

ILC 用多段マルクス回路の充電回路と制御の検討

STUDY OF MARX CIRCUIT POWER CHARGE AND CONTROL SYSTEM FOR ILC

林拓実^{#,A)}, 鈴木隆太郎^{A)}, 小笹有輝^{A)}, 江偉華^{A)}, 須貝太一^{A)}, 徳地明^{A,B)}, 澤村陽^{B)}, 明本光生^{C)},
中島啓光^{C)}

Takumi Hayashi^{#,A)}, Ryutarou Suzuki^{A)}, Yuki Kozasa^{A)}, Weihua Jiang^{A)}, Taichi Sugai^{A)}, Akira Tokuchi^{A,B)},
Yo Sawamura^{B)}, Mitsuo Akemoto^{C)}, Hiromitsu Nagashima^{C)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} Pulsed Power Japan laboratory Ltd.

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A high power and long pulse power supply for the International Linear Collider(ILC) is being developed. The target specifications are $-120\text{kV}(\pm 0.5\%)$, 140A , 1.7ms , and 5pps , with special consideration on compactness, reliability and cost control. A chopper MARX circuit with independent phase control has been developed by using new semiconductor devices. The technology for constant voltage control MARX circuit has been proposed. Furthermore, there is a proposed plan for charging the MARX units in parallel. For the target -120kV , 20 MARX units, each is capable of generating the output of -6.4kV , are superimposed. Each unit is composed of four-stage MARX cells of -1.6kV each. Important technical problems include ripple reduction and loss reduction during charging.

This paper shows an 80 stage MARX circuit optimization design for the charging circuit and overall structure of MARX for ILC.

1. はじめに

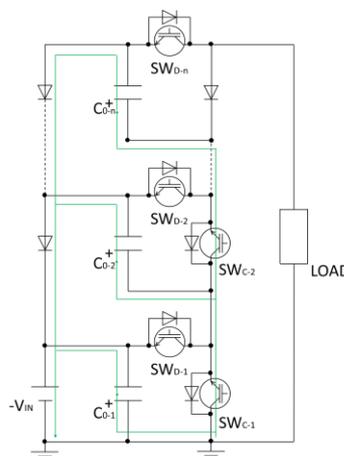
現在、高エネルギー下で電子と陽電子の衝突実験を行う ILC (International Linear Collider) の研究が推進されている。ILC 計画では、電子銃が電子ビームを生成し、その電子ビームから、電子の反粒子である陽電子をつくる。その電子と陽電子をそれぞれ 15km ずつ加速させ衝突させるものである。ILC 計画では加速域の 30km の間に 380 台の 10MW のマルチビームクライストロンを用いて粒子を加速させる。それに伴って電源も 380 台必要となる。この電源に求められる性能としては、 $-120\text{kV} (\pm 0.5\%)$, 140A , 1.7ms , 5pps , という高出力かつ長パルスの出力、さらに電源の小型化、低コスト化、高信頼性などが要求されている。パルストランスを用いて昇圧し、バウンサー回路で補償する場合、パルストランス及びオイルタンクが大きくなり要求を満たすことができない。そのためパルストランスを必要としない半導体スイッチを用いた半導体マルクス回路が有用であると考えられている。一般に、マルクス回路は並列でコンデンサに溜めたエネルギーを直列に放電する回路であるため、他方式の回路に比べ、充電時の損失が大きいことが知られている。

そこで本論文では、トータル 80 段という段数の多いマルクス回路に対する、充電回路の最適化設計と、全体設計について報告する。

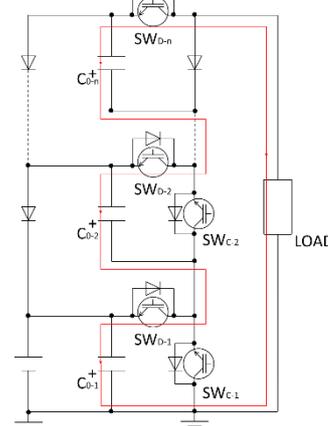
2. 原理

2.1 半導体マルクス

Figure 1 に半導体マルクス回路の回路図を示す。半



(a) The charge current path.



(b) The discharge current path.

Figure 1: Semiconductor MARX circuit.

