

การควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดแบบกระจายด้วยการบ่อนกลับ
 สัญญาณออกคงที่แบบ Stackelberg

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการเลี้ยงเชิงอนุพันธ์โดยสังเขป หลังจากนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีการเลี้ยงเชิงอนุพันธ์ที่ใช้การบ่อนกลับสัญญาณออกคงที่แบบ Stackelberg และในตอนท้ายจะประยุกต์ทฤษฎีที่นำเสนอกับการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดแบบกระจายของระบบไฟฟ้ากำลังสอง เขต พร้อมทั้งสรุปผลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีดังกล่าวออกแบบตัวควบคุมในกรณีต่าง ๆ

ทฤษฎีการเลี้ยงเชิงอนุพันธ์

ทฤษฎีการเลี้ยง เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการร่วมมือและแข่งขัน ถ้าระบบที่พิจารณาเป็นระบบพลวัต รูปแบบของเกมที่พิจารณาก็จะเรียกว่าเกมเชิงอนุพันธ์ (differential games หรือ dynamic games) โครงสร้างทั่วไปของเกมเชิงอนุพันธ์แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ผู้เล่น (player) หรือตัวควบคุมแต่ละคนซึ่งเป็นผู้ตัดสินใจ (decision maker หรือ DM) พยายามหาเวกเตอร์ควบคุม u^i ของตัวเองเพื่อที่จะทำให้ดัชนีสมรรถนะของตนมีค่าน้อยที่สุดโดยที่ผู้เล่นทั้งหมดมีการเกี่ยวข้องกันด้วยสมการสถานะ (state equation) ของระบบ และผู้เล่นแต่ละคนต่างก็มีการวัด (measurement) เป็นของตนเอง จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้คือ

$$\min_{u^i} J^i = K_i[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L_i[x, t, u^1, \dots, u^n] dt$$

subject to $\dot{x}(t) = f[x, t, u^1, \dots, u^n]$, $i=1, 2, \dots, n$ (5.1)

ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะเกมเชิงอนุพันธ์แบบผลรวมไม่เป็นศูนย์ (nonzero-sum differential games) เท่านั้นซึ่งเป็นกรณีที่ $\sum_{i=1}^n J^i \neq 0$

จากข้างต้นเห็นได้ว่า เกมเชิงอนุพันธ์เป็นปัญหาการตัดสินใจในรูปของการออบติไมซ์หลายเกณฑ์ (multicriteria optimization) ซึ่งเป็นการขยายความต่อจากทฤษฎีควบคุมแบบเล็ง เลิศ ถ้ามีผู้เล่นเพียงคนเดียวปัญหาก็จะกลายเป็นปัญหาการควบคุมแบบเล็ง เลิศ แต่ลักษณะที่แปลกของปัญหาเกมเชิงอนุพันธ์คือ มีคำตอบได้หลายคำตอบขึ้นอยู่กับ

โครงสร้างสารนิเทศของผู้เล่นและกลยุทธ์ที่ผู้เล่นแต่ละคนเลือกใช้ อาทิเช่น

ก) กลยุทธ์ของ Nash (Starr, 1969) คือกลยุทธ์ที่ผู้เล่นแต่ละคนไม่แน่ใจในความร่วมมือของทุกฝ่าย ทุกคนพยายามทำให้ตนเองได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยลำพัง เป็นผลทำให้ได้ผลลัพธ์ไม่ซ้ำค่าที่เล็ง เลิศในความหมายที่ว่าถ้าผู้เล่นไว้ใจกันผู้เล่นแต่ละคนอาจจะหาผลลัพธ์ที่ค่าดีกว่านี้ได้ แต่ผลลัพธ์จากกลยุทธ์ของ Nash เป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการที่ผู้เล่นไม่แน่ใจในความร่วมมือกันของทุกฝ่าย และเป็นการป้องกันไม่ทำให้ผู้เล่นผู้ใดผู้หนึ่ง เปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ในการเล่นเกมโดยลำพัง ในกรณีที่มีผู้เล่น 2 คนคือ DM.0 และ DM.1 แต่ละคนมีดัชนีสมรรถนะ J^0 และ J^1 ตามลำดับซึ่งควบคุมด้วยตัวแปร 2 ตัวคือ u^0 และ u^1 กลยุทธ์ของ Nash ของคู่ DM.0 และ DM.1 มีเงื่อนไขจำเป็นคือ

$$\begin{aligned} J^0(u^{0*}, u^{1*}) &\leq J^0(u^0, u^{1*}), \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } u^0 \\ \text{และ } J^1(u^{0*}, u^{1*}) &\leq J^1(u^{0*}, u^1), \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } u^1 \end{aligned} \quad (5.2)$$

ข) กลยุทธ์ของ Stackelberg (Cruz, 1978; Chen et al.1972; Simaan et al. 1973; Gardner et al. 1977,1978; Glankwamdee et al. 1978) คือกลยุทธ์ที่มีการแบ่งผู้เล่นออกเป็นผู้นำและผู้ตาม ในการเล่นเกมแต่ละคนจะโครงสร้างสารนิเทศต่างกัน กลยุทธ์แบบนี้มีลักษณะของการตัดสินใจแบบมีลำดับชั้น (hierachy) แฝงอยู่ กล่าวคือในการเล่นเกมผู้นำจะประกาศกลยุทธ์ในการเล่นของตนเองก่อน และผู้ตามก็จะเล่นตามกลยุทธ์ของผู้นำอย่างมีเหตุผล โดยผู้นำจะทราบดัชนีสมรรถนะที่ใช้ในการตัดสินใจของผู้ตาม แต่ผู้ตามอาจจะรู้หรือไม่รู้ดัชนีสมรรถนะของผู้นำ อย่างไรก็ตามผู้ตามซึ่งเล่นเกมภายหลังจะทราบถึงการตัดสินใจของผู้นำและนำข้อมูลนั้นไปวางแผนในการเล่นของเขา ในขณะที่เดียวกันผู้นำจะรับรู้พฤติกรรมตอบสนอง (reaction behaviour) ของผู้ตามและนำมาใช้ในการตัดสินใจของเขา ในกรณีที่มีผู้เล่น 2 คนคือ DM.0 เป็นผู้นำและ DM.1 เป็นผู้ตามแต่ละคนมีดัชนีสมรรถนะเป็น J^0 และ J^1 ตามลำดับ กลยุทธ์ของ Stackelberg ของคู่ DM.0 และ DM.1 จะมีเงื่อนไขจำเป็นคือ DM.1 จะตัดสินใจเลือก $u^1 = T_1(u^0)$ ที่ทำให้

$$J^1(u^0, T_1(u^0)) \leq J^1(u^0, u^1), \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } u^1 \quad (5.3)$$

จากแต่ละ u^0 ที่กำหนดค่าให้โดย DM.0 T_1 เป็น mapping จาก u^0 ไปยัง u^1 หรือเป็นโค้งตอบสนอง (reaction behavior) ของผู้ตามที่มีต่อผู้นำนั่นเอง ในการตัดสินใจของผู้นำ DM.0 จะเลือก u^0 เมื่อรู้โค้งตอบสนองของ DM.1 ที่ทำให้

$$J^0(u^{0*}, T_1(u^{0*})) \leq J^0(u^0, T_1(u^0)), \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } u^0 \quad (5.4)$$

ดังนั้นการตัดสินใจของผู้ตามเป็นปัญหาการอบติไมซ์ธรรมดาเมื่อกำหนดตัวแปรตัดสินใจของผู้นำให้ ในขณะที่การตัดสินใจของผู้นำเป็นปัญหาการอบติไมซ์แบบมีเงื่อนไขซึ่งคำนวณยุ่งยากกว่ามาก เพราะต้องหาโค้งตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดของผู้ตามที่มีต่อผู้นำด้วย จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่า กลยุทธ์ของ Stackelberg เหมาะในการแก้ปัญหาของระบบใหญ่ที่ซับซ้อนเช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง, ระบบทางเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น โดยที่สามารถทำให้ระบบมีโครงสร้างในการตัดสินใจแบบลำดับชั้น ผู้ตัดสินใจในระดับชั้นบนเป็นผู้นำและผู้ตัดสินใจในระดับชั้นล่างเป็นผู้ตาม

Chen et al. (1972) และ Cruz (1978) ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกัน ระหว่างการใช้กลยุทธ์ทั้งสองแบบสำหรับดัชนีสมรรถนะที่เหมือนกัน ดัชนีสมรรถนะของผู้นำที่ใช้กลยุทธ์ของ Stackelberg จะมีค่าที่ดีกว่าหรือเท่ากับค่าที่ได้เมื่อใช้กลยุทธ์ของ Nash เสมอ ส่วนผู้ตามที่ใช้กลยุทธ์ของ Stackelberg อาจมีค่าดัชนีสมรรถนะดีหรือเลวกว่ากรณีที่ใช้กลยุทธ์ของ Nash ก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามในการควบคุมระบบพลวัตด้วยการประยุกต์ทฤษฎีการตัดสินใจดังกล่าว โดยทั่วไปคาดหวังว่าการใช้กลยุทธ์ของ Stackelberg จะให้สมรรถนะรวมของระบบทั้งหมดดีกว่าการใช้กลยุทธ์ของ Nash เหตุผลดังกล่าวเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้กลยุทธ์ของ Stackelberg

กลยุทธ์ของ Stackelberg ที่ใช้การป้อนกลับสัญญาณออกแบบคงที่

ในการออกแบบระบบที่มีขนาดใหญ่ วิธีการป้อนกลับสถานะโดยใช้ทฤษฎีควบคุมแบบ เล็ง เลิศทำได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะต้องทำการป้อนกลับสถานะทั้งหมด ในกรณีที่ทำกรวัดสถานะได้ยาก การนำตัวส่ง เกตหรือตัวประมวลค่ามาช่วยก็ยังคงไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติอยู่ดี เพราะทำให้ระบบมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นและความเชื่อถือได้ลดลง การออกแบบระบบที่ดีควรใช้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นจึงมีการพยายามวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระบบแบบ เล็ง เลิศย่อยโดยใช้การป้อนกลับสัญญาณออกแทน ตัวควบคุมชนิดนี้จะใช้การป้อนกลับของสัญญาณออกเท่าที่ทำกรวัดได้เท่านั้น อย่างไรก็ตามในการควบคุมระบบขนาดใหญ่การควบคุมแบบรวมศูนย์ด้วยการป้อนกลับสัญญาณออกยังคงมีปัญหาในทางปฏิบัติ ดังนั้นในระบบขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยระบบย่อยหลายระบบ การควบคุมที่เหมาะสมที่สุดคือ การควบคุมแบบกระจายด้วยการป้อนกลับสัญญาณออก ดังแผนภาพที่แสดงในภาพที่ 5.2

ในกรณีที่เป็นการตัดสินใจซึ่งมีหลาย เกณฑ์และมีผู้ตัดสินใจหลายคนโดยที่แต่ละคนจะมีดัชนีสมรรถนะของตนเอง ทฤษฎีการเสี่ยง เชิงอนุพันธ์สามารถนำมาใช้อธิบายถึงความเหมาะสม

(optimality) ในเชิงความหมายของกลยุทธ์หรือยุทธวิธีที่เลือกใช้ (rationality) และสามารถใช้อัตราขยายย้อนกลับที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมของแต่ละระบบย่อยได้ต่อไปจะพิจารณาปัญหาเกมเชิงอนุพันธ์ที่มีผู้ตัดสินใจ 2 คนที่ใช้การย้อนกลับสัญญาณออกคงที่แบบ Stackelberg ในระบบพลวัตแบบเชิงเส้นซึ่งมีดัชนีสมรรถนะ เป็นฟังก์ชันกำลังสอง

พิจารณาระบบที่มีสมการสถานะคือ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B^0 u^0(t) + B^1 u^1(t), \quad x(0) = x_0 \quad (5.5)$$

$$y^i(t) = C^i x(t), \quad i=0,1 \quad (5.6)$$

โดยที่ $x(t)$ เป็นเวกเตอร์สถานะของระบบมิติ n

x_0 เป็นเวกเตอร์เชิงสุ่มแบบเกาส์มิติ n ที่มีค่าเฉลี่ย (mean) เป็นศูนย์ และโคแวนเรียนซ์ (covariance) เป็นเมตริกซ์เอกลักษณะ

$u^i(t)$ เป็นเวกเตอร์ควบคุมมิติ m_i ที่ได้จากกฎการควบคุมของผู้ตัดสินใจคนที่ i

$y^i(t)$ เป็นเวกเตอร์สัญญาณออกมิติ k_i ที่วัดได้ของผู้ตัดสินใจคนที่ i

ดัชนีสมรรถนะของผู้ตัดสินใจแต่ละคนคือ

$$J^i = 1/2 \int_0^\infty [x^T(t) Q^i x(t) + u^{iT}(t) R^i u^i(t)] dt, \quad i=0,1 \quad (5.7)$$

โดยที่ Q^i เป็นเมตริกซ์สมมาตรกึ่งบวกแน่นอนมิติ $n \times n$

R^i เป็นเมตริกซ์สมมาตรบวกแน่นอนมิติ $k_i \times k_i$

กำหนดให้การควบคุมย้อนกลับของแต่ละระบบย่อยมีโครงสร้างเป็น

$$u^i(t) = -F^i y^i(t) = -F^i C^i x(t) \quad (5.8)$$

ผู้ตัดสินใจแต่ละคนมีวัตถุประสงค์ในการเล่นเกมนั้นคือ หาเมตริกซ์อัตราขยาย F^i ที่ทำให้ค่าคาดคะเน (expected value) ของดัชนีสมรรถนะของตนเองมีค่าน้อยที่สุด F^i เป็นเมตริกซ์อัตราขยายย้อนกลับที่หามาได้โดยที่กฎการควบคุมเป็นการย้อนกลับแบบ Stackelberg

ดังนั้นระบบพลวัตใน (5.5) และ (5.6) เมื่อควบคุมแบบวงปิดดัง (5.8) จะได้เป็น

$$\dot{x}(t) = (A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1) x(t), \quad x(0) = x_0 \quad (5.9)$$

และถ้าระบบวงปิดที่ได้นั้น (5.9) มีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติก ค่าคาดคะเนของดัชนีสมรรถนะของผู้ตัดสินใจแต่ละคนใน (5.7) เขียนได้เป็น (Kwakernaak et al. 1972)

$$\hat{J}^i \triangleq E[J^i] = 1/2 \text{tr } K^i \quad (5.10)$$

โดยที่ K^i เป็นเมตริกซ์กึ่งบวกแน่นอนมิติ $n \times n$ และเป็นคำตอบของสมการเมตริกซ์เชิงเส้นของ Lyapunov

$$(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1)^TK^1 + K^1(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1) + Q^1 + C^1TF^1TR^1F^1C^1 = 0 \quad (5.11)$$

