

การวิเคราะห์สมรรถนะตัวควบคุมชำนาญการ

PERFORMANCE ANALYSIS OF AN EXPERT CONTROLLER

สรารวุฒิ สุจิตจร

Sarawut Sujitjorn

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology

email : sarawut@ccs.sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของระบบควบคุมอัจฉริยะ ที่อาจจะใช้ตัวควบคุมเป็นชนิดระบบผู้เชี่ยวชาญซึ่งเรียกสั้นๆ ว่า ตัวควบคุมชำนาญการ เมื่อตัวควบคุมดังกล่าวใช้งานกับกระบวนการการควบคุมที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตัวควบคุมนั้นจะกลายเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญแบบเปิด สมบัติสำคัญต่างๆ ที่เป็นตัวบ่งบอกสมรรถนะของตัวควบคุม ซึ่งได้กล่าวถึงไว้ในบทความนี้ ได้แก่ สมบัติของการเข้าถึงได้ สมบัติของการรวนเวียน และสมบัติของเสถียรภาพ บทความนี้ยังนำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์สมรรถนะต่างๆ เหล่านี้โดยอาศัยโครงข่ายกราฟและใช้การเทียบเคียงกับตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

ABSTRACT

This article presents the structure of an intelligent control system that may use an expert-system type controller called shortly an expert controller. This type of controller when being used with a controlled process with unknown model is regarded as an opened expert system. Important properties indicating the controller's performance, e.g. reachability, cyclic and stability properties, are discussed. The article also presents analysis techniques using graph net and an analogy to a fuzzy logic controller.

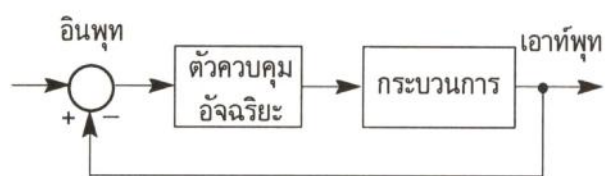
1. บทนำ

ทุกวันนี้การควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกคงจะเป็นที่คุ้นเคยกันในหมู่นักวิชาการ หากเมื่อกล่าวถึงระบบควบคุมแบบฟัซซี่ (fuzzy control) นั้น เป็นรูปแบบหนึ่งของระบบควบคุมอัจฉริยะ (intelligent control system) คงจะมีคำถามเกิดขึ้นทันทีว่าระบบควบคุมอัจฉริยะนั้น

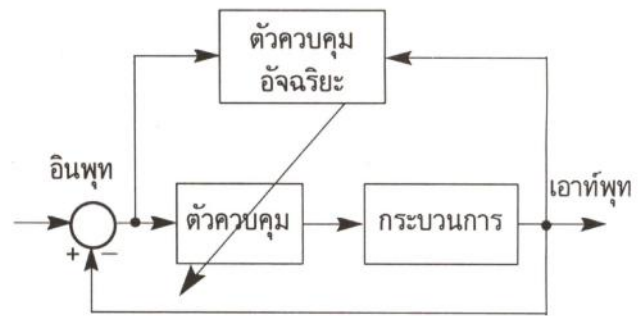
คืออะไร อาจกล่าวอย่างง่าย ๆ ในขณะนี้ได้ว่าระบบควบคุมอัจฉริยะมีรากฐานแนวคิดมาจากปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligent) [1] ซึ่งเป็นการศึกษาถึงกระบวนการความคิดของมนุษย์โดยอาศัยการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อจะพิจารณาถึงความหมายของระบบควบคุมอัจฉริยะ สิ่งที่สำคัญคงจะอยู่ที่คำว่า

“อัจฉริยะ” เมื่อพิจารณาประเด็นสำคัญในความหมายของคำว่า “intelligent หรืออัจฉริยะ” ดังที่ปรากฏใน [2, 3] จะเห็นว่าสิ่งใดที่ถือว่ามีความอัจฉริยะจะต้องสามารถเรียนรู้ เข้าใจและคิดด้วยเหตุผลได้ จึงเป็นที่มาของนิยาม ระบบอัจฉริยะที่ปรากฏใน [1] ว่า ระบบอัจฉริยะเป็นระบบที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่มีได้รู้ล่วงหน้ามาก่อนและจะต้องพึ่งพาตนเองได้อย่างดีในการปรับแก้ผลการเปลี่ยนแปลงนั้น นิยามของระบบควบคุมอัจฉริยะจึงมองได้เป็นสองแนวทาง กล่าวคือ แนวทางแรกมุ่งเน้นไปที่ความอัจฉริยะของตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น แนวทางที่สองมุ่งไปที่ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นจะต้องมีความสามารถพึ่งพาตนเอง (autonomous) ได้ดีขึ้นกว่าระบบควบคุมแบบธรรมดา

