Compensation Method for Fluctuation Power of Wind Power Generation Using Biomass Gas Turbine Generator and Flywheel Energy Storage Equipment

Masahiko Hara Student Member (Mie University, hara@cs.elec.mie-u.ac.jp)

Naoki Yamamura Member (Mie University, yamamura@elec.mie-u.ac.jp)

Muneaki Ishida Member (Mie University, ishida@elec.mie-u.ac.jp)

Masaaki Wakita Non-Member (Mie University, wakita@bio.mie-u.ac.jp)

Yasunari Kamada Non-Member (Mie University, kamada@mach.mie-u.ac.jp)

Takao Maeda Non-Member (Mie University, maeda@mach.mie-u.ac.jp)

Keywords: wind power generation, flywheel energy storage equipment, biomass generation, power compensation, power capacity

1. Introduction

Recently, electric power generation using natural energy and biomass energy are getting much attention. But, the generated power using natural energy depends on weather condition. So, it contains big fluctuation. Therefore, the system to compensate such a power fluctuation is necessary for practical use. Energy storage equipment is used as a method of power compensation. Therefore, when it compensates for all power fluctuation generated from such a system only by energy storage equipment, it should have large capacity. Consequently, we have an interest in biomass generation system that usually operates alone. And we propose the power compensating method for the low frequency fluctuation using that system. In the system design, the capacity of the energy storage equipment can be decreased by using this method. Therefore, by the natural energy generation system become widely using the proposed method. In proposal system, we show results of demonstration experiment to prove effectiveness.

Fig. 1. Compound type natural energy generation system

Fig. 2. Result of compensation power

Fig. 3. Frequency analysis

Fig. 4. Compensated energy

In our research, we propose "combined type natural energy generation system" like Fig. 1. This system consist of wind power generation, FWES(FlyWheel Energy Storage equipment) and MGT(Micro Gas Turbine) generation system. In this paper, we describe the power compensating method for considering frequency spectrum of wind power, response of compensation system, energy capacity of FWES, and availability factor of MGT generator.

2. Experimental Result

Figure 2 shows result of compensation. And Fig. 3 shows result of frequency analysis of power. Here, P_{Wind} is generated power by wind turbine generator. P_{O_W} is output power from wind power generation system with FWES. P_O is output to the power utility. In Fig. 2, when you compare P_{Wind} with P_{O_W} , high frequency fluctuation is compensated by FW compensation system. And, when you compare P_{O_W} with P_O , low frequency fluctuation is compensated by MGT generation system. In Fig. 3, similar compensation effect can be confirmed, too.

In the experiment result of Fig. 2, we make certain of how much E_{FW} is able to be reduced by compensation for low frequency fluctuation by MGT generation system. Figure 4 shows result of compensated energy. Here, E_{FW} is energy necessary for compensation by FW compensation system. And E_{CMP} is energy necessary for compensation all system. Figure 4 shows that maximum of E_{CMP} is about 700 [kJ] and maximum of E_{FW} is about 400 [kJ]. And so, E_{FW} was decreased about 300[kJ] by MGT system.

Consequently, proposal system can supply high quality power. And proposal system configuration can decrease capacity of energy storage equipment in the sysytem design.

バイオマスガスタービン発電機とフライホイール電力貯蔵装置を用いた風力発電の変動電力補償法

学生員 原 真彦* 正員 山村 直紀*
 正員 石田 宗秋* 非会員 脇田 正彰**
 非会員 鎌田 泰成*** 非会員 前田太佳夫***

Compensation Method for Fluctuation Power of Wind Power Generation Using Biomass Gas Turbine Generator and Flywheel Energy Storage Equipment

Masahiko Hara*, Student Member, Naoki Yamamura*, Member, Muneaki Ishida*, Member, Masaaki Wakita**, Non-member, Yasunari Kamada***, Non-member, Takao Maeda***, Non-member

The power generation using natural energy contains electric power fluctuation. Therefore, in order to put such power generation system to practical use, compensation for system power fluctuation is needed. In this paper, we propose a power compensation method using biomass gas turbine generator and flywheel energy storage equipment. The gas turbine generator is used for compensation of low frequency power fluctuation in order to decrease capacity of flywheel. Usefulness of the proposed system is confirmed by experiment using a test plant.

