

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับยูพีเอฟซี

Design of Fuzzy Logic Controller for UPFC

เชวศักดิ์ รักเป็นไทย เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์ วรวิทย์ ทายะติ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ABSTRACT

In this paper, a fuzzy logic controller for improving the dynamic performance of a Unified Power Flow Controller (UPFC) is presented. The proposed UPFC controller consists of four controllers for controlling input line voltage, dc-link voltage, real and reactive power flow in transmission line system. The fuzzy rule-base is obtained by inspecting system's behavior and from human experience.

Numerical simulations have been performed to compare the dynamic performance of UPFC fuzzy controller with conventional PI controllers. The simulation results indicate that the proposed fuzzy logic UPFC controller yield better the dynamic performances and has more robustness than those obtained from conventional PI controllers.

The prototype of the power and control circuit of 1-kVA UPFC is designed and implemented. However due to the problem of frequency synchronization, the shunt converter has been replaced by a three-phase diode rectifier. The experimental results also indicate effectiveness of the proposed fuzzy control.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอตัวควบคุมฟัซซีลอจิก เพื่อปรับปรุงสมรรถนะด้านพลวัตของตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้ารวม (UPFC) ในโหมดควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่นำเสนอมีสี่ตัวควบคุม สำหรับควบคุมแรงดันบัสด้านส่ง แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง กำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง กฎทางฟัซซีได้จากการสังเกตพฤติกรรมระบบ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

การจำลองสมรรถนะด้านพลวัตของ UPFC ที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมือนกัน ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกให้สมรรถนะด้านพลวัตที่ดีกว่า และมีความทนทานสูงกว่าตัวควบคุมพีไอ

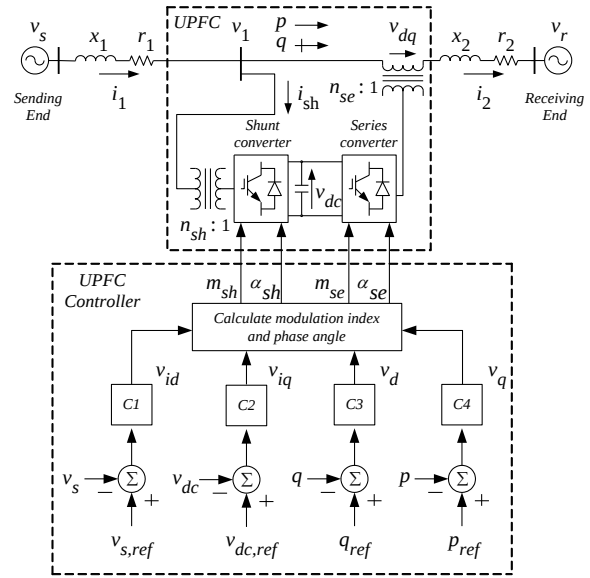
วงจรกำลัง และวงจรควบคุม สำหรับ UPFC ต้นแบบ ขนาดพิกัด 1 กิโลวัตต์แอมแปร์ ถูกออกแบบและติดตั้งอย่างใดก็ตามเนื่องจากมีปัญหาในการซิงโครไนซ์ความถี่ จึงแทนคอนเวอร์เตอร์ขนานด้วยวงจรเรียงกระแสที่เป็นไดโอดสามเฟส ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่นำเสนอ

1. บทนำ

UPFC เป็นอุปกรณ์ FACTS ที่มีความซับซ้อนและสามารถทำงานได้ในหลายโหมด [4] [5] เช่น โหมดควบคุมแรงดันบัส โหมดควบคุมมุมเฟส และโหมดควบคุมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง เป็นต้น ในรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของ UPFC ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลังสองตัวเชื่อมกันโดยแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงและระบบควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์อินพุตต่อขนานกับสายส่งโดยผ่านหม้อแปลงขนาน และคอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตต่ออนุกรมกับสายส่งโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรม การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลทำได้โดยเปลี่ยนขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์เอาต์พุต สำหรับคอนเวอร์เตอร์อินพุตจะทำหน้าที่จ่ายหรือรับกำลังจริงตามที่คอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตต้องการผ่านแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์อินพุตยังสามารถจ่ายหรือรับกำลังรีแอกทีฟเพื่อควบคุมแรงดันบัสด้านส่งได้ด้วย การควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองทำงานอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้ UPFC สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ตามต้องการ

