

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻
職位または役職	准教授
氏名	大西 亘

1. 研究題目

超高加速度リニアモータを用いたヒューズ半導体ハイブリッド直流遮断器の開発

2. 研究目的

本研究のねらいは、超高加速度リニアモータを用いた、ヒューズ半導体ハイブリッド型超高速直流遮断器の開発である。提案するハイブリッド型超高速直流遮断器により、以下が期待される。

1. 鉄道用の直流遮断器(1.5kV)の小型化・低コスト化
2. 小型・低コストの直流 25kV の超高速遮断器の実現により、
 - ・直流マイクログリッドシステム
 - ・未来の高電圧直流(9kV, 25kV)システム の社会実装への道を拓く

本研究は図1に示す、“使い捨てる電力機器”という斬新な設計思想を採用することで、

- ① 100kA にも及ぶ直流大電流が $\sim 10\text{ms}$ 以内で遮断できる**高速遮断性能**
- ② 遮断完了後に印加される 25kV 超の過渡回復電圧に耐えうる**絶縁性能**
- ③ 遮断完了後 $\sim 50\text{ms}$ 以内での**高速再閉路**
- ④ $\sim 1\text{m}$ スケールの**コンパクト性**

の全てを満たす高速直流遮断器を目指しており、**特許も登録済み**である。本直流遮断器は、ヒューズを使い捨てるという特殊性から、③の高速再閉路のためにはヒューズの高速な転換が必要である。そこで本研究は、ヒューズの切り替え・高速再閉路のための **15G を超える超高加速度のリニアモータの開発**と、極限加速度における**高速高精度位置決め技術**開発を目的とする。

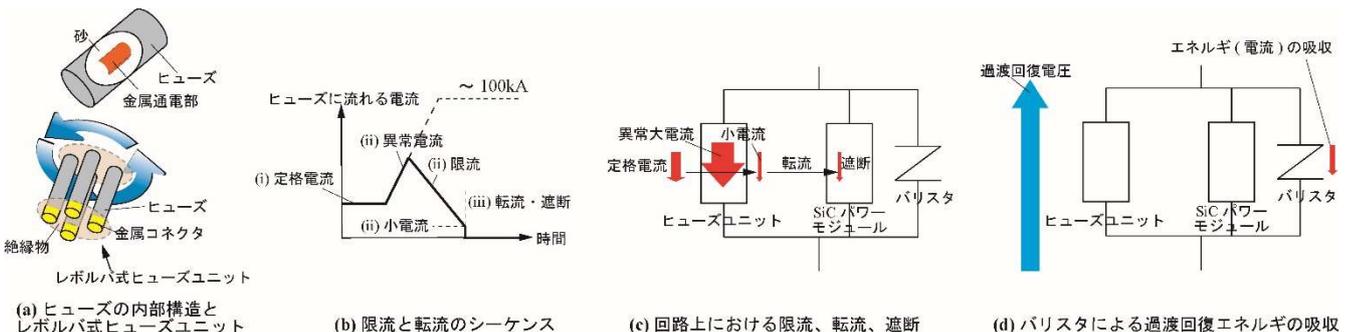


図1 本研究で提案する新しい直流遮断器

3. 研究内容及び成果

[Wataru Ohnishi, Yuki Inada, Shungo Zen, Reon Sasaki, Yasuhiro Takada, Yuta Miyaoka, Kosuke Tsukamoto, Yasushi Yamano: Proof-of-Concept of a Fuse-Semiconductor Hybrid Circuit Breaker with a Fast Fuse Exchanger, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, No. 2, 2023.]から抜粋をする。

