

複写可

三重大学大学院工学研究科修士論文

自然エネルギーを用いたマイクログリッドの
電力平準化制御



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
エネルギーシステム講座

奥村 雄一郎

2009年3月

目次

目次

第1章 緒言	
1.1. 研究の背景	1
1.2. 研究の目的	3
1.3. 本論文の構成	4
第2章 自然エネルギーを用いたマイクログリッド	
2.1. システムの構成	5
2.2. 風力発電システム	10
2.3. フライホイール電力補償システム	12
2.4. マイクロガスタービン発電システム	16
2.5. 負荷変動データ	20
2.6. 電力平準化手法	21
2.7. 電力容量算定	27
第3章 フィールド実験	
3.1. 実験条件	33
3.2. 実験結果及び考察	35
第4章 フライホイール電力補償システムの応答性の向上	
4.1. フライホイール電力補償システムの従来制御法	40
4.2. 一次磁束制御法	41
4.3. シミュレーションによる速度指令値の変化率上限の適正值検出...	47
第5章 模擬実験システムによる従来制御法との比較実験	
5.1. 模擬実験システム	50
5.2. ステップ応答	54
5.3. 周波数応答	57
5.4. 模擬平準化実験	58
第6章 結言	
6.1. 研究成果	62
6.2. 今後の課題	62
参考文献	63
関連論文および口頭発表	64
謝辞	65

第1章 緒言

1.1. 研究の背景

近年、産業の発展に伴い、石油や石炭などの化石燃料の消費が拡大している。そして、この化石燃料の消費によって排出される二酸化炭素などの温室効果ガスから地球温暖化などといった環境問題に対する懸念が広がっている。このことから、化石燃料に代わるエネルギーを用いた発電システムの導入が世界的に求められている。

化石燃料に代わるエネルギーとしては風力や太陽光などといった自然エネルギーを用いたものや、廃材や畜糞などから得られるバイオマスガスが注目を集めており、それらを用いた発電方式が電力自由化やグリーン電力制度の導入により、今後ますます増加していくと考えられる⁽¹⁾。

しかし、自然エネルギーを用いた発電方式は化石燃料を用いた発電方式と異なり、発電される電力が季節や気象条件などに依存するために変動が起きる。この変動される電力を系統へ供給する場合、系統側では電圧の周波数及び振幅に変動が起きることが知られており、今後の自然エネルギー発電システムのさらなる普及を考えたとき、無視できない問題となる。このため、自然エネルギーを用いた発電システムを実用化するには、この変動電力を平準化するシステムが必要となる。変動電力の平準化の手段として、電力の余剰分を貯蔵し必要に応じ放出する「電力貯蔵装置」を用いた平準化システムが盛んに研究されている⁽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エネルギー容量を持った電力貯蔵装置が必要である。

また、バイオマスガスを用いた発電方式においても発電量がガスの発生量に依存するという問題がある。バイオマスガスの輸送費を含めた原材料を考えると、大容量のバイオマスガスの確保は輸送費がかさむためにコストパフォーマンスが悪い。このことから地域特性を生かした原料の確保や他の原料コストが安い発電システムと組み合わせることによるコストの削減が必要である。

本研究ではこの双方の発電方式が持つ問題点に注目し、双方の発電方式を取り込んだマイクログリッドを構成した。そして、バイオマス発電による自然エネルギー発電によって発電される低周波変動電力の補償と自然エネルギー発電を用いることによるシステム全体の発電量に対するコスト低減法を提案する。このようなシステム構成とし、電力貯蔵装置のみでは困難な低周波変動を補償することで、自然エネルギー発電の増加にともなう電力品質の低下を防止できる。また、システム構成の際の電力貯蔵装置のエネルギー容量を低減可能である。さらに、発電量に対するコストの低下を図れることから新エネルギー発電の普及がより促進できると考える。

1.2. 研究の目的

本研究では、新エネルギー発電として期待される自然エネルギー発電システムに電力貯蔵装置を付加した発電システムとバイオマス発電システム及び負荷を統合した自然エネルギー発電を用いたマイクログリッドを提案する。そして、提案する発電システムにおいて、電力貯蔵装置のエネルギー容量を低減しながら、系統側から見た負荷変動が緩やかなマイクログリッドが実現可能であることを示すことを目的としている。

具体的には、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、電力貯蔵装置には、「フライホイール電力貯蔵装置(FWES : FlyWheel Energy Storage equipment)」を用いる。そして、バイオマス発電には畜糞や廃乳から得られるバイオマスガスを利用し、マイクロガスタービン発電機によって発電する。そして、風車から発電される発電電力の周波数分布やマイクロガスタービン発電機及びフライホイール電力貯蔵装置の補償能力を考慮した電力補償法を提案する。また、より系統側から見た負荷変動が緩やかなマイクログリッドを実現するためにフライホイール電力貯蔵装置を用いた平準化システムの構成と制御法について検討し、実験により有効性について検証する。

1.3. 本論文の構成

本論文は6章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的について示す。

第2章では、提案する自然エネルギーを用いたマイクログリッドの構成を説明する。

第3章では、提案システムの有効性を実験により検証する。

第4章では、より系統側から見た負荷変動が小さなマイクログリッドを実現するためにフライホイール電力貯蔵装置を用いた補償システムの応答性の改善法を提案する。

第5章では、第4章で述べた改善法の有効性を実験により検証する。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめる。

第2章 自然エネルギーを用いたマイクログリッド

2.1. システムの構成

本研究で提案する自然エネルギーを用いたマイクログリッドは、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」に設置されている。そして、最大発電電力100kWの風車によって発電された電力を系統に供給する風力発電システムと、風車によって発電される変動電力を補償するために定格容量10kWのフライホイール電力貯蔵装置を3台用いたフライホイール電力補償システム、そして、畜糞や廃乳から得られるバイオマスガスを燃料として用い、定格発電電力29kWのマイクロガスタービン発電機によってその出力電力を15kWから28kWの間で可変に発電するマイクロガスタービン発電システムから構成される。ここに過去に測定された負荷変動データから形成されたデータ上の電力供給先である仮想的負荷を接続することにより、本システムは発電システムからマイクログリッドへと拡張されている。図2.1に本研究で提案する自然エネルギーを用いたマイクログリッドの構成図を示す。

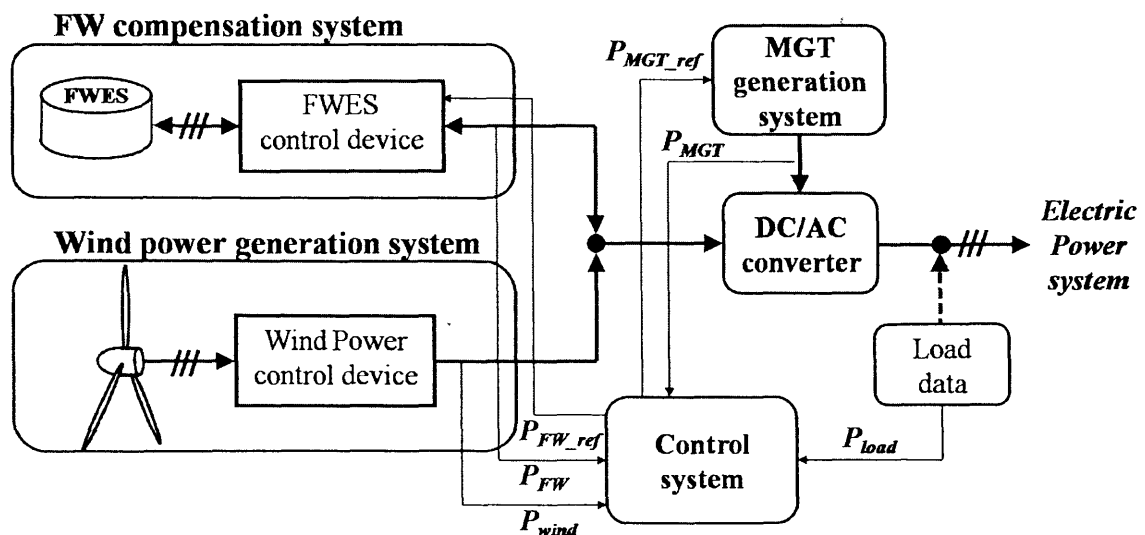


図 2.1 自然エネルギーを用いたマイクログリッド

本システムでは風車から発電された電力の脈動をフライホイール電力補償システム及びマイクロガスタービン発電システムで補償することで高品質電力の供給を目指している。したがって、風車から発電された電力 P_{Wind} を測定し、負荷変動データ P_{load} と共にこれをパソコンで処理することによってフライホイール電力補償システム及びマイクロガスタービン発電システムへの電力補償指令値を作成している。この処理を実行するソフトウェアとしては Visual Basic6.0 を使用し、フォームウィンドウでは、図 2.2 に示すようにパソコンで処理された数値データとそのグラフをリアルタイムで表示している。なお、出力電力は HIOKI 製 3193 パワーハイテスタを用い、それぞれ三相交流側で測定している。パソコンには DELL 製 Dimension5100 を用い、この PCI バスにインターフェイス製の AD・DA 変換ボード PCI-3523A が接続されている。これら装置の仕様を表 2.1 及び表 2.2 に示す。

また、実験環境の都合上、パソコンの付近にはフライホイール電力貯蔵装置の制御に使用される定格 40kVA インバータが設置されている。したがって、AD・DA 変換ボードの入出力信号には多くのノイズが重畳する。このため、AD・DA 変換ボードの入出力端には、図 2.3 に示すカットオフ周波数が約 30Hz の RC ローパスフィルタを 2 段接続している。ここで、カットオフ周波数を 30Hz とした理由は、一般の中・大型の風力発電システムから発電される電力の最も高周波の変動は数 Hz 程度であり、この成分が補償及び観測の対象となるためこの成分が減衰しないように設計したためである。そして、パソコンの DA 変換ボードからは、フライホイール電力補償システム及びマイクロガスタービン発電システムへの電力補償指令値が $\pm 10V$ の電圧信号として出力される。これらの信号のうちフライホイール電力補償システムへの電圧信号は、 $\pm 10V$ の信号を $\pm 5V$ の電圧に変化する絶縁電圧 - 電圧変換器を経由している。また、DA 変換ボードからマイクロガスタービン発電システムの電力補償指令値として出力される電圧信号は、入力 $\pm 10V$ 出力 4~20mA の絶縁電圧 - 電流変換器に入力され、電流信号として送信している。これは電力指令値を作成している場所から、マイクロガスタービン発電システムが設置されている場所まで数十メートルの距離があることから、伝送路において減衰が生じにくい電流に変換し信号を送信している。同様の理由により、マイクロガスタービン発電システムからの出力電力の測定値も電流信号で送信され、AD ボードに入力される直前に入力 4~20mA 出力 $\pm 10V$ の絶縁電流 - 電圧変換器を経由させている。

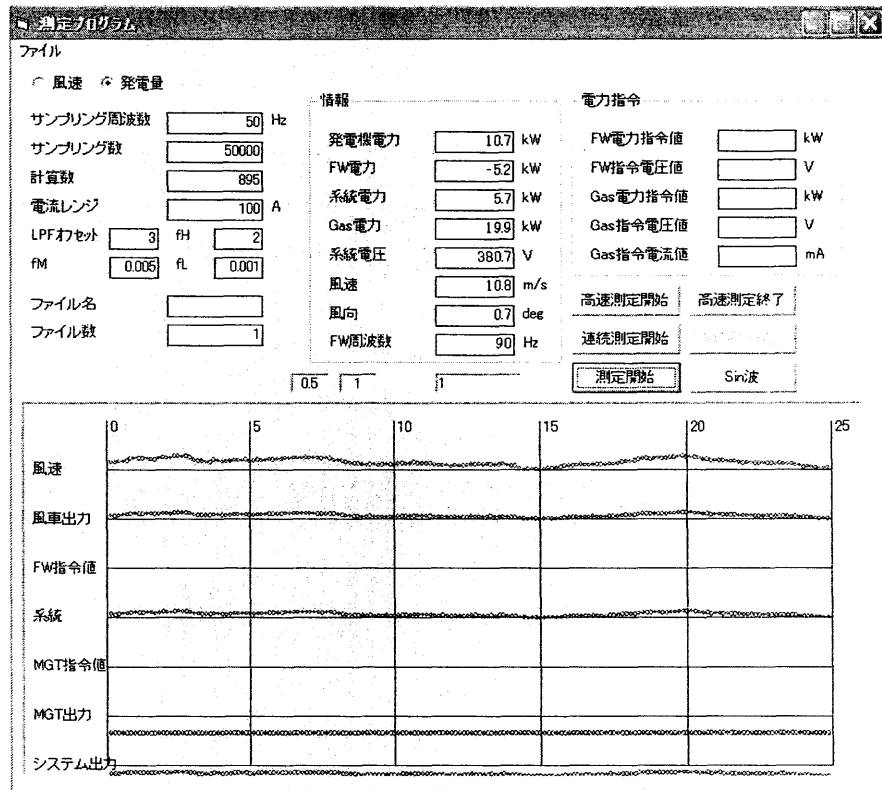


図 2.2 Visual Basic フォームウィンドウ

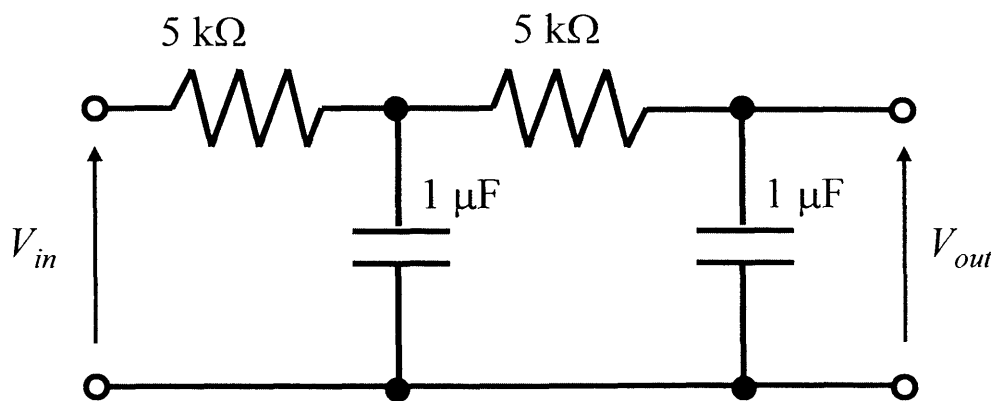


図 2.3 RC ローパスフィルタ

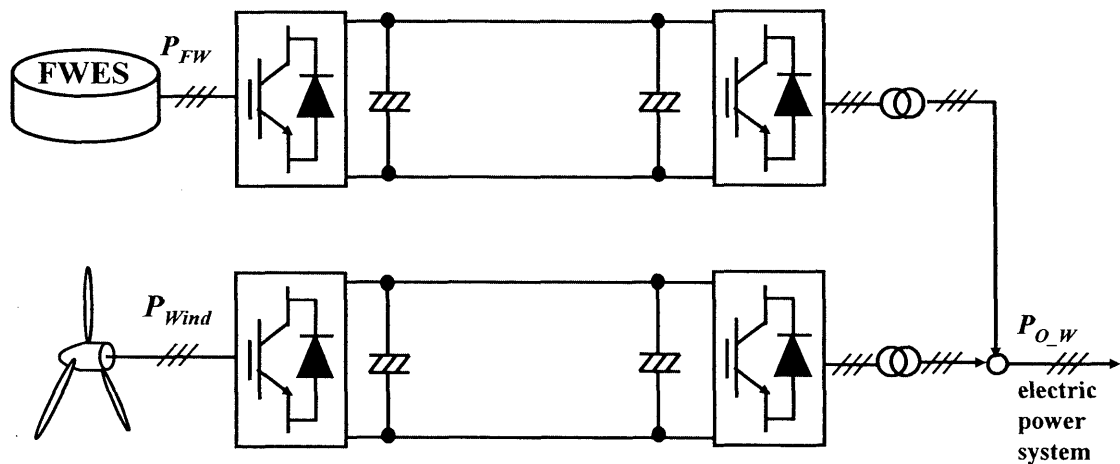
表 2.1 HIOKI 3193 パワーハイテスタの仕様

項目		仕様
最大電圧測定レンジ		600V
最大電流測定レンジ		200A
最大電力測定レンジ		120kW
周波数測定レンジ		0.5Hz~2MHz
積算回数		64回/s
D A 出 力	チャンネル数	8ch
	分解能	12bit
	出力電圧	±5V
	出力更新レート	16回/s

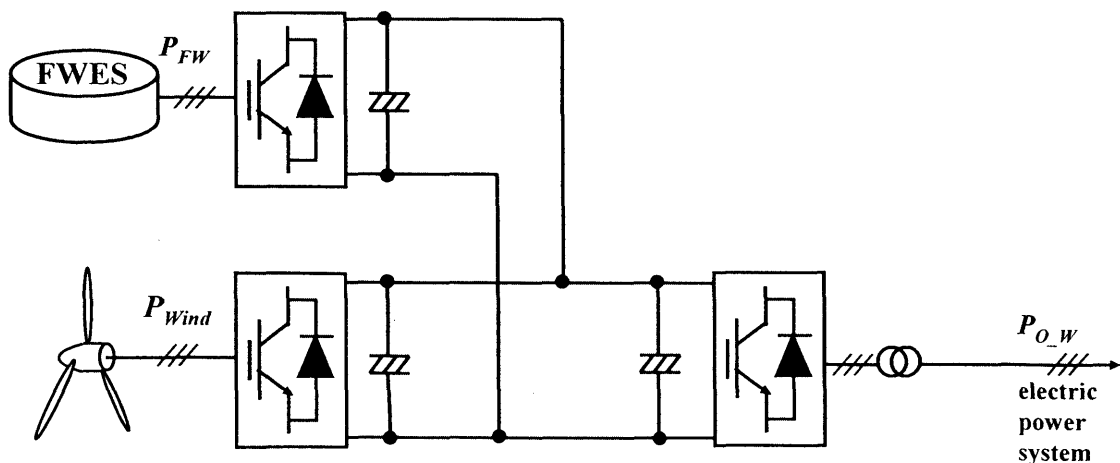
表 2.2 PCI-3523A の仕様

項目		仕様
A D 変 換 部	入力チャンネル数	シングルエンド8チャンネル
	入力形式	マルチプレクサ方式
	入力レンジ	バイポーラ: ±10V
	入力インピーダンス	10MΩ以上
	入力保護電圧	電源ON時: ±35V 電源OFF時: ±20V
	分解能	12bit
	誤差	±0.2%
	変換時間	チャンネル固定時: 10μs チャンネル切替時: 60μs
	絶縁方式	非絶縁
D A 変 換 部	出力チャンネル数	4チャンネル
	出力レンジ	バイポーラ: ±10V
	出力インピーダンス	1Ω
	出力保護電圧	GND, ±15V電源に対して短絡保護
	分解能	12bit
	誤差	±0.4%
	セトリングタイム	10μs
	絶縁方式	非絶縁

また、フライホイール電力補償システムは、図 2.4(b)に示すように風力発電システムの直流リンクに並列に接続された構成となっている。通常では、図 2.4(a)に示すようにフライホイール電力貯蔵装置を用いた電力補償システムは、三相系統に接続され補償する。しかし図 2.2(b)に示すように直流側に接続することで三相系統に接続するシステムを削減することができる。また、風力発電機から発電される変動電力を系統連系インバータの直前で平準化することで系統連系インバータから出力する電力のピーク値を低く抑えることができる。これは系統連系インバータの容量の低減が可能であることを意味する。これらのことから直流接続方式を採用することでシステム作成の際のコスト削減が可能である。



