

ボンドグラフに基づく風力発電システムの動特性解析

Dynamic Characteristic Analysis of a Wind-Power Generation System based on Bond Graphs

仲間 博文^{*1} 新垣 秀雄^{*3} 長田 智和^{*3} 國吉 侑^{*3}
 Hirofumi NAKAMA Hideo ARAKAKI Tomokazu NAGATA Yu KUNIYOSHI

玉城 史朗^{*2} 名嘉村 盛和^{*3} 翁長 健治^{*3}
 Shiro TAMAKI Morikazu NAKAMURA Kenji ONAGA

Abstract

In recent years, independent-type micro-grid power generation systems are focused as a source of an electric power supply of the irrigation system for agriculture. With the aim of high-quality agricultural-products production, we built a hybrid-power generation system for an agricultural irrigation system in Tsuken Island in OKINAWA Prefecture. In this research, an effective energy analysis method based on a bond graphs reasoning approach has induced the adoption of our wind-power generation system. To confirm the effectiveness of the proposed method, we carried out the experimentation and simulations. We conclude that the proposed method is useful as an energy-flow analysis system.

キーワード：風力発電機の動特性解析，ボンドグラフ，風力・太陽光ハイブリッド発電，システムモデリング

Key Words : Dynamic characteristic analysis of wind turbine, Bond graphs, Wind-power & photovoltaic hybrid power generation system, System modeling,

1. はじめに

南西諸島は，風力エネルギーや太陽光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，省エネルギー，および，環境保護の立場から，それらの自然エネルギーを有効活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用いたハイブリッド発電システムが有望視されている．我々の研究室では，農業用灌漑系の独立型電源の実証的研究開発として，沖縄県うるま市の津堅島に，ハイブリッド発電システムを設置した⁽¹⁾．

ところで，このようなシステムは，流体系，機械系，電

気系がエネルギー的に結ばれた複合システムであるため，設計や解析を行う際に，状態空間モデルなどの通常の手法で微分方程式を構成したとき，その数学モデルからエネルギーの流れを理解するのは困難な場合が生じる⁽²⁾．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，および，パワーに基礎を置くボンドグラフを導入する．ボンドグラフとは，流体系，機械系，電気系などに共通するエネルギー貯蔵素子，変換素子，消費素子を用いて，複合システムの構成素子の結びつきを有向グラフ（エネルギーフロー）で視覚的に表現する手法である．この手法は 1959 年に M. I. T. の Paynter によって考案された^{(2), (3)}．ボンドグラフによるモデリングや制御系設計は，現在，海外においてはすでに多く応用されているが⁽⁴⁾，自然エネルギー解析に利用された例はほとんどない．また，我が国におけるボンドグラフの利用例は少なく，近年，ポンプシステムの動特性解析に応用され始めているが，さらに多くの事例に応用し，その表現法の有効性と問題点を明らかにする必要がある^{(4), (5)}．また，システムの最適設計を行う場

*1 非会員，沖縄電力株式会社

(〒901-2602 沖縄県浦添市牧港五丁目2番1号)

*2 会員，琉球大学工学部情報工学科

(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

*3 非会員，琉球大学工学部情報工学科

(原稿受付：2006年9月20日)

合には、モデルの機械的パラメータを変更することにより最適化を行うことがひとつの有効な手段として用いられており、実際のシステムの最適設計が可能であるかどうかはモデリングの精度に深く依存する^{(3), (4)}。したがって、その手段のひとつとして、ボンドグラフの有効性を検証することは非常に有意義であると思われる。

本研究では、我々の研究室で沖縄県津堅島に設置した風力・太陽光ハイブリッド発電システムについて、特に、風力発電システムの動特性解析をボンドグラフに基づき行う。当然のことながら、風力発電システムにおける入力エネルギーは風力である。風力エネルギーは、風車により回転エネルギーに変換され、この回転エネルギーは発電機を駆動することにより電氣的エネルギーに変換されてバッテリーに蓄電される。そして、蓄電された電力はポンプを駆動して地下水を高所まで揚水し、その水が位置エネルギーの形で保存される。以上のような複合的エネルギーシステムのモデル化にはボンドグラフは非常に有効な手段であると考えられる。

