

パッケージエアコン用 3相アクティブコンバータ技術の開発

Development of 3-Phase Active Converter for Packaged Air Conditioners

技術本部 角 藤 清 隆*¹ 蟹 江 徹 雄*¹
エアコン製作所 佐 藤 友 孝*²

パワーエレクトロニクス機器は高調波電流を発生しやすく、この高調波による過電流により配電系統中の直列リアクトルや電力用コンデンサに、騒音・振動・焼損の傷害を発生させる可能性があり、インバータエアコンにおいても同様な問題がある。今回、従来のコンバータからアクティブコンバータに変更することで高調波電流が大きく低減され、さらにエアコンの動作条件を考慮することで、直流電圧や電流等のフィードバック回路のないオープンループ制御方式で簡単な回路構成が可能なることを見いだした。本アクティブコンバータは、シングルチップマイコンを使用した低コストな構成としながら、IEC (International Electrotechnical Commission) の高調波電流規制値を満足している。

Power electronics equipment usually generates harmonic current and the current harmonics may cause trouble with noise, vibration and burning by overcurrent in the power capacitor and in series reactor of the distribution system. The air conditioner with the inverter circuit also has the same problem. We find that harmonic current is effectively suppressed by using an active-converter in place of a conventional converter and that an open loop control method without feedback signals from direct voltage and currents can be obtained in consideration of the air conditioner's use. This active-converter can be up to the harmonic limiting standard of IEC and can be constructed at low cost by the open-loop control system using a single-chip microcomputer.

1. ま え が き

近年のパワーエレクトロニクス技術の急速な進歩に伴って半導体応用機器が普及し、これらの機器が発生する高調波電流によって配電系統の電圧ひずみが増大する傾向にある。

当社のエアコンには、半導体応用機器の中にインバータを搭載した製品が多くあり、本問題に関して深くかかわっている。

高調波は、現在、IEC (International Electrotechnical Commission) で、入力電流が16 A以下の機器を対象として規制値が定められており、日本国内でも通産省資源エネルギー庁から高調波抑制ガイドラインが通達されている。

本報では、当社製品の中で、業務用のインバータパッケージエアコンを対象とし、電源の高調波電流低減をねらった三相アクティブコンバータ技術に取組み、低コストな構成での実現と、IECの規制値をクリアする性能を達成したので報告する。

2. 高調波及び高調波規制

インバータパッケージエアコンの入力電流は、通常図1(a)に示すように正弦波に比べかなりひずんだ波形になっている。ひずんだ波形には、基本波周波数(商用50/60 Hz)以外に、基本波周波数の n 倍の周波数を持つ成分が多く含まれていると考えられ、それらをまとめて“高調波”と呼んでいる。

配電系統に流れる高調波電流によって、電力用コンデンサや直列リアクトルに過大な電流が流れ、振動・騒音や過熱が発生し、最悪時には焼損に至ることもある。

高調波規制は、上記高調波電流による障害の発生を防ぐために定められたものである。現在、最も一般的な規制は、1995年3月に発行された“IEC 1000-3-2”であり、適用範囲は16 A以下の機器を対象としている。規制レベルは機器により異なっているが、エアコンは表1(a)に示す値となっている。

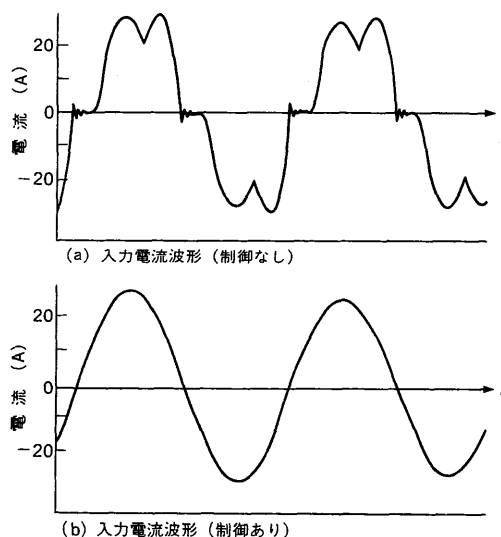


図1 入力電流波形 (a)は従来コンバータによるひずんだ電流波形、(b)はアクティブコンバータによる正弦波状の電流波形を示す。
Input current waveform

