลำดับข้อมูล $(\tilde{i}_d(n), \tilde{i}_q(n))$ และใช้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวเป็นอินพุตให้แก่ตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อคำนวณค่าแรงดันอ้างอิง $(u_d(n), u_q(n))$ จากบล็อก PI Controller ในรูปที่ 6.4 ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยระเบียบเชิงตัวเลข เริ่มต้นจากสมการที่ (6-9) โดยใช้การประมาณแบบ Tustin ดังสมการที่ (6-10) และแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (6-9) จะได้ดังสมการที่ (6-11) จากสมการดังกล่าวดำเนินการแปลงซีฟกผัน (inverse Z transform) เพื่อแปลงเป็นโดเมนเวลาดังสมการที่ (6-12) และสมการที่ (6-13) ตามลำดับ

$$\frac{U_d(s)}{\tilde{I}_d(s)} = \frac{U_q(s)}{\tilde{I}_q(s)} = \frac{(K_{PC}s + K_{IC})}{s} \quad (6-9)$$

$$s = \frac{2}{T} \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \quad (6-10)$$

$$\frac{U_d(z)}{\tilde{I}_d(z)} = \frac{U_q(z)}{\tilde{I}_q(z)} = K_{PC} + \frac{K_{IC}T}{2} \left(\frac{z}{z-1} + \frac{1}{z-1} \right) \quad (6-11)$$

$$z^{-1} \left[\frac{U_d(z)}{\tilde{I}_d(z)} \right] = z^{-1} \left[\frac{U_q(z)}{\tilde{I}_q(z)} \right] = K_{PC} + \frac{K_{IC}T}{2} \left(z^{-1} \left[\frac{z}{z-1} \right] + z^{-1} \left[\frac{1}{z-1} \right] \right) \quad (6-12)$$

$$\frac{u_d(n)}{\tilde{i}_d(n)} = \frac{u_q(n)}{\tilde{i}_q(n)} = K_{PC} + \frac{K_{IC}T}{2} ((1^n) \cdot u(n) + (1^{n-1}) \cdot u(n-1)) \quad (6-13)$$

จากสมการที่ (6-13) สามารถหาค่าเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบพีไอบนแกนดักคิว ในลักษณะลำดับข้อมูล (array) ดังสมการที่ (6-14) และสมการที่ (6-15) เพื่อเป็นค่าอินพุตให้กับการคำนวณแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์บนแกนดักคิว $(v_{di}^*(n), v_{qi}^*(n))$ ดังสมการที่ (6-16) และสมการที่ (6-17) จากนั้นแปลงค่าดังกล่าวให้อยู่บนปริมาณสามเฟสเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรอินเวอร์เตอร์ จนกระทั่งได้เป็นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟส $(v_{u1}(n), v_{u2}(n), v_{u3}(n))$ และทำการประมาณค่ากระแสชดเชยได้ตามสมการที่ (6-18)

$$u_d(n) = K_{PC} \tilde{i}_d(n) + \frac{K_{IC} \tilde{i}_d(n)T}{2} ((1^n) \cdot u(n) + (1^{n-1}) \cdot u(n-1)) \quad (6-14)$$

$$u_q(n) = K_{PC} \tilde{i}_q(n) + \frac{K_{IC} \tilde{i}_q(n)T}{2} ((1^n) \cdot u(n) + (1^{n-1}) \cdot u(n-1)) \quad (6-15)$$

$$v_{di}^*(n) = -\omega(n) \cdot L_c \cdot i_{cq}(n-1) + u_d(n) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot v_m \quad (6-16)$$

$$v_{qi}^*(n) = \omega(n) L_c i_{cd}(n-1) + u_q(n) \quad (6-17)$$

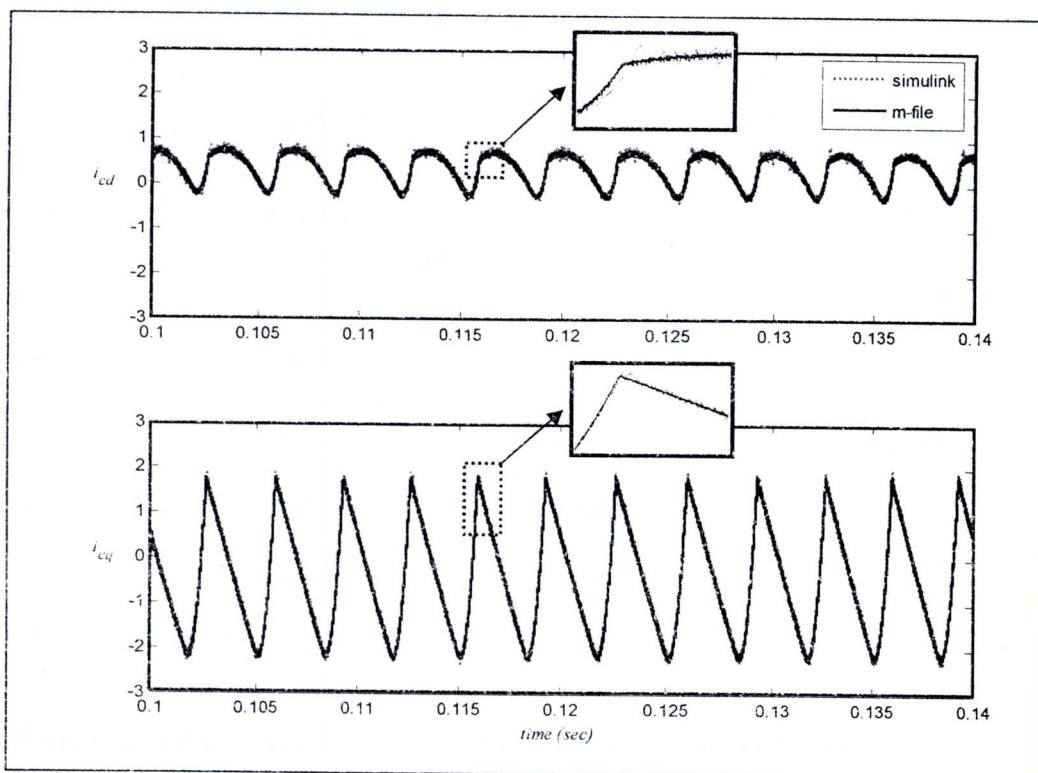
$$\frac{di_{ck}}{dt} \approx \frac{\Delta i_{ck}}{T} = \frac{i_{ck}(n) - i_{ck}(n-1)}{T} = \frac{v_{kl}(n) - v_{pcc,k}(n)}{L_c} \quad (6-18)$$

จากสมการที่ (6-18) สามารถคำนวณค่ากระแสชดเชยได้จากสมการที่ (6-19) และแปลงปริมาณให้อยู่บนแกนคิกว เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิงบนแกนคิกว ในการคำนวณค่า W_{err} เพื่อใช้ประเมินผ่านการค้นหาด้วยวิธี ATS เช่นนี้เรื่อยๆ จนได้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างของพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC}

