

回生 deQ 付共振充電を使用した高速充電器の高精度化に関する開発

DEVELOPMENT FOR HIGHER ACCURACY OF HIGH-SPEED CHARGER USING RESONANT CHARGING WITH DEQING FOR RECIRCULATION

中山響介^{#, A)}, 森均^{A)}, 徳地明^{A)}
 Kyosuke Nakayama^{#, A)}, Hitoshi Mori^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}
^{A)} Pulsed Power Japan Lab.

Abstract

High-precision capacitor chargers are used in a wide range of applications in a field of accelerators. In recent years, use of semiconductor in its load circuits has progressed, enabling high-speed operation. For this reason, we developed a high-speed charger using resonant charging, however, the charging voltage accuracy did not reach our target value of $\pm 0.01\%$. In this development, we attempted to improve accuracy by applying two-steps resonant charging. As a result, we found that the method was effective in improving accuracy.

1. 導入

加速器分野ではハイパワーかつ高い電圧精度を要求する機器が多く、高速・高精度のコンデンサ充電器がその代表格として挙げられる。我々が開発した既製品のスペックは $\pm 0.03\%$ 程度に留まり、ユーザからは $\pm 0.01\%$ 以下の更なる高精度化を期待されている。

2. 共振充電および主回路のメカニズム

共振充電の原理を Fig. 1 に示す。回路は非常に単純な LC 回路から成る。なお、負荷容量 C は電源側コンデンサ容量より十分小さいとする。スイッチを ON した時に電圧 V で充電済みの電源側コンデンサから負荷コンデンサに正弦波の充電電流が流れる。この時、ダイオードにより反転電流が防止され、負荷コンデンサの電圧は充電電圧 V の 2 倍、つまり 2V の状態で保持される。この回路を応用したのが今回使用する主回路 (Fig. 2) である。本回路は出力電圧を可変にするために deQ 回路を使用することを特徴とする。deQ とは共振時にコイルに蓄えられたエネルギーを何らかの形で消費することで共振を疑似的に止める操作のことを指す。Figure 2 の動作フェーズは大きく 2 つに分かれ、各フェーズの電流の流れとその時の波形を Fig. 3 に示す。フェーズ 1 では一次側の二つのスイッチを同時に ON して通常の共振充電を開始する。出力電圧が任意の値 αV ($0 < \alpha \leq 1$ とする) に到達したタイミングで deQ 回路のスイッチを ON および先のスイッチ 2 つを OFF するとフェーズ 2 に移行する。この時、負荷コンデンサに流れていた電流が deQ 回路に転流し、一次側ダイオードを通して電源側コンデンサに逆流する。これはエネルギーの一部が電源側に回生されることを意味する。負荷電圧は二次側のダイオードによって任意の電圧 αV で維持され、これが出力電圧になる。実際の回路では更に出力電圧を微調整するための回路が搭載されており高精度を実現している。つまり、deQ 回路は初めの粗調整に使用されている。

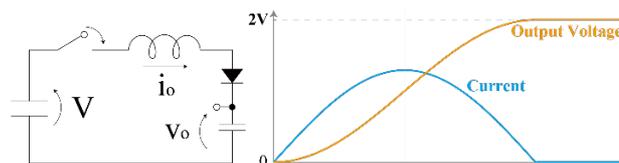


Figure 1: Principle of Resonant charging. (L) Basic circuit, (R) Basic waveforms.

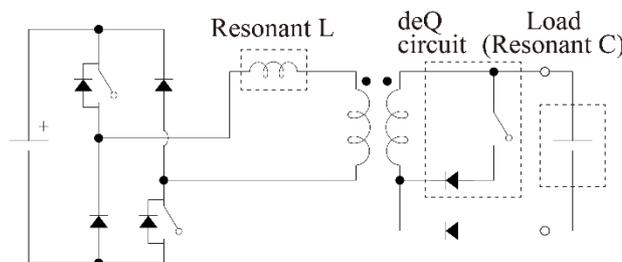


Figure 2: Main circuit diagram.

