

ブラシレスモータ用 低騒音高効率 正弦波駆動IC

Low-Noise and High Efficiency Sinusoidal-Waveform-Drive IC for Brushless Motors

杉浦賢治 Kenji Sugiura 八十原正浩 Masahiro Yasohara

要 旨

ブラシレスモータを低騒音で駆動する正弦波駆動に関して、正弦波波形の解像度と歪（ひずみ）の関係を検討し、騒音の原因である駆動電圧の歪を低解像度で効果的に抑える技術を開発した。また、高効率駆動の実現に重要な駆動電圧の位相制御に関して、グラウンド電流からモータ巻線電流位相を検出し、安価に駆動電圧位相を自動調節する技術、およびファン用途に特化した速度情報を用いて高効率を維持する位相調整技術を開発した。これらの技術をIC化し、従来の矩形波駆動モータと同等のコストで、5 dB ~ 10 dBの低騒音、高効率ブラシレスモータの実現を可能にした。

Abstract

Brushless motors can be driven with low noise when sinusoidal-waveform drive is applied, but distortion of the drive waveform is a problem since it becomes the cause of noise. We have analyzed the association between the resolution and the distortion of sinusoidal waveforms, and developed a new technology to reduce the distortion effectively even at low resolution.

Also, phase control of the drive voltage is an important factor to drive motors with high efficiency. We have developed the technology to control drive waveform automatically at low cost by detecting the coil current phase from the ground current, and the technology to keep high efficiency of driving fan motor by a specific phase-adjustment method which uses the motor rotation speed information.

Finally, by applying these new technologies for IC design, it becomes possible to develop a highly efficient brushless motor with 5 to 10 dB lower noise than the existing rectangular-waveform-drive motors at comparable cost.

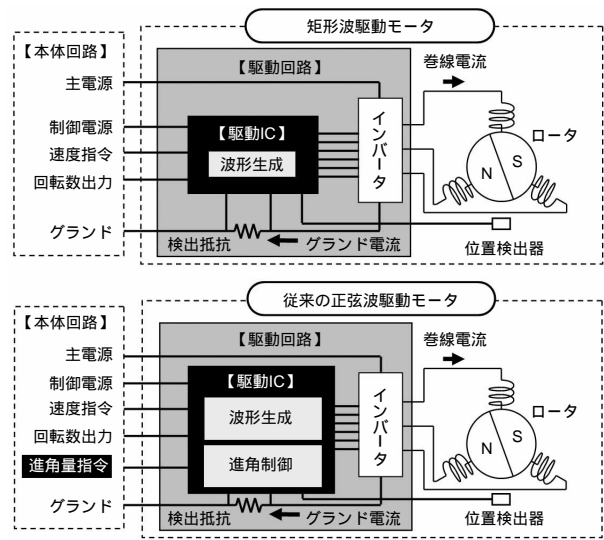
1. はじめに

ブラシレスモータ（以下、モータと記す）は、昨今の省エネルギー化の流れにより、さらなる高効率化が求められている。また、低騒音化も時代のニーズであり、これにはモータの駆動波形の矩形波から正弦波への移行が有効である。

しかしながら、正弦波駆動は矩形波駆動より複雑な波形出力回路が必要であり、駆動回路規模の増加を招く。さらに、正弦波駆動で常に高効率を維持するには、モータの誘起電圧と巻線電流の位相を合わせ、トルクを最大限引き出す制御（以下、進角制御と記す）が重要となり、この制御も駆動回路を複雑化させる。

従来、これらの制御を実現する駆動回路は、マイコンなど高価で高機能な部品を用いて構成されていた。また、エアコンなどのファン用途に用いられるモータでは、第1図に示すように、エアコンの本体回路からモータ内部の駆動回路へ進角量指令を入力する必要がある場合もあった。

このように、正弦波駆動は低騒音化を実現できる反面、その普及にはコストや使い勝手の改善に課題があり、正弦波駆動による低騒音高効率モータの普及には、これらの課題解決が必要である。



第1図 ファン用モータの構成
Fig. 1 Structure of fan motor

2. 低騒音高効率 正弦波駆動IC

これらの課題解決には、マイコンなどの高価な高機能部品を用いずに、低騒音、高効率モータを安価に実現できる正弦波駆動用の駆動IC（正弦波駆動IC）の開発が不可欠である。

第1図に示すように、駆動ICはエアコンやドキュメント機器に使用されるモータの駆動回路を構成する電子部品であり、ロータの位置信号や速度指令などから、モータを駆動するための通電波形を生成し、インバータを介して巻線に印加される電圧を制御している。

