

永久磁石形リニア同期モータにおける8磁石

9極配置のギャップ磁束密度の空間高調波分析

Space harmonic Analysis of gap flux density in 8-poles 9-slots combination in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

中村 太一 Shin Jung-Seob 古関 隆章 (東京大学)

Taichi Nakamura, Shin Jung-Seob, Takafumi Koseki (the University of Tokyo)

1 はじめに

永久磁石形同期電動機は小型で大出力が得られることや高効率運転が可能となり、様々な産業分野への応用が期待されている。しかし産業応用をするにあたり障害となる永久磁石形同期電動機固有の問題も存在する。その一つにコギング力が挙げられる。コギング力は振動や騒音の原因になる他、位置決め精度に影響を及ぼす。このためモータの設計において重要な一部分を占め、現在までに多くのコギング力低減手法が提案されている。

本論文ではコギング力低減手法の一つである8磁石-9極配置をリニアモータに応用する可能性に注目した。そしてこの構造における磁束密度の定式化を行い、コギング力の原因である空間高調波の解析を行うことのできる簡易設計法を提案した。

2 8磁石-9極配置のギャップ磁束密度の定式化

8磁石-9極配置を切り開いた図をFig.1に、解析モデルの一部をFig.2に示す。そしてFig.1、Fig.2に示した図を元に、8磁石-9極配置の空間高調波解析を磁気回路法を用いて行う。ここでFig.2の $\tau/2$ は電気角で 2π に相当する。

まず磁束密度がy軸方向成分のみ持ち、鉄心の透磁率が無限大であると仮定すると、起磁力 Θ 、鉄心のギャップ長 l_g を用いて磁束密度は式(1)で示される。

$$B = \mu_0 \frac{\Theta}{l_g} \quad (1)$$

式(1)において、磁束密度はギャップ長の逆数で表されている。ここで計算上扱いやすくするためギャップ長の逆数を Y と定義する。 Y の x 方向の分布を考えたとき、仮定より $Y(x)$ の波形はFig.3のように簡単化することができる。

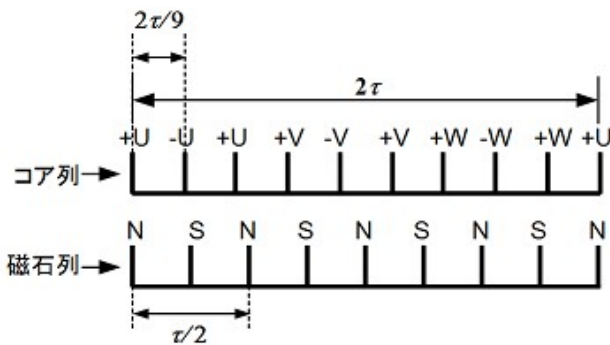


Fig.1 Linear model of 8 poles 9slots combination

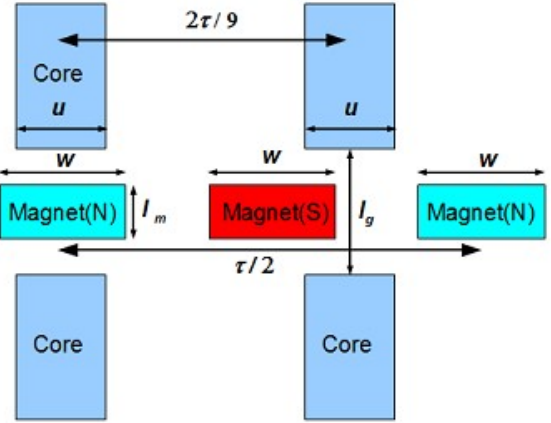


Fig.2 Detail view for analysis model

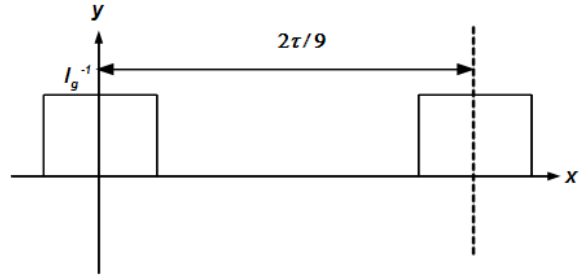


Fig.3 Inverse of the gap length

Fig.3で示した $Y(x)$ の波形の周期が 2τ であることに注意してFourier級数展開すると、式(2)で表される。

$$Y(x) = \frac{9u}{2\tau l_g} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi l_g} \sin \frac{9n\pi u}{2\tau} \cos \frac{9n\pi x}{\tau} \quad (2)$$

次に永久磁石による起磁力分布を方形波とし、周期が 2τ であることに注意しFourier級数展開をする。起磁力分布をFourier級数展開したものを式(3)に示す。

$$\Theta(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{16 H_c l_m}{(8m-4)\pi} \sin \frac{(8m-4)\pi w}{2\tau} \cos \frac{(8m-4)\pi x}{\tau} \quad (3)$$

式(2)と式(3)を式(1)に代入すると、式(4)で表されるような空間磁束密度分布が得られる。

$$B_y(x) = \mu_0 \left[\frac{9u}{2\tau l_g} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi l_g} \sin \frac{9n\pi u}{2\tau} \cos \frac{9n\pi x}{\tau} \right] \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \frac{16 H_c l_m}{(8m-4)\pi} \sin \frac{(8m-4)\pi w}{2\tau} \cos \frac{(8m-4)\pi x}{\tau} \right] \quad (4)$$

