

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-65787

(P2009-65787A)

(43) 公開日 平成21年3月26日(2009.3.26)

(51) Int.Cl.		F I	テーマコード (参考)			
H02J	3/32	(2006.01)	H02J	3/32	3H078	
H02J	3/38	(2006.01)	H02J	3/38	G	5G066
H01M	10/44	(2006.01)	H01M	10/44	P	5H030
F03D	9/02	(2006.01)	F03D	9/02	B	

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2007-232066 (P2007-232066)  
 (22) 出願日 平成19年9月6日(2007.9.6)

(71) 出願人 504145308  
 国立大学法人 琉球大学  
 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地  
 (74) 代理人 100104341  
 弁理士 関 正治  
 (72) 発明者 千住 智信  
 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地 琉球大学工学部内  
 (72) 発明者 菊永 康朗  
 沖縄県宜野湾市宜野湾3丁目17番2号宮城アパート3号  
 Fターム(参考) 3H078 AA02 AA26 BB21 CC32  
 5G066 CA09 HA15 HB09 JB03  
 5H030 AA01 AA09 AS01 BB10 FF41

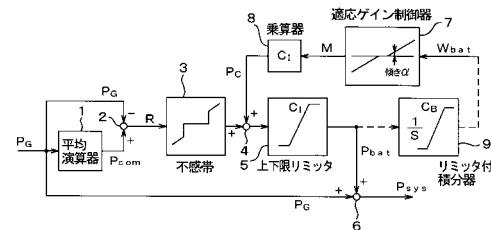
(54) 【発明の名称】 風力発電機に用いる蓄電池設備

(57) 【要約】

【課題】 風力発電機に併設され発電電力変動を平準化する、設備コストが最小となる最適容量を有する蓄電池を提供する。

【解決手段】 風力発電機と並設する蓄電池を備え、蓄電池制御器が、風力発電電力  $P_G$  とその移動平均値  $P_{com}$  との偏差  $R$  を求め、蓄電池残存容量  $W_{bat}$  の目標値との差に傾き  $\alpha$  で比例した修正係数  $M$  にインバータ容量  $C_I$  を乗じて得た修正電力値  $P_c$  を偏差  $R$  に加えて蓄電池出力指令値  $P_{bat}$  とするもので、蓄電池制御器の伝達関数モデルを使って、移動平均算定データ数  $n$ 、傾き  $\alpha$ 、不感帯幅  $D_{zone}$  を選択しては風速実測値を使った充放電シミュレーションを行って、設備コスト  $C_{cap} = C_B C_P + C_I C_W$  が最終的に最小となる蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$  を求めて蓄電池制御器を構築する。 $C_P$ 、 $C_W$  は蓄電池とインバータの容量当たりコストである。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

風力発電機と併設して電力系統に風力発電機と並列に電力供給するようにした蓄電池設備であって、蓄電池とインバータと蓄電池制御器を備え、該蓄電池制御器は、前記風力発電機の発電電力の移動平均値を算出する平均演算器と、該移動平均値から前記風力発電機の発電電力値を差し引いて偏差を求める減算器と、前記蓄電池の残存容量値に対して比例する修正係数を出力する関数発生器と、該関数発生器から入力した前記修正係数に前記インバータの容量値を乗じて修正電力値を出力する乗算器と、該修正電力値と前記偏差を加える加算器と、該加算器の出力を上下限值で制約して前記蓄電池の出力指令値として出力する出力リミッタを備え、該蓄電池出力指令値は、前記風力発電機の発電電力の移動平均値と比較して過剰な分を前記蓄電池に蓄え、不足の分を前記蓄電池から補充させるように指令することを特徴とする、風力発電機用蓄電池設備。

10

## 【請求項 2】

さらに、前記減算器と加算器の間に不感帯素子を備えて、前記偏差の絶対値が所定の値に達しない場合に前記加算器への出力がゼロになるようにすることを特徴とする請求項 1 記載の風力発電機用蓄電池設備。

## 【請求項 3】

さらに、出力指令値を積分する積分器を設け、前記蓄電池の残存容量は、前記積分器により前記蓄電池出力指令値を積分して算定することを特徴とする請求項 1 または 2 記載の風力発電機用蓄電池設備。

20

## 【請求項 4】

請求項 1 から 3 のいずれかに記載の蓄電池制御器を表す伝達関数モデルに従って、制御器パラメータである移動平均算定に使うデータ数  $n$  と関数発生器の修正係数における傾きと不感帯幅  $D$  zone の設定幅を入力し、該移動平均算定に使うデータ数  $n$  と傾きと不感帯幅  $D$  zone を前記入力した設定幅内において選択し、蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  を順次選択しては充放電シミュレーションを行って、合成出力電力  $P_{sys}$  の最大発電電力変動  $P_{max}$  と標準偏差  $\sigma$  が決められた制約条件を満たすことを前提として、設備コスト  $C_{cap} = C_B C_P + C_I C_W$  が最小となる蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  を求めて、前記選択された制御器パラメータ  $n$ 、 $\sigma$ 、 $D$  zone における最適な蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  とすることを、前記制御器パラメータ  $n$ 、 $\sigma$ 、 $D$  zone を設定された範囲内で変化させては繰り返し、該設定された範囲内で設備コスト  $C_{cap}$  が最小となる蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$  を求めて該設定範囲内で最適な蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$  とし採用し、そのときの制御器パラメータを採用して風力発電機用蓄電池設備を構築することを特徴とする風力発電機用蓄電池設備の製作方法。ここで、 $C_P$  は蓄電池の容量当たりコスト、 $C_W$  はインバータの容量当たりコストである。

30

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、電力系統に導入された風力発電機に併設して発電電力を平準化する蓄電池設備において、設備コストが最小になる最適容量を有する蓄電池を提供する方法および蓄電池設備に関する。

40

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、エネルギー資源である石油・石炭などの化石燃料の枯渇が懸念されるようになってきた。また、電力需要の増大による  $CO_2$  排出量の増加や森林破壊による  $CO_2$  吸収源の減少などにより、大気中の  $CO_2$  濃度が増加し地球温暖化が進行している。このような背景から、風力エネルギーを利用した風力発電システムが欧米を中心に世界各国で注目を集めている。風力発電システムは無尽蔵な自然エネルギーを活用するもので、 $CO_2$  を排出しないクリーンな発電設備であるため、日本においても、風力発電の総設備容量は今後増加すると考えられる。

50

## 【0003】

風力発電機の出力電力は風速の3乗に比例するため、風速の変化に従い激しく変動する。このため、電力系統に導入する風力発電システムの容量が大きい程、風力発電機の発電電力変動によって系統電圧変動や系統周波数変動が生じることになり電力品質が悪化しやすい。

