



การทำเสถียรภาพความถี่แบบคงทนในระบบไฟฟ้ากำลังอิสระที่มีแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่ไม่สม่ำเสมอด้วยการควบคุมร่วมกันของโหลดอัจฉริยะ

1. บทนำ

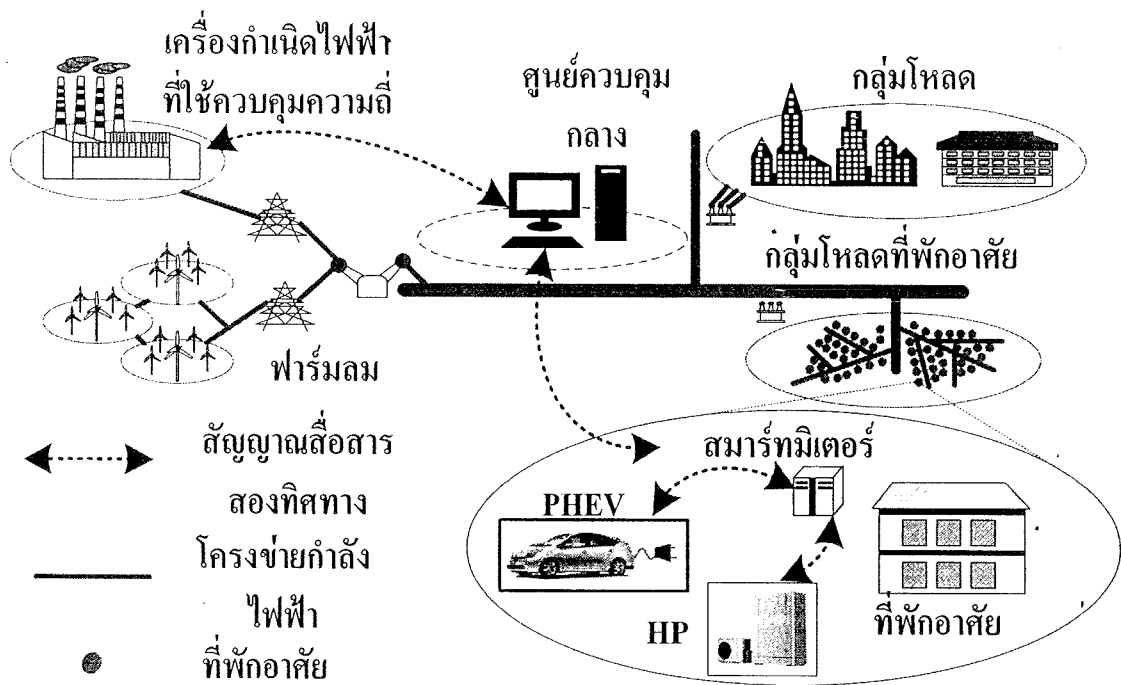
ปัจจุบัน ระบบไมโครกริดได้รับความสนใจอย่างสูงในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลดในสถานที่ซึ่งไม่สามารถต่อเข้าถึงระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้ โดยทั่วไประบบไมโครกริดประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่นลมและแสงอาทิตย์ เป็นต้น เนื่องจากการกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานลมและแสงอาทิตย์นั้นไม่สม่ำเสมอจึงทำให้เกิดการแกว่งของความถี่ขึ้นในระบบได้ [1]

ส่วนในด้านผู้ใช้ไฟฟ้านั้น มีแนวโน้มสูงในอนาคตที่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ประหยัดพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเช่น ปั๊มความร้อน (HP) และรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) เพิ่มมากขึ้น อุปกรณ์เหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังอัจฉริยะหรือสมาร์ตกริด [2] เนื่องจาก HP และ PHEV มีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์เหล่านี้ไปช่วยควบคุมความถี่ของระบบได้

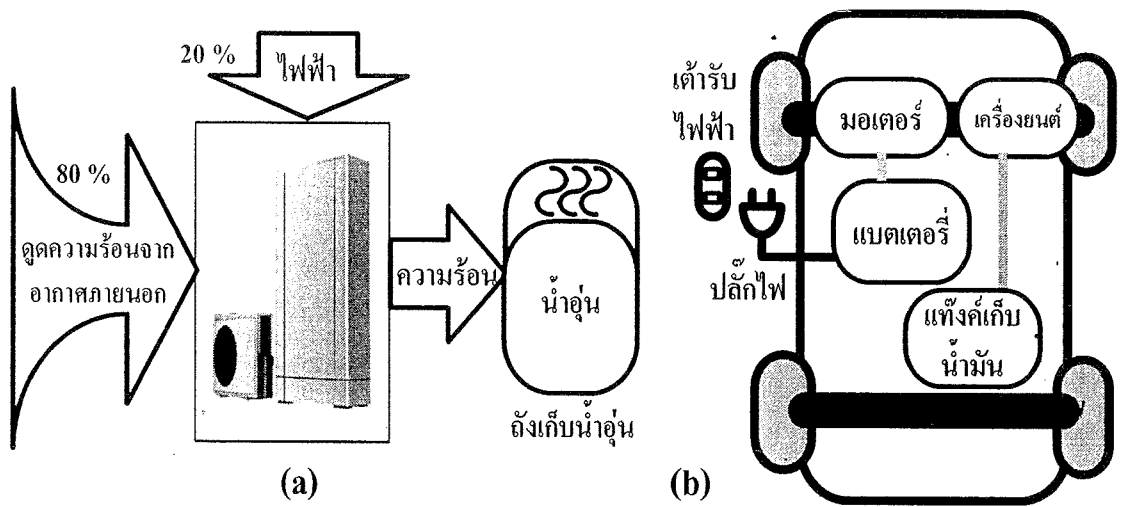
งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ HP และ PHEV ซึ่งติดตั้งอยู่ในกลุ่มที่พักอาศัยเพื่อใช้ในการลดการแกว่งความถี่อย่างทนทานในระบบสมาร์ตไมโครกริดซึ่งติดตั้งฟาร์มกังหันลม ในที่นี้จะกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ HP และ PHEV เป็นแบบพีไอดี ในการตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีนั้นจะใช้หลักการควบคุมผสม H_2/H_∞ [3] เพื่อรับรองด้านสมรรถนะการควบคุมและความทนทานต่อความไม่แน่นอนในระบบ การหาค่าพีไอดีที่เหมาะสมจะทำได้ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) [4] ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ HP และ PHEV ที่นำเสนออยู่นั้นนอกจากจะมีสมรรถนะสูงในการควบคุมความถี่แล้วยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบเหนือกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบ

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษาและแบบจำลองระบบ

รูปที่ 1 แสดงระบบไมโครกริดอิสระ [5] ที่ใช้ศึกษาซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมความถี่ได้ (Load frequency control, LFC) ขนาด 20 MW, ฟาร์มกังหันลม 6 MW, กลุ่มโหลด 17 MW ในกลุ่มบ้านพักอาศัยมีการติดตั้ง HP มีพิกัดกำลังตัวละ 4.4 kW ทั้งหมด 400 ตัวคิดเป็น 1.76 MW และ PHEV มีพิกัดกำลังตัวละ 5 kW ทั้งหมด 720 ตัวคิดเป็น 3.6 MW รวมพิกัดกำลังของ HP และ PHEV ทั้งหมดเป็น 5.36 MW เนื่องจากการกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งสร้างจากฟาร์มกังหันลมและการเปลี่ยนแปลงโหลดทำให้เกิดการแกว่งของความถี่ในระบบ เพื่อลดการแกว่งของความถี่ ศูนย์ควบคุมกลางทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าผ่านมิเตอร์อัจฉริยะหรือสมาร์ตมิเตอร์ แล้วส่งต่อไปยัง HP และ PHEV ในเวลาเดียวกันศูนย์ควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมไปที่ตัวควบคุมความถี่ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อปรับกำลังไฟฟ้าออกให้เหมาะสมด้วย



รูปที่ 1 ระบบสมาร์ทไมโครกริด



รูปที่ 2 (a) ปั๊มความร้อน (b) รถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด