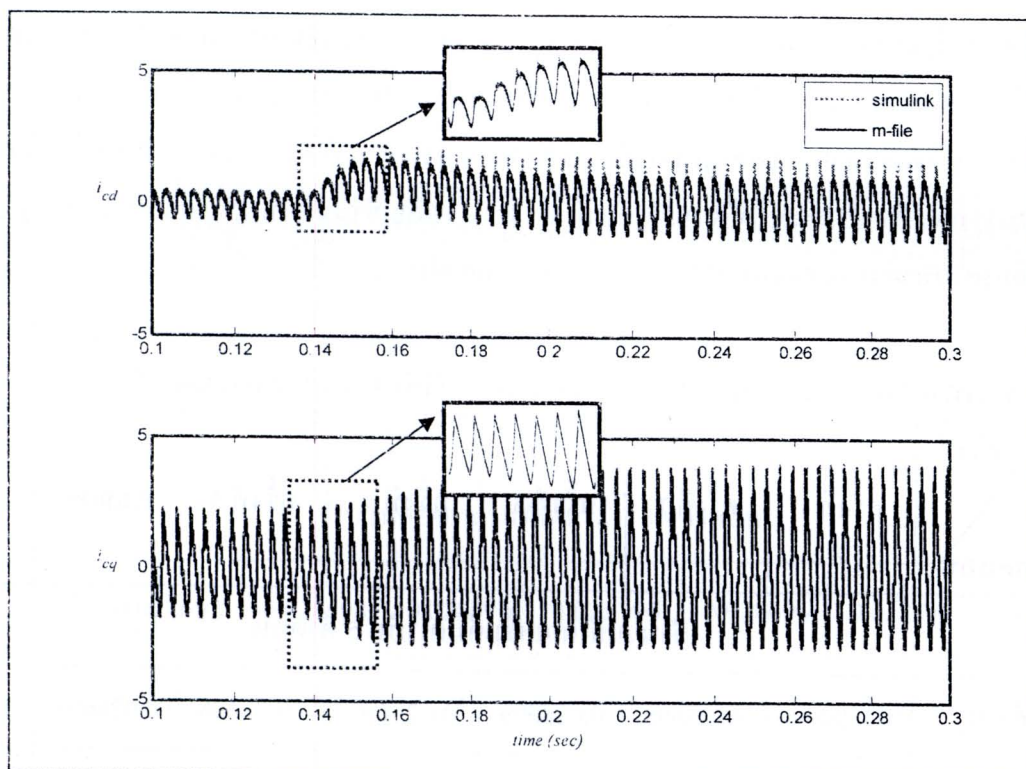
$$i_{ck}(n) = \left(\frac{v_{kl}(n) - v_{pcc,k}(n)}{L_c} \right) \times T + i_{ck}(n-1) \quad (6-19)$$

โดยที่ T คือ ช่วงเวลาการซีกตัวอย่าง

การจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม m-file สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} ด้วยวิธี ATS แทนการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม simulink จะเกิดความน่าเชื่อถือได้นั้นต้องมีการตรวจสอบ และยืนยันความถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบค่าการคำนวณกระแสชดเชยบนแกนคิกวของโปรแกรมทั้งสอง ซึ่งจากรูปที่ 6.5 สังเกตได้ว่า ค่ากระแสชดเชยมีความใกล้เคียงกันในสภาวะคงตัว และเมื่อค่ากระแสดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดของวงจรเรียงกระแสในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.14 วินาที เป็นต้นไป การคำนวณด้วยโปรแกรมทั้งสองยังคงให้ค่ากระแสชดเชยที่ใกล้เคียงเช่นกัน ดังรูปที่ 6.6 จากผลดังกล่าว พบว่า เมื่อทำให้การเปรียบเทียบค่า W_{err} ที่ได้จากโปรแกรม m - file กับค่า %THD ที่ได้จากโปรแกรม simulink จะมีแนวโน้มเดียวกัน ดังตารางที่ 6.1 โดยเมื่อค่า W_{err} ลดลงจะส่งผลให้ค่า %THD ลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบค่ากระแสชดเชยบน m - file เทียบกับ simulink



รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสชดเชยบน m - file เทียบกับ simulink

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบระบบบน m – file กับ simulink กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์		m-file (W_{err})	Simulink (%THD)
K_{PC}	K_{IC}		
40.43 x10 ³	66.86x10 ⁶	0.028698	1.6901
42.55 x10 ³	69.05x10 ⁶	0.028697	1.6826
48.25 x10 ³	80.46x10 ⁶	0.028696	1.6790
43.24 x10 ³	71.58x10 ⁶	0.028695	1.6647
48.00 x10 ³	81.84x10 ⁶	0.028694	1.6535
48.54 x10 ³	80.18x10 ⁶	0.028691	1.6480

6.4.2 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และผลการค้นหา
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ

องค์ประกอบที่สำคัญในโครงสร้างการค้นหาด้วยวิธี ATS ประกอบด้วย จำนวนคำตอบเริ่มต้น (S_N) จำนวนคำตอบรอบข้าง ($S_{neighbor}$) ค่ารัศมีเริ่มต้น (R) และค่าตัวปรับลดรัศมี (DF) เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการค้นหาในระบบจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการค้นหาด้วยวิธี ATS ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบพารามิเตอร์ดังกล่าว ดังตารางที่ 6.2 ถึงตารางที่ 6.5 โดยที่การชี้วัดสมรรถนะการค้นหาจะให้ความสำคัญกับค่า W_{err} เฉลี่ย จำนวนรอบการค้นหาเฉลี่ย (N) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ตามลำดับ

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
	จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ						
ค่า W_{err}	0.028698	0.028698	0.028699	0.028699	0.028698	0.028698	0.55x10 ⁻⁶
รอบ	10	9	10	9	10	9.6	0.55

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์ (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028698	0.028700	0.028696	0.028695	0.028697	1.95×10^{-6}
รอบ	9	12	15	1	2	7.8	6.14
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028699	0.028700	0.028699	0.028699	0.028699	0.028699	0.45×10^{-6}
รอบ	14	9	7	8	6	8.8	3.11
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028696	0.028699	0.028697	0.028699	0.028698	1.30×10^{-6}
รอบ	1	19	27	4	4	11	11.38
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.02870	0.028698	0.028695	0.028694	0.028698	0.028697	2.45×10^{-6}
รอบ	4	9	7	11	7	7.6	2.61
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028697	0.028698	0.028698	0.028700	0.028696	0.028698	1.48×10^{-6}
รอบ	1	3	8	7	11	6	4.00

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5,

ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.02870	0.028698	0.028695	0.028694	0.028698	0.028697	2.45×10^{-6}
รอบ	4	9	7	11	7	7.6	2.61
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028695	0.028694	0.028696	0.028696	0.028696	1.48×10^{-6}
รอบ	5	7	4	6	3	5	1.58
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028700	0.028697	0.028695	0.028696	0.028699	0.028697	2.07×10^{-6}
รอบ	2	5	3	3	10	4.6	3.21
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028699	0.028696	0.028698	0.028696	0.028698	0.028697	1.34×10^{-6}
รอบ	4	4	2	4	2	3.2	1.10
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 25 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028699	0.028697	0.028697	0.028698	0.028696	0.028697	1.14×10^{-6}
รอบ	1	5	3	1	6	3.2	2.28
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028698	0.028696	0.028699	0.028697	0.028698	1.14×10^{-6}
รอบ	3	4	3	1	1	2.4	1.34

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5,
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1



ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.25							
ค่า W_{err}	0.028699	0.028699	0.028700	0.028697	0.028697	0.028698	1.34×10^{-6}
รอบ	2	3	5	7	5	4.4	1.95
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028695	0.028694	0.028696	0.028696	0.028696	1.48×10^{-6}
รอบ	5	7	4	6	3	5	1.58
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1							
ค่า W_{err}	0.028694	0.028697	0.028698	0.028697	0.028698	0.028697	1.64×10^{-6}
รอบ	1	1	1	5	9	3.4	3.58
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2							
ค่า W_{err}	0.028699	0.028698	0.028697	0.028696	0.028697	0.028697	1.14×10^{-6}
รอบ	4	9	17	1	2	6.6	6.58
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028697	0.028696	0.028699	0.028698	0.028698	1.14×10^{-6}
รอบ	2	11	1	10	14	7.6	5.77
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4							
ค่า W_{err}	0.028700	0.028698	0.028699	0.028696	0.028695	0.028698	2.07×10^{-6}
รอบ	5	14	3	12	2	7.2	5.45

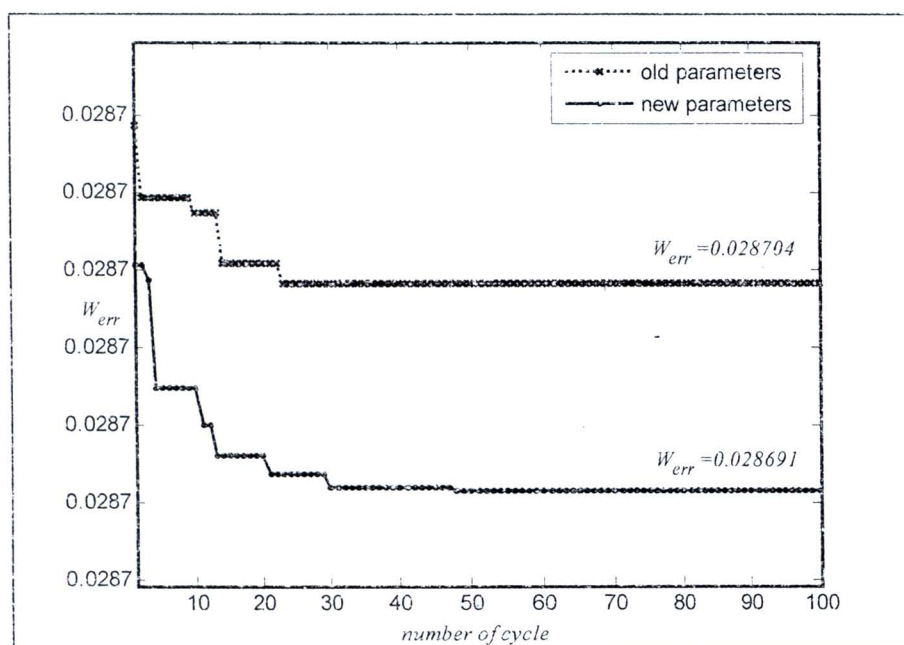
หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ,
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบค่าปรับลดครีมี กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.05							
ค่า W_{err}	0.028699	0.028697	0.028700	0.028699	0.028699	0.028699	1.09×10^{-6}
รอบ	7	14	8	8	13	10	3.24
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.1							
ค่า W_{err}	0.028698	0.028695	0.028694	0.028696	0.028696	0.028696	1.48×10^{-6}
รอบ	5	7	4	6	3	5	1.58
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.2							
ค่า W_{err}	0.028696	0.028696	0.028696	0.028699	0.028697	0.028697	1.30×10^{-6}
รอบ	5	3	6	5	1	4	2.00
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.3							
ค่า W_{err}	0.028696	0.028698	0.028698	0.028700	0.028697	0.028698	1.48×10^{-6}
รอบ	1	4	2	4	4	3	1.41
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.4							
ค่า W_{err}	0.028700	0.028698	0.028697	0.028696	0.028698	0.028698	1.48×10^{-6}
รอบ	8	5	3	1	4	4.2	2.59
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.5							
ค่า W_{err}	0.028697	0.028699	0.028700	0.028698	0.028700	0.028699	1.30×10^{-6}
รอบ	1	2	2	1	4	4	4.06

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ,
ค่าครีมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5

จากตารางที่ 6.2 ถึงตารางที่ 6.5 การเลือกค่าพารามิเตอร์การค้นหาวีธี ATS ใช้เกณฑ์พิจารณาจากค่า W_{err} เป็นประเด็นสำคัญ จำนวนรอบการค้นหา และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นประเด็นรองลงมา เริ่มต้นกำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 5 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 5 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบพารามิเตอร์ของ ATS ในแต่ละตัว เริ่มจากจำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 คำตอบ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ คงที่ จากตารางที่ 6.2 พบว่า จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 คำตอบ และ 25 คำตอบ ให้ค่า W_{err} เล็กลงน้อยที่สุด เท่ากับ 0.028697 แต่ที่จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 25 คำตอบ มีจำนวนรอบการค้นหาเฉลี่ยที่น้อยกว่า จึงเลือกใช้สำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ตัวถัดไป ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 คำตอบ โดยที่จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 25 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 ผลปรากฏว่า จำนวนรอบการค้นหาไม่มีนัยสำคัญ ที่จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 คำตอบ ให้ค่า W_{err} เล็กลงน้อยที่สุด เท่ากับ 0.028696 จึงนำมาใช้สำหรับทดสอบกับพารามิเตอร์ตัวถัดไป ตารางที่ 6.4 ทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยที่จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 25 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 คำตอบ และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 พบว่า จำนวนรอบการค้นหาไม่มีนัยสำคัญ ที่ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 0.5 ให้ค่า W_{err} เล็กลงน้อยที่สุด เท่ากับ 0.028696 และตารางที่ 6.5 เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบจะสังเกตได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงพิจารณาค่า W_{err} เล็กลง เท่ากับ 0.028696 ที่ค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 จะให้ค่า น้อยที่สุด



รูปที่ 6.7 การเข้าสู่ของค่า W กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

จากผลการทดสอบทั้งหมดกำหนดให้พารามิเตอร์ของการค้นหาวิธี ATS มีจำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 25 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ใหม่ (new parameters) ที่ได้จากการทดสอบนี้ ให้ผลการเข้าสู่ของค่า W_{err} เท่ากับ 0.02691 ดีกว่าค่าพารามิเตอร์เดิม (old parameters) ที่ให้ผลการเข้าสู่ของค่า W_{err} เท่ากับ 0.02704 มีผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 6.7 และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟuzzyที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS แสดงไว้ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟuzzy กรณีค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	ชนิดของตัวควบคุมกระแสชดเชย		
	PI+MATH	PI+ATS (old parameter)	PI+ATS (new parameter)
$K_{PC,d}$	0.87×10^3	24.97×10^3	48.54×10^3
$K_{IC,d}$	9.62×10^6	70.84×10^6	80.18×10^6
$K_{PC,q}$	0.87×10^3	24.97×10^3	48.54×10^3
$K_{IC,q}$	9.62×10^6	70.84×10^6	80.18×10^6
W_{err}	0.029070	0.028704	0.028691