このため、電力系統に風力発電機を導入するときには、発電電力変動を許容範囲まで平準化する必要がある。特に、大規模風力発電システムを電力系統に導入するためには、何らかの対策が求められる。風力発電機に蓄電池を併設して風力発電電力を平準化することは従来からよく行われている。風力発電システムに蓄電池を附属させることにより、風力発電の発電電力変動を平準化し、電力系統に与える影響を抑制することができる。蓄電池の利用により、風力発電システムの短周期から長周期までの発電電力変動が補償できる。

## 【0004】

しかし、蓄電池を附属させるときには、設備コストが増加する上、蓄電池特性が経時により劣化するため維持費も必要になる。

蓄電池の設備コストや維持費用は蓄電池の充放電特性により左右され、充放電特性は蓄電池の制御器の特性によって決まる。

風力発電機に併設される蓄電池は、発電電力変動の平準化を目的とするもので容量が大きいほど効果があるが、設備コストの観点からはできるだけ小容量の蓄電池を導入することが好ましい。

従来は、蓄電池の充放電による平準化効果を評価する方法は知られているが、蓄電池の制御器特性や蓄電池コストの評価方法について開示する文献は見当たらない。

## 【0005】

たとえば、特許文献1は、蓄電池を使った風力発電出力安定化方法を開示するが、コンバータとインバータを介して蓄電池を電力線に接続し、風力発電機の発生電力の微小単位時間における移動平均値を求めて、発生電力が移動平均値より大きいときに超過分を蓄電池に蓄え、不足があるときには不足分を蓄電池から電力線に給電するものであって、蓄電池の容量を最適化する思想は含まれていない。

なお、特許文献2には、太陽電池に蓄電池を組み合わせたシステムの蓄電池容量を決定する方法が開示されている。この開示方法は、太陽電池の容量と価格および蓄電池の容量と価格をパラメータとして、全天日射量の測定データを使ってシミュレーションを行って得たメリットを表した経済性評価図を作成して、これから最も経済的な太陽電池と蓄電池の組合せを決定するものである。

特許文献2に開示された方法は、太陽電池システムを対象とするものであるから、瞬時の発生電力が激しく変動する風力発電に適用することはできない。

【特許文献1】特開平11-299106号公報

【特許文献2】特開2004-032989号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

そこで、本発明が解決しようとする課題は、風力発電機に併設され充放電により発電電力変動を平準化する蓄電池において、設備コストが最小となる最適容量を有する蓄電池を提供することである。

【課題を解決するための手段】

## 【0007】

上記課題を解決するため、本発明の風力発電機に用いる蓄電池設備は、蓄電池とインバータと蓄電池制御器を備えて、風力発電機と並列に系統に電力供給するものである。蓄電池制御器は、風力発電機の発電電力の移動平均値を算出する平均演算器と、移動平均値から風力発電機の発電電力値を差し引いて偏差を求める減算器と、蓄電池残存容量値に対して比例する修正係数を出力する実質的には関数発生器ともいえる適応ゲイン制御器と、適応ゲイン制御器から入力した修正係数にインバータの容量値を乗じて修正電力値を出力す

10

20

30

40

50

る乗算器と、偏差と修正電力値を加える加算器と、加算器の出力を上下限值で制約して蓄電池の出力指令値として出力する出力リミッタを備える。

【0008】

蓄電池出力指令値は、風力発電機の発電電力の移動平均値と比較して過剰な分を蓄電池に蓄え、不足の分を蓄電池から補充させるように指令するので、系統に供給される電力は移動平均値に平準化されて、激しい電力変動を示さない。

また、蓄電池残存容量が目標とする50%から大きく隔たると、蓄電池の出力指令値に大きな修正量が作用するので、蓄電池残量は常時目標値近傍に存在するように管理される。

【0009】

出力リミッタの上下限値は、インバータ容量に関連して決定される。

蓄電池の残存容量は、積分器により、蓄電池出力指令値を積分して算定するようにしてもよい。

さらに、減算器と加算器の間に、不感帯素子を備えて、偏差の絶対値が所定の値に達しない場合に加算器への出力がゼロになるようにしてもよい。

【0010】

本発明の蓄電池制御器モデルを使って、移動平均算定に使うデータ数  $n$ 、適応ゲイン制御器の修正係数における傾き  $\alpha$ 、不感帯幅  $Dzone$  を設定し、充放電シミュレーションを行って、最大発電電力変動  $P_{max}$ 、合成出力電力変動  $P_{sys}$  の標準偏差  $\sigma$  が決められた条件を満たすことを前提として、設備コスト  $C_{cap} = C_B C_P + C_I C_W$  が最小となる蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$  を求める。ここで、 $C_P$  は蓄電池の容量当たりコスト、 $C_W$  はインバータの容量当たりコストである。

制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $Dzone$  を設定された範囲内で変化させることにより、範囲内で設備コスト  $C_{cap}$  が最小となる蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$  とそのときの制御器パラメータを求めると、これらの値が最適解となる。

【0011】

本発明では、風力発電機に充放電により風力発電電力変動を平準化する蓄電池を併設した上記システムにおいて、実地に得た風速観測データに基づいたシミュレーションにより蓄電池の設備コストが最小になる最適容量を算定することができる。蓄電池の最適容量は、蓄電池制御器のパラメータを大きな間隔で網羅的に変化させた条件の下で実地観測データを使ってシミュレートし、さらに設備コストを最小にする蓄電池容量とインバータ容量を局所的なシミュレートにより探索して得る。

【発明の効果】

【0012】

風力発電機が出力する発電電力は風速の変化により激しく変動する。蓄電池を併設することによりこの発電電力変動を平準化することができるが、蓄電池容量、インバータ容量によって平準化効果が変化する。また、蓄電池の充放電動作は蓄電池の制御器パラメータによって大きな影響を受ける。

本発明の風力発電機に用いる蓄電池設備は、発電電力変動の許容値まで平準化することを制約条件として、合成出力電力変動が制約条件を満たすと共に設備コストが最小となる最適な蓄電池容量、インバータ容量および蓄電池の制御器パラメータを備えるようにすることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

以下、図面を用い実施例に基づいて本発明を詳細に説明する。

図1は本実施例に係る風力発電機に用いる蓄電池設備の蓄電池制御器のブロック図、図2は風力発電機に用いる蓄電池設備の結線図、図3は蓄電池制御器に用いる適応ゲイン制御器の特性を示すグラフ、図4は1年間にわたる実測風速データを示すグラフ、図5は地表状態と修正係数の対応を示す表、図6は風力発電機の運転特性を表すグラフ、図7は実測風速データから算出した1年間にわたる発電電力変動を示すグラフ、図8は蓄電池とイ

