

フライホイール電力貯蔵装置と
バイオマスガスタービン発電機を用いた
風力発電機の変動電力補償法に関する研究

平成 18 年 度

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

原 真 彦

三重大学大学院工学研究科修士論文

フライホイール電力貯蔵装置と
バイオマスガスタービン発電機を用いた
風力発電機の変動電力補償法に関する研究

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
制御システム講座

原 真彦

2007 年 3 月



目次

目次

第1章	緒言.....	1
1.1.	研究の背景.....	1
1.2.	研究の目的.....	2
1.3.	本論文の構成.....	3
第2章	複合型自然エネルギー発電システム.....	4
2.1.	システムの構成.....	4
2.2.	風力発電システム.....	9
2.3.	フライホイール電力補償システム.....	11
2.4.	マイクロガスタービン発電システム.....	15
第3章	電力貯蔵装置の容量設計法.....	19
3.1.	電力平準化手法.....	19
3.2.	電力補償の応答性.....	26
3.3.	風力発電電力の周波数分布と補償エネルギー.....	30
3.4.	マイクロガスタービン発電機の稼働率と電力変換効率.....	32
3.5.	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の関係.....	34
3.6.	平滑コンデンサによる高域成分の補償.....	36
第4章	フィールド実験.....	37
4.1.	実験条件.....	37
4.2.	実験結果及び考察.....	40
第5章	フライホイール電力補償システムの応答性向上.....	50
5.1.	フライホイール電力補償システムの応答性.....	50
5.2.	模擬実験システム.....	52
5.3.	フライホイール駆動制御装置の制御構成.....	56
5.4.	一次磁束制御法.....	62
5.5.	フライホイール駆動制御装置の制御構成の変更.....	68
5.6.	実験結果と考察.....	71
第6章	結言.....	80
参考文献	83
関連論文および口頭発表	84
謝辞	85

第1章 緒言

1.1. 研究の背景

近年、産業の発達に伴い、石油・石炭などの化石燃料の消費量が拡大傾向にある。そして、この化石燃料の消費に伴い排出される二酸化炭素などの温室効果ガスにより地球温暖化問題が加速され、全世界規模の社会問題に発展している。このため、国際的には、温室効果ガスの排出量削減目標などを定めた京都議定書が議決され、地球温暖化対策が取り組まれている。このことから、化石燃料に変わる代替エネルギー源を用いた発電システムの導入が進められている。代替エネルギー源として風力発電や太陽光発電といったクリーンで無尽蔵なエネルギー源である自然エネルギーを利用した発電方式や、廃材などから得られるバイオマスガスを利用した発電方式が注目されており、電力自由化やグリーン電力制度の発足に伴い、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。この変動する電力を系統に供給したとき、系統側では系統周波数及び電圧に変動が生じ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更なる普及を考えたとき、これは無視できない大きな問題である。このため、自然エネルギー発電システムを実用化するためには、この電力変動を平準化するシステムが必要である。この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。

本研究では以前から、畜産・農林分野で研究され、通常は単独かつ一定出力で運転されている既存のバイオマス発電に注目した⁽⁴⁾。そして、ここにバイオマス発電を用いた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を補償することを提案する。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ことから、自然エネルギー発電の普及を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を統合した複合型自然エネルギー発電システムを提案する。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、クリーンで且つ、高品質な電力を供給が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」を用いる。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、電力平準化を行う上で、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、より電力脈動の少ない電力供給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、実験により有効性を検証する。

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、提案する複合型自然エネルギー発電システムの構成を説明する。

第 3 章では、まず、提案システムにおける電力平準化制御を説明する。そして、ある風力発電の発電データを用い、これの周波数分布とシステムの補償能力などを考慮した帯域分離周波数と電力貯蔵装置のエネルギー容量決定法を検討する。

第 4 章では、提案システムの有効性を実験により検証する。

第 5 章では、より高品質な電力供給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向上を検討し、実験により有効性を確認する。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめる。

第2章 複合型自然エネルギー発電システム

2.1. システムの構成

本研究で提案する複合型自然エネルギー発電システムは、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。図 2.1 に本研究で提案する複合型自然エネルギー発電システムの構成図を示す。

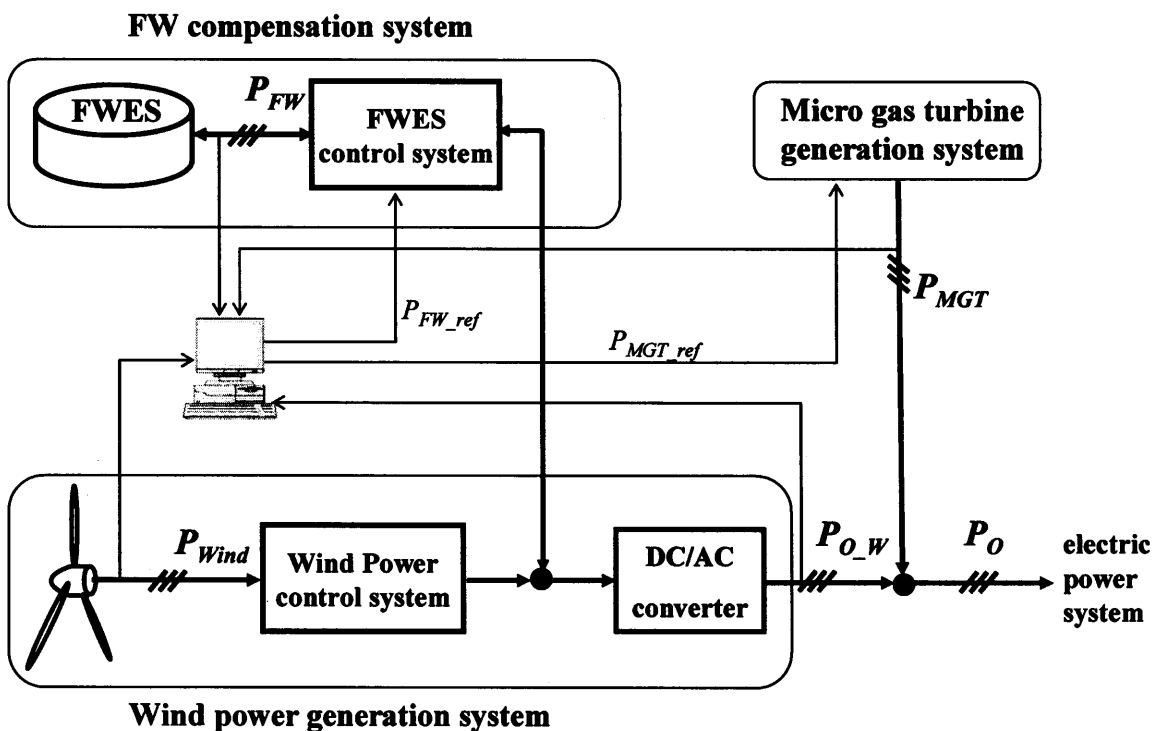


図 2.1 複合型自然エネルギー発電システム

本システムでは風車から発電された電力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、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。

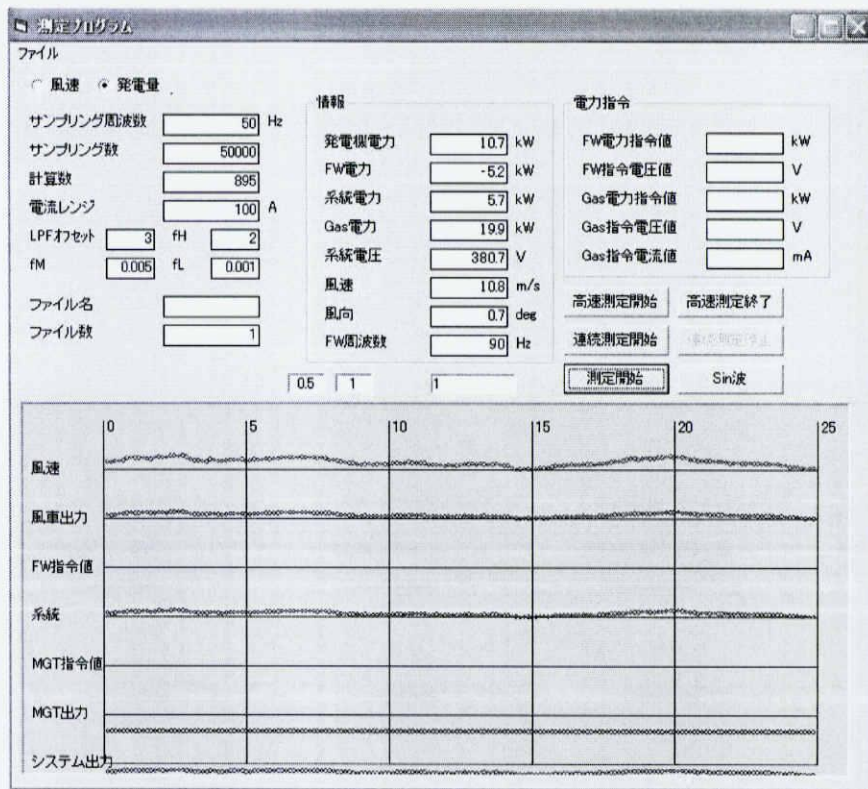


図 2.2 Visual Basic フォームウィンドウ

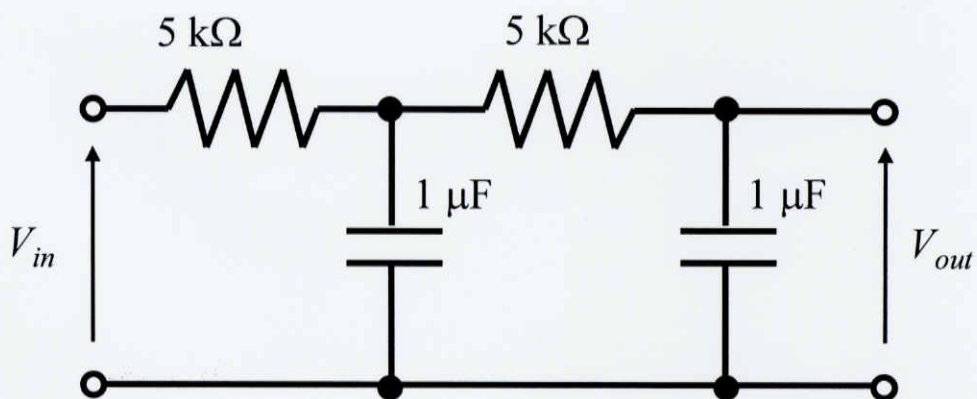


図 2.3 RC ローパスフィルタ

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。

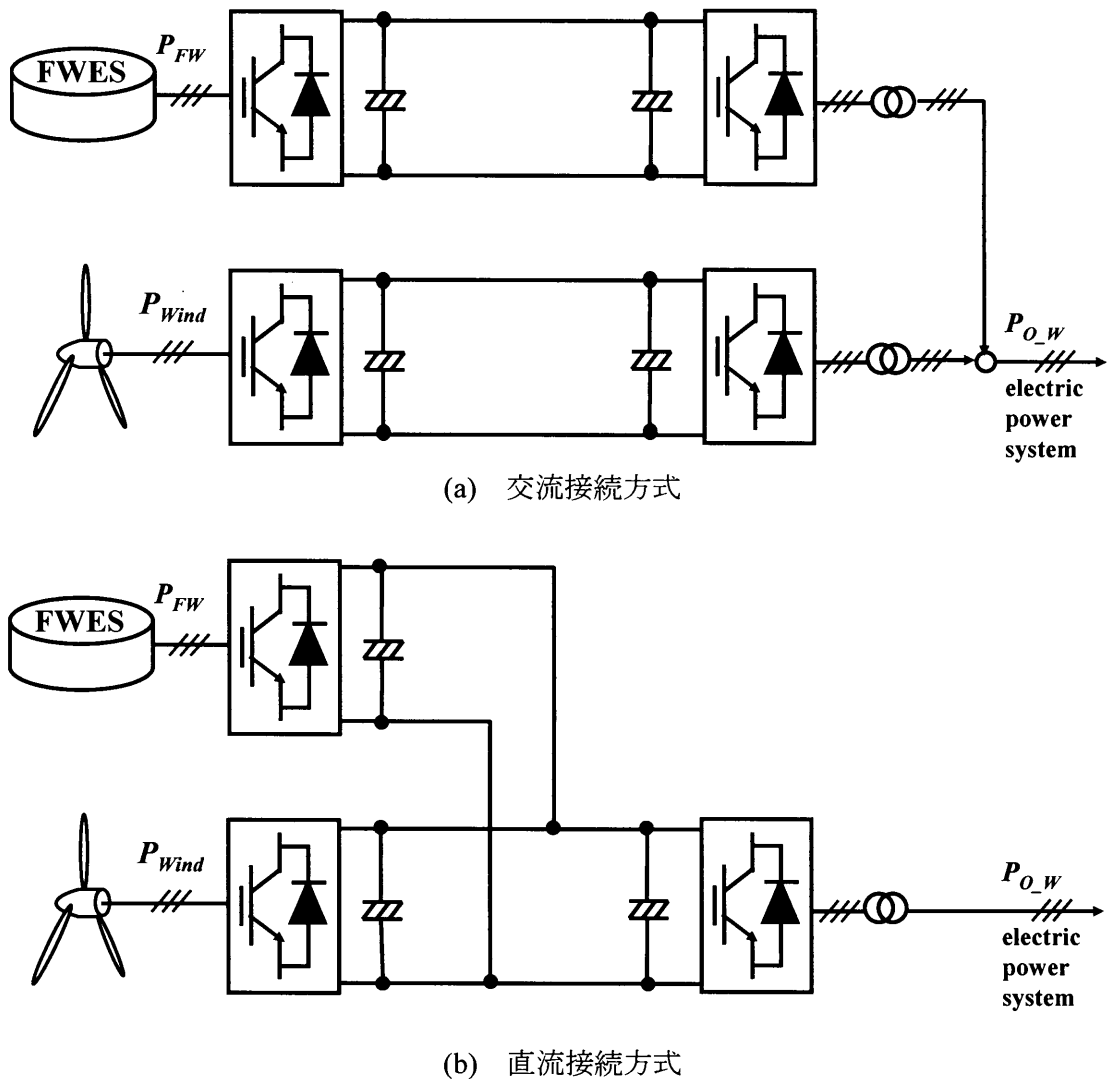


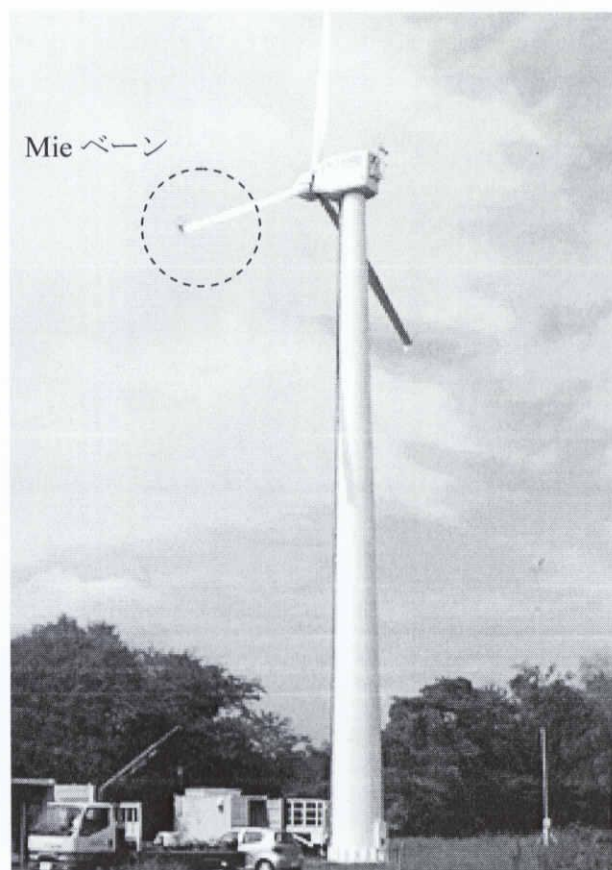
図 2.4 フライホイール付加型風力発電システムの構成

2.2. 風力発電システム

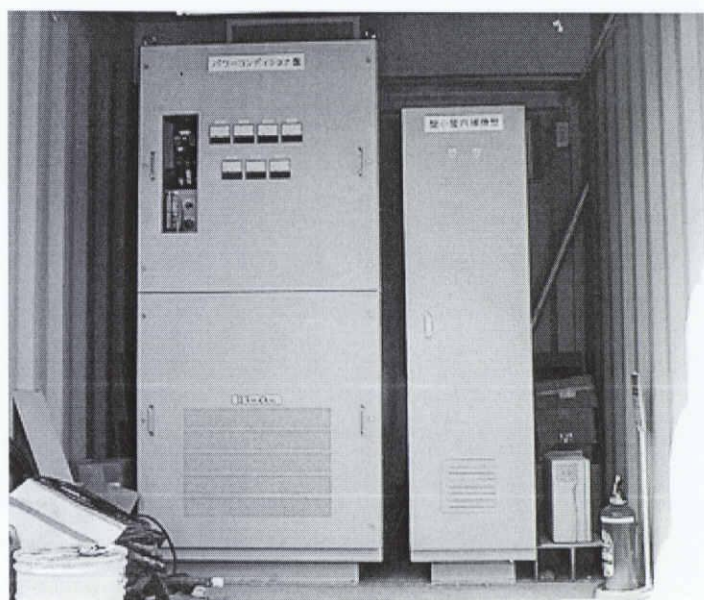
風力発電システムでは、図 2.5 に示すハブ高さ 30m、ブレード長 10m、定格出力 100kW の風力発電設備を使用する。そして、ブレードの先端には、翼に発生する揚力を翼端まで維持して出力を向上させる翼端小翼(Mie ベーン)が使用されている。また、本発電設備は図 2.4 に示す AC/DC/AC 方式を採用しており、低風速から高風速までロータの回転数変化により出力制御が可能である。そして、この直流リンク部分にはフライホイール電力補償システムが接続されている。表 2.3 に風力発電システムの仕様を示す。

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 はマイウェ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。

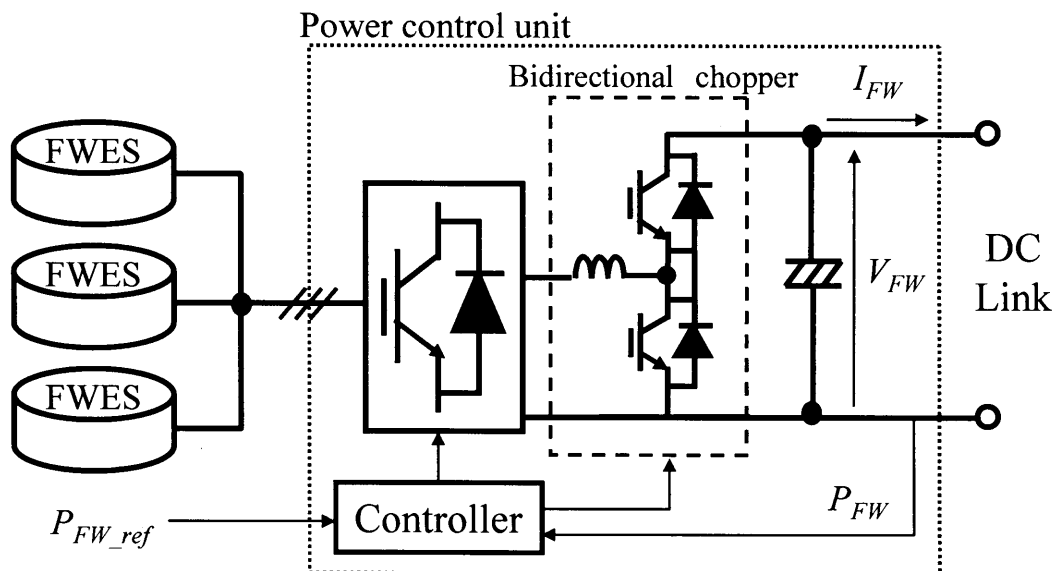
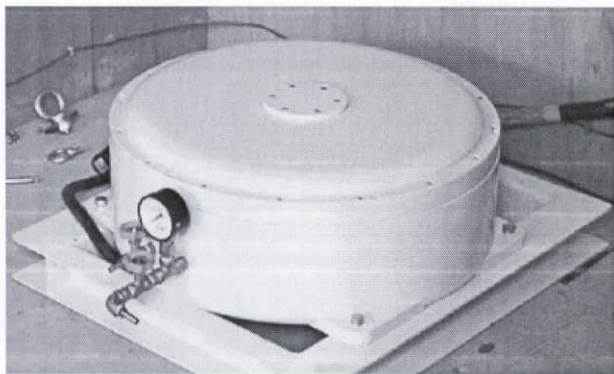
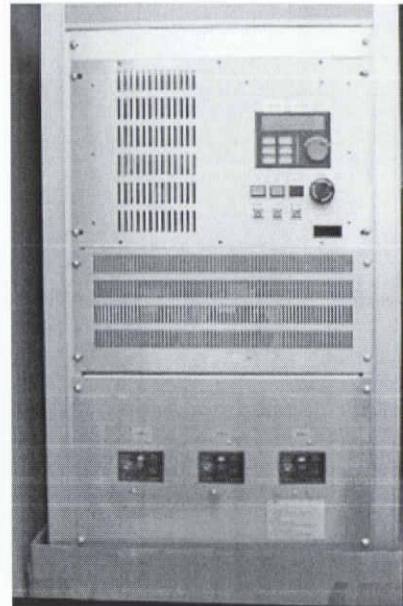


図 2.6 フライホイール電力補償システム



(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とは、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に変換し、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、フライホイールとは回転する物体に対して取り付けられる弾み車のことであり、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きた。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 $\omega[\text{rad/s}]$ 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。