วิธีการควบคุม UPFC แบบเดิมใช้ตัวควบคุมพีไอ (Proportional Integral Controller : PI) มีข้อด้อยหลายอย่าง กล่าวคือ ให้ผลตอบสนองช้า ค่าอัตราขยายที่ถูกกำหนดในช่วงการทำงานแคบ ระบบควบคุมไม่มีความทนทาน (robustness) ต่อความไม่แน่นอนของตัวแปรสายส่ง และไม่สามารถลดปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ได้ ทำให้สมรรถนะด้านพลวัตของ UPFC ค่อนข้างแย่ จะส่งผลให้ความสามารถในการควบคุมไฟฟ้ากำลังลดลงด้วย นอกจากนี้ในกรณีที่เกิดปฏิสัมพันธ์รุนแรงก็อาจทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้

เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นตัวควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นที่มีข้อดีหลายประการ [2] กล่าวคือ ค่าอัตราขยายอยู่ในช่วงกว้าง ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน เหมาะกับระบบที่ค่าตัวแปรไม่แน่นอน และการออกแบบไม่ซับซ้อนเข้าใจง่าย



รูปที่ 1 UPFC ถูกติดตั้งกับระบบสายส่ง

งานวิจัยนี้จึงนำฟัซซีลอจิกมาปรับปรุงสมรรถนะของ UPFC ในการวิจัยจะกำหนดให้ UPFC ทำงานในโหมดควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

2. แบบจำลอง UPFC

แบบจำลอง UPFC มีการวิเคราะห์หันทันพื้นฐานเอกสารอ้างอิง [7] ในการวิเคราะห์หันทันระบบไฟฟ้าสามเฟสถูกแปลงไปยังองค์ประกอบแกน d และ q ในระบบแกน dq ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคจร โดยใช้ v_1 เป็นแกนอ้างอิง วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2 และสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\frac{di_{1d}}{dt} = \frac{\omega_b}{x_1} (v_{sd} - v_1 - r_1 i_{1d}) + \omega i_{1q}$$

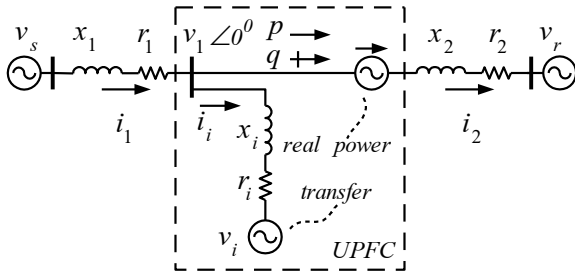
$$\frac{di_{1q}}{dt} = \frac{\omega_b}{x_1} (v_{sq} - r_1 i_{1q}) - \omega i_{1d}$$

$$\frac{di_{id}}{dt} = \frac{\omega_b}{x_i} (v_1 - v_{id} - r_i i_{id}) + \omega i_{iq}$$

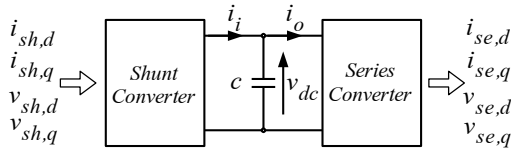
$$\frac{di_{iq}}{dt} = \frac{\omega_b}{x_i} (-v_{iq} - r_i i_{iq}) - \omega i_{id}$$

$$\frac{di_{2d}}{dt} = \frac{\omega_b}{x_2} (v_1 + v_d - v_{rd} - r_2 i_{2d}) + \omega i_{2q}$$

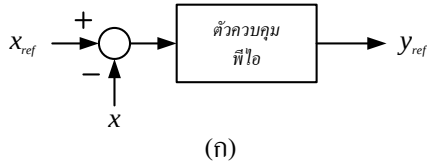
$$\frac{di_{2q}}{dt} = \frac{\omega_b}{x_2} (-v_q + v_{rq} - r_2 i_{2q}) - \omega i_{2d} \quad (1)$$



