

2021 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	講師
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 $\sim 10\text{ms}$ 以内に遮断できる **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[4]**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。

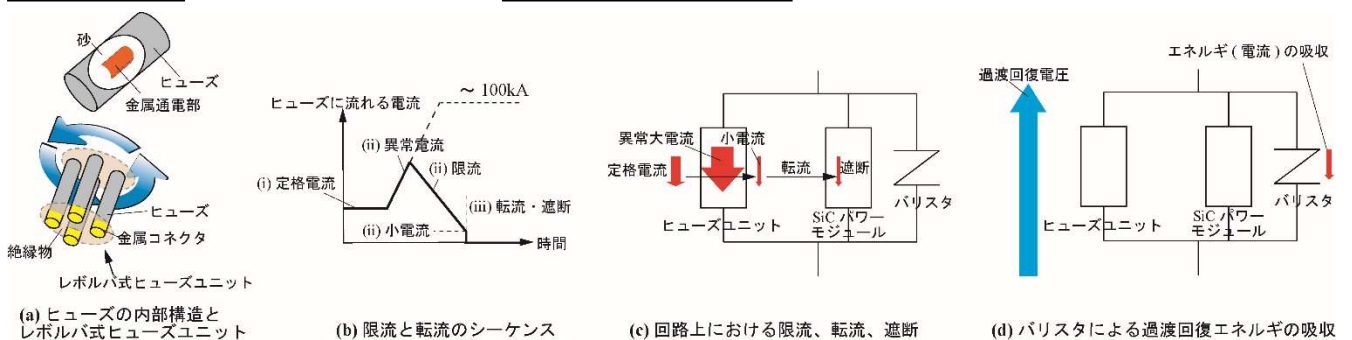


図1 本研究で提案する新しい直流遮断器

3. 研究内容及び成果

IEEE Transactions on Power Delivery (IF=4.825, Q1 Journal in Electrical and Electronic Engineering, Q1 Journal in Energy Engineering and Power Technology)に掲載された 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 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。

