

インバータエアコンも20年の歴史となったが、最近の注目点は環境をキーワードにした“省エネ”と“EMC^(注1)規制”である。当社は、最新のパワーエレクトロニクス技術を駆使したエアコンを開発し、その省エネルギー（以下、省エネと略記）性が大きく評価され、“大清快TMシリーズ”は史上初の2年連続の通商産業大臣賞の荣誉に輝いた。このエアコンは、当社独自のハイブリッド方式により高効率・高力率を実現し、また、新冷媒採用による環境特性の改善をした。更には、エアコン用インバータを応用した最新の汎用ドライバ IPDUTM (Intelligent Power Drive Unit) を開発し、販売を開始した。

Although inverter type air conditioners have been on the market for some 20 years now, the issues of energy saving and electromagnetic compatibility (EMC) restrictions are currently attracting attention. Toshiba has been developing air conditioners utilizing the latest power electronics know-how, and the energy-saving characteristics of these products are highly evaluated. For example, the “Daiseikai” series has been awarded the Minister of International Trade and Industry Prize for the past two years.

These products are developed with original Toshiba technologies. They are highly efficient while at the same time gentle to the environment, due to the new type of refrigerant gas used as well as our development of IPDUTM.

1 まえがき

インバータエアコンは、1980年に当社が業務用エアコンとして市場に出して以来、その省エネ性が認められ、今では家庭用エアコンの約90%にインバータが搭載されるまでに至っている。これは、半導体素子技術や制御技術に代表されるパワーエレクトロニクス技術の進歩によるところが大きい。

ここでは、インバータエアコンの動向とパワーエレクトロニクス技術がエアコンにどのように寄与しているか、その技術について述べる。また、このインバータの最新技術を織り込んだ組込み型汎用ドライバIPDUTMの概要についても述べる。

2 環境とエアコン

2.1 エアコン製品の環境技術

現在、エアコン製品の開発で一番重要なことは、環境に配慮した技術開発である。エアコンは現在、家庭内の消費電力量の約20%を占めるまでになっており、家庭用電気製品の中では消費電力量がトップである。このため、地球温暖化防止の観点から、その消費電力を低減することは大変重要であり社会の要望でもある。

また、従来のエアコンの冷媒であるフロンガス(R22)はオゾン層を破壊する度合いが大きく、このオゾン層を保護するための新冷媒(R410A)への切替えが急務である。

上記を含め環境に適合していくための開発項目は次のと

おりである。

- (1) 省エネ 省エネ法で2003年10月までに対応
- (2) 新冷媒対応 R22からR410Aへ切替え
- (3) 電源高調波 電力環境の改善
- (4) リサイクル 2001年から実施の家電リサイクル法適合化
- (5) 待機電力低減 機器停止中の消費電力の低減
- (6) 鉛フリー化 PC板はんだの鉛フリー化

ここでは、上記(1)～(3)の環境対応とパワーエレクトロニクス技術との関係について述べる。

2.2 エアコンの省エネ指標“COP”とは

インバータエアコンが発売されて以来、エアコンの技術開発は省エネ技術の開発と言っても過言ではない。ここでは、エアコンの省エネについて述べるために、その指標となるCOP(Coefficient Of Performance: エネルギー消費効率)について説明する。

一般的にエアコンは、ヒートポンプ技術を応用しているものがほとんどである。周知のように自然界では、水が高い所から低い所へ流れるように、熱は温度の高い所から低い所へ流れようとする。この流れを逆にするためには、水の場合はポンプが必要になる。熱の場合、このポンプの役目を果たすのがヒートポンプとなる。これを構成する主要な部品はコンプレッサ(圧縮機)と熱交換器である。インバータはこのコンプレッサの回転数をその必要能力に応じて可変するために用いられている。このヒートポンプは次に示す指標“COP”で性能を表す。

(注1) Electro Magnetic Compatibility (電磁環境適合性)