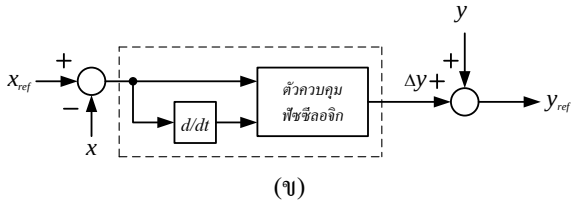
รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 1



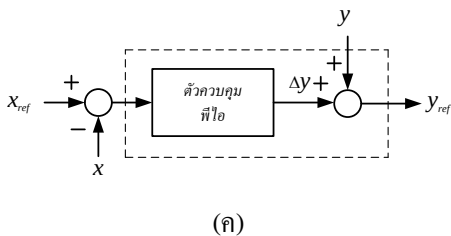
รูปที่ 3 วงจรดีซีของ UPFC



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4 โครงสร้างของตัวควบคุม

(ก) พีไอ (ข) พีซีลอปจิก (ค) พีไอโอ

ในที่นี้สมมติให้ความถี่ในการหมุนของแกน \$dq\$ (\$\omega\$) เท่ากับความถี่ปกติของระบบไฟฟ้า (\$\omega_b\$) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของหม้อแปลงและแหล่งจ่ายดีซีเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} v_{id} &= n_{sh} m_{sh} v_{dc} \cos \alpha_{sh} & v_{iq} &= n_{sh} m_{sh} v_{dc} \sin \alpha_{sh} \\ v_d &= n_{se} m_{se} v_{dc} \cos \alpha_{se} & v_q &= n_{se} m_{se} v_{dc} \sin \alpha_{se} \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ \$m_{sh}\$ คือดัชนีการผสมคลื่นของคอนเวอเตอร์ขนาน

\$m_{se}\$ คือดัชนีการผสมคลื่นของคอนเวอเตอร์อนุกรม

\$\alpha_{sh}\$ คือมุมระหว่าง \$v_1\$ และ \$v_i\$

\$\alpha_{se}\$ คือมุมระหว่าง \$v_{sh}\$ และ \$v_{dq}\$.

หากไม่คิดความสูญเสียในคอนเวอเตอร์จะได้ว่ากำลังทันทีทันใดที่ชั่วเอชและดีซีของคอนเวอเตอร์จะมีค่าเท่ากัน และได้ว่า

$$v_{dc} i_i = v_{sh,d} i_{sh,d} + v_{sh,q} i_{sh,q} \quad v_{dc} i_o = v_{se,d} i_{se,d} + v_{se,q} i_{se,q}$$

การทำงานของวงจรดีซีในรูปที่ 3 อธิบายได้ดังนี้

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \omega_b x_c (i_i - i_o) \quad (3)$$

โดยที่ \$x_c\$ คืออิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

กำลังจริง (\$p\$) และกำลังรีแอกทีฟ (\$q\$) ที่ไหลในสายส่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$p = v_1 i_{2d} \quad q = -v_1 i_{2q} \quad (4)$$

2. การออกแบบตัวควบคุม

รูปที่ 4 (ก) แสดงโครงสร้างตัวควบคุมพีไอ จะเห็นว่าเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีไอ (\$y_{ref}\$) จะถูกส่งไปควบคุมระบบโดยตรง หากค่า \$y_{ref}\$ เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน อาจส่งผลให้เอาต์พุตของระบบแกว่งอย่างรุนแรงได้ สำหรับตัวควบคุมพีซีลอปจิกนั้น ในศึกษาได้ออกแบบให้คำนวณอัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม (\$\Delta y\$) นำไปรวมกับสัญญาณควบคุมเดิม (\$y\$) แล้วจึงได้เป็นสัญญาณควบคุมอ้างอิง (\$y_{ref}\$) ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) กล่าวคือมีการนำเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมพีซีมาผ่านการอินทิเกรต (integrate) ก่อนจะส่งไปควบคุมระบบ

ในที่นี้เพื่อศึกษาผลของตัวอินทิเกรเตอร์ที่มีต่อระบบควบคุมจึงออกแบบตัวควบคุมเรียกว่า “ตัวควบคุมพีไอโอ” ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4 (ค) จากรูปจะเห็นว่าตัวควบคุมพีไอโอคือการนำเอาเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีโอมาผ่านตัวอินทิเกรเตอร์ก่อนจะส่งไปควบคุมระบบนั่นเอง