พัฒนาการของระบบควบคุมไปในแนวทางแรกนั้น ได้ผลที่ห่างไกลจากนิยามอยู่มาก ระบบควบคุมอัจฉริยะในปัจจุบันส่วนใหญ่จึงได้รับการพัฒนาไปตามแนวทางที่สองของนิยามข้างต้น ด้วยเหตุที่เป็นการยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามนุษย์และสัตว์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความอัจฉริยะ ระเบียบวิธีของการควบคุมแบบอัจฉริยะ (intelligent control methodology) จึงเป็นกรรมวิธีให้การตัดสินใจว่าจะควบคุมระบบอย่างไร โดยใช้ความรู้จากทฤษฎีและการสังเกตระบบชีวภาพ พฤติกรรมการแสดงออกและตัดสินใจของมนุษย์และสัตว์ ดังนั้น ตัวควบคุมอัจฉริยะ จึงเป็นตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นจากระเบียบวิธีของการควบคุมแบบอัจฉริยะ หรือใช้วิธีการควบคุมแบบธรรมดาให้การเลียนแบบพฤติกรรมการควบคุมที่แสดงออกโดยระบบชีวภาพ มนุษย์และสัตว์ [4]



รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างของระบบควบคุมอัจฉริยะโดยตรง

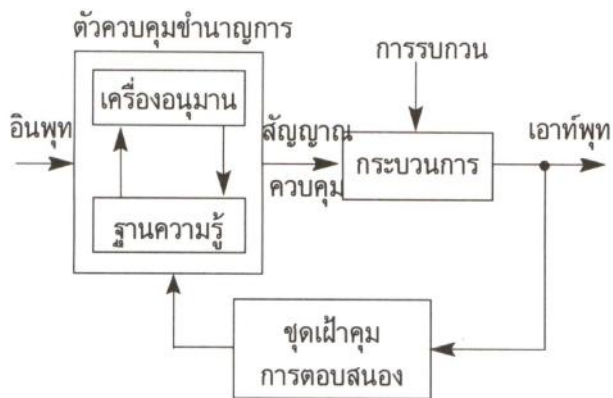


รูปที่ 1 (ข) โครงสร้างของระบบควบคุมอัจฉริยะทางอ้อมหรือระบบกำกับสั่งการอย่างอัจฉริยะ

ระบบควบคุมอัจฉริยะจึงหมายถึง ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมอัจฉริยะนั่นเอง และมีโครงสร้างที่จำแนกง่ายๆ ได้สองลักษณะ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1(ก) และ (ข) ในการควบคุมทางตรงนั้นตัวควบคุมอัจฉริยะจะควบคุมกระบวนการโดยตรง ส่วนในการควบคุมทางอ้อม ตัวควบคุมอัจฉริยะจะให้การปรับแต่งตัวควบคุมเดิม ที่ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการอีกต่อหนึ่ง ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน การอนุวัติระบบควบคุมอัจฉริยะที่พบเห็นได้บ่อยครั้งได้แก่ ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ (fuzzy control) ระบบควบคุมชำนาญการหรือแบบผู้เชี่ยวชาญ (expert control) ระบบควบคุมแบบนิวรอล (neural control) ระบบควบคุมแบบเรียนรู้ด้วยตนเอง (learning control) และระบบควบคุมที่ใช้การคำนวณเลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการ (evolutionary computation) ในบทความนี้ จะกล่าวถึงเพียงระบบที่มีการใช้ตัวควบคุมชำนาญการ (expert controller) และในบางส่วนอาจเกี่ยวโยงถึงตัวควบคุมแบบฟัซซี่ และวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าว

2. ตัวควบคุมชำนาญการและสมบัติแสดงสมรรถนะที่สำคัญ

ระบบควบคุมอัจฉริยะประเภทระบบควบคุมชำนาญการหรือ ECS (expert control system) นั้น มีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุมชำนาญการ

ตัวควบคุมที่ปรากฏในวงรอบมีสถาปัตยกรรมเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญหรือระบบผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งใช้กฎ (Rule) ในรูปประโยค

ถ้า..... แล้ว (ifthen)