欧州では、1996年1月からEMC (Electromagnetic Compatibility) 指令により、家電品を対象とした従来規格による規制が始まっており、1997年1月からは前述の“IEC 1000-3-2”規制が開始される予定である。日本国内では、規制ではなくガイドラインとして、1995年8月に資源エネルギー庁から通達があり、表1(b)に示す値でIECの規制値より緩やかな値となっており、現在のエアコンでも合格できるレベルになっている。

今後、エアコンとしては、IECの16 A以上の機器を対象とした規制レベルや日本国内の2000年以降に見直しされる規制レベルが厳しくなる見通しなので、十分注意する必要がある。

*1 名古屋研究所制御システム研究室

*2 技術部電子制御設計課

表1 高調波規制値

Harmonic limiting standard

(a) IEC (クラス A) 高調波電流限界値

高調波次数 n	最大許容高調波電流 $A \times (230/V_{nom})^*$
奇数高調波	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times (15/n)$
偶数高調波	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times (8/n)$

(b) 国内ガイドライン (暫定期間中) 高調波電流限界値

高調波次数 n	600 W を超えるエアコンデション及び 電子計算機の最大許容高調波電流 $A \times (230/V_{nom})^*$
奇数高調波 (有効入力電力 W)	
3	$2.30 + 0.00283 (W - 600)$
5	$1.14 + 0.00108 (W - 600)$
7	$0.77 + 0.00083 (W - 600)$
9	$0.40 + 0.00033 (W - 600)$
11	$0.33 + 0.00025 (W - 600)$
13	$0.21 + 0.00022 (W - 600)$
$15 \leq n \leq 39$	$\{0.15 + 0.00020 (W - 600)\} \times (15/n)$
偶数高調波 (有効入力電力 W)	
2	$1.08 + 0.00033 (W - 600)$
4	$0.43 + 0.00017 (W - 600)$
6	$0.30 + 0.00012 (W - 600)$
$8 \leq n \leq 40$	$\{0.23 + 0.00009 (W - 600)\} \times (8/n)$

*: 限度値として, 「表の中の値 $\times (230/V_{nom})$ 」の計算値は, 機器の定格電圧 (V_{nom}) が 220, 230, 240 V の電源系統以外の電圧の場合に適用する (ただし, 220, 230, 240 V の電源系統の場合は, $V_{nom} = 230$ V 一定とする)

3. コンバータシステム

3.1 コンバータ回路

エアコンのコンバータ回路は, 室外機コントローラ内にあり交流/直流変換により, インバータ回路に直流電源を供給する部分である。

従来の三相コンバータ回路は, 図2 (a)に示すようにブリッジ型 (上下に素子を1個ずつ配置されたものを1アームと呼び, 3相分で計3アームで構成されたもの) の整流素子と平滑コンデンサ等から構成され, いわゆるコンデンサインプット形入力回路と呼ばれるものである。電源電圧が平滑コンデンサの両端電圧以上のときのみ, 電流がパルス状に整流素子から平滑コンデンサ及び負荷へ流れ込む回路動作となり, 高調波電流成分が多く含まれる原因となる。

これに対し今回述べる三相アクティブコンバータ回路は, 図2 (b)に示すように, 基本構成として, 整流素子に並列にスイッチング素子を配列したブリッジ型の回路で, 電源とブリッジ構成回路との間に各相ごとにリアクトルを配置したものとなっている。ここで, スwitchング素子を動作させることにより積極的に入力電流の制御を行うので, アクティブコンバータと称している。回路動作の一例を以下に示す。

