Original Paper

Evaluation of Micro Grid including Power Storage Device

Takao SHINJI*¹, Tetsuo YAMAKAMI*¹, Akito MORIYAMA*¹, Atushi AKISAWA*¹,
Takao KASHIWAGI*², Goro FUJITA*³, and Masayoshi MATSUBARA*³

(Received January 7, 2008)

電力貯蔵設備を含んだマイクログリッドの評価

進士誉夫*¹, 山上哲雄*¹, 森山顕仁*¹, 秋澤 淳*¹, 柏木孝夫*², 藤田吾郎*³, 松原正芳*³

Renewable energies such as wind power or photovoltaic energy are getting attentions for view points of energy conservation and environmental issue. However, fluctuation of output power of renewable energies may cause excess variation of voltage or frequency of the grid. Increase of the amount of renewable energies would violate the quality of the grid. The micro grid in which dispersed energies compensate the variation from the renewable energies can expand the installation limit of the renewable energies by maintaining the quality of the interconnected grid.

In this paper, evaluation of ratio of gas turbines, gas turbines and batteries is discussed from the point of power flow stability of the grid, efficiency and economy. Gas turbines have quicker response and lower efficiency, whereas gas engines have slower response and higher efficiency. Best ratio is discussed for higher efficiency while fluctuation of output power of the micro grid is kept in a small amount. Additionally, introducing batteries is discussed to introduce more gas engines he point of power flow stability of the grid, efficiency and economy.

Key Words

Dispersed power source, Micro grid, Renewable energy, Wind power, Power flow fluctuation,
Power storage device

1. はじめに

温室効果ガスによる地球温暖化を回避するために京都議定書目標達成計画をはじめ国家レベルでの取り組みが行われている。風力発電、バイオマス発電、太陽光発電に代表される再生可能エネルギーは環境性には優れているものの、電力系統に与える影響が無視できず、導入に制限がかかる場合がある。その導入枠拡大の方策のひとつとして近年マイクログリッドが注目されている。

配電系統における分散電源の普及にあたっては、電力流通設備を含めた形成のあり方から、電源構成、周波数や電圧といった電力品質の確保の問題まで、多くの課題が掲げられている。とりわけ、電力品質の確保は分散電源普及のポイントであり、これまで多くの研究が行われてきている。例えば、分

散電源普及時には逆潮流の発生や不平衡運転、そして調相運転の考え方について考察をする必要があり、電圧変動という電力品質についての検証が不可欠である^{1)~6)}。また、この配電系統が、マイクログリッドのように閉じられた形態となった場合、系統連系の有無に応じた需給バランスの調整も大きな課題となる。具体的には、この配電系統が大規模な電力系統に隣接している場合、系統連系が可能であり、交流連系であれば周波数の維持は大規模電力系統が責務を負うことから、連系線の潮流制御を行うことで配電系統内の需給制御を達成できる。潮流制御の一方、離島のように単独系統の場合には、配電系統の需給バランス維持は自らの責務によるほかなく、需給アンバランスは周波数変動に直接影響を及ぼす。このほか、連系運転から単独運転への移行時や、その逆の過渡状態

* 1 Tokyo University of Agriculture & Technology
2-24-16 Nakamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan
* 2 Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan
* 3 Shibaura Institute of Technology
3-7-5, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548, Japan

* 1 東京農工大学大学院生物システム応用科学府
〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16
* 2 東京工業大学統合研究院大学院理工学研究科
〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1
* 3 芝浦工業大学工学部電気情報系電気工学科
〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5

についても、検討の余地がある⁷⁾。2005年には愛知万博において、新エネルギー等地域集中実証研究プロジェクトが実施され、複数分散電源による電力供給が実施された。本実証試験の焦点の1つも、異なる運転特性を持つ分散型電源を組み合わせることでどのように需給バランスを維持するかであり、太陽光発電は出力変動が激しいことから、NaS電池を用いて需給調整が行われた⁸⁾。