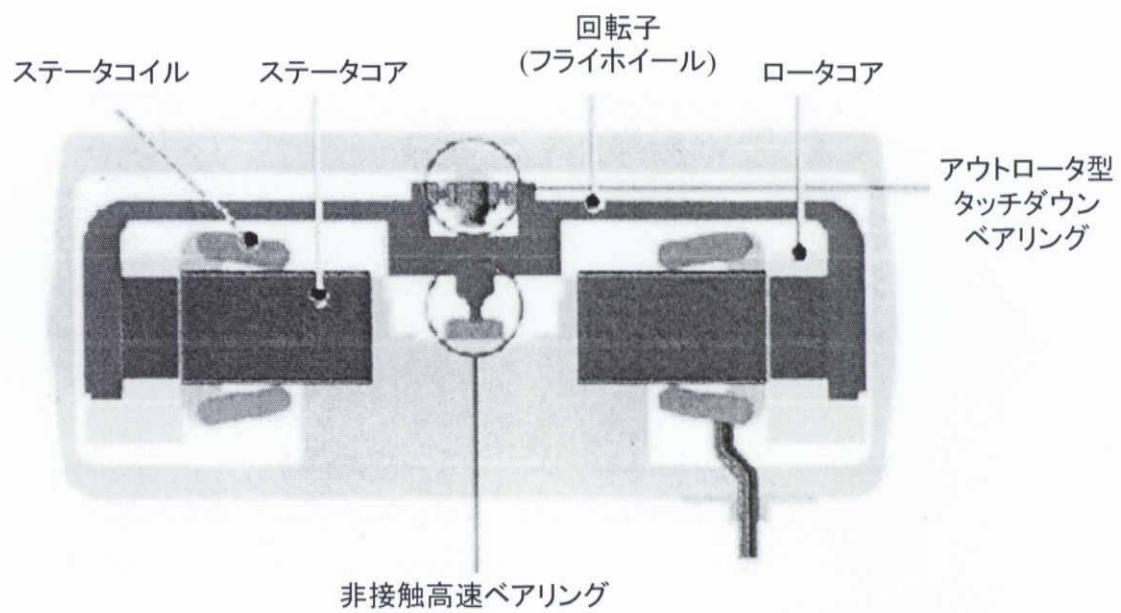


図 2.8 日本フライホイール製フライホイール電力貯蔵装置

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。

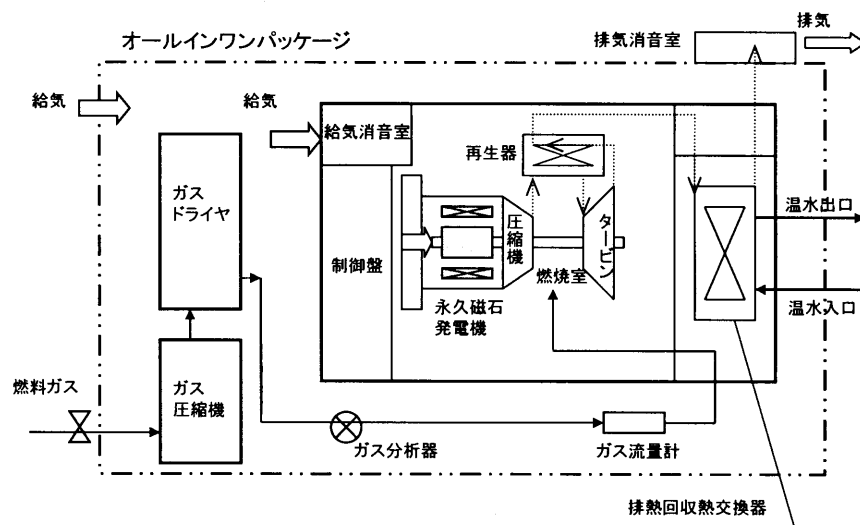


図 2.9 マイクロガスタービン発電システムの構成

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

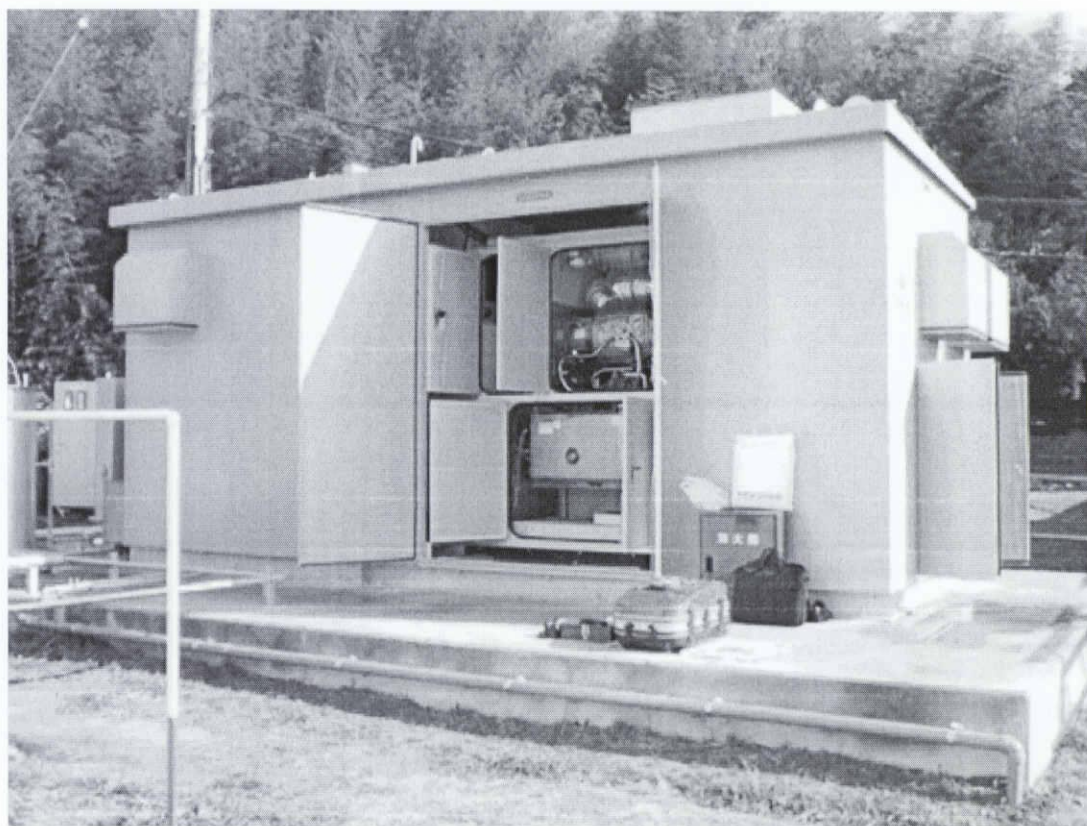


図 2.10 バイオマス発電システムパッケージ

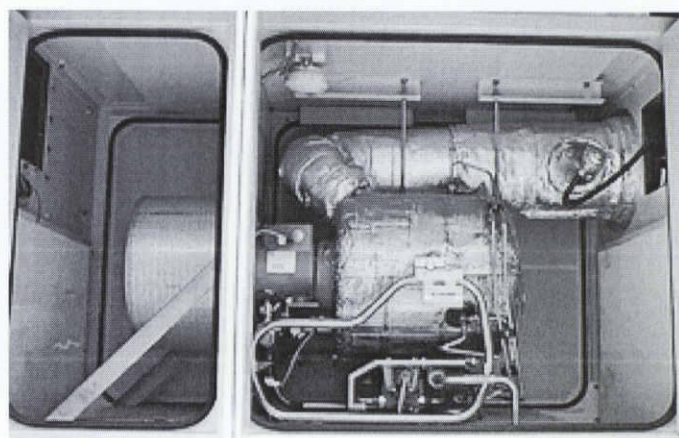


図 2.11 バイオマスガスタービン発電機

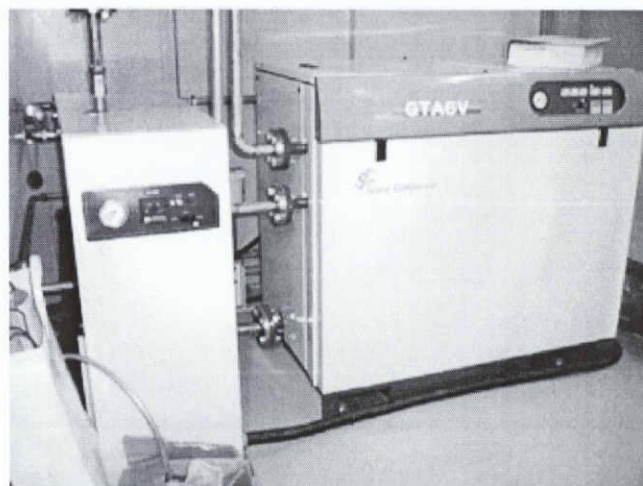


図 2.12 ガスドライヤ(左)とガス圧縮機(右)

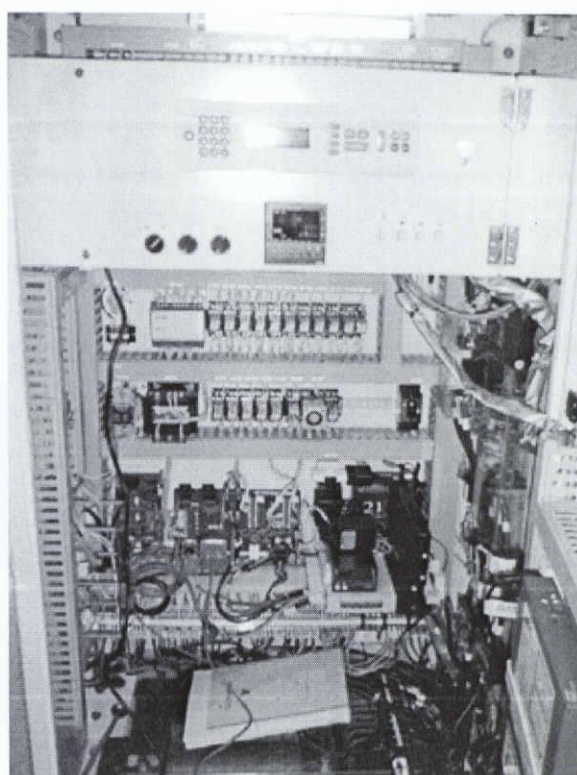


図 2.13 制御盤

第3章 電力貯蔵装置の容量設計法

3.1. 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。そして、この発電電力はさまざまな周波数成分を含んでいる。図 3.1 に三重大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波形とその周波数解析結果を示す。

また、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 で電氣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。

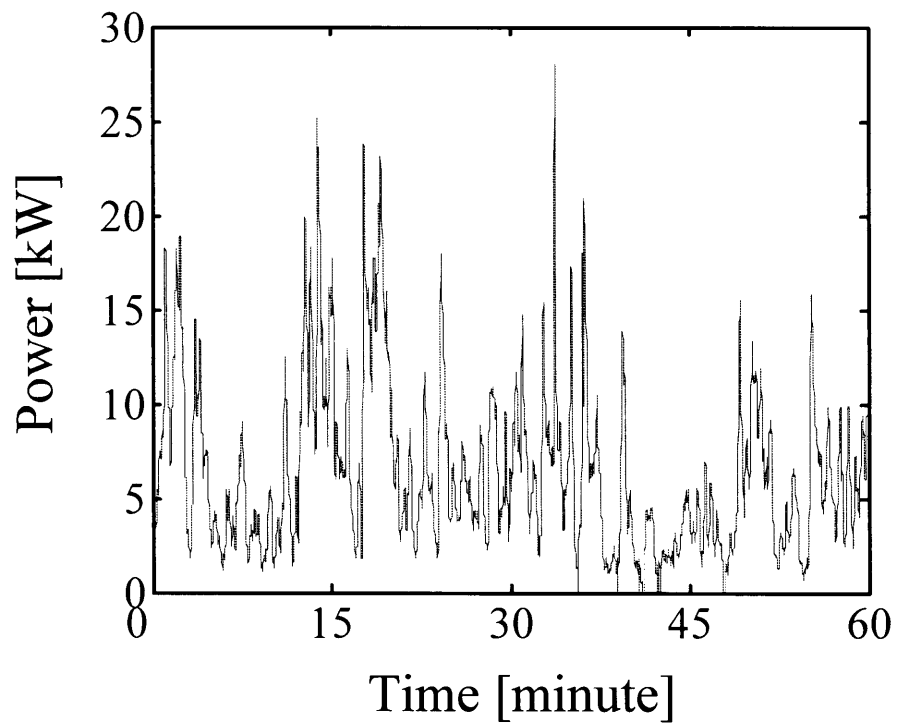
そこで、提案システムでは、供給電力を平準化するにあたり、風車から発電される変動電力 P_{wind} を高域・中域・低域・超低域の 4 つの周波数領域に周波数分離する。この概念図を図 3.2 に示す。ここで、図 3.2 に示す 4 つの周波数領域は下記のように定義している⁽⁵⁾。

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

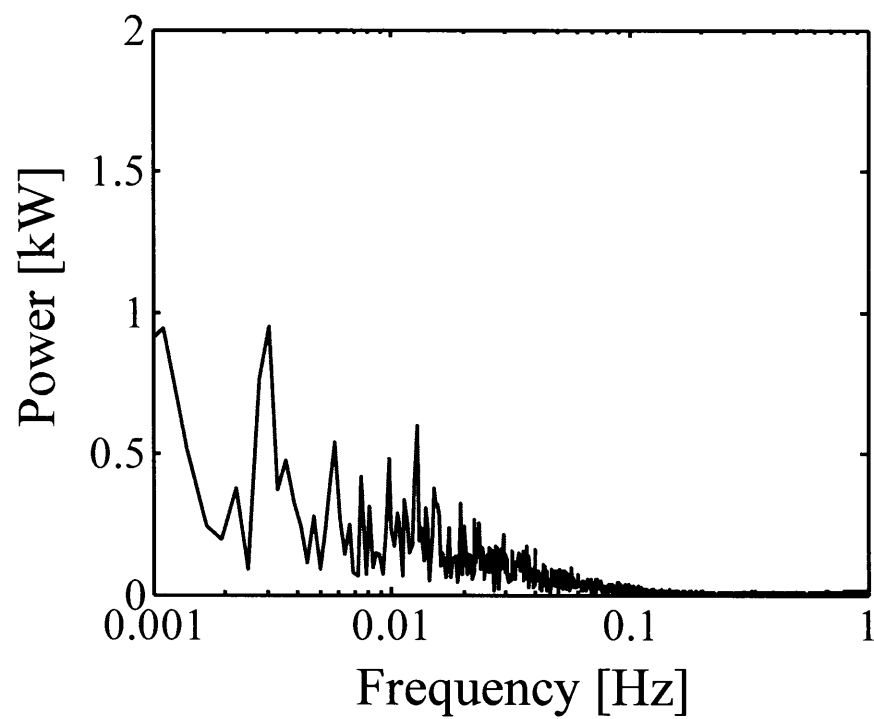
中域成分 P_M : フライホイール電力補償システムで補償対象とする成分

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 3.1 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 3.3 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、そのいくらかを補償する。

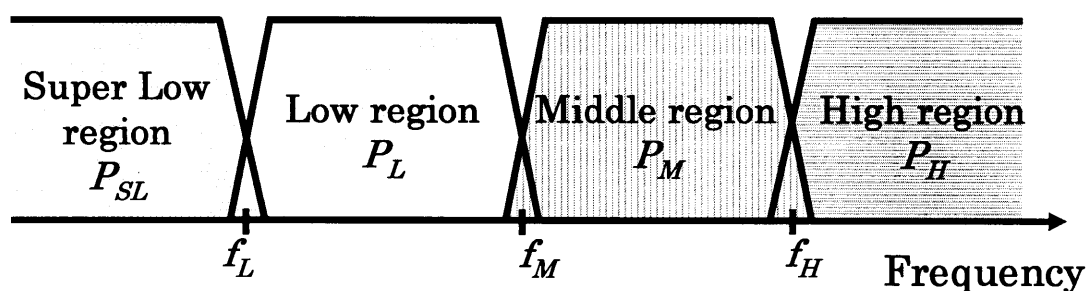


図 3.2 周波数分離概念図

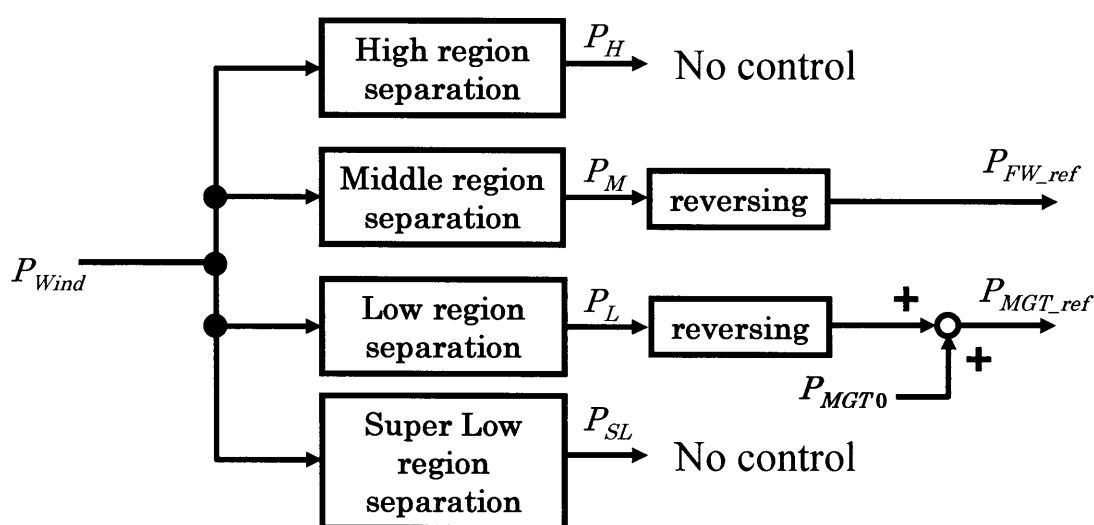


図 3.3 電力平準化制御概念図

図 3.2 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ことで高域成分 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 3.4 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 3.5 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 3.5 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 3.6 に図 3.1 に示す風車の発電電力を $f_M=0.005\text{Hz}$, $f_L=0.001\text{Hz}$ としたときの周波数分離結果を示す。この結果から、 0.005Hz 付近で補償電力が分離されていることが確認できる。

提案システムでは、このような手法により周波数分離することでマイクロガスタービン発電システム及びフライホイール電力貯蔵システムへの電力補償指指令値を作成する。したがって、既存の装置を使用する際やある電力品質の設定値を設けてシステムを設計する際には、風力発電機から発電される電力の周波数分布や、その補償装置の補償能力などを考慮したうえで、周波数分離の際の帯域分離周波数 f_L , f_M , f_H の決定や電力貯蔵装置のエネルギー容量を設計する必要がある。

本章では、マイクロガスタービン発電システムとフライホイール電力補償システムの応答性能や風力発電機の発電電力に含まれる周波数成分を基に補償エネルギーとマイクロガスタービン発電機の稼働率を考慮した電力貯蔵装置の容量設計法と帯域分離周波数の決定法を検討する⁽⁶⁾。

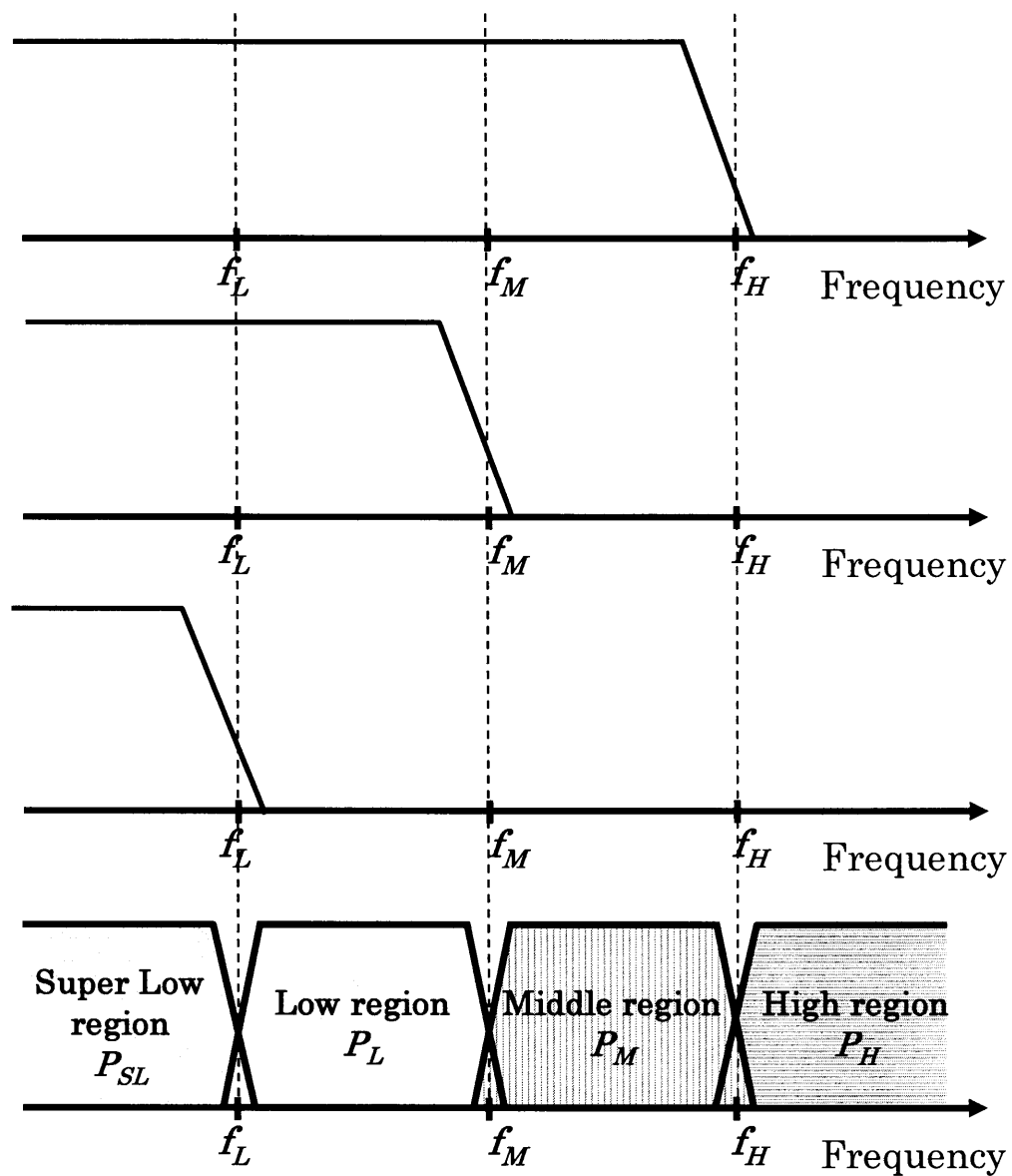
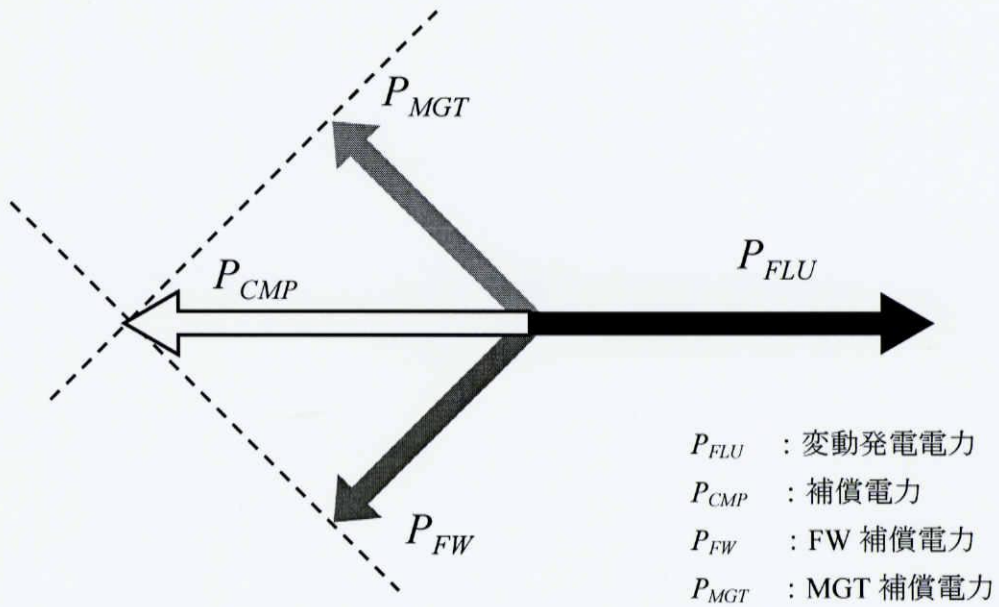
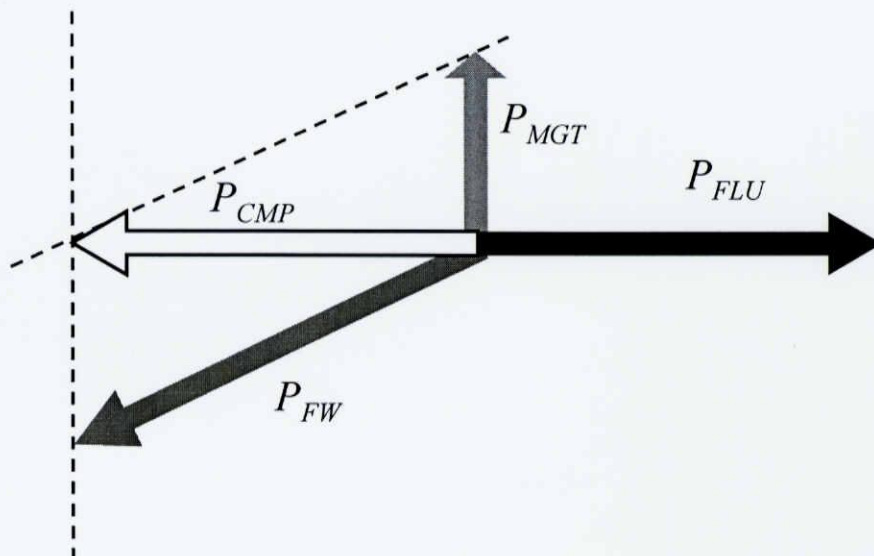


図 3.4 周波数分離手法



(a) 一次ローパスフィルタ



(b) 二次ローパスフィルタ

図 3.5 補償電力のベクトル関係

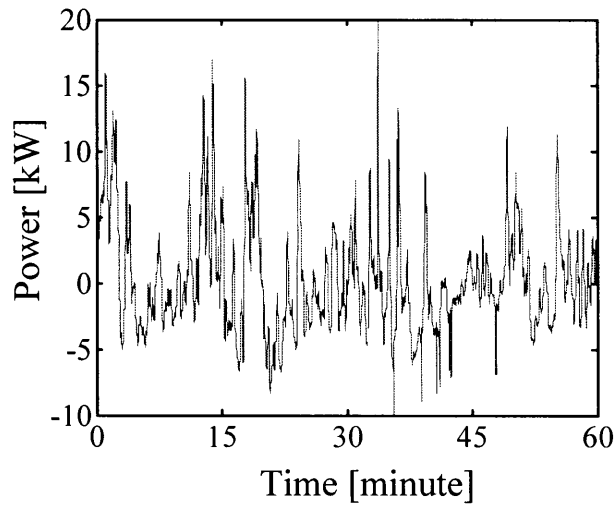
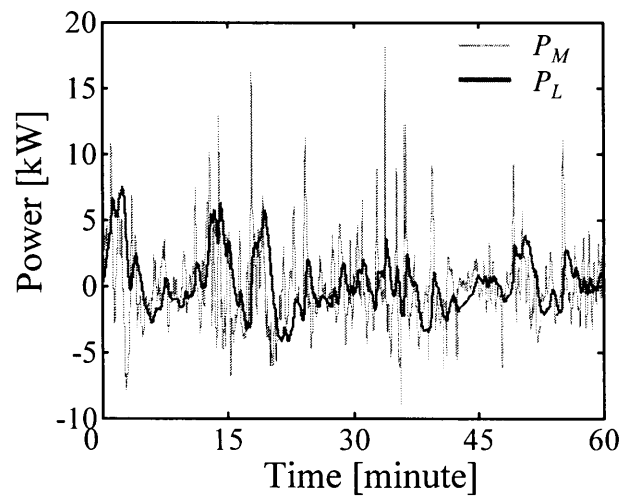
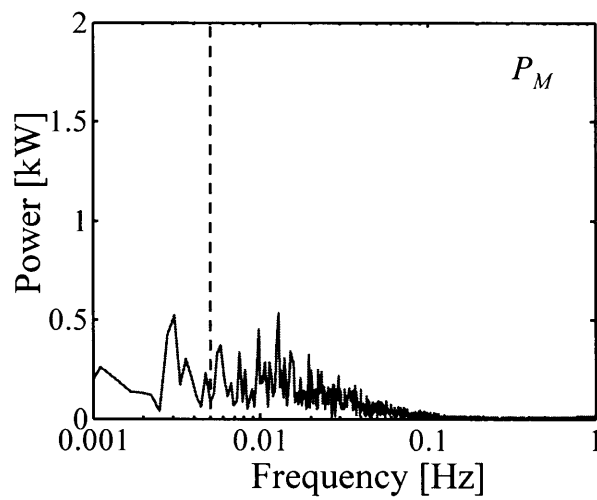
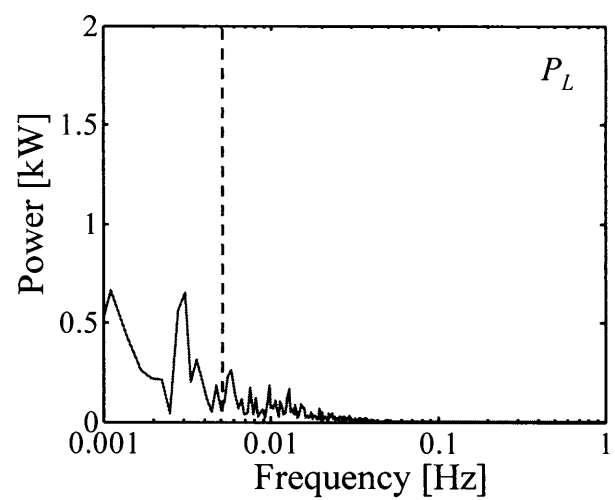
(a) 補償成分 P_{CMP} (b) 補償成分 P_M 及び P_L (c) 中域成分 P_M の周波数解析結果(d) 低域成分 P_L の周波数解析結果

