

マイクロプロセッサによる高効率スーパーキャパシタ 蓄電回路技術 - Power MOSFET による電流制御 -

中田 俊司^{†1}

Energy Storage Technology in Supercapacitors with High Energy Efficiency using a Microprocessor-Based Digital Control

Shunji NAKATA^{†1}

Abstract

In this paper, a circuit for adiabatically charging and discharging a supercapacitor is described. A microprocessor sets the duty ratio of the switching transistors that control the inductor current. Corresponding to the duty ratios, stepwise voltages are generated, and they enable adiabatic charging and discharging operation. Current measurements showed that the energy dissipation is reduced to one-eighth that for a constant-voltage charging.

Keywords: Energy storage, Supercapacitor, Adiabatic charging, Energy recovery, Dissipationless charging

1. はじめに

近年風力発電や太陽光発電のような再生可能エネルギーの利用が石油燃料に代わるエネルギー源として注目されている。しかしながら、これらの再生可能エネルギーは時間と共にエネルギー量が大きく変動するという問題点が存在している。時間により変動しない電力の平準化を行うためには、蓄電デバイスが必須である。

蓄電デバイスとして代表的なものに、リチウムイオン電池や電気二重層キャパシタなどのスーパーキャパシタがある。リチウムイオン電池は現在蓄電デバイスの中心として位置づけられている。電気自動車への搭載にも期待が高まっている。しかしながらリチウムイオン電池は単位体積当たりのエネルギー密度が大きいものの60%程度の深い放電を行うと充放電回数が1000回程度となるという短所が知られている¹⁾。仮に1日に1回充放電を行うような場合、3年未満の寿命となる。また風力発電の場合には、1日に10回以上充放電を行う事が起こりうるが、この場合において3ヶ月程度の寿命となる。これに対し、電気二重層キャパシタは電解液1分子程度の電気二重層という絶縁膜を利用したデバイスであり、この絶縁膜への蓄電・放電は100万回の繰り返しが可能である。このため、1日に10回の充放電であっても、ほぼ無制限に利用できるという特徴がある。

また、リチウムイオン電池は熱暴走の問題があり、安全性の点から注意を払う必要があるのに対し、キャパシタはこうした熱暴走の問題がない。

価格面では、1kwhあたりリチウムイオン電池と電気二重層キャパシタは、20万円および50万円となっている²⁾。今後の大量生産により両者の価格はより安価になり差異は低減すると考えられる。

上述のように、再生可能エネルギーを用いるスマートグリッドにおいてはエネルギー平準化が必要であり、その中で電気二重層キャパシタはリチウムイオン電池と共に今後重要な蓄電デバイスになっていくものと考えられる。

本論文では、電気二重層キャパシタに電気エネルギーを蓄電する際において、エネルギーロスを生じずに効率的に蓄電を行う回路技術について紹介する^{3,4)}。

2. キャパシタへの充電

パソコンやスーパーコンピュータに使用されているマイクロプロセッサは、CMOS (Complementary MOS; 相補型 MOS) 論理回路により設計されている。この回路は出力端子のキャパシタを充電・放電を行う事により論理処理を行っている。このとき、キャパシタの容量を C 、電源電圧の値を V とすると、充放電により CV^2 のエネルギ