10

20

30

40

50

ンバータの容量と平準化効果の関係を確認する手順を表すフロー図、図9は充放電シミュレーションにより得られた合成出力電力の標準偏差  $\sigma$  をインバータ容量  $C_i$  と蓄電池容量  $C_b$  の座標上に描いたグラフ、図10は充放電シミュレーションにより得られた合成出力電力の最大出力変動量  $P_{max}$  をインバータ容量  $C_i$  と蓄電池容量  $C_b$  の座標上に描いたグラフ、図11は図4をもとに算出した大容量蓄電池で平準化した風力発電機の1年間の合成出力電力変動を表すグラフ、図12は蓄電池とインバータの最適容量と最適な蓄電池制御パラメータをシミュレーションにより決定する手順を表すフロー図、図13は図12のシミュレーションにおけるインバータ容量  $C_i$  と蓄電池容量  $C_b$  の最適値を探索する手法を説明する図面、図14は最適解を求めるシミュレーションにおけるパラメータ設定値を示す表、図15はシミュレーション結果を示す表、図16から図19はそれぞれ第1ケースから第4ケースの最適解を適用した蓄電池システムで制御したときの合成出力電力の変動量を示す図面である。

10

#### 【0014】

本実施例の風力発電機に用いる蓄電池設備は、図2に示すように、風力発電機11にインバータ13を介して蓄電池12が並列に接続されて、風力発電機11の発電出力  $P_g$  と蓄電池12の入出力電力  $P_{bat}$  の和である合成出力電力  $P_{sys}$  を電力需要部に接続された電力系統14に供給するシステムである。

蓄電池12は、発電出力  $P_g$  が基準値を超えるときは蓄電池12に受け入れて蓄積し、基準値に足りないときは蓄電池12から不足分を補うことによって風力発電機11の出力変動を平準化するものである。

20

蓄電池12により発電出力  $P_g$  を平準化する機能は、図1のブロック図で示す蓄電池の制御器で生成される蓄電池出力電力指令値  $P_{bat}$  により達成される。

#### 【0015】

蓄電池制御器は、風力発電機11の発電電力  $P_g$  について過去の連続する所定数  $n$  個の移動平均値  $P_{com}$  を算出する平均演算器1と、移動平均値  $P_{com}$  から風力発電機11の発電電力値  $P_g$  を差し引いて偏差  $R$  を求める減算器2と、蓄電池残存容量値  $W_{bat}$  に傾き  $k$  で比例する係数を修正係数  $M$  として出力する適応ゲイン制御器7と、適応ゲイン制御器7から入力した修正係数  $M$  にインバータ13の容量値  $C_i$  を乗じて修正電力値  $P_c$  として出力する乗算器8と、偏差  $R$  と修正電力値  $P_c$  を加える加算器4と、加算器4の出力を上下限值で制約して蓄電池の出力指令値  $P_{bat}$  として出力する出力リミッタ5を備える。

30

#### 【0016】

出力リミッタ5から供給される蓄電池出力指令値  $P_{bat}$  は、正のときは蓄電池12からの電力出力を指令し、負のときは蓄電池12への電力入力を指令するもので、出力リミッタ5の上下限値はインバータ13の容量値  $C_i$  以下の値が使われる。

蓄電池出力指令値  $P_{bat}$  は、風力発電機11の発電電力の移動平均値  $P_{com}$  と比較して過剰な分を蓄電池12に蓄え、不足の分を蓄電池12から補充させるように指令するので、系統14に供給される電力は移動平均値  $P_{com}$  に平準化されて、激しい電力変動を示さない。

#### 【0017】

また、適応ゲイン制御器7は蓄電池充電率  $Ch = W_{bat} / C_b$  を所定の値に維持するために適当なゲインを指定するもので、蓄電池充電率  $Ch$  を入力して修正率  $M$  を出力する関数発生器である。図3は適応ゲイン制御器7の機能を例示する図である。例示した機能は蓄電池充電率  $Ch$  を50%付近に維持させるもので、蓄電池の放電時には蓄電池充電率  $Ch$  が55%を超えたときに修正値  $M$  を出力し、 $Ch$  が55%より大きくなると修正値  $M$  は  $Ch$  の増加量に対して傾き  $k$  で増加させる。同様に、蓄電池の充電時には  $Ch$  が45%より低下したときに修正値  $M$  を出力し、 $Ch$  がさらに減少すると  $Ch$  の減少量に対して傾き  $k$  で修正値  $M$  を減少させる。

40

#### 【0018】

したがって、蓄電池残存容量  $W_{bat}$  が目標とする値、たとえば蓄電池容量の50%から大きく隔たると、蓄電池の出力指令値  $P_{bat}$  に大きな修正量  $P_c$  が作用することになる。

50

このように、蓄電池残存容量  $W_{bat}$  が増加すると放電量  $P_{bat}$  が増加し、蓄電池残存容量  $W_{bat}$  が減少すると充電量  $P_{bat}$  が増える傾向が生じ、蓄電池残存容量  $W_{bat}$  は常時目標値近傍に収まるように管理される。

しかし、傾き  $\alpha$  の設定を大きくすると、蓄電池 1 2 の出力電力変動が大きくなり、発電電力変動の平準化に悪影響を与える。

このためシステム設計上、 $M$  を適当に設定する必要がある。

#### 【0019】

また、出力リミッタ 5 の上下限値は、インバータ 1 3 の容量に関連して決定される。

蓄電池 1 2 の残存容量  $W_{bat}$  は適宜な測定器から得られる実測値を使うことができるが、積分器 9 を用いて蓄電池出力指令値  $P_{bat}$  を積分して算定するようにしてもよい。なお、積分器 9 には、蓄電池容量の上下限値に対応する上下限リミッタを附属させることが好ましい。

10

#### 【0020】

さらに、減算器 2 と加算器 4 の間に不感帯素子 3 を備えて、偏差  $R$  の絶対値が所定の不感帯幅  $D_{zone}$  より小さい場合に加算器 4 への出力がゼロになるようにしてもよい。

不感帯素子 3 は、風力発電機 1 1 の発電電力  $P_G$  と移動平均値  $P_{com}$  の偏差  $R$  の絶対値が不感帯幅  $D_{zone}$  より大きいときに偏差  $R$  を出力する。したがって、大きな発電出力変動が発生したときのみ蓄電池 1 2 の充放電を行うことになるので、不感帯素子 3 を導入することにより充放電回数を抑制して蓄電池 1 2 の寿命を延長させることができる。

ただし、電力系統 1 4 に供給される合成出力電力  $P_{sys}$  は、風力発電機 1 1 の発電出力  $P_G$  と蓄電池 1 2 の入出力電力  $P_{bat}$  の和であるため、不感帯幅  $D_{zone}$  より絶対値が小さい変動が電力系統 1 4 に供給されて外乱となる。この外乱は不感帯幅  $D_{zone}$  を小さくすれば抑制することができる。したがって、不感帯幅  $D_{zone}$  の大きさを適当に設定する必要がある。

20

#### 【0021】

本実施例の風力発電機に用いる蓄電池設備において、風力発電機設置予定地において予め取得した風速データを用いたシミュレーションにより、適度な平準化効果を有し設備コストが最小となる最適な蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$ 、制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$  を選択することができる。

