

## 小水力発電システムにおける車載用オルタネータの適用

中原 亮太<sup>a)</sup>・春田 篤二<sup>a)</sup>・林 則行<sup>b)</sup>

## Application of Alternators Designed for Cars to Small Hydropower Systems

Ryota NAKAHARA, Atsuji HARUTA, Noriyuki HAYASHI

## Abstract

In this study, we conducted a study on the power generation system that uses a small water resources. Study of the system towards low-cost operation was performed, in order to reduce the cost of generator power systems, selecting the generator inexpensive, tested characteristics. Next, the study of the protection circuit of a lead-acid battery in a place that is not from an external power supply in actual experiment.

As the result, the alternator, power generation efficiency increases as the rotational speed increases. However, it was found that the alternator power generation efficiency was low in comparison with the generator using a permanent magnet. It was found that the alternator could be used to protect the storage battery circuit enough when excess power. When the generated power was insufficient, it was found that the circuit could be protected from the discharge end voltage of the battery.

**Keywords:** Power generation system, Storage battery

## 1. はじめに

我々は生活のあらゆる場面において様々なエネルギーの恩恵を受けて暮らしている。18世紀の産業革命以降のエネルギー消費の大きな変遷として、人類は石炭や石油などの化石燃料を消費し始めた。次に、1950年代に中東やアフリカに相次いで大油田が発見され、エネルギーの主役が石炭から石油へと移行した。さらに、1970年代に原油価格の急激な高騰が起き、石油危機ともいわれ、日本でも経済に大きな打撃を受けた。日本ではトイレットペーパーの買占め騒動や、ガソリンスタンドの休日休業やネオンサインの夜間23時までの制限がかけられるなどと、省エネルギー化が薦められた。石油危機を契機に世界的なエネルギー節減運動が行われるものの、1980~90年代に入ると、ライフスタイルの変化や原油価格の低下などを背景に、再び化石燃料の使用が増加してきた。これにより、熱効率の良い内燃機関の発達を促し、さらなる産業の高度化につながった。

このように化石燃料は、我々の生活に必要なエネルギーを作り出すための重要な資源として利用されてきた。しかし、大昔の動植物の死骸が長期間かかって変化した地下資源には限りがある。専門機関の調査によると、地球全体の石炭埋蔵量は9,800億トン、石油の埋蔵量は11,500億トンと推定されている。石炭やウランは100余年ほど供給可

能であるが、石油や石炭はこのままのペースで使用し続けると約半世紀ほどで枯渇してしまうと言われる。

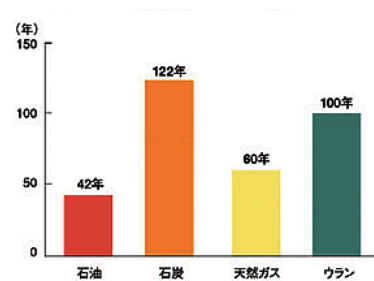


図1 化石燃料の可採年数

ここで、水力エネルギー、すなわち水力発電について述べる。太陽光発電や風力発電は日光の日射量や風況に大きく左右され、出力が不安定という欠点がある一方で、水力発電は落差のあるダムを利用し、水を下方に流して発電用の水車を回転させて発電を行う仕組みが一般的であり、落差さえあれば発電することができるため、水車を設置できる範囲もかなり広い。更に、安定した運転が可能で、エネルギー密度が高いのが特徴である。しかし、記述した水力発電のデメリットは、大規模な水力発電においてダム建設による周辺地域の自然環境の破壊や生態系への影響が懸念されていることである。さらに、長年使い続けているとダムの底に土砂が溜まってしまい、発電量が減るなどの諸問題も数々挙げられる。そこで近年注目されているのがダ

a) 電気電子工学専攻 大学院生

b) 電気システム工学科 教授

ムを必要としない流れ込み式の小水力発電である。この小水力発電は山間部や農業用水路、中小河川や上下水処理施設など幅広い箇所の水資源を利用した取り組みが行われている。小水力発電でも落差が大きく、水の流量が豊富な箇所であれば、理論上、数百 kW の発電が可能である。エネルギー利用効率の向上が進み、かつ未利用エネルギーの活用が重視されているため、小水力発電の推進は大きな効果を寄与するための提案事項である。

