บทที่ 2

การควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปทั่วไปของการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด (LFC) ซึ่งประกอบด้วย ลักษณะปัญหา จุดประสงค์ และสมมติฐานบางประการที่ใช้ของระบบ หลังจากนั้นจะสรุปเชิงวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยของ LFC ที่ผ่านมาทั้งการควบคุมแบบรวมสู่ศูนย์และแบบกระจาย

บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบไม่เชิงเส้น แต่ถ้าพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำงานในสภาวะปกติและสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบเป็นสัญญาณขนาดเล็ก พลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจัดเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขนาดเล็กรอบจุดทำงานปกติ (nominal operating point) จาก Elgerd(1982) แสดงให้เห็นว่าโมเดลของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถคิดเป็นระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และสามารถแยกออกเป็นโมเดลย่อยสองอันซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมที่แตกต่างกันของระบบไฟฟ้ากำลัง นั่นคือ

1) พฤติกรรมของระบบระหว่างกำลังจริงและความถี่

2) พฤติกรรมของระบบระหว่างกำลังรีแอกตีฟและแรงดันไฟฟ้า

การควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกี่ยวข้องกับความถี่และกำลังจริงจะเรียกว่า การควบคุมความถี่เนื่องจากโหลด ส่วนการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับขนาดแรงดันและกำลังรีแอกตีฟจะเรียกว่า การควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Automatic Voltage Regulator หรือ AVR) แม้ว่าในความเป็นจริงการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันไฟฟ้าจะมีผลกระทบถึงความถี่ของระบบ แต่ในการศึกษาปัญหา LFC มักจะไม่คิดถึงผลดังกล่าว โดยสมมติว่าในช่วงเวลาที่สนใจแรงดันของระบบมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงตัวทางเวลาของ AVR เร็วมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นใน LFC สภาวะชั่วครู่ของระบบ LFC จัดเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะว่ามีธรรมชาติเป็นลักษณะของเครื่องกลและไฟฟ้าผสมกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเฉื่อยของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกี่ยวกับกิริยาควบคุมจากกัฟเวอร์เนอร์ และเกี่ยวกับค่าของความถี่และกำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ช่วงเวลาที่สนใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของ

LFC จะอยู่ในราวหนึ่งนาทีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เราศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพแบบพลวัต (dynamic stability) ของระบบไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพทั่วไปของระบบ LFC

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเพียงเขตเดียว หน้าที่พื้นฐานของ LFC ก็คือปรับค่าความถี่ของระบบให้คงที่เสมอในขณะที่มีการใช้โหลดลดลงหรือเพิ่มขึ้น ส่วนในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหลายเขตดังปรากฏตัวอย่างในรูปที่ 2.2 และ 2.3 หน้าที่พื้นฐานของ LFC นอกเหนือจากการคงค่าความถี่ของระบบแล้ว ยังต้องควบคุมให้กำลังจริงที่แลกเปลี่ยนกันในเส้นเชื่อมต่อของแต่ละเขตเป็นไปตามค่าที่ได้กำหนดไว้ กล่าวคือระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละเขตต้องรับผิดชอบถึงการเพิ่มหรือลดของโหลดที่เกิดขึ้นภายในเขตของตนเองโดยไม่ให้กระทบกระเทือนเขตอื่น ยกตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้ากำลังสองเขตในรูปที่ 2.2 สมมติว่ามีการตกลงขายพลังงานไฟฟ้าจากเขตที่หนึ่งให้กับเขตที่สองโดยกำหนดให้ P_{tie} เท่ากับ 100 MW. ถ้าในเขตที่สองเกิดโหลดเพิ่มขึ้น 30 MW. และไม่มีการควบคุมกำลังจริงในเส้นเชื่อมต่อ P_{tie} ก็จะเพิ่มขึ้นจากที่ตกลงเอาไว้ทำให้เขตที่หนึ่งเสียเปรียบ ดังนั้นกล่าวโดยสรุปได้ว่า จุดประสงค์หลักของ LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังจำนวน L เขตที่เชื่อมโยงกันคือ

ก) ในภาวะอยู่ตัว ทำให้การเบี่ยงเบนของความถี่ของแต่ละเขต (Δf_i) และการเบี่ยงเบนของผลรวมสุทธิของกำลังจริงที่แลกเปลี่ยนกันในเส้นเชื่อมต่อของแต่ละเขต ($\Delta P_{tie,i} \triangleq \sum_{j=1,\neq i}^{L} \Delta P_{ij}$) เป็นศูนย์เสมอ

ข) ในภาวะชั่วครู่ ทำให้ผลตอบชั่วครู่ของระบบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวโดยใช้เวลาไม่นานจนเกินไป และไม่แกว่งมากจนเกินไป

ในระบบไฟฟ้ากำลังความถี่ของระบบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบของโรเตอร์ ดังนั้นจากรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าอุปกรณ์สำคัญในขบวนการ LFC คือกัฟเวอร์เนอร์ (governor) หน้าที่ของกัฟเวอร์เนอร์คือ ควบคุมลิ้นปิดเปิดของเทอร์ไบน์อันเป็นผลทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ช้าลงหรือเร็วขึ้นได้ โดยมีฟลายบอล (flyball) เป็นกลไกที่ป้อนกลับความเร็วรอบของโรเตอร์มาควบคุมกัฟเวอร์เนอร์ดังที่เห็นในรูปที่ 2.4 และ 2.5 การควบคุมในชั้นนี้เรียกว่าการควบคุมปฐมภูมิ (primary control) แต่โดยปกติกัฟเวอร์เนอร์ที่ใช้กันทุกวันนี้เป็นแบบสถิต (static type) ซึ่งหมายความว่ามีค่าผิดพลาดในภาวะอยู่ตัว (steady-state error) ระหว่างภาวะไม่มีโหลดและภาวะพิกัดโหลด ดังนั้นเมื่อต้องการกำจัดค่าผิดพลาดดังกล่าวให้หมดไปในการควบคุมความถี่ของระบบ ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดเกิดขึ้นโดยไม่ทราบขนาดล่วงหน้าซึ่งจัดเป็นสัญญาณรบกวนทางโหลดของระบบ LFC จึงต้องทำการควบคุมแบบป้อนกลับซ้อน

ทับอีกชั้นหนึ่ง เรียกว่า การควบคุมทุติยภูมิ (secondary control) ในโมเดลของระบบ LFC ที่กล่าวถึงจึง เป็นการควบคุมทุติยภูมิทางกัฟเวอร์เนอร์ทั้งสิ้น โดยที่สัญญาณควบคุมทุติยภูมิจะ เป็นฟังก์ชันของสัญญาณที่ป้อนกลับมายังตัวควบคุม

ทุกวันนี้วิธีที่นิยมใช้และได้ผลใน LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังหลายเขตที่เชื่อมโยงกันคือการควบคุมแบบที่นิยมใช้กัน (Cohn, 1966; Elgerd, 1982) ซึ่งอาศัยแนวความคิดของการควบคุมเส้นเชื่อมต่อแบบมีไบแอส กล่าวคือแต่ละ เขตพยายามที่จะปรับ Area Control Error (ACE) ในเขตของตนเองให้เป็นศูนย์เสมอในสภาวะอยู่ตัว โดย ACE ของแต่ละ เขตมีนิยามคือ

$$(ACE)_i = \Delta P_{tie,i} + b_{si}\Delta f_i \qquad (2.1)$$

โดยที่ Δf_i เป็นการเบี่ยง เบนของความถี่ในเขตที่ i

b_{si} เป็นไบแอสแฟกเตอร์ (bias factor) ของเขตที่ i

$\Delta P_{tie,i}$ เป็นการเบี่ยง เบนของผลรวมกำลังจริงสุทธิที่แลกเปลี่ยนกันในเส้นเชื่อมต่อ

เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ดังกล่าวในการควบคุม โดยที่กฎการควบคุมไม่ขึ้นกับผลของสัญญาณรบกวนทางโหลดซึ่ง เกิดโดยไม่ทราบขนาดล่วงหน้า กฎการควบคุมของแต่ละ เขตจะใช้เพียงการป้อนกลับอินทิกรัล (integral feedback) ของ ACE ของเขตตนเอง เท่านั้น จากตัวอย่างในรูปที่ 2.6 เห็นได้ว่าการควบคุมแบบที่นิยมใช้กันจัดเป็นการควบคุมแบบกระจายชนิดหนึ่ง ตัวควบคุมของแต่ละ เขตใช้การป้อนกลับสัญญาณออกเฉพาะท้องที่โดยทำการวัดค่าความถี่และค่าของกำลังจริงที่ไหลในเส้นเชื่อมต่อของแต่ละ เขตเท่านั้น ทำให้มีโครงสร้าง เรียบง่ายเหมาะต่อการปฏิบัติจริง ด้วยเหตุนี้จึง เป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ LFC แบบนี้ยังนิยมใช้กันอยู่ แต่อย่างไรก็ตามผลตอบชั่วครู่ของระบบ LFC แบบนี้ก็ยังไม่เป็นที่พึงพอใจ และยังมีช่องทางที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยอาศัยทฤษฎีควบคุมมาช่วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายคนที่นำทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่มาออกแบบตัวควบคุมของระบบ LFC เพื่อจุดประสงค์ดังกล่าว โดยแบ่งออกเป็น 2 หลักการได้แก่ การควบคุมแบบรวมสู่ศูนย์ และการควบคุมแบบกระจาย

LFC แบบรวมสู่ศูนย์

การควบคุมที่เดิมพัฒนามาตั้งแต่การควบคุมแบบคลาสสิก (classical control) ที่ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ Bode plot หรือ Nichol's chart จนกระทั่งถึงการควบคุมสมัยใหม่ที่ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ ทฤษฎีตัวคงค่าแบบ LQG (Linear-Quadratic-Gaussion regulator theory) ทฤษฎี เหล่านั้นต่างมีรูปแบบร่วมกันคือ เป็นการควบคุมแบบรวมสู่ศูนย์ทั้ง

สิ้น นิยามของการควบคุมแบบรวมสู่ศูนย์คือ การควบคุมที่โครงสร้างสารนิเทศเป็นแบบรวมสู่ศูนย์ และการตัดสินใจของระบบทั้งหมดจะเป็นไปภายใต้เกณฑ์ (criterion) อันเดียวกัน ถึงแม้ว่าตัวควบคุมจะมีหลายตัว ตัวควบคุมแต่ละตัวจะใช้โครงสร้างสารนิเทศที่เหมือนกันและจะเลือกกฎการควบคุมที่ทำให้ดัชนีสมรรถนะของระบบมีค่าเหมาะที่สุด

การพัฒนาทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่มาประยุกต์กับระบบ LFC ที่มีหลายเขตในช่วงแรกเริ่มต้นจากการควบคุมแบบรวมสู่ศูนย์ซึ่งได้ความสนใจอย่างมากในช่วง ค.ศ. 1950-1970 โดยเริ่มต้นจากงานวิจัยของ Fosha et al.(1970) ในงานวิจัยดังกล่าวได้นำทฤษฎีคงค่าสถานะแบบ LQ (Linear-Quadratic state regulator theory) ที่ได้พัฒนาเป็นอย่างดีมาใช้ โดยคิดระบบ LFC เป็นระบบเชิงเส้น ดัชนีสมรรถนะที่ใช้ตัดสินใจมีรูปเป็นฟังก์ชันกำลังสองดังสมการ

$$J = 1/2 \int_{t_o}^{t_f} [\, x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) \,]\, dt \qquad (2.2)$$

ตัวควบคุมใช้การป้อนกลับสถานะทั้งหมดแบบสัดส่วนดังในรูปที่ 2.7 ในกรณีที่ t_f เข้าใกล้ค่าอนันต์ (infinity) อัตราขยายป้อนกลับแบบคงที่ของตัวควบคุมหาได้จากการแก้สมการพีชคณิตของ Riccati ซึ่งเป็นสมการเมตริกซ์แบบไม่เชิงเส้น และเพื่อความง่ายในการปฏิบัติจริงจะใช้ตัวควบคุมแบบเล็งเลิศย่อยแทนตัวควบคุมแบบเล็งเลิศที่หาได้ กล่าวคือ ตัวควบคุมจะใช้เฉพาะการป้อนกลับสถานะในเขตของตนเองโดยละเลยการป้อนกลับสถานะจากเขตอื่น ในงานวิจัยดังกล่าวได้แสดงให้เห็นโดยใช้การจำลองเชิงเลขว่า วิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้และปรับปรุงผลตอบชั่วครู่ของระบบ LFC ให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการในงานดังกล่าวยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้จริง เนื่องจากโดยธรรมชาติของระบบ LFC แล้ว ไม่สามารถทราบล่วงหน้าว่าสัญญาณรบกวนทางโหลดของระบบจะมีขนาดเท่าไร และกฎการควบคุมที่ใช้ยังขึ้นกับค่าของสัญญาณรบกวนทางโหลดดังกล่าว ยิ่งไปกว่านั้น ตัวควบคุมยังใช้การป้อนกลับสถานะด้วยทำให้ปฏิบัติได้ยากในความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้ได้เป็นรากฐานสำคัญของ LFC ในช่วงหลัง

จากข้อเสียดังกล่าวในงานวิจัยของ Fosha et al.(1970) ทำให้นักวิจัยรุ่นต่อมาพยายามนำทฤษฎีการประมาณค่า (estimation) ของทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่มาใช้เพื่อลดข้อเสียเรื่องค่าของสัญญาณรบกวนทางโหลดที่มีผลต่อกฎการควบคุม Kavin et al.(1971) ได้พิจารณาปัญหา LFC เป็นรูปแบบของตัวคงค่าเชิงสโตคาสติก (stochastic regulator) และได้นำตัวกรอง Kalman มาใช้ โดยการออกแบบตัวควบคุมเป็นไปตามทฤษฎีบทการแยกคิด (seperation theorem) ซึ่งแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นที่แยกออกจากกันคือ การออกแบบตัวกรอง และการคำนวณหาอัตราขยายป้อนกลับของตัวควบคุมดังแผนภาพในรูปที่ 2.8 ในกรณีที่

สัญญาณรบกวนทางโหลดมีค่าคงที่โดยไม่ทราบล่วงหน้า กฎการควบคุมที่ใช้ก็จะขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนทางโหลดเช่นเดิม วิธีแก้ปัญหาก็ใช้ตัวกรอง Kalman ได้เช่นกัน แต่แก้ไขดัดแปลงให้เป็นตัวประมาณค่าแบบมีไบแอส (bias estimator) มาบอกเอกลักษณ์สัญญาณรบกวนทางโหลด แม้ว่าในทางทฤษฎีวิธีที่เสนอโดย Kavin et al.(1972) จะได้ผล แต่ในทางปฏิบัติยังไม่เหมาะสมที่นำไปใช้อยู่ดี เนื่องจากตัวควบคุมที่เสนอมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากโดยเฉพาะตัวกรอง Kalman วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้กับระบบขนาดใหญ่เช่นระบบ LFC ที่มีหลายเขต ยิ่งไปกว่านั้นเห็นได้ชัดว่าทำให้ความเชื่อถือของระบบลดลงและเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก

ต่อมา Miniesy et al.(1972) ได้เสนอแนวคิดแก้ปัญหาเรื่องผลของสัญญาณรบกวนของโหลด ด้วยการพิจารณาปัญหาเป็นรูปแบบของตัวคุมค่าเชิงดีเทอร์มินิสติก (deterministic) แทน โดยให้เหตุผลว่าการใช้ตัวกรอง Kalman ที่เสนอโดย Kavin et al.(1971) ปฏิบัติจริงได้ยาก การออกแบบตัวกรองดังกล่าวต้องใช้ข้อมูลทางสถิติอย่างละเอียดของตัวระบบและของสัญญาณรบกวนเชิงสุ่มในการวัด (measurement noise) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังข้อมูลดังกล่าวหาได้ยากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ตัวกรอง Kalman ในปัญหา LFC Miniesy et al.(1972) ได้พิจารณาให้สัญญาณรบกวนทางโหลดเป็นฟังก์ชันที่แปรตามเวลาอย่างช้า ๆ โดยสามารถประมาณเป็นฟังก์ชันค่าคงที่ในสภาวะอยู่ตัวได้ อย่างไรก็ตามกฎการควบคุมก็ยังขึ้นกับผลของสัญญาณรบกวนทางโหลดอยู่ดี สำหรับการออกแบบตัวควบคุมก็แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ก. การคำนวณหาอัตราขยายป้อนกลับของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะทุกตัวเช่นเดียวกับวิธีของ Fosha et al. (1970) และ Kavin et al. (1971)