เพื่อดำเนินกระบวนการผลิตสัญญาณควบคุม ตัวควบคุมชำนาญการนี้มีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องอนุมานและฐานความรู้ ฐานความรู้เป็นที่บรรจุกฎรวมทั้งชุดข้อมูลต่างๆ เพื่อการควบคุมกระบวนการ เครื่องอนุมานในเทคโนโลยีปัจจุบันก็คือ เครื่องคอมพิวเตอร์หรือไมโครโพรเซสเซอร์บอร์ดที่ให้การเอ็กซิติวท์กฎ (Rule) หรืออาจเรียกว่ากฎการควบคุมต่างๆ ครึ่งสองทางที่โยงระหว่างเครื่องอนุมานและฐานความรู้ นั้นหมายถึงเครื่องอนุมานดึงข้อมูลจากฐานความรู้ไปใช้ประโยชน์ ในบางจังหวะก็อาจส่งข้อมูลเข้าไปเก็บในฐานความรู้ หรืออาจดัดแปลงฐานความรู้ได้ ในกรณีที่ตัวควบคุมใช้กลไกการอนุมานแบบฟัซซีเพื่อการเอ็กซิติวท์กฎการควบคุม ก็อาจเรียกตัวควบคุมดังกล่าวว่าเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซีหรือ FLC (fuzzy logic controller)

การวิเคราะห์ ECS อาจดำเนินการสำหรับทั้งระบบที่เป็นวงรอบปิดของการควบคุม ซึ่งต้องการแบบจำลองของกระบวนการ ตัวควบคุม และของชุดเฝ้าคุมการตอบสนอง หากแบบจำลองมีลักษณะเป็นกฎ (Rule) ถ้า แล้ว การวิเคราะห์สมบัติทางสมรรถนะก็อาจใช้วิธีเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ [5] ซึ่งสามารถดำเนินการวิเคราะห์แยกส่วนสำหรับองค์ประกอบของวงรอบการควบคุม หากว่า

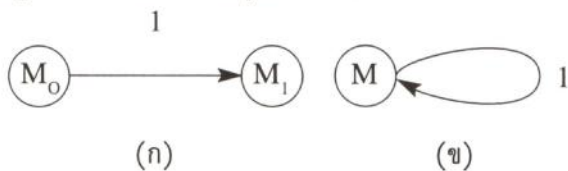
กระบวนการและชุดเฝ้าคุมการตอบสนอง สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ตามปกติ เช่น สมการดิฟเฟอเรนเชียล เป็นต้น การวิเคราะห์ที่อาจอาศัยเทคนิควิเคราะห์ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ บทความนี้ให้ความสนใจกรณีเฉพาะของวิศวกรรมระบบ ที่มีข้อสมมติว่ากระบวนการและชุดเฝ้าคุมนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ทราบแบบจำลอง ซึ่งเป็นกรณีของการประยุกต์ตัวควบคุมชำนาญการกันอย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรม การวิเคราะห์สมรรถนะจะกระทำกับตัวควบคุมเท่านั้น ซึ่งอาจเรียกตัวควบคุมในกรณีนี้ว่าตัวควบคุมชำนาญการแบบเปิดหรือเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญแบบเปิดนั่นเอง สมบัติแสดงสมรรถนะที่สำคัญได้แก่ สมบัติของความสามารถในการเข้าถึงได้ (reachability property) สมบัติของการวนเวียน (cyclic property) และสมบัติของเสถียรภาพ (stability property) ในตอนนี้จะกล่าวถึงสมบัติสองประการแรกก่อน

ความสามารถในการเข้าถึงได้นั้นหมายถึง ความสามารถของระบบพลวัตในการส่งต่อสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง จนกระทั่งสถานะได้รับการส่งต่อจนเข้าถึงสถานะที่พึงประสงค์ ในกรณีของระบบควบคุมชำนาญการ สถานะที่พึงประสงค์สามารถเป็นสถานะหนึ่งในเซตของสถานะที่พึงประสงค์ L_m

การวนเวียนนั้นคือ ลักษณะอาการที่สถานะเกิดการวนเป็นวงรอบอยู่ภายในเซตของสถานะ L_c สถานการณ์ของการวนเวียนในด้านร้ายคือ การชะงักงัน (deadlock) ในด้านดีนั้นหมายถึง เมื่อสถานะลู่อุ้เข้าหาเซตของสถานะทางพลวัตอันพึงประสงค์แล้ว สถานะก็จะวนเวียนอยู่ในเซตของสถานะที่พึงประสงค์เท่านั้น และยังสื่อความหมายถึงเสถียรภาพของระบบผู้เชี่ยวชาญเมื่อใช้เป็นตัวควบคุมอีกด้วย อย่างไรก็ตามเสถียรภาพของตัวควบคุมชำนาญการที่จะกล่าวถึงต่อไปนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยการเทียบเคียงกับ FLC (fuzzy logic controller) และทฤษฎีเสถียรภาพเชิงพลังงานของ FLC [6]