$COP = \text{エアコン出力能力 (W)} / \text{入力電力 (W)}$

ヒータによる電気ストーブやホットカーペットの場合は、出力能力と入力電力は等しいため、 $COP=1$ となる。これがヒートポンプであるエアコンの場合、部屋の外の熱エネルギーを汲み上げるため、入力電力以上の能力が得られる。最近の製品ではこの値が $COP=5$ を超える商品が出はじめており、これは、例えば入力が1kWのとき、エアコンは5kWの能力を出せることを意味し、消費電力以上の熱エネルギーが得られることを意味する。このことから、最近では、ヒートポンプ暖房が二酸化炭素(CO_2)の低減に有益であることから、フランスでは効率の良いヒートポンプには補助金を出す制度を検討中である。

当社のエアコンにおける定格消費電力とCOPの推移を図1に示す。これを見ると、年々COPが向上することにより冷房と暖房定格時の入力電力が大幅に低減していることがわかる。93年の消費電力が低下しているのは、主にコンプレッサモータを従来のインダクションモータから永久磁石を使ったブラシレスDC(直流)モータを採用したことが大きく寄与している。ブラシレスDCモータはインダクションモータと比較して、運転周波数の低い領域で特に高効率であるため、年間を通した期間消費電力をほぼ半減することが可能となり、画期的な商品となった。更に、98年には環境対応でエアコンの冷媒をR22からオゾン層を破壊しない新冷媒のR410Aに切り替えたことにより、大幅なCOPの向上が達成されている。

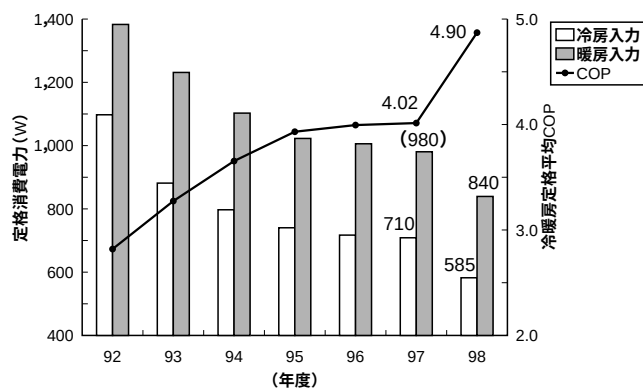


図1. エアコンの消費電力とCOPの推移 (2.8kWクラス) COPの向上などで、消費電力が大幅に低減している。
Trends in power dissipation and coefficient of performance (COP) of air conditioners

このような状況のなかで、改正省エネ法に“トップランナー方式”が採用された。これは、2004冷凍年度(2003年の10月から2004年の9月)までに、99冷凍年度の市場エアコン製品の最高COPの値を、全製品の最低限度値(加重平均値)と

するものである。これは“1997年度比で63%の消費電力削減”をすることに相当しており、業界にとっては大変ハードルの高い値となっている。この達成値は世界の中で比較しても約2倍以上の高効率を要求した内容であり、いかにハードルが高いかがわかる。省エネトップランナーの基準値を表1に示す。

表1. 省エネトップランナー基準冷暖房平均COP

Average COP of energy-saving top runner standard inverter air conditioners

エアコン能力クラス	基準COP
2.2~2.5 (kW)	5.27
2.8~3.2 (kW)	4.90
3.6~4.0 (kW)	3.65

3 エアコン用インバータ技術動向

3.1 高力率化(電源高調波低減)⁽¹⁾

一般にインバータなどの整流回路を含む機器は、高調波電流を発生することがあり、これにより電源電圧ひずみなどを引き起こし、他の機器へ障害を与えることがある。このため、94年9月に、“家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン”が通商産業省公報に通達された。インバータエアコンは既に、リアクトルとコンデンサによる“パッシブフィルタ回路”でこの高調波を低減する対応がされていたが、エアコン各社ではこのガイドライン導入をきっかけに、高調波をより低減する回路の導入が活発化してきた。

高調波を低減することは、結果的に入力力率を改善することにもつながる。入力力率が改善されれば、エアコンとしてはコンセント容量で制限される最大電流(国内の場合20A)の範囲で最大有効電力を大きくすることが可能となり、結果として暖房最大性能を引き上げられることになる。

