

電圧制御形および電流制御形コンバータ群を 併用した電源の高信頼度運転法の提案

学生員 渡瀬 睦巳^{*}, 正員 近藤 正示^{*} (長岡技術科学大学)

Proposal of a Highly Reliable Operating Method of a Voltage Controlled and Current Controlled Converter

Mutumi Watase^{*}, Student Member, and Kondo Seiji^{*}, Member

In recent years, parallel operation of power sources is used to increase reliability and power capacity of the system. In such a case, voltage controlled converters were operated in parallel. However, if the system used, output errors of each converter cause loop current between converters. Therefore, for suppressing a loop current, the control cooperatively to match the converter was used so far. However, there is a fault that keeping independence of each converter becomes difficult and the control becomes complex if it controls cooperatively.

The paper proposes a method of parallel operation of power source system using current controlled converters. if the proposed system was used, reliability improves and the control cooperatively to match converter was not necessary. Therefore It becomes easy to keep the independence and control of converter become easy.

キーワード：電流制御形コンバータ，並列運転

Keywords : Current controlled converter, Parallel operation

1. まえがき

近年，電源の信頼性向上や大容量化の需要が増加している。このような需要に対応するため，電源を複数台用いる並列冗長運転が行われている。このような並列コンバータシステムにおいて，通常は電圧制御形コンバータを複数台用いて冗長運転を実現している。その時，各コンバータの出力端にダイオードを接続し，コンバータ間に横流が流れないようにしている。しかし，ダイオードを用いるとダイオードの損失が発生するため，効率が低下する。また，ダイオードを用いないシステムを用いるとコンバータ同士の振幅が一致しない場合にコンバータに横流が流れ，損失の増加，出力電圧の乱れといった問題を生じる。そのため，電圧制御形コンバータを並列運転する場合，出力電圧，キャリアをすべてのコンバータにおいて一致させる協調制御を行わなければならない。

本文では，コンバータに電圧制御形のみではなく，電流制御形も用いることで各コンバータ間の協調制御が必要ないシステムを提案する。また，高信頼化を実現するためにある変換器が故障し，システムからの解列を行った後でも

*長岡技術科学大学

〒940-2135 長岡市上富岡町 1603-1

Nagaoka University of Technology

1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka 940-2188

負荷分担が成される制御法を提案する。

2. 電圧制御形コンバータ同士を並列運転させた時の問題点

従来，コンバータ同士を接続する場合，出力電圧に垂下性を持たせた電圧制御形コンバータを図 1 のように並列接続していた。しかし，この場合，垂下特性の傾きが両コンバータ同士で異なると，負荷分担率の不均衡が生じる。図 2 に垂下特性が異なるコンバータ同士を接続した時の負荷分担率の変化を示したグラフを示す。このグラフは，無負荷時に 10.15[V]

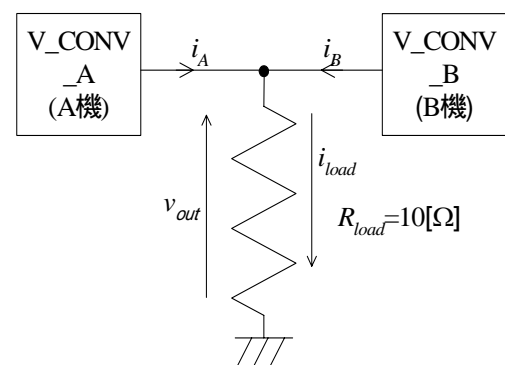


図 1 電圧制御形コンバータ同士の並列接続

,全負荷(1[A])時に 9.85[V]の垂下特性を持つV_CONV_Aと、垂下特性がV_CONV_Aの垂下特性の傾きに対して θ [%]ずれているV_CONV_Bを並列接続した場合の負荷分担率の変化をプロットしたグラフである。