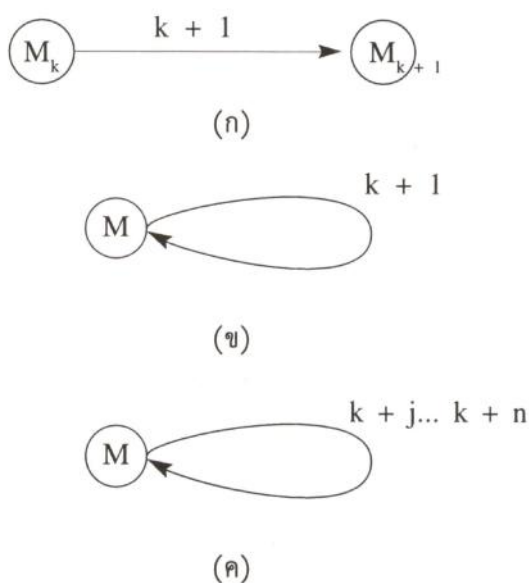
3. การวิเคราะห์สมรรถนะของตัวควบคุม ชำนาญการด้วยโครงข่ายกราฟ

สมบัติแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมชำนาญการในด้าน การเข้าถึงได้และการวนเวียน สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยโครงข่ายกราฟ ที่มีรูปลักษณะพื้นฐาน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพโครงข่ายกราฟพื้นฐาน

สัญลักษณ์วงกลมหมายถึงสถานะทางพลวัต M_i ภายในวงกลม หมายถึง การอธิบายลักษณะสมบัติของสถานะนั้นๆ ที่อาจเป็นการให้ความหมายโดยใช้ตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรแบบพีชข้ออธิบายสถานะนั้นๆ ครอบคลุมถึงการส่งของสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง เลข 1 ที่กำกับอยู่หมายถึง ครั้งที่ 1 หรือครั้งที่ $k, k+1, \dots$ ในกรณีทั่วไปดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 รูปที่ 3(ข) 4(ข) และ 4(ค) หมายความว่าสถานะ M เกิดการวนเวียน



รูปที่ 4 แผนภาพโครงข่ายพื้นฐานสำหรับกรณีทั่วไป

ตัวอย่างการวินิจฉัยสมรรถนะของตัวควบคุมชำนาญการได้แก่ที่ปรากฏใน [7] ใช้ตัวควบคุมชำนาญการปรับแต่งคุณภาพการตอบสนองโดยรวมของระบบควบคุมวงรอบปิดโดยใช้เทคนิคการปรับสัดส่วนของอินพุตที่ป้อนให้ระบบ ตัวแปรและสถานะทางพลวัตต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ถือเป็นตัวแปรพีชข้ออธิบายได้ด้วยคำอธิบายความทางภาษา ที่ใช้ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพแบบสามเหลี่ยม กฎการควบคุมที่ใช้มีเพียง 2 ชุดๆ ละ 5 ข้อ ตัวอย่างของกฎการควบคุมได้แก่

ถ้า (ปริมาณการพุ่งเกินในการตอบสนองพอยอมรับได้) แล้ว (ไม่ต้องปรับอินพุต)

ถ้า (ปริมาณการพุ่งเกินในการตอบสนองค่อนข้างมาก) แล้ว (ให้ลดอินพุตด้วยปริมาณ SP หรือ small positive)

ถ้า (ปริมาณการพุ่งเกินสูงมากจนอาจเป็นอันตรายต่อระบบ) แล้ว (ให้ลดอินพุตเหลือเพียง 10%) เป็นต้น

ตัวควบคุมชำนาญการนี้สามารถให้การควบคุมและปรับแต่งอาการตอบสนองของระบบ ได้เป็นที่น่าพึงพอใจภายใต้สถานการณ์ที่ต้องทำงานกับ “เอเลียส (alias)” รายละเอียดอื่นใดอาจค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก [7]

ตัวควบคุมชำนาญการที่ยกเป็นตัวอย่างนี้ใช้การให้ความหมายแก่สมรรถนะที่สนใจ ณ เวลาใดๆ ในเชิงตัวแปรทางภาษา ที่ M_i เป็นการอธิบายให้ความหมายดังต่อไปนี้

