キーワード

高調波, 無効電力補償, アクティブフィルタ

正員 竹田 正俊

三菱電機株式会社

1. まえがき

近年の電力用半導体素子の高電圧・大容量化に伴って、電力変換器容量の大容量化、高効率化が可能となり、その適用範囲は、電力系統分野や産業分野などにおいて飛躍的に増大しつつある。一方では、半導体電力変換器の普及により、高調波電流の発生量の増加という環境面での問題が無視できなくなり、これらの高調波電流により生じる電力系統の電圧歪みが同一系統に接続された機器へ与える障害が顕在化してきている。このような状況下で、高調波を抑制するためのガイドラインが設定され、機器から発生する高調波電流を抑制する事が求められている⁽¹⁾。

高調波発生量を低減するためには、小容量器においてはスイッチング周波数を上げる方法が通常とられるが、大容量器においてはスイッチング周波数を上げることにより発生損失の増大や半導体素子の利用率の低下を招くという弊害が無視できないため、スイッチング周波数の選定には慎重な考慮が必要である。

本編では、これらの状況を踏まえ、特に大容量変換器に範囲を限定して高調波対策技術を述べる。

2. 大容量器における高調波抑制対策

大容量器における代表的な高調波対策としては、次の方法が挙げられる。

(a) 機器側での対策

高調波発生源である電力変換器での対策であり、電力変換器の多パルス化やPWM化などの方策がある。

(b) 高調波フィルタでの対策

変換器から発生する高調波をフィルタで吸収する方式であり、フィルタとしてはアクティブフィルタやパッシブフィルタ(L-Cフィルタ)がある。

以下に、変換器における高調波発生メカニズムとその抑制対策について、対策事例を含めて述べる。

2.1 他励式三相ブリッジ回路での抑制方式

この回路方式は図1に示すように、大容量変換器の中で最も代表的な回路構成であり、電力系統用変換器を初め、各種産業用変換器などに数多く使用されている。

三相ブリッジ回路では、直流側の電流脈動を平滑化するために直流リアクトルが用いられており、交流側の電流はほぼ方形波となるため、転流重なり角を無視すると、交流側電流に含まれる高調波電流成分は次式で示される⁽²⁾。

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin \omega t \mp \frac{1}{5} \sin 5\omega t \pm \frac{1}{7} \sin 7\omega t - \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t \dots \right] \quad (1)$$

(注) 複号の上側は図1(a)、下側は図1(b)の場合を示す。

上式に示すように、発生高調波電流は6の倍数の前後の次数となり、その絶対値は基本波電流の $1/n$ (n は高調波次数)となる。このような三相ブリッジ回路の高調波抑制対策としては、変圧器の位相角をずらせて高調波電流を互いに相殺する多パルス化が一般に採用される。図1(c)は6パルス変換器(a)と(b)を組み合わせて12パルス変換器を構成した場合を示す。この場合の高調波成分は、

図1 6パルス変換器と交流側電流波形

Power System Harmonics Regulations and the Suppression Technologies.

IV. Suppression Technologies in Large Converter Systems

By Masatoshi Takeda, Member(Mitsubishi Electric Corporation)

優勢な高調波次数の5次と7次が相殺されて12の整数倍数の前後の次数のみとなり、高調波を抑制できる。

以上は、リアクトル平滑形変換器について述べたが、コンデンサ平滑形変換器についても多パルス化により高調波を低減する原理は同一である。

このように、多パルス化による高調波低減方策は変圧器と整流器の組み合わせでできるので、大容量器においては実用的な方策である。

2.2 サイクロコンバータ

この回路は、交流機の駆動用として大容量器で使用されており、基本的には3相ブリッジ回路の応用回路であるが、出力周波数により変調されるため、交流電源側の高調波には非整数次の側帯波が現れるのが特徴である。サイクロコンバータの高調波成分には、変換器のパルス数に依存しない特性高調波成分と、パルス数に依存する回路依存形高調波成分とがあり、三相出力サイクロコンバータでは次のような高調波成分を有する⁽³⁾。

$$\text{特性高調波成分} : f_{ch} = f_i \pm 6nf_o \quad (2)$$

$$\text{回路依存形高調波成分} : f_{H} = (kp \pm 1)f_i \pm 6mf_o \quad (3)$$

ただし、 f_i : 電源周波数 f_o : 出力周波数

p : 整流器パルス数

$n=1, 2, 3, \dots, k=1, 2, 3, \dots, m=0, 1, 2, \dots$

大容量サイクロコンバータでの高調波対策は、12パルスなどの多パルス化を行って優勢な高調波成分である回路依存形高調波成分を相殺することが基本であるが、低次に現れる側帯波成分を無視できないので、高次の高調波吸収以外に低次の高調波も吸収する必要がある。側帯波に起因する低次の高調波は、上式に示すように出力周波数 f_o に応じてその周波数が変化するため、共振周波数が固定されているパッシブフィルタでは十分な吸収が困難な場合があり、アクティブフィルタを併用した高調波補償が提案されている⁽⁴⁾。図2はサイクロコンバータの高調波抑制用にアクティブフィルタとパッシブフィルタの併用方式を適用した事例を示す。この方式では高次の高調波成分をパッシブフィルタで、また、低次の高調波成分をアクティブフィルタで吸収しており、図3に高調波電流の抑制効果を示す。

