

平成 23 年度 三重大学大学院工学研究科 修士論文

電力平準化装置の導入による分散型電源の 連系可能容量算定法に関する研究



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

鈴木 一史

目次

第1章	緒言	1
1.1	本論文の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	分散型電源システム	4
2.1	システム構成	4
2.1.1	実機システム構成	4
2.1.2	模擬システム構成	5
2.2	風力発電システム	7
2.2.1	実機システム	7
2.2.2	模擬システム	9
2.3	太陽光発電システム	10
2.4	フライホイール電力補償システム	15
2.4.1	実機システム	15
2.4.2	模擬システム	19
2.5	マイクロガスタービン発電システム	20
2.6	電力平準化制御	21
2.6.1	電力平準化制御	21
2.6.2	電力平準化模擬試験	23
第3章	系統連系モデル	26
3.1	電力系統の構成	26

3.2	系統連系モデルの等価回路.....	28
第4章	連系可能容量算定法.....	32
4.1	容量算定までの流れ.....	32
4.2	系統に投入する電力.....	34
4.3	電力系統への悪影響の評価.....	39
4.4	連系可能容量.....	40
4.4.1	定常時における連系可能容量.....	40
4.4.2	過渡時における連系可能容量.....	44
第5章	結言.....	50
参考文献	51
謝辞	52
論文目録	53

第1章 緒言

1.1 本論文の背景と目的

現在, 石油・石炭などの化石燃料の消費の増加が進んでいる. それに伴って, 排出される二酸化炭素の影響で, 地球温暖化が深刻化している. また, 化石燃料の枯渇も懸念されている. このことから, 近年, 風力発電・太陽光発電などに代表される再生可能エネルギー由来の発電が注目されている. しかし, こうした分散型電源から得られる電力は, 季節や気象条件など周囲の環境に大きく依存するため電力が変動する. 今後, 分散型電源が系統に大量に導入されると系統電圧変動・系統周波数変動といった電力品質に影響を及ぼすことが懸念されている. これに対し, 電力会社は, LFC(Load Frequency Control 負荷周波数制御)や AVR(Automatic Voltage Regulator 自動電圧調整装置)などを用いて電力補償を行い, 電力品質を維持している. しかし, その補償容量にも限度がある. 補償容量を超えてしまうと系統電圧変動・系統周波数変動を起し, 結果, 機器の故障や誤作動につながる. そこで, 分散型電源, 電力貯蔵装置, 負荷とネットワークで一体となったマイクログリッドを形成し, その中で電力補償を行うことで, 系統の補償容量を低減することが出来る.

先任者らによって, 分散型電源に風力発電, マイクロガスタービン発電, 電力貯蔵装置にフライホイール電力貯蔵装置(FWES:Fly Wheel Storage equipment)を用いたマイクログリッドが構築されている. ここでは, 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が提案されている. さらに, フライホイール電力貯蔵装置の新たな制御法を提案, 実装した. また, 制御器設計を行うことで, 電力補償性能を向上した. 加えて, 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システムの協調制御を行い, フライホイール電力貯蔵装置の容量低減が行われてきた^{[1][2]}.

そして現在, 一般的に電力貯蔵装置などの電力補償における技術課題として,

- ① 電力貯蔵装置の貯蔵容量の決定
(過剰な貯蔵容量はコストアップ, 不足は電力品質低下につながる.)
- ② 電力補償する変動電力の周期の決定
(貯蔵装置の補償性能や容量を考慮しなければ電力品質の低下につながる.)
- ③ 電力補償効果分析方法
(様々な分析がなされているが, 確立されていない.)

が挙げられる^[1].

そこで, 本研究では電力貯蔵装置の貯蔵容量について着目し, 貯蔵容量算定法確立を目指す. それに向けて, 本稿では風力発電・太陽光発電など今後大量導入が予想される分散型電源が電力系統へ及ぼす悪影響を考慮した電力貯蔵装置導入時の分散型電源連系可能容量について明らかにする. 具体的には, まず分散型電源システムを連系させる系統モデルを考え, その等価回路を構築する. 続いて, 系統に投入する送電電力の特性を電力円線図を用いて把握し, そこから電力潮流の計算を行った. そして, 分散型電源システムが大量導入された場合を仮定し, それが負荷に対してどういう影響を及ぼすか考察する. 本研究では系統モデルの等価回路に定電圧源を用いているため, 系統周波数変動や系統安定性についての評価は行わず, 系統電圧変動についてのみ評価を行った. 以上より, 電力貯蔵装置等の電力平準化装置の有無による分散型電源システム連系可能容量の比較, 考察を行った.

1.2 本論文の構成

本論文は以下のように構成されている。

第2章では、提案する分散型電源システムの構成及び、そこで用いられる電力平準化制御について説明する。さらに、新たに導入する太陽光発電システムの構成、そこで用いられる最大電力点追従制御及び太陽光発電システム導入時の電力平準化制御性能の模擬実験について説明する。

第3章では、提案する分散型電源システムの連系可能容量を算定するために、系統連系モデルについて説明する。

第4章では、分散型電源システムの連系可能容量算定までの流れ、系統に投入する電力及び系統連系評価について説明し、最後に連系可能容量について考察する。

第2章 分散型電源システム

本章では、分散型電源システムの構成、そこで用いられる電力補償制御について述べる。また、分散型電源システムの模擬システムについても述べる。

2.1 システム構成

2.1.1 実機システム構成

に提案されている分散型電源システムは「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。風力発電システムは最大発電電力100kWの風車によって発電された電力を系統に供給する。FW電力補償システムは定格容量10kWのFWESを3台使用し、風車から発電された変動電力を補償する。そして、MGT発電システムは、蓄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り発電する。そして、その出力は風力から発電された電力の低周波変動を補償するためにMGT発電システムの効率が落ちない範囲15~28kWの間で可変に出力される。図2.1に提案されている分散型電源システムの構成図を示す。

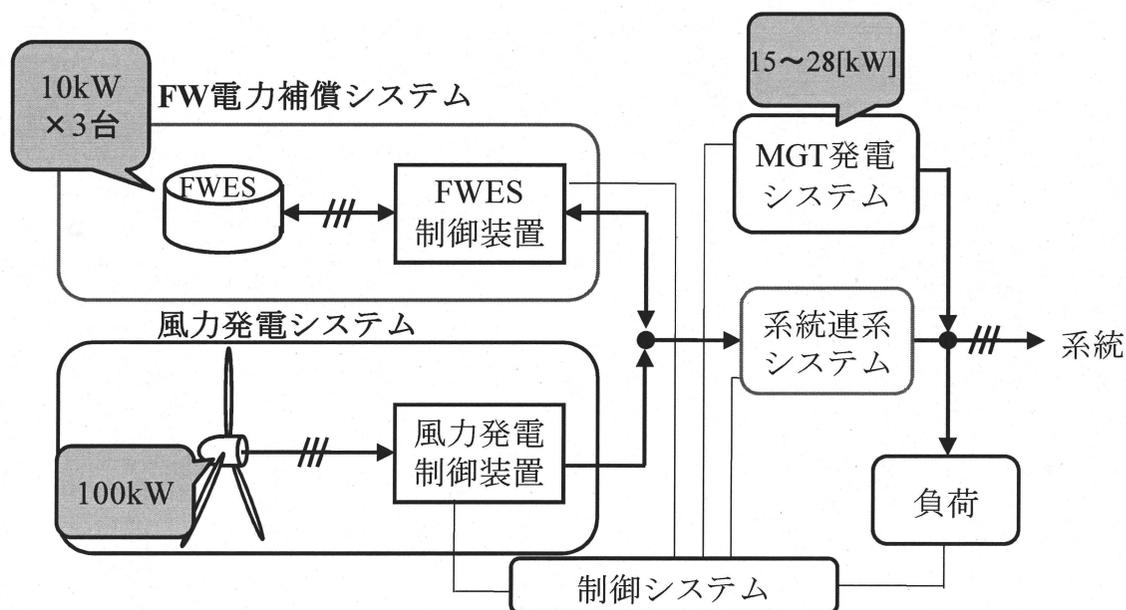


図 2.1 分散型電源システム

2.1.2 模擬システム構成

また、本研究では実機検証がコスト面などから頻繁に行うことが出来ない。そこで、図 2.1 の分散型電源システムの模擬システムを構築し、模擬実機検証を行っている。図 2.2 に分散型電源システムの模擬システムを示す。模擬システムでは分散型電源システムにおけるマイクロガスタービン発電システムを除く二つのシステムを模擬する。また、模擬システムに新たに太陽光発電システムを追加している。変動電力模擬システムでは系統連系システムを除く風力発電システムの模擬を行ない、フライホイール電力補償システムでは、農場システムの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の系統連系システムの模擬を行なう。また、模擬実験システムは農場実験システムと同様に、変動電力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、変動電力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、変動電力模擬システムへの発電電力指令値を作成する。また、変動電力模擬システムでは、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ことで直流電力を得る。

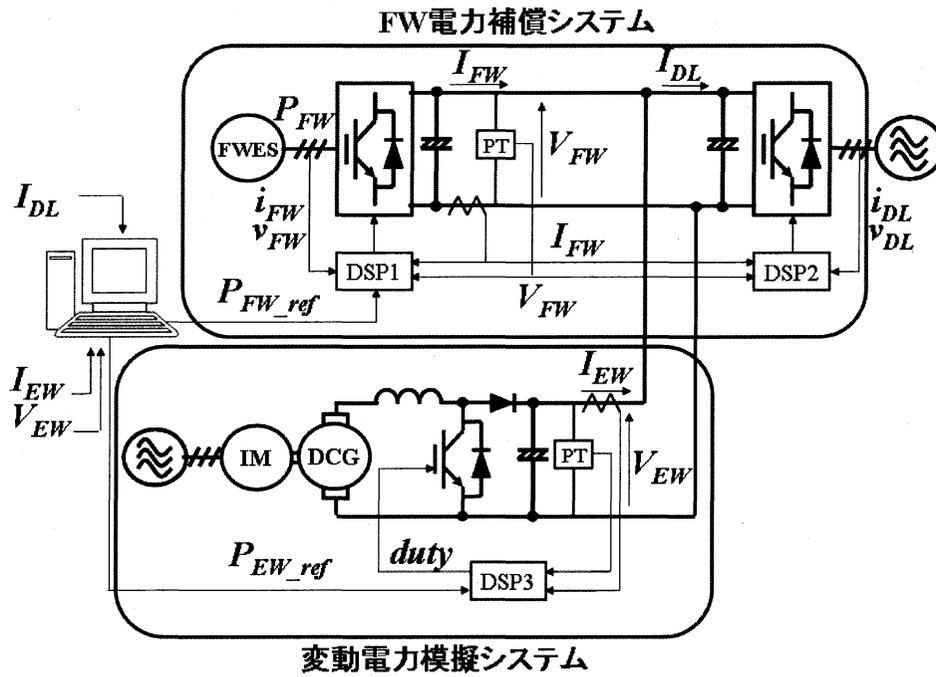


図 2.2 分散型電源システムの模擬システム

2.2 風力発電システム

2.2.1 実機システム

風力発電システムでは、図 2.3 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 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 2.1 に風力発電システムの仕様を示す。

表 2.1 風力発電システムの仕様

	項目	仕様
風力発電設備	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	強制ヨ一制御	
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

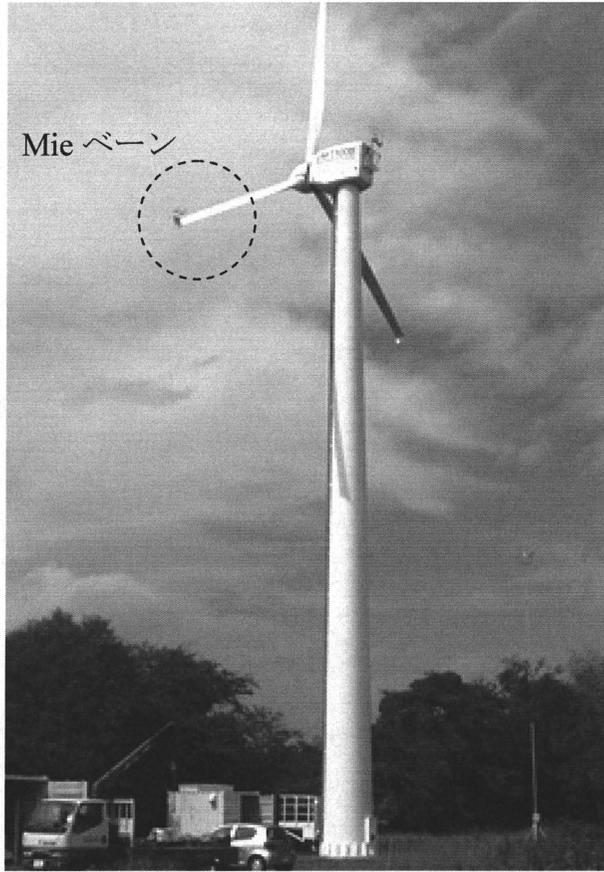


図 2.3 風力発電システム

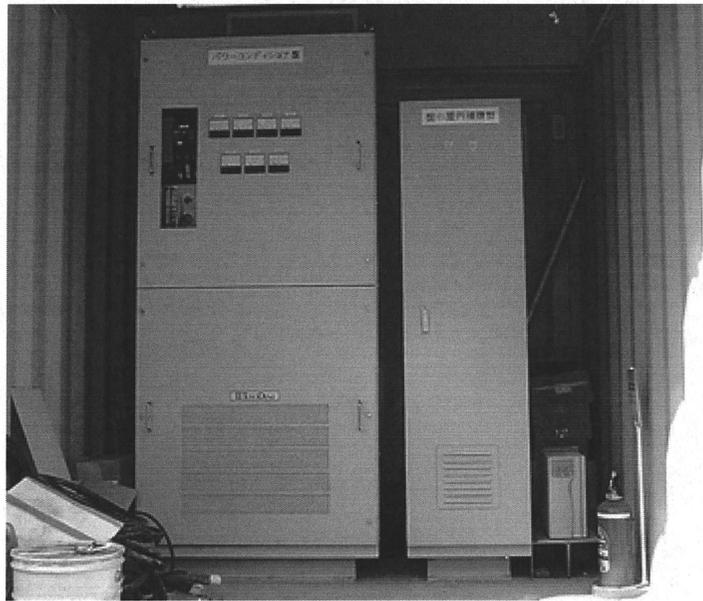


図 2.4 風力発電システムの制御装置

2.2.2 模擬システム

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, DSP 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 2.2 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 2.2 に使用する誘導電動機と直流発電機の仕様を示す. 本研究で使用する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 程度であるため, 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.

