

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：50102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560347

研究課題名(和文)電気二重層コンデンサの充電方式の研究

研究課題名(英文)Charge and discharge circuit for double layer capacitor

研究代表者

上田 茂太(Ueda, Shigeta)

苫小牧工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：40390380

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円、(間接経費) 390,000円

研究成果の概要(和文)：一般的に耐電圧の低い電気二重層コンデンサ(EDLC)を直列接続し電圧を高くして利用する場合、EDLCを直列接続したまま充電すると高い電圧の充電器が必要になるとともに複数のEDLCの電圧アンバランスが生じる。そこで、充電時には並列接続、放電時には直列接続に変更できるダイオード16個とリレー7個を用いた簡単な回路を提案し実験にて効果を確認した。定格233F、15VのEDLC8個用い、直流モータを負荷として、負荷条件を変えて実験した結果、80W負荷で1900秒間放電可能で、充放電における電圧アンバランスは概ね±1%以内に抑制でき、充放電のエネルギー効率としては70～80%という良好な結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：The rated voltage of double layer capacitor(EDLC) is relatively low. In high voltage applications many EDLCs are connected in series. In this case high voltage power source for charge is required and voltage imbalance of EDLCs is caused. A solution for such problem is proposed using variable connection scheme. Many EDLCs are connected in parallel through diodes in charging, and these are connected in series through several mechanical relays in discharging. Proposed scheme is evaluated in test equipment which is consisted of Eight EDLCs rated specifications of 233F,15V, sixteen diodes, seven mechanical relays and dc motor. Time of discharge is 1900 seconds at load of 80W. Voltage imbalance of EDLCs is absorbed within plus or minus 1%. The high energy efficiency between charge and discharge from 70% to 80% is obtained.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気二重層コンデンサ 充電回路 放電回路

1. 研究開始当初の背景

電気自動車等のモータ駆動用電源として、電池に代えて急速充電が可能な電気二重層コンデンサ (Electric Double Layer Capacitor: 以下 EDLC と略す) を適用する試みがなされている。EDLC は大電流での急速充電が可能であり、二次電池よりもサイクル寿命ははるかに長く、単位重量当たり蓄積できるエネルギー量も大きくなる可能性を有している。ただし EDLC は電圧定格が低いので、複数個直列にして使用することが一般的である。EDLC を直列にして急速充電する場合、個々のコンデンサの内部抵抗値のばらつき等の影響で電圧バランスが大きく変化して、許容電圧を超え破壊にいたることが考えられるので、充電電圧を許容値よりも低めに余裕を持たせて設定したり、あるいは充電電圧を均等化するために別途並列に回路を設けることが必要となる。充電電圧のばらつきをなくせば許容電圧に近い値まで充電が可能になり、EDLC の特性を最大限まで利用することができる。

2. 研究の目的

コンデンサを並列にして充電すればどのコンデンサも充電電圧は等しくなるので充電時は並列で、放電時には直列で利用すればよい。この考え方を実現する方法として、ダイオードとスイッチを用いた非常に簡単な回路を提案し、実際の回路を製作して充放電の特性を評価する。特に個々の EDLC の電圧誤差と充放電効率について詳細に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に提案回路を示す。本研究では EDLC は C1~C8 の 8 個とするが、必要とする電圧と EDLC の定格電圧により個数は任意に設定することができる。充電時にはスイッチ S1

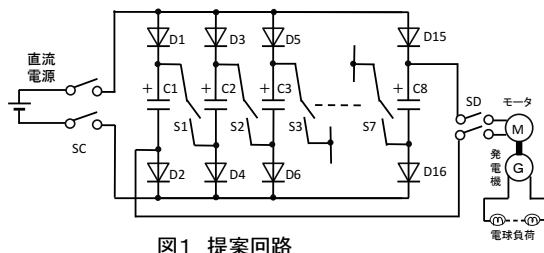


図1 提案回路

~S7 をオフにし SC をオンにしてダイオード D1~D16 を介して 8 個の EDLC、C1~C8 を並列充電する。この場合、図 2 のような回路で充電動作が行われる。充電が完了した時点で、SC をオフし、S1~S7 をオンにすると図 3 に示したように C1~C8 は直列に接続されるので、SD をオンすることで充電エネルギーを負荷に放電する。放電時には充電時に利用したダイオード D1~D16 が C1~C8 の横方向の電荷の移動を阻止し、図 2 の破線で示した方向にのみ放電する。負荷にはモータ軸に直結し