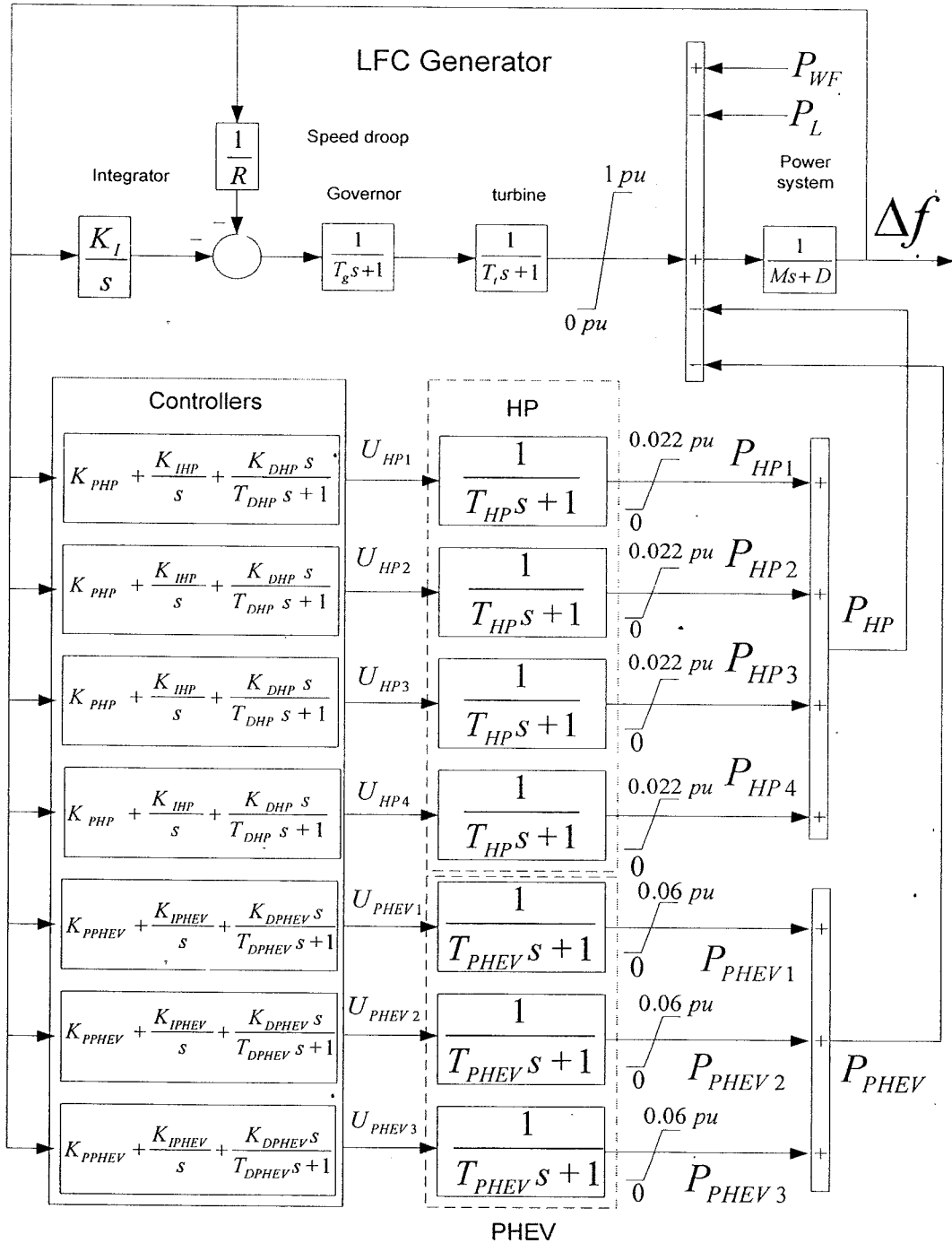
รูปที่ 2 (a) แสดงหลักการของ HP [6] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดึงความร้อนจากที่อุณหภูมิต่ำไปที่อุณหภูมิสูงสามารถนำมาใช้เพื่อทำความร้อนหรือทำน้ำอุ่นได้ HP จึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถดึงพลังงานความร้อนที่อยู่ในอากาศรอบตัวเราเป็นเสมือนเชื้อเพลิงมาใช้สร้างความร้อนโดยไม่ต้องสร้างความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยตรง ดังนั้น นอกจาก HP จะเป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงานแล้วยังช่วยลดสมภาวะโลกร้อนอีกด้วย หลักการทำงานของ HP สำหรับเครื่องทำน้ำอุ่นคือ HP จะดูดความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา 80 % และใช้ไฟฟ้า 20 % สำหรับระบบคอมเพรสเซอร์ภายในเพื่ออัดอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ได้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงออกมาใช้สำหรับทำน้ำอุ่นซึ่งเก็บอยู่ในถัง โดยทั่วไปการใช้ไฟฟ้าของ HP นั้นจะคงที่ที่ค่าลึงไฟฟ้าฟิคัด สำหรับในงานวิจัยนี้ ถ้าสมมติว่าน้ำอุ่นที่เก็บสำรองอยู่ในถังเก็บนั้นมีปริมาณเพียงพอกับการใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้นค่าลึงไฟฟ้าที่รับเข้ามาเพื่อใช้สำหรับทำน้ำอุ่นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และการควบคุมการรับค่าลึงไฟฟ้าของกลุ่มโหลด HP อย่างเหมาะสมทำให้ส่งผลไปควบคุมความถี่ของระบบได้ รูปที่ 2(b) แสดงโครงสร้างของ PHEV ซึ่งสามารถชาร์จค่าลึงไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ได้ด้วยการต่อปลั๊กไฟเข้าเต้ารับไฟฟ้า แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเมื่อพิจารณาจากกลุ่มของ PHEV จำนวนมากซึ่งติดตั้งอยู่ในด้านผู้ใช้ไฟหรือที่จอดรถอัจฉริยะ (Smart park) โดยการควบคุมการชาร์จค่าลึงไฟฟ้าที่เข้าแบตเตอรี่ของ PHEV ทุกคันอย่างเหมาะสม ทำให้สามารถใช้ PHEV ไปช่วยควบคุมความถี่ของระบบได้

รูปที่ 3 แสดงระบบไมโครกริดสำหรับการควบคุมความถี่ซึ่งติดตั้ง HP 4 ชุดๆละ 100 ตัวและ PHEV 3 ชุดๆละ 240 ตัว โดยแทนแบบจำลอง HP และ PHEV ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าเวลาคงตัว $T_{HP} = T_{PHEV} = 0.2$ s ในที่นี้กำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมการรับค่าลึงไฟฟ้าของ HP และ PHEV เป็นแบบพีไอดี ให้ HP และ PHEV ทำงานร่วมกันระบบกังหัน (Turbine, TB) และโกเวอร์นอร์ (Governor, GOV) ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจาก HP และ PHEV มีค่าเวลาคงตัวน้อยกว่าค่าเวลาคงตัวของ TB มาก ($T_T = 2$ s) จึงไม่คิดผลของ TB และ GOV ในการออกแบบตัวควบคุม HP และ PHEV แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบคือให้ HP และ PHEV ทำหน้าที่ลดความถี่ในสภาวะชั่วคราวหลังจากนั้นจึงให้ TB และ GOV กำจัดค่าผิดพลาดความถี่ในสภาวะคงตัว จากรูปที่ 3 สามารถหาสมการสถานะ (State equation) ของระบบที่ไม่คิดผล TB และ GOV เพื่อนำมาออกแบบค่า $K_{PHP}, K_{IHP}, K_{DHP}, T_{DHP}$ สำหรับ HP และ $K_{PPHEV}, K_{IPHEV}, K_{DPHEV}, T_{DPHEV}$ สำหรับ PHEV ตามลำดับ .

