

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656181

研究課題名(和文) エネルギー・ハーベスティングの高効率化限界の追求

研究課題名(英文) A Study on Highly Efficient Energy Harvesting Circuits and Systems

研究代表者

石原 昇 (Ishihara, Noboru)

東京工業大学・ソリューション研究機構・教授

研究者番号：20396641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：極限までの環境エネルギー活用を可能とするエネルギー・ハーベスティング(EH)回路の高効率化限界の追求を目的として研究を推進し、(1)微弱な無線信号エネルギー(電磁波)の収穫を可能とするEH回路の構成法、設計法を明確化し、集積回路試作により微弱無線信号エネルギーの収穫に成功、(2)蓄電池への充電を可能とする高出力電圧昇圧回路について集積回路化の検討を行い、トランジスタの耐圧を越える高電圧出力回路を実現、(3)異種ハーベスタを多数集積化した「発電木」を提案、(4)自律分散制御技術によるエネルギーマネージメント技術を明確化、さらに(5)「発電木」実現のための設計環境を構築するなどの成果を得た。

研究成果の概要(英文)：To utilize the environmental energy (EE) extremely, an energy harvesting (EH) circuit techniques were pursued and following results were obtained. (i) An EH CMOS circuit that can convert a weak radio frequency energy to electric power was clarified and its validity was confirmed by fabricating the circuit with a 0.18-um CMOS technology. (ii) In order to charge energy harvested to a storage battery, a high-voltage output dc-dc up-converter is required. A dc-dc up-converter with the COMS technology was studied and the circuit that can output a high voltage exceeding transistor's breakdown voltage was invented. (iii) An energy generation tree system (EGTS) that is integrated with different kinds of the energy harvesters was suggested to utilize the EE extremely. (iv) Autonomous distributed system controlling technique was clarified for the generic tree energy management. (v) And to implement the EGTS, the circuit and system design environment was built with the circuit simulator, SPICE.

研究分野：電気電子工学

キーワード：エネルギーハーベスティング RFエネルギー 昇圧回路 集積回路 自律分散制御 環境エネルギー
異種エネルギー統合

1. 研究開始当初の背景

社会で消費するエネルギーを低減し、それらを自然/環境エネルギーで賄うことは未来社会に向けた課題、取り組みとして必然の流れである。近年、集積回路技術の微細化により電子回路の低電力化が進んだ。ワイヤレスセンサ回路などでは微弱な環境エネルギーでの動作が可能となりバッテリーレス化の検討が進められている。さらに個々のハーベスタから得られる環境エネルギーは微弱ではあるが、多種多数のハーベスタを集積化し蓄電すれば、大電力となり各家庭での電力自給も可能となる。このためには、超微弱な電力であっても無駄にせず可能な限り収穫できるエネルギー・ハーベスティング回路の実現が必要である。

2. 研究の目的

本研究では極限までの環境エネルギー活用を可能とするエネルギー・ハーベスティング回路の高効率化限界の追求を目的とした。

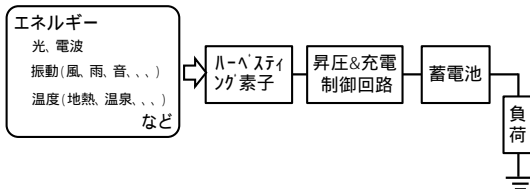


図1 エネルギーハーベスタの基本構成

3. 研究の方法

図1にエネルギーハーベスタの基本ブロック構成を示す。環境に存在する光や電磁波、振動、温度などのエネルギーを、ハーベスタ素子により電気エネルギーに変換、その電圧を昇圧し蓄電池に蓄える仕組みである。本研究では、主に以下の項目について検討を進めた。

(1)高感度ハーベスタ回路技術

放送や無線通信における電磁波は情報のキャリアとして使われてきたが、それらはエネルギーであることが再認識されハーベスティング対象の1つとなっている。本研究では、微弱なエネルギーを活用する技術の1つとして、電磁波エネルギーのハーベスティングに着目し、一般的なチャージポンプ型昇圧回路のクロック信号端子に電磁波を注入し、そのエネルギーをハーベスティングする回路の構成法、設計法を明らかにし、高感度化を追求することとした。

