

低リップル並列電源の設計指針について*

小 浜 輝 彦**
常 定 亮 太***

Design Guideline for Low-ripple Paralleled Converter System

Teruhiko KOHAMA and Ryota TSUNESADA

Design guideline for low-ripple paralleled converter system is proposed. Current and voltage ripples in the output capacitor of the paralleled converter system are estimated through a simplified circuit model which is available for any paralleled converter system. Design example for paralleled converter system is given to confirm the effectiveness of proposed guideline. Insulated type converter enhances flexibility of the design by adjusting turn ratio of transform.

Key Words: Paralleled Converter System, Ripple, Interleaving Operation, DC-DC Converter

1. はじめに

現在，CPU や LSI などの電子機器用並列電源には，低電圧・大電流かつ高速応答が求められている．これを実現するためには，平滑フィルタのインダクタンスを小さくしなければならないが電流リップルが増大するため問題となる．これを解決する手法として，並列電源モジュールのインターリーブ動作[1-5]が行われている．

我々はすでに接続台数と時比率の組み合わせによって，出力リップルの大幅な低減が可能であることを示した．[6-9]本稿では，この関係を用いてリップルが小さく，負荷急変に対応する高速並列電源についてその設計指針を示す．

2. インターリーブ動作

インターリーブ動作とは，図 1 に示すように並列電源モジュールのスイッチング位相を意図的にずらすことによって，出力コンデンサにおける電流変化を相殺しリップルを低減する方法である．2 台接続の場合，モジュール間の位相を180度ずらすことで最もリップルを抑制することができる．ただし，接続代数 N 及び時比率 D によってリップルの低減効果が異なるため，その関係を回路モデルを用い定量的に求める．

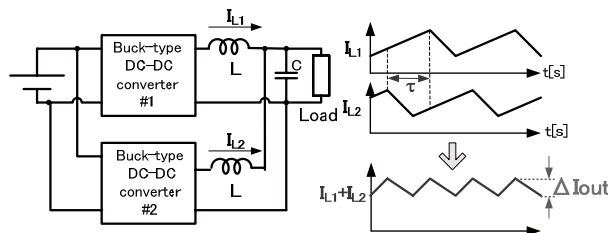


図1 インターリーブ動作

3. リップルの算出

降圧形コンバータのリップル算出用回路モデルは，図 2 (a)のようにパルス電圧源で表すことができる．ここで，スイッチング周期において出力電圧が一定と仮定すれば， L を流れる電流は三角波となるので，降圧形コンバータは図 2 (b)のような三角波電流源と等価と見なすことができる．このことから，図 3 のように N 台並列接続の場合でも，単純に各モジュールの電流リップルを加えることで電流リップル波形を表すことができ，このコンデンサ電流の最大値と最小値を求めることで，並列電源システムの出力リップルを容易に導出できる．

リップル算出用回路モデルから電流リップルと時比率の関

* 平成20年12月17日受付

** 電気工学科

*** 工学研究科電気工学専攻

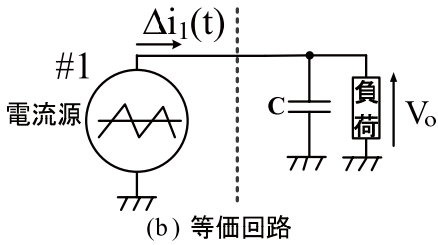
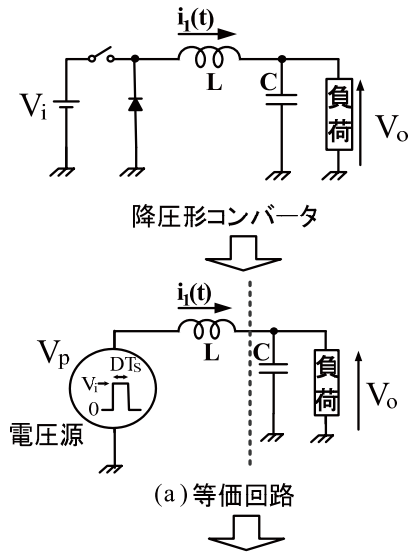