3. การปรับค่าพีไอดีที่เหมาะสมด้วยการควบคุมผสม H_2/H_∞

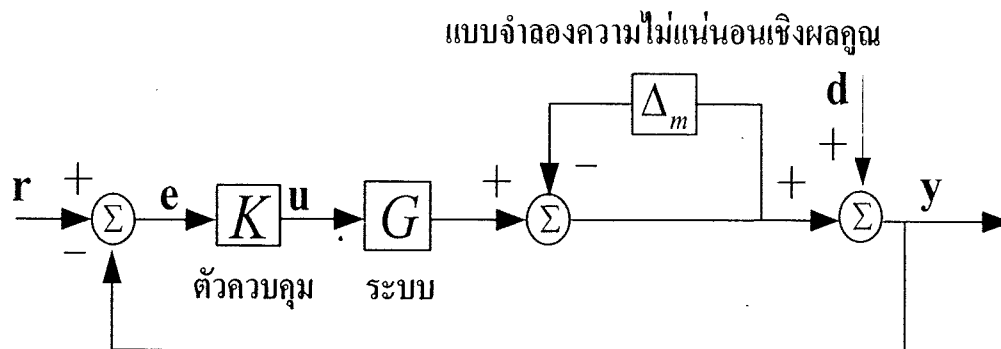
จุดประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีคือ

1. ให้ตัวควบคุมมีความทนทานสูงต่อความไม่แน่นอนของระบบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ
 2. ให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะสูงในการลดความเบี่ยงเบนความถี่ Δf
- เพื่อให้บรรลุได้ทั้งสองจุดประสงค์ สามารถตั้งปัญหาการปรับค่าพีไอดีให้เหมาะสมด้วยหลักการควบคุมผสม H_2/H_∞ และวิธีกลุ่มอนุภาคซึ่งอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3 แบบจำลองเชิงเส้นระบบไมโครกริดซึ่งติดตั้ง HP และ PHEV

3.1 หลักการควบคุมผสม H_2/H_∞



รูปที่ 4 ระบบควบคุมป้อนกลับที่มีความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ

พิจารณาระบบป้อนกลับซึ่งแทนความไม่แน่นอนในระบบด้วยแบบจำลองความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ [3] ดังแสดงในรูปที่ 4 โดย G เป็นระบบที่พิจารณา K เป็นตัวควบคุมที่ออกแบบ Δ_m คือความไม่แน่นอนในระบบเชิงผลคูณ (Multiplicative uncertainty) จากทฤษฎีอัตราขยายขนาดเล็ก (Small gain theorem) สามารถรับรองเสถียรภาพด้านความทนทานของระบบ (Robust stability) ได้ก็ต่อเมื่อ

$$\|\Delta_m\|_\infty < 1/\|(I+GK)^{-1}\|_\infty = 1/J_1 \quad (1)$$

เมื่อ $\|\cdot\|_\infty$ แทนค่านอร์มอนันต์ (Infinite norm) ของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นเมื่อทำให้ค่านอร์มอนันต์ J_1 มีค่าต่ำสุดก็จะทำให้ระบบมีส่วนเพื่อเสถียรภาพทนทาน (Robust stability margin) ต่อความไม่แน่นอนในระบบได้สูงสุด

เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะสูงในการควบคุมความถี่ จะพิจารณาค่าผิดพลาดของความถี่ e ระหว่างเอาต์พุต y กับสัญญาณอ้างอิง r เมื่อไม่คิดผลของ Δ_m และ d จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$E(s) = (I + G(s)K(s))^{-1} R(s) \quad (2)$$

ในที่นี้จะพิจารณาค่าของ $E(s)$ จาก

$$J_2 = \|E(s)\|_2^2 \quad (3)$$

เมื่อ $\|\cdot\|_2$ แทนนอร์มสอง (Two norm) ของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้น ถ้าทำให้ค่า J_2 มีค่าต่ำสุดก็จะทำให้ค่าความเบี่ยงเบนความถี่ต่ำสุดด้วย

เพื่อให้ตัวควบคุมมีความทนทานและสมรรถนะสูงจึงตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมได้ดังนี้

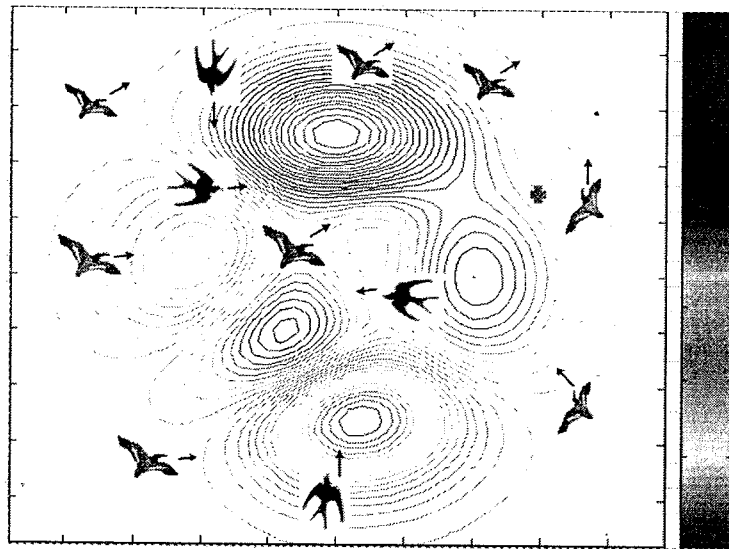
$$\begin{aligned} &\text{Minimize } J_1 + J_2 \\ &\text{Subject to } 0.0001 \leq K_p, K_I, K_D \leq 5 \\ &\quad \quad \quad 0.0001 \leq T_D \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