(2)CMOS 集積回路チップ化の検討

また、ハーベスティング回路は、CMOS集積回路化を念頭に、低しきい値 MOS トランジスタによるスイッチ回路構成を明らかにし、従来のダイオードスイッチより損失の少ないハーベスタ回路を明確化することとした。集積回路プロセスは、高電圧動作が必要となることから、0.18~0.5 μm CMOS 技術を想定し検討を進めることとした。

(3)異種ハーベスタによる相互補償回路技術
異種ハーベスタからのエネルギーの蓄積法、その蓄積エネルギーを効率的に活用するための最適制御法、回路の構成法、設計法を回路シミュレータの活用により検討することとした。

(4)高効率エネルギー蓄電システム「発電木」の設計と試作

太陽電池などは植物の葉の並び方に着目しシステムを構成する検討が報告されている。太陽光だけでなく、木々は風や雨の力を吸収する力を備えている。木々などの植物の性質に学び、提案する回路技術とともに異種ハーベスタによる高効率発電を可能とする「発電木」の構成法、設計法を明らかにし、その有効性を試作評価により実証することとした。

4. 研究成果

(1) 無線エネルギー・ハーベスティング回路 (RF-EH)

ディスクリート部品による EH

低しきい値のショットキーバリアダイオード (SBD) を用いた EH 回路の基本検討を実施した。図2に回路構成を示す。RF 信号をアンテナで受信し、整合回路で整流回路との電力整合を取り、SBD による整流動作により電圧出力を得る。無線 LAN 等で使用されている 2.4GHz の RF 信号の入力を想定し回路設計を行なった。図3に入力電力対出力電圧特性の評価結果を示す。-20dBm の RF 信号入力時で、0.1V 程の電圧出力が得られている。入力信号電圧感度としては 22mV となった。

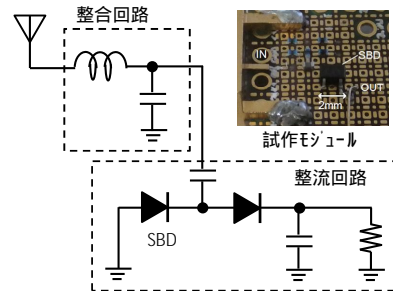


図2 SBD による RF-EH 回路

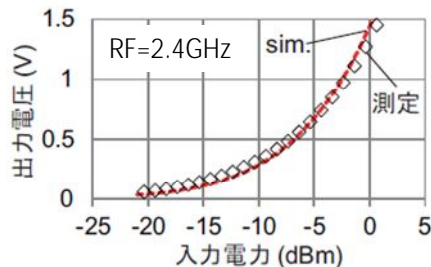


図3 入力電力対出力電圧

RF-EH 集積回路チップ

蓄電池に蓄電するためには、さらなる高電圧出力が必要となる。そこで、図4に示す多

段チャージポンプ昇圧回路を付加した EH 構成を考え高効率化のための最適設計を行なった。また、回路は $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS プロセス技術により集積回路チップ化した。チップ回路のコアサイズは、 $80\ \mu\text{m} \times 290\ \mu\text{m}$ ほどである。図 5 に入力電力対出力電圧特性の評価結果を示す。1V 以上の出力を得るのに図 2 の構成では -2dBm 以上の入力電力が必要であったのに対し、-13dBm の小信号入力でも 1V の電圧出力を可能とした。

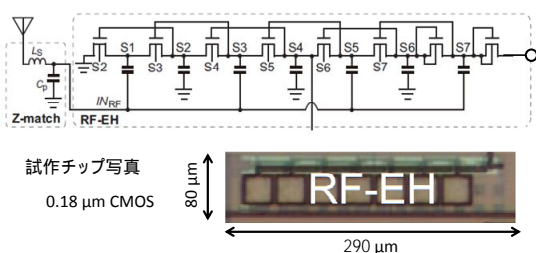


図 4 RF-EH 回路と試作チップ (コア部)