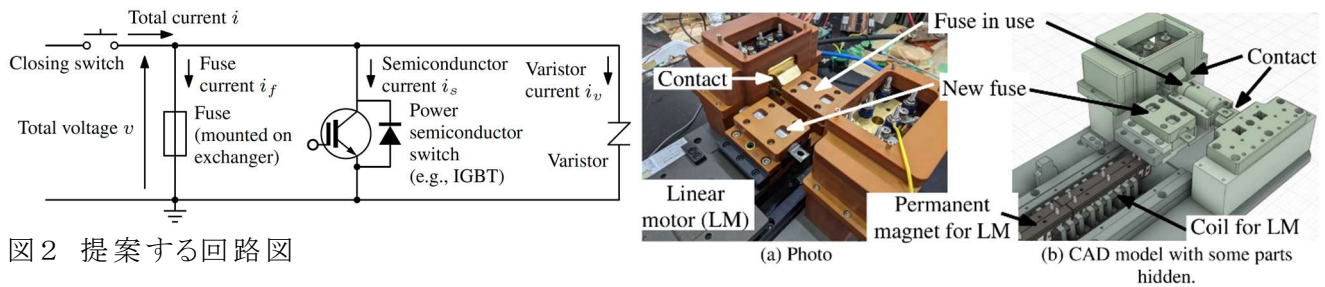


図2 提案する回路図

図3 リニアモータにより駆動される
ヒューズ交換装置

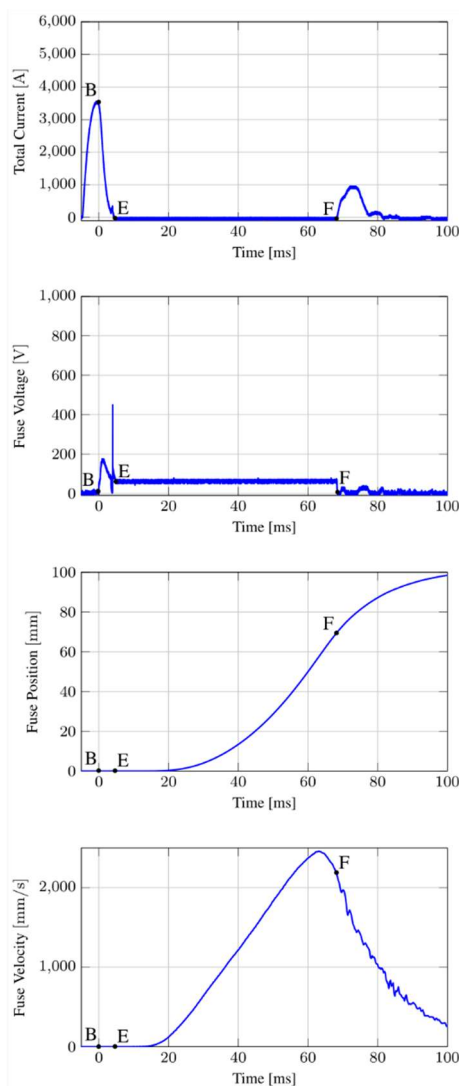


図4 3.6kA 事故電流遮断結果

【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。

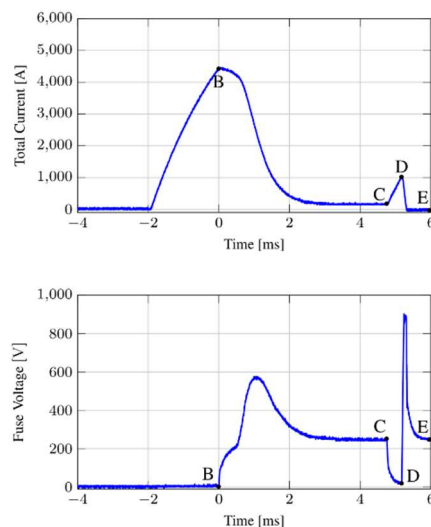


図5 6.0kA 事故電流遮断結果

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。

具体的には、ヒューズの転流しきい値 i_c 、IGBT の ON 時間 t_{on} に対し、式 (1)-(3) に示すトレードオフが存在する。

$$i_c + i \cdot t_{on} < i_{s,max} \quad (1)$$

$$i_{f,min} < i_c \quad (2)$$

$$t_{cool} < t_{on}, \quad (3)$$

ここで、 i は事故電流の変化率、 $i_{s,max}$ は半導体スイッチの許容電流値、 $i_{f,min}$ は、ヒューズの限流動作による電流の最低値、 t_{cool} は転流後にヒューズが絶縁体に戻る最低時間を表す。(1) が半導体スイッチが爆発しない条件、(2) が半導体スイッチへ転流動作が起こる条件 (転流が起こらないとヒューズが爆発する)、(3) がヒューズが十分に冷却される条件 (十分に冷却されないと再発弧し爆発する)。この条件を図示したのが図 6 である。

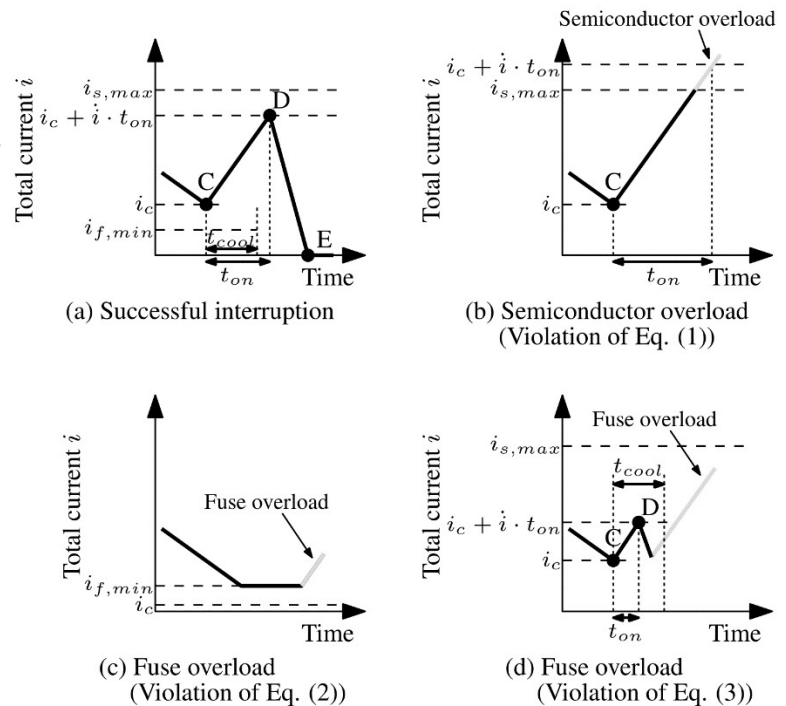


図6 遮断器設計の制約条件

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 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。

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*, 2022. (Early access)

【査読無 国内会議】

[2] 佐々木怜音, 大西亘, 高田康宏, 古関隆章, 全俊豪, 稲田優貴: ヒューズ半導体ハイブリッド遮断器におけるリニアモータを用いた高速ヒューズ交換の基礎検討, 電気学会研究会資料 (交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会), pp.7-12, 2022.

[3] 大西亘, 稲田優貴, 全俊豪, 佐々木怜音, 高田康宏, 宮岡優太, 塚本幸佑, 山納康: 高速再閉路可能なヒューズ半導体ハイブリッド遮断器の実証, 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), pp.13-18, 2021.

【特許】

[4] 稲田優貴, 山納康, 全俊豪, 前山光明, 大西亘, 特許第 7117744 号, 電流遮断装置及び電流遮断方法, 特願 2021-546922, 出願日 2020/9/15, 登録日 2022/8/4

【受賞】

[5] 大西亘, 開閉保護研究発表賞, 電気学会開閉保護技術委員会 ([3]の発表に対して)