矩形波駆動用の駆動ICは、通電波形が単純なため波形生成の回路規模は小さい。また、厳密な進角制御をせずともモータの効率を維持できるので、一般に進角制御機能はない。

一方、従来の正弦波駆動ICは、正弦波の通電波形が複雑なため波形生成の回路規模が大きく、進角制御回路を内蔵しているものの、進角量指令の入力が必要である。

また、進角制御のための巻線電流の情報を得るため、カレントトランスなどの高価な電流検出器を用いることもあった。

今回、矩形波駆動と同等のコストで正弦波駆動を実現するために、以下の技術開発に取り組んだ。

低解像度でありながら効果的に低騒音化を実現できる正弦波駆動技術と、電流検出器などを追加することなく進角制御を自動的に行い高效率化を実現できる進角制御技術である。

以下に、これらの技術について説明する。

3. 低騒音化

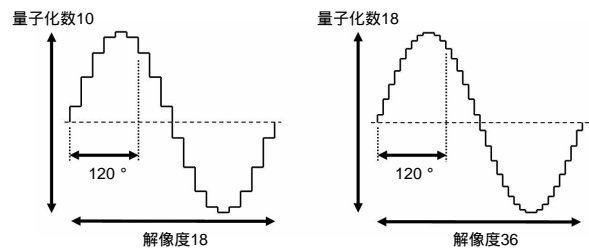
一般に、モータの騒音や振動を低減するには、巻線に印加される駆動電圧波形の歪を少なくし、正弦波形状に近づけるのが効果的である。そのためには駆動電圧波形の解像度を上げる必要があるが、過度な高解像度化は駆動回路規模の増加を招く。本開発では、比較的解像度が効果的に低騒音化を実現できる技術を検討した。

3.1 解像度と量子化数

駆動回路から出力される正弦波波形は、第2図に示すように一定の角度ごとに電圧出力値が離散的に変化する形状であり、横軸方向（角度）と縦軸方向（出力電圧値）で、それぞれある一定数で分割されている。駆動回路の規模を抑え、安価に正弦波駆動を実現するためには、これらの分割数を必要最小限に適正化する必要がある。

なお本稿では、以下、横軸の分割を解像度、縦軸の分割を量子化数と呼ぶ。

まず解像度について検討する。3相の正弦波出力をするには120°ごとに位相が異なる波形出力が必要となる。そのため、解像度は6の倍数が望ましい。6の倍数とすることで、120°の位置で出力電圧値が変化する波形となり（第2図）、ほかの相との位相関係を取りやすくなる。



第2図 正弦波の解像度と量子化数
Fig. 2 Resolution and quantization of waveform

量子化数は解像度によってほぼ決まる。たとえば、第2図に示すように、解像度が18であれば量子化数は10となり、解像度が36であれば量子化数は18となる。ここで解像度と量子化数の比に着目すると、解像度36の場合、量子化数はその半分の18であるが、解像度18の場合は量子化数が10であり、解像度18の半分より1つ多い。解像度に対して、量子化数が多いことは回路規模抑制の観点から非効率となる。