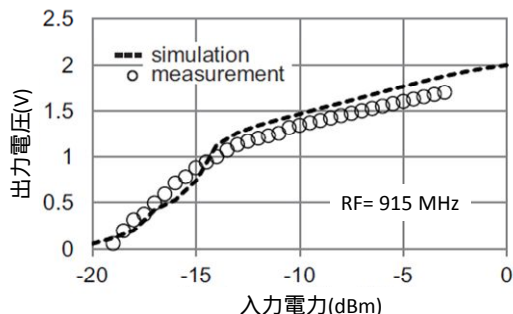


図 5 入力電力対出力電圧特性

(2) 高電圧出力昇圧回路技術

トリプルウェルトランジスタによるチャージポンプ昇圧回路構成

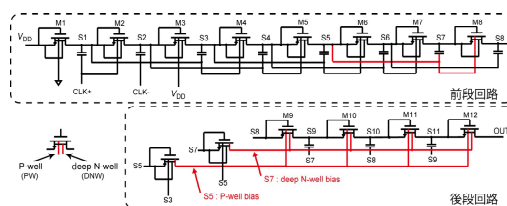
充電電圧の高い鉛蓄電池 (12V) への充電を可能にするには、更なる昇圧が必要となる。そこで、 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS プロセスで 12V 以上の高電圧出力を可能とする回路の検討を行った。一般に最大電圧出力はトランジスタの耐圧特性により制限される。 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS トランジスタの耐圧は、9V 程度のため 12V 以上の出力は通常困難である。そこで、トリプルウェル構造のトランジスタを採用し、そのバックゲートバイアスを最適化することにより、トランジスタの耐圧を越える高電圧出力を可能とする回路の構成法、設計法を明らかにした。

図 6 (a) に昇圧回路構成を示す。前段部と後段部からなる。前段部ではトランジスタの耐圧レベルまで昇圧を行い、後段部ではトランジスタのバックゲートを前段部の昇圧電圧でバイアスすることにより、後段部のトランジスタのブレークダウンを防止し、トランジスタの耐圧以上の高電圧出力を可能とした。

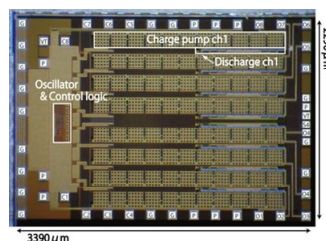
集積回路チップの試作評価結果

この回路技術を実証するため、 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS による回路試作を行った。図 6 のチップ写真に示すように、昇圧回路を 8 回路集積化し、複数の異種ハーベスタからの電圧信号を昇圧できる構成とした。

図 7 に入力電圧と出力電圧の関係の評価結果を示す。従来の回路構成では、10V が限界であったが試作回路では、20V 以上の高電圧出力が可能となっている。これにより高入力電圧を必要とする鉛蓄電池などへの充電が可能となる。最小入力電圧は、昇圧用のクロック生成回路の動作条件に制限され、今回の試作では 2.5V となったが、クロック生成回路の低電圧化の工夫により入力電圧 1V 以下の動作化は可能である。



(a) トリプルウェルトランジスタによるチャージポンプ型昇圧回路



(b) 8チャンネル昇圧集積回路チップ

図 6 高電圧出力昇圧回路と試作チップ

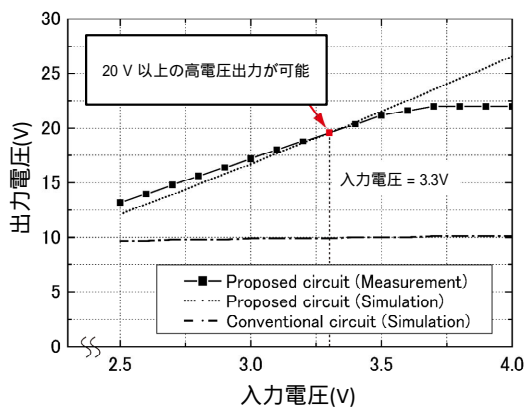


図 7 入力電圧対出力電圧特性

(3) 異種ハーベスタによる相互補償回路技術

異種ハーベスタによる蓄電システム

図 8 に異種ハーベスタによる蓄電システムのブロック構成を示す。発電デバイスにより発電能力が大きく異なることから、ハーベスタの種類ごとに蓄電池を設け、それぞれの蓄電池の蓄電量 (SOC: State of Charge) を比較し、SOC が最も大きいバッテリーを選択し、負荷へ供給する。このような制御は、マイコンによる集中制御により実現可能であるが、