(a) 交流接続方式



(b) 直流接続方式

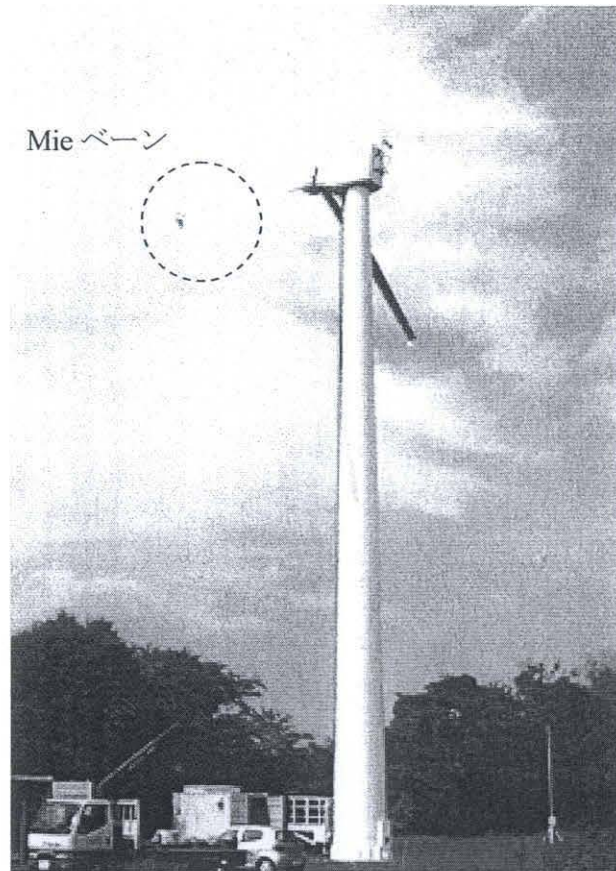
図 2.4 フライホイール付加型風力発電システムの構成

2.2. 風力発電システム

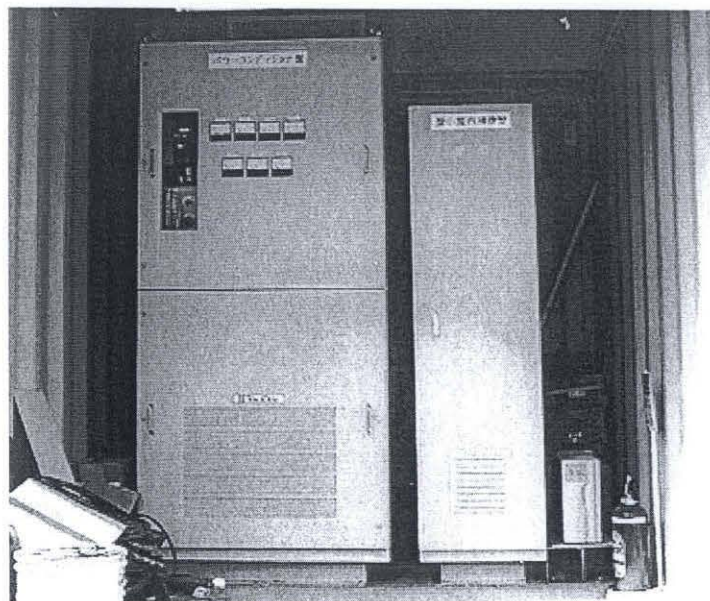
風力発電システムでは、図 2.5 に示すハブ高さ 30m、ブレード長 10m、定格出力 100kW の風力発電設備を使用する。そして、ブレードの先端には、翼に発生する揚力を翼端まで維持して出力を向上させる翼端小翼(Mie ベーン)が使用されている。また、本発電設備は図 2.4 に示す AC/DC/AC 方式を採用しており、低風速から高風速までロータの回転数変化により出力制御が可能である。そして、この直流リンク部分にはフライホイール電力補償システムが接続されている。表 2.3 に風力発電システムの仕様を示す。

表 2.3 風力発電システムの仕様

項目		仕様
風車	定格出力	100kW
	風車形式	水平軸型 アップウインド式
	回転方向	反時計回り
	ブレード枚数	3枚
	ブレード材質	GFRP(3軸織ガラス繊維)
	ロータ直径	20m
	ハブ高さ	30m
	チルト角	5deg
	ロータ回転数	20~72rpm
	ギア比	19~21
	制御法式	過変速フルスパン・ピッチ制御 ピッチフラップ制御
	カットイン風速	2.5m/s
	カットアウト風速	25m/s
	定格風速	13m/s
	連系方式	インバータ・コンバータ(AC/DC/AC)方式
	風向制御	強制ヨー制御
風力発電機	発電機形式	永久磁石同期発電機
	定格容量	110kW
	定格電圧	380V
	定格電流	190A
	定格周波数	75Hz
	定格回転速度	1500rpm
	相数	3
	極数	6
	冷却方式	外被表面冷却自力形
	絶縁種類	電機子巻線 F種
軸受方式	両軸受け	



(a) 風車



(b) パワーコンディショナー及び制御盤

図 2.5 風力発電設備

2.3. フライホイール電力補償システム

フライホイール電力補償システムは図 2.6 に示すように 3 台のフライホイール電力貯蔵装置と、これの電動発電機ユニットを駆動させるためのインバータユニット、このインバータユニットのリンク電圧を風力発電システムのリンク電圧に昇圧するための双方向チョップユニットそして、これらの装置を制御する DSP から構成される。フライホイール電力貯蔵装置は日本フライホイール株式会社製の製品を使用し、この 3 台はインバータの三相出力に対し並列に接続されている。また、インバータユニットと双方向チョップユニットそして、DSP はマイウエイ技研株式会社により製作され、一つの制御装置(以降はフライホイール駆動制御装置)として構成されている。そして、本装置は、正面操作部分の START ボタンを押すことで始動し、自動的にフライホイール電力貯蔵装置の回転数が約 2683rpm になるまで蓄電される。この後は、図 2.6 中の直流電圧 V_{FW} 及び電流 I_{FW} を乗算することで算出される出力電力 P_{FW} が外部アナログ入力端子から入力される電力補償指令値 P_{FW_ref} に追従するように制御される。図 2.7 に本研究で使用するフライホイール電力貯蔵装置とフライホイール駆動制御装置を示し、表 2.4 にこの仕様を示す。

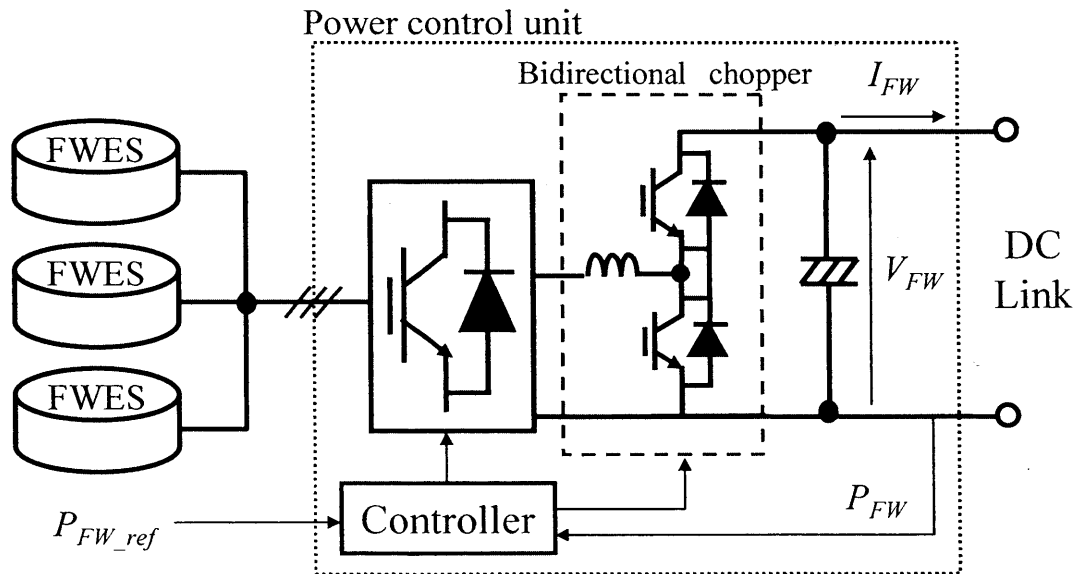
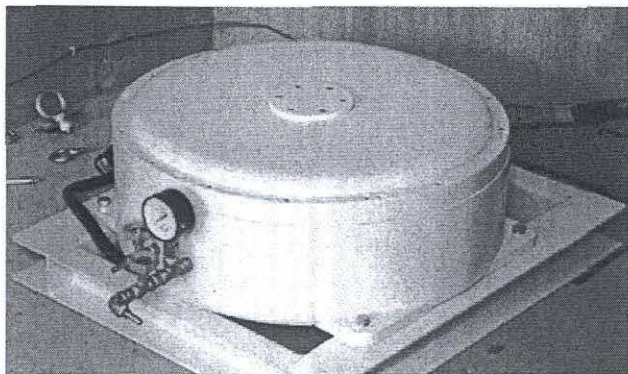


図 2.6 フライホイール電力補償システム



(a) フライホール電力貯蔵装置



(b) FW 駆動制御装置

図 2.7 フライホイール電力貯蔵装置とその駆動装置

表 2.4 フライホイール駆動制御装置の仕様

項目	仕様	
出力電力	-30~30kW	
最大補償エネルギー	900kJ	
FWES動作回転数	1764~3600rpm	
電力指令値	-4~4V	
FWES	電動発電機	かご形誘導機
	定格容量	10kW
	定格電圧	200V
	定格電流	60A
	定格回転数	3600rpm
	慣性モーメント	21.72kg・m ²
	極数	4極

フライホイール電力貯蔵装置は、そのままの状態では直接貯蔵することのできない電気エネルギーを機械的な回転エネルギーとして、貯蔵する装置であり、電動発電機とフライホイールから構成される。ここで、フライホイールは回転する物体に対して取り付けられる弾み車であり、これに回転エネルギーが蓄積されることにより、回転の持続や円滑化といった効果が得られる。この効果は、フライホイール効果と呼ばれ、電動発電機などさまざまな回転体で利用されている。フライホイール電力貯蔵装置では、このフライホイールを回転の持続と円滑化といった観点で捉えるのではなく、エネルギー貯蔵媒体という観点で使用する。そして、電動発電機を電動機として動作させることにより、フライホイールの回転を加速させ電力を蓄電し、電動発電機を発電機として動作させることで、それまでフライホイールに蓄積されていた回転エネルギーから電力を取り出すことができる。フライホイールに貯蔵されるエネルギー U は(2.1)式で表され、慣性モーメント J [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$], 回転角速度 ω [rad/s] の 2 乗に比例する。

$$U = \frac{1}{2} J \omega^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

また、本研究で使用するフライホイール電力貯蔵装置は、日本フライホイール製の装置を用いる。本装置は電動発電機としてかご形誘導機を使用し、フライホイールはかご形誘導機の回転子と一体となっている。そして、回転子は大きな慣性を得るために、やじろべえ構造となっており、回転子の二次導体が固定子の外側に配置されるように設計されている。また、フライホイールを支えるベアリングは先端に溝が刻まれており、高速回転時にはこの溝に潤滑油が流れ込むことによりベアリング部分が非接触となる。これにより、軸受け損が低減される。図 2.8 に本研究で使用するフライホイール電力貯蔵装置の断面図を示す。

電力貯蔵装置としてはフライホイール電力貯蔵装置の他にも電気エネルギーを電磁エネルギーとして貯蔵する超伝導電力貯蔵装置(SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage equipment)や二次電池が挙げられる。しかし、超伝導電力貯蔵装置は超伝導技術を利用しているため、冷却装置が必要である。また、磁気漏洩対策も必要となる。そして、二次電池では化学物質を用いることから使用環境に制約を受け、リサイクルも困難である。また、化学変化を伴うため寿命が短いといった特徴がある。これに対してフライホイール電力貯蔵装置は、産業界での応用が十分に行われている電動発電機技術を利用しているため、信頼性が高い装置である。また、その構成材質のほとんどが金属で構成されるため堅牢でリサイクルが容易であり環境負荷が小さいといった特徴がある。

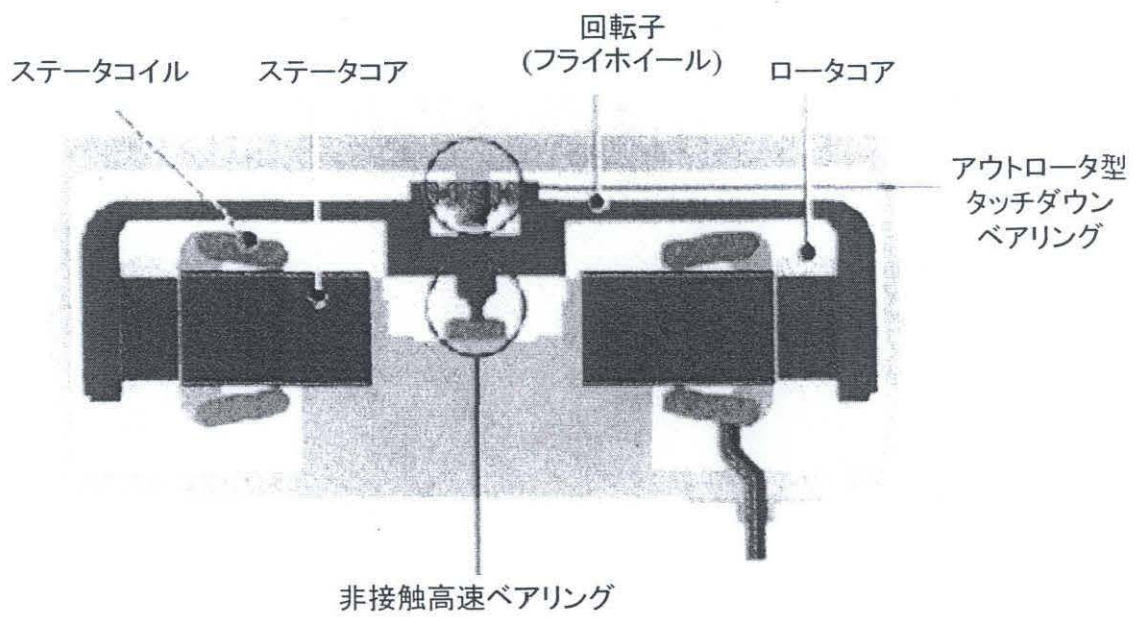


図 2.8 日本フライホイール製フライホイール電力貯蔵装置

2.4. マイクロガスタービン発電システム

本研究で用いる、マイクロガスタービン発電システムの全体構成を図2.9に示す。マイクロガスタービン発電システムはマイクロガスタービン発電機、ガス圧縮機、ガスドライヤ、熱交換器、制御盤から構成されており、これらの全てが一つにパッケージされ、省スペース・騒音の防止も図られている。また、マイクロガスタービン発電機は米国Capston社製の製品をバイオマス用に転用したものである。そして、熱交換器を内蔵しており、廃熱を温水に利用することができるコージェネレーションシステムとなっている。発電した電力は施設内の電力として利用することに加え、余剰な電力は電力会社の系統に接続され、系統連系運転が可能となっている。このため、停電時には発電機が自動的に停止し、発電を行わないように設計されている。

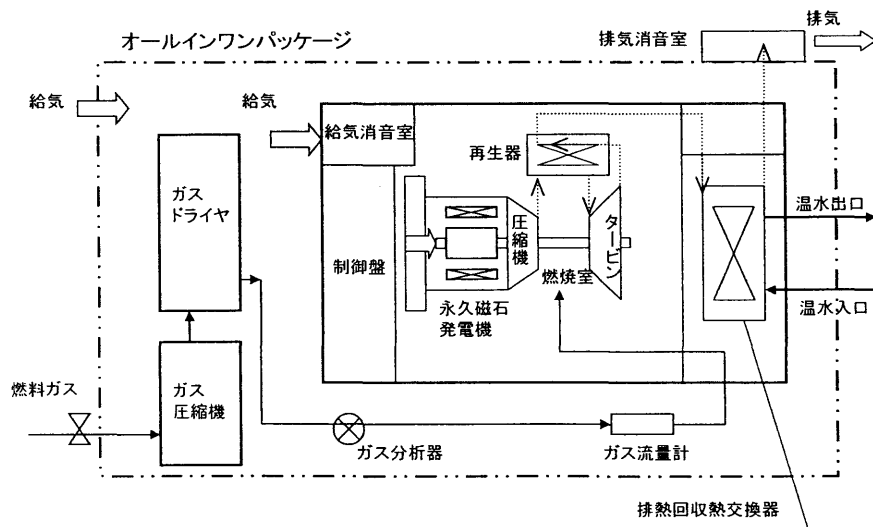


図2.9 マイクロガスタービン発電システムの構成

バイオガス圧縮機は、大気圧の燃料ガスを 0.49MPa に昇圧し、マイクロガスタービンに燃料を供給する。ガスドライヤはガス圧縮機で加圧されたガスの水分を除湿する。これにより、バイオマスガス中の水分が除かれ、効率よく燃焼させることができる。廃熱回収用熱交換器は、高温の排ガス(約 280℃)と熱交換することにより、温水を作る。温水の流量は 10m³/h である。そして、制御盤では、マイクロガスタービン発電システムの各部の運転の監視と制御を行う。システムの運転・停止や出力の調整なども、制御盤に取り付けられたコントローラにより容易に衝動で操作が可能である。システムに故障などによる異常が発生した場合や、バイオマスガスの発熱量が一定値を下回る場合、その他停電時などの非常時には直ちに消火し全自動で停止するように設計されている。また、メタン発酵槽ともにセンサにより連動しており、バイオマスガスが一定量発生したら自動で発電を行う自動運転もできるように設計されている。表 2.5 にマイクロガスタービン発電システムの仕様を示し、各部の写真を図 2.10 から図 2.13 に示す。

表 2.5 マイクロガスタービン発電システムの仕様

発電出力		29 kW
発電効率		20%
燃料消費量		19.8 m ³ /h (バイオマスガス)
NO _x 値		15 ppm
排ガス温度		110 °C
排ガス量		855 m ³ /h
廃熱回収熱交換器熱回収量		51 kW
総合効率		65%
騒音		平均 65dB 以下
重量		1900 kg
外径寸法		W900×L3050×H2200 mm
バイオ ガス 圧縮機	吸入圧力	0.101MPa
	吐出圧力	0.49 Mpa
	流量	40 m ³ /h
	電力	200V , 60Hz
ガス ドライヤ	処理ガス量	20 m ³ /h
	吐出圧力	0.49 MPa

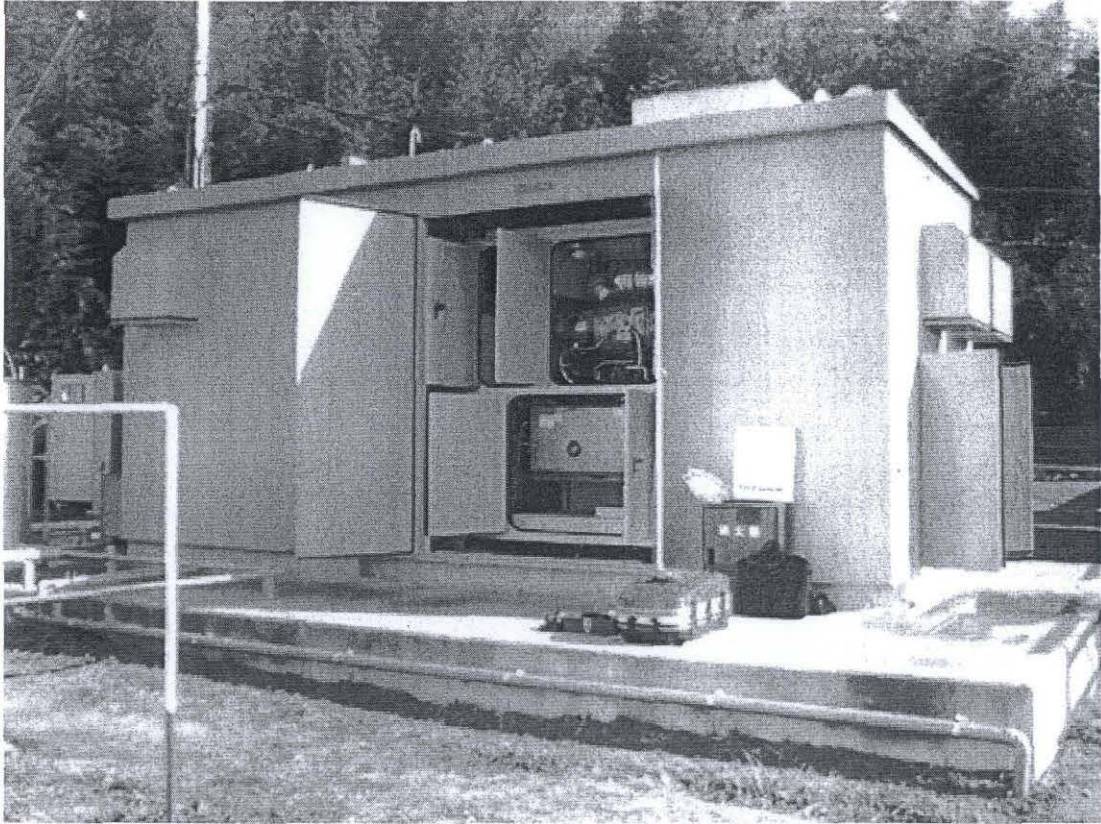


図 2.10 バイオマス発電システムパッケージ

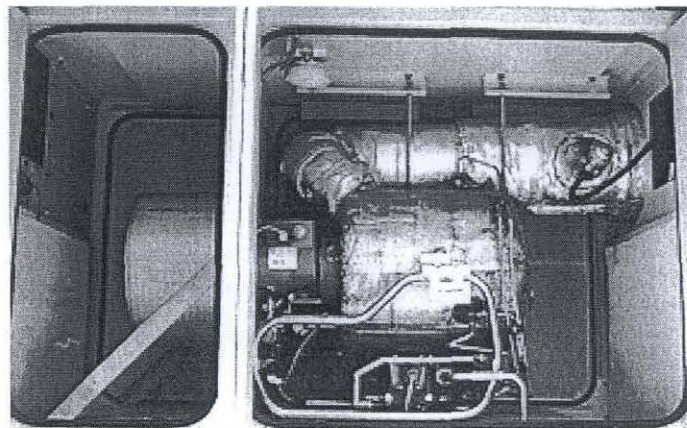


図 2.11 バイオマスガスタービン発電機

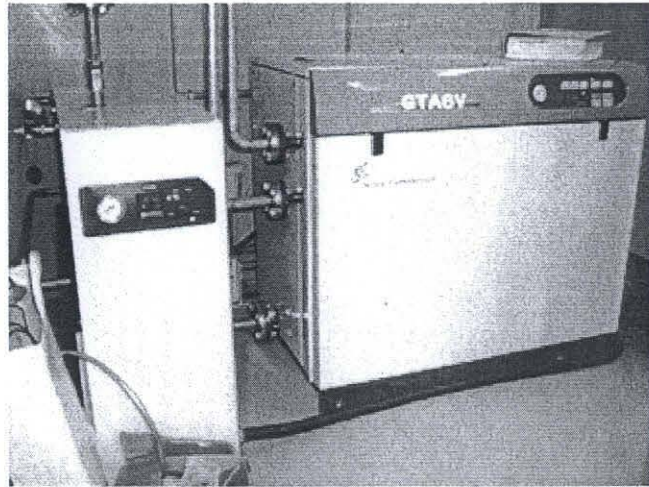


図 2.12 ガスドライヤ(左)とガス圧縮機(右)

