

チョッパとインバータを用いた電気二重層コンデンサの電圧バランス回路

A New Voltage Balance Circuit using Chopper and Inverter for Electric Double Layer Capacitors

峯村明憲, 後藤純一, 金子裕良, 阿部 茂

Akitoshi MINEMURA, Junichi GOTO, Yasuyoshi KANEKO, Shigeru ABE

Electric double layer capacitors(EDLCs) are used in series connection and the voltage balance among EDLCs is important. The voltage balance circuit with inverter has the merits of simple and low cost. However the voltage drop at diodes and transistors impedes the voltage balance operation. We have developed a new voltage balance circuit using chopper and inverter. The chopper steps up the input voltage of inverter to compensate the voltage drop. This paper describes the new voltage balance circuit and the experimental results in detail.

Keywords: Electric Double Layer Capacitor, Voltage Balance, Inverter, Chopper, Storage System

1. はじめに

電気二重層コンデンサ(EDLC: Electric Double Layer Capacitor)¹⁾は二次電池に比べ一桁以上大きな出力密度と 10 年以上の長寿命が特長である。エネルギー密度はまだ二次電池に比べ一桁劣るが、長寿命や大出力密度の特長を生かして自発光道路鉄・コピー機・UPS (Uninterruptible Power System) などで実用化が進んでいる。将来は燃料電池自動車の回生電力蓄電装置への適用が期待されている。

しかし EDLC は 1 個あたりの耐圧が 2~3V と低く、高電圧を得るために多数直列接続する必要がある。この際、静電容量や漏れ抵抗のばらつきなどにより各 EDLC の電圧がアンバランスになり、

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科
Department of Electrical and Electronic
Systems, Faculty of Engineering, Saitama
University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku,
Saitama, Saitama, 338-8570, Japan

耐圧以上の電圧印加に伴う過電圧破壊や、蓄電エネルギー量の低下などの問題が生じる。EDLC を過電圧から保護しエネルギー利用効率を高めるには、各 EDLC の電圧を均等化する電圧バランス回路が不可欠である。

多くの電圧バランス回路が提案されているが^{1) 2) 3) 4)}、インバータを用いる方式⁵⁾は EDLC 毎に電圧バランス回路を設置する必要がなく、シンプルで廉価の特長がある。しかし、ダイオードとトランジスタの順電圧降下のため電圧がバランスせず、この解決に同期スイッチを併用する方式が発表されている⁶⁾。同期スイッチは EDLC 每に設置するため、インバータ方式の利点が減少する。

本論文では順電圧降下を直流チョッパで補償する方式を提案する⁷⁾。この方式はインバータ方式のシンプルで廉価の特長を保持しており、電圧アンバランスを完全に解消できる。本方式を詳しく紹介するとともに、実験によりその電圧ラン

ス化動作を確認する。

2. 従来の電圧バランス回路とその問題点

図1のように各EDLCに並列にツェナーダイオード（降伏電圧=EDLCの最大電圧）を接続すれば電圧バランス回路として動作する。実用的には図2のような電圧バランス回路を各コンデンサ毎に設置する方法が一般的である¹⁾。図2の電圧バランス回路は、充電時にあるコンデンサの電圧が一定値以上になると充電電流を抵抗にバイパスすることで、各コンデンサの電圧をバランスさせる。過電圧保護の機能も備えている。蓄電エネルギー量が大きな装置では損失が大きく放熱にも配慮が必要となる。またコンデンサと同じ数だけバランス回路が必要になるため高価となる。

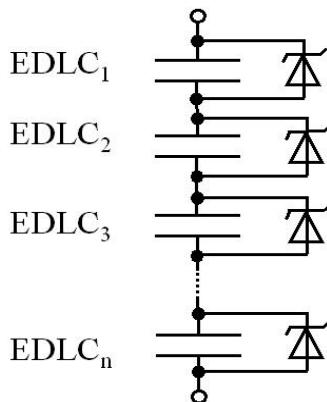


Fig.1 Voltage balance circuit with Zener diode.

