

モータの最新技術動向

The Latest Technological Trends in Electric Motors

池 防 泰 裕*
Yasuhiro Ikeboh

要 旨

近年ユーザの環境問題に関する認識の高まりから、特に家電分野では、省エネ・高効率化、省資源化を目指した製品が開発されており、パワーエレクトロニクス技術とは密接な関係になってきている。また家電製品に搭載されているモータは、電力消費量の大部分を占めており、ここ数年省エネ化の技術開発が進んでいる。またモータは家電製品の基本性能を決定しており、省エネ・高効率化以外にも静音化・低振動化なども要求されている。

ここでは技術革新が進んでいるエアコン、洗濯機のモータ技術を中心に、搭載されているモータの最新技術動向について制御方法も含めながら説明する。

The rising public eco-consciousness has led to the development of household appliances with emphasis on energy and resource saving. This has made power electronics a key element in the development process.

Usually, electric motors are the parts that consume most of the power in an appliance. For this reason, there has been a lot of R&D work aiming at making them more energy-efficient.

Noise and vibration reduction is also required as well as energy efficiency as it can be said that motors are the deciding factor in basic performance of household appliances.

This paper discusses the latest technological trends in motors used in air-conditioners and washing machines, where technological innovations are most apparent, including the control methods.

まえがき

ここ数年、ユーザの環境への意識やエネルギー問題への関心の高まりなどから、身近な家電製品にも省エネ・高効率・省資源・リサイクルなどの面が要求されてきている。一方、社会的にもエネルギー消費の増加に伴うCO₂排出による地球温暖化、冷媒に利用されているフロンガスによるオゾン層破壊など地球規模での環境悪化が懸念されている。このような社会的背景の中、1997年12月に開催されたCOP3(京都会議)において、CO₂削減の数値目標が示された。その結果として、省エネ法が改正されることになり、中でも運転時間の長いエアコンに対しては、1999年4月に施行された改正省エネ法において、省エネトップランナー方式が導入され、04年以降の省エネ基準値が示された。

このような状況において、エアコンに関しては圧縮機用モータが、誘導モータからブラシレスDCモータへと変遷してきており、さらに高効率化を図るため、磁石トルクに加えてリラクタンストルクを併用できる新しいタイプのモータが登場してきている。最近ではこの新モータが、省エネタイプのエアコン用圧縮機モータの標準になっている。この新モータは、現状のインバータ回路のままリラクタンストルクを有効に利用でき高効率化が容易に実現できるため、現在では、エアコンだけでなく、冷蔵庫、洗濯機へと応用の範囲が広がってきている。

一方洗濯機に関しては、“速く、合理的に、経済的に洗いたい”、“早朝や夜間でも周囲に気兼ねなく静かに洗いたい”などのエアコンとは異なる要求があり、このため従来からの洗浄・すすぎ性能、脱水性能などの洗濯機本来の性能向上以外に、静音化・低振動化・省エネ性能が重要視されてきている。これに伴い従来の減速機構を用いたベルトドライブ方式に代わり、DD(ダイレクトドライブ)モータ方式が開発されている。

このようにエアコン、洗濯機などの具体的な製品に搭載されているモータにおいて、省エネ化・高性能化・静音化などの面から制御技術を含めて最新のモータ技術について説明する。

* 電化システム事業本部 電化商品開発センター 第2開発部

1. 家電製品に利用されているモータ

従来家電製品には、誘導モータが一般的に採用されていた。理由としては、誘導モータは構造が簡単、長寿命、低コスト、さらに制御が容易など有利な面が数多くあるためである。このため家電から産業分野まで幅広い分野で使われているが、誘導モータは原理的にロータ側での2次銅損が発生するため、効率面で課題があった。前述したように、ここ最近の社会的な背景・環境問題などにより、家電製品の消費電力を左右するモータの高効率化は避けて通れないものになってきている。このため家電製品に採用されるモータも誘導モータからより高効率なブラシレスDCモータへと移行している。ブラシレスDCモータはロータに磁石を用いることで2次銅損が発生せず効率が向上する。

エアコン、冷蔵庫に搭載される圧縮機用モータと、洗濯機、掃除機に搭載されるモータでは、要求仕様が大きく異なる。エアコン、冷蔵庫では、低速から高速までの可変速範囲の広いモータ、洗濯機では洗い時の大トルク、脱水時の高速化、掃除機では超高速回転など各製品毎に仕様が異なる。

