方形波ブラシレス DC モータの通電角による効率比較

Comparison of efficiencies depending on excitation angle of a square-wave brushless DC motor

野口 俊介^{*1}(学生員), 鈴木 憲吏^{*1}(正員), 百目鬼 英雄(正員)^{*1}

Shunsuke NOGUCHI(Stu.Mem.), Kenji SUZUKI (Mem.), Hideo DOHMEKI(Mem.)

There is a method to excite by a square wave as a simple method of the brushless DC motor drive. The simplest method is 120° excitation method used the Hall sensor output. But the method has part inferior in terms of efficiency. However, the efficiency can be clearly improved by extending excitation angle or advancing current phase angle, in spite of square wave excitation. In this paper, we measure the motor efficiency using these methods, and inspect their validity experimentally.

Keywords: brushless DC motor, square wave, efficiency, excitation angle, 150deg excitation.

1 はじめに

近年家電や FA 機器, 車載部品など組み込み用途で利用される小型のモータには, 従来多用されてきた直流モータに代わりブラシレス DC モータ (brushless DC motor) の利用が増加している。ブラシレス DC モータは PMSM と類似した構造となり, スロットコンビネーションにより特性が異なる[1]。

特に 10 極 12 スロット構造のモータにおいては, 誘起電圧の波形が正弦波に非常に近くなり, コギングトルクも他のスロットコンビネーションより小さくなることから, 正弦波で通電を行う AC サーボモータとしては優れた特性を持つ。しかしながら, このモータをブラシレス DC モータとして方形波で通電を行うと, 特性劣化が実用上の問題となっている。

BLDC モータの振動・騒音低減法は古くから研究が行われており, 定性的な改善法が広く知られている[2]。しかし, 通電角の拡大や位相調整について振動・騒音の観点から検討した報告は見かけられるものの[3]-[8], ホール素子駆動時の通電角と効率特性の関係について検討した論文は見受けられない。

そこで本稿では, 10 極 12 スロットのモータを方形波で通電しブラシレス DC モータとして駆動させることを前提として, ホール IC とカウンタを用い高度な制御を行わずに通電時の方形波の通電角を延長すること

や通電位相を進め電流の遅れを補償することで, 特に効率の改善が簡易に図れることを実験的に検証した。

2 通電方式と効率改善の手法

2.1 ブラシレス DC モータの通電方式

ブラシレス DC モータは制御回路を経由してモータに通電する。磁極位置に合わせ周期的に通電を切り替えるため, 制御回路からは交流が出力され, その通電波形によりブラシレス DC モータの特性が変化する。通電波形は大別すると, 方形波通電と正弦波通電の 2 種類となる。Table 1 に方形波通電と正弦波通電の特徴をまとめる。

正弦波通電を行うと制御精度や効率, 騒音の面で優れるが, システムが複雑になり高価になる。対して方形波通電では精度, 効率, 騒音では正弦波通電に劣るものの, システムは簡易で安価になる特徴がある。加えて正弦波通電を行うためにはマイコン等による高速で複雑な演算が必要となるが, 方形波通電ではその必要はなく, 最小限の機能のみに特化すればハードウェアのみでの構成も可能となる[2]。そのため, 本稿では簡易で安価な方式である方形波通電に着目し, この方式において効率の変化を検証することを目的とした。

2.2 方形波 120° 通電方式

方形波通電方式のうち最も簡易で一般的なものは 120° 通電方式である。Fig.1 の通電波形イメージのよ

連絡先: 野口 俊介, 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 10 号館 1 階, 東京都市大学工学研究科 電気電子工学専攻 電気機器研究室
e-mail: g1481314@tcu.ac.jp

^{*1} 東京都市大学 電気機器研究室

うに電気角半周期のうち 120° を通電する方式で、残りの 60° は無通電期間となり誘起電圧が現れる期間となる。三相のブラシレス DC モータにおいては通電相が電気角 60° ごと切り替わるため、6つの通電パターンをもつことから「6ステップ通電」とも呼ばれる。またブラシレス DC モータの位置センサで一般的に用いられるホールセンサの分解能も電気角 60° であることから、 120° 通電方式との相性も良く、ホール出力からロジックのみで通電パターンを生成することも可能である。無通電期間に現れる誘起電圧を利用しゼロクロスを検出することで容易にセンサレス制御も実現することが可能となる。ゆえに最低限のリソースで実現が可能な通電方式であるといえる。