キーワード：風力発電，フライホイール電力貯蔵装置，バイオマス発電，電力平準化，電力容量

Keywords: wind power generation, flywheel energy storage equipment, biomass generation, power compensation, power capacity

1. はじめに

現在，まとまって捨てられる，あるいは放置されているバイオマスは全国に多数あると考えられる。これらを放置しておくと，CO₂ よりはるかに地球温暖化効果が強いメタンが発生する。そこでこのメタンを利用し，発電を行なうことで，温暖化を防止すると共に化石燃料の消費を削減することが可能となる。そのため，バイオマスを用いた発電システムが注目されている。

バイオマスが発生する，あるいは存在する場所に適した規模の発電・資源再利用システムを構築し事業として成り立つためには，バイオマス収集コストを考慮し，バイオマスを発生する事業所単位で，数十 kW 程度の比較的小規模の発電システムを想定したほうが望ましい。しかしながら，

バイオマスだけで数十 kW 程度の電力を発電しようと考えると，供給エネルギーが不足する。このことからエネルギー的に自立するためには自然エネルギーを複合する方法が考えられる。しかし，自然エネルギーを利用した発電システムは，従来の化石燃料を用いた発電システムとは異なり，発電される電力は季節や気象条件などに大きく依存するため変動が生じる。そのため，バイオマス発電に自然エネルギー発電を複合した場合，現在の電力系統と同等の電力品質を維持するためには，この変動電力を平準化するシステムが必要である。そこで，フライホイール電力貯蔵装置や二次電池といった電力貯蔵装置を用いる手法が多く提案されている⁽²⁾⁽³⁾。しかし，電力貯蔵装置のみで自然エネルギー発電システムから発電される変動電力の低周波変動を補償するためには大きな容量を持った電力貯蔵装置が必要となる。そこで本研究では，一般に定出力で運転される⁽⁴⁾ バイオマスガスタービン発電を自然エネルギー発電システムによる低周波変動電力を補償することを提案する。このようなシステム構成とすることで，自然エネルギー発電システムとバイオマス発電を複合する際に使用する電力貯蔵装置の容量を低減することが可能である。

本研究ではバイオマスを用いた発電システムとして，畜糞や廃乳から得られるバイオマスガスを利用し発電するマイクロガスタービン (MGT) 発電機を用い，自然エネルギーを用いた発電システムとして風力発電を用いる。そして，

* 三重大学工学研究科電気電子工学専攻
〒514-8507 津市栗真町屋町 1577
Department of Electrical and Electronics Engineering, Mie University
1577, Kurimamachiya, Tsu 514-8507

** 三重大学生物資源学研究所生物圏生命科学専攻
〒514-8507 津市栗真町屋町 1577
Department of Biosphere life Engineering, Mie University
1577, Kurimamachiya, Tsu 514-8507

*** 三重大学工学研究科機械工学専攻
〒514-8507 津市栗真町屋町 1577
Department of Mechanical Engineering, Mie University
1577, Kurimamachiya, Tsu 514-8507

電力貯蔵の手段として電氣的に優れた応答性を有し、堅牢といった特徴を持ち、二次電池に比べリサイクルが容易であり、化学廃棄物も少なく、対環境性に優れるといった利点を持つ、フライホイール電力貯蔵装置 (FWES: FlyWheel Energy Storage equipment) により構成される複合型自然エネルギー発電システムを提案し、高品質な電力を供給することを目的とする。本論文では、電力平準化を行う上で、風車の発電電力の周波数分布や MGT 発電機及び FWES の補償能力を考慮した電力補償法について述べ、これを用いた実証試験結果により提案システムの有効性を検証する。