ここでは省エネ化が重要なエアコンにおける技術動向と、静音化が要求される洗濯機の技術動向について紹介する。

2. エアコンにおける技術動向

2.1 圧縮機モータの高効率化

ここ数年、圧縮機に採用されているモータの高効率化には著しいものがある。誘導モータからブラシレスDCモータへの移行に始まり、ロータ構造、ステータ構造、巻線方式、ケイ素鋼板の材質、磁石材料など様々な技術革新が行われてきている。

(a) ロータ構造

初期のブラシレスDCモータは、ロータ表面に磁石が張り付けたSPM(Surface Permanent Magnet: 表面磁石貼付型)モータであった。このSPMモータは、高速回転時に磁石が遠心力で飛散ないようにSUS(ステンレス)管を被せており、この部分での鉄損が効率を低下させていた。この磁石をロータ内部に配置させることで、磁石の飛散防止を図るとともに、SUS管も廃止できることで効率改善を図ったIPM(Interior Permanent Magnet: 内部磁石埋込型)モータが現在では主流になっている。

IPMモータでは磁石がロータ内部に埋め込まれるため、ステータ巻線から見たインダクタンスがロータ位置の関係で変化する。図1に示すようにd軸方向では

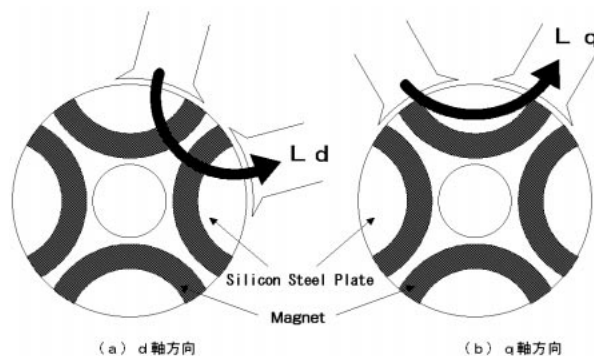


図1 IPMモータのロータ構造

Fig. 1 Rotor configuration of IPM motor.

磁気抵抗の大きな磁石が磁路を妨げるが、q軸方向では磁気抵抗の小さいケイ素鋼板を通る磁路が形成される。このd軸インダクタンス: L_d とq軸インダクタンス: L_q の差によりリラクタンストルクが発生する。一方磁石による磁石トルクも発生するため、このモータの総合トルク T は、 P_n : 極対数、 i_a : 電機子鎖交磁束、 I_a : 電機子電流、 L_d, L_q : d, q軸インダクタンス、 β : 電流位相角とすると、一般的に次式のようになり、右辺の第1項が磁石トルクを、第2項がリラクタンストルクを表す。

$$T = P_n \left\{ a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad (1)$$

図2に電流位相角 β を変化させた時の総合トルク T の変化を示す。磁石トルクとリラクタンストルクの大小関係により、総合トルクの最大値をとる β の値は変化する。実際のエアコンでは、負荷条件毎に β の値を最適化し、高効率駆動を行っている。

現在各社の省エネ型エアコンの圧縮機には、すべてこのIPMモータが採用されている。

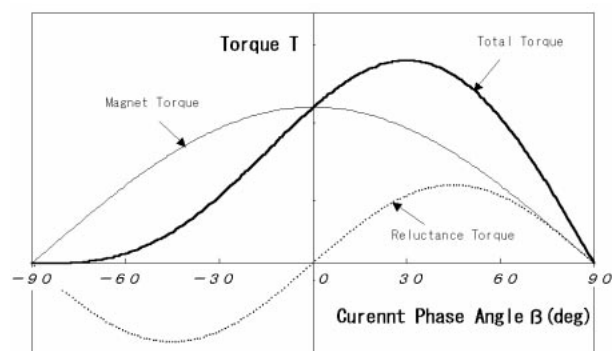


図2 磁石トルクとリラクタンストルク

Fig. 2 Magnet torque and reluctance torque.

