

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560266

研究課題名(和文) 限流機能付きパワー半導体デバイス型遮断器の仕様解析と試作研究

研究課題名(英文) Reseach on Low-Voltage Solid-State Circuit Breaker with Current-Limitation Function

研究代表者：

横水 康伸 (YOKOMIZU YASUNOBU)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50230652

研究成果の概要(和文)：本研究は、パワー半導体のスイッチング機能を利用した低圧用直流遮断器を提案・検討している。半導体として、オンオフ制御半導体の代表である IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いた。ゲート・エミッタ間電圧に対する IGBT のコレクタ・エミッタ間抵抗の依存性に着眼し、直流限流遮断の達成のための回路要素の構成を考案した。この考案に基づいて、モデル IGBT 型直流遮断器を構成した。モデル器に電流遮断実験を課した結果、モデル器は、電源電圧 120 V の下で、10～80 A の直流電流を限流遮断することに成功した。また、限流遮断時間を制御できることも検証することができた。IGBT のみならず、サイリスタ型遮断器についても回路要素構成を検討し、限流遮断過程を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：The present research deals with a low-voltage DC(Direct Current) solid-state circuit breaker utilizing the switching function of a power semi-conductor device. An IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) was employed. In consideration of a dependence of a corrector-emitter resistance on a gate-emitter voltage, circuit configuration of circuit-breaker components was contrived to achieve limiting and breaking operations of the direct current. The model IGBT-type DC circuit breaker was constructed to perform the current-breaking experiment. The experimental results demonstrated that the model circuit-breaker successfully interrupts the current of the 10-80 A under the source voltage of DC 120 V. The results also verified that adjustment of the time constant  $\tau_{GE}$  in the gate circuit allows control of the interrupting time  $t_{int}$ . A thyristor was also discussed to construct the low-voltage DC circuit breaker.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：大電流工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器, 大電流限流遮断

## 1. 研究開始当初の背景

低電圧から超高圧の電力システムにおいて、遮断器が電流遮断のために利用されている。この遮断器は、アーク放電の過渡応答を利用して電流を遮断している。一方、半導体分野に着目すると、Si系パワー半導体デバイ

スの大電流化・高電圧化が年々進展し、近年ではSiC系パワー半導体デバイスの材料開発が行われ、パワー半導体の低損失化・小型化が非常に期待されている。パワー半導体デバイスでは、外部回路によって導通状態・非導通状態に切り替えることができる。そこで、

パワー半導体デバイスを利用した固体遮断器の着想に至った。この遮断器においては、遮断時間を要望の値に調整できる、高速動作が可能、接点部のような損耗部がない、アークの繰り返し点弧による使用回数限度から解放されるという特徴がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、以下のとおりである。1) パワー半導体デバイスの導通特性を考慮して、限流機能を具備したパワー半導体デバイス型遮断器の構成回路、すなわち限流機構部および制御部の回路構成を考案すること。2) 同遮断器を試作し、モデル直流システムにおいて、試作器が直流電流を限流し、遮断できることを実証すること。3) 試作器の限流遮断特性を明らかにすること。

## 3. 研究の方法

パワー半導体としてオンオフ制御デバイスに着目し、その代表種である IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) を取り上げた。a) 遮断器の構成回路、すなわち限流機構部および制御部の回路構成を検討し、モデル器を構築した。b) モデル器に直流電流 20~80A の限流遮断を課した。限流遮断過程における遮断器に流れる電流を計測した。c) ゲート・エミッタ間電圧の制御回路において、時定数を数種に変化させた。この変化に伴って、遮断時間を制御できるかどうか測定した。

次いで、オン制御デバイスの代表としてサイリスタを用いることにした。サイリスタの通電可能電流は、他種の半導体デバイスと比較して大きいという特徴を有している。サイリスタ型固体遮断器の回路構成を考案し、さらに限流遮断動作を確認した。

## 4. 研究成果

### (1) IGBT 型固体遮断器に関する結果

限流機構部および制御部の回路構成： IGBT のゲート・エミッタ間(以下 G-E 間)  $v_{GE}$  を 15~8V の範囲で調整することによって、IGBT のコレクタ・エミッタ間(以下 C-E 間) 抵抗を変化できることに着眼し、この特性を限流遮断に適用することを目論んだ。ここでは、なるべくシンプルな方法にて、G-E 間電圧を時間変化させることとし、図 1 に示すように IGBT 型モデル遮断器を試作した。雑誌論文①の図 3 で示されるように、IGBT の G-E 間に、キャパシタ  $C_{GE}$  および抵抗素子  $R_{GE}$  をそれぞれ並列に接続している。 $R_{GE}$  には抵抗  $R_1$  とトランジスタ  $Tr$  を介して、直流電圧源  $E_{GE}$  が接続されている。同遮断器は以下のように閉路およ