ข. การออกแบบตัวประมาณค่าเพื่อหาขนาดของสัญญาณรบกวนทางโหลดในกรณีที่สามารถป้อนกลับสถานะทุกตัวได้ การหาขนาดสัญญาณรบกวนทางโหลดจะใช้วิธีการประมาณเชิงอนุพันธ์ (differential approximation) และในกรณีที่สามารถวัดสถานะได้เพียงบางตัว การประมาณค่าสัญญาณรบกวนทางโหลดสามารถทำพร้อมกับการประมาณค่าสถานะที่วัดไม่ได้ด้วยการใช้ตัวสังเกต Luenburger (Luenburger, 1966)

ในงานดังกล่าวได้แสดงให้เห็นเช่นกันว่าวิธีที่เสนอให้ผลลัพธ์ที่ดี แต่ในความเป็นจริงก็ยังไม่เหมาะสมที่จะปฏิบัติจริงอยู่ดี เนื่องจากตัวควบคุมที่เสนอยังคงมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ลดความเชื่อถือได้ของระบบลง และไม่เหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับการใช้ตัวกรอง Kalman อยู่ดี

จากงานวิจัยของ LFC แบบรวมสู่ศูนย์ที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่ามีปัญหาที่เหมือนกันคือ

กฎการควบคุมที่ใช้ขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนทางโหลด ถึงแม้ว่าจะพยายามแก้ไขโดยใช้ตัวกรอง Kalman หรือตัวสังเกต Luenburger ก็ตาม แต่การทำเช่นนั้นกลับเพิ่มความซับซ้อนให้กับระบบมากยิ่งขึ้น Calovic (1972) ได้พยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการป้อนกลับอินทิกรัลของ ACE เช่นเดียวกับ LFC แบบที่นิยมใช้กัน โครงสร้างตัวควบคุมที่เสนอขึ้นดังในรูปที่ 2.9 มีคุณสมบัติคือ กฎการควบคุมไม่ขึ้นกับสัญญาณรบกวนทางโหลดของระบบ อัตราขยายของการป้อนกลับสถานะแบบสัดส่วนอินทิกรัลสามารถคำนวณโดยประยุกต์ทฤษฎีควบคุมแบบเล็งเลิศของตัวค่าคงแบบ LQ (Linear-Quadratic regulator) เหมือนกับในงานของ Fosha et al. (1970) จากงานดังกล่าวของ Calovic นับได้ว่าเป็นความสำเร็จเริ่มแรกในการนำทฤษฎีควบคุมแบบเล็งเลิศมาใช้ในระบบ LFC โดยที่กำจัดผลของสัญญาณรบกวนทางโหลดได้ เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวสามารถปรับปรุงผลตอบชั่วครู่ของระบบให้ดีขึ้น และในขณะเดียวกันผลตอบอยู่ตัวของระบบยังคงเป็นไปตามจุดประสงค์เช่นเดียวกับ LFC แบบที่นิยมใช้กัน ยิ่งไปกว่านั้นในตัวควบคุมที่เสนอขึ้นใช้โครงสร้างของระบบ LFC แบบที่นิยมใช้กันโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงเพียงแต่มีการวัดสถานะเพื่อใช้ในการป้อนกลับแบบสัดส่วนเพิ่มขึ้นเท่านั้น ทำให้ประยุกต์แนวความคิดดังกล่าวในระบบ LFC ที่มีอยู่ได้โดยง่าย

อย่างไรก็ตาม ในแนวความคิดดังกล่าวตัวควบคุมต้องใช้การป้อนกลับสถานะทั้งหมด ทำให้ยังคงมีปัญหาในทางปฏิบัติอยู่ดี Calovic et al.(1973) ได้พยายามแก้ไขข้อเสียดังกล่าวโดยใช้การป้อนกลับสัญญาณออกแบบสัดส่วนอินทิกรัลแทน ตัวควบคุมดังกล่าวซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 ถูกจำกัดให้ใช้การป้อนกลับเฉพาะสัญญาณออกเท่าที่สามารถวัดในระบบได้แก่ กำลังขาออกของเทอร์ไบน์ กำลังจริงในเส้นเชื่อมต่อ และความถี่ ซึ่งทำให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ทฤษฎีที่ใช้ตัดสินใจเลือกอัตราขยายที่เหมาะสมของตัวควบคุมป้อนกลับสัญญาณออกถูกคิดขึ้นและเสนอโดย Levine et al.(1970) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสัญญาณออกที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงผลตอบชั่วครู่ของระบบได้ใกล้เคียงกับการใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสถานะทั้งหมดมาก และทำได้ง่ายกว่ามากในทางปฏิบัติจริง แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างสารนิเทศที่ใช้ยังเป็นแบบรวมสู่ศูนย์ การใช้ตัวควบคุมดังกล่าวกับ LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังหลายเขตที่เชื่อมโยงกันยังคงมีปัญหาในการปฏิบัติจริง เนื่องมาจากต้องมีการแลกเปลี่ยนสารนิเทศเป็นระยะทางไกล ๆ ระหว่างเขตซึ่งกันและกัน

LFC แบบกระจาย

จากที่กล่าวมาในตอนที่แล้ว เห็นได้ว่าการควบคุมแบบรวมสู่ศูนย์ที่เสนอขึ้นมาไม่สามารถใช้ได้จริงในระบบที่มีหลายเขต ทำให้นักวิจัยหันมาสนใจการควบคุมแบบกระจายซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าเหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยระบบย่อยหลายระบบเชื่อมโยงกัน การควบคุมแบบกระจายคือการควบคุมที่แบ่งระบบใหญ่ ๆ ออกเป็นระบบย่อย ๆ ตามธรรมชาติของระบบนั้น แต่ละระบบย่อยมีการควบคุมเป็นของตัวเองโดยใช้สารนิเทศเฉพาะท้องที่ (local information) เท่านั้นดังในรูปที่ 2.11 แสดงการควบคุมระบบแบบกระจายที่มีสองระบบย่อย

ในการจัดการเกี่ยวกับระบบขนาดใหญ่วิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ แยกระบบออกเป็นระบบย่อย เพื่อจุดประสงค์บางอย่าง เช่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณ หรือเพื่อความง่ายในการออกแบบอาทิเช่น การคำนวณที่เกี่ยวกับสปาร์ซเมตริกซ์ เป็นต้น การกระทำเช่นนั้นแฝงความคิดของการมีลำดับขั้น (hierarchy) อยู่ และในที่สุดได้นำไปสู่การพัฒนาเป็นรูปแบบของการควบคุมแบบลำดับขั้น การควบคุมแบบลำดับขั้นคือการควบคุมที่แบ่งออกเป็นหลายระดับ การควบคุมในระดับล่างสุดจะเป็นการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมเฉพาะท้องที่ ตัวควบคุมระดับล่างแต่ละตัวจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมที่อยู่ระดับสูงขึ้นไปดังในรูปที่ 2.12 ตัวควบคุมที่อยู่ชั้นบนสุดทำหน้าที่เป็นผู้ประสานงาน (co-ordinator) คอยรับสารนิเทศจากตัวควบคุมระดับล่างและส่งสารนิเทศบางอันกลับไปเพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการทำงานของระบบทั้งหมด ดังนั้นการควบคุมแบบลำดับขั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับการควบคุมแบบกระจาย และอาจจัดเป็นการควบคุมแบบกระจายประเภทหนึ่ง

