

台数切替制御による並列電源システムの効率改善*

小 浜 輝 彦**

出 島 秀 樹***

Improvement of Overall Power Conversion Efficiency of Paralleled DC-DC Converter System

Teruhiko KOHAMA** and Hideki DEJIMA***

Energy saving techniques and improving over-all power conversion efficiency in electrical equipment have been key issues for prevention of global warming in earth. This paper proposes on-off controlling method to improve over-all power conversion efficiency in paralleled converter system at any load conditions. This method changes number of active modules according to the load current. The main concern of proposed control is to determine the on-off point of the module. A buck-type converter with synchronous rectifier is modeled to derive an estimated characteristic of module efficiency. By using the model, optimized on-off points are analyzed and determined to improve over-all efficiency at any load conditions. Experimental and simulation results show the effectiveness of proposed on-off controlling method.

Key Words : Paralleled converter system, Power conversion efficiency, DC-DC converter

1. はじめに

現在、電子機器用電源には低電圧、大電流、高効率が求められている。この要求は、複数台の電源モジュールに負荷電流を均等分担させる並列電源システムで実現できる。しかし、一般に電源モジュールは軽負荷において電力変換効率が低下する傾向にあるため、負荷電流を複数の電源モジュールによって均等分担させると相対的にモジュール電流が減少しシステム全体の効率が著しく低下する。近年、省エネルギー化の要求は一層強まっており、重負荷のみならず軽負荷時においても効率改善が望まれている。この問題は、軽負荷時にモジュールの稼働台数を減らして相対的にモジュール電流を増やすことで対処できるが、稼働台数を変化させる切替点が重要となる。さらに、並列電源システムにおいてモジュール電流の均等分担が最も高効率であるのかとの疑問もある。

本研究では、同一モジュールを2台並列接続させた並

列システムについて電力変換効率が最大となる電流分担率を解析により導出し、回路シミュレーションによって確認した。さらに、同一モジュールを複数台並列接続させた並列電源システムについて、実測した単体モジュールの効率特性から、 n 台並列電源システムの切替点推定方法を提案し、その有用性を実験及び回路シミュレータで確認した。

2. 台数切替制御

通常、並列電源システムでは特定のモジュールに電流が集中し、熱的、電氣的ストレスが集中することを防ぐため、各モジュールの出力電流を均等分担させる制御方法がとられている。しかし、一般的なコンバータの効率特性は図1のような効率特性であるため、負荷電流を均等に分担させる並列電源システムでは軽負荷時に効率が大きく低下する。この問題は、軽負荷時にモジュールの稼働台数を減らし、相対的にモジュール電流を増やすことで高効率で動作させることができる。

例えば、図1に示すような効率特性をもつモジュールの2台並列システムを考える。図2のように重負荷時 ($I_L=16.0A$) には並列システムの特長を生かし、85%