ここでは、風力発電システムにおけるエネルギーエネルギー貯蔵・変換・消費素子の定義を明確にし、また、それらの物理パラメータを実測することにより、風力発電システムの詳細なモデリングをボンドグラフを用いて構成する。そして、実際の風力発電システムのデータとボンドグラフシミュレータの出力を比較することにより、提案する手法の有効性を検証する。

2. 津堅島ハイブリッド発電システムとボンドグラフによる風力発電システムモデリング

我々の研究室では、沖縄県うるま市の津堅島に風力・太陽光エネルギー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、人参やパインなどの熱帯果樹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。ところで、図1に示すように、津堅島の地下には、淡水と海水の比重の差によってできた淡水レンズ、すなわち地下水が豊富に存在することが明らかになっている。このため、自然エネルギーを活用し、地下水をくみ上げ、農業用水として利用することが有望視されている。なお、その年間取水可能量は50万トンと推定されている。この地下水を活用することにより、農業用水の確保が可能となり、地場の新しい付加価値の高い亜熱帯果樹類などの生産を行う計画が進められている。我々は、研究の一環として、自然エネルギーを活用した独立型電源としてのハイブリッド発電システムを構築し、農業用水の確保に貢献することをひとつの目的としている。

図2に、今回津堅島に設置したハイブリッド発電システム概念図を、写真1に風車の概観、写真2にソーラーパネルの概観を示す。

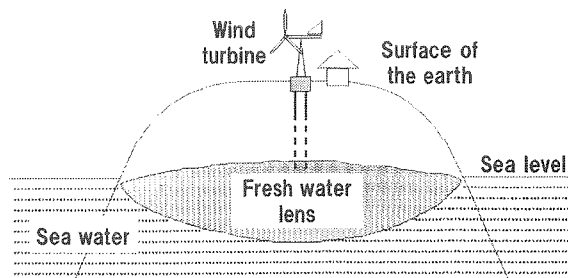


Fig.1 A fresh water well in Tsuken island.

図1. 津堅島の淡水レンズ

また、同システムの構成図を図3に示す。なお、風車は4.5kW(三相同期発電機 World Power Whisper4500)、ソーラーパネルは80W×16枚(京セラ多結晶シリコン太陽電池:計1.28kW)、ポンプの消費電力は400W(揚水量41.5リットル/分)、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。

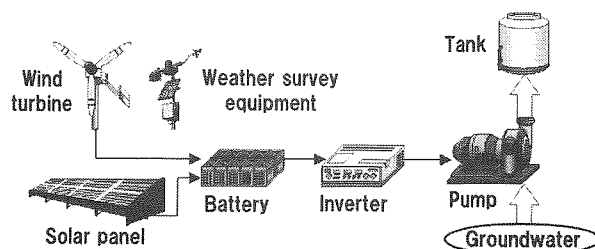


Fig.2 Schematic diagram of hybrid power generation system.

図2. ハイブリッド発電システム



Photo 1 Scenery of wind turbine.

写真1. 風車の概観

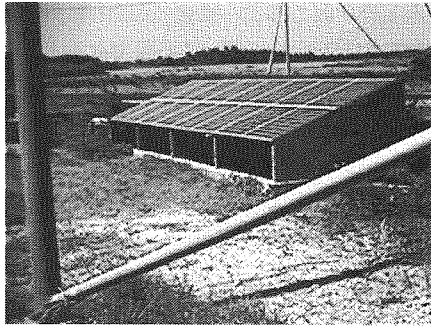


Photo 2 Scenery of solar-panel.
写真2. ソーラーパネルの概観

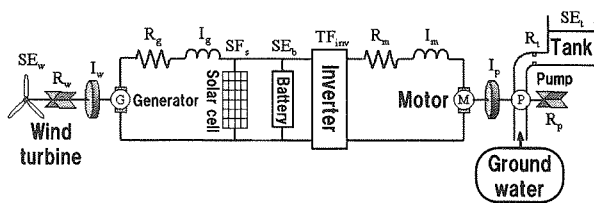


Fig. 3 Block diagram of hybrid power generation system.
図3. ハイブリッド発電システムの構成図

図3をボンドグラフで表現すると図4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 SE_w 、 SF_s 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。ボ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4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、そして、蓄電池に蓄電され、さらに、蓄電池の電力を用いてポンプを駆動し、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。