本研究では、小規模な水資源を利用した発電システムに関する研究を行った。まず「低コスト運用へ向けたシステムの検討」として、実際の発電システムの発電機のコストの削減を図るために、安価な発電機を選択し、特性試験を行い、流用の妥当性の判断を行った。次に、外部より電源供給のない場所での鉛蓄電池の保護回路の検討、実証実験を行った。

## 2. オルタネータの特性試験

### 2.1 実験方法

本実験では、オルタネータと各装置を一軸に接続した実験装置を使用した。実験装置の内訳として、まずオルタネータの動力源として電磁ブレーキ付きサーボモータ (KEYENCE 社製, SV-B100AK) を使用する。また、オルタネータの回転数を増加させると内部のロータコイルの回転運動によりトルクが生じる。そこで、回転軸トルクセンサー (小野測器製, SS-500) をサーボモータと一軸に接続し、同時にトルクの変化の測定を行った。このとき、回転数とトルクの表示計としてデジタルトルク演算表示計 (小野測器社製, TS-2700) を使用した。サーボモータと軸トルクセンサー、及びデジタルトルク演算表示計の仕様を表 3.1, 3.2, 3.3 にそれぞれ示す。なお、発電を行うためにはオルタネータのロータコイルに電流を流して励磁を行わせる必要がある。そこで、ステンレス製のバッテリー用ターミナルを用いて 12 V の自動車用バッテリー (GS YUASA 社製, STANDARD 38B19R) を励磁させる電源として使用した。具体的な実験手順を示す。本実験で使用する実験回路を図 2 と図 3 にそれぞれ示す。今回は直巻発電と分巻発電の 2 種類の自励発電方式によってオルタネータの特性を行った。制御回路を介さずにオルタネータのロータコイルにバッテリーと可変負荷抵抗を接続し、オルタネータを 500~3000 rpm の範囲でサーボモータを使用して回転させる。その後、バッテリーとロータコイル間に接続されているスイッチを OFF にし、バッテリーを回路から切り離す。ここで、十分な回転数でオルタネータが回転しているとオルタネータ自身が励磁を行って自ら発電をするので、その際に負荷に流れる電流と負荷にかかる電圧を計測器でそれぞれ測定し、負荷消費電力を算出した。

この手順で負荷抵抗の値を 5, 10, 15  $\Omega$  と変化させたときの各パラメータを測定し、直巻発電と分巻発電の 2 種類の発電方式の場合で上記の比較を行った。ここで、ロ

ータコイルにバッテリーを直接接続させると励磁電流が大きくなり、オルタネータが損壊してしまう恐れがある。そのため、バッテリーとロータコイルの間に電流制御用の抵抗 (4.8  $\Omega$ ) と、バッテリーへの電流の逆流を防ぐために整流ダイオードをそれぞれ接続した。

なお、実験で得られた消費電力からオルタネータの発電効率を求めることが出来る。式(1)に発電効率の式を示す。

$$\eta = \frac{V \times I}{2\pi \times \frac{N}{60} \times T} \times 100 \quad (1)$$

この式(1)を用いて、直巻発電と分巻発電の 2 種類の自励発電の場合での発電効率を算出し、最終的に両者を比較することで、オルタネータの発電特性及び超小型エネルギー回収装置への流用の妥当性を検証した。