^{†1} 近畿大学工学部電子情報工学科

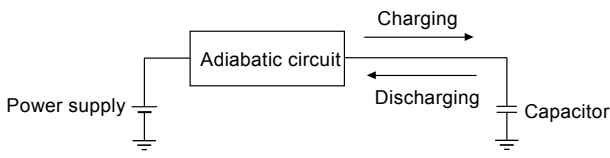


図1 断熱充電回路の概念

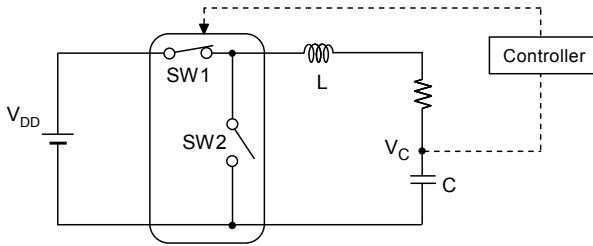


図2 トランジスタとインダクタによる断熱充電回路

一が消費されることが知られている。充電時には、静電エネルギー $CV^2/2$ がキャパシタに蓄えられ、この時に抵抗成分により静電エネルギーと同量の $CV^2/2$ がジュール熱として失われる。すなわち、充電時においては、静電エネルギーの2倍のエネルギーを要して充電が行われていることになる。放電時においては、この静電エネルギーが全て GND に流れ失われてしまう。

これに対し、キャパシタを準静的に緩やかに充電する手法（断熱充電）を用いると、抵抗成分によるジュール熱を理想的にはゼロとすることができ、高効率の充電を行う事が可能である。図1に断熱充電回路の概念図を示す。電源から緩やかにキャパシタに電流を流し充電を行い、放電時には緩やかにキャパシタから電流をポンプのように吸い上げ電源に戻すものである。

この回路は具体的には図2のように、2つのスイッチングトランジスタとインダクタを用いて構成できる。SW1とSW2は交互にONとOFFを行う。すなわちSW1がONの時にはSW2がOFFとなり、SW1がOFFの時にはSW2がONとなる。

図2において、SW1, SW2をpMOSおよびnMOSで実現した回路を図3に示す。充電時キャパシタ電圧は0Vである。SW1がON, SW2がOFFのとき電流は電源からキャパシタに流れる[図3(a)]。SW1がOFF, SW2がONのとき電流は電磁誘導により、流れ続けようとしてGNDから電流を吸い上げキャパシタを充電する[図3(b)]。この状態においてインダクタは誘導起電力をもつ電池の役割を持っている。放電時においては、電流は逆方向に流れる。SW1がOFF, SW2がONのとき、まず電流はキャパシタからGNDに流れる[図3(c)]。SW1がON, SW2がOFFのとき、電流は電磁誘導により流れ続けようとして、キャパシタからインダクタを通り電源の方に流れる[図3(d)]。この状態において、同様にインダクタは誘導起電力をもつ電池の役割を持っており、このため

