自己始動形永久磁石同期電動機の始動特性解析 — 時間差分の影響 —

正員 栗原和美 (茨城大) 学生員 馬場雄一郎 (茨城大)
学生員 仲田徹 (茨城大) 正員 久保田朋次 (茨城大)
正員 高宏偉 (オリエンタルモーター)

Starting Performance Analysis of Self-Starting Permanent Magnet Synchronous Motor — The Effect of Time Step —

Kazumi Kurihara, Member, Yuichiro Baba, Student Member, Tohru Nakada, Student Member,
Tomotsugu Kubota, Member (Ibaraki University), Hong Wei Gao, Member (Oriental Motor Co., Ltd.)

This paper presents the best choice of a time step for the starting performance analysis of self-starting permanent magnet synchronous motor in which the time-stepped finite element technique is used. The agreement between computed and measured values of the slip in starting is good.

キーワード：永久磁石同期電動機，始動特性，空間高調波，有限要素法，時間刻み幅

1. ま え が き

近年，地球環境問題の観点から，商用電源で駆動する電動機の高効率化が強く求められている。高効率化対策の一つとして，回転子にかご形巻線をもつ永久磁石同期電動機が注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。この電動機の特長は高い効率・力率積が容易に実現可能なことにある⁽¹⁾。しかし，始動時には永久磁石によるブレーキトルクが発生し，誘導電動機に比較して始動時の平均トルクが小さくなる欠点がある。特に同期引き入れトルクが小さくなり，負荷の慣性モーメントが大きい場合，同期に入らない場合が起こる。このため，電動機は勿論，負荷の慣性モーメントを考慮した始動時の過渡特性を把握することは重要である。本研究では著者らの一部が開発した「有限要素法による永久磁石同期電動機の過渡特性の解析法」⁽³⁾を用いてシミュレーションを行った。解析結果と実験結果の比較から，空間高調波による始動電流，始動トルクへの影響を考慮して，時間刻み幅 Δt を十分小さな値に設定しなければならないことが明らかになった。

2. 解析方法

永久磁石同期電動機の始動時における機械運動方程式を次式に示す。

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_l \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで， T ：電動機の発生トルク， J ：回転体の慣性モーメント， θ ：回転体の回転角， T_l ：負荷トルク

$d^2\theta/dt^2$ の項を前進差分近似すると次式を得る⁽³⁾。

$$\theta^t = \frac{(\Delta t)^2}{J} (T^{t-\Delta t} - T_l^{t-\Delta t}) + 2\theta^{t-\Delta t} - \theta^{t-2\Delta t} \quad (2)$$

ここで， T の計算には比較的少ないメッシュで高精度のトルク値が求まる iBl 則による方法を用いた⁽⁴⁾。また，機械角速度 ω_m は次式から求まる。

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

解析法の詳細については，文献(3)で報告してあるのでここでは省略する。

3. 解析結果と実験結果の比較

図1に本解析に用いた試験機の回転子断面(1極分)を示す。試験機は三相，4極機で固定子には定格出力600W，スロット数24の標準の誘導電動機のを，永久磁石には38MGOeのNd-Fe-B磁石をそれぞれ使用した⁽¹⁾。試験機は試作機であり，特に定格電圧は定まっていないが，無負荷時の端子電圧に対する入力電流特性(V曲線)から力率がほぼ1であり，十分な始動トルクが得られる140Vを定格

図1 試験機の回転子断面図(1極分)

Fig. 1. Cross section of experimental rotor.

電圧に選んだ⁽¹⁾。

著者らの一部は文献(5)において空間高調波の影響を考慮した永久磁石同期電動機の定常負荷特性解析を示した。この文献では、電動機が同期速度で一定回転している場合を考え、 Δt を固定子1スロットピッチの1/4の移動に必要な時間、即ち $417\mu\text{s}$ 以下に選べば、平均トルクが正確に求まることを述べた。試験機の固定子は文献(5)のものと同一であるが、回転子は銅バー形状、スロットの数と形状、磁石材料等が相違している。図2に出力に対する入力電流を示す。図中の $208\mu\text{s}$ 、 $52\mu\text{s}$ はそれぞれ固定子1スロットピッチの1/8、1/32の移動時間である。 $\Delta t=208\mu\text{s}$ 、 $52\mu\text{s}$ の場合の計算値は互いによく一致し、また、実験値ともよく一致していることがわかる。これにより*iBl*則を用いたトルク計算方法⁽⁴⁾の妥当性が確認できた。

次に、図3、図4に時間*t*に対するすべり特性を示す。ここで、 $J=2.774 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ で回転子単体の慣性モーメントの約18.6倍である。また、 T_l は零である。図3から、 Δt の値の相違により、時間に対するすべり波形、加速時間が大きく相違することがわかる。なお、 $\Delta t=26\mu\text{s}$ の計算値と $52\mu\text{s}$ の計算値は完全に一致するので、 $\Delta t=26\mu\text{s}$ の計算値は図では省略した。以上から、始動特性解析では、 Δt は同期速度における固定子1スロットピッチの1/32の移動時間以下に設定しなければならないことが明らかになった。図4に、 $\Delta t=52\mu\text{s}$ の計算値と実験値の比較を示す。図から、計算値と実験値がよく一致していることがわかる。また、表1に示すように同期速度に達する時間は計算値で2.38s、実験値で2.35s、誤差1.28%でよく一致していることもわかった。

4. む す び

ここでは、時間刻み有限要素法による自己始動形永久磁石同期電動機の始動特性解析を行った。始動時の過渡特性解析において、時間刻み幅を適切な値以下に設定しなければならないことが明らかになった。試験機では、同期速度における固定子1スロットピッチの1/32の移動時間即ち、時間刻み幅を $52\mu\text{s}$ 以下に設定した場合に計算値と実験値がよく一致し、正確な始動特性解析が行えることがわかつ

図2 入力電流－出力特性

Fig. 2. Input current characteristics versus output.

図3 時間－すべり特性 (計算値)

Fig. 3. Computed slips versus time.

図4 時間－すべり特性

Fig. 4. Computed and measured slips versus time.

表1 同期速度に達する時間

Table 1. Starting time.

	計算値	実験値
同期速度に達する時間	2.38 s	2.35 s

た。なお、紙面の都合で時間刻み幅 $208\mu\text{s}$ 、 $104\mu\text{s}$ 、 $52\mu\text{s}$ の計算値のみを示したが、他の設定値での計算結果からも $50\mu\text{s}$ 以下が良いという結論になった。これは、(1)式に前進差分近似を適用したためで、時間刻み幅における速度変化に許容上限があるものと考えられる。

(平成12年12月25日受付、同13年1月23日再受付)

文 献

- (1) 例えば、K.Kurihara, et al.: "Small High Efficiency Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors", *Proc. of IPEC-Tokyo*, 1290, (2000)
- (2) 例えば、平野、他: 「新高効率モータと応用」、安川電機技報, **62**, 290 (平10)
- (3) 栗原、他: 「有限要素法による永久磁石同期電動機の過渡特性解析」、電学論D, **114**, 551 (平6-5)
- (4) K.J. Binns, et al.: "The Efficient Evaluation of Torque and Field Gradient in Permanent-Magnet Machines with Small Air-Gap", *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-21**, 2435 (1985)
- (5) K.Kurihara, et al.: "Steady-State Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors Including Space Harmonics", *ibid.*, **MAG-30**, 1306 (1994)