

ゲート回路用自己給電型高電圧 DC/DC コンバータの開発

DEVELOPMENT OF THE SELF-FEEDING HIGH VOLTAGE DC/DC CONVERTOR FOR GATE CIRCUITS

中山響介^{1, A)}, 森均^{A)}, 徳地明^{A)}

Kyosuke Nakayama^{1, A)}, Hitoshi Mori^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}

^{A)} Pulsed Power Japan Lab. Co. Ltd. (PPJ)

Abstract

In a circuit where several gate-voltage controlled semiconductor devices such as FETs, thyristors and IGBTs are used in series, we need to supply control power to the gate circuits in each stage that are floating at high potentials. In order to achieve this, a method of supplying power separately from a grounded-external power supply via insulations is generally used, but when this is applied to a high-voltage section that exceeds several tens of kilovolts, voltage withstand design is often a problem. In order to solve this problem, we have developed the high-voltage DC/DC convertor circuit that does not require an external power supply or signals, and the circuit itself automatically generates the control-power supply from the applied high voltage. Advantage of the circuit is not only the output voltage and current remain constant even when the applied voltage is increased, but also the voltage sharing between the stages is good because the circuit has positive slope of the I-V characteristics when connected in series. This circuit can supply power to even stages floating above several tens of kilovolts by connecting many in series in principle. Now, we have confirmed the stable operation of two series circuits, and succeeded in producing 5 W, 5 V at each stage at a maximum 3 kV input per each stage.

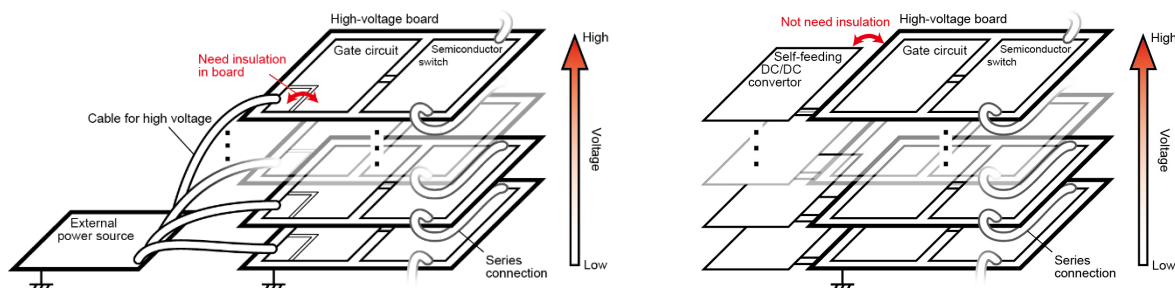
1. 背景・目的

加速器を代表とした数十 kV を超える超高電圧を扱う回路では、大電力の開閉や機器の保護を目的として従来からサイトロンやイグナイトロンなどの真空管類が用いられており、他に代替品がないことからそれらは今でも広く用いられている現状がある。しかし、それら真空管は大型、寿命が短い、単価が高い、不安定、高繰り返し動作が不可能などといったデメリットを多く併せ持つ。これに対して、近年それらを半導体に置き換える動きが活発化しはじめた。これによりそれらデメリットの多くを解消することが期待されている。

ところでそのような超高電圧を半導体で扱う場合、多数の素子を直列に接続して耐圧を確保してやる必要が出てくる。そうした場合、一般的にはスイッチングの高速性からゲート電圧制御型半導体が使われるが、スイッチングのラグとなるゲート入力信号を制御するための電源回路(ゲート回路)を直列接続の各段に設ける必要がある。各段の基準電位はその1つ下の段の電位に浮くため、接地した外部電源から各段のゲート回路へ電力を供