最適値を決定するためのシミュレーションは、本実施例の蓄電池制御器モデルを使って、移動平均算定に使うデータ数  $n$ 、適応ゲイン制御器の修正係数  $M$  における傾き  $\alpha$ 、不感帯幅  $D_{zone}$  を設定し、風速の実地データを用いて充放電シミュレーションを行う。

30

#### 【0022】

充放電シミュレーションの結果から、合成出力電力  $P_{sys}$  の最大電力変動  $\Delta P_{max}$  と標準偏差  $\sigma_x$  が予め決められた条件を満たすことを前提として、設備コスト  $C_{cap} = C_B C_p + C_I C_w$  が極小となる蓄電池の  $kWh$  容量  $C_B$ 、インバータの  $kW$  容量  $C_I$  を求める。なお、 $C_p$  は蓄電池の容量  $kWh$  当たりのコスト、 $C_w$  はインバータの容量  $kW$  当たりのコストであり、蓄電池やインバータの形式により異なる。

充放電シミュレーションは、制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$  を設定された範囲内で変化させて行い、その設定範囲内で設備コスト  $C_{cap}$  が最小となる蓄電池容量  $C_B$ 、インバータ容量  $C_I$  とそのときの制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$  を求めると、これらの値が最適解となるので、得られた値を用いたシステムを構築すれば、設備コストが最小の風力発電変動を平準化する蓄電池設備を得ることができる。

40

#### 【0023】

以下に、本実施例において、風力発電機に充放電により風力発電電力変動を平準化する蓄電池を併設した上記システムにおいて、実地に得た風速観測データに基づいて蓄電池の設備コストが最小になる最適容量を算定するシミュレーションの例を説明する。

シミュレーションは、図1の蓄電池制御器のブロック図において、発電出力  $P_G$  について風速の実測値から算定した風力発電機の発電出力値を相当させて行う。

#### 【0024】

50

## (風速の実測と補正)

本実施例の実証試験には、琉球大学工学部2号館屋上で測定した風速データを用いた。測定は、2005年11月から2006年10月までの約1年間行い、10分間平均風速のデータを収集した。

図4は上記実測した1年間にわたる風速データを示すグラフである。

当該風速データについての観測日数は357日、1年間の平均風速は3.58 m/sであった。

## 【0025】

風速の実測データから発電電力を算出するには、風力発電機の地上高と観測点の地上高が異なるため、補正を行う必要がある。補正は下式を用いて行った。

$$V_z = V_h (z/h)^{1/N} \quad (1)$$

ここで、 $V_z$ は風力発電機のハブ高さにおける風速、 $V_h$ は観測地点における風速、 $z$ はハブ高さ、 $h$ は観測地点高さ、 $N$ は補正係数である。

補正係数 $N$ は図5の表に示される通り、風力発電機を設置する場所の地表状態に基づいて決まる係数で、本実施例では $N=2$ を採用した。

なお、気象観測機を設置した地上高は21.2 m、想定した風力発電機のハブ高さは60 mである。

## 【0026】

## (風力発電機の運転特性)

風力発電機の発電電力 $P_w$ は風速 $V$ に対して3乗特性を持ち、下式で表される。

$$P_w = \rho A V^3 C_p / 2 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $A$ は受風面積、 $C_p$ は発電効率である。

本実施例で使用する風力発電機は定格出力1 MWで、受風面積 $A$ は2,980 m<sup>2</sup>、発電効率 $C_p$ は機械的損失も考慮すると40%である。また、空気密度 $\rho$ は日本の平地における年平均値である1.225 kg/m<sup>3</sup>とした。風速 $V$ はハブ高さにおける風速を使う。

ただし、風力発電機は、ごく低速の2.5 m/s以下の領域では出力を出さず、所定の風速たとえば12 m/sを超える高速領域では定格値で出力が飽和し、さらにたとえば25 m/s以上の風速領域では安全のため出力を遮断するようになっている。風力発電機の運転特性は、図6に示す通りになる。

## 【0027】

## (1年間の発電電力変動)

図7は、上記1年間にわたる風速データに基づいて算定した1年間の発電電力変動を示すグラフである。発電電力変動は、10分間平均風速データから得られた発電電力の差分から計算した。

風速データから算出された発電電力変動の標準偏差は63.4 kW、発電電力の最大変動幅は981.2 kWであった。

発電電力変動が正規分布に従うとすると、±100 kWの変動範囲に88.53%の変動データが含まれることになる。

## 【0028】

## (蓄電池設備の平準化効果)

平均演算器1は、発電電力 $P_G$ の移動平均値 $P_{com}$ を算出して平準化の目標値とする。移動平均値 $P_{com}$ は、風力発電機の過去の発電電力平均値から下式を用いて算出する。

$$P_{com} = (P_t + P_{t-1} + P_{t-2} + \dots + P_{t-(n-1)}) / n \quad (3)$$

ここで、 $P_i$ は時間 $i$ における発電電力平均値、 $n$ は移動平均をとる窓の幅を示す整数である。

移動平均窓の幅 $n$ を大きくすると、移動平均値 $P_{com}$ の変動が小さくなり、平準化効果が大きくなるが、蓄電池充電率の変動は大きい。逆に $n$ を小さくすると蓄電池充電率の変動は小さいが平準化効果も小さくなる。

## 【0029】

## (蓄電池容量およびインバータ容量と平準化効果)

10

20

30

40

50

平準化効果は、最大発電電力変動  $P_{max}$ の最大値と合成出力電力変動  $P_{sys}$ の標準偏差  $\sigma$ の大きさで評価することができる。最大発電電力変動  $P_{max}$ は、平準化期間  $T$ 内における合成出力電力  $P_{sys}$ の最大値と最小値の差の最大値である。なお、シミュレーションにおいては、電力系統 14 に供給される合成出力電力  $P_{sys}$ は、出力部に設けた加算器 6 によって、風力発電機 11 の発電出力  $P_G$ と蓄電池 12 の入出力電力  $P_{bat}$ の和を求めることにより生成することができる。

標準偏差  $\sigma$ は、合成出力電力  $P_{sys}$ 同士の差分から算出した合成出力電力変動に下式を適用して求める。

$$\sigma^2 = n / (n - 1) * \sum_{j=1}^n (x_j - \mu)^2 \quad (4)$$

ここで、 $\mu$  は平均値である。

#### 【0030】

図 8 は、蓄電池とインバータの容量と平準化効果の関係を確認する手順を表すフロー図である。

初めに、蓄電池制御パラメータを設定する (Step 1)。蓄電池制御パラメータは、平均演算器 1 において発電電力の移動平均値を求めるときの窓の幅  $n$ 、適応ゲイン制御器 7 における修正係数の傾き  $\alpha$ 、不感帯素子 3 における不感帯幅  $D_{zone}$ 、変動状態を評価する平準化期間  $T$  である。

次に、蓄電池の容量  $C_B$  を設定する (Step 2)。また、インバータの容量  $C_I$  を設定する (Step 3)。

#### 【0031】

1年分の充放電シミュレーションを行って合成出力  $P_{sys}$ を算出し、得られた  $P_{sys}$ から  $P_{max}$ と  $\sigma$ を算出する (Step 4)。

