

琉球大学学術リポジトリ

ボンドグラフによるハイブリッド発電システムの動特性解析

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2009-08-19 キーワード (Ja): キーワード (En): Power Generation System, System Modeling, Bond Graphs, System Dynamics 作成者: 仲間, 博文, 新垣, 秀雄, 玉城, 史朗, 翁長, 健治, Nakama, Hirofumi, Arakaki, Hideo, Tamaki, Shiro, Onaga, Kenji メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/11947

ボンドグラフによるハイブリッド発電システムの動特性解析

仲間 博文* 新垣 秀雄** 玉城 史朗*** 翁長 健治***

Dynamic Characteristic Analysis of A Hybrid Power Generation System Based on Bond Graphs

Hirofumi NAKAMA* Hideo ARAKAKI** Shiro TAMAKI*** Kenji ONAGA***

Abstract

When analyzing and designing a hybrid power generation system, it is difficult to construct the system's state equations. In this study, an effective energy analysis method based on bond graph reasoning approach is proposed to model and analyze the system to solve the above problem. We verify the effect of this approach by simulation using BGSP (Bond Graph Simulation Program), and aim at an optimal design and control for the power generation system.

Key Words: Power Generation System, System Modeling, Bond Graphs, System Dynamics.

1. はじめに

南西諸島は、風力エネルギーや太陽エネルギー等の自然エネルギーが豊富な地域に位置している。現在、エネルギー有効利用の立場から、それらの自然エネルギーを有効利用したシステムの研究・開発が注目されており、その代表例として、風力/太陽光エネルギーを活用した発電システムがある。

ところで、このようなシステムは、複合システムであるため、設計や解析を行う際、通常的手法では、数学モデルの構築が困難な場合が生じる。上記の問題点を克服するため、本研究では、エネルギーの流れ、パワーに基礎を置くボンドグラフを導入する。そして、沖縄県勝連町の津堅島に設置したハイブリッド発電システム、および糸満市の西崎親水公園に設置した集合型風力発電システムの動作解析、および発電量のシミュレーションを行い、その結果をもとにした、より効率の良いシステムの利用形態を考え、システムの最適設計を目指す。

2. ボンドグラフについて

ボンドグラフとは、抵抗、インダクタなどからなる電気系、剛体、ばね、ダンパなどからなる機械系、流体抵抗、タンク、流体慣性からなる流体系が、構成要素がエネルギーの流れによって結合されているシステムという共通の視点でとらえられることに注目したシステムのグラフ表現であり、1959年にM.I.TのPaynter氏によ

って考案された。一般に多くの要素から構成されるシステムの全体としての挙動は、個々の要素の固有の性質とそれらの要素の結合形態との相乗効果として現れるものである。上述のように、ボンドグラフはシステムの物理的性質をうまくとらえたものなので、対象とするシステムをボンドグラフで表現するのは容易である[1]。

2.1 ボンドグラフにおける変数の分類

ボンドグラフでは、電流、電圧、速度、力など、システムにおける変数を、エネルギーの流れ、すなわちパワーを軸として、エフォート、フローという2種類の変数に大別する。表1に示すように、様々な物理系における、エフォートとフローの積は、単位がすべて[Nm/s]、すなわちパワーとなる。したがって、これらの変数はパワー変数と呼ばれている。このように変数を分類することにより、あらゆる物理系の要素を含んだ複合システムを統一的に扱うことが容易となる。

	Effort	Flow
電気系	電圧 [V]	電流 [A]
機械系 (直線運動)	力 [N]	速度 [m/s]
機械系 (回転運動)	トルク [Nm]	角速度 [1/s]
流体系	圧力 [N/m ²]	流量 [m ³ /s]

表1. 変数の分類

2.2 ボンドグラフにおける素子の分類

ボンドグラフでは、システムを構成する素子をエネルギー、パワーの観点から分類する。表2に示すように、

受理：1998年12月1日

*理工学研究科情報工学専攻(Dept. of Information Engineering, Graduate School of Engineering Sciences)

