

電気二重層コンデンサを用いた

経皮エネルギー伝送システムの出力電圧変動の低減

Reduction of Output Voltage Fluctuation in Transcutaneous Energy Transmission System

by Using Electrical Double Layer Capacitor

○ 山本隆彦 (東京理科大学) 越地耕二 (東京理科大学)

大沼健太郎 (国立循環器病研究センター) 住倉博仁 (国立循環器病研究センター)

巽 英介 (国立循環器病研究センター) 妙中義之 (国立循環器病研究センター)

Takahiko YAMAMOTO, Tokyo University of Science
 Kohji KOSHIJI, Tokyo University of Science
 Kentaro OHNUMA, National Cerebral and Cardiovascular Center
 Hirohito SUMIKURA, National Cerebral and Cardiovascular Center
 Eisuke TATSUMI, National Cerebral and Cardiovascular Center
 Yoshiyuki TAENAKA, National Cerebral and Cardiovascular Center

Abstract: Transcutaneous energy transmission (TET) systems, which can provide the driving energy to a totally implantable artificial heart without invasion, are potential candidates for reducing the risk of infection as the cable penetrates the skin. Recently, capacitor with high capacitance such as electric double layer capacitors (EDLC) is paid to attention. We have investigated the application of EDLC to TET system. As a result, the equivalent series resistance (ESR) inside a capacitor has affected the driving voltage fluctuation resulting from a load change. In order to make an actuator drive stably, it is necessary to reduce this voltage fluctuation. In this paper, we investigated the reduction method of the ESR of EDLC with devising the connection of EDLC. Furthermore, the method of stabilizing the drive voltage to the load change was examined. As a result, connecting the EDLC in parallel reduced the ESR and the voltage variation. Thereby, the actuator drive voltage was able to be stabilized.

Key Words: Transcutaneous Energy Transmission System, Electrical Double Layer Capacitor, Equivalent Series Resistance, Voltage Fluctuation

1. はじめに

人工心臓⁽¹⁾をはじめとする体内埋込型機器に対する QOL (Quality of Life) の高いエネルギー供給法として、経皮エネルギー伝送システム (Transcutaneous Energy Transmission System : TETS)^{(2),(3)}は最も有力とされている。消費電力が瞬時々々に変化し、ごく短時間ではあるものの大電力を必要とする人工心臓の駆動電圧を安定化することは、人工心臓を安定動作させる上で重要な課題の一つである。体内への埋込を考慮すると、TETS は小型であることが望ましいものの、一般に大電力を供給可能な仕様とすると TETS は大型化する。このため、小型でありながら大電力供給可能であり、しかも負荷変動の際の駆動電圧変動が小さな TETS を実現する必要がある。

近年、蓄電のためのデバイスとして、電気二重層コンデンサ (Electrical Double Layer Capacitor : EDLC)⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾が注目されている。EDLC は、リチウムイオン二次電池等の充電池と比較して短時間での充電が可能であり、短時間ではあるものの大電力を供給可能などの特長を有している。これを活用することにより、小型でありながら、人工心臓アクチュエータの負荷変動時の駆動電圧を安定化した TETS の実現が期待できる。

これまでに、EDLC を用いた TETS の最大供給電力や負荷変動時における駆動電圧の安定性について、評価検討を行ってきた⁽⁴⁾。本稿では、EDLC の接続方法の工夫により

EDLC の等価直列抵抗を低減し、負荷変動時の駆動電圧をさらに安定化する方法について検討を行ったので報告する。

2. 等価直列抵抗(ESR)と電圧変動

本稿では、アクチュエータなどの機器を定格電圧 5 V、電流 1 A で駆動させることを想定し、耐圧 2.3 V、静電容量 10 F の EDLC を 3 個直列接続したものを使用した。