表 2.2 直流機と誘導機の仕様

	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

2.3 太陽光発電システム

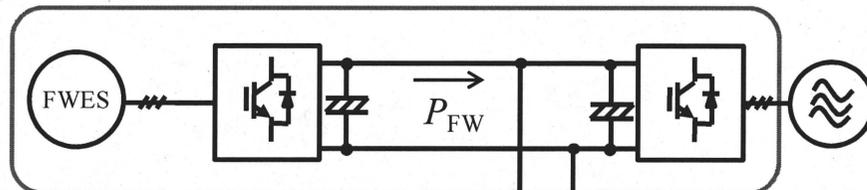
ここでは、今後風力発電より導入が多くなるであろう太陽光発電を新たに導入することを考える。そこで、まず模擬システムにおいて太陽光発電システムを導入し、模擬実機検証を行う。

太陽光発電システムは、本校屋上に設置している太陽光パネルを7枚使用する。太陽光パネルの仕様を表 2.3 に示す。太陽光パネルから得られる電力は直流であるため、太陽光発電システムはFW 電力補償システムの直流リンク部に直接接続する。接続した後の模擬システムを図 2.5 に示す。

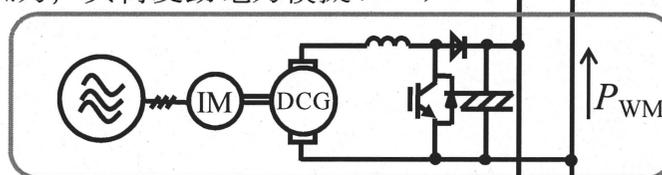
表 2.3 太陽光パネルの仕様

	太陽光パネル[枚]	
	5	2
公称最大出力 P_m [W]	125.00	128.00
公称解放電圧 V_{cc} [V]	32.66	32.70
公称短絡電流 I_{sc} [A]	5.30	5.49
公称最大出力動作電圧 V_{pm} [V]	26.38	26.45
公称最大出力動作電流 I_{pm} [A]	4.74	4.84

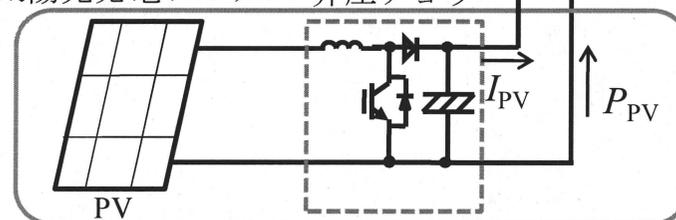
FW電力補償システム



風力，負荷変動電力模擬システム



太陽光発電システム 昇圧チョッパ



公称最大出力881[W]

図 2.5 太陽光発電システム導入後の模擬システム

ここで、表 2.3 より、太陽光パネルの公称最大電圧が合計 294V、FW 電力補償システムの直流リンク電圧が 350V であるため、太陽光発電システムから FW 電力補償システムに電力を供給することができない。そこで、太陽光発電システムと FW 電力補償システム間に昇圧チョッパを使用する。昇圧チョッパでは、太陽光パネルから効率よく電力を取り出すために、最大電力点追従制御(以下 MPPT 制御)を行う。MPPT 制御は、正弦波式 MPPT 制御を適応する。

図 2.6 に正弦波式 MPPT 制御の概念図を示す。模擬システムにおいて、太陽光発電システムの実出力電圧は FW 電力補償システムの系統連系インバータによって一定に保たれているため、太陽光発電システムの実出力電力は出力電流に比例する。そのため、MPPT 制御を行う際は、出力電流量が最大になるように昇圧チョッパのスイッチングパターンを制御する。制御手順を次ページに示す。

1. $duty$ を (2.1)式のようにある動作中心点 d_n で正弦波状に変化させる.
2. 正弦波 $duty$ の最大と最小となるときの出力電流 I_2 及び I_3 を検出する. このとき I_2 は $\pi/2$, I_3 は $3\pi/2$ でホールドする.
3. I_2, I_3 を比較し, 動作中心点 d_n を増減させる.
4. 最大電力点付近では $I_2 \doteq I_3$ であるため, 動作中心点はほぼ移動せず, 最大電力点に追従したとみなされる.

$$duty = d_n + \Delta d \sin \theta \quad (2.1)$$

$$d_1 = \int (I_2 - I_3) dt \quad (2.2)$$

以上の制御により, 最大電力点に追従させる.

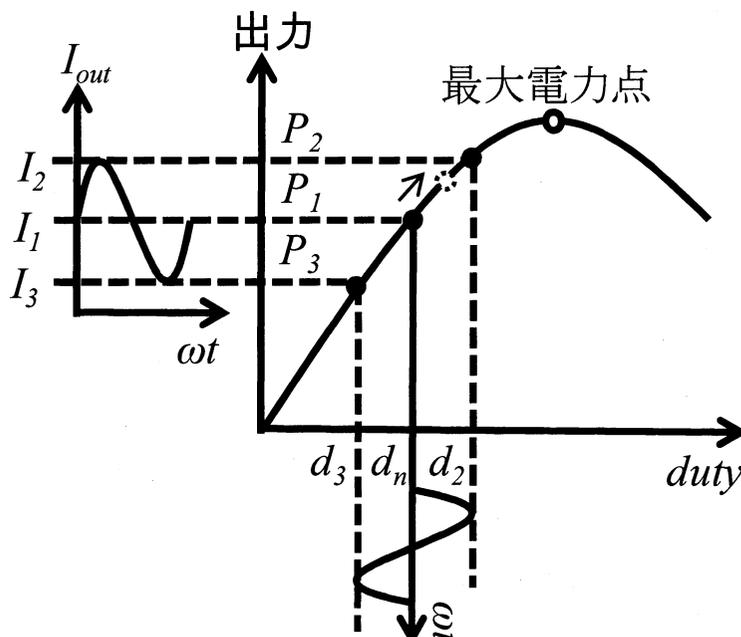


図 2.6 正弦波式 MPPT 制御法

続いて、MPPT 制御試験を行う。試験は、FW 電力補償システムと太陽光発電システムのみで行い、MPPT 制御の動作確認を行う。各制御パラメータを表 2.4 に示す。また試験環境として、冬の晴れた日に試験を行った。

$duty$ をステップ状に変化させたときの波形を図 2.7 に、MPPT 制御を行ったときの波形を図 2.8 にそれぞれ示す。図 2.7 より、 $duty$ の値によって出力電力が山型の特性となり、 $duty=0.475$ 付近に最大電力点が存在することが確認できる。これに対し、図 2.8 より $duty=0.475$ 付近に追従していることが確認できる。これらの結果より MPPT 制御が正しく行われていることがわかる。

しかし、図 2.7 より最大電力が約 300W であるが図 2.8 では約 250W と最大電力にずれが生じていることがわかる。エネルギー源が太陽光であるため、同じような天気でも刻一刻と電力が変化する。そのため、最大電力量や $duty$ にずれが生じてしまう。しかし、複数回の試験により、天気が晴れであれば、常に最大電力点は $duty=0.475$ 付近に存在することを確認した。

表 2.4 制御パラメータ

比例ゲイン K	0.005
正弦波周波数 f [Hz]	7
正弦波振幅 Δd	0.025

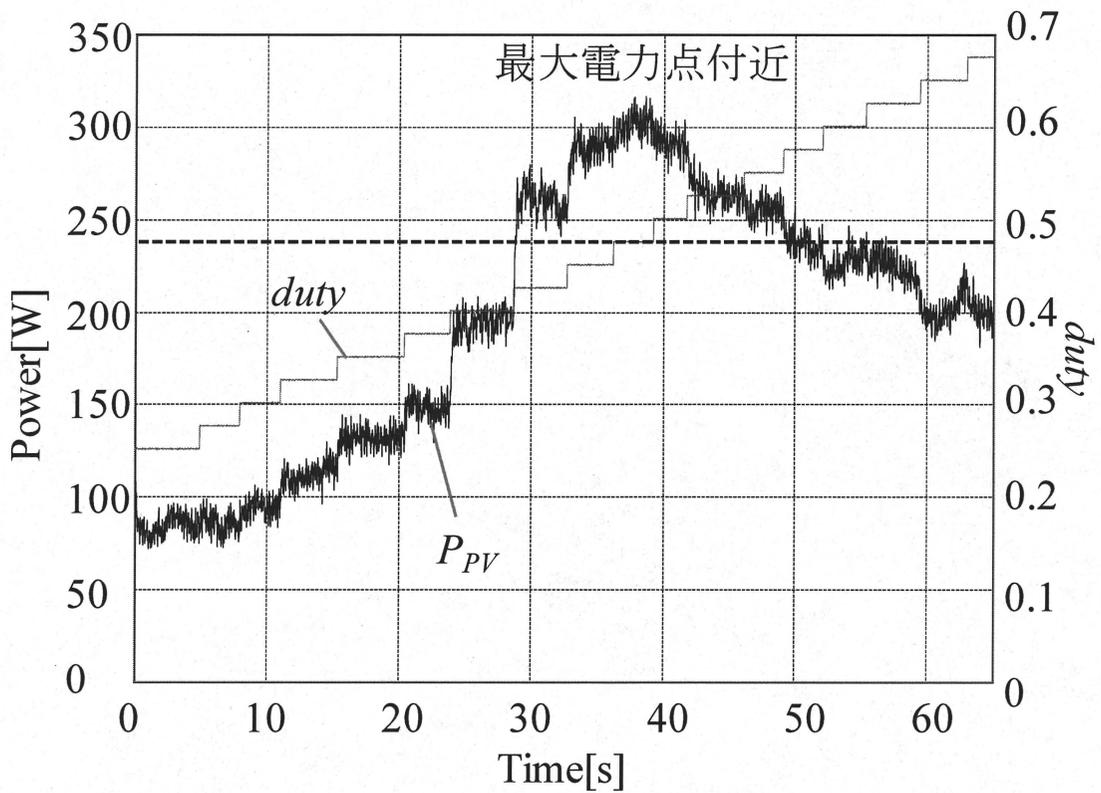


図 2.7 $duty$ をステップ状に変化させた時

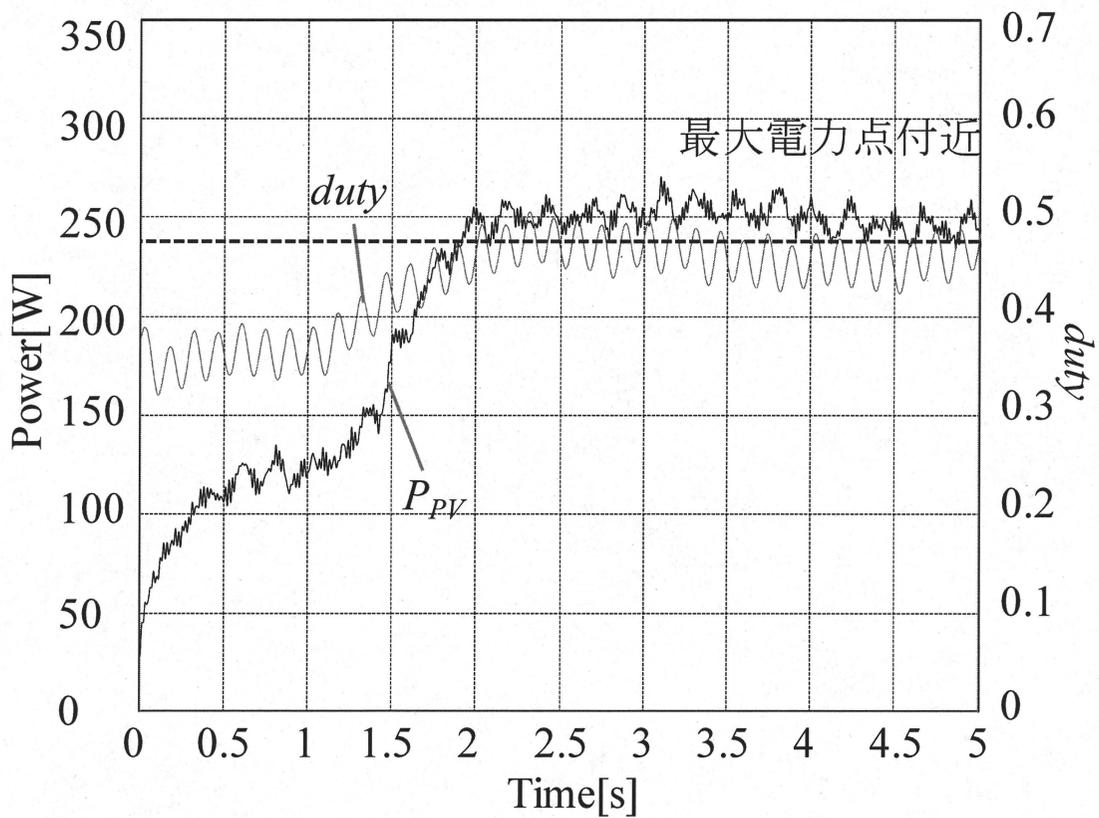


図 2.8 MPPT 制御を行った時

2.4 フライホイール電力補償システム

2.4.1 実機システム

フライホイール電力補償システムは図 2.9 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パユニットそして、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パユニットそして、DSP はマイウェイ技研株式会社により製作され、一つの制御装置として構成されており、図 2.9 中の直流電圧 V_{FW} 及び電流 I_{FW} を積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ている。図 2.10 に本研究で使用するフライホイール電力貯蔵装置と FW 駆動制御装置を示し、表 2.5 にこの仕様を示す。

本システムは、正面操作部分の START ボタンを押すことで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。そして、蓄電が終了すると外部アナログ端から入力される電力補償指令にしたがって補償電力が制御される。