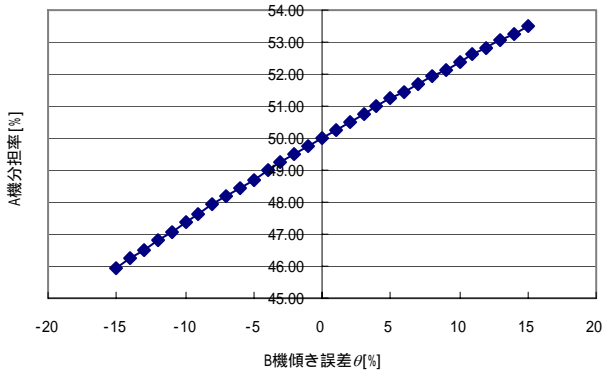


図 2 垂下性の傾き誤差と負荷

なお、負荷分担率 K は

$$K = \frac{i_A - i_{load} / 2}{i_{load} / 2} \times 100[\%] \quad \dots\dots\dots (1)$$

と定義した。

図 2 から、B 機傾き誤差 θ が大きいほど、A 機負荷分担率が増加していくのが確認できる。さらに例えば分担率の差を 1[%]に抑えるためには B 機傾き誤差を 5[%]以内に抑えなければならないことも分かる。今、A 機の傾きは 0.3[V/A]であるため、5[%]以内に抑えるためには傾きの誤差は A 機の垂下特性の傾きに対し、 ± 15 [mV/A]以内でなければならない。そのため、コンバータの並列運転において、電圧制御形同士を接続した場合、負荷分担率の差を数パーセント以内に抑えるためには数[mV/A]の精度で垂下特性の制御を行わなければならない。しかし、その精度で垂下特性の制御を行うことは困難であるため、電圧制御形同士の並列接続は不利である。

3. 電圧制御形 / 電流制御形コンバータ併用システム

3.1 併用システムの回路構成

今回提案する電流制御形コンバータ(I_CONV)を用いたコンバータ並列運転システムの回路図を図 3 に示す。電圧制御形コンバータ(V_CONV)の詳細な回路を図 4 に、電流制御形コンバータ(I_CONV)の詳細な回路を図 5 に示す。

従来行われてきた並列運転において、図 1 に示すように電圧制御形のみを複数接続するという構成になっていたのに対し、図 3 に示す提案法では電圧制御形 1 台に対し、電流制御形を複数台接続するという構成にした。電圧制御形のみを複数接続した場合、2 章で論じた負荷分担率不平衡問題のほかに、横流が流れるという欠点もある。電圧源と