システムが大型化すると管理が複雑化し増設等のメンテナンスが難しくなると考え、本研究では自律分散制御によるエネルギーマネジメント技術にチャレンジした。

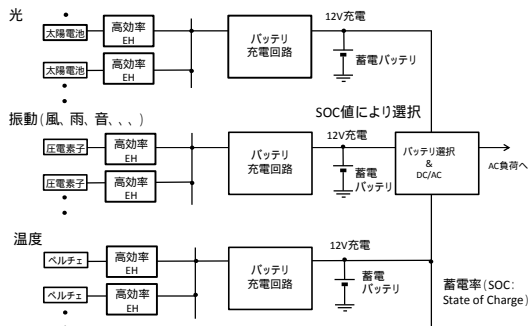


図8 異種ハーベスタによる蓄電システム

自律分散制御

自律分散制御とは、自律的に行動する各要素の相互作用によって系全体を制御するもので、集中制御端末を必要としない特長を有する。

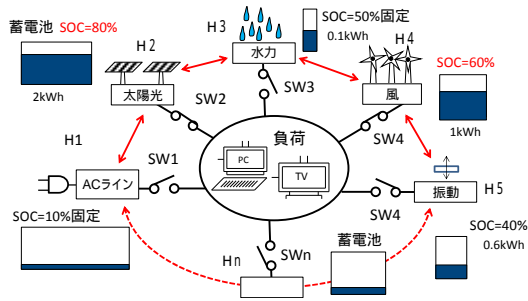


図9 自律分散制御による電力供給

図9は蓄電池のSOCを活用した自律分散制御による電力供給システムの構成例である。各ハーベスタは隣接するハーベスタとSOCを比較し、SOCの値が大きければ負荷へエネルギーを供給する。このようなシンプルな制御条件により負荷へ供給可能な電力が自動的に選択され系全体が自動的に制御される。なお、ACラインは各ハーベスタの蓄電池が枯渇してしまった場合の負荷への電力供給源として想定している。

この自律分散動作を確認するため、原理確認シミュレーションを行った。図10に解析結果例を示す。初期状態では各ハーベスタの蓄電池は無充電(SOC=0)とし、適宜、各ハーベスタ回路により蓄電されて行く様子を解析した。負荷への電力供給は、SOC>20%以上で、隣接蓄電池よりも大きい時の負荷へ電力を供給する単純な制御ルールを適用した。その結果、初期段階では、ACラインより負荷へ電力が供給されているが、蓄電池にエネルギーが蓄えられるに従って負荷への電力供給が、ACラインから太陽光、風力などへ自動的に移行していることが分かる。

図11は72時間経過後の解析結果で、定常状態ではACラインに頼ることなく各ハーベスタからの電力で負荷への電力が賄える結果を得た。隣接するハーベスタとの連携動作のみで、系全体を制御できることを確認した。

本自律分散制御は、簡単な制御ルールで拡張性が高く、マイクログリッドなど、小規模から大規模レベルまでの電力自給システムの運用にも有効である。

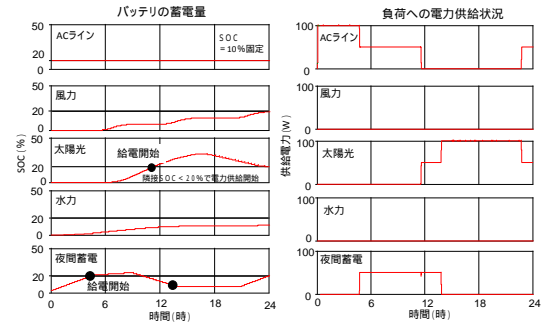


図10 自律分散制御による電力供給動作 (初期状態：負荷電流1A)

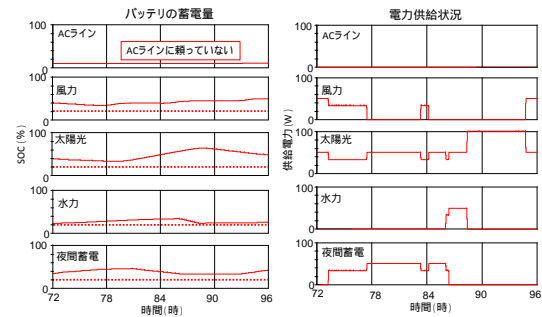


図11 自律分散制御による電力供給動作 (定常状態：負荷電流1A)