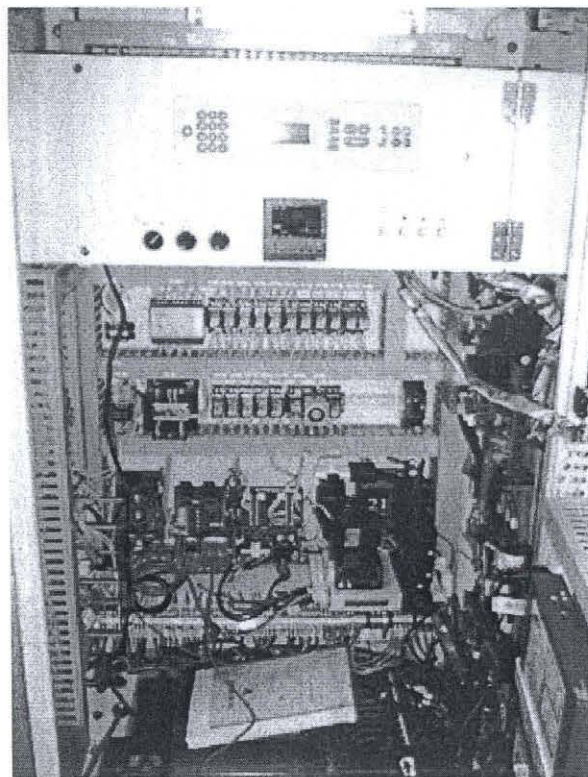


図 2.13 制御盤

2.5. 負荷変動データ

本システムでは将来的に電力の供給先を設けて自然エネルギーを用いたマイクログリッドをマイクログリッドに拡張する予定である。しかし、現在は設備が整っていないため、実際の負荷ではなく、データを用いて仮想的に負荷を接続している。負荷データは過去に測定された研究室の時間毎ごとの消費電力などを csv 形式に保存し、Visual Basic6.0 上で読み込むことによって仮想的に接続を行っている。

2.6. 電力平準化手法

風車からの発電される電力は気象条件に依存するため脈動が生じる。また、負荷に関しても人の生活に依存するため同様に電力脈動が起きる。そして、これらの発電電力及び負荷電力はさまざまな周波数成分を含んでいる。図 2.14 に三重大学の構内に設置されている定格発電電力 100kW 風力発電設備によって発電された電力の波形とその周波数解析結果を示す。

提案システムではこの風力発電機から発電される変動電力と負荷変動によってもたらされる変動電力はフライホイール電力補償システムとマイクロガスタービン発電システムで補償する。フライホイール電力補償システムでは、その補償電力がフライホイール電力貯蔵装置の電動発電機をインバータと DSP で電気的な制御が可能であるため優れた応答性を有している。これに対し、マイクロガスタービン発電システムでは、マイクロガスタービン発電機に注入するバイオマスガスの注入量を制御することにより発電機回転数を変化させ、補償電力を制御する。このため、その応答性能はフライホイール電力補償システムのものと比べ低い。

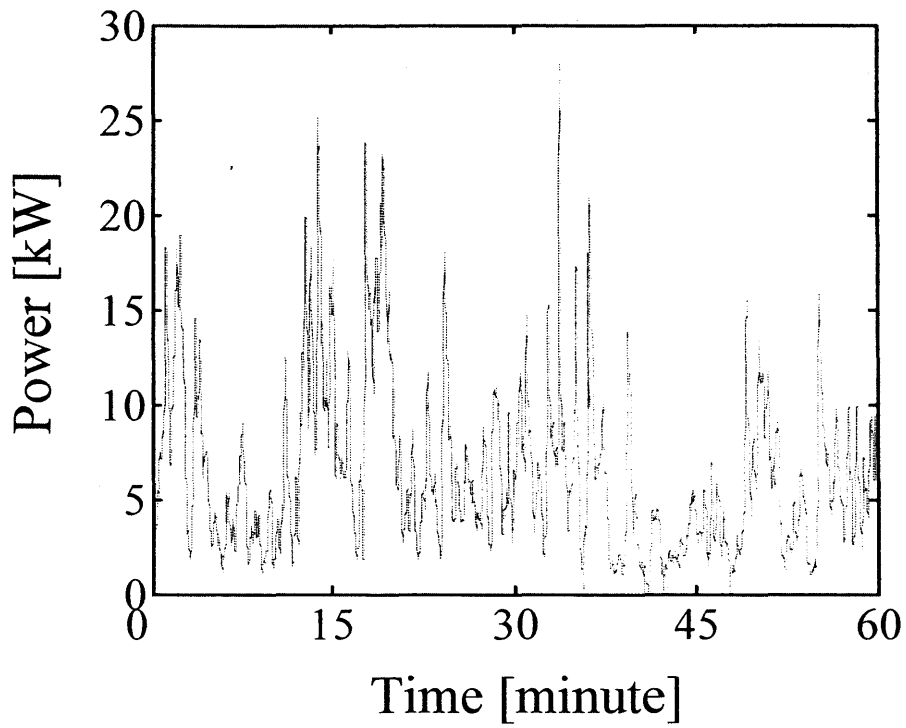
そこで、提案システムでは、供給電力を平準化するにあたり、風車から発電される変動電力 P_{Wind} と負荷変動 P_{load} を高域・中域・低域・超低域の 4 つの周波数領域に周波数分離する。この概念図を図 2.15 に示す。ここで、図 2.16 に示す 4 つの周波数領域は下記のように定義している⁽⁵⁾。

高域成分 P_H : 応答に優れる FW 電力補償システムでも補償できない高周波成分

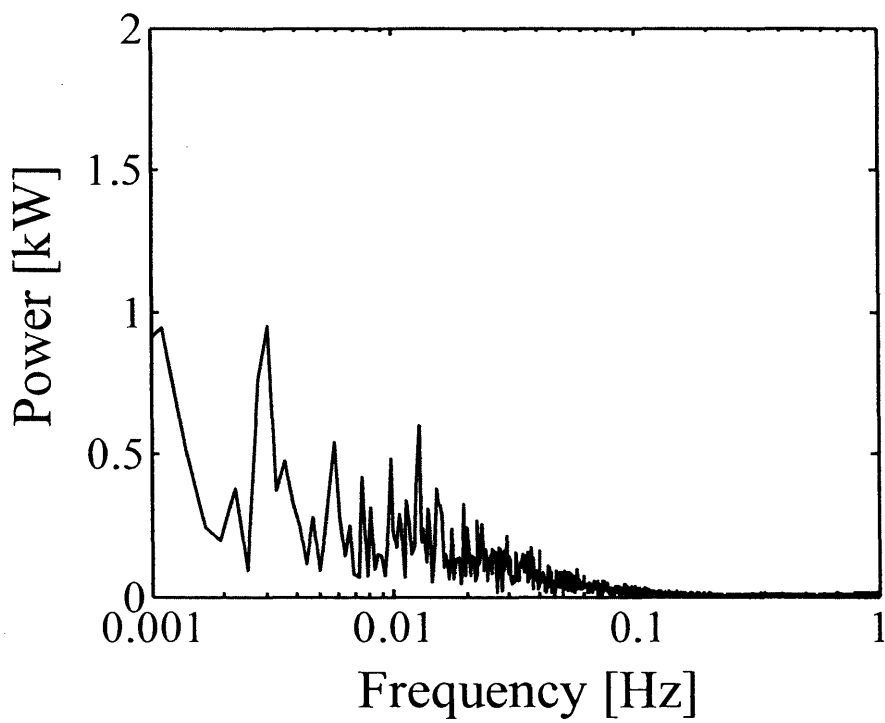
中域成分 P_M : フライホイール電力補償システムで補償対象とする成分

低域成分 P_L : マイクロガスタービン発電機で補償可能な低周波成分

超低域成分 P_{SL} : 電力系統に送電する脈動として許容する非常に低周波の成分



(a) 発電電力波形



(b) 周波数解析結果

図 2.14 構内 100kW 風力発電機の発電電力

すなわち、周波数分離とは、風車から発電された変動電力をフライホイール電力補償システムとマイクロガスタービン発電システムの補償能力を考慮し、それぞれが補償する周波数領域と、そのまま系統に送電する周波数領域に分離することを意味する。そして、図 2.16 に示すように周波数分離により得られた中域成分 P_M 及び低域成分 P_L から、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。ここで、マイクロガスタービン発電システムはその出力を 15kW から 28kW の間で変化させる。このため、マイクロガスタービン発電システムへの電力指令値 P_{MGT_ref} には、動作中心である P_{MGT0} (=21.5kW) を加える必要がある。また、高域成分 P_H は本来なら補償対象とすべき高周波変動である。そこで、この成分に関して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を利用することで、そのいくらかは補償される。

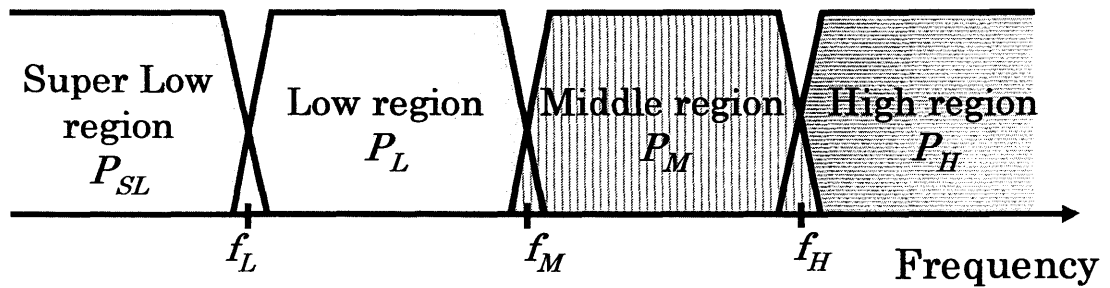


図 2.15 周波数分離概念図

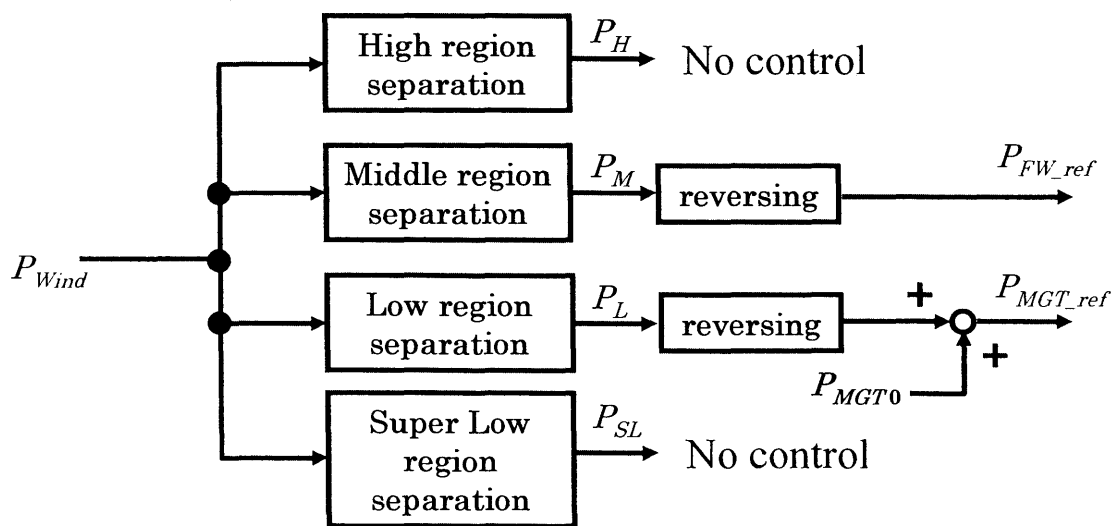


図 2.16 電力平準化制御概念図

図 2.15 のように、風力発電機で発電された電力を周波数分離するには、カットオフ周波数の異なる 3 つの一次ローパスフィルタを用いることで実現している。このローパスフィルタはパソコンの Visual Basic 上で作成しており、3 つのローパスフィルタのカットオフ周波数は、周波数分離の際の帯域を分離する周波数 f_L , f_M , f_H である。

AD・DA 変換ボードから取り込まれた風力発電機の発電電力 P_{wind} に対して、カットオフ周波数 f_H のローパスフィルタを通過させる。こうすることで、高域分離周波数 f_H 以下の周波数帯域を取り出すことができる。そして、風力発電機の発電電力 P_{wind} からカットオフ周波数 f_H のローパスフィルタの出力の差を求めると高域成分 P_H を取り出すことができる。同様にカットオフ周波数 f_H と f_M のローパスフィルタの出力の差をとることで中域成分 P_M を、カットオフ周波数 f_M と f_L のローパスフィルタの出力の差をとることで低域成分 P_L を取り出すことができる。また、カットオフ周波数 f_L のローパスフィルタの出力が超低域成分 P_{SL} となる。この概念図を図 2.17 に示す。

ここで、以下に示す理由からローパスフィルタは一次系とした。図 2.18 に f_M の周波数成分におけるフライホイール電力補償システムの補償電力 P_{FW} とマイクロガスタービン発電システムへの補償電力 P_{MGT} のベクトル関係を示す。図 2.18 から、周波数分離の際に一次ローパスフィルタを用いた場合には、中域分離周波数である f_M 成分のフライホイール電力補償システムの補償電力 P_{FW} は周波数分離を行うことで低減できている。しかし、二次ローパスフィルタを使用した際には位相遅れが大きくなることから周波数分離を行うことでフライホイール補償電力 P_{FW} が大きく増加する。このことから、周波数分離を行う際には有効電力だけでなく無効電力についても考慮する必要がある。したがって今回は周波数分離の際の無効電力が大きくなるようにローパスフィルタは一次系としている。

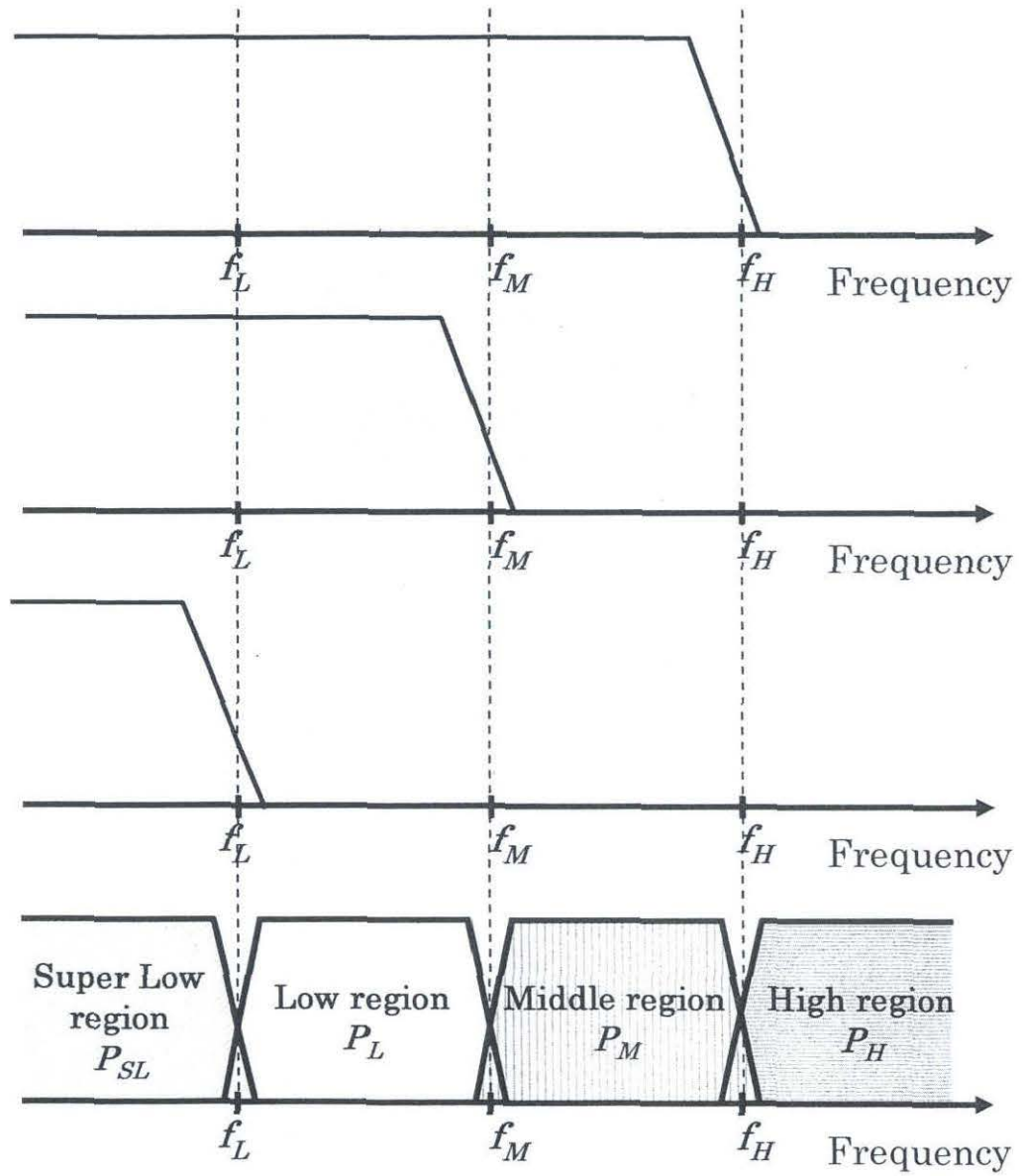
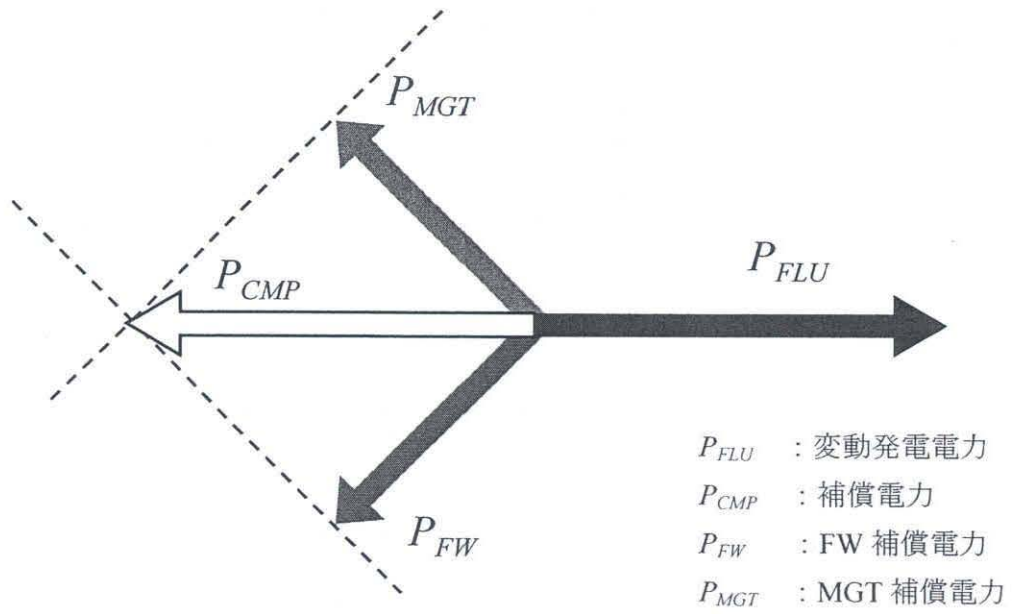
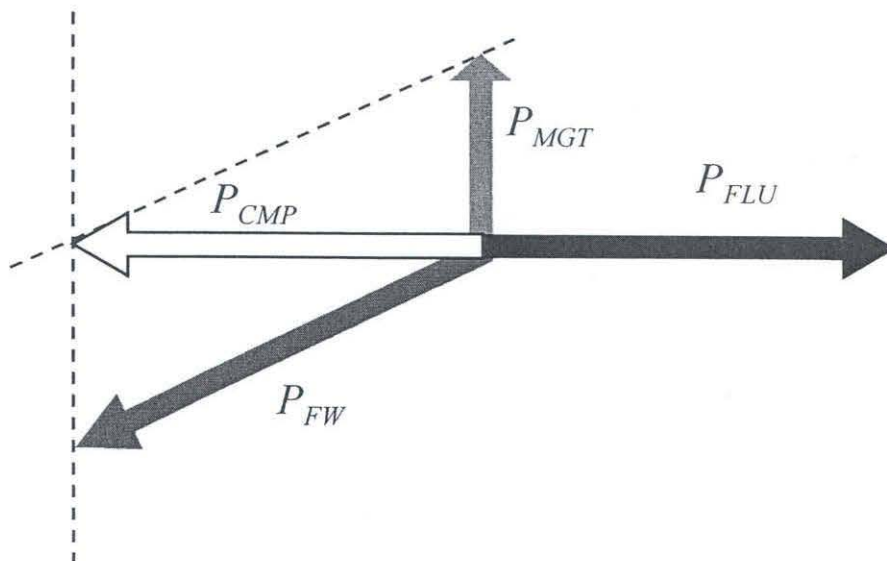