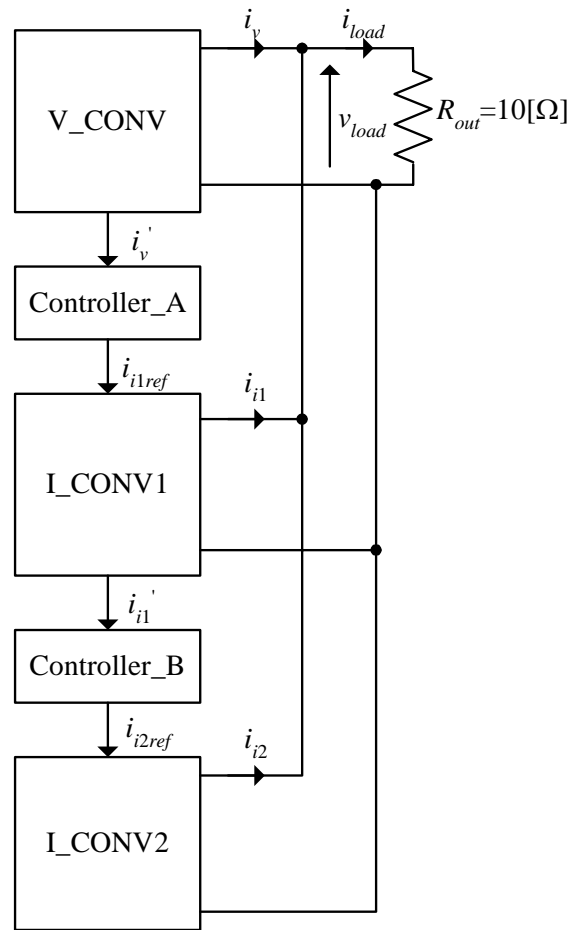


図 3 電流制御形コンバータを並列接続した時の回路図

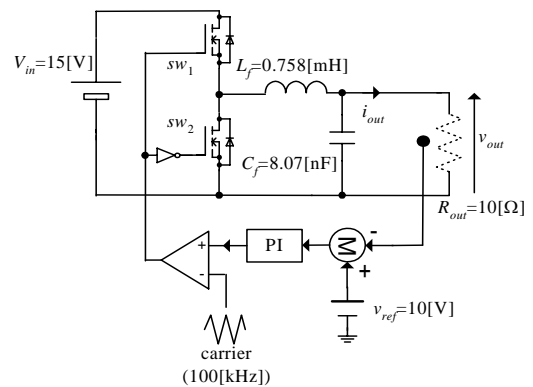


図 4 電圧制御形コンバータ(V_CONV)

いう、出力インピーダンスが理論上ゼロの電源を並列接続した時、電圧源の電圧不平衡によりコンバータ間に横流が流れる。一方、出力インピーダンスが理論的に無限大である電流源ならば並列接続しても横流が流れることはなくなる。従って、図 3 の提案回路では電流源を並列化した。しかし、電流源のみの並列接続では負荷電圧 v_{load} が不定になる。

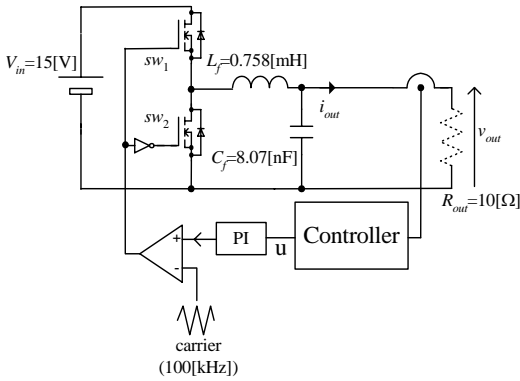


図 5 電流制御形コンバータ(L_CONV)

これを避けるため、並列システムのうち、1 台を電圧制御形コンバータとした。

図 4 に示す電圧制御形コンバータの回路において、コンバータとして回生形を用いている。電圧制御形コンバータには出力電圧 v_{out} を一定にするという役割の他に電流制御形コンバータが出した余剰電流を吸い込む役割も持っているため、回生形を採用した。また、電圧制御形コンバータは出力電圧を一定にする制御を行っている。

一方、図 5 に示す電流制御形コンバータにおいて、電流制御形コンバータは出力電流 i_{out} を一定にする制御を行っている。なお、電流制御形コンバータは回生形にする必要はないが、電圧制御形コンバータが故障した時に、電圧制御形コンバータとして動作しなければならない。よって、電圧制御形コンバータと同様の回路構成にしなければならないため、回生形を採用した。