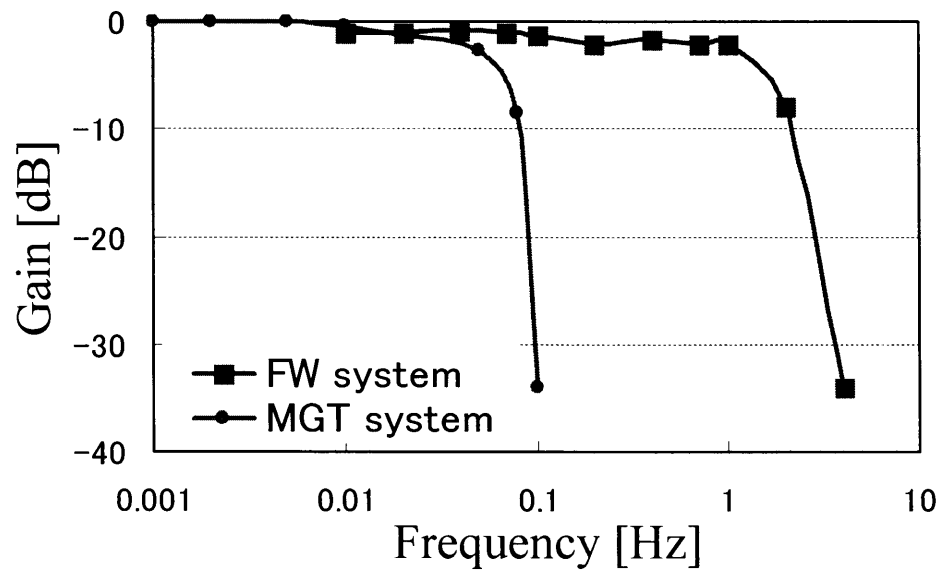
図 3.6 補償電力と周波数解析結果

3.2. 電力補償の応答性

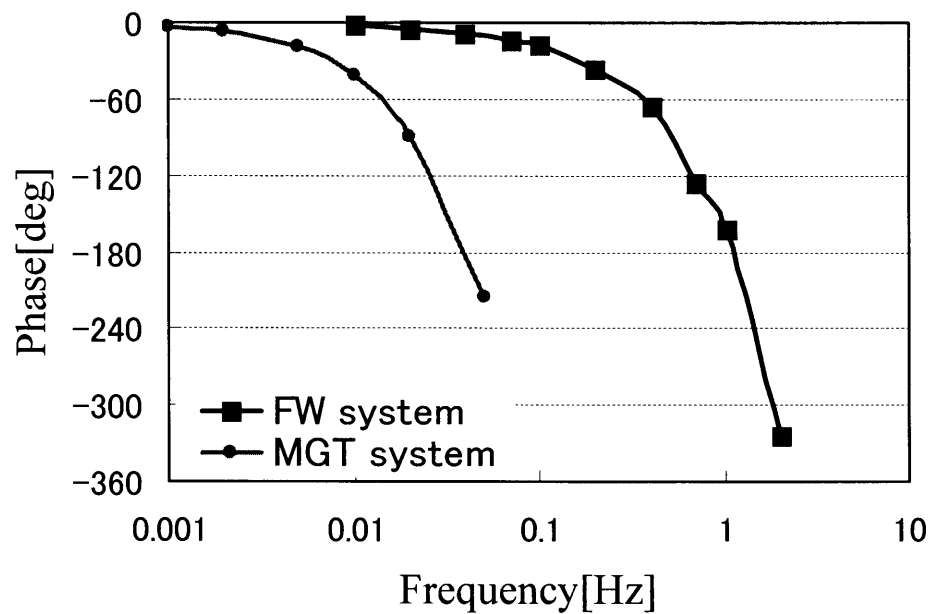
提案する複合型自然エネルギー発電システムでは図 3.4 に示す周波数分離により得られた中域成分 P_M をフライホイール電力補償システムで補償し、低域成分 P_L をマイクロガスタービン発電システムにより補償する。そのため、周波数分離の際にはフライホイール電力補償システムの応答性とマイクロガスタービン発電システムの応答性を考慮したうえで帯域分離周波数を決定する必要がある。したがって、下記のような実験条件を基に、フライホイール電力補償システムとマイクロガスタービン発電システムにおける周波数特性を測定した。この結果を図 3.7 に示す。

<実験条件>

- 正弦波電力指令値は電力平準化を実行する際に実際に電力指令値を作成するパソコンで作成し出力する。
- フライホイール電力補償システムからの補償電力は、フライホイール電力貯蔵装置の三相交流側に接続されたパワーハイテスタにより測定する。そして、このパワーハイテスタの DA 出力より出力された信号をパソコンに取り込み観測する。
- マイクロガスタービン発電システムからの補償電力は、マイクロガスタービン発電システムから送られる信号をパソコンに取り込むことで観測する。



(a) ゲイン特性



(b) 位相特性

図 3.7 FW 電力補償システム及び MGT 発電システムの周波数特性結果

図 3.7(a)のゲイン特性結果から、フライホイール電力補償システムでは 1Hz 程度まで、そして、マイクロガスタービン発電システムでは 0.02Hz 程度まで高いゲイン特性を得られることが確認できる。しかし、図 3.7(b)の位相特性結果からは、フライホイール電力補償システムでは約 0.2Hz、そして、マイクロガスタービン発電システムでは 0.01Hz よりも高い周波数において 30deg を超える大きな位相差が生じている。ここで、電力補償を行う上で、補償電力の遅れが供給電力に対してどのように影響するかを検討する。まず、(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 3.8 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 3.8(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 3.8(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。

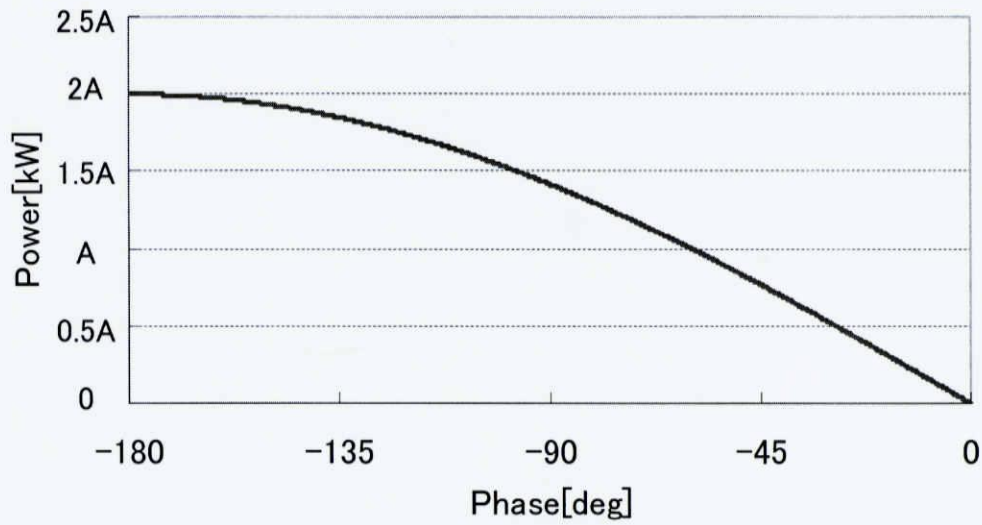
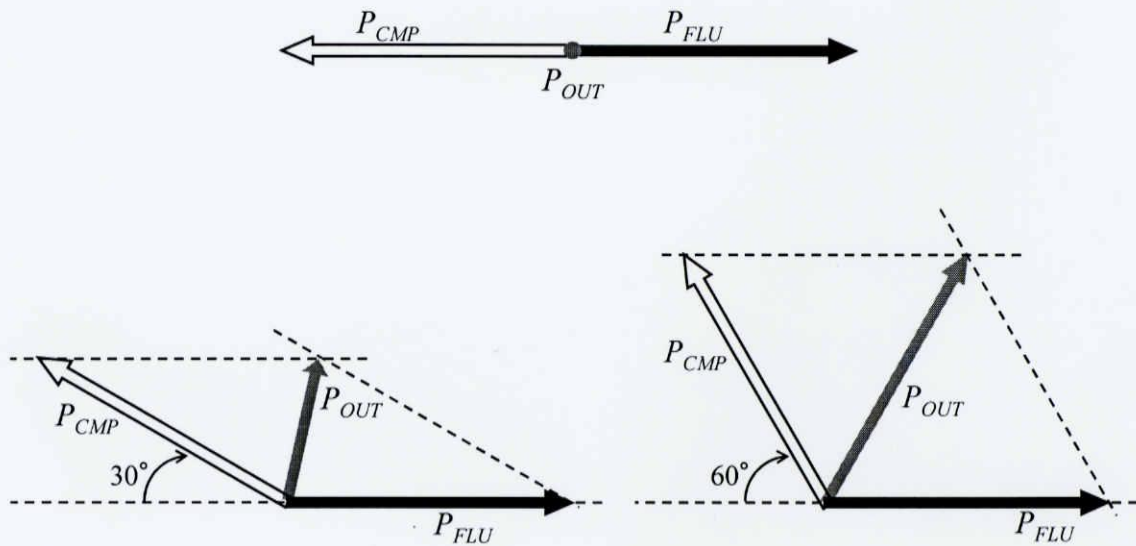
したがって、帯域分離周波数を決定する際には周波数特性における位相遅れを考慮する必要がある。中域分離周波数 f_M はフライホイール電力補償システムで補償する中域成分 P_M とマイクロガスタービン発電システムで補償する低域成分 P_L とを分離する周波数である。このため、中域分離周波数 f_M はマイクロガスタービン発電システムの位相特性が 30deg 以下であり大きな補償効果の期待できる 0.01Hz 未満に設定する。また、高域分離周波数 f_H は中域成分 P_M と風力発電システムの電力変換器に付属する電解コンデンサで補償する高域成分 P_H とを分離する周波数である。フライホイール電力補償システムは電力補償の際に能動的に補償電力を制御するのにに対して、電解コンデンサでは受動的に電力を補償する。したがって、高域分離周波数 f_H はフライホイール電力補償システムにおいて補償効果が期待できる位相特性が 60deg 以下となるとき、すなわち 0.4Hz 未満に設定する必要があると考えられる。

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

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

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

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

(a) (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 3.8 位相遅れによる供給電力 P_{OUT} の振幅の変化

3.3. 風力発電電力の周波数分布と補償エネルギー

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 3.1(b)の発電電力の周波数解析結果から、今回測定した風力発電機からの発電電力に含まれる変動は 0.1Hz 以下の成分が主成分であり、低周波変動が多くを占めている。風力発電機から発電される発電電力は変動が激しく季節により大きく変動する。ここでは、図 3.1(a)に示す発電電力の一例を基に検討を始める。

今、図 3.1(a)に示した風力発電機から発電された電力 P_{wind} のうち、0.001Hz よりも高い変動成分を補償帯域と仮定する。このときの補償に必要な補償電力 P_{CMP} は図 3.6(a) のようになる。この結果から、補償装置としては定格発電容量が 20[kW]以上の装置が必要となる。また、仮定のような電力補償を行った際に、この補償電力 P_{CMP} を時間積分することで算出される補償エネルギー E_{CMP} を図 3.9 に示す。この結果から、補償には約 2000kJ のエネルギーが必要といえる。この電力補償を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のみで実現しようとする、上記の補償能力を有した装置を用意する必要がある。ここで、電力貯蔵装置は風力発電機によって発電された電力を蓄放電することで変動電力を補償する。このため、補償の際には瞬時電力だけでなくエネルギー容量にも制限を受ける。したがって、より低周波の変動までの補償を考えたとき、電力貯蔵装置のエネルギー容量を大きく設計しなければならない。そこで、電力貯蔵装置のみ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、補償領域を二つに分割し、低周波変動(低域成分 P_L)をマイクロガスタービン発電システムで補償する。こうすることで、補償の際に電力貯蔵装置で必要とする補償エネルギーを低減することができる。

補償対象とする 0.001Hz 以上の変動成分をフライホイール電力補償システムで補償対象とする中域成分 P_M とマイクロガスタービン発電システムで補償対象とする低域成分 P_L に分離する中域分離周波数 f_M を 0.005Hz としたとき、補償成分 P_M 及び P_L は図 3.6(b) のようになる。このときフライホイール電力貯蔵装置で補償に必要なエネルギー P_{FW} は図 3.9(b) に示したようになる。図 3.6(b) から高周波変動を含む中域成分 P_M は全補償電力 P_{CMP} と比較してもその補償電力幅は大きく変化していない。しかし、図 3.9 から、フライホイール電力貯蔵装置で補償に必要とするエネルギー E_{FW} の大きさは最大で約 500kJ である。このことから、マイクロガスタービン発電システムで低域成分 P_L を補償することで、ライホイール電力貯蔵装置で補償に必要とするエネルギー E_{FW} の大きさ約 1500kJ 軽減することが可能である。また、電力貯蔵装置は電力の蓄放電し電力を補償する装置であるために、補償エネルギーの大きさに制限を受ける。これに対し、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による発電機構を有しているため、補償エネルギーには制限を受けない。このことから、提案するシステム構成はより低周波の電力補償を考えたとき、有効なシステム構成であると考えられる。

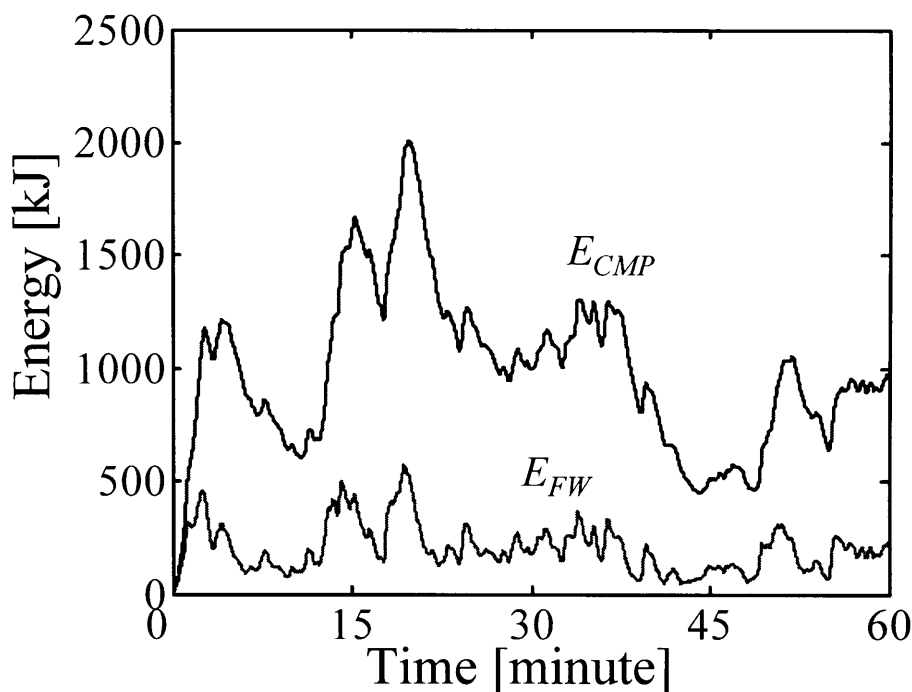


図 3.9 補償エネルギー

3.4. マイクロガスタービン発電機の稼働率と電力変換効率

マイクロガスタービン発電システムでは定格発電電力 29kW のマイクロガスタービン発電機を用い、風力発電の低周波変動を補償するためにその出力を 15kW から 28kW の間で可変に出力することが可能である。しかし、マイクロガスタービン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、稼働率とはマイクロガスタービンの出力電力をその定格電力で除算したときの商である。図 3.10 にマイクロガスタービン発電機の稼働率を変化させたときの発電効率を示す。図 3.10 から、マイクロガスタービン発電機の稼働率を 100%から 50%に変化させることで発電効率は 25.0%から 22.4%に低下していることが確認できる。したがって、マイクロガスタービン発電機において、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、高稼働率運転は、出力電力に対する設備建設コスト[円/W]の観点からも重要な要素であるといえる。

マイクロガスタービン発電機の稼働率の低下はマイクロガスタービン発電システムで補償する低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L で決定する。これは、低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L が小さい場合には図 3.3 に示すマイクロガスタービン発電機の動作出力平均値 P_{MGT0} を高く設定することができ、反対に、変動幅 ΔP_L が大きい場合には変動幅の大きさに合わせてマイクロガスタービン発電機の動作出力平均値 P_{MGT0} を低く設定する必要があるためである。ここで、より低周波の変動補償を考えると、それは低域分離周波数 f_L を低く設定する必要がある。しかし、こうすることで低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L は大きくなる。したがって、マイクロガスタービン発電機の稼働率は低下する。また、マイクロガスタービン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低周波成分 P_{SL} を高周波側への拡大する必要がある。このことから、マイクロガスタービン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がある。したがって、これらのことを考慮したうえでマイクロガスタービン発電機の容量と電力品質を検討する必要がある。

表 3.1 マイクロガスタービン発電機における燃料消費と電力変換効率

出力設定値 [kW]	出力 [kW]	消費燃料 [m ³ /h]	燃料消費の比 [m ³ /kWh]	発電効率[%]
29.00	29.07	22.30	0.767	25.0
25.80	25.89	19.41	0.750	25.6
21.75	22.10	17.68	0.800	24.0
14.50	14.50	12.43	0.857	22.4

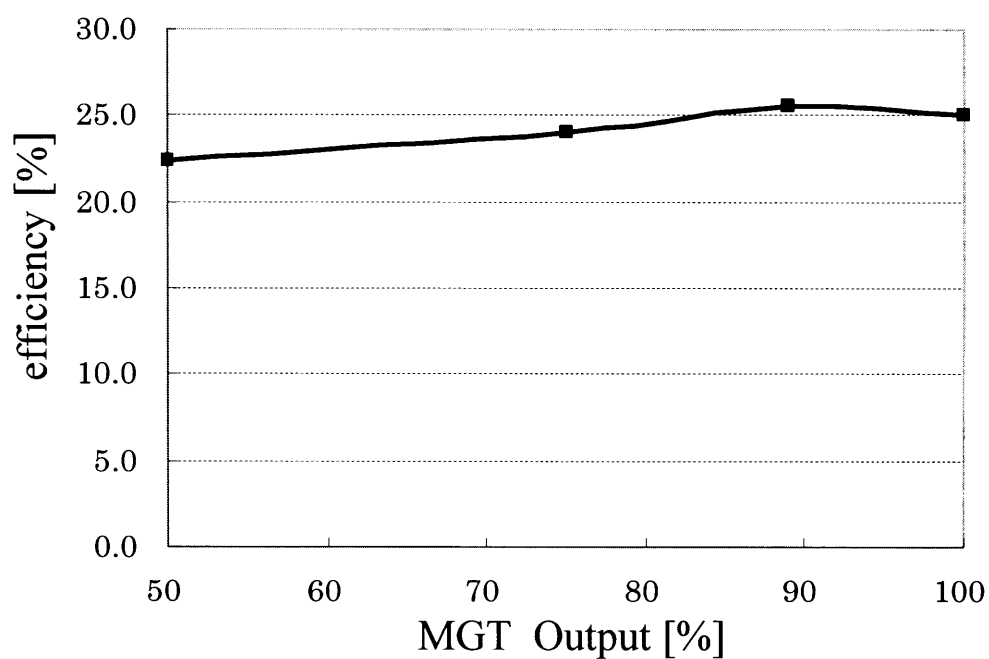


図 3.10 マイクロガスタービン発電機の電力変換効率

3.5. 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の関係

前述したように、提案するシステム構成では風力発電の電力平準化を実現するにあたり、中域成分 P_M の補償エネルギーの大きさやマイクロガスタービン発電機の稼働率を考慮する必要がある。そこで、図 3.7(a) に示す風力発電機の発電電力を平準化する際に、2 つの帯域分離周波数 f_L 及び f_M を変化させたときの、フライホイール電力補償システムで中域成分 P_M を補償するために必要なエネルギー ΔE_{FW} とマイクロガスタービン発電システムで補償対象とする低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L の変化を確認した。この結果を図 3.11 に示す。なお、このとき 2 つの帯域分離周波数 f_L 及び f_M は、用いる風力発電データの時間長が約 60 分であることから、低域分離周波数 f_L の変化は 0.0005Hz から 0.005Hz とする。そして、マイクロガスタービン発電システムの応答性能を考慮したうえで中域分離周波数 f_M は 0.02Hz からそのときの低域分離周波数 f_L 付近の値まで変化させた。また、低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L と中域成分 P_M を補償するために必要なエネルギー ΔE_{FW} は(3.4)式から(3.6)式のように算出した。

$$E_{FW}(t) = \int P_M(t) dt \quad (3.4)$$

$$\Delta E_{FW} = \max(E_{FW}(t)) - \min(E_{FW}(t)) \quad (3.5)$$

$$\Delta P_L = \max(P_L(t)) - \min(P_L(t)) \quad (3.6)$$

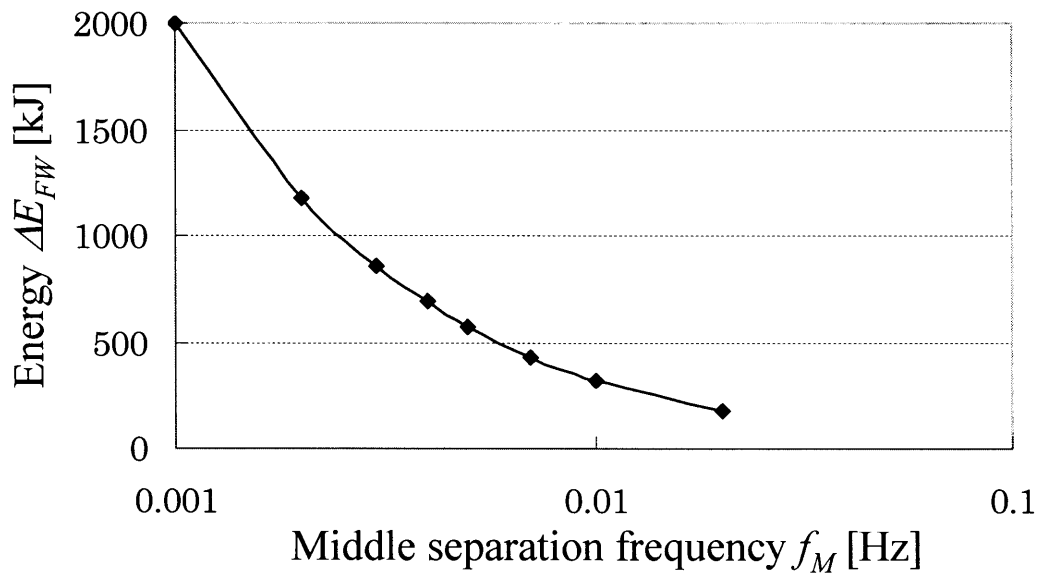
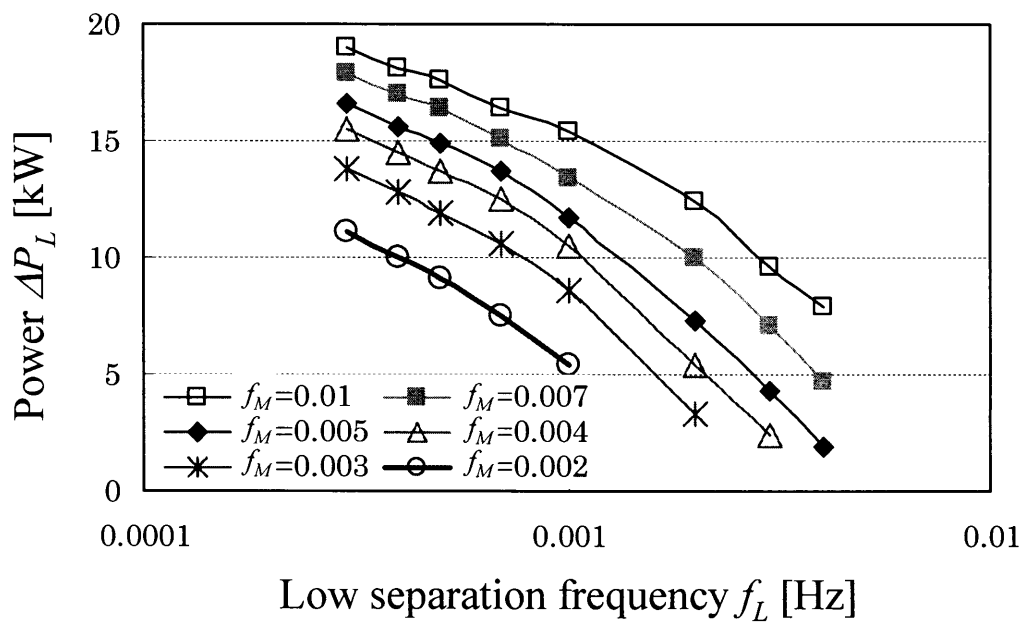
(a) フライホイール補償エネルギー ΔE_{FW} (b) 中域成分の変動幅 ΔP_L

