

# 簡易な構成で高効率化を実現する ブラシレスDCモーター制御技術

Technology for Control of Brushless DC Motors to Achieve High Efficiency through Simple Configuration

會澤 敏満

小湊 真一

大村 直起

■ AIZAWA Toshimitsu

■ KOMINATO Shinichi

■ OMURA Naoki

ブラシレスDC (直流) モーターは、省エネ化や静音化の観点から情報機器や家電製品などに幅広く使用されるようになってきている。ブラシ付きモーターなど他のモーターとは異なり、モーターの回転位置に応じたフィードバック制御が必要で、駆動の高効率化には駆動電圧の位相を適切に調整しなければならない。しかし、モーター回転数や負荷トルクなどによって適切な駆動電圧の位相が変化するため、常に高効率で駆動するには複雑な制御が必要であった。

東芝は、高効率での駆動を簡単な制御で実現するため、モーター電流と誘起電圧の極性に着目し、それぞれの極性変化点を一致させるように駆動電圧の位相を自動で調整する技術を開発した。また、この機能を搭載した三相ブラシレスDCモータードライバー IC を2016年2月に製品化した。

Brushless DC motors are widely used in information equipment and home appliances due to their high efficiency and quiet operation. Unlike other types of motors such as brush motors, however, when driving them there is a need for feedback control according to the motor rotation angle. Furthermore, it is essential to appropriately adjust the phase of the drive voltage in order to achieve high efficiency, because the appropriate phase may change due to the operating status of the motor such as the rotation speed and load torque. Consequently, complicated control is required to drive brushless DC motors with high efficiency.

Against this background, Toshiba has developed a technology for brushless DC motors that achieves high efficiency without the need for complicated phase adjustment. Focusing on the polarity of the motor current and induced voltage, this technology makes it possible to automatically adjust the phase of the drive voltage by matching the point of change of each polarity. We have applied this technology to a motor driver integrated circuit (IC).

## 1 まえがき

製造業や家庭内の様々な機器に組み込まれたモーターで消費される電力は、国内の全消費電力量の約55%を占めるとも言われており<sup>1)</sup>、モーター省エネ化への対応が求められている。また、省エネ化だけでなく静音化の観点からも、各種ファンや、冷蔵庫、エアコン、プリンター、デジタル複合機など幅広い用途でブラシレスDCモーターが採用されるようになった。

ブラシレスDCモーターにはいくつかの種類があるが、一般的な、回転子表面に磁石を貼り合わせた形状を持つSPM (Surface Permanent Magnet) ブラシレスDCモーターを効率良く駆動させるには、駆動電圧の位相を調整 (進角制御) して誘起電圧とモーター電流の位相を一致させる必要がある。ベクトル制御と呼ばれる技術を用いて高効率駆動を実現できるが、制御が複雑である点や、モーター回転数や負荷トルクなどに応じて制御ゲインなどのパラメーター調整が必要である点が課題であった。

そこで東芝は、簡易な構成かつ調整不要でありながら、モーターの高効率駆動を実現する自動進角制御技術 InPAC (Intelligent Phase Control) を開発した。ここでは、InPACの原理と特長、及びこの機能を搭載したモータードライバー IC に

