

ภาคผนวก

ผลการศึกษาวิจัยจากโครงการนี้ได้รับการตีพิมพ์ดังนี้

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Chalotorn Rattanapornchai, Issarachai Ngamroo and Sitthidet Vachirasricirikul

"Robust frequency control in the smart microgrid by heat pump and plug-in hybrid electric vehicle"
Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010), 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-146.

การประชุมวิชาการระดับชาติ

ชโลธร รัตนพรชัย, อิศระชัย งามหรุ, ชีรวุฒิ ไชยธรรม และ สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล

"การควบคุมความถี่อย่างทนทานในระบบสมาร์ตไมโครกริดโดยใช้ปั๊มความร้อนและรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด"
งานวิจัยรับเชิญสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON 33) 1 – 3 ธันวาคม 2553 เชียงใหม่

ROBUST FREQUENCY CONTROL IN THE SMART MICROGRID BY HEAT PUMP AND PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Chalotorn Rattanapornchai*, Issarachai Ngamroo**, Sitthidet Vachirasricirikul***

*Department of Electrical Engineering

**Center of Excellence for Innovative Energy Systems

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd. Bangkok, 10520, Thailand

***Department of Electrical Engineering, School of Engineering, Phayao University
Tumbol Maeka Muang Phayao, 56000, Thailand

Email: offering_l@hotmail.com, ngamroo@gmail.com, sitthidetv@hotmail.com

ABSTRACT

This paper proposes a new controller design of heat pumps (HP) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) for robust frequency control in a smart microgrid (MG) system with wind farm. The system frequency can be controlled by the smart power charging of HP and PHEV. The structure of power charge controller is a proportional integral derivative (PID) with single input. System uncertainties are modeled by the multiplicative uncertainty. By taking the robust stability margin into account, the particle swarm optimization (PSO) is applied to optimize the PID controller parameters of HP and PHEV concurrently based on specified-structure mixed H_2/H_∞ control approach. Simulation results confirm the superior robustness and performance of the proposed control.

KEY WORDS

Smart microgrid, heat pump, plug-in hybrid electric vehicle, mixed H_2/H_∞ control, robust control, particle swarm optimization

1. Introduction

Nowadays, the microgrid (MG) system which is a small power system has been paid many attentions to supply power to system load in remote areas which are not connected to main utility grid (UG) because of the limitation of investment costs, right of way difficulties. The MG can be performed autonomously in an islanding mode and also interconnected to the main UG [1]. Generally, the MG system consists of the renewable energy sources such as wind power (WP), photovoltaic (PV), etc. Due to intermittent power generation from WP and PV, the unequal generation and load demand cause the problem of large frequency fluctuation [2,3].

In the load side, there are upward trends to install the effective devices such as heat pumps (HP) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) in the smart grid [4].

This paper presents the charging power control of HP and PHEV installed in residences for robust frequency control in the smart MG system with wind farm. Here, HP and PHEV are cooperated with turbine (TB) and governor (GOV) of diesel generator. However, the dynamic responses of HP and PHEV are much faster than TB and GOV of diesel generator. As a result, the HP and PHEV deal with suppressing the peak value of frequency fluctuation. Also, the TB and GOV of diesel generator are used for eliminating the steady state error of the frequency deviation. The controller structure of HP and PHEV is the PID. To increase the robustness of HP and PHEV controllers, system uncertainty model are represented by the multiplicative uncertainty [5]. However, the robust stability is often not adequate in the control system design. The minimization of tracking error (i.e., H_2 norm) should be taken into account [6,7].

To tackle this problem, the particle swarm optimization (PSO) [8]-based specified-structure mixed H_2/H_∞ control technique is applied to tune simultaneously the PID control parameters of HP and PHEV. Simulation results show the superior robustness and control effect of the proposed HP and PHEV controllers.

2. System Modeling

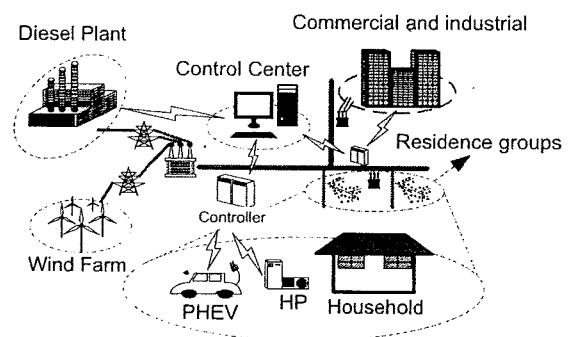


Figure 1. Smart microgrid system

To take the dynamic response into consideration, the HP and PHEV are faster than TB and GOV of diesel generator. Therefore, the operational tasks are assigned according to the response speed as follows. The HP and PHEV are responsible for damping the peak value of frequency deviation rapidly against the abrupt load change. Subsequently the TB and GOV of diesel generator are utilized for eliminating the steady state error of the frequency fluctuation. As a result, the TB and GOV models are neglected in the control design of HP and PHEV. The linearized model of MG system is shown in Fig.2. System parameters are given in [2,3].