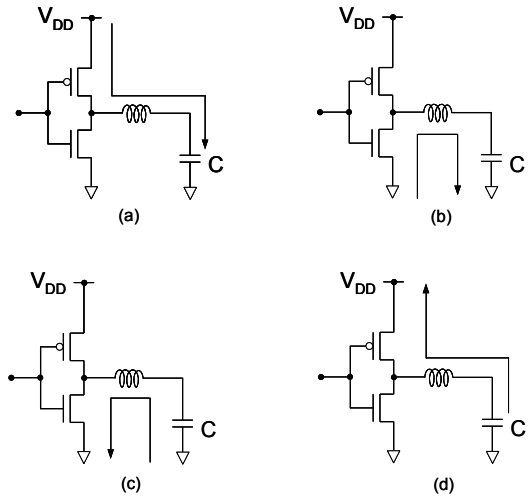


図3 回路動作。(a)充電時pMOSがONの状態。(b)充電時nMOSがONの状態。(c)放電時nMOSがONの状態。(d)放電時pMOSがONの状態。

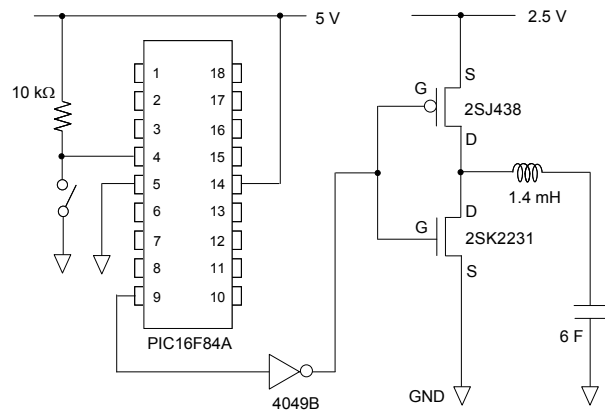


図4 マイクロプロセッサによるスイッチングトランジスタの制御

キャパシタより高い電位を持つ電源に電流を流すことができる。

図3の回路を実現するために、pMOS, nMOSとしてパワーMOSFETである2SJ438と2SK2231を用いた。またこれらのトランジスタのON, OFFをPWM (Pulse Width Modulation)制御するためにマイクロコンピュータであるPIC16F84Aを用いた。回路構成を図4に示す。スーパーキャパシタとして $C=6\text{ F}$ の電気2重層キャパシタを用いた。PICの4, 5, 9, 14番ピンはそれぞれリセットピン, GNDピン, 出力ピン, 電源ピンである。ICの4049B (インバータ) はPICの出力ピンの電流駆動力が小さいために用いている。また4049BとパワーMOSFETのインバータにより2重否定となるので、パワーMOSFETからの出力はPICの出力と同相となっている。PICと4049Bの電

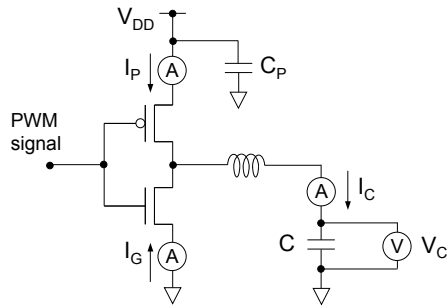


図5 充放電回路とマルチメータの構成図

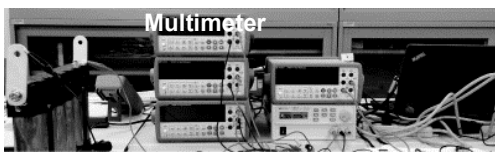


図6 測定システム

源電圧は5Vとしている。またパワーMOSFETのpMOSの電源電圧は、スーパーキャパシタの耐電圧が2.5Vであることを考慮し、同じ値の2.5Vとした。

図5に測定系を示す。ここでは、4つの物理量を測定している。まずキャパシタ電圧 V_C 、インダクタからキャパシタに向かって流れるキャパシタ充電電流 I_C 、電源からキャパシタに向かって流れる電源電流 I_P 、GNDからキ

ャパシタに向かって流れる電流 I_G である。これらの物理量をデジタルマルチメータ(Keysight 34450A)で測定し、パソコンにリアルタイムに表示するシステムを構築した。実際の測定系の様子を図6に示す。

本研究においては、準静的に充電するためのステップ数 N を4および8とした。図7、8は4および8ステップのそれぞれの場合の V_C, I_P, I_C, I_G を示す。8ステップの方がより準静的であるために、電流値が1/2に低減していることがわかる。ここでは、図8の振る舞いについて詳しく議論を行う。図8において1ステップの時間間隔は60sである。充電時(0sから480sの間、 I_P のピーク電流はSW1がONする割合であるデューティ比 d に比例する。時間と共に d が増大し階段電圧が上昇すると、 I_P も増大していることが確認できる。 I_G のピーク電流はSW2がONする割合である $1-d$ に比例する。この場合、時間と共に d が増大すると、 I_G も減少していることが確認できる。また、実験から、 I_P と I_G の和が I_C と一致することが確認できる。

放電時(480sから960sの間、 I_P, I_C, I_G は充電時とは逆の正の値となっている。これは充電時と放電時において流れる方向が逆であることを示している。

また図9に $N=1, 2, 4, 8$ ステップの場合のキャパシタ充電電流を示す。8ステップ時において、電流が1ステップの1/8倍となっていることがわかる。ここで N ステップの時の抵抗成分におけるエネルギー散逸を考察する。電流値は $1/N$ となっており、これが N 回繰り返されることから、エネルギー散逸は次式で与えられる。