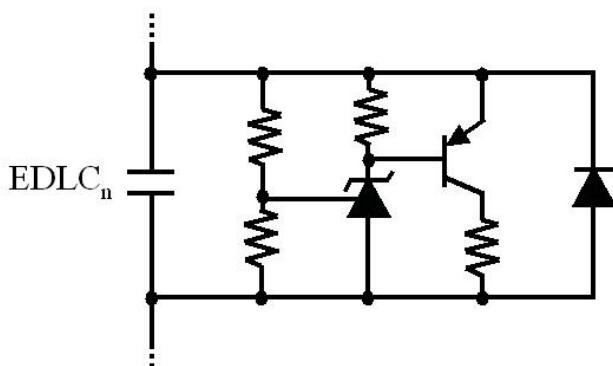


Fig.2 Voltage balance circuit of parallel monitor¹⁾.

これに対してインバータを用いた図3の電圧バランス回路⁵⁾は図2の回路に比べ、コンデンサの

直列数が増しても制御素子Sが4個で済む。また電圧の高いコンデンサから電圧の低いコンデンサに電流を流して電圧をバランスさせてるので損失が少ないと特長がある。

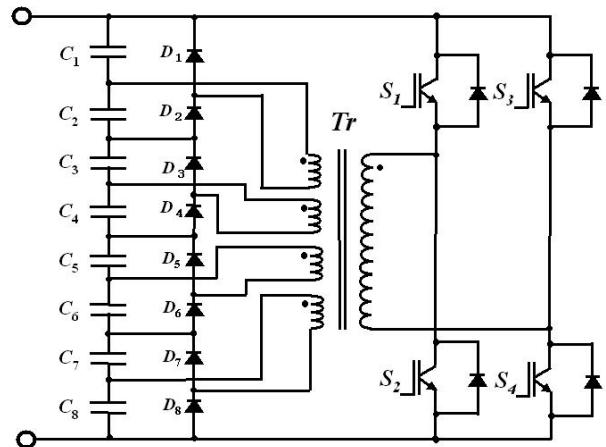


Fig.3 Voltage balance circuit with inverter.

コンデンサの直列接続数をnとしたとき、全コンデンサの電圧を入力として電圧形方形波インバータを動作させ、その出力に巻数比nの高周波トランスを用いて降圧すれば、高周波トランスの二次側には全コンデンサの平均電圧を振幅とする方形波が発生する。これを電圧源としてダイオードを介して各コンデンサに接続すれば、平均電圧より低い電圧のコンデンサだけが充電され、一定時間インバータを運転すれば、すべてのコンデンサの電圧が均一になると考えられる。

しかし実際にはコンデンサの電圧に比べ、インバータのトランジスタやトランス二次側のダイオードの順電圧降下が大きいため、コンデンサの電圧はうまくバランスしない。この問題を解決するためにダイオードの代わりに同期スイッチを用いて順電圧降下をほぼゼロにする方法が発表されている⁶⁾。この方法はダイオードの損失を減らす効果もある。しかし、同期スイッチはコンデンサの数だけ必要となるため、インバータ方式のシンプルで廉価という特長が損なわれる。

3. チョッパとインバータを用いた電圧バランス回路

我々はインバータ方式の特長を備え、順電圧降下の問題を解決する方法として、インバータ入力電圧を常に順電圧降下分だけ直流チョッパで昇圧する方法を考えた⁷⁾。図4に直流チョッパとインバータを組み合わせた電圧バランス回路を示す。直列 n 個のEDLCの電圧を V_C 、ダイオードの順電圧降下を V_{Don} 、制御素子 S (図4ではIGBT)の順電圧降下を V_{Son} 、高周波トランジスタの巻数比を a とすれば、インバータの入力電圧 V_I が V_C の変化に依らず常に次式の値になるように直流チョッパを制御すれば、各 EDLC に V_C/n の平均電圧が印加される。