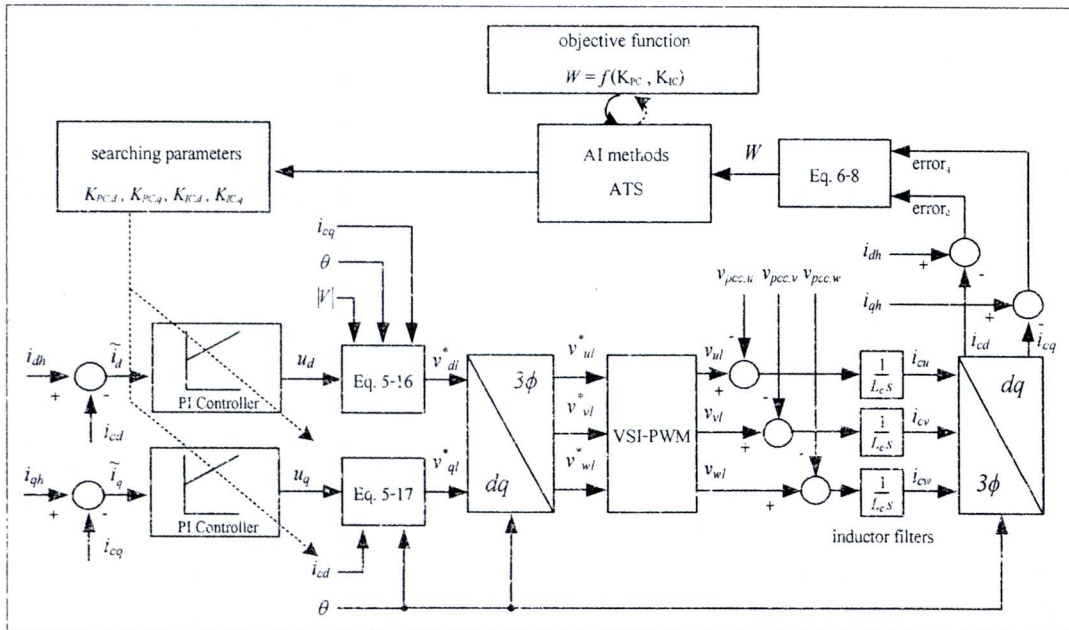
จากตารางที่ 6.6 พบว่า การออกแบบตัวควบคุมแบบฟuzzyด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ให้ค่าการประเมินจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W_{err}) เท่ากับ 0.029070 ในส่วนกรณีการออกแบบด้วยวิธี ATS ด้วยพารามิเตอร์ชุดเก่าให้ค่า W_{err} เท่ากับ 0.028704 และกรณีการออกแบบด้วยวิธี ATS ด้วยพารามิเตอร์ชุดใหม่จะให้ค่า W_{err} น้อยที่สุด เท่ากับ 0.028691 จากผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าการออกแบบด้วยวิธี ATS ให้ค่าการประเมินที่ดีกว่าวิธีการดั้งเดิม อีกทั้งการออกแบบที่ได้รับการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหา จะมีสมรรถนะการค้นหาคำตอบที่ดี

6.5 การค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟuzzyเพื่อปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธี ATS เป็นการค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} เพื่อทดสอบกับระบบบนแกนคิวดด้วยค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกัน อันเนื่องมาจากการออกแบบพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ให้ผลการออกแบบบนแกนคิ และแกนคิวดที่เหมือนกัน การออกแบบด้วยวิธี ATS ในช่วงต้นจึงอ้างอิงแนวทางการค้นหาแบบเดิม ผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมุติฐานว่าการค้นหาค่าพารามิเตอร์

K_{PC} และ K_{IC} ที่อิสระต่อกันบนแกนคิวิต ($K_{PC,d}, K_{IC,d}, K_{PC,q}, K_{IC,q}$) มีความยืดหยุ่นกว่าแนวทางการค้นหาเดิม และอาจมีส่วนช่วยปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้ สามารถพิจารณากระบวนการออกแบบ ได้ดังรูปที่ 6.8

6.5.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว



รูปที่ 6.8 แผนภาพโคะแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธี ATS แบบ 4 พารามิเตอร์

จากรูปที่ 6.8 การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอนี้มีขั้นตอนการออกแบบเหมือนกับกรณีการค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์ แตกต่างกันเฉพาะในส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งกรณีนี้มีด้วยกันทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ $K_{PC,d}, K_{IC,d}, K_{PC,q}$ และ $K_{IC,q}$ ข้อแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้การคำนวณค่าแรงดันอ้างอิง (u_d^*, u_q^*) ในสมการที่ (6-9) และสมการที่ (6-10) มีการปรับเปลี่ยนตามการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS บนแกนคิวิต ดังสมการที่ (6-20) และสมการที่ (6-21) หลังจากนั้น แนวทางดำเนินการจะเหมือนกับขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อที่ 6.4 และทำการประเมินค่า W_{err} ผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามสมการที่ (6-8) จนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมที่สุด

$$u_d(n) = K_{PC,d} \cdot \tilde{i}_d(n) + \frac{K_{IC,d} \cdot \tilde{i}_d(n)T}{2} \left((1^n) \cdot u(n) + (1^{n-1}) \cdot u(n-1) \right) \quad (6-20)$$

$$u_q(n) = K_{PC,q} \cdot \tilde{i}_q(n) + \frac{K_{IC,q} \cdot \tilde{i}_q(n)T}{2} \left((1^n) \cdot u(n) + (1^{n-1}) \cdot u(n-1) \right) \quad (6-21)$$

การจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม m-file สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ค่า ด้วยวิธี ATS แทนการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม simulink ได้รับการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า W_{err} จากโปรแกรม m - file กับค่า %THD จากโปรแกรม simulink แสดงดังตารางที่ 6.7 สังเกตได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ค่า ที่ได้จากการค้นหาอิสระต่อกัน ภายใต้ขอบเขตการค้นหาเดียวกัน ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า เมื่อค่า W_{err} ลดลง ค่า %THD ก็จะมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 6.7 ผลการเปรียบเทียบระบบบน m – file กับ simulink กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์				m-file (W_{err})	Simulink (%THD)
บนแกนดี		บนแกนคว			
$K_{PC,d}$	$K_{IC,d}$	$K_{PC,q}$	$K_{IC,q}$		
21.22×10^3	131.99×10^6	28.30×10^3	16.43×10^6	0.028630	1.7113
35.89×10^3	139.44×10^6	47.88×10^3	81.54×10^6	0.028627	1.6860
38.89×10^3	147.63×10^6	48.00×10^3	175.33×10^6	0.028624	1.6766
23.83×10^3	87.24×10^6	30.38×10^3	78.22×10^6	0.028623	1.6558
33.74×10^3	60.16×10^6	42.51×10^3	9.84×10^6	0.028621	1.6231
26.84×10^3	82.66×10^6	34.60×10^3	80.30×10^6	0.028613	1.6205

6.5.2 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ

การค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธี ATS แบบ 4 พารามิเตอร์จำเป็นต้องได้รับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงตัวควบคุมดังกล่าวมีบรรทัดฐานเดียวกัน พารามิเตอร์ที่ใช้จึงต้องทำการทดสอบทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ จำนวนค่าตอบเริ่มต้น จำนวนค่าตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี เพื่อให้กระบวนการค้นหามีค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมกับการค้นหาในระบบ โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028628	0.028625	0.028625	0.028617	0.028628	0.028625	4.51×10^{-6}
รอบ	8	6	12	6	8	8	2.45
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028626	0.028627	0.028629	0.028623	0.028627	0.028626	2.19×10^{-6}
รอบ	16	9	5	2	9	8.2	5.26
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028622	0.028617	0.028629	0.028625	0.028629	0.028624	5.08×10^{-6}
รอบ	8	6	12	12	6	8.8	3.03
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028626	0.028627	0.028629	0.028621	0.028621	0.028625	3.63×10^{-6}
รอบ	2	1	9	4	4	4	3.08
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028606	0.028629	0.028624	0.028628	0.028622	0.028622	9.28×10^{-6}
รอบ	5	9	17	8	3	8.4	5.37
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028629	0.028626	0.028629	0.028628	0.028630	0.028628	1.52×10^{-6}
รอบ	14	8	8	6	13	9.8	3.49