【提案する遮断原理と設計製作した実験装置】

提案するヒューズ・半導体ハイブリッド遮断器の回路図を図 2 に示す。図 3 に示す、高速高精度に駆動できるリニアモータによるヒューズ交換装置を設計製作した。

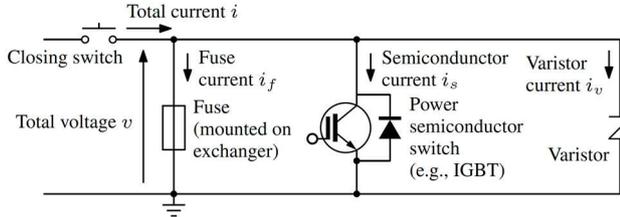


図 2 提案する回路図

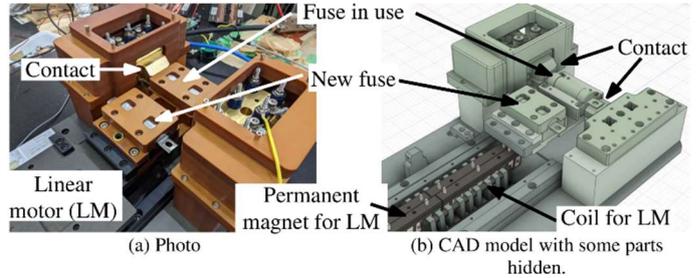


図 3 リニアモータにより駆動されるヒューズ交換装置

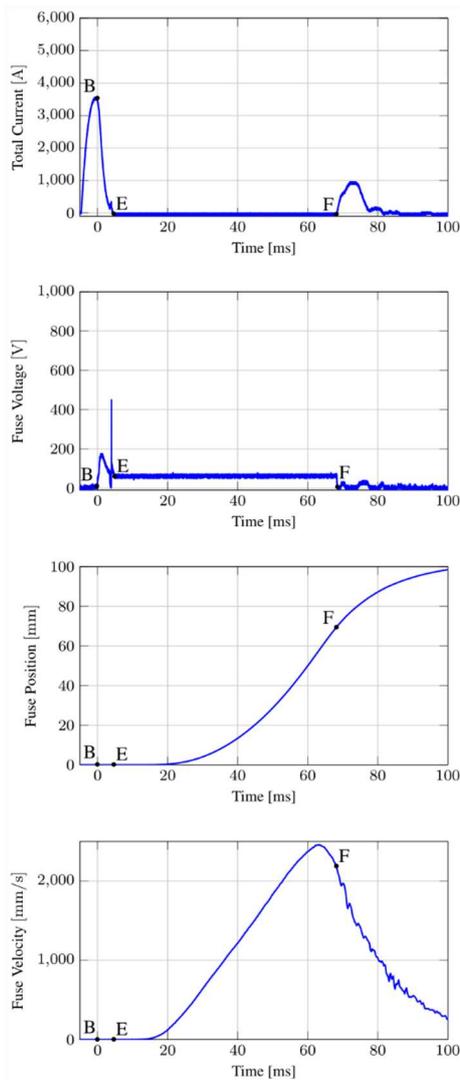
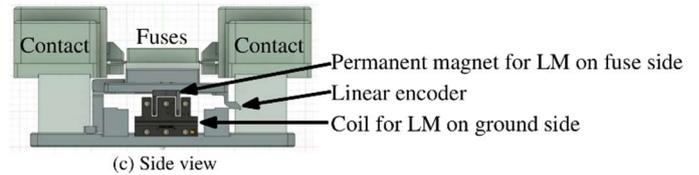


図 4 3.6kA 事故電流遮断結果

【実験結果】

Fuji Electric FA Components & Systems Co., Ltd.による FCK2-75 のヒューズを用いた遮断試験結果を図 4, 5 に示す。

図 4 より、B 地点でヒューズが作動し、事故電流を限流・遮断し、E 地点で遮断が完了していることがわかる。さらに、リニアモータの高速動作により、F 地点でヒューズ交換が完了し、68.2ms で再閉路に成功した。

図 5 より、事故電流をさらに増やすと、2.8ms-4.75ms の電流波形に明らかなように、ヒューズのみでは遮断ができていないことがわかる。C 地点に IGBT が ON して転流し、さらに D 地点で IGBT が OFF することで遮断が完了している。

以上より、ヒューズ交換機能を持つヒューズ・半導体ハイブリッド遮断器の有効性が示された。さらなる大電流・高電圧化の実験も成功し、結果は査読中である。

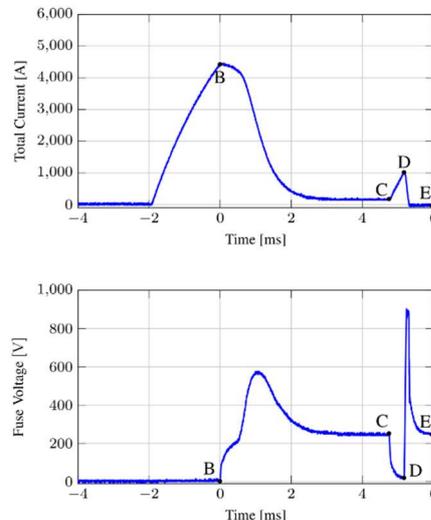


図 5 6.0kA 事故電流遮断結果

4. 今後の研究の見通し

本コンセプトは、ヒューズ・パワー半導体・リニアモータが協調し、お互いの利点を活かし、欠点を補い合うことで、それぞれ単独では遮断できない大電流を遮断するものである。したがって、様々な設計パラメータはトレードオフ関係にあり、設計を誤ると、過剰に保守的な設計となり高コスト化するか、爆発などの損傷が生じる可能性がある。