図 2.17 周波数分離手法



(a) 一次ローパスフィルタ



(b) 二次ローパスフィルタ

図 2.18 補償電力のベクトル関係

2.7. 電力容量算定

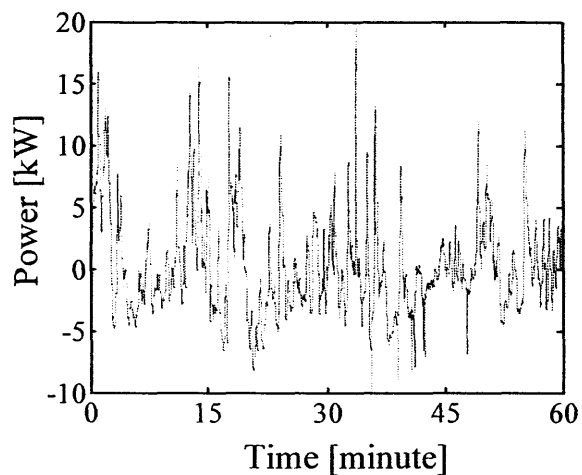
ここでは前研究者の示した風車の発電電力に含まれる周波数成分を基に FWES のエネルギー容量と MGT 発電機の稼働率を考慮した帯域分離周波数の決定法について紹介する。

2.7.1 風力発電電力に含まれる周波数成分

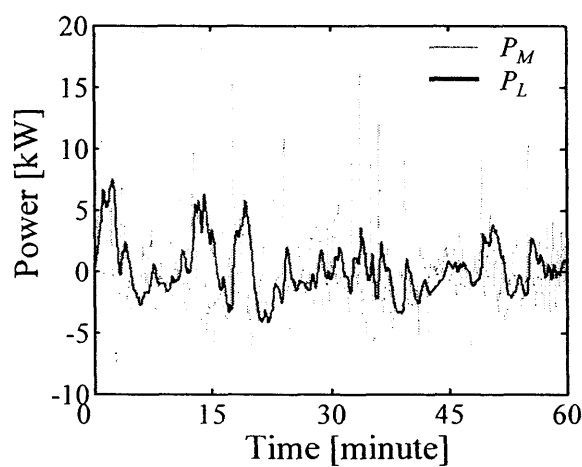
2.6 節でも述べたように、風車から発電される電力には多くの周波数成分が含まれる。図 2.14 から、このとき、風車から発電される電力に含まれる変動の主成分は約 0.1Hz 以下の変動成分であり、低周波の変動が多く含まれている。風車からの発電電力は変動が激しく季節により大きく変動するものであるが、ここでは、図 2.14 に示した発電電力の一例を基に検討をする。

今、図 2.14 に示す風車から発電された電力を 0.001Hz より高い変動成分を平準化すると仮定する。図 2.19(a)に補償に必要な電力 P_{CMP} を示し、図 2.19(c)に P_{CMP} を時間積分し得られる補償エネルギー E_{CMP} 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することができると考えられる。

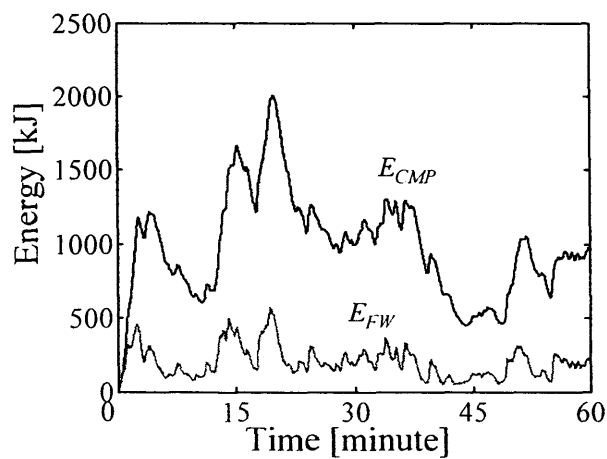
図 2.19(b),(c)に補償対象とする 0.001Hz よりも高い周波数成分のうち FW 電力貯蔵装置で補償対象とする中域成分 P_M と MGT 発電システムで補償対象とする低域成分 P_L を分離する中域分離周波数 f_M を 0.005Hz としたときの補償成分と FW 電力貯蔵装置で補償に必要なエネルギーの変化を示す。図 7(c)から MGT 発電システムで低域成分 P_L を補償することで、FWES で補償するエネルギー E_{FW} の大きさを最大で約 1500kJ 低減できていることが確認できる。また、電力貯蔵装置は電力の蓄放電を行う装置であるため、補償エネルギーの大きさに制限を受ける。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。



(a) 補償に必要な電力



(b) 中域成分 P_M 及び低域成分 P_L



(c) 補償エネルギー

図 2.19 補償電力とエネルギー

2.7.2. 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 29kW 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 15kW から 28kW 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。図 2.20 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。図 2.20 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。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を高周波側へ拡大する必要がある。

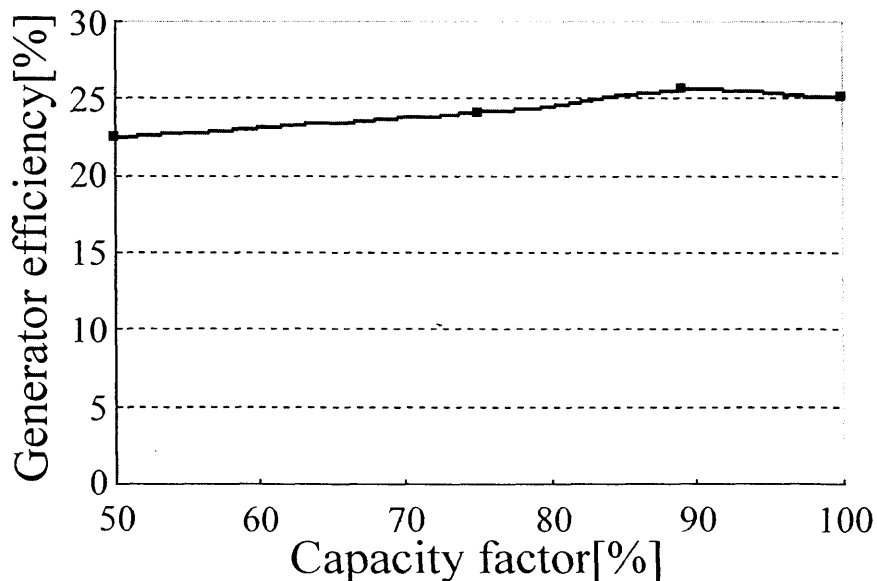


図 2.20 MGT 発電システムの補償効率

2.7.3. 帯域分離周波数の変化による MGT 発電機の稼働率と FW 電力貯蔵装置の容量

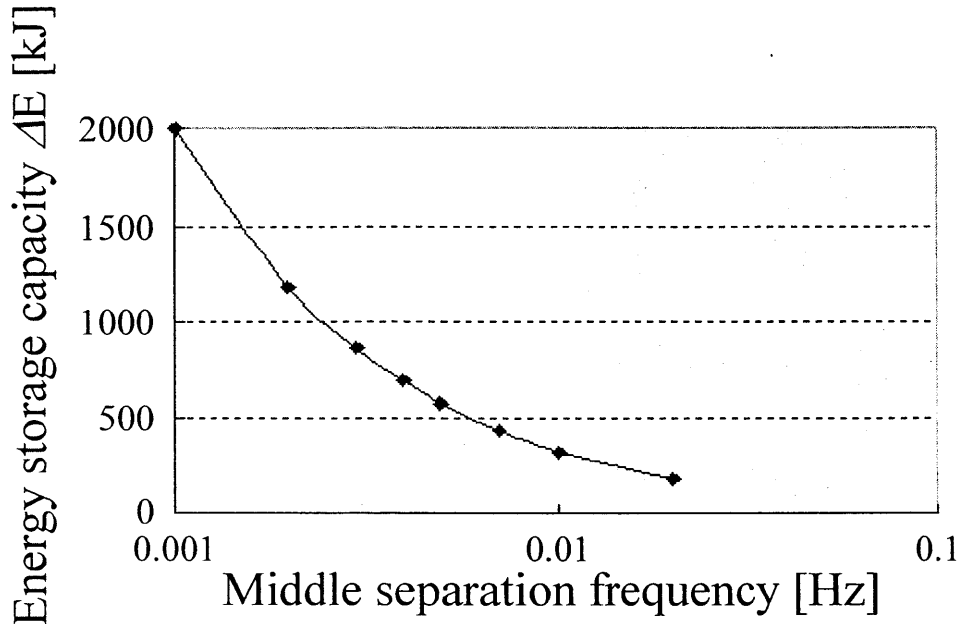
前述のように、提案する自然エネルギーを用いたマイクログリッドでは風力発電の電力平準化を行うにあたり、FW 電力貯蔵装置の補償エネルギーの大きさや、MGT 発電システムの稼働率を考慮する必要がある。そこで、図 2.14(a)に示す風車の発電電力を平準化する際に、2つの帯域分離周波数を変化させることで、FW 電力補償システムで中域成分 P_M を補償する際に必要なエネルギー ΔE_{FW} 及び MGT 発電機で補償対象とする低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L の大きさがどのように変化するか確認した。この結果を図 2.21 に示す。なお、MGT 発電システム及び FW 電力補償システムの応答性を考慮したうえで、低域分離周波数 f_L を 0.002Hz から 0.0005Hz 間で変化させた。また、中域分離周波数 f_M に関しては 0.02Hz 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、(2.1)式から(2.3)式で算出している。

$$E_{FW}(t) = \int P_M(t) dt \dots\dots\dots (2.1)$$

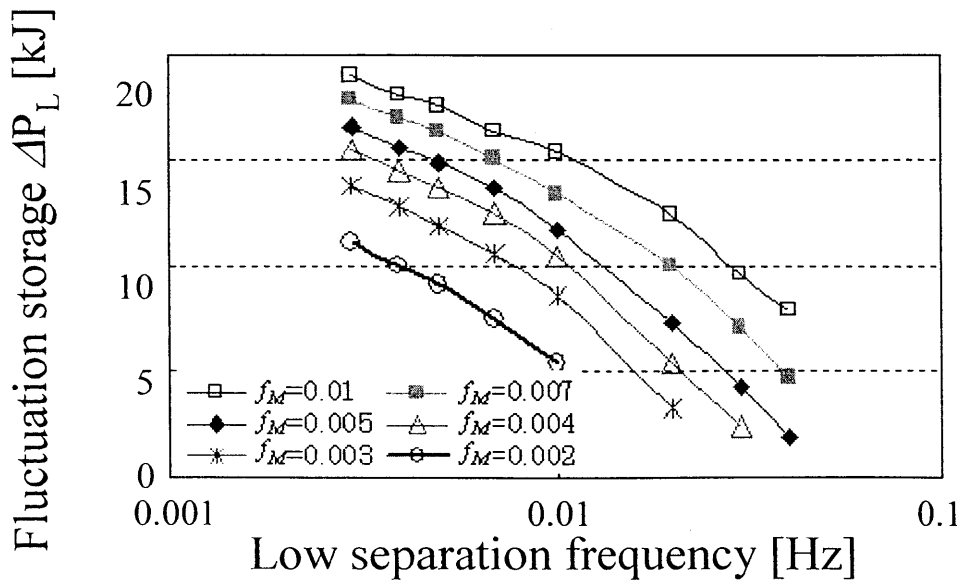
$$\Delta E_{FW} = \max(E_{FW}(t)) - \min(E_{FW}(t)) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\Delta P_L = \max(P_L(t)) - \min(P_L(t)) \dots\dots\dots (2.3)$$

図 2.21(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、図 2.21(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ことが分かる。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、低域分離周波数及 f_L を決定すればよい。



(a) 補償エネルギー ΔE_{FW}



(b) 変動電力 ΔP_L

図 2.21 分離周波数による特性変化

2.7.4. 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、(2.4) 式のように決定すればよい。

$$C = \frac{2 \cdot \Delta E_C}{V_{DC_max}^2 - V_{DC_min}^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

第3章 フィールド実験

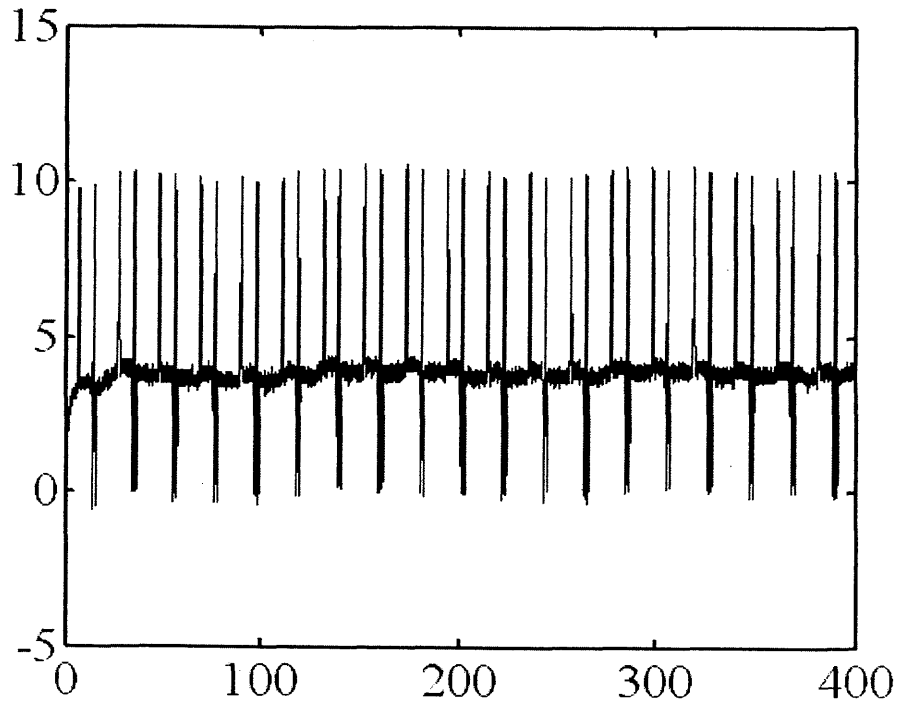
3.1. 実験条件

本研究において図 2.1 のシステムで風車の発電電力の変動の FW 電力補償システム、MGT 発電システムによる抑制効果は前研究者により確認されている。そこで本実験では風車の出力電力だけでなく負荷変動も含めた電力変動の抑制効果の検証を行う。

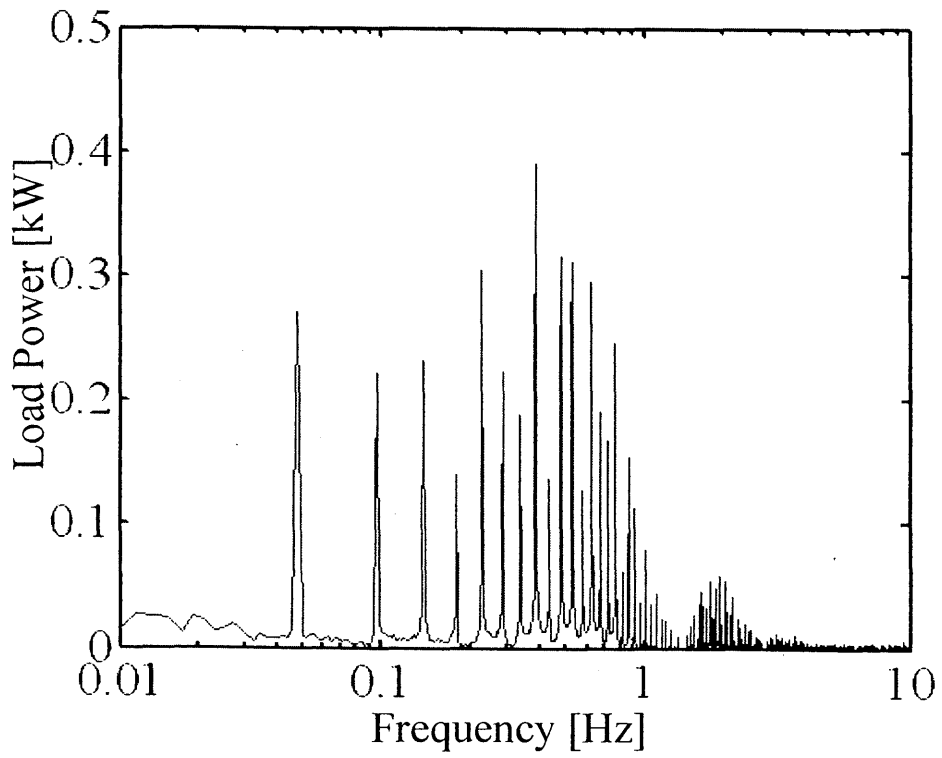
具体的には図 2.1 のシステムにおいて図 3.1 に示す負荷変動データをマイクログリッドの負荷変動に見立て、風力発電電力の変動成分とともに、変動電力を抑制する。このとき、負荷変動データのもつ変動成分の周波数帯域が FW 電力補償システムの補償帯域におもに分布されていることから、MGT 発電システムを用いず、FW 電力補償システムのみ稼働させ抑制を行った。変動電力の周波数分離に用いたローパスフィルタのカットオフ周波数を表 3.1 に示す。

表 3.1 帯域分離周波数

f_H	2
f_M	0.05



(a)負荷電力波形



(b)周波数解析結果

図 3.1 負荷電量データ

3.2. 実験結果及び考察

図 3.2 に今回実験で観測された風力発電システムの出電力を、図 3.3 に風力発電電力と負荷変動データを合わせた変動電力波形を、図 3.4 に系統側から見たマイクログリッドの出電力を示す。

自然エネルギーを用いたマイクログリッドの抑制効果を確認するために図 3.3(a)と図 3.4(a)の電力波形を見比べると変動電力に対して出力電力の変動が小さくなっていることが確認できる。しかし、高周波の成分が増加されているのも確認できる。それぞれの周波数解析結果である図 3.3(b)と図 3.4(b)を見比べると出力電力の方が変動電力に対して 1Hz 以下の成分が抑制され小さくなっているが、それ以上の成分は逆に増幅されて大きくなっていることが分かる。この 1Hz 以上の電力変動が増幅された原因としては FW 電力補償システムの応答遅れがあげられる。

例えば、(3.1)式に示すようなある正弦波の変動電力 P_{FLU} を想定する。そして、この変動電力 P_{FLU} に対して(3.2)式に示す位相遅れ ϕ を伴った補償電力 P_{CMP} を想定する。このとき、供給電力 P_{OUT} は変動電力 P_{FLU} と補償電力 P_{CMP} の和であるため(3.3)式で表される。(3.3)式から、補償電力に生じる位相遅れ ϕ によって供給電力 P_{OUT} の振幅は変化することがわかる。図 3.5 は位相遅れ ϕ の変化による供給電力 P_{OUT} の振幅の変化を表したものである。図 3.5(a)から、補償電力が 30deg 以上の遅れを生じるとその補償効果は半分以下となり、60deg 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。この関係は、図 3.5(b)に示した変動電力 P_{FLU} と補償電力 P_{CMP} そして供給電力 P_{OUT} のベクトル関係からも確認できる。