ZO = about zero

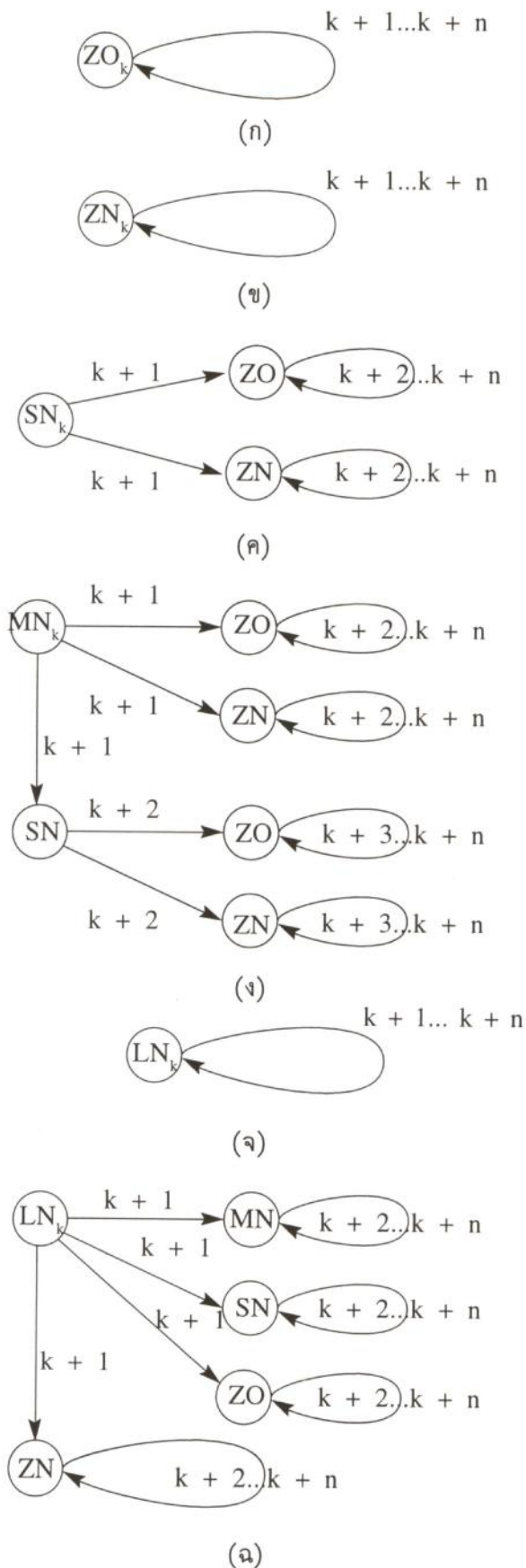
ZN = negative zero

SN = small negative

MN = medium negative และ

LN = large negative

ZO และ ZN อธิบายสถานะที่พึงประสงค์ ดังนั้นจากรูปที่ 5(ก)(ข)(ค) และ (ง) สถานะทางพลวัตของ



รูปที่ 5 แผนภาพโครงข่ายกราฟที่ใช้วิเคราะห์สมรรถนะของตัวควบคุมชำนาญการที่เป็นตัวอย่าง

ระบบล้นถูกส่งเข้าไปถึงสถานะอันพึงประสงค์ทั้งสิ้น และสถานะในขั้นสุดท้ายวนอยู่ในเซ็ทของสถานะที่พึงประสงค์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงตัวควบคุมมีสมรรถนะที่น่าพึงพอใจแสดงได้ด้วยสมบัติของความสามารถในการเข้าถึงได้และสมบัติการวนเวียน นอกจากนี้ หากยอมรับการให้ความหมายเรื่องเสถียรภาพของ Lyapunov ว่า หมายถึง การที่ระบบพลวัตสามารถถูกกำกับให้สถานะทางพลวัต เคลื่อนจากสถานะตั้งต้นใดๆ เข้าหาเซ็ทของสถานะที่กำหนดให้ และสถานะวนเวียนอยู่ในเซ็ทของสถานะดังกล่าวนี้ [5,7,8,9] ระบบที่บังคับควบคุมด้วยตัวควบคุมชำนาญการดังกล่าวจึงมีเสถียรภาพ

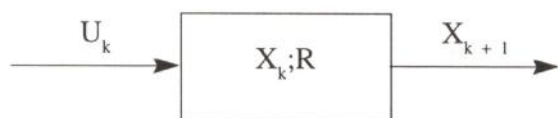
เมื่อพิจารณาแผนภาพของรูปที่ 5(จ) และ (ฉ) จะเห็นว่า มีบางโอกาสที่สถานะทางพลวัตของระบบวนเวียนที่สถานะ SN MN และ LN ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์และหมายความถึงมีบางโอกาสที่ระบบอาจขาดเสถียรได้ จึงเป็นสิ่งกระตุ้นเตือนที่ตัวในการใช้งานตัวควบคุมจำเป็นต้องมีชุดนิรภัย (safety jacket) ที่จะนำระบบกลับสู่สภาวะที่ไม่เสี่ยงต่อการเสียหาย หรือแม้กระทั่งจะต้องปิดระบบถ้ามีสถานการณ์อันล่อแหลมต่อการขาดเสถียรหรือเสี่ยงต่อการเสียหาย

เทคนิคที่นำเสนอมาข้างต้นเป็นสิ่งที่เอื้อประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของตัวควบคุมชำนาญการ แม้ว่าจะมีความยุ่งยากอยู่บ้างในการดำเนินงานที่ไม่เป็นอัตโนมัติ ผู้ออกแบบตัวควบคุมจะต้องถอดความหมายกฎการควบคุมต่างๆ และเขียนแผนภาพโครงข่ายกราฟดังกล่าว แล้วจึงค่อยดำเนินการวิเคราะห์ต่อไป