多くのメーカーが、スイッチング素子で高速にON/OFFするアクティブフィルタ方式を採用し、高調波低減と力率を改善する制御を高級機種で採用を始めてきた。このアクティブフィルタ方式は広い範囲にわたって100%近い電源力率が得られるため、当社もアクティブフィルタ方式を15年程前から研究をしていたが、以下の技術課題を克服することが重要であった。

- (1) 回路構成上、トランジスタのスイッチングを5~20kHzで行うため、スイッチング損失による変換効率の低下を伴う。更に、その放熱のためのフィンが大型化する。
- (2) 上記高速スイッチングに伴いラジオ周波数帯のノイズ発生量が増大し、これを抑制するための電磁妨害(EMI)対応部品がコストアップし、大型化する。

- (3) 高速スイッチングでリアクトル容量は小型になるが、逆に鉄損が増大するため、高周波損失の少ない高価な鉄心が必要になる。

これに対して、当社では図2に示す部分スイッチング方式を開発した。これは、整流する前のAC(交流)側にACスイッチを1個配し、ACの半サイクルに1回のスイッチングを行う方式である。パッシブフィルタ方式の高効率でローエミッションである利点と、アクティブフィルタ方式の高力率である利点を合わせ持ったトータルバランスの良い回路となっている。また、簡単な回路方式なため低コストでありながら最大力率99%が得られる。パッシブフィルタ方式では、電源電圧波形のゼロクロスから一定期間電流が流れない無通電期間を生ずるが、この回路では電源電圧波形のゼロクロスからACスイッチ回路を一定時間ONし、リアクトルに強制的に電流を流すことにより入力電流の通電角が広がり、力率を改善することができる。

更に、部分スイッチング方式は、昇圧機能もあるため100V電源機種と200V電源機種で、DC回路からインバータ出力段までは共通化できる。この方式は、民生用機器に幅広く応用できる方式と考えられる。

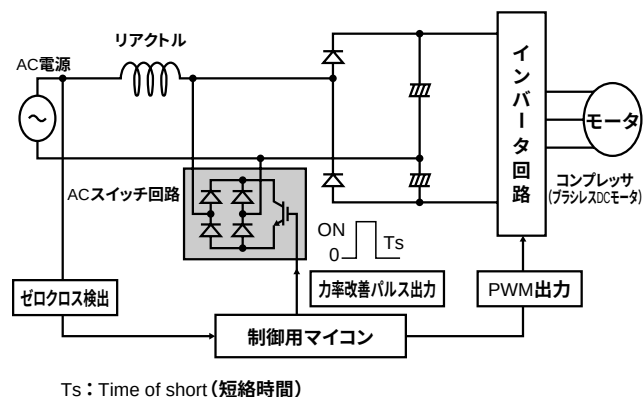


図2. 部分スイッチング方式の回路構成 ACスイッチ回路のタイミング信号はAC電源から得て、制御用マイコンに入力している。
Configuration of partial switching system circuit

3.2 リアクトル騒音低減方法

部分スイッチング方式では、パッシブフィルタ方式と同じ安価なケイ素鋼板のリアクトルを採用できるのも、大きなメリットである。しかし、部分スイッチング方式で交流スイッチをOFFした際、リアクトル電流が急変し、リアクトルギャップの吸引力も急変することでインパクト的な加振力が加わる。この瞬間、リアクトルはその固有振動数(f_c)で自由振動を起し可聴帯の大きな騒音が発生する。実用化にはこの騒音低減が必要になる。

そこで、当社では、リアクトル振動を電氣的に打ち消す方

法を開発した。これは、リアクトルの騒音がその固有振動から発生していることに着目し、力率改善パルスを終了した直後の固有振動位相から120°ずつ位相差を持たせるような細いパルスを発生させるようにする。このようにすることで、ちょうど三相交流の総和が“ゼロ(0)”であるのと同じように固有振動を抑制することができる。こうして、リアクトルの振動を根本から抑制することが可能となった。