一般に、キャパシタは電圧の変化を妨げる素子であり、キャパシタ C の電圧 v と流れる電流 i には式(1)の関係があり、急峻な電圧変化は生じない。しかしながら、キャパシタ内部の等価直列抵抗 (Equivalent Series Resistance : ESR) r により、キャパシタの端子電圧は式(2)のように表され、特に流れる電流が変化することにより、端子電圧は変化する。

$$v = \frac{1}{C} \int i dt \quad (1)$$

$$v = ri + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2)$$

このため、大容量のキャパシタをパラレルに挿入した回路においても、負荷変動に対しては端子電圧が変動する。

3. ESR の評価とその低減

人工心臓システムへの EDLC の適用は、体内外回路において種々考えられるが、アクチュエータへの供給電圧の安定化、最大供給電力の向上という観点から、整流平滑回路の平滑コンデンサとしての活用が考えられる。瞬時々に流れる電流が大きく変化する人工心臓においては、ESR に起因し電圧変動が大きく生じる可能性がある。ここでは、ESR を測定し、これを低減する方法について検討を行った。

3-1 ESR の測定

Fig.1 は一例として、Fig.2(b)に示す回路において、6 V に充電された状態の EDLC を時刻 $t=1$ s より 3 A 一定の条件下で放電した際の電圧・電流波形である。端子電圧は、放電開始の際に 6.0 V から 5.6 V へと 0.4 V の低下が生じており、これが ESR による電圧降下であると考えられる。以上より、キャパシタの ESR r は端子電圧および電流の変化 Δv 、 Δi を用いて式(3)のように表すことができる。

$$r = \left| \frac{\Delta v}{\Delta i} \right| \quad (3)$$

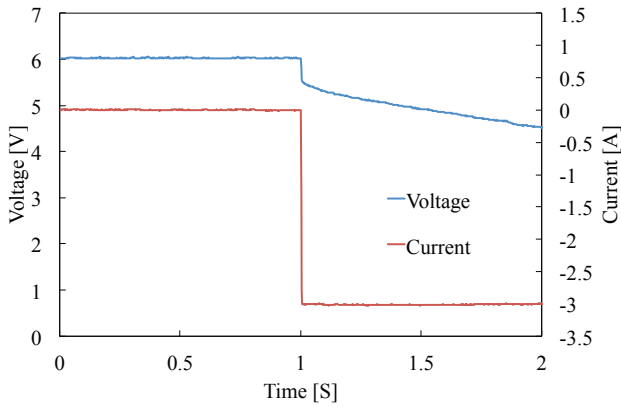


Fig.1 Characteristics of EDLC discharge

Fig.2(a)の回路により、EDLC を入力電流 0 A の状態から 2 A で充電し、式(3)により各電圧における ESR を測定した。また、Fig.2(b)の回路により、EDLC に流れる 0 A の状態から 2 A を放電させ、式(3)により各電圧における ESR を測定した。結果を Fig.3 に示す。

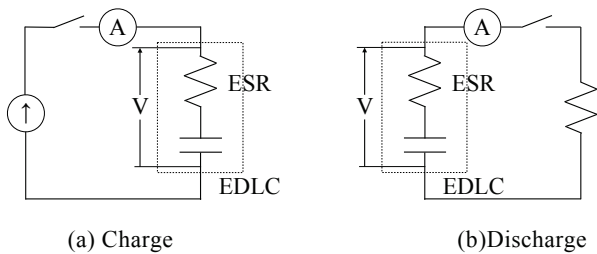


Fig.2 Measurement circuit on ESR

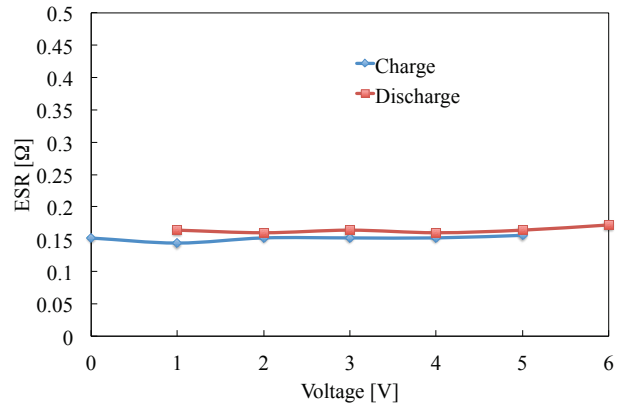


Fig.3 ESR characteristics of EDLC in each voltage

充電時における ESR は 1.5 Ω、放電時 1.6 Ωとそれぞれにおいてほぼ一定であり、EDLC の ESR はその端子電圧に依存しない特性を有するといえる。

