UDC 621.313.333: [621.3.013.2: 621.3.045.5]

論文

58-B71

単層巻線高速 LIM における交番起磁力の影響

正員 野中 作太郎 (九州大)

正員 古川 達也 (九州大)

1. ま え が き

従来、リニアインダクションモータ (LIM) に関して、種々の解析法^{(1)~(8)}が提案され、計算値と実測値との比較⁽⁶⁾⁽⁷⁾、パラメータ変更時の諸特性の評価⁽⁸⁾などから実用規模のモータの理論設計⁽⁹⁾が要求される現段階において、諸解析法間の関連性や各々の得失を論ずる上で、解析法自体の比較検討を行なう必要性が生じている。しかしながら、従来の解析法では、モデルの設定(主として、巻線方式)に関して統一性を欠いており、巻線方式によって、二次うず電流分布が全く異なること⁽¹⁰⁾などを考慮すれば、同一モデルおよび仮定に基づいた理論の比較から始める必要がある。

筆者らは、この見地に立って実際の一次巻線起磁力分布を考慮したフーリエ級数法とフーリエ変換法とによる LIM の二次元解析の比較を二層巻線および単層巻線を施した各 LIM (以下、二層巻 LIM、単層巻 LIM と略称) について実行し、前者に関してエアギャップ中の磁束密度分布は、ほぼ一致するが、後者では、高すべり領域でかなり異なった分布をとることを明らかにしてきた⁽¹¹⁾。この結果から、従来の LIM 解析^{(1)~(4)}で考察されてきた単層巻 LIM には、通常の二層巻 LIM とは異なった電磁現象が存在することが判明した。すなわち、単層巻 LIM には、モータ全長にわたって一様な大きさで時間的に交番する起磁力成分 (以下、交番起磁力と略称) が存在し⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾、エアギャップ中には、交番起磁力と進行波起磁力とによる磁束が共存することから、この交番起磁力の振舞あるいは、特性に及ぼす影響などを究明する必要がある。

しかし、この点に関しては、従来その指摘はあるが^{(13)~(15)}、実際の一次巻線起磁力分布を考慮した筆者らの報告^{(10)~(12)(16)}を除いては、詳細な考察はほとんど行なわれていない。

本論文では、高速 LIM の磁束分布⁽¹⁶⁾と二次うず電流分布⁽¹⁰⁾とを単層巻 および二層巻 LIM の各場合について導出し、両者の比較から交番起磁力の影響を明確にし、更に推力の瞬時分布と併せて、推力発生機構を解明し、従来、検討が不十分であった同期速度時の推力発生模様を考察している。また、無限に長い一次鉄心を仮定し、有限の長さの正弦波表面電流で一次巻線を表現した従来の多層理論^{(2)~(4)(6)}では、本論文で採用した理論と同様に単層巻 LIM に発生する推力を過大評価する傾向があることを示している。

2. 解析モデル

図1は本論文で考察した単層巻線の巻線配置図であり、ここでは、相数 $m=3$ 、極数 $p=4$ 、每極毎相のスロット数 $q=2$ の場合を示す。図2は図1の単層巻線を施した両側式 LIM の解析モデルと a 相起磁力分布である。解析モデルは、実際のモータを相隣るモータ相互間の影響がないくらい十分長い間隔 L_c をおいて周期的に配置し、解析を容易にするために、磁気抵抗を無視した無限に長い一次鉄心で結合したものである。周期 $2L_1$ の斜線を施した方形波起磁力がすべて

図1 単層三相一次巻線

Fig. 1. Single-layer primary winding.

Effect of The Stationary Pulsating M.M.F. Component in The Single Layered High-Speed LIM. By Sakutaro Nonaka, Member & Tatsuya Furukawa, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University)

野中作太郎: 正員, 九州大学工学部電気工学科

古川達也: 正員, 九州大学大学院工学研究科電気工学専攻

図 2 単層巻線を施した両側式 LIM の解析モデルと a 相起磁力分布

Fig. 2. Model for analysis of double-sided LIM with single-layer windings and distribution of the phase a m.m.f.