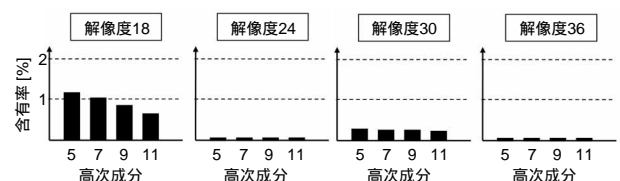
3.2 正弦波の高次成分

次に、出力波形の歪の観点から検討する。正弦波波形の歪はモータの騒音に影響を与える。特に低解像度の正弦波波形は多くの高次成分を含み、歪が大きい。

ここで筆者らは、高次成分の内、5次から11次程度の次数の低い成分が騒音に特に影響を与えていると考え、それらの成分の含有率に着目した。

解像度を18から36までの6の倍数とした場合の正弦波波形の高次成分を検討した結果を、第3図に示す。なお、量子化数は解像度の半分以下とする制限の元で検討した。

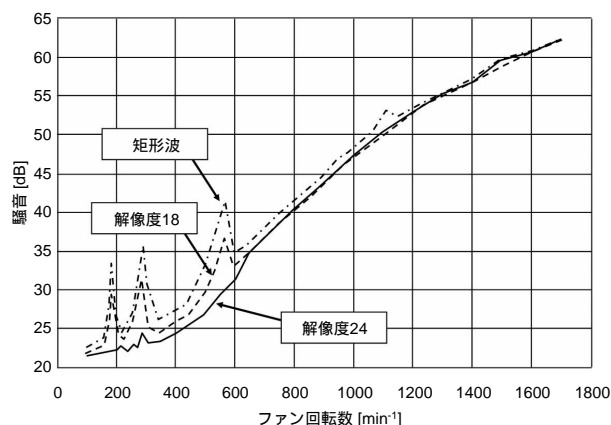
検討した解像度の中で、解像度が12の倍数である解像度24と解像度36は、5次から11次までの高次成分をほとんど含んでいないのに対し、解像度18や解像度30は高次成分を多く含んでいる結果となった。このことから、正弦波出力の解像度は、12の倍数とするのが量子化数を増やさず最も効果的に低騒音を実現できるとわかった。



第3図 解像度と高次成分含有率
Fig. 3 Resolution and content percentage of high order components

3.3 騒音比較

解像度の検討結果の効果を確認するため、2種類の解像度の正弦波駆動と従来の矩形波駆動とで騒音の比較を行った（第4図）。



第4図 騒音測定結果

Fig. 4 Acoustic noise

従来の矩形波駆動に比べ、解像度18の正弦波駆動は騒音が低減しているが、600 min⁻¹などに騒音のピークが残っている。これは、正弦波波形の高次成分によるトルク脈動が原因である。これに対し解像度24の正弦波駆動では、騒音のピーク値が5 dBから10 dB程度低減されており、解像度を12の倍数とすることの効果を確認できた。

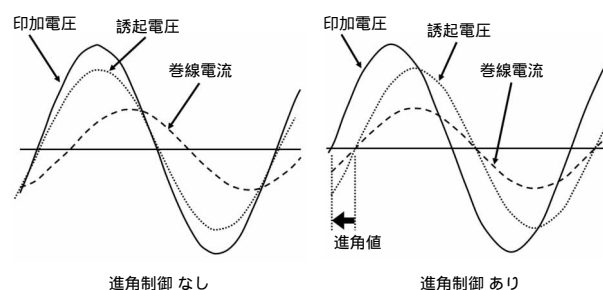
4. 高効率化

次に高効率化の取り組みについて説明する。一般にモータは、巻線に流れる電流が磁界を発生させ、永久磁石で形成されたロータを回転方向に引き寄せることで回転する。したがって、ロータの磁石の位置に合わせて巻線が磁界を発生させなければ、トルクを最大限に引き出すことができず、モータを高効率で駆動することができないため、巻線に電流を流すタイミングが重要となる。しかし、正弦波波形の電圧を巻線に印加すると、巻線のインダクタンス成分の影響でモータの回転数や負荷の大きさにより巻線電流の位相が変化してしまう。このため、巻線電流の位相の変化に合わせて巻線への印加電圧の位相を調節する必要がある。本開発では、この巻線電流の位相の変化によるトルクの減少、効率の低下を抑えるための進角制御について検討を行い、比較的低コストで実現可能な2つの制御技術を開発した。

4.1 進角制御

まず、進角制御について少し説明を加える。モータのトルクは、ロータ磁石の磁界と巻線の磁界が90°ずれているときに最大となる。言い換えれば、誘起電圧と巻線電流の位相を合わせることでトルクが最大となる。進角制御は、この両者の位相を合わせ、モータを高効率で駆動することを目的とした制御である。

その動作について、第5図を用いて具体的に説明する。



第5図 進角制御

Fig. 5 Phase adjustment control

進角制御を行わずに、たとえば誘起電圧と同じ位相で電圧を印加すると、巻線のインダクタンス成分により巻線電流の位相は遅れる（進角制御なし）。この遅れを補い、モータを高効率駆動するには、印加電圧の位相を進めて巻線電流の位相を進ませ、誘起電圧と巻線電流の位相を合わせる必要がある（進角制御あり）。この動作が進角制御である。また、このときの印加電圧の位相進み角度を進角値と呼ぶ。

この進角値は、モータの特性や回転数、負荷トルクによって最適値がさまざまに変化する。したがって、仮にあるポイントで進角値を最適に設定しても、回転数や負荷が変化して最適な進角値が設定した進角値より大きくなれば、巻線電流の位相は遅れ、また逆の場合は巻線電流の位相が進み過ぎ、どちらの場合もトルクを最大限に引き出すことはできない。