次に、EDLC を端子電圧 0 V、入力電流 0 A の状態から充電し、各入力電流に対する ESR を測定した。さらに、EDLC の端子電圧 6 V、電流 0 A の状態から放電させ、各放電電流に対する ESR を測定した。結果を Fig.4 に示す。

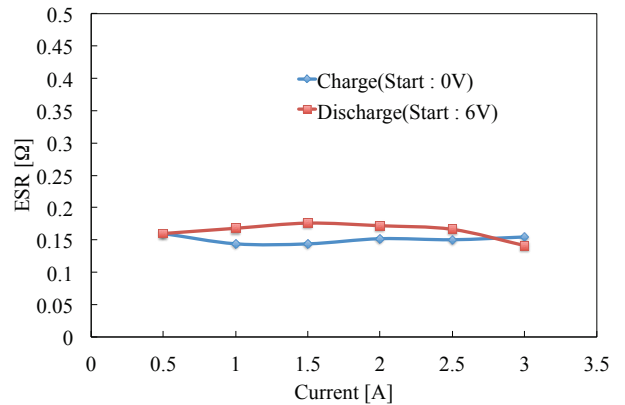


Fig.4 ESR characteristics of EDLC in each current

充電および放電の電流に依存して変化した。0.5 A~3 A の放電範囲において ESR の変動率は 20%、充電時の ESR の変動率は 7%であった。

3-2 ESR の低減

EDLC の ESR を低減する方法として、EDLC を複数個並列に接続する方法が考えられる。ここでは、耐圧 2.3 V、静電容量 10 F の EDLC を 3 個直列接続したものを複数個接続し、このとき、EDLC の端子電圧 6 V、電流 0 A の状態から 3 A で放電させ、式(3)にもとづいて ESR を測定した。結果を Fig.5 に示す。

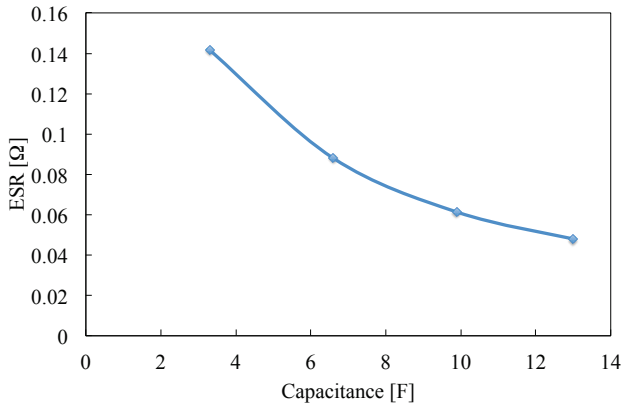


Fig.5 Characteristics between Capacitance vs. ESR

ESR は静電容量の増加に反比例して減少した。静電容量を増加させることで、EDLC の体積は増加するものの ESR は低減され、流れる電流に依存する端子電圧の変動を低減可能であると同時に、短時間における最大出力電力の向上も期待できる。

4. 整流平滑回路への適用

EDLC の ESR を低減することによる、負荷変動時の電圧安定性について検討を行った。実験回路の構成を Fig.6 に示す。TETS の体内回路を想定したものであり、FET (Field-Effect Transistor) を用いた同期整流回路である。本回路を用いて体外より伝送された交流電力を直流に変換する。入力のための交流電力の波形は 100 kHz の正弦波とした。ここでは簡略化のため、Fig.7 に示すように、負荷に流れる電流を 1 A および 3 A の矩形波であり周期 1 秒で変化させた。