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการเทียบเคียงกับ FLC

เทคนิควิเคราะห์เสถียรภาพที่กล่าวถึงในที่นี้ อาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่ [6] เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพลังงานของระบบฟัซซี่อิสระ ซึ่งหมายถึงไม่พิจารณาอินพุทภายนอก เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์ตัวควบคุมชำนาญการหรือระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม

ชำนาญการ การทำงานของตัวควบคุมและ/หรือระบบ ECS โดยรวม จะต้องได้รับการตีความให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ ถ้า [A] แล้ว [B] ซึ่งทั้ง A และ B อธิบายสถานะทางพลวัตด้วยความหมายของตัวแปรทางภาษา M_i ระบบพลวัตแบบฟัซซี่โดยทั่วไปเมื่อพิจารณาอาจแทนได้ด้วย แผนภาพดังในรูปที่ 6 มีความสัมพันธ์ที่อธิบายระบบเป็นดังสมการ (1)



รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกเมื่อพิจารณาระบบพลวัตแบบฟัซซี่

$$X_{k+1} = X_k o U_k o R \quad (1)$$

X_k และ X_{k+1} เป็นฟัซซี่เซตของสถานะที่ k และที่ $(k+1)$ ตามลำดับ

U_k เป็นอินพุตที่ k

R เป็นแมทริกซ์ความสัมพันธ์ของระบบ และ

o เป็นสัญลักษณ์แสดงปฏิบัติการ max-min

สำหรับระบบอิสระ $U_k = 0, \forall k, k = 0, 1, 2, \dots$ สมการ

(1) ลดรูปเหลือ

$$X_{k+1} = X_k o P, k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

P เป็นแมทริกซ์ความสัมพันธ์ที่อาจเรียกว่า แมทริกซ์ลักษณะสมบัติของระบบ ถ้าระบบได้รับการอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์

ถ้า $X_k = M_1$ แล้ว $X_{k+1} = M_1^*$

พร้อมกับ (also)

ถ้า $X_k = M_2$ แล้ว $X_{k+1} = M_2^*$

พร้อมกับ

.....

พร้อมกับ

ถ้า $X_k = M_Q$ แล้ว $X_{k+1} = M_Q^*$

P ที่นิยามตาม [6,11] แทนได้ด้วยความสัมพันธ์ที่ (3)

$$P = \min_{q=1}^Q [\min \{\mu_{x_k}, \mu_{x_{k+1}}\}] \quad (3)$$

และหาก P นิยามตาม [10,11] P อาจแทนได้ด้วยความสัมพันธ์ที่ (4)

$$P = \max_{q=1}^Q [\min \{\mu_{x_k}, \mu_{x_{k+1}}\}] \quad (4)$$

Q ใน (3) และ (4) คือ จำนวนกฎ μ_{x_k} และ $\mu_{x_{k+1}}$ หมายถึงค่าสมาชิกภาพของ X_k และ X_{k+1} ตามลำดับ การนำ P ตามสมการ (3) ไปใช้ในการวิเคราะห์คำนวณจะให้ผลที่อาจตีความได้ว่าเป็นขอบเขตด้านต่ำ (lower boundary) และผลการคำนวณที่อาศัย P ตามสมการ (4) ก็จะเป็นขอบเขตด้านสูง (upper boundary) การวินิจฉัยว่าระบบฟัซซี่ใดเสถียร ไม่เสถียร หรือสั่นไหว อาจอาศัยการตีความระดับพลังงาน ΔE_c ที่อาจคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Delta E_c(P, i) = E(P^i) - E(P^{i-1}), i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

$$P^i = \begin{matrix} P_0 & P_0 & \dots & o & P \\ \leftarrow & & & & \rightarrow \\ \text{มี } P \text{ ปรากฏ } i \text{ ครั้ง} \end{matrix} \quad (6)$$

และ

$$E(P) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w(x_i, y_j) \cdot f\{\mu_p(x_i, y_j)\} \quad (7)$$

การคำนวณตามความสัมพันธ์ (7) สามารถทำความเข้าใจจากตัวอย่างต่อไปนี้

สมมติให้

$$P = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 \\ 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}, n \times m = 2 \times 2$$

$$E(P) = \frac{1}{4} [(1 \times 1) \times 0.4 + (1 \times 2) \times 0.3 + (2 \times 1) \times 0.5 + (2 \times 2) \times 0.2] = 0.7$$

และการคำนวณ P^i ตามความสัมพันธ์ (6) ดังตัวอย่างเช่น

$$P^2 = P o P = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 \\ 0.5 & 0.2 \end{bmatrix} o \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 \\ 0.5 & 0.2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 \\ 0.4 & 0.3 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$E(P^2) = \frac{1}{4} [(1 \times 1) \times 0.4 + (1 \times 2) \times 0.3 + (2 \times 1) \times 0.4 + (2 \times 2) \times 0.3] = 0.75$$