2. 複合型自然エネルギー発電システム

提案する複合型自然エネルギー発電システムを Fig. 1 に示す。本システムは、本学の三重大学フィールドサイエンスセンター附帯施設農場に設置されており、バイオマスガスを燃料として用い、定格発電電力 29 kW の MGT 発電システムを基盤に、最大発電電力 100 kW の風力発電システム、そして、風車からの変動電力を補償するための定格容量 10 kW の FWES を 3 台用いたフライホイール電力補償システム (以降 FW 電力補償システム) から構成される。FW 電力補償システムは Fig. 2 に示すロータがフライホイールとなった誘導機 3 台が 1 台のインバータに並列接続され制御されている。また、100 kW の風車は 29 kW の MGT 発電システムに対する風車の規模を検討するために出力が大きなものを設置した。

バイオマス発電が定常的に出力できる電力は事業所が定常的に発生するバイオマスガス発生量に依存する。しかし、提案システムでは、風力発電システムを複合することにより、システム全体で定常的に出力できる電力を増やすことができ、事務所のエネルギー自給率を上げることになる。また提案システムでは風力発電の電力変動を補償する FWES

Fig. 1. Combined type natural energy generation system.

Fig. 2. Structure of flywheel energy storage equipment.

を用いた補償システムを有している。FWES は風車の発電電力の変動成分が平均電力よりも大きい場合は充電を行い、小さい場合は放電をし、変動電力の補償を行なっている。一般的に FWES は直接、三相系統に接続される。しかし提案システムでは FW 電力補償システムを風力発電システムの直流リンクに並列に接続している。このような接続をすることで系統連系インバータを 1 つにすることができる。また、三相系統に接続した場合には風力発電システムの系統連系インバータは風力発電機の最大発電電力以上の容量を必要とするが、FWES を直流リンクで接続することで風力発電システムの出力電力を平準化が可能となるため、系統連系インバータの容量を低減することが可能である。これらのことから、システム設計の際に要するコストの軽減が可能である。

3. 電力平準化制御

高品質な電力供給を行なう場合には、出力変動の抑制のほかに、高調波及び電圧変動の補償も考慮する必要がある。しかし、今回は出力変動の補償のみを考えるものとする。

風車からの発電電力 P_{Wind} の変動分にはさまざまな周波数成分が含まれており、それらは風車の容量にも依存するが、ここでは平準化の手法を示すことに主眼をおいているので、一例として 100 kW 風車の発電データを基に行なう。供給電力の平準化を行う際には、風車からの変動的な発電電力 P_{Wind} の周波数特性を考慮に入れ、高域・中域・低域・超低域の 4 つの周波数領域に周波数分離を行う。この概念図を Fig. 3 に示す。このように周波数分離により得られた中域成分 P_M は FW 電力補償システムにより補償を行う周波数成分である。また、低域成分 P_L は MGT 発電システムにより補償を行う周波数成分である。そして、Fig. 4 に示すように、これらの正負を反転させ、両補償システムへの電力補償指令値 P_{FW_ref} 及び P_{MGT_ref} を作成する。なお、MGT 発電システムへの電力指令値 P_{MGT_ref} に関して、そ

Fig. 3. Concept chart of frequency separation.

Fig. 4. Frequency separation method.

の出力は 15kW から 28kW であるため、補償を行う際は動作中心である P_{MGT0} ($= 21.5 \text{ kW}$) を加える必要がある。次に、高域成分 P_H とは FWES でも補償しきれない高周波の成分を指す。そして、この成分の一部は、風力発電システムの電力変換器に付属される電解コンデンサによって補償される。この電解コンデンサの容量の決定法については第 5 章、6 章にて言及する。最後に、超低域成分とは数分以上の非常にゆっくりとした周期で現れる成分であり、系統に供給する変動として許容する成分とみなしている⁽⁵⁾。

4. 補償システムの応答性による補償帯域の検討

Fig. 3 のように風車から発電された電力を周波数分離する際の 3 つの帯域分離周波数 f_H , f_M , f_L の決定は風車から発電された電力の周波数分布とその大きさだけでなく、2 つの補償システムの応答性と電力容量に依存する。ここでは、FW 電力補償システムと MGT 発電システムの応答性を考慮した帯域分離周波数の決定法について述べる。

Fig. 5. Frequency response result.