図2 リプル算出用等価回路モデル

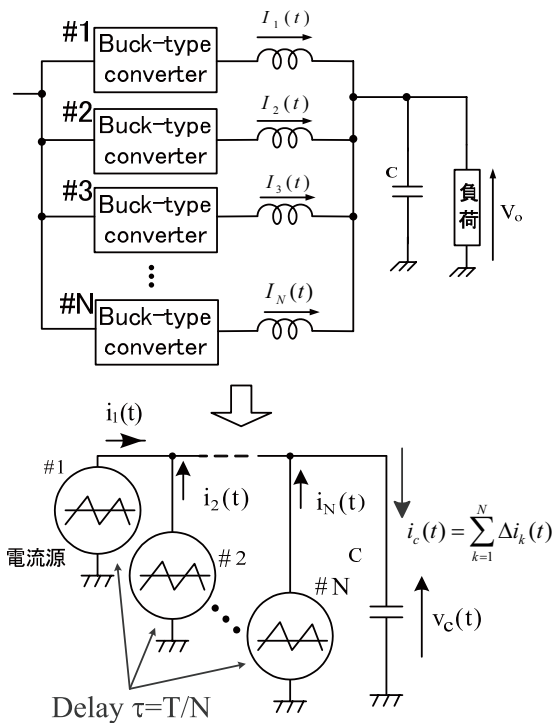


図3 複数台リプル算出用等価回路モデル

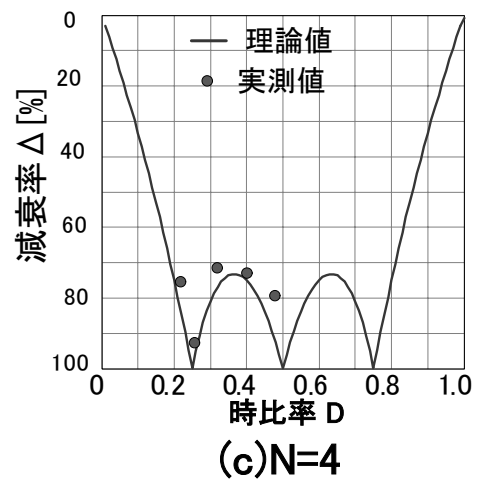
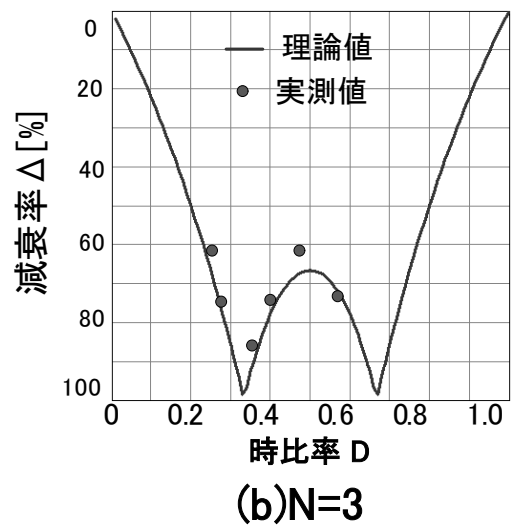
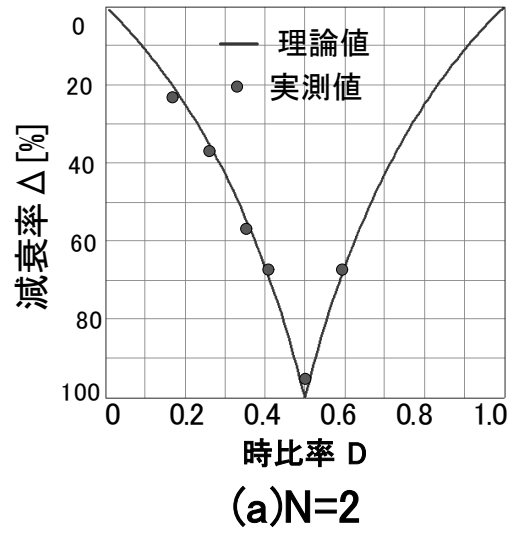