**工学部電気電子工学科(Dept. of Electrical and Electronic Engineering Fac. of Eng.)

***工学部情報工学科(Dept. of Information Engineering, Fac. of Eng.)
第20回記念国際風力エネルギーシンポジウムにて1998年11月19日に発表済み

素子にはC, I素子を含むエネルギー貯蔵素子や, R素子を含むエネルギー消費素子, トランスフォーマTF, ジャイレータGYを含むエネルギー変換素子があり, 各素子はその性質により分類される.

	エネルギー貯蔵素子		消費素子	変換素子
	C	I	R	TF, GY
電気系	コンデンサ	インダクタ	電気抵抗	モータ 発電機
機械系	バネ	剛体の慣性	ダンパ	てこ
流体系	液槽	液体の慣性	液体抵抗	ポンプ

表2. 素子の分類

3. ポンドグラフによる津堅島ハイブリッド発電システムのモデリング

本研究では, 沖縄県勝連町の津堅島に太陽光/風力を活用したハイブリッド発電システムを設置した. この島では, 人参を中心とした農業が盛んであるが, 慢性的な水不足に悩まされている. しかし地下水が豊富に存在することが明らかになっているため, 自然エネルギーを活用し, この水をくみ上げ, 農業用水として利用しようと考えた.

図1に, 今回津堅島に設置したハイブリッド発電システムの概念図を, また図2には同システムの構成図を示す. なお, 風車は4.5kW(World Power Whisper4500), ソーラーパネルは1.7kW(多結晶シリコン太陽電池), ポンプの消費電力は450W, バッテリーは24V-700Ah(鉛蓄電池)である. 同システムにおいて, 風車, およびソーラーパネルで発生した電力は, 一旦バッテリーに貯蔵された後, インバータにより交流電力に変換され, 揚水ポンプを駆動する動力として使用される.

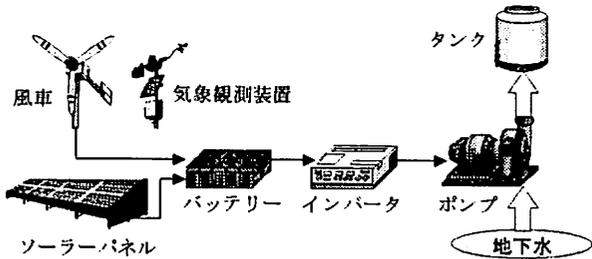


図1. 津堅島ハイブリッド発電システム

図2をポンドグラフで表現すると, 図3が得られる. 同図において, R, Iはそれぞれ風車の回転摩擦, 慣性モーメント, 発電機の電機子抵抗, 電機子インダクタンスなどを表している. また風車, ソーラーパネルはそれぞれトルク源, 電流源としてSE₁, SF₁で表現されており, 発電機, モータ, ポンプはエネルギーを変換す

るものとしてGYで表現されている. ポンドグラフでは矢印がエネルギーの伝達方向を示している. 例えば図3では, 風車によって発生した回転エネルギーが発電機によって電気エネルギーに変換され, 最終的に位置エネルギーとしてタンクに貯蔵される流れを示している.