いて述べる。

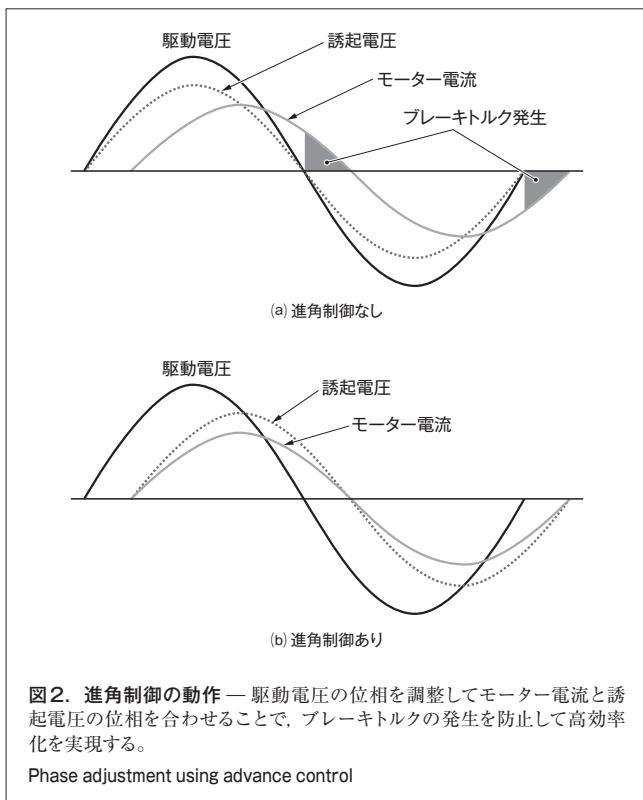
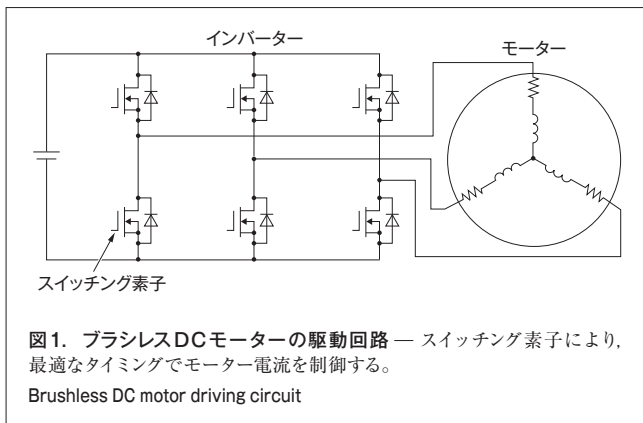
## 2 進角制御技術

### 2.1 ブラシレスDCモーターの駆動方式と進角制御

ブラシレスDCモーターの駆動回路の構成を図1に、進角制御の動作のようすを図2に示す。モーターを駆動するには、図1の上段及び下段のスイッチング素子 (MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ) やIGBT (絶縁ゲートバイポーラートランジスタ) など) をオン/オフし、巻線に流れる電流を適切に制御する必要がある。巻線にはインダクタンス成分があるため、電圧を印加してもすぐに電流は流れず、モーター電流に位相遅れが発生する。また、モーターの回転数が上がればインダクタンス成分の影響が大きくなり、位相遅れは更に大きくなる。

ブラシレスDCモーターの駆動方式には、モーターに矩形 (くけい) 波状の電流を流す矩形波駆動と、正弦波状の電流を流す正弦波駆動がある。正弦波駆動は、矩形波駆動に比べて電流の変化が滑らかになるのでトルク脈動が減り、静音化に対して有効である。

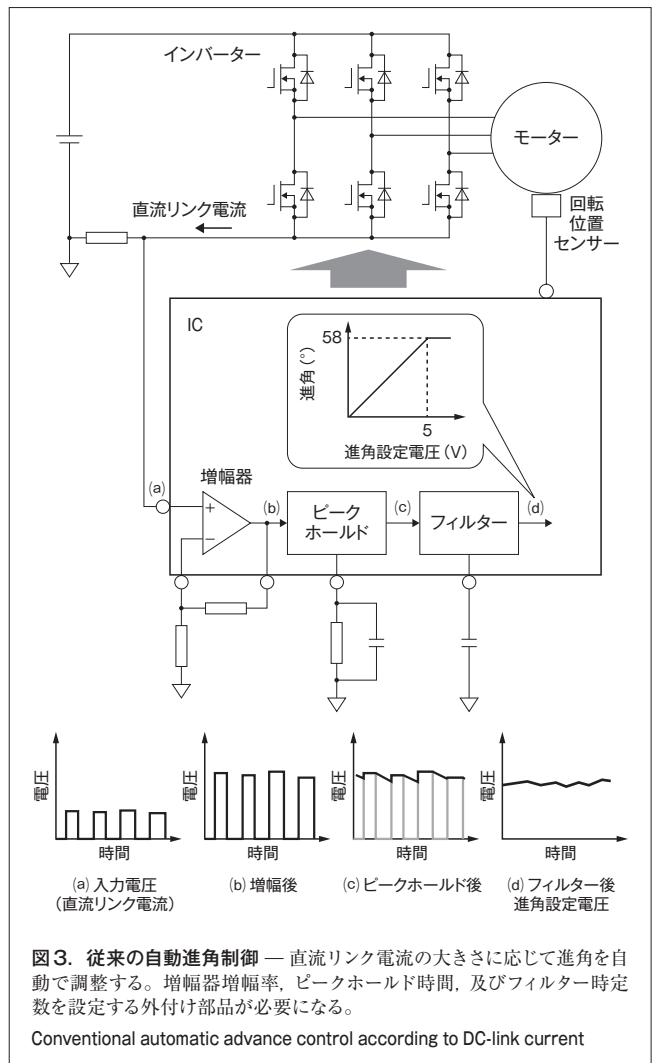
しかし、正弦波駆動の場合、各スイッチング素子は電気角



180°の全区間で通電しているので、誘起電圧に対してモーター電流の位相遅れが生じると、図2(a)に示すように、誘起電圧とモーター電流の符号が異なる領域ではトルクが負の値（ブレーキトルク）となり、モーターの効率が低下してしまう。そのため、誘起電圧とモーター電流の位相を合わせる 것이重要になる。