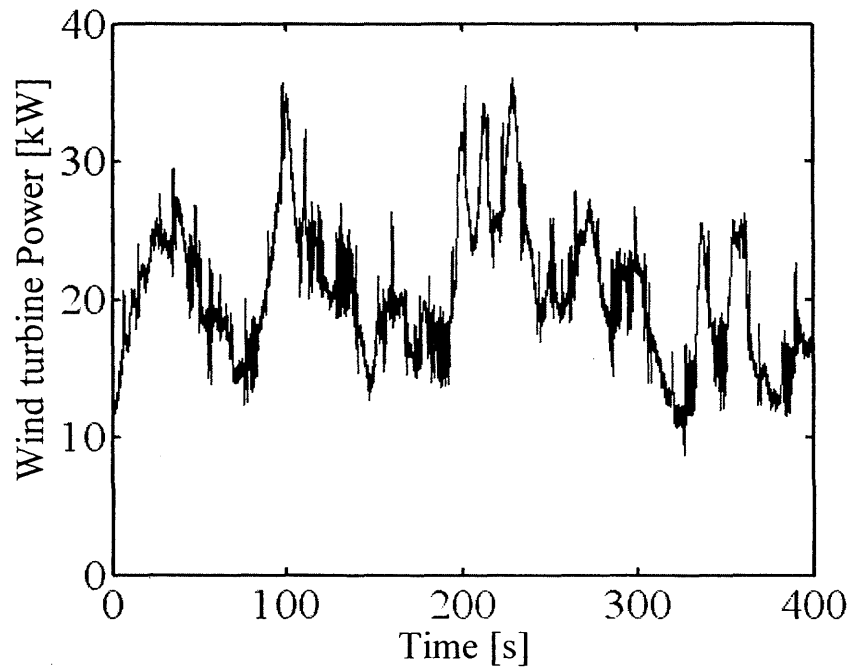
このように補償電力が指令値から遅れたことにより、1Hz 以上の電力が増幅されてしまったものと考えられる。このことからフライホイール電力補償システムの応答性の向上を図るとともに周波数分離フィルタのカットオフ周波数の値を変更する必要があるといえる

$$P_{FLU} = A \sin(2\pi ft) \dots\dots\dots(3.1)$$

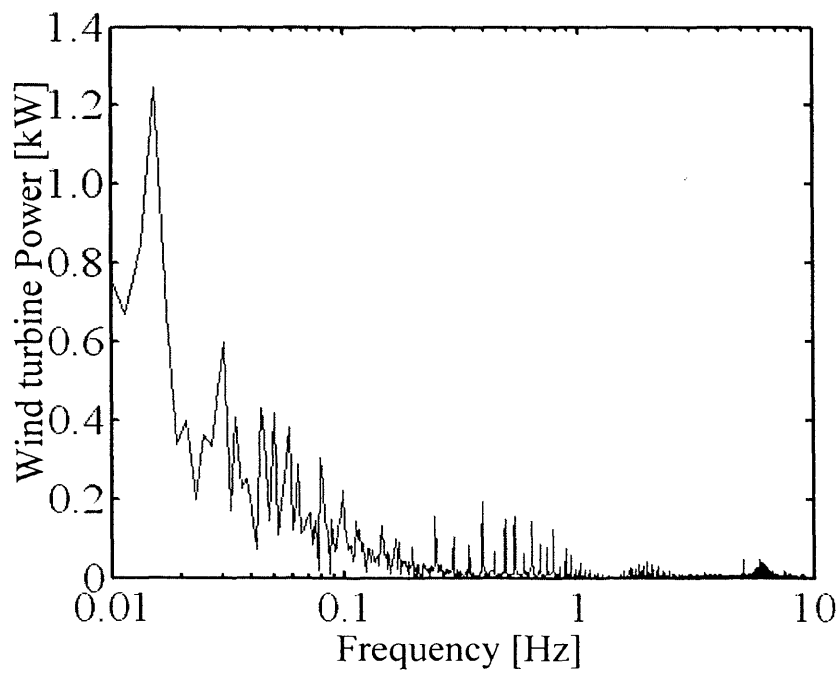
$$P_{CMP} = A \sin(2\pi ft - \pi + \phi) \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\begin{aligned} P_{OUT} &= P_{FLU} + P_{CMP} \\ &= A\sqrt{2(1 - \cos\phi)^{1/2}} \sin(2\pi ft + \alpha) \dots\dots\dots(3.3) \end{aligned}$$

$$\text{ただし, } \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\phi}{1 - \cos\phi}\right)$$

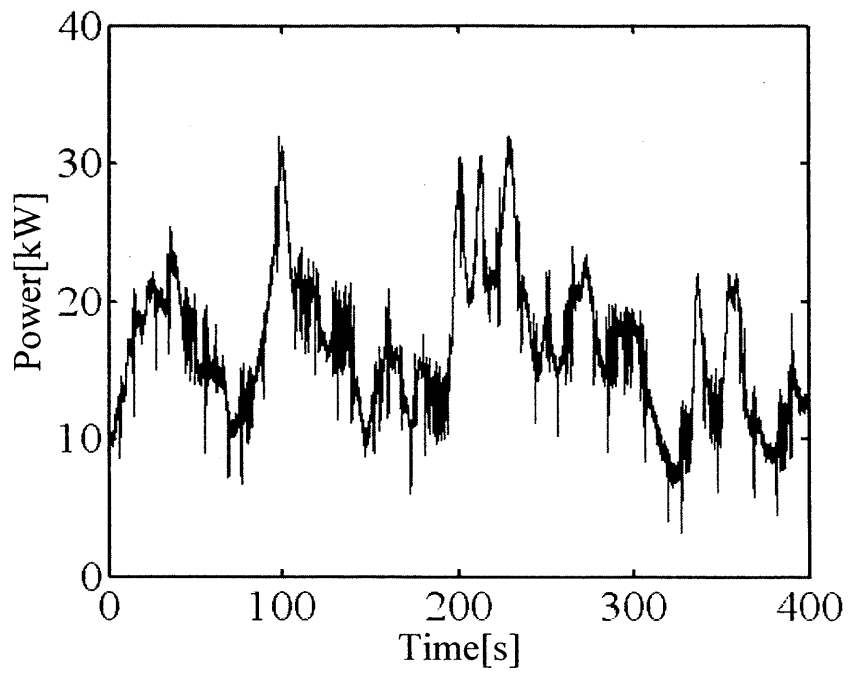


(a)風力発電電力波形

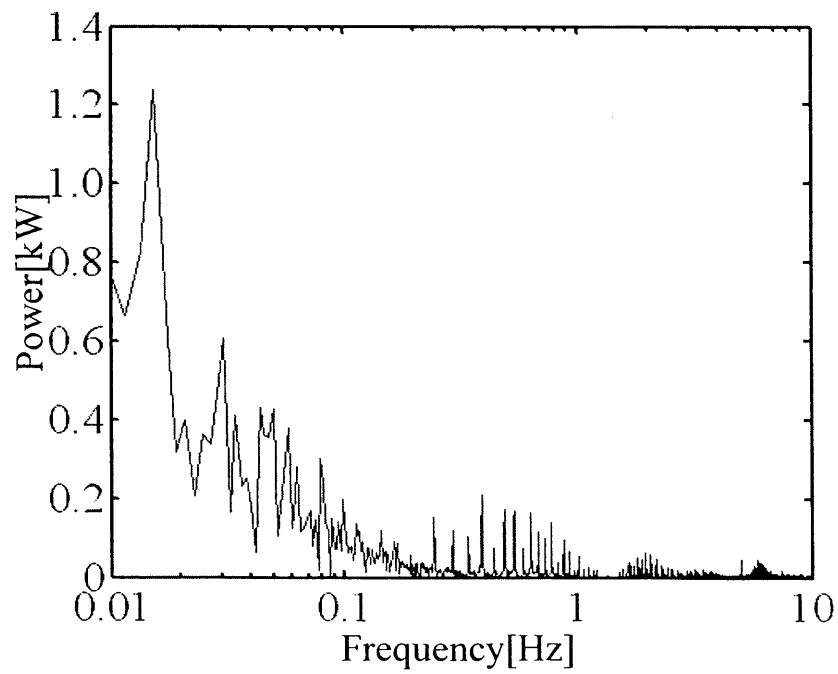


(b)周波数解析結果

図 3.2 風力発電電力

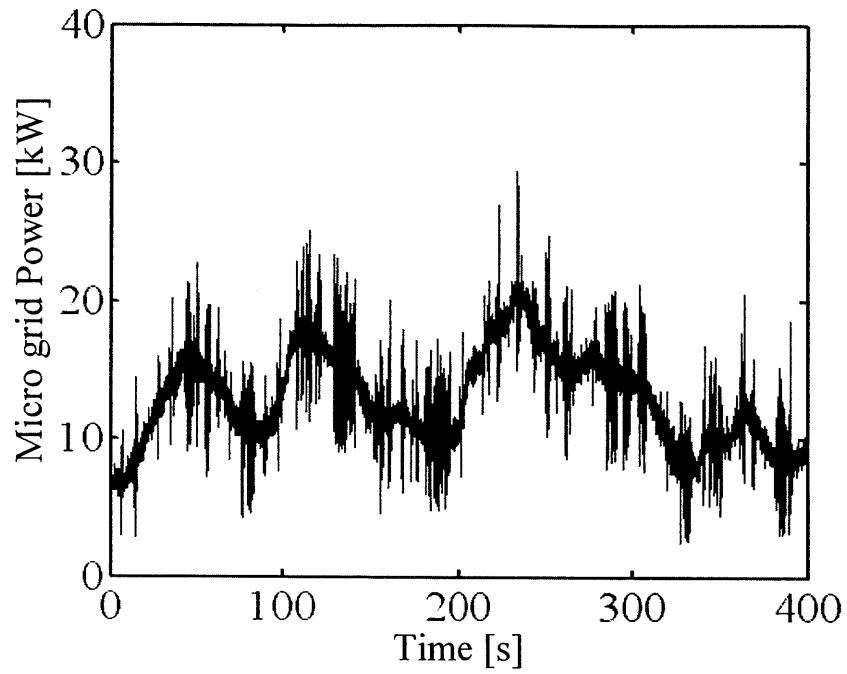


(a)変動電力波形

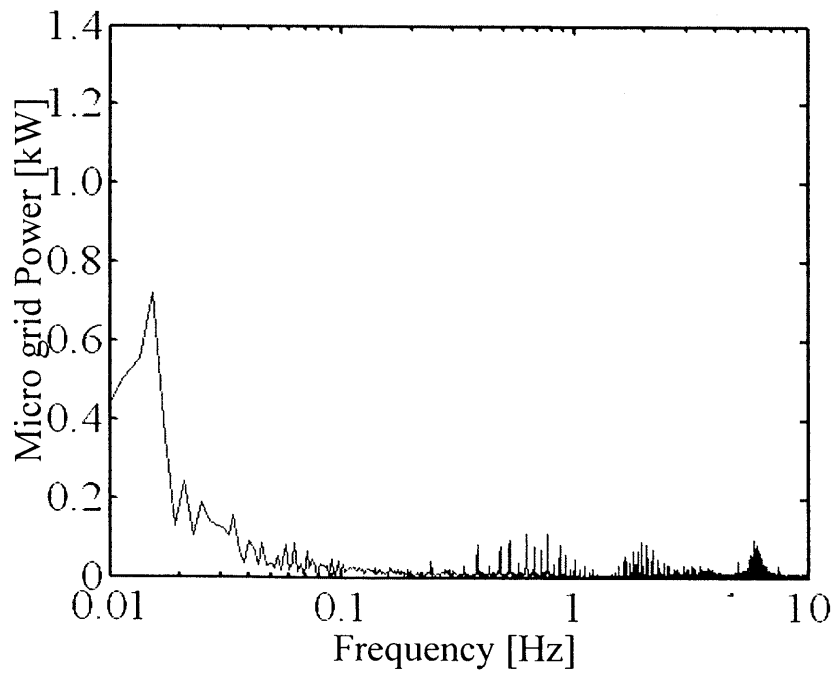


(b)周波数解析結果

図 3.3 変動電力

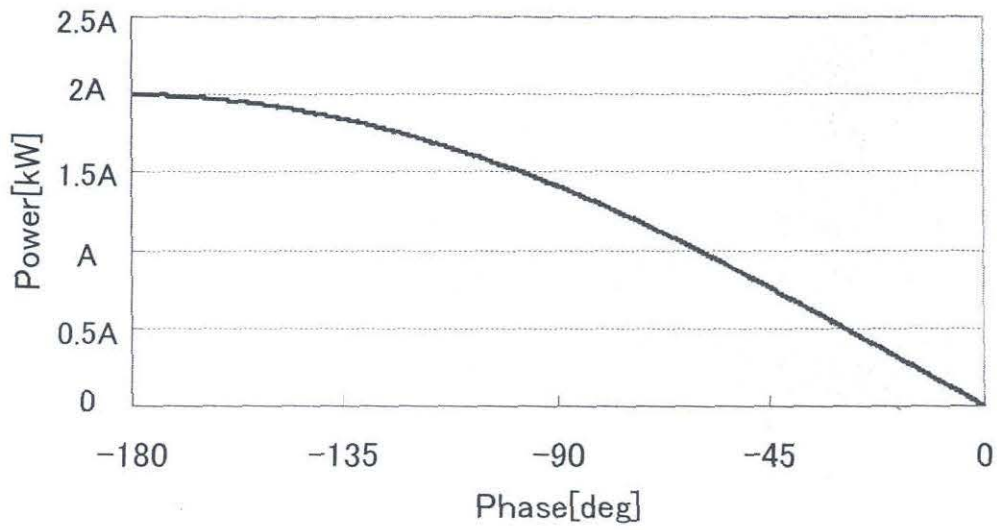


(a) 出力電力波形

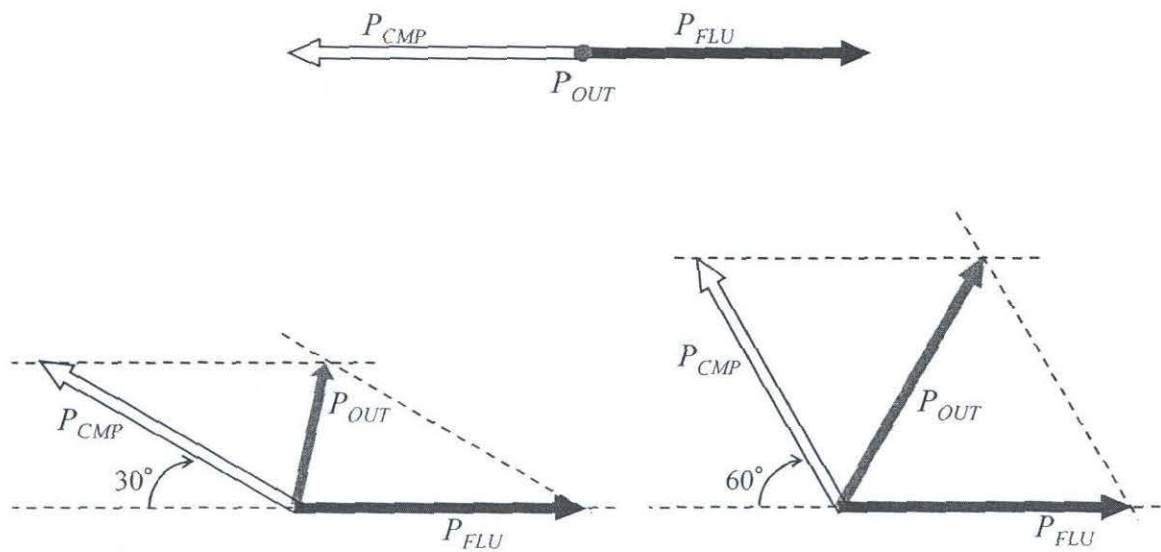


(b) 周波数解析結果

図 3.4 マイクログリッド出力電力



(a)(3.3)式による P_{OUT} の振幅



(b)ベクトル関係における P_{OUT} の振幅

図 3.5 位相遅れによる供給電力 P_{OUT} の振幅の変化

第4章 フライホイール電力補償システムの応答性の向上

4.1. フライホイール電力補償システムの現行制御法

フライホイール電力補償システムの応答性を向上するために本研究ではフライホイール電力補償システムに一次磁束制御法を適用することにより実現する。ここではまず、一次磁束制御法を説明する前に現行の制御法について述べる。

現在、フライホイール電力補償システムではV/f制御法にてフライホイール電力貯蔵装置を制御している。V/f制御法ではフライホイール電力貯蔵装置の一次周波数に出力電圧を比例させ、フライホイール電力補償システムの周波数を制御する方法である。

現行システムではV/f制御法を用いて電圧の周波数振幅を制御することによりトルクを間接的に制御し、出力電力の制御している。現行システムのフライホイール電力貯蔵装置の一次周波数 f_{ref} と電圧 V_{FW} の関係は式(4.1)および図 4.1 に表わされるとおりである。

$$|V_{FW}| = K_v \cdot f_{ref} \tag{4.1}$$

但し, $K_v = 3.5 - (3.5/170)f_{ref}$, $K_{vmax} = 3.5$, $K_{vmin} = 1.67$

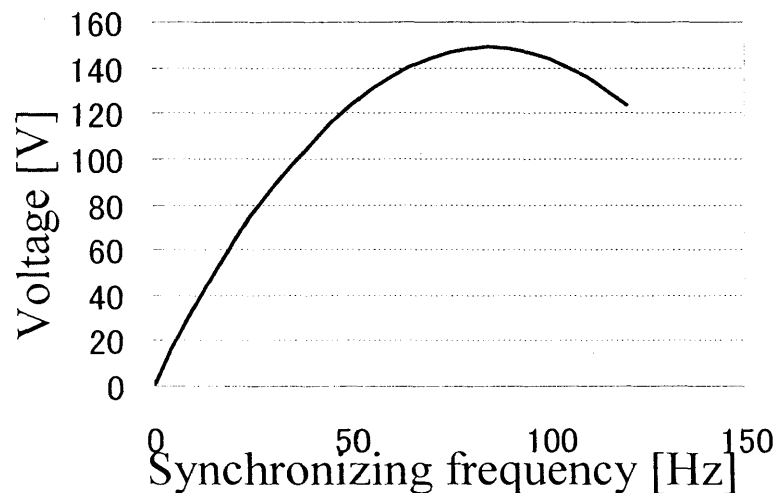


図 4.1 同期周波数と電圧の関係

4.2. 一次磁束制御法

一次磁束制御法とは固定子の γ 軸磁束を0に δ 軸磁束を一定に保つことにより、トルクと固定子の γ 軸電流の関係が比例することを用いた制御法である。以下に詳しい理論を示す。

図4.2に誘導機の駆動系を示し、図4.3に一次角周波数 ω_1 で回転する γ - δ 軸座標系を示す。そして、(4.2)式に γ - δ 軸座標系で表した誘導機の電圧方程式を示す。ここで、(4.2)式における各シンボルは下記のものである。

- | | |
|---|---|
| R_1 : 1次巻線抵抗 | R_2 : 2次導体抵抗 |
| L_1 : 1次巻線インダクタンス | L_2 : 2次導体インダクタンス |
| M : 相互インダクタンス | ω_1, ω_2 : 1次, 2次角周波数 |
| P : 微分演算子 | v_γ, v_δ : 1次側 γ, δ 軸電圧 |
| $i_{1\gamma}, i_{1\delta}$: 1次側 γ, δ 軸電流 | $i_{2\gamma}, i_{2\delta}$: 2次側 γ, δ 軸電流 |

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1P & L_1\omega_1 & MP & M\omega_1 \\ -L_1\omega_1 & R_1 + L_1P & -M\omega_1 & MP \\ MP & -M\omega_1 & R_2 + L_2P & L_2\omega_2 \\ M\omega_2 & MP & -L_2\omega_2 & R_2 + L_2P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\gamma} \\ i_{1\delta} \\ i_{2\gamma} \\ i_{2\delta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4.2)$$