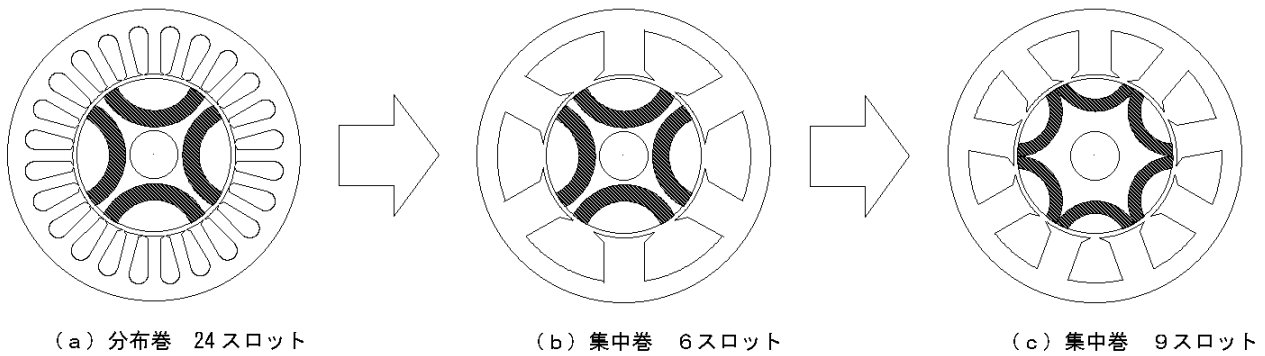


図3 ステータ構造
Fig. 3 Stator configuration of IPM motor.

(b) ステータ構造

ステータ構造について当初は、図3(a)に示す分布巻と呼ばれる24スロットのものが一般的に採用されていたが、90度離れたスロット間を巻線が渡る構造のためエンドターンが大きく、巻線使用量が多くなっていた。このため図3(b)に示すように、この欠点を解消したスロットに直接巻き込む集中巻と呼ばれる巻線構造が開発されている。この集中巻は巻線使用量を大幅に低減できることで銅損を下げ高効率化が容易となるとともに、低コスト化・省資源化も図られる。但し、極数が24から6に減るため、コギングトルクが増加し振動・騒音が課題となっている。このため最近では図3(c)に示すように、ステータ極数を9スロットに増やし、ロータ極数も4極から6極に増やすことでコギングトルクを低減し、低振動化・低騒音化を図っている。

2・2 モータ制御技術

現在のモータは、単独ではその性能を十分に発揮できず、高性能CPUによる制御技術と組み合わせることで、高効率化・静音化・低振動化などを実現している。

(a) ベクトル制御

従来FA分野などの汎用インバータで利用されていたベクトル制御が、高性能CPUの低コスト化に伴い家電製品にも搭載されつつある。ベクトル制御とは、3相モータ電流を、励磁電流成分 i_d とトルク寄与電流成分 i_q の直交2軸に分解することで、トルクと励磁を独立して制御し、モータトルクを自由に制御できることで高効率運転を可能にする制御技術である。

ベクトル制御で用いられるモータの状態方程式は、次式で表され、この式に基づいて制御は行われる。

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -L_q \\ L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix} \quad (2)$$

V_d, V_q : 電機子電圧のd軸, q軸成分
 L_d, L_q : d軸, q軸の自己インダクタンス
 i_d, i_q : 電機子電流のd軸, q軸成分
 R_a : 電機子抵抗, ω : 角速度, p : 微分演算子
 a : 永久磁石による電機子鎖交磁束

(b) 電流位相差制御

ブラシレスDCモータは同期モータであり、ロータ位置を検出することが不可欠である。通常圧縮機内部は高温高圧のためセンサを内蔵できないため、従来は巻線誘起電圧によりロータ位置を検出する方式が採用されていた。この誘起電圧を検出するため、60度の無通電区間が必要で、120度矩形波通電制御が一般的に用いられている。但し、モータ電流が矩形波のため効率低下、電磁音の増加などの課題があり、モータ電流の正弦波化が望まれていた。この正弦波電流を実現するため、図4に示すようにモータ電流とモータ電圧の位相差を制御することで、誘起電圧を検出しなくても高効率駆動を実現する電流位相差制御が開発されエアコンに搭載されている。モータ電流の正弦波化は、高

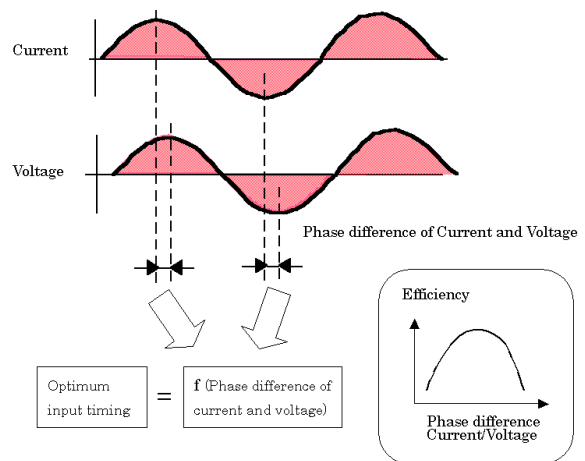


図4 電流位相差制御
Fig. 4 Phase control of current.