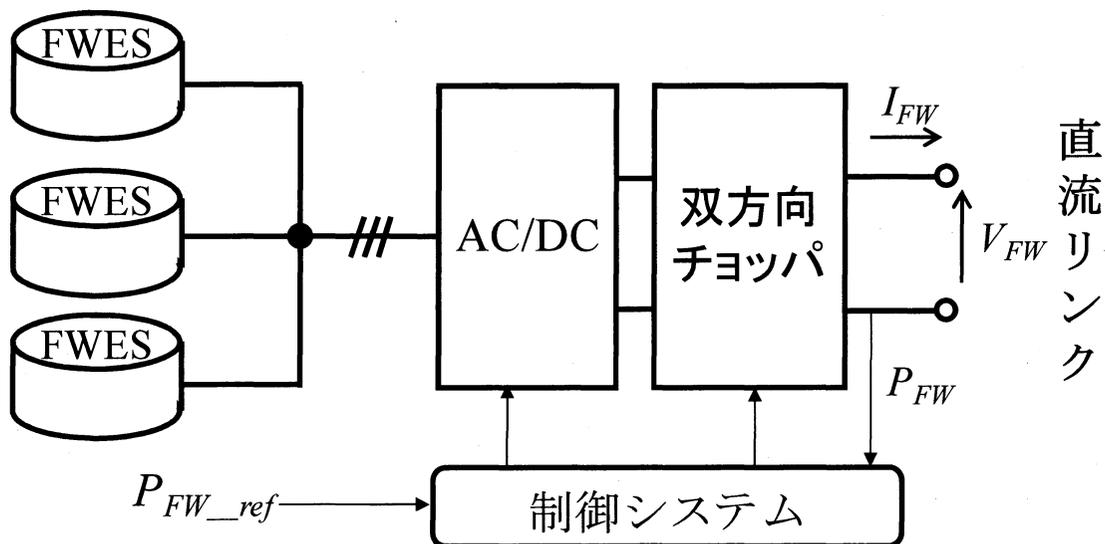
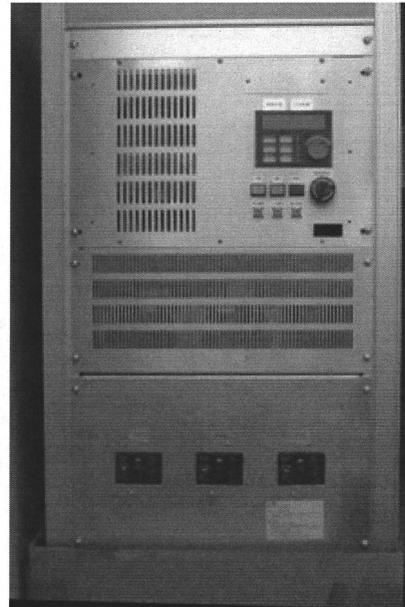


図 2.9 フライホイール電力補償システム



(a) フライホール電力貯蔵装置



(b) FW 駆動制御装置

図 2.10 フライホイール電力貯蔵装置とその駆動装置

表 2.5 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(2.3)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。

$$U = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2.3)$$

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 2.11 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電導電力貯蔵装置(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、冷却装置が必要となる。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、堅牢で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。

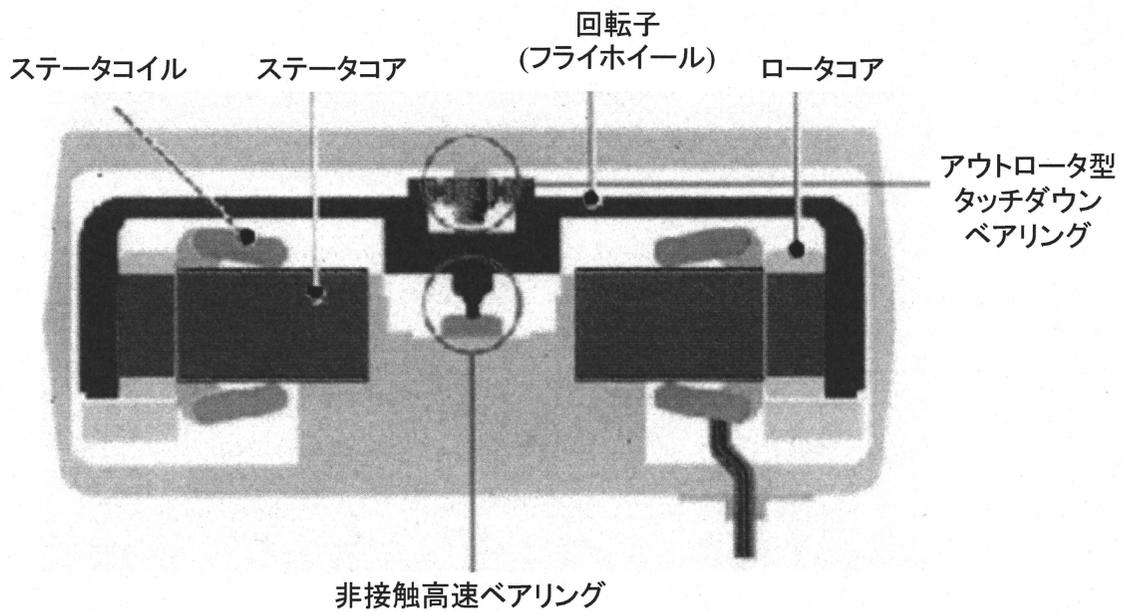


図 2.11 日本フライホイール製フライホイール電力貯蔵装置

2.4.2 模擬システム

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系統連系システムそして、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システムそして二つの 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中にあることと、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。

2.5 マイクロガスタービン発電システム

本研究で用いる、実機システムのマイクロガスタービン発電システムの全体構成を図 2.12 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。現在、模擬システムではマイクロガスタービン発電システムの模擬を行っていない。

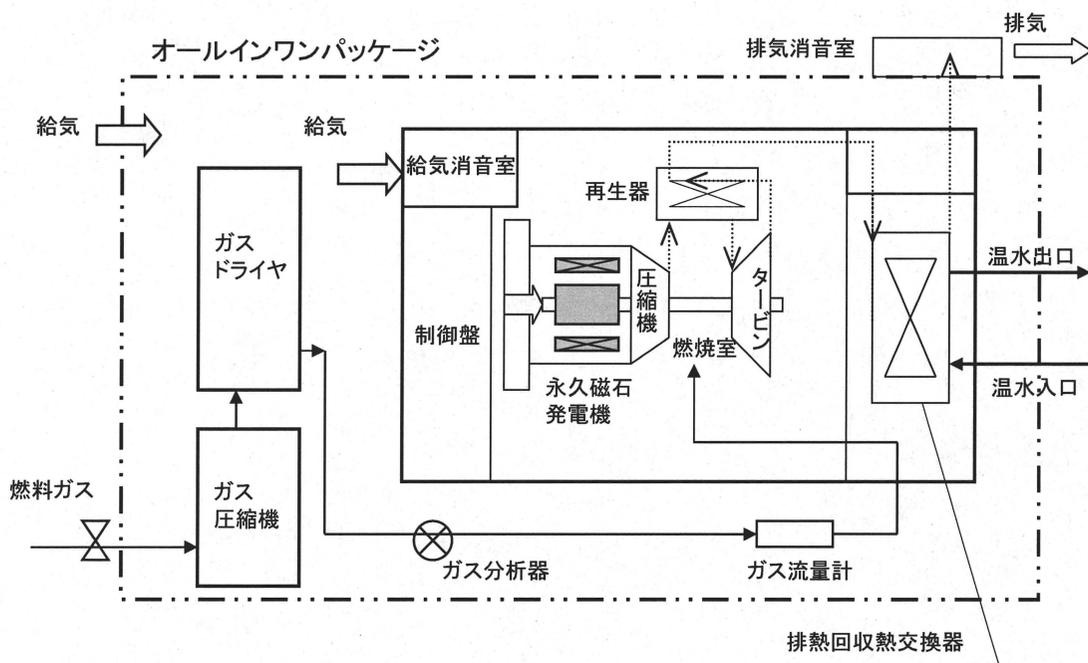


図 2.12 マイクロガスタービン発電システムの構成

2.6 電力平準化制御

2.6.1 電力平準化制御

風車からの発電電力 P_{wind} にはさまざまな周波数成分が含まれている。そこで、系統への供給電力を平準化するには、風車からの変動的な発電電力 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を行なう。この概念図を図 2.13 に示す。周波数分離により得られた中域成分 P_M は FW 電力補償システムにより補償を行なう周波数成分である。また、低周波成分 P_L は MGT 発電システムにより補償を行なう周波数成分である。そして、図 2.14 に示すように、これらの正負を反転させ、両補償システムへの電力補償指令値 P_{FW_ref} 及び P_{MGT_ref} を作成する。なおバイオマス発電システムへの電力指令値 P_{MGT_ref} に関して、その出力は 15kW から 28kW の間で変化させるため、補償を行なう際には動作中心である $P_{MGT0}(=21.5kW)$ を加える必要がある。次に、高周波成分 P_H とは優れた応答性を有する FWES でも補償しきれない高周波の成分をさす。そして、この成分の一部は、風力発電システムの電力変換機に付属される電解コンデンサによって補償される。最後に、超低域成分とは数分以上の非常にゆっくりとした周期で現れる成分であり、系統に供給する変動として許容する成分とみなしている。

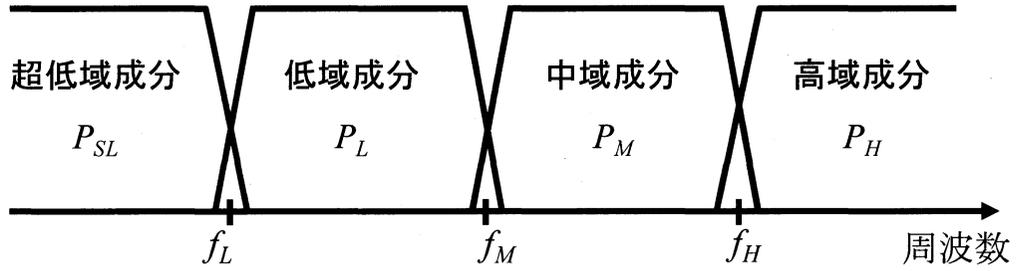


图 2.12 周波数分離

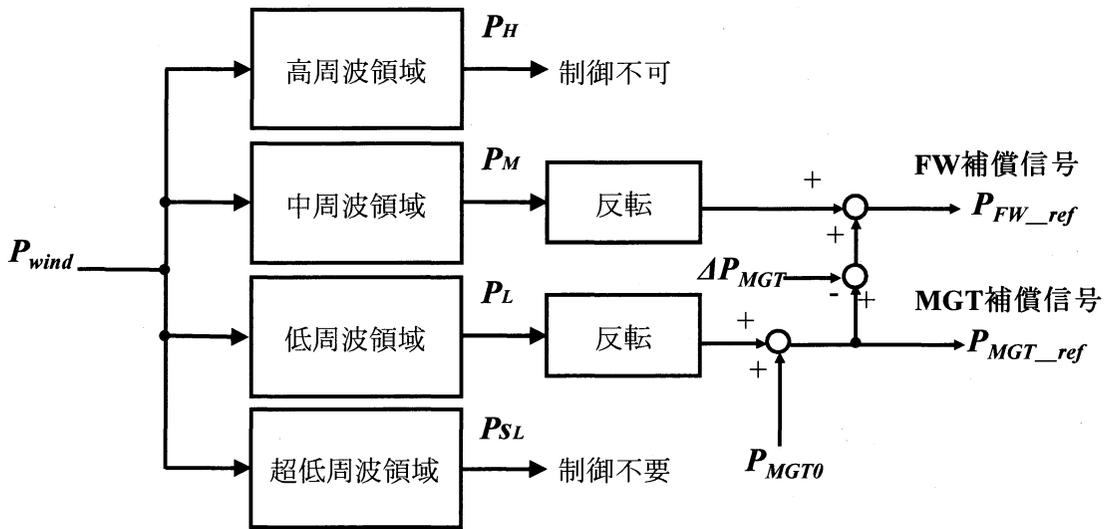


图 2.13 周波数分離法

2.6.2 電力平準化模擬試験

模擬システムを用いて、電力平準化模擬試験を行う。変動電力は2.2.2の変動電力模擬システムを用いる。この時の変動電力は、過去にフィールド試験により得られた風力発電電力のデータから、マイクログリッドの負荷変動に見立てた電力を引いた図2.13を用いる。そして、さらに本校屋上に設置された太陽光パネルを追加して補償試験を行う予定であった。しかし、図2.7より、季節が冬であると、電力が最大で約300Wとなる。これに対し、夏では600W~700Wである。模擬出力は1kW~3kWであるため、夏ほどの出力がないと電力に影響を与えることができない。そこで、補償試験では、夏に測定した太陽光発電電力のデータを用いる。従来の変動電力と今回新たに追加する太陽光発電電力の波形を図2.13に示す。図2.13より、300sや425sあたりでは、太陽光発電電力が足し合わさることでより急峻な電力変動になることが予想される。そこで、図2.13の2つの波形を足し合わせた電力を新たな変動電力として、模擬装置により模擬出力し、補償試験を行う。