* 平成24年5月31日受付

** 電気工学科

*** 工学研究科電気工学専攻

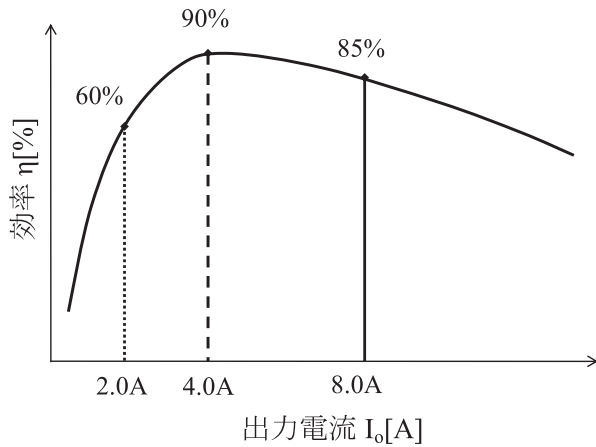


図1 一般的なコンバータの効率特性の一例

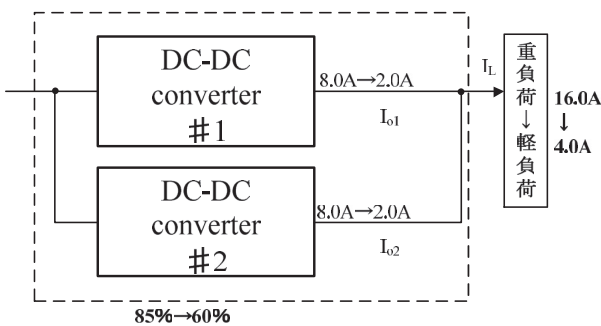


図2 2台並列電源システム

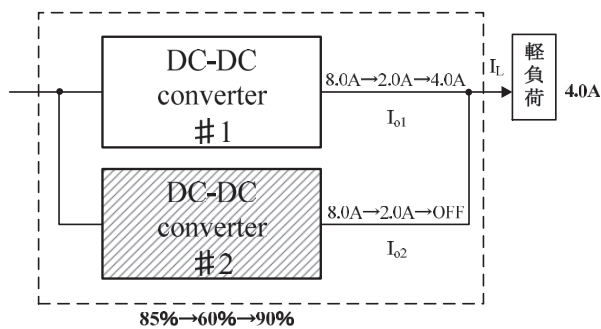


図3 2台並列システム (1台停止)

と高効率で動作している。しかし、軽負荷時 ($I_L=4.0A$) には並列システムの特長を生かし切れず 60%と効率が大きく低下している。そこで、図3に示すようにモジュール #2 を停止し相対的にモジュール #1 のモジュール電流を増加させることで軽負荷時でも 90%と高効率で動作させることができる。

3. 電流分担率

3.1 損失計算

同期整流方式バックコンバータの主な損失は、コイルの損失、FET による損失、コンデンサによる損失、回路パターンでの損失である。これらの損失を考慮し、出力電流との関係式で表すと次のように近似できる。

$$P_{loss} = C + aI_o^2 + bI_o \tag{1}$$

ここで C は固定損を表し、 a, b はそれぞれ I_o の二乗、 I_o に比例する損失係数である。また、モジュール #1 とモジュール #2 の出力電流を I_{o1} , I_{o2} とし負荷電流 I_L と電流分担比 α との関係は、

$$I_{o1} : I_{o2} = \alpha I_L : (1 - \alpha) I_L \tag{2}$$

と表せる。ただし、 $0 < \alpha < 1$ である。これを用いて、各モジュールの損失は次式で表すことができる。

$$P_{loss1} = C + a(\alpha I_L)^2 + b(\alpha I_L) \tag{3}$$

$$P_{loss2} = C + a(1 - \alpha)^2 I_L^2 + b(1 - \alpha) I_L \tag{4}$$

したがって、電源全体の損失 P_{total} は P_{loss1} と P_{loss2} の合計であるため次式で表せる。

$$P_{total} = 2C + a(2\alpha^2 - 2\alpha + 1)I_L^2 + bI_L \tag{5}$$

この式より、 P_{total} は I_L^2 の係数 $2\alpha^2 - 2\alpha + 1$ に依存することがわかる。 $2\alpha^2 - 2\alpha + 1$ は $\alpha = 0.5$ のときに最小であり、 P_{total} もこのとき最小となるため、最高効率を得られる。

3.2 シミュレーション結果

等価回路を用いて図4に示す1台動作時の効率特性を回路シミュレータ上で再現した。次にこの等価回路を2台並列接続し電流分担比 α を 0.9 ~ 0.5 と変化させた場合の効率特性を図4に重ねて描いた。

この結果からも同一モジュールを並列接続し動作台数を固定した場合は、負荷を問わず電流を均等にする ($\alpha = 0.5$) と最高効率を得られることが確認できた。台数の