図4 減衰率と時比率の関係

係は図4のように表すことができる。接続台数2台の場合、時比率0.5でゼロリップルとなる。また3台の場合、時比率約0.33と0.67で最も減衰効果が確認できる。図4から分かるように同じ接続台数でも時比率が異なるとリップルの低減効果が変化する。また接続台数を増加させるに従って全体的にリップルが低減する傾向がある。大きな特徴として時比率と接続台数の組み合わせが式(1)の条件を満たす場合ゼロリップルとなる。

$$D \times N = \text{整数} \quad (1)$$

理論値と実験結果がほぼ一致することから、回路モデルの妥当性を確認することができる。

4. 設計指針

まず、電流リップルの減衰率 Δ を次式で定義する。

$$\Delta = \frac{\Delta I_m - \Delta I_o}{\Delta I_m} \quad (2)$$

ここで、

ΔI_o : 並列電源システムの出電流リップル

ΔI_m : モジュール1台の出電流リップル

である。 Δ が1に近い程リップルは低減する。

コンバータが非絶縁型の場合の設計フローチャートを図5に示す。まず始めに、入出力電圧とコンバータモジュール単体の内部損失から大まかな時比率の動作範囲を推定する(Step0)。次にスイッチング周波数とモジュール単体の応答速度から平滑コイルのインダクタンスを決定する(Step1)。続いて電圧リップルの目標値と平滑コンデンサのESRから電流リップルの目標値を決め(Step2)、モジュール単体の電流リップルを求め式(2)より電流リップルの減衰率を決定する(Step3)。リップル算出用回路モデルを用いてグラフからリップルを見積り、条件を満たす時比率範囲を明確にする(Step4)。次にStep0で求めた時比率範囲とStep4で明確にした時比率範囲が重なる接続台数候補を選定する(Step5)。ここで下記四点を考慮して接続台数を決定する(Step6)。

- ・ N台合計のモジュール容量が目的とするシステムの電流容量を満足するか。
- ・ 接続台数候補ごとに時比率範囲を計算しその値が条件を満たすか。
- ・ N台接続の場合モジュール全体で応答速度を満足するか。
- ・ 接続台数の増加によるコストに問題はないか。

コンバータが絶縁型の場合の設計フローチャートを図6に示す。絶縁型はまず、非絶縁型コンバータのフローチャートのStep1~4と同様の手順を行う。Step4で明確にした時比率範囲の中から時比率範囲を決める。この際、内部損失による時比率変化が考えられるので範囲の広いものを選択し、範囲が同じ程度のものが複数ある場合に