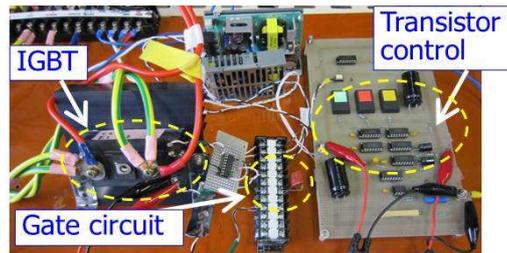


図 1 IGBT 型直流遮断器のモデル器

び閉路動作を行うことを目論んでいる。(a) 閉路：  $Tr$  を導通状態に維持することによって、 $C_{GE}$  については、 $v_{GE}$  が 15V に保たれ、その結果 C-E 間は低抵抗状態を維持する。(b) 開路：  $Tr$  を非導通状態に変化させる。この直後から  $v_{GE}$  は  $15 \exp\{-t/(C_{GE}R_{GE})\}$  で低下する。 $v_{GE}$  の低下にともなって、C-E 間の抵抗値は次第に高い値に上昇し、IGBT コレクタ電流は限流される。 $v_{GE}$  が 8V 以下に低下すると、ついには IGBT のコレクタ電流はゼロとなり、遮断が達成される。

直流電流遮断への着手： はじめに、モデル器が直流電流を限流遮断できることを確かめることにした。ここでは、 $\tau_{GE} = C_{GE}R_{GE}$  を 10ms に設定し、モデル器を抵抗器を介して、直流電源(出力電圧 DC120V)に接続した。遮断すべき DC 電流を 20 から段階的に 80A まで増加させ、モデル器に遮断を課した。図 2 は、G-E 間電圧  $v_{GE}$  とモデル器に流れる電流  $i_{CB}$  の波形を示している。図(a)に示されるように、 $v_{GE}$  は時刻 0 から約 4ms の期間において、15 から約 10V に減少している。しかし、同図(b)に示されるように、遮断電流 20A の場合  $i_{CB}$  は 20A のままである。しかし、時刻約 5ms 以降において、 $v_{GE}$  が 10V 以下に低下すると、C-E 間抵抗が急激に高くなるので、 $i_{CB}$  は限流され始める。時刻 7ms では、 $v_{GE}$  が 8V 以下となって、IGBT が非導通となるため、遮断すべき直流電流を 40, 60 および 80A に増加させても、図 2(b)に示すようにモデル器は直流電流を約 7ms で遮断した。すなわち、モデル器が DC20~80A を遮断できること、また、遮断時間は電流に依存しないことを提示することができた。

遮断時間の制御： 前述の測定結果は、遮断時間は、ゲート・エミッタ間電圧が 15V から 8V に低下する時間で決まることを示唆している。そこで、モデル器において  $\tau_{GE}$  を調整すれば、遮断時間をコントロールできると考えた。モデル器において、 $\tau_{GE}$  を 5 および 1ms に設定した。電源電圧 DC120V のもとで、DC10~80A の遮断を課した。図 2 は DC80A の場合における  $\tau_{GE}$  と  $i_{CB}$  の測定波形を示している。 $\tau_{GE}$  を 5 および 1ms の場合には、直流電流をそれぞれ約 3.7ms および 0.8ms で限流遮断している。したがって、 $\tau_{GE}$  を調整することで