図 3.11 帯域分離周波数の変化による補償量の変化

図 3.11(a)の結果から、フライホイール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、増加している。また、図 3.11(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確認できる。したがって、このような関係を考慮してシステム設計や帯域分離周波数を決定する必要がある。

システム設計の際には、まず、供給電力の品質を周波数成分の観点から考え、補償対象とする周波数領域の下限、すなわち低域分離周波数 f_L を決定する。その上で、使用する既存のマイクロガスタービン発電機の電力容量と駆動する際の稼働率を考慮して図 3.11(b)の特性から中域分離周波数 f_M を決定する。そして、図 3.11(a)の特性から、決定した中域分離周波数 f_M において必要とする補償エネルギーの大きさ ΔE_{FW} を求めることにより補償の際に必要な電力貯蔵装置のエネルギー容量を決定する。

次に、既存のマイクロガスタービン発電機と電力貯蔵装置を使用するときについて考える。このとき、図 3.11(a)の特性から、使用する電力貯蔵装置のエネルギー容量を考慮して中域分離周波数 f_M を決定する。そして、図 3.11(b)の特性から、決定した中域分離周波数 f_M を用いたときの低域成分 P_L の変動幅 ΔP_L とマイクロガスタービン発電機の稼働率を考慮し、低域分離周波数 f_L を決定する。こうすることで、既存の装置の補償能力に見合った品質の電力供給が可能であると考えられる。

3.6. 平滑コンデンサによる高域成分の補償

本システムでは、フライホイール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、(3.7)式のように決定すればよい。

$$C = \frac{2 \cdot \Delta E_C}{V_{DC_max}^2 - V_{DC_min}^2} \quad (3.7)$$

第4章 フィールド実験

4.1. 実験条件

本研究では提案するシステム構成の有効性を示すために、最大発電電力 100kW の風力発電システムと定格発電電力が 29kW のマイクロガスタービン発電システム、そして、定格電力 30kW かつ最大補償エネルギー900kJ のフライホイール電力補償システムが用意されている。したがって、前章に述べた内容を基に 3 つの帯域分離周波数 f_H , f_M , f_L を決定し、フィールド実験によって提案システムの有効性を検証する。

図 3.7 から、マイクロガスタービン発電システムで補償可能な周波数領域は 0.01Hz より低い領域である。また、フライホイール電力貯蔵装置の最大補償エネルギーは約 900kJ である。よって、図 3.11(a)から、中域分離周波数 f_M は 0.003Hz 以下に設定する必要がある。したがって、中域分離周波数 f_M はフライホイール電力貯蔵装置の最大補償エネルギーに対して余裕を持たせ、0.005Hz に設定する。次に、低域分離周波数 f_L は、図 3.11(b)において中域分離周波数 f_M が 0.005Hz のときを考える。フィールド実験システムではマイクロガスタービン発電機の動作変動幅を 13kW と設定している。したがって、低域分離周波数 f_L は、設定する動作変動幅に対して余裕を持たせ 0.001Hz に設定する。最後に高域分離周波数 f_H はフライホイール電力補償システムにおいて補償効果が期待できる最大周波数である 0.4Hz よりも低い値に設定する必要がある。しかし、周波数分離手法は図 3.4 に示すように帯域分離周波数をカットオフ周波数とする一次ローパスフィルタによって実現している。また、図 3.1(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約 0.1Hz 以下である。そのため、高域分離周波数を 0.3Hz にしたとき、この 0.1Hz 付近の補償信号は減衰し、位相遅れも大きくなる。図 4.1 にカットオフ周波数 0.3Hz の一次ローパスフィルタのボード線図を示す。また、図 3.1(b)から、0.3Hz 以上の変動は僅かであることから、高域分離周波数 f_L は 0.1Hz の補償信号が減衰しないように 0.3Hz 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_L は 2Hz に設定する。表 4.1 に決定した帯域分離周波数を示す。

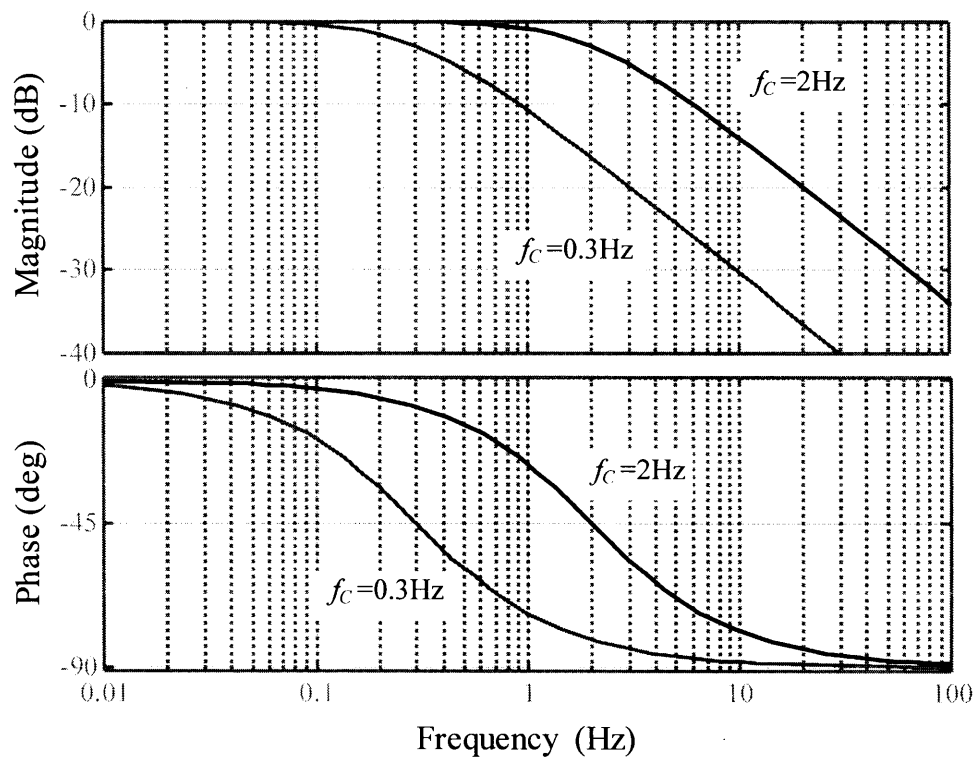


図 4.1 LPF のボード線図

表 4.1 帯域分離周波数

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

また、フライホイール電力貯蔵装置は、電気エネルギーを回転エネルギーに変換することで電力を貯蔵する装置であるため、時間経過に伴いその貯蔵エネルギーは減衰する。図4.2はフライホイール電力補償システムにおいて電力補償指令値 P_{FW_ref} を 0kW 一定としたときのフライホイール電力貯蔵装置の回転数の減衰を示したものである。なお、この結果はパワーハイテスタにおいて測定されたフライホイール電力貯蔵装置の一次周波数を測定し、これを極対数で除算することでフライホイール電力貯蔵装置の回転周波数の近似値を算出したものである。この結果から、貯蔵エネルギーは約 1000 秒の間に動作回転数である 3600rpm から約 1800rpm まで減衰していることが確認できる。これは電力補償指令値 P_{FW_ref} が 0kW であることからフライホイール電力補償システムではシステムから出力される電力が 0kW となるように制御される。このため、フライホイール電力貯蔵装置における風損や銅損、そして、インバータとで生じる電力損失がフライホイール電力貯蔵装置に貯蔵されているエネルギーにより供給されるためである。また、このとき、フライホイール電力貯蔵装置では約 1000 秒の間に全補償可能エネルギー(900kJ)が放出されたことから平均的に 0.9kW の損失が生じていることになる。したがって、この損失による貯蔵エネルギーの減衰を避けるために、フライホイール電力貯蔵装置に入力する電力補償指令値 P_{FW_ref} は周波数分離によって作成された指令値に対して-0.9kW(システムから出力する方向を正と定義)を加えている。

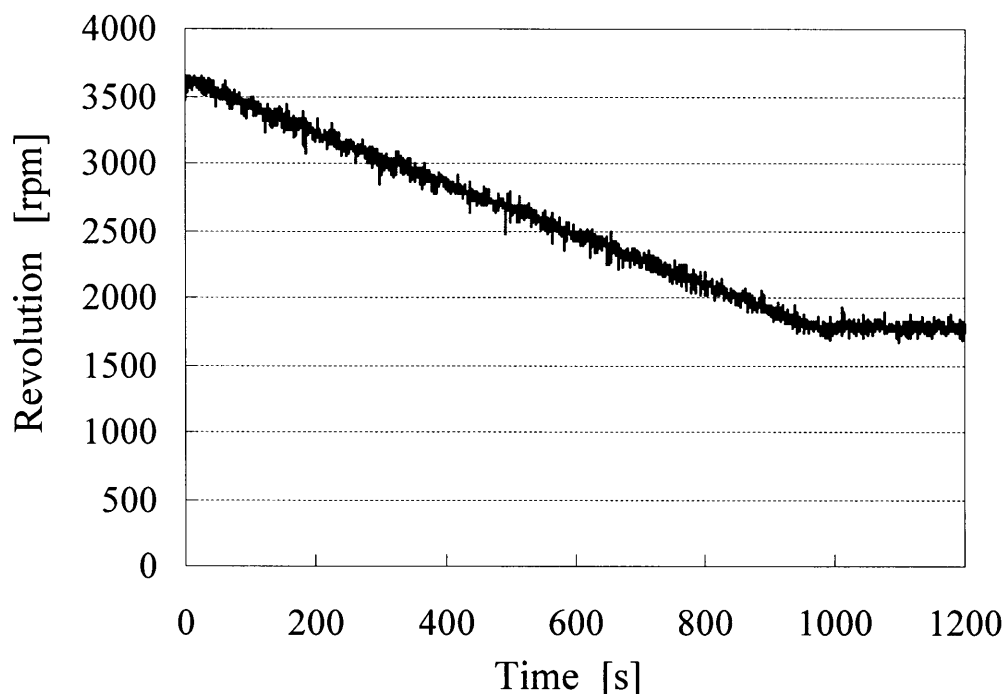
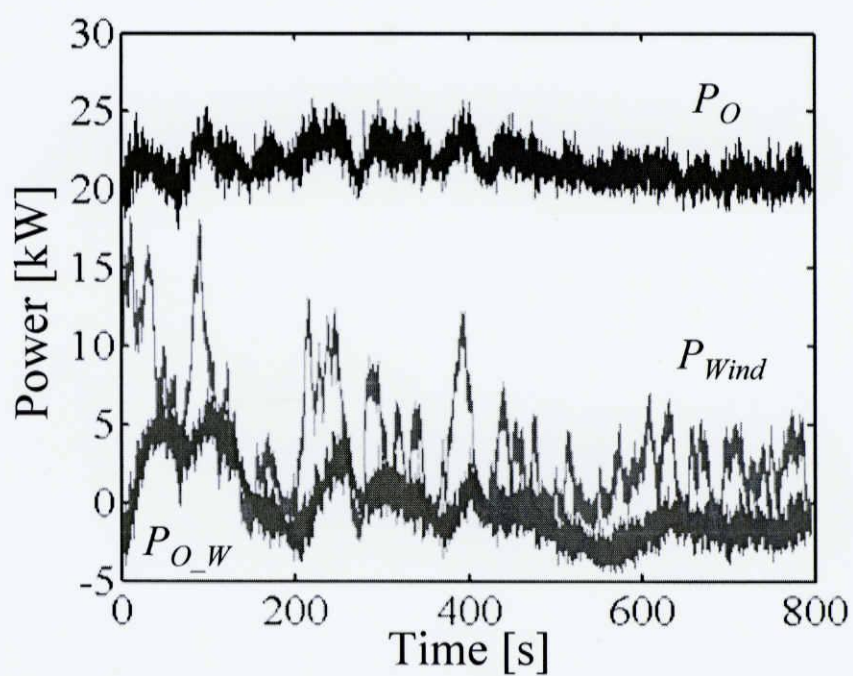


図 4.2 フライホイール電力貯蔵装置における回転数の減衰

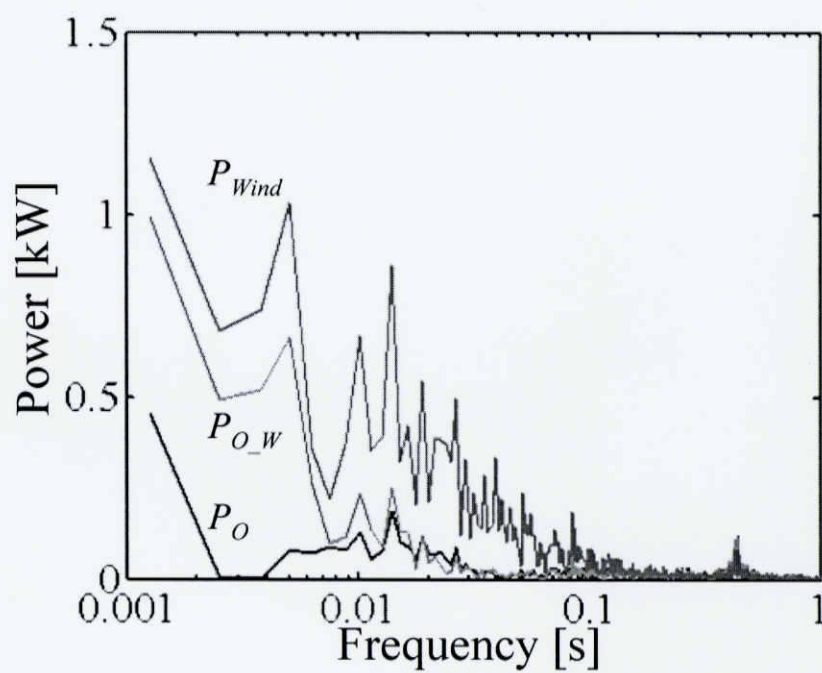
4.2. 実験結果及び考察

提案する複合型自然エネルギー発電システムにおいて帯域分離周波数を表 4.1 のように設定し実験した。この結果を図 4.3 に示す。なお、最終系統出力電力 P_O は風力発電システムの出力電力 P_{O_w} とマイクロガスタービン発電システムの出力電力 P_{MGT} の和によって算出している。

図 4.3(a) から、風力発電機からの発電電力 P_{Wind} と風力発電システムの出力電力 P_{O_w} を比較すると、フライホイール電力補償システムで風力発電機から発電される変動電力の中域成分を補償することで、数秒から数十秒といった周期で生じていた電力変動を補償できていることが確認できる。さらに、風力発電システムの出力電力 P_{O_w} と最終的な系統出力 P_O を比較するとマイクロガスタービン発電システムによって風力発電機から発電される電力の低域成分を補償することで、百秒から数百秒程度の周期で生じる変動が軽減されていることが確認できる。この結果は、図 4.3(b) に示す各測定電力を周波数解析した結果からも同様のことが確認できる。まず、風力発電機出力 P_{Wind} と風力発電システムの出力 P_O の周波数解析結果を比較したとき、中域分離周波数 f_M として設定した 0.005Hz よりも高い周波数領域においてその変動を軽減できている。また、風力発電システムの出力 P_{O_w} と最終的な系統出力 P_O の周波数解析結果を比較したとき 0.002Hz よりも高い周波数領域においてその変動を軽減できていることが確認できる。したがって、提案する複合型自然エネルギー発電システムはクリーンかつ高品質な電力供給を実現可能である。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、フライホイール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、フライホイール電力貯蔵装置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置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としない。



(a) 電力補償結果



(b) 周波数解析結果

図 4.3 電力補償結果

また、このような補償を行う上で、フライホイール電力補償システム単体で補償に要したエネルギー E_{FW} 及び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に要したエネルギーの総和 E_{CMP} の時間変化を確認した。この結果を図 4.4 に示す。なお、これらのエネルギー E_{FW} 、 E_{CMP} は以下のように算出している。

(1) FW 電力補償システム補償エネルギー E_{FW}

FWES から出力される電力を測定し、これの交流分を取り出し、時間積分し算出

(2) 補償エネルギーの総和 E_{CMP}

風車の発電電力 P_{wind} の交流成分と最終出力 P_o の交流成分の差を時間積分し算出

図 4.4 から、図 4.3 に示すフィールド実験において風車からの発電電力 P_{wind} の変動を補償するためには 700kJ 程度の補償エネルギーが必要である。そして、このうち、フライホイール電力補償システムにおいて補償を行った際に使用したエネルギーは約 300kJ である。したがって、マイクロガスタービン発電システムによって風力発電の低周波変動を補償することで、フライホイール電力貯蔵装置で補償するエネルギー量を軽減することが可能である。以上のことから提案する複合型自然エネルギー発電システムは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するために有効なシステム構成といえる。

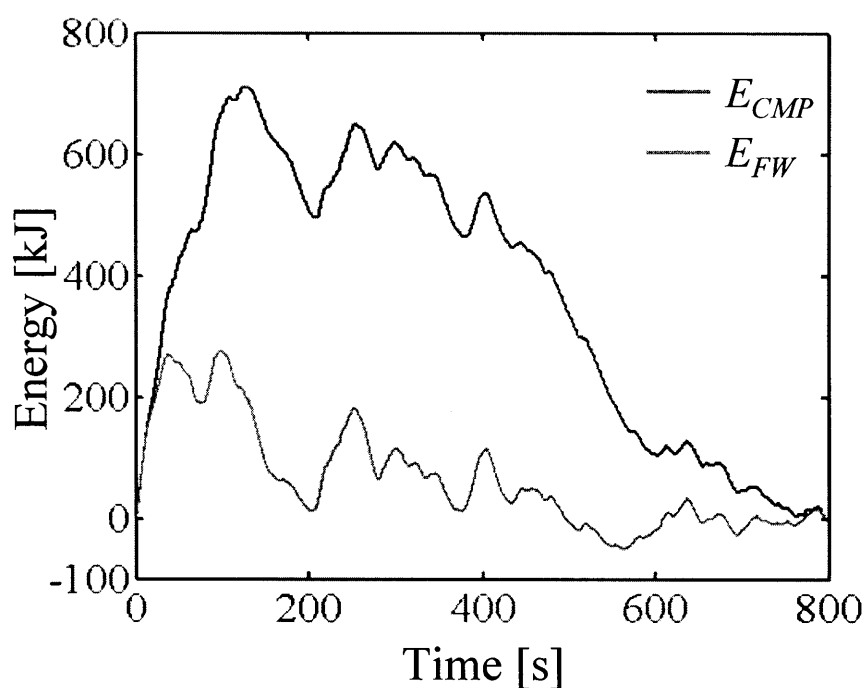
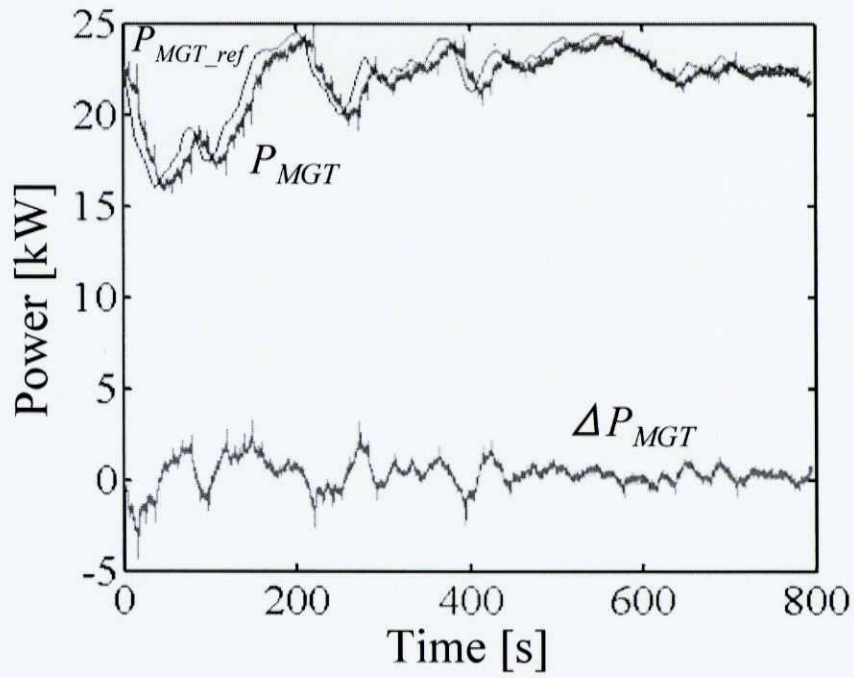
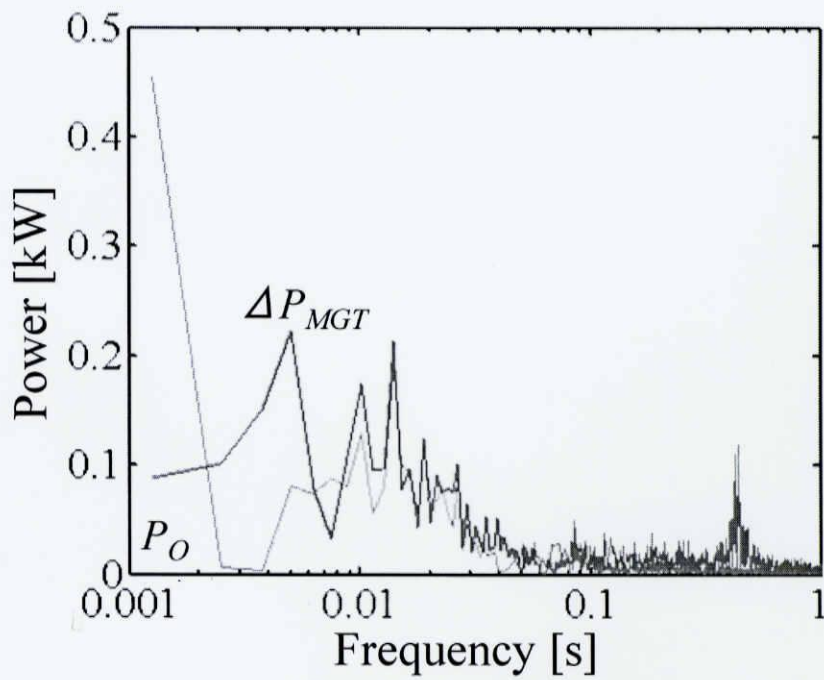


図 4.4 補償エネルギー

しかし、図 4.3(a)をみると、最終的な系統出力電力 P_o には数十秒から百秒程度の周期の変動が生じてしている。これは、マイクロガスタービン発電システムの応答遅れが原因であると考ええる。図 4.5(a)にマイクロガスタービン発電システムにおける電力補償指令値 P_{MGT_ref} とその出力電力 P_{MGT} そして、その誤差 ΔP_{MGT} を示す。そして、図 4.5(b)に最終的な系統出力電力 P_o とマイクロガスタービン発電システムの応答誤差 ΔP_{MGT} の周波数解析結果を示す。図 4.5(a)に示すマイクロガスタービン発電システムの応答誤差 ΔP_{MGT} と図 4.3(a)に示す最終系統出力電力 P_o を比較すると、出力電力 P_o には応答誤差 ΔP_{MGT} と同様の変動が生じていることが確認できる。また、図 4.5(b)から、最終系統出力電力 P_o と応答誤差は問題としていた周波数帯域において同様の周波数成分を持っていることが確認できる。したがって、より高品質な電力供給を実現するためにはマイクロガスタービン発電システムで生じる応答遅れを補償する必要がある。



(a) 応答波形のとその誤差



(a) 周波数解析結果

図 4.5 マイクロガスタービン発電システムにおける応答遅れ

したがって、マイクロガスタービン発電システムの応答誤差 ΔP_{MGT} をフライホイール電力補償システムで補償することで高品質な電力供給を実現できると考えられる。すなわち、図 4.6 に示すようにマイクロガスタービン発電システムの応答遅れにより生じる誤差 ΔP_{MGT} をフライホイール電力補償システムへの電力補償指令値 P_{FW_ref} に加える。このときの実験結果を図 4.7 に示す。なお、帯域分離周波数は表 4.1 の値を用いた。