เห็นได้ว่าปัญหาได้เปลี่ยนจากการออบติไมซ์เชิงพลวัตมาเป็นการออบติไมซ์เชิงสถิตแบบที่มีข้อจำกัดแบบสมการ (equality constraint) จากการใช้หลักการของตัวคุณลากรางจ์ในเกมซึ่งใช้กลยุทธ์ของ Stackelberg ที่กำหนดให้ DM.0 เป็นผู้นำ และ DM.1 เป็นผู้ตาม โดยมีวัตถุประสงค์คือ

ก) ผู้ตามจะทำให้ค่าคาดคะเนของดัชนีสมรรถนะของตนน้อยที่สุดเทียบกับ F^1 เมื่อกำหนด F^0 ำจากผู้นำ

ข) ผู้นำจะทำให้ค่าคาดคะเนของดัชนีสมรรถนะของตนเองน้อยที่สุดเทียบกับ F^0 โดยมี F^1 เป็นไปตามโต้ตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดของผู้ตามที่มีต่อตน

ลากรางจ์เกียนของผู้ตาม $\tilde{J}^1(F^0, F^1, K^1, L^1)$ ที่มีเมตริกซ์ L^1 เป็นตัวคุณลากรางจ์เขียนได้เป็น

$$\tilde{J}^1(F^0, F^1, K^1, L^1) = 1/2 \operatorname{tr} K^1 + 1/2 \operatorname{tr} [\{ (A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1)^TK^1 + K^1(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1) + Q^1 + C^1TF^1TR^1F^1C^1 \} L^1T]$$

เงื่อนไขจำเป็นของการทำให้น้อยที่สุดของผู้ตามเทียบกับ F^1, K^1, L^1 เมื่อกำหนด F^0 ำให้ คือ

$$\frac{\partial \tilde{J}^1}{\partial F^1} = 0 \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial \tilde{J}^1}{\partial K^1} = 0 \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial \tilde{J}^1}{\partial L^1} = 0 \quad (5.14)$$

จาก (5.12)-(5.14) จะได้โต้ตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้นนำสมการของโต้ตอบสนองที่ได้แทนลงในค่าคาดคะเนของดัชนีสมรรถนะของผู้นำ และใช้วิธีการทำนองเดียวกันหาเงื่อนไขจำเป็นในการทำให้น้อยที่สุดของผู้นำได้

ทฤษฎีบท เมตริกซ์อัตราขยายการบ่อนกลับสัญญาณออกแบบ Stackelberg ($F^i, i = 0, 1$) ของระบบใน (5.5)-(5.8) และมีดัชนีสมรรถนะในการตัดสินใจของผู้ตัดสินใจตั้ง (5.10)-(5.11) เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$F^1 = (R^1)^{-1} B^1 T K^1 L^1 C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} \quad (5.15)$$

$$F^0 = (R^0)^{-1} B^0 T \{K^0 L^1 + K^1 M + N L^1\} C^0 T (C^0 L^1 C^0 T)^{-1} \quad (5.16)$$

$$(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)^T K^0 + K^0 (A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1) + Q^0 + C^0 T F^0 T R^0 F^0 C^0 = 0 \quad (5.17)$$

$$(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)^T K^1 + K^1 (A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1) + Q^1 + C^1 T F^1 T R^1 F^1 C^1 = 0 \quad (5.18)$$

$$(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1) L^1 + L^1 (A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)^T + I = 0 \quad (5.19)$$

$$(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1) M + M (A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)^T - B^1 (R^1)^{-1} B^1 T \{K^0 L^1 + K^1 M + N L^1\} C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} C^1 L^1 + B^1 F^1 C^1 M C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} C^1 L^1 = 0 \quad (5.20)$$

$$(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)^T N + N (A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1) - K^1 B^1 (R^1)^{-1} B^1 T \{K^0 L^1 + K^1 M + N L^1\} C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} C^1 + K^1 B^1 F^1 C^1 M C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} C^1 - C^1 T F^1 T R^1 F^1 C^1 M C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} C^1 + C^1 T F^1 T B^1 T \{K^0 L^1 + K^1 M + N L^1\} C^1 T (C^1 L^1 C^1 T)^{-1} C^1 = 0 \quad (5.21)$$

ขั้นตอนวิธีในการหาคำตอบ

จากข้างต้นคำตอบของ เกมแบบ Stackelberg สามารถหาได้จากการแก้สมการ (5.15 - 5.21) ซึ่งเป็นชุดของสมการพีชคณิตไม่เชิงเส้นโดยวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เช่น Newton-Raphson เป็นต้น แต่วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการทำซ้ำ (iterative method) ซึ่งไม่รับประกันการลู่เข้าของคำตอบ และปัญหาที่ยิ่งไปกว่านั้นก็คือ ตัวแปรที่มีจำนวนที่เกี่ยวข้องมากถ้าระบบมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงได้เสนอขั้นตอนวิธี (algorithm) เพื่อหาคำตอบของปัญหาดังกล่าวขึ้น เมื่อพิจารณาจากข้างต้นเห็นได้ว่าปัญหาของเกมแบบ Stackelberg ดังกล่าวได้ลดรูปจากการออบติไมซ์เชิงพลวัตลงมาเป็น การออบติไมซ์เชิงสถิตที่มี 2 ขั้นตอน คือ

ก) การตัดสินใจระดับล่างของผู้ตาม มีจุดมุ่งหมายคือ หาโต้ตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือ เมื่อกำหนด F^0 มาให้หา F^1 ที่

$$\min J^1 = 1/2 \operatorname{tr} K^1 \quad (5.22)$$

โดยที่ K^1 เป็นเมตริกซ์สมมาตรกึ่งบวกแน่นอนมิติ $n \times n$ และเป็นคำตอบของสมการ

$$(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1)^TK^1 + K^1(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1) + Q^1 + C^1TF^1TR^1F^1C^1 = 0 \quad (5.23)$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดแต่ละค่าของ F^0 มาหาก็สามารถหา F^1 ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้จากการใช้เทคนิคการโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Choi et al. 1974; Horisberger et al. 1974; Jacoby et al. 1972) ดังสรุปเป็นขั้นตอนวิธีได้ดังนี้

Algorithm 1 : input $A, B^0, B^1, C^0, C^1, Q^1, R^1, F^0$, and EPS
output F^1

STEP 0. Find an initial guess of F^1 such that $(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1)$ is asymptotically stable. Set $i = 0$ and $F_i^1 = F^1$.

STEP 1. Find \hat{J}^1 from (5.22) and (5.23).

STEP 2. Compute a search direction s^i according to the selected nonlinear programming techniques.

STEP 3. Perform a one-dimensional minimization, assuming that F_i^1 is stored columnwise.

$$\hat{J}^1(F_i^1 + \alpha_i s^i) = \min_{\alpha} \hat{J}^1(F_i^1 + \alpha s^i)$$

STEP 4. Update $F_{i+1}^1 = F_i^1 + \alpha_i s^i$.

STEP 5. If $\|F_{i+1}^1 - F_i^1\| / \|F_i^1\| < \text{EPS}$ then stop; else go to step 6.

STEP 6. Set $i = i + 1$. Go to step 2. #####

ข) การตัดสินใจระดับของผู้นำ มีจุดมุ่งหมายคือ หา F^0 ที่

$$\min \hat{J}^0 = 1/2 \text{tr} K^0 \quad (5.24)$$

โดยที่ K^0 เป็นเมตริกซ์สมมาตรกึ่งบวกแน่นอนมิติ $n \times n$ และเป็นคำตอบของสมการ

$$(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1)^TK^0 + K^0(A-B^0F^0C^0-B^1F^1C^1) + Q^0 + C^0TF^0TR^0F^0C^0 = 0 \quad (5.25)$$

และ F^1 ที่ทำให้

$$J^1(F^0, F^{1*}) \leq J^1(F^0, F^1), \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } F^1 \quad (5.26)$$

งานทำนองเดียวกับตอนต้น ปัญหาในระดับนี้สามารถแก้ได้โดยใช้เทคนิคเดียวกันตั้งขั้นตอนวิธีต่อไปนี้

Algorithm 2 : input $A, B^0, B^1, C^0, C^1, Q^0, Q^1, R^0, R^1$, and EPS.
output F^0 and F^1

STEP 0. Find an initial guess of F^0 and F^1 such that $(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)$ is asymptotically stable. Set $j = 0$, $F_j^0 = F^0$ and $F_j^1 = F^1$.

STEP 1. Find F_{j+1}^1 which corresponds to F_j^0 along the optimal reaction curve by using algorithm 1 with F_j^1 as an initial guess.

STEP 2. Compute \hat{J}^0 from (5.24) and (5.25).

STEP 3. Compute a search direction s^j .

STEP 4. Perform a one-dimensional minimization, assuming that F_j^0 is stored columnwise.

$$\hat{J}^0(F_j^0 + \alpha_j s^j) = \min_{\alpha} \hat{J}^0(F_j^0 + \alpha s^j)$$

STEP 5. Update $F_{j+1}^0 = F_j^0 + \alpha_j s^j$.

STEP 6. If $\|F_{j+1}^0 - F_j^0\| / \|F_j^0\| < \text{EPS}$ then stop; else go to step 7.

STEP 7. Set $j = j+1$. Go to step 3.

#####

ขั้นตอนวิธีข้างต้นมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

ก. ในขั้นตอนวิธีที่เสนอการปรับเกรงไม่เชิงเส้นควรเลือกใช้วิธีของ Davidon-Fletcher-Powell ตามที่เสนอโดย Choi et al. (1974) และ Horisbergen et al. (1974)

ข. ในขั้นตอนวิธีที่เสนอการแก้สมการเมตริกซ์แบบเชิงเส้นของ Lyapunov ควรใช้วิธีที่เสนอโดย Bartels and Stewart (1972)

ค. การเดาคำตอบครั้งแรก (initial guess) ในขั้นตอนวิธีที่สองที่เสนอ ต้องทำให้ระบบวงปิด $(A - B^0 F^0 C^0 - B^1 F^1 C^1)$ มีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติก ในความจริง

คำตอบที่ใช้เดาแรกจะใช้ค่าอะไรก็ได้ที่ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพดังกล่าว แต่เพื่อการประหยัดเวลาในการคำนวณ ควรใช้คำตอบที่ได้จากกรณีของการใช้ตัวควบคุมแบบเล็ง เลิศที่ใช้การป้อนกลับสัญญาณออกดังกล่าวแต่เลือกใช้เฉพาะค่าที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรในระบบย่อยของตนเองเท่านั้น

ง. ในการคำนวณค่าของ J^0 แต่ละครั้งต้องทำการหา $F1^*$ โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่หนึ่ง เพื่อที่จะลดเวลาของการคำนวณในขั้นตอนวิธีที่หนึ่ง $F1^*$ ที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งควรเก็บไว้เป็นคำตอบที่ใช้เดาแรกของการคำนวณในขั้นตอนวิธีที่หนึ่งครั้งต่อไป

การออกแบบตัวควบคุมแบบกระจายสำหรับระบบ LFC สองเขต

จากที่ผ่านมานบทที่ 4 เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบกระจายสำหรับระบบ LFC ที่เสนอโดย Calovic (1977) สามารถปรับปรุงผลตอบชั่วคราวของระบบ LFC ให้ดีขึ้นกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบที่นิยมใช้กัน โดยแต่ละเขตทำการวัดสัญญาณออกของเทอร์โบเพิ่มขึ้นจากการวัดที่มีอยู่เดิมใน LFC แบบที่นิยมใช้กัน และใช้ป้อนกลับเฉพาะในเขตของตนเท่านั้น ตัวควบคุมที่เสนอนี้มีโครงสร้างเรียบง่ายใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบที่นิยมใช้กันและมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาใช้ในการปฏิบัติจริง แต่วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เสนอโดย Calovic(1977) ซึ่งหาอัตราขยายป้อนกลับที่เหมาะสมโดยการทำให้ออร์มน้อยที่สุดมีข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือ ไม่รับประกันว่าคำตอบที่ได้ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติก ดังนั้นการออกแบบจึงค่อนข้างเป็นไปในลักษณะของการลองผิดลองถูกเสียเป็นส่วนใหญ่เพื่อหาชุดของตัวถ่วงน้ำหนักของค่าไอเก้นที่เหมาะสม ผิดกับการใช้หลักการของทฤษฎีตัวคงค่าแบบ LQ ซึ่งโดยทั่วไปจะรับประกันได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จะมีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติกทำให้ออกแบบตัวควบคุมได้ง่ายกว่า การลองผิดลองถูกในวิธีของตัวคงค่าแบบ LQ เป็นเพียงการเปลี่ยนการถ่วงน้ำหนักของตัวแปรในดัชนีสมรรถนะเพื่อให้ได้ผลตอบเป็นที่พอใจเท่านั้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงพิจารณาการออกแบบตัวควบคุมแบบกระจายโดยใช้หลักการของทฤษฎีตัวคงค่าแบบ LQ เป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนางานวิจัย จากข้อเสียดังกล่าวของวิธีที่เสนอโดย Calovic(1977) ต่อไปจะประยุกต์ทฤษฎีการเลี้ยงเชิงอนุพันธ์ที่นำเสนอมาใช้คำนวณหาอัตราขยายของตัวควบคุมแทนเพื่อแก้ข้อเสียดังกล่าว โดยที่โครงสร้างของตัวควบคุมยังคงเหมือนกับที่เสนอโดย Calovic (1977)

เช่นเดียวกับในบทที่ 3 พิจารณาโมเดลของระบบ LFC สองเขตที่อาอินทิกัลของ ACE ดังในสมการ (3.24) ระบบ LFC แต่ละเขตใช้การป้อนกลับของสัญญาณออกเท่าที่ทำการวัดได้

ในเขตของตนเท่านั้น โดยการวัดเป็นไปตามสมการ

$$y^i = C^i x = [y_{Pi}^T, y_{Ii}^T]^T \quad (5.27)$$

โดยที่ y_{Pi} เป็นเวกเตอร์สัญญาณออกที่ใช้ในการบ่อนกลับแบบสัดส่วนของเขตที่ i

y_{Ii} เป็นเวกเตอร์สัญญาณออกที่ใช้ในการบ่อนกลับแบบอินทิกรัลของเขตที่ i หรือเป็นอินทิกรัลของ ACE ในเขตที่ i