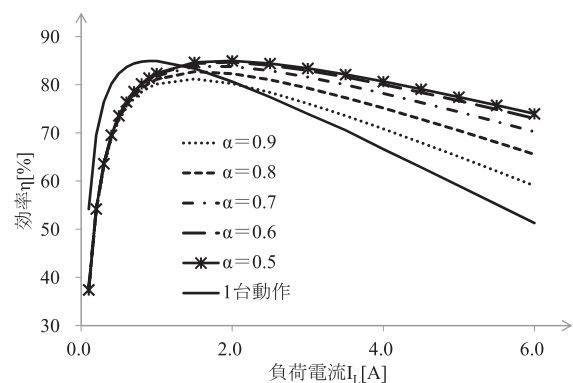


図4 電流分担率を変化させた効率特性

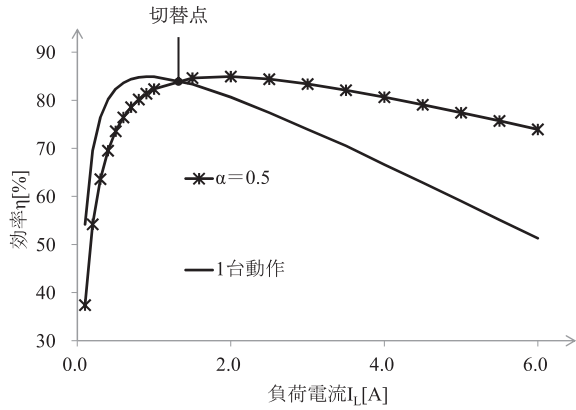


図5 2台並列システムの切替点

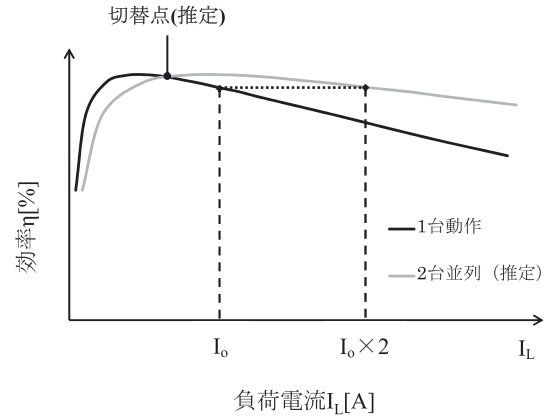


図7 並列電源システムの効率推定

切替は、図5に示すように1台動作時の効率グラフと $\alpha = 0.5$ 時の2台並列効率グラフが交差する点で行えばよいことがわかる。

4. 切替点推定方法

図6に示すように同一モジュールを複数台並列動作させる並列システムについて考える。通常並列システムは、負荷電流を n 台のモジュールに均等分担させるため、各モジュールの出力電流 I_o は

$$I_{o1} = I_{o2} = \dots = I_{on} = I_o \tag{6}$$

となり、負荷電流 I_L は、

$$I_L = n \times I_o \tag{7}$$

と表すことができる。

また、同一モジュールを使用しているため各モジュールの電力変換効率 $\eta_i (i=1..n)$ は、

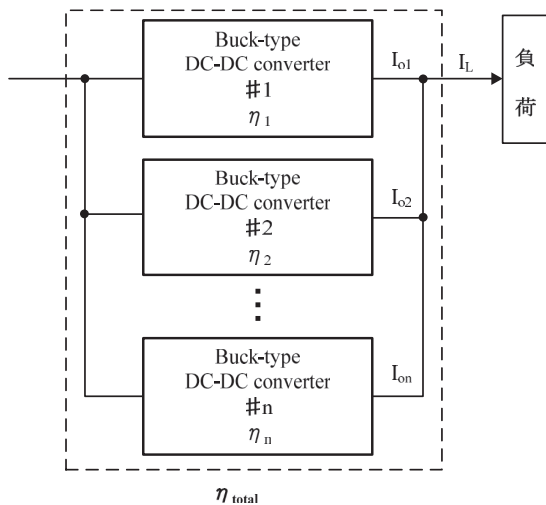


図6 並列電源システムのモジュール電流と効率

$$\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_n = \eta = \eta_{total} \tag{8}$$

となる。この結果、負荷電流 $I_L (I_L = n \times I_o)$ 時の並列システムの変換効率 η_{total} は、モジュール単体の I_o 時の効率 η と一致する。この考えを利用し、図7に示すように1台動作時の効率特性を実測し、測定点の出力電流だけを2倍することで2台並列動作時のシステム全体の効率特性を推定することができる。ここで、実測した1台動作時の効率グラフと推定した2台並列動作時の効率グラフの交点を切替点とすれば軽負荷時の効率向上を図ることができる。この考えを拡張して、 $n-1$ 台から n 台へ稼働台数を変化させる切替点は、モジュール単体の出力電流 I_o をそれぞれ n 倍、 $n-1$ 倍して得られた効率特性グラフの交点として求められる。