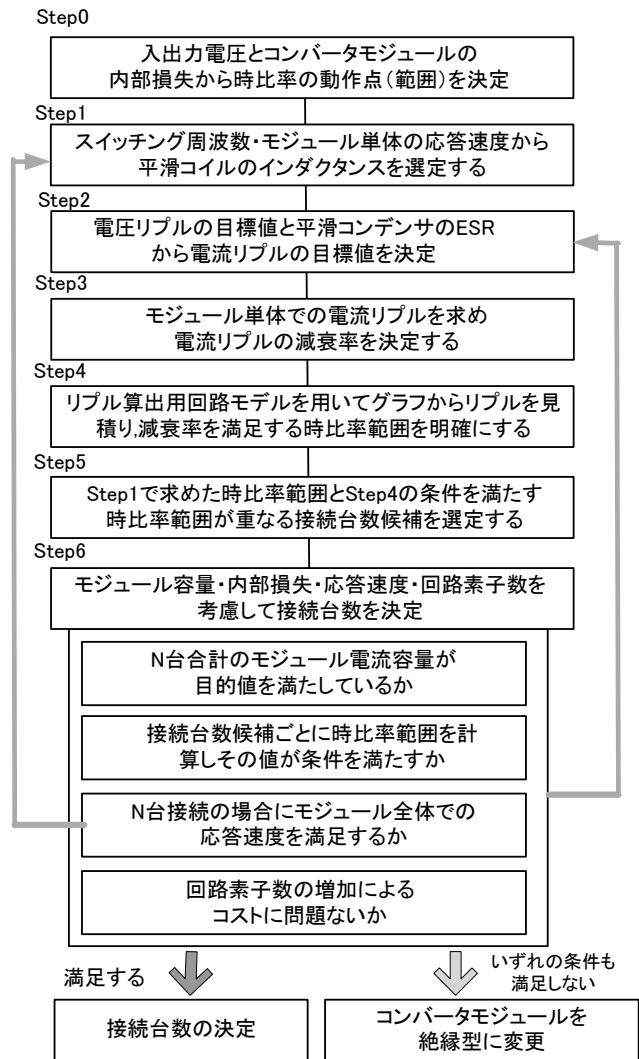


図5 非絶縁型の設計フローチャート

は全て候補に入れておく。続いて、モジュール容量、モジュールの時比率範囲、応答速度、回路素子数を考慮して接続台数を決定する。最後に、入出力電圧と時比率の動作点からトランス比を決定する。

5. 設計例

設計例として入力12[V]、出力3.3[V]、30[A]、出力電圧リップルが出力電圧の3%以下となる非絶縁型並列電源について考える。

Step1 入出力電圧とコンバータモジュールの内部抵抗から時比率の動作範囲を推定する

コンバータの内部損失がない場合次式の関係が得られる。

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (3)$$

ここで $V_{in} = 12[V]$ 、 $V_o = 3.3[V]$ より時比率 D は0.275となる。また、コンバータの内部抵抗 r が0.1[]だとす

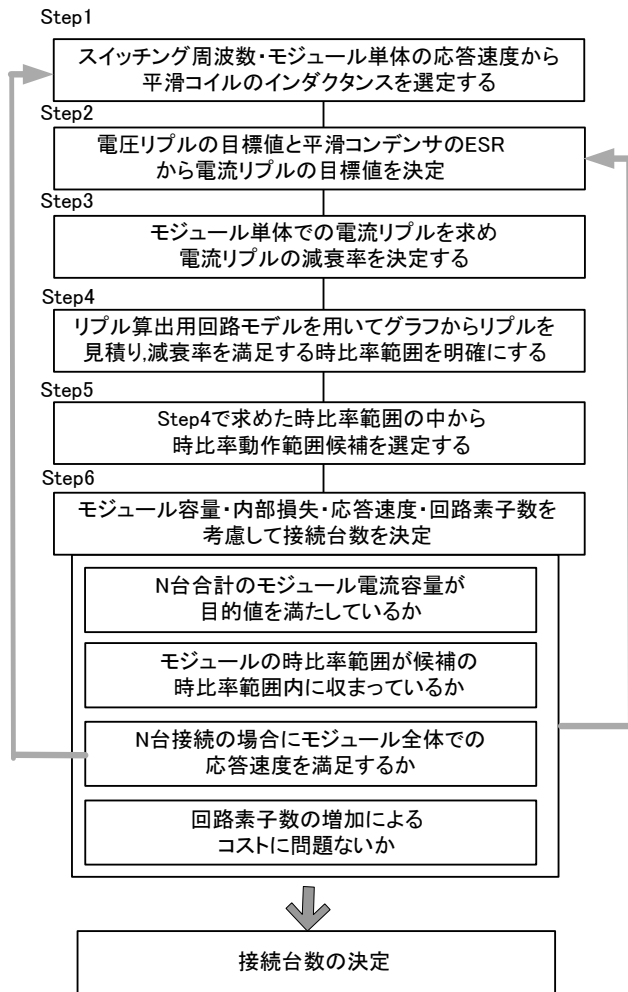


図6 絶縁型の設計フローチャート

ると時比率 D' は

$$D' = \frac{V_o + rI_o}{V_{in}} \quad (4)$$

で表わされる。したがって D' は0.358となる。ここでは出力電流 I_o はモジュール単体の定格電流値である。よって時比率の動作範囲は0.275から0.358となる。