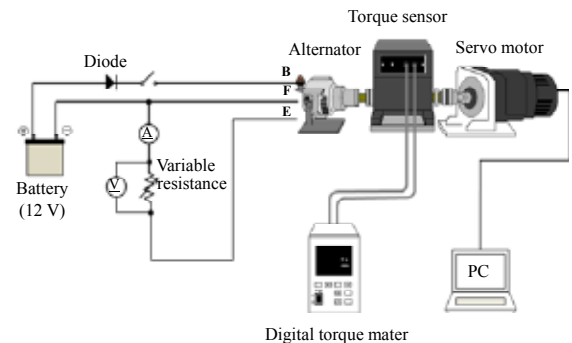


図2 オルタネータの直巻発電の接続

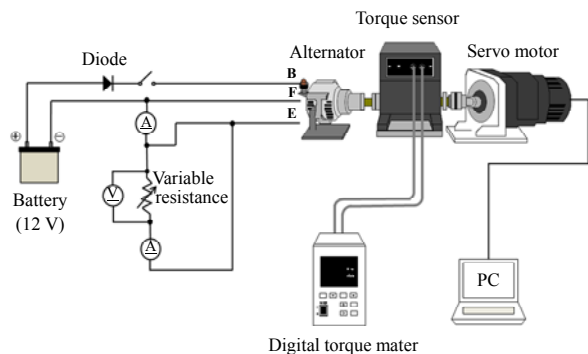


図3 オルタネータの分巻発電の接続

### 2.2 実験結果

オルタネータは、ある程度の回転数が得られないと発電を行わない仕組みであることがわかっていった。そこで、各負荷抵抗値における発電開始回転数に注目する。表 1, 2 に直巻発電と分巻発電の各負荷抵抗値別の発電開始回転数をそれぞれ示す。今回の特性試験にてオルタネータが少ない回転数で発電が可能であるのは分巻発電時であった。直巻発電時では負荷抵抗値の増加に従って発電開始回転数の増加が確認されたが、分巻発電時ではそのような傾向が確認されなかった。

表 1 直巻発電時の各負荷抵抗値の発電開始回転数

負荷抵抗値 [Ω]	5	10	15
回転数 [rpm]	1200	1600	2200

表 2 分巻発電時の各負荷抵抗値の発電開始回転数

負荷抵抗値 [Ω]	5	10	15
回転数 [rpm]	800	500	600

オルタネータの回転数と、オルタネータによる負荷電流と負荷電圧の関係を図 4、5 にそれぞれ示す。負荷電流値は、負荷抵抗値の減少に伴って増加したことが確認された。これにより、負荷抵抗値を調節することで、負荷電流値の増減の調節も可能であることが分かった。しかし、測定された負荷電圧値に関して、オームの法則に従えば負荷抵抗値の増加に伴って負荷電圧値は増加するが、今回の試験ではそのような傾向が確認されなかった。なお、図 5 より負荷抵抗値が増加するに従い、負荷電圧の上昇率が増加していることが分かる。

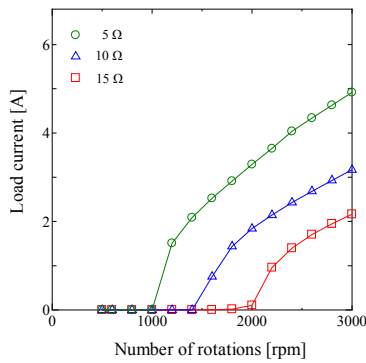


図 4 負荷電流の変化(直巻発電時)

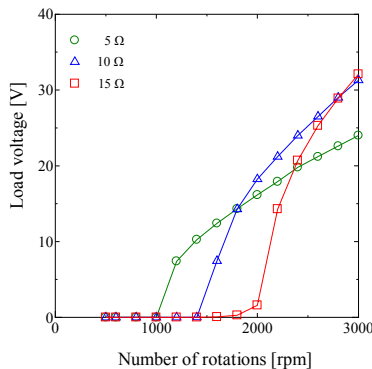


図 5 負荷電圧の変化(直巻発電時)

次に、図 6 にオルタネータの回転数と負荷電力の関係を示す。図 6 より、発電が開始されると負荷電力は回転数に比例するように増加する傾向が見られた。

また、測定した励磁電流とオルタネータのトルクの関係を図 7 に示す。通常、負荷電流とトルクは比例の相関があるが、直巻発電時は負荷電流と励磁電流は同等の関係にあるので、各負荷抵抗値において励磁電流とトルクが比例し

ているということが確認された。なお、負荷抵抗値の減少に従ってトルクが増加する傾向が見られた。

先述した負荷電力、及び(1)式を用いて直巻発電時の発電効率を算出した。直巻発電時の発電効率の推移を図 11 に示す。直巻発電時では負荷抵抗値が 15 Ω で、かつオルタネータの回転数が 3,000 rpm のとき、最大で 31% の発電効率を示した。この結果から、直巻発電方式でオルタネータを発電機として流用する場合、負荷抵抗の値を大きくすることで発電効率の増加が期待出来るものと考えられる。