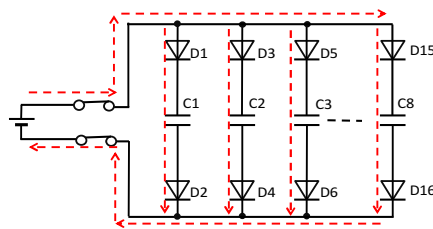


図2 充電時の動作

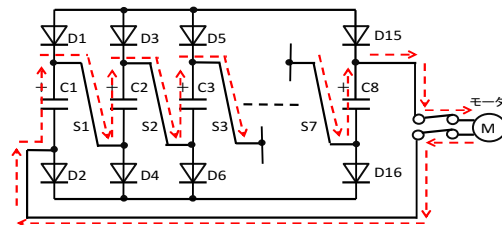


図3 放電時の動作

た発電機と電球負荷を利用している。電球の個数を変えることで電動機の負荷状態を変えることができる。EDLC1 個の充電電圧を E とすれば、8E という電圧が得られる。最初に各動作モードごとに問題ないかを検証する。並列充電モードにおいて、個々の EDLC の充電電圧が等しくなることを検証し、次に回路接続を並列から直列に接続変更できていることを確認する。次にモータを駆動できることを確認する。最後に一連の動作モードを連続して行えるかを検証するとともに異なる負荷状態での充放電効率や負荷急変時の動作について評価する。なお、当初は S1~S7 には、半導体リレーか MOSFET を使用する予定にしていたが、研究結果の項目で述べる理由により機械式のリレーを用いることにした。

(1) 図 2 に示した並列充電モードの回路において、スイッチ SC をオンし、直流電源を用いて充電し EDLC1~C8 の充電電圧が等しくなることを確認する。同様に交流電源を用いて充電できることを確認する。

(2) SC をオフして充電を終了し、各 EDLC の電圧が、ダイオードにより放電が阻止されていることを確認する。

(3) S1~S7 をオンし、コンデンサの端子間を相互に接続して 8 個のコンデンサを直列に接続する。接続時に過電圧等の異常が発生しないことを確認する。また、合計電圧が 1 個の 8 倍になることを確認する。

(4) SD をオンし、図 3 に示した回路でモータを接続する。負荷条件 (電球個数) を変えて放電が終わるまでの時間を計測する。

(5) 一連の動作モード (並列充電モード、接続切替モード、直列放電モード) に必要な時間を計測するとともにモータ負荷にて一連の動作を確認する。実際のモータ負荷では、

負荷が急激に増加したり減少したりするモードがあるので負荷を急変させた場合のEDLCの電圧・電流波形に異常がないかを記録観測する。入力電圧・電流、出力電圧・電流を充電から放電完了まで計測し、各々(電圧×電流)を積算することで充放電エネルギーを計算して充放電効率を求める。また、ダイオードやスイッチの損失がどの程度発生しているかを評価する。

4. 研究成果

(1)当初、直列接続を行なうスイッチ(S1~S7)にはMOSFETか半導体リレーを使用することとしていたが、放電時に電圧が0Vまで放電できず、4~5V程度残ることが判明した。



図4 試作した実験装置の外観

これは、半導体の順電圧降下が1個当たり約0.6Vとすると、スイッチS1~S7の7個分で4.2Vとなることが原因で、電圧定格が一般的に低いEDLCでは問題となる。そこで、S1~S7の動作速度については、特に問題にはならず半導体を利用する必要がないため、機械式リレーを使用することに変更した。その結果、ほぼ0Vまで放電でき動作上も問題がないことを確認した。以下では全て機械式リレーを用いた。試作した実験装置の外観を図4に示す。中央に青く見えのがEDLCで、容量が233F、最大電圧が15VでこのEDLCを8個使用している。周辺にはスイッチやリレー類が配置さ

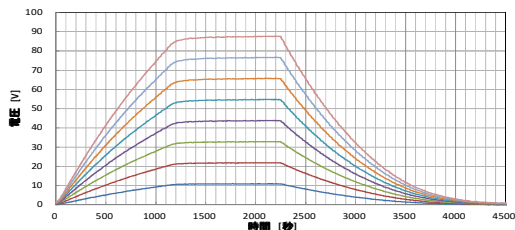


図5 充放電時のEDLC電圧

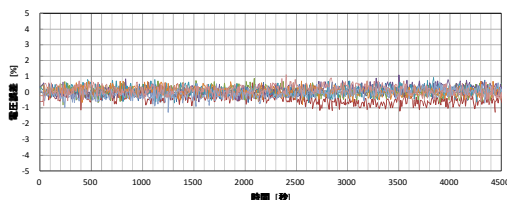


図6 充放電時の電圧誤差

れている。

(2)EDLCを8個並列接続したまま15Aの定電流で12Vまで充電し、充電完了後に直列に接続を切り替え、8倍の電圧に充電されたEDLCによる負荷への放電へ移行する。この回路をダイオード16個、スイッチ7個という簡素な部品で構成し、装置を製作して実験により動作モードごとに問題がないか検証した。