## 2.2 従来技術の課題

ブラシレスDCモーターを駆動する安価なシステムとしてモータードライバーICが利用されている。従来のモータードライバーICは、外部入力電圧で進角を設定する方法（固定進角制御）が採用されている。例えば、ある回転数での効率を良くするため、誘起電圧とモーター電流の位相が一致するように進角を固定した場合、回転数が下がると誘起電圧に対して



モーター電流の位相は進み、回転数が上がると遅れるため、位相を一致させた回転数以外での効率は低下してしまう。

図3に示すように、インバーターのGND（グラウンド）ラインに流れる直流リンク電流の大きさに応じて自動で進角を調整する方法がある<sup>(2)</sup>。この方法では、モーター電流に応じて直流リンク電流も大きくなることを利用しているが、増幅率やピークホールド時間などを調整するために、抵抗やコンデンサーなどの外付け部品と、それらの実機での合わせ込みが必要になる。また、モーターの運転状態によって進角は自動で変化するが、常に高効率となるように制御されるわけではない。

## 2.3 InPACの特長

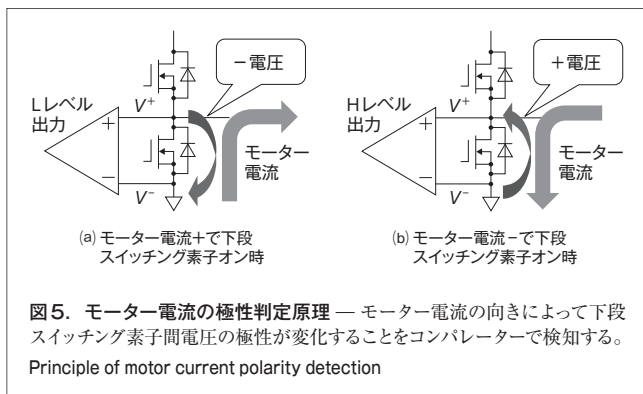
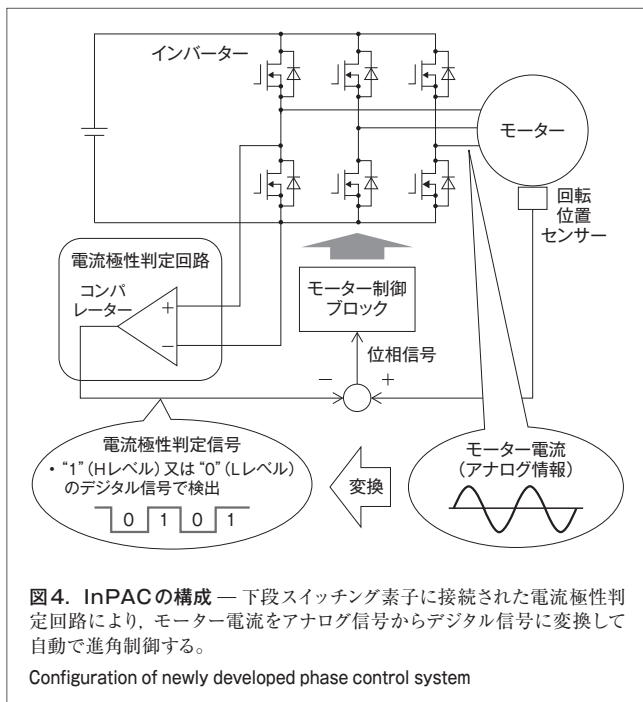
当社は、前節で述べた課題に対して、アナログのモーター電流を符号（極性）だけに変換したデジタル信号と、ホールIC（デジタル出力磁気センサー）などの回転位置センサーで検出した誘起電圧のデジタル信号との、両者の極性変化点を一致させるInPACを開発した<sup>(3)</sup>。

InPACの特長は、外付け部品が不要である点に加えて、モーターの運転状態に応じて自動で進角を調整することで高

効率駆動を実現できることから、従来技術に比べ構成が更に簡素化される点である。システムの構成を図4に、InPACでキーとなるモーター電流の極性判定原理を図5に示す。