กฎการควบคุมแบบกระจายของแต่ละเขตคือ

$$w_i(t) = -F^i y^i(t) = -K_{Pi} y_{Pi}(t) - K_{Ii} v_i(t) \quad (5.28)$$

$$\text{โดยที่ } F^i = [K_{Pi}, K_{Ii}] \quad (5.29)$$

เมื่อประยุกต์ทฤษฎีตัวควบคุมแบบ LQ ที่เสนอขึ้นในข้างต้น เพื่อให้ทำการเบี่ยงเบนของผลตอบชั่วครู่มีค่าน้อยที่สุด สมการสถานะของระบบ LFC ใน (3.24) เขียนใหม่ให้อยู่ในรูปมาตรฐานที่ไม่มีผลของสัญญาณรบกวนทางโพลและในรูปแบบกระจาย (decentralized form)

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}^1 \hat{w}_1 + \hat{B}^2 \hat{w}_2, \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \quad (5.30)$$

$$\hat{y}^i(t) = C^i \hat{x}(t) \quad (5.31)$$

$$\text{โดยที่ } \hat{x} = \begin{bmatrix} x - x_{ss} \\ v - v_{ss} \end{bmatrix}, \quad \hat{w} = [w - w_{ss}], \quad \hat{y} = [y - y_{ss}]$$

จากสมการ (5.30) และ (5.31) ระบบดังกล่าวอยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้ทฤษฎีการตัดสินใจที่ได้นำเสนอในข้างต้น เพื่อหาอัตราขยายบ่อนกลับของตัวควบคุมที่เหมาะสม

ในที่นี้ได้แบ่งกรณีของการออกแบบตัวควบคุมออกเป็น 3 กรณี และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้เรียกกรณีต่อไปนี้เป็นตัวย่อภาษาอังกฤษ ถ้าลงท้ายด้วย "A1" จะหมายถึงกรณีของเกมแบบ Stackelberg ที่มีเขตที่ 1 เป็นผู้นำและเขตที่ 2 เป็นผู้ตาม ถ้าลงท้ายด้วย "A2" จะหมายถึงกรณีของเกมแบบ Stackelberg ที่มีเขตที่ 2 เป็นผู้นำและเขตที่ 1 เป็นผู้ตาม กรณีทั้ง 3 นี้ได้แก่

1. กรณี INSTKA1 และ กรณี INSTKA2 เป็นกรณีที่ใช้เปรียบเทียบโดยตรงกับผลที่ได้จากตัวควบคุมที่เสนอโดย Calovic(1977) ตัวควบคุมจะใช้โครงสร้างสารนิเทศเหมือนกับที่เสนอโดย Calovic(1977) ตัวควบคุมแต่ละเขตจะใช้จำนวนการบ่อนกลับที่เท่ากันดังสมการ

$$y^i = [\Delta P_{Ti}, \Delta P_{Hi}, \Delta f_i, \Delta P_{I2}, v_i]^T \quad (5.32)$$

ระบบ LFC แต่ละเขตมีดัชนีสมรรถนะคือ

$$J^i = 1/2 \int_0^{\infty} (\Delta f_i^2 + 0.5\Delta P_{12}^2 + (v_i - v_{iss})^2 + \hat{w}_i^2) dt, \quad i=1,2 \quad (5.33)$$

2. กรณี MSTKA1 และ MSTKA2 เป็นกรณีศึกษาที่ทำเพิ่มขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเกมแบบ Stackelberg เมื่อผู้นำและผู้ตามมีจำนวนสารนิเทศไม่เท่ากัน ผู้นำจะใช้สารนิเทศในการบ่อนกลับมากกว่าผู้ตาม โดยผู้นำมีการวัดเหมือนกับกรณีแรกคือ

$$y_{\text{leader}} = [\Delta P_{Ti}, \Delta P_{Hi}, \Delta f_i, \Delta P_{12}, v_i]^T \quad (5.34)$$

และผู้ตามมีการวัดคือ

$$y_{\text{follower}} = [\Delta f_i, \Delta P_{12}, v_i]^T \quad (5.35)$$

ดัชนีสมรรถนะของระบบ LFC แต่ละเขตเหมือนกับในกรณีแรกคือสมการ (5.33)

$$J^i = 1/2 \int_0^{\infty} (\Delta f_i^2 + 0.5\Delta P_{12}^2 + (v_i - v_{iss})^2 + \hat{w}_i^2) dt, \quad i=1,2 \quad (5.33)$$

3) กรณี STKLDA1 และ STKLDA2 เป็นกรณีศึกษาที่ทำเพิ่มขึ้นเช่นกันเดียวกับกรณีที่สอง ผู้นำและผู้ตามจะใช้โครงสร้างสารนิเทศเหมือนกับกรณีที่สองดังสมการ (5.34) และ (5.35) แต่ดัชนีสมรรถนะของแต่ละเขตจะไม่เหมือนกับกรณีที่สอง คือ

$$J_{\text{leader}} = 1/2 \int_0^{\infty} (\Delta f_i^2 + \Delta P_{12}^2 + (v_i - v_{iss})^2 + \hat{w}_i^2) dt \quad (5.36)$$

$$J_{\text{follower}} = 1/2 \int_0^{\infty} (\Delta f_i^2 + (v_i - v_{iss})^2 + \hat{w}_i^2) dt \quad (5.37)$$

จากกรณีทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อสังเกตสรุปได้ดังนี้

ก) ดัชนีสมรรถนะของแต่ละเขตจะเกี่ยวข้องเฉพาะตัวแปรในเขตของตนเท่านั้น โดยมีกำลังจริงในเส้นเชื่อมต่อ (ΔP_{12}) เป็นตัวแปรร่วมระหว่างสองเขต เห็นได้ว่าเกณฑ์ในการตัดสินใจเป็นแบบกระจาย

ข) จากทั้งสามกรณี เห็นได้ว่าผลรวมของดัชนีสมรรถนะจากแต่ละเขตจะมีค่าคือ

$$J^1 + J^2 = 1/2 \int_0^{\infty} (\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2 + \Delta P_{12}^2 + (v_1 - v_{1ss})^2 + (v_2 - v_{2ss})^2 + \hat{w}_1^2 + \hat{w}_2^2) dt = J_{\text{centralized}} \quad (5.38)$$

สาเหตุที่เลือกดัชนีสมรรถนะในรูปแบบดังกล่าวคือ เพื่อจะสามารถเปรียบเทียบได้ว่าสมรรถนะที่ได้จากการควบคุมแบบกระจาย เบี่ยงเบนไปจากสมรรถนะที่ได้จากการควบคุมแบบรวมศูนย์มากน้อยเท่าไร ถึงแม้ว่าการเปรียบเทียบดังกล่าวจะไม่สามารถบอกถึงความแตกต่างของสมรรถนะของระบบได้อย่างชัดเจน แต่อย่างน้อยก็พอที่จะให้ภาพพจน์ในการเปรียบเทียบดังกล่าวได้บ้าง อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเปรียบเทียบระหว่างผลตอบชั่วครู่ของระบบด้วย เพื่อให้เห็น

ถึงความแตกต่างในการใช้งานจริงของกรณีต่าง ๆ อย่างชัดเจน

ค) สำหรับกรณีที่หนึ่งและกรณีที่สองอาจกล่าวได้ว่าเป็นกรณีที่ศึกษาผล เมื่อผู้นำและผู้ตามต่างรับผิดชอบการเบี่ยงเบนของ ΔP_{12} คนละครึ่งหนึ่งในการตัดสินใจของตน

ง) กรณีที่สามเป็นกรณีที่ศึกษาผลเมื่อผู้นำรับผิดชอบการเบี่ยงเบนของ ΔP_{12} แต่เพียงผู้เดียวในการตัดสินใจ

อัตราขยายบ่อนกลับของตัวควบคุมในกรณีทั้งสามแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 สมรรถนะของระบบบางปิดพิจารณาได้จากผลตอบชั่วคราวเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของโหลดดีมานด์ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันขั้นขนาด 0.01 pu. ผลตอบชั่วคราวของระบบและของสัญญาณควบคุมของแต่ละเขตหาได้จากสมการ (3.25) โดยสมมติว่าสภาวะเริ่มแรกของระบบทั้งหมดเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับกรณีในบทที่ 3 และ 4 ที่ผ่านมา ผลตอบชั่วคราวดังกล่าวของกรณีที่หนึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ถึง 5.7 ผลตอบชั่วคราวของกรณีที่สองแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 และผลตอบชั่วคราวของกรณีที่สามแสดงไว้ในรูปที่ 5.13 ถึง 5.17 นอกจากนี้รูปที่ 5.18 ถึง 5.22 และรูปที่ 5.23 ถึง 5.27 ยังแสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วคราวดังกล่าวระหว่างกรณีต่าง ๆ ซึ่งกำหนดให้เขตที่หนึ่งเป็นผู้นำ และกรณีต่าง ๆ ซึ่งกำหนดให้เขตที่สองเป็นผู้นำตามลำดับ จากการวิเคราะห์ผลตอบที่ได้จากกรณีต่าง ๆ สรุปผลได้ดังนี้

1) จากรูปที่ 5.3 ถึง 5.7 เป็นกรณีที่แต่ละเขตใช้จำนวนสารนิเทศเท่ากันในการบ่อนกลับ และแต่ละเขตต่างแบ่งรับผิดชอบการเบี่ยงเบนของ ΔP_{12} คนละเท่ากันในการตัดสินใจของตนผลตอบชั่วคราวของ Δf_1 , Δf_2 และ ΔP_{12} จากทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกันมากนักสรุปได้ว่าสำหรับโหมดระบบ LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังสองเขตที่ใช้ในที่นี้จะให้เขตใดก็ได้เป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg ระหว่างกรณีของ INSTKA1 และ INSTKA2

2) จากรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 และรูปที่ 5.13 ถึง 5.17 เป็นกรณีที่ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นในกรณีที่แต่ละเขตใช้จำนวนสารนิเทศไม่เท่ากัน สำหรับโหมดของระบบ LFC ที่ใช้ (MSTKA1 และ MSTKA2) หรือกรณีที่สาม (STKLDA1 และ STKLDA2) จะได้ผลที่เหมือนกันคือ สมรรถนะของระบบโดยการที่พิจารณาจากผลตอบชั่วคราวของ Δf_1 , Δf_2 และ ΔP_{12} ในกรณีที่กำหนดให้เขตที่สองเป็นผู้นำค่อนข้างดีกว่ากรณีที่กำหนดให้เขตที่หนึ่งเป็นผู้นำ จากกรณีดังกล่าวเห็นได้ว่าการที่เขตที่หนึ่งใช้จำนวนสารนิเทศในการบ่อนกลับมากกว่าเขตที่สอง (MSTKA1 และ STKLDA1) ไม่ได้ทำให้ผลตอบของ Δf_1 ดีไปกว่าการที่เขตที่หนึ่งใช้จำนวนสารนิเทศในการบ่อนกลับน้อยกว่าเขตที่สอง (MSTKA2 และ STKLDA2) เลย กล่าวคือ เขตที่หนึ่งไม่ได้รับ

ประโยชน์เพิ่มขึ้นจากการที่เป็นผู้นำเลย ทั้ง ๆ ที่คนที่เป็นผู้นำจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการวัดสัญญาณออกมากกว่าผู้ตาม ดังนั้นสำหรับโมเดลของระบบ LFC ที่ใช้นี้สรุปได้ว่า ในกรณีที่แต่ละเขตมีจำนวนสารนิเทศไม่เท่ากัน (MSTKA1 & MSTKA2 และ STKLDA1 & STKLDA2) ควรให้เขตที่สองเป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg

3) จากกรณีของ MSTKA1 และ MSTKA2 เมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีสมรรถนะกับผลตอบที่ได้ในรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 เห็นได้ว่า ค่าดัชนีสมรรถนะของเขตที่หนึ่งในการกรณีที่เขตที่หนึ่ง เป็นผู้นำจะต่ำกว่าในการกรณีที่เขตที่สอง เป็นผู้นำ แต่จากผลตอบชั่วครู่ของ Δf_1 ในรูปที่ 5.8 เห็นว่าผลตอบดังกล่าวในการกรณีที่เขตที่หนึ่ง เป็นผู้นำกลับไม่ได้ดีไปกว่ากรณีเขตที่สอง เป็นผู้นำ เหตุการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่า การที่ค่าดัชนีสมรรถนะจะสูงหรือต่ำเป็นเรื่องของการอพติไมซ์ที่เกิดขึ้นในเกมการตัดสินใจ ส่วนสมรรถนะของระบบจะต้องพิจารณาโดยตรงจากผลตอบของระบบอีกครั้งหนึ่ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวมักเกิดขึ้นในการนำทฤษฎีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์มาใช้ในการควบคุมระบบ แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบตัวควบคุมไม่ว่าด้วยวิธีใดเพื่อนำมาใช้งานจริง จำเป็นต้องพิจารณาผลตอบของระบบในกรณีที่ชะงักงานเสมอ

4) จากการเปรียบเทียบทั้งกรณีต่าง ๆ ที่ให้เขตที่หนึ่งเป็นผู้นำในรูปที่ 5.18 ถึง 5.22 และกรณีต่าง ๆ ที่ให้เขตที่สองเป็นผู้นำในรูปที่ 5.23 ถึง 5.27 ได้ผลสรุปที่เหมือนกันคือ การใช้จำนวนของสารนิเทศในการบ่อนกลับมากขึ้นย่อมทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นด้วย เพราะว่ามีจำนวนตัวแปรในการปรับค่าได้มากขึ้น ดังนั้นเห็นได้ว่า กรณี INSTKA1 มีสมรรถนะที่ดีกว่ากรณี MSTKA1 และ STKLDA1 และกรณี INSTKA2 มีสมรรถนะที่ดีกว่ากรณี MSTKA2 และ STKLDA2

5) นอกเหนือการหาตัวถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมในดัชนีสมรรถนะ เพื่อให้ได้ผลตอบเป็นที่พอใจตามวิธีการออกแบบทฤษฎีตัวคงค่าแบบ LQ แล้ว การใช้การบ่อนกลับแบบ Stackelberg ในการคำนวณตัวควบคุมแบบกระจายที่เหมาะสมยังต้องพิจารณาด้วยว่าใครควรจะ เป็นผู้นำในการตัดสินใจดังกล่าว เพื่อที่จะให้สมรรถนะของระบบมีค่าเหมาะสมจากผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างสารนิเทศของแต่ละระบบย่อยมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเลือกผู้นำที่เหมาะสมของเกมแบบ Stackelberg ดังในตัวอย่างของกรณี MSTKA1 และ MSTKA2 ที่กล่าวแล้วในข้อ 2

