

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420242

研究課題名(和文) 電流遮断時に電流経路を変えるインテリジェントエッチドヒューズの研究

研究課題名(英文) Research on the Fuse Element Pattern Changing a Current Pathway in the Process of Current Interruption

研究代表者

山納 康 (YAMANO, Yasushi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30323380

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：インテリジェントヒューズの基本構成部となる単位ヒューズのエレメントパターンの最適化による遮断性能の向上とこれを直列化した高電圧用ヒューズの開発を目的とした。エレメントのパターンを種々変えた場合について、遮断電流が流れたときに連絡ヒューズが機能し転流を起こすエレメントパターンの開発を行った。更に単位エレメントヒューズが直列化されても連絡ヒューズが機能するかどうかについて調査した。結果、エレメントパターンの違いにより遮断部のアーク特性を変えることで、ヒューズ内部で電流を転流させることができ、直列化においても転流が行われることが確認できたが、単位ヒューズエレメントの遮断性能の向上までは至らなかった。

研究成果の概要(英文)：Protection techniques for the semiconductors are regarded as an important issue, because power semiconductor devices are indispensable for electric power control systems. This paper reports new type of etched fuse element pattern which has possibility of improving the current interruption performance. Newly developed fuse element has the network current pathway on the ceramic substrate, and the pathway automatically changes rapidly when the short current flows. We named this fuse Intelligent Fuse. The basic design of the element of the Intelligent Fuse and the results of the interruption test are described. Some kinds of test fuse elements were prepared and the interruption tests were done under the short circuit current. The result shows the fault current pathway could be commutated from the ordinary current path by altering the number of the series interruption points. In addition, it is found that this commutation of the current pathway contributed to interruption of fault current.

研究分野：工学

キーワード：ヒューズ 半導体保護用ヒューズ パワーエレクトロニクス 短絡保護 電流遮断

### 1. 研究開始当初の背景

インバータを代表とする半導体電力変換装置において、回路の短絡・地絡事故により半導体素子が破損し、収納するケースまでもが破壊することがあり、これを保護するために半導体保護用ヒューズが用いられている。現在の半導体保護用ヒューズでは、事故電流が流れた場合に半導体用の収納ケースの防爆保護用として用いられており、半導体 (IGBT) 自体は保護できずに破損してしまう。電気自動車を代表とする電動機のユーザからはインバータ (半導体) 自体の保護が求められており、これを保護するためにヒューズの性能向上が必要である。

半導体の破損を保護するには、事故電流により半導体内部で発生する熱エネルギー ( $I^2t$  値) が、その許容値に達する前にヒューズによって電流を遮断できれば、半導体の破損を保護できる。それにはヒューズに事故電流が流れたとき、電流時間許容量の指標値  $I^2t$  値を半導体の  $I^2t$  値よりも低くする必要がある。このような高性能な半導体保護ヒューズが開発されれば、これまでなら高価なインバータを取り換えていたものが、安価なヒューズのみを取り換えるだけで済むようになり、コスト面、修理の容易さ、安全面においても大変有意義であり、電動機をインバータ駆動しているあらゆる産業へ波及効果は極めて大きい。

このような背景から、研究代表者は図 1(1) のような従来からの銀薄板をプレス機で打ち抜く方式で成形したヒューズエレメント (銀薄板プレス加工ヒューズ) とは全く構造が異なるエッチドヒューズやインテリジェントヒューズの研究を続けてきた。エッチドヒューズは、図 1(2) に示すようなセラミック基板上にヒューズエレメントを密着させたヒューズであり、ヒューズエレメントの電流遮断部である狭小部の機械的強度が上がるので、従来のヒューズより微細な加工が可能となり、これにより遮断性能を向上させることに成功した ( $I^2t$  値を  $1/3 \sim 1/10$  に低下)。これは、図 1(2) のように直列遮断点や並列遮断点を図 1(1) の従来のヒューズと比べて 2~3 倍まで増加させることで、事故電流が流れた時の  $I^2t$  値が直列点数の増加による S (直列) 分割効果や並列点数の増加による P (並列) 分割効果によって大幅に低下できたからである。このエッチドヒューズの製造技術の向上により、電流遮断特性がエッチドヒューズより更に 2 倍以上優れたインテリジェントヒューズの製作と実用化が可能になったと考えられる。

インテリジェントヒューズは、図 1(3) に示すようにセラミック基板上のヒューズエレメントに (a) 部、(b) 部と、連絡ヒューズ (c) 部からなる遮断点がネットワーク状に設けられている構造となっている。このヒューズは定常通電時 (定格電流以下) は (a) 部と (b) 部を電流が流れ、事故電流時には電流の経路を自