U相下アームのスイッチング素子 (以下 SW 素子と略す) T_{U-} が

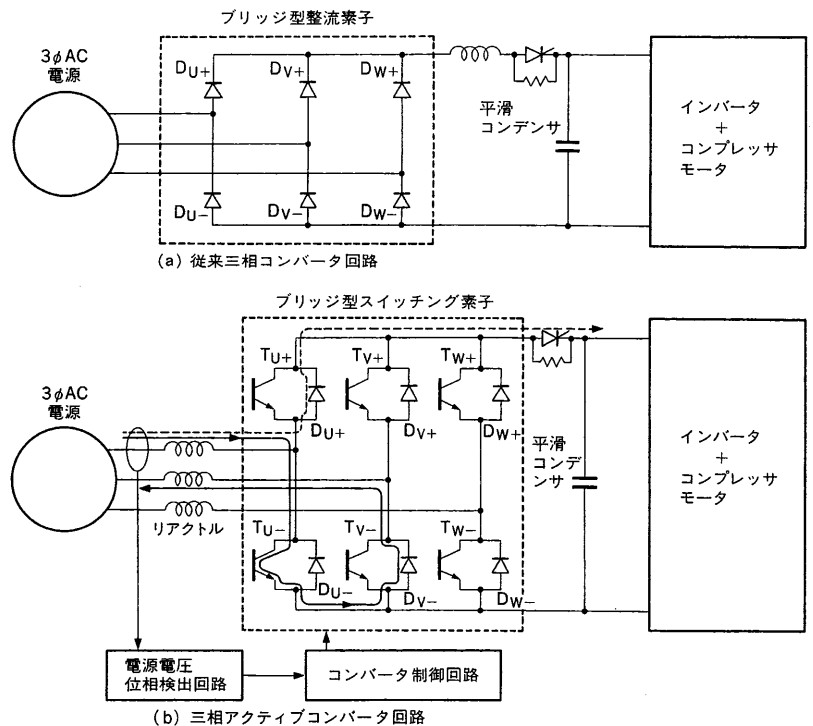


図2 コンバータ回路概略図

(a)は従来の三相コンバータ回路, (b)は三相アクティブコンバータ回路を示す。
Configuration of converter circuit

オンした場合,

電源 → U相リアクトル → SW 素子 T_{U-} → V (または W) 相下アームの整流素子 D_{V-} (D_{W-}) → V 相 (W 相) リアクトル → 電源

の短絡ループで増加方向の電流が流れ, リアクトルにエネルギーが蓄積される [図2 (b) “→” 参照]。

次に U 相 SW 素子の下アーム T_{U-} がオフ (T_{U+} がオン) した場合リアクトルに蓄えられたエネルギーにより誘導起電力が発生して,

電源 → U相リアクトル → U相上アーム整流素子 D_{U+} → 平滑コンデンサ → インバータ負荷

と電流が流れ, エネルギーが放出される [図2 (b) “→” 参照]。

このようにして, SW 素子を 10 kHz 前後のキャリア周波数で PWM 制御して, 入力電流の制御を行っている。

従来, 入力電流を正弦波状にする制御法としては, 制御システムの多くが, 電源電圧に同期した電流基準信号を発生させこれに回路電流が一致するように PWM 制御を行う電流瞬時値制御手法や, 有効電力・無効電力のベクトル演算により PWM 電圧指令を与える方式であった⁽¹⁾。これらは, 直流電圧や電流の検出によりフィードバック制御回路を構成しており, 位置, 速度等に対する高速・高精度な制御に対応している。

しかしエアコンにおいては, コンプレッサモータの回転数制御が必要だけであり, コンバータとしては, 高調波規制を満足するシステムで, できるだけシンプル・低コストな構成のものが必要となる。

今回述べる三相アクティブコンバータ回路は, エアコン専用としてコンバータの運転範囲を考慮することで, 直流電圧や電流等のフィードバック回路を持たないオープンループ制御方式により正弦波状入力電流が得られることが分かった。この方法では, コンバータの SW 素子のオン・オフ信号となる PWM 波形の位相の

