

マトリックスコンバータに適用する ダンピング制御のゲイン設計法

小岩 一広*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Gain Design Method of a Damping Control for a Matrix Converter

Kazuhiro Koiwa, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年, 大容量のエネルギーバッファを用いずに交流から交流へ直接変換できるマトリックスコンバータ(以下 MC)の研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。MC は大容量の電解コンデンサがないため, 小型, 軽量, 長寿命化が期待できる。

著者らは MC の電圧利用率の問題を解決するため, MC の前段に V 結線チョッパを接続し, 電圧が不足する領域のみチョッパにより昇圧する方式を提案した⁽²⁾。V 結線チョッパは電流の通過素子数が少ないため効率低下の影響を抑えることができる。一方で, 入力フィルタの共振が原因で入力電流がひずみ, システムの安定性を悪化させる。共振はダンピング制御により抑制できるが, その設計指針は明確になっていない。

本論文では, ダンピング制御のゲインをダンピング抵抗接続による共振抑制効果の観点から設計する方法を提案する。また, 1.4kW の誘導性負荷を使用した実機実験によりダンピング制御の有効性について検討する。その結果, 最高効率は 95.1%, 最大率は 0.996, 入力電流の総合ひずみ率(THD)は 7.6%と得られたので報告する。

2. 回路構成およびゲイン設計

〈2.1〉 回路構成

図 1 に提案回路の制御構成図を示す。提案回路では昇圧機能を実現するため, MC の入力側に V 結線型の交流チョ

ッパを接続する。チョッパを V 結線型にすることで MC に追加する素子は双方向スイッチ 4 つのみとなる。よって, 提案回路は MC の利点である小型化を維持できる。しかし, 提案回路は入力フィルタによる共振が原因で入力電流波形にひずみが生じる。共振ひずみを抑制する方法はダンピング抵抗を接続する方法, およびダンピング制御を適用する方法が検討されている。

〈2.2〉 ダンピングゲインの設計法

図 2 にダンピング制御を適用した場合のチョッパ入出力応答ブロック図を示す。ここで, K_v は変換器ゲイン, T_{HPF} は HPF の時定数である。また, β はチョッパの昇圧比である。その他の計算条件は表 1 にまとめる。このときの伝達関数は(1)式で表せる。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{\beta LC} s + \frac{1}{\beta LCT_{HPF}}}{s^3 + \left(\frac{1}{T_{HPF}} + \frac{K_v K_d}{L}\right) s^2 + \frac{1}{\beta^2 LC} s + \frac{1}{\beta^2 LCT_{HPF}}} \quad (1)$$

本論文では, ダンピング制御に必要なゲイン設計をダンピング抵抗 R 接続時の共振抑制効果の観点から行う。まず, フィルタコンデンサ C と直列に R を接続した時のチョッパ入出力応答の伝達関数は次式で表せる。

$$G_{resist} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{R}{\beta \cdot L} s + \frac{1}{\beta \cdot LC}}{s^2 + \frac{R}{\beta^2 \cdot L} s + \frac{1}{\beta^2 \cdot LC}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

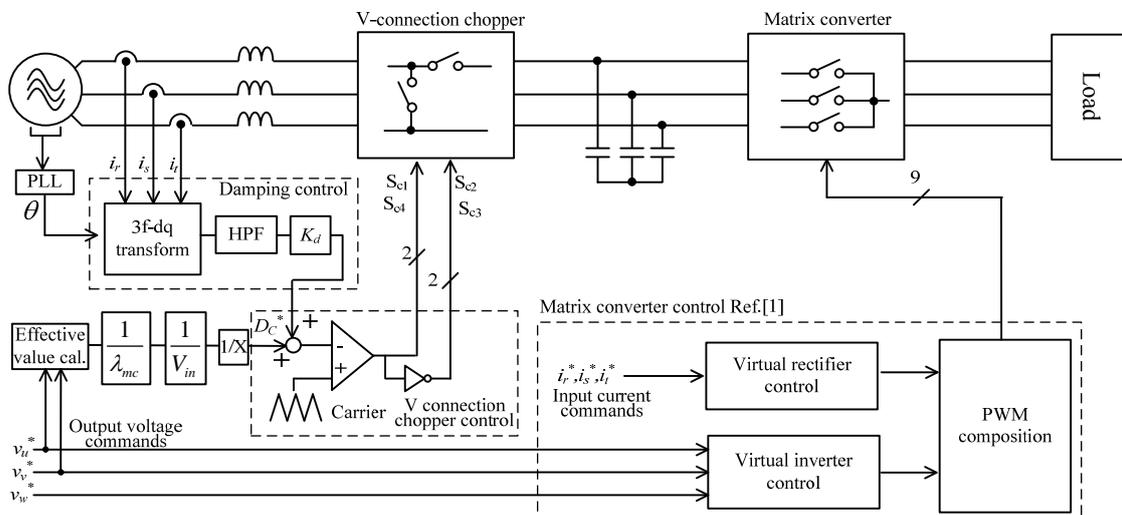


Fig. 1. Configuration of the proposed circuit.