図 4.7(a)の結果から、最終的な系統出力 P_O は図 4.3(a)で生じていた数十秒から百秒程度の周期の変動が軽減している。また、図 4.3(b)と図 4.7(b)の周波数解析結果からも 0.01Hz 付近の変動が軽減できていることが確認できる。このことから、マイクロガスタービン発電システムの応答誤差 ΔP_{MGT} をフライホイール電力補償システムによって補償することでより高品質な電力供給が可能である。

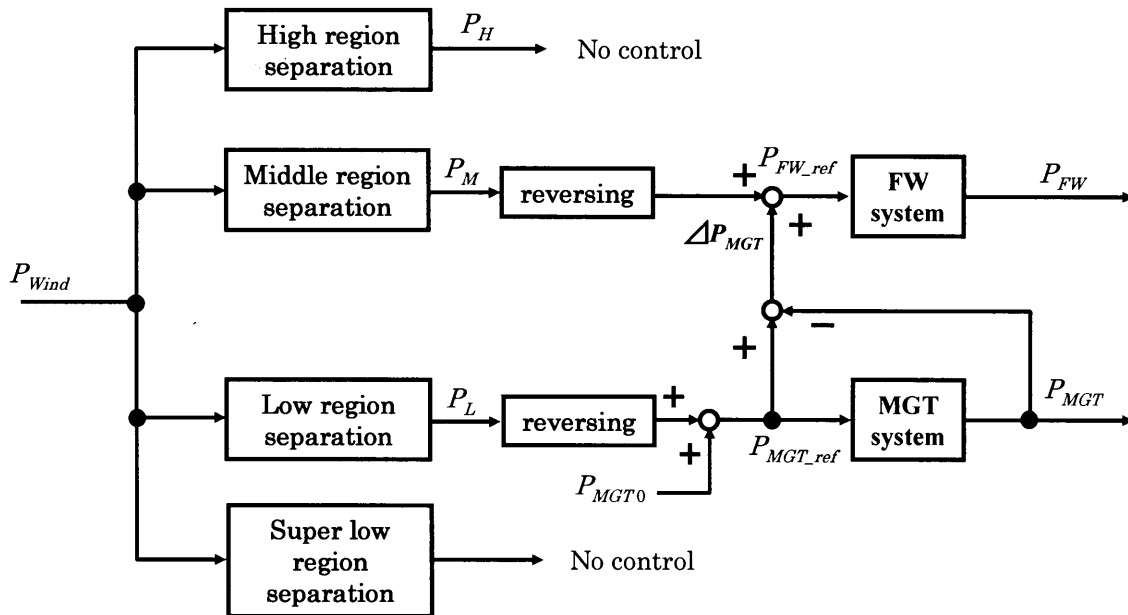
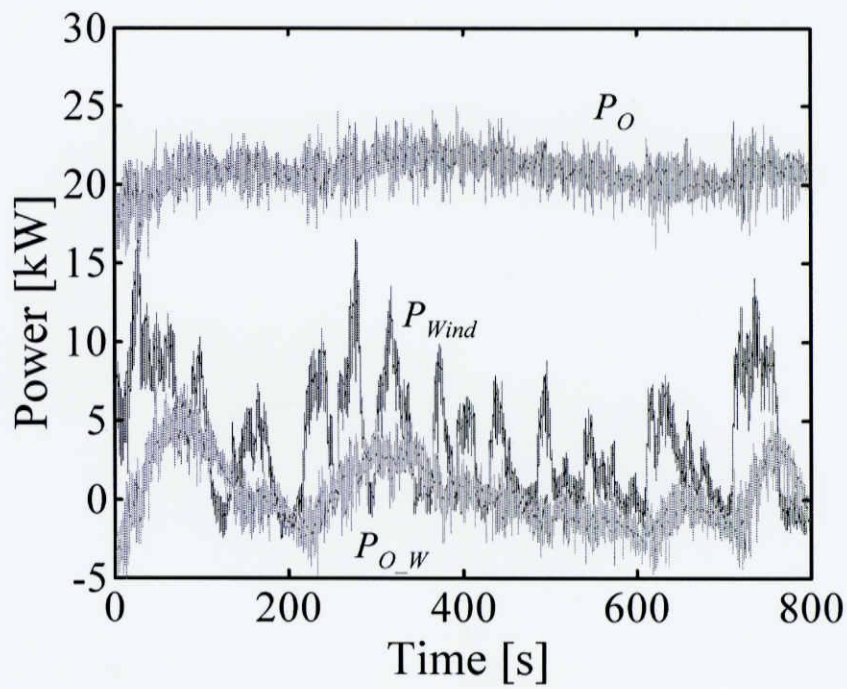
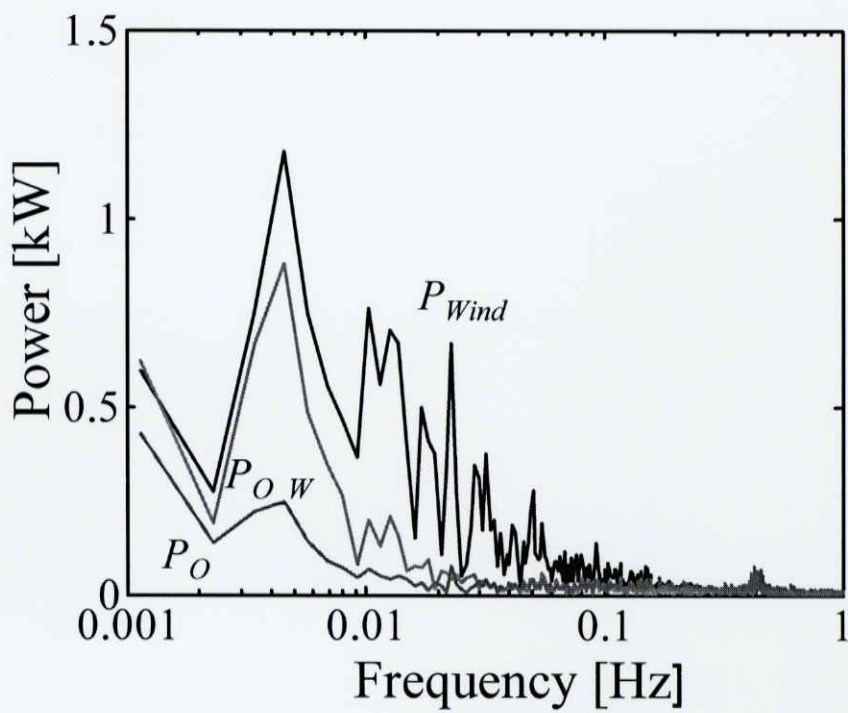


図 4.6 制御ブロック



(a) 電力補償結果



(b) 周波数解析結果

図 4.7 MGT 発電システムの応答遅れを補償した電力補償結果

次に、図 4.7 に示す実験において、フライホイール電力補償システム単体で補償に要したエネルギー E_{FW} 及び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に要したエネルギーの総和 E_{CMP} の時間変化を確認した。この結果を図 4.8 に示す。この結果から、図 4.4 に示す実験結果と同様にフライホイール電力補償システムで補償するエネルギーの大きさを約 700kJ から約 400kJ へと約 300kJ 低減できていることが確認できる。しかし、図 4.4 と図 4.8 に示す結果を比較したとき、システム全体で補償に要したエネルギー E_{CMP} の大きさは大きく変わらないが、図 4.4 の結果ではフライホイール電力補償システムで補償するエネルギー E_{FW} の大きさを約 400kJ 軽減できているのに対し、図 4.8 の結果では低減量が約 300kJ と減少している。この二つの実験は同一条件の下に行った実験ではないため、単純に比較することはできないが、フライホイール電力補償システムにおいてマイクロガスタービン発電システムの応答誤差 ΔP_{MGT} を補償したことにより、低域成分 P_L の変動の一部をフライホイール電力補償システムで補償したためであると考えられる。しかし、マイクロガスタービン発電システムで低周波変動を補償することによるフライホイール電力貯蔵装置のエネルギー容量低減効果は確認できる。

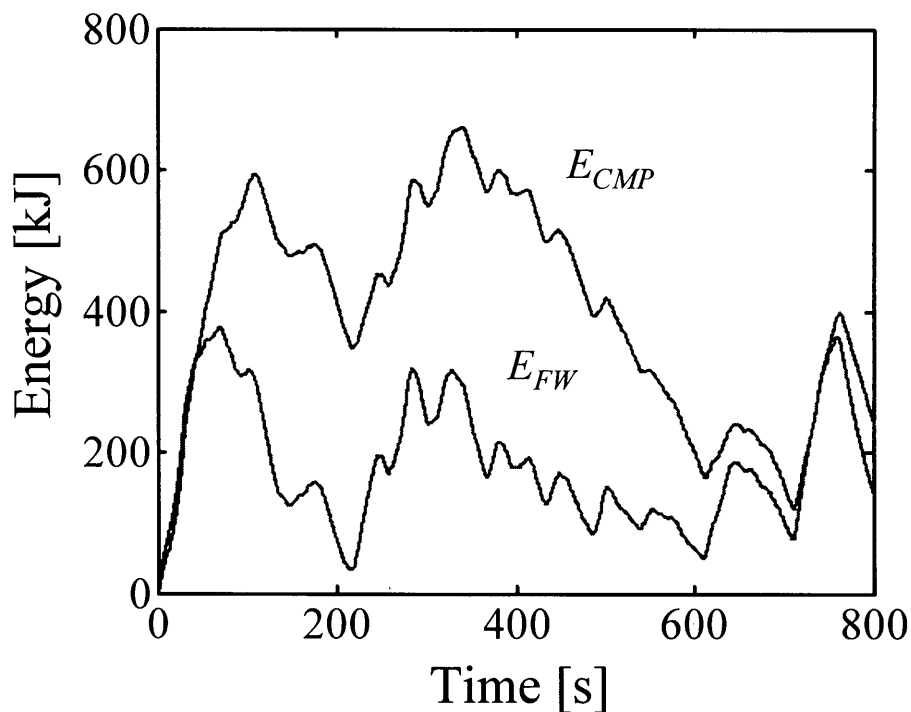
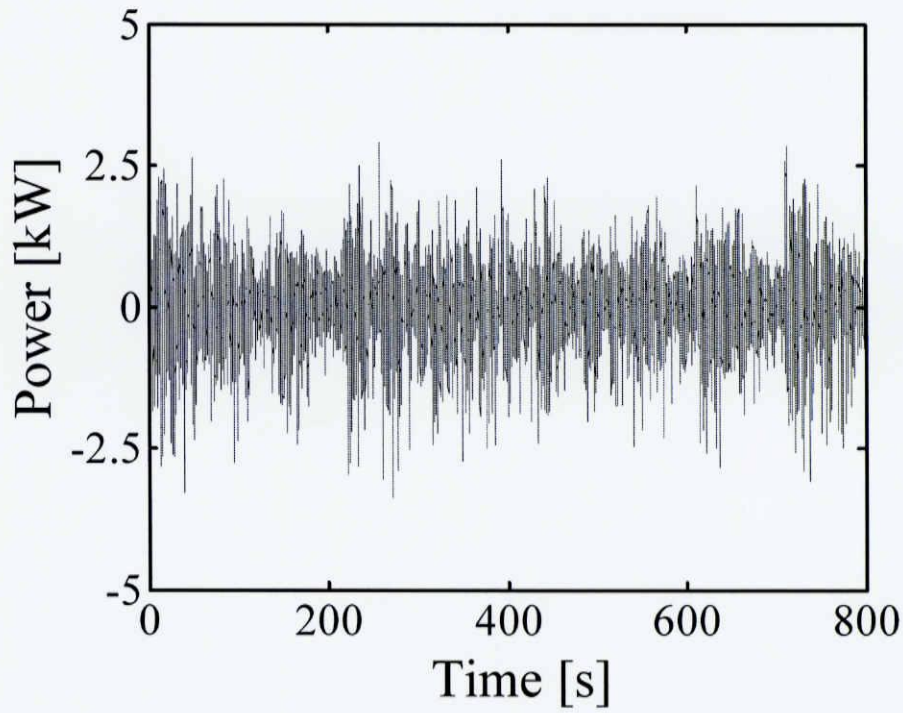


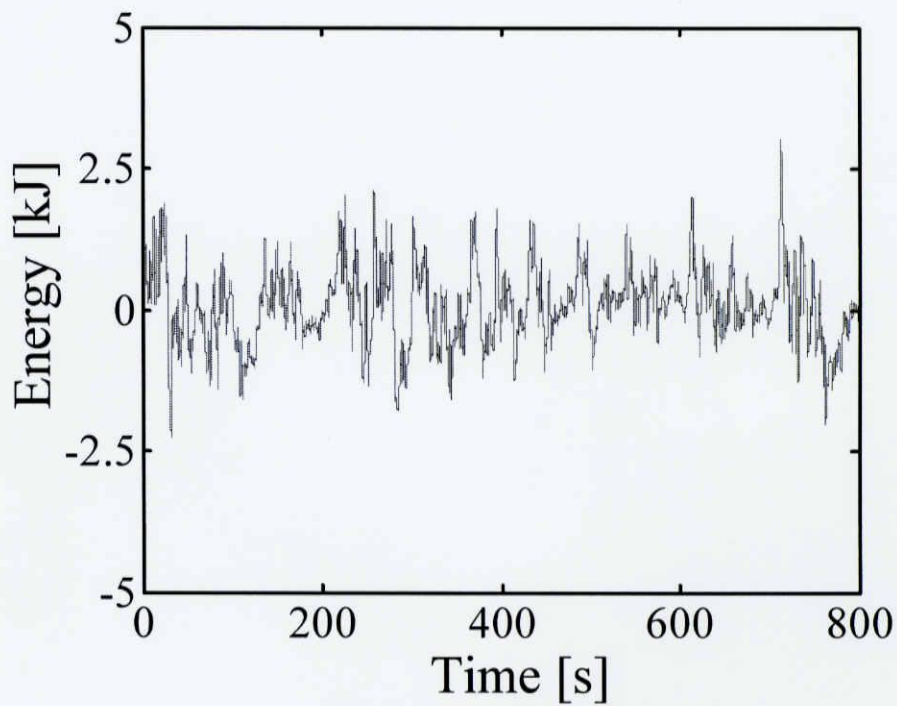
図 4.8 補償エネルギー

また、提案システムではフライホイール電力補償システムでも補償できない高周波変動は風力発電システムの電力変換器に付属する電解コンデンサによって補償する。図 4.9 は最終系統出力 P_o において生じる高周波変動電力 P_c とこれを時間積分することで算出したエネルギー E_c である。なお、高周波変動電力 P_c は周波数分離における超低域成分 P_{SL} の平均値を減算した交流分と最終系統出力 P_o の交流分の差をとることで算出している。図 4.9(b) から、補償できなかった高周波変動を補償するためには 5kJ のエネルギーを必要とする。風力発電システムでは直流リンク電圧を 650V から 710V の間で変動を許容している。現在、風力発電システムの直流リンクには 16.05mF の電解コンデンサが用いられているが、高周波変動 P_c を完全に補償するためには、(3.7)式から、さらに、約 125mF の容量を有した平滑用のコンデンサを用意する必要がある。

現状では、フライホイール電力補償システムの応答性から、その補償帯域は 0.4Hz 未満である。このため、図 4.7(b) に示すように 0.4Hz から 0.5Hz の変動成分を除去できないでいる。したがって、フライホイール電力補償システムの応答性能を向上させる必要がある。こうすることで、より高品質な電力供給が可能であり、風力発電システムにける電解コンデンサで補償すべき高周波成分が低減されるため、必要な平滑コンデンサの容量を低減することができる。



(a) 補償電力



(b) 補償エネルギー

図 4.9 電解コンデンサによる補償電力と補償エネルギー

第5章 フライホイール電力補償システムの応答性向上

現在のフライホイール電力補償システムはその補償帯域は 0.4Hz 未満である。これは一般的な電動機トルク制御の応答性と比較すると十分であるとはいえない。したがって、本章ではフライホイール電力補償システムが低応答である原因を検討するとともに、その改善法について検討する。

5.1. フライホイール電力補償システムの応答性

現在、フライホイール電力補償システムは図 5.1 に示す制御ブロックのように、制御される。まず、図 2.6 における風力発電システムとの直流リンク電圧・電流を時定数 1ms のローパスフィルタを通過させ、乗算し補償電力 P_{FW} を検出する。次に、補償電力 P_{FW} とローパスフィルタを通過させた後の電力補償指令値 P_{ref_lpf} の誤差が最小となるように PI 制御される。そして、PI 制御器からはフライホイール電力貯蔵装置の誘導電動発電機を制御するための一次周波数 f_1 が作成され、V/f 一定制御を基とする制御法によって補償電力 P_{FW} が制御される。この制御構成では、外部から入力された電力補償指令値 P_{FW_ref} に対して時定数 0.2 秒の LPF が設けられている。このため、応答性能はローパスフィルタの特性に制限される。したがって、応答性を向上させるためにはこのローパスフィルタの除去または再設計が必要である。しかし、ローパスフィルタが設けられている要因としては以下のことが考えられる。

- (1) 本システムは既存の風力発電システムにフライホイール電力貯蔵装置を付加した構成であるため、図 2.6 のように、主回路の双方向チョッパユニットが設けられている。双方向チョッパにはインダクタンスが存在し、これにより応答遅れを考慮した制御設計がなされているため。
- (2) 本システムはフライホイール電力貯蔵装置の誘導機部分は図 5.1 のように V/f 一定制御法を基とする制御法により制御される。よって、電力補償指令値 P_{FW_ref} が急変したとき一次周波数指令値 f_{ref} は急変し、フライホイール電力貯蔵装置には過電流が流れる。これを防止するためにローパスフィルタが設けられている。

したがって、応答性を向上させるためにはフライホイール電力補償システムの主回路を双方向チョッパを用いない構成に変更する必要がある。また、主回路の変更だけではなく、電力補償指令値 P_{FW_ref} に対して設けられているローパスフィルタを再設計する必要がある。本システムは、風力発電システムは 440V の電力系統に接続されているのに対してフライホイール電力補償システムは定格 200V のフライホイール電力貯蔵装置を用いる。このため各システムの直流リンク電圧は異なる。このため、上述のようにフライホイール電力補償システムに双方向チョッパユニットを設けることで両システムを接続している。しかし、フライホイール電力補償システムの応答性の観点から考えるとチョッパユニットは風力発電システムとフライホイール電力補償システムが接続される以前に設ける必要があると考えられる。また、電力変換器による損失を軽減するために直流チョッパは設けないことが望ましい。したがって、風力発電システムとフライホイール電力補償システムでは、等しいリンク電圧で使用が可能な機器を用いるべきである。

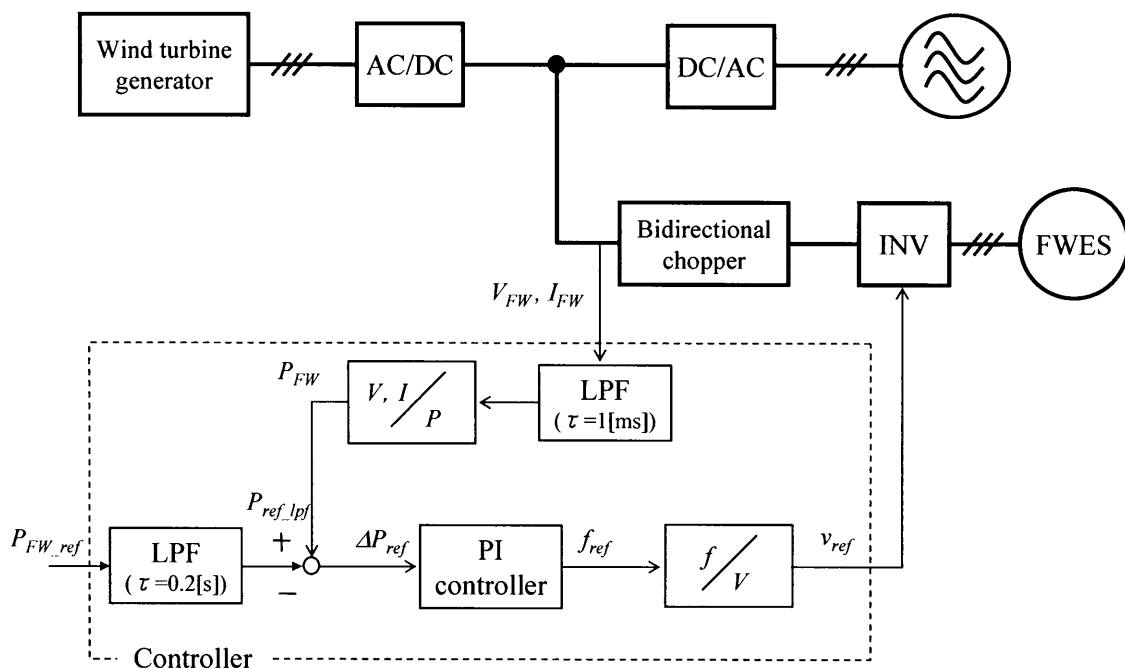


図 5.1 フライホイール電力補償システムにおける電力制御ブロック

5.2. 模擬実験システム

前述したようにフライホイール電力補償システムには双方向チョップパを用いない構成とすることが望ましい。しかし、フィールド実験システムにおいて双方向チョップパを取り除くことはシステムの構成上、困難である。そこで、図 5.2 に示すような模擬実験システムを作成しこれにより双方向チョップパユニットを用いないシステム構成における応答性の向上を検討する。

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。

風力発電システムは直流電動機と直流発電機、昇圧チョップパ、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、DSP により昇圧チョップパのスイッチングパターンを制御することにより、図 5.2 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を模擬する。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。

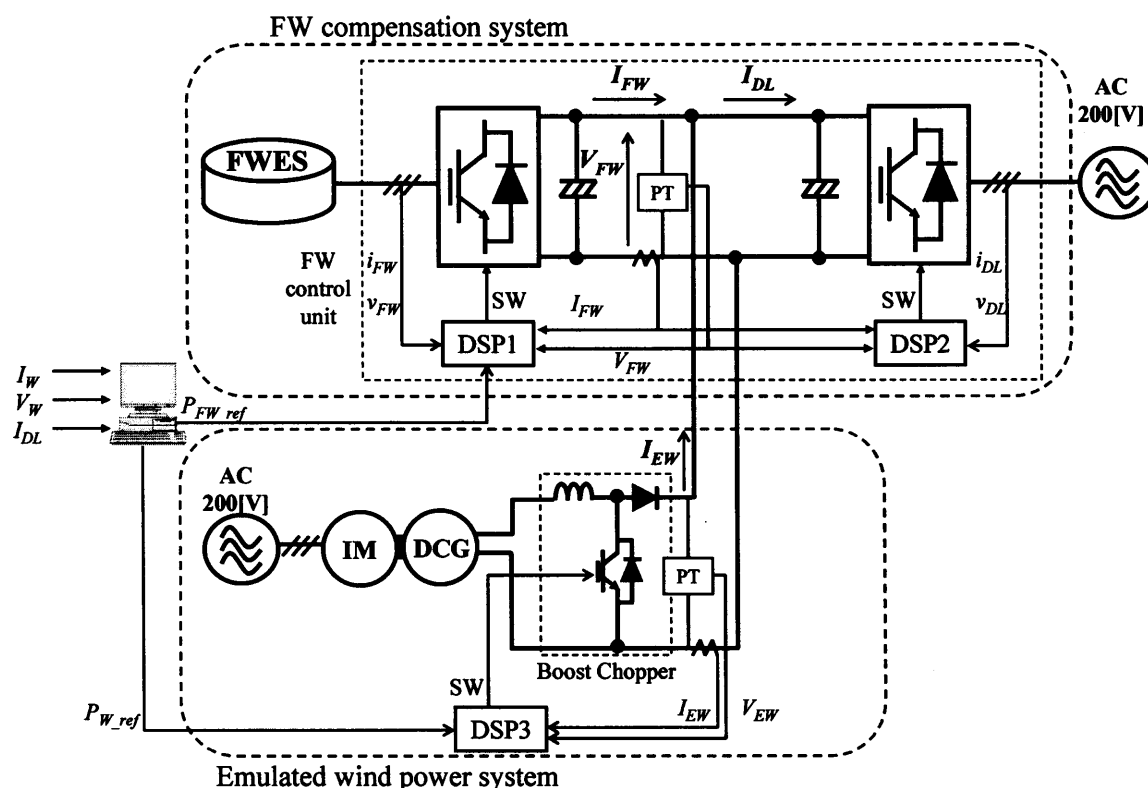


図 5.2 模擬実験システム

表 5.1 電動機・発電機の定格

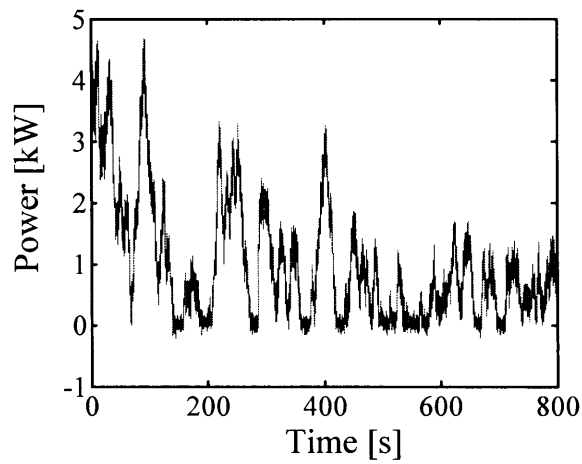
	直流機	誘導機
TYPE	三菱電機 SDN-CFZ	三菱電機 SF-JR
定格容量 [kW]	5.5	3.7
定格電圧 [V]	210	220
定格電流 [A]	33	13.4
定格回転数 [rpm]	1750	1730
定格周波数 [Hz]	–	60
極数	4	4
絶縁	F種	E種