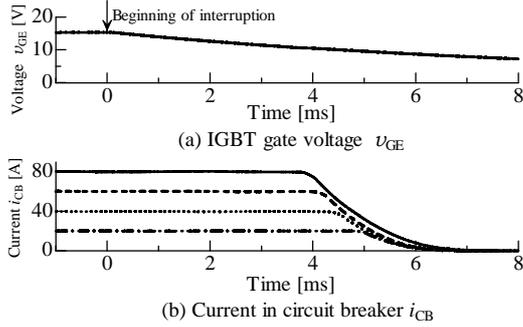


図 2 直流電流 20~80 A に対する限流遮断過程

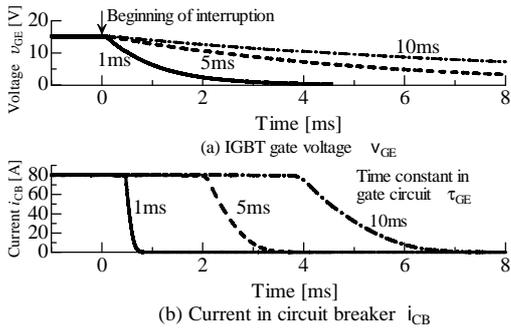


図 3 各ゲート回路の時定数に対する限流遮断過程

遮断時間を制御できることを実証することができた。

(2)サイリスタ型固体遮断器に関する結果  
**限流機構部および制御部の回路構成:** 固体遮断器のスイッチング素子としてサイリスタを用いるためには、以下を考慮して限流遮断部の回路を構成する必要がある。(i)遮断すべき直流電流の限流方法および(ii)サイリスタの非導通状態への転移方法。図 4 は考案・作成したサイリスタ型直流遮断器を示している。雑誌論文②で述べたように、限流遮断部では、サイリスタ Th1 が用いられ、さらにサイリスタ Th1 に対して、キャパシタ (静電容量  $C$ )、インダクタ (インダクタンス  $L$ ) およびサイリスタ Th2 からなる直列共振回路を並列接続している。Th1 に対して、ダイオード  $D$  も並列接続されている。サイリスタ Th1 が負荷電流の通電・非通電を行う。

同遮断器では、以下のように閉路および開路を行う。

(a) 閉路：サイリスタ Th1 およびトランジスタ  $Tr$  を導通状態に転移・維持させる。負荷電流は Th1 を通じて流れるとともに、サイリスタ Th2 には非導通状態を維持させる。また、キャパシタはほぼ電源電圧に等しい電圧で充電される。

(b) 開路：(期間 I) サイリスタ Th1 および

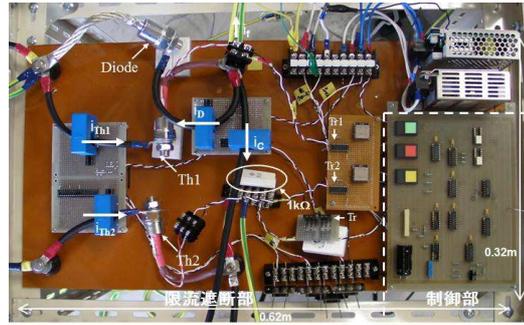


図 4 サイリスタ型直流遮断器のモデル器

トランジスタ  $Tr$  のベース電流をゼロにする。これと同時に、サイリスタ Th2 を導通状態に転移させる。キャパシタからの放電電流は、Th1 に逆方向に注入される。このとき、サイリスタ Th1 に流れる電流は順方向に流れている遮断すべき電流 (負荷電流または故障電流、以下遮断電流と称する) と逆方向の注入電流のベクトル的な和となり、Th1 の電流は徐々に減少する。その結果、Th1 の電流はゼロとなり、Th1 はターンオフされる。

(期間 II) Th1 は非導通状態に転移したので、遮断電流は Th2 に転流する。また、キャパシタからの放電電流は、ダイオードを流れる。

(期間 III) ダイオードに流れる電流は、減少し、ゼロになる。キャパシタは逆極性に充電され続け、遮断電流は限流される。ついに、遮断電流の瞬時値はゼロに減少し、Th2 はターンオフし、限流遮断が達成される。

**直流電流遮断:** 図 5 は、サイリスタ型直流遮断器による電流遮断過程を示している。時刻ゼロが限流遮断開始の時刻である。図 5(a) は、Th1 および Th2 のゲート電流を示している。図 5(b) は、各部を流れる電流波形を示し

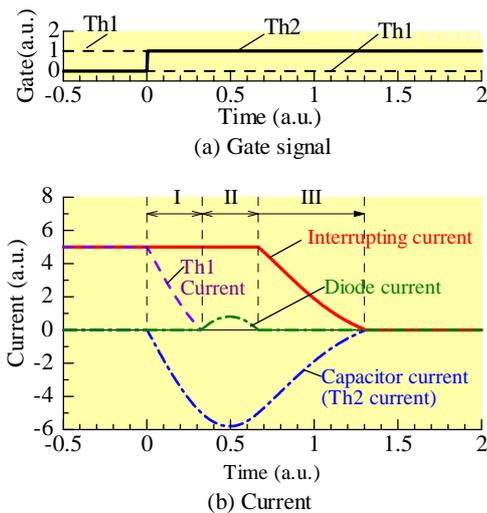


図 5 サイリスタ型遮断器による直流電流の限流遮断過程

ている。期間 I において、Th1 に流れる電流がゼロに減少し、期間 III において、遮断すべき電流が限流遮断されている。したがって、考案した遮断器が直流電流を限流遮断できることを確認できた。

