

積層方向 3 分割永久磁石の空間的位相差による リニア同期モータの推力と横方向力への影響

平野 遥 田原 俊司 小川 幸吉
(大分大学 工学部)

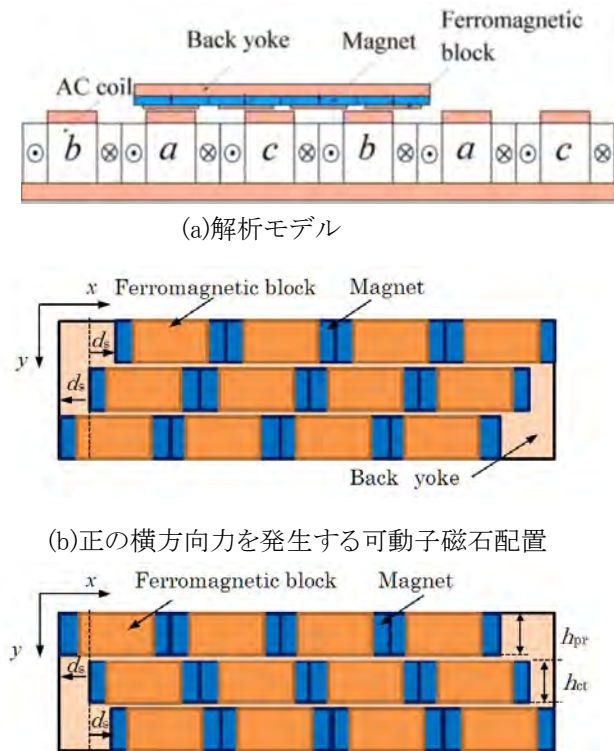
1 はじめに

永久磁石リニア同期モータの界磁側磁石を積層方向に 3 分割し、推力脈動を軽減したい高調波に対して、それぞれの磁石部分を 120 度のピッチで空間的位相差を設けると脈動を相殺できる[1]-[3]。4 極 3 スロット構成の場合にこの方法によってどの程度の推力脈動低減が可能かということを示し、さらに空間的位相差による積層方向の非対称性が発生する横方向力を評価する。

2 解析モデルと推力脈動低減の方法

2.1 解析モデル

図 1 の 4 極 3 スロットの PMLSM の解析モデルと、高調波成分推力を低減する場合の積層方向に分割した磁石配置の変位する方向を示す。(b), (c) の磁石配置はエアギャップ側から見たもので、リラクタンス力の発生を考慮して磁石表面に強磁性体板を張り付ける。(b) の磁石配置は進行方向が x 軸の正の方向の場合、 y 軸の正の方向に横方向力を発生する。



(c) 負の横方向力を発生する可動子磁石配置

図 1 4 極 3 スロット PMLSM のモデルと磁石配置

2.2 推力脈動低減の方法

モータ可動子磁石を積層方向に 3 分割し、中心部分を基準にして両端の部分を d_s だけ正負の方向に変位する場合、第 n 次高調波成分推力を相殺するためには、次の式が成り立てばよい。ただし、 τ は磁極ピッチである。

$$\frac{1}{3}(1 + e^{-j\frac{d_s}{\tau_n}\pi} + e^{j\frac{d_s}{\tau_n}\pi}) = 0 \quad (1)$$

$$d_s = \frac{2}{3}\tau_n = \frac{2\tau}{3n} \quad (2)$$

3 数値計算

3.1 変位置量変化時の推力と横方向力

磁極ピッチ $\tau=36\text{mm}$ に対して、第 3 高調波推力を相殺するためには式(2)より変位置量 $d_s=8\text{mm}$ となる。図 2 は変位置量に対する平均推力と平均横方向力を示す。リニアモータでは可動子両端が開磁路構造になっている為、若干最適値が異なることが考えられるが、本例の場合 $d_s=8.2\text{mm}$ で推力脈動率が 12.7% の最小値となった。平均推力は 145N で変位しない場合の 180N より 35N 低下した。また変位により、モータ積層方向の対称性がなくなるため、横方向力が発生する。平均横方向力は 14N で、推力の約 10% である。

図 3 と図 4 は瞬時推力波形と瞬時横方向力波形について、磁石を 3 分割後変位しない場合と $d_s=8.2\text{mm}$ 変位した場合を比較したものである。横方向力については変位したことによって第 3 高調波成分と第 12 高調波成分が現れる。