$$V_I = a \times (V_{Don} + V_C/n) + 2V_{Son} \quad \dots \dots \dots (1)$$

これより $a = n$ とすれば、直流チョッパで必要な昇圧値は次式となる。

$$\Delta V = V_I - V_C = nV_{Don} + 2V_{Son} \quad \dots \dots \dots (2)$$

4. 実験回路

実験に用いた回路を図4に、その写真を図5に示す。EDLC $C_1 \sim C_8$ は耐圧 2.5V、静電容量 200F のものを 8 個直列に接続した。 $D_1 \sim D_8$ には順電圧降下の小さいショットキーバリアダイオード($V_{Don}=0.25V$) を用いた。トランジスタの一次巻線はフルブリッジインバータに接続し、2次巻線はダイオードを介して各 EDLC に接続した。トランジスタおよびチョッパ回路内のコイルにはリツツ線を使用し、トランジスタの巻数比は 64:8 とした。 S_1 から S_4 およびチョッパ回路内の S_0 には IPM(Intelligent Power Module) の IGBT を使用した。チョッパ回路の $C=500\mu F$, $L_0=0.5mH$ である。

インバータおよびチョッパの動作周波数は 5kHz と 20kHz とした。チョッパは V_C の値が変化しても常に一定電圧 $\Delta V = 8V_{Don} + 2V_{Son} = 3.4V$ を昇圧させて、 $V_I = V_C + \Delta V$ となるよう電圧フィードバック制御を行った。

5. 実験結果

EDLC を $V_{C1}=V_{C2}=V_{C3}=V_{C6}=2.5V$, $V_{C4}=V_{C5}=V_{C7}=V_{C8}=0.5V$ に充電した後、電圧バランス回路を動

作させ電圧変化を調べた。実験は電圧バランス回路がインバータだけの場合とチョッパとインバータ併用の場合を行い、動作を比較した。

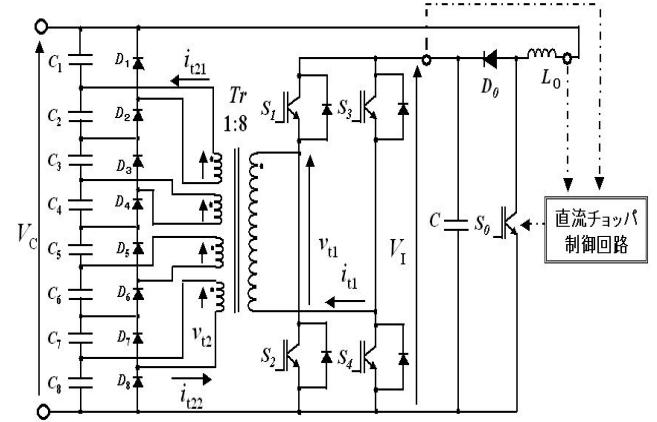


Fig. 4 Voltage balance circuit using chopper and inverter.

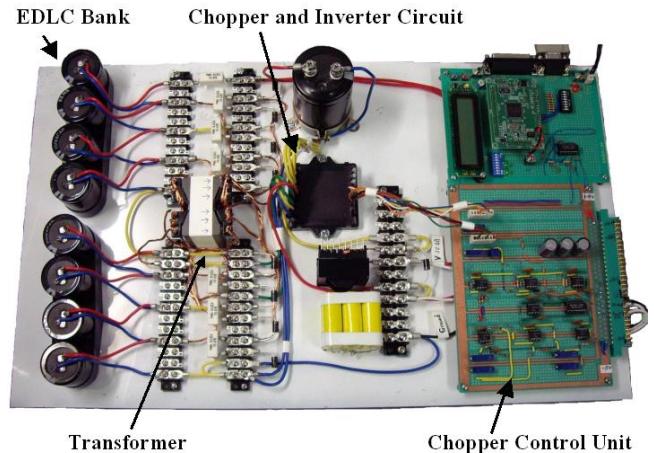


Fig.5 Experiment circuit.

インバータだけの場合の実験結果を図6(a)に、チョッパとインバータを併用した場合の実験結果を図6(b)に示す。インバータだけの場合は、140 分間動作させても 0.52V の電圧差が残り、電圧アンバランスは解消されなかった。チョッパとインバータを併用した場合は、約 20 分で電圧差が 0.077V (EDLC の 1 セルの耐圧 2.5V の 5%以下)となり、電圧がバランスした。これより本電圧バランス回路が理論どおり動作することが分かる。

図7は各部の電圧、電流波形である。図7(a)より V_I が V_C より ΔV 昇圧され、 v_{t1} の振幅が V_I より IGBT の順電圧降下分だけ小さいことがわかる。