この方式は簡易、低コストであるという長所に対し正弦波通電に比して効率が良くない、騒音が大きい、トルクリプルが大きくなるといった短所が知られている。その原因として、力率の低下、すなわち方形波で通電をしたことによる電流位相の遅れ、並びに方形波電流の波形そのものによる影響がある。ここで、Maplesoft 社の maplesim を用いてブラシレス DC モータを 120° 通電で駆動させた時のシミュレーションを行った。電圧波形、電流波形のシミュレーション結果をそれぞれ Fig.2, Fig.3 に示す。なお、回転速度は 2500rpm、負荷トルク 0.06Nm としてシミュレーションを行った[10]。

一般にブラシレス DC モータは誘起電圧の位相に合わせて電流を流すことで最大の効率を得ることができる。電圧は Fig.2 の通り誘起電圧の位相に合わせて印加できているが、Fig.3 の電流波形を見ると、モータのインダクタンスによる時定数の関係から、電圧の立ち上がりから遅れて電流が立ち上がっており、結果として位相遅れが生じていることが分かる。また、電流波形そのものが方形波に酷似し、低次高調波の多い形となっていることも分かる。そのため、電流の位相遅れ並びに波形改善が行えれば効率の向上が可能になることが推測される。

Fig.1 120degree excitation waveform image.

Table 1 Features of the square wave excitation and sine wave excitation.

Excitation waveform	Square wave	Sine wave
System configuration	Simple	Complicated
Control accuracy	Low	High
Costs	Low	Expensive
Noise	Loud	Quiet
Efficiency	Low	High
Torque Ripple	Large	Small

Fig.2 Voltage waveform of 120degree excitation (simulation result, 2500rpm, load : 0.06Nm).

Fig.3 Current waveform of 120degree excitation (simulation result, 2500rpm, load : 0.06Nm).

2.3 方形波通電における効率改善の手法

前節のシミュレーション結果より、電流位相遅れの補償並びに電流波形の改善により効率が向上する可能性があることが分かった。そこで、次の2つの手法を検証することとした。

- 1) 通電期間を前側に延長し、通電期間を延ばす
- 2) 通電タイミングを前倒しし、電流位相を進める

1)に関しては通電を終えるタイミングは 120° 通電

時と同じで、通電開始タイミングを前倒しし通電期間を 150° 程度まで延長する手法である。Fig.4 に一例として 150° 通電波形のイメージを示す。2) に関しては通電期間は 120° のまま、通電位相を全体的に前倒しし電流位相遅れを補償する手法である。なお双方とも通電を前倒しする方向であるが、電流の遅れを解消する意図であるため通電を後ろ側にずらすことについては検討を行っていない。

これら手法についても、maplesim を用いて通電波形のシミュレーションを行い、改善が見込めるかどうか検証を行った。シミュレーションでは、 120° 通電を電気角で 30° 分前側に延長し、 150° 通電を想定した。この時の電圧波形を Fig.5 に、電流波形を Fig.6 に示す。

Fig.5, Fig.6 を見ると、電圧を 120° 通電時から 30° 分早いタイミングで印加を始めたことにより、 120° 通電時で電圧の印加が始まるタイミングには電流は十分に立ち上がって流れている状態となっている。すなわち電流位相を進められていると見受けられる。また通電開始から電流が最大になるまでの電流の立ち上がり方が緩やかになり、総じて電流の波形が正弦波により近くなりピーク値も低下していることが分かる。

これらのシミュレーション結果から、通電期間の延長及び電流位相を進めることが効率向上に有効であると考えられる。

そこで、これらの手法を用い、実機において実際に効率の測定を行い、効率が向上するか検証を行うことにした。

3 通電方式の違いによる効率比較

3.1 効率の測定方法

効率を測定するための機器構成を Fig.7 に示す。またブラシレス DC モータ駆動のための制御回路を Fig.8 に示す。トルク計を用いて軸トルク τ と回転数 n を測定し、制御回路に設けた電圧計と電流計によりインバータ部のリンク電圧 V_{dc} 及びリンク電流 I_{dc} を測定した。この測定では、オリエンタルモーター製のブラシレス DC モータ、BLH230K-A を使用した。このモータの諸元を Table 2 に示す。なお前述のシミュレーションにおけるモータはこのモータをモデルとした。

モータの効率 η は、出力 P_{out} と入力 P_{in} の比で求められることから、次式によって算出した。なお損失は入力 P_{in} と出力 P_{out} の差とした。

$$P_{in} = V_{dc} \times I_{dc} \quad (1)$$

$$P_{out} = \tau \times \frac{2\pi n}{60} \quad (2)$$

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Fig.4 150degree excitation waveform image.