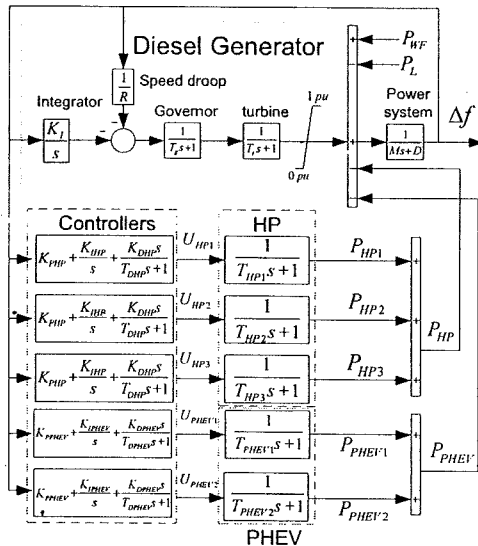


Figure 2. Linearized model of isolated MG system

In Fig.2, the linearized state equations can be expressed as

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta u \quad (1)$$

$$\Delta Y = C\Delta X + D\Delta u \quad (2)$$

$$K_{HP1}(s) = K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s} + \frac{K_{D1}s}{\tau_{d1}s + 1} \quad (3)$$

$$K_{HP2}(s) = K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} + \frac{K_{D2}s}{\tau_{d2}s + 1} \quad (4)$$

$$K_{HP3}(s) = K_{P3} + \frac{K_{I3}}{s} + \frac{K_{D3}s}{\tau_{d3}s + 1} \quad (5)$$

$$K_{PHEV1}(s) = K_{P4} + \frac{K_{I4}}{s} + \frac{K_{D4}s}{\tau_{d4}s + 1} \quad (6)$$

$$K_{PHEV2}(s) = K_{P5} + \frac{K_{I5}}{s} + \frac{K_{D5}s}{\tau_{d5}s + 1} \quad (7)$$

where the state vector $\Delta X = [P_{HP1} \ P_{HP2} \ P_{HP3} \ P_{PHEV1} \ P_{PHEV2} \ \Delta f]^T$. P_{HP1} , P_{HP2} , P_{HP3} , P_{PHEV1} and P_{PHEV2} are the charging power of HP1, HP2, HP3, PHEV1 and PHEV2, respectively. Δf is the change of system frequency. The output vector $\Delta Y = [\Delta f]$, the control output signal $\Delta u = [U_{HP1} \ U_{HP2} \ U_{HP3} \ U_{PHEV1} \ U_{PHEV2}]^T$. U_{HP1} , U_{HP2} , U_{HP3} , U_{PHEV1} and U_{PHEV2} are the charging power control signals of HP1, HP2, HP3, PHEV1 and PHEV2, respectively. $K_{HP1}(s)$, $K_{HP2}(s)$, $K_{HP3}(s)$, $K_{PHEV1}(s)$ and $K_{PHEV2}(s)$ are the proposed PID controllers of HP1, HP2, HP3, PHEV1 and PHEV2, respectively. The system (1) is a multi-input single-output (MISO) system and referred to as the nominal plant G .

3. Proposed Design Method

The proposed design method is represented as follows:

3.1 Specified-structure mixed H_2 / H_∞ control method

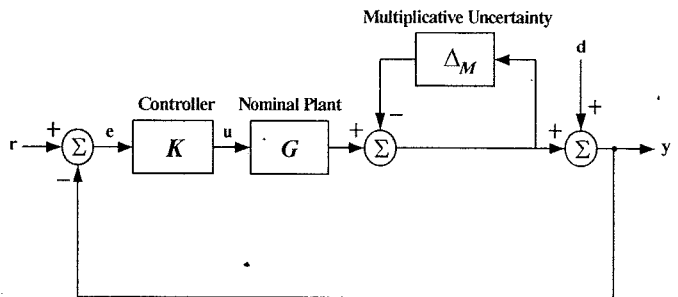


Figure 3. Control system with inverse output multiplicative perturbation and external disturbance

To improve the robustness of HP and PHEV controllers against unstructured system uncertainties, the inverse output multiplicative perturbation [5] is applied to formulate the problem of optimization. The control system with inverse output multiplicative perturbation and external disturbance is shown in Fig.3. In Fig.3, G is the nominal plant. K is the designed controller. $r(t)$ is the reference input. $e(t)$ is the error tracking. $d(t)$ is the external disturbance. $y(t)$ is the output of the system. Δ_M is the system uncertainties such as various generating and loading conditions, system parameters variation etc. which is modeled by multiplicative uncertainty. Based on the small gain theorem, for a stable multiplicative uncertainty, the system is stable if

$$\left\| \Delta_M (I + GK)^{-1} \right\|_{\infty} < 1 \quad (8)$$

then,

$$\|\Delta_M\|_\infty < 1/\|(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad (9)$$

The right hand side of (9) implies the size of system uncertainties or the robust stability margin against system uncertainties. By minimizing $\|(I + GK)^{-1}\|_\infty$, the robust stability margin of the closed-loop system is maximum. This concept can be applied to design robust controller as the cost function J_∞

$$J_\infty = \|(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad (10)$$

However, not only the robust stability, but also small tracking error is very considerable. Accordingly, the problem of minimizing the tracking error can be defined by the integral of the squared error (ISE) as the cost function J_2 [6,7]

$$J_2 = \int_0^\infty e^T(t) e(t) dt = \|E(s)\|_2^2 \quad (11)$$

where $e(t) = r(t) - y(t)$ is the error which can be obtained from the inverse laplace transformation of $E(s)$ with $\Delta_M = 0$ and $d(t) = 0$ as

$$E(s) = (I + GK)^{-1} R(s) \quad (12)$$

Hence, the objective function is

$$\text{Minimize } J_2 + J_\infty \quad (13)$$

Subject to

$$\begin{aligned} K_{P1-5, \min} &< K_{P1-5} < K_{P1-5, \max} \\ K_{I1-5, \min} &< K_{I1-5} < K_{I1-5, \max} \\ K_{D1-5, \min} &< K_{D1-5} < K_{D1-5, \max} \\ \tau_{d1-5, \min} &< \tau_{d1-5} < \tau_{d1-5, \max} \end{aligned} \quad (14)$$

where $K_{P1-5, \min}$, $K_{I1-5, \min}$, $K_{D1-5, \min}$ and $\tau_{d1-5, \min}$ are the minimum PID gains of HP1, HP2, HP3, PHEV1 and PHEV2, respectively. $K_{P1-5, \max}$, $K_{I1-5, \max}$, $K_{D1-5, \max}$ and $\tau_{d1-5, \max}$ are the maximum PID gains of HP1, HP2, HP3, PHEV1 and PHEV2, respectively.