Miniesy et al. (1971) ได้เสนอการแก้ปัญหา LFC ด้วยการควบคุมสองชั้น (two-level control) ซึ่งมีโครงสร้างเช่นเดียวกับรูปที่ 2.2 การควบคุมแบ่งออกเป็นสองส่วน การควบคุมในชั้นที่หนึ่งเป็นหน้าที่ของตัวควบคุมในแต่ละเขตซึ่งใช้การป้อนกลับสถานะเฉพาะท้องที่โดยค่าอัตราขยายป้อนกลับของตัวควบคุมคำนวณเก็บไว้ล่วงหน้า เนื่องจากระบบ LFC เป็นระบบขนาดใหญ่ การลดความลำบากในการคำนวณทำได้โดยตัดผลจากพจน์เชื่อมต่อระหว่างระบบย่อยทิ้งเสีย การคำนวณอัตราขยายป้อนกลับของตัวควบคุมในแต่ละเขตที่ทำให้ดัชนีสมรรถนะกำลังสองของระบบได้ลดขนาดลงมาเป็นการแก้สมการพีชคณิตของ Riccati ของแต่ละระบบย่อย ซึ่งใช้เพียงโมเดลของระบบย่อยเท่านั้น การควบคุมในชั้นที่สองใช้การควบคุมแบบออนไลน์ (online control) เนื่องจากการควบคุมในชั้นที่หนึ่งยังไม่ได้คำนึงถึงผลของพจน์เชื่อมต่อระหว่างระบบย่อยเลย ระบบ LFC ที่ใช้เฉพาะการควบคุมในชั้นที่หนึ่งเพียงอย่างเดียว

อาจไม่มีเสถียรภาพก็ได้ Miniesy ได้เสนอให้ชดเชยผลเหล่านั้นด้วยการควบคุมในชั้นที่สอง ดังสมการ

$$u_i(t) = -K_i x_i(t) + v_i(t) \qquad (2.3)$$

โดยที่เทอมแรกเป็นการควบคุมในชั้นที่หนึ่งและเทอมหลังจะได้จากการควบคุมออนไลน์ในชั้นที่สอง ผู้ประสานงานส่วนกลางจะทำการควบคุมในชั้นที่สองในลักษณะวงเปิดคือ ผู้ประสานงานส่วนกลางจะรับเอาสภาวะเริ่มแรกของทุกระบบย่อย เมื่อเกิดสัญญาณรบกวนทางโหลดไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ภายใต้เกณฑ์อันหนึ่งที่กำหนดไว้เพื่อใช้กำเนิดสัญญาณ $v_i(t)$ ที่เหมาะสมให้กับแต่ละระบบย่อย แนวความคิดดังกล่าวของ Miniesy et al. (1971) ไม่ได้รับประกันว่าค่าความผิดพลาดในภาวะอยู่ตัวของระบบที่ใช้โครงสร้างดังกล่าวจะเป็นศูนย์

Bengiamin et al. (1978) ได้แก้ไขข้อเสียเรื่องนี้โดยการควบคุมแบ่งออกเป็นสองชั้นเหมือนกัน การควบคุมในชั้นที่หนึ่งใช้ค่าที่คำนวณเก็บไว้ล่วงหน้า และการควบคุมชั้นที่สองเป็นการควบคุมออนไลน์ การแก้ไขเรื่องค่าความผิดพลาดในภาวะอยู่ตัวไม่เป็นศูนย์ทำได้โดยกำหนดภาวะสุดท้าย (final condition) ของตัวแปรที่ต้องการบางตัวให้เป็นศูนย์เสีย การควบคุมของแต่ละระบบย่อยเป็นไปภายใต้การทำให้ดัชนีสมรรถนะกำลังสองของแต่ละระบบย่อยนั้นน้อยที่สุด โดยคิดว่าสถานะของระบบย่อยอื่น ๆ ที่เกิดจากพจน์เชื่อมต่อมีการกำหนดค่าให้จากผู้ประสานงานส่วนกลาง ในการควบคุมชั้นที่หนึ่งตัวควบคุมจึงใช้เฉพาะการป้อนกลับสถานะเฉพาะท้องที่เท่านั้น เมื่อใช้วิธีดังกล่าวถึงแม้ระบบจะเป็นเชิงเส้นและดัชนีสมรรถนะเป็นฟังก์ชันกำลังสอง การควบคุมของแต่ละระบบย่อยไม่สามารถหาได้จากการแก้สมการ Riccati เหมือนในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว เนื่องจากมีการกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรขึ้นมา กฎการควบคุมจึงขึ้นกับขนาดของภาวะเริ่มแรกของระบบ เมื่อประยุกต์ทฤษฎีควบคุมแบบเล็งเลิศ (Athans et al. 1966) โดยใช้หลักการของฮามิลโทเนียล (Hamiltonian) ก็จะสามารถหาเงื่อนไขจำเป็นของคำตอบได้โดยที่คำตอบของแต่ละระบบย่อยดังกล่าวอยู่ในรูปของปัญหาค่าขอบเขตสองจุด (two-point boundary value problem) ส่วนการควบคุมในชั้นที่สองตัวประสานงานส่วนกลางจะรับข่าวสารจากการควบคุมระดับล่างและตัดสินใจส่งค่าที่เหมาะสมของสถานะของระบบอื่นในพจน์เชื่อมต่อระหว่างระบบย่อยเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการทำงานของระบบทั้งหมด จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่าแนวความคิดเรื่อง LFC แบบลำดับขั้นที่เสนอโดย Miniesy et al.(1971) และ Bengiamin et al.(1978) ยังไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เพราะว่าตัวควบคุมมีโครงสร้างซับซ้อนยากแก่การปฏิบัติจริงมาก

Venkateswarlu et al.(1977) ได้พิจารณาปัญหา LFC เป็นปัญหาระบบควบคุมแบบกระจายเชิงสโตคาสติก และใช้เทคนิคการแก้ไขความผิดพลาดของการจำลอง (modelling -error correction) ร่วมกับเทคนิคการประมาณค่า กล่าวคือระบบ LFC แต่ละเขตจะมีดัชนีสมรรถนะกำลังสองเป็นของตัวเอง ในการตัดสินใจของตัวควบคุมจะใช้เฉพาะโมเดลของระบบย่อยนั้น ๆ ส่วนผลของพจน์เชื่อมต่อระหว่างระบบย่อยพิจารณาเป็นตัวแปรเชิงสุ่มตัวหนึ่งที่มีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพการควบคุมที่เสนอขึ้นดังกล่าว การประมาณค่าสัญญาณรบกวนทางโหลดตลอดจนตัวแปรเชิงสุ่มตัวอื่นที่มีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ทำได้โดยใช้ตัวประมาณค่าแบบมีไบแอส การวัดของแต่ละระบบย่อยจำกัดให้วัดได้เฉพาะ ACE แต่กฎการควบคุมที่ได้ต้องใช้การป้อนกลับสถานะเฉพาะท้องที่แบบสัดส่วนอินทิกรัล ดังนั้นจากทฤษฎีบทการแยกคิดค่าของสถานะหาได้จากการใช้ตัวประมาณค่าแบบไม่มีไบแอส จากการจำลองเชิงเลขพบว่าได้ผลที่ดีแต่ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการปฏิบัติจริง เนื่องจากตัวควบคุมมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและจำเป็นต้องรู้ข้อมูลทางสถิติของระบบเพื่อใช้ในการประมาณค่า