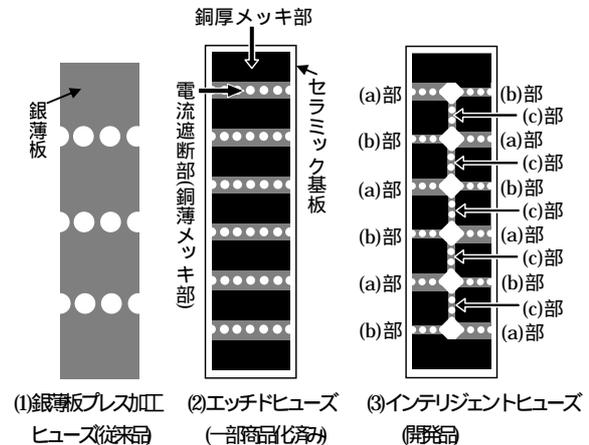


図 1 半導体保護用ヒューズエレメント

動的に変えることができる全く新しい発想を持ったヒューズである。事故電流が流れた時、図 1(3) に示される (a) 部、(b) 部のアーク放電の特性の違いによって電流が転流することにより、連絡ヒューズ (c) 部にも電流が流れる。これで電流経路の直列遮断点数が約 2 倍になり、S 分割効果によって遮断性能の向上が期待できる。

### 2. 研究の目的

電気自動車の半導体保護用ヒューズとして、インバータの半導体の破損を保護できる程度に  $I^2t$  値を低下させることを最終目的として、本研究では図 1(3) のようなインテリジェントヒューズの基本構成部となる単位ヒューズのエレメントパターン最適化による遮断性能の向上と単位エレメントヒューズを直列化したものを開発することを目的とする。具体的には、ヒューズエレメントのパターンを変えて、連絡ヒューズを機能させて、電流を転流させるためのエレメントパターンの開発を行い、遮断性能の各段の向上を目指す。また、単位エレメントヒューズの直列化によって、高電圧化されたインテリジェントヒューズにおいても連絡ヒューズを機能させて電流を転流させるためのエレメントパターンの開発を行い、遮断性能の各段の向上を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) インテリジェントヒューズの設計パラメータ

転流の実現には、3 種類の遮断部の相対的な動作特性を高度に制御する必要がある。ここで図 2 に直列分割数  $S=2$ 、並列分割数  $P=4$  である遮断部の例を示した。ここでは、図 2 の網掛けの部分の狭小部と呼び、狭小部の最小断面積位置における電流密度を最大電流密度  $j$  と呼ぶ。遮断部の抵抗値  $R$  は、狭小部の抵抗値に直列分割数  $S$  を乗じて並列分割数  $P$  で除し、さらに厚メッキ部の抵抗値を加えた値である。これらのパラメータが満たすべき条件や物理的意味について ~ 項で説明する。

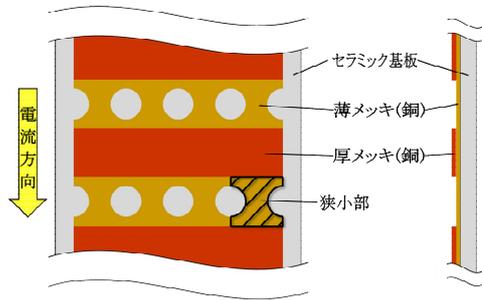


図2 遮断部の構造列(直列分割数2,並列分割数4)

遮断部の抵抗値 ( $R_A$ ,  $R_B$ )

通常時のインテリジェントヒューズは図1(c)のように(a)部と(b)部のみに電流が流れ、(c)部には電流が流れないようにする必要がある。したがって、(a)部と(b)部の抵抗値 ( $R_A$ ,  $R_B$ ) はそれぞれ等しくなるように設計する必要がある。

遮断部の直列分割数 ( $S_A$ ,  $S_B$ )

通常時の電流経路から遮断時の電流経路に転流するためには、(a)部のアーク時間を(b)部よりも短くする必要がある。アーク時間は直列分割数の増加に伴って減少すると考えられるので、(a)部の直列分割数  $S_A$  は(b)部の直列分割数  $S_B$  よりも大きくする必要がある。

狭小部の最大電流密度 ( $j_A$ ,  $j_B$ )