3・2 負荷分担の平衡化制御

変換器の並列運転を行うにあたって、各コンバータの出力を平衡させるのが望ましい。そこで、負荷分担を平衡させる制御法を以下に述べる。

まず、図 3 中の Controller_A の詳細を図 6 に、Controller_B

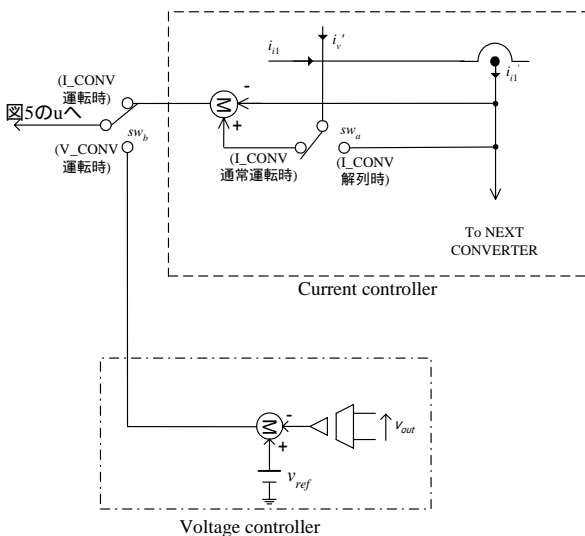


図 6 Controller_A の回路図

の詳細を図 7 に示す。Controller_A の Current controller にて、V_CONV の出力電流 i_v と L_CONV1 の出力電流 i_{i1} を比較する。その偏差を PI 制御器に掛け、スイッチングを制御することで i_v と i_{i1} の電流値が一致する。さらに、Controller_B により、L_CONV2 の出力電流 i_{i2} は L_CONV1 の出力電流 i_{i1} に追従する。よって、すべてのコンバータの電流値が一致するため、それぞれのコンバータの負荷分担を平衡化することができる。

また、図 3 において、 I_v, I_{i1}, I_{i2} の総和が I_{load} の目標値よりも大きい場合、余剰電流が電圧制御形コンバータへ流れ込む。すると、 I_v が減少し、 I_v に追従する I_{i1}, I_{i2} も同時に減少する。よって、 I_v, I_{i1}, I_{i2} の総和も減少し、 I_{load} に収束する。 I_v, I_{i1}, I_{i2} の総和が I_{load} の目標値よりも少ない場合は、これとは逆に I_v, I_{i1}, I_{i2} の総和が増加し、 I_{load} に収束する。

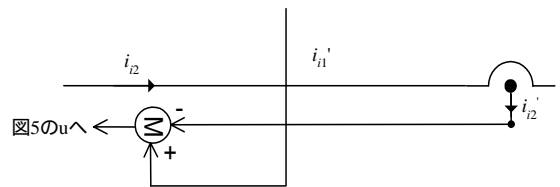


図 7 Controller_B の回路図

提案した負荷分担の平衡化制御について 30[ms] 時点で負荷を 10[Ω] から 5[Ω] に変動させた時のシミュレーション結果を図 8 に示す。

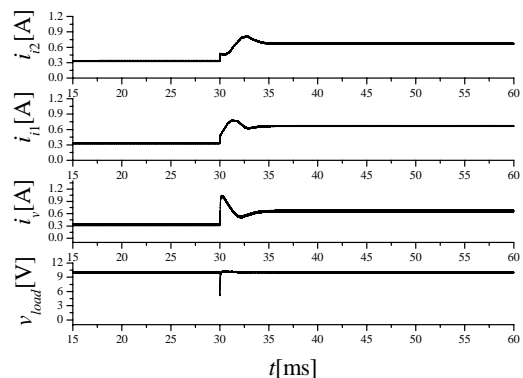


図 8 負荷分担平衡化制御適応時の波形 (30[ms] で負荷変動 10[Ω] から 5[Ω])

表 1 図 8 の数値データ

	i_v	i_{i1}	i_{i2}
電流値[A](29[ms])	0.33	0.33	0.33
分担率[%](29[ms])	33.0	33.0	33.0
電流値[A](60[ms])	0.66	0.66	0.67
分担率[%](60[ms])	33.0	33.0	34.0

図 8、表 1 を見て分かるように、負荷変動前、負荷変動後の両方において、各コンバータの負荷分担が平衡している。

4. コンバータ故障時の動作

4.1 I_CONV1 故障時の動作

システムの信頼性を高めるため、あるコンバータが故障した場合でもシステムを継続して動作させる制御法を説明する。例えば、I_CONV1 が故障し、システムから解列されたとする。この時、図 6 に示す Controller_A の Current controller の切り替えスイッチ sw_a が切り替わることによって、V_CONV の出力電流 i_v の情報を I_CONV2 へ伝達させる。よって電流制御形コンバータが故障し、解列しても負荷分担は平衡する。

図 3 の I_CONV1 が故障し、システムから解列したと想定した時のシミュレーション結果を図 9 に示す。なお、解列は 30[ms]時点で行った。

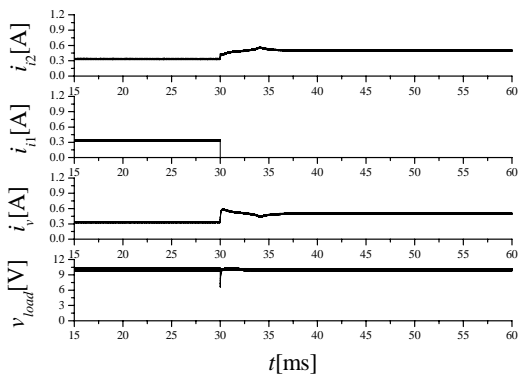


図 9 I_CONV 解列時の波形(30[ms]で解列)