図 7(b)よりトランス二次巻線の電圧振幅 v_{t2} が EDLC の電圧 V_{C4} よりダイオードの順電圧降下分だけ大きいことがわかる。

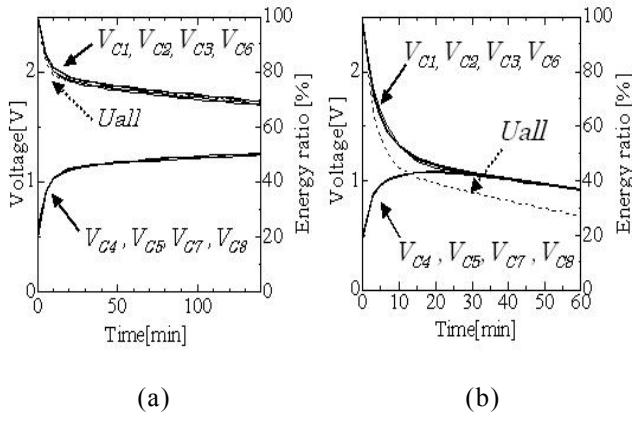


Fig.6 Experimental results 1.

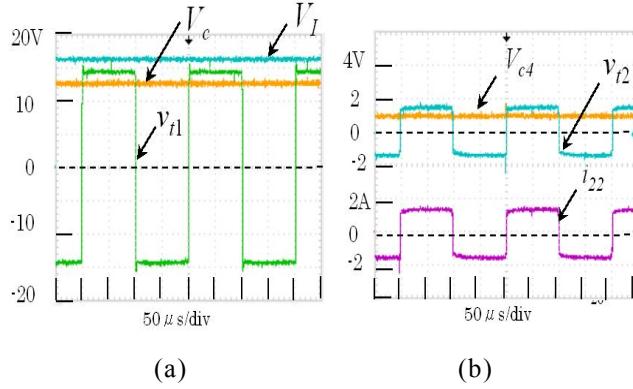


Fig.7 Voltage and current waveforms at voltage balance operation.

図 6(a) (b)の点線は EDLC の総エネルギーの推移を示している。インバータだけの場合は、140 分間で総エネルギーは 2619J から 1808J となり、30.9% の損失であった。チョッパとインバータ併用の場合は、電圧がバランスするまでの 20 分間に 2519J から 977J となり、61% の損失となった。

EDLC の初期電圧を $V_{C1}=V_{C5}=2.5V$ 、 $V_{C2}=V_{C6}=2.0V$ 、 $V_{C3}=V_{C7}=1.5V$ 、 $V_{C4}=V_{C8}=1.0V$ に変更し、同様の実験を行った。インバータだけの場合を図 8(a)に、チョッパとインバータ併用の場合を図 8(b)示す。インバータだけの場合は、60 分間動作させても 0.88V の電圧差が残った。チョッパとインバータ併用の場合は、約 17 分で電位差が 0.062V(EDLC の 1 セルの耐電圧 2.5V の 5% 以下)と

なり、電圧はバランスした。

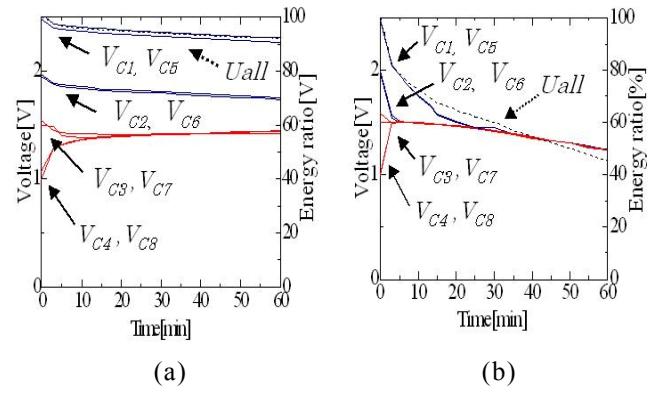


Fig.8 Experimental results 2.