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5,
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028629	0.028624	0.028627	0.028630	0.028625	0.028627	2.55×10^{-6}
รอบ	5	12	8	2	1	5.6	4.51
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028628	0.028626	0.028618	0.028615	0.028629	0.028623	6.30×10^{-6}
รอบ	5	6	3	3	5	4.4	1.34
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028624	0.028628	0.028630	0.028613	0.028624	0.028624	6.57×10^{-6}
รอบ	2	3	6	2	2	3	1.73
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 25 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028619	0.028620	0.028625	0.028626	0.028621	0.028622	3.11×10^{-6}
รอบ	6	2	4	4	5	4.2	1.48
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028621	0.028616	0.028610	0.028622	0.028628	0.028619	6.77×10^{-6}
รอบ	1	3	5	3	5	3.4	1.67
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 35 คำตอบ							
ค่า W_{err}	0.028621	0.028616	0.028625	0.028627	0.028626	0.028623	4.53×10^{-6}
รอบ	1	1	2	3	6	2.6	2.07

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5,
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5							
ค่า W_{err}	0.028621	0.028616	0.028610	0.028622	0.028628	0.028619	6.77×10^{-6}
รอบ	1	3	5	3	5	3.4	1.67
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1							
ค่า W_{err}	0.028613	0.028628	0.028624	0.028618	0.028627	0.028622	6.36×10^{-6}
รอบ	7	8	3	5	4	5.4	2.07
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2							
ค่า W_{err}	0.028603	0.028610	0.028621	0.028620	0.028623	0.028615	8.56×10^{-6}
รอบ	4	10	9	8	9	8	2.34
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3							
ค่า W_{err}	0.028621	0.028611	0.028628	0.028621	0.028628	0.028622	6.68×10^{-6}
รอบ	5	14	15	8	14	11.2	4.44
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4							
ค่า W_{err}	0.028628	0.028627	0.028615	0.028617	0.028630	0.028623	6.88×10^{-6}
รอบ	1	2	16	6	10	7	6.16
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5							
ค่า W_{err}	0.028624	0.028625	0.028628	0.028626	0.028625	0.028626	1.51×10^{-6}
รอบ	1	14	13	2	8	7.6	6.02

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ,

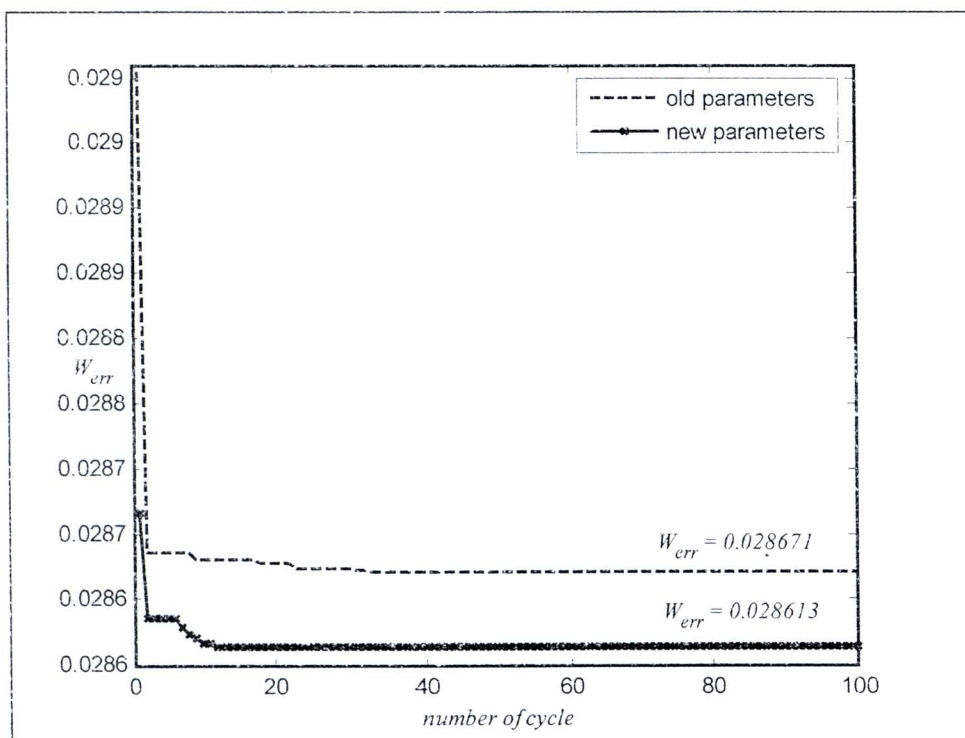
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 6.11 ผลการทดสอบค่าปรับลดครีมี กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ครั้งที่ ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.1							
ค่า W_{err}	0.028603	0.028610	0.028621	0.028620	0.028623	0.028615	8.56×10^{-6}
รอบ	4	10	9	8	9	8	2.34
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.2							
ค่า W_{err}	0.028622	0.028626	0.028628	0.028629	0.028620	0.028625	3.87×10^{-6}
รอบ	8	1	5	9	6	5.8	3.11
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.3							
ค่า W_{err}	0.028621	0.028607	0.028618	0.028602	0.028624	0.028614	9.45×10^{-6}
รอบ	8	5	6	5	6	6	1.22
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.4							
ค่า W_{err}	0.028626	0.028615	0.028629	0.028610	0.028624	0.028621	7.98×10^{-6}
รอบ	1	4	4	2	4	3	1.41
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.5							
ค่า W_{err}	0.028625	0.028617	0.028619	0.028629	0.028611	0.028620	7.01×10^{-6}
รอบ	3	1	1	3	4	2.4	1.34
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.6							
ค่า W_{err}	0.028625	0.028611	0.028622	0.028626	0.028622	0.028621	5.98×10^{-6}
รอบ	1	2	4	3	4	2.8	1.30

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ,
ค่าครีมีเริ่มต้นเท่ากับ 2

จากตารางที่ 6.8 ถึงตารางที่ 6.11 การเลือกค่าพารามิเตอร์การค้นหาวิธี ATS ใช้เกณฑ์พิจารณาจากค่า W_{err} เป็นประเด็นสำคัญ จำนวนรอบการค้นหา และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นประเด็นรองลงมา ตามลำดับ ซึ่งใช้หลักการเลือกเช่นเดียวกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ 2 พารามิเตอร์ ดังนั้น จากผลการทดสอบทั้งหมดกำหนดให้พารามิเตอร์ของการค้นหาวิธี ATS มีจำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 25 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 30 คำตอบ คำรัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 2 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.3 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ใหม่ (new parameters) ที่ได้จากการทดสอบนี้ให้ผลการลู่เข้าของค่า W_{err} เท่ากับ 0.028613 ดีกว่าค่าพารามิเตอร์เดิม (old parameters) ที่ให้ผลการลู่เข้าของค่า W_{err} เท่ากับ 0.028671 มีผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟuzzyที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS แสดงได้ดังตารางที่ 6.12