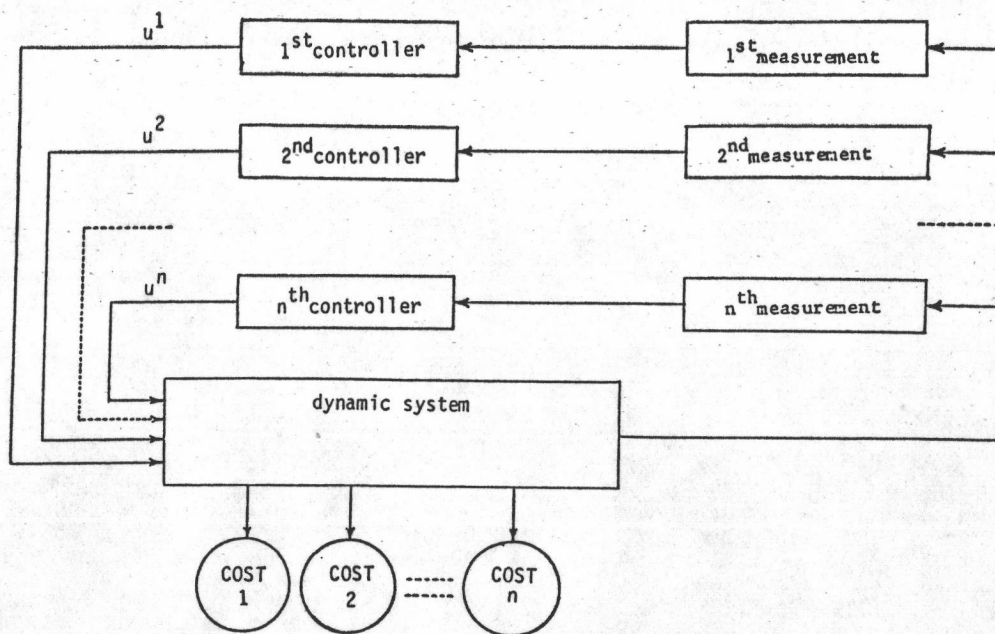
6) กรณีของ INSTKA1 และ INSTKA2 เป็นกรณีที่ใช้การบ่อนกลับสัญญาณออกคงที่แบบ Stackelberg คำนวณหาอัตราขยายบ่อนกลับของตัวควบคุมแบบกระจายที่มีโครงสร้าง

เหมือนกับตัวควบคุมที่เสนอโดย Calovic (1977) จากการเปรียบเทียบผลตอบชั่วคราวของระบบในรูปที่ 5.3 ถึง 5.7 กับผลตอบชั่วคราวของระบบ LFC แบบที่นิยมใช้กันรูปที่ 3.2 ถึง 3.5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ตัวควบคุมที่เสนอนักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถปรับปรุงผลตอบชั่วคราวของระบบ LFC ได้โดยที่ตัวควบคุมที่ใช้มีโครงสร้างเรียบง่ายเหมือนกับที่ได้เสนอโดย Calovic (1977) แต่ใช้หลักการออกแบบตัวควบคุมที่ต่างกัน

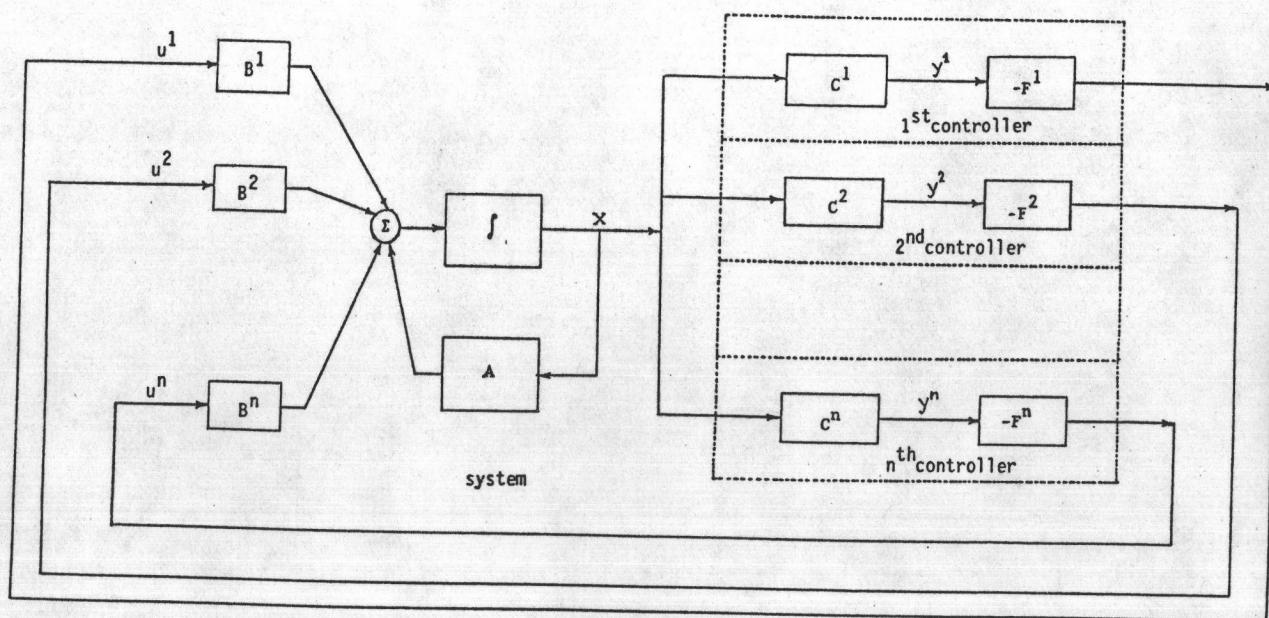
7) จากการพิจารณาระหว่าง MSTKA1 และ STKLDA1 หรือระหว่าง MSTKA2 และ STKLDA2 ซึ่งเป็นกรณีที่มีการที่ทั้งผู้นำและผู้ตามแบ่งรับผิดชอบการเบี่ยงเบนของ P_{12} ในดัชนีสมรรถนะที่ใช้ตัดสินใจ หรือการที่ผู้นำรับผิดชอบการเบี่ยงเบนของ P_{12} ในดัชนีสมรรถนะที่ใช้ตัดสินใจแต่เพียงผู้เดียวตามลำดับนั้น สรุปได้ว่า สำหรับโมเดลระบบ LFC ที่พิจารณานี้ สมรรถนะของระบบที่ได้จากทั้งสองกรณีมีลักษณะ ใกล้เคียงกัน

สรุป

ในบทนี้ได้พิจารณาการออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้นแบบกระจายสำหรับระบบขนาดใหญ่นำโดยใช้ทฤษฎีการตัดสินใจมาช่วยอธิบายถึงความเหมาะสมของอัตราขยายป้อนกลับที่เลือก เงื่อนไขสำคัญของการป้อนกลับสัญญาณออกคงที่แบบ Stackelberg ได้ถูกนำเสนอขึ้นพร้อมกับขั้นตอนวิธีการคำนวณหาคำตอบของปัญหาดังกล่าว หลังจากนั้นได้นำทฤษฎีที่เสนอดังกล่าวไปใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบกระจายสำหรับระบบ LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังสองเขต ตัวควบคุมมีโครงสร้างเหมือนกับที่เสนอโดย Calovic (1977) ซึ่งเรียบง่ายใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบที่นิยมใช้กันจากการจำลองเชิงเลขแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีที่นำเสนอสามารถปรับปรุงผลตอบชั่วคราวของระบบให้ดีกว่าตัวควบคุมแบบที่นิยมใช้กัน ยิ่งไปกว่านั้นการทำกรณีศึกษาอื่น ๆ เพิ่มเติมยังแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างสารนิเทศของแต่ละระบบย่อยมีผลต่อการเลือกผู้นำที่เหมาะสมในแบบ Stackelberg ด้วย

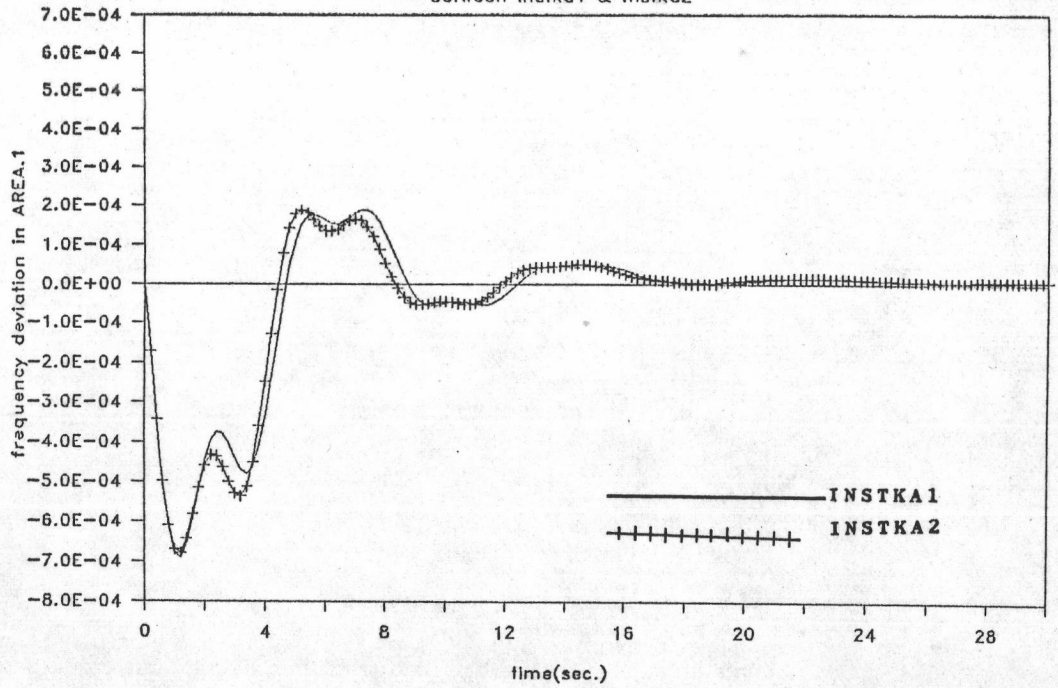


รูปที่ 5.1 โครงสร้างทั่วไปของเกมเชิงอนุพันธ์



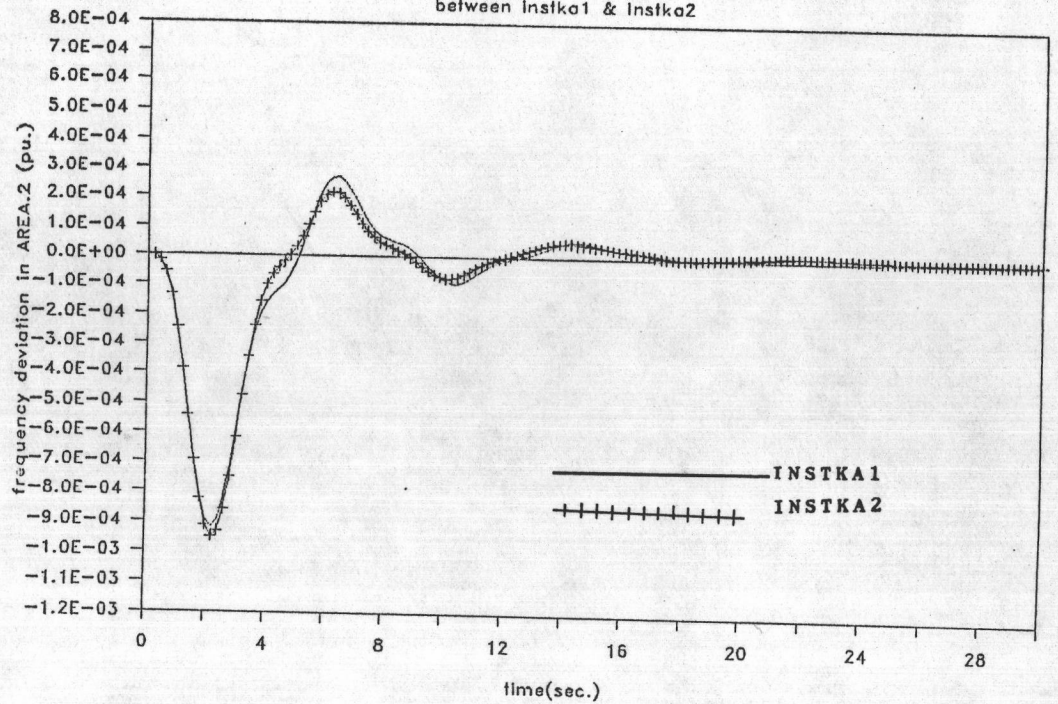
รูปที่ 5.2 แผนภาพระบบเชิงเส้นที่ใช้การควบคุมแบบกระจายด้วยการบ่อนกลับสัญญาณออก

upon step load disturbance in AREA.1
between Instka1 & Instka2



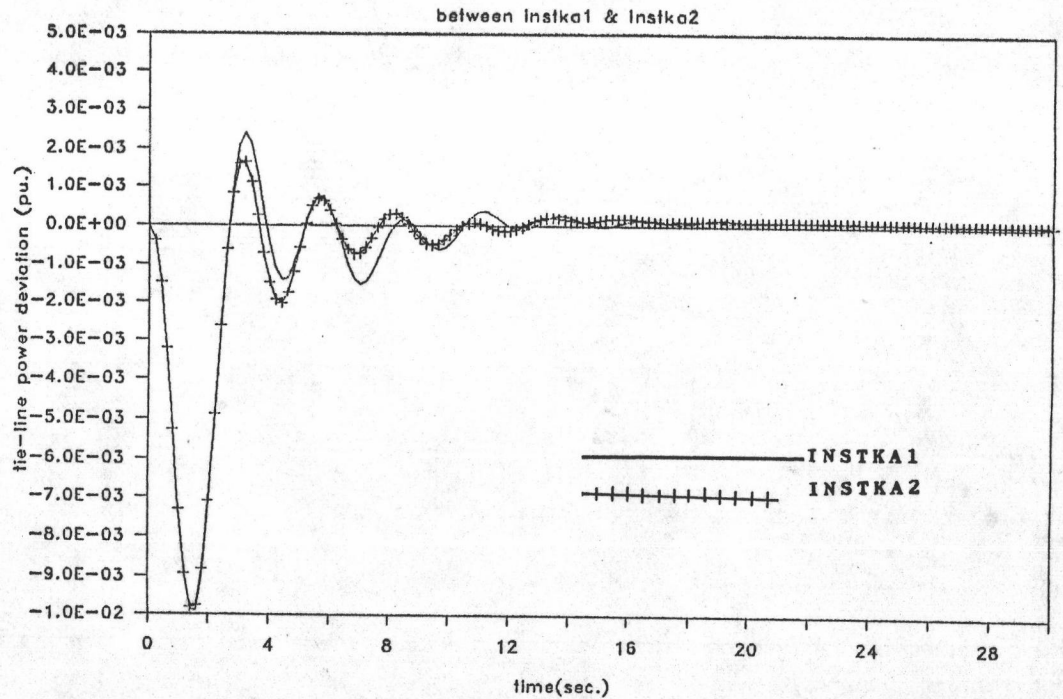
รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_1 ระหว่างกรณี INSTKA1 และ INSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1
between Instka1 & Instka2