ここでは、ダンピング制御と抵抗 R の共振の抑制効果が共振点付近で等しくなるように、ダンピング制御のゲイン K_d を設計する。つまり、共振周波数 ω_c 時に(1)式と(2)式が等しいとし、ダンピングゲイン K_d を求めると、次式となる。

$$K_d = \frac{2L\sqrt{\beta^2 + \frac{T_{HPF}^2}{LC}}}{\beta K_v T_{HPF}} \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{4\zeta^2 + \beta^2}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ζ は減衰係数であり、次式で表せる。

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \dots\dots\dots (4)$$

図 3 にダンピング抵抗 R 接続時とダンピング制御適用時のゲイン特性を示す。ここで、表 1 の条件をもとに(3)式より K_d を求めると、0.018 となる。 ω_c での両者のゲイン特性を一致させて K_d を設計したことで、等しい共振抑制効果が得られている。

3. 実験結果

図 4 に表 1 の条件と誘導性負荷を用いて提案回路の動作実験を行った結果を示す。入出力電圧比は 1:1 を実現し、提案回路の入力力率はほぼ 1.0 に制御できている。このとき、入力電流 THD は 7.60%，出力電流 THD は 1.58% である。ここで、THD は基本波周波数の 40 次までを観測して算出した。なお、ダンピング制御と等価な共振抑制効果を得られる R を(3)式により求めると、 3.91Ω となる。このダンピング抵抗による損失は、損失シミュレーションにより 75.9W(出力電力の 5.5%)と算出され、ダンピング抵抗で共振を抑制すると著しく効率を低下させる。

図 5 に負荷を変化させた場合の効率、力率および THD 特性を示す。ダンピング抵抗により共振を抑制した場合、入力電流 THD は 8%以下に抑制できている。しかし、抵抗損失の発生により効率は低下する。一方、ダンピング制御を適用した場合はダンピング抵抗による共振抑制法と比較して、効率の低下なしに入力電流 THD を 10%以下に抑制可能であることを確認できる。特に 1.4kW 負荷において、最高効率 91.5%，最大力率 0.996，入出力電流 THD は 7.60% を得られた。また、ダンピング制御を適用した場合とダンピング抵抗を接続した場合の損失はそれぞれ 142W，72.2W と、ダンピング抵抗で 70W の電力を消費し、シミュレーション結果とほぼ一致する。したがって、ダンピング制御は抵抗損失による効率低下なしに THD を抑制できる。以上より、ダンピング制御の有効性を確認できた。なお、本研究は平成 21 年度産業技術研究助成事業の支援を受けており、関係各位に感謝の意を表します。

文献

- (1) 伊東他, 電学論 D, 124 巻 5 号, P457, 2004
- (2) 小岩他, SPC 長野, SPC-10-129, 2010
- (3) Pawel Szczesniak et al, EPE-PEMC 2008, P165

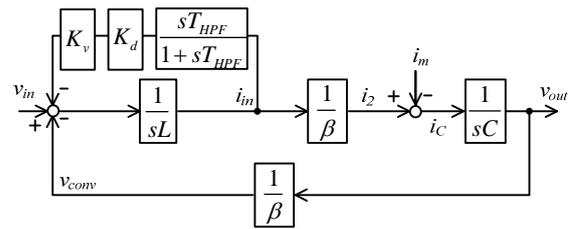


Fig. 2. Control diagram of the proposed circuit.

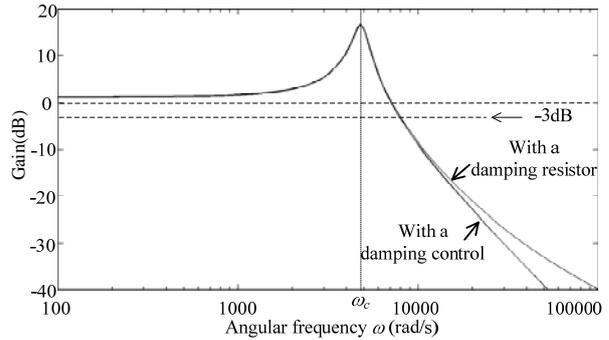


Fig. 3. Gain characteristics of the proposed circuit applied for the damping control.

Table 1. Calculation and experimental parameters.

Input voltage	115 V	LC filter	2 mH (2.2%)
Input frequency	50 Hz		13.2 μF (11.9%)
Output voltage	200 V	Boost ratio of chopper	1.15
Output frequency	40 Hz	Voltage transfer ratio of MC	0.865
Carrier frequency	10 kHz	Time constant of HPF T_{HPF}	3.18 ms
Damping gain K_d	0.018	Damping factor ζ	0.162
Converter gain K_v	164	Damping resistance	3.91 Ω

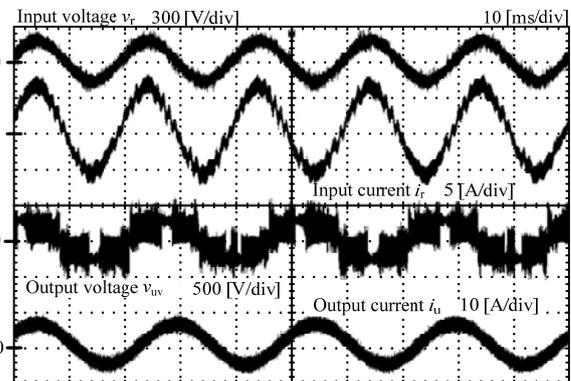


Fig. 4. Operation waveform with a damping control.

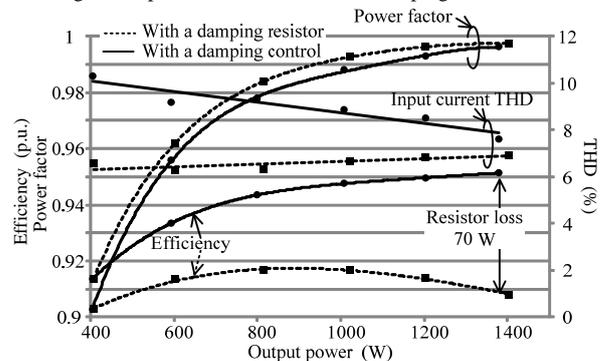


Fig. 5. The characteristics between a damping resistor and a damping control.