電力平準化模擬試験結果を図2.14に示す。FW電力補償システムの補償帯域である0.05Hz~2Hzで電力を平準化出来ていることが分かる。

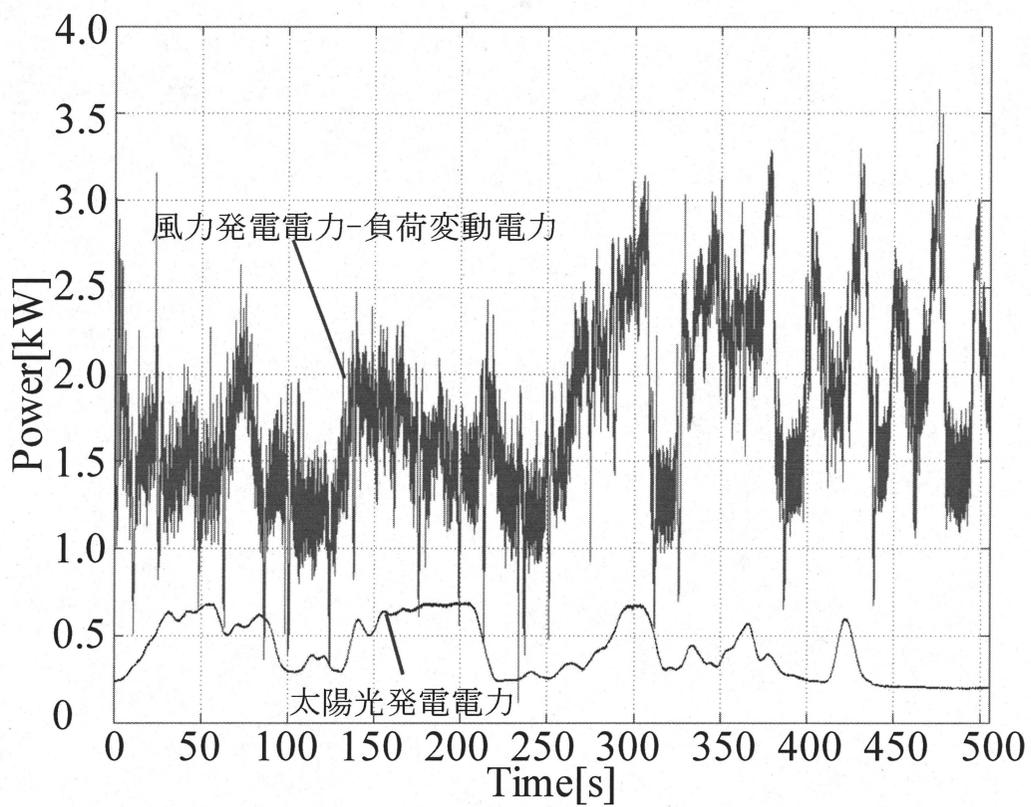
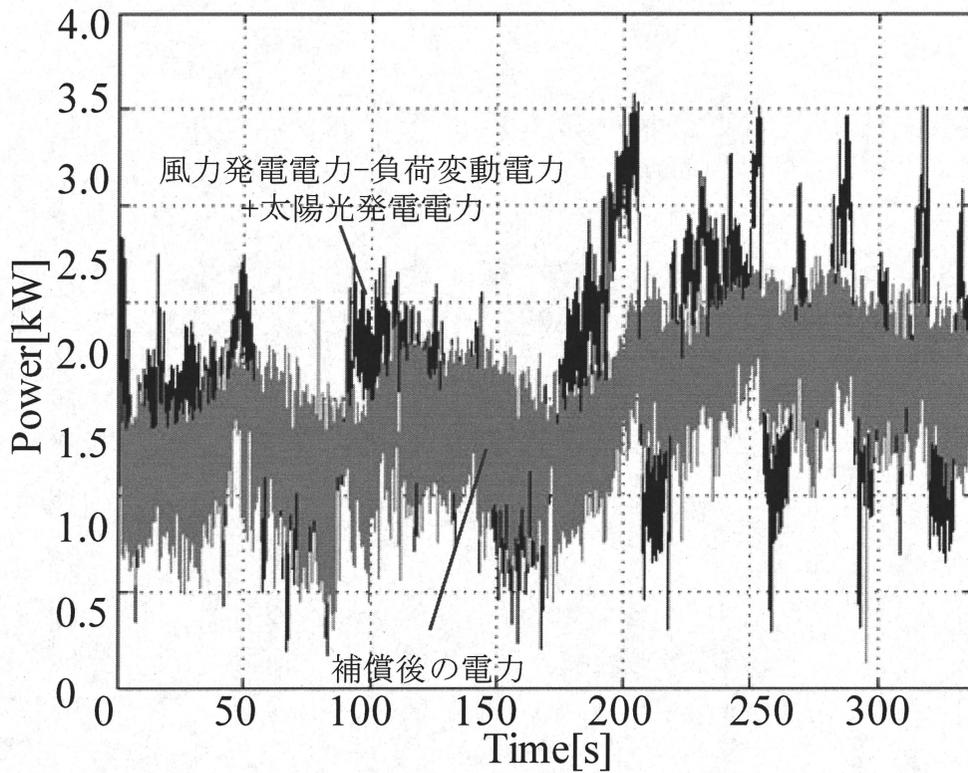
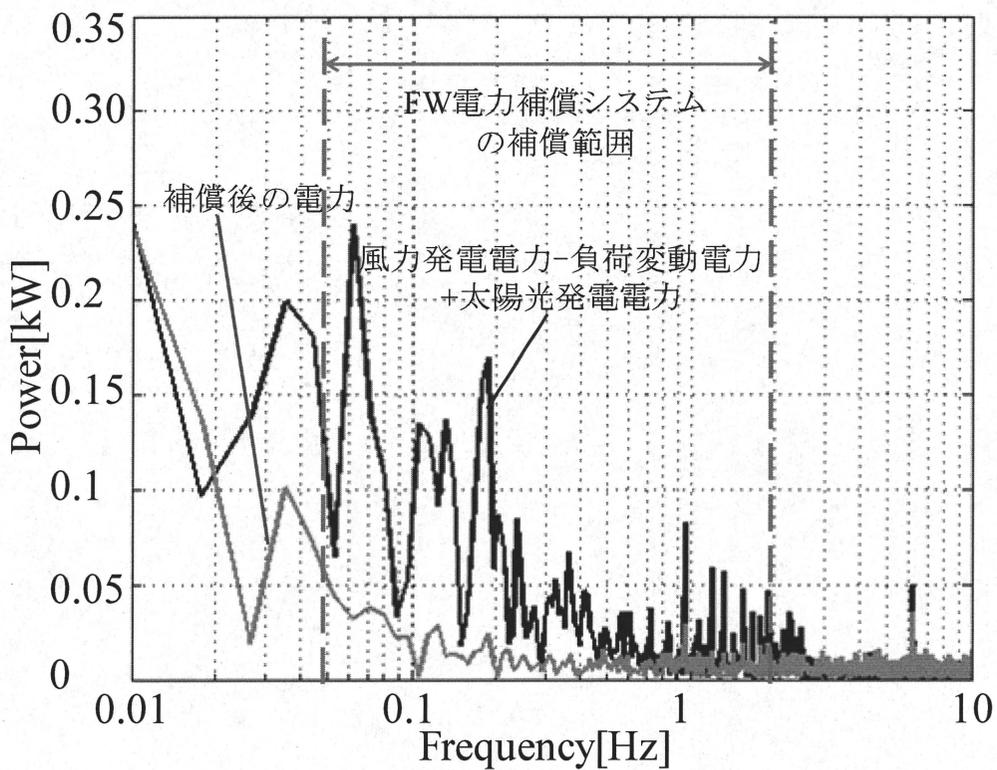


図 2.13 変動電力



(a) 時間波形



(b) FFT 解析結果

図 2.14 電力平準化模擬試験結果

第3章 系統連系モデル

本章では、分散型電源システムを連系する電力系統のモデルについて述べる。

3.1 電力系統の構成

一般的な電力系統の構成を図 3.1 に示す。原子力・火力・水力などで発電された電気は、発電所→送電線→変電所→配電線→引込線などの電力設備を経て、需要家へ送電、供給されている。表 3.1 に実際に実施されているマイクログリッドの構成例を示す。これらのマイクログリッドは電力系統の末端(6.6kV 系)で構成される。その理由として資源エネルギー庁が発行する「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」で1 需要家あたりの設備容量が 2000[kW]未満は高圧(3.3~6.6kV)に連系することと定められているためである。詳細は表 3.2 を参考されたい。

本研究で提案している分散型電源システムの設備容量は図 2.1 より 2000[kW]未満であるため図 3.1 のように系統連系することを想定する。

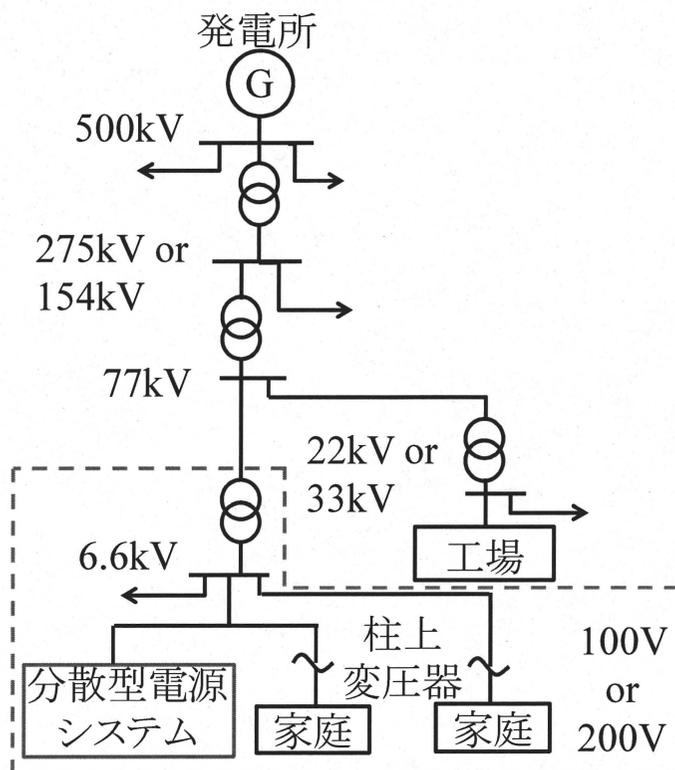


図 3.1 一般的な電力系統の構成

表 3.1 実際に実施されているマイクログリッドの構成

実施場所	装置	出力	供給先
青森県 八戸市	バイオガスエンジン発電	510kW	小中学校や庁舎
	太陽光発電	80kW	
	風力発電	20kW	
	二次電池	100kW	
	合計	710kW	
京都府 京丹後市	バイオガスエンジン発電	400kW	庁舎や病院など
	溶融炭酸塩形燃料電池(MCFC)	250kW	
	太陽光発電	50kW	
	風力発電	50kW	
	二次電池	100kW	
	合計	850kW	

表 3.2 電力系統の連系区分及び容量

連系区分	1需要家当りの設備容量
低圧(100~200V)	原則として50kW未満
高圧(3.3~6.6kV)	原則として2,000kW未満
特別高圧(22~33kV)	個別協議
スポットネットワーク	原則として10,000kW未満

3.2 系統連系モデルの等価回路

実際に電力系統を考える際は図 3.1 の等価回路を考える。ある末端系統の等価回路を図 3.2 に示す^[3]。系統周波数は 60[Hz]である。それぞれ、パーセントインピーダンスは 10[MVA]，基準電圧は 6.6[kV]で示す。パーセントインピーダンスを実際のインピーダンスに直すときは(3.2)式を用いて求めることが出来る。また，系統の送電線は三相三線交流のスター結線である。電力潮流を計算する際は一相分を考慮するので，負荷は 1/3，6.6kV は線間電圧なので相電圧にするためルート 3 分の 1 する。電圧値は実効値を表わす。また，6.6kV 系より上位系を考慮すると，回路が複雑になるため上位系は無有限大母線とし，基準位相とする。無有限大母線とは電流によらず，周波数と電圧が一定の理想的な交流電圧である。以上を考慮して求めた 6.6kV 系統モデルの各パラメータを図 3.3 に示す。

また，分散型電源システムの出力は 1 配電線 1AC リアクトルあたり 150[kW]とする。

その理由としては，図 3.5 に電力会社 9 社の平均送配電損失率を示す。また，表 3.2 に図 3.3 における配電線損失率を示す。図 3.5 と表 3.3 より分散型電源システムの出力は 150[kW]が妥当であると判断した。

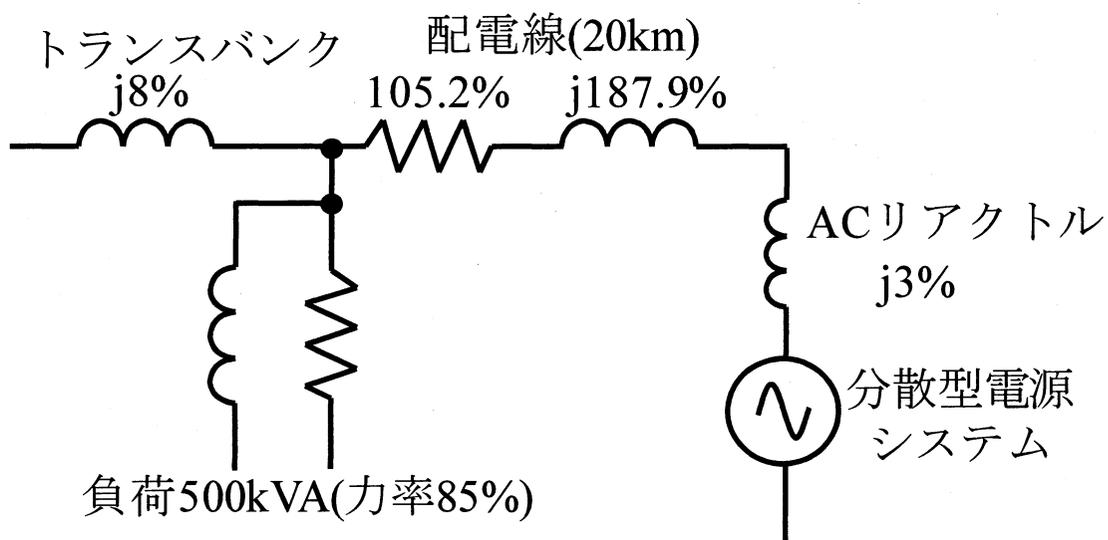


図 3.2 末端系統の等価回路

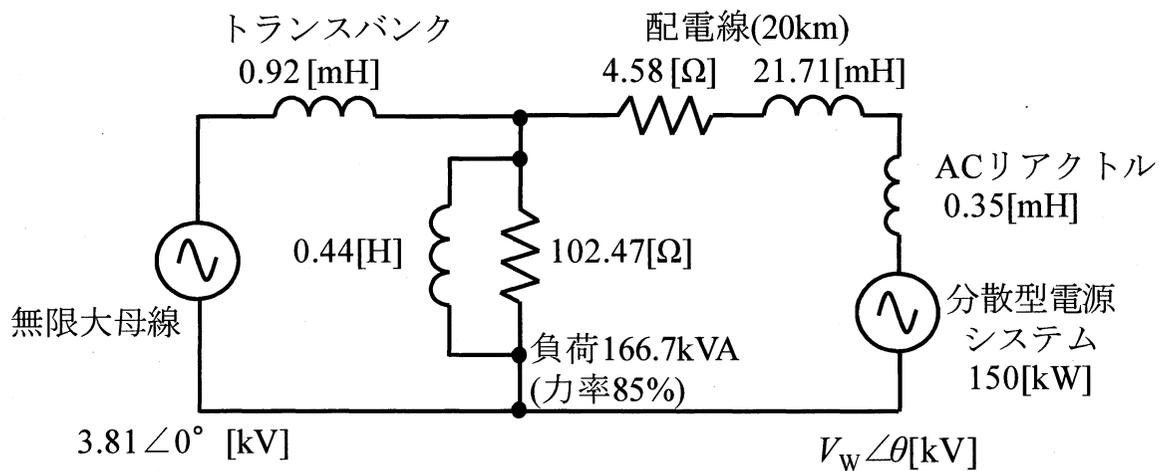


図 3.3 図 3.2 の各パラメータ

パーセントインピーダンス(%Z)は、回路に定格電流を通じた場合に生じる電圧降下と定格電圧の比である。パーセントインピーダンスは、電力系統計算として短絡容量計算、電圧降下計算など幅広く用いられる。パーセントインピーダンスは図 3.4 の回路において(3.1)式より求めることが出来る。これより、インピーダンスは(3.2)式となる。

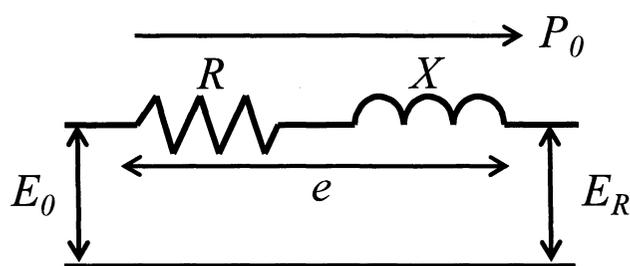


図 3.4 基本回路

$$\%Z = \frac{e}{E_0 \times 10^3} \times 100 = \frac{ZI_0}{E_0 \times 10^3} \times 100 = \frac{ZP_0}{10E_0^2} (\%) \quad (3.1)$$

$$Z = \frac{\%Z \times 10E_0^2}{P_0} (\Omega) \quad (3.2)$$

Z : インピーダンス(Ω)

e : 電圧降下値(V)