Step2 スwitching周波数・平滑コイルのインダクタンスを決め、電流リップルの減衰率を決定する

スイッチング周波数が300[kHz]、モジュール単体の応答速度の目標値を3[A/μs]とすると、式(4)からコイルのインダクタンス L 、インダクタンスに加わる電圧を V は

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L} \quad (5)$$

となる。降圧形では $V = V_{in} - V_o$ となるので式(5)より L は2.9[μH]となる。

Step3 電圧リップルの目標値と平滑コンデンサの ESR から電流リップルの目標値を決定する

出力電圧リップル ΔV は、平滑コンデンサの ESR と電流リップル ΔI の積に大きく依存しほぼ次式で表される。

$$\frac{\Delta V}{ESR} = \Delta I \quad (6)$$

この式を用いて ΔV に目標とする電圧リップルを設定すれば、 ΔI が電流リップルの目標値 ΔI_o となる。ここでは例として平滑コンデンサの ESR を0.15[]とすると、 $\Delta V = 3.3 \times 0.03 = 0.099[V]$ となるので電流リップルの目標値 ΔI_o は0.66[A]となる。

Step4 モジュール単体の電流リップルを求め電流リップルの減衰率を決定する

モジュール単体の電流リップル ΔI_m は

$$\Delta I_m = \frac{di}{dt} \cdot T_{on} = \frac{V}{L} \cdot D'T \quad (7)$$

で与えられる。これより $\Delta I_m = 3.6[A]$ となる。以上の結果より式(2)を用いて電流リップルの減衰率を決定すると $\Delta = 81.7[\%]$ となる。

Step5 回路モデルを用いて電流リップル算出

電流リップルの見積りは、リップル算出用等価回路を用い接続台数ごとのリップルを算出する。

Step6 求めた時比率範囲でリップルの減衰率が条件を満たす接続台数候補を選定

図7に各接続台数に対する時比率と減衰率の関係を示す。接続台数が2台の場合、リップルの減衰率 Δ が81.7%以上を満たす時比率は、0.46~0.54までの範囲である。接続台数3台の場合では、条件を満たす時比率の範囲は0.29~0.38と0.62~0.70の範囲となる。同様にして接続台数ごとのリップルの条件を満たす時比率の範囲を表したグラフが図8である。図8から Step0で求めた時比率範囲のときに条件を満たす接続台数候補は3台、4台、5台、6台、7台となる。

Step7 モジュール容量、内部損失、応答速度、回路素子数を考慮して接続台数を決定する

(1) N台合計のモジュール容量が目的とするシステムの電流容量を満足するか。

例として、一台のモジュール容量が10[A]であるとすると3台以上なら条件を満たす。

(2) 接続台数候補ごとに時比率範囲を計算しその値が条件を満たすか。

接続台数によってモジュール1台の出力電流分担が変わるので、式(4)を用いて再度、実際に動作する時比率(動作点)を計算すると、 $N = 3$ のときの時比率は $D'_3 = 0.358$ 、 $N = 4$ のとき $D'_4 = 0.338$ 、同様にして $D'_5 = 0.325$ 、 $D'_6 = 0.317$ 、 $D'_7 = 0.311$ となる。これらの動作点と減衰率が条件を満たす時比率範囲を図9に示す。図9から時比率範囲内に動作点があるものは接続台数が3台、6台、7台と分かりこれらの台数が条件を満たす。