Davison et al. (1978) ได้เสนอการควบคุมระบบ LFC แบบกระจายอีกรูปแบบหนึ่ง จุดเด่นของงานวิจัยดังกล่าวคือ ตัวควบคุมของแต่ละระบบย่อยใช้การป้อนกลับสัญญาณออกเฉพาะท้องที่ซึ่งมีโครงสร้างใกล้เคียงกับระบบ LFC แบบที่นิยมใช้กัน ซึ่งเหมาะสมในการใช้งานจริงกับระบบ LFC ที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน และมีรูปแบบทั่วไปสามารถประยุกต์ใช้ระบบ LFC กรณีมีหลายเขตได้ง่าย จากแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.14 เห็นว่าในทฤษฎีที่เสนอโดย Davison เปิดโอกาสให้สามารถใช้ตัวชดเชยแบบพลวัต (dynamic compensator) ได้อีกด้วย อัตราขยายของตัวควบคุมหาได้จากการแก้ปัญหาของการโปรแกรมไม่เชิงเส้นแบบมีข้อจำกัด (constrained nonlinear programming) โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ค่าคงตัวทางเวลาที่เด่น (dominant time constant) ของระบบวงปิดมีค่าน้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ตัวประกอบการหน่วง (damping factor) ของระบบวงปิดดังกล่าวต้องไม่น้อยเกินไปด้วย จากการใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบกระจายที่มั่นคง (robust) ที่คิดขึ้นโดย Davison (1976) สามารถบอกได้อย่างแน่นอนว่าในระบบวงปิดที่พิจารณาสามารถหาตัวควบคุมแบบกระจายตามที่กำหนดให้ได้หรือไม่ และถ้าปัญหาดังกล่าวมีคำตอบสามารถบอกได้ถึงขอบเขตบนของสมรรถนะที่ดีที่สุดเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบกระจายดังกล่าว การแก้ปัญหาของ Davison ดังกล่าวใช้หลักการของทฤษฎีควบคุมแบบโมดัล (modal control) ซึ่งผิดกับงานวิจัยที่ได้กล่าวมาในข้างต้นซึ่งพยายามใช้หลักการของทฤษฎีตัวคงค่าแบบ LQG และถึงแม้ตัวควบคุมจะมีหลายตัวในระบบแต่การตัดสินใจเพื่อเลือกอัตราการ

014160

ขยายที่เหมาะสมเหล่านั้นเป็นไปภายใต้เกณฑ์หรือดัชนีสมรรถนะอันเดียวกัน

Calovic et al. (1977) ได้เสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับ LFC แบบกระจาย ซึ่งได้พัฒนาต่อจากงานวิจัยชิ้นก่อน (Calovic 1972,1973) ตัวควบคุมที่เสนอขึ้นยังคงใช้การป้อนกลับสัญญาณออกแบบสัดส่วนอินทิกรัลแต่เปลี่ยนมาใช้โครงสร้างสารนิเทศแบบกระจายแทนดังในรูปที่ 2.15 จากการใช้ตัวควบคุมดังกล่าวยังได้ผลตอบอยู่ตัวเป็นไปตามจุดประสงค์เหมือนกับงานวิจัยชิ้นก่อน แต่ตัวควบคุมใช้การป้อนกลับน้อยลง การเลือกอัตราขยายป้อนกลับของตัวควบคุมมีขั้นตอนสองขั้นคือ

ก) หาตัวควบคุมป้อนกลับสถานะแบบเล็งเลิศ (Calovic, 1972) เสียก่อนแล้วคำนวณดูว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบเล็งเลิศดังกล่าวแล้วระบบควบคุมวงปิดที่ได้มีค่าไอเก็นและปริภูมิไอเก็น (eigen-space) เป็นเท่าไร

ข) พิจารณาค่าอัตราขยายตัวป้อนกลับแบบกระจาย โดยเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบกระจายดังกล่าวแล้ว ระบบวงปิดที่ได้จะมีปริภูมิไอเก็นที่เกิดจากค่าไอเก็นที่เด่นใกล้เคียงกับปริภูมิไอเก็นที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมในข้อ ก) ดังนั้นปัญหาในขั้นตอนนี้คือการเลือกอัตราขยายที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบกระจายโดยทำให้นอร์มมีค่าน้อยที่สุด (norm minimization)

แนวความคิดดังกล่าวได้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในงานวิจัยของ Bengtsson et al. (1974) ต่อมา Calovic ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้ในปัญหา LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังหลายเขตที่เชื่อมโยงกัน จากการจำลองเชิงเลขปรากฏว่าแนวความคิดดังกล่าวที่เสนอสามารถใช้ได้และเห็นได้ชัดว่าตัวควบคุมมีโครงสร้างเรียบง่ายเหมาะแก่การควบคุมระบบขนาดใหญ่อย่างเช่นระบบ LFC ที่มีหลายเขต แต่อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้จากแก้ปัญหาของการทำให้นอร์มมีค่าน้อยที่สุดดังกล่าวไม่ได้รับประกันว่า คำตอบที่ได้จะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติกซึ่งผิดกับการแก้ปัญหาโดยใช้ทฤษฎีตัวคงค่าแบบ LQG ที่มักจะรับประกันเสถียรภาพของระบบวงปิดที่ได้จากการออกแบบ

<u>ข้อสรุปทั่วไป</u>

จากการสำรวจงานวิจัยของการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดทั้งแบบรวมสู่ศูนย์และแบบกระจายที่ผ่านมา พอจะสรุปผลได้คือ

1) การควบคุมระบบ LFC แบบที่นิยมใช้กันเป็นการควบคุมแบบกระจายที่นิยมใช้กันในปัจจุบันสำหรับระบบ LFC และได้ผลทั่วไปเป็นที่น่าพอใจ แต่ผลตอบชั่วครู่ของระบบ LFC

ยังสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้

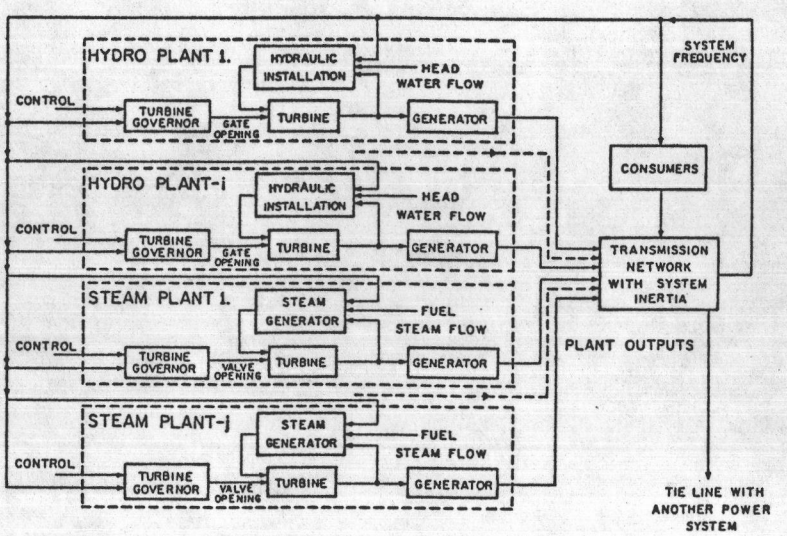
2) การควบคุมระบบ LFC แบบรวมสู่ศูนย์ได้ผลในทางทฤษฎีคือ สามารถปรับปรุงผลตอบชั่วครู่ของระบบให้ดีขึ้นได้ แต่ยังคงมีปัญหาในทางปฏิบัติจริง เนื่องจากต้องป้อนกลับสถานะทั้งหมดซึ่งไม่สามารถวัดได้ ถึงแม้จะใช้การป้อนกลับสัญญาณออกก็ตามโครงสร้างสารนิเทศยังคงเป็นแบบรวมสู่ศูนย์ ระบบ LFC แต่ละเขตต้องมีการแลกเปลี่ยนสารนิเทศระหว่างเขตซึ่งกันและกัน ทำให้ยังคงมีปัญหาในทางปฏิบัติจริงอยู่ดี

3) การควบคุมที่เหมาะสมกับระบบ LFC ของระบบไฟฟ้ากำลังหลายเขตที่เชื่อมโยงกันควรเป็น การควบคุมแบบกระจาย

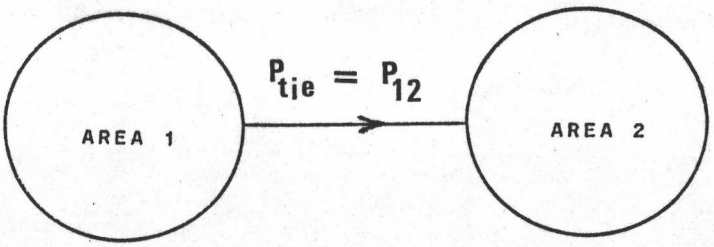
4) LFC แบบกระจายที่ใช้การป้อนกลับสถานะยังคงไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติจริงอยู่ดี เนื่องจากในความเป็นจริงสถานะบางตัวของระบบทำการวัดได้ยาก การใช้ตัวประมาณค่าแบบต่าง ๆ ก็ยังเพิ่มความซับซ้อนให้กับระบบควบคุมแบบกระจายดังกล่าว

5) กฎการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับ LFC แบบกระจายควรใช้การป้อนกลับสัญญาณออกเท่าที่วัดได้จริงในระบบ หรือใช้การป้อนกลับสัญญาณออกเฉพาะท้องที่นั่นเอง

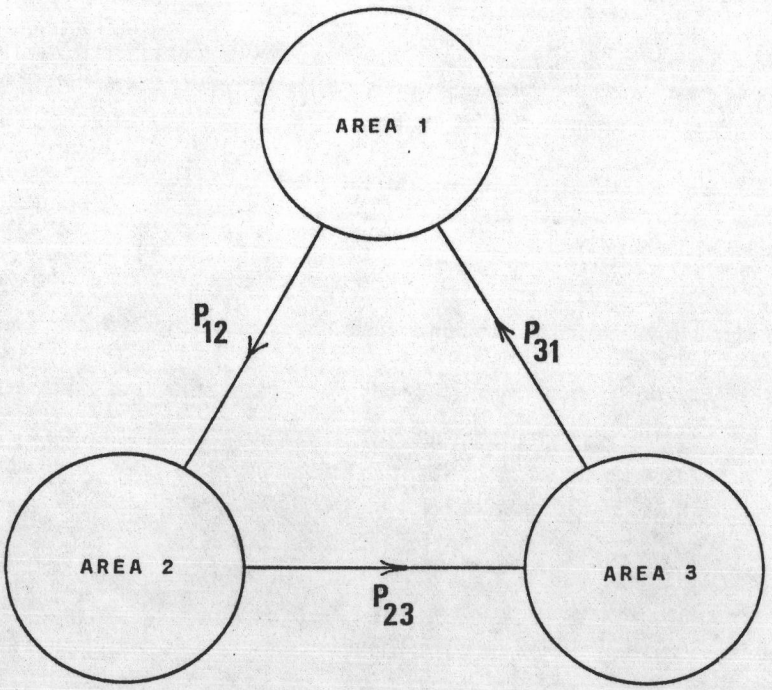
6) เท่าที่ผ่านมางานวิจัยของการใช้ทฤษฎีตัวคงค่า LQ แบบกระจายในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับ LFC แบบกระจายยังมีน้อยเมื่อเทียบกับการใช้หลักการของทฤษฎีควบคุมแบบอื่น ๆ ดังนั้นจึงยังมีปัญหาที่น่าสนใจเพื่อทำวิจัยในหัวข้อดังกล่าวอีกมาก



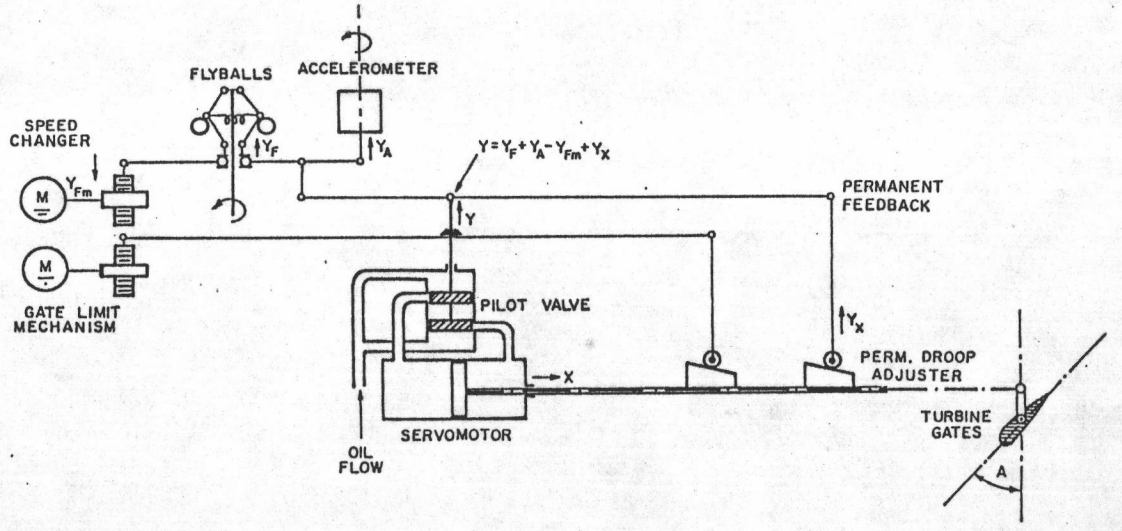
รูปที่ 2.1 แผนภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละเขต



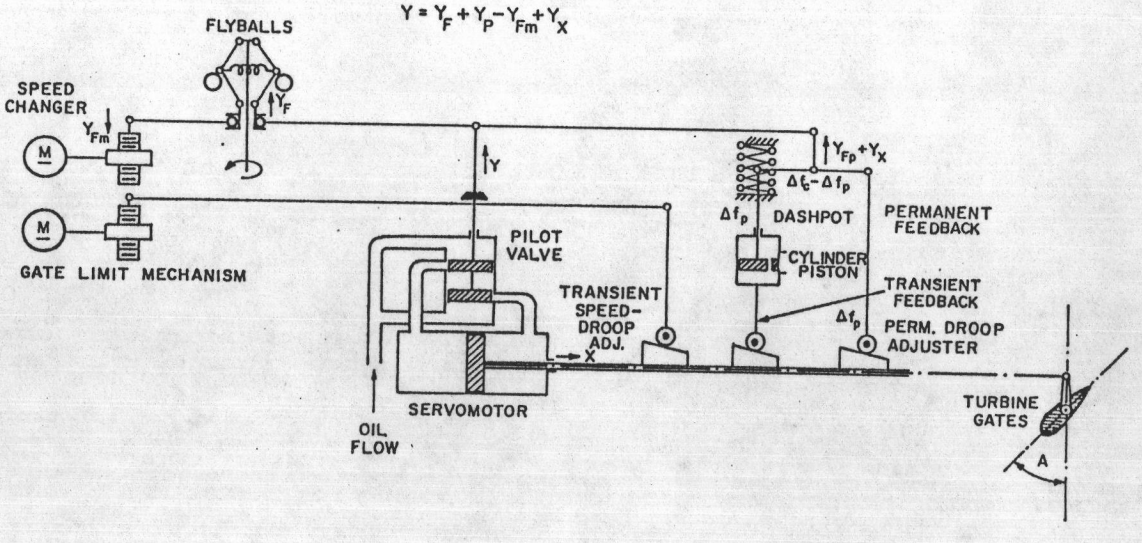
รูปที่ 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสองเขต



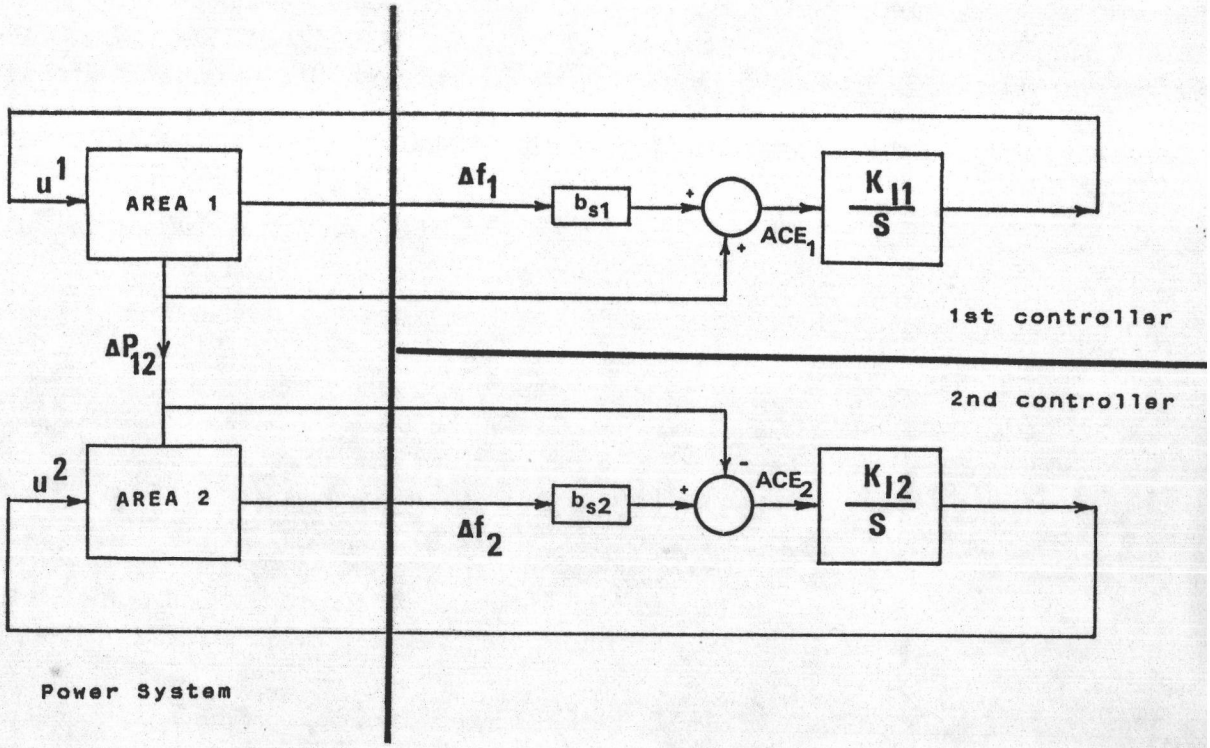
รูปที่ 2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสามเขต



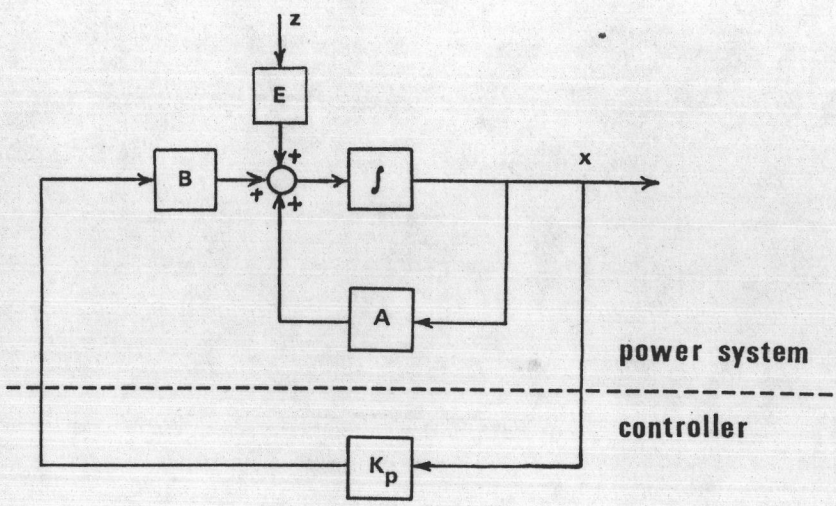
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการทำงานของกัฟเวอร์เนอร์แบบ accelerotachometric



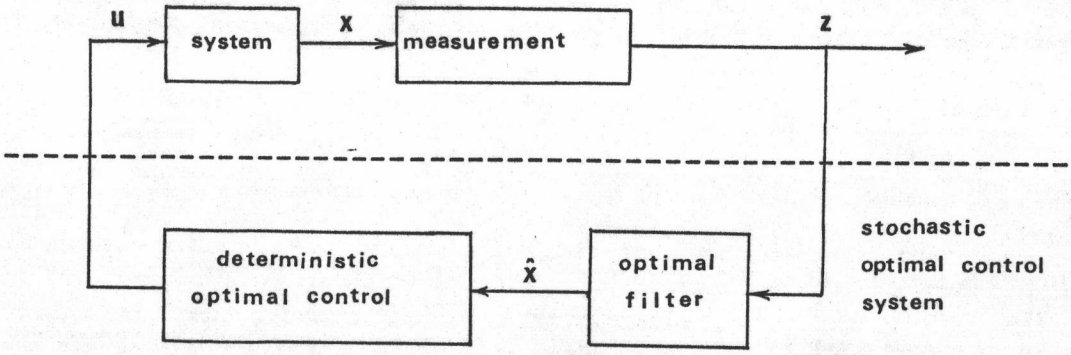
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการทำงานของกัฟเวอร์เนอร์แบบ transient speed-droop



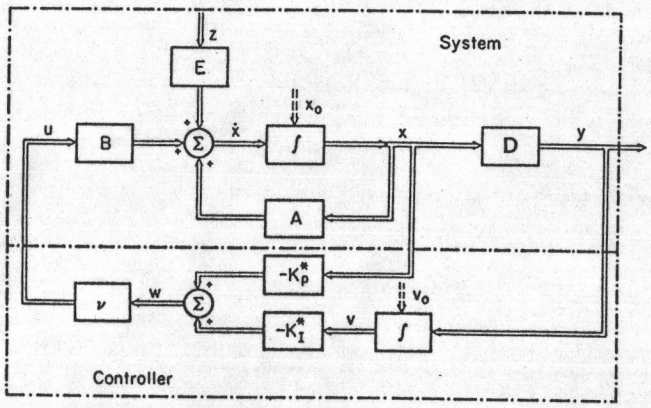
รูปที่ 2.6 แผนภาพการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดแบบที่นิยมใช้กัน



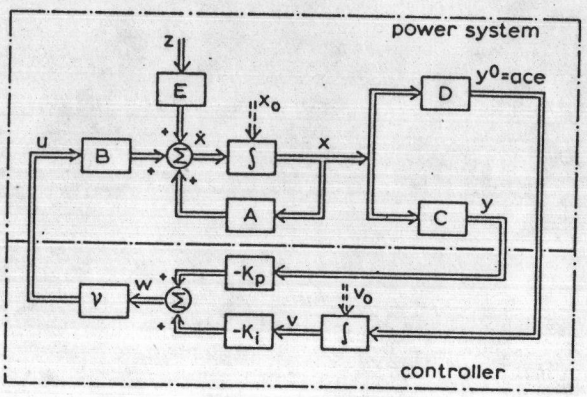
รูปที่ 2.7 แผนภาพการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดแบบสัดส่วนที่เสนอโดย Fosha et al.(1970)



รูปที่ 2.8 แผนภาพการควบคุมระบบเชิงสโตคาสติกโดยทฤษฎีบทแยกคิด

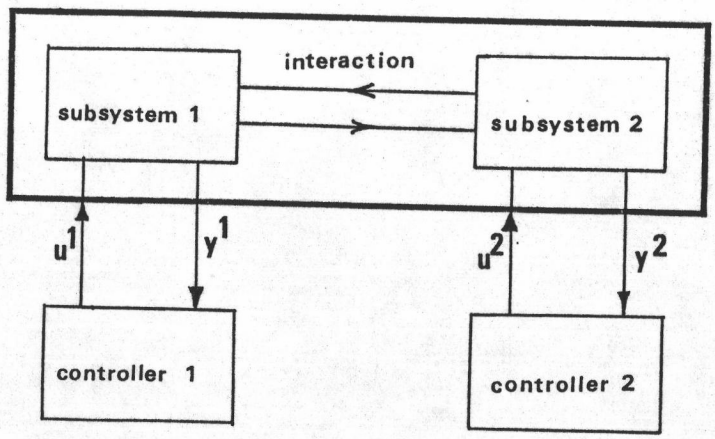


รูปที่ 2.9 แผนภาพการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดโดยการป้อนกลับสถานะทั้งหมด