Fig. 5 は FW 電力補償システム及び MGT 発電システムにおいて測定した周波数特性である。周波数特性の測定は、変動電力の指令値の振幅をシステムへの影響が最も大きいと考えられる、許容変動電力範囲の最大値に設定して行なった。Fig. 5(a) のゲイン特性結果から、FW 電力補償システムでは 1 Hz 程度まで、そして、MGT 発電システムでは 0.02 Hz 程度まで高いゲイン特性を得られることが分かる。しかし、Fig. 5(b) の位相特性結果からは、FW 電力補償システムでは約 0.2 Hz、そして、MGT 発電システムでは 0.01 Hz よりも高い周波数において 30 deg を超える大きな位相差が生じている。ここで、三角演算を解いたとき、補償電力が 30 deg 以上の遅れを生じるとその補償効果は半分以下となる。そして、60 deg 以上の遅れが生じたときには反対に電力脈動を増加させてしまう。したがって、帯域分離周波数を決定する際にはこれを考慮する必要がある、本システムでは中域分離周波数 f_M は MGT 発電システムの位相特性が 30 deg 以下である 0.01 Hz 以下に、そして、高域分離周波数 f_H は FW 電力補償システムの位相特性が 60 deg 以下である 0.4 Hz 未満に設定する必要がある。

5. 電力容量による補償帯域の検討

ここでは、風車の発電電力に含まれる周波数成分を基に FWES のエネルギー容量と MGT 発電機の稼働率を考慮した帯域分離周波数の決定法を検討する⁽⁶⁾。

〈5・1〉 風力発電電力に含まれる周波数成分 風車から発電される電力には多くの周波数成分が含まれる。Fig. 6 に三重大学構内に設置されている 100 kW の容量を持つ風車から得られた発電結果を示す。この結果から、今回測定した風車から発電される電力に含まれる変動の主成分は約 0.1 Hz 以下の変動成分であり、低周波の変動が多く含まれている。風車からの発電電力は変動が激しく季節により大きく変動するものであるが、ここでは、Fig. 6 に示した発電電力の一例を基に検討を始める。

今、Fig. 6 に示す風車から発電された電力を 0.001 Hz より高い変動成分を平準化すると仮定する。Fig. 7(a) に補償に必要な電力 P_{CMP} を示し、Fig. 7(c) に P_{CMP} を時間積分

Fig. 6. Generated power by wind power generation in campus.

Fig. 7. Compensation power and energy.

し得られる補償エネルギー E_{CM} を示す。電力貯蔵装置のみで補償を行う際に、より低周波の変動成分まで補償しようとした場合には、必要とされる貯蔵装置の容量も大きく設計しなければならない。しかし、電力貯蔵装置で補償対象とするすべての変動成分を補償するのではなく、補償対象を中域成分 P_M と低域成分 P_L に分割し、低域成分 P_L を MGT 発電システムで補償することによって電力貯蔵装置で補償に必要なエネルギーを低減できると考えられる。

Fig. 7(b), (c) に補償対象とする 0.001 Hz よりも高い周波数成分のうち FW 電力貯蔵装置で補償対象とする中域成分 P_M と MGT 発電システムで補償対象とする低域成分 P_L を分離する中域分離周波数 f_M を 0.005 Hz としたときの補償成分と FW 電力貯蔵装置で補償に必要なエネルギーの変化を示す。

Fig. 7(c) から MGT 発電システムで低域成分 P_L を補償することで、FWES で補償するエネルギー E_{FW} の大きさを最大で約 1500 kJ 低減できていることが確認できる。また、電力貯蔵装置は電力の蓄放電を行う装置であるため、補償エネルギーの大きさに制限を受ける。これに対し、MGT 発電システムは MGT 発電機による発電機構を有するため、補償エネルギーに制限を受けない。このことから、提案システムは、より低周波の変動成分まで電力補償を考えたとき、より有効な平準化システムであると考えられる。