このように、進角制御は正弦波でモータを高効率駆動するために重要な技術である。そのため、従来は巻線電流の位相を直接検出するためにカレントトランスなどの高価な電流検出器を使用するなどして、進角制御を行っていた。

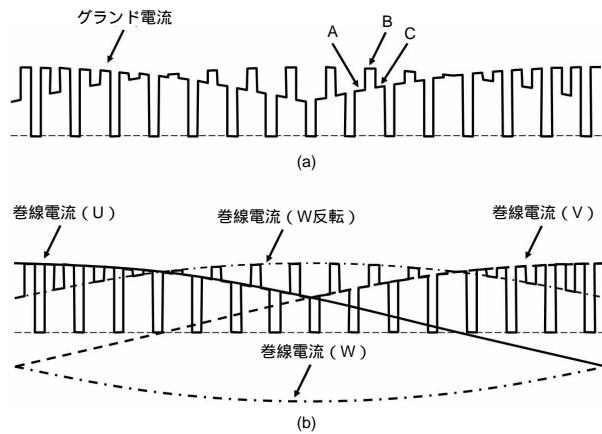
4.2 グランド電流検出による進角制御

進角制御を比較的低コストで実現するための1つめの制御技術として、駆動回路のグランド電流から巻線電流の位相を推定して進角制御を行う技術を開発した。

本稿では、エアコンなどの本体回路の主電源から駆動

回路のインバータを通して本体回路のグランドへ返る電流をグランド電流と呼ぶ（第1図）。ここで、インバータは6個のパワートランジスタで構成され、モータの巻線に電圧を印加し、電流を流す回路である。

グランドへと流れるグランド電流は、従来より過電流検出用として備わっている検出抵抗を用いて簡単に検出できるため、カレントトランスのような高価な電流検出器を必要としない。しかしながら、グランド電流は巻線電流とは異なり、第6図(a)に示すような凹凸波形の連続となっており、このグランド電流の波形から巻線電流の位相を推定するには工夫が必要である。



第6図 電流波形
Fig. 6 Current waveforms

筆者らは、このグランド電流から巻線電流の位相を検出するために、凹凸波形の形状に着目した。この凹凸波形を、第6図(a)に示すようにA, B, Cの高さの異なる部分に分けて捉え、Bの部分のみ、またはAとCの部分のみを結びと、第6図(b)に示すように、凹凸波形には巻線電流の情報が含まれていることがわかる。この特徴を利用し、グランド電流の凹凸波形を信号処理することで、巻線電流の位相を推定した。

この巻線電流の位相の推定結果を用いて、巻線に印加する電圧の位相を調整することで進角制御を行う。具体的には、巻線電流の位相情報と誘起電圧の位相情報を比較し、巻線電流の位相が誘起電圧の位相より遅れている場合、印加電圧の位相を進め、位相が合った時点で位相の調整を停止する。また、反対に電流の位相が進んでいれば、印加電圧を遅らせ、位相を合わせる。この動作を常時行うことで、たとえば回転数の変化により最適な進角値が変化した場合でも、巻線電流の位相と誘起電圧の位相は常に一致し、高效率を維持することができる。

4.3 モータ回転数による進角制御

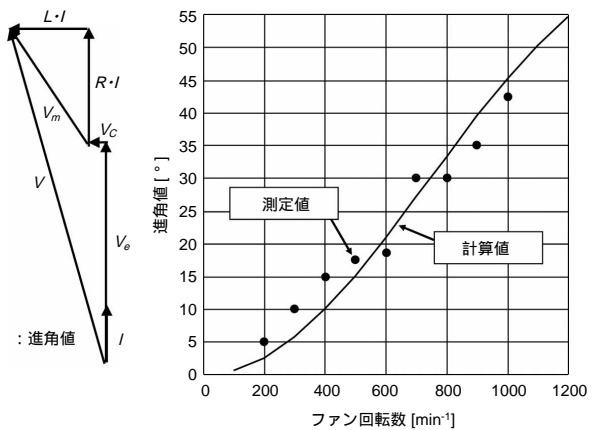
2つめの進角制御技術として、最適な進角値をモータの回転数から推定する技術を検討した。

前述したように、モータの最適な進角値は、その回転数と、負荷の大きさによって変化する。したがって、最適な進角値をモータの回転数のみで決めることはできない。しかし、エアコンなどのファン用途に用いられるモータでは、負荷の大きさはモータが回すファンの特性によって決まり、それは回転数の2乗におおむね比例することがわかっている。この特性を利用し、回転数から最適な進角値を推定する検討を行った。