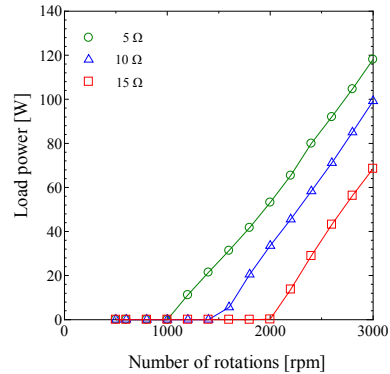


図 6 負荷電力の変化(直巻発電時)

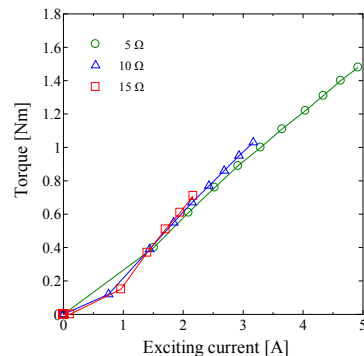


図 7 励磁電流とトルクの関係

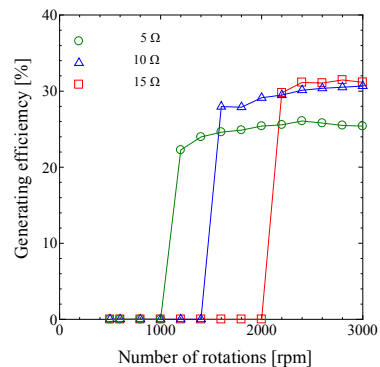


図 8 直巻発電時の発電効率

分巻発電時の負荷抵抗値別におけるオルタネータの発電開始回転数は、直巻発電時の場合と共に表 2 に既に示した。

次に、分巻発電時のオルタネータの回転数による負荷電流と負荷電圧、負荷電力の変化を図 9、10、11 にそれぞれ示す。直巻発電と同様に、負荷電流値は抵抗値の減少に

伴って増加し、かつオルタネータの回転数に比例していることが確認された。一方、負荷電圧では直巻発電の場合とは異なり、負荷電流と同様にオルタネータの回転数に比例し、なおかつ負荷抵抗値を増加させることによって僅かに負荷電圧値が増加していることが確認された。負荷電力値についても直巻発電とは異なり、放物線を描くような増加の傾向が見られた。

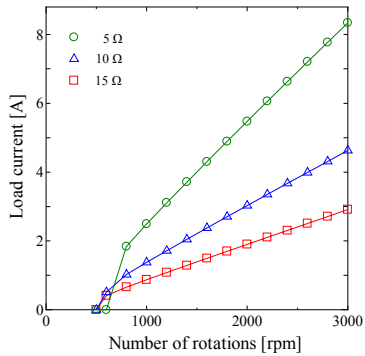


図9 負荷電流の変化(分巻発電時)

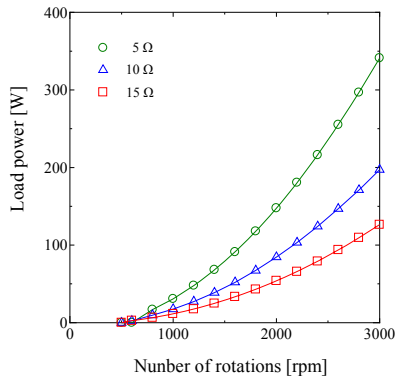


図10 負荷電圧の変化(分巻発電時)

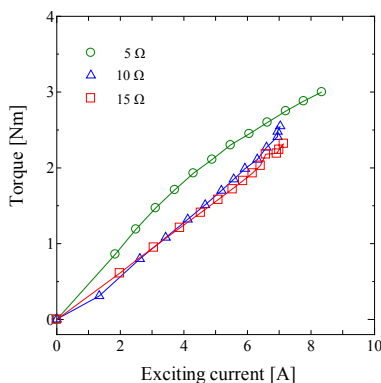


図11 負荷電力の変化(分巻発電時)

分巻発電時の励磁電流とオルタネータのトルクとの関係を図12に示す。分巻発電では直巻発電とは異なり、負荷電流と励磁電流は等しい関係ではない。しかし、分巻発電時のトルクは負荷抵抗値の減少に伴ってトルクが増加するといった傾向があり、これは直巻発電時の場合でも同様である。

分巻発電時の発電効率の推移を図13に示す。算出方法は直巻発電時の場合と同じである。分巻発電時では、負荷

抵抗値が5 Ωのとき最大で36%の発電効率を得られた。分巻発電の場合は直巻発電とは全く異なり、負荷抵抗値を減少させることで発電効率の向上が可能であることが分かった。なお、今回の試験にて、直巻発電時と比較すると発電効率は分巻発電時のほうが高い結果となった。