รูปที่ 6.9 การลู่เข้าของค่า W_{err} กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ผลการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyโดยใช้วิธี ATS แบบ 4 พารามิเตอร์ จากตารางที่ 6.12 สังเกตได้ว่า การออกแบบตัวควบคุมแบบฟuzzyด้วยพารามิเตอร์ของ ATS ชุดใหม่ให้ค่า W_{err} น้อยกว่าการออกแบบด้วยพารามิเตอร์ของ ATS ชุดเก่า และการออกแบบดังกล่าวยังคงให้ผลการประเมินดีกว่าวิธีการออกแบบที่พึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลดังกล่าวยืนยันได้ว่าการออกแบบด้วยแนวทางใหม่สามารถค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาได้

ตารางที่ 6.12 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของตัวควบคุมแบบพีไอ
กรณีค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	ชนิดของตัวควบคุมกระแสชดเชย		
	PI+MATH	PI+ATS (old parameter)	PI+ATS (new parameter)
$K_{PC,d}$	0.87×10^3	40.59×10^3	26.84×10^3
$K_{IC,d}$	9.62×10^6	168.73×10^6	82.66×10^6
$K_{PC,q}$	0.87×10^3	49.22×10^3	34.60×10^3
$K_{IC,q}$	9.62×10^6	460.43×10^6	80.30×10^6
W_{crit}	0.029070	0.028671	0.028613

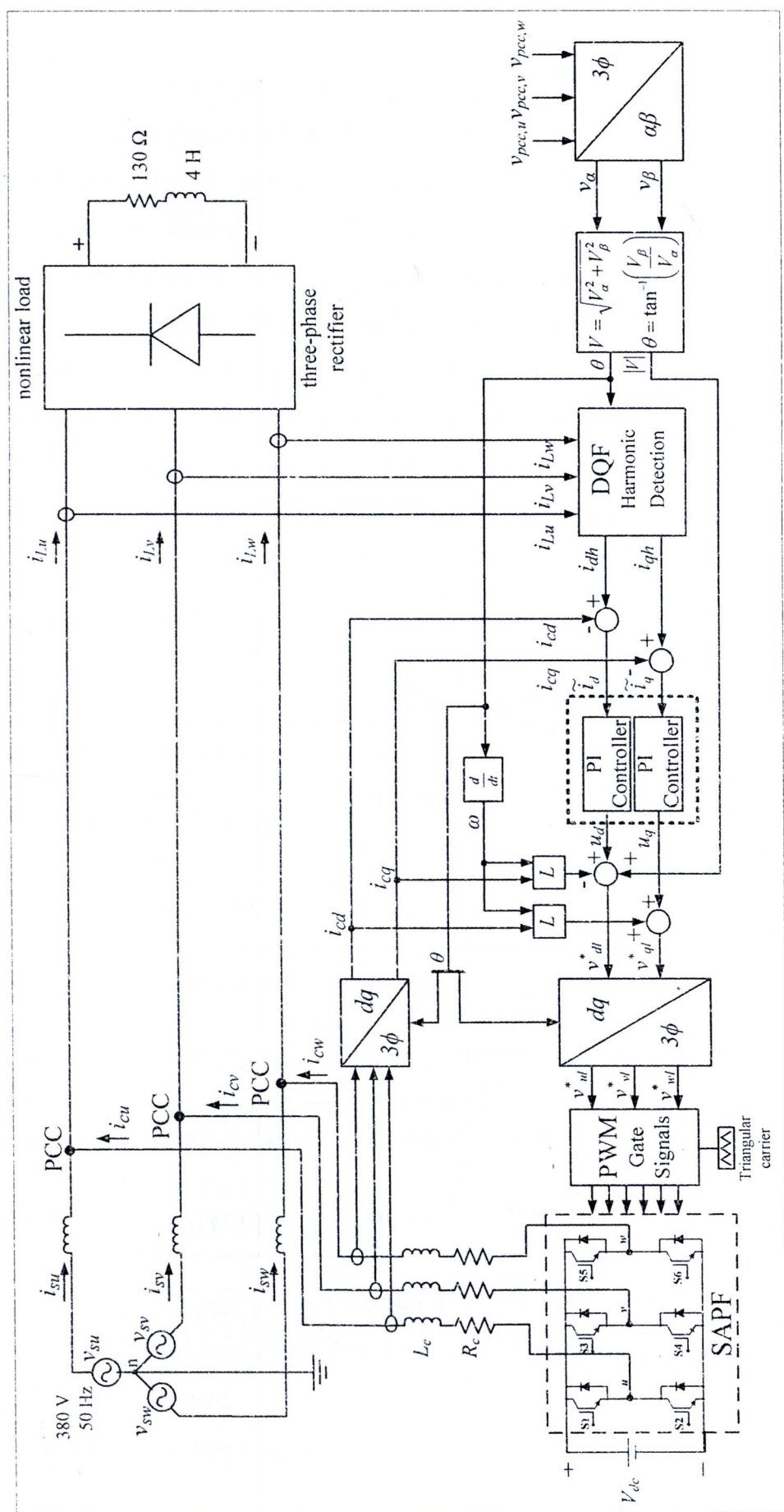
6.6 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ในบทนี้เพื่อต้องการทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอในส่วนขอระบบควบคุมกระแสชดเชย ด้วยเหตุนี้การทดสอบดังกล่าวจะไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ดังนั้น จึงเลือกใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟมีค่าคงที่ เท่ากับ 750 V โดยมีระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ $K_{PC,d}$ $K_{IC,d}$ $K_{PC,q}$ และ $K_{IC,q}$ ใน 2 แนวทางดังต่อไปนี้

แนวทางที่ 1 การออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5

แนวทางที่ 2 การออกแบบด้วยวิธี ATS ที่ประเมินจากค่าผลต่างระหว่างค่ากระแสชดเชยกับค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์ และแบบ 4 พารามิเตอร์ ที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.4 และหัวข้อที่ 6.5 ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาในช่วงเวลาดังแต่ 0 วินาที ถึง 0.20 วินาที เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว การทดสอบทั้งสองแนวทางข้างต้นให้ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานของตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงได้ดังตารางที่ 6.13