3.2 PSO algorithm

The PSO algorithm [8] is explained as follows:

1. Specify the parameters of PSO. Initialize a population of the particles with random positions and velocities.
2. Evaluate the objective function in (13) for each particle.
3. Compare the fitness value of each particle with it's the best position for particle (*pbest*). The best fitness value

among all the *pbests* is the best position of all particles in the group (*gbest*).

4. Update the velocity v_i and position of particle x_i by

$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (pbest - x_i) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (gbest - x_i) \quad (15)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (16)$$

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \text{iter} \quad (17)$$

where c_1 and c_2 are the cognitive and social acceleration factors, respectively. rand_1 and rand_2 are the random numbers of range (0,1). w is the inertia weight-factor. $w_{\min}$ and $w_{\max}$ are the minimum and maximum of inertia weight factors, respectively. iter and $\text{iter}_{\max}$ are the iteration count and maximum iteration, respectively.

5. When the maximum number of iterations is arrived, stop the process. Otherwise go to process 2.

4. Simulation Results

In optimization problem, the searching parameters and parameters of PSO are set as follows:

$K_{P1-5} \in [0.0001 \ 5]$, $K_{I1-5} \in [0.0001 \ 5]$, $K_{D1-5} \in [0.0001 \ 5]$, $\tau_{d1-5} \in [0.0001 \ 0.02]$, PSO sizes = 50, maximum iterations = 100, $c_1 = 2$, $c_2 = 2$, $w_{\min} = 0.4$ and $w_{\max} = 0.9$.

Based on (12), select $R(s) = 1/(s+5)$ instead of step as reference input to avoid the infinite value of H_2 norm. By minimizing (13), the objective function value is 1.6498. Consequently, the proposed HP and PHEV controllers (PHP & PPHEV) are

$$\begin{aligned} K_{HP1}(s) &= 2.5772 + \frac{2.8339}{s} + \frac{0.0569s}{0.0075s + 1} \\ K_{HP2}(s) &= 3.8772 + \frac{1.1017}{s} + \frac{0.0774s}{0.0088s + 1} \\ K_{HP3}(s) &= 2.7380 + \frac{2.3349}{s} + \frac{0.0353s}{0.0050s + 1} \\ K_{PHEV1}(s) &= 3.7467 + \frac{2.5655}{s} + \frac{0.0951s}{0.0093s + 1} \\ K_{PHEV2}(s) &= 3.1321 + \frac{3.6015}{s} + \frac{0.0955s}{0.0089s + 1} \end{aligned} \quad (18)$$

To test simulation, the PHP & PPHEV is compared with the HP & PHEV controllers called as "CHP & CPHEV". The CHP & CPHEV is designed by minimizing the integral absolute error (IAE) of frequency deviation as

$$\text{Minimize } \int_0^\infty |\Delta f(t)| dt \quad (19)$$

Subject to

$$\begin{aligned}
 K_{p1-5,min} &< K_{p1-5} < K_{p1-5,max} \\
 K_{I1-5,min} &< K_{I1-5} < K_{I1-5,max} \\
 K_{D1-5,min} &< K_{D1-5} < K_{D1-5,max} \\
 \tau_{d1-5,min} &< \tau_{d1-5} < \tau_{d1-5,max}
 \end{aligned} \quad (20)$$

where Δf_s is the system frequency change. The PID controller parameters of CHP & CPHEV are tuned concurrently by PSO.

In normal operation, it is assumed that the isolated MG system is performed under the WP output and random load change as in Figs.4-5, respectively. Frequency deviation, HP charging power and PHEV charging power are demonstrated in Figs.6-8, respectively.