このように、ボンドグラフでは要素の特性と結合形態が視覚的にわかりやすい形で表現されるので、エネルギー伝

達・貯蔵・変換・消費システムの構成を理解するのに有用である。また、一旦ボンドグラフが得られると、一定の規則に従ってシステムの動特性を示す状態方程式が容易に導かれるため、コンピュータシミュレーションによりシステムを解析する際、ボンドグラフは非常に有効な手段となる。本研究では、風力発電システムの動特性解析を、BGSP (Bond Graph Simulation Program) というシミュレーションプログラムを用いて行う⁽⁶⁾。

3. ボンドグラフによる風力発電機のシミュレーション

今回、ボンドグラフ解析用プログラムとして用いた BGSP は、旧通産省工業技術院機械技術研究所（現在、産業技術総合研究所）で開発されたボンドグラフ専用プログラムであり、ボ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。したがって、システム解析やモデリングを行う際には、システムのボンドグラフ表現を行い、素子のパラメータを決定すればよい。

ここでは、まず、バッテリー充電時における風速-出力パワーカーブの実測値とボンドグラフによるシミュレーション値との比較を述べる。表1に、今回シミュレーションで用いたパラメータを示す。ここで、表1において風車摩擦係数以外は、実測で得たパラメータ、および、メーカーから得た情報を用いた。しかし、摩擦係数は稼動状況などにより変化するため、その推定には、風力発電システム稼動中の出力電力実測値を十分反映するように、摩擦係数のチューニングとシミュレーションによる評価を繰り返し、最適値を求めるパラメータ調整法⁽⁷⁾を適用した。図5に示すように、このシステムにおいて、風力発電機の交流出力は、ダイオードによって全波整流され、直流電力としてバッテリーに貯蔵される。この時、発電機出力電圧(瞬時値)の絶対値がバッテリー端子間電圧よりも低い場合は電流が流れない。したがって、バッテリーに充電するためには、ある程度風車が回転し、発電機出力電圧がバッテリー電圧を超

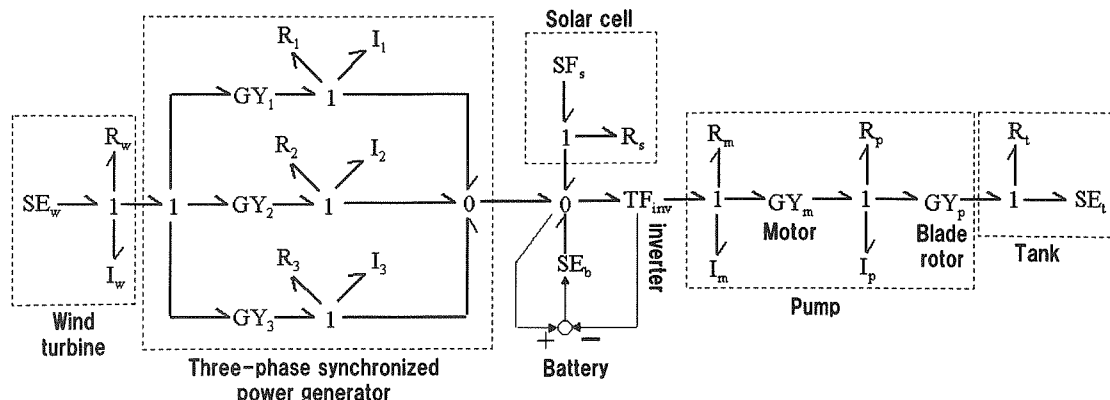


Fig. 4 Bond graph method of the system.
図4. システムのボンドグラフ表現

える必要がある。実際は、図5に示すように、発電機出力は平滑用コンデンサによって、その出力電圧のピーク値に近い値が維持される。ゆえに、充電するためには、少なくともそのピーク値がバッテリー電圧を超えなければならない。

Table 1 Parameters of the wind-turbine.