ส่วนตัวควบคุมเปรียบเทียบกับนั้นจะทำการปรับค่าพีไอดีโดยการทำให้ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงอินทิกรัล (Integral absolute error, IAE) ของ Δf มีต่ำที่สุด ดังนั้นจึงตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } J_3 = \int_0^{\infty} |\Delta f(t)| dt \quad (5)$$

โดยมีเงื่อนไขเช่นเดียวกันกับสมการที่ (4) ในงานวิจัยนี้ทำการใช้ PSO [4] เพื่อแก้ปัญหาสมการที่ (4) และ (5) ให้ได้ค่าพีไอดีที่เหมาะสมที่สุด

3.2 วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)



รูปที่ 5 หลักการ และแนวคิดพื้นฐานของวิธี PSO

วิธี PSO ได้นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [4] ในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ผีเสื้อกลางคืน หรือฝูงปลา เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 5 วิธี PSO เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร (population) แต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า อนุภาค (particle) ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคนี้อาจจะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม และบินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ในระหว่างบินนั้นแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งโดยอาศัยการอ้างอิงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว

เพื่อใช้หาทิศทางการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเอง หรืออนุภาคใกล้เคียง และวิธี PSO ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ง่าย และมีคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ (convergence characteristic) และประสิทธิภาพของการคำนวณที่ดีมาก

3.2.1 องค์ประกอบของวิธี PSO

รายละเอียดขององค์ประกอบวิธี PSO พิจารณาได้ดังต่อไปนี้
กำหนดให้

g คือ มิติ (dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา

$x_j = (x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,g})$ แทนตำแหน่งของอนุภาคที่ j

$v_j = (v_{j,1}, v_{j,2}, \dots, v_{j,g})$ แทนอัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่ j

$pbest_j = (pbest_{j,1}, pbest_{j,2}, \dots, pbest_{j,g})$ แทนตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคที่ j

$gbest_g$ แทนตำแหน่งของอนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด

ดังนั้นการเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาค สามารถคำนวณได้จาก

$$v_{j,g}^{(t+1)} = \omega \cdot v_{j,g}^{(t)} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c_2 \cdot Rand() \cdot (gbest_g - x_{j,g}^{(t)}) \quad (6)$$

$$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)} \quad (7)$$

โดยที่

n คือ จำนวนอนุภาคในกลุ่ม

m คือ จำนวนตัวแปร

t คือ ครั้งที่ทำการค้นหา (iteration)

$v_{j,g}^{(t)}$ คือ ความเร็วของอนุภาคที่ j ในรอบที่ t โดยที่

$$v_g^{min} \leq v_{j,g}^{(t)} \leq v_g^{max}$$

ω คือ แฟกเตอร์น้ำหนักความเฉื่อย (inertial weight factor)

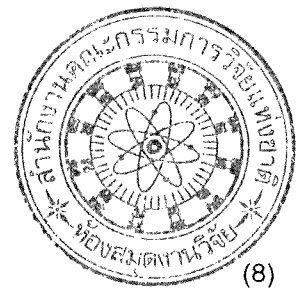
c_1, c_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง (acceleration constant)

$rand()$, $Rand()$ คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง $[0,1]$

$x_{j,g}^{(t)}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาคที่ j ในรอบที่ t

ค่า v^{max} ใช้ในการหาค่าความละเอียดของคำตอบ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคบินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจจะค้นหาไม่ครอบคลุมทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นจากการทดสอบมาแล้ว v^{max} ควรจะกำหนดค่าประมาณ 10-20 % ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว

ค่าคงที่ c_1 และ c_2 แทนน้ำหนักของความเร่งของแต่ละอนุภาคผ่านตำแหน่ง $pbest$ และ $gbest$, ถ้ามีค่าน้อยเกินไป ในกรณีที่อนุภาคอยู่ห่างจากตำแหน่งเป้าหมายก็อาจจะหมดแรงก่อนถึงเป้าหมาย แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจจะบินข้ามเป้าหมายไป ดังนั้นค่า c_1 และ c_2 จากการทดสอบมาแล้ว ควรตั้งไว้ที่ค่า 2.0



การเลือกค่า ω ที่เหมาะสมนั้น หาได้จาก

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (8)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า ω ที่เหมาะสมคือ $\omega_{\max} = 0.9$ และ $\omega_{\min} = 0.4$

3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธี PSO

ระเบียบขั้นตอนการดำเนินงานของวิธี PSO แสดงได้ดังรูปที่ 6 ขั้นตอนการดำเนินงานของ วิธี PSO อธิบายได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมดของ PSO และทำการสุ่มค่าเริ่มต้นของจำนวนประชากรของแต่ละอนุภาค โดยตั้งค่า $iteration = 1$