5. 実験結果

モジュールとして同期整流方式バックコンバータを使用し、同一モジュールを2台並列動作させた実験回路を図8に示す。この実験回路のモジュール単体の効率特性

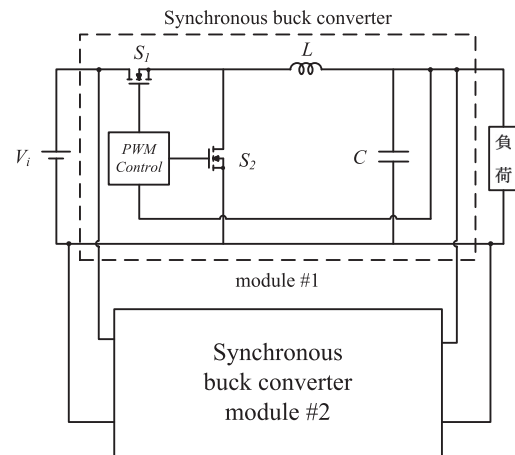


図8 実験回路構成

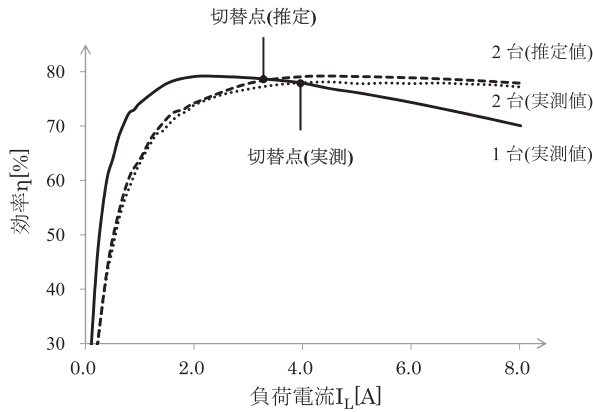


図9 並列システムの電力変換効率

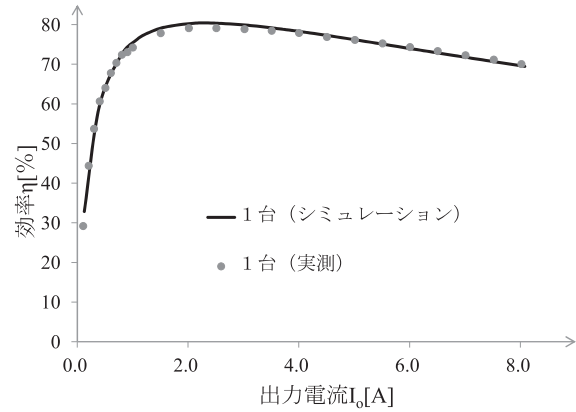


図11 モジュール単体の効率特性の比較

と2台並列動作時の推定効率特性を図9に示す. 確認のため, 2台並列システムの効率特性を実測したグラフも図9に重ねて描いた.

この結果から, 推定により求めた2台並列システムの効率特性は実測値とほぼ一致していることが分かる. したがって, 図9から得られる推定切替点は実測による切替点とほぼ一致しており, 台数切替制御を行う上で有効であるといえる.

6. シミュレーション結果

推定方法により求めた切替点で, 台数切替制御を行った効率特性を回路シミュレータにより確認した. 図10は実験モジュールと同じ電力変換効率特性を模擬した等価回路である. ここで, Liner Voltage SourceはPWM制御コンバータを関数化したマクロモデル(MM)である. この等価回路の効率特性と実験で測定したモジュールの効率特性を図11に示す. さらに, 図12に示すように, シミュレータ上で作製した等価モジュールを3台並列動作させ, 負荷電流を検出し, 推定によって求めた切替点でモジュールの稼働台数を制御し効率を測定した. このモジュールの1台動作時の効率特性と推定した2台動作時の効率特性及び3台動作時の効率特性をそれぞれ

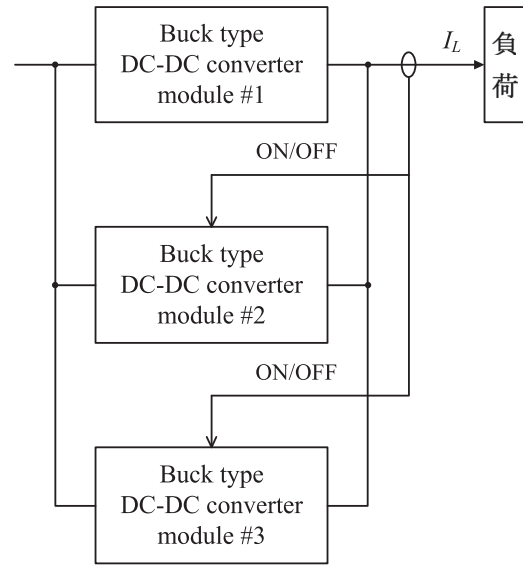


図12 並列システム回路構成(シミュレーション)