当社インバータエアコンに、この振動低減制御を適用した場合の騒音特性測定結果を図3に示す。騒音低減パルスを付加することにより、リアクトルの固有振動数 f_c 近傍の騒音が約16dB低減することがわかる。

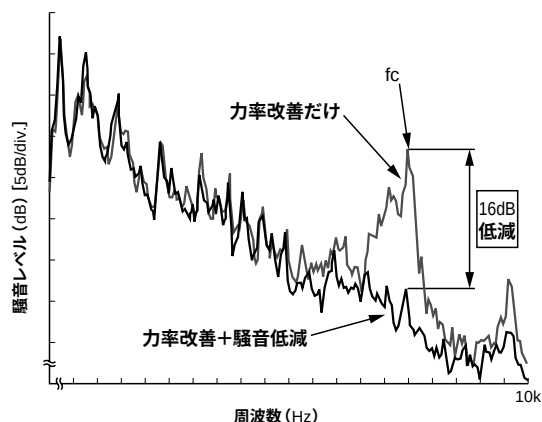


図3. リアクトルの騒音低減結果 リアクトルの騒音を低減させる制御を適用し、リアクトルの固有振動数 f_c 近傍の騒音が約16dB低減する。
Results of reactor noise reduction measures

3.3 コンプレッサからの漏れ電流低減⁽²⁾

インバータエアコン用のコンプレッサモータは、冷媒中に配置されている。冷媒は、誘電率を持つことから、通常のモータと比較して高周波のコモンモードのインピーダンスが低い。このため、コンプレッサモータをインバータで駆動すると、インバータのPWM(Pulse Width Modulation)出力に同期してモータ巻線とケース間に高周波の漏れ電流が流れる。この漏れ電流は、人体への安全を確保するためインバータエアコンの場合、電気用品取締法で1mA以下に規制されている。

しかし、オゾン層を破壊しないR410Aを採用すると、従来のR22に比較して比誘電率が増加し、漏れ電流も増加する。このため、コンプレッサからの漏れ電流を大幅に低減する漏れ電流補償回路を開発し、量産に採用した。

漏れ電流補償回路の構成と動作原理を図4に示す。補償回路は、コモンモード電流センサ(CT)、トランジスタ(Tr_1 , Tr_2)、コンデンサ(C_b)で構成される。コンプレッサからの漏れ電流 I_L をCTで検出し、トランジスタをスイッチングすること

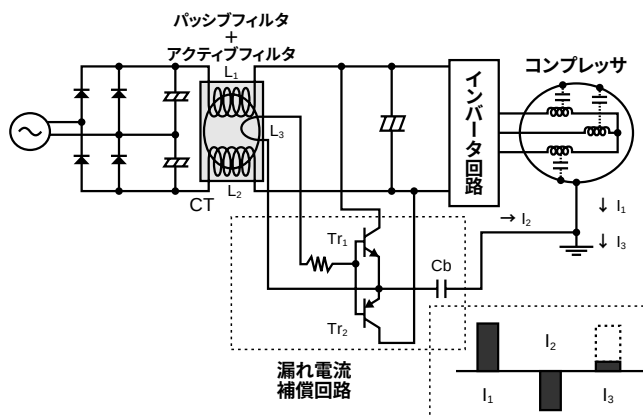


図4. 漏れ電流補償回路の構成 漏れ電流補償回路は、整流されたDC回路に接続される。
Configuration of leakage current compensation circuit

で漏れ電流 I_1 を打ち消すような補償電流 I_2 を流す。これにより、アースに流れる電流 I_3 を大幅に低減させることができる。

コンプレッサからの漏れ電流測定結果の実測値を表2に示す。補償回路を動作させることで、コンプレッサからの漏れ電流はほぼ“0”にすることが可能になった。

また、漏れ電流補償回路は、高周波のコモンモード電流を低減することから、コモンモードノイズが低減し、雑音端子電圧(ラジオ帯ノイズ)が低減される。これは、外部への機器に対して電磁環境を改善するものである。