給する場合は接地した高圧用ケーブルと絶縁を介して行わなければならない(Fig. 1a)。しかし、数十 kV 以上のレベルで浮いた回路へこの手法を使おうとすると、絶縁設計に問題が生じてしまうことが多い。例を挙げると、生産されている高圧用ケーブルの耐圧にはもちろん限界があり、適切なケーブルを選定できない可能性がある。他にも、高圧に浮いた回路上で絶縁を行うため、空間距離や沿面距離を考慮した結果、基板を大きくしなければならなくなる可能性が高い。さらにはより高圧がかかる部分から絶縁劣化が進み、半導体の使用により素子の寿命を延ばしたにもかかわらず全体としての寿命は縮まってしまうことも考えられる。

我々は以上の問題を解消するため、ゲート回路への自己給電方式を考案した(Fig. 1b)。自己給電方式とは、印加された高圧から分流・降圧してゲート回路の動作電圧を生成する方式を指す。つまり DC/DC コンバータのことである。この方式であれば浮いた回路に並列に接続するだけで使用でき、前述した部分の絶縁は不要となる。しかし、ここにも問題があった。実際に設計・製作して 2 直列回路で動作試験を行った結果、一方の回路では出



a: Conventional method.

b: New method.

Figure 1: Power supply method for the gate circuits.

¹nakayama@myppj.com

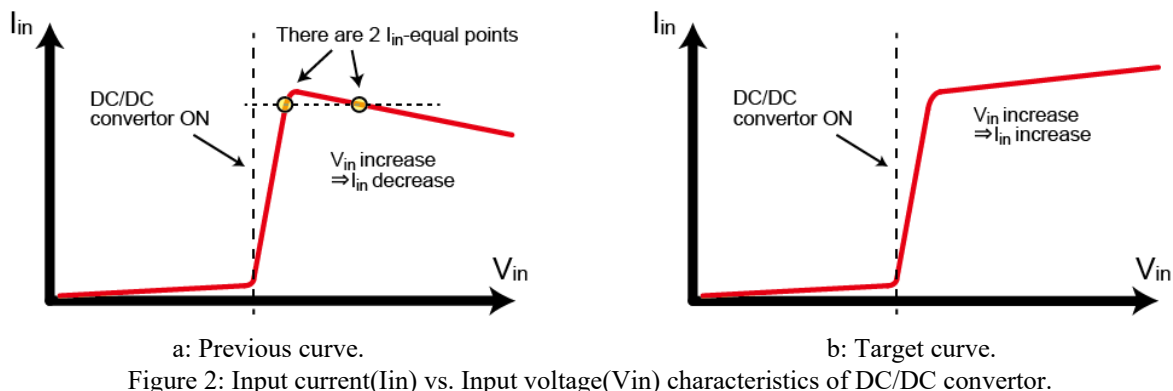


Figure 2: Input current(I_{in}) vs. Input voltage(V_{in}) characteristics of DC/DC converter.

力され、もう一方の回路では全く出力されないことが判明した。この原因を探ると、入力電圧を上げていったときの入力電流が、DC/DC コンバータ入力の定電力特性によってある電圧から減少してしまうことに起因することが分かった(Fig. 2a)。

これを踏まえて、我々は出力を安定させることを目的に、入力電流 I-入力電圧 V のグラフが正の傾きを持つような特性を持つ回路の開発を行った(Fig. 2b)。

2. 考案した回路とその動作

今回考案した回路を Fig. 3 に示す。

回路は大きく分けて電源、定電流制御(CC)部、定電圧制御(CV)部、スイッチ部、市販 DC/DC コンバータの 5 つに分けることができる。ここでは CC 部、CV 部、スイッチ部について解説する。

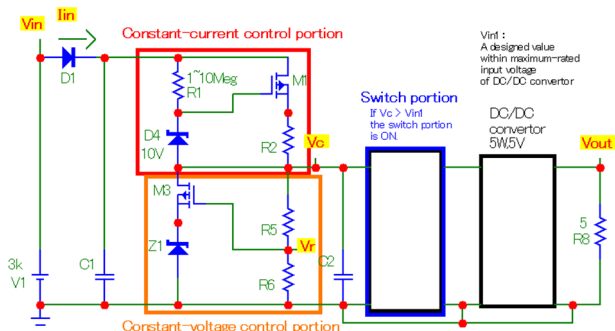


Figure 3: Invented circuit.