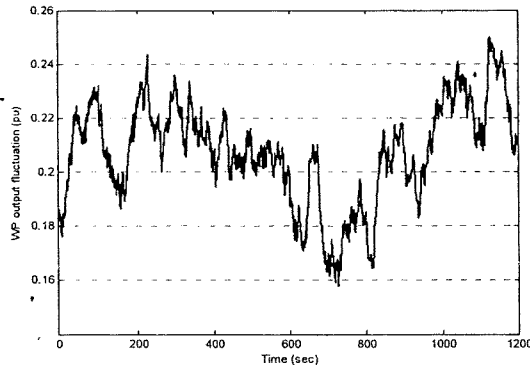


Figure 4. WP output fluctuation

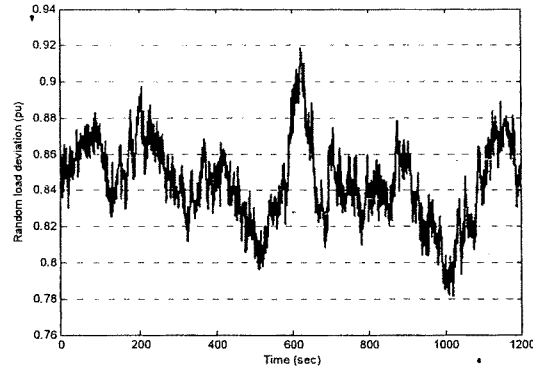


Figure 5. Random load deviation

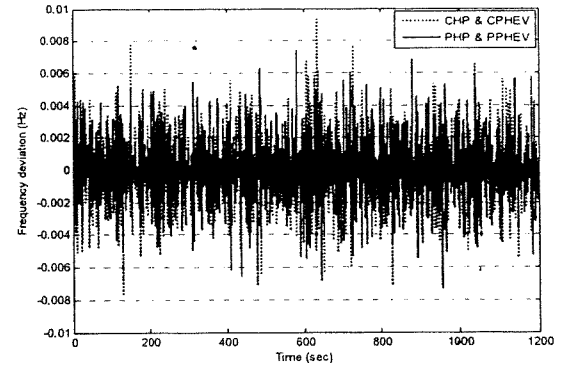


Figure 6. Frequency deviation

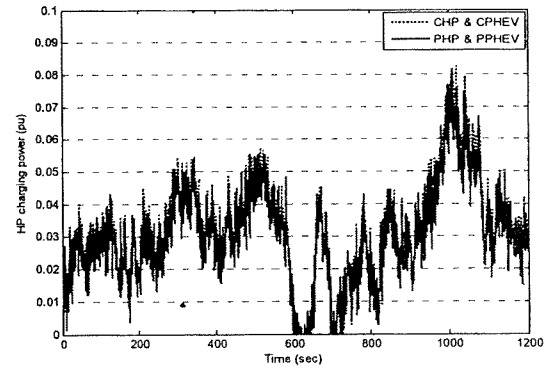


Figure 7. HP charging power

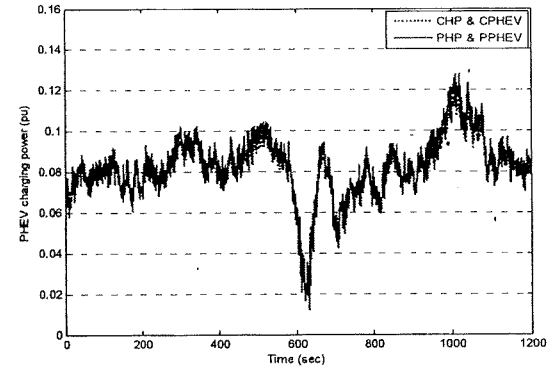


Figure 8. PHEV charging power

From Fig.6, CHP & CPHEV provides less damping effect than PHP & PPHEV. This shows that the charging power control effect is enhanced effectively by PHP & PPHEV. In Fig.7, the HP charging power of CHP & CPHEV is more than that of PHP & PPHEV. This indicates that the HP power consumption of PHP & PPHEV is lower than CHP & CPHEV. With Fig.8, the PHEV charging power in the case of PHP & PPHEV is higher than CHP & CPHEV. This implies that the PHEV power is highly charged by the proposed controller.

Next, to investigate the robustness of PHP & PPHEV against the system parameters variation, the IAE of frequency deviation (Δf) under the WP output and random load deviation in Figs. 4-5 are determined as

$$\text{IAE of } \Delta f = \int_0^{1200} |\Delta f| dt \quad (21)$$

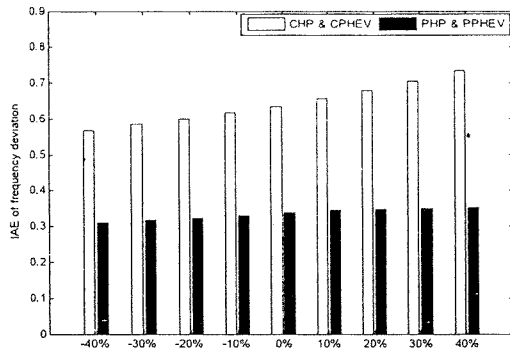


Figure 9. IAE of frequency deviation

Figure 9 shows the IAE values of frequency deviation while all system parameters are changed from -40% to +40% of the normal values. In Fig.10, the IAE values of CHP & CPHEV largely increase when system parameters increase. On the other hand, the changes of IAE values in case of PHP & PPHEV are lower than CHP & CPHEV. This exhibits that PHP & PPHEV is very robust to the variation of system parameters.

Next, in case of system parameters change, it is supposed that the WP output and random load deviation as illustrated in Figs.10-11 are subjected to the studied MG system. During the simulation, it is assumed that time constants of GOV (T_g) and diesel generator (T_d) are increased by 40% from the normal values, the HP1 controller (K_{HP1}) and the PHEV2 controller (K_{PHEV2}) are disconnected unexpectedly at $t = 0$ s. This implies that the capacities of HP and PHEV installed in the isolated MG are reduced. Simulation result of the frequency deviation is shown in Fig.12.

From Fig.12, the damping effect of CHP & CPHEV is deteriorated. On the contrary, PHP & PPHEV is able to suppress the frequency oscillation efficiently. This result confirms the superior robustness and frequency control effect of PHP & PPHEV over CHP & CPHEV.

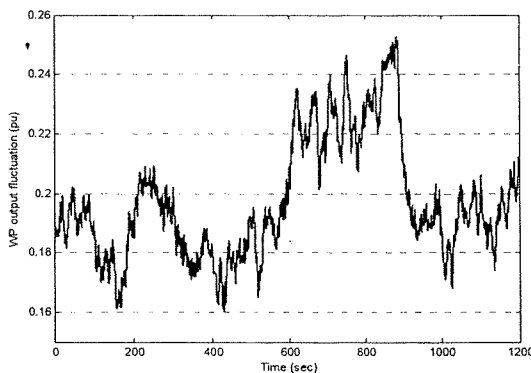


Figure 10. WP output fluctuation (changed system parameters)

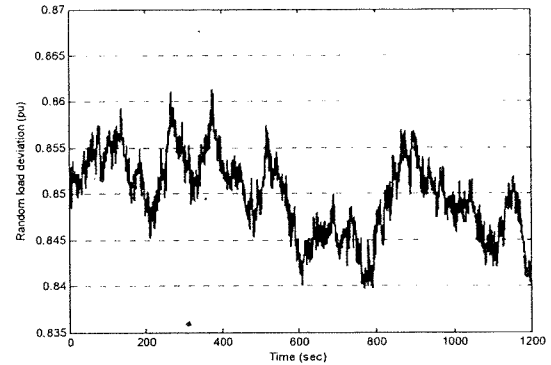


Figure 11. Random load deviation (changed system parameters)

