

コギングトルク低減のためのスキュー条件最適化

高野剛次*

Optimization of Skew Angle for Cogging Torque Reduction

Takeshi Takano

Synopsis

Some of motors for electric power steering and so on are required very small cogging torque. To reduce cogging torque in surface permanent magnet motors, magnet skewing has been applied. There are two ways in the magnetic skewing, one is by the magnetization of magnets and the other is by the arrangement of magnets. And skew angle influences reduction of cogging torque in both methods.

This paper clarified the reason why cogging torque is reduced by the magnet skewing and the way to reduce cogging torque efficiently with the methods.

1. 緒言

電動パワーステアリング (Electric Power Steering, EPS) に用いられるモータには静粛性が要求されるため、振動の原因となるコギングトルク、トルクリップルは極めて小さく抑えることが求められる。このようなモータにおいては、磁石の形状、配向方向、着磁状態を適切に選択することが重要である。回転性能を向上させるための磁石の使い方として、スキュー着磁や磁石配置を周方向にずらす段スキューが挙げられる (Fig.1)。これらの手法では、スキュー角により回転性能が変化するため、要求仕様を満たすようスキュー角を調整する必要がある。本稿では有限要素法による磁場解析を利用し、主にコギングトルクの低減を目的にスキュー角を最適化する簡便な手法について検討した。

2. スキュー角の最適化

2. 1 はじめに

本手法では、まずモータ軸方向の磁束の流れを考慮し

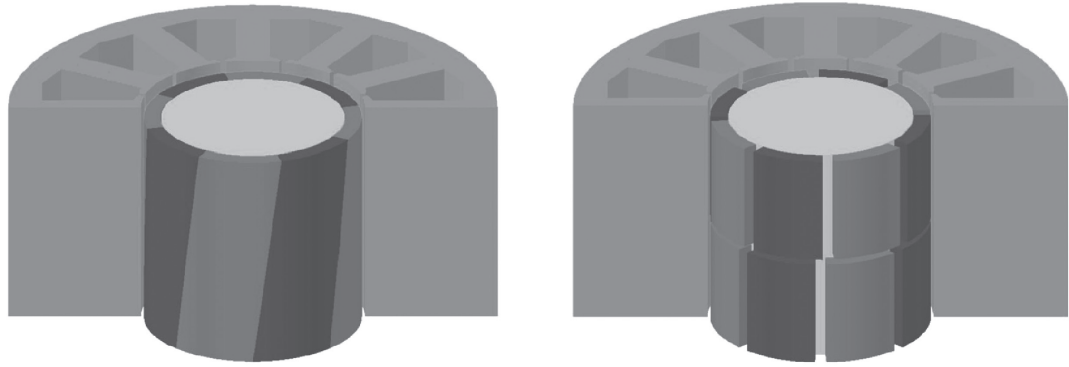
ない、2次元モデルにおいて磁場解析を行い、軸方向の単位長さ当たりのコギングトルク波形を計算しスキュー角の最適化を検討する。2次元モデルでは軸方向に流れる磁束を考慮しないため、端部の影響や、ロータステータの長さにはずれがある場合など、モータ軸方向の特徴に起因する現象については考慮されない。軸方向の磁束による影響が大きい場合には、大まかな条件出しとして用い、3次元解析や実機評価により修正することが望ましい。なお、本稿中では peak to peak のトルク幅をコギングトルクの値とする。

2. 2 2次元解析結果からの3次元モータ特性の推定方法

2次元解析結果から3次元でのモータ特性の推定を行う手法の概念図を Fig.2 に示す。コギングトルクはロータ全体に働くトルクの総和で表されるため、実際の3次元形状のロータに対するコギングトルクはモデルを軸方向にごく小さい長さの層ごとに分割し、各層について2次元解析を行いそれぞれの層に対するコギングトルクを計算し、最後に結果を足し合わせることで近似的に再現

2011年5月26日受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)



(a) Skew magnetizing (linear skew)

(b) Step skew

Fig.1. Skew magnetizing and step skew.