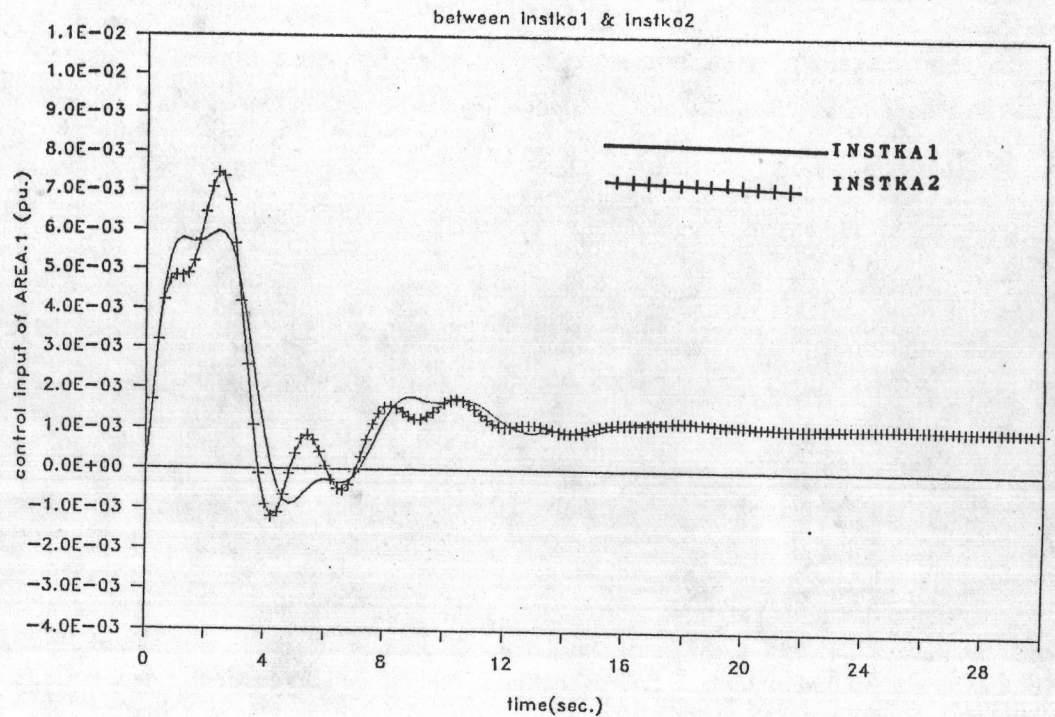
รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_2 ระหว่างกรณี INSTKA1 และ INSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



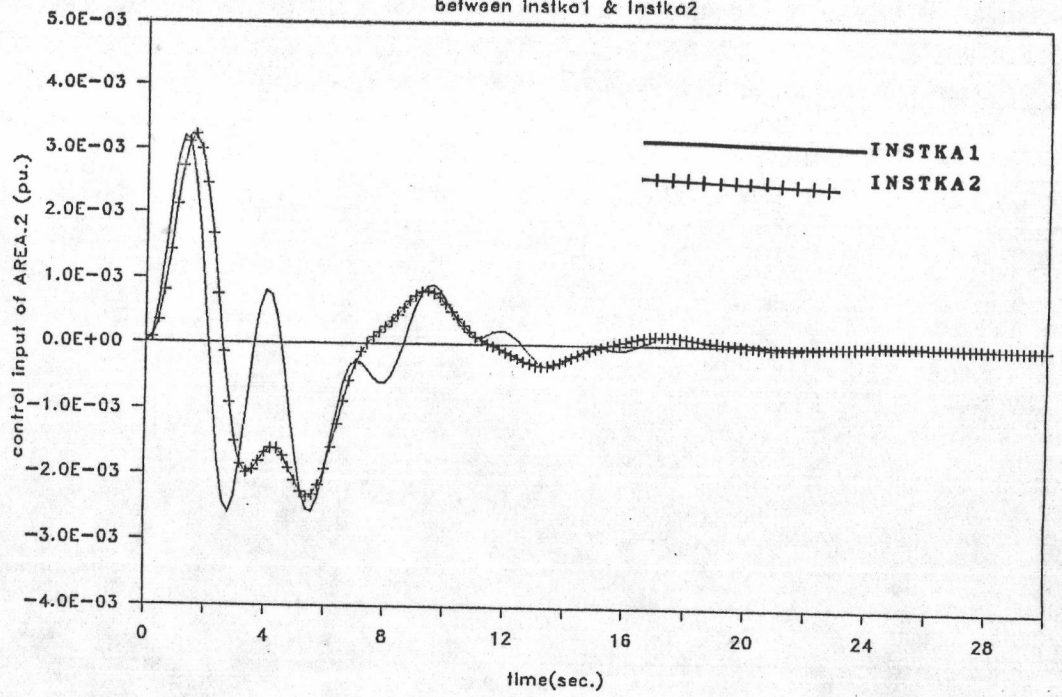
รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ ΔP_{12} ระหว่างกรณี INSTKA1 และ INSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



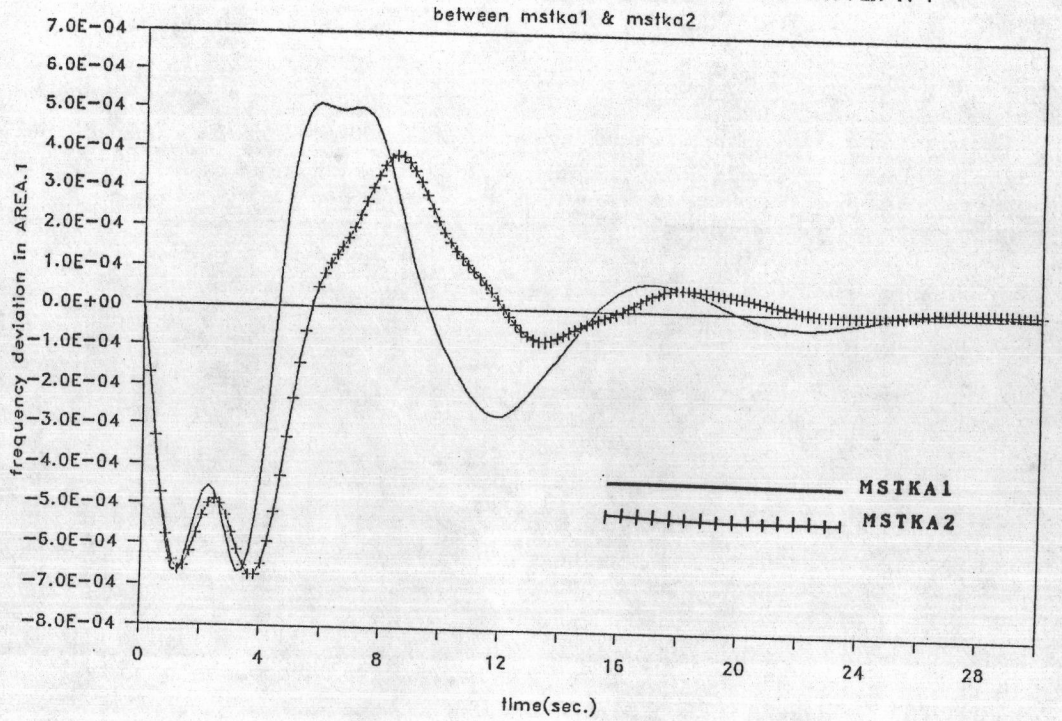
รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_1 ระหว่างกรณี INSTKA1 และ INSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



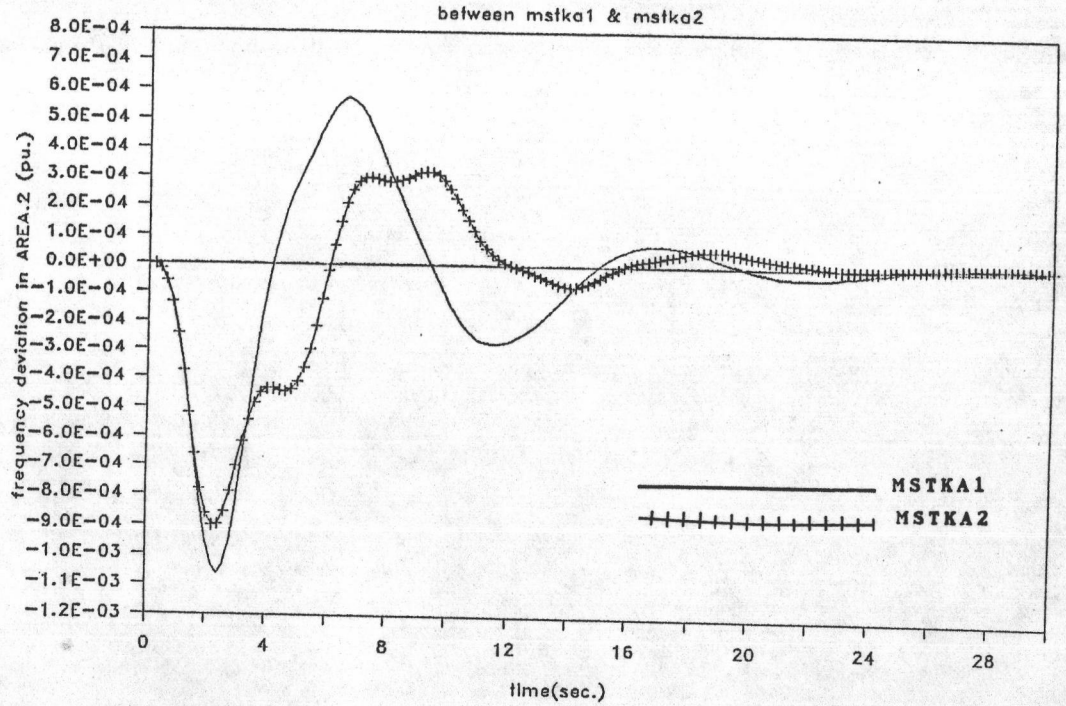
รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_2 ระหว่างกรณี INSTKA1 และ INSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



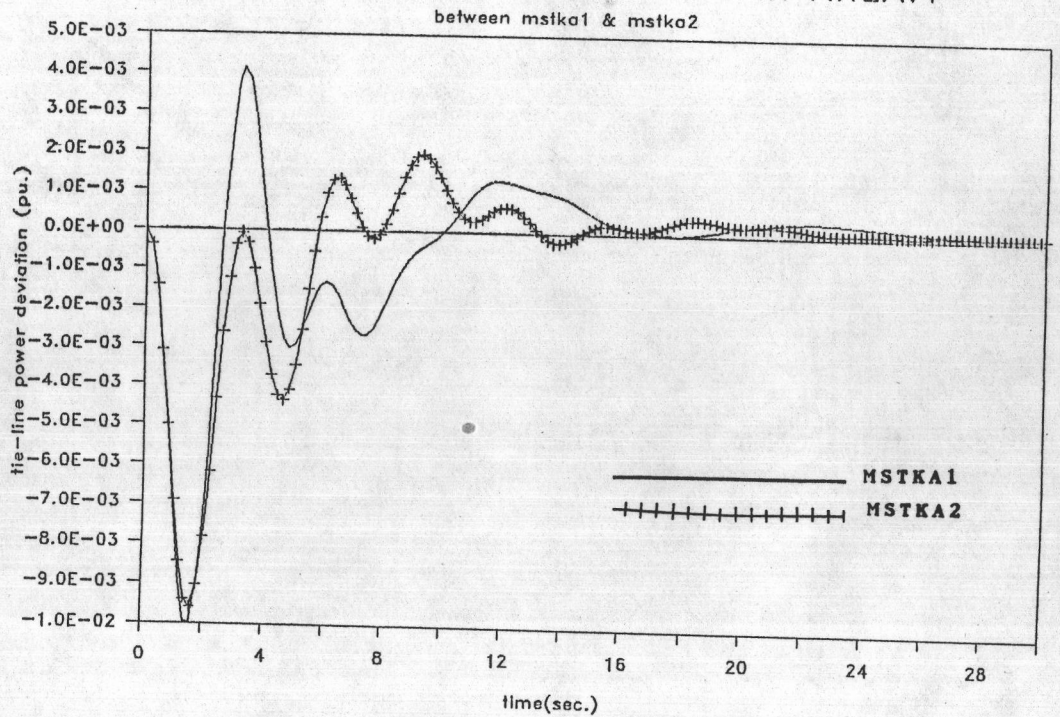
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_1 ระหว่างกรณี MSTKA1 และ MSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