表1：風力発電機シミュレーションで用いたパラメータ

Radius of the wind-turbine	2.25[m]
Air density	1.225[Ns ² /m ⁴]
Loss coefficients of K_1	21.736
wind turbine K_2	-1.15892
K_3	0.22747
Friction coefficient	0.005[Nm/rad/s]
Moment of inerter	15[kgm]
Magnetic poles of generator	16
Torque coefficient of generator	0.404[Nm/A]
Electromotive coefficient of generator	0.404[V/rad/s]
Anode resistance of generator (/phase)	0.072[Ω]
Internal inductance of generator (/phase)	0.35[mH]

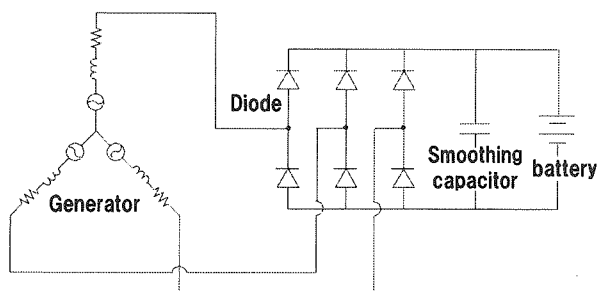


Fig. 5 The connection condition of the generator and the battery.

図5. 風力発電機とバッテリーの接続状況

バッテリー充電時における風力発電機のパワーカーブを図6に示す。本実験での風速は6.5m/sから16m/sの間で変化している。ここでは、カットアウトを行うための制動をかけていない。この図において■点が実測値で、曲線がボンドグラフによるシミュレーションを表している。図6のシミュレーション値から、この発電機のカットイン風速は、約5.2m/sである。ここに、バッテリーの開放時端子電圧は、実際に測定したときの値(24.7V)とし、バッテリー内部抵抗は0.055Ω(充電電流および充電時バッテリー端子電圧の実測値より算出)、ダイオードの順方向電圧を実測

値0.7Vとした。ところで、風速(入力)に対する発電機出力の動特性(パワーカーブ)が把握できると、その発電システムにおけるバッテリーの電圧や充電状況を明らかにすることができる。このことは、バッテリーを管理する上で非常に重要となる。この目的を達成するために、バッテリー充電時の発電機出力電圧、バッテリー電圧、および、実測値に基づくモデルから得られたパワーカーブとの関係をシミュレーションにより明らかにした。この結果を図7に示す。前述のように、風速5.2m/s(カットイン風速)以下では、この発電機は発電できない。つまり、この風速以下では、発電機出力電圧が、バッテリー電圧(24.7V)とダイオード順方向電圧(0.7V×2=1.4V)の和(24.7V+1.4V=26.1V)よりも低いため発電が不可能であると考えられる。換言すると、この発電機においては、バッテリー電圧に依存して発電を開始する風速も変動し、カットイン風速以降から初めて充電が開始される。なお、充電開始後、バッテリー電圧は上昇し、発電機出力と一致するが、これは充電電流によるバッテリー内部抵抗での電圧上昇によるものである。

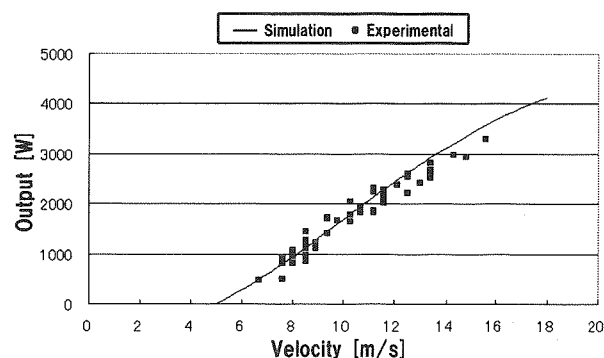


Fig. 6 Simulation and experimental results of velocity vs. power of generator.