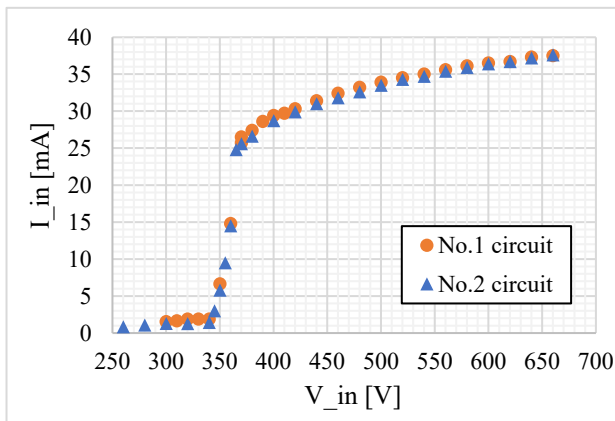


Figure 4: I_{in} - V_{in} characteristics of 2 circuits.

まず CC 部は FET M1 に流れる電流が一定になるように弱く制御し、その電流を DC/DC コンバータに供給する役割を持つ。ツェナーダイオードと FET のゲート、R2 のループにキルヒホッフの第二法則を適用すると、ゲート (G)-ソース(S)間には(ツェナー電圧 V_{Z1})-(R2 での電圧降下 V_{R2})の電圧 V が加わることが分かる。これによりドレイン電流 I_{Ds} が流れ、 V_{R2} が増加する。すると先の式より G-S 間電圧 V_{GS1} が減少し、 I_{Ds} も減少する。このフィードバックにより電流 I_{Ds} は一定に近づく。

次に、CV 部はコンデンサ C2 の電圧 V_C が一定になるように弱く制御し、その電圧を DC/DC コンバータに供給する役割を持つ。 V_C の値は R5 と R6、 I_{Ds} 、ツェナー電圧 V_{Z2} とで決まる。 V_r の値が V_{Z2} を少し超えたあたりで FET M3 の G-S 間に V_{GS2} がかかり始める。すると FET M3 に I_{Ds2} が流れ始め、 V_r が増加するのを防ぐ。このフィードバックにより電圧 V_C は一定に近づく。

最後に、スイッチ部は V_C がある任意の電圧 V_{in1} に達した時に DC/DC コンバータに電流を入力する役割を持つ。 V_{in1} とは組み込む市販 DC/DC コンバータの最大入力定格電圧以下の任意の設計値を指す。

以上の動作より、本回路は V_C が任意の値に達した時、DC/DC コンバータに一定の電圧・電流を入力するように動作する。

3. 方法

本開発の目的は I-V 特性に正の傾きを持たせ、回路の直列動作時の安定性を確保することだった。よって 2 組の同じ回路を作製し、各段の負荷抵抗を 5 Ω としてそのそれぞれについて I-V 特性を取得した。ここで、 I, V は Fig. 3 の I_{in}, V_{in} を示し、測定もその箇所で行われた。その次にそれら 2 枚を直列に接続し、電圧分担を測定した。その際、測定するのは全体の印加電圧と下段の分担電圧のみで、上段の分担電圧はオシロの関数でそれらの差として表示した。

なお、今回の試験回路は V_{in1} 360 V となるように設計した。

4. I-V 特性およびその考察

2 回路それぞれについて取得した I-V 特性を Fig. 4 に示す。電源の都合上、 V_{in} は 660 V までとしている。

6. 結論・展望

本開発の目的は DC/DC コンバータを直列接続した際に出力が安定しない問題を解決することだった。

試験の結果、定電流制御部、定電圧制御部を組み合わせた回路を利用して各段回路の I-V 特性に正の傾きを持たせることができ、そのため直列動作時の各段の電圧分担が均等になることを実証した。そして各段の入力 370 V 以上において 5 W, 5 V 出力が安定することを実証した。