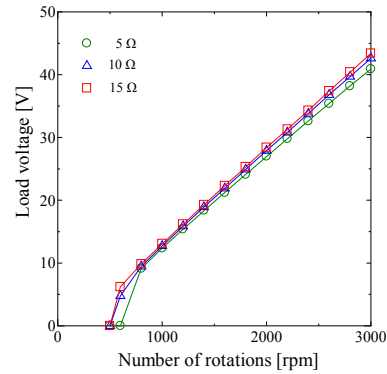


図12 励磁電流とトルクの関係

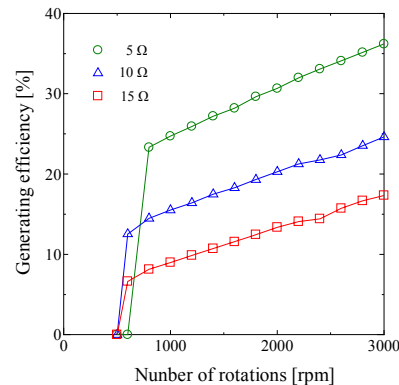


図13 分巻発電時の発電効率

本実験では、実際に設置している小水力発電システムの発電機のコストを下げるために汎用の自動車用オルタネータを選択した。そして、オルタネータが発電システムの発電機として適切であるかを判断するために特性試験を行った。オルタネータの特性試験をするにあたり、定格以下の回転数でも測定が可能で、かつ出力を増加させることを目的として内部に組み込まれている制御回路を分離させて実験を行った。なお、本実験では自励発電である直巻発電と分巻発電の2種類の発電方式で調査を行った。結果、直巻発電時では1,200 ~ 2,200 rpmの範囲で発電が開始された。分巻発電時では3種類の負荷抵抗値のどの場合でも1000 rpm以内で発電が開始された。発電電力について、直巻発電時は最大で118 W、分巻発電時は最大で341 Wの発電電力が測定された。また、両方の発電方式の場合においても負荷抵抗値の減少に従って発電時に発生するトルクが増加することが確認された。

直巻発電時では負荷抵抗値を大きくすることで発電効率が向上した。一方、分巻発電では負荷抵抗値を小さくすることで発電効率が向上した。今回の2種類の自励発電方式で得られた最大発電効率は、分巻発電時の36%である。



しかし、直巻発電と分巻発電のそれぞれの発電効率は共に 40 %以下であり、約 60 ~80 %程度が発電過程で起きる損失と考えると、効率としてはかなり小さいものである。この原因としてオルタネータの機械的損失や、ロータコイルの励磁に発電電力が大きく使用されるため、このように大きな損失が生じてしまったものと考えられる。

### 3. 放電制御回路

#### 3.1 シミュレーションによる検討

ここで、実際の現場で使用する場合、オペアンプで使用する電源電圧は鉛蓄電池を使用する。制御で消費する電力を少なくするために、制御で使用する電圧を低くする。これらを考慮した放電制御回路の設計を行った。LTspice を使用してシミュレーションを行った。余剰電力が増加した場合に制御を行うために蓄電池の電圧により電球に電力を供給し電力を消費するようにした。今回シミュレーションを行った回路図を図 14 に示す。

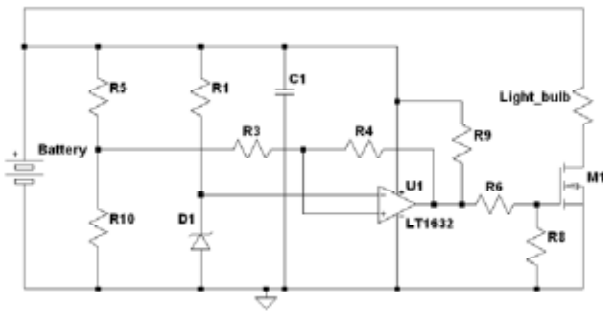


図 14 シミュレーション回路

回路の構成は、スイッチを ON/OFF を切り替える値に余裕を持たせるためにヒステリシスを持たせて、比較機による蓄電池の電圧と基準電圧の比較を行う。次に、鉛蓄電池の電圧の上昇により蓄電池の電圧が基準電圧より、高くなった場合にスイッチである MOSFET に信号を送り、電球を動作させる。逆に、鉛蓄電池の電圧が減少した場合、シミュレーションを行ったところ、ヒステリシスを持たせてスイッチの ON/OFF の切り替えを行うことができ、電球で電力を消費させることができたことがわかった。