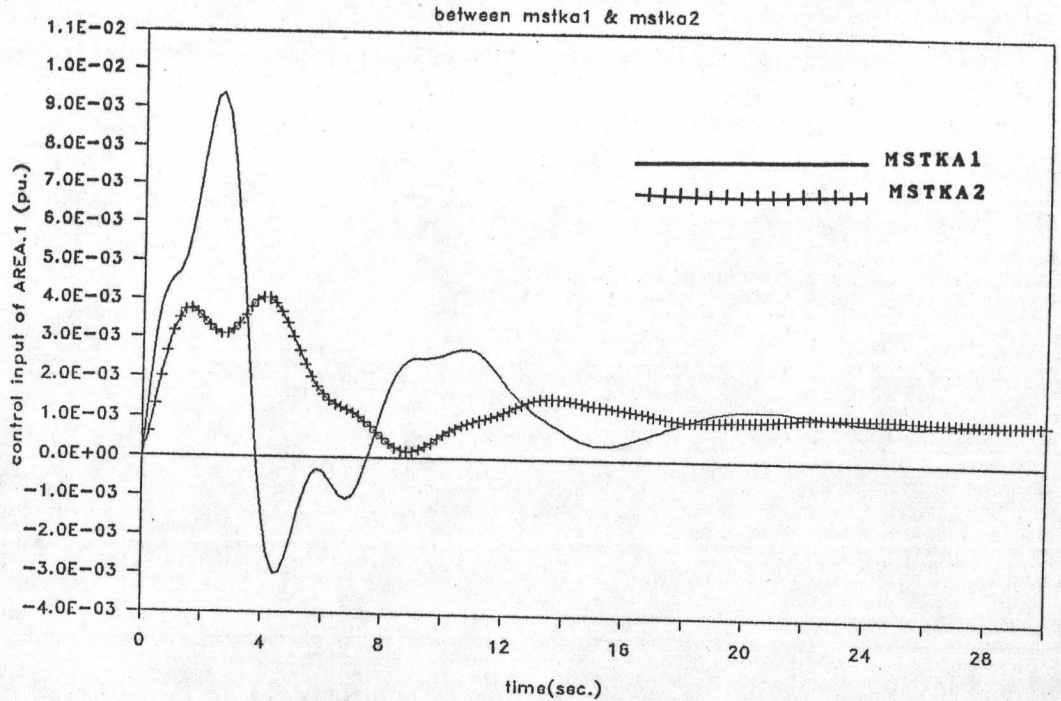
รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_2 ระหว่างกรณี MSTKA1 และ MSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



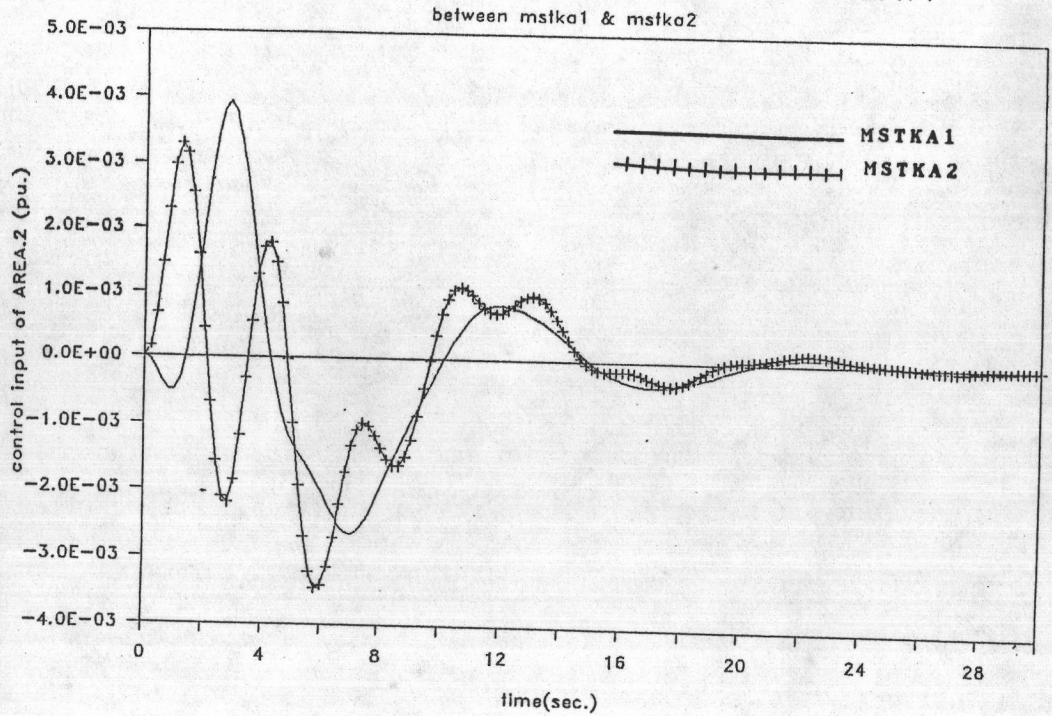
รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ ΔP_{12} ระหว่างกรณี MSTKA1 และ MSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



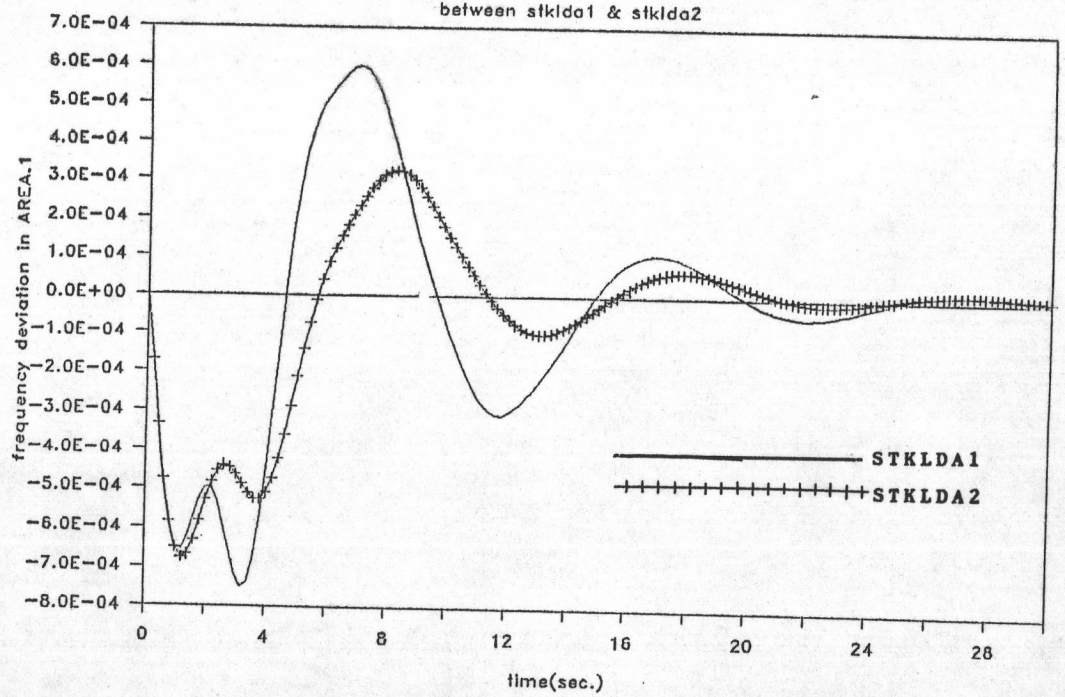
รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_1 ระหว่างกรณี MSTKA1 และ MSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1



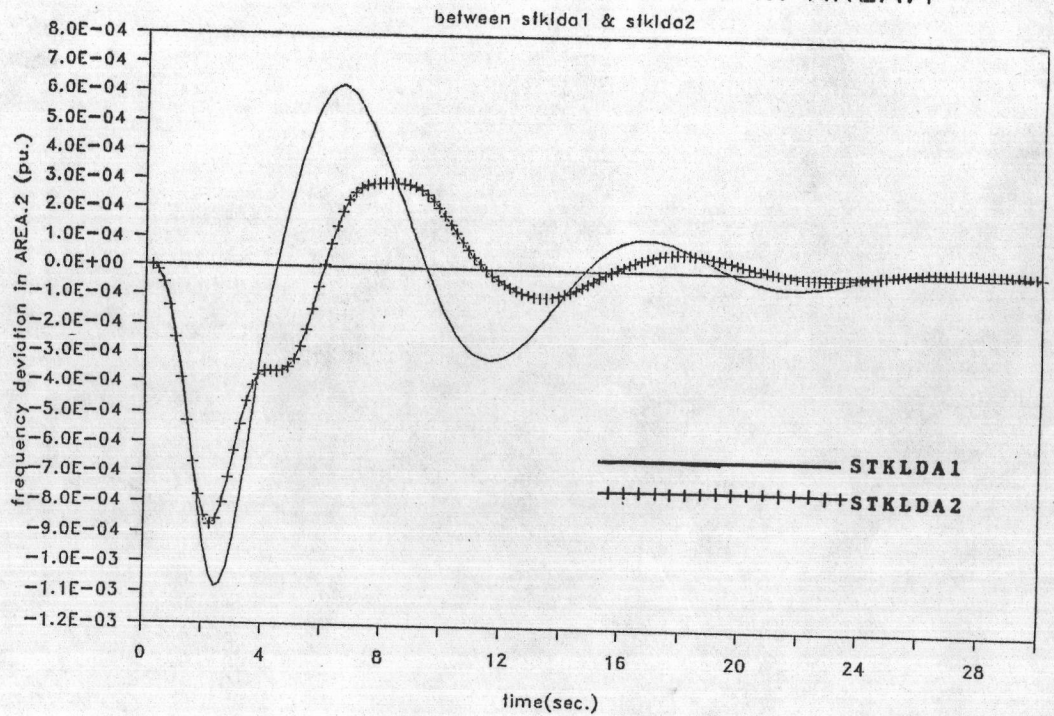
รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_2 ระหว่างกรณี MSTKA1 และ MSTKA2

upon step load disturbance in AREA.1

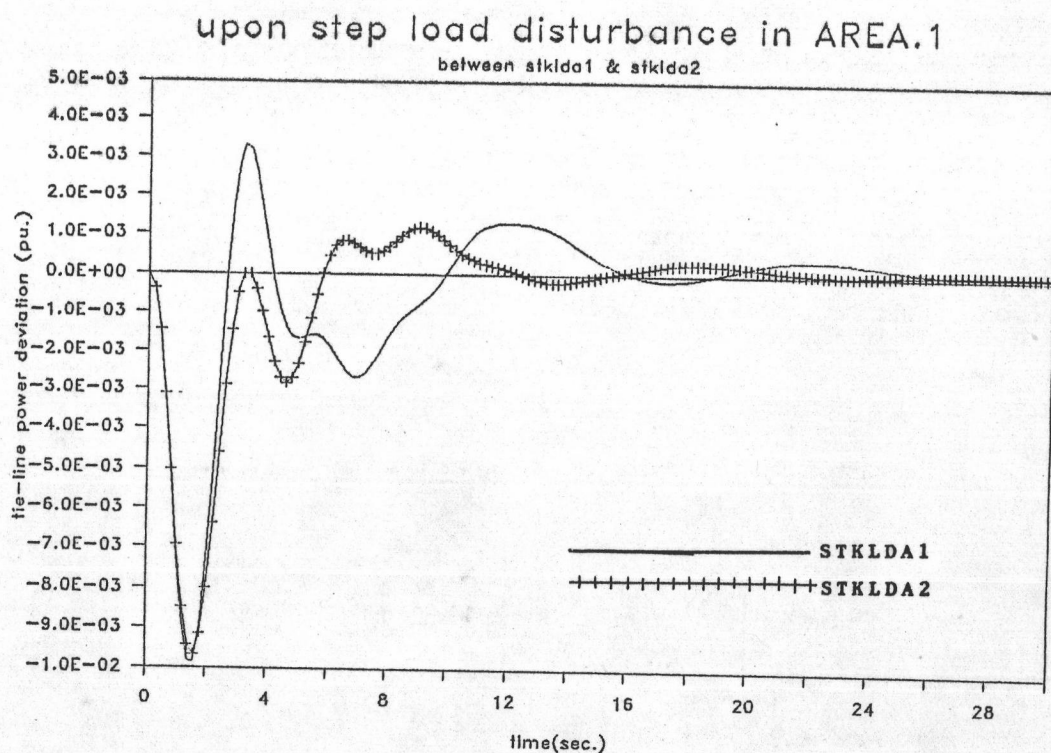


รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วคราวของ Δf_1 ระหว่างกรณีของ STKLDA1 และ STKLDA2