電流変化率  $di/dt$  が非常に大きい事故電流を遮断する場合、遮断部の溶融は熱伝導を無視した断熱過程において起こると考えられる。したがって、遮断部の材料が同じであれば、その溶断時間は電流密度によって決まる。ここでは、各遮断部の最小断面位置における電流密度を最大電流密度 ( $j_A$ ,  $j_B$ ) と呼んで設計のパラメータに加えた。

狭小部の単位消費電力 ( $w_A$ ,  $w_B$ )

電流変化率  $di/dt$  が比較的小さい事故電流を遮断する場合、遮断部では熱伝導の影響を伴った溶融現象が起こると考えられる。遮断部の材料が同じであれば、その溶断時間は狭小部の消費電力と熱伝導の影響によって決まると考えられる。本論文では  $di/dt$  が非常に大きい電流に対する遮断動作を主題としているため、各遮断部の狭小部の消費電力を単位消費電力 ( $w_A$ ,  $w_B$ ) と呼んで設計パラメータに加え、熱伝導の影響については今後の検討課題とした。

## (2) インテリジェントヒューズの設計法

ヒューズエレメントの設計では、(a)部と(b)部に関して前述の ~ 項に示したパラメータを先ず与える。インテリジェントヒューズでは(a)部と(b)部の抵抗値を等しくする必要がある(式(1))。また、直列分割数の比は1以上の任意の定数  $k$  に設定することができる(式(2))。ここで並列分割数  $P$  と最小断面積  $D$  を用いて式(1)の条件のもとで最大電流密度の比を表すとそれぞれ式(3)のようになる。

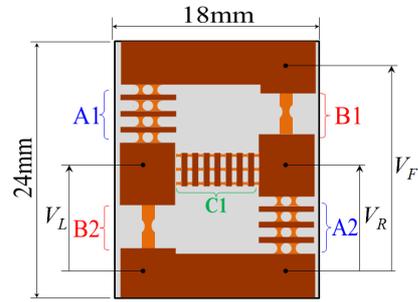


図3 供試単位インテリジェントヒューズエレメント

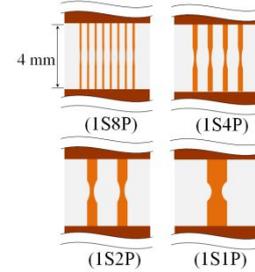


図4 B部の構造列

$$R_A = R_B \quad (1)$$

$$S_A/S_B = k \quad (k \geq 1) \quad (2)$$

$$j_A/j_B = \frac{P_B D_B}{P_A D_A} \quad (3)$$

$$w_A/w_B = \frac{S_B P_B}{S_A P_A} \quad (4)$$

今回は各パラメータを適宜組み合わせ設定してあり、これらが動作特性に及ぼす影響を調べた。これらのパラメータを上式(3)、式(4)に代入すれば、並列分割数の比  $P_A/P_B$  および最小断面積の比  $D_A/D_B$  を決定することができる。

## (3) 試作単位ヒューズエレメント

供試単位ヒューズエレメントは図3のようなエッチドヒューズエレメントの技術を採用したものであり、セラミック基板上にメッキした銅薄膜をエッチングして作られる。また、追加メッキを施して立体構造にすることで厚メッキ部(85  $\mu\text{m}$ )と薄メッキ部(25  $\mu\text{m}$ )を設けた。薄メッキ部は厚メッキ部を隔てて直列に分割されており、さらにそれぞれの薄メッキ部もエッチングによるパターン加工で並列に分割されている。この薄メッキ部が狭小部となる。このようなエレメントに事故電流が流れると、発生するジュール熱はエレメント内の最も断面積が小さい箇所(薄メッキ部の中心の狭小部)に集中して溶断し、アークが発生する。このアークは薄メッキ部を溶かして伸長し厚メッキ部まで到達するが、厚メッキ部は銅薄膜が厚く形成されているためアークによる浸食が遅くなる。先にも述べた通り、インテリジェントヒューズは図3のように1枚のエレメント内に3種類の遮断部を持ち、A1とA2同土、B1とB2同土が

それぞれ同じ構造且つ同じ抵抗値となっている。A部とB部の遮断特性に差をつけることで電流遮断過程において電流経路を転流させ、C部に電流を流す仕組みである。

A部の構造を変えてA部の直列遮断点数の増加によるアーク電圧の増加により転流を実現した(後述発表論文の雑誌論文(1)参照)が、遮断特性の向上には至らなかった。その原因として、B部のアーク時間が短く、C部へ流れる電流が十分でなかったことが考えられた。ここでは、更にB部の構造を変えた場合について述べる。図4に試作したインテリジェントヒューズを構成する回路一部分の単位エレメントの1つを示し、A部(4直列2並列、以下4S2Pのように示す)、B部(1S1P)、C部(8S3P)となっている。試作したエレメントは4つであり、図4に示すようにB部の並列分割数が異なる。B部の並列分割数を8, 4, 2, 1と減らしており、A部に比べてB部のアーク時間を長くすることを予想して製作した。