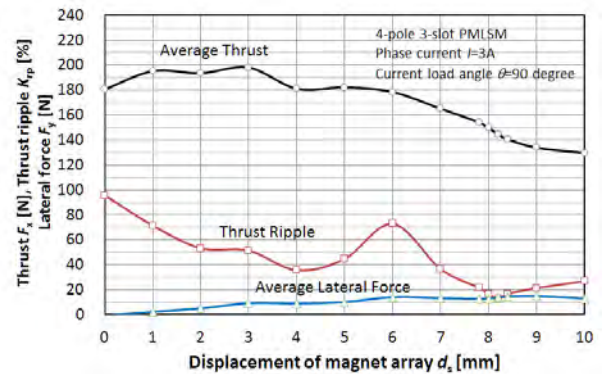


図 2 変位置量に対する平均推力と平均横方向力

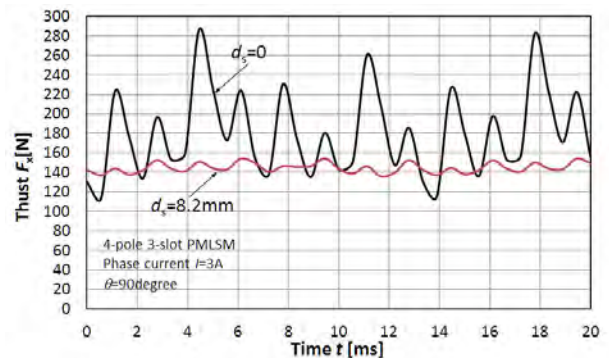


図 3 3 分割時の変位置量に対する瞬時推力波形

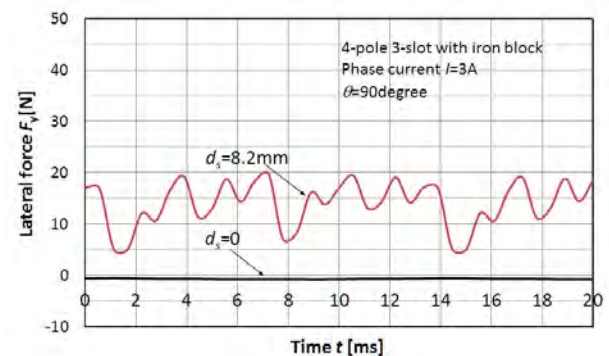


図 4 3 分割時の変位置量に対する瞬時横方向力波形

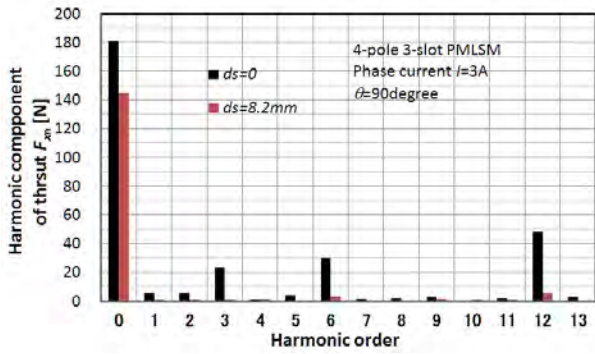


図5 変位量に対する推力の高調波成分の変化

図5は変位なしの場合と8.2mm変位した場合の推力の瞬時波形を数値フーリエ級数展開したもので、第3高調波成分のみならず、第6、第12高調波成分が顕著に減少している。また本モータは4極で3スロットと電機子コイル配置の周期が界磁配置と異なっている為、第1、第2の高調波推力が現れているが、この方法では、これらの低次の高調波成分も減少する

3.2 モータの積層方向分割幅の影響

式(1)は分割した磁石の3列の部分と同じ大きさの推力を発生していると仮定している。ギャップ磁束密度は積層方向に均一になるとは限らない。そこで中央部分と両端の幅を変化して、平均推力、平均横方向力について検討した。

図6は平均推力、推力脈動率、平均横方向力を、両端部磁石積厚を変化して示したものである。変位量 d_s は8mmとする。図中横軸の14mmは均等に分割した場合で、それより大きくなると両端部の積厚が大きくなる。事前の予測では、両端部の積厚が14mmより大きい場合に推力脈動率が小さくなると思っていたが、等分割の場合の16.6%に対して、両端部が0.5mm狭い場合に16.2%に減少するのみで、ほぼ積層方向磁束分布の影響はないことが確認できる。

図中破線は負の横方向力を発生する磁石配置に対応するもので、横方向力は負の値になるが、積厚変化による値の大きさを確認する意味で、絶対値をとった。平均推力、推力脈動率とも可動磁石配置の違いによる値の差はない。