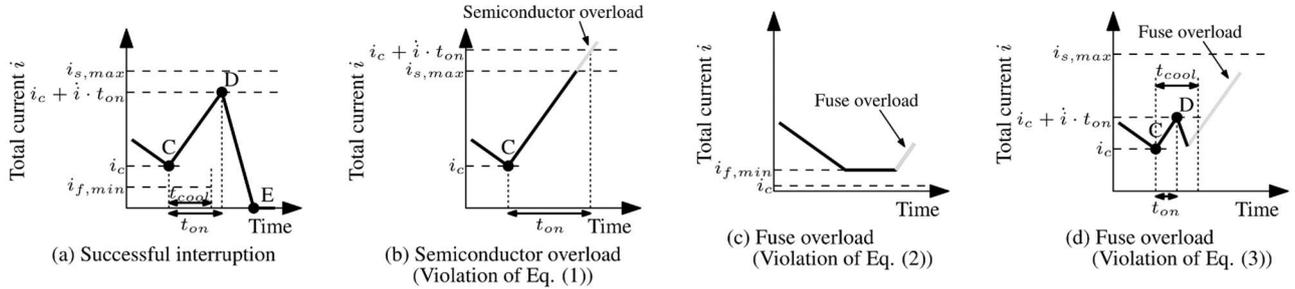


図 6 遮断器設計の制約条件[1]

現在、このトレードオフ設計は事前の実験により行われているが、今後はマイクロコントローラや FPGA によるオンライン計測に基づく、転流条件の最適化による「スマートな遮断器」を提案し、さらなる遮断電流・電圧の向上を目指していく。

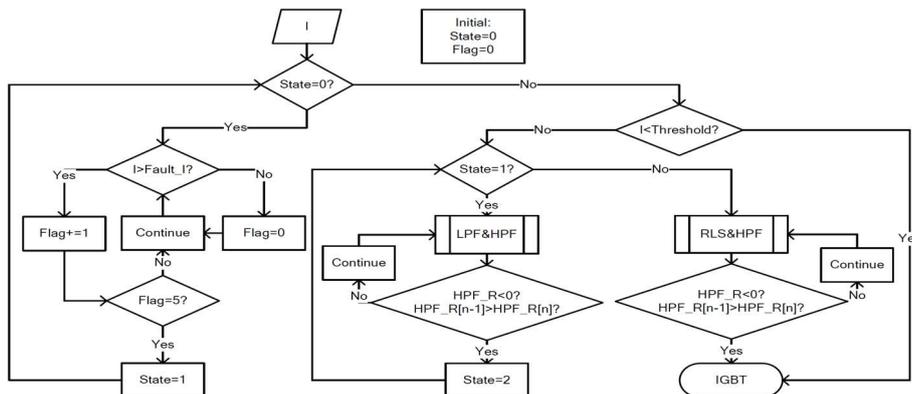
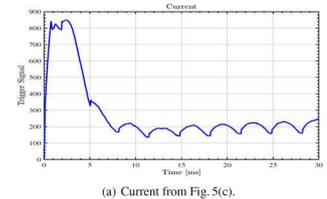
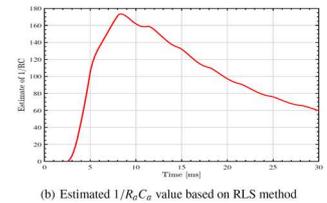


Fig. 10. Flowchart for online decision of fuse transform timing, where State and Flag are initial global variables. State is able to select different states. Flag is a redundant judgment of the on moment.



(a) Current from Fig. 5(c).



(b) Estimated $1/R_e C_e$ value based on RLS method

Fig. 9. Current waveform and estimated $1/R_e C_e$ value plot obtained based on the RLS method. Fig. (a) signifies current value, (b) represents $1/R_e C_e$.

図 7 ヒューズ状態のオンライン推定機構の一例[4]

図 8 ヒューズの等価時定数の推定例[4]

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

【査読付 学術論文誌】

- [1] Wataru Ohnishi, Yuki Inada, Shungo Zen, Reon Sasaki, Yasuhiro Takada, Yuta Miyaoka, Kosuke Tsukamoto, Yasushi Yamano: Proof-of-Concept of a Fuse-Semiconductor Hybrid Circuit Breaker with a Fast Fuse Exchanger, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, No. 2, 2023.
- [2] Yuki Inada, Yusuke Fukai, Naoki Takayasu, Yusuke Nakano, Shungo Zen, Wataru Ohnishi, Yasushi Yamano, Mitsuaki Maeyama, Naoto Kodama: Spatiotemporal Evolution of Electrical Conductivity in Current-Limiting-Fuse Arc, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023.

他 2 報査読中

【査読無 国内会議】

- [3] 清水涼雅, 全俊豪, 稲田優貴, 大西亘, 中野裕介, 兒玉直人, 山納康: 高電圧用限流ハイブリッド直流遮断器の開発, 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー/静止器/開閉保護合同研究会, 2023.
- [4] Liu Yecheng, 佐々木怜音, 大西亘, 小林泰平, 山田圭矢, 稲田優貴, 全俊豪, 電気学会研究会資料(放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧合同研究会), 2023. (発表予定)