このように電力貯蔵設備を併用することは、分散電源の普及促進に大きく貢献するが、その必要容量や制御特性については、今後の課題となっている。そして、デバイスの組み合わせにより、マイクログリッドの最適な電源構成のあり方を考察する必要がある。

このような研究背景に鑑み、筆者らは配電システムの需給制御モデルを構築し、マイクログリッドにおける好ましい需給制御のあり方について検討を行ってきた⁹⁾。具体的には可変出力であるガスタービン発電機、不規則な出力の風力発電機、固定出力の燃料電池から構成される小規模システムを構築し、ガスタービン発電機の運転効率低下ならびに風力発電機の導入限界についての定量的考察を行った。

この研究により、風力発電による電気出力の変動をマイクログリッド内に設置されたガスタービンの出力を変動させることにより、マイクログリッドから系統に及ぼす出力変動(本論文では連系線潮流の標準偏差 P_{tie} をマイクログリッドの系統に与える影響のひとつの指標としている)を抑制することができることが判明した。しかしながら、マイクログリッドから系統に及ぼす出力変動を抑制する装置としてはガスタービンよりも制御応答性は悪いが発電効率の高いガスエンジンや省エネルギー効果はないものの制御応答性の高速な蓄電池が考えられる。

そこで本報告では、必要とされる設備容量および運用手法について考察を行ない、電力貯蔵設備の有用性について検証を行った。

2. モデルの概要と前提条件

2.1 マイクログリッド

マイクログリッドとはFig. 1に示すようなシステムであり、ある系統に風力発電、ガスタービン、燃料電池などの発電設備を組み合わせ、系統と一点で連系しているシステムを示す。

今回の考察に用いたモデルはFig. 2に示すモデル^{10)~15)}であり、風力発電(WF)の変動と負荷の変動によって生ずる連系線潮流の変動をガスタービン(以下GT)、ガスエンジン(GE)、蓄電池(BT)に対して連系線潮流の設定値に対する偏差をフィードバックし、連系線潮流の設定値からの偏差を少なくするように各発電設備、BTの容量に応じて発電出力を制御している。今回の考察に用いたモデルはFig. 2に示すモデル^{10)~15)}であり、風力発電(WF)の変動と負荷の変動によって連系線潮流に変動が発生する。これをガスタービン(以下GT)、ガスエンジン(GE)、蓄電池(BT)の出力を制御することにより抑制している。なお、連系線潮流は、設定値に対する偏差をゼロと目標にすることも可能であるが、ここでは設

Fig. 1 Concept of micro grid

Fig. 2 Micro grid block diagram

定値をゼロとしているため、連系線潮流変動そのものを抑制することが目標となる。

本稿で用いる標準的な構成をTable 1に示す。風力発電(WF)はここでは平均出力を導入量として位置づけている。また燃料電池(FC)は固定出力である。詳しくは文献9)を参照されたい。

GEは発電効率がよいが、負荷追従速度がGTと比較して低い。またBTはGTよりも応答速度が速いのが特徴である。これにより、4000[s]のシミュレーションを行った結果の一例がFig. 3である(GT51MW, GE49MW, FC10MW, WF16MW)。

省エネルギー性の観点からはGEをできるだけ多く使用したいが、系統に対する影響を抑えるには一部GTを使用しなければならない。このような条件の下、省エネルギー性、経済性の観点から最適な電源構成を考察した。

Table 1 Standard configuration of micro grid

Generators	Capacity	Load following speed	Comments
GT	100MW	8.3%/min.	Output range 50 ~ 100%
GE		4.15%/min.	
BT	0MW ~	6.7%/s	Capacity varies
WF	0MW ~	-	Capacity varies
FC	10MW	-	Constant

Fig. 3 Sample of simulation output

Table 2 Efficiency of generators (%)

Efficiency index	GT	GE	FC
Electric output	25	35	40
Thermal recovery	40	30	40
Overall efficiency	65	65	80
Overall efficiency in PURPA ¹⁶⁾	45	50	60