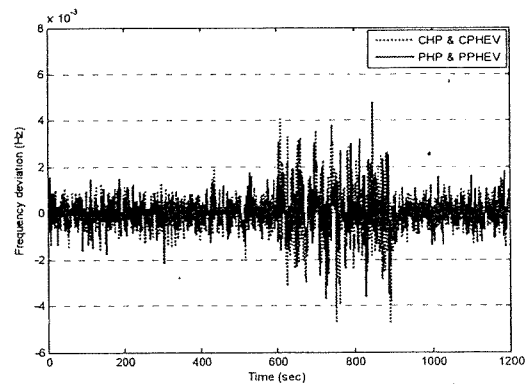


Figure 12. Frequency deviation (changed system parameters)

5. Conclusion

The new robust controller design for frequency control by HP and PHEV in the smart MG system with wind farm has been presented. The multiplicative uncertainty is applied to model the unstructured system uncertainties. The PSO-based specified-structure mixed H_2/H_∞ control method is utilized to simultaneously adjust the PID controller parameters of HP and PHEV. The proposed designed PID controllers are very robust against the variation of system parameters. Simulation results confirm the superior robustness and frequency control effect of the proposed HP and PHEV controllers.

References

- [1] B. Kroposki, et al., "Making Microgrids Work," IEEE Power and Energy Magazine, Vol.6, Issue.3, pp.40-53, 2008.
- [2] T. Senjyu, M. Tokudome, A. Yona and T. Funabashi, "A Frequency Control Approach by Decentralized Controllable Loads in Small Power Systems," IEEE Trans Power Energy, pp.1074-1080, 2009.

- [3] T.Senjyu, et al., "A Frequency Control Approach by Decentralized Generators and Loads in Power Systems," IEEE International Conference on Power and Energy, pp.79-84, 2008.
- [4] A. Yokoyama, "Smarter Grid II," IEEJ Journal, Vol.30, No. 3, pp.163-167, 2010.
- [5] D-W. Gu, P.H. Petkov and M.M. Konstantinov, Robust Control Design with MATLAB, Springer, 2005.
- [6] S-J. Ho, et al., "Designing Structure-Specified Mixed H_2/H_∞ Optimal Controllers using an Intelligent Genetic Algorithm IGA," IEEE Transactions on Control System Technology, Vol.13, No.6, pp.1119-1124, 2005.
- [7] B.T. Thanh and M. Parnichkun, "Balancing Control of Bicyrobo by Particle Swarm Optimization-Based Structure-Specified Mixed H_2/H_∞ Control," International Journal of Advanced Robotic Systems, pp.395-402, 2008.
- [8] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Vol.1, pp.1942-1948, 1995.

การควบคุมความถี่อย่างทนทานในระบบสมาร์ตไมโครกริดโดยใช้ปั๊มความร้อนและรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด

Robust Frequency Control in the Smart Microgrid by Heat Pump and Plug-in Hybrid Electric Vehicle

ชโลธร รัตนพรชัย¹ อิศระชัย งามหิรัญ² ชีรวิทย์ ไชยธรรม³ และ สติติเดช ขวาศรีศิริกุล⁴

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา 56000, E-mail: offering_l@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมความถี่อย่างทนทานด้วยปั๊มความร้อน (Heat pump : HP) และรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in hybrid electric vehicle : PHEV) ในระบบสมาร์ตไมโครกริดซึ่งได้รับผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่สร้างจากฟาร์มกังหันลม การควบคุมความถี่ทำได้โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพื่อควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของกลุ่ม HP และ PHEV ซึ่งติดตั้งในด้านของผู้ใช้ไฟฟ้า ในการหาค่าตัวควบคุมพีไอดีนั้นจะตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมโดยใช้หลักการควบคุมผสม H_2/H_∞ เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ได้มีสมรรถนะและความทนทานสูงต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบ แล้วจึงใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อค้นหาค่าพีไอดีที่เหมาะสม ผลการจำลองคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ HP และ PHEV ที่นำเสนอนั้นมีสมรรถนะในการควบคุมและความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบ คำสำคัญ : สมาร์ตไมโครกริด, ปั๊มความร้อน, รถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด, การควบคุมโหลด-ความถี่, การควบคุมผสม H_2/H_∞ , วิธีกลุ่มอนุภาค

Abstract

This paper presents a robust frequency control by heat pumps (HP) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) in a smart microgrid with wind farm. The intermittent power generation from wind farm causes frequency fluctuations in the microgrid. To alleviate frequency fluctuations, the power charge control of HP and PHEV can be applied. The proportional-integral-derivative (PID) structure is selected as the power charge controller of HP and PHEV. The PID parameters optimization problem is formulated based on a mixed H_2/H_∞ control. The particle swarm optimization (PSO) is used to solve for PID parameters. Simulation results confirm that the proposed HP and PHEV controller is much superior to the conventional controller in terms of control performance and robustness against system parameters variation.

Keywords : Smart microgrid, Heat pump, Plug-in hybrid electric vehicle, Load-frequency control, Mixed H_2/H_∞ control, Particle swarm optimization

1. บทนำ

ปัจจุบัน ระบบไมโครกริดได้รับความสนใจอย่างสูงในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลดในสถานที่ซึ่งไม่สามารถต่อเข้าถึงระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้ โดยทั่วไประบบไมโครกริดประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่นลมและแสงอาทิตย์ เป็นต้น เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานลมและแสงอาทิตย์นั้นไม่สม่ำเสมอจึงทำให้เกิดการแกว่งของความถี่ขึ้นในระบบได้ [1]