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)マイウェ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。

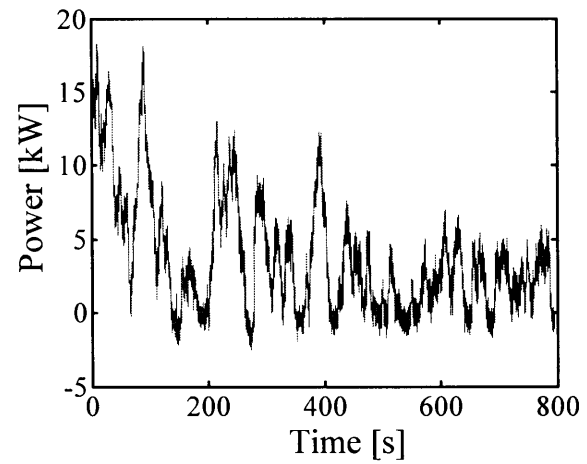
また，模擬実験システムは農場実験システムと同様に，風力発電模擬システムから発電された電力を，インターフェイス製の AD・DA 変換ボード PCI-3523A を経てパソコンに取り込む。そして，パソコン内でフライホイール電力補償システムへの電力補償指令値を作成し，出力する。なお，制御プログラムは農場システムと同様に Visual Basic6.0 で作成する。そして，風力発電模擬システムでは直流チョッパのスイッチングパターンを制御することで直流発電機の発電電力を制御し，風力発電電力を作成する。このため，

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パを制御する 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、Visual Basic6.0 による制御プログラムにお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する。

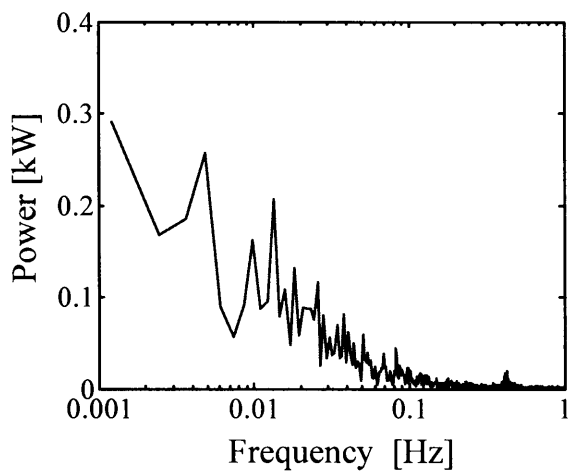
また、風力発電模擬システムでは、定格容量 3.7kW の誘導電動機によって直流発電機を回転させる。したがって、直流発電機から定常的に発電可能な電力は 4.5kW 程度である。実際にフィールド実験システムの風力発電機から発電される電力の最大値は発電電圧が高い場合で 20kW から 25kW 程度であった。このため、模擬実験システムではフィールド実験システムの 1/4 から 1/5 倍の実験規模となる。図 5.3 に風力発電機からの発電電力を模擬した発電電力波形を示す。この波形は図 4.3 に示した過去にフィールド実験システムにおいて測定した風力発電機から出力電力データを基にこれを 1/4 倍して作成している。図 5.3(a)から模擬実験システムにおいて発電される電力は、図 5.3(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 5.3(a)の波形は図 5.3(b)のものと比べ、わずかに遅れが生じている。また、図 5.3(b)では発電電力が 0kW を下回っているのに対して、図 5.3(b)はほとんど 0kW を下回っていない。これは、風力発電模擬システムは高圧チョッパによって出力電力を制御していることから、フライホイール電力補償システム側から風力模擬システム側に電力の逆流が生じないためである。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 5.3(c)、図 5.3(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。



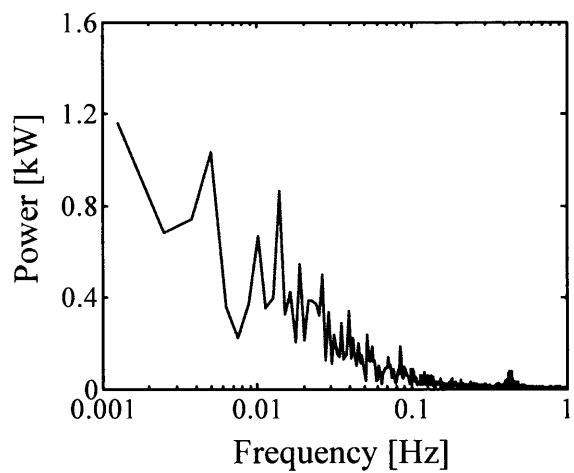
(a) 模擬システム発電電力



(b) 風力発電機発電電力



(c) 模擬発電電力周波数解析結果



(d) 風力発電機電力周波数解析結果

図 5.3 模擬システム及び風力発電機の発電電力

5.3. フライホイール駆動制御装置の制御構成

フライホイール駆動制御装置では、(株)マイウェイ技研によって作成された制御プログラムがあらかじめ用意されており、図 5.4 に示す正面操作部分を以下のように操作することで駆動する。まず、主電源をオンにする。そして、運転 SW をオンにし、系統連系インバータを起動させる。直流リンク電圧が 350V に立ち上がったことを確認し、START ボタンを押す。するとフライホイール電力貯蔵装置の回転速度が約 2683rpm になるまで蓄電され、これ以降は外部アナログ端から入力される電力補償指令値に従い補償電力が制御される。また、模擬実験システムのフライホイール駆動制御装置はフィールド実験システムのそれとは異なり、DSP の制御プログラムを自由に変更できる。

このような制御が実現されるにあたり、main 関数では図 5.5 のようなフローチャートによりシステムの初期化と状態シーケンスの制御が実行される。そして、キャリア同期割り込みルーチンにより図 5.6 に示すフローチャートによってフライホイール電力貯蔵装置の誘導機が制御される。

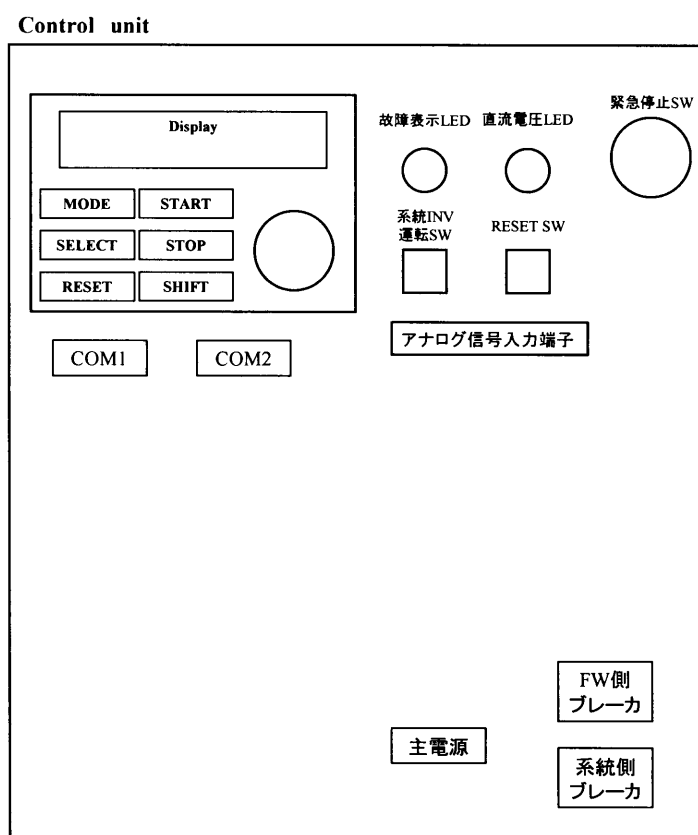


図 5.4 フライホイール駆動制御装置正面図

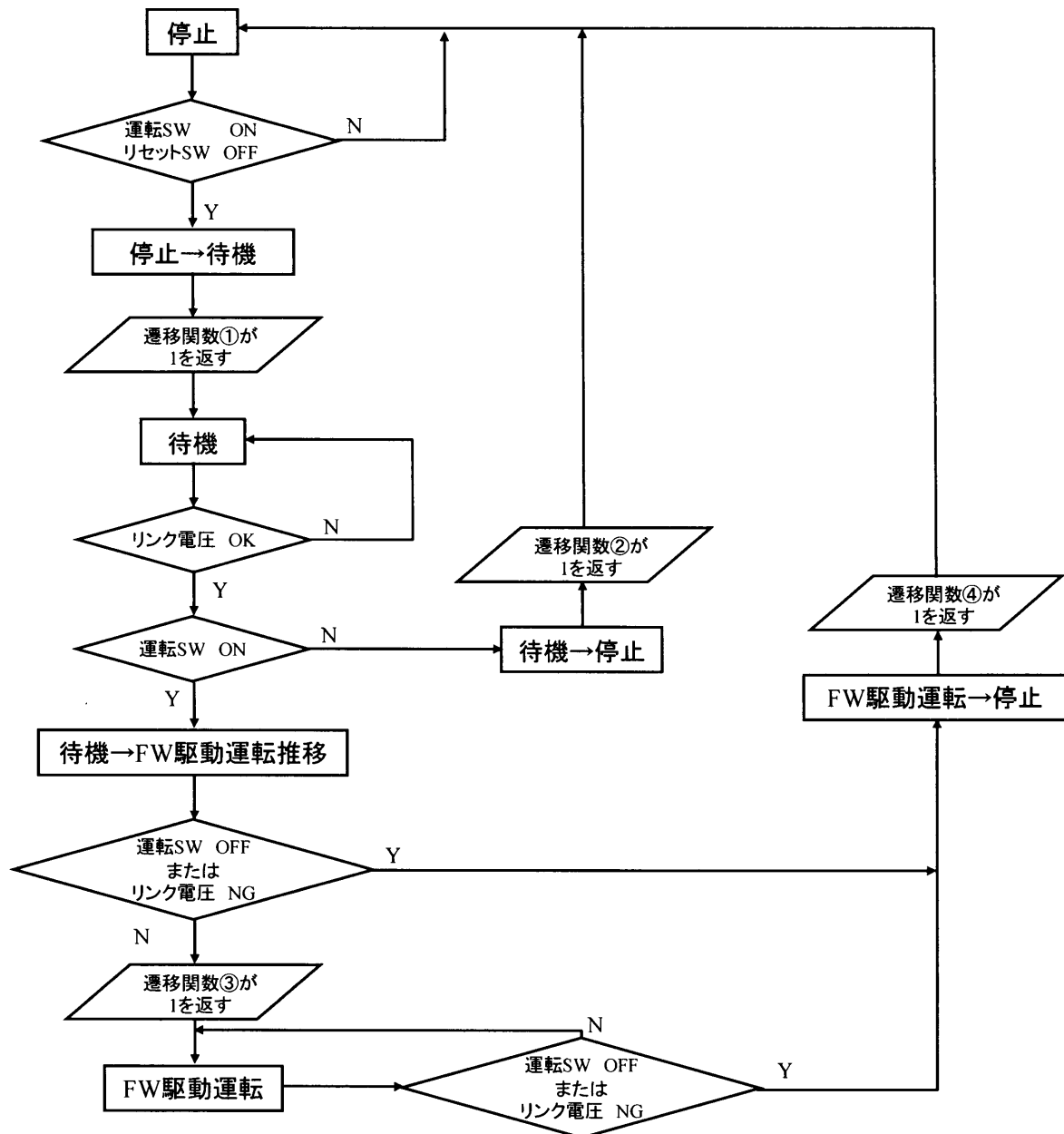


図 5.5 main 関数フローチャート

以下に main 関数におけるシーケンス処理を説明する。

〔停止モード〕

運転が開始されていない状態. 運転 SW がオン且つリセット SW がオフで次のモードに遷移する。

〔停止→待機遷移モード〕

停止モードから待機モードに遷移するために遷移関数①を実行する. 遷移関数①が戻り値を返せば待機モードに遷移する。

＜遷移関数①＞

停止モードから待機モードに遷移するために実行され, 主に PWM 信号の停止し AD サンプルングの設定が行われる。

〔待機モード〕

停止から運転の間に設けられたモードでありリンク電圧が 350V に立ち上がるのを待機する。リンク電圧と運転 SW を確認し次のモードに遷移する。

〔待機→FW 駆動運転遷移モード〕

停止モードから待機モードに遷移するために遷移関数③を実行. 遷移関数③が戻り値を返せば待機モードに遷移する。

＜遷移関数③＞

待機モードから FW 駆動モードに遷移するため実行され, 主にエラーリセット PWM 信号の出力などを実行する。

〔FW 駆動運転モード〕

回転周波数を拾い上げ, 一次周波数が 89.433Hz 以下の場合にはこの周波数まで蓄電する. 指令値に従い電力制御を行う。

〔待機→停止モード〕〔FW 駆動運転→停止モード〕

条件を満たさず停止モードに遷移するモードである。

＜遷移関数②④＞

シーケンス初期化関数を実行する。

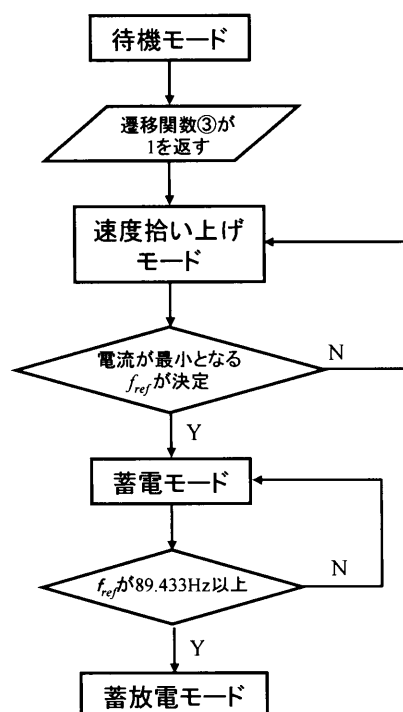


図 5.6 キャリア同期割り込みルーチンにおける制御モードの遷移

図 5.5 に示すフローチャートのようにシステムの状態が遷移する中でキャリア同期割り込みルーチンが実行され、システムの状態やフライホイール電力貯蔵装置の回転数に応じて、制御モードが遷移する。そして、この制御モードの遷移によりフライホイール電力貯蔵装置の回転数の拾い上げや、初期蓄電、そして、電力制御といったモードを切り替える。以降に各制御モードについて説明する。なおこれ以降回転周波数という表現を用いる。しかし、これの本質的な意味はフライホイール駆動用インバータから出力する一次周波数のことであり本研究で用いるフライホイール電力貯蔵装置の誘導機ではすべりが 1%未満で動作することから一次周波数と回転周波数(電気角換算)は近似的に等しいとみなしているためこのように表記する。

[FW 待機モード]

周波数指令値を作成しない IDLE 状態。前節の停止モードでこのモードに初期化される。また、図 5.5 の遷移関数③が実行されることにより速度拾い上げモードに遷移する。

[FW 速度拾い上げモード]

一次周波数を上限である 120Hz から割り込みごとに 0.001Hz ずつ 10Hz まで減少させていき、検出した u , w 相電流を $\alpha\beta$ 変換し i_α , i_β を求め、 $\sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}$ を算出しこれが最小になる周波数を回転周波数とする。このとき、電圧指令値は(5.1)式で作成される。そして、拾い上げが完了すると制御モードを蓄放電モードへ遷移するための蓄電モードに遷移する。

$$V_{ref} = 30 + 0.01 \cdot f_{ref} \quad (5.1)$$

[蓄電モード]

前制御モードで拾い上げられた回転周波数が 89.433Hz よりも小さいときには回転周波数が 89.433Hz となるまで蓄電する。周波数指令値は、割り込みごとに(5.2)式で算出される Δf_{ref} だけ増加させる。そして、V/F 一定制御法を基に(5.3)式で制御が行われる。この制御を行い回転周波数が 89.433Hz に達したとき蓄放電モードに遷移する。

$$\Delta f_{ref} = 89.433 / 300 \cdot T_s \quad (5.2)$$

但し、サンプリング周期 $T_s = 0.1\text{ms}$

$$|V| = K_v \cdot f_{ref} \quad (5.3)$$

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

[蓄放電モード]

このモードでは図 5.1 に示す制御ブロックに従い補償電力が制御される。外部アナログ端子から入力された電力指令値 P_{FWref} に時定数 0.2 秒の LPF を通し、作成される P_{ref_lpf} と出力電力 P_{FW} の偏差を PI 制御器に入力される。そして、電力偏差が最小になるように周波数指令値 f_{ref} を作成し、(5.3)式を基に電力制御が実行される。

フライホイール駆動制御装置では上述のような制御構成が組み立てられている。このなかでフライホイール電力補償システムによって電力制御がなされるのはキャリア同期割り込みルーチンにおける蓄放電モードである。したがって、蓄放電モードの制御プログラムを変更の対象とする。具体的には図 5.1 に示す制御ブロックに示されている外部入力された電力補償指令値に対しても設けられているローパスフィルタを再設計する。また、高速なトルク制御が困難な V/f 制御に変わり、誘導機の一次磁束制御を適用することでフライホイール電力補償システムの応答性の向上を目指す。誘導機の一次磁束制御とは誘導機の一次磁束を所定の値に保ち、一次電流と一次磁束の積として誘導機の瞬時トルクを演算する。この詳細は次節に記載する。

5.4. 一次磁束制御法

図 5.7 に誘導機の駆動系を示し、図 5.8 に一次各周波数 ω_1 で回転する γ - δ 軸座標系を示す。そして、(5.4)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、(5.4)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

L_1 : 1 次巻線インダクタンス

M : 相互インダクタンス

P : 微分演算子

$i_{1\gamma}, i_{1\delta}$: 1 次側 γ, δ 軸電流

R_2 : 2 次導体抵抗

L_2 : 2 次導体インダクタンス

ω_1, ω_2 : 1 次, 2 次角周波数

v_γ, v_δ : 1 次側 γ, δ 軸電圧

$i_{2\gamma}, i_{2\delta}$: 2 次側 γ, δ 軸電流

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 P & L_1 \omega_1 & MP & M\omega_1 \\ -L_1 \omega_1 & R_1 + L_1 P & -M\omega_1 & MP \\ MP & -M\omega_1 & R_2 + L_2 P & L_2 \omega_2 \\ M\omega_2 & MP & -L_2 \omega_2 & R_2 + L_2 P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\gamma} \\ i_{1\delta} \\ i_{2\gamma} \\ i_{2\delta} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

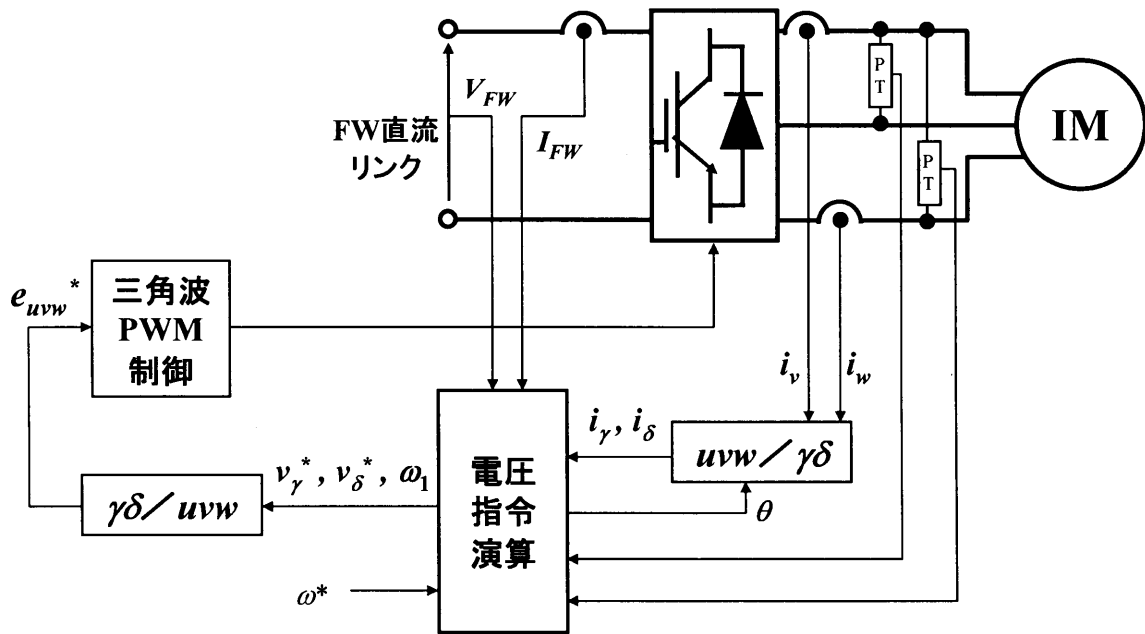


図 5.7 誘導機駆動系

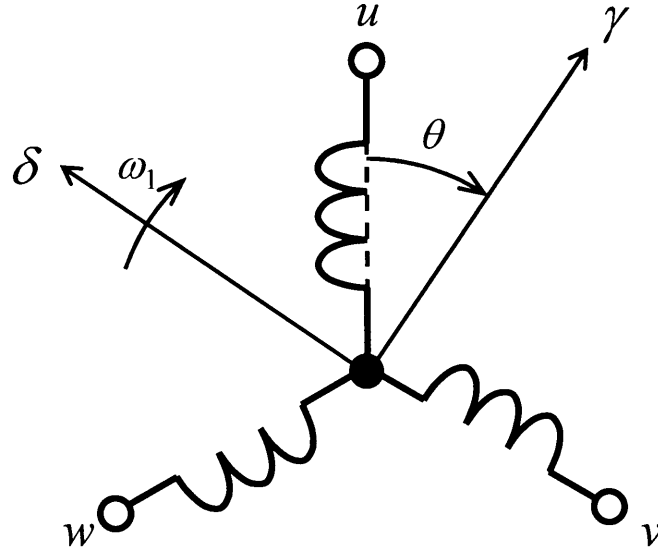

 図 5.8 γ - δ 軸座標系

図 5.8 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(5.5)式のようなになる。

$$\lambda_{1\gamma} = 0, \quad \lambda_{1\delta} = \Lambda_{1\delta} \quad (5.5)$$

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(5.6)式で表すことができる。したがって、(5.5)式のように制御を行った場合、発生トルク式は(5.7)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。

$$\lambda_{1\gamma} = L_1 i_{1\gamma} + M i_{2\gamma}, \quad \lambda_{1\delta} = L_1 i_{1\delta} + M i_{2\delta} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \tau &= n_p M (i_{2\delta} i_{1\gamma} - i_{2\gamma} i_{1\delta}) = n_p (\lambda_{1\delta} i_{1\gamma} - \lambda_{1\gamma} i_{1\delta}) \\ &= n_p \Lambda_{1\delta} i_{1\gamma} \end{aligned} \quad (5.7)$$

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(5.8)式に置き換える。

$$\lambda'_\gamma = \lambda_\gamma / L_1, \quad \lambda'_\delta = \lambda_\delta / L_1, \quad I_\delta = \Lambda_\delta / L_1 \quad (5.8)$$

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、(5.4)式の第 1, 2 行は(5.9)式で表せる。

$$P \begin{pmatrix} \hat{\lambda}'_\gamma \\ \hat{\lambda}'_\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 \\ \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\lambda}'_\gamma \\ \hat{\lambda}'_\delta \end{pmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{pmatrix} v_\gamma - R_1 i_\gamma - L_1 \omega_1 I_\delta \\ v_\delta - R_1 i_\delta \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

そして、(5.4)式 3, 4 行、(5.6), (5.9)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(5.10)式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} v_\gamma^* &= R_1 i_\gamma + L_1 \omega_1 I_\delta \\ v_\delta^* &= R_1 i_\delta + K_i (i_\delta^* - i_\delta) \\ i_\delta^* &= \{(1 + \sigma) I_\delta - \sqrt{(1 + \sigma)^2 I_\delta^2 - 4\sigma^2 i_\gamma^2}\} / (2\sigma) \\ \omega_1 &= n_p \omega_m^* + \frac{1}{1 + T_\omega P} \frac{\chi_2}{I_\delta - \sigma i_\delta} i_\gamma \\ \omega_1 &= n_p \omega_m^* + \frac{1}{1 + T_\omega P} \frac{\chi_2}{I_\delta - \sigma i_\delta} i_\gamma \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

ここで、式中に用いているシンボルは以下のものである。

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

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 3 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。