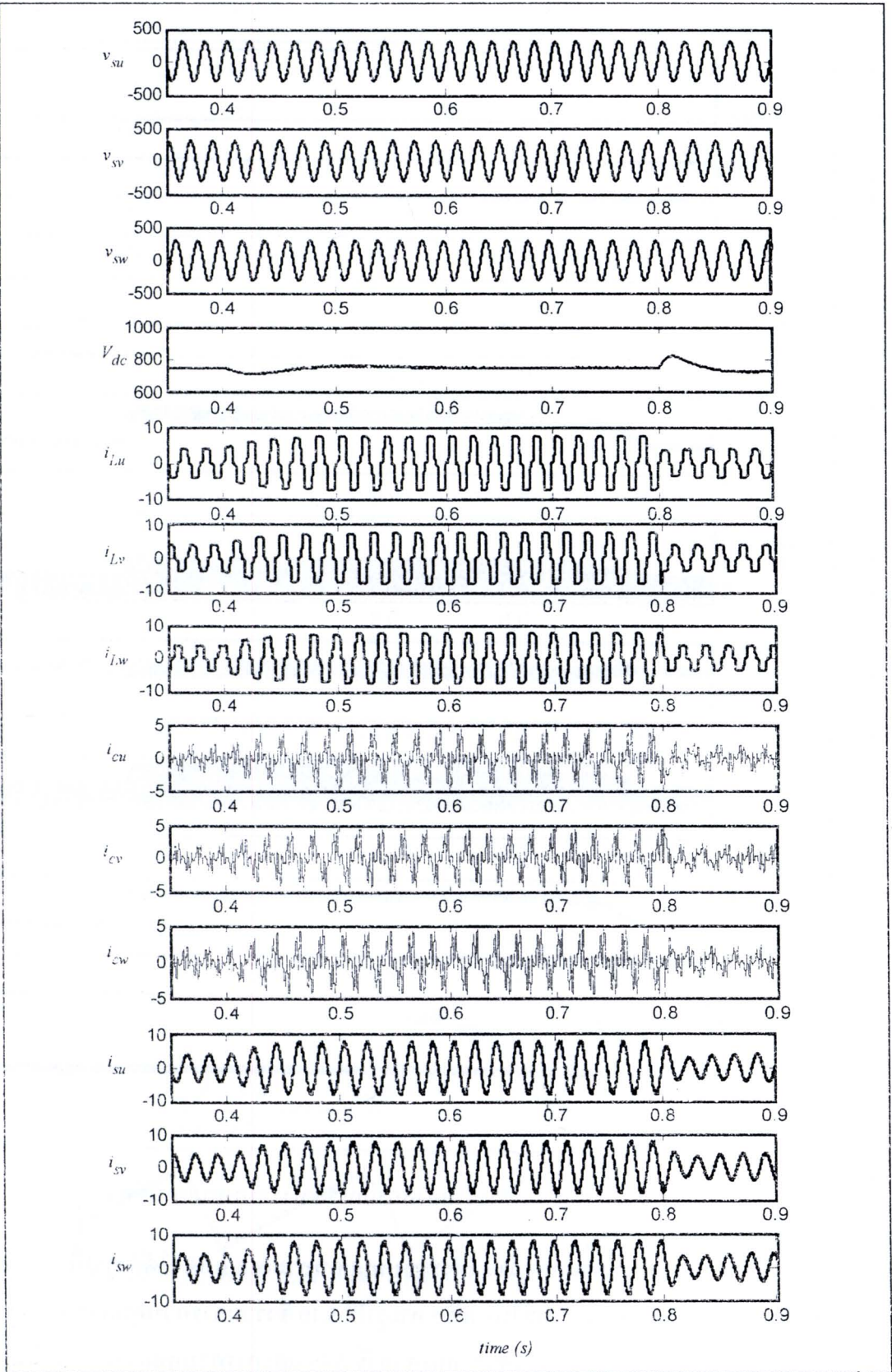


รูปที่ 6.10 ระบบสำหรับการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบฟuzzy

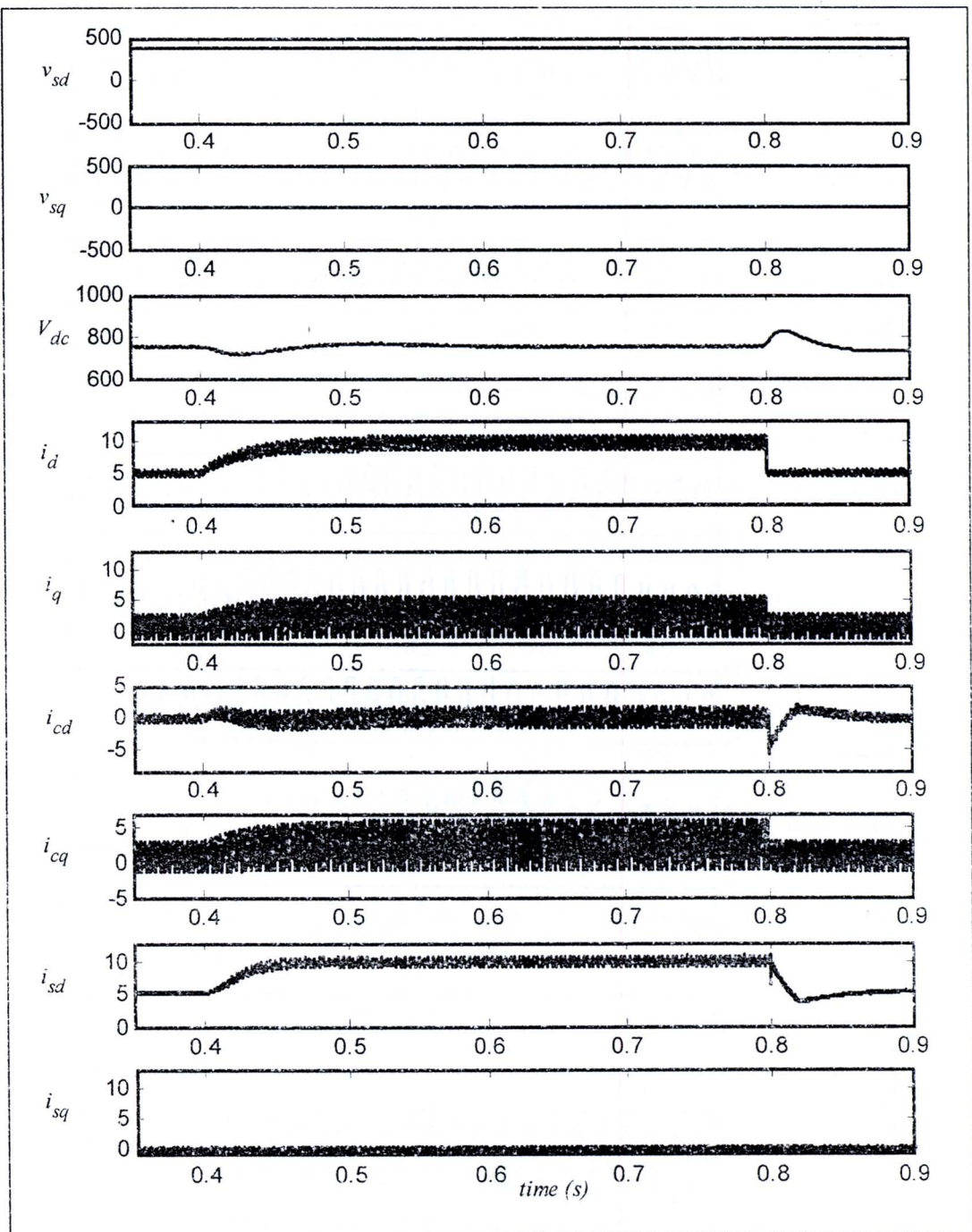
จากตารางที่ 6.13 ได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบพีไอ ภายหลังการชดเชย พบว่า ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิมให้ค่า W_{err} และค่า W_{res} เท่ากับ 0.0291 และ 0.208080 ตามลำดับ มีค่า %THD_{av} ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย เท่ากับ 1.96 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนกรณีการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบค้นหา 2 พารามิเตอร์ให้ค่า W_{err} เท่ากับ 0.0287 มีค่า %THD_{av} ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย เท่ากับ 1.72 เปอร์เซ็นต์ และกรณีการ ออกแบบด้วยวิธี ATS แบบค้นหา 4 พารามิเตอร์ให้ค่า W_{err} เท่ากับ 0.0286 ซึ่งน้อยกว่าแนวทางใน ข้างต้น ส่งผลให้มีค่า %THD_{av} ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายน้อยที่สุด เท่ากับ 1.62 เปอร์เซ็นต์ และ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ต้องการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ให้มี สมรรถนะการควบคุมการบิดกระแสชดเชยที่ดีที่สุด โดยชี้วัดจากค่า %THD_{av} ภายหลังการชดเชย ทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมด้วยวิธี ATS แบบค้นหา 4 พารามิเตอร์ ที่ให้ค่า %THD_{av} น้อยที่สุด