(4)高効率エネルギー蓄電システム「発電木」の検討

発電木の構成

図12に「発電木」の構成イメージを示す。これは多種多数のハーベスタを樹状に展開し、図8で示した蓄電システム構成を採用し、環境のエネルギーを最大限に活用するシステム構成案である。

太陽光パネルなどは植物の葉の並び方(葉

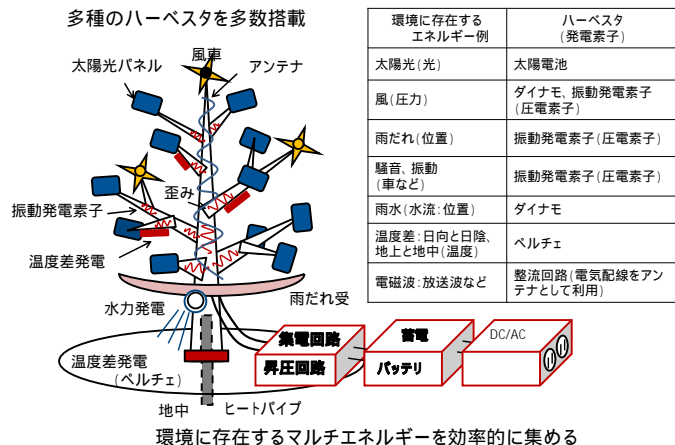


図12 発電木の構成イメージ

序)に学び、方角、角度を設定し、通年で高い発電量を得られるよう配置する。風の力は風車を利用するほか、風雨で枝に加わる力は圧電素子により発電する。太陽光パネルの表裏の温度差、地温と気温の温度差はペルチェ素子を利用する。雨水は位置エネルギーを利用し水車により発電する。また、電磁波エネルギーに関しては、配線をアンテナとして利用し、4.1節で述べたRF-EHを活用できる。

「発電木」は樹状形状のため、少ない占有面積で小型の発電デバイスを多数集積化しやすく、また芸術的な3次元デザインの導入により環境に溶け込ませることが可能と考える。家庭における人工のシンボルツリーとして、郊外では森林状にシステムを展開した発電所として、農場ではIT農業用の自給電源としての活用が期待される。

シミュレーション環境の構築

「発電木」実現のためには、多種多量のハーベスタを用いた発電回路設計が必要となる。しかし、調査の結果、これまでの発電システムの設計は集積回路設計に比べるとコンピュータによる最適設計手法が確立されていない。

システムシミュレーションを可能とするツール(シミュレータ)の開発は、一般的なC言語やBasicなどのプログラミング言語、MathematicaやExcel、MATLABなどの数値解析ソフトによる開発が可能であるが、プログラミングに時間を要するとともに、汎用化、標準化が難しい。

そこで、本研究では、「発電木」の実現にむけ向け回路シミュレータ(SPICE)によるシミュレーション環境の構築を目指した。回路シミュレータは、主に集積回路設計やプリント基板回路などの弱電回路の設計に用いられてきたが、発電回路設計への拡張を図ることとした。

発電回路シミュレーションの課題

SPICEで発電回路シミュレーションを実現するための課題は以下の通りである。

(a)デバイスのモデリング

太陽光パネル、圧電素子、ダイナモモータや蓄電池などのデバイス特性を含めたシステムのシミュレーションを行うための解析モデルを作成する必要がある。

(b)解析時間

電子回路の設計では、1秒時間以下の動作解析が主であるが、発電回路の解析では、時間単位となるため、回路設計と同様の解析条件を適用すると膨大な解析時間を要する。

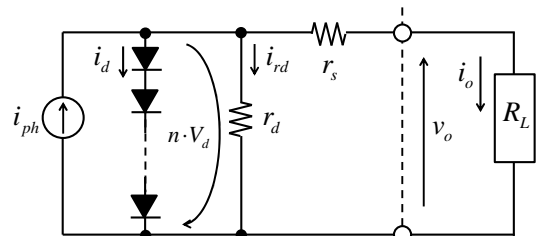
そこで、解析時間に関しては、シミュレータ上の1秒を1時間(3600倍)と捉え、発電回路シミュレーションを行うこととした。