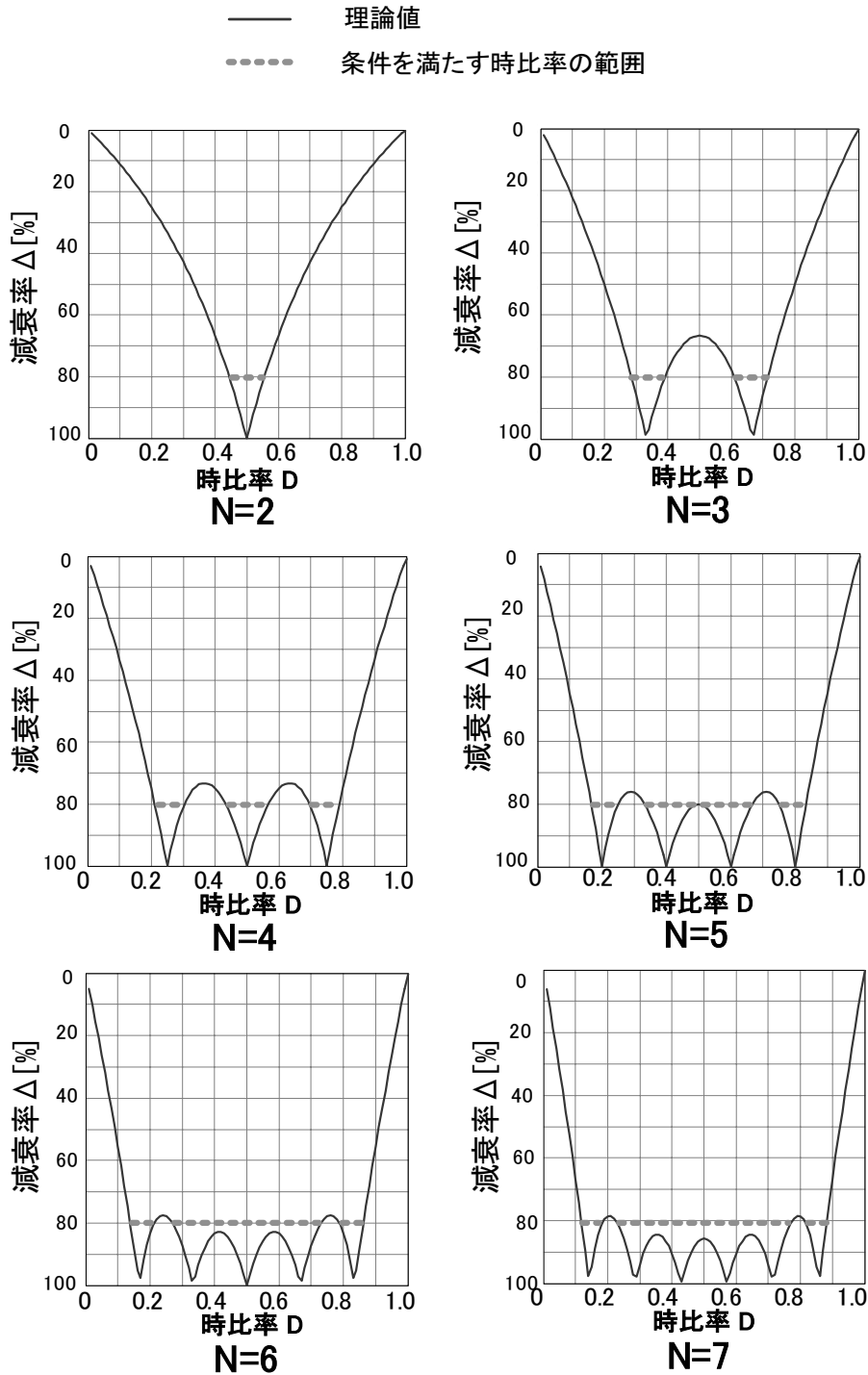


図7 出力電流リップルと時比率の関係

(3) 台接続の場合にモジュール全体で応答速度を満足するか。

並列システム全体の応答速度が $10[A/\mu s]$ 必要だとするとモジュール単体の応答速度は $3[A/\mu s]$ なので4台以上のとき条件を満たす。

(4) 接続台数の増加によるコストに問題はないか。

(1)～(3)を踏まえ、リップル条件を満足し回路素子数を少なくするなら接続台数は6台に決まる。しかし、コス

トに見合わない場合、以下の作業を行う。

(a) 応答速度は満足しないが、Step6の(2)で時比率範囲にまだ余裕がある場合