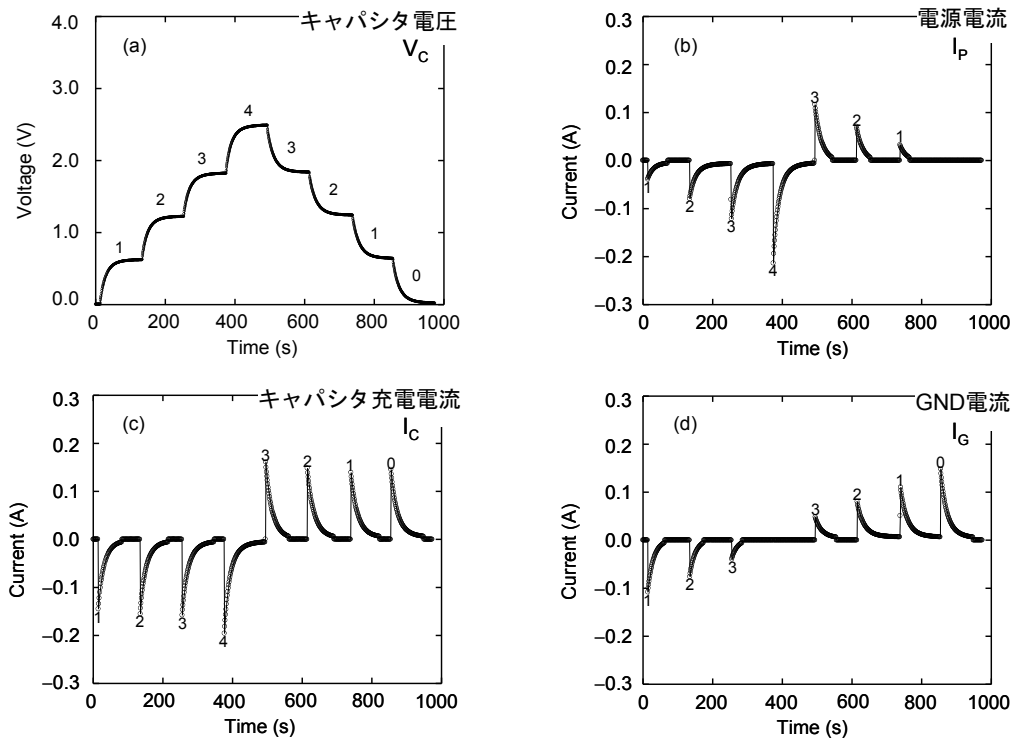


図7 4ステップ充電時における(a)キャパシタ電圧、(b)電源電流、(c)キャパシタ充電電流、(d)GND電流。数字はステップ数に対応。

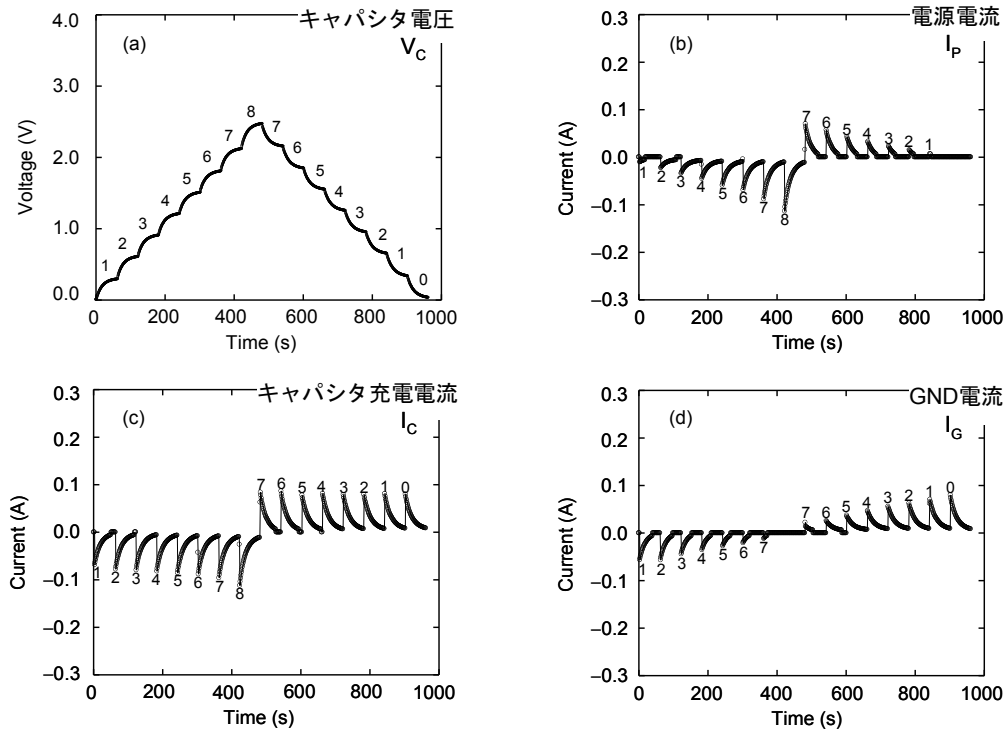


図8 8ステップ充電時における(a)キャパシタ電圧, (b)電源電流, (c)キャパシタ充電電流, (d)GND電流. 数字はステップ数に対応.

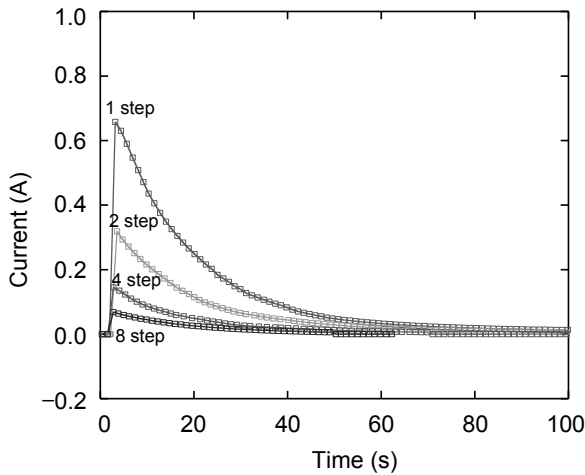


図9 キャパシタ充電電流のステップ数依存性

$$\int R(I/N)^2 dt \times N = \int RI^2 dt / N. \quad (1)$$

したがって、 N ステップにおいてはエネルギー散逸は $1/N$ となることがわかる。この議論から、本研究において、8ステップの場合エネルギー散逸が $1/8$ 倍になっていることが示される。

3. まとめ

スーパーキャパシタをマイクロプロセッサを用いて段階的に充電および放電する手法により、8ステップの場合にエネルギー散逸が $1/8$ となることが明らかとなっ

た。電気エネルギーの蓄電に、エネルギーロスが大きく低減される本手法は今後極めて有用である。

謝辞

本研究は、公益財団法人 中国電力技術研究財団の研究助成金および、JST A-STEP フィージビリティスタディステージ探索タイプ (AS262Z00309L)、科研費 (15K05964) の助成を受けて行われた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Battery University, How to Prolong Lithium-based Batteries, http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries, 2016.
- 2) 西岡亨・原亮一・北裕幸, “風力発電等分散型エネルギーの広域運用システム,” 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.113 (2015).
- 3) S. Nakata et al., “Energy Efficient Stepwise Charging of a Capacitor Using a DC-DC Converter With Consecutive Changes of its Duty Ratio,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 61, no. 7, pp. 2194-2203 (2014).
- 4) S. Nakata et al., “An Adiabatic Circuit with Consecutive Changes of the Duty Ratio of the Switching Transistor Using a Microprocessor,” Journal of Circuits, Systems, and Computers, vol. 26, no. 1, 1750007 (2017).