Fig.5 Voltage waveform of 150degree excitation (simulated by maplesim, 2500rpm, load : 0.06Nm).

Fig.6 Current waveform of 150degree excitation (simulated by maplesim, 2500rpm, load : 0.06Nm).

3.2 通電角延長時の効率比較

まず実機において、ホール IC による位置情報とタイマカウンタを用いて通電角を 120° から 180° まで 15° ずつ変化させた時の電圧及び電流波形を Fig.9 に示す。通電角が確かに 15° ずつ延長されていることが確認できるとともに、前述の 120° と 150° のシミュ

レーション波形と比べて電圧、電流とも酷似した波形が実際に観測できていることが分かる。また通電角が 150° に近づくとつれ電流波形は正弦波に近くなり、電流振幅も最も小さくなっている。

通電角を延長させることができていることが確認できたため、次に通電角を電気角 15° ずつ延長したときの効率を比較する。測定は、定格速度(2500rpm)、低速(600rpm)、高速(3000rpm)のそれぞれにおいて定格負荷(0.12Nm)をかけた時の電圧を基準に一定とし、負荷を増減させ軸トルク、回転数、リンク電圧、リンク電流を測定することにより効率を算定した。

Fig.10 に定格速度時の効率の変化を示す。同様に Fig.11 に低速時のものを、Fig.12 に高速時のものを示す。また Table 3, Table 4, Table 5 にはそれぞれ定格速度時、低速時、高速時における各通電角の最大効率と損失をまとめた。

定格速度時、低速時、高速時で最大効率は異なるものの、いずれの結果からも通電角を延ばすことで効率が改善できることが分かるが、 150° 程度のときに最大効率を得られる通電角となっており、 150° を超えてさらに通電角を延長すると効率が低下することが分かる。また低速時以外では 150° 程度の時に損失も最小となる。低速時は通電角拡大に伴って損失が増加する傾向にあるため、通電角拡大による効率の変化が小さく考えられる。

定格速度時で比較すれば、一般的な 120° 通電では 64.3%の効率であるのに対し、 150° に延長することで 67.6%と約 3%効率が向上した。低速、高速においても 120° 通電より 150° 通電の方が 1%~2%効率が向上する結果となった。従って 150° 通電により効率が向上し、かつ電流波形の改善も図れることがいえる。

3.3 電流位相進相時の効率比較

電流位相を 0° から 15° ずつ 60° まで進めた時の電圧並びに電流波形を Fig.13 に示す。通電角延長時と同様ホール IC による位置情報とタイマカウンタにより電流位相を進相させた。通電角はいずれも 120° のままであるが、通電位相を早めるとともに電流位相が進んでいることが確認できる。また進み角を大きくしていくと進み角 0° 時の電流波形の尖りが丸まってくるが、通電角を延ばした時のように波形が正弦波に近づくことは見受けられない。なお電流のピーク値は進み角 15° のときに最小となった。

電流位相進相時も通電角延長時と同様に、定格速度時において効率の変化を測定した。効率の変化を Fig.14 に、進み角ごとの最大効率と損失を Table 6 にまとめた。

進み角を大きくしていくと、進み角 15° までは効率が向上しているがそれ以降は効率が低下する様子がみられる。進み角 15° 程度が最大効率を得られる進み角となっており、進み角 0° の効率 64.3%から 2.5%程度向上し 66.7%となった。損失も進み角 15° 程度の時に最小となった。ただし、同じ条件において 150° 通電を行った場合の効率は前述の通り 67.6%となり電流位相を進める場合よりもより高い効率が得られ、かつ電流波形の改善も行える。ゆえに、電流位相を進める方法においても効率の向上は図れるものの、 150° 通電のように通電角を延長する方法の方が、効率を含めモータの駆動特性をより向上させることが可能であるといえる。

Fig.7 Configuration of the experimental equipments.

Fig.8 Circuit of the brushless DC motor controller.

Table 2 Specification of brushless DC motor[9].

Model	BLH230K-A
Number of slots	12
Number of poles	10
Typical voltage	DC24[V]
Typical output	30[W]
Typical torque	0.12[Nm]
Typical current	2.1[A]
Typical speed	2500[rpm]
Speed control range	100~3000[rpm]

Fig.9 Voltage and current waveform of the excitation angle during extension. The left figure is the voltage waveform, and the right one is the current waveform.

Table 3 Maximum efficiency of each excitation angle(typical speed).

Excitation angle	Torque[Nm]	Efficiency[%]	Loss[W]
120°	0.101	64.3	15.6
135°	0.092	65.8	13.6
150°	0.100	67.6	13.5
165°	0.101	67.4	13.6
180°	0.110	62.4	18.1

Table 4 Maximum efficiency of each excitation angle (low speed).