E_0 : 基準電圧(kV)

I_0 : 基準電流[P_0/E_0 (A)]

P_0 : 基準電力(kVA)

表 3.3 図 3.3 における配電線損失率

配電線損失[kW]	分散型電源システム出力[kW]	配電線損失率[%]
0.8	50.8	1.6
3.4	103.4	3.3
8	158.1	5.1
14.9	214.8	6.9
24.4	274.7	8.9
36.8	336.9	10.9

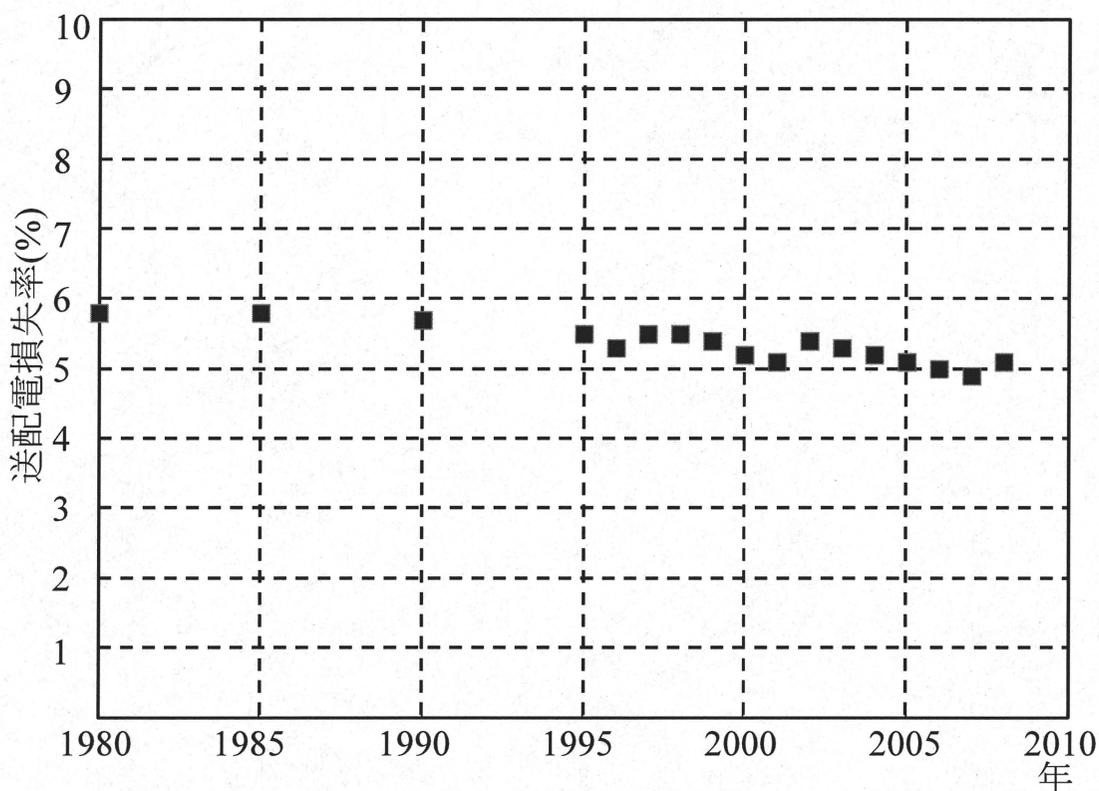


図 3.5 電力会社 10 社平均の送配電損失率

$$\text{送配電損失率} = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100 \quad (3.3)$$

A : 送電端供給力=発電受電電力量-電力会社発電所所内電力量

B : 使用電力量+変電所所内電力量

第4章 連系可能容量算定法

本章では，電力貯蔵装置の容量算定法までの流れと，容量算定に向けて電力系統への影響を考慮した分散型システムの連系可能容量について述べる．

4.1 容量算定までの流れ

図 4.1 に容量算定までのフローチャートを示す．まず，分散型電源の増加による系統への悪影響を評価する．系統への悪影響は，系統電圧変動，系統周波数変動や系統安定性などがある．続いて，本研究のような分散型電源システム内の電力貯蔵装置の性能によってどれほど，系統への悪影響を緩和できるかを評価する．以上より，分散型電源の容量，系統連系モデル，電力貯蔵装置等の電力補償装置の性能を総合的に判断し，電力貯蔵装置の容量を決定していく．

そこで，まず分散型電源システムを増加させた場合，系統にどう影響するのかについて考える．この時，図 3.3 の系統モデルの分散型電源システムと配電線と ACリアクトルを 1 セットと考え，これが並列に繋がっていくことで，分散型電源の増加を表現する．図 3.4 にその様子を示す．この時 1 セットの出力は 150[kW]とする．その理由については 3 章を参照されたい．

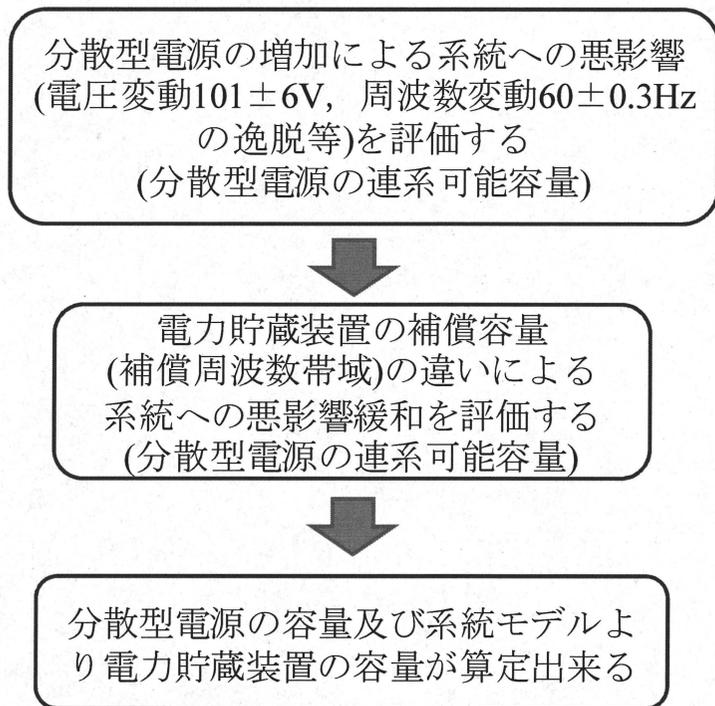


図 4.1 電力貯蔵装置の容量算定までのフローチャート

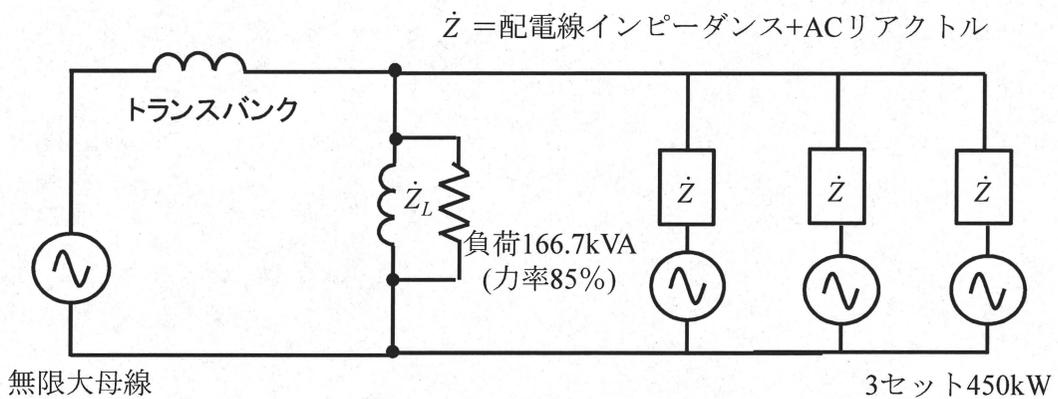


図 4.2 分散型電源システムの増加方法

4.2 系統に投入する電力

まず、図 4.3 の回路における送電電力を考える。送電端が送電線路に送り出す有効電力 P_s 、無効電力 Q_s は、送電端の電圧ベクトル \dot{V}_s と線路電流ベクトル i_s の共役ベクトル i_s^* との積として、次式で表わされる^[4]。

$$P_s + jQ_s = \dot{V}_s i_s^* = V_s \varepsilon^{j\theta} \frac{V_s \varepsilon^{-j\theta} - V_r \varepsilon^{j\theta}}{Z \varepsilon^{-j\varphi}} = \frac{V_s^2}{Z} \varepsilon^{j\varphi} - \frac{V_s V_r}{Z} \varepsilon^{j(\theta-\varphi)} \quad (4.1)$$

それぞれ有効電力 P_s と無効電力 Q_s は次式で表わされる。

$$P_s = \frac{V_s^2}{Z} \cos \varphi - \frac{V_s V_r}{Z} \cos(\theta - \varphi) \quad (4.2)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{Z} \sin \varphi - \frac{V_s V_r}{Z} \sin(\theta - \varphi) \quad (4.3)$$

(4.2)式と(4.3)式をそれぞれ変形し、二乗をとると次式で表わされる。

$$\left(P_s - \frac{V_s^2}{Z} \cos \varphi\right)^2 = \left(\frac{V_s V_r}{Z}\right)^2 \cos^2(\theta - \varphi) \quad (4.4)$$

$$\left(Q_s - \frac{V_s^2}{Z} \sin \varphi\right)^2 = \left(\frac{V_s V_r}{Z}\right)^2 \sin^2(\theta - \varphi) \quad (4.5)$$

(4.4)式と(4.5)式を足すと送電電力は次式で表わされる。

$$\left(P_s - \frac{V_s^2}{Z} \cos \varphi\right)^2 + \left(Q_s - \frac{V_s^2}{Z} \sin \varphi\right)^2 = \left(\frac{V_s V_r}{Z}\right)^2 \quad (4.6)$$

また、(4.6)式より送電電力は図 4.4 のように表わされる。

これより、有効電力、無効電力はある端子間の電圧の比と位相差で決定される。

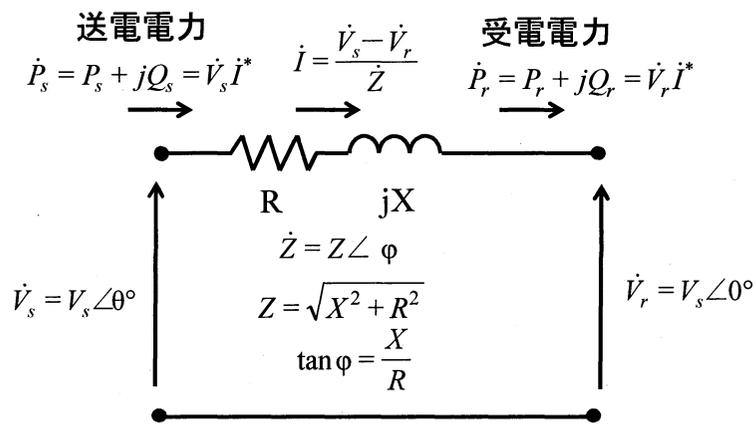


図 4.3 送電線路

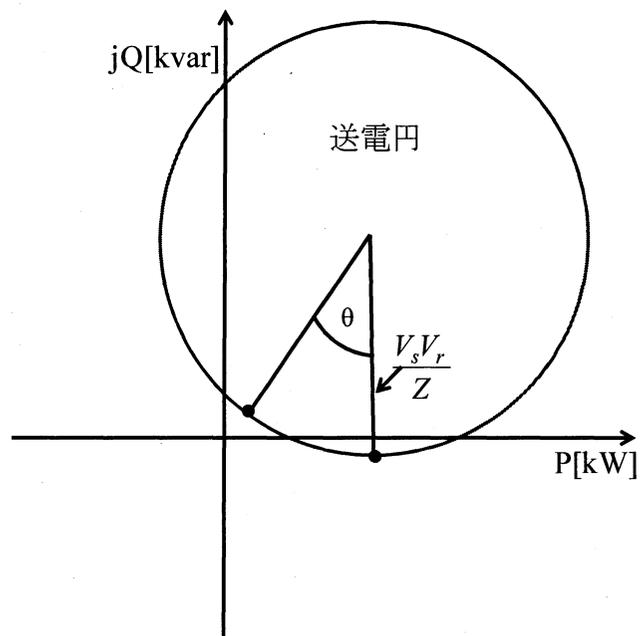
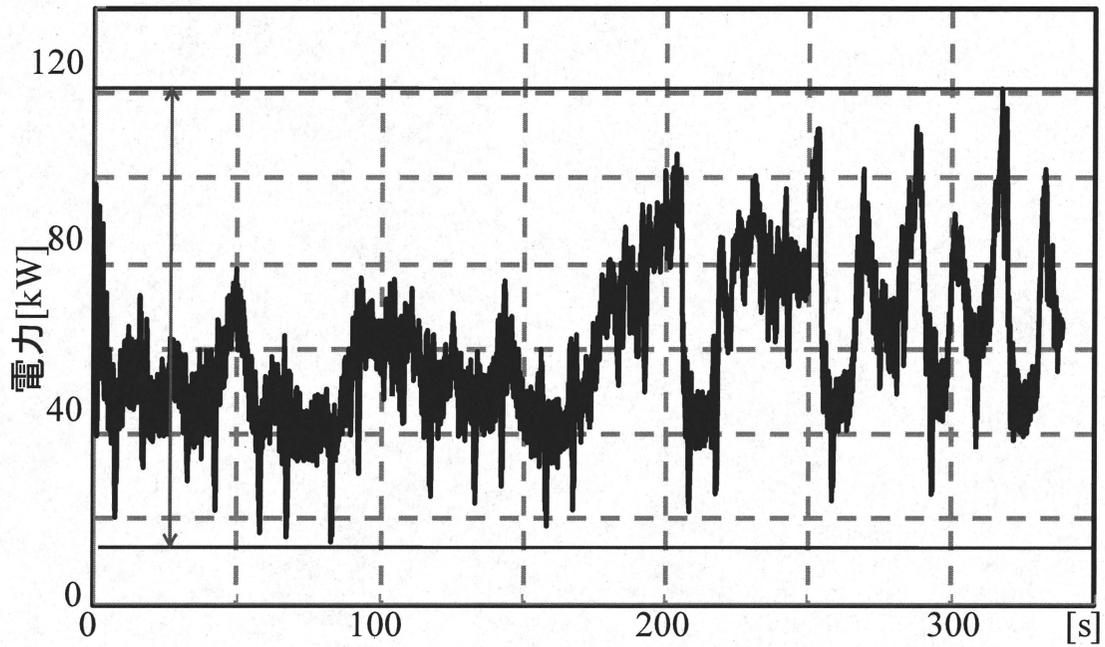
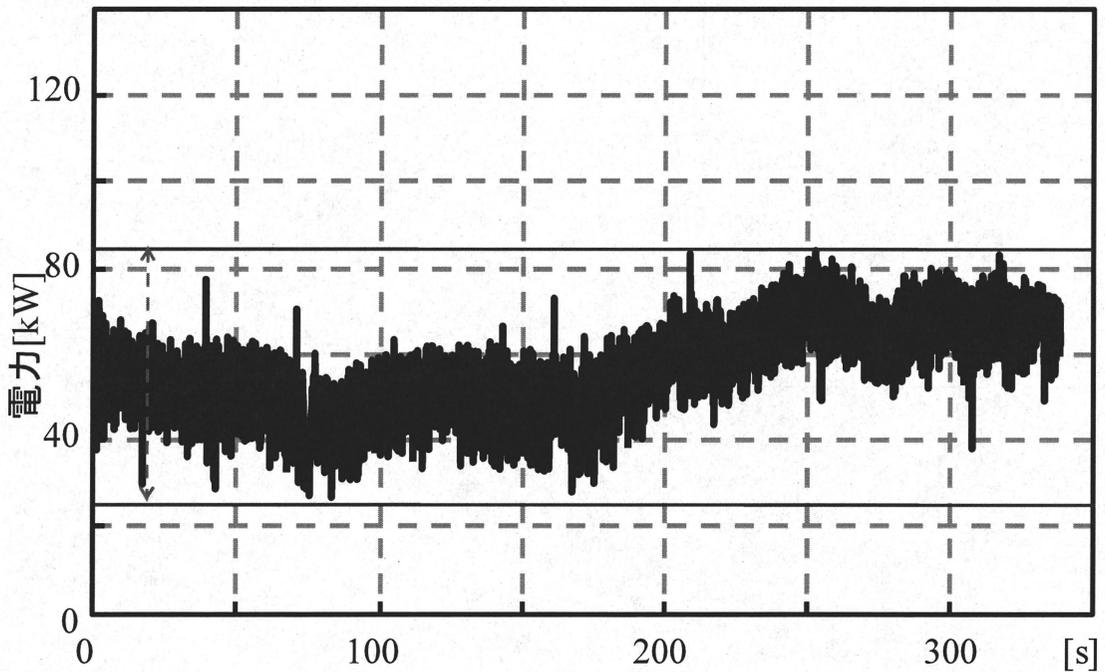