効率化, 静音化以外にも, 弱め界磁制御などを容易にしモータの運転範囲を拡大できるメリットもある。

(c) トルク制御

圧縮機のピストン構造には, シングル, ツイン, スクロールなどの方式がある。この中で低コスト・高効

率の特長を持つシングルロータリ圧縮機は, その構造上, 吸入・圧縮・排出行程での負荷変動が大きく振動が発生していた。この負荷トルク変動による振動を低減するため, 図5に示すように従来は一定電圧を印加していた制御に対し, 負荷トルクパターンに合わせたモータトルクを制御することで, ロータ加速度を一定にし, 振動を低減するトルク制御も実用化されている。これにより安価なシングルロータリ圧縮機で, ツインロータリ圧縮機並みの静音化を実現している。

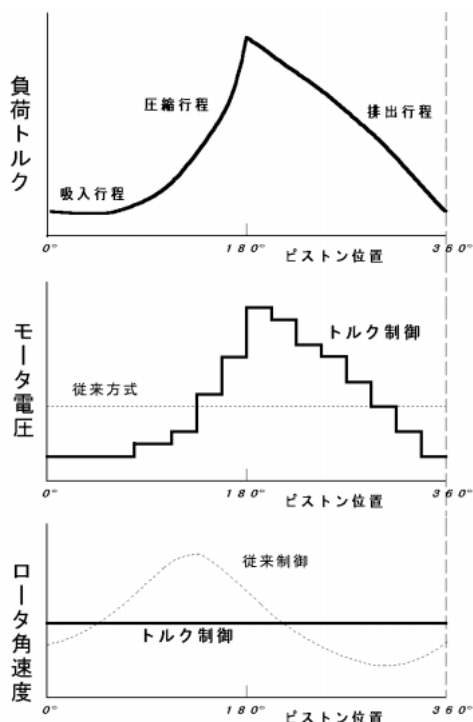


図5 トルク制御(圧縮機モータ)
Fig. 5 Torque control of compressor motor.

3. 洗濯機における技術動向

3.1 モータ駆動方式

エアコンとは異なり, 洗濯機に要求されている負荷特性は, 低速(10 ~ 150rpm)・高トルク(20 ~ 30Nm)が必要な“洗い時”と, 高速回転(800 ~ 1000rpm)が必要な“脱水時”の大きく異なる2つの負荷トルク領域に分かれる。通常“洗い時”はパルセータ(攪拌翼)により洗濯物を攪拌し, “脱水時”は脱水槽を回転させその遠心力で脱水している。このパルセータ及び脱水槽を駆動する機構により, 表1に示すようなベルトドライブ方式, ギア併用方式, ダイレクトドライブ方式に大別される。ベルトドライブ方式は従来から最も一般的に用いられている方式で, モータのトルクをプーリを介したベルトとギアにより伝達するもので, 減速比を切替える機構が内蔵されている。その減速比はパルセータ駆動時約1:14, 脱水槽駆動時約1:2である。この機構は洗濯時と脱水時のモータ

表1 洗濯機の駆動方式
Table 1 Comparison of motor drive mechanism.

	ベルトドライブ方式	ギア併用方式	ダイレクトドライブ方式	
			(アウターロータ)	(インナーロータ)
モータ方式				
プーリ比	約1:2			
ギア比	約1:7	約1:7		
バランス	×			
静音性	×			
モータ	誘導モータ/ブラシレスDCモータ	ブラシレスDCモータ	ブラシレスDCモータ	
トルク	小	中	大	
効率				
コスト				