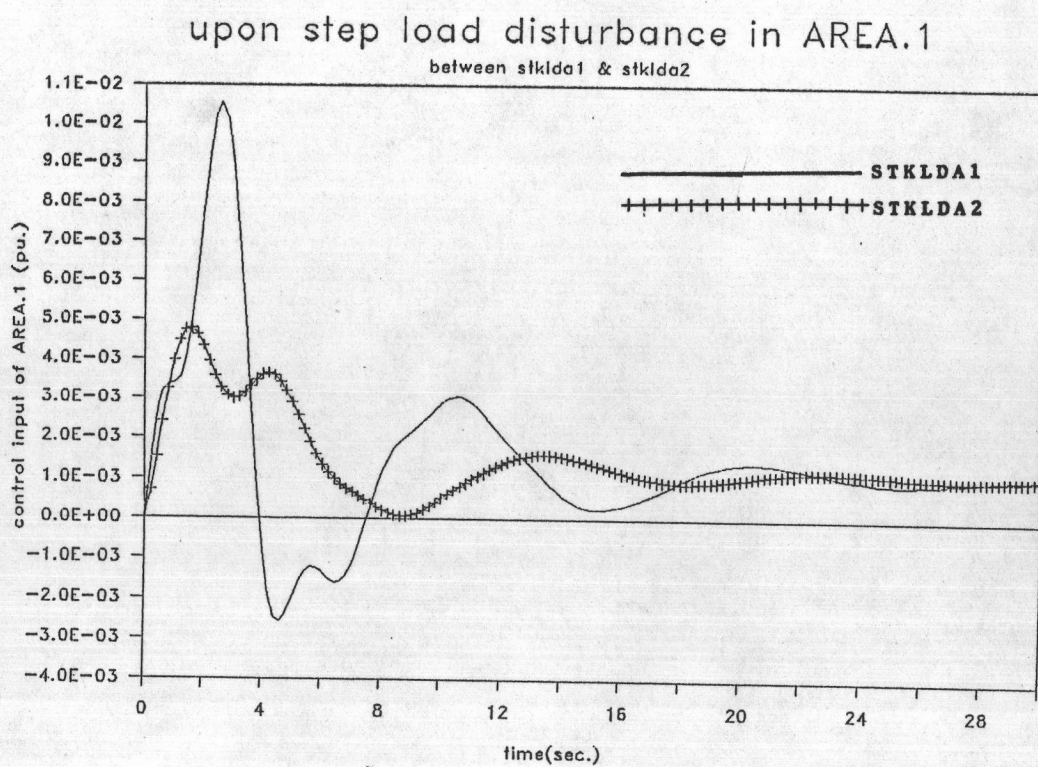
upon step load disturbance in AREA.1



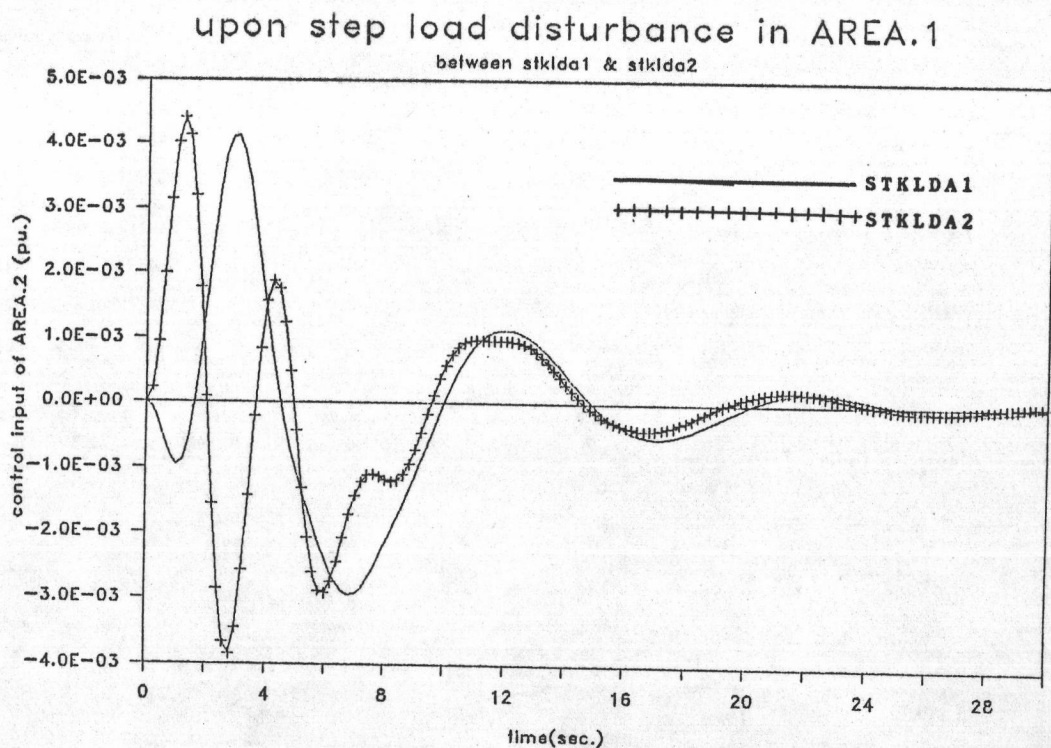
รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วคราวของ Δf_2 ระหว่างกรณีของ STKLDA1 และ STKLDA2



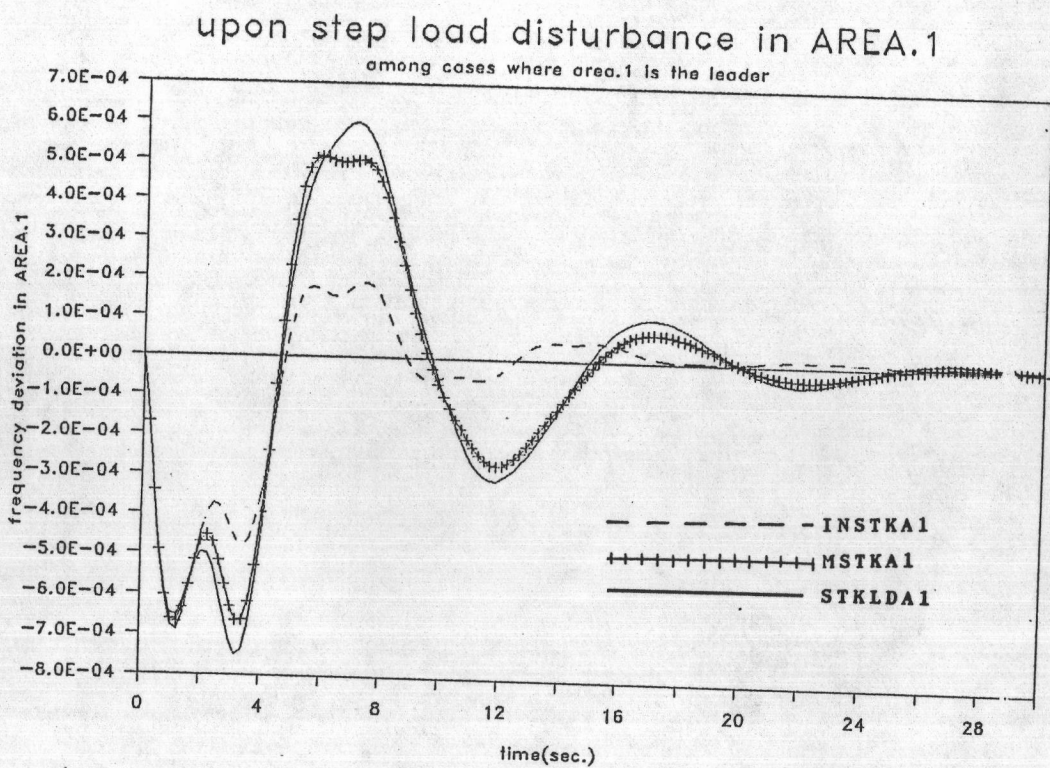
รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ ΔP_{12} ระหว่างกรณีของ STKLDA1 และ STKLDA2



รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_1 ระหว่างกรณีของ STKLDA1 และ STKLDA2



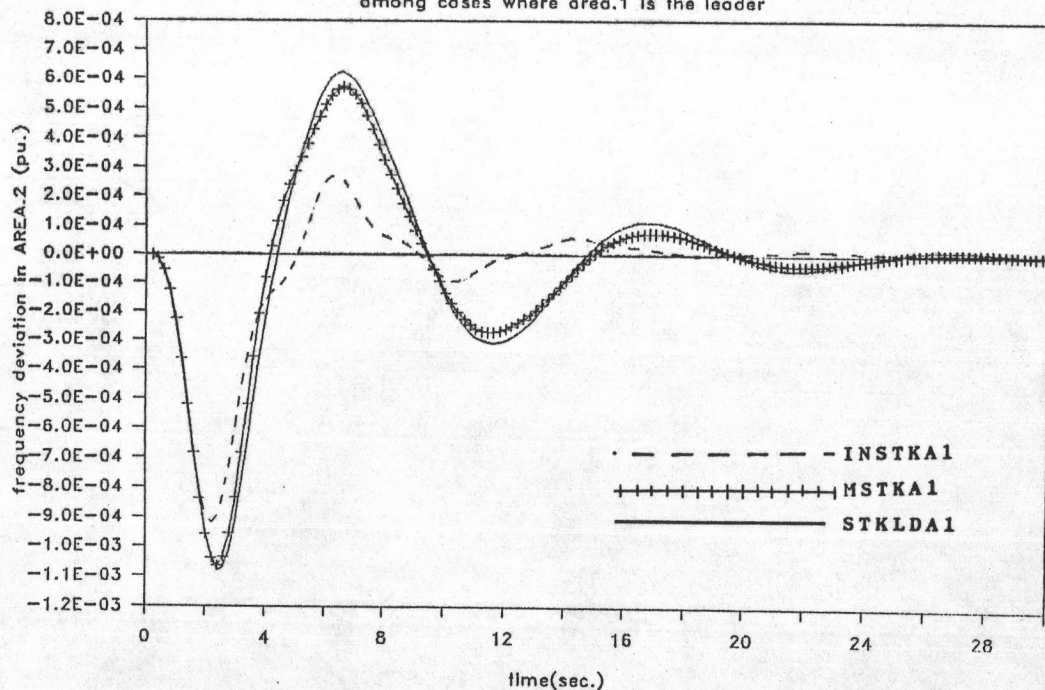
รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_2 ระหว่างกรณีของ STKLDA1 และ STKLDA2



รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_1 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มี
เขตที่หนึ่งเป็นผู้นำนเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

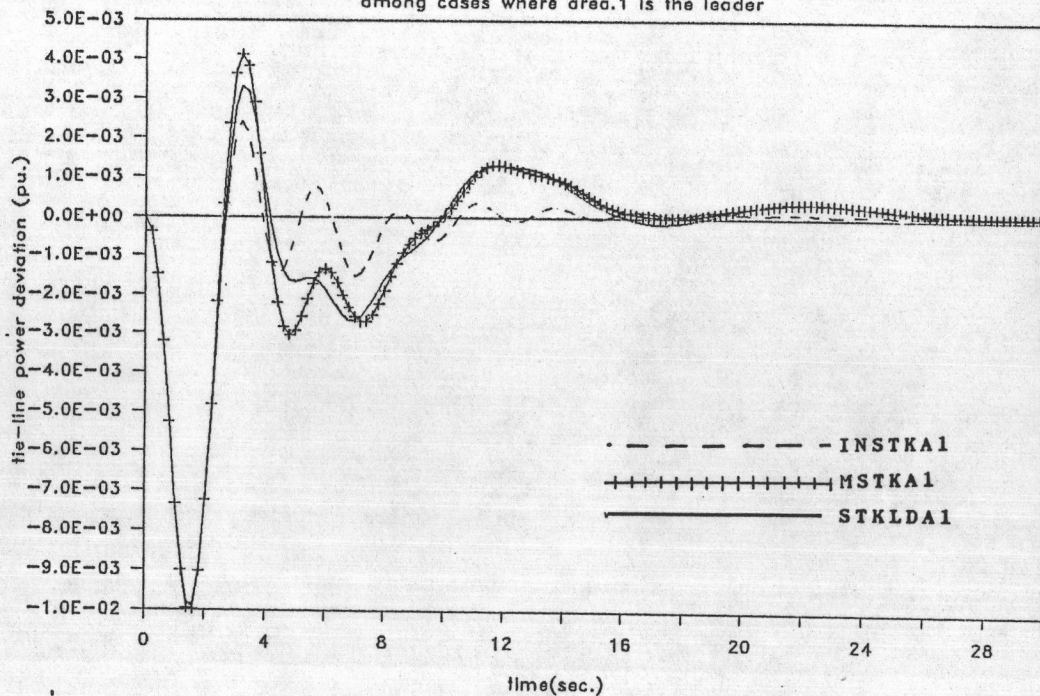
among cases where area.1 is the leader



รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_2 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่หนึ่งเป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

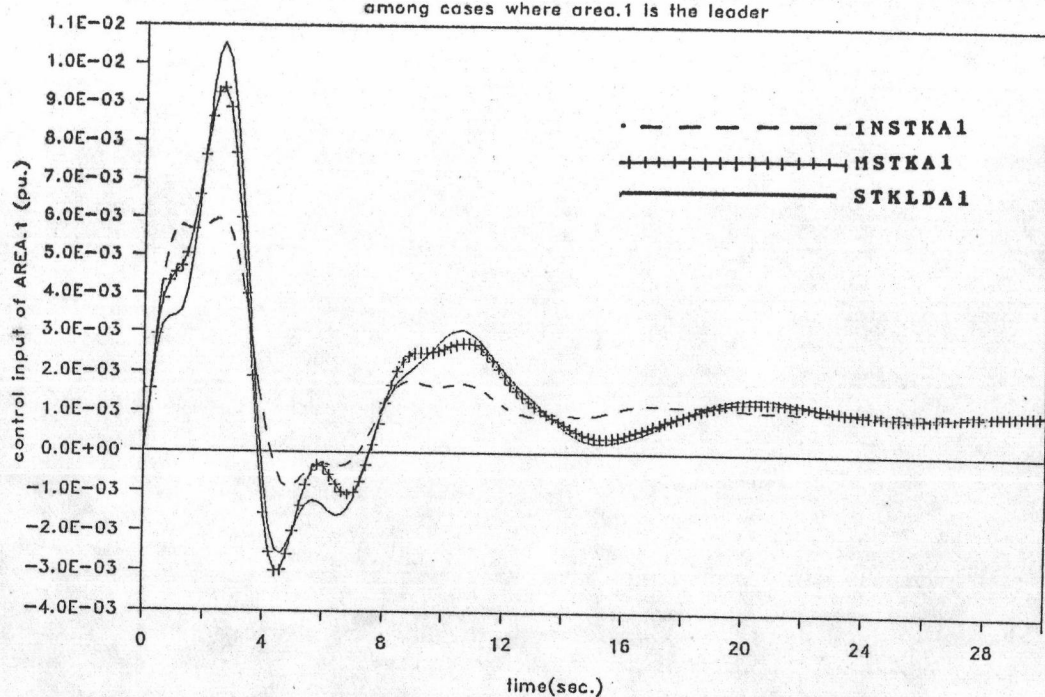
among cases where area.1 is the leader



รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ ΔP_{12} ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่หนึ่งเป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

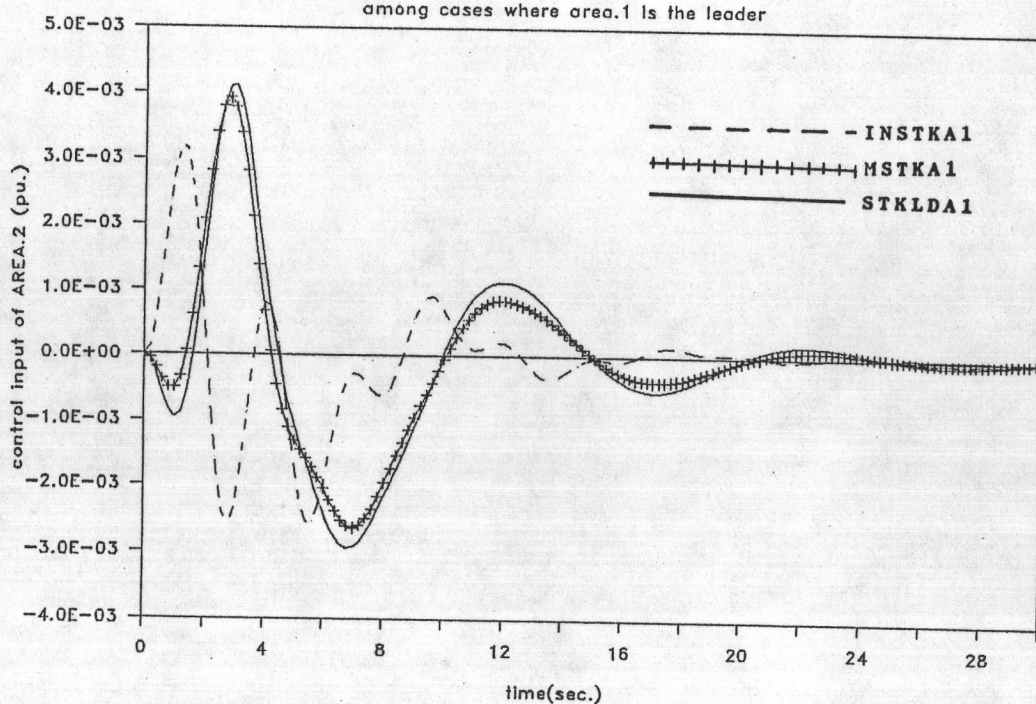
among cases where area.1 is the leader



รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_1 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่หนึ่งเป็นผู้นำในแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