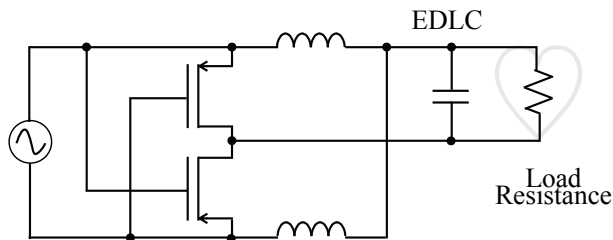


Fig.6 Experimental circuit

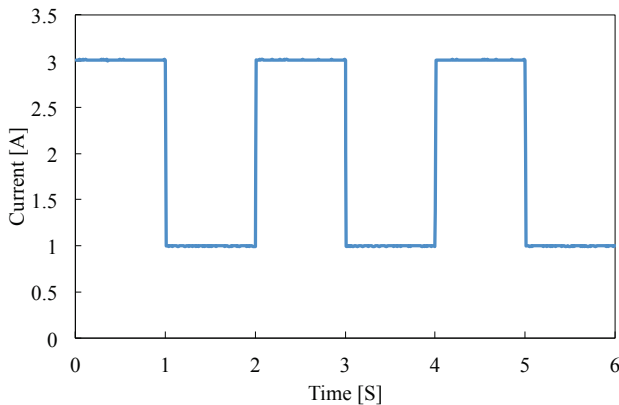


Fig.7 Current waveform which flows the load resistor

負荷抵抗両端の電圧波形を、EDLC の容量を変化させながら測定した結果を Fig.8 に示す。なお、比較のため、従来の TETS において用いられている 470 μF のアルミ電解コ

ンデンサ使用時の波形もあわせて測定した。

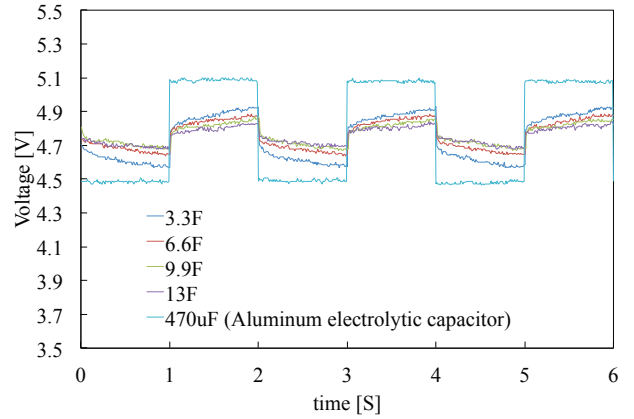


Fig.8 Output voltage waveform of load resistance

電圧の変動幅はアルミ電解コンデンサの 0.58 V と比較して、EDLC の変動幅は小さいことがわかる。これらは、キャパシタに蓄えられた電荷がアルミ電解コンデンサと比較して大きく、より負荷に対して安定的に電力を供給可能であったことが理由である。一般的な商用電源設備 (100 V) における電圧変動許容範囲は±6%程度とされており、これを参考にすると、許容できる変動幅は 0.6 V となる。本検討において用いたキャパシタはすべてこれを満たしているものの、より負荷変動幅の大きい条件下においては EDLC による電圧変動の低減は有用であると考えられる。

大容量キャパシタを使用した際の電圧変動は、負荷に流れる電流が変化した際の急峻な変化とその後の緩やかな変化に分類できる。前者はキャパシタの等価直列抵抗 (Equivalent Series Resistance : ESR) に起因するものであるのに対し、後者は ESR と容量の積により表される時定数に起因するものと考えられる。EDLC の容量に対するこれらの電圧変動幅をそれぞれ Fig.9, 10 に示す。