Step1に戻り平滑コイルのインダクタンスを小さくしてモジュール単体の応答速度を上げる。

(b) 応答速度は満足するが、Step6の(2)で時比率範囲内に動作点が存在しない場合

Step1に戻り平滑コイルのインダクタンスを大きくす

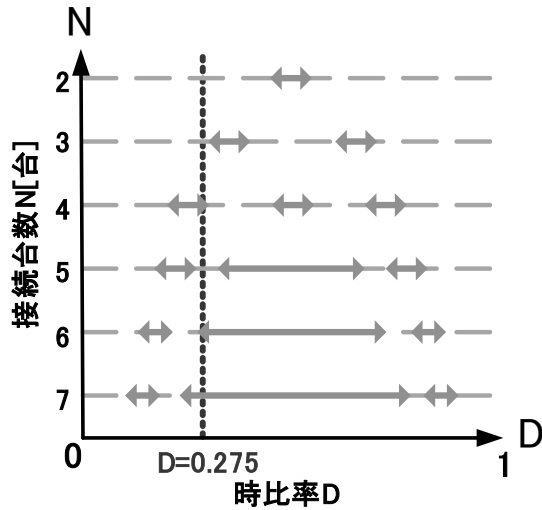


図8 目標減衰率を満足する時比率範囲(ESR = 0.15)

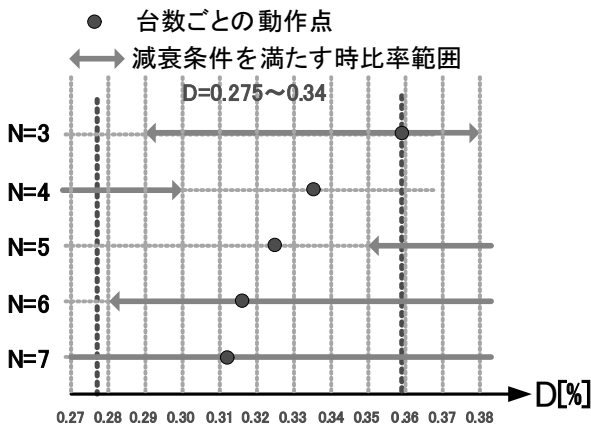


図9 台数ごとの動作点と減衰条件を満足する時比率範囲の関係

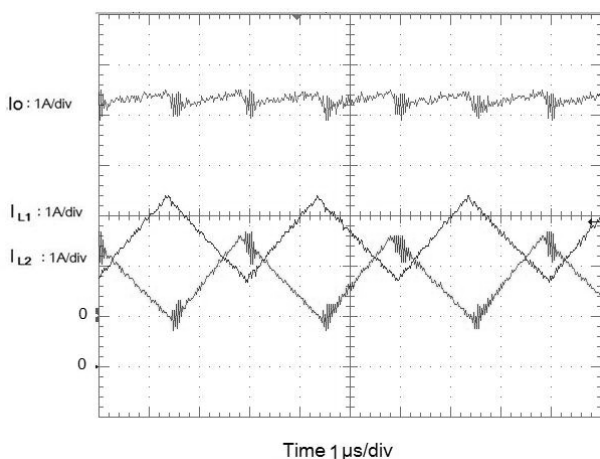


図10 絶縁型コンバータの電流リップル波形(N = 2)