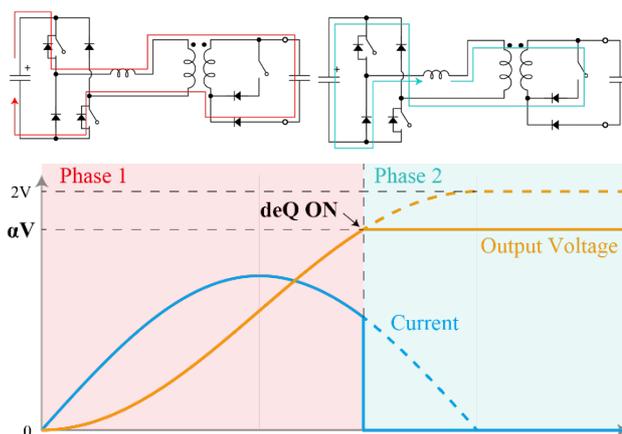


Figure 3: Mechanism of the main circuit. (TopL) Resonant charging at phase 1, (TopR) DeQing for setting to arbitrary voltage at phase 2, (Bottom) DeQ-applied waveforms.

[#] nakayama@myppj.com

3. 高精度化に向けた改善策

3.1 概要

今回は deQ 動作に焦点を当てて精度の改善を試みる。具体的には、出力電圧の時間変化 dv/dt が小さいタイミングで deQ が入るように共振充電を二段階化する[1]。この時の各波形を Fig. 4 に示す。一段階目の充電では αV などから決定されるタイミングで一次側のスイッチを OFF する。この時はまだ deQ 回路は動作させない。その後、二段階目で αV に到達したタイミングで deQ がかかり充電が完了する。共振充電の性質上、一段階目の充電時間が長くなるほど二段階目の電流ピークは下がり、到達できる電圧も低下する。

ここで通常の共振充電と二段階充電における各 deQ 点を比較した時、二段階の方が正弦半波後端(位相 180°)に近い点で deQ がかかることに着目したい。それぞれの deQ 点における出力電圧波形を拡大したイメージ図を Fig. 5 に示す。正弦半波のピーク(位相 90°)を少し過ぎた辺りで deQ が入る場合、出力電圧の dv/dt が比較的大きく、deQ の指令が出た後に実際に実行されるまでの遅延 Δt の間で変化する電圧差 ΔV も大きくなる。一方で、位相 180° 付近で deQ が入る場合、 Δt が前者と等しいと仮定すれば ΔV が相対的に小さくなる。つまり、設定電圧からのズレが小さくなり、粗い充電の精度が向上する。これは同時に微調整の精度も向上することを意味する。

3.2 実験方法

本開発ではまず二段階充電の有無による精度の違いが実証できるかどうかに着目した。具体的には制御プログラムを書き換えて二段階充電を ON/OFF できるようにした後、それぞれに対して繰り返し周波数 5 kHz で 50 回の充放電を行い、全パルスの微調整後の電圧を測定・集計した。電圧測定には 0.01 % 以下の差異が十分見られる高精度の差動アンプを使用し、測定精度を上げた。なお、測定点は各充電の開始時間からの経過時間で固定し、これによる精度のバラつきへの影響を軽減した。

3.3 実験結果

まず始めに実際に出力波形を Fig. 6 に示す。通常の充電から二段階充電に変えた時、deQ 点が位相 90° 強(黒丸部)から 180° 弱(赤丸部)へ移るように調整した。なお、電流測定器の都合上、測定しやすいトランス一次側電流を測定した。また、放電には 1Ω 以下の抵抗を使用し、急峻に立ち下がるようにした。次に、二段階充電の有無における各 50 個の電圧値を集計したヒストグラムを Fig. 7 に示す。なお、どちらも最初の 7 回の充電電圧値は主に電源側電圧の急減によって変動が大きくなり過ぎるため無視した。通常充電では山が広く低く分布しているのに対して、二段階充電では狭く高い山が形成されていることが分かる。これは明らかに二段階充電の方が高精度となることを示しており、その結果、精度は $0.049\%(\pm 0.025\%)$ から $0.019\%(\pm 0.01\%)$ に改善された。