太陽光による蓄電モデル

「発電木」実現のファーストステップとして、太陽光の発電システムを最適化するための解析モデルをSPICE上に構築した。

(a)太陽電池モデル

開放電圧24V、1W出力の太陽電池(AM-7S03)のモデリングを行った。図13に等価回路を示す。一般的なダイオードの縦続接続構成により出力の電圧電流特性を表現する構成とした。27段のダイオード縦続接続構成とし、出力抵抗値を最適化した。図14に電圧電流特性および出力電力特性のモデリング結果を示す。18Vの出力電圧で、最大1.1Wの発電が可能となっている。



$$\text{光電流 } i_{ph} = \eta \cdot P_{\text{Light in}} \quad \text{ダイオード電流 } i_d = i_s \left\{ \exp\left(\frac{q \cdot V_d}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right\}$$

$$\text{出力電流 } i_o \approx i_{ph} - i_s \left\{ \exp\left(\frac{q \cdot V_d}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right\} - \frac{n \cdot V_d}{r_d}$$

図13 太陽電池の等価回路

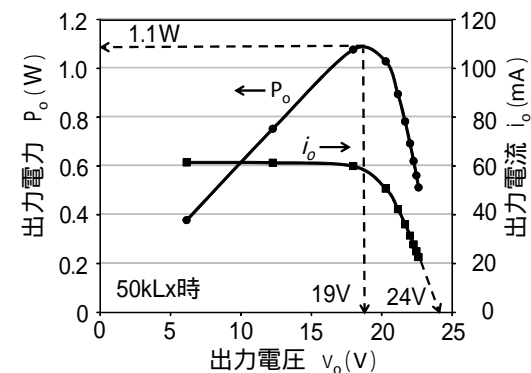


図14 太陽電池の電圧電流&出力電圧特性

(b)12V鉛蓄電池モデル

太陽電池からの電力を蓄える鉛蓄電池の充放電特性のモデリングを行った。SPICE上で取り扱いが可能な蓄電機能を有する素子はキャパシタであることから、キャパシタを鉛蓄電池として見立て、充放電特性のモデリングを行った。

蓄電量SOCと充放電電圧との関係性を考慮した。SOCは、キャパシタの端子間電圧(0~1VをSOCの0~100%に対応付)で表現することとし、SOCと充放電電圧の関係は、SPICEのルックアップテーブル(LUT)による換算機能により表現することとした。

図15に充放電時の蓄電池の等価回路を示す。シミュレータ上のキャパシタの値、充放電電流は、SPICEの解析時間1秒を1時間と見立て換算した。なお、図15では、充放電時の等価回路を独立に記したが、実際の回路シミュレータ上では電流の向きにより、それぞれの等価回路(LUT)が自動的に切り換わるよう構成した。

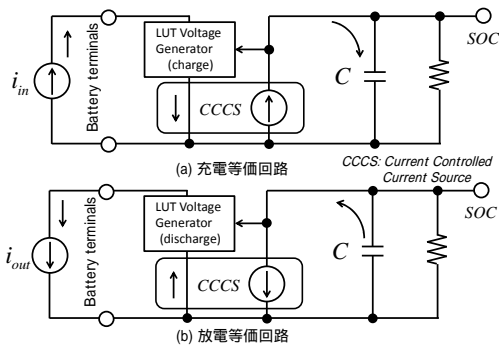


図 15 鉛蓄電池の充放電等価回路

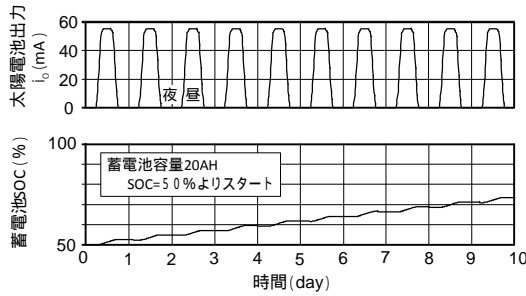


図 16 太陽光発電による蓄電の様子

(c)太陽電池と蓄電池間のインターフェース
 図 14 のシミュレーション結果から分かるように太陽電池からの供給電力が最大となる出力電圧は、通常、開放電圧の約 80%位の電圧になる。インターフェース回路では太陽電池の端子電圧が 19V (=24V x0.8) になるように電流を引き抜く回路を想定した。