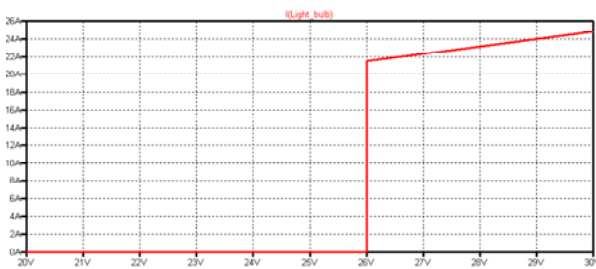


図 15 電圧の上昇時の電球に掛かる電圧

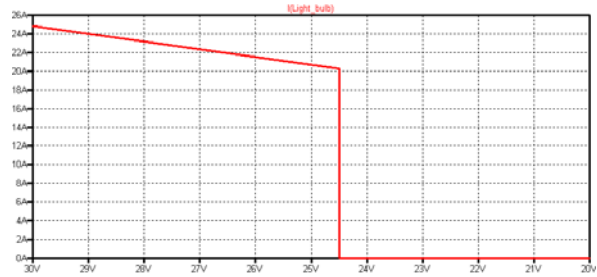


図 16 電圧の減少時の電球に掛かる電圧

#### 3.2 実験方法

模擬発電装置を使用して、発電機の回転数を一定にして、ハイブリッドコントローラに電力を供給するようにした。ハイブリッドコントローラは発電電力より負荷電力が少ない場合、鉛蓄電池電圧と負荷電圧が上昇してしまい制御ができなくなる。その為、余剰分の電力を消費する必要がある。余剰分を消費するために作製した放電制御回路の動作実験を行った。この回路は  $R_3$  と  $R_4$  の比によって任意の入力電圧を作り出し、 $R_1$  と  $R_2$  の比によって任意のヒステリシスを持たせることができる。回路は電圧が上昇した時に 26[V]でスイッチが ON となり、減少時に 24.5[V]で OFF となるように設定した。放電制御回路はハイブリッドコントローラと鉛蓄電池間に接続し、鉛蓄電池電圧を制御する。測定方法として、消費電力を発電電力が上回る条件の発電機の回転数にし、1 分毎に測定し、20 分間計測した。

#### 3.3 実験結果

図 17 に時間ごとの鉛蓄電池電圧の変化を示す。

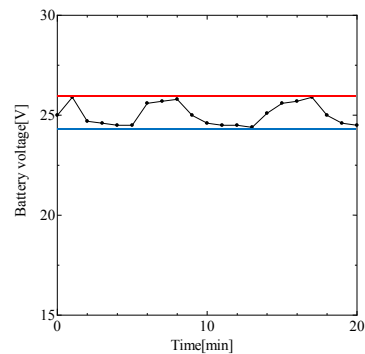


図 17 時間毎の鉛蓄電池の電圧の変化

鉛蓄電池電圧が上昇する時と減少する時では異なった値で MOSFET の ON/OFF を行い、電力を消費するための電球で余剰電力を消費することができた。スイッチの ON/OFF のタイミングがずれているのでスイッチの切り替えにヒステリシスを持たせることができた。余剰電力を消費することができたので、鉛蓄電池を過充電より保護できることがわかった。

## 4. 充電制御回路

### 4.1 シミュレーションによる検討

シミュレーションを行う為にMATLABのSim-Power-Systemsを使用してシミュレーションを行った。作製したモデルを図21に示す。鉛蓄電池電圧が減少した時に、ハイブリッドコントローラの負荷側への出力電力を鉛蓄電池にも供給する鉛蓄電池電圧の値で制御を行うモデルを作製した。作製したモデルは鉛蓄電池電圧と基準電圧を比較し、基準電圧よりも鉛蓄電池電圧が少ない場合に負荷出力と鉛蓄電池間を接続しているサイリスタに信号を送り、サイリスタを動作させ、負荷出力から鉛蓄電池に電力を送る。