Excitation angle	Torque[Nm]	Efficiency[%]	Loss[W]
120°	0.047	54.5	3.93
135°	0.050	55.8	3.94
150°	0.050	55.7	4.01
165°	0.061	52.5	5.41

Table 5 Maximum efficiency of each excitation angle(high speed).

Excitation angle	Torque[mNm]	Efficiency[%]	Loss[W]
120°	100.5	68.3	15.5
135°	100.2	69.3	14.7
150°	100.0	70.9	13.6
165°	109.9	70.4	15.1

Fig.10 The efficiency characteristics due to the change in the excitation angle(typical speed).

Fig.11 The efficiency characteristics due to the change in the excitation angle(low speed).

Fig.12 The efficiency characteristics due to the change in the excitation angle(high speed).

Fig.13 Voltage and current waveform when advancing the current phase. The left figure is the voltage waveform, and the right one is the current waveform.

Fig.14 The efficiency characteristics due to the change in the excitation lead angle.

Table 6 Maximum efficiency of each excitation lead angle.

Lead angle	Torque[Nm]	Efficiency[%]	Loss[W]
0°	0.101	64.3	15.6
7.5°	0.111	66.4	15.1
15°	0.102	66.7	14.1
22.5°	0.099	66.2	14.2
30°	0.101	65.1	15.3

4 まとめ

本稿では、ブラシレス DC モータの通電方式の一つである方形波通電方式は効率が良くないという特徴を持つが、その通電角や電流位相を変化させることで効

率を向上させることが可能であることを検証した。

電流位相を 15° 進めることで一般的な方形波通電である 120° 通電時の効率から 2.5% 向上させることが可能であることが判明した。しかし通電角を 120° から 150° に延ばすことで 120° 通電時よりも 3% の効率向上、すなわち電流位相を進めるよりもより高い効率向上が図れ、 150° 通電により方形波通電でありながら正弦波に類似した電流波形が得られることも確認することができた。

以上より、 150° 通電方式を採用することで、簡易な方形波通電でありながら効率含めブラシレス DC モータの駆動特性の向上を手軽に、安価に実現できるといえる。また方形波通電であることからゼロクロスを用いたセンサレス制御への適用も容易に行えるものと推測される。

(2015 年 4 月 21 日受付)

参考文献

- [1] M. Yoneda, H. Dohmeki: "Novel Selection of the Slot/Pole Ratio of the PMSM for Auxiliary Automobile", 41st IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.8-13, 2006.
- [2] 百目鬼英雄, 高効率モータ技術, 日刊工業新聞社, 2001.
- [3] 城ノ口秀樹, 森山正和, 稲山博英, 通電角・通電位相最適化によるブラシレスモータの高効率制御, 電気学会回転機研究会資料, Vol.RM-04, No.161-178, pp.27-32, 2004.
- [4] 吉田昌春, 村井由宏, 高田昌亨, ブラシレスモータの騒音低減に関する研究, 電気学会回転機研究会資料, Vol.RM-97, No.107-110, pp.7-12, 1997.
- [5] Masataka Miyamasu, Kan Akatsu: "Efficiency Comparison between Brushless DC Motor and Brushless AC Motor Considering Driving Method and Machine Design", *Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Vol.37th, Vol.2, pp.1830-1835, 2011.
- [6] WANG Chao - Min, LIN Shir - Kuan, LIN Hsing - Yu, WANG Shyh - Jier: "A Novel Twelve-Step Sensorless Drive Scheme for a Brushless DC Motor", *IEEE Trans Magn.*, Vol.43, No.6, pp.2555-2557, 2007.
- [7] LELKES A, KROTSCH J, DE DONCKER R W: "Low-Noise External Rotor BLDC Motor for Fan Applications", *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl.*, Vol.37th, Vol.3, pp.2036-2042, 2002.
- [8] 川端幸雄, 遠藤常博, 高倉雄八, 石井誠, 位置センサレス・ブラシレス DC モータの新起動法に関する検討, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.11, pp.1531-1538, 2006.
- [9] オリエンタルモーター株式会社, 2014, BLH230K-A | BLH シリーズ, (2014 年 9 月 27 日取得, <https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=BLH230K-A>).
- [10] Waterloo Maple Inc., 2014, MapleSim User's Guide, (2014 年 9 月 28 日取得, http://www.maplesoft.com/documentation_center/maplesim6/MapleSimUserGuide_Japanese.pdf).