にかかる負荷をほぼ同一にするとともに、洗濯時に要するモータの最大駆動トルクを小さくすることができるが、ベルト、ギアの摺動音等の騒音が大きくなる課題がある。

これに対しダイレクトドライブ方式では、モータのトルクを直接パルセータや脱水槽に伝達する機構のためギアやベルトによる騒音が全くなく、静音性は極めて優れている。反面、減速機構がないため特にパルセータ駆動時にモータ負荷はベルトドライブ方式の約15倍となり、その結果モータに要する最大駆動トルクは大きくなり効率が課題となる。このダイレクトドライブ方式に使用されるDD（ダイレクトドライブ）モータには、パルセータ駆動時の低速高トルクと脱水槽駆動時の高速回転の性能を要し、現在アウターロータ方式とインナーロータ方式の2種類のブラシレスDCモータが採用されている。ここでは特にインナーロータ方式のダイレクトドライブブラシレスDCモータの高効率化と静音化技術について説明する。

3・2 DD(ダイレクトドライブ)モータ

前述したようにベルトドライブ方式に比べダイレクトドライブ方式では、減速できない分トルクが従来の約15倍も必要となり、モータが大型化する課題がある。このため洗濯機用DDモータは写真1に示すように、低速大トルクとコギングトルク低減を実現するためロータ20極、ステータ24スロットの大型モータになっている。さらに高トルク化を図るため、互いに向かい合った極に配した20個の磁石による磁石トルクと、ロータ表面の磁氣的突極を利用したリラクタンストルクを併用できるIPM構造のブラシレスDCモータになっている。ロータはクサビ型のケイ素鋼板をフェライト磁石で挟んだIPM構造であり、対面した同極磁石から外周方向に磁束が放射する。一方ステータは銅損の低減を図るべくエンドターンの少ない集中巻コイルを24個配し、その巻線はリラクタンストルクを効



写真1 DD(ダイレクトドライブ)モータ
Photo 1 DD(Direct Drive) motor.

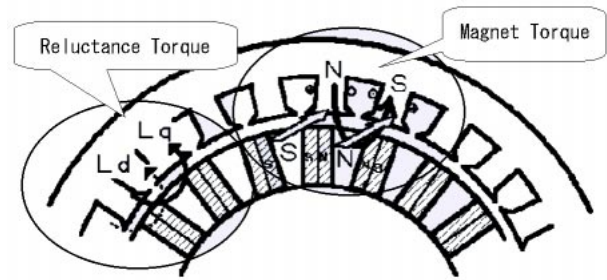


図6 トルク発生原理
Fig. 6 Principle of torque generating.

率よく引き出すため各相隣接同士異極構造である。

3・3 発生トルク原理

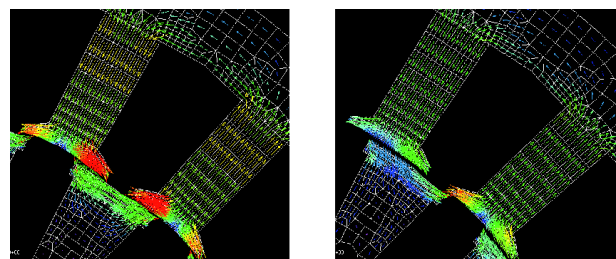
インナーロータ型の課題はアウターロータ型と比較し同一外形ではロータの大径化が困難であり、その結果、大トルクを要するときに高い駆動電流を必要とする点である。このトルク不足を解決するため、DDモータでは従来のブラシレスDCモータの駆動源である磁石トルクの強化と、リラクタンストルクを併用する高トルク型のロータ構造にしている。

磁石トルク向上手段は図6に示すようにロータ内部に磁石をV字型に埋め込んだIPM化であり、隣接する磁石の磁力をロータ外周部に集中させ電機子鎖交磁束密度の高密度化を図っている。

一方リラクタンストルクはロータの磁氣突極に働く電磁力であり、図6に示すように、ロータの磁石とその間にあるケイ素鋼板のインダクタンス差により磁氣突極を得てリラクタンストルクを発生させている。

このインダクタンスを高透磁率のケイ素鋼板に磁束が透過する際の L_q と低透磁率の磁石に磁束が透過する際の L_d であらわすと、 $L_q > L_d$ となりこの差がトルク発生源となる。

このリラクタンストルクを有効に引き出すにはロータ位置とコイルの通電電流位相角の最適化が必要である。この位相角と静トルクの関係は有限要素法を用いたシミュレーションによると図7(a)、(b)のよう



(a) 進角0deg: 磁束密度最大 (b) 進角4deg: 磁気飽和

図7 磁束密度分布(計算結果)
Fig. 7 Calculation result of magnetic flux distribution.