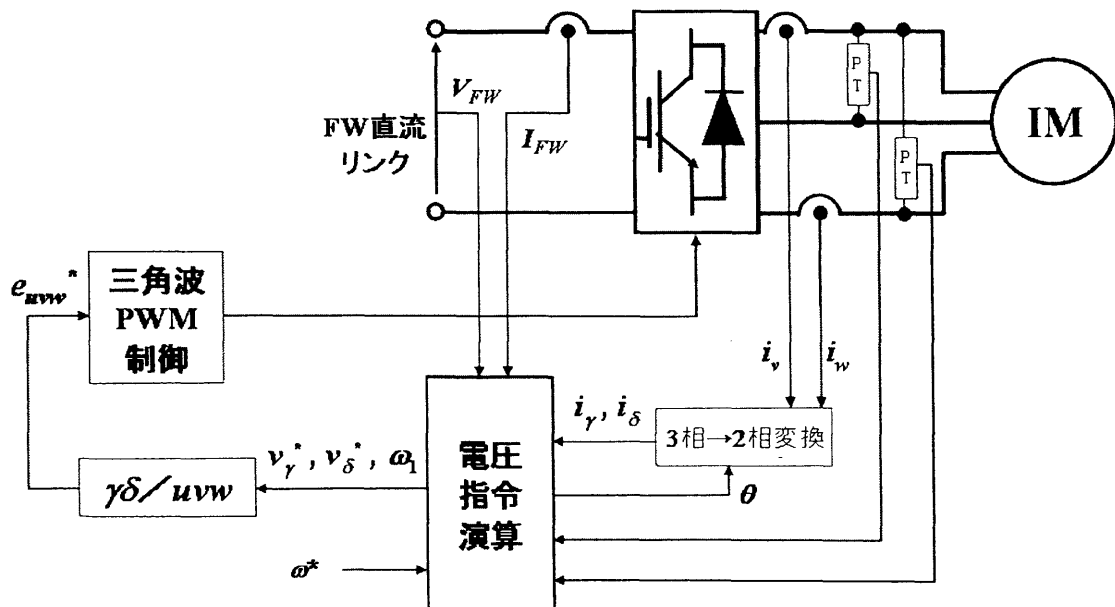


図4.2 誘導機駆動系

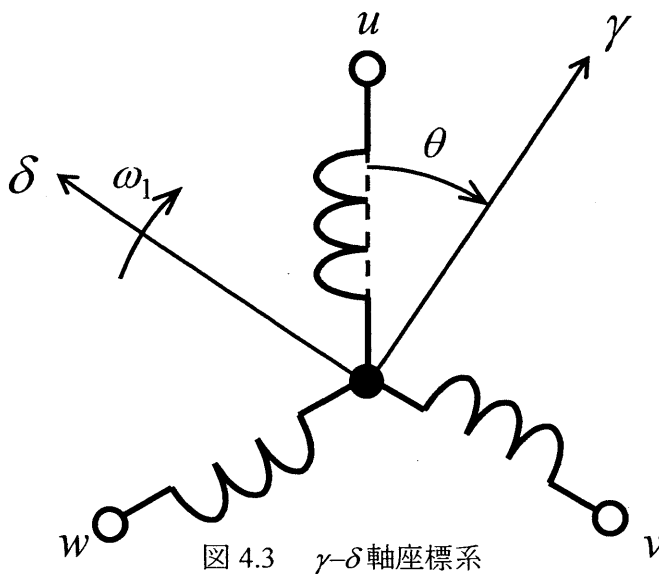


図 4.3 γ - δ 軸座標系

図 4.3 のように角速度 ω_1 で回転する回転座標系で、回転磁界の δ 軸方向をとり、これに直交する方向に γ 軸をとる。このとき、一定の強さで回転磁界が作られていれば一次磁束鎖交数の γ 、 δ 軸成分 $\lambda_{1\gamma}$ 及び $\lambda_{1\delta}$ はそれぞれ(4.3)式のように 0 と一定値になる。

$$\lambda_{1\gamma} = 0, \quad \lambda_{1\delta} = \Lambda_{1\delta} \dots\dots\dots (4.3)$$

また、1 次磁束鎖交数の γ 、 δ 軸成分 $\lambda_{1\gamma}$ 及び $\lambda_{1\delta}$ は電流 $i_{1\gamma}$ 、 $i_{1\delta}$ 、 $i_{2\gamma}$ 、 $i_{2\delta}$ を用いたとき(4.4)式で表すことができる。したがって、(4.3)式のように制御を行った場合、発生トルクは (4.5) 式で表すことができ、1 次側 γ 軸電流に比例したトルク τ を得ることができる。

$$\lambda_{1\gamma} = L_1 i_{1\gamma} + M i_{2\gamma}, \quad \lambda_{1\delta} = L_1 i_{1\delta} + M i_{2\delta} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$\begin{aligned} \tau &= n_p M (i_{2\delta} i_{1\gamma} - i_{2\gamma} i_{1\delta}) = n_p (\lambda_{1\delta} i_{1\gamma} - \lambda_{1\gamma} i_{1\delta}) \\ &= n_p \Lambda_{1\delta} i_{1\gamma} \dots\dots\dots (4.5) \end{aligned}$$

一次磁束鎖交数 $\lambda_{1\gamma}$ 及び $\lambda_{1\delta}$ は、冗長をなくすため λ_γ 及び λ_δ と表記する。今、一次磁束鎖交数 λ_γ 及び λ_δ 、そして磁束指令 Λ_δ は電流次元で考えるため以降(4.6)式に置き換える。

$$\lambda'_\gamma = \lambda_\gamma / L_1, \quad \lambda'_\delta = \lambda_\delta / L_1, \quad I_\delta = \Lambda_\delta / L_1 \dots\dots\dots (4.6)$$

一次磁束制御法において、制御目的は $\lambda'_\gamma \rightarrow 0$, $\lambda'_\delta \rightarrow I_\delta$ であるため微少量 $\hat{\lambda}'_\gamma = \lambda'_\gamma$ 及び、 $\hat{\lambda}'_\delta = \lambda'_\delta - I_\delta$ を定義する。このとき、(4.2)式の第1, 2行は(4.7)式で表せる。

$$P \begin{pmatrix} \hat{\lambda}'_\gamma \\ \hat{\lambda}'_\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 \\ \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\lambda}'_\gamma \\ \hat{\lambda}'_\delta \end{pmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{pmatrix} v_\gamma - R_1 i_\gamma - L_1 \omega_1 I_\delta \\ v_\delta - R_1 i_\delta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.7)$$

そして、(5.4)式 3, 4 行, (4.4), (4.7)式から計算することによって誘導機に与える電圧指令値 v_γ^* , v_δ^* 及び一次角周波数 ω_1 は(4.8)式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} v_\gamma^* &= R_1 i_\gamma + L_1 \omega_1 I_\delta \\ v_\delta^* &= R_1 i_\delta + K_i (i_\delta^* - i_\delta) \\ i_\delta^* &= \{(1 + \sigma) I_\delta - \sqrt{(1 - \sigma)^2 I_\delta^2 - 4\sigma^2 i_\gamma^2}\} / (2\sigma) \\ \omega_1 &= n_p \omega_m^* + \frac{1}{1 + T_\omega P} \frac{\chi_2}{I_\delta - \sigma i_\delta} i_\gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、

- σ : 漏れ係数 ($1 - M^2 / L_1 L_2$)
- χ_2 : R_2 / L_2
- n_p : 極対数
- ω_m^* : 速度指令値
- I_δ : δ 軸磁束指令値
- $1 / (1 + T_\omega P)$: 一次遅れ要素の伝達関数
- K_i : フィードバックゲイン

である。

ω_m^* は速度指令値に相当する項であり、いま、 ω_{m0} で運転しているモータを ω_{m1} で回転させようとしたとき図 4.4 のように加速期間 T_a を設け、ランプ状に変化する速度指令値 ω_m^* を入力する。また、この式の右辺第 2 項は、すべり角周波数 ω_2 であり、 ω_1 の急激な変化を抑えるために一次遅れ要素を加えている。

上述のように一次磁束制御法は速度制御系に関してはオープンループで構成される。本研究で使用する(株)日本フライホイール製フライホイール電力貯蔵装置はその構造上、速度センサを取り付けることができない。したがって、ベクトル制御のように速度情報を必須とする制御方法に比べ適した制御法であると考えられる。

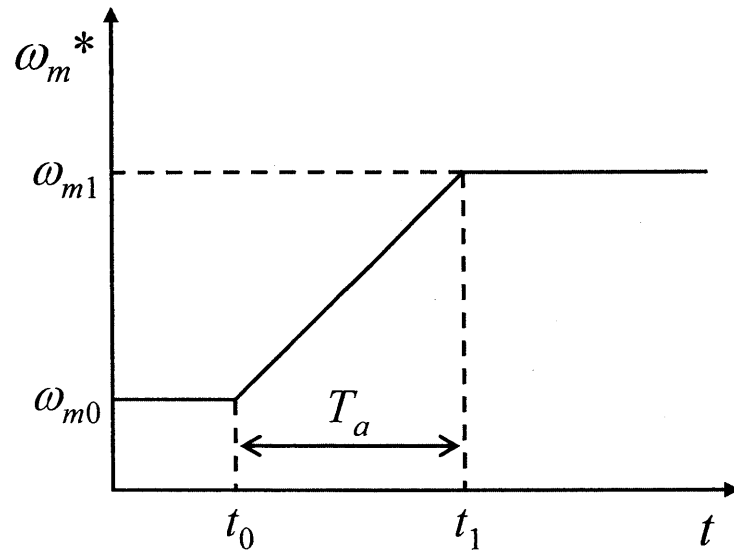


図 4.4 速度指令値 ω^*

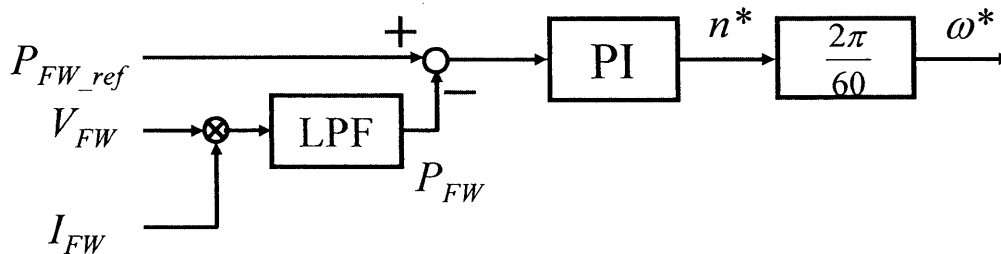


図 4.5 電力制御系への拡張ブロック

一次磁束制御法は本来、電動機のトルク制御および速度制御を目的とし適用されている。しかし、本研究では誘導機から入出力する電力を制御対象としている。したがって、一次磁束制御を電力制御系に拡張する必要がある。そこで、図 4.5 に示す制御ブロックのように、外部から入力された電力指令値 P_{FW_ref} とフライホイール直流リンク電圧 V_{FW} 及び電流 I_{FW} の乗算で求めた補償電力 P_{FW} との誤差を積分ゲイン K_{IFW} 、比例ゲイン K_{PFW} の PI 制御器に入力しこの誤差が最小となるように回転速度指令値 n^* [rpm]を作成する。そして、これから角速度指令値 ω^* [rad/s]を作成し、この角速度指令値 ω^* (4.8)式に入力することで電力制御系に拡張する。

また、本研究では、補償電力を制御対象としている。ここで、回転機において電力はトルク τ と回転角速度 ω の積であるため、回転数が低い状態で定格電力を得るためには大きなトルク τ が必要である。また、トルクは二次電流と磁束(励磁電流)の積に比例する。このため、電流が過大になることを防ぎ、高電力を得るためには二次電流だけでなく励磁電流も大きくする必要がある。そこで、フライホイール電力貯蔵装置の回転数によらず、二次電流の大きさによって電力を制御可能にするため、磁束指令値 I_δ は定格無負荷電流 $I_{\delta 0}$ を用い、一次周波数 f_1 に応じて(4.9)式のように変化させる。

$$I_\delta = \frac{120}{f_1} I_{\delta 0} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

一次磁束制御法では(4.8)式に示すように制御パラメータとして誘導機のモータ定数を使用する。使用するフライホイール電力貯蔵装置は回転子が完全に密閉されているため拘束試験をすることができない。このため、一部のモータ定数を測定することができない。そこで、モータ定数の設計値と無負荷試験によってモータ定数を算出する。モータの設定値は一次側巻線抵抗 R_1 が 0.1372Ω であり二次導体抵抗の一次換算値 R_2 は 0.01254Ω であり、一次及び二次の漏れリアクタンスの和 $l_1 + l_2$ が 0.834mH であり、慣性モーメント J が 21.72kg m^2 である。また、定格電圧 $V_n (=200\text{V})$ 、定格周波数 $f_n (=120\text{Hz})$ によってフライホイール電力貯蔵装置を駆動させたときに得られた定格無負荷電流 $I_{\delta 0}$ は 12.0A であった。ここで、定常状態及び無負荷運転時における誘導機の等価回路は図4.6のように描ける。このため、無負荷時の誘導電動機のインピーダンス Z_{IM} は(4.10)式及び(4.11)式のように表せる。また、一次巻線インダクタンス L_1 と一次巻線漏れインダクタンス l_1 、励磁インダクタンス M の間には(4.12)式の関係が

$$Z_{IM} = (V_n / \sqrt{3}) / I_{\delta 0} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

$$Z_{IM} = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

$$L_1 = l_1 + M \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

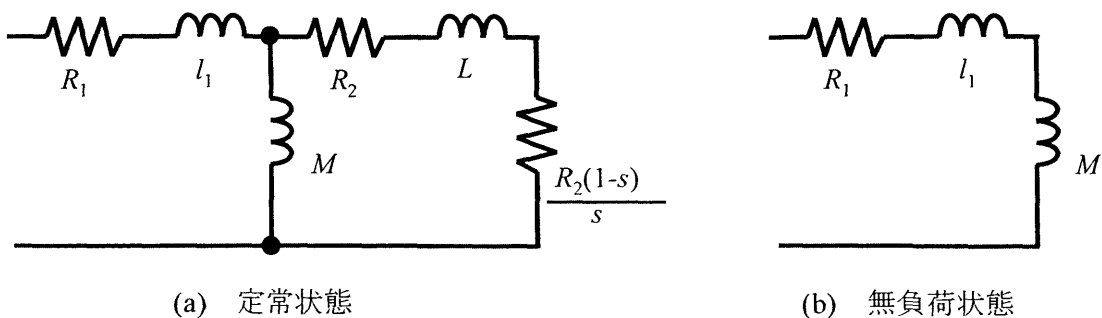


図 4.6 誘導機等価回路

成立するため、(4.10)式から無負荷運転時の誘導電動機のインピーダンスは 9.62Ω である。そして、一次巻線抵抗 R_1 は 0.1372Ω と誘導電動機のインピーダンス Z_M に比べ十分小さいため、 $Z_M \approx \omega L$ と近似すると一次巻線インダクタンス $L_1=12.76\text{mH}$ となる。そして、一次及び二次漏れインダクタンスの和 l_1+l_2 が 0.834mH であるため、巻数比が $1:1$ と仮定し一次側の漏れインダクタンス $l_1=0.417\text{mH}$ とする。一次巻線インダクタンス L_1 と一次巻線漏れインダクタンス l_1 、励磁インダクタンス M の間には(4.12)式の関係が成立するため、励磁インダクタンス $M=12.35\text{mH}$ とする。以上のように決定したフライホイール電力貯蔵装置で用いる誘導機のモータ定数を表 4.1 に示す。

表 4.1 フライホイール電力貯蔵装置の誘導機定数

一次巻線抵抗 R_1	0.1372[Ω]
二次導体抵抗 R_2	0.01254[Ω]
一次巻線漏れインダクタンス l_1	0.417[mH]
二次漏れインダクタンス l_2	0.417[mH]
励磁インダクタンス M	12.35[mH]
慣性モーメント J	21.72[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

4.3. シミュレーションによる速度指令値の変化率上限の適正值検出

4.2 節で説明した速度指令値の変化率上限の適正值をシミュレーションにより検出した。シミュレーションソフトには Power sim 社の PSIM7.1 を用いた。図 4.7 にシミュレーションに用いた回路を示す。このときフライホイール電力貯蔵装置のパラメータには表 4.1 と同様の値とし、フィードバックゲインは $K_i=4$ 、積分ゲイン、比例ゲインは V/f 制御法適用時と同様の $K_{JFW}=0.00002$ 、 $K_{PFW}=0.04$ とした。

上記の回路条件で一次磁束制御法で制御されたフライホイール電力貯蔵装置に 5kW の電力指令値を与え、速度指令値の変化率上限を変えながら δ 軸電流指令値と δ 軸電流を観測した。各変化率上限における δ 軸電流指令値 i_{sref} と δ 軸電流 i_s を図 4.7 に示す。図 4.7 を見ると速度指令値がどの変化率上限のときも δ 軸電流が δ 軸電流指令値に 12s からの数百 ms を除き追従しているのが見て取れる。しかし 7000rpm/s のときは δ 軸電流指令値が式(4.8)の三行目の平方根内が 0 以上であるという条件からもたらされる指令値の最大値である 84.5A に達していることが確認できる。これは図 4.5 における ω^* の変化量が速度指令値の変化率上限を超えてしまったために i_s の上昇が緩やかなため、 ω^* の PI ゲインの積分項が大きくなりすぎたために起きたものだと考えられる。また、10000rpm/s のときは逆に PI ゲインによってもたらされる速度指令値の急激な変化によって δ 軸電流指令値が 8000, 9000rpm/s のときよりも振れ幅が大きくなっていることが確認できる。

このことから、本研究ではフライホイール電力貯蔵装置の速度指令値の変化率上限に 9000rpm/s を適用する。

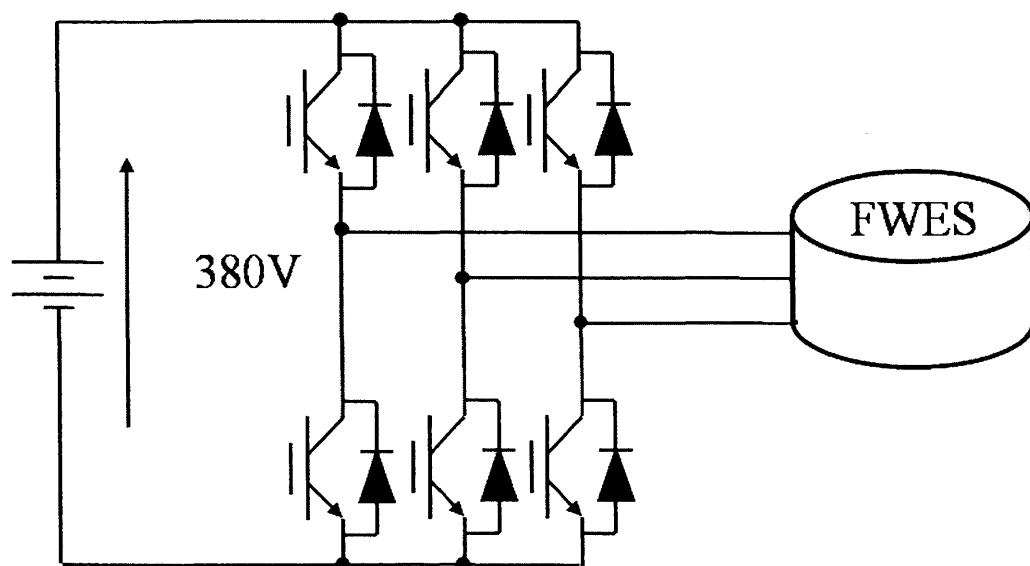
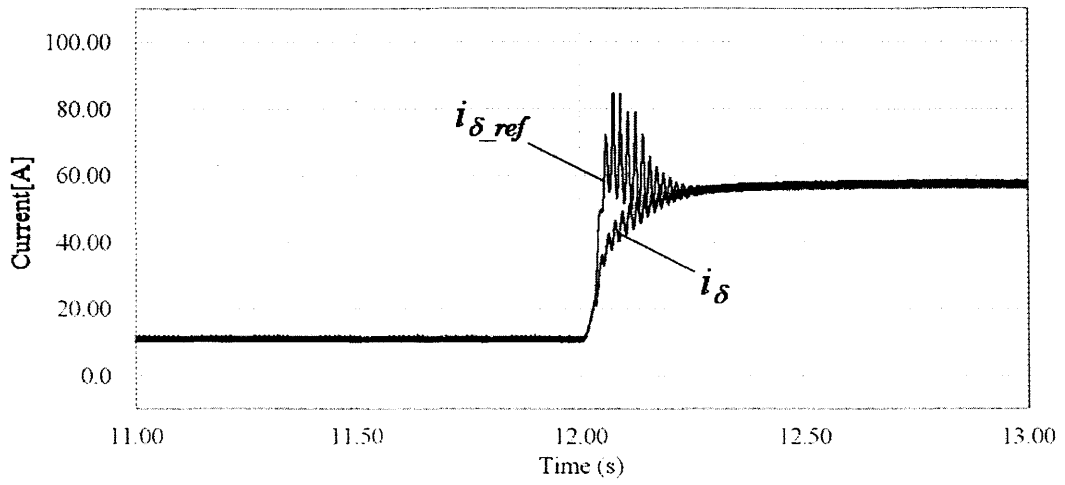
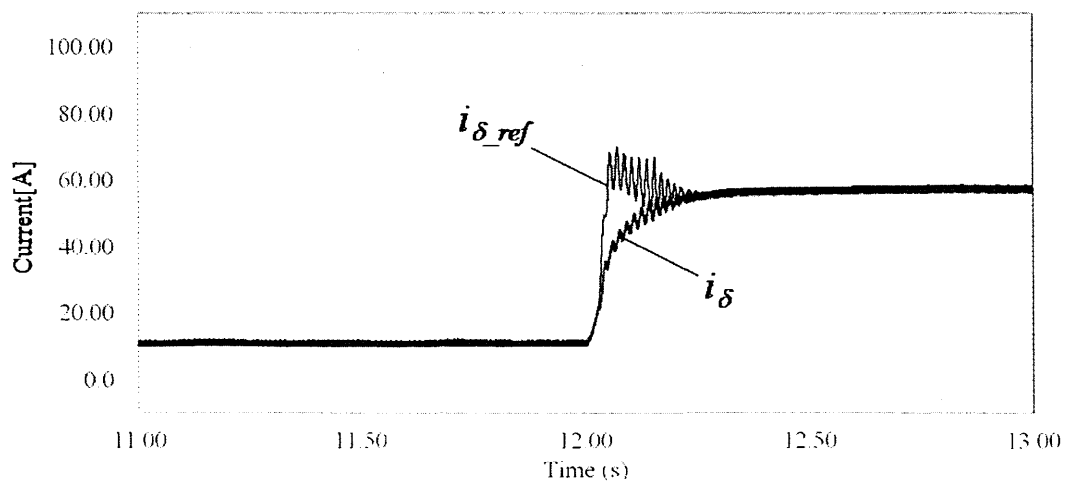