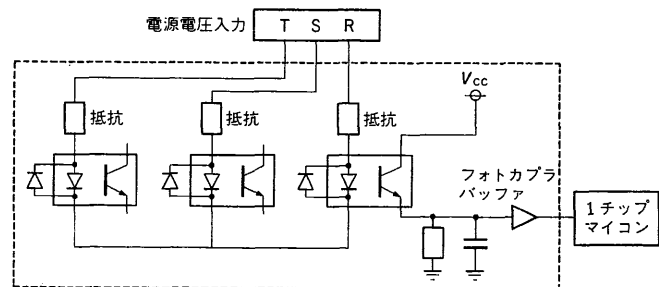


図3 電圧位相検出回路 電源電圧ゼロクロス信号の検出回路を示す。
Voltage phase detector

みを制御するものである。PWM 波形は、正弦波・三角波比較法により生成しており、位相は電源電圧のゼロクロス信号を検出する位相検出回路の出力に同期させる。検出回路としては、電源電圧のゼロクロス信号を検出する位相検出回路のみである。また、コンバータ制御回路はシングルチップマイコンを使用し、PWM 波形生成と位相の同期制御を行っている。

3.2 電圧位相検出回路

電圧位相検出回路は、図3に示すようなシンプルな構成としている。これは、電源とリアクトルとの間から取出した入力電圧を各相ごと抵抗を介してY結線して中性点を作成し、この中性点と抵抗との間にフォトカプラの入力側を直列に接続した回路である。このフォトカプラの出力を直接、電圧ゼロクロス信号として、シングルチップマイコンに割込み信号として入力している。

電圧ゼロクロスのためのレベル比較部は、コンパレータ等のICを使用せずフォトカプラのみで構成している。

ただし、フォトカプラの特性により、電源ゼロクロス信号出力と実際のゼロクロスとの間に時間差が生じる場合には、あらかじめこの時間差を算出しておき、マイコンのソフト上で、PWM 波形の出力位相に補正を加えている。

4. コンバータ制御

4.1 制御原理

図4に、アクティブコンバータの基本回路構成を示す。簡略化のため、三相回路は相電圧で考え、図4(a)のように1相分の単相回路で説明する。

ここで、電源電圧ベクトルを E_a 、入力電流ベクトルを I_a 、SW 素子への入力電圧を E_c （ここでは、PWM 制御電圧ベクトルと呼ぶ）、リアクトルの L 分、 R 分の電圧ベクトルをそれぞれ E_{LL} 、 E_{LR} とすると、図4(b)に示すように、基本波成分では次のベクトル式が成り立つ。

$$E_a = E_c + E_{LR} + E_{LL}$$

電源電圧 E_a に対して、リアクトルには E_{LL} 、 E_{LR} の合成分の電圧 E_L が発生し、 E_{LL} より 90° 遅れの入力電流 I_a が力率角 α で流れることになる。

4.2 アクティブコンバータ制御

正弦波状の電流波形は、3.1節で述べたような PWM 波形で実現されるが、コンバータとしては、高効率であることが望ましい。そのためには、図4のベクトル図で、電源電圧と PWM 制御電圧の位相差 ϕ を制御して、入力力率がほぼ1となるようにしてやればよい。