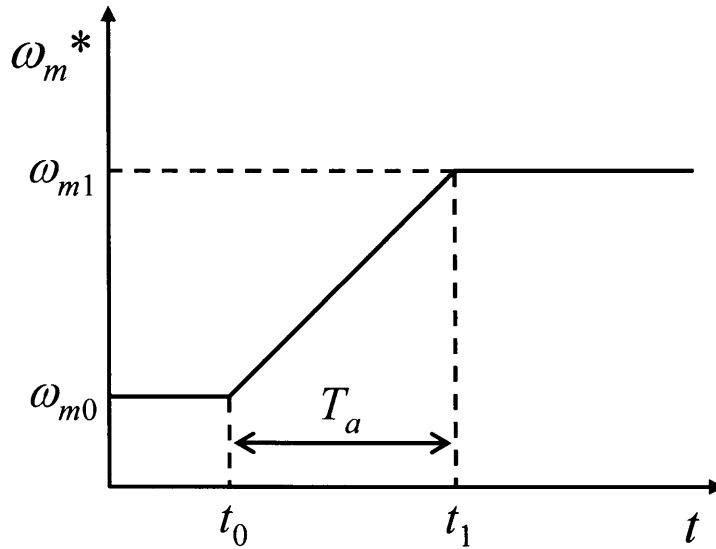
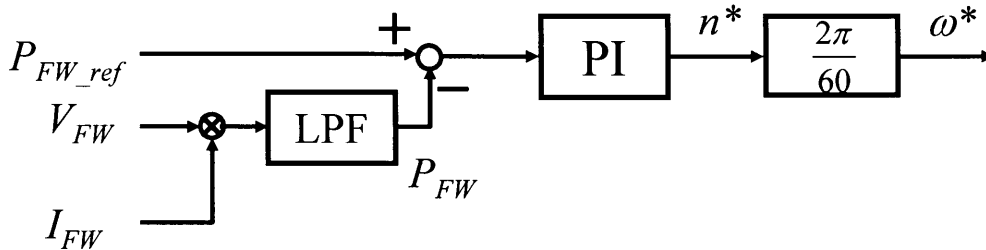

 図 5.9 速度指令値 ω^*


図 5.10 電力制御系への拡張ブロック

一時磁束制御法は本来、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、一磁束制御を電力制御系に拡張する必要がある。そこで、図 5.10 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 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 $n^*[\text{rpm}]$ を作成する。そして、これから角速度指令値 $\omega^*[\text{rad/s}]$ を作成し、この角速度指令値 ω^* (5.10 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(5.11)式のように変化させる。

$$I_\delta = \frac{120}{f_1} I_{\delta 0} \quad (5.11)$$

一次磁束制御法では(5.10)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(株)日本フライホイール製の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、(株)日本フライホイールによりいただいた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。(株)日本フライホイールによりいただいたモータ定数は一次側巻線抵抗 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 5.11 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(5.12)式及び(5.13)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(5.14)式の関係が

$$Z_{IM} = (V_n / \sqrt{3}) / I_{\delta 0} \quad (5.12)$$

$$Z_{IM} = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad (5.13)$$

$$L_1 = l_1 + M \quad (5.14)$$

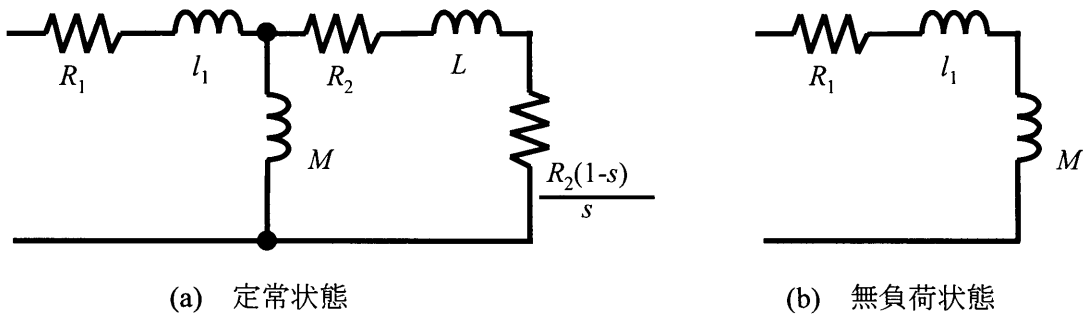


図 5.11 誘導機等価回路

成立するため、(5.12)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_{IM} に比べ十分小さいため、 $Z_{IM} \approx \omega L$ 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(5.14)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 5.2 に示す。

表 5.2 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	$0.1372[\Omega]$
二次導体抵抗 R_2	$0.01254[\Omega]$
一次巻線漏れインダクタンス l_1	$0.417[\text{mH}]$
二次漏れインダクタンス l_2	$0.417[\text{mH}]$
励磁インダクタンス M	$12.35[\text{mH}]$
慣性モーメント J	$21.72[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$

5.5. フライホイール駆動制御装置の制御構成の変更

フライホイール駆動装置はフライホイール電力貯蔵装置における誘導機の制御法を一次磁束制御法に変更する。このため、図 5.6 における蓄放電モードを変更することになる。しかし、蓄放電モードを変更することで、制御モードが蓄電モードから蓄放電モード切り替わるときには、フライホイール電力貯蔵装置や接続されている電力系統に過電流が生じないようにスムーズに移行する必要がある。すなわち、フライホイール電力貯蔵装置に印加する電圧の基本波成分が不連続にならないような対策が必要である。このためには、蓄電モードでも制御プログラムを変更する必要がある。

一次磁束制御を適用したとき、(5.10)式から電圧指令値は、 γ 軸電圧指令値 v_γ^* に大きく依存する。また、 γ 軸電圧指令値 v_γ^* は制御モードが切り替わる周波数領域では $L_1\omega_1 I_\delta$ に依存する。よって、このとき電圧指令値の振幅は一次角周波数 ω_1 と磁束指令値 I_δ に比例する。ここで、一次磁束制御法において電力制御を行う際には回転数が低い場合にも過電流になることなく定格電力を得るために磁束指令値 I_δ を(5.11)式のように一次周波数 f_1 に反比例させる。これは、V/f 比を一次周波数 f_1 に反比例するように設定することと等価である。したがって、制御モードが蓄電モードから蓄放電モードに切り替わりを考慮したとき、電圧振幅が大きく変化しないようにするためには蓄電モードにおける V/f 比 K_v を(5.15)式のように設定すればよい。しかし、低速回転領域において過電流となることを防止するために上限値リミッタを設ける必要がある

$$K_v = 1.67 * \frac{120}{f_1} \quad (\text{ただし, } K_{v_max}=3.3) \quad (5.15)$$

また、制御モードが移行したとき、図 5.10 に示す電力制御ブロックの PI 制御器のゲインの値を大きく設定されていると、積分制御器の保持する値が発散してしまう可能性がある。また、比例制御器の働きにより、作成される速度指令値 ω^* が急変することでフライホイール電力貯蔵装置に過電流が流れ込む可能性がある。したがって、制御モードが移行した際には、移行直後 5 秒間は比例ゲインを 0 に積分ゲインを 1/20 に制限することとした。

図 5.12 に制御モード移行時の線間電圧 v_{uv} 及び線電流 i_u , i_w を示す。この結果から、制御モードが移行する際にも線間電圧 v_{uv} は連続的に変化し、また、線電流にも過電流が流れていないことが確認できる。

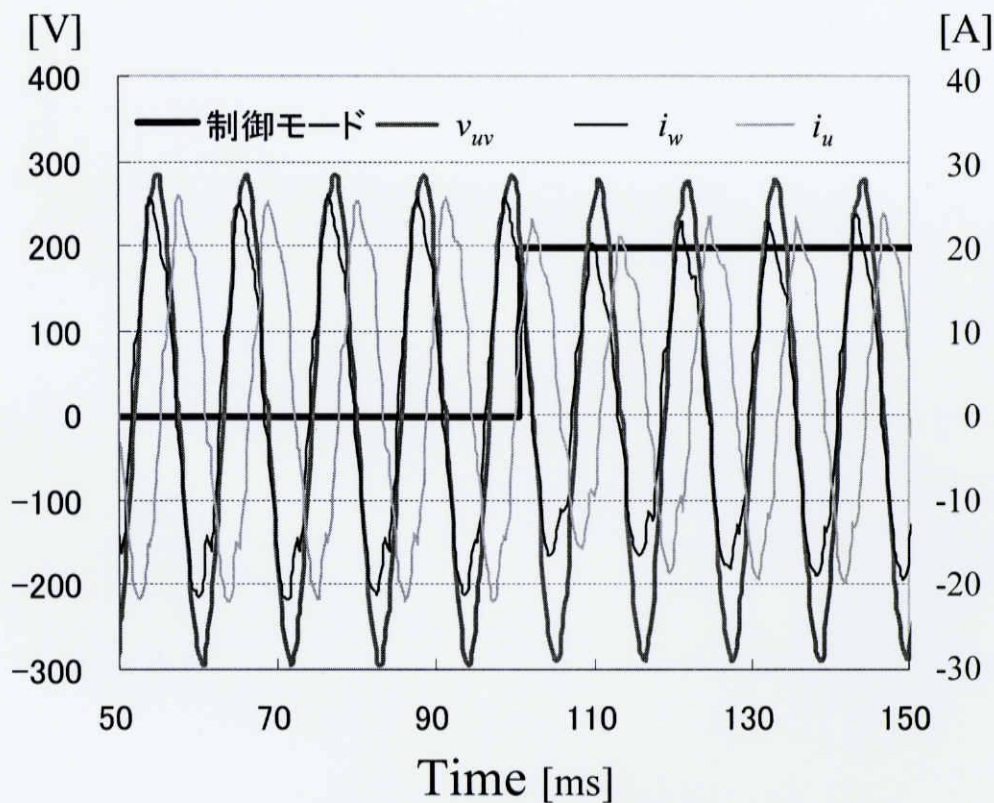


図 5.12 制御モード移行時の線間電圧と線電流

一次磁束制御では制御パラメータとして γ 軸・ δ 軸電流 i_γ , i_δ を用いる。図 5.13 にフライホイール電力貯蔵装置に流れ込む u 相, w 相電流を座標変換し得られる γ 軸・ δ 軸電流 i_γ , i_δ を示す。この結果から、 γ 軸・ δ 軸電流ともに多くの振動が重畳している。 γ 軸・ δ 軸電流は制御パラメータであるため、この振動は望ましくない。そこで、時定数 0.01 秒の LPF によって振動を除去する。

また、フライホイール電力補償システムによる応答性を改善するためには、外部アナログ端より入力される電力補償指令値に対して設けられているローパスフィルタを再設計する必要がある。このローパスフィルタはシステムの応答性を制限するため、用いないことが望ましい。しかし、このローパスフィルタは PC から送られる信号に重畳するノイズを除去するためにも必要である。また、制御パラメータとして利用する γ 軸・ δ 軸電流 i_γ , i_δ に対して時定数 0.01 秒のローパスフィルタを用いている。したがって、ここで、問題としているローパスフィルタの時定数は γ 軸・ δ 軸電流 i_γ , i_δ に設けるローパスフィルタの時定数を考慮し、0.02s とする。このようにローパスフィルタの時定数を 0.2 秒から 0.02 秒に変更することで、フライホイール電力補償システムの補償帯域をより高周波側に拡大できると考える。

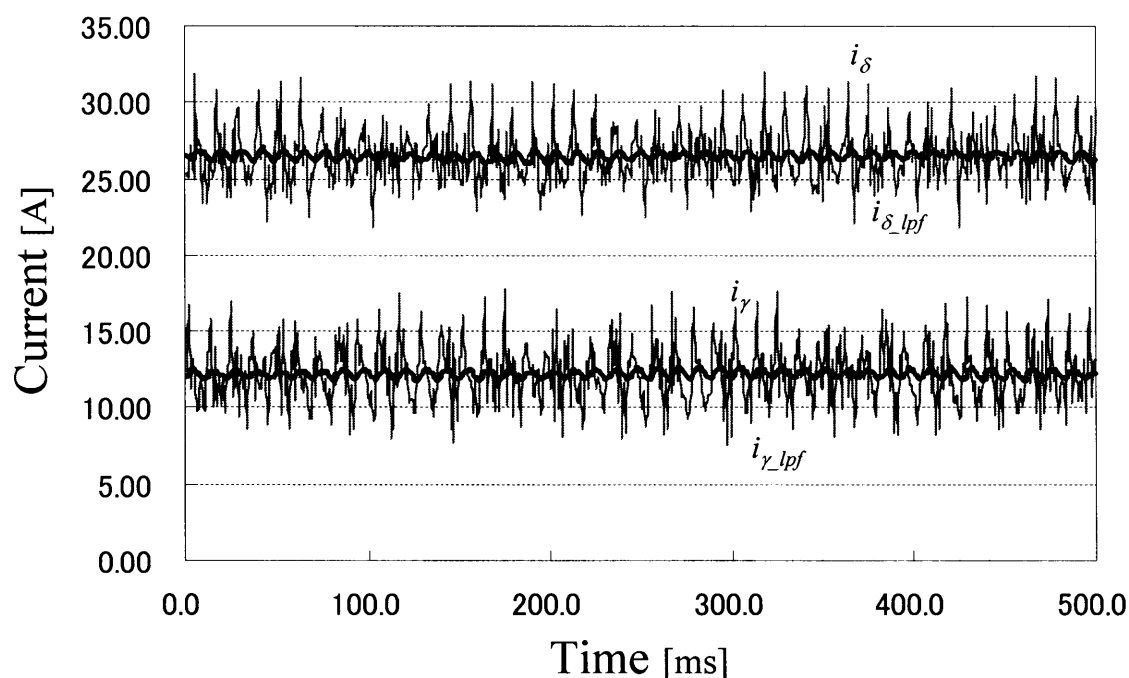


図 5.13 γ 軸・ δ 軸電流

5.6. 実験結果と考察

フライホイール電力補償システムにおいて、外部から入力される電力指令値に設けられているローパスフィルタの時定数と制御法を変更することで、補償帯域をどの程度拡大できるかを確認するために周波数特性を測定した。測定の際には、実際に平準化実験をする場合と同等の条件で周波数特性を測定するために、正弦波電力指令値をパソコン上の Visual Basic6.0 によって作成し出力する。また、電力補償指令値を作成する Visual Basic6.0 の制御プログラムは制御周期が約 16ms である。このため、数 Hz や、十分の数 Hz といった周波数信号を出力しようとした際、それは連続的なものとはみなすことができない。図 5.14 はパソコンから、振幅 4kW、周波数 7Hz の正弦波電力指令値を出力したときのパソコン出力信号とシステムから出力される補償電力 P_{FW} を測定した結果である。よって、位相特性を測定する際には、図 5.14 に示すようにパソコンから出力される電力指令値 P_{FW_ref} が更新される点を結んだ破線で示す正弦波信号を入力指令値として考える。また、周波数特性の測定は以下の三つの項目について測定した。この測定結果を図 5.15 に示す。なお、 K_p 、 K_i は図 5.10 における PI 制御器のゲインである。

- ① フライホイール駆動装置が入荷されたときのものを測定したときの測定結果
(比例ゲイン $K_p=0.05$ 、積分ゲイン $K_i=0.3$)
- ② LPF の時定数を 0.2 秒から 0.02 秒に変更し、V/f 制御によって制御したときの測定結果
($K_p=0.03$ 、 $K_i=0.2$)
- ③ LPF 時定数を 0.02 秒とし、制御手法を V/f 制御から一次磁束制御に変更した際の測定結果
($K_p=0.03$ 、 $K_i=0.2$)

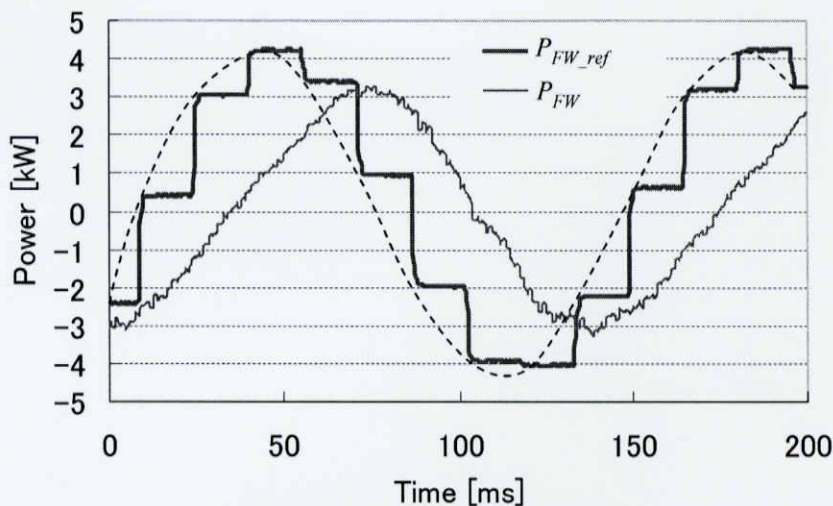
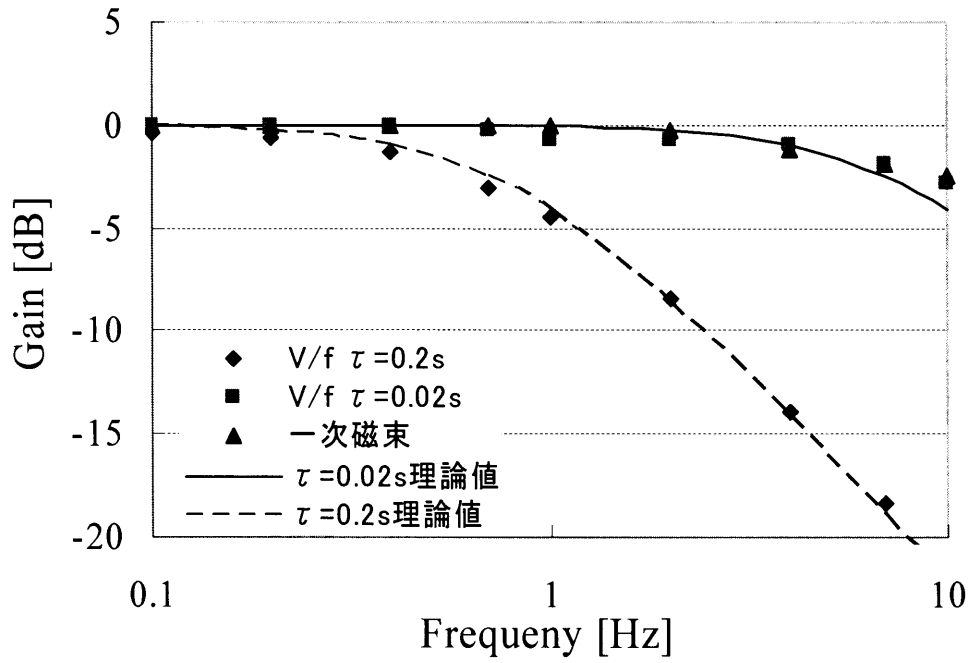
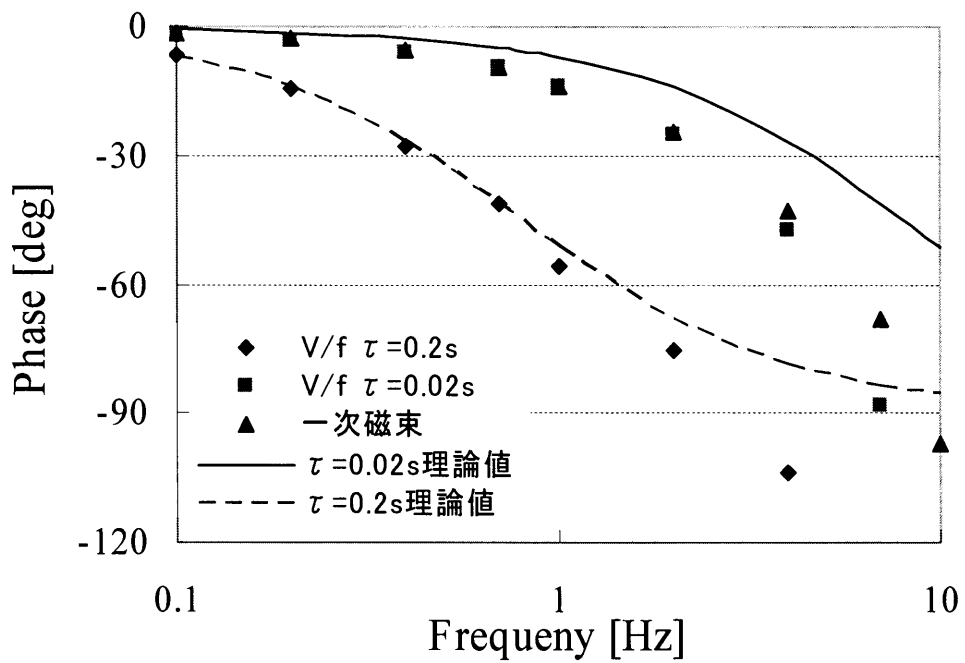


図 5.14 電力指令値 P_{FW_ref} と補償電力 P_{FW}



(a) ゲイン特性

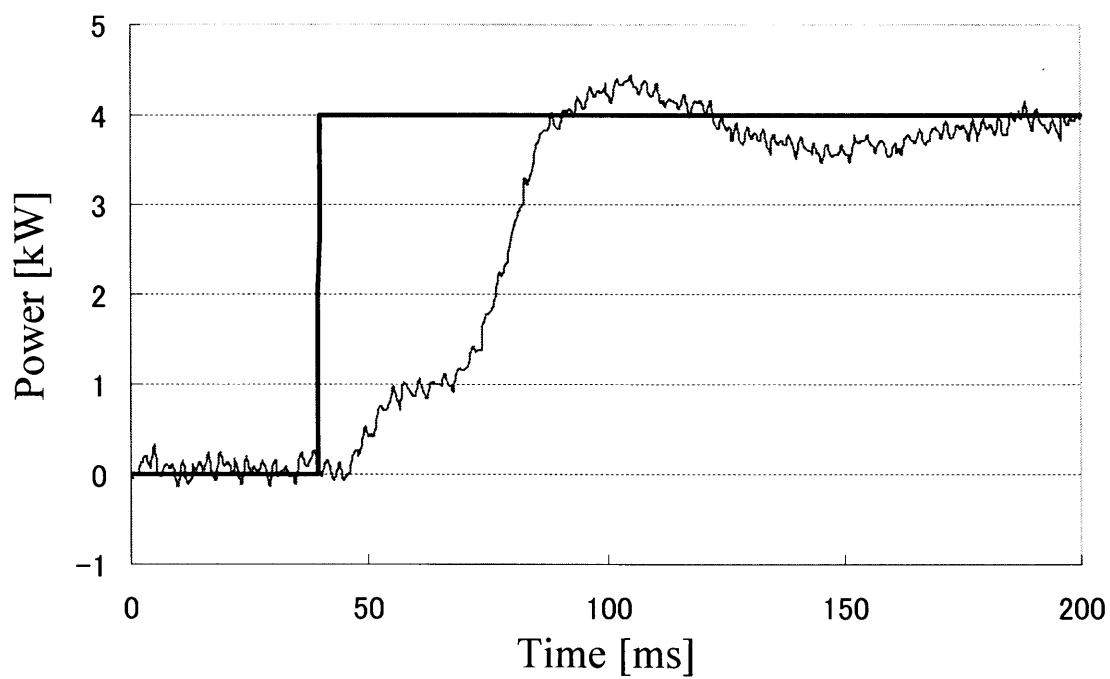


(b) 位相特性

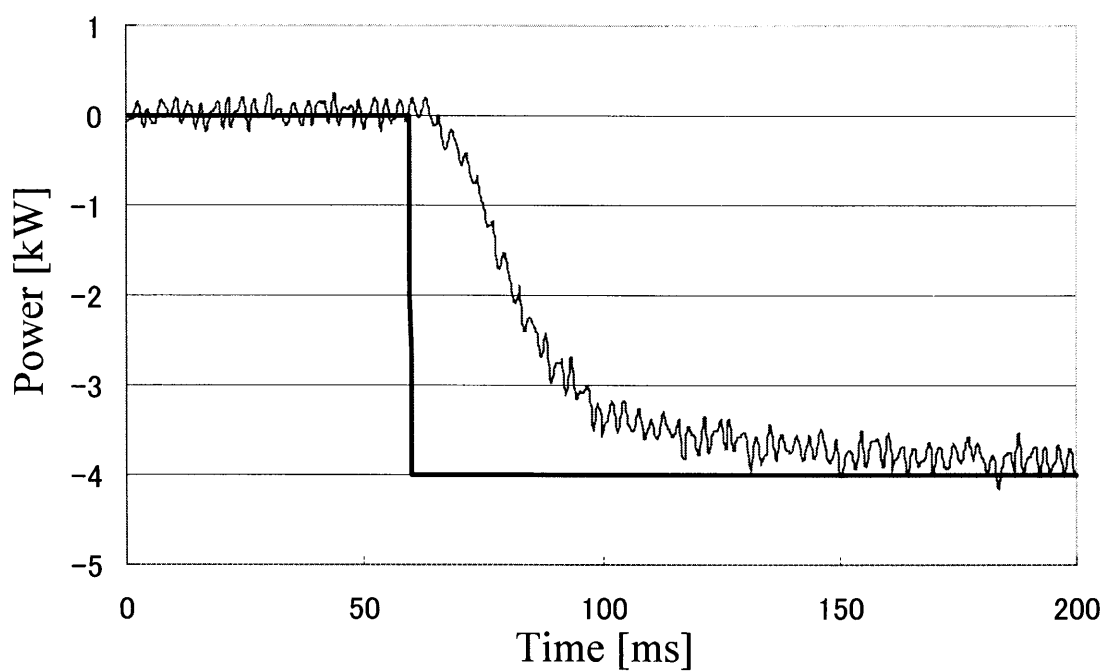
図 5.15 周波数特性の測定結果

図 5.15 は周波数特性の測定結果である。なお、この結果には時定数 0.2 秒と時定数 0.02 秒のローパスフィルタの理論周波数特性を同時に表示している。図 5.15 の結果から、フライホイール電力補償システムから出力される補償電力は、電力補償指令値 P_{FW_ref} に設けられるローパスフィルタの時定数に大きく依存し、時定数を 0.2 秒から 0.02 秒に変更することでゲイン特性・位相特性ともに大きく改善されていることが確認できる。次に、ローパスフィルタの時定数と電力制御における PI 制御器のゲインが等しい場合に、フライホイール電力貯蔵装置の誘導機の制御法として一次磁束制御を適用した場合と V/f 制御を基とした制御法を適用したときの周波数特性結果を比較する。図 5.15(a)のゲイン特性では、前者・後者ともに同様の特性を有していることが確認できる。また、図 5.15(b)の位相特性から、誘導機の制御法として一次磁束制御を用いることで 2Hz 以降の高周波領域で応答性が改善されていることが確認できる。そして、補償帯域に関しても V/f 制御の場合には 4Hz 程度であるのに対して一次磁束制御を適用することで 5Hz 程度に拡大できている。また、図 5.16 及び図 5.17 に同条件で測定したステップ応答波形を示す。この結果から、わずかながら、一次磁束制御法を適用した場合のほうが応答性に優れていることが確認できる。現在、一次磁束制御法では γ 軸・ δ 軸電流のノイズ除去を目的とした時定数 0.01 秒のローパスフィルタを用いている。このことから応答に制限がある。しかし、電流検出法を改善することでローパスフィルタを除去でき、より応答性を向上させることができると考えられる。