กำหนดให้

K_p เป็นอัตราขยายเป็นสัดส่วน (proportional gain)

T_i เป็นเวลาของผลตอบสนอง (response time)

2.1 ตัวควบคุมพีไอ

กำหนดให้แรงดันอ้างอิงในแกน d (v_d^*) และแกน q (v_q^*) ได้มาจากกระแสอ้างอิงในแกน d (i_{2p}^*) และแกน q (i_{2q}^*) จะได้รูปแบบตัวควบคุมพีไอเป็น

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \\ K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2p}^* - i_{2p} \\ i_{2q}^* - i_{2q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 ตัวควบคุมพีไอโอ

และกำหนดรูปแบบตัวควบคุมพีไอโอเป็น

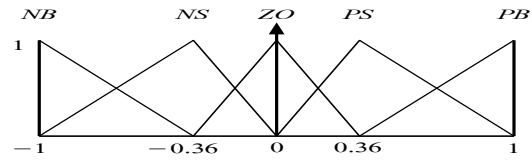
$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_p}{sT_s} \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \\ \frac{K_p}{sT_s} \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2p}^* - i_{2p} \\ i_{2q}^* - i_{2q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

โดยที่ T_s คือ เป็นคาบการสุ่ม (sampling period) สมการที่ (5) และ (6) ถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลอง UPFC เพื่อหาอัตราขยายตัวควบคุมพีไอ (C3 และ C4) ที่เหมาะสม โดยจะพิจารณาจากตำแหน่งขั้ว (poles) และศูนย์ (zeros) และผลตอบสนองเมื่อป้อนฟังก์ชันสเตป (step function) สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม C1 และ C2 ก็ใช้หลักการเดียวกัน

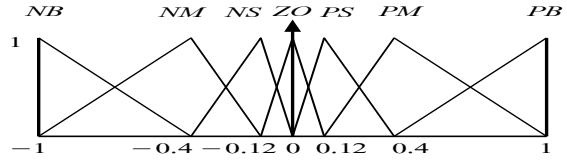
2.3 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

อินพุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นสัญญาณผิดพลาด และอัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด ส่วนของเอาต์พุตเป็นอัตราเปลี่ยนแปลงของแรงดันควบคุม และวิธีฟัซซีฟิเคชันที่ใช้เป็นวิธีความสูง (Height Method)

กฎพื้นฐานและฟังก์ชันสมาชิก (membership function) ที่ใช้ในการออกแบบได้จากพฤติกรรมของระบบ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ



รูปที่ 5 ฟังก์ชันสมาชิกของ C1 และ C2



รูปที่ 6 ฟังก์ชันสมาชิกของ C3 และ C4

ตารางที่ 1 กฎทางฟัซซีของ C1 และ C2

อัตราเปลี่ยนแปลงสัญญาณผิดพลาด		NB	NS	ZO	PS	PB
สัญญาณผิดพลาด	NB	NB	NB	NB	NB	ZO
	NS	NB	NS	NS	ZO	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	ZO	PS	PS	PB
	PB	ZO	PB	PB	PB	PB

ตารางที่ 2 กฎทางฟัซซีของ C3 และ C4

อัตราเปลี่ยนแปลงสัญญาณผิดพลาด		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
สัญญาณผิดพลาด	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

3. ผลการจำลอง

โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ถูกใช้ในการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุม UPFC ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอโอ และตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด การจำลองกำหนดวิธีคำนวณเป็น *fix-step Runge-Kutta* ค่า Δt เท่ากับ 0.5 มิลลิวินาที และกำหนดเงื่อนไขการจำลอง ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 : กำลังจริงถูกเปลี่ยนแบบขั้น

เงื่อนไขที่ 2 : กำลังรีแอกทีฟถูกเปลี่ยนแบบขั้น

เงื่อนไขที่ 3 : ค่าตัวแปรสายส่งเพิ่มขึ้น 100
เปอร์เซ็นต์ และกำลังจริงถูกเปลี่ยนแบบขึ้น
ผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลองสามารถสรุปได้ดัง
ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผลการจำลอง