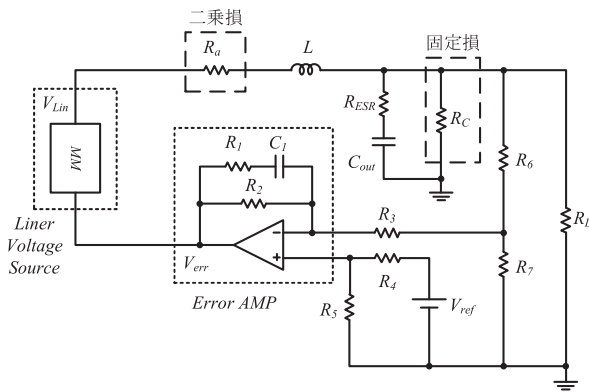


図10 シミュレーション等価回路

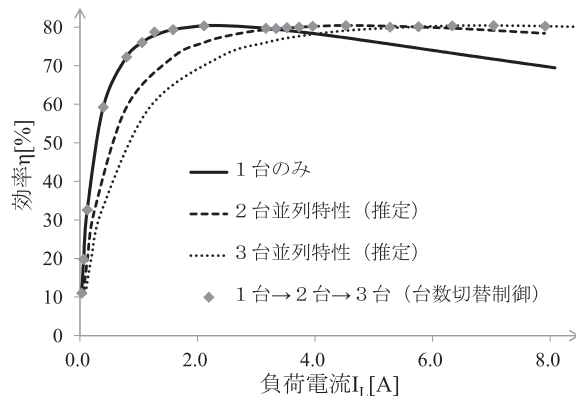


図13 台数切替による並列システムの効率特性

図13に示す. これらの効率特性から求めた切替点でモジュールの稼働台数を制御した場合の効率特性グラフも重ねて描いた.

このシミュレーション結果から, 推定により求めた切

替点で切替制御を行うことで全負荷にわたり高効率を維持できることが分かる.

7. まとめ

本研究では, まず固定台数で電流分担率を変化させた場合の2台並列システムの電力変換効率を解析した. この結果, 最高効率となる電流分担率が0.5であることが示され, シミュレータにより結果の妥当性を確認した. 次に, 同一モジュールを用いた並列システムの効率特性が実測した単体モジュール特性から容易に推定できることを示した. 続いてこの結果を利用して最適な台数切替点が得られることを示し, 推定切替点を用いた切替動作で効率特性を改善できることを実験及び回路シミュレーションで示した. 従って, 提案する切替点を用いた台数切替運転を行うことで並列システム全体の効率を改善することができる.

8. 参考文献

- [1] R.H.Wu, T.Kohama, Y.Kodera, T.Ninomiya, F.Ihara, "Load-Current-Sharing Control for Parallel Operation of DC-to-DC Converters", IEEE 24th Power Electronics Specialists Conference Record, pp.101-107, 1993
- [2] T.Kohama, T.Ninomiya, M.Shoyama, and F.Ihara, "Dynamic Analysis of a Parallel-Module Converter System with Current Balance Controllers," Proceedings of IEEE 16th International Telecommunications Energy Conference, pp.190-195, 1994
- [3] D.K.W.Cheng, X.C.Liu, and Y.S.Lee, "Parallel operation of DC-DC converters with synchronous rectifiers," Proceedings of Power Electronics Specialists Conference Record, pp.1225-1229, 2011
- [4] 田原照久, 小浜輝彦, "低電圧降圧コンバータの電力変換効率に関する一考察", 平成22年度電気関係学会九州支部連合大会論文集 No.10-1A-08, 2010年9月
- [5] 出島秀樹, 小浜輝彦, "台数切替制御による並列電源システムの効率向上について", 平成23年度電気学会産業応用部門大会論文集 No.Y-36, 2011年8月
- [6] 出島秀樹, 小浜輝彦, "台数切替制御による並列電源システムの効率向上について", 平成23年度電気関係学会九州支部連合大会論文集 No.09-2P-14, 2011年9月
- [7] 原田耕介, 二宮保, 顧文建, "スイッチングコンバータの基礎", コロナ社
- [8] 佐藤守男, "高効率・高信頼スイッチング電源設計の勘どころ", 日刊工業新聞社