2 8磁石-9極配置のギャップ磁束密度分布の空間高調波分析

8磁石-9極配置のギャップ磁束密度の空間高調波解析を行うため、Table1に示す数値を式(4)にそれぞれ代入した。次に磁石をFig.1に示す位置を基準にとり、その位置でのギャップ磁束密度、および電気角で $5\pi/9$ ずらしたときのギャップ磁束密度を数値計算した。それらの結果をFig.4に示す。

Table1 Each parameter

H_c	1.2×10^6 (A/m)	l_g	6 (mm)
l_m	5 (mm)	u	5 (mm)
w	6 (mm)	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
τ	36 (mm)		

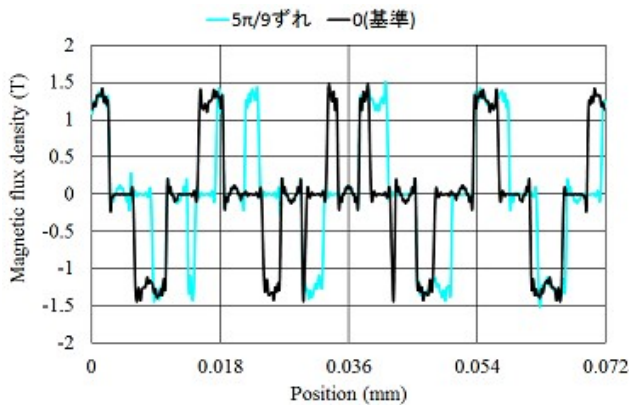


Fig.4 Gap flux density distribution in the model

次に式(4)を用いて $\tau/2$ に相当する周期を基本波としたときの調波成分を取り出し、それぞれの位置における空間高調波分析を行った。その結果をFig.5に示す。なおFig.5において次数に4をかけたものが、 2τ を基準にとったときの次数である。

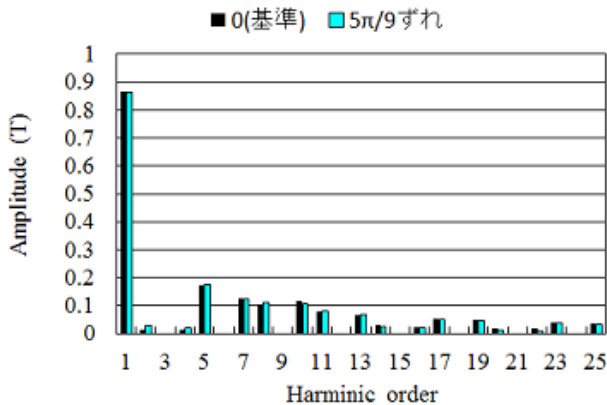


Fig.5 Results of space harmonic analysis

Fig.5よりどちらの場合も高調波成分の大きさはほとんど同じであった。また高調波成分の内、5倍波、7倍波、8倍波、10倍波の成分が大きく、基本波の振幅のおよそ1/8程度である。

次に位置が基準のときの基本波とした成分以外の高調波を調べた。その結果をFig.6に示す。なおFig.6における次数は 2τ を基準にとったときの次数である。

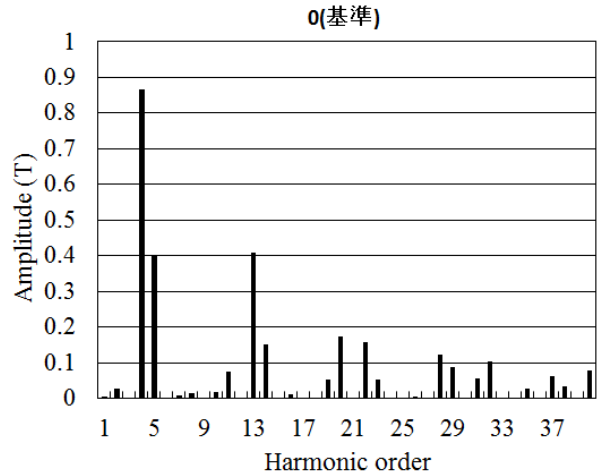


Fig.6 Result of space harmonic analysis

Fig.6より基本波の整数倍でない高調波も検出されている。これらの高調波が、これは方形波近似に起因するものであるのか、それとも本質的な高調波であるのかを、今後より詳細な数値計算を行い、考察する。

3 まとめ

本論文では8磁石-9極配置の無励磁時におけるギャップ磁束密度の定式化を行った。そしてコギング力の原因である空間高調波の解析を行うことのできる簡易設計法を提案した。提案した設計法は8磁石-9極配置以外の場合も対応可能である。今後得られた式を元に推力の計算を行い、推力と高調波との関係を明らかにする。さらに電機子の巻線の利用率を上げるための極の並べ方の変更と空間高調波との関係を議論し、具体的な設計を行う。

文献

(1)申, 古関, 金: "磁束形円筒リニア同期モータの設計と磁束集中形界磁による大推力化の提案", リニアドライブ研究会, LD-10-060, 2010