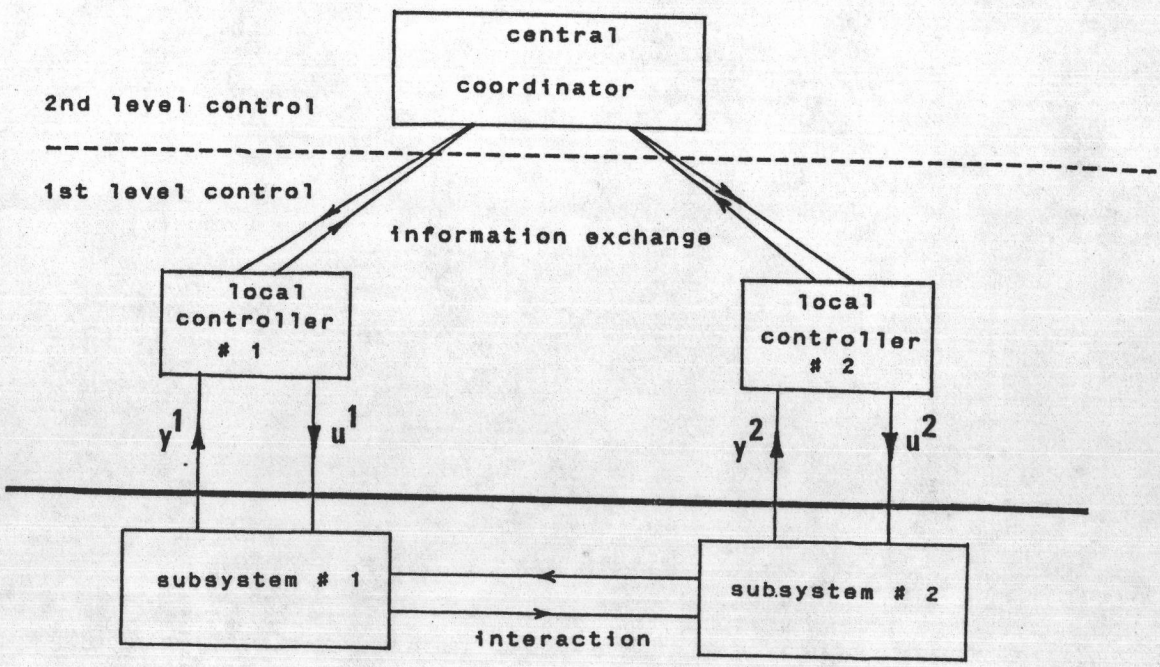


รูปที่ 2.10 แผนภาพการควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดโดยการป้อนกลับสัญญาณออก

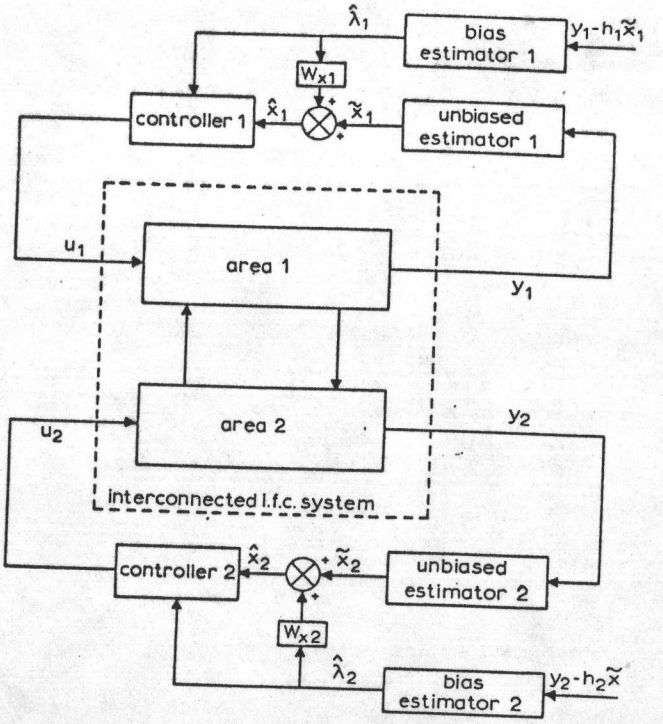
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



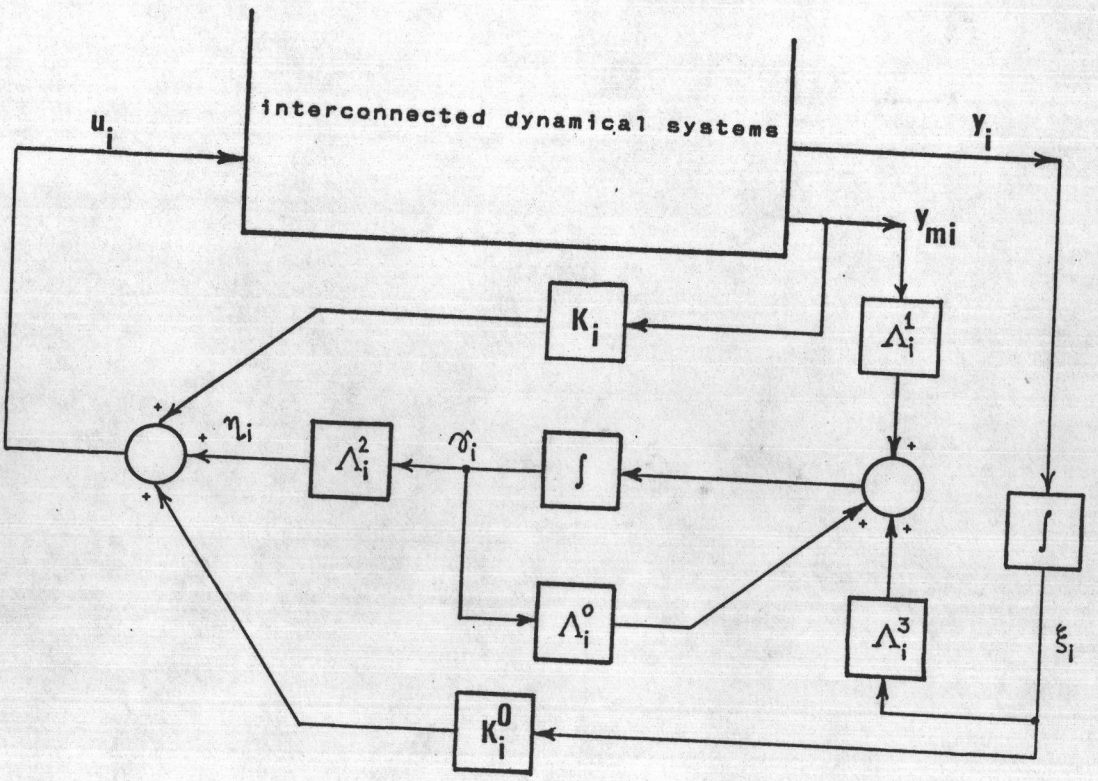
รูปที่ 2.11 แผนภาพการควบคุมแบบกระจาย



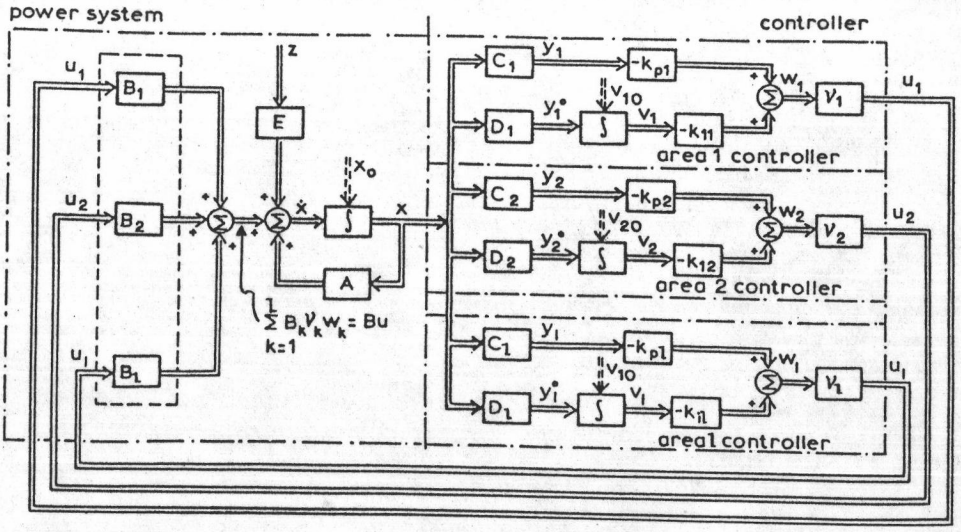
รูปที่ 2.12 แผนภาพการควบคุมแบบลำดับขั้น



รูปที่ 2.13 แผนภาพระบบ LFC ที่เสนอโดย Venkateswarlu et al.(1977)



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบ LFC ที่เสนอโดย Davison et al.(1978)



รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบ LFC ที่เสนอโดย Calovic et al.(1977)