การวินิจฉัยสมรรถนะของตัวควบคุมพิจารณาได้จาก ΔE_c กรณีเสถียร ΔE_c ลู่เข้าหาศูนย์ดังรูปที่ 7 (ก) หาก ΔE_c มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไรขอบเขตดังรูปที่ 7(ข) นั้น หมายถึงการขาดเสถียร หาก ΔE_c สั่นไกวดังรูปที่ 7(ค) หมายถึงระบบพัชชีหรือ FLC สั่นไกวด้วย

กฎการควบคุมของตัวควบคุมชำนาญการตามตัวอย่างในตอนต้นที่ 3 นั้น ได้รับการถอดความดังรายละเอียดที่ปรากฏใน [7] ให้เป็นชุดประโยคเงื่อนไขแบบพัชชี เช่น

ถ้า $X_k = ZO$ แล้ว $X_{k+1} = ZO$

พร้อมกับ

ถ้า $X_k = SN$ แล้ว $X_{k+1} = ZO$

พร้อมกับ

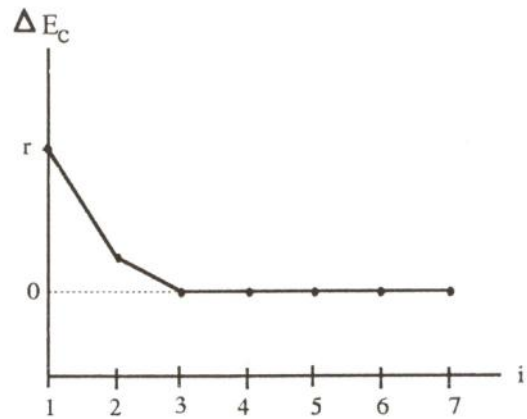
ถ้า $X_k = SN$ แล้ว $X_{k+1} = ZN$

.... เป็นต้น

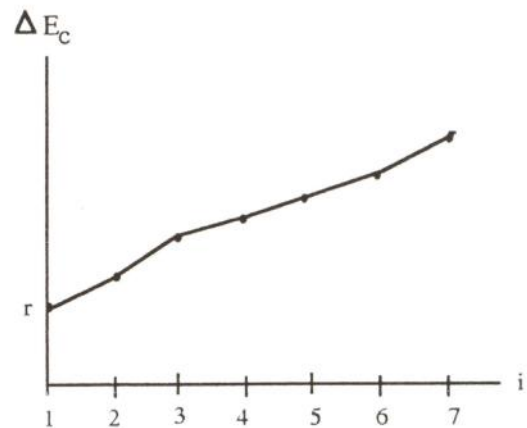
แมทริกซ์ P ที่คำนวณตามความสัมพันธ์ (3) ได้เป็นแมทริกซ์ศูนย์ ซึ่งหมายถึงระดับพลังงานต่ำสุดที่ FLC นี้จะอยู่ในสภาวะสมดุลที่เสถียรอยู่เสมอ ในกรณีที่เกี่ยวข้องความสัมพันธ์ (4) ผลการคำนวณได้แมทริกซ์ P ดังต่อไปนี้

P-matrix =

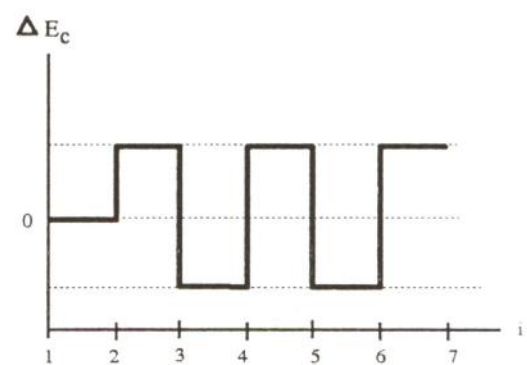
1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	0.0
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
0.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	0.0
0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