特徴として以下のことが挙げられる。開路時には、LC 共振回路からの電流が Th1 に注入され、次いで、遮断電流が LC 共振回路に転流する。したがって、LC 共振回路の周波数を変化させることによって、限流遮断時間を制御できる。開路時においては、キャパシタ  $C$  が負荷側端子に接続される。直流給電システムへのキャパシタ接続は、定電力負荷時における電圧不安定現象の発生を緩和し、ひいては給電可能電力の上限値を増大させる効果がある。したがって、ここでの回路構成は、給電可能電力の上限値の増大に寄与すると考えられる。

### (3) 位置づけとインパクト

- ① パワー半導体デバイスの大電流化が進展し、遮断器に利用できるレベルになってきた。金属接点の機械的駆動の形態から逸脱し、パワー半導体のスイッチング機能を遮断器の開閉・遮断機能に適用に成功している。
- ② 交流電流は半周期ごとに零点を通過するため、遮断器にとってはこの機会に電流を遮断できるチャンスがある。しかし、直流電流の場合、電流瞬時値が零になる機会がないので、電流の瞬時値を意図的に減少させる、すなわち限流機能も開発している。
- ③ 単なる構想ではなく、回路構成・回路定数を設計し、固体限流遮断器を実現することに新規性・独創性がある。本研究の成果は、近い将来に向け、需要家内受配電システムにおける開閉および遮断を根底から支援する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Fundamental Approach to Low-Voltage Direct-Current Interruption by Means of Solid-State Circuit Breaker Composed of IGBT', The Seventh International Workshop on High Voltage Engineering -IWHV 2010-(Kitakyushu), ED-10-62, SP-10-29, HV-10-24 (2010). Y. Yokomizu, T. Hayase and T. Matsumura. 査読無し
- ② 「限流機能付き固体遮断器による低圧直流遮断の基礎検討」, 電気学会 放電/静止器/開閉保護合同研究会資料,

ED-10-47/SA-10-63/SP-10-14 (2010). 横水康伸・早瀬哲央・松村年郎. 査読無し。

[学会発表] (計 7 件)

- ① 横水康伸・早瀬哲央・松村年郎: 「IGBT を用いた低圧直流用固体遮断器の遮断時間」. 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集, 6-275 (2011 年 3 月 17 日). 大阪大学(大阪府豊中市).
- ② 横水康伸・早瀬哲央・松村年郎: 「IGBT 型固体直流遮断器の遮断時間に関する検討」. 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, B4-7 (2010 年 8 月 31 日). 中部大学(愛知県春日井市).
- ③ 横水康伸・早瀬哲央・飯岡大輔・松村年郎: 「IGBT 型固体遮断器による低圧直流電流遮断への基礎実験」. 平成 22 年電気学会全国大会講演論文集, 6-256 (2010 年 3 月 19 日). 明治大学(東京都).
- ④ Y. Yokomizu. Approach to Application of Power Semiconductor Device to Low-Voltage DC Circuit Breaker'. DC building Power Japan. 2009(平成 21) 年 12 月 7 日. ハイアットリージェンシー東京(東京都新宿区).
- ⑤ 横水康伸・早瀬哲央・飯岡大輔・松村年郎: 「低圧直流システムへの固体遮断器の導入に向けた IGBT 適用構成の検討」, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 0-081 (2009 年 9 月 10 日). 愛知工業大学(愛知県豊田市).
- ⑥ 横水康伸・M. Azmi・松村年郎: 「低圧直流システムにおけるサイリスタ固体遮断器による限流遮断とその過程の基礎検討」, 平成 21 年電気学会全国大会講演論文集, 6-175 (2009 年 3 月 17 日). 北海道大学(北海道札幌市)
- ⑦ 横水康伸・Mohamed Azmi Bin Sidik・松村年郎: 「低圧直流システムにおける限流機能付きサイリスタ型固体遮断器の基礎的検討」, 平成 20 年度電気関係学会東海支部連合大会, 0-031(2008 年 9 月 18 日). 愛知県立大学(愛知県愛知郡).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横水 康伸 (YOKOMIZU YASUNOBU)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50230652

### (2) 研究分担者

松村 年郎 (MATSUMURA TOSHIRO)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90126904

### (3) 連携研究者 なし