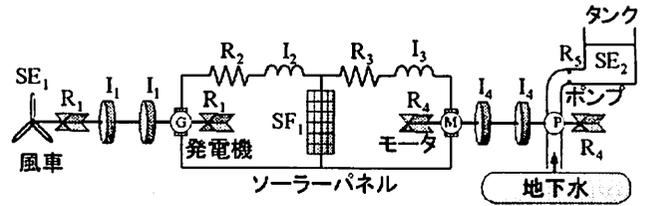


図2. 津堅島ハイブリッド発電システムの構成図

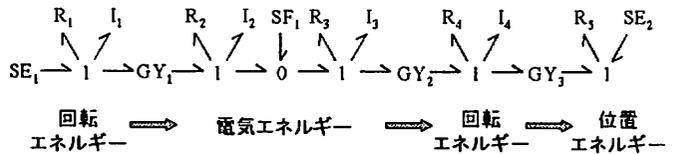


図3. システムのポンドグラフ表現

このように, ポンドグラフでは要素の特性と結合形態が視覚に訴えてわかりやすい形で表現されるので, システムの構成を理解するのに有用である

4. ポンドグラフによるハイブリッド発電システムのシミュレーション

今回, ポンドグラフ解析用プログラムとして, BGSP (Bond Graph Simulation Program) [2]を用いた. このソフトは, 通産省工業技術院機械技術研究所で開発されたポンドグラフ専用プログラムであり, ポンドグラフモデルと各素子のパラメータを入力することにより, システムの状態方程式が自動的に導出され, その動特性を解析することができる. 表3に, 今回シミュレーションで用いたパラメータを示す. なお, 太陽光発電電力については, 図4に示す, 太陽電池モジュールの電流-電圧特性の照度依存性に基づいてシミュレーションを行った. 図5に, 風速をパラメータとした, 風力発電機出力電力のシミュレーション結果と, メーカー仕様値との比較を示す.

風車	
風車半径	2.25[m]
風車慣性モーメント	5.1[Nms ²]
風車トルク係数	0.06
空気密度	1.225[Ns ² /m ⁴]
発電機	
トルク係数	0.95[Nm/A]
起電力係数	0.95[V/srad]
電機子抵抗	0.3[Ω]
電機子インダクタンス	0.01[H]

表3. シミュレーションパラメータ

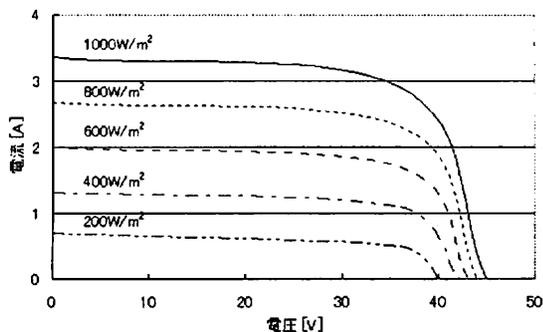


図4. 太陽電池モジュール電流 - 電圧特性の照度依存性

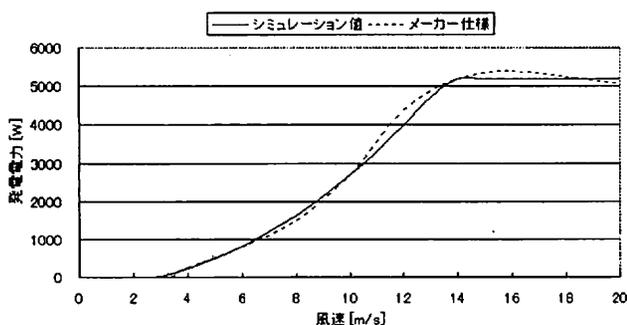
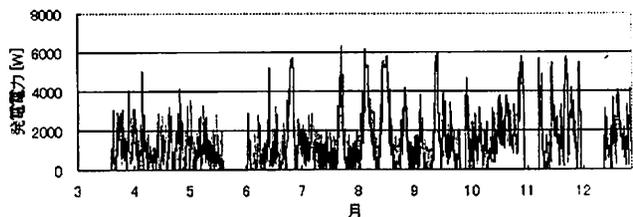