ตัวควบคุม	คุณลักษณะเมื่อเปลี่ยน p/q แบบขึ้น
พีไอ	- ผลตอบสนองช้า - แรงดันบัสมิการแกว่งมาก - ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเกิดมาก - ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์เกิดมาก - ไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสายส่ง
พีไอไอ	- ผลตอบสนองรวดเร็ว - แรงดันบัสมิการแกว่งมาก - ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเกิดน้อย - ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์เกิดมาก - ไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสายส่ง
พีซีแอลจิก	- ผลตอบสนองรวดเร็วมาก - แรงดันบัสมิการแกว่งน้อย - ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเกิดน้อยมาก - ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์เกิดน้อย - มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสายส่ง

4. ผลการทดสอบ

เพื่อทำการทดสอบวิธีควบคุมทั้งสามวิธี จึงได้สร้าง
วงจร UPFC และระบบควบคุมขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดย
วงจร UPFC ที่สร้างมีการแทนคอนเวอร์เตอร์ขนานด้วย

วงจรเรียงกระแสที่เป็นไดโอดสามเฟส ดังนั้นพลวัตของ
คอนเวอร์เตอร์ขนานจึงยังไม่ได้ถูกรวมไว้ในการควบคุมมี
การเชื่อมโยงการทำงานระหว่างวงจรกำลังกับเครื่อง
คอมพิวเตอร์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตัวแปลง
สัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล วงจรวัดสัญญาณแรงดัน
วงจรตรวจจับกระแส วงจรป้องกันกระแสเกิน เป็นต้น

ระบบทดสอบมีพิกัดกำลัง 1 กิโลวัตต์แอมแปร์
แรงดันเฟส 311 โวลต์ (ค่าขอด) มุมเฟสระหว่างบัสด้านส่ง
และบัสด้านรับมีค่าประมาณ 3 องศา ระบบมีความถี่ 50
เฮิรตซ์ และความถี่ในการสวิตช์เป็น 1 กิโลเฮิรตซ์ วิธีการ
สวิตช์เป็นการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์
(space-vector pulse-width modulation) ค่าอัตราขยายของ
ตัวควบคุมได้จากการลอกผิดลองถูก ในการทดสอบ
กำหนดสภาวะการทำงาน ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 : กำลังจริง (p) ถูกเปลี่ยนแบบขึ้น

เงื่อนไขที่ 2 : กำลังรีแอกทีฟ (q) ถูกเปลี่ยนแบบขึ้น

เงื่อนไขที่ 3 : ตัวแปรสายส่งเพิ่มขึ้น 33 เปอร์เซ็นต์
และกำลังจริงถูกเปลี่ยนแบบขึ้น

เงื่อนไขที่ 4 : ตัวแปรสายส่งเพิ่มขึ้น 33 เปอร์เซ็นต์
และกำลังรีแอกทีฟถูกเปลี่ยนแบบขึ้น

ในรูปที่ 7 ถึง 10 แสดงผลตอบสนองกำลังที่ได้จากการ
ทดสอบ และผลการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ตัวควบคุมพีไอมิมีความทนทานสัญญาณรบกวน
ต่ำ ทำให้การหาค่าอัตราขยายตัวควบคุม หาได้ยากกว่าตัว
ควบคุมพีไอไอ และตัวควบคุมพีซีแอลจิก

2. ตัวควบคุมพีไอไอ และตัวควบคุมพีซีแอลจิก
ช่วยลดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่
ไหลในสายส่ง

3. ผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอไอ และตัว
ควบคุมพีซีแอลจิก จะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้รวดเร็วกว่า
และเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า ผลตอบสนองที่
ได้จากตัวควบคุมพีไอ

4. ตัวควบคุมพีซีแอลจิกสามารถคงค่า
ผลตอบสนองในช่วงสภาวะคงตัวให้อยู่ที่ค่าอ้างอิงได้
ดีกว่าตัวควบคุมพีไอและพีไอไอ

5. เมื่อตัวแปรสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมทั้งสามวิธีจะให้ผลตอบสนองช้าลง

6. ตัวควบคุมพีไอไอ และตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก มีความทนทานต่อความไม่แน่นอนของตัวแปรสายส่งได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

7. การทดสอบยังให้ผลตอบสนองไม่ดีนัก สาเหตุหลักเกิดจากตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลที่ใช้ทำงาน มีประสิทธิภาพต่ำ และกระบวนการประเมินค่าของระบบไฟฟ้ากำลัง ยังให้ค่าความถี่ที่ไม่แม่นยำพอ