ตารางที่ 6.13 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการบิดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกทีฟ แบบขนานของตัวควบคุมแบบพีไอ

แนวทางการออกแบบ ค่าพารามิเตอร์		คณิตศาสตร์	การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	
			แบบ 2 พารามิเตอร์	แบบ 4 พารามิเตอร์
ตัวควบคุมแบบพีไอ	$K_{PC,d}$	0.87×10^3	48.54×10^3	26.84×10^3
	$K_{IC,d}$	9.62×10^6	80.18×10^6	82.66×10^6
	$K_{PC,q}$	0.87×10^3	48.54×10^3	34.60×10^3
	$K_{IC,q}$	9.62×10^6	80.18×10^6	80.30×10^6
ค่าวัตถุประสงค์	W_{err}	0.0291	0.0287	0.0286
ผลการจำลองสถานการณ์	%THD _{av} (หลังการชดเชย)	1.96%	1.72%	1.62%
	%THD _{av} (ก่อนการชดเชย)	24.42%		



รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์ทั้งระบบบนแกนสามเฟส

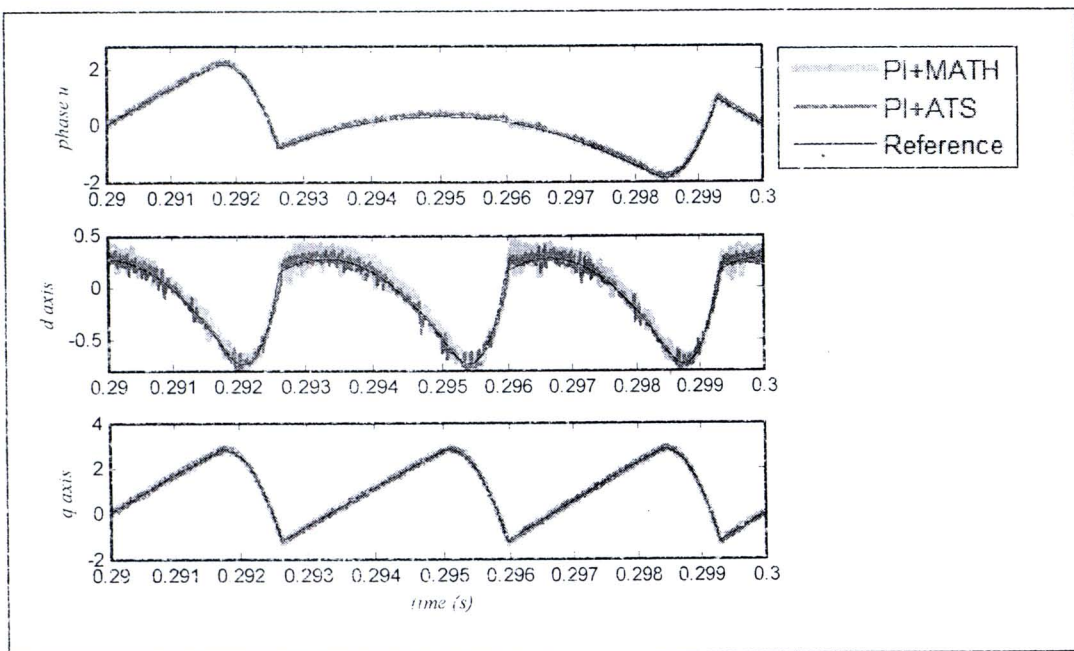


รูปที่ 6.12 ผลการจำลองสถานการณ์ทั้งระบบบนแกนดีคิว

ผลการจำลองสถานการณ์ของทั้งระบบบนแกนสามเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 6.11 โดยอ้างอิงจากระบบการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 5 ตามรูปที่ 5.10 ซึ่งรวมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับปรุงสมรรถนะด้วยวิธี ATS และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดโหลดของวงจรเรียง

กระแสสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.4 วินาที และที่เวลา 0.8 วินาที ปรากฏว่า กระแสที่แหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมของโหลด แต่ยังคงสามารถควบคุมกระแสชดเชย (i_{cd}, i_{cq}) ให้มีรูปสัญญาณใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิง (i_{dh}, i_{qh}) และสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ให้คงที่เท่ากับ 750 V ทำให้ได้สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี โดยดูได้จากรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i_{su}, i_{sv}, i_{sw}) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนมีการชดเชย

การจำลองสถานการณ์ในระบบเดียวกันนี้ ได้แสดงลักษณะรูปสัญญาณทั้งระบบที่พิจารณาอยู่บนแกนดิกิว ดังรูปที่ 6.12 โดยเริ่มต้นจากแรงดันที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักบนแกนดิกิว (v_{sd}, v_{sq}) มีค่าเท่ากับ 381 V และ 0 V ตามลำดับ แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) มีการควบคุมให้คงที่เท่ากับ 750 V ในลำดับถัดมา คือ การพิจารณาขั้นตอนการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบ เริ่มต้นจากการตรวจจับสัญญาณของกระแสฮาร์มอนิกที่โหลดบนแกนดี (i_d) และแกนคว (i_q) เพื่อส่งผ่านไปยังส่วนการแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดิกิว ออกจากปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานด้วยวิธี DQF เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการควบคุมกระแสชดเชยจริงบนแกนดิกิว (i_{cd}, i_{cq}) จนสามารถทำให้รูปสัญญาณกระแสภายหลังการชดเชยที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i_{sd}, i_{sq}) มีค่าคงที่ เท่ากับ 5.2 A ถึง 9.85 A บนแกนดี และคงที่ เท่ากับ 0 A บนแกนคว โดยปริมาณที่ไม่ปรากฏขึ้นบนแกนคว เนื่องจากกระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF สามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟของระบบ รายละเอียดต่าง ๆ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3



รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบผลการติดตามกระแสชดเชย

จากรูปที่ 6.13 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งพิจารณาจากความผิดพลาดในการติดตามค่ากระแสอ้างอิง (tracking error) จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS มีลักษณะรูปสัญญาณคล้อยตามสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม ดังนั้น การออกแบบด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้ระบบควบคุมกระแสชดเชยมีสมรรถนะการติดตามค่ากระแสอ้างอิงที่ดี

6.7 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว โดยการกำหนดเป้าหมายการประเมินค่า 2 แนวทาง ได้แก่ การประเมินจากผลต่างระหว่างค่ากระแสชดเชยกับค่ากระแสอ้างอิง ด้วยกรณีการค้นหาแบบ 2 พารามิเตอร์ และแบบ 4 พารามิเตอร์ ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ของระบบกำลังฮาร์มอนิกที่มีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยสองแนวทางดังกล่าว พบว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยการประเมินจากผลต่างระหว่างค่ากระแสชดเชยกับค่ากระแสอ้างอิงกรณีการค้นหาแบบ 4 พารามิเตอร์ ให้ผลการออกแบบดีที่สุด โดยชี้วัดจากค่า $\%THD_{av}$ ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย ซึ่งผลจากการออกแบบด้วยวิธี ATS ทำให้ค่า $\%THD_{av}$ ที่ได้ลดลงกว่าการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม เท่ากับ 17.35 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกลดลงจากการชดเชย เท่ากับ 93.37 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งค่า $\%THD_{av}$ ที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992