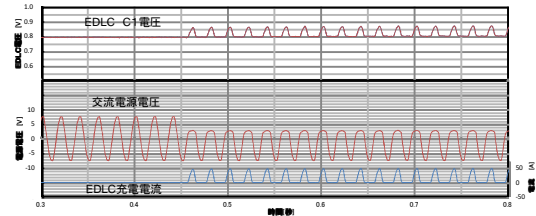


図7 交流充電時の波形

(3)並列充電モードにおいて、15Aの定電流で12Vまで充電し、負荷としては電球4個(80W)の場合について放電が終了するまでの各EDLCの電圧波形を図5に示す。図6には同時に測定した8個分のEDLCの電圧誤差を示す。電圧誤差については、充電終了後の1個当たりの電圧の平均値を E_{av} とすると、 $(\text{個々の電圧} - E_{av}) / E_{av} \times [\%]$ として充放電全期間にわたり8個全部について計算した。8個のEDLCの電圧がほぼ充放電期間を通してほぼ1.0%以内に抑制されていることがわかる。充電終了後、各コンデンサの電圧がダイオードにより放電が阻止されて電圧がダイオード2個分の順方向電圧降下分だけ低い10.9Vに維持できている。8個のEDLCを直列に接続して、合計電圧10.9Vの約8倍である87Vになることを確認した。同様に交流電源(実効値5V)を用いて充電を行った波形を図7に示す。交流の場合は、ダイオードがあるため正方向の電圧のときのみ充電するので電流は半波整流のような波形となっているが、充電は可能であり、徐々に充電が進み電圧が上昇していることがわかる。

(4)負荷電球の個数を変えた時の損失の内訳と充放電効率について評価した結果を表1に示す。各負荷状態において、EDLCが完全に放電を終了するまでの時間とEDLCに充電したエネルギーと放電したエネルギーから充放

表1 充放電効率の計算結果

電球 個数	消費 電力 [W]	抵抗 [Ω]	放電 時間 [s]	全放電 エネルギー [J]	リレー		充電		ダイオード		EDLC内部		充放電 効率 [%]
					損失 [J]	比率 [%]	エネルギー [J]	損失 [J]	比率 [%]	損失 [J]	比率 [%]		
1	20	500	3600	98627	170	0.17	135858	7545	5.55	37061	27.3	72.6	
2	40	250	2838	98530	243	0.25	115513	6631	5.74	16742	14.5	85.3	
3	60	167	2548	98775	307	0.31	132770	7533	5.67	33688	25.4	74.4	
4	80	125	1940	98142	357	0.36	122554	6870	5.61	24055	19.6	80.1	

電効率を計算した。電球4個では1940秒、80.1%、3個では2548秒、74.4%、2個では2838秒、85.3%、1個では3600秒、72.6%となった。充放電効率の平均は78.7%となっ

た。次に損失の内訳について計算した。損失としては充電回路に用いるダイオード回路、放電回路に用いるリレー回路およびコンデンサの内部抵抗による損失である。充電回路にはダイオードを合計 16 個使用しておりこれらの損失合計は平均で充電エネルギーの約 5.6%であった。さらに切替回路の損失を評価した。リレーの定常オン抵抗は 1 個当り最大で 0.1 Ωである。8 個の EDLC 間を接続する 7 個のリレーと電動機に接続するリレー 2 個の計 9 個のリレーを流れる電流の実測値から算出した結果、充電したエネルギーの約 0.3%がリレー損失になった。また放電時に EDLC の内部で消費されるエネルギーは平均 21.1%となった。

(5) 負荷急変時の特性について測定した結果を図 8 に示す。電球の個数を 0~4 個まで 1 個ずつ増加、減少させたところ、1 個の電球について電流が 0.5A 変化、EDLC の電圧は 8 直列の EDLC の端子電圧 87V 付近において 0.1V 変化した。続けて 4 個の電球を同時にオンオフする実験を数回行ったところ、電流が 2A 増減し、電圧は 0.4V 程度の変化となったが特に電圧や電流に異常はないことがわかる。

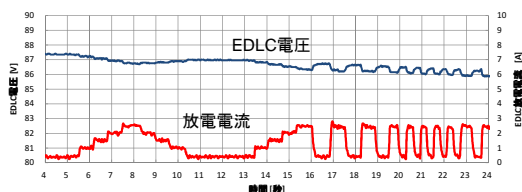


図8 負荷変化時の電圧電流

以上の結果から、複数個の EDLC の充電を並列回路で行ない、直列に接続変更して放電する比較的簡素な回路について実験により特性を評価し、電圧誤差がほぼ 1%以下に抑制され、充放電効率は 78.7%、負荷変動に対しても十分に追従できることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

①佐藤友哉、上田茂太「電気二重層キャパシタの充放電切替え回路」電気学会産業応用部門全国大会 Y-34、平成 24 年 8 月 22 日、千葉工業大学

②村上大智、上田茂太「電気二重層キャパシタの活用に関する研究」北海道内電力系研究室合同研究発表会 HP23-5、平成 23 年 12 月 22 日、北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 茂太 (Ueda, Shigeta)

苫小牧工業高等専門学校・電気電子工学科・教授

研究者番号：40390380

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし