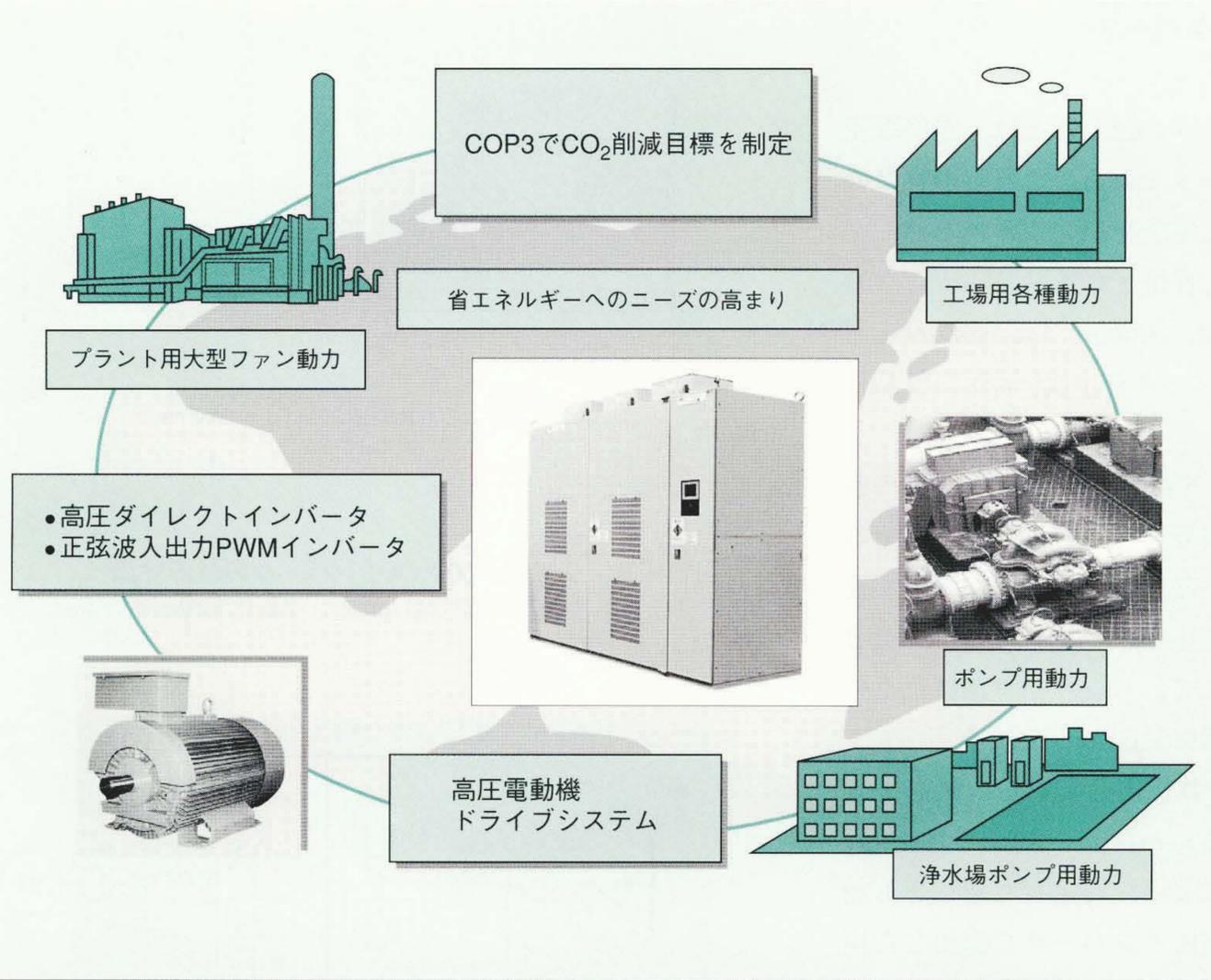


# 省エネルギー追求型の可変速ドライブシステム

Motor Drive Systems for Energy Saving

梶山 繁 Shigeru Sugiyama  
嶋田 恵三 Keizô Shimada

守永大策 Daisaku Morinaga  
門三野洋二 Yôji Monzono



注：略語説明  
COP3 (1997年地球温暖化防止京都会議)  
PWM (Pulse Width Modulation)

省エネルギーに対応するさまざまなドライブシステム  
COP3でのCO<sub>2</sub>削減目標の制定により、省エネルギーへのニーズが高まっている。中でも、インバータドライブシステムによる交流電動機の可変速駆動が脚光を浴びている。

COP3(地球温暖化防止京都会議)でCO<sub>2</sub>削減目標が決定され、各業界で省エネルギーを図る動きが活発化している。特に、工場やプラントでは電機的動力が大きなエネルギー消費源になっており、その削減がポイントである。電動機の動力削減には「機械的方法」と「電気的方法」があるが、インバータ技術の進歩により、近年、一定速度運転の交流電動機を可変速運転する「電気的方法」が主流になってきている。パワーエレクトロニクスの著しい発展により、インバータ技術は、従来の低圧電動機駆動から、最近では高圧電動機駆動に及んでいる。今後、この傾向はさらに大容量化へと発展していくものと考えられる。

日立製作所は、パワーエレクトロニクスの要素技術を駆使して、インバータドライブシステムを開発してきた。今後、高圧交流電動機を可変速運転するインバータドライブシステムを通じて、各種産業界のニーズにこたえる、省エネルギーへの取組みを進めていく。

## 1 はじめに

1997年のCOP3(地球温暖化防止京都会議)で、各国のCO<sub>2</sub>削減目標が決定された。これに伴って省エネルギーへのニーズが急速に高まっており、特に工場・プラントなど大型動力を用いる製造業では、動力削減の手段を求めている。また、1999年4月からエネルギーの使用の合理化に関する法律の改正(通称、「改正省エネ法」)が施行され、エネルギー管理指定工場の範囲が拡大され

た。このような背景を踏まえて、日立製作所は、可変速電動機の容量拡大を図るために、高圧交流電動機を可変速運転するインバータドライブを開発し、製品化してきた。

ここでは、高圧交流電動機を可変速運転する、主として小容量用途のトランス結合正弦波インバータと、中・大容量用途を中心とする、変圧器を用いないダイレクト駆動インバータについて述べる。

2

日立製作所の省エネルギーインバータ製品のラインアップ

2.1 「Mシリーズ」高圧インバータ  
(トランス結合正弦波インバータ)

2.1.1 シリーズの概要

100 kWを超える容量のモータのほとんどは、定格電圧が3 kV系か6 kV系の高圧モータである。これらの容量のモータの回転数制御には、高電圧を出力するインバータが必要になる。そのため、大容量・高速スイッチング素子であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いた「Mシリーズ」高圧インバータを平成9年度に製品化した。

「Mシリーズ」高圧インバータは、160~2,000 kVAの容量領域をカバーし、一般産業分野を中心に、ファンやポンプ用に数多く適用されている。「Mシリーズ」の主な仕様を表1に示す。定格入力電圧、出力電圧とも3 kV級と6 kV級がある。変換方式として、コンバータ部には正弦波入力PWM(Pulse Width Modulation)を、インバータ部には電圧形PWMをそれぞれ採用している。制御方式は全デジタルV/F(Volt/Frequency)制御を採用し、制御性能を向上させることによって安定した運転を可能としている。「Mシリーズ」高圧インバータで採用した回路方式は、他の方式に比べて特に小容量機で小型化できるという特徴がある。一例として、160 kVAインバータの外形寸法を図1に示す。「幅2,000×奥行800×高さ2,300(mm)」という小型化を実現するとともに、設置場所の制約に応じて変圧器の分離を可能としている。

2.1.2 電源に優しいインバータ

「Mシリーズ」高圧インバータの回路構成を図2に示す。IGBTを用いたコンバータで交流電源を直流に変換する。フィルタを挿入し、入力電流を正弦波に制御すると同時に入力電源の電圧と電流の位相を一致させ、「入力電源高調波電流≒0」と、「入力電源力率≒1」を実現している。

表1 「Mシリーズ」の主な仕様

高圧インバータ「Mシリーズ」の主な仕様を示す。

項目	仕様
定格出力容量	160~2,000 kVA
定格入力電圧	3 kV級, 6 kV級
定格出力電圧	3 kV級, 6 kV級
変換方式	正弦波入力PMWコンバータ 電圧形PWMインバータ
制御方式	全デジタルV/F制御

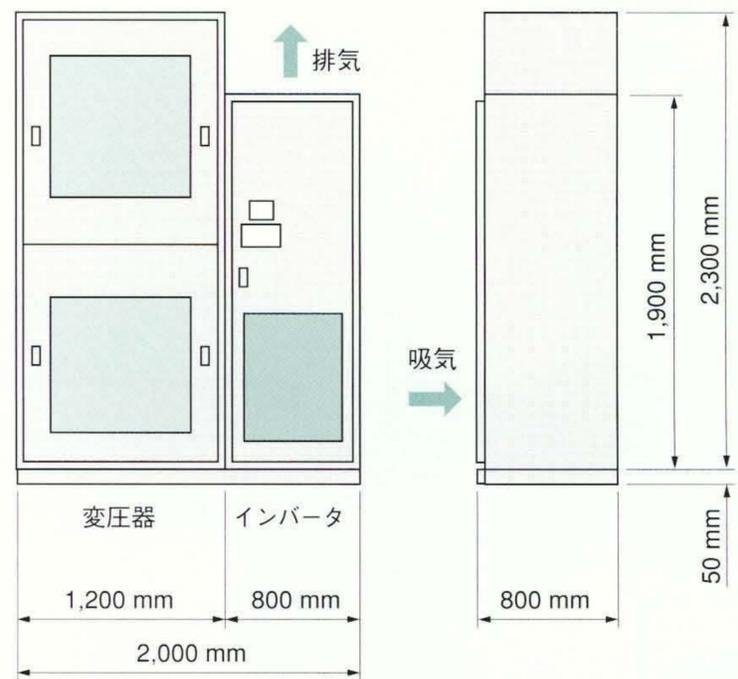
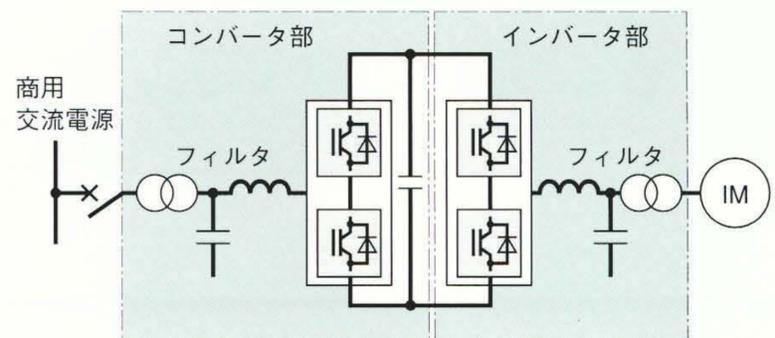


図1 「Mシリーズ」160 kVAインバータの外形寸法  
変圧器盤含めて盤幅2,000 mmと、小型化を図っている。



注：略語説明 IM(Induction Motor)

図2 「Mシリーズ」高圧インバータの回路構成

入出力フィルタを使用して高調波低域を図るとともに、正弦波コンバータを採用している。

電源への高調波流出がほとんどなく、また、電源設備容量が抑えられることから、電源に優しいインバータと言える。

2.1.3 モータに優しいインバータ

直流を交流に変換するインバータ部も、IGBTを用いたPWMインバータである。インバータ出力はフィルタで高周波成分を除去し、出力トランスで高圧電圧に変換し、高圧モータへ印加する。IGBTはスイッチング速度が速いために、スイッチ動作したときに、毎マイクロ秒当たり数百から数千ボルトの急峻(しゅん)な電圧変動が発生する。この急峻な電圧変動がモータに直接印加されると、(1)モータの絶縁の劣化、(2)モータ軸に高周波電流が流れることによる軸受けの劣化、(3)モータ・イ

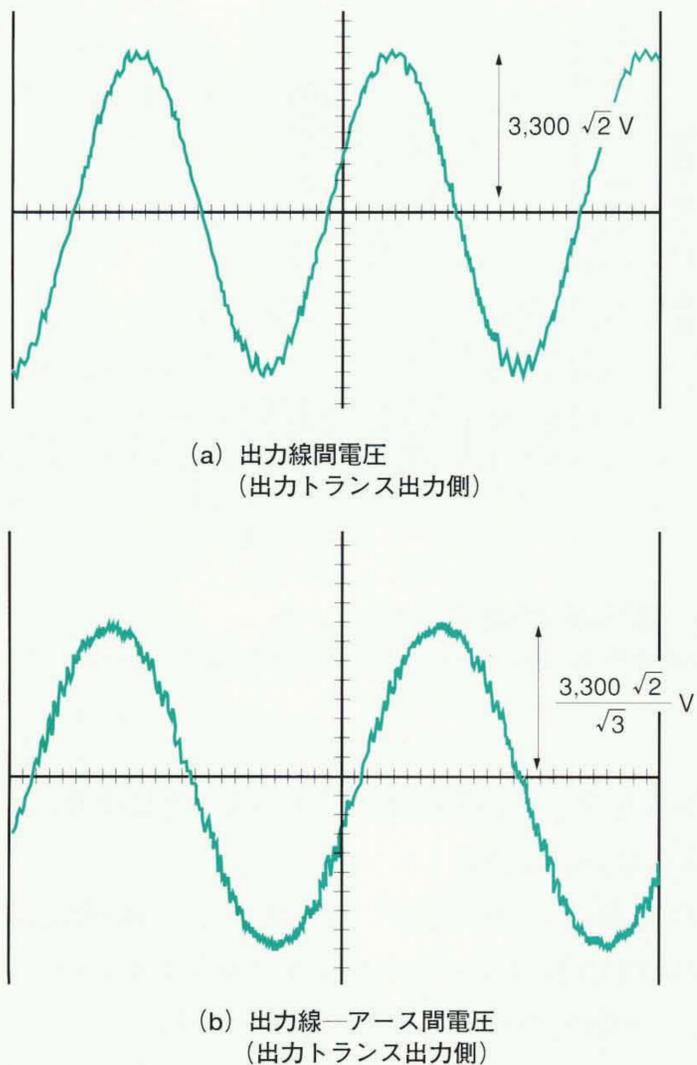


図3 インバータ出力側の電圧波形  
出力フィルタの採用により、モータに優しい波形となっている。

インバータ間接続ケーブルに高周波電流が流れることによる各種高周波障害の発生などが懸念される。大容量の高圧モータでは、小型の低圧モータに比べてこれらの問題が発生した場合の影響も大きく、また、対策や修復に必要な費用も膨大になる。

「Mシリーズ」高圧インバータでは、インバータの出力フィルタによって線間に発生する急峻な電圧変動を除去する。さらに、線とアース間に発生する急峻な電圧変動も、出力絶縁変圧器によって除去している。インバータ出力の線間およびアース間電圧波形を図3に示す。どちらでも、高周波成分が除去されているのがわかる。前記の(1)から(3)のようなモータに対する懸念がなく、標準モータにも安心して適用することができることから、負荷であるモータに対しても優しいインバータと言える。

## 2.2 高圧ダイレクトインバータ 「HIVECTOL-HVIシリーズ」

### 2.2.1 シリーズの概要

高圧ダイレクトインバータは出力側に昇圧変圧器を用いない方式であり、インバータ装置が高電圧を直接出力

することを特徴とする。平成10年度に製品化し、3 kV系と6 kV系に対応した容量展開を図っている。高圧ダイレクトインバータは入出力のフィルタと出力側昇圧変圧器を用いないので、インバータ装置の総合効率を高くすることができるという利点がある。

高圧ダイレクトインバータ「HIVECTOL-HVIシリーズ」では、入力変圧器とインバータを含めた総合効率が約98%である。「HIVECTOL-HVIシリーズ」は、3 kV系で100～3,300 kVAを、6 kV系で200～6,600 kVAをそれぞれカバーし、主として産業用と、発電設備補機などのファン・ポンプ用に適用されている。

### 2.2.2 回路構成

高圧ダイレクトインバータ「HIVECTOL-HVIシリーズ」の回路構成を図4に示す。同図(a)の主回路構成に示すように、出力1相当たり4組のセルユニットを直列接続して使用する。入力トランスは出力側を三相多重巻線としており、12組の出力巻線をそれぞれIGBTインバータユニット(セルユニット)に接続する。おのおののセルユニットは620 Vを出力し、4組直列接続することにより、線間電圧3,000 V級の高電圧を出力することができる。また、線間電圧6,000 V級の電圧を出力する場合、上記IGBTセル

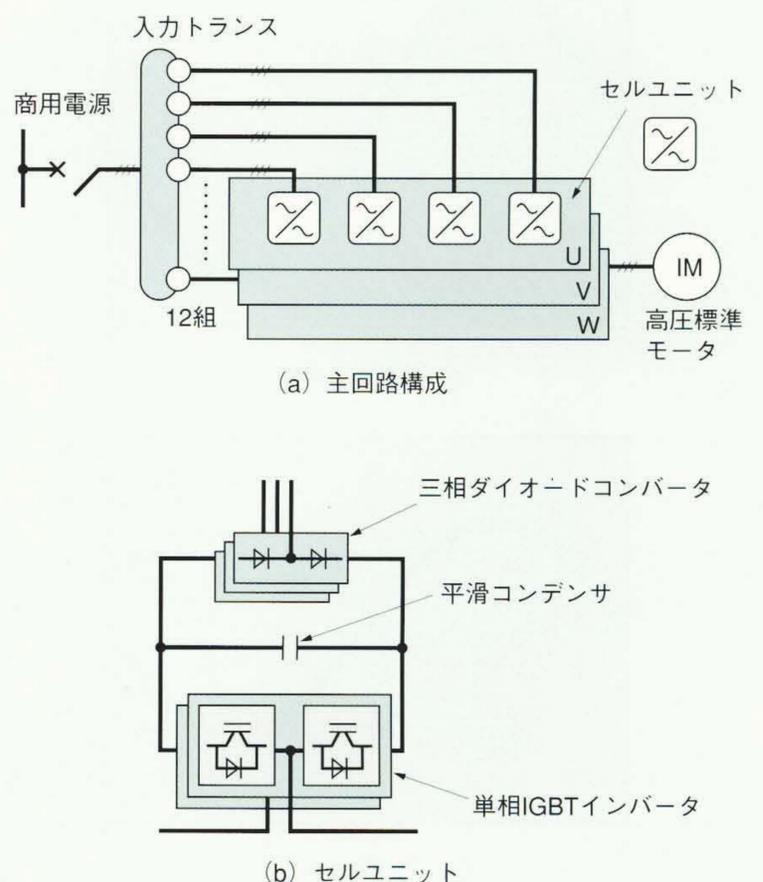


図4 高圧ダイレクトインバータの回路構成  
インバータユニット(セルユニット)にIGBTを使用した、出力トランスのない方式である。

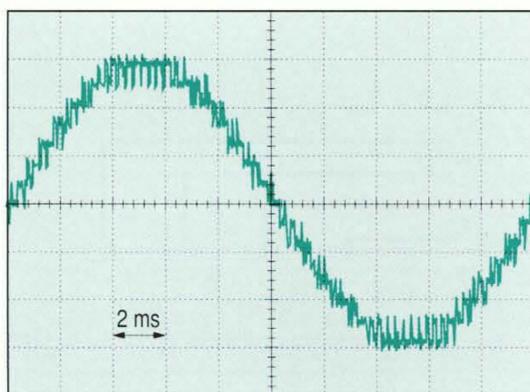
ユニットを8組直列接続することで可能となる。

セルユニットの主回路構成は、三相入力ダイオードコンバータと、単相出力のIGBTインバータ、および平滑コンデンサで構成する〔図4(b)参照〕。

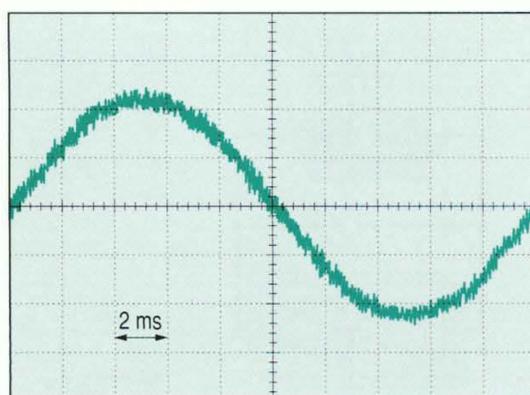
### 2.2.3 既設設備への配慮

出力電圧と電流波形を図5に示す。既設高圧モータの絶縁劣化などへの配慮から、セルインバータの直列段数を4段とした。段数を4段とすることにより、3段とした場合や、3レベルインバータなどと比較して、正弦波により近い高電圧を出力することができる。また、セルユニット内のIGBTスイッチングパターンをくふうし、各段ユニットを順次点弧させる方式の採用により、電圧の変化幅を全領域で1段としている。したがって、既設高圧標準モータも、フィルタなしでダイレクトに駆動することができる。

ポンプ設備などでは、同一受電系統に接続される他設備、特に発電機などへ悪影響を与えないための配慮から、電源側高調波電流を極力小さくする必要がある。高圧ダイレクトインバータでは、電源側高調波対策として、入力トランスの出力側多重巻線方式を採用している。4組