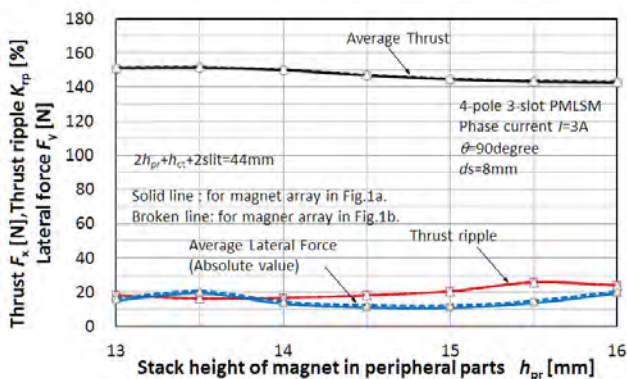


図6 磁石積厚変化に対する平均推力と平均横方向力

図7は積層方向に磁石を等分割した場合の $d_s=8$ mmにおける瞬時推力と横方向力を、変位の方向が異なる場合と比較したものである。瞬時推力は完全に重なっている為区別がつかない。横方向力は正と負の波形となるが、軸を中心に対称の波形となっている。

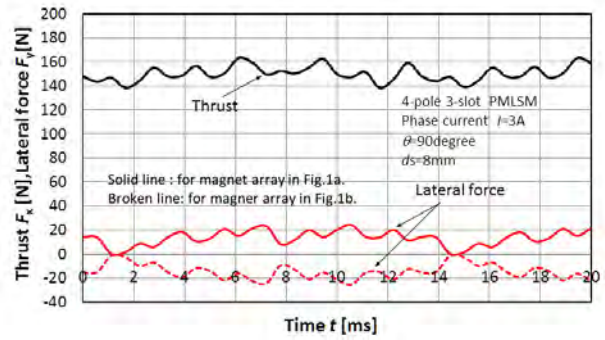


図7 磁石配置が異なる推力・横方向力の瞬時波形

3.3 積層方向磁石列間にスリットを設けない場合

積層方向の磁石列間には幅1mmのスリットを設けているが、このスリットを設けずに磁石をつないだ場合の推力と横方向力を検討した。磁石エアギャップ側表面にリラクタンスを期待して張り付けた3個の強磁性体ブロックは一つのみとした形状として扱う。この場合電機子の積厚もスリットのみで2mm少ない42mmとした。変位量 d_s は8mmとする。

図8は推力と横方向力について瞬時波形を比較した。推力は両者とも類似の波形を示すが、スリットがない場合は全積厚が44mmから42mmに減少するため、15N程度低い。横方向力については、波形が互いに異なる。

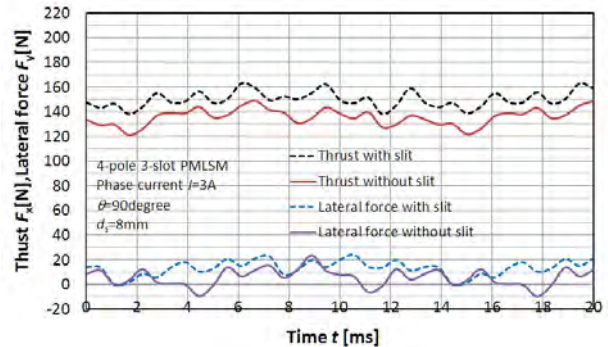


図8 スリットの有無による瞬時特性の比較

4 まとめ

界磁側の3分割磁石を変位することによって、平均推力145N、推力脈動率は12.7%程度に改善でき、積層方向が非対称になることによって発生する平均横方向力は平均推力に対して10%程度であった。一方4極6スロット構造では、推力脈動率は5%程度の低い値が達成できている。大きな推力が期待できる4極3スロット構造において、電機子側の構造を変化することなく、界磁側磁石配置をさらに検討することによって、推力脈動の小さなモータを実現したい。

参考文献

- [1] 甲斐由紀子・田原俊司・小川幸吉:「永久磁石リニア同期モータの推力脈動低減の方法」, 電気学会産業応用部門大会, No3-70(2013)
- [2] 近藤竜也・田原俊司・小川幸吉:「コイル配置の異なる永久磁石リニア同期モータの推力脈動」, 第67回電気・情報関係学会九州支部連合大会 13-2P-02 (2014)
- [3] 甲斐由紀子・田原俊司・小川幸吉:「可動子を積層方向に3分割した時の永久磁石リニア同期モータの推力脈動」, 電気学会回転機リニアドライブ家電・民生合同研究会, pp.47-50(2014)