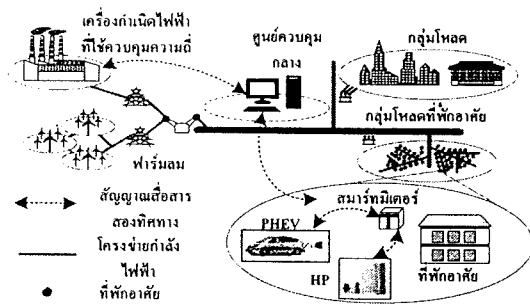
ส่วนในด้านผู้ใช้ไฟฟ้านั้น มีแนวโน้มสูงในอนาคตที่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ประหยัดพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเช่น ปั๊มความร้อน (HP) และรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) เพิ่มมากขึ้น อุปกรณ์เหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังอัจฉริยะหรือสมาร์ตกริด [2] เนื่องจาก HP และ PHEV มีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบ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

2. ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

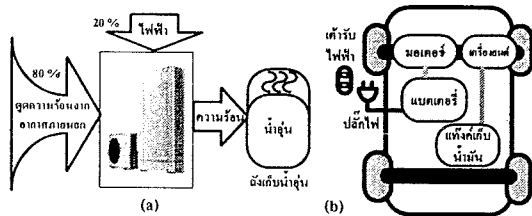
รูปที่ 1 แสดงระบบไมโครกริดอิสระ [5] ที่ใช้ศึกษาซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมความถี่ได้ (Load frequency control, LFC) ขนาด 20 MW, ฟาร์มกังหันลม 6 MW, กลุ่มโหลด 17 MW ในกลุ่มบ้านพักอาศัยมีการติดตั้ง HP มีพิกัดกำลังตัวเลข 4.4 kW





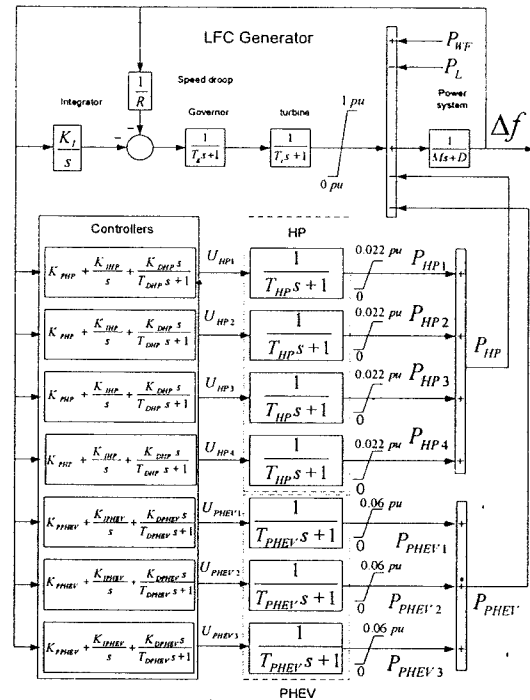
รูปที่ 1 ระบบสมาร์ทไมโครกริด

ทั้งหมด 400 ตัวคิดเป็น 1.76 MW และ PHEV มีพิกัดกำลังต่อละ 5 kW ทั้งหมด 720 ตัวคิดเป็น 3.6 MW รวมพิกัดกำลังของ HP และ PHEV ทั้งหมดเป็น 5.36 MW เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งสร้างจากฟาร์มกังหันลมและการเปลี่ยนแปลงโหลดทำให้เกิดการแกว่งของความถี่ในระบบ เพื่อลดการแกว่งของความถี่ ศูนย์ควบคุมกลางทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าผ่านมิเตอร์อัจฉริยะหรือสมาร์ทมิเตอร์ แล้วส่งต่อไปยัง HP และ PHEV ในเวลาเดียวกันศูนย์ควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมไปที่ตัวควบคุมความถี่ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อปรับกำลังไฟฟ้าให้ออกให้เหมาะสมด้วย



รูปที่ 2 (a) ป้อนความร้อน (b) รถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด

รูปที่ 2 (a) แสดงหลักการของ HP [6] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดึงความร้อนจากที่อุณหภูมิต่ำไปที่อุณหภูมิสูง สามารถนำมาใช้เพื่อทำความร้อนหรือทำน้ำอุ่นได้ HP จึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถดึงพลังงานความร้อนที่อยู่ในอากาศรอบตัวเราเป็นเสมือนเชื้อเพลิงมาใช้สร้างความร้อนโดยไม่ต้องสร้างความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยตรง ดังนั้น นอกจาก HP จะเป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงานแล้วยังช่วยลดสถานะโลกร้อนอีกด้วย หลักการทำงานของ HP สำหรับเครื่องทำน้ำอุ่นคือ HP จะดูดความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา 80 % และใช้ไฟฟ้า 20 % สำหรับระบบคอมเพรสเซอร์ภายในเพื่ออัดอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ได้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงออกมาใช้สำหรับทำน้ำอุ่นซึ่งเก็บอยู่ในถัง โดยทั่วไปการใช้ไฟฟ้าของ HP นั้นจะคงที่ที่ กำลังไฟฟ้าพิกัด สำหรับในงานวิจัยนี้ ถ้าสมมติว่าน้ำอุ่นที่เก็บสำรองอยู่ในถังเก็บนั้นมีปริมาณเพียงพอกับการใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่รับเข้ามาเพื่อใช้สำหรับทำน้ำอุ่นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของกลุ่มโหลด HP อย่าง