図5. 風力発電量シミュレーション結果

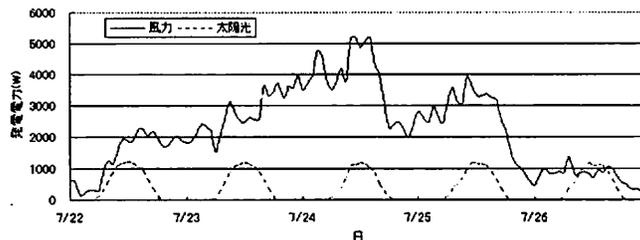
風速約10m/s以上の高風速域において、シミュレーション値と仕様値に多少差が見られるが、これは風車トルク係数を一定としたために生じた誤差と考えられる。実際は周速比（風車ブレードの翼端の進行速度と風速の比）の変化に伴い、風車トルク係数も変化するが、通常この値は実験的な方法によって得られる。現段階では実験データが得られていないため、トルク係数を一定とした。しかし、このような高風速が現れることは少ないため、年間発電量シミュレーション等への影響も少ないと思われる。



	風力	太陽光	ハイブリッド
平均風速 日射量	6.7[m/s]	202[W/m ²]	
風力・太陽光 エネルギー [W]	2,930	3,232	6,162
年間平均 電力[W]	1,275	258	1,533
効率[%]	43.5	8.0	24.9

図6. ハイブリッド発電電力の年間シミュレーション結果(1997年)

図6に、津堅島で実際に観測された、1997年の風速、および日射量データをもとにした、風力、太陽光発電電力の合計、すなわちハイブリッド発電電力のシミュレーション結果を示す。ただし、データは3月半ば以降のものであり、5月後半、12月前半等、途中データが欠けているのは、データロガーの不調により取得できなかった期間である。次に、1997年7月22日から31日までの10日間の風力、および太陽光発電電力シミュレーション結果を示す。まず図7には、7月22日から26日までの5日間の、シミュレーション結果を示す。



	風力	太陽光	ハイブリッド
平均風速 日射量	8.9[m/s]	307[W/m ²]	
平均電力[W]	2,253	393	2,646
電力量[kWh/5日]	270	47	318

図7. 1997年7月22~26日の風力・太陽光発電電力シミュレーション結果

この期間において、風力エネルギー、太陽光エネルギーおよびバッテリーのみでポンプを駆動できる時間 T_{PW} , T_{PS} , T_{PB} は、インバータの効率を0.8、バッテリーの放電深度を0.5とすると、それぞれ、

$$T_{PW} = 270 \text{ kWh} \div 450 \text{ W} \times 0.8 = 480 \text{ h} \quad (1)$$

$$T_{PS} = 47 \text{ kWh} \div 450 \text{ W} \times 0.8 = 83.6 \text{ h} \quad (2)$$

$$T_{PB} = 700 \text{ Ah} \times (1 - 0.5) \times 24 \text{ V} \div 450 \text{ W} \times 0.8 = 14.9 \text{ h} \quad (3)$$

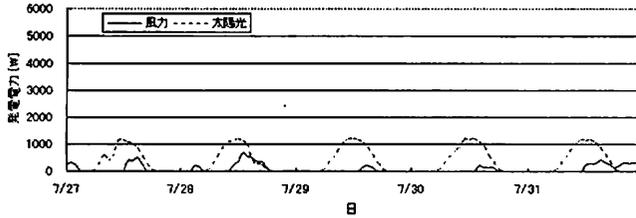
となる。この期間は天候もよく、平均風速も高かったため、(1), (2)式より、バッテリーを使用しなくても、5日間ポンプを駆動し続けることができる。図8には、1997年7月23日から31日までの5日間のシミュレーション結果を示す。先程と同様に、この期間において、風力エネルギー、太陽光エネルギー、およびバッテリーのみでポンプを駆動できる時間は以下ようになる。

$$T_{PW} = 10.4 \text{ kWh} \div 450 \text{ W} \times 0.8 = 18.5 \text{ h} \quad (4)$$

$$T_{PS} = 45.7 \text{ kWh} \div 450 \text{ W} \times 0.8 = 81.2 \text{ h} \quad (5)$$

$$T_{PB} = 700 \text{ Ah} \times (1 - 0.5) \times 24 \text{ V} \div 450 \text{ W} \times 0.8 = 14.9 \text{ h} \quad (6)$$