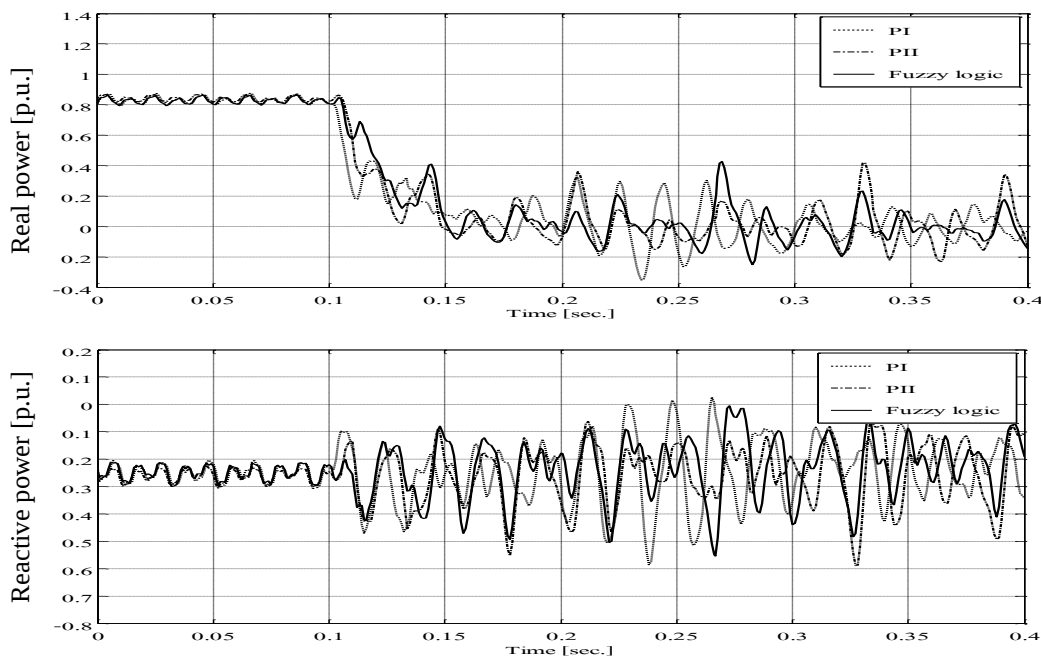
5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของ UPFC ในโหมดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ฐานข้อมูลที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกได้จากการเรียนรู้พฤติกรรมด้านพลวัตของ UPFC ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ และประสิทธิภาพของผู้ออกแบบ ในการทดสอบวงจร UPFC ในห้องปฏิบัติการ ยังไม่ได้รวมพลวัตของคอนเวอร์เตอร์ขนาน เพราะมีการกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ขนานทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส

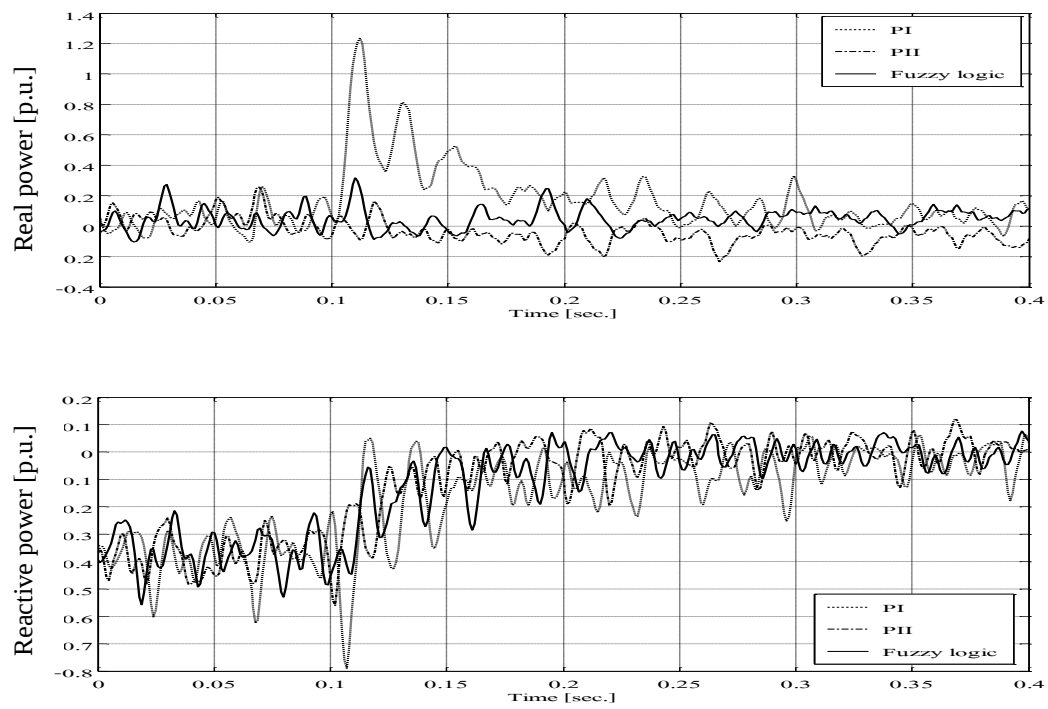
ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ สามารถสรุปข้อดีของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่นำเสนอได้ดังนี้