進角値は、第7図に示すようなベクトル図で表すことができる。このベクトル図は、印加電圧 V から誘起電圧 V_e と巻線磁束の影響 V_c を引いた電圧 V_m と、巻線の抵抗 R 、インダクタンス L および巻線電流 I の関係を示している。このベクトル図を用いて、回転数から最適な進角値を推定する制御技術を検討した。

まず、最適な進角値の状態では、誘起電圧 V_e と巻線電流 I は同位相であるため、ベクトルは同じ方向を向くように定義する。そして、誘起電圧 V_e の大きさは回転数に比例し、巻線電流 I の大きさは負荷（トルク）に比例、すなわち回転数の2乗に比例した値とする。これらに、抵抗 R とインダクタンス L と巻線磁束の影響 V_c の大きさを条件として加えることで、最適な進角値を求めることができる。この進角値は、回転数のみの変数として計算でき、進角値とファン回転数の関係は、第7図に示すグラフのようになる。

この計算結果の妥当性を確認するため、実際に各回転数において効率が最大となる進角値を測定して第7図のグラフ上にプロットすると、ほぼ同一線上にあり、計算結果が正しいことが確認できた。

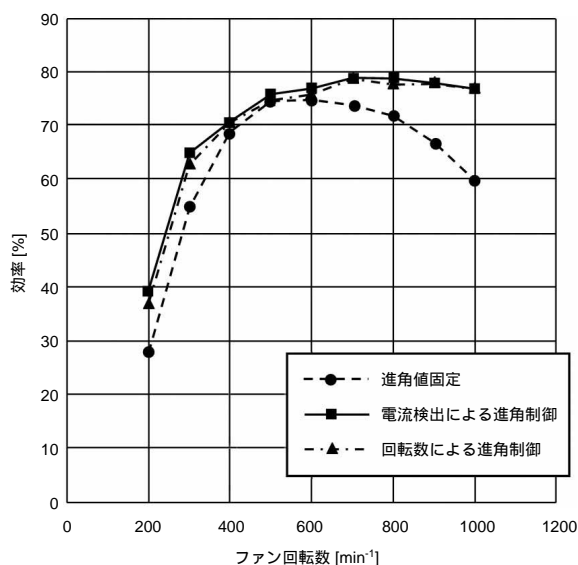


第7図 進角値と回転数の関係
Fig. 7 Relation between phase shift and speed

このグラフから、ファン用途に用いられるモータでは、回転数と最適進角値の関係はほぼ直線で近似できることがわかる。この特性を利用し、回転数に応じて進角値が比例して変化する制御を開発した。この制御では電流を検出する必要がなく、回転数の情報は従来より備わっているロータの位置検出器の信号から得られるため、低コストで実現が可能である。

4.4 効率比較

これらの2つの進角制御技術によるモータ駆動効率を確認した(第8図)。同グラフ上に、進角値固定(進角制御を行わない場合)の効率も合わせて示している。



第8図 効率比較

Fig. 8 Comparison of efficiency

進角値固定のモータは、進角値を15°に設定している。そのため、最適進角値が15°付近である500 min⁻¹では高効率となっているが、最適進角値から外れる低回転数、および高回転数では効率が極端に低下している。一方、電流検出による進角制御と、回転数による進角制御で駆動したモータは、低回転数から高回転数まで常に高効率を維持している。ここで、低回転数で効率が低いのは、回路による損失が支配的であるためである。

5. まとめ

以上のように、解像度を12の倍数とすることで低解像度でありながら効果的に低騒音を実現できる正弦波駆動技術と、従来より備わっている電流検出抵抗などを活用して進角制御を自動的に行い、高効率駆動を実現できる進角制御技術を2つ紹介し、その効果を示した。

これらの技術はIC化が容易で、従来の矩形波駆動モータと同等のコストを実現可能である。筆者らは、エアコン用ファンモータやドキュメント機器用モータの駆動ICにこれら技術の展開を進め、低騒音で高効率な正弦波駆動モータの普及拡大に努めている。

今後も省エネルギー化の流れは止まることはなく、高効率化が求められる。また、エアコン本体の防音構造の簡素化など、機器の省資源設計に対応するため、モータの低騒音化技術はますます重要になると考える。本技術の展開は、省エネルギー化、省資源化、低騒音化に貢献するものである。

著者紹介



杉浦賢治 Kenji Sugiura
モータ社 モータ開発研究所
Motor R&D Lab., Motor Company



八十原正浩 Masahiro Yasohara
モータ社 モータ開発研究所
Motor R&D Lab., Motor Company