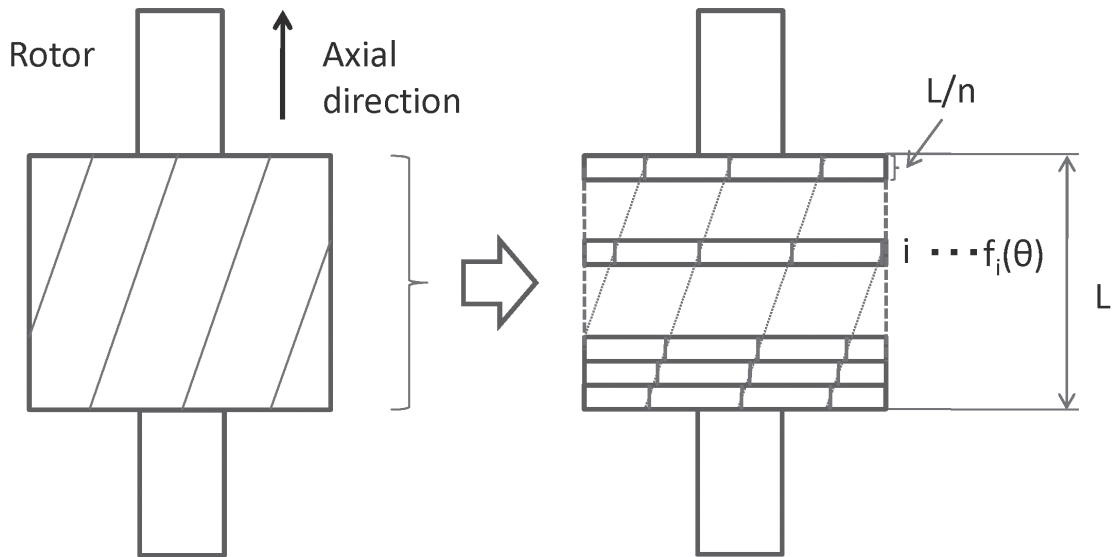


Fig.2. Schematic diagram of the estimation of 3D-motor cogging torque with 2D analysis.

できるはずである。本稿ではラジアル配向リング磁石に対する着磁スキュー（以降段スキューとの対比から、リニアスキューと呼ぶ）と段スキューを取り扱う。これらのスキュー条件では各層においてのステータ、ロータの断面形状は等しいため、それぞれの層に対応するコギングトルクの波の形自体は等しく、スキュー角に応じて位相のみがずれているとして取り扱うことができる。

2. 3 スキュー角の最適化

一般にコギングトルク波形は角度に対する周期関数と

なっており、フーリエ級数によって、

$$f(\theta) = A_0 + A_1 \cos(\theta + \varphi_1) + A_2 \cos(2\theta + \varphi_2) + \dots + A_n \cos(n\theta + \varphi_n) + \dots \quad (1)$$

という形式で表すことができる。

コギングトルク波形には理論上直流成分は含まれないので、定数項 $A_0 = 0$ としてよく、一般的な形として

$$f(\theta) = A_1 \cos(\theta + \varphi_1) + A_2 \cos(2\theta + \varphi_2) + \dots + A_n \cos(n\theta + \varphi_n) + \dots \quad (2)$$

とできる。

この一般的なコギングトルク波形を前提とし、リニア

スキューと段スキューについて最適化手法を述べる。

①リニアスキュー

ステータ側をスキューさせることで平行配向磁石を使用したモータでも等価な状態を作り出すことはできるものの、基本的にはラジアル配向のリング磁石でのみ可能である。ここでは磁石軸方向両端での磁極位置のずれを、軸周りの角度で表したものをスキュー角と呼ぶ。ロータの軸方向の長さをLとし、ロータ全体に対するスキュー角を θ_s とする。ロータの軸方向の長さLに対して、層状にn等分したものを考える。各層の厚みは $\frac{L}{n}$ となり、これらの層を、磁極位置を機械角0から θ_s まで層数で等分し、ずらして積み重ねることで3次元のロータを近似的に表す。それぞれの層内においては、磁極のスキューは考慮せず、軸方向に直線的に配置された磁極を持つモデルとして扱い、コギングトルクは軸方向の長さあたりの2次元解析の結果をそのまま使用する。