図 3 単層巻線の起磁力および等価表面電流密度の空間分布

Fig. 3. Space distributions of the total m.m.f. and the equivalent surface current density in a single-layer winding.

の空間起磁力の基本であり、これをフーリエ級数表示する空間高調波解析法⁽⁵⁾を用いると合成起磁力は、これと等価な起磁力を与える表面電流密度で表現される⁽¹⁰⁾。この表面電流を用いれば、モータの特性はこれら無数の進行波空間高調波成分が二次導体を含んだエアギャップ中に誘導する電磁現象の和として求められる。

図 2 から、単層巻線における 1 相分の起磁力分布には、二層巻線の場合⁽⁵⁾とは異なって、ポールピッチ τ で

とに逆向きのコイルが配置されていないため、空間的な直流成分が重畳し、三相合成起磁力は、空間的に一様で時間的に変動する交番起磁力 (Stationary pulsating m.m.f.)⁽¹²⁾⁽¹⁸⁾ と移動起磁力 (Traveling m.m.f.) から構成される。

これを確認する意味で、図 3 に起磁力および等価表面電流密度の空間分布をフーリエ級数⁽¹⁰⁾で計算した結果を示す (各相電流は 1A と仮定した)。上述の交番起磁力の影響は明白であり、表面電流密度分布がモータ中心に関して対称な正弦波分布をとる (b) 図の瞬時に、起磁力分布は、大きく一方向に持上がるのがわかる。

なお、フーリエ変換法⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾に基づく解析で採用されている有限長正弦波表面電流モデル $j_1 = J_1 \varepsilon^{j(\omega t - \pi x/\tau)}$ は、本章で示した単層巻線のスロット数を非常に多くし、三相巻線に代って相数の非常に多い多相巻線を施した場合に相当する。

3. 磁束分布と二次うず電流分布

本章で示す磁束分布は、二次導体を含むエアギャップ領域を格子線で分割して、各格子点上のベクトルポテンシャル値を計算し、その等ポテンシャル線を描くことによって導出した⁽¹⁷⁾。また、二次うず電流分布は導体面上の二次元解析から流線関数を導き⁽¹⁰⁾、同上の手順に従って求めた。なお、両分布で端効果の影響は、空間高調波解析法⁽⁵⁾によって考慮した。

考察の対象とした高速 LIM の主な設計定数は、極数 $p=4$ 、每極毎相のスロット数 $q=4$ 、ポールピッチ $\tau=312\text{mm}$ であり⁽⁷⁾、1 コイル当りの巻数を単層巻線および二層巻線に関してそれぞれ 6 ターンおよび 3 ターンに設定し、両者の電気装荷を等しくした。以下の結果は、印加電源周波数を 220 Hz、メカニカルクリ

アランス g を 5 mm とし、板厚 16 mm の単一アルミ二次導体を持つ場合の定電流駆動時 ($I_1=200$ A) の分布である。

ここで、磁束分布は x 軸に対して z 軸を 10 倍に拡大し、電流分布と並列して示す。なお、二次うず電流分布図中で左回り、右回りの電流線群の境界となる実線は、電流の向きを区別する分離線を表している。また、磁束分布図中に記した白丸、黒丸は電流線と有効に鎖交して、それぞれ正、負の推力を発生する磁束線

であることを明示したものである。

〈3.1〉 二次静止時の磁束分布と二次うず電流分布

図 4 に単層巻線 LIM の $s=1.0$ 時の磁束分布と二次うず電流分布、図 5 に、図 4 に対応した推力分布を、図 6、図 7 には、二層巻線 LIM について同上の分布を時間位相 ωt を $\pi/3$ ずつ変化して示す。

図 4 から、単層巻線 LIM において、 $s=1.0$ 時の二次うず電流分布は、前述の交番起磁力の影響を反映して、モータ内を循環する電流ループに、磁界進行方向

図 4 単層巻線 LIM の $s=1.0$ 時の磁束分布と二次うず電流分布

Fig. 4. Flux and secondary eddy current distributions for a single layered LIM at $s=1.0$.

図 5 単層巻線 LIM の $s=1.0$ 時の推力分布

Fig. 5. Space distribution of the thrust for a single layered LIM at $s=1.0$.