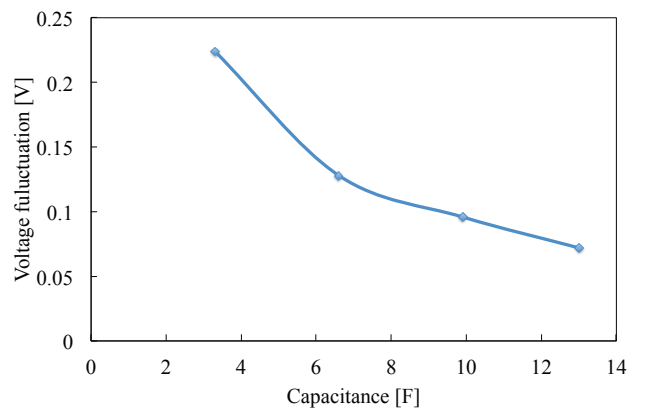


Fig.9 Voltage fluctuation caused by ESR

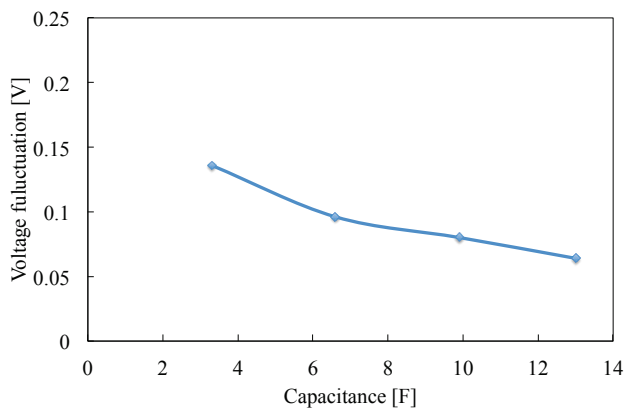


Fig.10 Voltage fluctuation caused by capacitance

静電容量の増加にともなう、ESR が減少し、これにより ESR に起因する急峻な電圧変動が低減されていることがわかる。また、後者の電圧変動である穏やかな変動は、静電容量の増加に伴って減少し、電圧の安定性が向上したといえる。

これに対して、比較のために示したアルミ電解コンデンサ使用時の電圧は矩形形状に変化した。これは、EDLC と比較してアルミ電解コンデンサの容量は小さいために時定数が短く、短時間に定常状態に収束したことが理由であると考えられる。

以上より、EDLC などのキャパシタの容量を増加させることにより、ESR は低減され、人工心臓などの機器に供給する電圧を安定的にすることが可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本稿においては近年注目されている EDLC の TETS への適用について、特に体内回路への適用可能性について検討を行った。その結果、平滑用コンデンサとして EDLC を使用した場合、従来のアルミ電解コンデンサと比較して負荷変動に対して安定した電圧において電力供給が可能であった。さらに、EDLC を複数個並列に接続することにより、ESR が低減され、負荷変動にともなう電圧変動を低減可能であることが明らかになった。また、EDLC を並列に接続することにより、静電容量が増加し、これにともなう時定数を伴って変化する電圧変動も低減可能であることが明らかになった。

本検討は体内に埋込む装置を大型にするものであるが、TETS の体内回路に大容量キャパシタを適用することは有用であり、埋込み可能な範囲において大容量のキャパシタを使用することが望ましいと考えられる。

参考文献

- (1) 許俊鋭他, 補助循環法の進歩, Clinical Engineering, 秀潤社, Vol.19, No.6, pp.595-667, 2008
- (2) 山本隆彦, 越地耕二他, 体内埋込型人工心臓駆動用体外結合型経皮エネルギー伝送システム—経皮トランスのコア接合面のずれとギャップによる結合異常検出—, 生体医工学, Vol.43, No. 2, pp.261-267, 2005
- (3) 山本隆彦, 越地耕二, 名和礼成, 柳光江, 池田芳則, 本間章彦, 巽英介, 妙中義之: ファントムを用いた完全体内埋込型人工心臓駆動用体外結合型経皮エネルギー伝送システムの電磁妨害波の評価と低減に関する検討, ライフサポート, Vol.20, No.2, pp.53-58, 2008
- (4) 山本隆彦, 越地耕二, 大沼健太郎, 住倉博仁, 巽英介, 妙中義之, 本間章彦, 体内埋込型人工心臓用経皮エネルギー伝送システムへの電気二重層コンデンサの適用, 第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp. 425 – 428, 2011
- (5) 山田哲, 山城迪, 佐々木正和, 荒木修一, 電気二重層キャパシタの等価回路モデルに関する一考察, 電学論B, Vol. 123, No. 8, pp.1011-1017, 2003
- (6) 山城迪, 仲村 宏一, 荒木修一, エネルギー法による EDLC 等価回路定数の測定, 電学論B, Vol.130, No.7, pp.679-686, 2010
- (7) 原田耕介, 坂井栄治, 百武宏記, 低電圧電源への電気二重層コンデンサの適用, 信学技報, Vol.99, No.625, pp.95-102, 2000