(d)太陽光発電のシミュレーション結果
 以上、3 種のシミュレーションモデルを組み合わせ、日照パターンを想定した時の蓄電池への充電特性のシミュレーションを行った。その結果、日照パターンの繰り返しにより、図 16 の下図に示すように SOC が増加しエネルギーが蓄電されていく様子を模擬できた。

(e)他ハーベスタのシミュレーションモデル
 他のハーベスタを用いたシミュレーションもハーベスタのエネルギー変換特性をモデリングすることにより、同様の SPICE シミュレーションが可能となる。

(5)成果のまとめと今後の展開
 本研究で得た成果を以下にまとめる。
 無線エネルギー・ハーベスティング回路技術:微弱無線エネルギーの収穫を可能とする CMOS 集積回路の構成法、設計法を明らかにし、IC 試作により微弱無線信号エネルギーの収穫に成功した。
 昇圧回路技術:蓄電池への充電を可能とする高出力電圧昇圧回路について集積回路化の検討を行い、トランジスタの耐圧を越える高電圧昇圧出力回路技術を明らかにした。
 発電木の提案:環境エネルギーを最大限に活用する異種ハーベスタを多数集積化

した「発電木」構成を提案した。
 異種ハーベスタによる相互補償回路技術:自律分散制御技術による異種エネルギーのマネージメント技術を明らかにした。
 設計環境の構築:発電木の最適設計を可能とする回路シミュレータ (SPICE) ベースの設計環境を構築した。

今後も環境エネルギーを最大限に活用できる「発電木」の実現に向け、デバイスレベルからシステムレベルまでの研究開発を継続して行く予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 6 件)

- [1] 石原 昇, 伊藤 浩之, 益 一哉, 「発電木の提案と設計: SPICE による太陽光発電シミュレーション」平成 27 年電気学会全国大会, 2015 年 3 月 24-26 日, (東京都大学, 東京都世田谷区) .
- [2] 石原 昇, 板垣 智信, 菅沼 隆史, 島陰 豊成, 石橋 拓, 竹内 典和, 山下 暢彦, 横山 健児, 益 一哉, 「自律分散バッテリーによるマイクログリッドシステム制御」, 電子情報通信学会 2015 年総合大会, 通信講演論文集 2, p.331. 2015 年 3 月 10 日 (立命館大学, 滋賀県草津市) .
- [3] 白根篤史, 伊藤浩之, 石原 昇, 益 一哉, 「RF エネジーハーベスタにおけるインピーダンス変換回路に関する考察」, 電子情報通信学会アナログ RF 研究会, 2013 年 11 月 19 日 (東京工業大学, 東京都大田区) .
- [4] 高安 基大, 白根 篤史, 李 尚暉, 伊藤 浩之, 石原 昇, 益 一哉, 「MEMS スイッチ制御用昇降圧回路に関する研究」, 電子情報通信学会集積回路研究専門委員会, LSI とシステムのワークショップ, 2013 年 5 月 13 日-15 日 (北九州国際会議場, 福岡県北九州市) .
- [5] 白根篤史, 田野井 聡, 伊藤浩之, 石原 昇, 益 一哉, 「微細 CMOS プロセスを用いた MEMS 駆動用 26V 出力チャージポンプ回路」, LSI とシステムのワークショップ 2012, 2012 年 5 月 29 日 (北九州国際会議場, 福岡県北九州市) .

6. 研究組織

- (1)研究代表者
 - ・石原 昇 (ISHIHARA NOBORU)
 東京工業大学・リサーチ研究機構・教授、
 研究者番号: 20396641
- (2)連携研究者
 - ・益 一哉 (MASU KAZUYA)
 東京工業大学・ITナティア研究機構・教授、
 研究者番号: 20157192
 - ・伊藤 浩之 (ITO HIROYUKI)
 東京工業大学・精密工学研究所・准教授、
 研究者番号: 40451992