図 4.4 電力円線図(送電円のみ)

続いて、系統に投入する電力は図 4.5 のような電力を考える。一つは風車から出力される電力を電力補償なしで系統に投入した場合と電力貯蔵装置で電力補償した電力を系統に投入する場合である。表 4.1 に図 4.5 の電力のピークトップ、ピークボトム、平均値を示す。実際、系統に電力を送る場合は、図 4.5 のワーストケースを考えて、図の矢印の幅のピークボトムとピークトップで考える。電力を系統に流すとき、分散型電源システムの電圧の大きさ V_w と位相 θ を操作し、所望の電力と力率になるように調整する。



(a) 電力補償前



(b) 電力補償後

図 4.5 分散型電源システムの実出力

表 4.1 図 4.5 の各値

	(a)電力補償前	(b)電力補償後
電力平均値[kW]	61	57
電力ピークトップ値[kW]	121	84
電力ピークボトム値[kW]	15	27

4.3 電力系統への悪影響の評価

電力系統への悪影響の評価については、系統電圧変動、系統周波数変動、系統安定性などを評価しなければならない。しかしながら、図1の電力系統の等価回路で分散型電源システムや無限大母線は定電圧源で表現しているため、系統周波数変動や系統安定性の評価は行えない。従って、系統電圧変動のみの評価を行う。系統電圧変動の評価は資源エネルギー庁が発行する「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」ののっとり行う。これによると、常時電圧変動対策に「発電設備等を一般配電線に連系する場合には、電気事業法第26条及び同法施行規則第44条の規定により、低圧需要家の電圧を標準電圧100[V]に対しては 101 ± 6 [V]、標準電圧200[V]に対しては 202 ± 20 [V]以内に維持する必要がある」とある。従って、本研究では標準電圧100[V]を基準にして考える。また、力率については「逆潮流がある場合の受電点の力率は、適性なものとして原則85%以上とするとともに、電圧上昇を防止するために系統から見て進み力率(発電設備等側から見て遅れ力率)とならないようする」とある。従って、力率は85%以上で考える。

4.4 連系可能容量

図 3.3 の系統モデルから分散型電源システムの連系可能容量を求める。

4.4.1 定常時における連系可能容量

電力を系統に投入するとき、有効電力や無効電力は(4.6)式と図 4.4 より分散型電源システムの電圧の大きさ V_w と位相 θ で決まる。そこで、 V_w と θ を調整して所望の力率、有効電力になるようにし、その時の負荷の電圧を求める。このとき、柱上変圧器は理想とし 6.6kV/101V とする。

ここで、(4.6)式より V_w は 4 次方程式となるため、所望の力率、有効電力となる V_w と θ の組み合わせはいくつか存在すると考えられる。そこで、ある 2 つの例について示す。図 4.6 に分散型電源システムの連系容量を増やした時の負荷電圧を力率の条件を変えて示す。図 4.6(a)は進み力率、図 4.6(b)は遅れ力率の時の図を示す。図 4.6 より進み力率か遅れ力率かによって負荷電圧の変動も異なる。図 4.6 より電圧制約である $101 \pm 6[V]$ を矢印の範囲で示し、これを超える時の連系容量を求めたものを表 4.2 に示す。これより、力率によって連系可能容量は異なり、必ずしも力率が良い送電が良いとは限らないことが分かる。さらに、進み力率より、遅れ力率のほうが連系可能容量を増やすことが出来る。

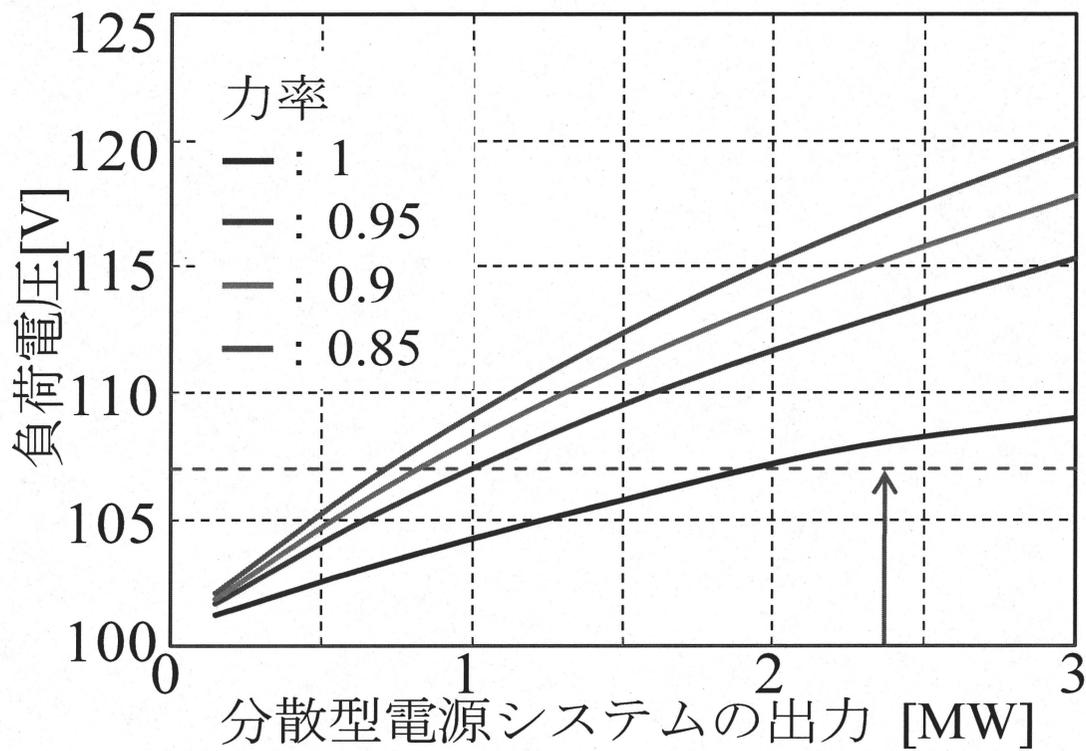
表 4.2 連系可能容量

(1) 図 4.6(a)進み力率の時の連系可能容量

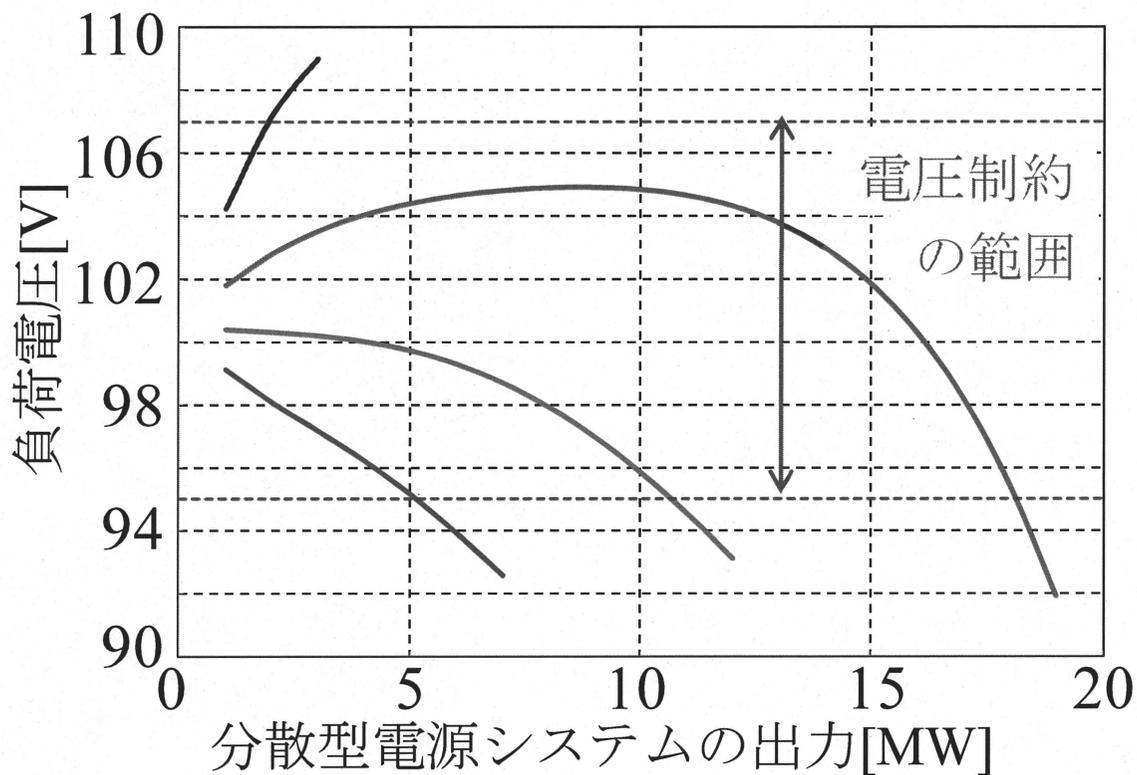
力率	1	0.95	0.9	0.85
連系可能容量[kW]	1929	993	819	714

(2) 図 4.6(b)遅れ力率の時の連系可能容量

力率	1	0.95	0.9	0.85
連系可能容量[kW]	1929	18133	16972	5129



(a) 進み力率



(b) 遅れ力率

図 4.6 分散型電源システムの連系容量を増やした時の負荷電圧

また, 現在表 4.1 より電力補償を行うことでピークトップ値を電力補償前(100%) 比べて 70%に抑えることが出来るため, 連系可能容量を 1.4 倍することが出来る. 図 4.7 に力率 1 の時の電圧変動を示し, 赤い矢印は図 4.5 の電力脈動が 20 セット並列接続された場合の電力脈動幅を示してある. これより, 電力補償を行うことで, 電力脈動を連系可能領域に抑えることができ, 連系可能容量を増やすことが出来る.

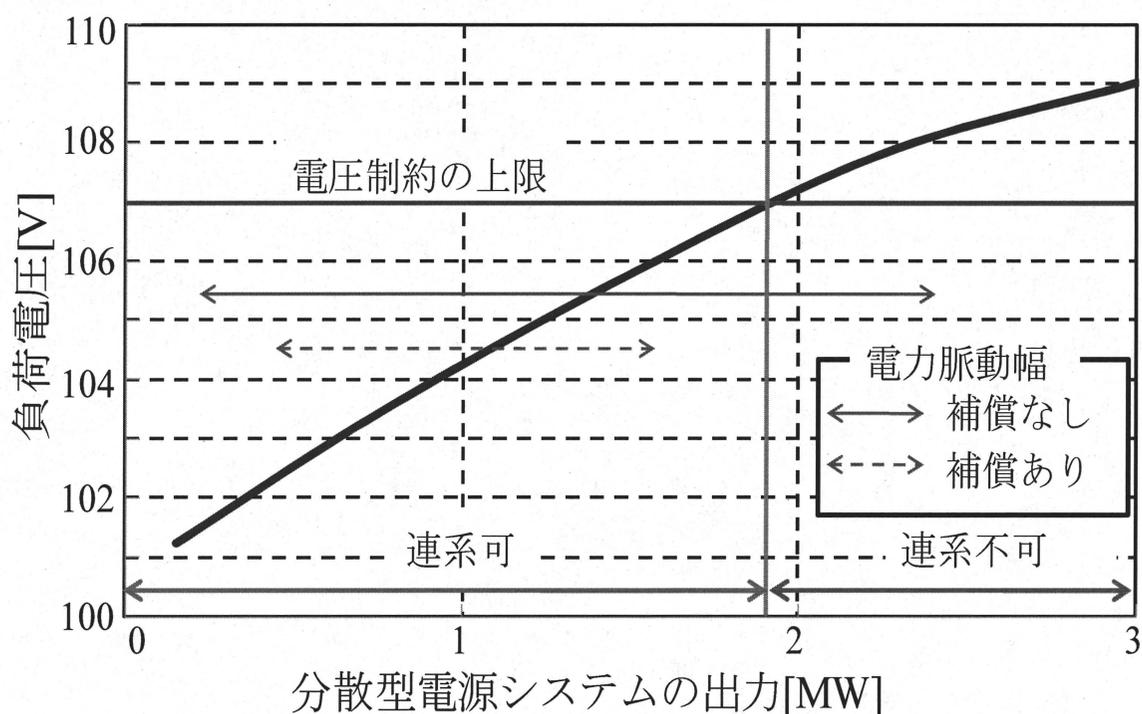


図 4.7 力率 1 の時の負荷電圧変動

また、遅れ力率、進み力率による電圧変動の違いについて図 4.7 を用いて説明する。図 4.8(b)より遅れ力率であれば、受電端の電圧は送電端の電圧に比べ低い。図 4.8(a)より進み力率だと、あるところで、受電端の電圧が送電端の電圧より高くなる(フェランチ現象)。