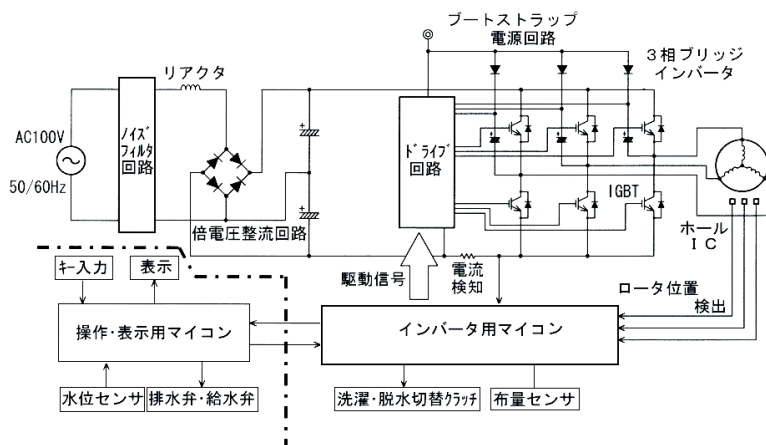


図8 回路ブロック図(インバータ洗濯機)

Fig. 8 Circuit block diagram (inverter type washing machine).

になり,このDDモータでは40°付近で,磁束密度が最大になり最大トルクが得られる。

3.4 インバータ部

洗濯機モータを制御するインバータ回路は,図8に示すようにエアコン同様3相ブリッジ回路である。但しモータのロータ位置検出には,電気角60度毎に配した3個のホールICを用いている。ロータ磁石の磁極変化により切り替わる信号に変換し,ロータ1回転につき60分割の信号を得ている。この信号情報により起動時にロータ位置を判定,その後起動トルク,回転数,回転方向を制御すべく,ロータ位置に応じた最適なモータ通電電圧と進み角を制御している。

3.5 慣性エネルギー利用による高効率化

最近の全自動洗濯機では,脱水槽を急速反転させる洗浄方式を採用されている。この洗浄方式は布団,毛布等大物洗いの洗浄効果が大い利点をもつが,パルセータ駆動と比べ大重量の負荷を反転させなければならないため,比較的大きな駆動電力を要する。この電

力を低減するため,図9に示すように脱水槽の慣性エネルギーをDDモータの発電制御により,インバータ入力の平滑コンデンサに回生しその電力を次回の駆動時に利用する方式が採用されている。この方式では平滑コンデンサの充電電圧を通常の倍電圧整流で得られる280Vから約400Vまで昇圧し,その充電エネルギーを約16Jから33Jに倍増している。発電制御は,モータ駆動電流から見て180°反転した電流をモータに通電し逆トルクを発生させるとともに,この通電電流を決定するインバータスイッチング素子の通電率とその位相角制御により発電電圧を一定にする方式である。この制御により洗濯槽による洗いモードでの消費電力を約5~7%低減している。

むすび

家電製品に搭載されるモータの省エネ要求は,今後ますます続くものと思われる。特にエアコンでは04冷凍年度より省エネトップランナーの基準値をクリアしていかなければならず,低コストで高効率化を実現する技術が急務となっている。また洗濯機のみならずエアコンにおいて,省エネ・高効率化以外にも基本性能の向上,静音化,低振動化などの要求仕様も高くなってきており,これを実現していくモータ・インバータ技術はますます重要になってくるものと思われる。

参考文献

- 1) 長竹和夫;「モータ実用ポケットブック 家電用モータ・インバータ技術」,日刊工業新聞社(2000)

(2002年1月22日受理)

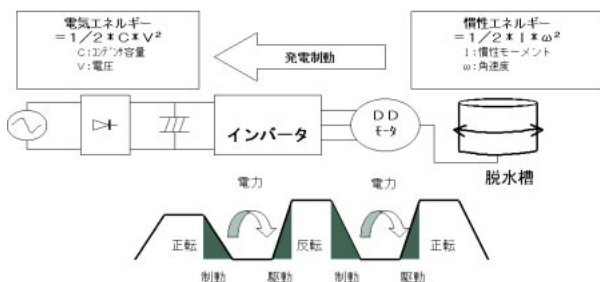


図9 慣性エネルギー回生制御

Fig. 9 Regenerative control by inertial energy.