実用化を踏まえ、今後の展望を以下に示す。

- 実用化のため、組み込む市販 DC/DC コンバータを、定格入力電圧のさらに高いものに変更することで電流を抑制し、消費電力を減らす。
- 段数を増やして更なる高電圧を入力した時でも、安定した動作を実証する。

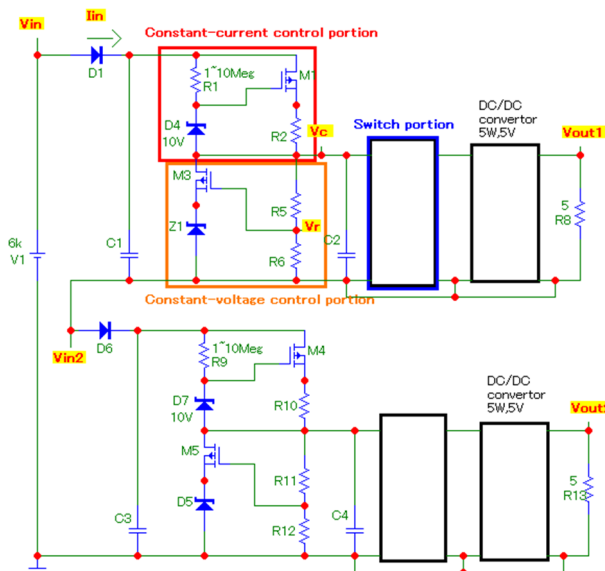


Figure 5: 2 series circuit.

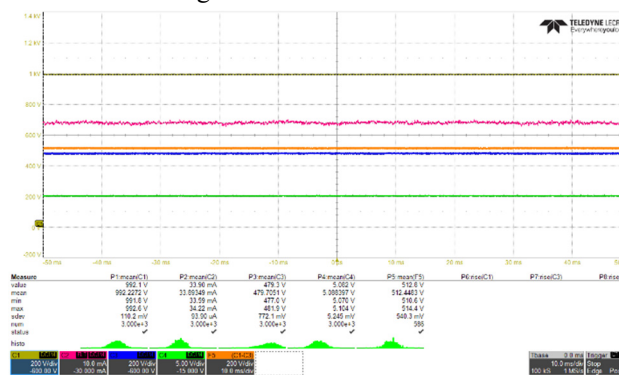


Figure 6: Measurement of the voltage sharing in 2-series circuit. Yellow: Input voltage, 200 V/div, Red: Input current, 10 mA/div, Blue: Sharing voltage at lower circuit, 200 V/div, Green: Output voltage, 5 V/div, Orange: Sharing voltage at upper circuit, 200 V/div, 10 ms/div.

Figure 4 の通り、I-V 特性が目的の正の傾きを持つことを確認することができた。また、2 回路の特性は DC/DC コンバータがオンする電圧も含めて非常によく重なったものとなった。これは回路を作製する際に抵抗値が近いものを使用した影響が大きいと思われる。なお、DC/DC コンバータは約 365 V でオンした。

5. 2 直列接続動作および電圧分担の測定

2 回路を直列接続した時の回路図を Fig. 5 に示す。

その時に電圧分担を測定した結果を Fig. 6 に示す。

1 kV 電源で約 992 V を印加した結果、電圧分担は上段(橙)が 512 V、下段(青)が 480 V となり、ほぼ均等であることが実証できた。電圧分担にわずかに差があることの原因としては、I-V 特性の差や負荷抵抗の温度特性の違いが挙げられる。また、数分間モニタした限りでは、各段あたり入力電圧 370 V 以上において 5 W, 5 V 出力が途切れることなく安定していることを確認した。