次のインバータ容量  $C_I$  を選択し (Step 5)、ステップ 3 に進む。

そのときの蓄電池容量  $C_B$  について予定したインバータ容量  $C_I$  の全てを処理したら、次の蓄電池容量  $C_B$  を選択し (Step 6)、ステップ 2 に進む。

予定した蓄電池容量  $C_B$  の全てについて処理できたら、最適な蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  を決定して (Step 7)、処理を終了する。

#### 【0032】

図 9 と 10 は、こうして得られた  $\sigma$  と  $P_{max}$  を蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  の面上にプロットした図面である。

このとき、蓄電池制御パラメータは、 $n = 40 \text{ min}$ 、 $\alpha = 0.0002 \text{ pu}$ 、 $D_{zone} = 0 \text{ kW}$ 、 $T = 10 \text{ min}$  とした。

図から、合成出力電力の最大変動量  $P_{max}$  と標準偏差  $\sigma$  はいずれも、蓄電池容量とインバータ容量を増加するにしたがって減少することが分かる。インバータ容量が増大すると指令値により忠実に従った充放電ができるので、平準化が容易になる。また、蓄電池容量が増大すると、大きな変動が生じたときにも電力変動分を吸収することができるため平準化が容易になる。

しかし、蓄電池容量が  $500 \text{ kWh}$  を超えると  $P_{max}$  が減少しなくなり、これ以上の容量増加は平準化に貢献しないことから、蓄電池やインバータの容量に最適値があることが分かる。

#### 【0033】

(大容量の蓄電池とインバータにより平準化した合成出力電力変動)

図 11 は、設備コストを考慮せず、大容量の蓄電池と大容量のインバータを用いて風力発電機の出力を平準化したときの合成出力電力変化を示すグラフである。

図 11 は、1 MW 容量の風力発電機に容量  $C_I = 600 \text{ kW}$  のインバータを介して容量  $C_B = 500 \text{ kWh}$  の蓄電池を並列接続した装置を、図 4 に表された 1 年間の実測風力変動下で稼働させて発電電力を平準化するシミュレーションを行って得られた合成出力変動  $P_{sys}$  の状況を表す。

蓄電池制御パラメータは、 $n = 40 \text{ min}$ 、 $\alpha = 0.0002 \text{ pu}$ 、 $D_{zone} = 0 \text{ kW}$ 、 $T = 10 \text{ min}$  とした。

10

20

30

40

50



シミュレーションの結果は、最大発電電力変動  $P_{max} = 374 \text{ kW}$ 、合成出力電力変動の標準偏差  $\sigma = 21.43 \text{ kW}$ であった。すなわち、図7に表された風力発電機の発電電力変動が高度に平準化されて、合成出力では1年間を通して最大 $\pm 374 \text{ kW}$ の変動しか発生しないことが確認された。

#### 【0034】

(蓄電池設備の最適容量算定基準)

風力発電機の発電電力変動を平準化する本実施例の蓄電池システムでは、蓄電池の制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ の値により充放電結果が異なり、蓄電池等の容量の最適値も異なる。

そこで、発電電力変動を要求される水準まで平準化し、かつ設備コストが最小になるように蓄電池設備とインバータの容量を最適化する。このとき、蓄電池の制御器パラメータも最適値を使う必要がある。

#### 【0035】

シミュレーション結果を評価して最適な容量値を得るため、目的関数と制約条件を明定する。

$$\text{目的関数：} \min C_{cap} = C_B C_P + C_I C_W \quad (5)$$

$$\text{制約条件：} P_{dmax} \leq P_{max}, \quad d \leq \sigma \quad (6)$$

すなわち、制御器パラメータや蓄電池容量等は、合成出力電力  $P_{sys}$ の最大電力変動  $P_{max}$ が管理目標とする変動幅  $P_{dmax}$ 以下であり、かつ合成出力電力  $P_{sys}$ の標準偏差  $\sigma$ が目標とする値  $d$ 以下であるという条件を満たすことを前提として、蓄電池システムの設備コスト  $C_{cap}$ を最小にすることを目的とする。

#### 【0036】

(最適容量と制御器パラメータの決定手順)

図12は、蓄電池とインバータの最適な容量と最適な蓄電池制御パラメータをシミュレーションにより決定する手順を表すフロー図である。

初めに、発電電力変動の許容条件として、合成出力電力  $P_{sys}$ の管理目標とする電力変動幅  $P_{dmax}[\text{kW}]$ 、電力変動の変動許容範囲 $\pm P_{dev}[\text{kW}]$ および許容範囲に含まれる確率  $g(P_{dev})[\%]$ 、平準化期間  $T[\text{min}]$ を設定する(Step1)。合成出力電力変動  $P_{sys}$ は正規分布すると想定する。 $P_{sys}$ は $\pm P_{dev}$ の範囲に  $g(P_{dev})$ 以上含まれることが要求される。

#### 【0037】

さらに、評価指標の制約値を算出する(Step2)。蓄電池等の容量を算定する上で、合成出力電力  $P_{sys}$ の制約条件は、(6)式に示す通り、最大電力変動  $P_{max}$ の管理目標とする変動幅  $P_{dmax}$ と標準偏差  $\sigma$ の管理目標値  $d$ である。

変動幅  $P_{dmax}$ はステップ1で与えられる。また、標準偏差の管理目標値  $d$ は、電力変動の確率  $g(P_{dev})[\%]$ と変動許容範囲 $\pm P_{dev}[\text{kW}]$ に基づいて、最も妥当な標準偏差値を算定して使用する。

#### 【0038】

次に、制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ を設定する(Step3)。これら制御器パラメータが変化すると、蓄電池の充放電状況が変化し、蓄電池やインバータの最適容量も変化する。そこで、図12の最適値決定手順では、制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ を順次変化させて、真の最適容量値を見出すようにしている。

#### 【0039】

これらの準備を整えてから、充放電シミュレーションを行う(Step4)。シミュレーションは、図1に表した蓄電池制御器システムにおいて蓄電池容量  $C_B$ とインバータ容量  $C_I$ を順次選択しては、1年間の風速パラメータから形成された1年間の風力発電電力変動データを入力させることにより行われる。

シミュレーションにより、電力系統14に供給される合成出力電力  $P_{sys}$ の想定データが取得できるので、このデータから最大電力変動  $P_{max}$ と標準偏差  $\sigma$ を算定して(6)式の制約条件を満たすことを確認する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 0 】

さらに、(5)式の目的関数に表されるように、設備コストが最小となる蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  を探索する。

蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  の最適値探索は、図 1 3 に示すように、蓄電池容量  $C_B$  とインバータ容量  $C_I$  をプロットする平面に粗い格子目を描き格子の交点を測定点に取り、それら測定点が示す容量値をブロック図の要素に代入してシミュレーションし、 $P_{max}$  と  $x$  を求める。