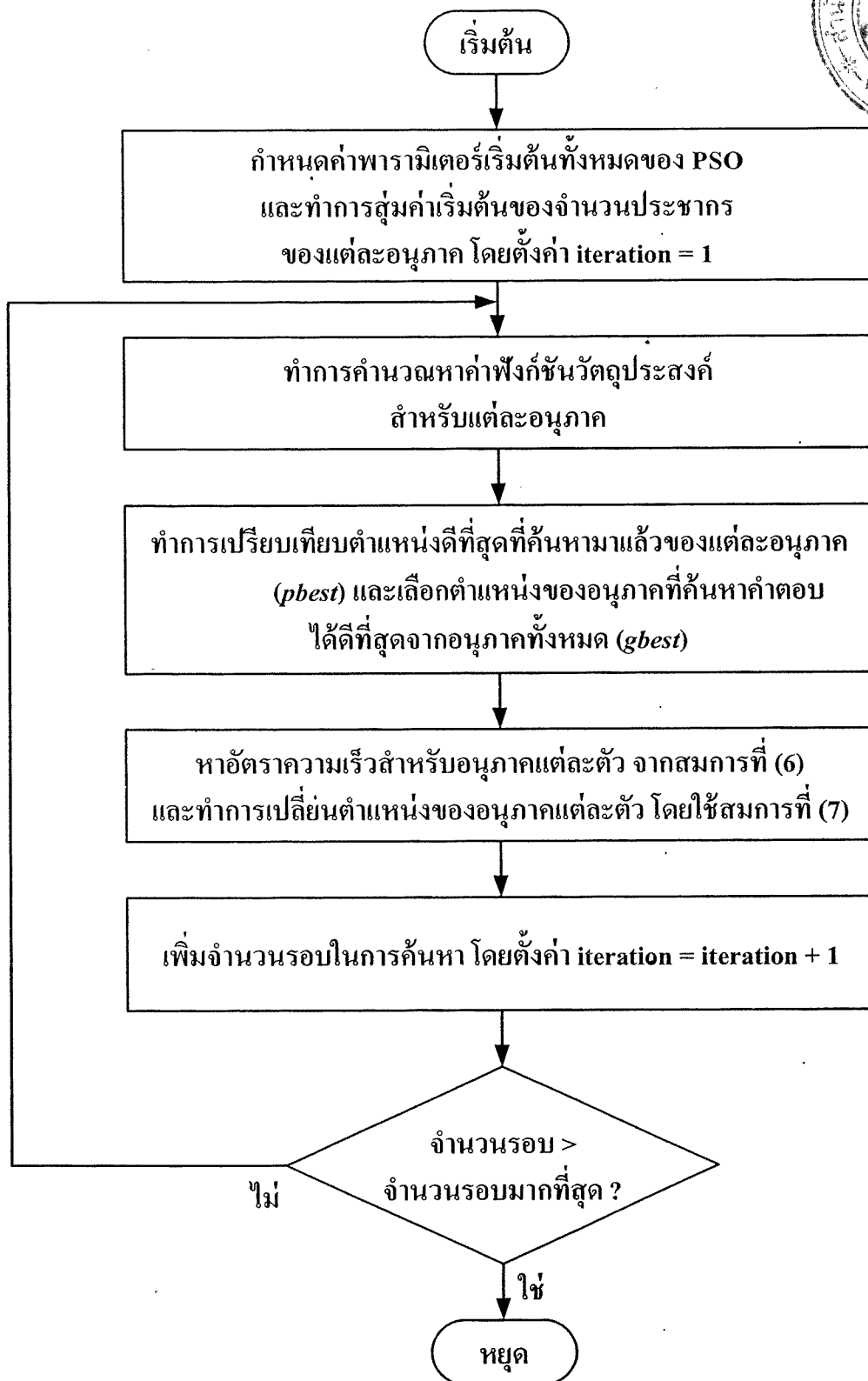
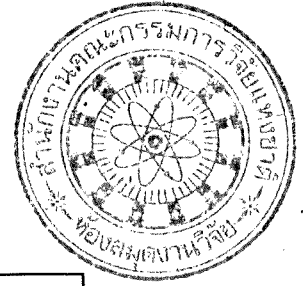
ขั้นตอนที่ 2 ทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับแต่ละอนุภาค

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของแต่ละอนุภาค ($pbest$) และเลือกตำแหน่งของอนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด ($gbest$)

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าอัตราความเร็วสำหรับอนุภาคแต่ละตัว จากสมการที่ (6) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตัว โดยใช้สมการที่ (7)

ขั้นตอนที่ 5 เพิ่มจำนวนรอบในการค้นหา โดยตั้งค่า $iteration = iteration + 1$

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดดำเนินการ ถ้ายังไม่ตรงตามเงื่อนไข ให้วนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 แต่ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดดำเนินการ



รูปที่ 6 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธี PSO

4. ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอแสดงได้ดังนี้

$$K_{HP}(s) = 1.5393 + \frac{1.1323}{s} + \frac{0.7756s}{0.0425s + 1} \quad (9)$$

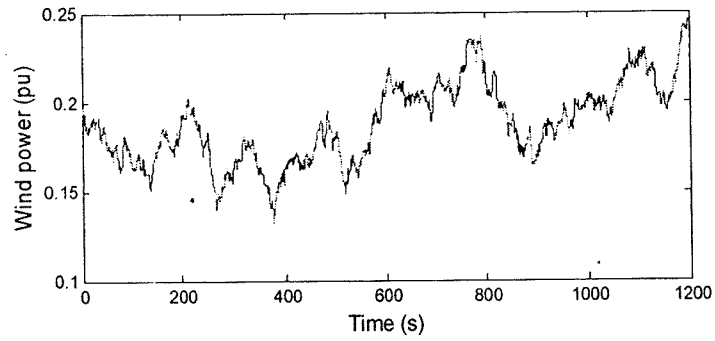
$$K_{PHEV}(s) = 1.8979 + \frac{1.5139}{s} + \frac{0.8971s}{0.0462s + 1} \quad (10)$$