รูปที่ 3 แบบจำลองเชิงเส้นระบบไมโครกริดซึ่งติดตั้ง HP และ PHEV

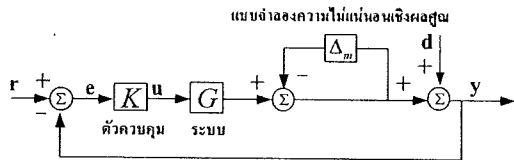
เหมาะสมทำให้ส่งผลไปควบคุมความถี่ของระบบได้ รูปที่ 2(b) แสดงโครงสร้างของ PHEV ซึ่งสามารถชาร์จกำลังไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ได้ด้วยการต่อปลั๊กไฟเข้าเต้ารับไฟฟ้า แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเมื่อพิจารณาถึงกลุ่มของ PHEV จำนวนมากซึ่งติดตั้งอยู่ในด้านผู้ใช้ไฟหรือที่จอดรถอัจฉริยะ (Smart park) โดยการควบคุมการชาร์จกำลังไฟฟ้าที่เข้าแบตเตอรี่ของ PHEV ทุกคันอย่างเหมาะสม ทำให้สามารถใช้ PHEV ไปช่วยควบคุมความถี่ของระบบได้

รูปที่ 3 แสดงระบบไมโครกริดสำหรับการควบคุมความถี่ซึ่งติดตั้ง HP 4 ชุดละ 100 ตัวและ PHEV 3 ชุดละ 240 ตัว โดยแทนแบบจำลอง HP และ PHEV ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าเวลาคงตัว $T_{HP} = T_{PHEV} = 0.2$ s ในที่นี้กำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ HP และ PHEV เป็นแบบพีไอดี ให้ HP และ PHEV ทำงานร่วมกันระบบกันหัน (Turbine, TB) และไกวเวอร์เนอร์ (Governor, GOV) ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจาก HP และ PHEV มีค่าเวลาคงตัวน้อยกว่าค่าเวลาคงตัวของ TB มาก ($T_i = 2$ s) จึงไม่คิดผลของ TB และ GOV ในการออกแบบตัวควบคุม HP และ PHEV แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบคือให้ HP และ PHEV ทำหน้าที่ลดความถี่ในสภาวะชั่วคราวหลังจากนั้นจึงให้ TB และ GOV กำจัดค่าผิดพลาดความถี่ในสภาวะคงตัว จากรูปที่ 3 สามารถหาสมการสถานะ (State equation) ของระบบที่ไม่มีผล TB และ GOV เพื่อนำมาออกแบบค่า K_{PHP} , K_{HP} , K_{DHP} และ T_{DHP} สำหรับ HP และ K_{PPHEV} , K_{IPHEV} , K_{DPHEV} และ T_{DPHEV} สำหรับ PHEV ตามลำดับ

3. การปรับค่าพีโอดีที่เหมาะสมด้วยการควบคุมผสม H_2/H_∞

จุดประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีคือ

1. ให้ตัวควบคุมมีความทนทานสูงต่อความไม่แน่นอนของระบบ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ
2. ให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะสูงในการลดความเบี่ยงเบนความถี่ Δf เพื่อให้บรรลุได้ทั้งสองจุดประสงค์ สามารถตั้งปัญหาการปรับค่าพีโอดีให้เหมาะสมด้วยหลักการควบคุมผสม H_2/H_∞ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้



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 $\|\cdot\|_\infty$ แทนค่าอนอร์มอินฟินิตี้ (Infinite norm) ของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นเมื่อทำให้ค่าอนอร์มอินฟินิตี้ J_1 มีค่าต่ำสุดก็จะทำให้ระบบมีส่วนเผื่อเสถียรภาพทนทาน (Robust stability margin) ต่อความไม่แน่นอนในระบบได้สูงสุด

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

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

ในที่นี้จะพิจารณาขนาดของ $E(s)$ จาก

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

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

เพื่อให้ตัวควบคุมมีความทนทานและสมรรถนะสูงจึงตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมได้ดังนี้

$$\text{Minimize } J_1 + J_2 \quad (4)$$

$$\text{Subject to } 0.0001 \leq K_p, K_I, K_D \leq 5$$

$$0.0001 \leq T_D \leq 1$$

ส่วนตัวควบคุมเปรียบเทียบกับนั้นจะทำการปรับค่าพีโอดีโดยการทำให้ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เชิงอินทิกรัล (Integral absolute error, IAE)

ของ Δf มีค่าที่ต่ำสุด ดังนั้นจึงตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

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

โดยมีเงื่อนไขเช่นเดียวกันกับสมการที่ (4) ในบทความนี้ทำการใช้ PSO [4] เพื่อแก้ปัญหาสมการที่ (4) และ (5) ให้ได้ค่าพีโอดีที่เหมาะสมที่สุด

4. ผลการทดสอบตัวควบคุม

ผลการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอแสดงได้ดังนี้

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

$$K_{PHEV}(s) = 1.8979 + \frac{1.5139}{s} + \frac{0.8971s}{0.0462s + 1} \quad (6)$$

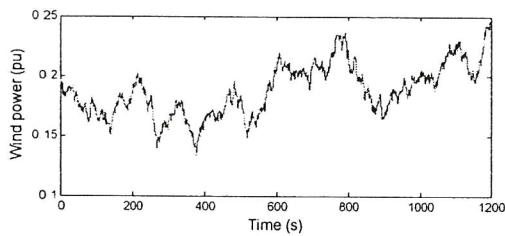
ในที่นี้จะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมที่นำเสนอและตัวควบคุมที่ปรับค่าด้วยสมการ (5) รูปที่ 5 และ 6 แสดงกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่สร้างจากฟาร์มกังหันลมและการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลด ตามลำดับ ผลการจำลองเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบแสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าเมื่อไม่มี HP และ PHEV จะเกิดการแกว่งของแรงดันอย่างรุนแรงในทางตรงข้าม ตัวควบคุมของ HP และ PHEV ที่นำเสนอและเปรียบเทียบกับนั้นมีสมรรถนะในการลดค่าความเบี่ยงเบนความถี่ได้ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 8 แสดงความเบี่ยงเบนความถี่ในกรณีที่มีค่า T_g (ค่าเวลาคงตัวกังหัน), T_g (ค่าเวลาคงตัวไจเวอร์เนอร์), D (ค่าคงที่ความหน่วง) และ M (ค่าคงที่ความเฉื่อย) เปลี่ยนแปลงไป -40% จากค่าปกติ จะเห็นว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบกับได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปทำให้สมรรถนะการควบคุมความถี่ลดลงในขณะที่ตัวควบคุมที่นำเสนอยังคงควบคุมความถี่ได้อย่างทนทาน ส่วนกำลังไฟฟ้าที่รับเข้าของ HP และ PHEV แสดงดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ เพื่อประเมินความทนทานของตัวควบคุมเพิ่มเติม จะพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนของความถี่ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังสมการ

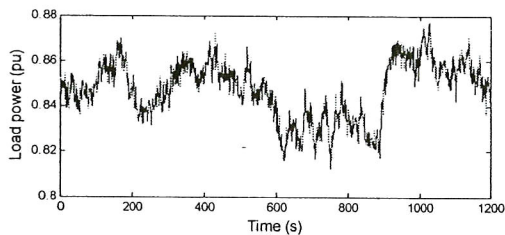
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (7)$$

เมื่อ $f(x)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ, σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, x คือค่าที่ทำการสุ่มหาในที่นี้หมายถึง Δf และ μ คือค่าเฉลี่ย รูปที่ 11 และ 12 แสดงฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวควบคุมเปรียบเทียบกับที่นำเสนอ ตามลำดับ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ T_g , T_g , D และ M พร้อมกันทั้งหมดเป็น -10%, -20%, -30% และ -40% จากค่าปกติ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบกับมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในขณะที่ของตัวควบคุมที่นำเสนอนั้นแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอนอกจากจะมีสมรรถนะแล้วยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบกับมาก

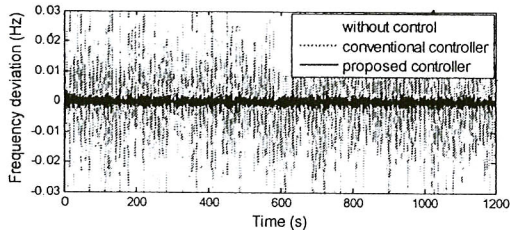




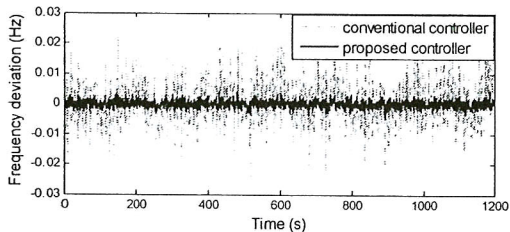
รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากฟาร์มกังหันลม



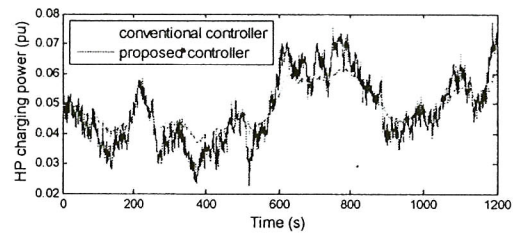
รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าของโหลด



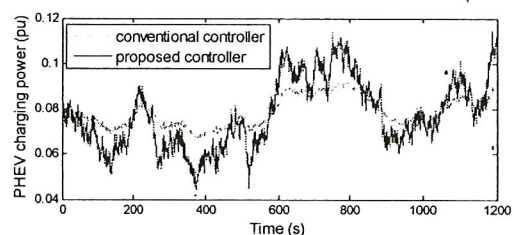
รูปที่ 7 ความเบี่ยงเบนความถี่เมื่อไม่เปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ



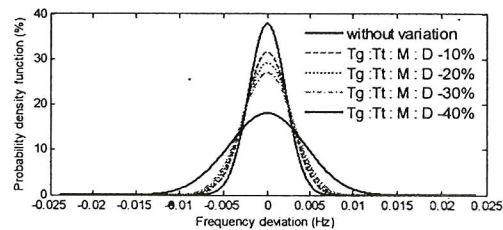
รูปที่ 8 ความเบี่ยงเบนความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ



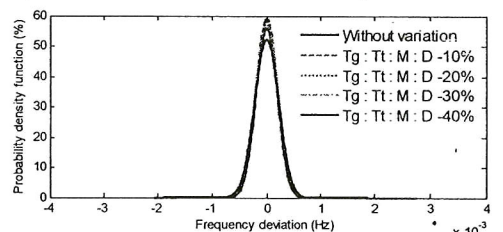
รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่รับเข้าของ HP เมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ระบบ



รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าที่รับเข้าของ PHEV เมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ระบบ



รูปที่ 11 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวควบคุมเปรียบเทียบ



รูปที่ 12 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวควบคุมที่นำเสนอ

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการควบคุมความถี่อย่างทนทานด้วยการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของปั๊มความร้อนและรถไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริดในระบบสมาร์ตไมโครกริดซึ่งได้รับผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ผลิตจากฟาร์มกังหันลม ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบฟัซซี่ซึ่งปรับค่าให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคโดยใช้หลักการควบคุมผสม H_2/H_∞ เพื่อทำให้สมรรถนะและทนทานต่อความไม่แน่นอนต่างๆในระบบ ผลการศึกษายืนยันได้ว่าสมรรถนะในการควบคุมความถี่และความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบของตัวควบคุมของ HP และ PHEV ที่นำเสนอขึ้นสูงกว่าตัวควบคุมเปรียบเทียบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Yokoyama, "Smarter grid I," *IEEE Journal*, Vol.30, No.2, 2010.
- [2] A. Yokoyama, "Smarter grid II," *IEEE 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," *IEEE Trans. Power & Energy*, Vol.129, No.9, pp.1074-80, 2009.
- [6] T. Yanabe, Heat pump, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น 2551.



