単相マルチレベル整流回路の遺伝的アルゴリズムを用いた高調波成分制御法

正 員 星 伸一* 正 員 大口 國臣*

Harmonic Control Scheme using Genetic Algorithm for Single-phase Multi-level Rectifiers

Nobukazu Hoshi*, Member, Kuniomi Oguchi*, Member

Harmonic control scheme using genetic algorithm (GA) for single-phase multi-level rectifiers is proposed to meet harmonic current limiting standards with minimum input filter inductance. The effectiveness of the proposed scheme was verified by experiments. As the results, switching pattern which was able to decrease about 6.3% THD of the line current more than the conventional scheme and met harmonic current limiting standard was obtained.

キーワード：マルチレベル整流回路，スイッチングパターン，遺伝的アルゴリズム

Keywords: multilevel rectifier, switching pattern, genetic algorithm (GA)

1. まえがき

単相整流回路では，小形の入力フィルタを用いて高調波電流に対する規格を満たし，更に，できるだけ損失の小さいことが要求されている。これらの要求を満たす一方式として，単相マルチレベル整流回路（図 1）を用い，スイッチング損失を低減するために，できるだけ少ないスイッチング回数で高調波規格を満たす制御方式を，著者らは先に提案した⁽¹⁾。しかし，スイッチングパターンを試行錯誤的に決めていたので，その決定に時間を要するばかりで無く，必ずしも良いパターンが得られていなかった。

そこで，本レターでは，遺伝的アルゴリズム（GA）を用いることで，パターン決定に掛かる時間を短縮し，なおかつ電流ひずみ率も抑えたスイッチングパターンを求める方法を提案し，実験によりその有効性を検証する。

2. 単相マルチレベル整流回路の高調波成分制御方式

図 2 に基本波及び 3 つの高調波を制御した場合の電源電圧 v_s ，整流回路入力電圧 v_{AB} ，双方向スイッチ S_a ， S_b のスイッチングパターンを示す。簡単のため，直流側キャパシタの電圧を $E = E_a = E_b$ とすると， n 次高調波電圧の実効値 V_{Rn} は， v_{AB} のフーリエ級数展開により，

$$V_{Rn} = \frac{2\sqrt{2}E}{n\pi} (\cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_0) \quad (n = 1, 3, \dots) \quad (1)$$

となる（偶数次は $V_{Rn} = 0$ ）。電源電圧に高調波成分が含まれていないものとする，基本波等価回路及び高調波等価

回路より，電源電流の基本波成分 I_{s1} 及び高調波成分 I_{sn} は次式で表される。

$$I_{s1} = \frac{\sqrt{V_s^2 + V_{R1}^2 - 2V_s V_{R1} \cos \delta}}{\omega L_s} \quad (2)$$

図 1 単相マルチレベル整流回路

Fig. 1. A single-phase multi-level rectifier.

図 2 高調波成分制御

Fig. 2. Harmonics control method.

* 茨城大学 工学部

〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1

Faculty of Engineering, Ibaraki University

4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi 316-8511

図3 実験結果

Fig. 3. Experimental results.

$$I_{sn} = \frac{V_{Rn}}{n\omega L_s} \quad (n = 2, 3, 4, \dots) \quad (3)$$

ただし、 ω は電源の角周波数、 V_s は電源電圧の実効値である。

文献(1)では、次式により、制御する高調波次数の整流回路入力電圧指令値 V_{Rn}^* を求め、(1)式との非線形連立方程式を解くことにより α_n の値を求めている。

$$V_{Rn}^* = \epsilon_n I_{snlim} \times n\omega L_s \quad (4)$$

ただし、 I_{snlim} は、電源電流の n 次高調波成分の規制値であり、 ϵ_n は、安全率 ($0 \leq \epsilon_n \leq 1$) である。従来、初期値を低めの値に設定し、制御していない高調波成分が規制値を越えた場合には、いずれかの次数の ϵ_n を基本的には 1 に近づけるように調整することで、試行錯誤的に値を設定していた (図 3(a) では、 $\epsilon_3 = 0.61$, $\epsilon_5 = 0.82$, $\epsilon_7 = 0.58$)。