2.2 効率の考察

Table 2は、分散型電源の一般的な効率の比較について示している。マイクログリッド全体の省エネルギー性を考慮するとGTより発電効率の高いGEの導入が有利である。しかしながら、GEはGTに比較して制御応答性が悪いので、連系線潮流変動を抑制するには不利である。

3. ガスエンジンがマイクログリッド挙動に与える影響

3.1 GE 導入による連系線潮流の変化

Fig. 4はGE導入による連系線潮流の変化を示している。GTをGEに置き換えて導入していった場合、GEの割合が大きくなるほど制御応答性が悪いので、Fig. 4に示すように連系線潮流変動の標準偏差が大きくなる。

同じ大きさの負荷変動と発電設備の変動の系統の周波数に与える影響が同じであることから、マイクログリッドが系統連系している場合の連系線潮流の目標値のひとつとして、“負荷変動と同程度の変動レベル”が考えられる。すなわち、どの系統でも“負荷変動”は常に生じているものであり、負荷変動に風力発電の変動が加わり変動が大きくなっても、GTな

Fig. 4 Ptie STD by installation of GE

Fig. 5 Maximum WF installation by GE

Fig. 6 Configuration of generators

どによりその変動を抑制してもとの負荷変動のみの場合の変動レベルに戻すことができれば、風力発電の変動は抑制されているという考え方である。この考えに基づき、連系線潮流変動の標準偏差 (図中ではPtieSTDと表示) がマイクログリッド全体の容量の3%以内をひとつの基準とする。3%はひとつの目安であるが、特定電気事業者の電力会社との受電点潮流変動幅など他の類似例を参考として設定した。

ここで現状の上述の基準 (連系線潮流変動の標準偏差が3%以内) に基づいて、10MWのGTをGEに置き換える形でGEを導入した場合、連系線潮流の変動は大きくなる (Fig. 4)。風力発電の導入時に連系線潮流変動の標準偏差が3%を越えない範囲の最大のGEの導入量を Fig. 5 に示す。

連系線潮流変動の標準偏差が3%以内の基準の下では、WFが10MW (全体の容量の10%) までであればGTすべてをGEに替えることができる (Fig. 6)。

この場合GTのみの場合に比較して発電効率は最大15%向上する。

4. 電力貯蔵装置による連系線潮流変動の改善

4.1 BTの最適ゲインの考察

Fig. 7よりBTのゲイン (連系線潮流の偏差に対する出力減の割合) は約3まではPtieの変動の改善が見られるが、それ以上大きくしても、改善は見られないことがわかる。今後、BTのゲインの最適値を3と設定して、この値で考察を進める。

4.2 風力発電設備導入可能量の考察

Fig. 8は、WF導入による連系線潮流変化である。連系線潮流の標準偏差の上限値3%を基準とするとその導入限界はGTのみの場合は20MWであり、BTを併用することにより25MW

Fig. 7 Ptie STD by BTgain

Fig. 8 Ptie STD by WF

まで拡大できる (WF の容量は 7.5MW として試算)。

WFを導入した場合に、連系線潮流の変動を標準偏差 3 % 以内に抑制するためには、GT を GE に置き換えて導入しなければならない。そのような置き換えを行ったことによるマイクログリッド全体の総合発電効率は次式であらわされる。

$$\eta = \frac{W}{E_{GT} + E_{GE} + E_{FC}}$$

η : 総合発電効率

W : システム全体の出力

E_{GT} : GT への投入一次エネルギー

E_{GE} : GE への投入一次エネルギー

E_{FC} : FC への投入一次エネルギー

このときの変化を Fig. 9 に示す。WF の容量 10MW までは GE のみで対応できるが、それを超えると GT の導入が必要となり、総合発電効率は低下する。