ในที่นี้จะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมที่นำเสนอและตัวควบคุมที่ปรับค่าด้วยสมการ (5) รูปที่ 7 และ 8 แสดงกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่สร้างจากฟาร์มกังหันลม และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลด ตามลำดับ ผลการจำลองเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบแสดงดังรูปที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อไม่มี HP และ PHEV จะเกิดการแกว่งของความถี่อย่างรุนแรง ในทางตรงข้าม ตัวควบคุมของ HP และ PHEV ที่นำเสนอและเปรียบเทียบนั้นมีสมรรถนะในการลดค่าความเบี่ยงเบนความถี่ได้ใกล้เคียงกัน

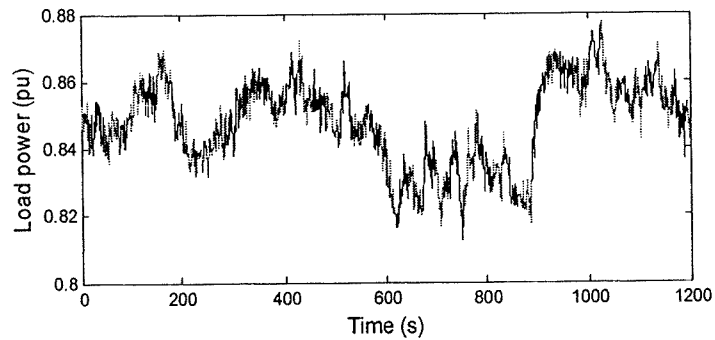
รูปที่ 10 แสดงความเบี่ยงเบนความถี่ในกรณีที่ค่า T_i (ค่าเวลาคงตัวกังหัน) , T_g (ค่าเวลาคงตัวโกเวอร์เนอร์) , D (ค่าคงที่ความหน่วง) และ M (ค่าคงที่ความเฉื่อย) เปลี่ยนแปลงไป -40 % จากค่าปกติ จะเห็นว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปทำให้สมรรถนะการควบคุมความถี่ลดลงในขณะที่ตัวควบคุมที่นำเสนอยังคงควบคุมความถี่ได้อย่างทนทาน ส่วนกำลังไฟฟ้าที่รับเข้าของ HP และ PHEV แสดงดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ เพื่อประเมินความทนทานของตัวควบคุมเพิ่มเติม จะพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนของความถี่ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังสมการ

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (11)$$

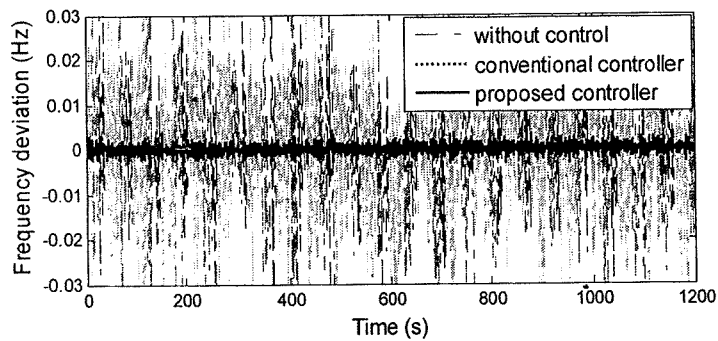
เมื่อ $f(x)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ, σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, x คือค่าที่ทำการสุ่มหาในที่นี้หมายถึง Δf และ μ คือค่าเฉลี่ย รูปที่ 13 และ 14 แสดงฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวควบคุมเปรียบเทียบและที่นำเสนอ ตามลำดับ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ T_i , T_g , D และ M พร้อมกันทั้งหมด เป็น -10%, -20%, -30% และ -40% จากค่าปกติ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในขณะที่ของตัวควบคุมที่นำเสนอ นั้นแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอ นอกจากจะมีสมรรถนะแล้วยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบ



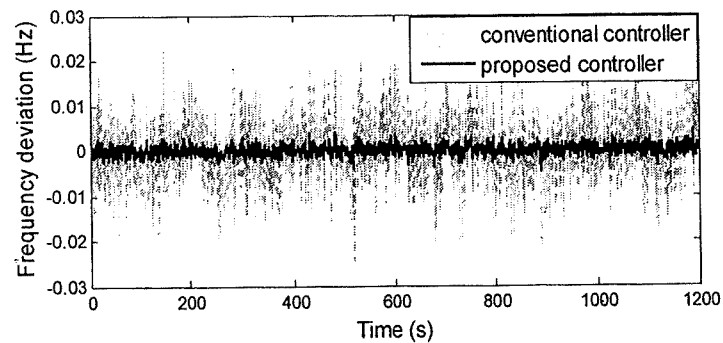
รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากฟาร์มกังหันลม



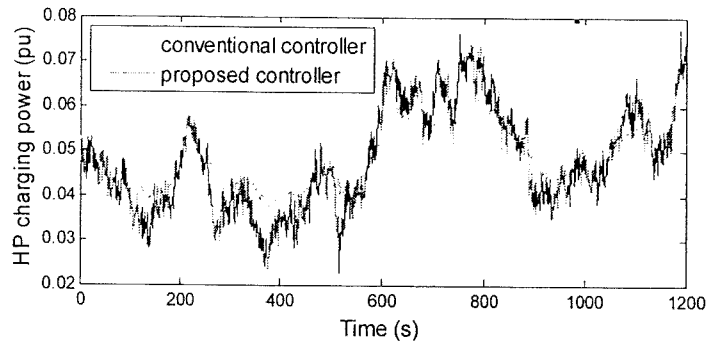
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าของโหลด