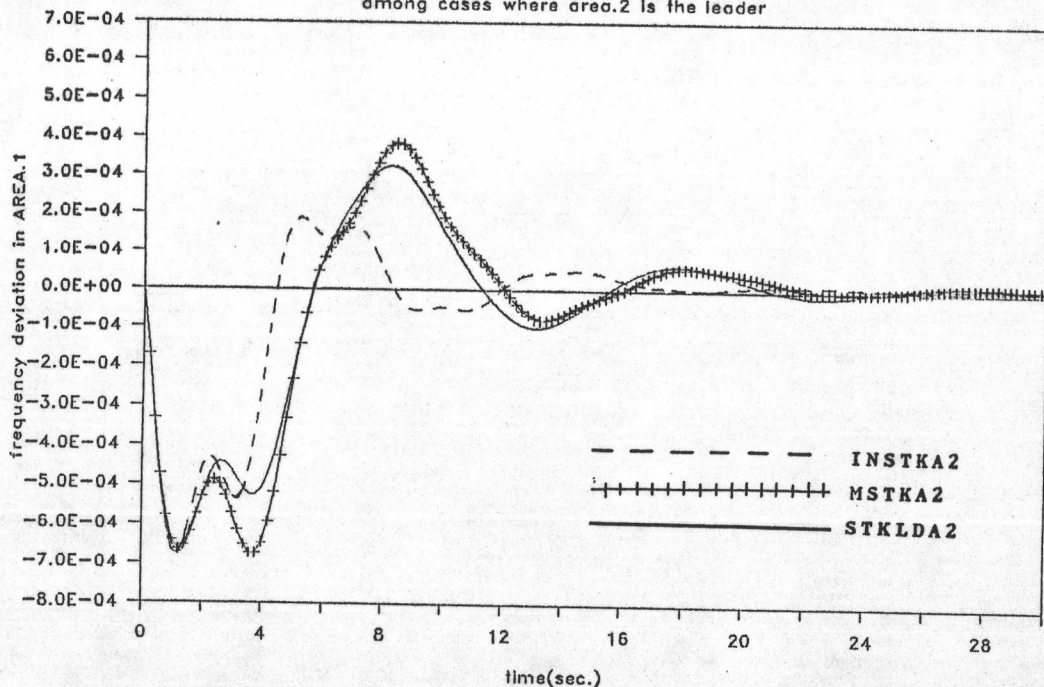
among cases where area.1 is the leader



รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_2 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่หนึ่งเป็นผู้นำในแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

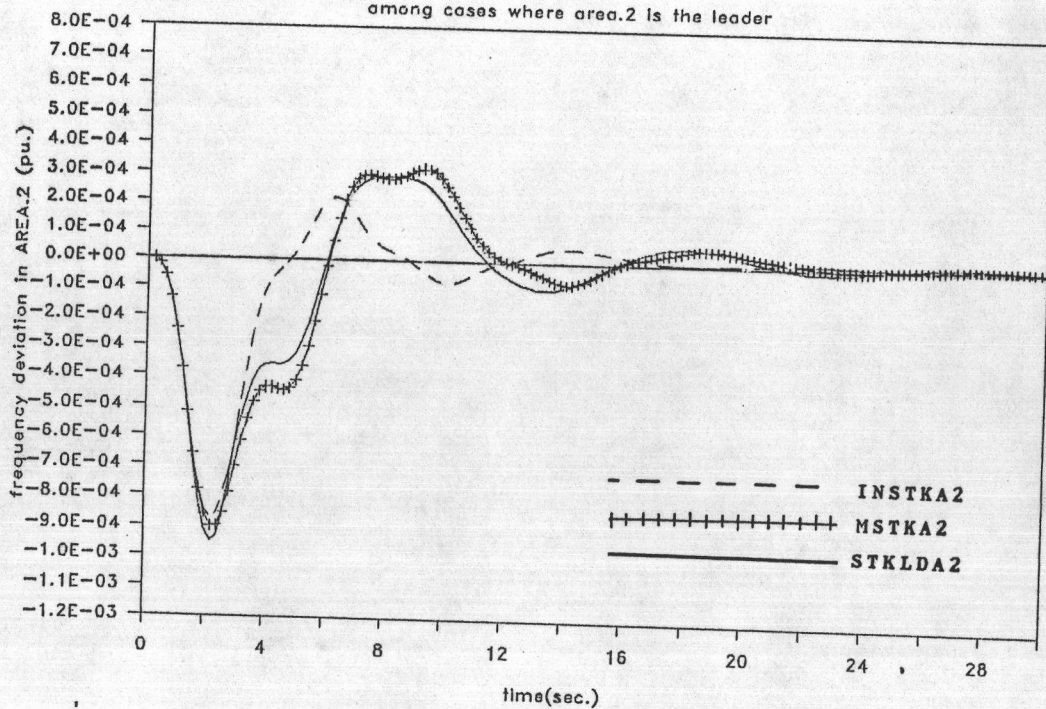
among cases where area.2 is the leader



รูปที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_1 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่สองเป็นผู้นำนเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

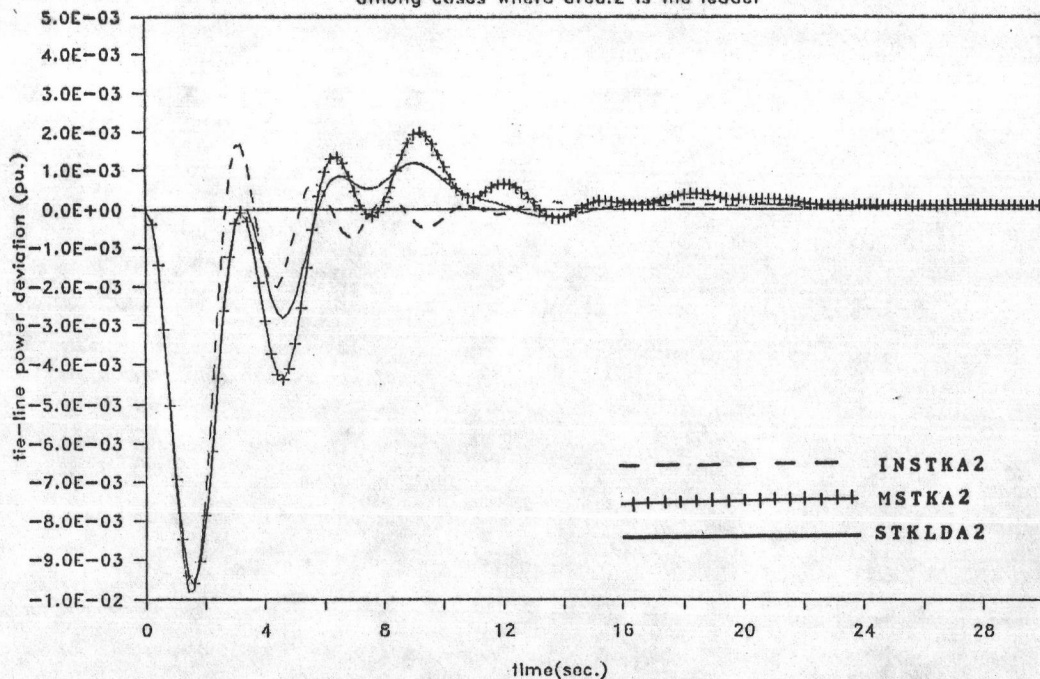
among cases where area.2 is the leader



รูปที่ 5.24 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ Δf_2 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่สองเป็นผู้นำนเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

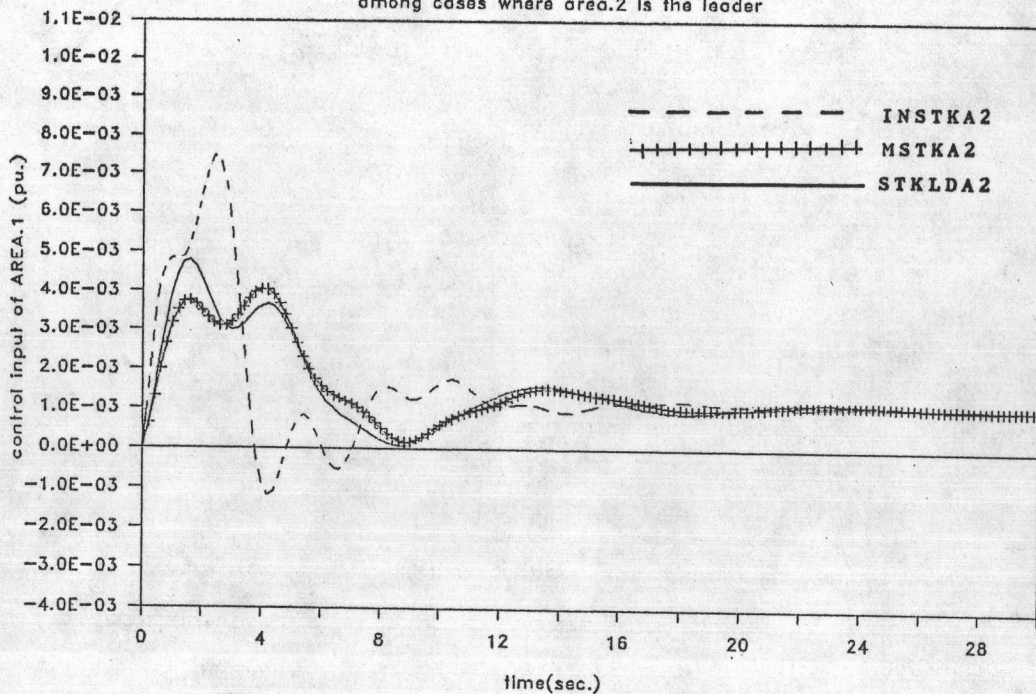
among cases where area.2 is the leader



รูปที่ 5.25 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ ΔP_{12} ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่สองเป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

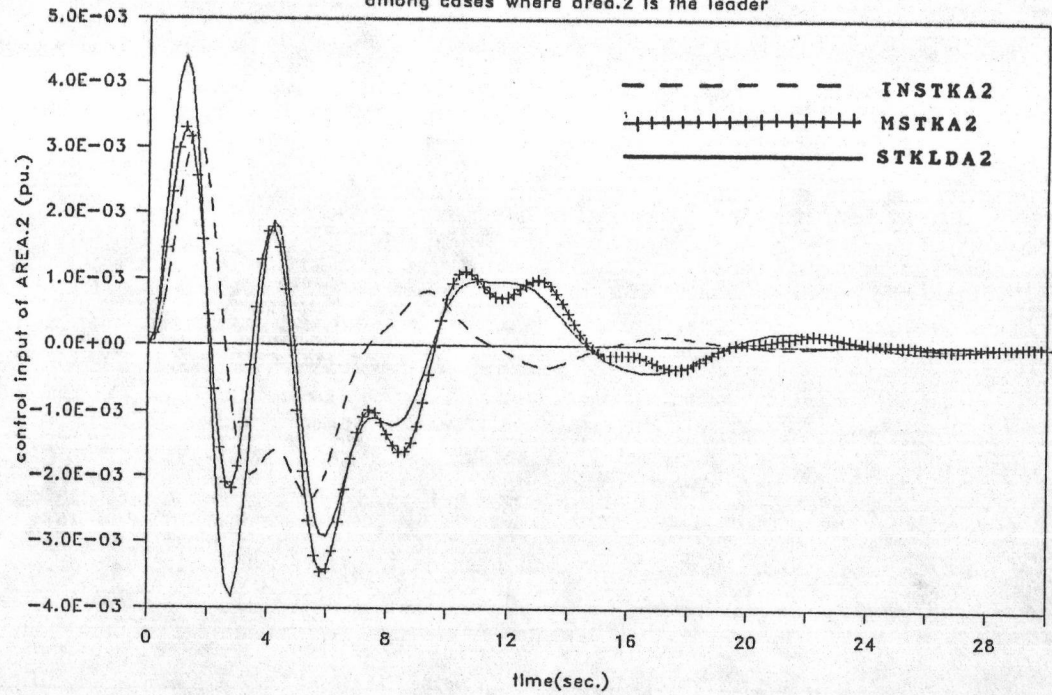
among cases where area.2 is the leader



รูปที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_1 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มีเขตที่สองเป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg

upon step load disturbance in AREA.1

among cases where area.2 is the leader



รูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบชั่วครู่ของ w_2 ระหว่างกรณีต่าง ๆ ที่มี
เขตที่สองเป็นผู้นำในเกมแบบ Stackelberg

CASES	FEEDBACK GAINS											total \hat{J} $\hat{J}_1 + \hat{J}_2$		
	w_1	w_2	ΔP_{T1}	ΔP_{H1}	Δf_1	ΔP_{12}	ΔP_{T2}	ΔP_{H2}	Δf_2	v_1	v_2		\hat{J}_1	\hat{J}_2
INSTKA1	w_1	w_2	1.007	0.2628	6.171	-0.1509	0.3189	1.506	0.3115	7.967	0.5220	574.68	599.45	1,174.13
INSTKA2	w_1	w_2	1.382	0.3236	5.697	-0.2634	0.1602	1.139	8.276	0.6398	0.6136	615.21	529.60	1,144.81
MSTKA1	w_1	w_2	1.295	0.304	5.497	-0.3252	-0.1706			3.653	0.6704	663.37	931.10	1,594.47
MSTKA2	w_1	w_2			3.407	0.1044	0.3950	1.379	0.3189	7.147	0.04082	978.93	699.54	1,678.47
STKDA1	w_1	w_2	1.265	0.3027	5.025	-0.4107	-0.2350			3.6601	0.6480	801.97	795.77	1,597.74
STKDA2	w_1	w_2			3.6654	0.1903	0.5415	1.300	0.3095	6.587	0.0402	792.88	878.15	1,671.03

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบอัตราขายของตัวควบคุมที่ใช้การปรับกลับสัญญาณออก

แบบ Stackelberg ระหว่างกรณีต่าง ๆ