(a) 出力電圧波形



(b) 出力電流波形

図5 高圧ダイレクトインバータの出力波形

出力電圧と電流をともに正弦波に近づけることにより、モータへのさまざまな悪影響を低減するように配慮している。

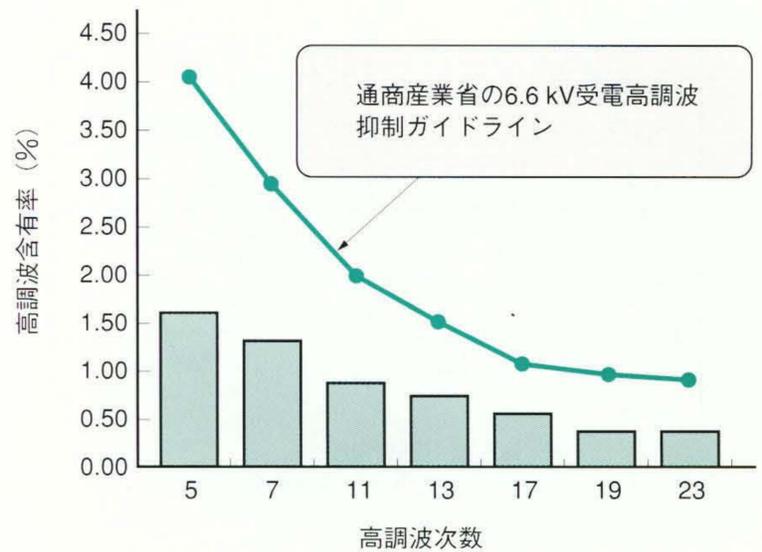


図6 電源側高調波電流スペクトル

多重巻線変圧器により、電源高調波を抑制している。

の多重巻線の位相を15度ずつずらすことにより、入力側電流の高調波を抑制している。

日立製作所の既設ポンプ設備で、稼動後30年の500 kW高圧標準モータを高圧ダイレクトインバータで駆動し、絶縁特性を中心に波形解析を実施した。

電源側高調波電流成分のスペクトル(実測値)を図6に示す。通商産業省の高調波抑制ガイドラインを、フィルタなしでクリアしている。

### 2.2.4 「HIVECTOL-HVIシリーズ」の主な仕様

HIVECTOL-HVIシリーズの主な仕様を表2に示す。このシリーズは、100~6,600 kVAの容量領域をカバーしている。制御方式として速度センサレスベクトル制御を採用しており、ファンやポンプなど二乗低減トルク負荷以外に、高始動トルクを必要とする負荷や、定トルク特性を持つ負荷などに適用することができる。

表2 HIVECTOL-HVIシリーズの主な仕様

高圧ダイレクトインバータ「HIVECTOL-HVIシリーズ」の主な仕様を示す。

項目	仕様
定格出力容量	100/200~3,300/6,600 kVA
定格入力電圧	3 kV級, 6 kV級
定格出力電圧	3 kV級, 6 kV級
変換方式	ダイオードコンバータ 正弦波IGBT 多レベルPWMインバータ
制御方式	速度センサレスベクトル制御

### 3 インバータによる省エネルギー運転の適用例

#### 3.1 ポンプ可変速運転による省エネルギー効果の例

ポンプ運転の場合の所要電力を吐出弁制御と回転数制御とで比較した例を図7に示す。吐出弁による流量制御は、配管に取り付けた弁の開度を調整することによって行う。この場合、同図からわかるように、必要流量が30%減少しても、所要電力量は約8%の低減にとどまる。ポンプの場合、一般的に、負荷トルクが回転数(流量は回転数に比例する。)の二乗に比例するという、二乗トルク特性<sup>1)</sup>を持っている。したがって、回転数とトルクの積で表されるモータの動力は、回転数(流量)の三乗に比例することになる。

モータを回転数制御した場合には、流量の減少に対してモータ動力が三乗で低減するので、大きな省エネルギー効果を得られることになる。図7からわかるように、回転数制御の場合、必要流量が30%減少したとき、所要電力量は、吐出弁制御に対して52%の低減になる。ポンプを多数使用する浄水場では、配水圧力を制御するように流量がコントロールされている。1日の時間帯によって必要流量は変化し、必要流量に応じてポンプの回転数を変化させた場合、年間およそ1,200万円の電気量低減が見込まれる(時間帯による流量の変化：100, 70, 50%, 年間運転時間：6,000時間、モータ：500 kW、電力料金：