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた高調波成分制御方式

本レターでは ϵ_n を調整するのではなく、GA を用いて (8) 式の目的関数を最小化することで、規制値を満たし、なおかつ電流のひずみ率を低く抑えることができる δ , α_0 , α_1 , α_2 , α_3 の最適値を探索し、スイッチングパターンを決定する高調波成分制御法を提案する。

(5) 式により、 $\alpha_0 \sim \alpha_3$ の大小関係及び値の範囲が拘束される。 α_n の最大値は、GA での探索効率を向上させるために、文献(1)での経験を踏まえ 45° に設定した。また、電流基本波が設定値 I_{s1nom} (本レターでは IEC61000-3-2 Class A の入力電流範囲を考慮し 16 A に設定) 近傍となる様に (6) 式の $n = 1$ の場合の式を用い、高調波が規制値を満たすように (6) 式のその他の式を用いた。更に、電源電流のひずみ率 THD_i を低減するために (7) 式を導入し、(5)~(7) 式

の和を目的関数とした (今回は $n_{max} = 100$ 次として演算)。

$$E0 = \begin{cases} 0 & \text{when } 0^\circ \leq \alpha_0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \\ & \leq \alpha_3 \leq 45^\circ \quad \dots\dots\dots (5) \\ 1000 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E1(n) = \begin{cases} \left| I_{s1nom} - \frac{\sqrt{V_s^2 + V_{R1}^2} - 2V_s V_{R1} \cos \delta}{\omega L_s} \right| \times 0.1 & \text{when } n = 1 \\ 110 & \text{when } (I_{sn} - I_{snlim}) > 0, \\ & (n = 2, 3, \dots, 40) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$E2 = THD_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Objective} = E0 + \sum_{n=1}^{n_{max}} E1(n) + E2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

4. 実験結果

実験には、100 V、50 Hz の交流電源、 $L_s = 5$ mH、 $L_d = 1$ mH、 $C_1 = C_2 = 11.2$ mF の回路素子を用いた。負荷抵抗 R_d は、電源電流の基本波成分が 16 A 近傍になるように調整して実験した。また、スイッチングパターン探索時の GA パラメータとして、個体数 100、世代数 500、2 点交叉、交叉確率 1.0、突然変異確率 0.01 を設定した。

図 3(a) は、文献(1)に示す従来法で得られたスイッチングパターン ($\alpha_0 = 15.899^\circ$, $\alpha_1 = 32.812^\circ$, $\alpha_2 = 36.601^\circ$, $\alpha_3 = 39.195^\circ$) を用いた場合であり、(b) は、提案法で得られたスイッチングパターン ($\alpha_0 = 18.535^\circ$, $\alpha_1 = 37.822^\circ$, $\alpha_2 = 39.952^\circ$, $\alpha_3 = 44.169^\circ$) を用いた場合の実験結果である。

図に示すように、提案法を用いることで、規制を満たし、電流ひずみ率を従来法より 6.3%改善できるスイッチングパターンが得られた。また、提案法では、従来法に対して 3 次高調波が 61%、7 次高調波が 55%低減されている。

提案法では Pentium 4-1.7 GHz を用いて 7 秒程度でスイッチングパターンを得ることができたが、初期集団によっては適切なスイッチングパターンが探索できない場合もあったため、初期集団の与え方などに工夫が必要である。

5. むすび

遺伝的アルゴリズムを用いた高調波成分制御方式の提案を行った。提案法で生成したスイッチングパターンを用いた実験では、規制を満たし、なおかつ電流のひずみ率を従来法より 6.3%低減することができた。この方法は、三相マルチレベル整流回路など、他の整流回路への適用も期待できる。なお、オンラインでのスイッチングパターン生成法などについては、稿を改めて報告する。

(平成 17 年 6 月 28 日受付, 平成 17 年 8 月 23 日再受付)

文 献

- (1) K. Oguchi, T. Tanaka, N. Hoshi, and T. Kubota: "A Novel Control Method for Single-Phase Slow Switching Multilevel Rectifiers", Conf. Rec. of IEEE IAS Annual Meeting 2002, pp.1966-1973 (2002)