#### (4) 試験回路

遮断試験回路と校正波形を図5、図6に示した。合成コンデンサに充電した後、投入器を動作させて短絡電流を試験エレメントに通電した。その時の電流Iの波形およびエレメントの各部電位VF, VL, VRの波形を測定し、アーク発生タイミングを検討した。なお試験エレメントはヒューズリンクを模擬した専用ケースに収めて消弧砂を充填し、油圧ポンプでケースの蓋に3.0~3.5 MPaの圧力をかけながら遮断試験を行った。

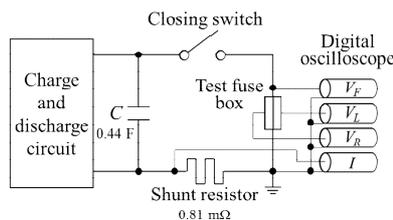


図5 遮断試験回路

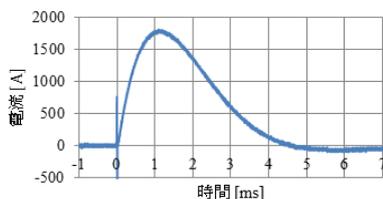


図6 校正試験の電流波形(10V充電)

#### 4. 研究成果

試作した4つの単位エレメントを分割して、遮断部単体に対して合成コンデンサ90V充電の遮断試験を行った。得られた波形からA部およびB部のアーク時間を求めた結果を図7に示す。同図よりB部の並列分割数を減らすことでB部のアーク時間が長くなる傾向が見られた。また4S2PのA部のアーク時間はB部に比べて短くすることができた。

試作した4つの単位エレメントに対して

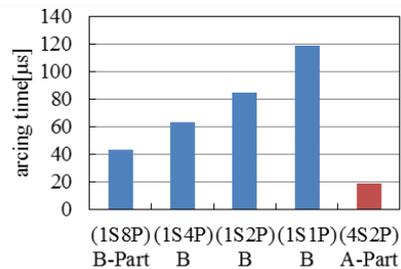


図7 B部のアーク時間

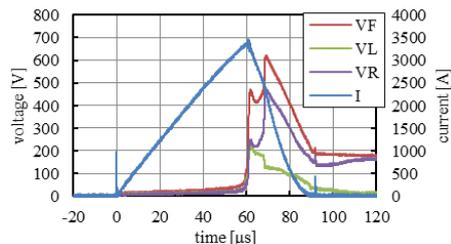


図8 遮断試験波形(B-Part:1S1P)

180 V 充電の遮断試験を行った。一例としてB部が1S1Pの場合のエレメントの遮断波形を図8に示す。時刻0 μsが通電開始時刻となっている。60 μsでVF, VL, VRの波形が立ち上がっていることからA1, A2部, B1, B2部でアークが発生したと言える。その後65 μs付近からVLとVRに大きな電位差が生じており、この時転流によってC部が溶断したと言える。この瞬間、電流波形のdi/dtが変化して傾きが大きくなっていることがわかる。遮断試験後にヒューズエレメントを観察したところC部は確実に溶断し、アークの熱で溶けた消弧砂が冷えてできた固まり(フルグライト)が確認できた。しかし、C部のフルグライトの量はA部やB部に比べて少量であり、C部はすぐに消弧したと考えられる。そのためC部が十分に遮断に寄与しているとは考えにくい。また他のエレメントについても同様な波形が見られ、B部のアーク時間を変えたことによる遮断特性の違いは見られなかった。遮断性能が向上しなかった原因としてA部のアーク抵抗が低くC部溶断直後にA部への分流が増えてしまい、C部に十分電流が流れなかったためと考えられた。