図2 サイクロコンバータの高調波対策例

(a) アクティブフィルタとハイパスフィルタが有る場合

(b) ハイパスフィルタのみの場合

図3 アクティブフィルタによる高調波抑制効果

2.3 大容量自励式変換器での抑制方策

小容量自励式変換器では、高調波発生量を低減するためにスイッチング周波数を上げる方策が通常採用されるが、大容量自励式変換器では、スイッチング周波数を上げることによる発生損失の増大や半導体素子の利用率の低下などの弊害が無視できないため、スイッチング周波数をあまり上げずに多重化を併用して高調波低減を行うのが一般的である。大容量自励式変換器における代表的な高調波抑制方策としては以下がある。

(1) 多重変圧器方式

本方式は、変圧器移相巻線を介してインバータユニットを多重接続し、合成パルス数を高くすることにより高調波を低減する方法であり、先に述べた他励式変換器における多パルス化と基本的には同一の考え方によるものである。多重変圧器方式を用いている事例として、図4に示す電力系統安定化用自励式無効電力補償装置がある⁽⁵⁾。この事例では、PWM変換器（PWMパルス数=1）で構成したユニットインバータを、移相変圧器を介して直列に多重接続して48パルス変換器を構成している。pパルス構成を行った場合に出力電圧に含有される高調波成分は、(4)式に示される成分のみとなるため、多重パルス数pが大きいほど発生高調波成分を小さくできる。

$$E_n = E_1 / n \quad (4)$$

ここで、

$$n = mp \pm 1$$

$$E_1: \text{基本波電圧}, \quad E_n: n \text{ 次高調波電圧}$$

$$p: \text{多重パルス数}, \quad m: \text{整数}(m=1, 2, 3, \dots)$$

図4の回路で、変換器接続点での総合電圧歪率を1%以下にするために必要な多重パルス数と変換器容量対系統短絡容量比（SCR）との関係を求めると図5となり、系統が弱い場合でも多重パルス数を増加させることにより高調波フィルタなしで接続可能となることがわかる。この事例では系統短絡容量=1900MVA時に80MVA容量の変換器を接続するための必要な多重パルス数として、48パルスを選定している。

また、30度の位相差を有する変圧器と2組のPWMインバータ（PWMパルス数=2）を組み合わせることで実質的に24パルス相当の高調波抑制を行っている事例も報告されている^[6]。

図4 自動式無効電力補償装置の構成

図5 多重パルス数と系統短絡容量比との関係

図6 PWMの高調波特性

（2）多パルスPWM化

多パルスPWM方式はPWM周波数を比較的高くして低次の高調波を抑制するようにした方式である。

三角波比較方式で変調した場合の3相PWMインバータにおける出力電圧波形において、

$$\text{搬送波信号の周波数} / \text{指令信号の周波数} = m$$

$$\text{指令信号の振幅} / \text{搬送信号の振幅} = K_n$$

とすると、交流出力の有力な高調波成分は、 m 、 $m \pm 2$ 、 $2m \pm 1$ 次となり、その含有率は図6に示すようになる^[7]。したがって、搬送波の周波数を上げて m を大きくすることにより低次の高調波は発生しなくなり、電源側のわずかのリアクタンスにより高調波電流を減衰させることができる。

3. あとがき

以上、大容量変換器における高調波抑制方策について述べた。半導体素子の特性改善や大容量化へ向けての開発が進み、多レベルインバータ回路やスナバエネルギー回収回路などの開発と相まって、高効率・高性能な変換器が実現されつつあり、大電力変換器の用途は一層拡大していくものと予想される。このような技術動向の下で、高調波抑制技術開発も併せて進めていく必要があり、本稿がその一助になれば幸いである。

（平成7年7月7日受付）

文 献

- 資源エネルギー庁公益事業部：「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」および「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」（平成6年）
- 高調波対策専門委員会：「電気協同研究」第46巻2号（平成2年）
- B.R.Pelly, 西条訳：「サイクロンバーク」電気書院発行（昭51）
- 竹田, 他：「アクティブフィルタを適用した高調波補償装置」三菱電機技報, Vol. 61, No. 70, 1987
- 長谷川, 竹田, 他：「系統安定化用大容量SVGの開発」電学論D, 111巻10号, 平成3年
- K.Suzuki, et.al.: "Minimum Harmonics PWM Control for a Self-commutated SVC" PCC-Yokohama, 1993
- 半導体電力変換方式調査専門委員会編：「半導体電力変換回路」電気学会発行（昭62）

竹田 正俊

（正員）1968年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。

同年4月、三菱電機株式会社へ入社。現在、神戸製作所パワーエレクトロニクス部HVDCプロジェクトマネージャ。主として、静止形無効電力補償装置、アクティブフィルタ、サイリスタパルプなどの開発・設計に従事。昭和61年、平成3年電気学会進歩賞受賞。