## 【 0 0 4 1 】

目標関数の極値がありそうな格子目を検出したときに、その格子目の中にさらに細かい格子目を形成してその細かい格子目の交点が表す測定点  $C_B$ 、 $C_I$  について精査して  $\min P_{con}$  になる  $C_B$ 、 $C_I$  の組合せを探索する。このような探索法を 2 段重ねて実行すると、さらに少ないシミュレーションで効率的にピーク解を検出することができる。

なお、設備コストが最小となる上位 3 個の解をそれぞれ細かく詮索することにより局所解に収束しないようにして真の最適解を見落とすことを防止しながら、与えられた制御器パラメータについての最適容量解を決定する。

## 【 0 0 4 2 】

予定の終了回数に達していないときは、設定した制御器パラメータにおける最適容量を評価し、ステップ 3 に戻って新しい制御器パラメータをセットしてステップ 4 の工程を繰り返す (Step 5)。また、終了回数に達したときは、それまでのシミュレーションの結果として最適な蓄電池容量とインバータ容量、およびそのときの制御器パラメータを決定して (Step 6)、演算処理を終了する。

## 【 0 0 4 3 】

こうして求めた蓄電池容量値、インバータ容量値、制御器パラメータ値などを実現した蓄電池設備を備えることによって、蓄電池システムは目標とする合成出力の平準化を達成するものであって設備コストが最も小さいシステムとなる。

## 【 0 0 4 4 】

(最適容量、最適パラメータの決定例)

出力 1 MW の風力発電機に併設する蓄電池として Na S 電池を使った蓄電池システムについて、管理目標とする最大電力変動  $P_{max}$  の変動幅  $P_{dmax}$  [kW]、電力変動の変動許容範囲  $\pm P_{dev}$  [kW] とこの範囲に含まれる確率  $g(P_{dev})$  [%]、および平準化期間  $T$  [min] とが異なる 4 個のケースを対象として、本実施例の手順によりシミュレーションを使って容量最適値と制御器パラメータ最適値を求めた。

なお、Na S 電池の kWh 当たりコストを 700 \$、インバータの kW 当たりコストを 1500 \$ と想定した。

## 【 0 0 4 5 】

図 1 4 は、4 個のケースについてこれらシミュレーションパラメータの設定値を示す表である。

ケース 1 では、 $P_{dmax}$  を 400 kW、 $g(P_{dev})$  を 99.95%、 $P_{dev}$  を 100 kW、 $T$  を 10 min とし、ケース 2 ~ 4 はケース 1 と比較して 1 項目ずつ設定値を変えたものである。ケース 2 は  $P_{dmax}$  を 100 kW 減らした場合、ケース 3 は  $P_{dev}$  を 30 kW 減らした場合、ケース 4 は  $T$  を 10 min 増やした場合である。

## 【 0 0 4 6 】

図 1 5 は、シミュレーションにより得られた最適解を示す表で、ケース毎に、最適な制御器パラメータ  $n$ 、 $\sigma$ 、 $D_{zone}$ 、合成出力電力  $P_{sys}$  の標準偏差  $\sigma_x$ 、最大発電電力変動  $P_{max}$ 、最適インバータ容量  $C_I$ 、最適蓄電池容量  $C_B$ 、設備コスト  $C_{cap}$  を示す。

## 【 0 0 4 7 】

(ケース 1 の特性)

ケース 1 の容量最適化においては、発電出力の移動平均値をとるサンプル期間  $n$  を増加させると、設備コスト  $C_{cap}$  が増加した。蓄電池残存容量の変動が大きくなり、満放電、満充電時は発電電力変動を平準化できないため、 $P_{max}$  が増大した。不感帯幅  $D_{zone} < 10$

kW以下では、 $n$ を小さくしても不感帯幅以内の発電電力変動が  $P_{sys}$ に現れて  $x$ が増加し制約条件を満たせないため、解が得られなかった。

ケース1の最適値は、蓄電池最適容量が274kWh、インバータ最適容量が580kW、このときの制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ はそれぞれ、3、0.0004 pu、10kWであり、設備コストは\$1,061,800になった。

#### 【0048】

(ケース2の特性)

ケース2は、最大発電電力変動  $P_{max}$ の許容幅を400kWから300kWに減らしたものである。 $n$ を3以下にすると、 $P_{max}$ を300kW以下にするという制約条件を満たすことができず、最適解が得られなかった。

ケース2の最適値は、蓄電池最適容量が451kWh、インバータ最適容量が675kW、このときの制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ はそれぞれ、4、0.0002 pu、0kW、設備コストは\$1,328,200になった。

出力変動幅を抑制しようとしたためケース1と比較するとインバータ容量、蓄電池容量が大きく、設備コストも大きい。ケース1のシミュレーション結果によると、 $P_{max}$ が300kW以上になるのは、年間数回しかないので、大きな設備コストに見合うメリットはないと評価される。

#### 【0049】

(ケース3の特性)

ケース3は、合成出力電力の99.95%統計的変動範囲  $P_{dev}$ を100kWから70kWに狭くしたものである。発電電力変動の確率的な分布を小さくするためには十分な蓄電池容量が必要になるので、設備コストも増大した。また  $n$ を5以上にしないと解が得られなくなる。また、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ は十分小さな値にしなければ、設備コストが増大して最適解が得られないことがある。

ケース3の最適値は、蓄電池最適容量が501kWh、インバータ最適容量が574kW、このときの制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ はそれぞれ、5、0.0001 pu、0kW、設備コストは\$1,211,700になった。

ケース1と比較すると平準化効果は大きい。しかし、設備コストを抑制するためには、発電電力変動が小さい地域に立地するなどの工夫が必要である。

#### 【0050】

(ケース4の特性)

ケース4では、20分間の変動を平準化させる制約条件の下で最適化を行っている。平準化期間を長く設定すると発電電力変動が大きくなるので、変動を抑制する蓄電池容量が増大し、設備コストが増大した。

ケース4の最適値は、蓄電池最適容量が720kWh、インバータ最適容量が601kW、このときの制御器パラメータ  $n$ 、 $\alpha$ 、 $D_{zone}$ はそれぞれ、3、0.0008 pu、0kW、設備コストは\$1,384,500になった。

全てのケースの中で設備コストが最も大きかった。平準化期間を長くすると蓄電池容量を増大する必要が出てくるので、風車のピッチ角制御や電力系統との協調制御などにより蓄電池の負担を低減させることが好ましい。

#### 【0051】

(最適値を適用したときの風力発電機の運転成績)

図16~19は、風力発電機に併設した本実施例による蓄電池設備に上記ケース毎に算定された最適容量、そのときの制御器パラメータを適用し、通年の風速実測データから得られた図7の発電電力変動データを入力して求めた発電電力変動平準化効果を示す図面である。図は、風力発電機と蓄電池設備の合成出力  $P_{sys}$ の差分から算定した合成出力変動  $P_{sys}$ の1年にわたる変動状態を示す。

#### 【0052】

いずれのケースにおいても、図7に示した風力発電機出力における変動を抑制して顕著な平準化効果を示している。

ケース 1 は、適度な平準化効果を有し、設備コストはケース中最小である。

ケース 2 では、ケース 1 と比較して合成出力電力  $P_{sys}$  の変動幅が小さい。しかし、設備コストが大きく、大きな変動が年に数回程度しか生じないので、設備が過重であると判定することができる。

ケース 3 は設備コストがケース 1 とケース 2 の中間になるが、ケース 2 並の平準化効果を呈している。

さらにケース 4 では、最もよく出力変動が抑制されるが、設備容量が最も大きく設備コストも最大になる。

#### 【 0 0 5 3 】

本発明の蓄電池設備は、風力発電機の発電電力について所定期間に係る移動平均値との偏差を蓄電池制御装置に設定値として与えるので、電力系統への合成出力電力を移動平均値に近づくように平準化させる作用効果を有する。設定値を算定するとき、蓄電池容量の上下限値を考慮し、蓄電池残存容量を目標のレベルに収束するような修正値を算出して設定値を修正しながら出力する。

さらに、本発明の方法に基づいて、風速の実測データを用いて風力発電機出力に換算した発電電力データを使って、シミュレーションにより所定の条件下で設備コストが最小で最適な蓄電池容量やインバータ容量、およびそのときの制御器パラメータを探索し、実機に設定することができる。

したがって、本発明により、電力系統に出力する合成出力を十分平準化するものであって、最小の設備コストの蓄電池設備を得ることができる。

#### 【 図面の簡単な説明 】

#### 【 0 0 5 4 】

【 図 1 】本発明の 1 実施例に係る風力発電機に用いる蓄電池設備の蓄電池制御器のブロック図である。

【 図 2 】本実施例における風力発電機に用いる蓄電池設備の結線図である。

【 図 3 】本実施例における蓄電池制御器に用いる適応ゲイン制御器の特性を示すグラフである。

【 図 4 】1 年間にわたる実測風速データを示すグラフである。

【 図 5 】本実施例に使う補助係数と地表状態の対応を示す表である。

【 図 6 】本実施例に使う風力発電機の運転特性を表すグラフである。

【 図 7 】図 4 をもとに算出した定格容量 1 MW の風力発電機の 1 年間の発電電力変動を表すグラフである。

【 図 8 】本実施例における蓄電池とインバータの容量と平準化効果の関係を確認する手順を表すフロー図である。

【 図 9 】本実施例の充放電シミュレーションにより得られた合成出力電力の標準偏差  $\times$  をインバータ容量  $C_I$  と蓄電池容量  $C_B$  の座標上に描いたグラフである。

【 図 10 】本実施例の充放電シミュレーションにより得られた合成出力電力の最大出力変動量  $P_{max}$  をインバータ容量  $C_I$  と蓄電池容量  $C_B$  の座標上に描いたグラフである。

【 図 11 】図 4 をもとに算出した大容量蓄電池で平準化した風力発電機の 1 年間の合成出力電力変動を表すグラフである。

【 図 12 】本実施例の蓄電池とインバータの最適容量と最適な蓄電池制御パラメータをシミュレーションにより決定する手順を表すフロー図である。

【 図 13 】図 12 のシミュレーションにおけるインバータ容量  $C_I$  と蓄電池容量  $C_B$  の最適値を探索する手法を説明する図面である。

【 図 14 】本実施例において最適解を求めるシミュレーションのパラメータ設定値を示す表である。

【 図 15 】本実施例のシミュレーション結果を示す表である。

【 図 16 】本実施例のシミュレーションにおける第 1 ケースの最適解を適用した蓄電池システムで制御したときの合成出力電力の変動量を示す図面である。

【 図 17 】本実施例のシミュレーションにおける第 2 ケースの最適解を適用した蓄電池シ

10

20

30

40

50

システムで制御したときの合成出力電力の変動量を示す図面である。

【図18】本実施例のシミュレーションにおける第3ケースの最適解を適用した蓄電池システムで制御したときの合成出力電力の変動量を示す図面である。

【図19】本実施例のシミュレーションにおける第4ケースの最適解を適用した蓄電池システムで制御したときの合成出力電力の変動量を示す図面である。

【符号の説明】

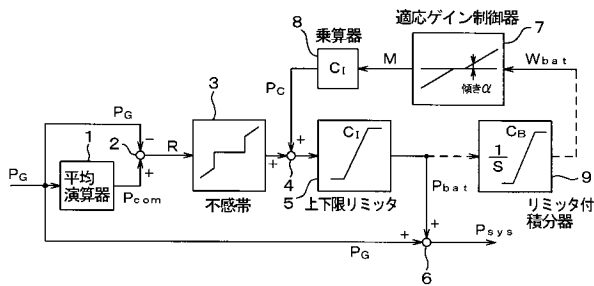
【0055】

- 1 平均演算器
- 2 減算器
- 3 不感帯素子
- 4 加算器
- 5 出力リミッタ
- 6 加算器
- 7 適応ゲイン制御器
- 8 乗算器
- 9 積分器
- 11 風力発電機
- 12 蓄電池
- 13 インバータ
- 14 電力系統

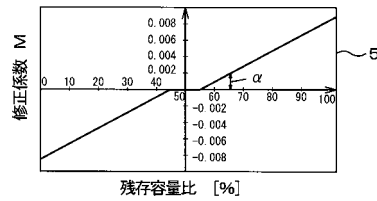
10

20

【図1】

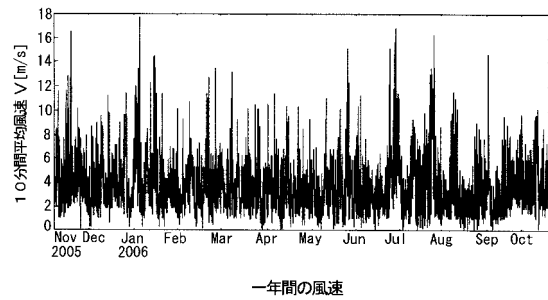
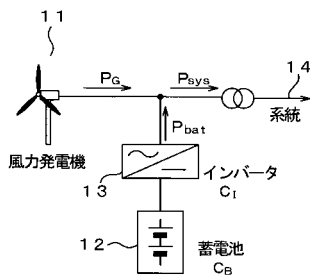