表 2 図 9 の数値データ

	i_v	i_{i1}	i_{i2}
電流値[A](29[ms])	0.33	0.33	0.33
分担率[%](29[ms])	33.0	33.0	33.0
電流値[A](60[ms])	0.50	0.00	0.50
分担率[%](60[ms])	50.0	0.00	50.0

図 9、表 2 を見て分かるように、I_CONV1 が解列した後も負荷分担が平衡しているのが分かる。よって、電流制御形コンバータの解列時において、提案システムは負荷分担を損なうことなく電力供給を継続することが可能となる。

4.2 V_CONV 故障時の動作

V_CONV を解列した時は I_CONV1 が V_CONV の代わりに電圧制御形コンバータとして動作しなければ v_{out} が不定になる。そこで、V_CONV が解列されたときは、I_CONV1 の制御回路を図 6 に示すスイッチ sw_b によって、制御回路を Current controller から Voltage controller に切り替え、I_CONV1 を電圧制御形コンバータとして動作させる。そうすることで、電圧制御形コンバータが故障した場合でも、出力電圧 v_{out} が不定になることも無くシステムを動作させることができる。

図 3 の V_CONV が故障し、システムから解列したと想定した時のシミュレーション結果を図 10 に示す。なお、解列は 30[ms]時点で行った。

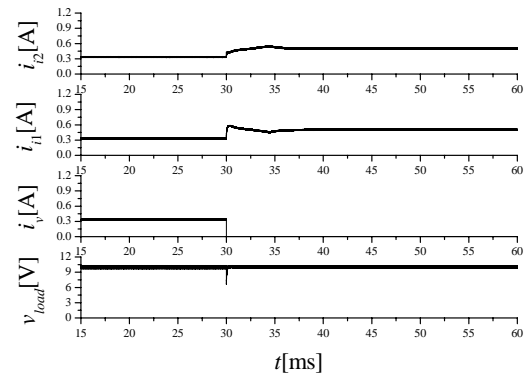


図 10 V_CONV 解列時の波形(30[ms]で解列)

表 3 図 10 の数値データ

	i_v	i_{i1}	i_{i2}
電流値[A](29[ms])	0.33	0.33	0.33
分担率[%](29[ms])	33.0	33.0	33.0
電流値[A](60[ms])	0.00	0.50	0.50
分担率[%](60[ms])	0.00	50.0	50.0

図 10、表 3 を見て分かるように、V_CONV が解列した後も出力電圧が指令値どおりの値となり、さらに負荷分担が平衡している。よって、電流制御形コンバータの解列時においても提案したシステムは負荷分担を損なうことなく負荷への電力供給を継続することが可能となる。

5. まとめ

本稿では、電圧制御形と電流制御形コンバータを併用した電源において、負荷分担の平衡と高信頼化を実現するための方法を提案した。提案法に対してシミュレーションを行った結果、提案したシステムがコンバータ故障時においても負荷分担が平衡するシステムであることが確認できた。このシステムを各種電源に適用することにより、単一電源で動作させるよりも高い信頼性を持つ電源を構成することができる。さらに、電源の大容量化も実現できる。

また、本稿では、電圧制御形コンバータ 1 台と電流制御形コンバータ 2 台で検討を行ったが、コンバータを 1 台追加するごとに図 6 の Controller_A を追加していくことで、さらに多くの複数台並列運転が可能である。

文 献

- (1) Stefano Saggini, Massimo Ghioni, and Angelo Geraci, "An Innovative Digital Control Architecture for Low-Voltage, High-Current DC-DC Converters with Tight Voltage Regulation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no.1, pp. 210-218, Jan 2004.