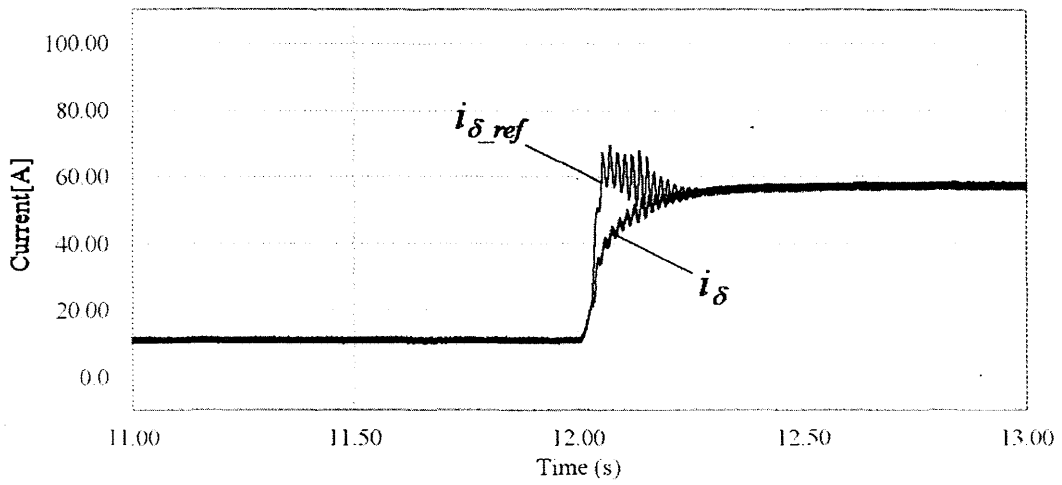
図 4.7 シミュレーション回路



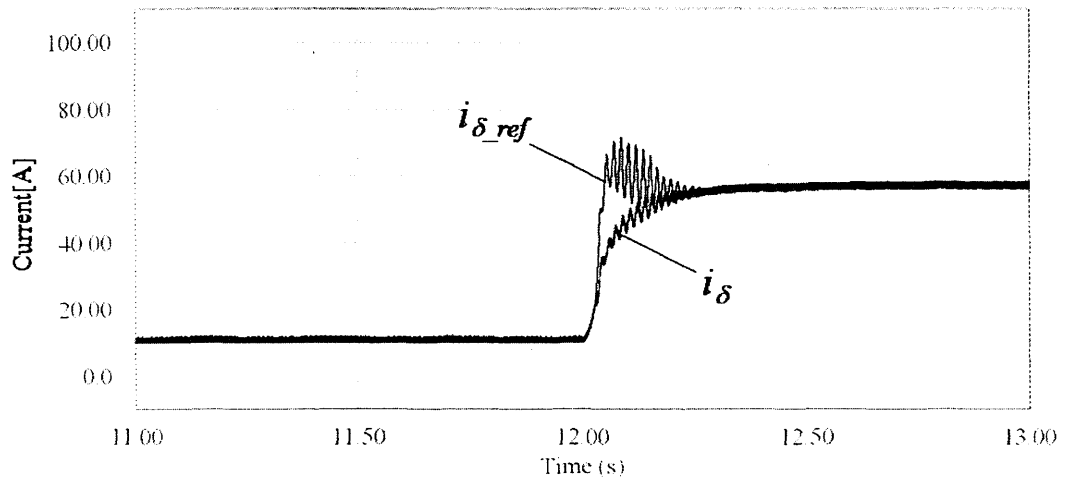
(a)7000rpm/s



(b)8000rpm/s



(c)9000rpm/s



(d)10000rpm/s

図 4.7 δ 軸電流指令値 i_{δ_ref} と δ 軸電流 i_{δ}

第5章 模擬実験システムによる従来制御法との比較実験

5.1. 模擬実験システム

本研究では一次磁束制御法を適用したフライホイール電力貯蔵装置とV/f制御法を適用したフライホイール電力貯蔵装置の電氣的応答を比較するために模擬実験システムを用いて検証する。

模擬実験システムは農場に設置されている複合型自然エネルギー発電システムにおける風力発電システムとフライホイール電力補償システムを模擬する実験システムである。主に農場における風力発電システムを模擬する変動電力模擬システムは直流電動機と直流発電機、昇圧チョッパ、そしてDSPによって構成される。まず、系統電源によって直流発電機とカップリングされた電動誘導機を回転させることで直流電力を発電させる。そして、DSP3により昇圧チョッパのスイッチングパターンを制御することにより、図5.1中の直流電圧 V_{EW} 及び電流 I_{EW} を乗算することで求められる発電電力 P_{EW} を制御し、フィールド実験システムにおける風力発電電力と負荷変動電力を模擬する。また、DSP3ではセンサによって取り込み計測した発電電力 P_{EW} からフライホイール電力補償システムへの電力補償指令値を作成し出力する。表5.1に使用する誘導電動機と直流発電機の仕様を示す。

表 5.1 電動機・発電機の定格

	直流機	誘導機
TYPE	三菱電機 SDN-CFZ	三菱電機 SF-JR
定格容量 [kW]	5.5	3.7
定格電圧 [V]	210	220
定格電流 [A]	33	13.4
定格回転数 [rpm]	1750	1730
定格周波数 [Hz]	-	60
極数	4	4
絶縁	F種	E種

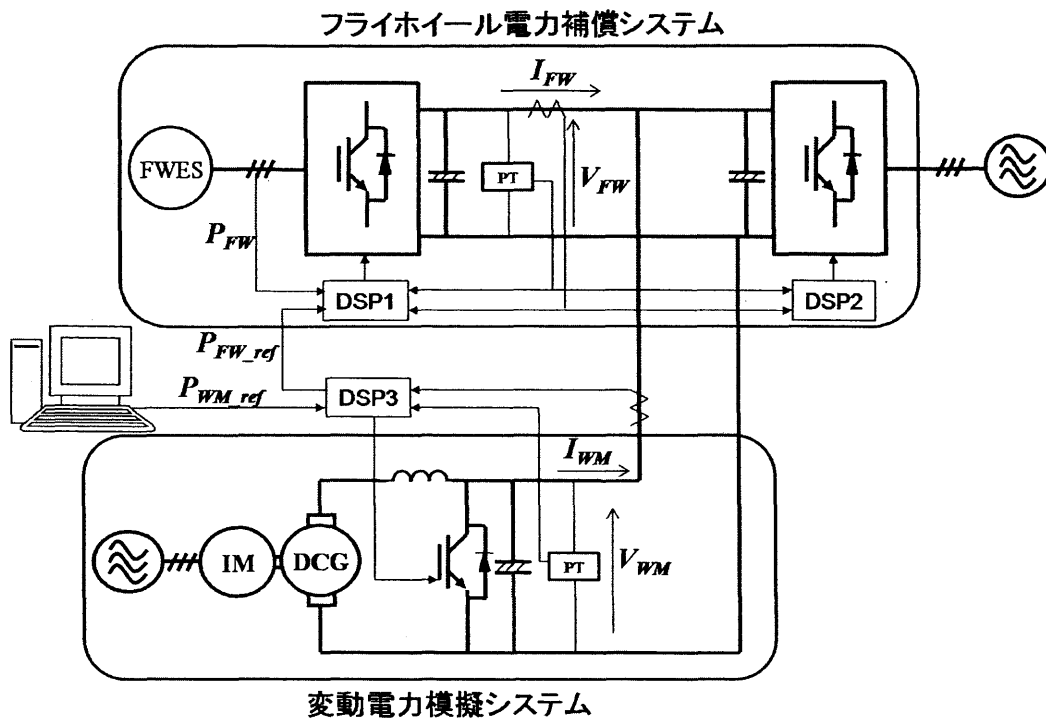


図 5.1 模擬実験システム

フライホイール電力補償システムは一台のフライホイール電力貯蔵装置とこれを制御するインバータ、商用電源に接続するための連系インバータそして、これら電力変換器のスイッチングを制御する二台の DSP によって構成される。また、本システムはフィールド実験システムと同様に、(株)マイウエイ技研によって作成された駆動装置であり、フライホイール制御インバータと系統連系インバータそして二つの DSP は一つの装置としてユニット化されている(以降フライホイール駆動制御装置)。DSP2 では系統連系制御が実行され、直流リンク電圧がほぼ一定(=350V)かつ力率が 0.98 以上になるように制御される。そして、DSP1 では外部アナログ端から入力される電力補償指令値 P_{FW_ref} に対して、直流リンク電圧 V_{FW} と電流 I_{FW} を乗算することで算出される補償電力 P_{FW} が追従するような制御が実行される。また、フライホイール電力貯蔵装置は農場システムと同様に、(株)日本フライホイール製の 10kW のものを用いる。そして、農場システムと異なる点は系統連系インバータがフライホイール電力補償システム側にあることと、フライホイール電力補償システムにおいて直流チョッパを用いていないことである。したがって、この模擬実験システムにおいて直流チョッパを用いない場合を想定した応答性の検証が可能である。

変動電力模擬システムの電力指令値は過去にフィールド実験システムで測定した発電電力データを利用する。しかし、風力発電システムの直流チョップを制御する DSP1 には数万点に及ぶ発電電力データを保存させることができない。したがって、模擬実験システムでは、パソコンで Visual Basic6.0 を用いて過去の風力発電データを読み込み、風力発電模擬システムへの発電電力指令値を作成しインターフェイス製の AD・DA 変換ボード PCI-3523A を経てパソコンから DSP3 に入力される。

また、風力発電模擬システムでは、定格容量 3.7kW の誘導電動機によって直流発電機を回転させる。したがって、直流発電機から定常的に発電可能な電力は 4.5kW 程度である。実際にフィールド実験システムの風力発電機から発電される電力の最大値は発電量が高い場合で 20kW から 25kW 程度であった。このため、模擬実験システムではフィールド実験システムの 1/4 から 1/5 倍の実験規模となる。図 5.2 に風力発電機からの発電電力を模擬した発電電力波形を示す。この波形は図 4.4 に示した過去にフィールド実験システムにおいて測定した風力発電機から出力電力データを基にこれを 1/4 倍して作成している。図 5.2(a)から模擬実験システムにおいて発電される電力は、図 5.2(b)に示すフィールド実験システムにおいて得られた風力発電機の発電電力と比べると、フィールド実験システムから得られたデータはその時間刻みが約 15.6ms であるのに対し模擬実験システムにおける Visual Basic6.0 で作成する制御プログラムの制御周期は約 16.0ms と時間刻みにずれがあるため図 5.2(a)の波形は図 5.2(b)のものとは比べ、わずかに遅れが生じている。しかし、このわずかな違いを除いては、概形は模擬できていると考える。また、図 5.2(c)、図 5.2(d)から、周波数分布においてもほぼ 1/4 倍に縮小した結果が得られていることが確認できる。したがって、模擬実験システムにおいてもフィールド実験システムの再現実験が可能であると考えられる。

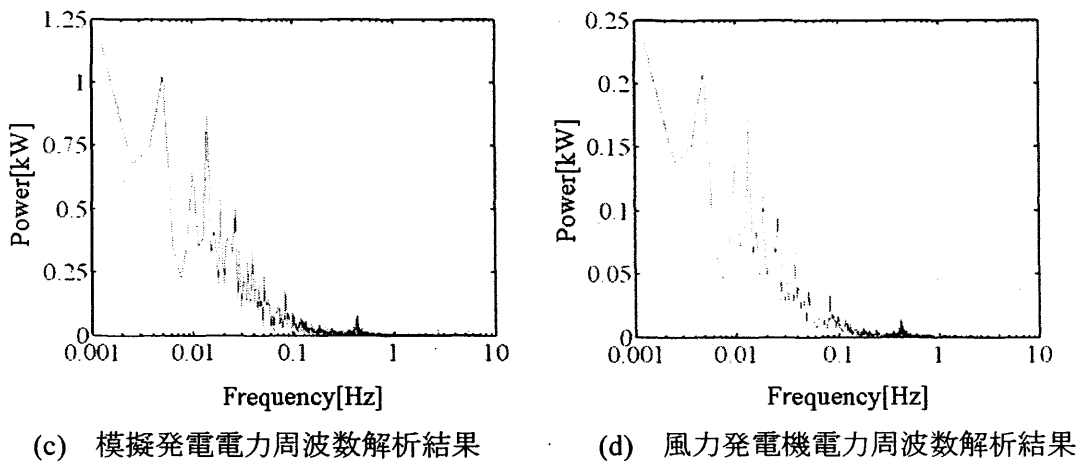
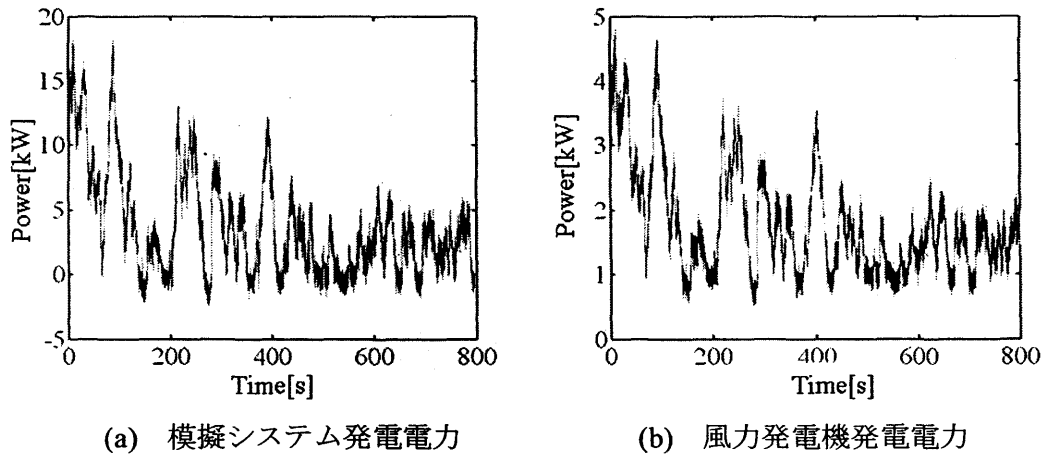


図 5.2 模擬システム及び風力発電機の発電電力

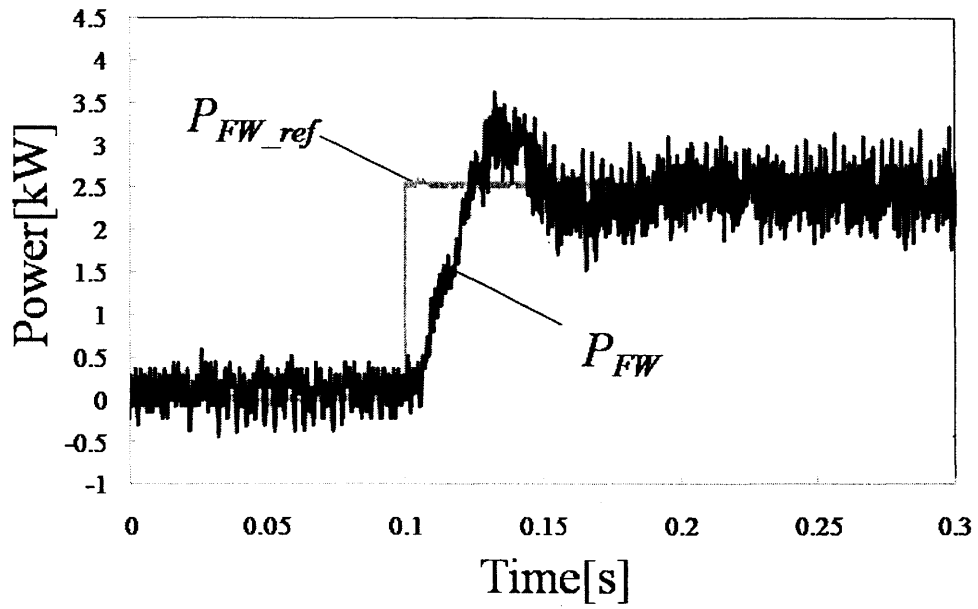
5.2. ステップ応答

図 5.1 の模擬実験システムのフライホイール電力補償システムに一次磁束制御法を適用し、電力指令値 P_{FW_ref} として 0-2.5kW の step 指令値を与え、従来制御法時との比較を行った。一次磁束制御法適用時と V/f 制御法適用時の実験結果を図 5.3 に示す。また、この時の電力フィードバックゲインは $K_{JFW}=0.00002$ 、 $K_{PFW}=0.04$ である。

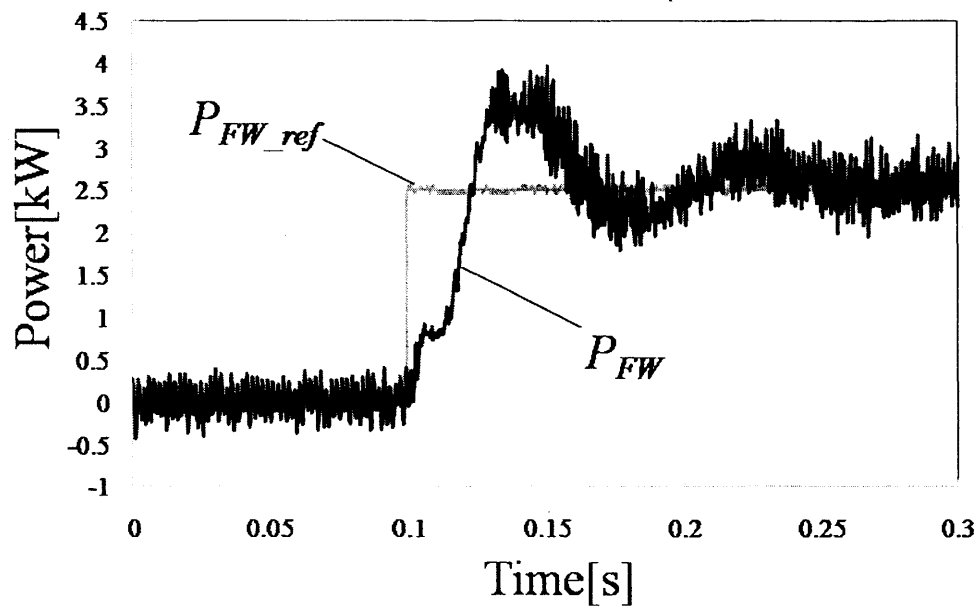
図 5.3(a), (b) 双方を見比べると、電力指令値が変化してからその値に到達するまでにかかる時間にはさほど差が見受けられないが、一次磁束制御法は V/f 制御に比べて電力値が指令値に収束するまで時間が短い。また、積分ゲインによるオーバーシュート量も小さいことから、一次磁束制御法は V/f 制御よりも高く電力フィードバックゲインが設定でき、それにより一次磁束制御法を適用することによって V/f 制御よりも高い応答性を制御的に安定した状態で得ることができると考えられる。図 5.4 に電力フィードバックゲインを $K_{JFW}=0.00005$ 、 $K_{PFW}=0.05$ に変えたときの一次磁束制御法を適用したフライホイール電力補償システムの出力電力を示す。

図 5.3(a) と図 5.4 を見比べるとゲインを上昇させたときは上昇させる前と比べて指令値が変化した時から、出力電力がその値に達するまでの時間が 0.01s ほど短い。それに対してオーバーシュート量は増えているが、その値は V/f 制御時と同じ程度である。このことからフライホイール電力貯蔵装置の制御に一次磁束制御法を適用する際には電力フィードバックゲインに $K_{JFW}=0.00005$ 、 $K_{PFW}=0.05$ を用いるものとする。

しかし、出力フィードバックゲイン変化後の出力電力はフライホイール電力貯蔵装置の一次巻線抵抗と一次漏れインダクタンスから算出される時定数 0.030[s] より遅いため、PI 制御器を PID 制御器に変更することにより現在の同じオーバーシュート量でより速く電力指令値に出力電力が追従させることができる可能性がある。