〈5・2〉 マイクロガスタービン発電機の稼働率と電力変換効率 MGT 発電システムでは定格発電電力 29 kW の MGT 発電機を用い、風力発電の低周波変動を補償するため、出力が 15 kW から 28 kW の間で可変に制御される。しかし、MGT 発電機の出力を変化させ、稼働率の低い状態で運転することは発電効率の低下を引き起こす。ここで、稼働率とは出力電力を定格出力電力で除算したときの商である。Fig. 8 に、提案システムで用いる MGT 発電機において稼働率を変化させたときの発電効率の変化を示す。Fig. 8 から、MGT 発電機の出力を定格の 100% から 50% に変化させると、発電効率は 25.0% から 22.4% に低下していることが分かる。したがって、MGT 発電機において、高い電力変換効率を得るためには高稼働率で運転する必要がある。

Fig. 8. Power conversion efficiency of MGT system.

また、MGT 発電機の稼働率の低下は MGT 発電システムで補償を行う低域成分 P_L の変動幅で決定する。そして、風車から発電された電力をより低周波の変動成分まで補償することを考えたとき、低域成分 P_L の領域は拡大する。このため、より、低周波の変動を補償しようとした際には MGT 発電機の動作範囲を大きくとる必要がある。したがって、MGT 発電機の稼働率と補償可能な低周波成分はトレードオフの関係となる。このことから MGT 発電機の稼働率を高く維持するためには低域分離周波数 f_L を高く設定することで系統に供給する際に許容する周波数帯域の高周波側への拡大する必要がある。

〈5・3〉 帯域分離周波数の変化によるマイクロガスタービン発電機の稼働率とフライホイール電力貯蔵装置の容量 前述のように、提案する複合型自然エネルギー発電システムでは風力発電の電力平準化を行うにあたり、FW 電力貯蔵装置の補償エネルギーの大きさや、MGT 発電システムの稼働率を考慮する必要がある。そこで、Fig. 6(a) に示す風車の発電電力を平準化する際に、2つの帯域分離周波数を変化させることで、FW 電力補償システムで中域成分 P_M を補償する際に必要なエネルギー ΔE_{FW} 及び MGT 発電機で補償対象とする低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L の大きさがどのように変化するか確認した。この結果を Fig. 9 に示す。なお、MGT 発電システム及び FW 電力補償システムの応答性を考慮したうえで、低域分離周波数 f_L を 0.002 Hz から 0.0005 Hz 間で変化させた。また、中域分離周波数 f_M

に関しては0.02 Hzから低域分離周波数 f_L 付近の値まで変化させた。そして、低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L と中域成分 P_M の補償に必要なエネルギー ΔE_{FW} は、(1)式から(3)式で算出している。

$$E_{FW}(t) = \int P_M(t)dt \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta E_{FW} = \max(E_{FW}(t)) - \min(E_{FW}(t)) \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta P_L = \max(P_L(t)) - \min(P_L(t)) \dots\dots\dots(3)$$

Fig. 9(a)の結果から、FW電力貯蔵装置で補償する際に必要となるエネルギーの大きさ ΔE_{FW} は中域分離周波数 f_M を低く設定することで、増加することが分かる。また、Fig. 9(b)から低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L の大きさは低域分離周波数 f_L の低下または中域分離周波数 f_M の上昇により大きくなる事が分かる。したがって、システム設計の際には、MGT発電機システムの応答性に合わせ、中域分離周波数 f_M を設定し、中域成分 P_M を補償するために必要なエネルギーの大きさからFWESの容量を決定する必要がある。また、MGT発電機の稼働率を考慮したうえで出力変動幅を決定し、低域分離周波数 f_L を決定すればよい。