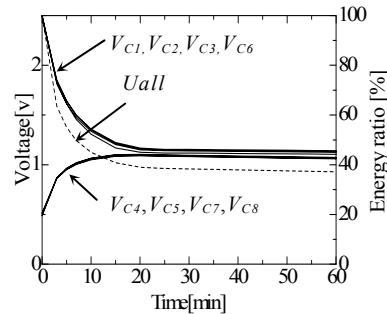


Fig.9 Experimental results 3.

(Operation of chopper circuit is stopped when voltage was balanced.)

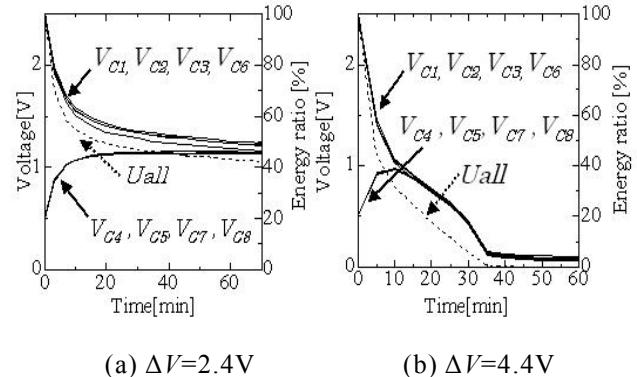


Fig.10 Experimental results 4.

チョッパとインバータ併用の場合、電圧がバランスしたら回路を止めてよい。しかし実験では回路を止めなかったので、電圧が下がり続けていく。この原因は電流を流し続けるチョッパにあると考えられる。そこで図 6 の実験で電圧がバランスしたとき（電圧差が EDLC の 1 セルの耐電圧 2.5V の 5% 以下の 0.076V になった 20 分後）に、

チョッパの動作を止めた。この実験結果を図 9 に示す。

以上の実験では直流チョッパ回路での電圧昇圧値 ΔV は、

$$\Delta V = 8V_{Don} + 2V_{Son} = 3.4 \text{ [V]} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

設定した。なおダイオードの電圧降下 $V_{Don}=0.25\text{V}$ と IPM 内の IGBT による電圧降下 $V_{Son}=0.7\text{V}$ は別の実験から求めた値を用いた。

この電圧昇圧値を変えた場合の実験結果を図 10 に示す。昇圧値を理論値の 3.4V よりも低い値に設定すると、電圧がバランスするのに長い時間を要し、逆に高い値に設定すると、少しバランスする時間が短縮されるが、損失が大きくなることがわかる。

6. むすび

チョッパとインバータを用いた電圧バランス回路を提案し、その動作と有効性を確認した。本方式は、従来の個別制御方式のバランス回路（図 2）とは異なり EDLC の直列接続数が増しても制御素子数が増えない、つまりインバータ方式のシンプルで廉価である特長を備えている。

バランス動作時の損失は改善する必要があるが、従来の個別制御方式に比べれば損失は少ないと考えられる。

今後はバランス動作時の損失を減らす方法、適切な電圧アンバランスの検出方法と電圧バランス回路の起動停止制御法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 岡村廸夫, 「電気二重層キャパシタと蓄電システム第 2 版」, 日刊工業新聞社, 2001
- 2) 岡村廸夫他, 特許第 3238841 号
- 3) 森和也, 高橋真吾, 長谷部章雄, 関純子, 伊東孝彦, 電気二重層キャパシタの電圧平準化装置, 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.12, pp.1406-1413, 2003

- 4) P. Barrade, *Series Connection of Super-capacitors: Comparative Study of Solutions for the Active equalization of the Voltages*, Electrimacs 2002, 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, 18-21 August, Ecole de Technologie Supérieure (ETS), Montréal, Canada, 2002
- 5) 岸高嗣, 清水敏久, 電気二重層コンデンサ用電圧バランス回路の研究, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-04-37, pp.31-34, 2003
- 6) 高橋祐二, 清水敏久, 同期スイッチを用いた電気二重層キャパシタ用電圧バランス回路, 平成 17 年電気学会全国大会, 4-041, p.65, 2005
- 7) 後藤純一, 峯村明憲, 金子裕良, 阿部茂, チョッパとインバータを用いた電気二重層コンデンサの電圧バランス回路, 平成 18 年電気学会全国大会, 4-034, p.51, 2006