この5日間は、前日までと一転して、平均風速がかなり落ち込んでおり、その結果、風力発電量も低下している。したがって、(4)、(5)、(6)式より、風車とバッテリーだけならば、この5日間で約33時間しか駆動できないのに対して、ハイブリッドならば、風力エネルギーの不足分を太陽光エネルギーが補い、合計約115時間、つまり5日間ポンプをほぼフル稼働できることがわかる。



	風力	太陽光	ハイブリッド
平均風速 日射量	2.9[m/s]	298[W/m ²]	
平均電力[W]	87	381	468
電力量[kWh/5日]	10	46	56

図8. 1997年7月27～31日の風力・太陽光発電電力シミュレーション結果

このようにシステムをボンドグラフ化すれば、システムの動作を定量的に把握することができ、その挙動を解析するのに有効である[3]。また各パラメータの調節によって性能を向上させ、問題点があればそれを見つけることができる。

5. ボンドグラフによる集合型風力発電システムのモデリングおよびシミュレーション

本研究では、勝連町の津堅島に続いて、糸満市の西崎親水公園に、集合型風力発電システムを設置した。図9に、今回設置したシステムの構成図を示す。同図に示すように、システムは、風車(500W×2, 300W×2), ソーラーパネル(600W 単結晶シリコン太陽電池), バッテリー(24V 鉛蓄電池), インバータ, 噴水 (550W), およびライトアップ用照明(150W×3)から成りたっている。なお風車は WINDSEEKER(500W), AIR wind module(300W)の2種類で、いずれも米国 South Windpower 社製である。同システムにおいて、風車、およびソーラーパネルで発生した電力は、一旦バッテリーに貯蔵された後、インバータにより交流電力に変換され、噴水用ポンプの駆動や、ライトアップ用照明の電力として使用される。図10は風力発電機、およびソーラーパネルからバッテリーまでをボンドグラフによりモデリングしたものである。同図において、風車はトルク源を示すSE1～4, ソーラーパネルは電流源を示すSF1, バッテリーは電圧源を示すSE5でそれぞれ表現されている。また、Rは風車の回転摩擦、および発電機の電機子抵抗を示しており、Iは風車の慣性モーメント、

および発電機の電機子インダクタンスなどを示している。なお、GYはいずれも発電機を示している。図10では、風車によって発生した回転エネルギーが発電機によって電気エネルギーに変換され、最終的にバッテリーに貯蔵される流れを示している。

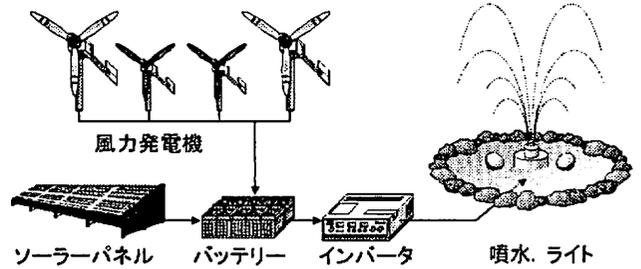


図9. 西崎親水公園発電システム

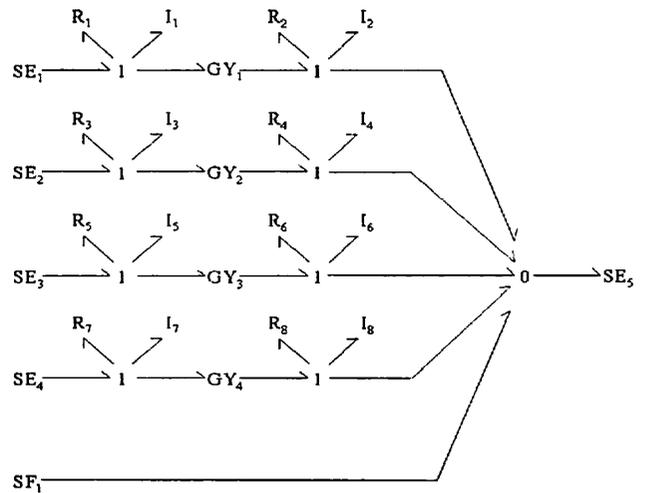


図10. 発電システムのボンドグラフモデル

風車(300W)	
風車半径	0.57[m]
風車慣性モーメント	0.11[Nms ²]
風車トルク係数	0.15
空気密度	1.225[Ns ² /m ⁴]
風車(500W)	
風車半径	0.77[m]
風車慣性モーメント	0.39[Nms ²]
風車トルク係数	0.10
発電機(300W)	
トルク係数	0.6[Nm/A]
起電力係数	0.6[Vs/rad]
電機子抵抗	0.1[Ω]
電機子インダクタンス	0.01[H]
発電機(500W)	
トルク係数	0.7[Nm/A]
起電力係数	0.7[Vs/rad]
電機子抵抗	0.1[Ω]
電機子インダクタンス	0.01[H]

表4. シミュレーションパラメータ

表4に, 300W風車, および500W風車のシミュレーションで用いたパラメータを示す. なお, ここでも風車トルク係数は一定とした. また, 太陽光発電電力については, 図11に示す, 太陽電池モジュールの電流-電圧特性の照度依存性に基づいてシミュレーションを行った.

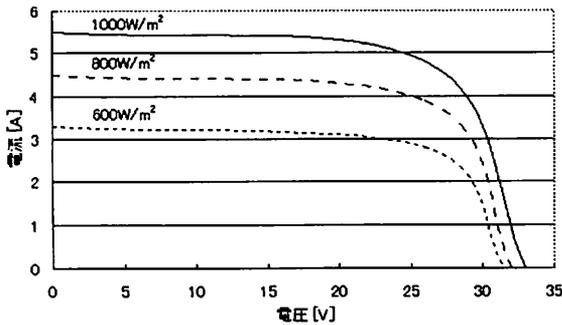


図11. 太陽電池モジュール電流-電圧特性の照度依存性

図12, 13に, 300W風車, および500W風車のシミュレーション結果および仕様値との比較を示す.

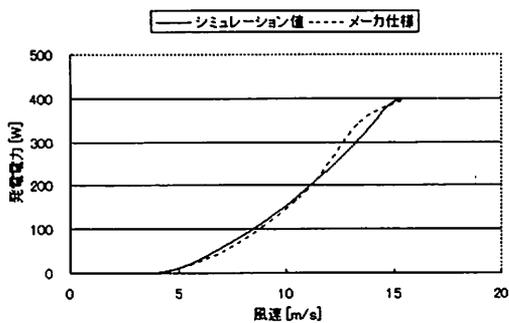


図12. 300W風車のシミュレーション結果および仕様値との比較

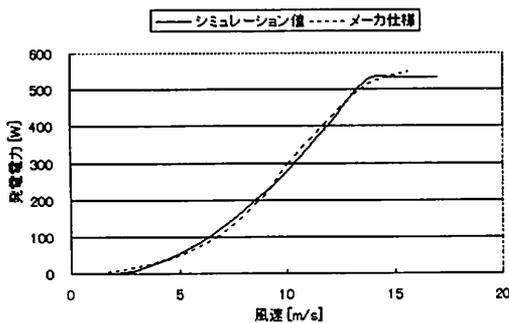


図13. 500W風車のシミュレーション結果および仕様値との比較

図14, 表5に, 1995年に那覇市で実際に観測された, 風速, および日射量データを基にした, 風力発電機, およびソーラーパネルにおける発電電力のシミュレーション結果を示す. 表5に示すように, この発電システムによって, 一日平均 7443Wh の電力量が得られることがわかる. インバータ効率を 0.8 とすると, 実際に利用できる電力量は,

$$7443\text{Wh/日} \times 0.8 = 5954\text{Wh/日} \quad (7)$$

となる. 噴水(550W)および照明(150W×3)の使用電力を考慮すれば,

$$5954\text{Wh/日} \div (550\text{W} + 150\text{W} \times 3) = 5.954\text{h/日} \quad (8)$$

となり, これらの負荷を一日あたり約6時間使用できることがわかる.