最終的にロータ全体としてのコギングトルクを考える際において、各層のコギングトルク波形を足し合わせる際に、その層のスキュー角度に応じた角度分をずれとして導入すればよい。

軸方向最端部の層の一方を基準として固定し、i番目の層のコギングトルクの絶対値の波形を(2)を利用して表すと、

$$f_i(\theta) \times \frac{L}{n} = \left\{ A_1 \cos\left(\theta + \varphi_1 + \frac{i}{n}\theta_s\right) + A_2 \cos\left(2\theta + \varphi_2 + \frac{i}{n}\theta_s\right) + \dots + A_j \cos\left(j\theta + \varphi_j + \frac{i}{n}\theta_s\right) + \dots \right\} \times \frac{L}{n} \dots (3)$$

各層を積み重ね、ロータ全体でのコギングトルク波形を θ に対する周期ごとの項にまとめると、

$$f(\theta) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(\theta) \times \frac{L}{n} \\ = A_1 \sum_{i=0}^{n-1} \cos\left(\theta + \varphi_1 + \frac{i}{n}\theta_s\right) \times \frac{L}{n} + \\ A_2 \sum_{i=0}^{n-1} \cos\left(2\theta + \varphi_2 + \frac{i}{n}\theta_s\right) \times \frac{L}{n} + \dots \\ \dots + A_j \sum_{i=0}^{n-1} \cos\left(j\theta + \varphi_j + \frac{i}{n}\theta_s\right) \times \frac{L}{n} + \dots (4)$$

と表される。

コギングトルク低減を考えた場合、 θ に対する式(4)の変動が小さいほど良く、究極的には任意の θ に対して $f(x) = 0$ となるよう、 θ_s を取ることが望ましい。そこで式(4)のj番目の項について抜き出し、この項を θ によらず常に0とする θ_s について考える。

$$f(\theta) = A_j \sum_{i=0}^{n-1} \cos\left(\theta + \varphi_1 + \frac{i}{n}\theta_s\right) \times \frac{L}{n} \dots (5)$$

とし、 $n \rightarrow \infty$ の極限を取ると、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_j(\theta) = A_j L \int_0^1 \cos(\theta_s x + j\theta + \varphi_j) dx \\ = \frac{A_j L}{\theta_s} [\sin(\theta_s + j\theta + \varphi_j) - \sin(j\theta + \varphi_j)] \dots (6)$$

式(6)が θ によらず常に0になるためには、 $\theta_s = \frac{2\pi m}{j}$ であればよい。(mは1以上の整数)

実際のモータへの適用を考えた場合、スキュー角 θ_s の増大は鎖交磁束の減少をもたらす、トルク定数を低下させるため、 θ_s はできるだけ小さくとることが望ましい。すべてのjに対して $f_j(\theta) = 0$ とし、スキュー角を小さく抑えるための条件としては、 $\theta_s = 2\pi$ とするのがよい。この操作は実際のモータにおいて見かけ上のコギングトルク波形1周期分の長さを基本波と取ったとき、スキュー角度を基本波1周期分取れば、コギングトルクの基本波とすべての高調波成分を0にできるということに相当する。

②段スキュー

こちらの方式は平行配向磁石や極異方配向など、磁石の配向方向に周方向の異方性がある場合にも実施可能である。理屈上、無限に段数を増やした段スキューと①のリニアスキューは同等となるが、EPS用モータ程度のサイズにおいて実際のロータ製作を考えた場合、可能なスキュー段数は2~3段であると思われる。この場合、①の例のようにコギングトルク波形のすべての高調波の項について0とすることは不可能であるため、2次元解析によって得られたコギングトルク波形に対してフーリエ変換を行い、寄与の大きい周波数の項を狙って打ち消すなどの工夫が考えられる。