表2. 漏れ電流測定結果
Results of leakage current measurements

補償回路	なし	あり
コンプレッサからの漏れ電流 (mA)	0.4	0.05

3.4 コンプレッサモータ(ブラシレスDCモータ)⁽³⁾

当社分布巻きモータ(従来)と集中巻きモータ(新開発)の構造を図5に示す。

分布巻きモータは、ステータが24スロットあり、ロータは4極のIPM (Interior Permanent Magnet: 埋込み永久磁石) 構造で、四つのフェライト磁石が逆円弧に配置されている。

集中巻きモータは、ステータが6スロットあり、ロータは従来と同様のIPM構造であるが、6スロットステータに対して最適な形状になっている。ステータ巻線は、ステータティースにボビンと呼ばれる絶縁物を介して直接コイルを巻きつけている。そのため、ステータコア端面をわたるコイルを非常に少なくできるため、従来モータに対して巻線の使用量を約35%低減でき、省資源とコスト低減に寄与することができる。また、コイルエンドの周長を短縮し、太い電線を高密度に巻き付けることにより、巻線抵抗を分布巻きモータに対して約

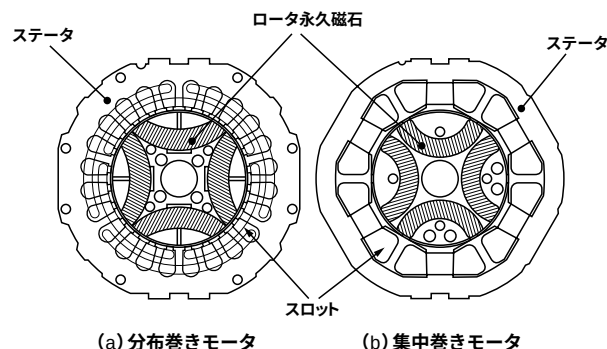


図5. コンプレッサモータの構造比較 新開発の集中巻きモータは従来の分布巻きモータに比べて、ステータティースにボビンを介してステータ巻線を直接巻き付けている。そのため、巻線の使用量を低減できる。
Comparison of compressor motor structures

40%低減できたことで、銅損が大幅に低減している。

実使用運転条件時の各回転数における総合効率(モータ効率×インバータ効率)を図6に示す。参考として、92年までメインに使用していたインダクションモータのデータも示している。インダクションモータに比べ、ブラシレスDCモータの効率が圧倒的に高いことがわかる。エアコンは、安定運転時に低い周波数で運転されることが多く、運転周波数が低い領域で効率の良いDCブラシレスモータは、インダクションモータに比べ消費電力量が大幅に低減される。

更に、分布巻きモータに対して集中巻きモータは全運転領域で効率が上昇しているが、これは上述した銅損の効率改善効果である。

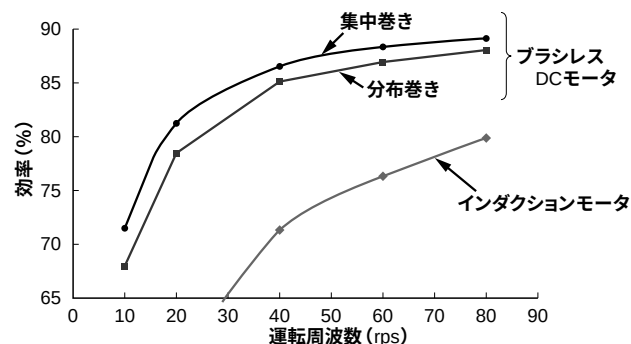
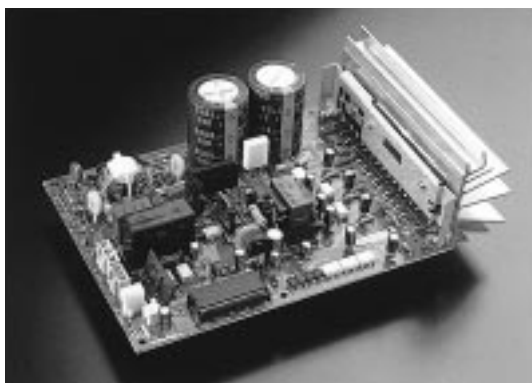