Fig. 9 Total efficiency by installation of WF

Fig. 10 BT installation by WF installation

Fig. 11 Total efficiency by WF installation

4.3 BT の容量の考察

今回のシミュレーションでは BT の上下限値は設定しているが、その範囲内で運用することができており、さらに BT の容量を小さくする余地がある。そのような考え方でシミュレーションの結果、BT の出力変動の最大振幅によって BT の容量を決定すると、WF の導入量に応じて Fig. 10 のようになる。図に示すように直線近似できることがわかる。

Fig. 11 は BT を導入することにより、マイクログリッド全体の発電効率を低下させることなく、WF を導入することが可能となることを示している。これは GT の導入量の増加を回避できるのが理由である。

5. 電力貯蔵装置導入の経済性評価

最後にシステムの電源構成をコスト面で評価する。BT 導入時、WF 導入量が多くなり、マイクログリッド全体の発電効率も上昇することがわかるが、BT のインシヤルコスト、WF のインシヤルコストが増加する。そこで、WF 導入量増加による発電電力量の価値と、BT、WF のインシヤルコスト増加との関係を考察する。

BT なしの場合、発電効率最大の WF 10MW 導入時の WF 導入量を“WF1”とし、コスト比較対象を BT 導入時の WF 導入量が 10 ~ 27MW の“WF2”とする。

WF 発電電力の価値の BT 有無での差を P [円/年] とすると以下が得られる。

$$P = (WF2 - WF1) [MW] \times 8760 [h] \times 16.5 [\text{円/kWh}]$$

電力単価 16.5 円 / kWh は業務用電力の代表的な値からとった。

本研究のWF出力モデルは風況が比較的安定した4000[s]でのシミュレーションであるが、年間を通しての考察では風力発電の負荷率を一般的な値である0.15～0.25と変化させ、それぞれの値でのPを求める。

GE導入量は両者とも100MW、FC導入量も10MWであるので、Pと比較するコストは、WFイニシャルコストの差とBTイニシャルコストである。WF、BTのイニシャルコストはシミュレーションによりPtieが3%を超えない最低の容量からイニシャルコストを求め、法定耐用年数で割り、Pと比較する。なお、本研究のWF、BTのイニシャルコストは25万円/kW、10万円/kW、法定耐用年数は17年、8年と定める。

以上により負荷率0.15及び0.25の場合のWFの導入によるマイクログリッド全体の発電効率も上昇とWFとBTイニシャルコストを経済的観点から評価した結果をFig. 12, 13に示

Fig. 12 Economical merit by installation of WF & BT (Load factor 0.15)

Fig. 13 Economical merit by installation of WF & BT (Load factor 0.25)

Fig. 14 Minimum WF installation for economical merit

す。負荷率0.15の場合、WFを11.2MW以上導入した場合にメリットが出ることがわかる。Fig. 14より、WFの負荷率も考慮した結果、BT導入の際、風力発電導入量が最低でも10.4MW以上必要となる。

6. まとめ

以下に本研究で得られた事項をまとめる。

- (1) マイクログリッドに導入されたWFの出力変動によって生じる連系線潮流の変動を3%以内に抑制するには、WFの容量がマイクログリッド全体の10% (10MW/100MW) 以内であればGEの出力制御により変動を抑制することが有効であることが判明した。
- (2) WFの容量がマイクログリッドの10%を超えると、GEよりも制御応答性のよいGTを導入しなければWFの出力変動によって生じる連系線潮流の変動を3%以内に抑制することができなくなる。しかし、GTは発電効率が低いのでマイクログリッド全体の総合的な発電効率は低下してしまう。
- (3) 10%を超えるWFの導入による出力変動の抑制には、制御応答性のよいBTの導入が有効である。
- (4) WFとBTのイニシャルコスト対ランニングメリットの比較ではWF導入は10.4MW以上でないとメリットがない。
- (5) 今回の考察はWFの出力変化が比較的連続した場合の結果であるが、無風状態から出力が急増する場合や、その逆に急に無風状態になる場合を考察すると、最大10MWの出力変化が生じる可能性がある。このように大きな変動が生じた場合には、GT、GEの追従速度特性に制約があるため、まれに今回示したような制御ができない可能性がある。しかし今回の評価では4000秒間での統計的な標準偏差で評価しており、評価結果に大きな影響を生じないと考えられる。