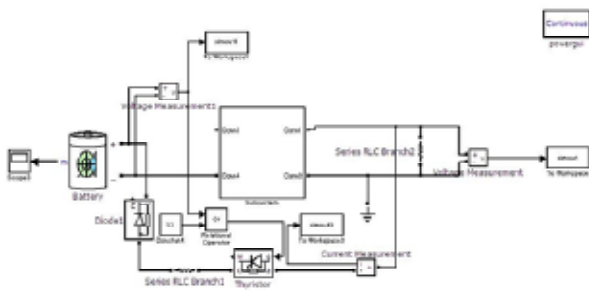


図18 充電制御回路のシミュレーション図

### 4.2 シミュレーション結果

図19に鉛蓄電池電圧の変化のシミュレーション結果を示す。

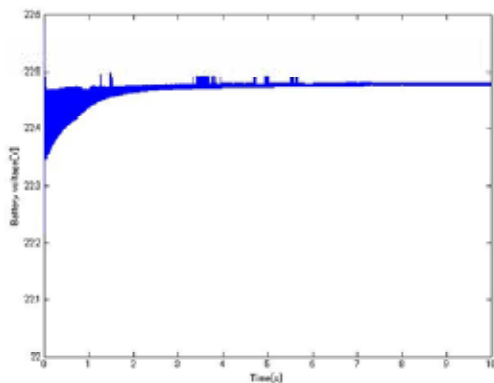


図19 シミュレーション結果

シミュレーションでは鉛蓄電池の電圧が22Vから始めた。22Vから始め、基準電圧と鉛蓄電池電圧を比較し、サイリスタに信号が入力されてサイリスタが動作し、負荷出力側から電力を供給することができ、鉛蓄電池電圧が上昇していくのが確認できた。22.4V以上に上昇しないことがわかった。しかし、鉛蓄電池の放電終了電圧である21.6Vより高い電圧で動作し、鉛蓄電池を保護する目的として十分であることがわかった。

## 5. 結論

本研究では、外部からの電源を使用しない場合に小水力発電システムの構築を行うために、低コストの運用に向けた発電機の検討と蓄電池の保護回路の検討を行った。本研究では以下のことを行った。

まず、低コスト運用に向けた発電機の検討に向けて、オルタネータの特性試験を行った。オルタネータの特性試験では、今回行った2種類の試験において、発電電力の大部分がロータコイルの励磁に使用されるため、両者とも40%以下のような低い発電効率という結果となった。実際に使用される発電機の発電効率は約60~80%程度であり、オルタネータの発電効率はこの発電効率の半分程度であることがわかった。オルタネータを使用した小水力発電システムでは、永久磁石による発電機より発電効率が悪くなるが、コストを下げることができると思われる。

次に、放電制御回路の検討では、鉛蓄電池の電圧が上昇する時と減少する時では異なった値でスイッチのON/OFFを行い、電力を消費するための電球で余剰電力を消費することができた。余剰電力を消費することができるので、バッテリーを過充電より保護できることが分かった。

最後に、充電制御回路の検討では、負荷出力側から電力を供給することができ、鉛蓄電池の電圧が上昇していくのが確認できた。22.4V以上に上昇しないことがわかった。しかし、バッテリーの放電終了電圧である21.6Vより高い電圧で動作し、バッテリーを保護する目的として十分であることが分かった。シミュレーションのみの検討なので、実装回路を作製し、実証試験を行う必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は、農林省 平成22年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業(研究代表者: 宮崎大学農学部助教日吉健二)の一環として行われた。本研究の実施に際して、貴重なアドバイスを頂いた宮崎大学農学部助教日吉健二先生に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 平成19年度版 環境循環型白書  
<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h19/index.html#index>.
- 2) 京都議定書の概要  
<http://www.env.go.jp/earth/cop6/3-2.html>.
- 3) 中島羊介, 「勇払東部地区における小水力発電の検討」, 農業農村工学会北海道支部, pp.96-101, 2010年.
- 4) 産総研 ホームページ  
<http://www.aist.go.jp>.
- 5) 市川 裕一, 「アナログ基本回路の設計と製作」, 誠分堂新光社, pp.232-238.
- 6) 岡村 勉夫, 「OPアンプの設計」, CQ出版, pp.31-32.