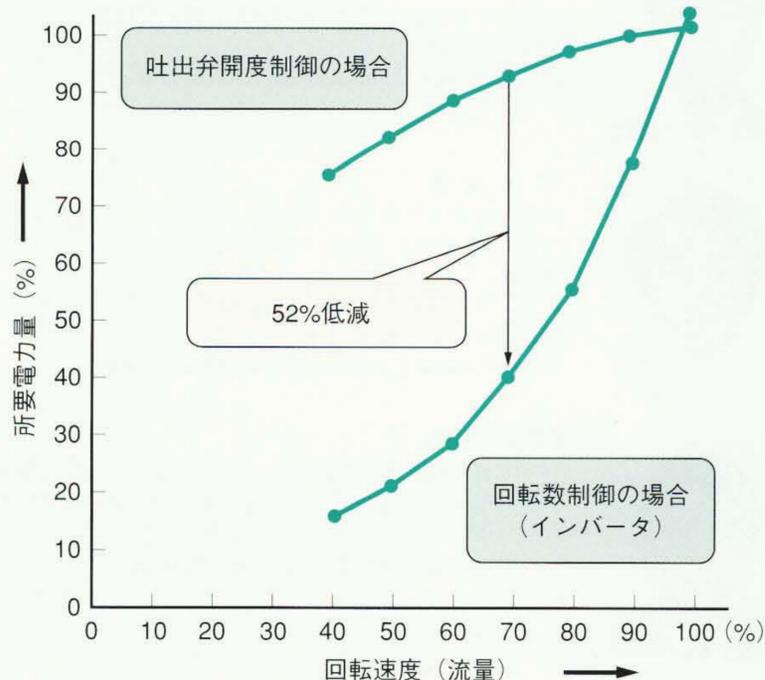


図7 ポンプ運転の場合の所要電力量比較  
70%流量で回転数制御をした場合、吐出弁制御に比べて52%の電力量削減が図れる。

10円/kW・hと仮定した場合)。

#### 3.2 ファン可変速運転による省エネルギー効果の例

圧延設備などの大型モータ用冷却ファンをインバータ駆動し、可変速運転した場合の例を図8に示す。ファンは、前述のポンプと同様に、二乗低減負荷トルク特性を持っているので、回転数の三乗に比例して駆動動力が低減される。また、同一特性の複数台モータを1台のインバータで駆動し、設備の初期投資を抑制することも可能である。同図の例では、主機モータ用の冷却ファン2台を、1台のインバータで駆動している。既設の高圧遮断器回路を流用し、インバータ回路と既設回路との切換スイッチを設けており、インバータ装置に万一の不具合が発生しても、風量が確保できる構成としている。また、この用途では中央制御装置で主機モータ運転制御を行っており、主機モータの負荷を検知することが可能であることから、主機モータの負荷に応じた冷却風の流量制御ができる。さらに、主機モータ負荷に応じてインバータ装置に速度可変指令を与えることにより、省エネルギー運転を可能としている。