文 献：References

- 1) Ramirez, A., Semlyen, R., Iravani, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**(3), (2004)
- 2) 山本茂広, 角和芳, 西川榮一, 橋本武, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), **124**(4), (2004) : Yamamoto, S., Sumi, K., Nishikawa, E., Hashimoto, T., *IEEE Transactions on Power and Energy*, **124**(4), (2004)
- 3) Bhowmik, A., Maitra, S., Halpin, M., Schatz, J. E., *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**(2), (2003)
- 4) Oliva, R., Balda, J. C., *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**(2), (2003)
- 5) Marei, M. I., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A., *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**(3), (2004)
- 6) 奥山賢治, 加藤丈佳, 呉カイ, 鈴置保雄, 舟橋俊久, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), **123**(3), (2003) : Okuyama, K., Kato, T., Wu, K., Suzuoki, Y., Funabashi, T., *IEEE Transactions of Power and Energy*, **123**(3), (2003)
- 7) 辻隆男, 大山力, 熊野照久, 河野良之, 伊与田功, 電気学

- 会論文誌B(電力・エネルギー部門誌), **124**(3), 6(2004): Tsuji, T., Oyama, T., Kumano, T., Kono, Y., Iyoda, I., *IEEE Transactions of Power and Energy*, **124**(3), (2004)
- 8) 中村公雄, 角田二郎, NTTファシリティーズジャーナル, **43**, 253(2006-1): Nakamura, K., Tsunoda, J., *NTT Facilities Journal*, **43**, 253(2006-1)
- 9) 進士誉夫, 関根剛史, 秋澤淳, 柏木孝夫, 藤田吾郎, 松原正芳, 電気学会電力, エネルギー部門誌(B), **126**(1), (2006): Shinji, T., Sekine, T., Akisawa, A., Kashiwagi, T., Fujita G., Matsubara, M., *IEEE Transactions of Power and Energy*, **126**(1), (2006)
- 10) Kundur, P., Power System Stability and Control, (McGrawHill), (1994)
- 11) Wood, J., Wollenberg, B. F., Power Generation Operation and Control, (Wiley), (1996)
- 12) 電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御調査専門委員会, 「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」, 電気学会技術報告, No. 869, (2003): Research Committee of Power System Load Frequency Control for Normal and Emergency Operation, 'Power System Load Frequency Control for Normal and Emergency Operation,' IEEJ Technical Report, No. 869, (2003)
- 13) 道上勉, 大石孝穂, 電気学会論文誌, **120-B**, 7(2000): Michigami, T., Oishi, T., *IEE Japan*, **120-B**, 7(2000)
- 14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構/電力中央研究所, 「風力発電電力系統安定化等調査」, NEDO-NP-0012: NEDO/CRIEPI, 'Research on Power System Stabilization of Wind Generation', NEDO-NP-0012
- 15) 中村哲廣, 江崎公太, 柿沼絵美, 藤田吾郎, 山口剛史, 横山隆一, 小柳薫, 舟橋俊久, 電力技術研究会研究資料, PSE-04-3(2004): Nakamura, A., Ezaki, K., Kakinuma, E., Fujita, G., Yamaguchi, T., Yokoyama, R., Koyanagi, K., Funabashi, T., The Papers of Technical Meeting on Power Systems Engineering, IEE of JAPAN, PSE-04-3(2004)
- 16) 岡本洋三, 坂倉淳, 秋澤淳, 柏木孝夫, 日エネ誌, **84**(10), (2005): Okamoto, Y., Sakakura, A., Akisawa, A., Kashiwagi, T., *J. Jpn. Inst. Energy*, **84**(10), (2005)
-