ることによって電流リップルの減衰率が下がる。よって Step5での条件を満たす時比率範囲が広がる。

(c) コンデンサの ESR を変更し設計をやり直す場合リップルは式 (6) のように ESR の影響を受けるので

ESR の値を変更することでリップルを低減できる。例として、平滑コンデンサの ESR を 0.15[] から 0.10[] に変更した場合、電圧リップルが 3% 以下の条件を満足する減衰率は 81.7% から 70% と下がる。この結果、図 8 の条件を満たす時比率の範囲が広がり接続台数候補が 3 台でも可能となる。

(d) コンバータモジュールを非絶縁型から絶縁型にする場合

トランス比により時比率の調整が可能となり接続台数候補を増やすことができる。例としてコンバータモジュールを絶縁型とし接続台数が 2 台の場合に、条件を満たすようトランス比を調整した実験結果を図 10 に示す。実験結果から接続台数が 2 台の場合でもリップルの減衰率が 78% となり接続台数候補が増える。コンバータを絶縁型とすることで設計の自由度が高まったことが確認できる。

6. まとめ

低電圧リップルを実現する並列電源システムの設計指針を示した。等価回路を用いて事前にリップル抑制効果を把握できるため、負荷に合った適切な接続台数と回路パラメータを選択することができる。また、コンバータを絶縁型とすればトランスによる時比率調整が可能となり設計の自由度を高めることができる。

参考文献

- [1] B.A.Miwa, D.M.Otten, and M.F.Schlecht, "High efficiency power factor correction using interleaving techniques," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.557-568, 1992.
- [2] D.J.Perreault and J.G.Kassakian, "Distributed Interleaving of Paralleled Power Converters," IEEE Trans. on Circuit and Systems I, Vol.44, No.8, pp.728-734, 1997.
- [3] J.Weil and F.C.Lee, "A Novel Soft-Switched, High-Frequency, High-Efficiency, High-Current 12V Voltage Regulator - The Phase-Shift Buck Converter," IEEE 18th Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.724-730, 2003.
- [4] T.Kohama, G.Endo, H.Shimamori, T.Ninomiya, "New Synchronizing Circuit Suitable for Paralleled Converter System with Automatic Interleaving Operation," Proceedings of IEEE 19th Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.647-653, 2004.
- [5] T.Kohama, G.Endo, H.Shimamori, T.Ninomiya, "Simple Multiphase Control for Paralleled Converter System", IEICE Trans. on Communication, Vol.E88-B, No.12, pp.4636-4642, 2005.
- [6] Teruhiko Kohama and Tamotsu Ninomiya,

- “Automatic Interleaving Control for Paralleled Converter System and Its Ripple Estimation with Simplified Circuit Model,” Proceedings of the 7th International Conference on Power Electronics, pp. 238-242, October 2007.
- [7] Teruhiko Kohama, Ryota Tsunesada, and Tamotsu Ninomiya, “Ripple Estimation for Paralleled Converter System with Automatic Interleaving Function,” Proceedings of the 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, CD-ROM(6pages), November 2007.
- [8] 小浜輝彦, 横溝篤史, “低電圧並列電源システムの簡易リップル算出モデルについて” 福岡大学工学集報第77号 pp.9-14 (2006)
- [9] 小浜輝彦, 二宮保, “並列電源システムの簡易リップル算出モデルとゼロリップル電源について” 平成18年度電気関係学会九州支部大会論文集 No. 07-2A-06.
- [10] 小浜輝彦, 常定亮太, “電流リップルを低減する並列電源設計指針について” 平成20年度電気学会全国大会論文 No. 4-068.
- [11] 小浜輝彦, 常定亮太, “低出力リップルを実現する並列電源設計指針について” 平成20年度電気関係学会九州支部大会論文集 No. 09-2P-06.
- [12] “High Speed PWM Controller UC3823A, B/3825A, B”, Unitrode Product & Applications Handbook, pp.6-158 ~ 6-165 1995-1996.
- [13] “High Speed PWM Controller UC3824”, Unitrode Product & Applications Handbook, pp.6-166 ~ 6-172, 1995-1996.