【図3】



【図4】

【図2】

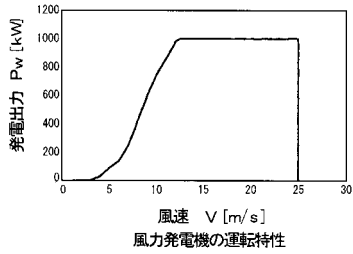


【 図 5 】

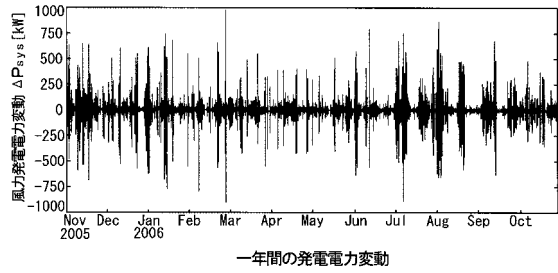
地表状態によるべき級数 N

地表状態	N
静かな海面など	10
平野・草原	7
森林・高い建物のない市街地	4
大都市の郊外周辺	3
大都市の中心付近	2

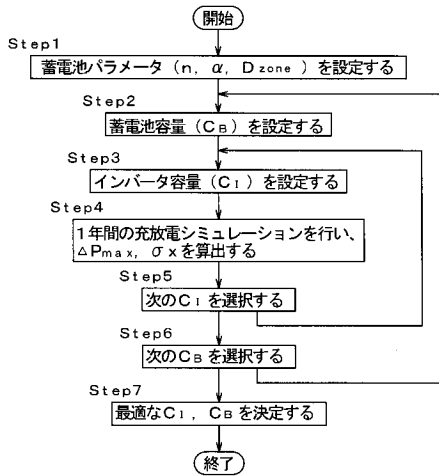
【 図 6 】



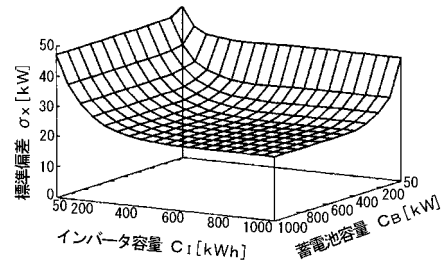
【 図 7 】



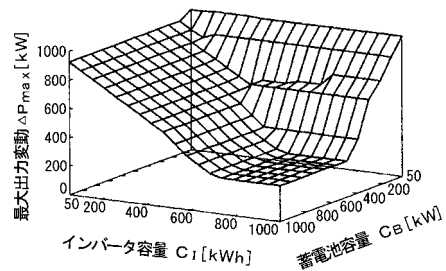
【 図 8 】



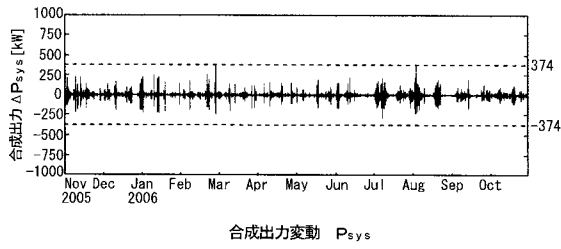
【 図 9 】



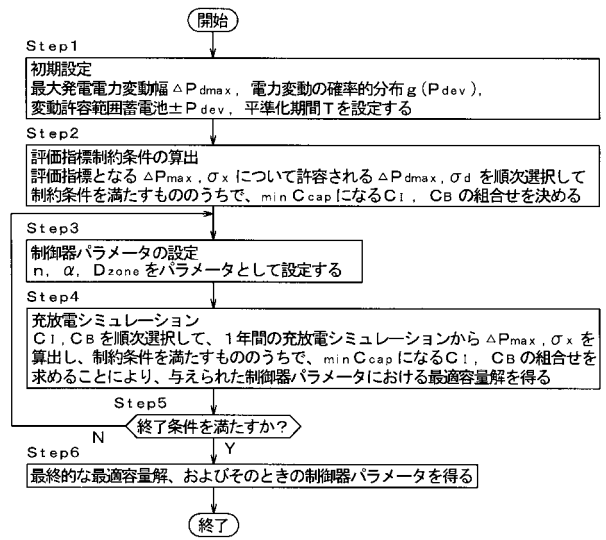
【 図 10 】



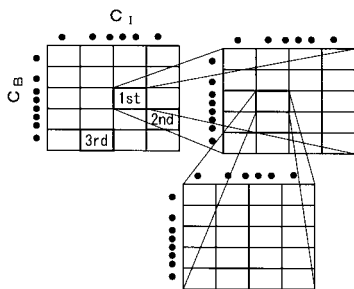
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 5 】

表3 シミュレーション結果

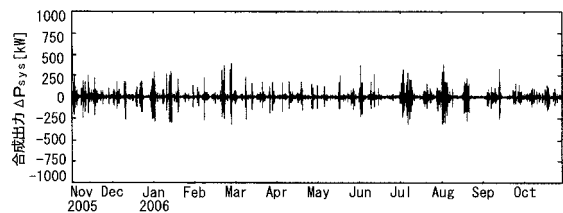
	case1	case2	case3	case4
n [min]	30	40	50	60
α [pu]	0.0004	0.0002	0.0001	0.0008
D <sub>zone</sub> [kW]	10	0	0	0
ΔP <sub>dmax</sub> [kW]	399	299	399	399
σ <sub>x</sub> [kW]	26.83	21.47	18.76	28.55
C <sub>1</sub> [kW]	580	675	574	601
C <sub>B</sub> [kWh]	274	451	501	720
C <sub>cap</sub> [S]	1,061,800	1,328,200	1,211,700	1,384,500

【 図 1 4 】

表 シミュレーションパラメータ

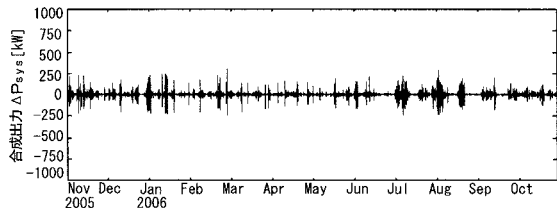
	case1	case2	case3	case4
ΔP <sub>dmax</sub> [kW]	400	300	400	400
g(P <sub>dev</sub> ) [%]	99.95	99.95	99.95	99.95
±P <sub>dev</sub> [kW]	100	100	70	100
T [min]	10	10	10	20

【 図 1 6 】



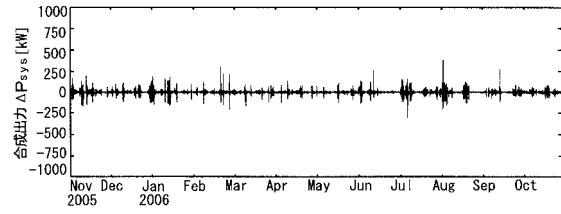
case1の最適解での制御結果

【 図 1 7 】



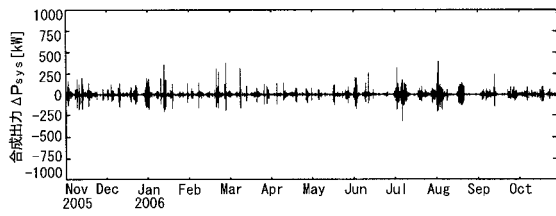
case2の最適解での制御結果

【 図 1 9 】



case4の最適解での制御結果

【 図 1 8 】



case3の最適解での制御結果