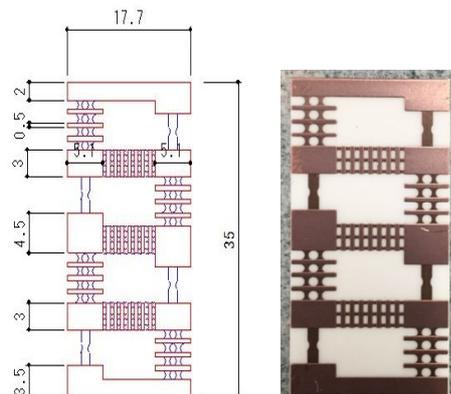


図8 2直列タイプインテリジェントヒューズ



図9 2直列型ヒューズの遮断試験後の様子

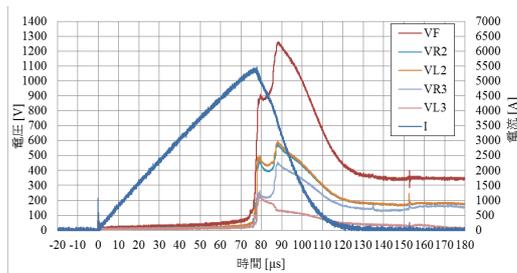


図8 2直列タイプインテリジェントヒューズにおける電圧電流波形

図7より、B部の溶断時間が最も長くなった1S-1Pの元素を2直列にしたものを試作した。図8に元素の設計図および試作した元素の写真を示す。

同図より、2直列パターンにおけるヒューズ元素も2節で述べた設計法により製作が可能である。このヒューズ元素においても遮断試験を実施した。遮断試験回路は、図5の試験回路であるが、2直列になっていることから充電電圧は360Vとして試験を行った。遮断試験後のヒューズ元素の様子と、その際の電圧電流波形および2直列のヒューズ元素一部の電位を示したものを図9、図10に示す。同図より、2直列にした場合も、転流が起きC部にフルグライトが付着していることがわかる。しかし、C部のフルグライトの量はA部やB部に比べて少量であり、C部はすぐに消弧したと考えられる。また、上から2段目のC部は溶断しておらず転流が起きていない箇所もあることが分かった。各部の電位波形を見ても転流が起きている箇所では、VLとVRに電位差が生じているが、転流が起きていないところではVLとVRに電位差が生じていない。

これらの状況を更に深く追求するために、インテリジェントヒューズの遮断過程を観測できる装置を構築した。本装置では、ヒューズ内部の発弧の様子を高速ビデオカメラで観測できるようにアクリル製のヒューズボックスを構築し、発弧の様子を同時測定した。図9はインテリジェントヒューズではないが、代表的なヒューズ元素におけるアーク発光の様子を示す。同図の通り、アーク発弧が発生し、アーク長が伸展していることが分かる。この方法をインテリジェントヒューズにおいても適用して撮影した結果、アークの発弧はA部、B部で同時に発生して

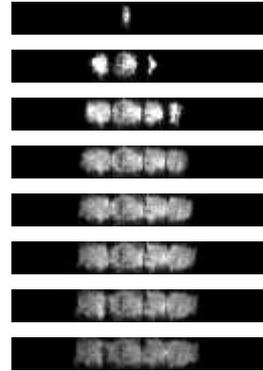


図9 高速ビデオカメラによるヒューズ内部のアーク発光の様子例

おり、C部もそれらと同時に発弧していることが明らかとなった。その後の映像ではC部が先に消弧されていることが判明した。C部には転流されていることは明らかであるが、先に消弧されることから、A部のアーク抵抗が未だ低くC部溶断直後にA部への分流が増えてしまい、C部に十分電流が流れなかったためと考えられる。

以上の結果より、ヒューズ元素の構造を変えるだけでは、インテリジェントヒューズとして転流はできるが、遮断性能の向上には大きく貢献できていないことが明らかとなり、今後は、これらの測定により溶断直後から遮断完了に至るまでに遮断部で起こる現象を理解し、消弧材料を工夫することにより遮断を確実に制御することができれば転流による遮断性能の向上を期待できると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

石川夕貴, 山納康, 土屋正樹, ヒューズリンク内部のアーク観測とアーク電圧特性の調査, 電気学会研究会資料放電・開閉保護・高電圧合同研究会, ED-15-135 SP-15-059 HV-15-101, pp.29-34, 2015, 査読無し.

M. Tsuchiya, Y. Yamano, S. Kobayashi and K. Hirose, "Basic Research on the Fuse Element Pattern Changing a Current Pathway in the Process of Current Interruption," Proc. of ICEPE-ST, 2-p2-R-3, Oct. 2013, 査読有り

〔学会発表〕(計2件)

石川夕貴, 山納康, 土屋正樹, 直流用ヒューズにおけるアーク電圧の実験式の検討, 平成28年電気学会全国大会講演論文集, Vol.6, pp.54-55, 2016.

松崎太亮, 山納康, 遮断過程で電流経路を変化させるヒューズ元素の遮断部構造の検討, 平成27年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.7-5-11 ~ 7-5-12, 2015.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

山納 康 (YAMANO, Yasushi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30323380

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し