(i) 2段スキュー

(1)式の特定の項を、 $f_n(\theta) = A_n \cos(n\theta + \varphi_n)$ とする。 f_n を θ によらず0とするためには、位相 $\frac{2\pi n}{2n}$ ずらした元の波形を足し合わせればよい。見かけ上のコギングトルクの周期に対応する周波数を基本波と取り、この項について0となるよう段スキュー角を取ると効果的にコギングトルクを低減できる。また、この際、基本波に対し $2m+1$ 倍周波数の項(mは正の整数)についても0となる。

(ii) 3段スキュー

2段スキュー同様、特定項を狙って0とするには、位相を $\frac{2\pi n}{3n}$ もしくは $\frac{4\pi n}{3n}$ ずらせばよい。このとき基本波に対し $3m-2$ 、 $3m-1$ 倍周波数の項についても0となり、一般的には2段スキューよりも低いコギングトルクが期待できる。

3. 検討例

モータモデルを仮定し、今回検討を行った手法を適

用し確認を行った。対象モータとして、EPSサイズを想定した2種類のモータ a, bを仮定し、磁場解析によりコギングトルクの計算を行った。モータモデルを Fig.3 に、諸元を Table 1 に示す。これらのモデルにおいてのコギングトルク波形は Fig.4 のようになった。一般的にロータ、ステータの対称性により、見掛け上のコギングトルク波形の機械角周期は $360/(\text{磁石極数とスロット数の最小公倍数})$ となることが知られている。これにならい a モデルでは 15° 周期、b モデルでは 6° 周期のコギングトルク波形が得られている。これらに対し、本稿にて示した着磁によるリニアスキュー、2段、3段の段スキューを適用した場合のコギングトルク変化を Fig.5 に

示す。8極 12スロットについては、コギングトルクの値のとりレンジが広いので、対数で軸を取っている。段スキューの角度については、隣り合う磁石間の角度によって表現しており、3段スキューの場合には、軸方向両端の磁石のなす角度は2倍になる。リニアスキューではコギングトルクの谷部分でほぼ0に近い値が得られているのに対して段スキューによる結果では若干大きくなっている。また、段スキューでは段数によってコギングトルクの最低値にも差が表れており、本手法の検討内容から推測されたとおりの結果が得られている。

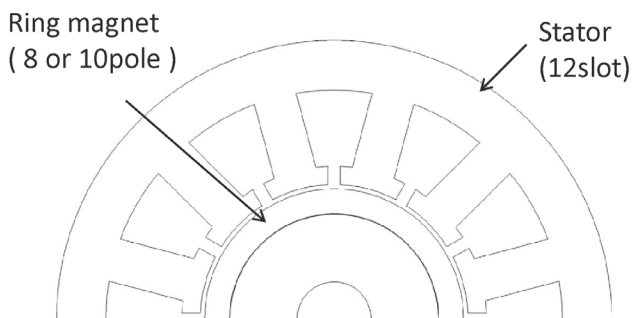
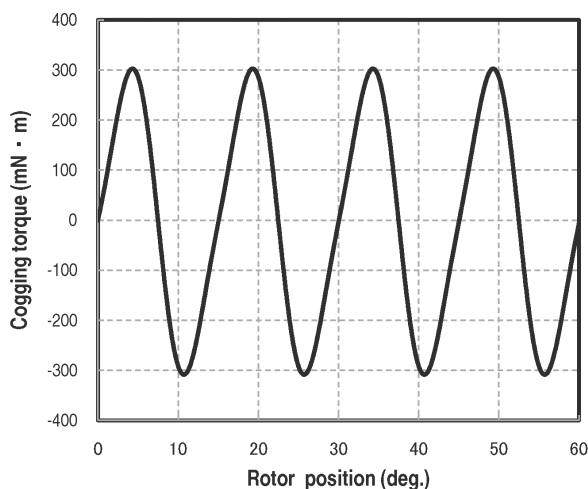
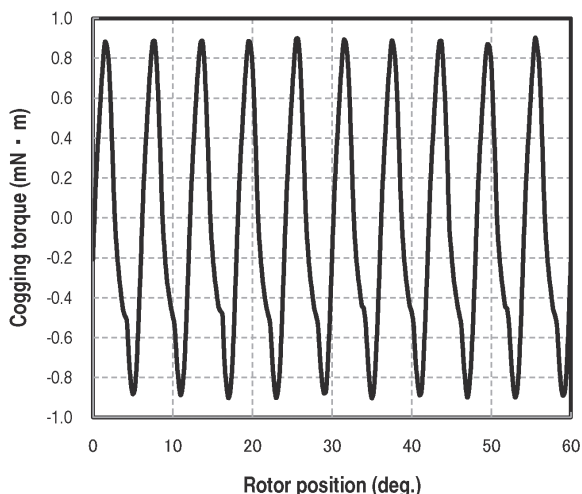