本アクティブコンバータでは、位相補正角 ϕ を一定に設定しているが、エアコンの動作条件内では、以下の実験結果に示すように入力力率はほぼ99%以上が得られている。

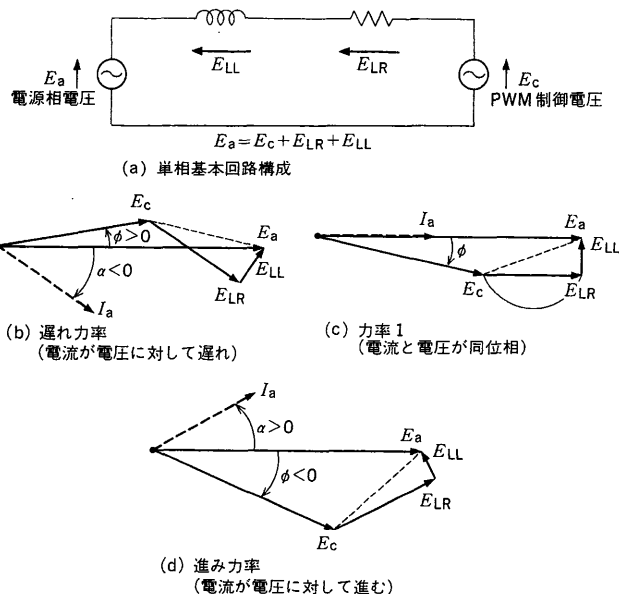


図4 アクティブコンバータ基本構成 (a)に単相基本回路構成を示し、(b)~(d)に動作ベクトル図を示す。

(a) Simplified equivalent circuit of 1-phase active-converter
(b) (c) (d) Phasor diagrams of active converter

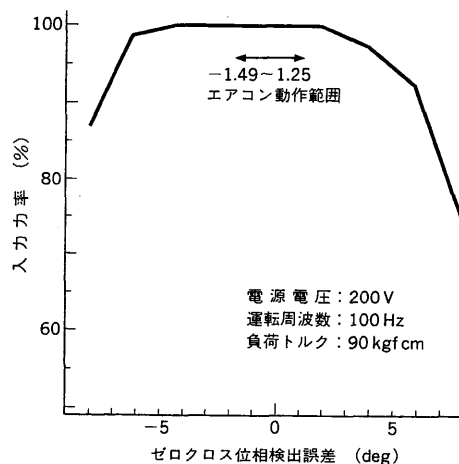


図5 入力力率特性 位相検出誤差に対する入力力率特性を示す。
Power factor vs. phase error

図5に、電圧ゼロクロス信号の検出誤差に対する入力力率特性を示す。

電圧ゼロクロス信号の検出誤差は、次の①~③の要因によるもので、エアコンの動作範囲内では、 $-1.49 \sim 1.25 \text{ deg}$ の範囲にある。そのため、図5に示すようにオープンループ制御でも高効率なコンバータが実現されている。

- ① 電源電圧変動 (AC 200 V $\pm 10\%$) (実験により信号検出)
- ② 周囲温度変動 ($-20 \sim 60^\circ\text{C}$) (の時間差を測定)
- ③ フォトカプラ電流伝達率のばらつき (カタログから算出)

位相補正角 ϕ は、あらかじめエアコンの定格負荷ポイントで電源電圧と入力電流とがほぼ同位相になるように設定しておき、マイコンの出力位相は電圧ゼロクロス信号ごとに同期を取っている。

電圧ゼロクロス信号は、1相分のみをゼロクロス信号として入力しているが、他の2相に関しては、この検出されている1相分の信号より $\pm 120^\circ$ 分だけソフト上でずらして、PWM 波形の位相をセットしている。