ここで、現在、農場で使用する風力発電機から発電される電力の主となる変動成分は 0.5Hz 以下の成分である。しかし、この周波数領域におけるフライホイール電力補償システムの周波数特性は図 5.15 から、V/f 制御法、一次磁束制御法ともにほぼ同様の特性となっている。これは、この周波数領域ではシステムの応答性能が誘導機の制御法にかかわらず、ローパスフィルタの応答速度に依存しているためである。しかし、一次磁束制御法の適用により補償帯域が拡大することから、小規模風力発電などのより変動周期の速い新エネルギー発電システムの電力補償を考えたとき有効な手法であるといえる。

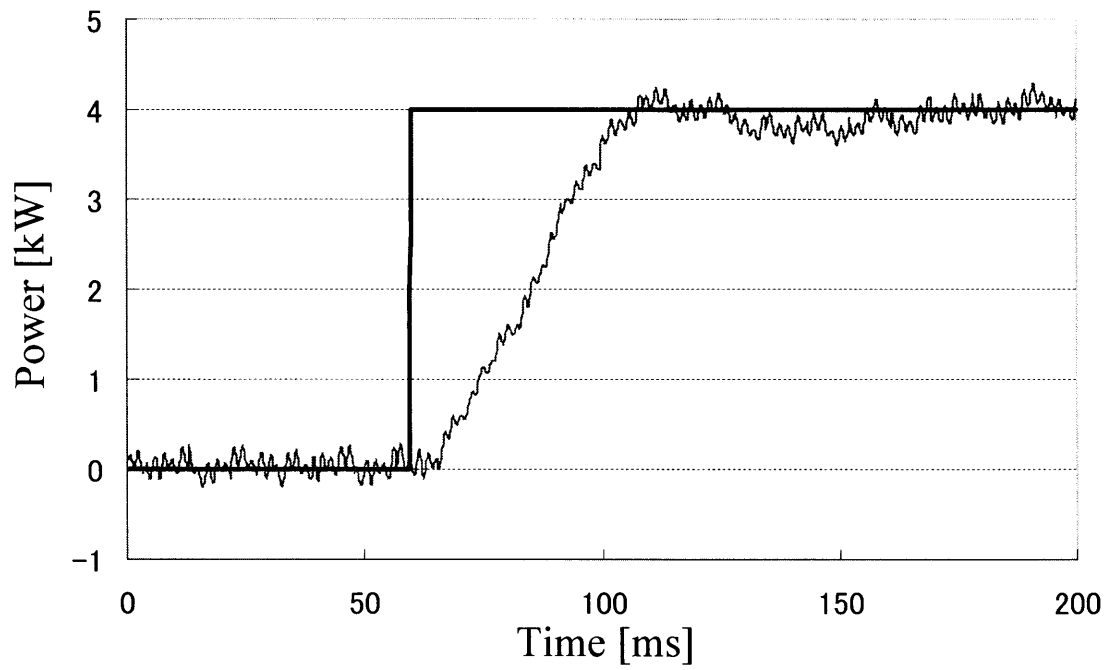


(a) 放電時

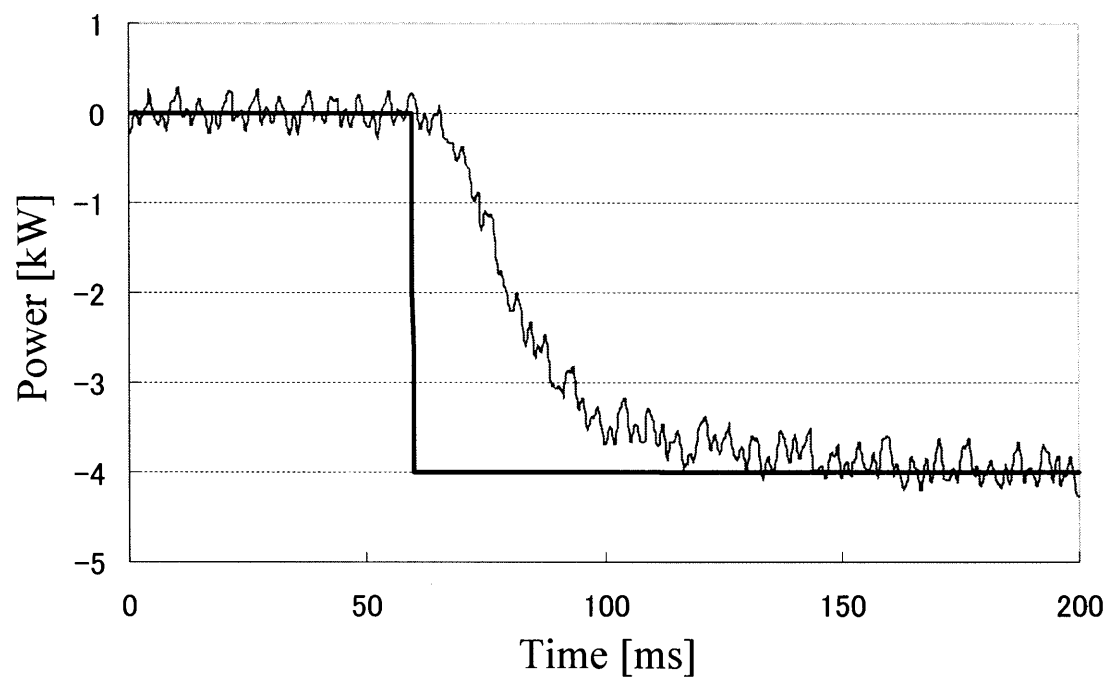


(b) 蓄電時

図 5.16 V/f 制御法によるステップ応答結果



(a) 蓄電時



(b) 放電時

図 5.17 一次磁束制御法によるステップ応答結果

また、現状は電力指令値をパソコンによって作成しているためその制御周期から離散的になるが制御周期の早い機器を使用することでより応答性を改善できると考えられる。図 5.18 はファンクションジェネレータによって電力補償指令値を入力したときの位相特性である。この結果から、電力補償指令値をパソコンから離散的な電力指令値よりも連続的な電力指令値を用いた場合のほうがより位相特性を改善することができる。したがって、応答性の向上のためには、電力補償指令値を作成する機器に関しても補償する周波数帯域に対して制御周期が十分に短い機器を使用する必要がある。

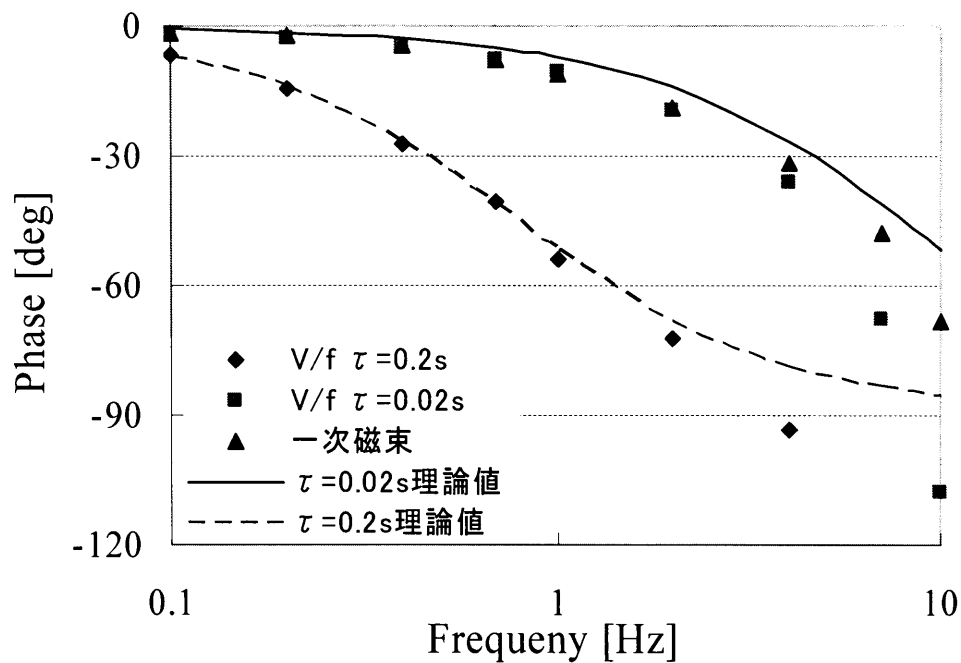


図 5.18 ファンクションジェネレータを用いたときの位相特性

次に、風力発電模擬システムを稼働させ、これにより発電された電力をフライホイール電力補償システムによって平準化する実験をした。風力発電データは、図 4.3(a)に示す農場で測定した風力発電機の発電電力データを利用する。この発電データは最大で約 18kW の電力を発電しているため、模擬システムではこれを 1/4 倍して使用する。また、フライホイール電力補償システムの補償帯域である中域成分は 0.005Hz から 2Hz とした。図 5.19 にフライホイール駆動装置が入荷時の設定(V/f 制御, LPF 時定数=0.2 秒)のときの実験結果を示す。そして、図 5.20 に誘導機の制御法とし一次磁束制御法を適用し、ローパスフィルタの時定数を 0.02 秒としたときの実験結果を示す。なお、図中で用いる P_{EW} は風力発電模擬システムの発電電力であり図 5.2 における直流電圧 V_{EW} と電流 I_{EW} を乗算して算出している。また、 P_{DL} はフライホイール電力貯蔵装置によって補償された後の出力電力であり、直流電圧 V_{EW} と電流 I_{DL} を乗算したものである。

図 5.19 と図 5.20 の結果から、ともに風力発電模擬システムから発電される変動電力をフライホイール電力貯蔵装置によって中域成分を補償できていることが確認できる。ここで、両実験結果の周波数解析結果を比較したとき、図 5.19 の結果では農場に設置されているフィールド実験システムでの実験結果と同のように 0.4Hz から 0.5Hz 程度の変動が補償しきれていないことが確認できる。これに対して、図 5.20 の結果では、電力補償指令値 P_{FW_ref} に設けられるローパスフィルタの時定数と制御法の変更により、フライホイール電力補償システムにおける補償帯域を高周波側への拡大できたため、農場システム及び制御構成の変更前では補償できなかった 0.4Hz から 0.5Hz の変動成分を補償できていることが確認できる。

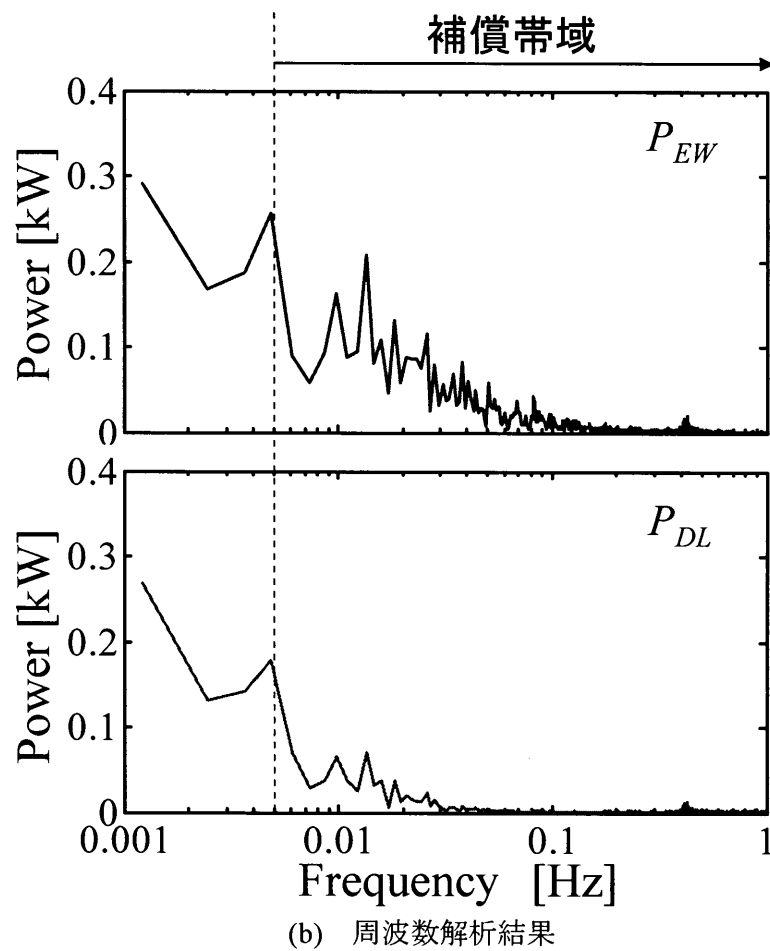
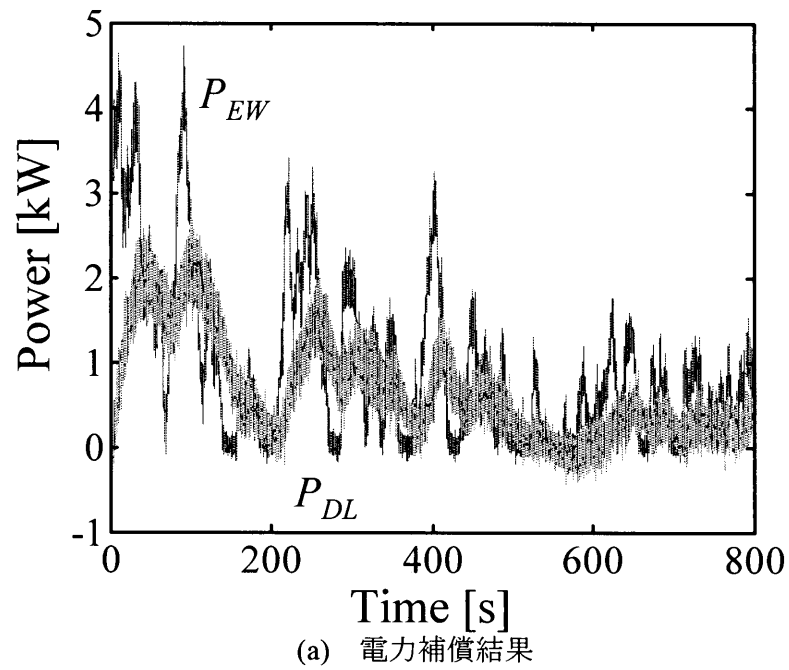
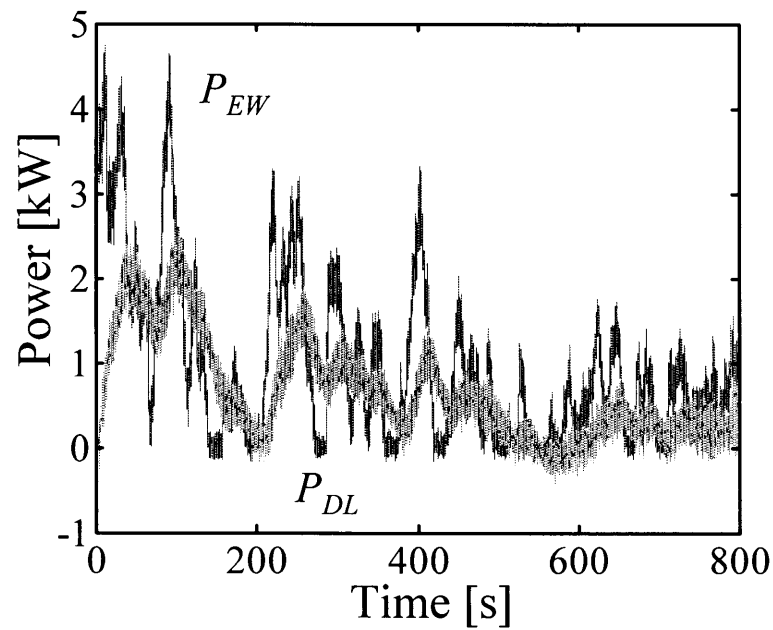
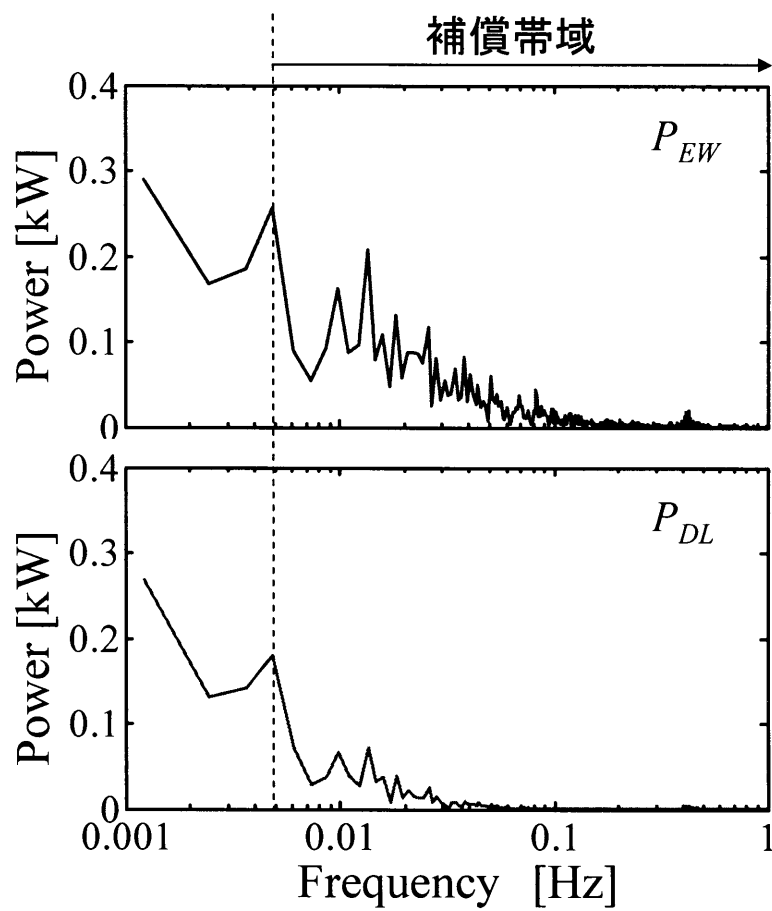


図 5.19 V/f制御による電力補償結果



(a) 電力補償結果



(b) 周波数解析結果

図 5.20 一次磁束制御法による電力補償結果

第6章 結言

本論文では風力発電機とフライホイール電力貯蔵装置、そして、バイオマスガスタービン発電機を統合することによって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た。そして、風力発電機から発電される変動電力を周波数分離し、高周波変動をフライホイール電力貯蔵装置により補償し、低周波変動に関してはバイオマスガスタービン発電機により補償することで、電力脈動の少ない高品質な電力を供給可能であることをフィールド実験によって確認した。また、フィールド実験においては、これまでの電力貯蔵装置のみに依存する平準化システムに比べ電力貯蔵装置で補償に必要なエネルギーの大きさを約 700kJ から約 400kJ へと 300kJ 程度低減できることも確認できた。

また、本論文ではフィールド実験システムにおいて約 12 分間の実験結果を示した。しかし、本来はより長時間の検証が必要である。また、長時間における検証の際には風力発電から発電される電力にはより多くの低周波変動が観測されることが予想されるため、フライホイール電力貯蔵装置における補償エネルギーの低減効果はより大きくなると考えられる。

今回は、フライホイール電力補償システムやの応答性を実験的に求めた。しかし、本来はシステム設計の段階でその応答性を理論的に算出する必要があると考えられる。このため、今後はフライホイール電力補償システムの応答性を理論的に算出し、この理論応答性を基にし、補償電力の有効分、無効分を考慮し、周波数分離手法を検討する必要があると考えられる。

本研究で使用するフィールド実験システムは、風力発電機の最大発電電力の大きさからフライホイール電力貯蔵装置とマイクロガスタービン発電機の容量を決定し用意された実験システムである。しかし、実際にシステム設計をする場合には、以下のようにシステム設計をすればよいと考えられる。

- (1) 風力発電機から発電される電力の周波数分布を確認する
- (2) 電力系統に供給する電力品質を周波数成分の観点により決定する。
- (3) 使用するマイクロガスタービン発電機の稼働率を決定し出力変動幅を決定する
- (4) 風力発電電力波形を用いて、4つの周波数帯域に周波数分離する際の帯域分離周波数を変化させたときの低域成分の変動幅と中域成分を補償するために要するエネルギーの関係を算出する。
- (5) (2)、(3)及び低域成分の変動幅を考慮して低域分離周波数を決定する。そして、このように決定した低域分離周波数を用いたときの中域成分の補償エネルギーの大きさから電力貯蔵装置の容量を決定する。

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られる。例えば、発電電力の周波数分布が図 3.7(b)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。

本論文ではマイクロガスタービン発電機の稼働率を固定値とした検討を示した。しかし、風力発電電力が低い場合には電力変動も小さいため、マイクロガスタービン発電機は稼働率を高く維持した運転が可能である。したがって、風力発電電力の大きさによりマイクロガスタービン発電機の稼働率を変化させることで、マイクロガスタービン発電機の電力変換効率をより向上させることができると考えられる。

フィールド実験システムでは、フライホイール電力補償システムの主回路に双方向チョップユニットを用いていることから制御的に応答に制限を設けているため、応答性能が通常のモータ制御の性能に比べて低くなっている。したがって、直流接続方式の電力補償システムを設計する際には、電力補償システムの応答性能を損なわないようにするため、自然エネルギー発電システムと電力補償システムでは等しい直流リンク電圧で使用する機器を用いるべきである。そして、フィールド実験システムのように異なるリンク電圧の機器を使用する際には補償性能の観点からチョップユニットは補償システム側に接続するのではなく発電システム側に接続する必要がある。また、フライホイール電力貯蔵装置の制御法として一次磁束制御法を適用することで補償帯域を 0.4Hz 程度から、5Hz 程度まで高周波側に拡大可能である。これは小型風車などの電力変動が速い電力源に対する電力補償において有効であると考えられる。

近年の新エネルギーを利用した発電システムの増加傾向を考慮すると、現在のわが国の電力品質を維持するためには、電力貯蔵装置による高周波変動の補償だけでなく、低周波変動に関しても補償対象とする必要がある。本論文で提案する既存のバイオマス発電を有効利用した平準化システムは、より低周波変動の補償が可能であり、高品質電力を供給可能である。また、システム設計の際の貯蔵装置の容量を低減することも可能である。このため、電力品質面やコスト面から、新エネルギー発電の一層の普及に期待される。

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) 饒雅英，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，常広譲：「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] 原真彦, 松川達哉, 山村直紀, 石田宗秋, 鎌田泰成, 前田太佳夫:「風力・バイオマス・フライホイールを統合した高品質複合型発電システムの提案」, 平成 17 年電気学会産業応用部門大会論文集, pp.I425-I428

- [2] 原真彦, 松川達哉, 山村直紀, 石田宗秋:「風力・バイオマス・フライホイールを用いた高品質複合型自然エネルギー発電システムの提案」, 平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, pp.105

- [3] 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)

- [4] 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)

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 講師 工学博士 山村直紀先生，同大学工学部電気電子工学 助手 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。また，貴重な時間をさいて本論文の査読をして頂いた三重大学 電気電子工学 教授 工学博士 平井淳之先生に心より御礼申し上げます。

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 助教授 工学博士 鎌田泰成先生に心よりお礼申し上げます。

研究室在籍中，本研究の遂行にあたり共に実験をした，平成 17 年度学部 4 年生 坂本陽平氏，模擬実験システムの作成を中心的に行ってくれた平成 18 年度学部 4 年生 奥村雄一郎氏に心から感謝致します。

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。

最後に大学，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。