導体マルクス回路は充電コンデンサ、充電スイッチ、放電スイッチ及び充電ダイオードから構成されている。充電スイッチ SW_C をオンして電源から SW_C とダイオードを介して格段のコンデンサに充電するモード1と放電スイッチ SW_D をオンしてコンデンサから SW_D を介して負荷に出力するモード2を交互に繰り返すことで動作する。このように、マルクス回路は並列でコンデンサに充電し、スイッチを用いて直列で放電することで、次式に示すように充電器電圧の n 段倍の出力を得る回路である。

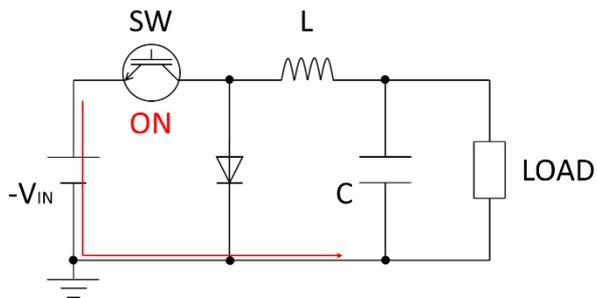
$$V_{out} = nV_{IN}$$

2.2 降圧チョップ

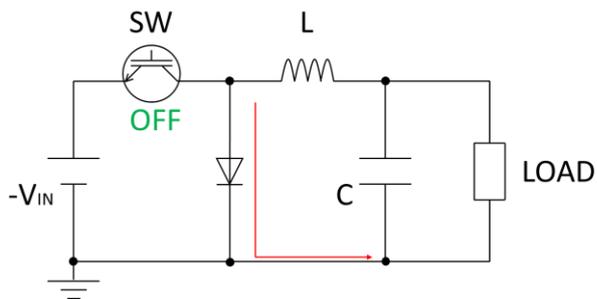
本論文でのマルクス回路には、長パルスが求められている。パルス開始時のコンデンサ電圧と比べて終了時コンデンサ電圧は低下する。Figure 2 に降圧チョップの回路図を示す。スイッチをオンすると、電源からスイッチとインダクタンス及びコンデンサ経路で電流が流れ、スイッチがオフするとインダクタンスに蓄えられた磁気エネルギーによりコンデンサ及びダイオードを経由し電流が流れる。この降圧チョップ回路と半導体マルクス回路を組み合わせることで定電圧制御を行う。

2.3 チョップ型マルクス

Figure 3 に本論文での定電圧制御マルクス回路の回路図を示す。充電時は同様の経路で電解コンデンサに充電し、放電時は SW_D をオンオフすることにより、定電圧制御を行う。また、降圧チョップ型DC/DCコンバータを小型化することにより発生するリップルには、マルクス回路の格段の出力の位相をずらすことにより低減することが出来る。



(a) Mode 1.



(b) Mode 2.

Figure 2: Step down chopper circuit.

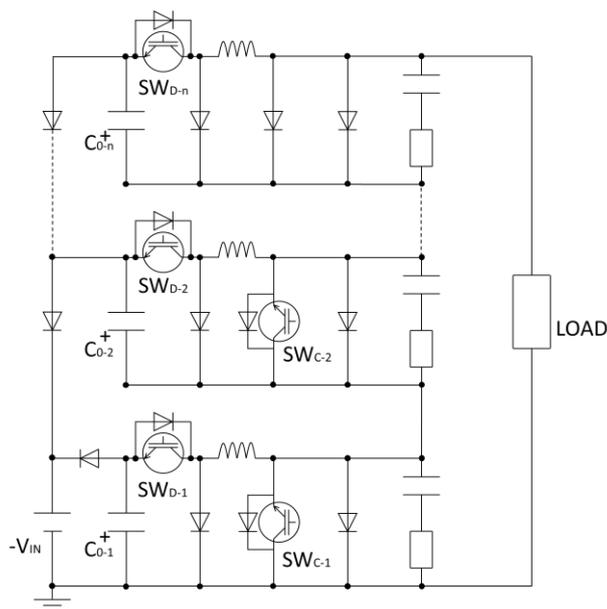
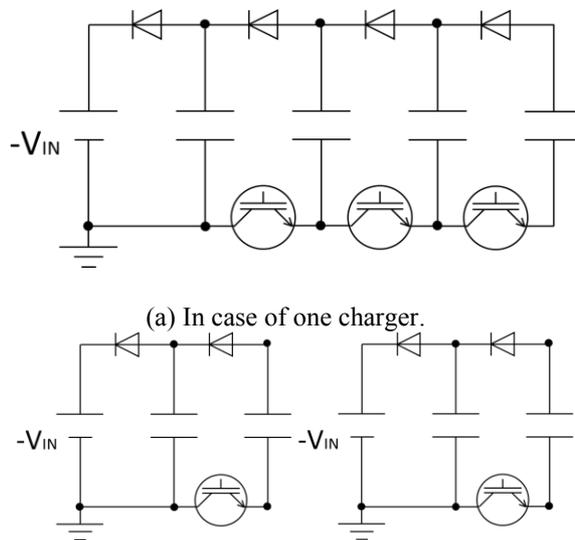