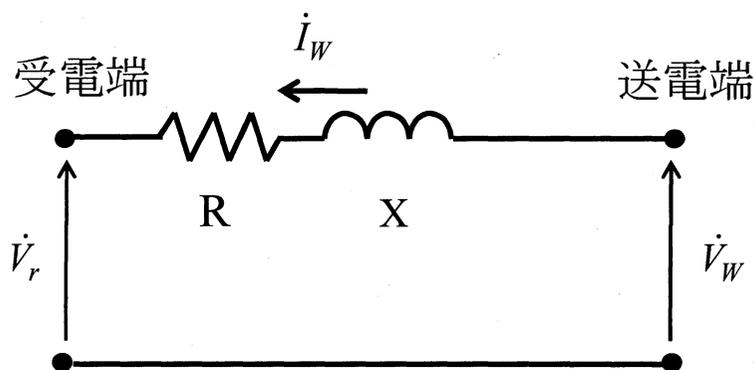


図 4.7 送受電回路

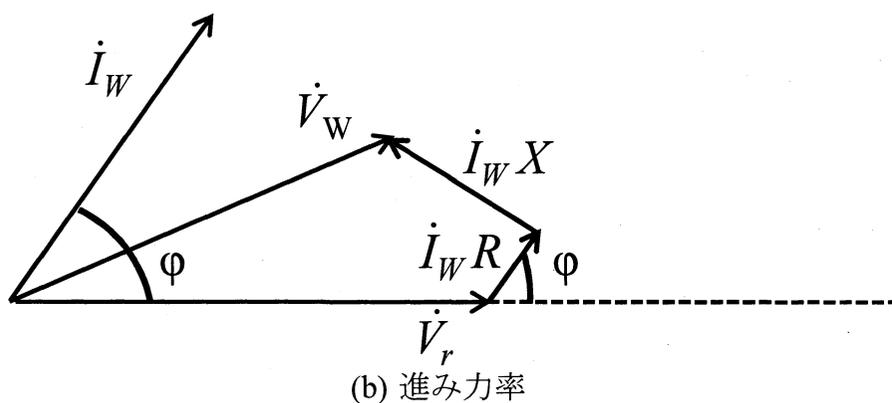
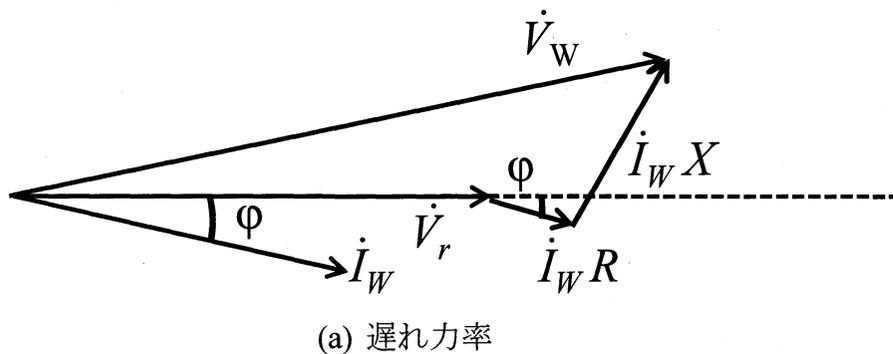


図 4.8 遅れ力率、進み力率のベクトル図

4.4.2 過渡時における連系可能容量

前項までは、分散型電源システムの定常時における連系可能容量を算出してきた。しかし、図 4.6 のように力率によって、電圧変動が異なる。そのため、力率によって電圧制約を超える時の出力が異なる。従って、力率が変化した場合を考慮した負荷電圧変動を評価する必要がある。そこで、本研究ではシミュレーションにより、任意の力率と出力を入力とした時の分散型電源システムの電圧位相を求め、そこから電圧変動を評価し、分散型電源システムの連系可能容量を求める。図 4.9 に任意の力率と出力を入力とした時の負荷電圧を求める方法を示す。

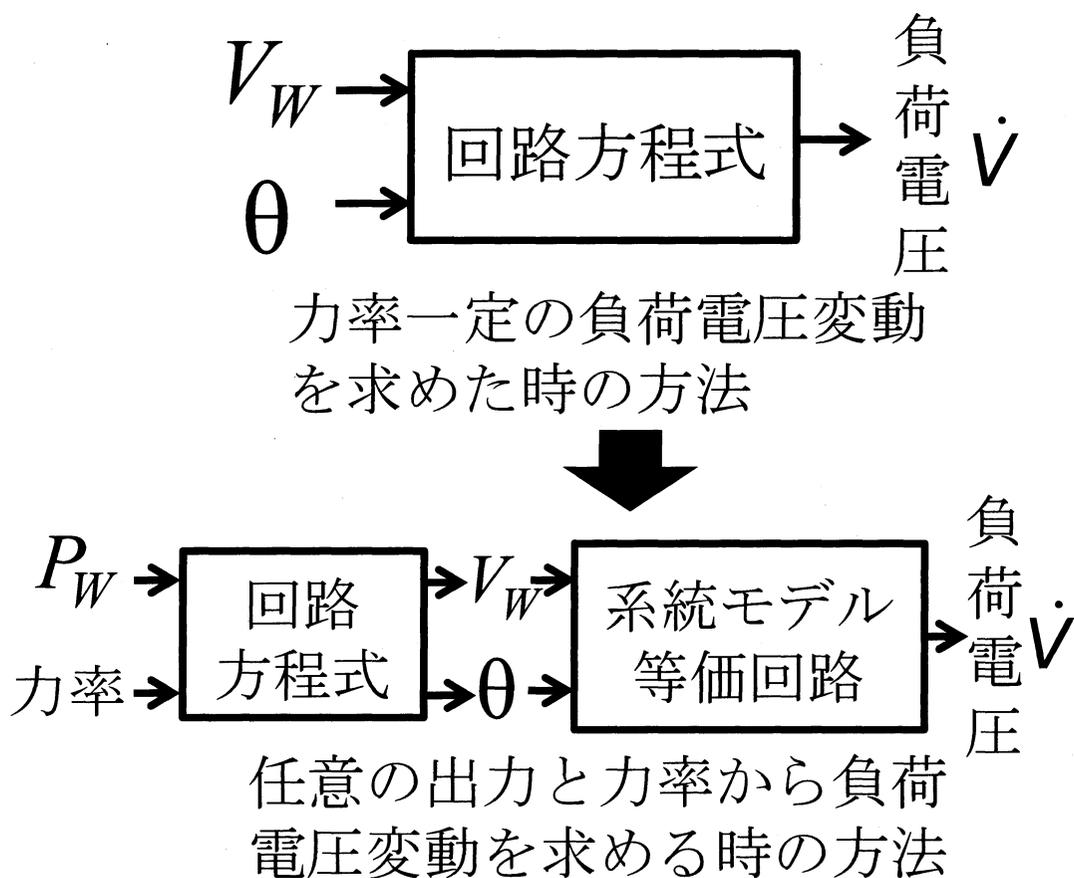


図 4.9 任意の出力と力率から負荷電圧変動を求める方法

分散型電源システムの電力脈動の再現は以下の手順で行う。まず図 4.10 の回路において、所望の電力と力率を求める。この時送電電力 \dot{P}_W は

$$\dot{P}_W = P_W + jQ_W = \dot{V}_W \dot{I}_W = V_W e^{j\theta} \cdot \frac{V_W e^{-j\theta} - V e^{j0}}{Z_W e^{-j\phi}} = \frac{V_W^2}{Z_W} e^{j\phi} - \frac{V_W V}{Z_W} e^{j(\theta+\phi)} \quad (4.7)$$

(4.7)式を θ について整理する。

$$\begin{aligned} e^{j\theta} &= \frac{V_W}{V} - \frac{Z_W \dot{P}_W}{V_W V} e^{-j\phi} = \frac{V_W}{V} - \frac{Z_W (P_W + jQ_W) \cdot (\cos\phi - j\sin\phi)}{V_W V} \\ &= \frac{V_W}{V} - \frac{Z_W (P_W \cos\phi + Q_W \sin\phi)}{V_W V} + j \frac{Z_W (P_W \sin\phi - Q_W \cos\phi)}{V_W V} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$\cos\theta$ $\sin\theta$

(4.8)式の実軸は $\cos\theta$ 、虚軸は $\sin\theta$ を表わすので、 θ は(4.9)式で求められる。

$$\theta = \arctan \frac{Z_W (P_W \sin\phi - Q_W \cos\phi)}{Z_W (P_W \cos\phi + Q_W \sin\phi) - V_W^2} \quad (4.9)$$

次に(4.8)式について大きさが 1 という条件から共役をかけると 1 になる。

$$\left(\frac{V_W}{V} - \frac{Z_W \dot{P}_W}{V_W V} e^{-j\phi} \right) \cdot \left(\frac{V_W}{V} - \frac{Z_W \dot{P}_W^*}{V_W V} e^{j\phi} \right) = 1$$

$$\begin{aligned} (V_W^2 - Z_W \dot{P}_W e^{-j\phi}) \cdot (V_W^2 - Z_W \dot{P}_W^* e^{j\phi}) &= V_W^4 - V_W^2 Z_W (\dot{P}_W e^{-j\phi} + \dot{P}_W^* e^{j\phi}) + Z_W^2 (P_W^2 + Q_W^2) = V V_W^2 \\ V_W^4 - V_W^2 (V^2 + 2Z_W (P_W \cos\phi + Q_W \sin\phi)) + Z_W^2 (P_W^2 + Q_W^2) &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

これより V_W は(4.10)式で求められる。

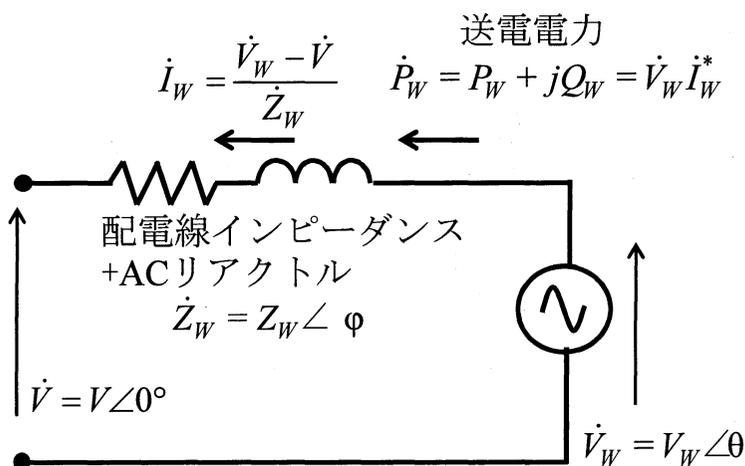


図 4.10 V_W と θ を求める回路

続いて、図 3.3 の系統モデルの等価回路に合わせるために図 4.11 のように無限大母線まで計算する。このとき、無限大母線がすべての基準であるので、ずれた電圧の大きさは比で、位相はずらして調整する。

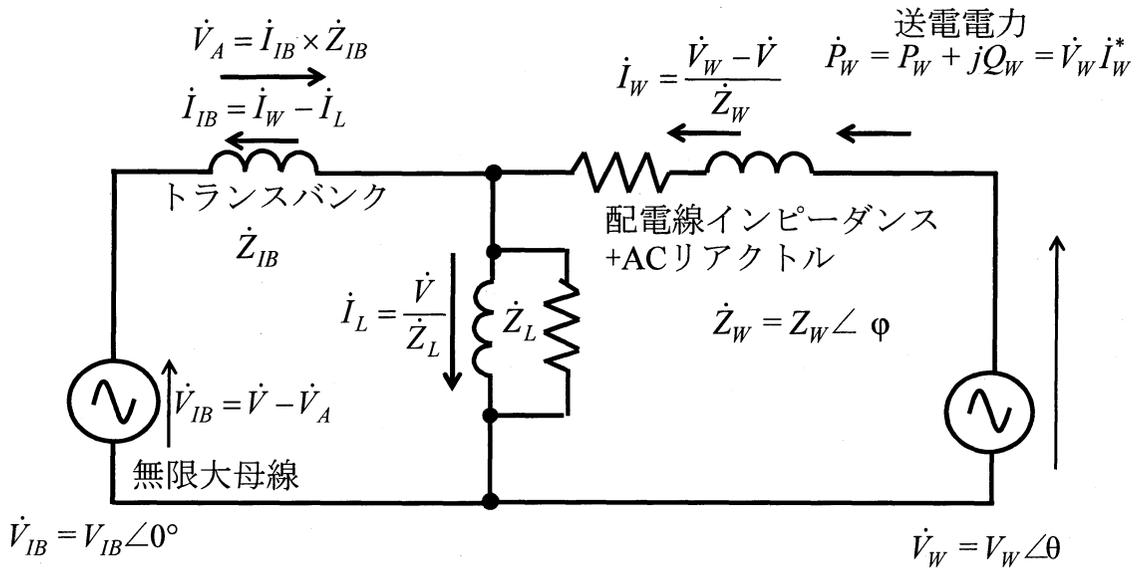
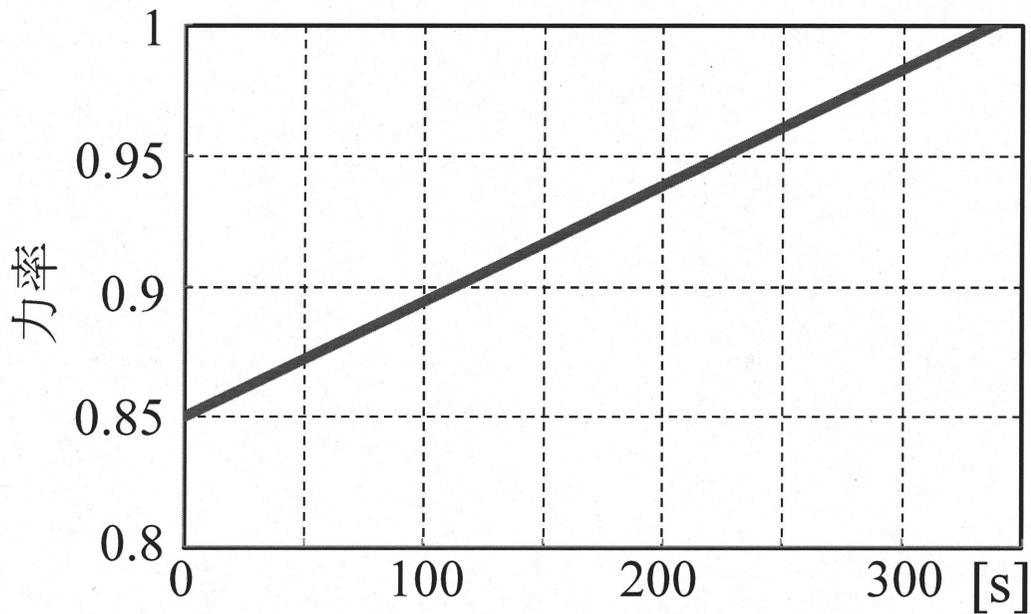
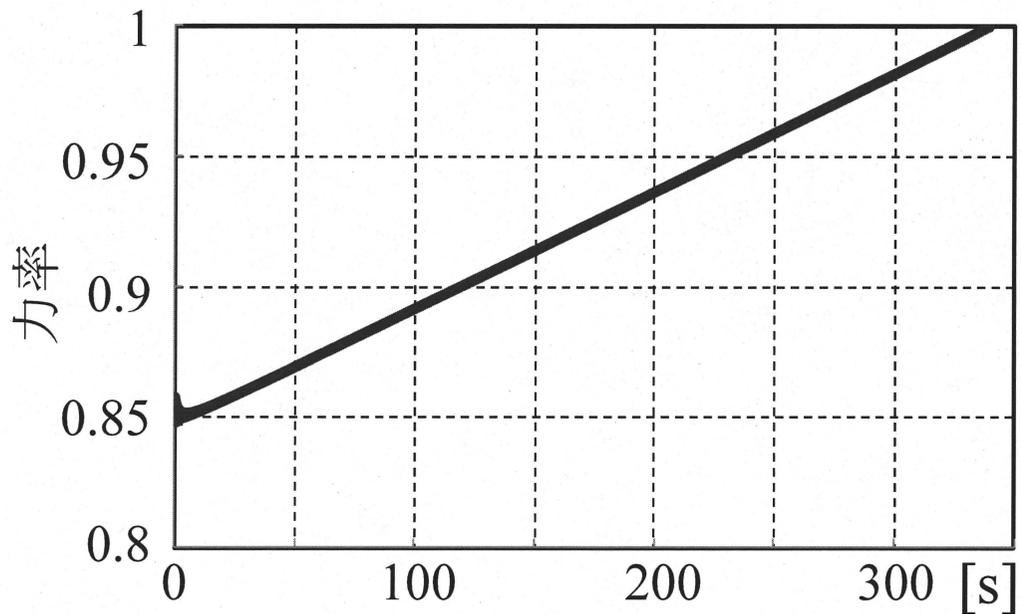