電流極性判定回路では、モーター電流の極性に応じて、インバーターの各相出力の下段スイッチング素子に発生する電圧を利用する。モーター電流が下段スイッチング素子からモーターへ流れる正極性のときに下段スイッチング素子がオンすると、コンパレータ+端子の入力電圧 $V^+$ は-端子の入力電圧 $V^-$ 未満となる。このとき、コンパレータ出力はロー(L)レベルとなる(図5(a))。一方、モーター電流がモーターから下段スイッチング素子へ流れる負極性のときに下段スイッチング素子がオンすると、 $V^+$ は $V^-$ より高くなる。このとき、コンパレータ出力はハイ(H)レベルとなる(図5(b))。

この動作を基にして、回転位置センサーで検出した誘起電圧の極性変化点と比べ、電流極性判定回路の出力であるモーター電流の極性変化点が遅れている場合は駆動電圧の位相



を進め、モーター電流の極性変化点が進んでいる場合は駆動電圧の位相を遅らせる。その結果、誘起電圧の極性変化と電流極性判定回路の出力変化のタイミングが一致するように、自動で駆動電圧位相を調整することができる。

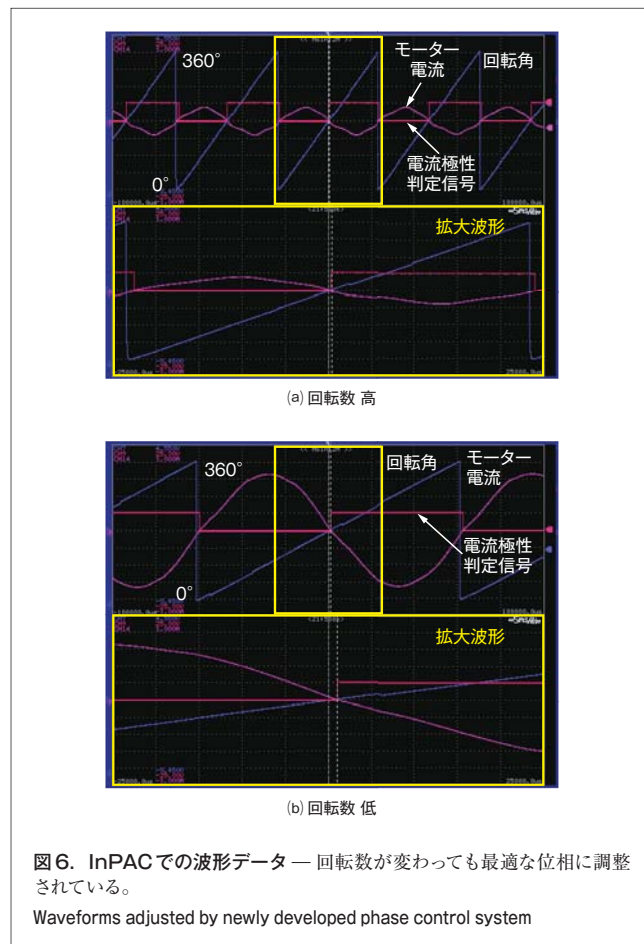
### 3 InPACの動作検証結果

InPACの実験用回路を試作し、トルク試験機を使って回転数を変えて、ブラシレスDCモーターの駆動実験を行い評価した。

検証実験は回転数が高い場合と低い場合の2ケースを実施し、それぞれの場合で測定したモーター電流、電流極性判定信号、及び回転角の波形の例を図6に示す。モーターの回転角は、回転位置センサーで検出した角度と回転位置センサーのエッジ間隔から求めた速度より算出しており、誘起電圧の位相と一致している。回転角とモーター電流との位相ずれは、回転数が高い場合で $2.1^\circ$ 、低い場合で $3.0^\circ$ と非常に小さく、負荷トルクによらず自動で進角制御ができることを確認した。

### 4 モータードライバー IC への搭載

InPAC 機能を搭載した三相ブラシレスDCモータードライ



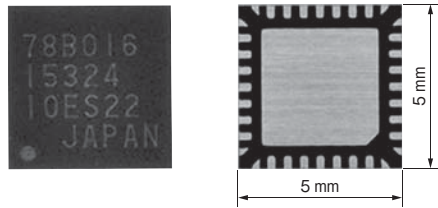


図7. TC78B016FTG — 小型パッケージを採用し、InPAC機能を搭載した。  
TC78B016FTG three-phase brushless DC motor driver IC