〈5・4〉電解コンデンサによる高域成分の補償 本方式は、FW電力貯蔵装置で補償できない高域成分を風力発電システムにおけるDCリンクの電力変換器に付属している電解コンデンサで補償することを考えている。そのため、コンデンサ容量 C も適切に設定する必要がある。この容量の設定は高域成分 P_H を補償するために必要なエネルギー容量 ΔE_C と、DCリンク電圧を変動させる際の最大値 V_{DC_max}

と最小値 V_{DC_min} により決定する。したがって、(4)式のように決定すればよい。

$$C = \frac{2 \cdot \Delta E_C}{V_{DC_max}^2 - V_{DC_min}^2} \dots\dots\dots(4)$$

また、風車の発電電力の出力レベル及び周波数分布は大きく変動するため上記の検討は統計的に処理する必要がある。しかし、検討の手法については有効であると考ええる。例えば、発電電力の周波数分布がFig. 5とほぼ同様のものであり、発電電力の絶対量が2倍に増加した場合には、単純に中域成分 P_M を補償する際に必要なエネルギー ΔE_{FW} 及び低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L は2倍になると考えればよい。

6. 実証実験

前章では、風車の発電電力に含まれる周波数成分とMGT発電機の稼働率、FWESの貯蔵容量、そして、電力品質を考慮したFWESの容量決定法を示した。そして、実証試験システムではMGT発電機の変動幅を13 kWとし、FWESとしては最大補償容量900 kJの装置を用いる。

提案システムの有効性を証明するために実証実験を行った。このとき、風車の発電電力を4つの周波数領域に分離するための3つの帯域分離周波数をTable 1に示し、実験結果をFig. 10に示す。なお、帯域分離周波数 f_L 、 f_M 、 f_H を前章で述べた考えを基にし、次のように決定した。

Fig. 5から、MGT発電システムで補償可能な周波数領域は0.01 Hz以下である。また、FWESの最大貯蔵容量は900 kJであるため、Fig. 9(a)から、中域分離周波数 f_M は0.003 Hz以下である必要がある。したがって、貯蔵容量に対し余裕を持たせ、中域分離周波数 f_M は0.005 Hzに設定した。次に、Fig. 9(b)において、中域分離周波数 f_M が0.005 Hzのときを考える。そして、MGT発電機の動作変動幅を13 kWとしているため、これに対して余裕を持たせ、低域分離周波数 f_L を0.001 Hzと設定する。最後に、高域分離周波数 f_H はFW電力補償システムにおいて補償効果の期待できる最大の周波数帯域である0.3 Hz程度に設定される必要がある。しかし、周波数分離は帯域分離周波数をカットオフ周波数とする1次のローパスフィルタを用いることで実現している。また、Fig. 6(b)から風車から発電される電力に含まれる変動のうち、主となる変動成分は0.2 Hz程度まで存在している。そのため、高域分離周波数を0.3 Hzにしたとき、この0.2 Hz付近の補償信号は減衰する。しかし、0.3 Hz以上の変動は僅かであることから、高域分離周波数 f_H は0.2 Hzの補償信号が減衰しないように0.3 Hzよりも大きな値に設定することが望ましいと考える。したがって、高域分離周波数 f_H は2 Hzに設定する。Fig. 10から、風車単体

Fig. 9. Change in characteristic by separation frequency.

Table 1. Band separation frequency.

f_H	2 [Hz]
f_M	0.005[Hz]
f_L	0.001[Hz]

Fig. 10. Compensated result of power fluctuation.

Fig. 11. Compensated energy.

Fig. 12. Capacitor compensation energy.