図 4.11 無限大母線まで求める回路

そして、求めた V_w と θ で所望の出力と力率になるかシミュレーションを行う。力率の指令は 0.85 から 1 の単調増加，出力の指令は 0[MW]から 20[MW]の単調増加で与える。図 4.12 に指令力率とシミュレーション結果，図 4.13 に指令出力とシミュレーション結果をそれぞれ示す。これより，力率は指令値通りの結果を得ることが出来たが，出力は得ることが出来なかった。

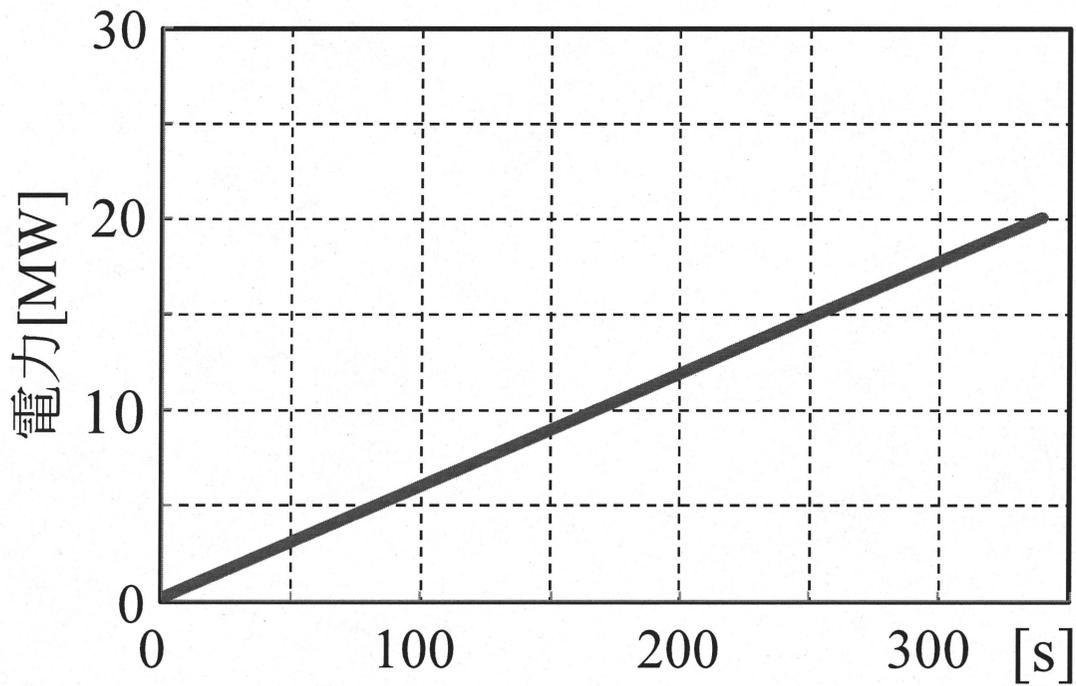


(a) 指令力率値

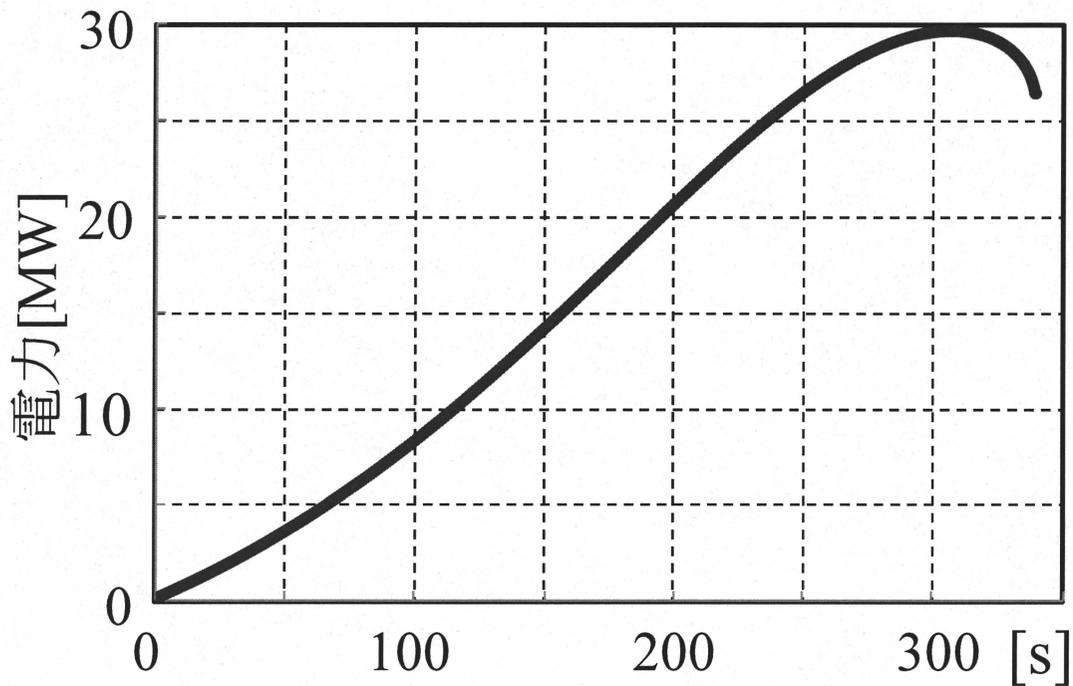


(b) シミュレーション結果

図 4.11 分散型電源システムの力率



(a) 指令電力値



(b) シミュレーション結果

図 4.12 分散型電源システムの出力量

出力が大きくなった原因として、図 4.10 から無限大母線を基準にするときに、各電圧値の大きさは比 A で、位相は α ずらして調整して計算した。この時、分散型電源システムの出力は $P_w = AV_w AI_w \cos\beta$ ($\beta: V_w, I_w$ の位相差) となる。これより、分散型電源システムの出力は A^2 分大きくなったと考えられる。位相に関してはずらしただけなので、位相差に変化はなく力率は指令値通りの結果になったと考えられる。

そこで、図 4.12 のシミュレーション結果を A^2 で割った図を図 4.13 に示す。これより、指令値通りの結果が得られた。

以上より、無限大母線を基準にするところに問題があり、任意の力率と出力に対する分散型電源システムの電圧位相を求める式には問題はないことが確認された。

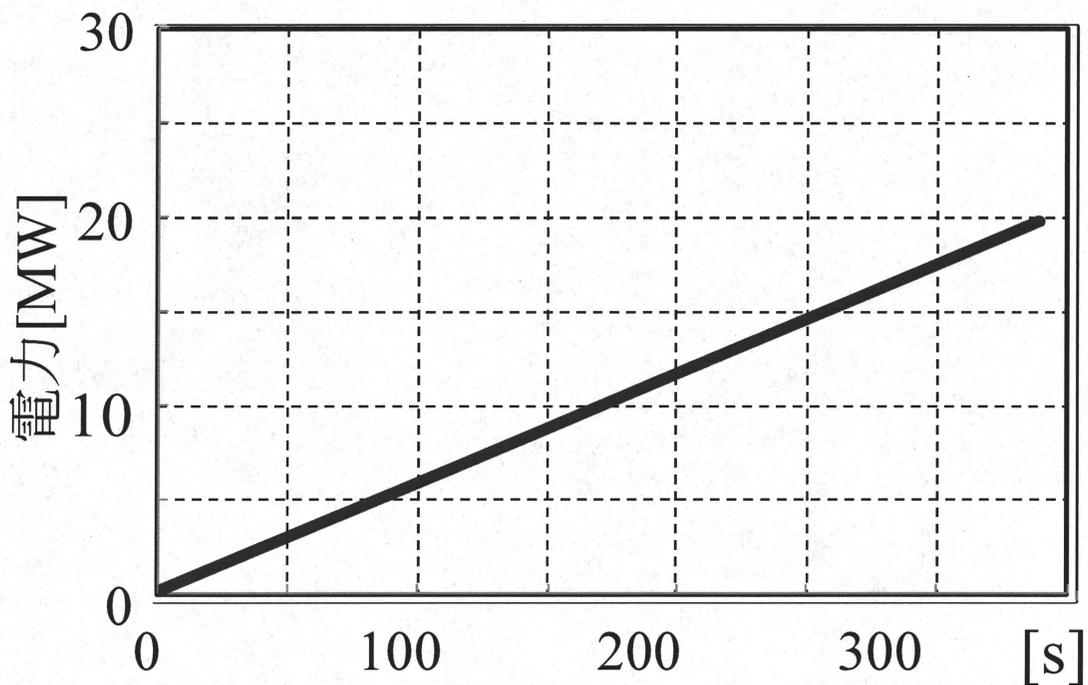


図 4.13 図 4.12 のシミュレーション結果を A^2 で割った結果

第5章 結言

本研究では、分散型電源システムの電力貯蔵装置の容量算定を目標としてきた。それに向けて、系統連系モデルを構築し、分散型電源システムが系統に与える影響について評価してきた。ここでは、評価の一つとして、負荷の電圧変動を考慮し、分散型電源システムの連系可能容量を求め定量的に評価した。すると、連系可能容量は遅れ力率、進み力率、力率の値など力率の条件によって電圧変動が異なることが分かった。そこで、任意の力率、出力に対して負荷の電圧変動を評価出来るように、回路方程式を解き求めることが出来た。これより、任意の力率、出力に対して負荷の電圧変動を評価出来るようになった。しかし、無限大母線を基準にするところで計算ミスが生じたため、再検討する必要がある。また、現在の分散型電源システム内の電力貯蔵装置の補償性能により連系可能容量は1.4倍出来ることも分かった。

今後の課題として、より正確に連系可能容量を求めるために、系統連系モデルの電源を発電機モデルに置き換え、系統周波数変動の評価、さらには、系統安定性の評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] 奥村雄一郎, 紀平裕也, 山村直紀, 石田宗秋:「フライホイール電力貯蔵装置への一次磁束制御法の適用と検証」平成21年電気学会全国大会講演論文集 No.7-006, pp.8-9, 2009-3
- [2] 紀平裕也, 山村直紀, 石田宗秋:「複合型自然エネルギー発電システムにおける協調制御の提案」:平成22年電気学会産業応用部門大会講演論文集 Vol.1, No.1-85, pp.493-494, 2010-3
- [3] 西村荘治, 蓑輪義文, 志方俊彦, 江村徳男, 竹内雅靖, 奥田誠, 北野信之, 羽田儀宏:「次数間高調波注入による単独運転検出方式と製品開発」日新電機技報 Vol.46, No.2(2001.5)
- [4] 大久保仁 著:「電力システム工学」 オーム社 新ユニバーシティ (2008)
- [5] 伊原木永二郎, 鈴木智宏, 仁井真介:「分散型エネルギーシステムを支える技術」富士時報 Vol.78 No.6 (2005)

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成におきまして、右も左もわからない拙生に対し終始丁寧にご指導いただきました三重大学 電気電子工学 教授 石田宗秋先生，同大学 電気電子工学 准教授 山村直紀先生，元同大学(現千葉大学) 准教授 残間忠直先生，文部科学技官 廣田栄毅氏に心より御礼申し上げます。

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 電気電子工学科 教授 平井淳之先生に心より御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，ともに苦労を重ねてきたエネルギーシステム研究室，制御システム研究室の皆様にも心より御礼申し上げます。

最後に何不自由なく大学生活を送らせて頂いた両親に心から感謝し，厚く御礼申し上げます。

論文目録

- [1] 鈴木一史, 山村直紀, 石田宗秋:「複合型自然エネルギー発電システムの設備容量算定に関する一考察」, 平成 22 年三重地区計測制御研究講演会講演論文集, B-01, 2010-12
- [2] 鈴木一史, 山村直紀, 石田宗秋:「マイクログリッドにおける電力貯蔵装置の容量算定に関する一考察」, パワーエレクトロニクス学会 第 186 回定例研究会, 講演予稿集-48, 2010-12
- [3] 鈴木一史, 山村直紀, 石田宗秋:「電力平準化装置を伴う分散型電源導入時の設備容量に関する一考察」, 平成 23 年度三重地区計測制御研究講演会講演論文集, PE-03, 2011-12