(a)一次磁束制御法



(b)V/f 制御法

図 5.3 フライホイール電力貯蔵装置ステップ応答

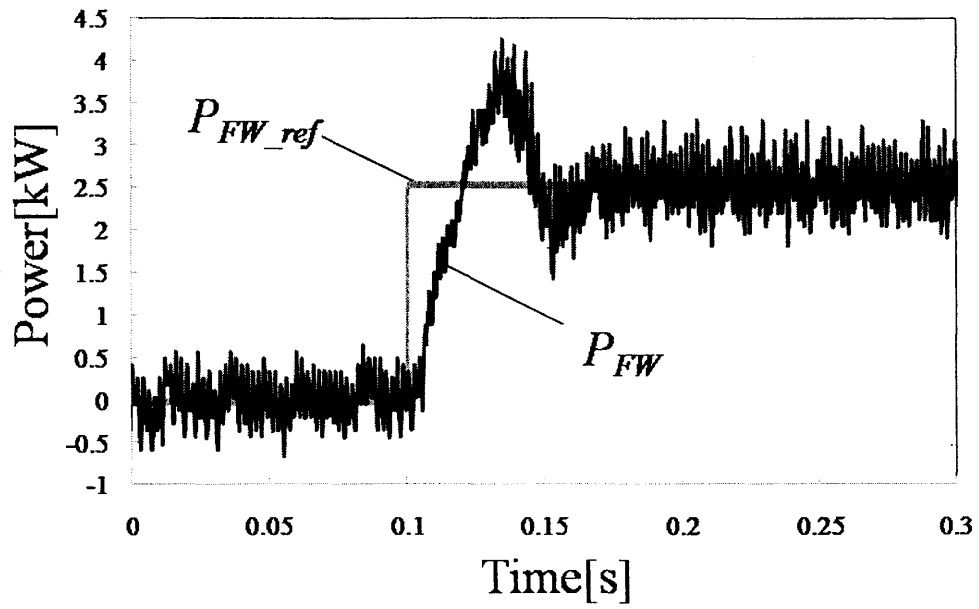


図 5.4 一次磁束制御法を適用したフライホイール電力貯蔵装置ステップ応答ゲイン上昇時

5.3. 周波数応答

模擬実験システムのフライホイール電力補償システムに一次磁束制御法を適用し、電力指令値 P_{FW_ref} として 1Hz から 10Hz の正弦波を入力し、従来制御法との比較を行った。この時、電力指令値と位相 180 度違う変動電力を抑制すると仮定し、電力指令値 P_{FW_ref} と出力電力 P_{FW} の差と電力指令値 P_{FW_ref} の FFT 解析結果から得た周波数成分より式(5.1)を用いて評価を行った。このときの周波数と抑制率の関係を図 5.5 に示す。図 5.5 から一次磁束制御法は V/f 制御法に比べて 1Hz から 10Hz の間で高い抑制率を保っていることが確認できる。このことから一次磁束制御法をフライホイール電力補償システムに適用することにより、従来手法に比べてより高い周波数成分を抑制できると考えられる。

$$\text{抑制率} = \frac{P_{c-s}}{P_{FW_ref}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ただし、 P_{c-s} : 電力指令値と出力電力の差の周波数成分

$P_{FW_ref_s}$: 電力指令値の周波数成分

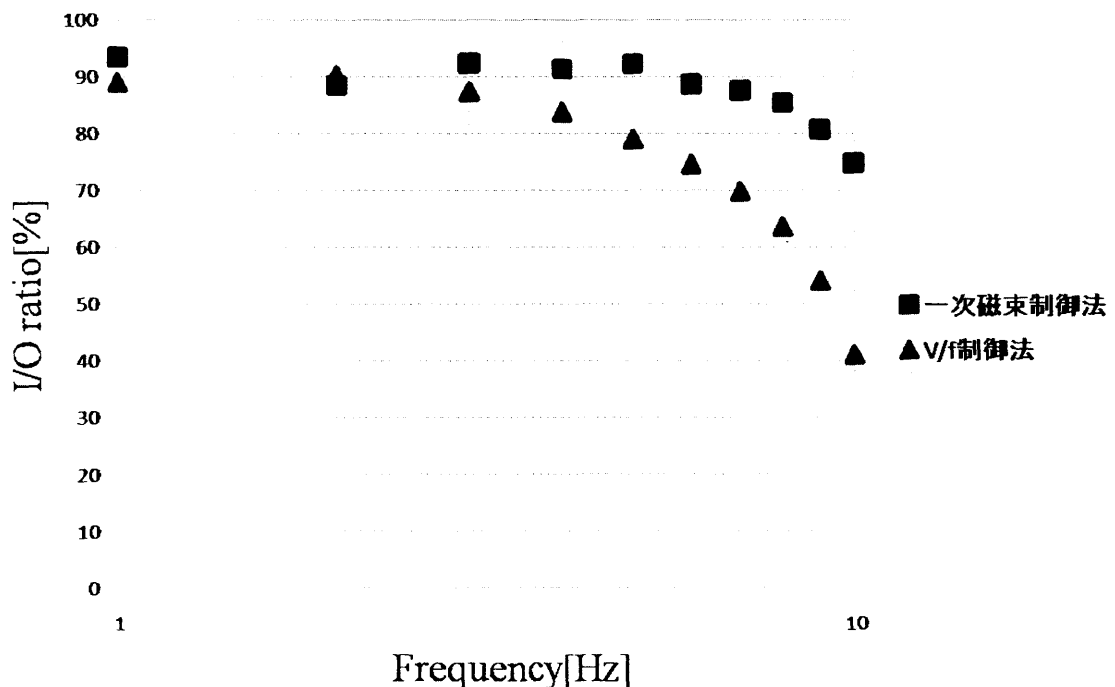
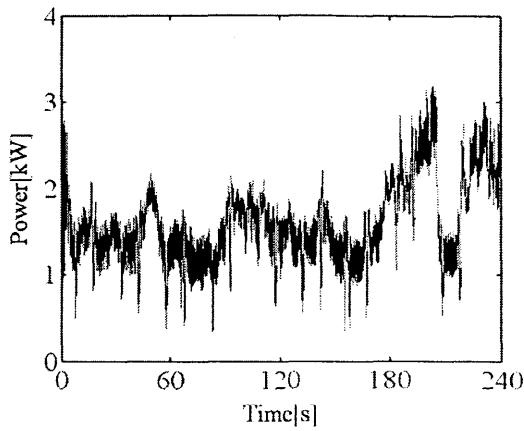


図 5.5 周波数応答

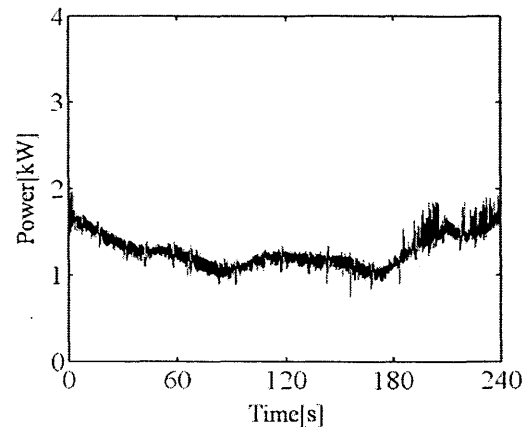
5.4. 模擬平準化実験比較

風力発電電力のような複数の周波数を含んでいる変動電力に対しても、5.3 節の各周波数に対するように有効性があるかを確認するために、図 5.1 の模擬システムを用いて検証を行った。変動電力模擬システムの電力指令値としては過去に農場で測定された風力発電システムの出力電力を模擬実験システムの容量に合わせて 1/8 倍したものに研究室で測定した負荷変動電力、モータのスイッチのオン、オフを繰り返した時の消費電力を加えたものを用いた。そして、従来制御法と一次磁束制御法とで制御されたフライホイール電力補償システムそれぞれによって変動電力の平準化を行った。この時、フライホイール電力補償システムの補償範囲としてはカットオフ周波数が $f_M=0.05\text{Hz}$ と $f_H=100\text{Hz}$ のバンドパスフィルタによって切り取られた範囲とする。フィールド実験システムと違い f_H の周波数が高く設定されているのは第 3 章の結果でローパスフィルタによる遅れが一因である 1Hz 以上の周波数成分が増幅されたことを考慮にいたったことである。図 5.6 に一次磁束制御法によって制御されたフライホイール電力補償システムを用いたときの変動電力とその平準化結果を、図 5.7 に従来制御法によって制御されたフライホイール電力補償システムに用いたときの変動電力とその平準化結果を示す。

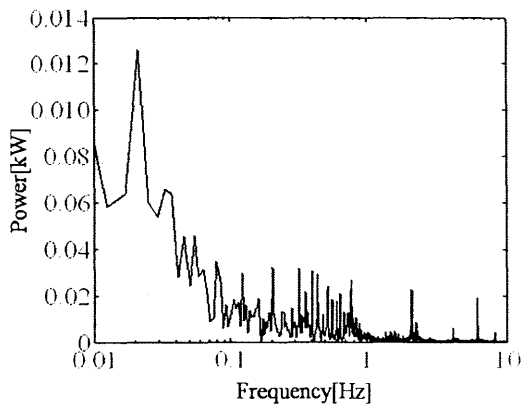
図 5.6(a)、(b)と図 5.7(a)、(b)からどちらの制御法においても変動電力が平準化されていることが確認できるが、これらの平準化電力波形からでは制御法の違いが確認できない。それぞれの周波数結果である図 5.6(c)、(d)と図 5.7(c)、(d)からも同様である。しかし、図 5.6(c)、(d)および図 5.7(c)、(d)の 1 から 10Hz に焦点を合わせ拡大した図 5.6(e)、(f)および図 5.7(e)、(f)の波形から 2, 4, 6, 8Hz 付近の変動電力成分に違いが見られ、一次磁束制御法を適用したフライホイール電力補償システムを用いた方の平準化電力のほうが変動成分の小さいことが確認できる。表 5.2 に変動電力の各周波数成分を 1 としたときの平準化波形の比率を示す。この表 5.2 から比率的に一次磁束制御法を適用したフライホイール電力補償システムを用いた方の平準化電力のほうが変動成分の小さいことが分かる。これらの結果からフライホイール電力補償システムの制御法として一次磁束制御法を適用することにより、1 から 10Hz の変動電力成分をより抑制できることが確認できた。



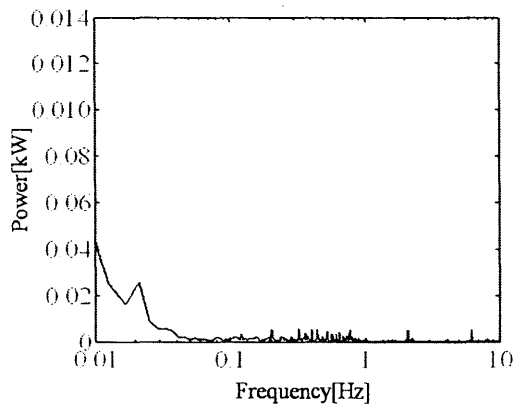
(a) 変動電力波形



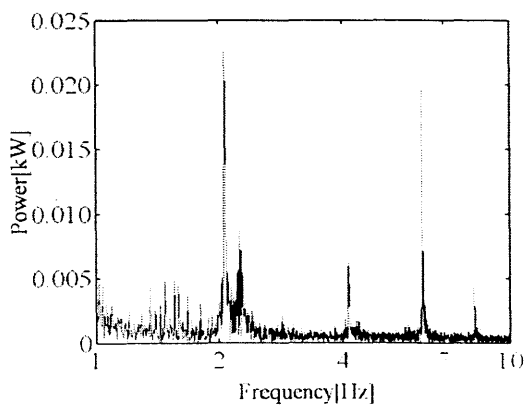
(b) 平準化電力波形



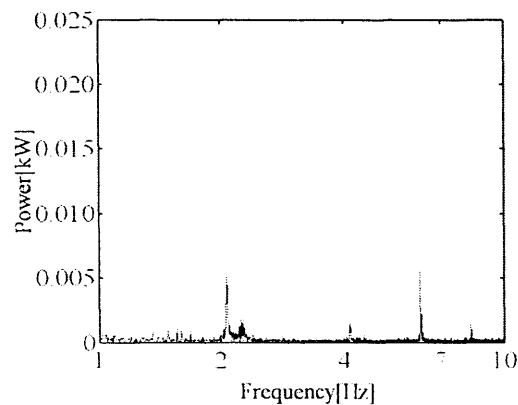
(c) 変動電力波形 fft 解析結果



(d) 平準化電力波形 fft 解析結果

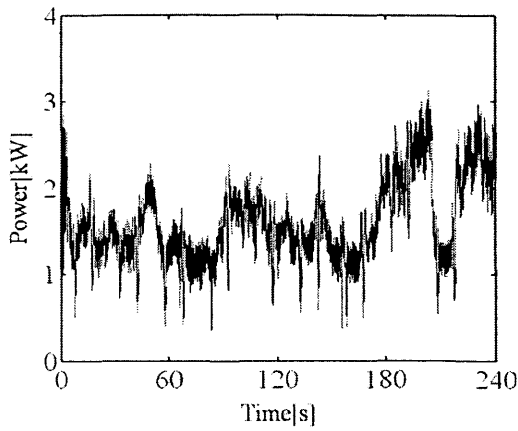


(e) 変動電力波形 fft 解析結果拡大図

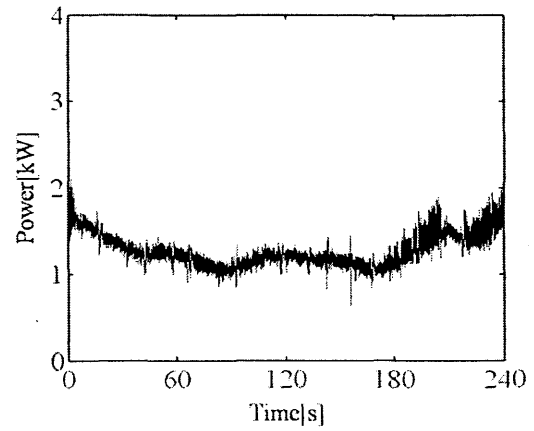


(f) 平準化電力波形 fft 解析結果拡大図

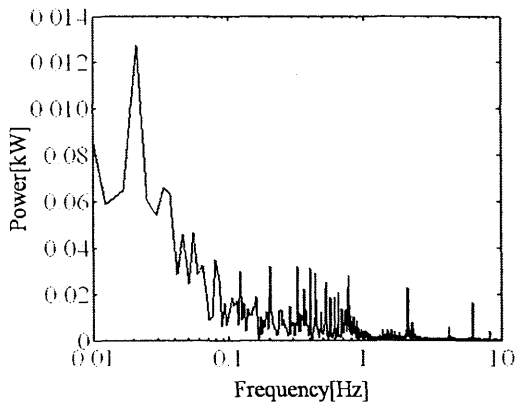
図 5.6 一次磁束制御法により制御されたフライホイール電力補償システムを用いた
模擬平準化結果



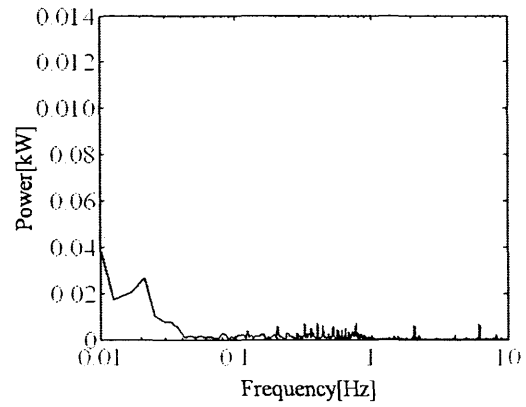
(a) 変動電力波形



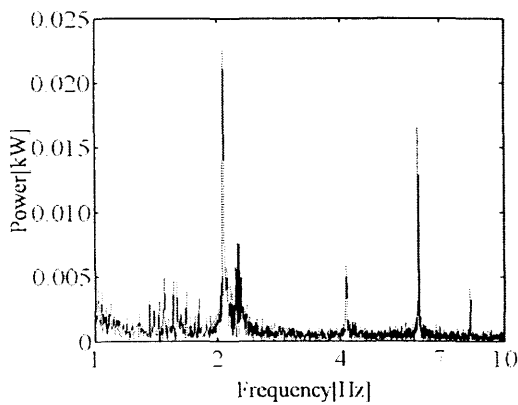
(b) 平準化電力波形



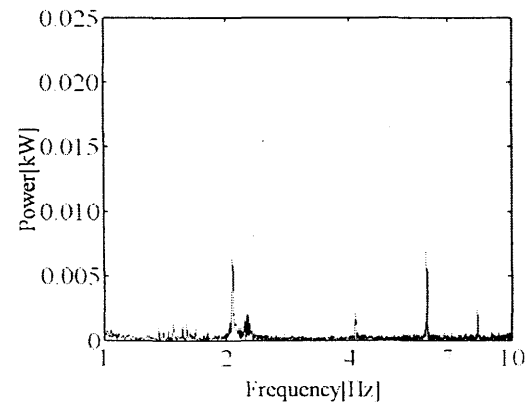
(c) 変動電力波形 fft 解析結果



(d) 平準化電力波形 fft 解析結果



(e) 変動電力波形 fft 解析結果拡大図



(f) 平準化電力波形 fft 解析結果拡大図

図 5.6 従来制御法により制御されたフライホイール電力補償システムを用いた
模擬平準化結果

表 5.2 変動電力に対する各周波数成分の比率

周波数[Hz]	2.065	4.134	6.198	8.259
一次磁束制御法	0.225166	0.252252	0.284165	0.331633
V/f 制御法	0.282613	0.033862	0.41742	0.589861

第6章 結言

6.1. 研究の成果

本論文では風力発電機とフライホイール電力貯蔵装置, バイオマスガスタービン発電機そして負荷によって構成される自然エネルギーを用いたマイクログリッドを提案した。そして, フィールド試験により 1Hz 以下の変動電力成分に対してその抑制効果を確認した。また, 1Hz 以上の変動電力成分に対しても, 変動電力の周波数分離用ローパスフィルタのカットオフ周波数の変更及びフライホイール電力補償システムに一次磁束制御法を適用することにより, 抑制効果が見込めることを模擬実験システムにより確認した。

6.2. 今後の課題

今後の課題としては, フィールドシステムのフライホイール電力補償システムの制御法に一次磁束制御法を適用することが挙げられる。また, 一次磁束制御法を適用した際の周波数分離用ローパスフィルタのカットオフ周波数 f_H の値についても検証する必要があるといえる。

参考文献

- (1) 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 Vol.27, No.3, 5月号， pp.6-10 (2006)
- (2) 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年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, T-67, pp.715 (2000)
- (3) R. Takahashi, L. Wu, T. Murata, J. Tamura: "An Application of Flywheel Energy Storage System for Wind Energy Conversion," IEEE PEDS, November, pp932-937 (2005)
- (4) 飴雅英, 柏原宏行, 堀川敦史, 渡辺達也：「バイオマス加圧流動層ガス化システム用再生型ガスタービンの開発」，第10回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集，pp227-230，日本機械学会 (2005)
- (5) 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」，電気学会研究会資料 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換研究会, pp13-17, (社)電気学会 (2006)
- (6) 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」，電気情報通信学会技術研究報告 電子通信エネルギー研究会, pp59-64, (社)電子情報通信学会 (2006)
- (7) 山村直紀, 相場謙一, 常広謙：「誘導機の一次磁束制御法について」，電気学会論文誌産業応用部門誌 Vol.113 pp859-864 (1993)

関連論文および口頭発表

- [1] 奥村, 山村, 石田:「複合型自然エネルギー発電システムの変動電力補償法～負荷変動時の補償特性の検証～」
平成 20 年電気学会全国大会講演論文集[7]エネルギー変換・輸送 7-013, pp.18-19
- [2] 奥村, 山村, 石田:「Study of Compensation Method of Fluctuating Power of Wind Power Generation and load Using FlyWheel Energy Storage equipment」
The International Conference on Electrical Engineering 2008 P-199 pp.1-5(CD-ROM)
- [3] 奥村, 山村, 石田:「複合型自然エネルギー利用発電システムにおける FW 電力貯蔵装置の応答性向上」
平成 20 年電子デバイス半導体電力変換合同研究科資料 EDD-08-58, pp.13-18

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に際し、終始並々ならぬご指導とご鞭撻を賜りました三重大学工学部電気電子工学 教授 工学博士 石田宗秋先生，同大学工学部電気電子工学 准教授 工学博士 山村直紀先生，同大学工学部電気電子工学 助教授 工学博士 残間忠直先生，同大学工学部電気系技術室 技官 廣田栄毅氏に心よりお礼申し上げます。

実験システムの構築及び実験指導に尽力してくださいました三重大学生物資源学 教授 脇田正彰先生，同大学工学部機械工学 教授 工学博士 前田太佳夫先生，同大学工学部機械工学 准教授 工学博士 鎌田泰成先生に心よりお礼申し上げます。

同時期に研究室に在籍し共に過ごされた方々には大変お世話になりました。心より感謝致します。また同学年に入学した多くの友人に感謝致します。

大学院への進学を許していただき，三年の長きにわたる研究活動を支えてくれた家族に感謝します。

最後に先日この世を去った兄，真一郎に深い感謝の念をもって本論文を締めくくりたいと思います。