(ก) ΔE_c ของระบบที่เสถียร



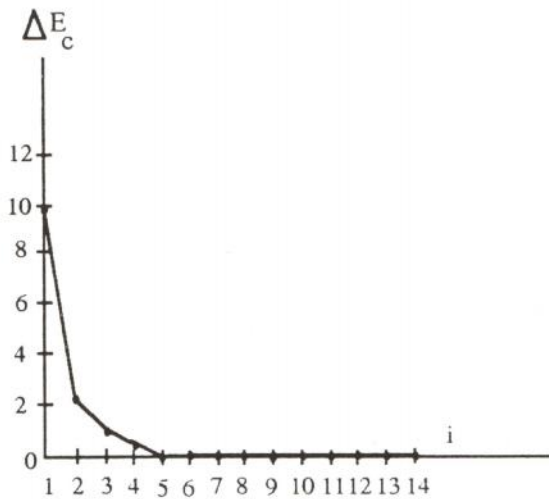
(ข) ΔE_c ของระบบขาดเสถียร



(ค) ΔE_c ของระบบที่มีการสั่นไกว

รูปที่ 7 ลักษณะกราฟโดยทั่วๆ ไปของ ΔE_c ตามการคำนวณครั้งที่ i

เมื่อคำนวณ ΔE_c ด้วยจำนวนครั้ง $i = 1, 2, \dots, 14$ [6] ได้ค่า ΔE_c ลู่เข้าหาศูนย์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมมีเสถียรภาพที่ดี



รูปที่ 8 ΔE_c ที่คำนวณได้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวควบคุมขำนาญการ

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะของตัวควบคุมขำนาญการ เมื่อได้รับการนำไปใช้ควบคุมกระบวนการที่ไม่ทราบแบบจำลอง ตัวควบคุมคือระบบผู้เชี่ยวชาญแบบเปิด และอาจเทียบเคียงได้กับระบบฟัซซี่อิสระ สมรรถนะที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ความสามารถในการเข้าถึงได้ การวนเวียน และเสถียรภาพ การวิเคราะห์สามารถกระทำได้โดยอาศัยโครงข่ายกราฟดังที่ได้รับการนำเสนอในบทความนี้ ความยุ่งยากจะอยู่ที่การถอดความกฎการควบคุมออกไป เป็นโครงข่ายกราฟแสดงการส่งสถานะพลวัต เมื่อได้โครงข่ายกราฟแล้ว การวิเคราะห์สมรรถนะสามารถกระทำได้อย่างง่าย ๆ นอกจากนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถกระทำได้ โดยการเทียบเคียงตัวควบคุมขำนาญการกับ FLC และดำเนินการคำนวณดัชนีบ่งชี้เสถียรภาพเชิงพลังงาน (ΔE_c) เสถียรภาพ การไม่มีเสถียรภาพและพฤติกรรมสั้นไกว สามารถวินิจฉัยได้โดยง่ายจากค่า ΔE_c อย่างไม่ก็ตามความยุ่งยากของเทคนิคการเทียบเคียงนี้ อยู่ตรงที่ การถอดความกฎการควบคุมของตัวควบคุม

ขำนาญการไปอยู่ในรูปชุดประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ ที่อธิบายระบบฟัซซี่อิสระที่เทียบเคียงกัน เทคนิคที่นำเสนอนี้เอื้อประโยชน์สูงต่อการวิเคราะห์ระบบควบคุมที่ไม่เป็นอมตะ ประเภทระบบอัจฉริยะที่มีการใช้ตัวควบคุมขำนาญการกำกับและสั่งการกระบวนการที่ไม่ทราบแบบจำลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยนี้ และคุณปราณี กระจ่างโพธิ์ ที่ได้พัฒนาต้นแบบบทความนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] "Defining intelligent control - Report of the Task Force on intelligent control," *IEEE Cont. Sys.*, vol 14, no. 3, pp. 4-5/58-66, 1994.
- [2] *Longman Dictionary of Contemporary English*, Longman, 1985.
- [3] *Collins Cobuild English Language Dictionary*, Collins, 1987.
- [4] K.M. Passino, "Bridging the gap between conventional and intelligent control systems," *IEEE Cont. Sys.*, vol. 13, no. 3, pp. 12-18, 1993.
- [5] K. M. Passino and A.D. Lunardhi, "Qualitative analysis of expert control systems," *Intelligent Control Systems*, pp. 404-442, IEEE Press, 1996.
- [6] J.B. Kiszka, M. M. Gupta and P.N. Nikiforuk, "Energetic stability of fuzzy dynamic systems," *IEEE Trans. SMC*, vol. 15, no. 6, pp. 783-792, 1985.

- [7] สรวุฒิ สุจิตจร, รายงานวิจัย : การปรับแต่งปัจจัยน้ำหนักของอินพุตในตัวเอง, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, พ.ศ. 2539.
- [8] P.C. Parks and V. Hahn, *Stability Theory*, Prentice-Hall, 1993.
- [9] K.M. Passino, A.N. Michel and P.J. Antsaklis, "Lyapunov stability of a class of discrete event systems," *IEEE Trans. AC*, vol. 39, no. 2, pp. 269-279, 1994.
- [10] M.M. Gupta, J.B.Kiszka and G.M. Trojan, "Multivariable structure of fuzzy control systems," *IEEE Trans. SMC*, vol. 16, no. 5, pp. 638-655, 1986.
- [11] L.A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process," *IEEE Trans. SMC*, vol. 3, no. 1, pp. 28-44, 1973.