からの発電電力 P_{Wind} に対し、風力発電システムと FW 電力補償システムの合成電力を系統連系インバータにより系統に出力される電力 P_{O_W} は FW 電力補償システムを動作させることにより、FW 電力補償システムの補償対象である 0.005 Hz よりも高い周波数成分を補償できていることが分かる。次に、 P_{O_W} に対し、最終的な系統への出力 P_O は MGT 発電システムを動作させることによって 0.005 Hz から 0.002 Hz 程度の変動成分を補償できていることが確認できる。ここで、風車の発電電力 P_{Wind} において負となる領域が存在している。これは、本システムの風車では風力発電機の回転数がある設定値よりも小さい場合、電動機動作をすることで、設定された回転数を維持するシステムとなっているためである。また、風力発電システムの出力 P_{O_W} の平均値が P_{Wind} のそれよりも低下している。これは、FW 電力補償システム及び風力発電システムにおける電力変換器で生じる損失や、FWES において生じる風損、銅損などの損失を発電電力 P_{Wind} でまかなっているためである。本研究では電力脈動に観点をおいているため出力の平均値が負となっていることは問題にならないと考える。このような状況下で MGT 発電システムによって電力脈動の低周波成分を補償することにより FW 電力補償システムで補償するエネルギーをどの程度軽減できるかを確認した。この結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 から、今回行った実験において、補償に必要とした全エネルギー E_{CMP} の最大値は約 700 kJ であるのに対して、FW 電力補償システムで補償したエネ

ルギー E_{FW} の最大値は約 400 kJ であることがわかる。これより、MGT 発電システムにより FW 電力補償システムで補償するエネルギーを約 300 kJ 軽減できていることから、提案システムの有効性を確認できたと考える。

また、本実験において FW 電力補償システムで補償できなかった高周波成分をキャパシタで補償する際に必要な補償エネルギーの推移を Fig. 12 示す。この結果から補償に必要なエネルギー容量は約 5 kJ である。この場合、本システムは風力発電システムの DC リンク電圧を 650 V から 710 V の間で変化させる。(4) 式から、約 125 mF の容量を有したキャパシタを用意すればよいことになる。ただし、FW 電力補償システムの応答性を考えると改善の必要がある。そして、高域分離周波数 f_H を高くすることで、キャパシタで補償すべき高周波成分が低減されるため、必要なキャパシタ容量は低減される。

7. まとめ

本論文では、風力発電から発電される脈動電力を高域・中域・低域に分離し、低域成分をバイオマスガスタービン発電機で、中域成分をフライホイール電力貯蔵装置で補償する電力補償法を提案した。そして、マイクロガスタービン発電機で低域成分を補償することでフライホイール電力貯蔵装置が補償すべき電力容量を低減できることを明らかにした。しかし、フライホイール電力貯蔵装置の応答性の改善によりキャパシタに要求される容量を低減できること

を示した。今後の課題としては、バイオマス発電の応答性と規模を考慮したシステムの構築、負荷変動や高調波を考慮にいたした系統連系インバータの制御法の検討などがある。
(平成19年1月4日受付, 平成19年6月22日再受付)

文 献

- (1) K. Kiichiro: "The Present Situation and Problem Area of Waste to Energy and Biomass Energy", *Energy & Resources*, Vol.27, No.3, pp.6-10 (2006-3) (in Japanese)
小川紀一郎:「廃棄物発電とバイオマスエネルギーの利用の現状課題」, *エネルギー・資源*, 27, 3, pp.6-10 (2006-3)
- (2) A. Koyanagi, H. Nakamura, Y. Suzuki, M. Molinas, and R. Shimada: "Study on Power Fluctuation Compensation of Wind Turbin Generator by Fly-wheel", 2000 National Convention Record IEE Japan, Industry Application Society, Vol.2, T-67, p.715 (2000) (in Japanese)
小柳明大・中村浩和・鈴木康慎・マルタモリナス・嶋田隆一:「可変速フライホイール発電機による風力発電変動補」, 平成12年電気学会産業応用部門大会, T-67, p.715 (2000)
- (3) R. Takahashi, L. Wu, T. Murata, and J. Tamura: "An Application of Fly-wheel Energy Storage System for Wind Energy Conversion", *IEEE PEDS*, pp.932-937 (2005)
- (4) K. Masahide, H. Kashihara, A. Hirokawa, and T. Watanabe: "Development of Recuperated Gas Turbine for Biomass Pressurized Fluidized Bed Gasification System", *The 10th National Symposium on Power and Energy Systems (SPE 2005)*, pp.227-230 (2005)
- (5) M. Hara, T. Matsukawa N. Yamamura, M. Ishida, M. Wakita, Y. Kamada, and T. Maeda: "Proposal of Low Frequency Power Compensation Method of Wind Power Generation Using Biomass Gas Turbine Generator", *The Papers of Joint Technical Meeting on PE, PSE and SPC, IEE Japan*, pp.13-17 (2006) (in Japanese)
原 真彦・松川達哉・山村直紀・石田宗秋・脇田正彰・鎌田泰成・前田太佳夫:「バイオマスガスタービン発電機を用いた風力発電の低周波変動補償法の提案」, *電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換研資*, pp.13-17 (2006)
- (6) M. Hara, N. Yamamura, M. Ishida, M. Wakita, Y. Kamada, and T. Maeda, "Method of Electric Power Compensation for Wind Power Generation Using Biomass Gas Turbine Generator and Flywheel—One Study For Electric Power Capacity—", *The Papers of Joint Technical Meeting on EE, IEICE Japan*, pp.59-64 (2006) (in Japanese)
原 真彦・山村直紀・石田宗秋・脇田正彰・鎌田泰成・前田太佳夫:「バイオマスガスタービンとフライホイールを用いた風力発電の電力補償法」, *電気情報通信学会電子通信エネルギー技術研究報告*, pp.59-64 (2006)