1. ทำงานรวดเร็ว สามารถนำไปใช้งานได้จริง
2. ช่วยปรับปรุงสมรรถนะด้านพลวัตของ UPFC กล่าวคือ ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และช่วยลดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
3. สามารถคงค่าผลตอบสนองในช่วงสภาวะคงตัวให้อยู่ที่ค่าอ้างอิงได้ดี
4. มีความทนทานต่อความไม่แน่นอนของตัวแปรสายส่ง
5. มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน

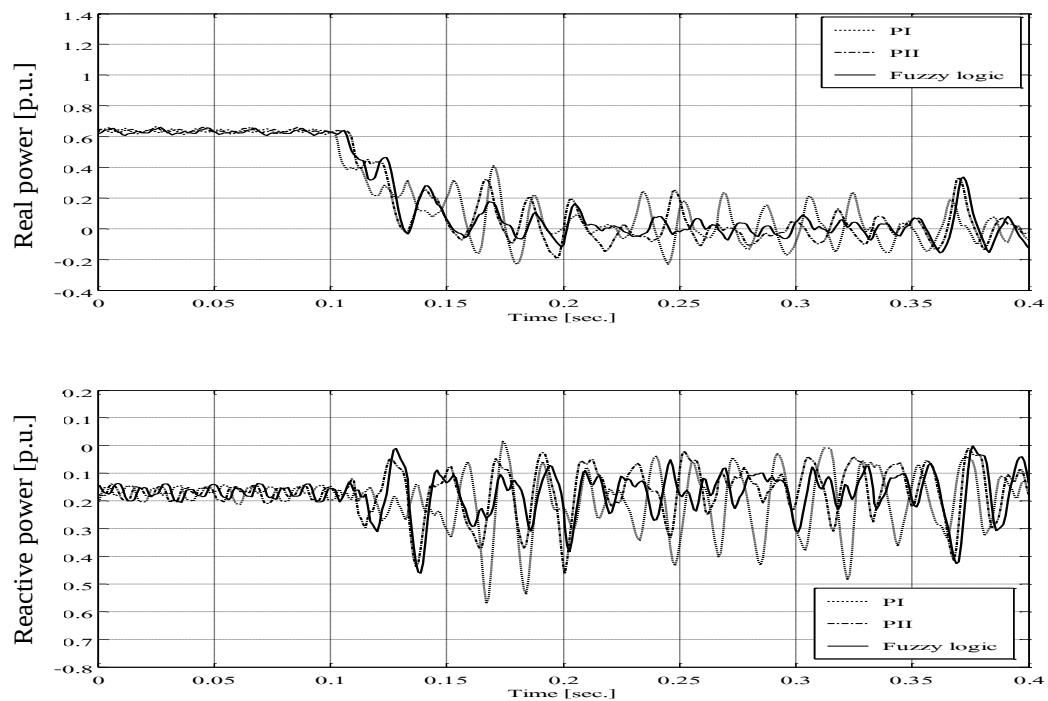
อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการภายในตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก จะต้องมีการเปรียบเทียบค่าและแปลงค่าตามหลักการทางฟัซซี่ ทำให้โปรแกรมควบคุมที่ได้มีความยาวของโปรแกรม และมีการใช้หน่วยความจำมากกว่าโปรแกรมของตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 7 ผลตอบสนองจากการทดสอบเงื่อนไขที่ 1 (กำลังจริงถูกเปลี่ยนแบบขั้น)