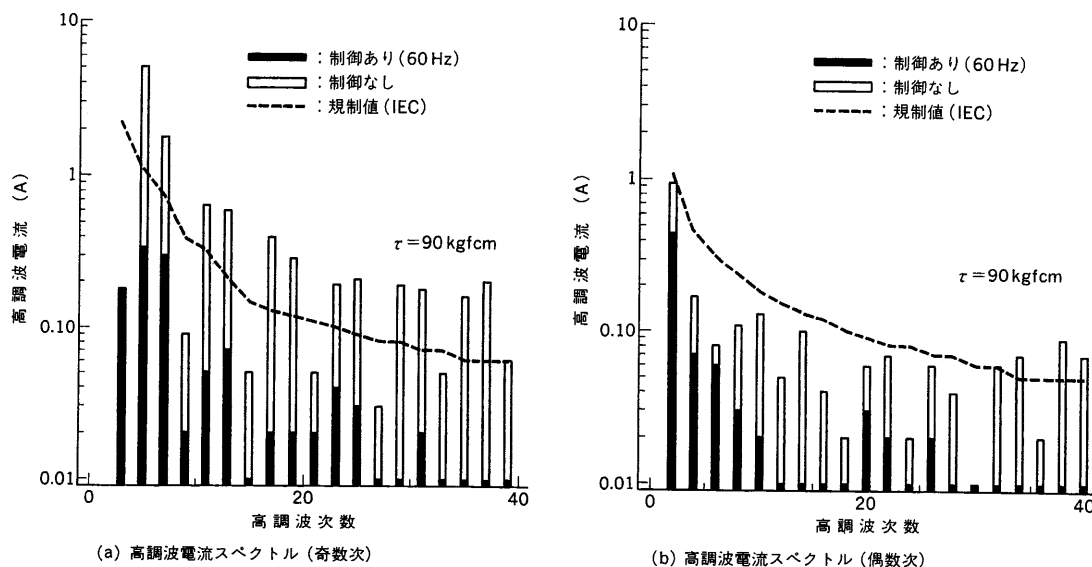


図6 高調波低減結果 アクティブコンバータ制御による高調波低減効果を示す。
Suppressing harmonics effect by active-converter control

ところで、アクティブコンバータの信頼性確保のためには、パワー素子の耐電圧制限及び負荷に対する電圧変動抑制の点から直流電圧の抑制が必要になる。アクティブコンバータ制御では、直流電圧は波形変調率とほぼ逆比例関係にあり、波形変調率が小さいほど高い直流電圧が得られる⁽²⁾。そのため、波形変調率はできるだけ大きな値、すなわち1に近い値（ただし、デッドタイムの影響の出ない範囲内）に設定している。

5. コンバータ特性試験結果

図6に、本アクティブコンバータを、定格冷凍能力16000Wクラスのエアコンに相当する（インバータ+モータ）負荷で運転した場合の高調波低減効果を示す（入力電流は約20A）。

高調波電流スペクトルは、IECの高調波規制値（2～40次）が奇数次と偶数次とで基準が異なるので、それぞれ図6(a)、(b)に分けて示す。制御なしの場合には、特に奇数次においては規制値を大きく超えているのに対し、制御ありの場合には、全範囲で規制値を十分にクリアしていることが分かる。

また、入力電流波形は図1(b)に示したように、アクティブコンバータ制御を行うことで、パルス状のひずみ波形から正弦波状に改善されている。

6. ま と め

従来、インバータエアコンには、コンデンサインプット形の整流回路が用いられ、入力電流はパルス状のひずみ波形で高調波を

多く含んだものになっており、国内外の高調波規制に対応する必要があった。

また、入力電流を正弦波化し高調波を抑制する手法としては、これまで電流の瞬時値制御PWM方式等のコンバータで、直流電圧や電流のフィードバックを必要とする回路構成・制御方式が一般的であったため、エアコンに適したシンプル構成とはいえなかった⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

しかし、本報で述べた3相アクティブコンバータ技術は、エアコンの運転条件を考慮した専用設計とすることによりシンプルで低コストな構成にすることができ、IECの高調波規制（2～40次）をすべてクリアして入力力率を改善している。

本技術を、今後のパッケージエアコンに搭載すべく製品の開発を進めていく計画である。

参 考 文 献

- (1) 竹下, 岩崎, 松井, 三相PWMコンバータのパラメータ変更を考慮した電流制御法, 電気学会論文誌D 107, 1339 (1987-11)
- (2) 大西, 力率制御方式三相電圧形PWM制御電力変換装置, 電気学会論文誌D 110 No.7 (1990) p.821
- (3) 川瀬, 中岡ほか, 瞬時空間電圧ベクトル理論を応用した三相PWMコンバータの制御, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-90-73, 57
- (4) 戸塚, 小笠原, 赤木, 難波江, 瞬時電力フィードバックを有する電圧形PWMコンバータ, インバータシステム, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-90-14, 29