Figure 3: Chopper MARX circuit.



(a) In case of one charger.

(b) In case of two chargers.

Figure 4: Charging circuit.

3. 充電回路の最適化

3.1 充電回路

充電回路を改めたものを Figure 4 に示す。図からわかるようにマルクス回路は、段数を重ねるごとにスイッチ及びダイオード数が増える。これにより充電時に電流が多く流れ、それにより半導体素子の損失が増え、更に半導体素子のオン電圧により充電器から離れるに従って、コンデンサ充電電圧が低下する。Figure 5 に充電器一台で充電するマルクス段数に対する充電損失を示す。この図より、マルクス回路は段数が増えるにつれ、充電損失が加速度的に増えることがわかる。そこで、本論文では、充電器数

を増やすことで、充電損失の低下及び充電電圧の低下を解決し最適設計を行う。

Figure 6 に充電器一台で充電するマルクス段数とマルクスが 80 段のときの充電損失及び出力可能電圧の関係を示す。ただし、マルクス段数は全ての充電器に同じ数接続されるものとする。出力可能電圧は、各コンデンサに充電された電圧の合計にドレージ率 20% をかけたものとなっている。図より 80 段を一台の充電器で充電する場合、出力可能電圧は 115kV となり仕様を満たせないことがわかる。この図から、-120kV の出力のためには少なくとも充電器が二台必要であることがわかる。また、左軸には充電器数と充電時に発生する損失の関係について示す。充電器数を増やすことにより、充電器一台あたりが負担する入力電力が減少し、出力する電流が小さくなることで損失が低下する。また、充電器に近い半導体素子ほど大きな電流が流れるため、充電器数が多いことで、半導体素子の耐電流に余裕が生まれる。充電器数を増やすことで充電電圧の低下及び損失の低下が防げることを示した。最も損失が少なく最も充電電圧が減少しないのは、充電器を段数分つけた場合である。しかし、充電器数が増えると機器全体の体積が増加するため一段ずつ充電器を付けることは難しい。そこで、充電時の損失は 1% 以下となるように選定を行う。Figure 6 より充電損失 1% 以下を達成できるのは充電器一台に対して充電する段数が 5 段以下の場合である。一台で負担する段数が多くなるにつれ、充電の構成が難しくなり、ユニット化した場合、1 ユニット当たりの出力電圧が高くなるため、内部の絶縁が難しくなる。充電器一台で充電するマルクス段数は 4 段、5 段が適していると考えられ、上記の理由から 4 段を選定し、充電器数 20 台とする。4 段では、充電損失がマルクス回路の損失の 0.64% となり、出力可能電圧は、127kV になる。これ以上台数を増やすと損失及び充電電圧の低下は極めて小さくなるが、面積は倍々と増える。そのため、充電器数を 20 台とし四段ずつ充電する方法が最適だと考えられる。

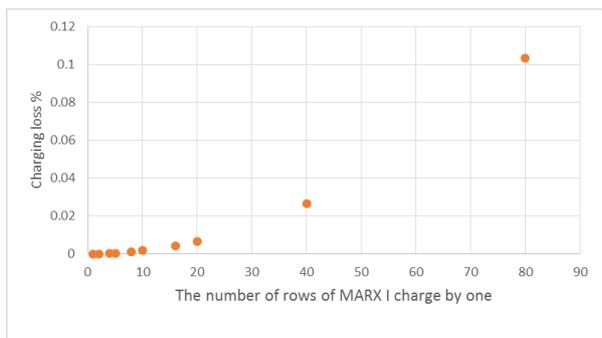


Figure 5: The number of rows I charge by one and charge loss.