Fig.3. Analysis model of 8 pole 12 slot/10 pole 12 slot motor.



(a) 8pole 12slot

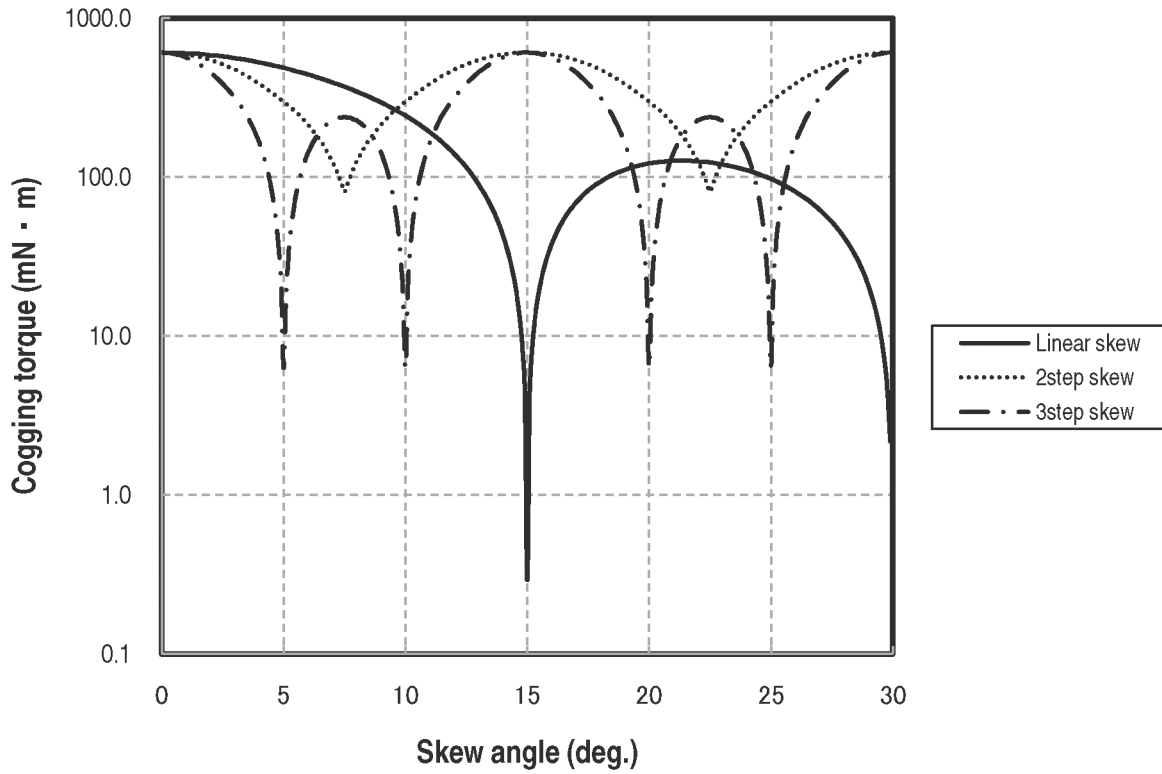


(b) 10pole 12slot

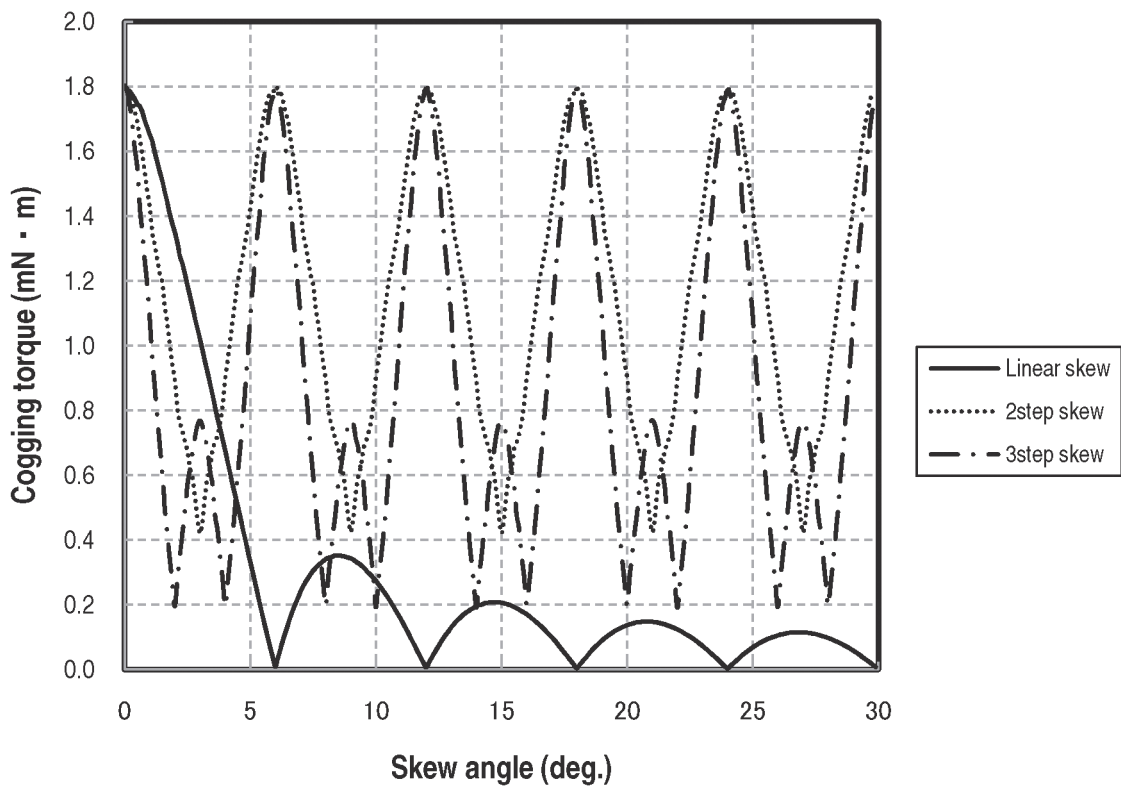
Fig.4. Cogging torque waveform.

Table 1. Specifications of motor models

Rotor diameter	42 mm	
Stator diameter	90 mm	
Gap length	0.7 mm	
Teeth width	7 mm	
Stack length	40 mm	
Stator Core	Material	50A600
	Number of slot	12
Permanent magnet	Material	Nd-Fe-B
	Residual magnetic flux density	1.25 T
	Recoil permeability	1.05
	Number of pole	8 or 10
	Magnetizing direction	Radial



(a) 8pole 12slot



(b) 10pole 12slot

Fig.5. Relation between skew angle and cogging torque.

4. まとめ

特定のスロットコンビネーションによらず、任意のコギングトルク波形をもつ表面磁石形モータにおいてコギングトルク低減を目的とした着磁スキューと段スキューのスキュー角の最適化について述べた。ラジアル配向リング磁石を使用し、着磁によるスキューを導入する場合には、見掛け上のコギングトルクの周期と等しい角度をスキュー角として取ればよく、このときコギングトルク

の高調波成分も同時に0となるため、非常に低いコギングトルクが得られることを一般化して示した。

また、段スキューにおいては、段数に応じて打ち消しが可能なコギングトルクの高調波成分が変化するため、コギングトルク波形を周波数分解し各高調波成分の大きさと目標とするコギングトルクの大きさを勘案しつつスキュー角を決定する必要がある。ただし、理論上いくらかの高調波成分は残るため、着磁によるスキューよりはコギングトルクは大きくなる。