図6. 風力発電機の風速-出力シミュレーション結果および実測値(バッテリー充電時)

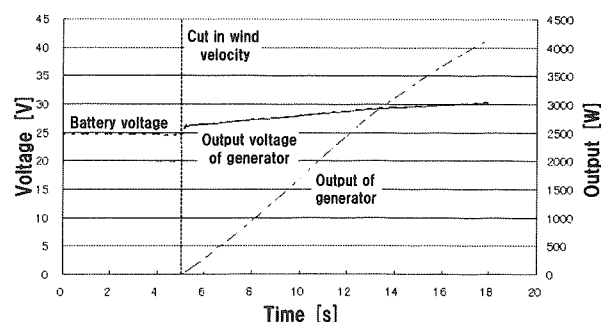


Fig. 7 Simulation results of the generator output voltage in the battery charge, battery voltage and wind-turbine vs. wind velocity.

図7. バッテリー充電時の発電機出力電圧、バッテリー電圧、風車出力

図8は、バッテリー充電時における10分間の発電機出力の実測値とシミュレーション結果である。シミュレーション値と実測値に多少の差が見られるが、これは、空気力学的なモデリングが不十分であることや機械的バックラッシュなどの影響で、風車回転トルク等に誤差が生じ、結果として、出力値に誤差が反映されたと考えられる。しかし、モデルの出力は実測値に十分追従していることが確認できる。

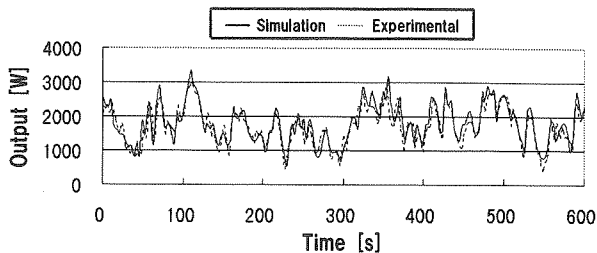


Fig. 8 Result of generator output of actual measurement and simulation values in the battery charge.

図8. バッテリー充電時の発電機出力シミュレーション結果および実測値

4. まとめ

本研究では、自然エネルギー解析の新たな手法としてボンドグラフを導入し、沖縄県うるま市津堅島に設置した風力発電システムのボンドグラフによるモデリングを行った。そして、実測値に基づき、モデルパラメータを決定し、バッテリー充電時の風力発電機出力シミュレーションを行い、構築したシミュレータは実システムの特性を十分に反映できることを実証した。その結果、ボンドグラフに基づく風

力発電機の動特性解析の有効性が確認できた。

今後は、より詳細な風車の空気力学的モデリングを行い、さらに精度の高いモデル構築を目指す。特に、風力発電と太陽光発電を併用した発電システムにおける揚水実験を行い、ハイブリッド発電システムの最適設計のための詳細なモデリングを行う予定である。そして、風力・太陽光エネルギーの有効活用システムの構築に努めていく次第である。謝辞：本研究を行うにおいて、ボンドグラフに関するすばらしい解説書を書かれ、さまざまな観点から御示唆いただいた須田信英先生と鈴木勝也先生に深く感謝します。また、BGSP に関し貴重なアドバイスを頂きました田中和博先生（九州工業大学）、桜井康雄先生（足利工業大学）に感謝します。最後に、この研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（課題番号 13540165）の補助により遂行されました。ここに深謝します。

参考文献

- 1) 仲間博文 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, 琉球大学理工学研究科修士論文, 1998
- 2) 須田信英 システム・ダイナミクス, コロナ社, 1996
- 3) J. U. トーマ, 須田信英, ボンドグラフによるシミュレーション, コロナ社, 1996
- 4) H. Wang and D. Linkens: Intelligent Supervisory Control, World Scientific, 1996
- 5) 容偉洪, 田中和博, 大津孝夫, 塚本寛, ボンドグラフによる遠心ポンプ始動/停止時の過渡特性解析, 日本機械学会論文集(B編)62巻594号, 1996
- 6) 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
- 7) 古田勝久 線形システムの観測と同定, コロナ社, 1981