4. 結論

本開発では高速コンデンサ充電器の高精度化に向けて、理論だけだった二段階の共振充電技術の基本動作

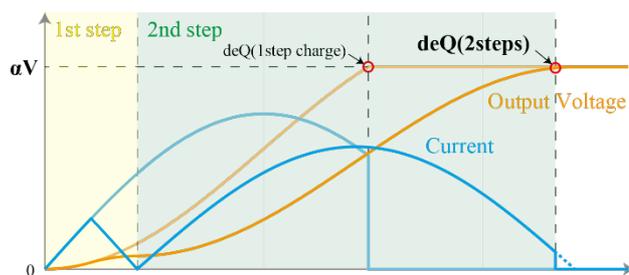


Figure 4: Principle of two-steps resonant charging.

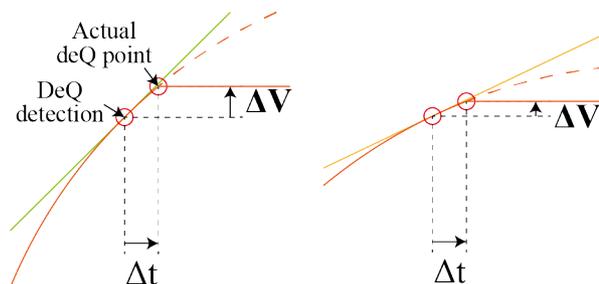


Figure 5: Differences in voltage differences depending on the deQ points. (L) Large dv/dt , (R) Small dv/dt .

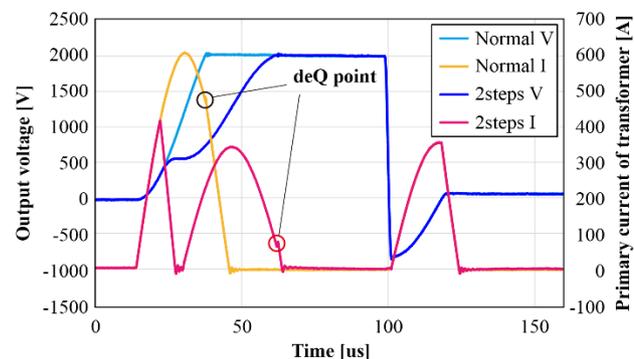


Figure 6: Output voltage and primary current waveforms of normal charging and two-steps charging.

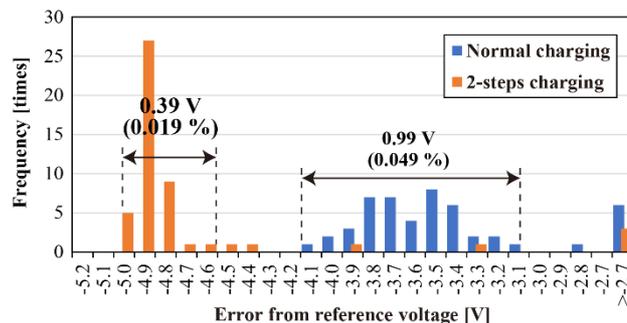


Figure 7: Histograms of Errors from a reference voltage with normal and two-steps charging. Initial seven values from fifty-times charging is not included.

とその効果を実証するべく進められた。結果、二段階充電は共振充電の精度向上に有用な効果があることが認められた。今回の例では電圧変動を従来の約 39 % に抑えることができ、精度は $\pm 0.01\%$ 以下となった。しかし、今回の実験結果はバースト開始時の過渡的データを除去

しており、真の実力値ではないことに注意されたい。また、
現段階では各種パラメータの最適化が未完了で、今後
更なる高精度化が期待できる。最適化を図った後、デー
タ取得数を増やしてより正確な電圧精度の実力値を評
価していきたい。加えて、今回除外した充電初期の数発
を含めて目標精度を達成できるように回路の改良を進め
ていきたい。

参考文献

- [1] K. Furuya, H. Mori, 特開 2002-78359.