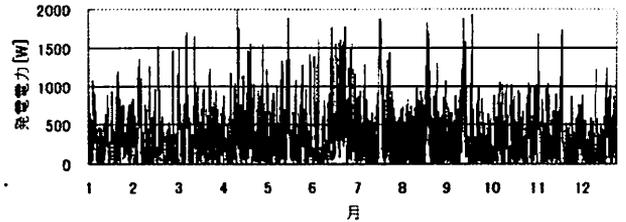


図14. 風力4基およびソーラーパネル出力合計の年間シミュレーション結果 (1995年)

	1号機	2号機	3号機	4号機	ソーラー	合計
平均風速 [m/s]	5.3	5.1	5.2	5.2	158.1	
日射量 [W/m²]						
平均電力 [W]	80.2	75.5	31.7	32.6	90.1	310.1
理論値 [W]	165.7	153.5	80.5	82.6	790.6	1272.9
効率 [%]	48.4	49.2	39.3	39.5	11.4	24.4
平均電力量 [Wh/日]	1924	1813	760	783	2162	7443
比率 [%]	25.9	24.4	10.2	10.5	29.1	100

表5. 各風車およびソーラーパネルの年間シミュレーション結果 (1995年)

6. バッテリー容量の変動を考慮した風力発電システムの動特性解析

これまででは, バッテリー電圧を 24V 一定と仮定して, 様々なシミュレーションを行ってきた. しかし実際は, バッテリー容量の変化に伴い, バッテリー端子電圧も変化する. したがって, 充電電流も増減するため, 発電量も変動することになる. ここでは, バッテリー容量の変動を考慮した津堅風車の発電量シミュレーションを行う. 図15に示すように, 一般的なバッテリー (鉛蓄

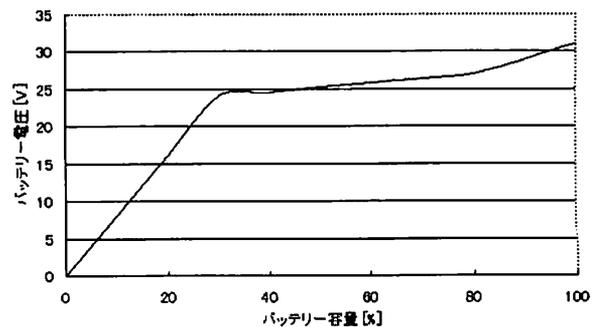


図15. 鉛バッテリー特性

電池)は容量が約20~30%以下になると電圧が急激に降下する[3]。それに伴い充電電流が増加し、発電機の回転を妨げる方向のトルクが大きくなる。その結果、風車の回転数は下がり、発電電力も低下することになる。なお、インバータは、入力電圧18V以下で停止するものとし、それに伴いポンプも停止するものとする。

図16,17,18はそれぞれ風速を一定とし、バッテリーの初期容量を70%とした場合の、バッテリー電圧、風車回転速度、および風力発電電力の24時間のシミュレーション結果である。