図6. 総合効率比較(インバータ効率×モータ効率) インダクションモータに比べ、ブラシレスDCモータの効率が圧倒的に高く、また、分布巻きモータに対して、集中巻きモータは全運転領域で効率が上昇している。
Comparison of overall efficiency (Inverter efficiency x Motor efficiency)

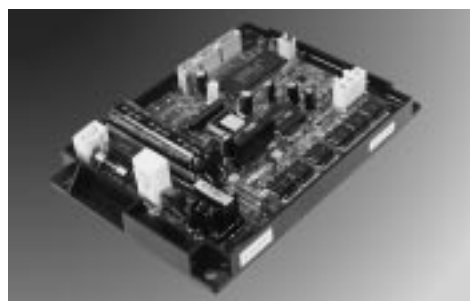
4 汎用ドライバ IPDU_{TM}

以上のようにエアコンは、最新のパワーエレクトロニクス

技術により“環境”との調和性に優れたインバータを開発してきた。機能をある程度限定することで、民生機器として培った低コストで高信頼を持つインバータ技術を、エアコン以外の用途にも提供できると考え、このインバータ部分の販売を開始した。図7(a)は、当社が販売を開始した2.5kWタイプのIPDUTMであり、図7(b)は冷蔵庫用IPDUTMである。IPDUTMは、ブラシレスDCモータを最適に運転することはもちろん、通信機能、保護機能、電源供給機能、高調波低減機能など、エアコンで使用している機能はすべて織り込まれている。



(a) エアコン用2.5kWクラスIPDUTM



(b) 冷蔵庫用IPDUTM

図7. IPDUTM IPDUTMは、ブラシレスDCモータの最適運転ができることはもちろん、通信・保護・電源供給・高調波低減機能など、すべて織り込まれている。

IPDUTM

ユーザーとのコミュニケーションはUART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) を介して行われる。このコミュニケーション内容は、すべてユーザーに開放しているため、ユーザーは様々なパラメータをチューニングすることも可能である。図8のように、開発支援のためパソコン(PC)との接続も容易で、RS-232Cポートと接続し、運

- ・ PCによる運転指令
- ・ 動作状況モニタ機能
- ・ データ保存機能



図8. IPDUTM開発システム IPDUTMの開発システムが、PCからアダプタを介して簡単に接続できる環境になっている。

IPDUTM development system

転周波数指令、運転状態のモニタ機能、運転履歴などが表示可能になっている。

ラインアップとしては、現在エアコン用、冷蔵庫用を含めて12機種(単相100V、単相三相200V、単相230V)をそろえている。現在、数多くの問合せ、及びエアコン以外の用途からも引合いをいただいている状況である。

5 あとがき

当社エアコン用インバータは、常に最新のパワーエレクトロニクス技術を導入して、業界をリードしてきた。また、約20年の歴史を持ち、大量生産により高信頼性と低コストを実現してきている。当社は、高効率なヒートポンプのエアコンとともにIPDUTMで地球規模の省エネを実現させ、地球環境へ貢献できることを願っている。

謝 辞

漏れ電流補償回路は、長岡技術科学大学の高橋勲教授の研究成果で実現できました。ここに深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 植杉通可, ほか. 力率改善型エアコン用単相倍電圧コンバータ回路. 電気学会論文誌D. **119-D**, 5, 1999, p.592-598.
- (2) Takahashi, I; Ogata, A. “Active EMI Filter for switching noise of high frequency Inverters”. in proceedings of the joint conf. of PCC-Nagaoka. **1**, 1997, p.331-334.
- (3) 金澤秀俊. “低損失・低ノイズ・低コストを実現したエアコン用高力率インバータの開発”. JMA99モータ技術シンポジウムセッションB-2: (社)日本電機率協会編. 東京, 1999-04, p.B2-1-1-B2-1-11.



蛭間 淳之 HIRUMA Atsuyuki

東芝キャリア(株) エレクトロニクス開発部参事。エアコン用インバータの開発・設計に従事。電気学会会員。
Toshiba Carrier Corp.