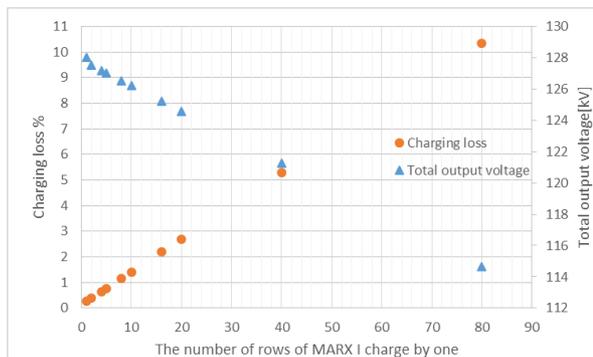


Figure 6: Relation between the number of rows of MARX charge by one, loss and the output possible voltage.

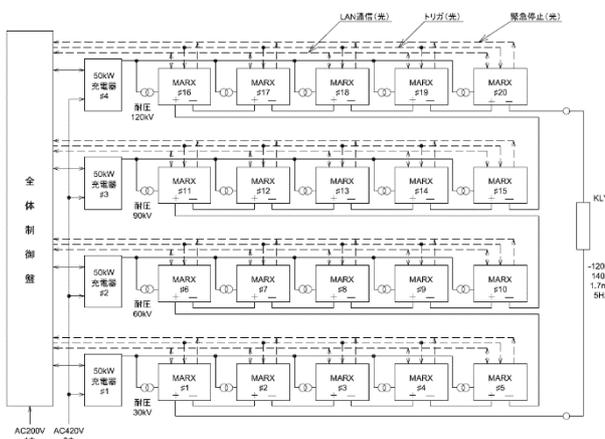


Figure 7: The whole schematic.

Table 1: The Respective Performance

Charger	Output:50[kW]
Transformer	Capacity:10[kVA]
MARX unit (Four step)	Input Voltage:2.0[kV] Output Voltage:6.4[kV]

4. 全体構成

充電回路の設計を受けて全体構成を考案した。全体構成を Figure 7 に示す。マルクス回路 80 段に対して、10kVA の絶縁トランスを 20 台用いて充電する。ここでの絶縁トランス及び整流器が前述していた充電器に当たる。このように充電器を複数台用意することで、充電時に発生していた問題点を解決する。

絶縁トランス 5 台に対して、50kW の充電器を 1 台用いて電力を供給する。本論文で全体構成を考えたことにより、前提としていた充電電圧が常に一定であるという事項に関して検討する必要が出てきた。入力電圧は、出力電圧に大きく関係していることから、常にモニターしフィードバックする必要がある。

そこで、マルクス回路への入力電圧リアルタイムでモニターし全体制御盤へとフィードバックし、充電器の定電圧制御を行う。マルクス回路は最大-120kVに電位が浮いているため、光通信を行うことで絶縁する。これを実装することにより、マルクス回路の出力を安定させることが出来る。

5. まとめ

本論文では、80段という段数の多いマルクス回路に対する、充電回路の最適化設計を行い、充電損失を大幅に低減できる方式を提案した。また、ILC用チョッパ型マルクス回路の全体構成を示した。下記にその結論を示す。

(1) 充電損失は充電器一段に充電するマルクス段数を減らすことにより、一段当たりに入流する充電電流を減少させることにより大幅に減少させることが出来る。

(2) 充電電流が減少することにより、素子の耐電流に余裕を十分持たせることが出来る。

以上のことより、提案する充電方式を採用することで回路全体の損失が大幅に減らすことが出来る。

今後は、最大-120kVに電位が浮いている状態のマルクス回路の充電電圧をモニターし、リアルタイムで充電器にフィードバックすることにより、充電器の定電圧制御を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Y.Kozasa, et al., “ILC用半導体マルクス電源”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-11, 2014, Aomori, Japan. PASJ2014-SAP055.