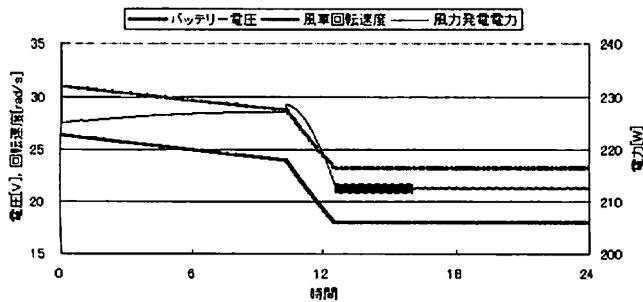


図16. 風速4 m/s時の24時間シミュレーション結果

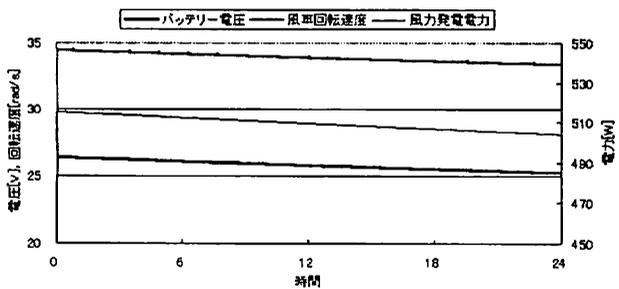


図17. 風速5 m/s時の24時間シミュレーション結果

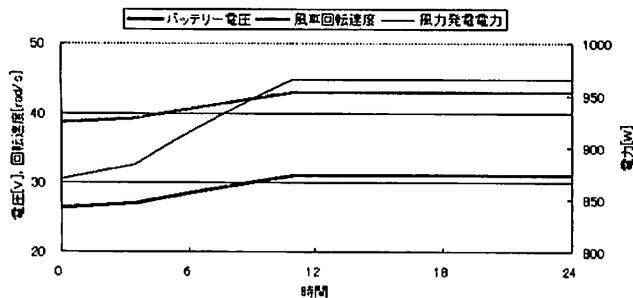


図18. 風速6 m/s時の24時間シミュレーション結果

図16, すなわち風速4 m/sでは、風力発電量が、ポンプの消費電力量に追いつかず、バッテリー電圧が降下していき、約12時間後にはその電圧が18V以下となり、ポンプが停止する様子が分かる。その後、発電電力は振動しているが、これは、18V以下でポンプが停止するため、その間に充電され、また18V以上に戻ると、再

びポンプのスイッチがオンとなるといった動きを繰り返すためである。

図17, すなわち風速5 m/sでは、風力発電電力より、ポンプ消費電力が僅かに大きいため、バッテリー電圧、風車回転速度、風力発電電力ともに少しずつ低下しているが、24時間以内では、ポンプは停止しないことがわかる。

そして図18, すなわち風速6 m/sでは、ポンプ消費電力よりも風力発電電力が大きいため、バッテリー電圧等が上昇している様子がわかる。つまり、平均風速が6 m/s以上あれば、ポンプを駆動し続けることができるという結果が得られた。

7. まとめ

本研究では、ポンドグラフによる津堅島ハイブリッド発電システム、および西崎親水公園に設置した、集合型風力発電システムのモデリングを行った。そして、シミュレーションプログラムBGSPにより、風速、日射量などの実測値をもとにした発電量のシミュレーションを行い、これらのシステム活用の可能性について示した。また、バッテリー容量の変動を考慮し、より現実的なシミュレーションを行った。今後の課題として、ポンドグラフによる、ポンプや噴水など負荷のモデリング、およびシミュレーションや、システムから得られた実データと計算結果との比較によるシミュレーション精度の向上、そしてシミュレーション結果に基づく、より効率の良いシステムの利用形態を考え、最適なバッテリー容量や負荷容量などの決定、すなわちシステムの最適設計を目指す。

参考文献

- [1] J.U.トーマ, 須田信英, ポンドグラフによるシミュレーション, コロナ社, 1996
- [2] 幸田武久 他, BGSPの改良に関する研究委員会成果報告書別冊, 日本油空圧学会, 1992
- [3] 技術説明書, ユアサ産業用鉛蓄電池について, 湯浅電池株式会社