表1. TC78B016FTGの主な仕様

Main specifications of TC78B016FTG

項目	仕様
電源電圧(動作範囲)	6 ~ 30 V
出力電流(動作範囲)	3 A
駆動方式	正弦波駆動方式
進角制御	InPAC機能
回転位置センサー	ホール素子及びホールICに対応
速度制御入力	PWM信号入力及びアナログ電圧入力に対応
異常検出機能	過熱検出, 過電流検出, モーターロック検出
出力オン抵抗(上下段の和)	0.23 Ω (typ.)
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>ソフトスタート機能, 加減速レート設定機能</li> <li>回転方向切替え端子, ブレーキ端子付き</li> <li>電源電圧昇圧防止機能</li> </ul>
パッケージ	WQFN36 (サイズ: 5 × 5 × 0.8 mm)

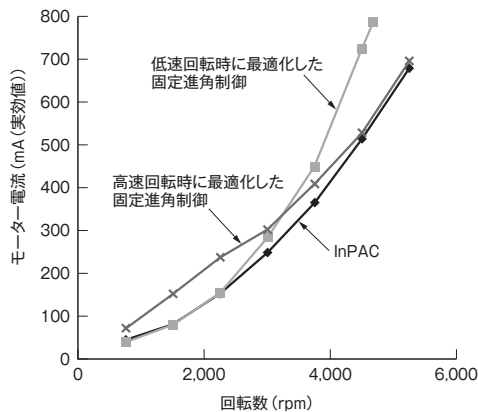


図8. モーター電源の削減効果 — 3,000 rpmの回転時、従来の固定進角制御に比べてモーター電流を約10%削減できる。  
Reduction of motor current achieved by TC78B016FTG

バー IC TC78B016FTGを製品化した。パッケージ外観を図7に、主な仕様を表1に示す。

TC78B016FTGでは、PWM(パルス幅変調)のデューティ比を変更することで回転数を制御できる。またホールアンプを内蔵し、回転位置センサーとして、ホールICだけでなくアナログ出力のホール素子にも対応している。小型パッケージの採用に加え、外付けの調整部品も不要であり、限られた実装

スペースで、常に高効率なモーター駆動を実現できる。

TC78B016FTGを使用した場合のモーター電流の低減効果を図8に示す。固定進角制御機能で低速回転時に最適化した場合と高速回転時に最適化した場合、及びInPAC機能を使用した場合の回転数とモーター電流の関係を表しており、InPACでは回転数によらず常に最適化された位相制御となっていることがわかる。回転数が3,000 rpmでは、従来の固定進角制御に比べてモーター電流を約10%削減できることを確認した。

## 5 あとがき

ブラシレスDCモーターの駆動回路において、インバーターの各相出力の下段スイッチング素子に流れる電流によって発生する誘起電圧から検出したモーター電流の極性変化点と、回転位置センサーで検出した誘起電圧の極性変化点を自動で調整することにより、モーターの回転数や負荷トルクなどによらず常に高効率な制御が実現できるInPACを開発した。InPACは簡易な構成であることからモータードライバー ICへの組込みが可能になり、今回TC78B016FTGに搭載した。

今後も当社は、更なる高効率化や適用可能なモーターの拡大を目指して技術開発を進めていく。

## 文 献

- 資源エネルギー庁. 平成21年度省エネルギー設備導入促進指導事業(エネルギー消費機器実態等調査事業) 報告書. 2010-03, IAE-0919107, 97p.
- 東芝. “半導体&ストレージ製品 TB6556FG”. <<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/product/linear/motordriver/detail.TB6556FG.html>>, (参照 2017-3-8).
- 會澤敏満 他. “調整レスによる高効率を実現するモーター制御技術”. 平成29年電気学会全国大会論文集4. 富山, 2017-03, 電気学会, 2017, p.39.



會澤 敏満 AIZAWA Toshimitsu

生産調達統括部 生産技術センター 制御技術研究部主任研究員。パワーエレクトロニクス及びモータードライブの研究・開発に従事。  
Control Technology Research Dept.



小湊 真一 KOMINATO Shinichi

生産調達統括部 生産技術センター 制御技術研究部研究主務。パワーエレクトロニクス及びモータードライブの研究・開発に従事。  
Control Technology Research Dept.



大村 直起 OMURA Naoki

ストレージ&デバイスソリューション社 ミックスドシグナルIC事業部 ミックスドシグナルIC応用技術部参事。モータードライバー ICの商品企画及び応用技術の開発に従事。  
Mixed Signal IC Div.