省エネルギー効果の一例として、ファンの運転での吸込ダンパ制御の場合とインバータ制御の場合の比較を表3

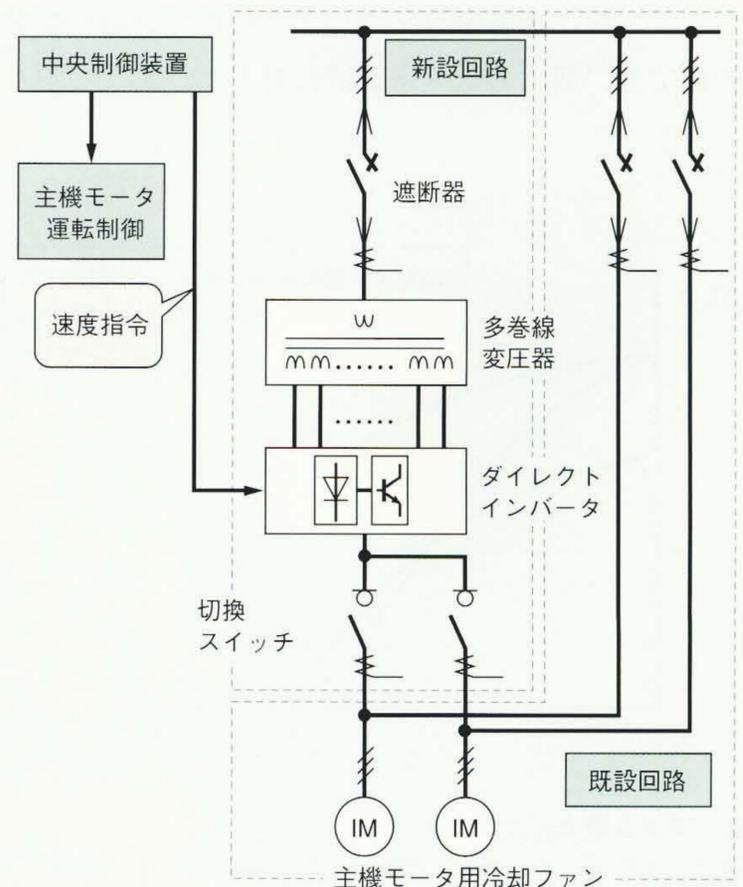


図8 ダイレクトインバータのファンへの適用例  
2台のモータを1台のダイレクトインバータで駆動することにより、初期投資の低減を図っている。

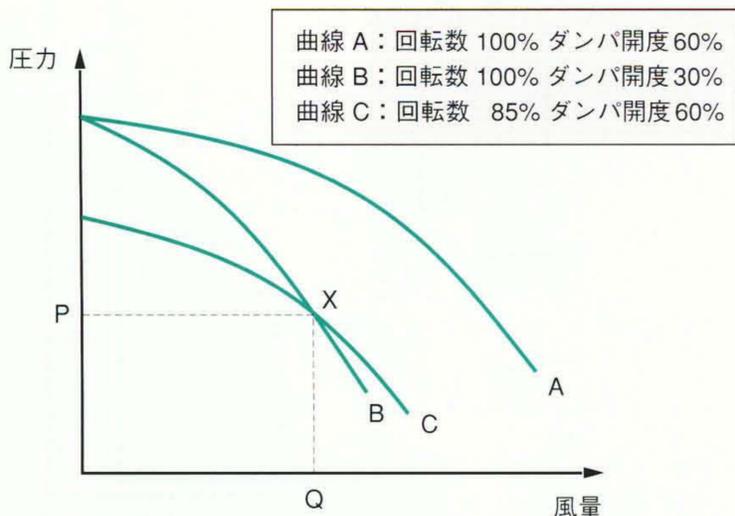
**表3 風量制御の省エネルギー効果比較**

風量制御の方式別に省エネルギー効果を算出した結果の比較を示す。

項目	ダンパ制御の場合	インバータ制御の場合
モータ回転数	100%	85%
ダンパ開度	30%	60%
所要動力	モータ容量の約75%	モータ容量の約53%
省エネルギー動力	約22%	

に示す。この場合の運転特性を図9に示す。縦軸に圧力、横軸に風量をとると、特性点Xでの運転は曲線Bと曲線Cの条件が可能である。曲線Bは、100%一定速度運転でダンパを30%まで絞った場合である。一方、曲線Cはインバータによる可変速運転で、85%速度、ダンパ開度60%での運転である。特性点Xはどちらも同一であるが、表3に示すように、インバータ制御のほうが省エネルギー動力として約22%の効果がある。

インバータによるファンの可変速運転では、(1) 低速度域でのサージング限界<sup>2)</sup>の把握、(2) 慣性モーメントが大きいことによるモータとの軸振動周波数ジャンプ機能、(3) モータとのカップリングを通しての軸電流の影響などについて考慮する必要がある。日立製作所の省エネルギーインバータ装置は、低速リミッタ機能と運転周波数ジャンプ機能(最大5点)を持っている。また、モータ軸アースブラシを設置することにより、可変速運転でもファン本体に影響を与えないようにしている。使用環境の面でも、通常の電気室設置に対して、制御装置を保



**図9 ファン運転特性の例**

特性点Xで運転する場合、曲線Bまたは曲線Cどちらの条件も可能である。

護するための防じん対策や、湿度対策などを講じている。

#### 4 おわりに

ここでは、省エネルギーに対応したインバータ、特に高圧モータを駆動するインバータの製品シリーズと適用例について述べた。

ポンプやファンの省エネルギーの必要性が今後ますます問われていき、インバータの適用が進むものと考えられる。また、インバータ装置自体の信頼性向上や容量拡大により、プラントの重要設備での適用が検討されはじめている。

今後もさらに製品の信頼性向上を図るとともに、システム的なアプローチにより、トータルな省エネルギーへの提案に努めていく考えである。

#### 参考文献

- 1) 電気学会：電気工学ハンドブック新版(1988)
- 2) 社団法人日本産業機械工業会 送風機技術者連盟編：送風機ハンドブック、日本工業出版株式会社(1990)

#### 執筆者紹介



**杉山 繁**

1980年日立製作所入社、電力・電機グループ 情報制御システム事業部 制御設計本部 電機制御システム設計部 所属  
現在、ドライブシステムの設計・開発に従事  
技術士(電気・電子部門)  
電気学会会員  
E-mail: sugi @ omika. hitachi. co. jp



**嶋田 恵三**

1984年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 日立生産本部 パワーエレクトロニクス部 所属  
現在、半導体電力変換装置の設計・開発に従事  
電気学会会員  
E-mail: keizo\_shimada @ pis. hitachi. co. jp



**守永 大策**

1972年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 電機ソリューション本部 ドライブシステム部 所属  
現在、産業用モータとモータ ドライブ システムの事業企画業務に従事  
E-mail: daisaku\_morinaga @ pis. hitachi. co. jp



**門三野 洋二**

1980年日立製作所入社、電力・電機グループ 情報制御システム事業部 制御設計本部 電機制御システム設計部 所属  
現在、ドライブシステムの企画業務に従事  
E-mail: monzono\_youji @ pis. hitachi. co. jp