原 真彦 (学生員) 1983年1月9日生。2007年3月三重大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻修了。同年4月シャープ(株)入社。

山村直紀 (正員) 1964年10月20日生。1993年3月名古屋工業大学大学院博士後期課程電気情報工学専攻修了。同年4月名古屋工業大学電気情報工学科助手。1998年4月三重大学工学部電気電子工学科講師。工学博士。インバータを用いた電動機駆動・発電システム, アクティブフィルタの開発に従事。IEEE, パワーエレクトロニクス学会会員。

石田宗秋 (正員) 1952年4月12日生。1980年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学および電子工学専攻博士後期課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科助手。1987年6月三重大学工学部電気電子工学科助教授, 1996年10月同大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。工学博士。1993, 2001年電気学会論文賞, 1999年電気学会著作賞受賞, 2002年計測自動制御学会論文賞受賞。IEEE, パワーエレクトロニクス学会, 計測自動制御, 日本機械学会, 溶接学会会員。

脇田正彰 (非会員) 1945年6月10日生。1970年3月三重大学大学院農学研究科修士課程修了。同年4月三重大学農学部農学科助手, 1981年12月同大学農学部農学科助教授, 1987年10月同大学生物資源学部生物資源学科助教授, 1998年11月同大学生物資源学部生物資源学科教授, 2000年同大学生物資源学部生物圏生命科学研究科教授, 現在に至る。農学博士。家畜の栄養, 成長, 管理に関する研究に従事。日本畜産学会, 日本家禽学会, 日本比較内分沁学会会員。

鎌田泰成 (非会員) 1968年11月2日生。1994年3月三重大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月同大学工学部機械工学科助手, 2007年1月同大学大学院機械専攻助教授, 2007年4月同大学工学部機械工学科准教授, 現在に至る。工学博士。2000年 Wind Power for the 21st Century Poster Award, 2004年および2006年2004年論文ポスター賞(日本風力エネルギー協会), 2005年 EXPO WCWRF 2005 Poster Award 受賞。日本機械学会, 風力エネルギー協会, ヨーロッパ風力エネルギー協会, ターボ機械協会会員。

前田太佳夫 (非会員) 1991年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程機械工学及び機械工学第二専攻満了。同年4月名古屋大学工学部助手。1995年6月オランダ王国デルフト工科大学風力エネルギー研究所フェローシップ研究員。1997年1月三重大学工学部助教授, 2005年12月同大学工学部教授, 2006年4月同大学大学院工学研究科教授, 現在に至る。工学博士。日本機械学会, 日本風力エネルギー協会理事, ターボ機械協会, 日本風力発電協会顧問。