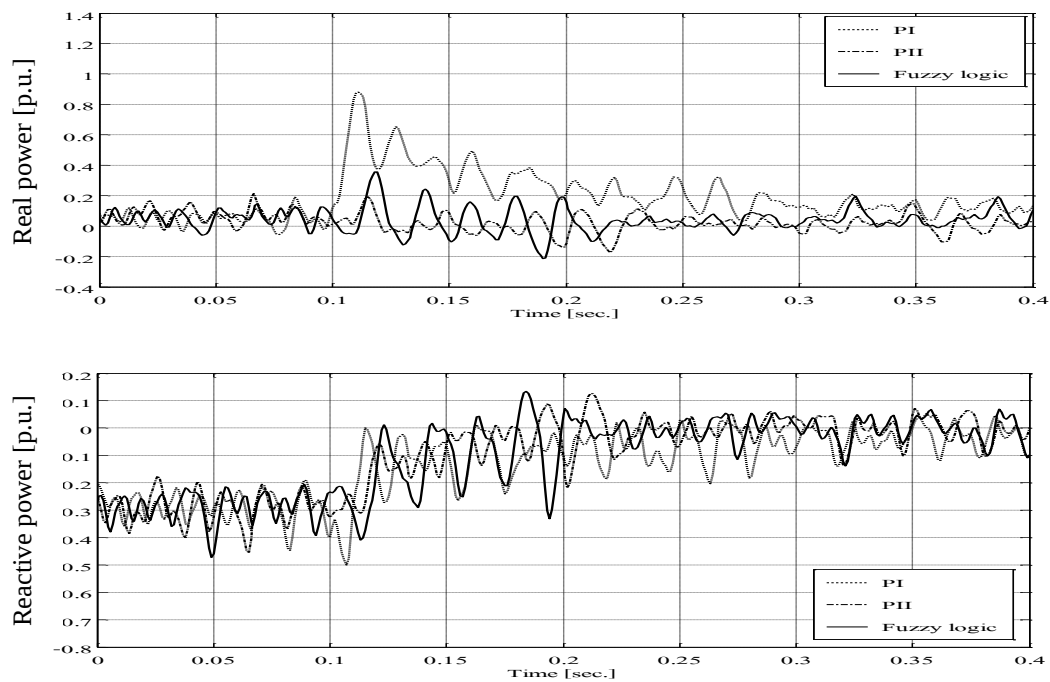


รูปที่ 8 ผลตอบสนองจากการทดสอบเงื่อนไขที่ 2 (กำลังรีแอกทีฟถูกเปลี่ยนแปลงขึ้น)



รูปที่ 9 ผลตอบสนองจากการทดสอบเงื่อนไขที่ 3 (ตัวแปรสายส่งเพิ่มขึ้น

33 เปอร์เซ็นต์ และกำลังจริงถูกเปลี่ยนแปลงขึ้น)



รูปที่ 10 ผลตอบสนองจากการทดสอบเงื่อนไขที่ 4 (ตัวแปรสายส่งเพิ่มขึ้น
3.3 เปอร์เซนต์ และกำลังรีแอกทีฟถูกเปลี่ยนแบบขั้น)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dong L.Y., Zhang L. and Crow M.L., "A new control strategy for the unified power flow controller," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 1, pp.562-566, 2002.
- [2] Driankov D., Hellendoorn H. and Reinfrank M., *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.
- [3] Fujita H., Watanabe Y. and Akagi H., "Control and analysis of a unified power flow controller," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, November 1999.
- [4] Gyugyi L., Schauder C.D., Williams S.L., Rietman T.R., Torgerson D.R. and Edris A., "The unified power flow controller : a new approach to power transmission control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 1085-1097, April 1995.
- [5] Hingorani N.G. and Gyugyi L., *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems*, IEEE Press, 2000.
- [6] Kundur P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [7] Makombe T. and Jenkins N., "Investigation of a unified power flow controller," *IEE Proceeding of Generation Transmission and Distribution*, Vol. 146, No. 4, pp. 400-408, July 1999.