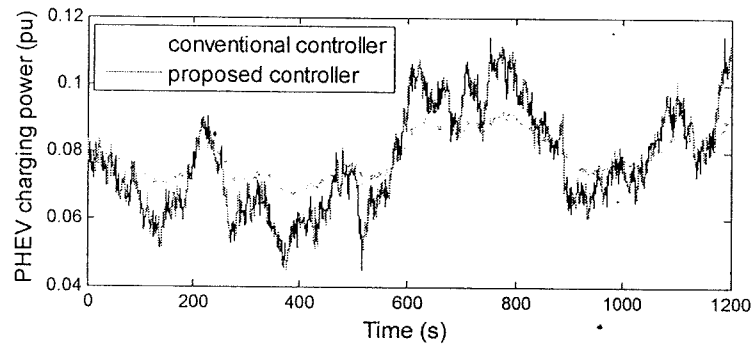
รูปที่ 9 ความเบี่ยงเบนความถี่เมื่อไม่เปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ



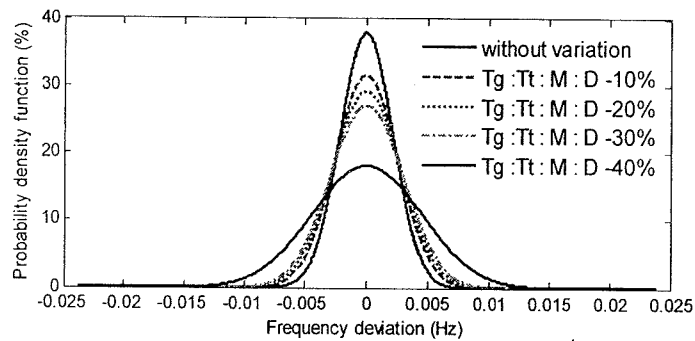
รูปที่ 10 ความเบี่ยงเบนความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ



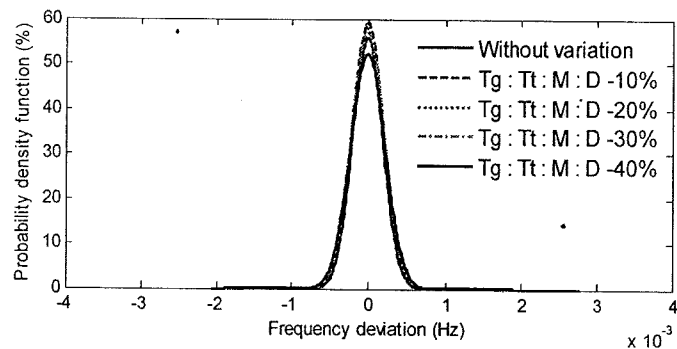
รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าที่รับเข้าของ HP เมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ระบบ



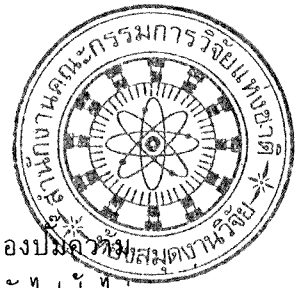
รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าที่รับเข้าของ PHEV เมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ระบบ



รูปที่ 13 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวควบคุมเปรียบเทียบ



รูปที่ 14 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวควบคุมที่นำเสนอ



5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมความถี่อย่างทนทานด้วยการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของปั๊มความร้อนและรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริดในระบบสมาร์ตไมโครกริดซึ่งได้รับผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ผลิตจากฟาร์มกังหันลม ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีไอดีซึ่งปรับค่าให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคโดยใช้หลักการควบคุมผสม H_2/H_∞ เพื่อให้สมรรถนะและทนทานต่อความไม่แน่นอนต่างๆในระบบ ผลการศึกษายืนยันได้ว่าสมรรถนะในการควบคุมความถี่และความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบของตัวควบคุมของ HP และ PHEV ที่นำเสนอั้นสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบสามารถสรุปผลการนำเสนอได้ดังนี้

- วิธีการทำให้เหมาะสมที่นำเสนอเป็นแบบออฟไลน์ สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างอัตโนมัติจึงสะดวกต่อการนำไปใช้งาน
- สามารถนำวิธีที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีโครงสร้างชนิดอื่นๆได้ เช่น ตัวชดเชยแบบเฟสหน้า/ล่าหลัง, พีไอ เป็นต้น
- ตัวควบคุมที่นำเสนอนอกจากจะมีสมรรถนะในการควบคุมสูงแล้วยังมีความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบสูงอีกด้วย
- สามารถนำวิธีออกแบบที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้ออกแบบโหลดอัจฉริยะอื่นๆได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Yokoyama, "Smarter grid I," *IEEEJ Journal*, Vol.30, No.2, 2010.
- [2] A. Yokoyama, "Smarter grid II," *IEEEJ Journal*, Vol.30, No.3, 2010.
- [3] D.W. Gu, *Robust control design with MATLAB*, Springer, 2005.
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. IEEE Inter. Conf. Neural Networks*, pp.1942–48, 1995.
- [5] T. Senjyu, et al., "A frequency control approach by decentralized controllable loads in small power systems," *IEEEJ Trans. Power & Energy*, Vol.129, No.9, pp.1074-80, 2009.
- [6] T. Yanabe, Heat pump, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น 2551