図 6 二層巻 LIM の $s=1.0$ 時の磁束分布と二次うず電流分布Fig. 6. Flux and secondary eddy current distributions for a double layered LIM at $s=1.0$. 図 7 二層巻 LIM の $s=1.0$ 時の推力分布Fig. 7. Space distribution of the thrust for a double layered LIM at $s=1.0$.

に移動する電流ループが重畳した分布になっている。例えば、 $\omega t=0$ 、 $\omega t=2\pi/3$ の各瞬時では、電流線はそれぞれ左回り、右回りのループを構成し、モータ全長にわたって交番する磁束を抑えるように二次側に電流が誘導されることをよく表している。なお、この場合同一の向きの電流がモータの前部と後部で独立したループを描くのは、進行波磁束が重畳することに起因する。また、一次表面電流密度がモータ中心に関して対

称な正弦波分布をとり、交番起磁力が最大となる図 3 の (b) 図に対応する電流分布は、モータ内ではほぼ完全な 4 極の電流線を構成し、この交番起磁力を打消すのがわかる。

このすべりでの磁束分布は、交番起磁力の影響を受けて、モータ内でかなり不均一になっているが、特に図 4 の (b) 図の場合、 $20\text{cm} < |x| < 40\text{cm}$ の範囲の二次導体を貫く磁束線数は、モータ中心部の 2 倍以上に

もなっている。また、同一鉄心異極に漏れる磁束もこの瞬時に、高い二次打消し起磁力となる4箇所(13)の電流ループの中心から斥けられることによって生じている。一方、他の二つの例では、二次電流の集中が交番起磁力によって緩和されるために、二つに分離した電流ループの中心を通過するような磁束線が現われることが明らかになった。

以上の各瞬時の磁束線図と電流線図とを比較すると、図4の(b)図の場合で、密に流れる電流成分と鎖交する磁束線が $x = \pm 30$ cm 付近で著しく現れ、他の二つの場合に比べて、大きな推力を発生することがわかる。なお、この状況は図5の推力の瞬時分布からも確認でき、結局、図中の破線で示される時間平均値分布は、モータの中心付近で大きくくぼんだ分布になることが判明した。

次に、二層巻 LIM の二次うず電流分布には、図4のようなモータ内を循環する電流ループは見当らず、時間とともに磁界進行方向へ移動する電流線として観測される。但し、この場合、モータ出入口端の単層部では、交番起磁力が存在するため⁽¹³⁾、この部分で電流のループは発生消滅を繰返すことになる⁽¹⁰⁾。

磁束分布は、各瞬時において、二次導体を貫く磁束線の本数がほぼ一定した分布となり、単層巻線の場合のような、極端に不均一な磁束分布は見当らない。また、磁束線のへんいの仕方も各瞬時において、ほとんど変わらないことがわかる。なお、電流線と有効に鎖交する磁束線の本数は、モータ両端の単層部を除いて、各箇所均一となり、推力分布はモータ内ではほぼ一樣になることが推察される。この状況は、図7の推力分布から単層部を除いて、推力の瞬時最大値が一樣な分布になっていることから確かめられる。

以上の考察から、2種類の巻線方式に関して、全く異なった電磁現象が存在し、その結果として、推力分布が異なることが明らかになったが、ここで、交番起磁力の影響を更に詳しく検討してみる。

図4ではモータ外部でも電流の分離線が多く認められる。これは、二次側で打消されずに残った交番起磁力による磁束が磁気抵抗を無視した一次鉄心表面に沿って、 x の正負両方向のモータ外へ漏れてゆく際に誘導されるものである。この場合、解析モデルでは、図2のように相隣る短一次巻線の起磁力の向きが互いに正負反対になっているので、上述の剰余磁束は、一次鉄心を介して、前後のモータ間を循環する磁束となっており、一次鉄心端面での fringing 磁束とはなり得ず、一次鉄心の有限性に起因するリラクタンス制動力としては現れてこない。特に、フーリエ変換法⁽¹⁾⁽³⁾⁽¹⁴⁾を用

いる際には、無限遠点でのポテンシャルを零と置くため、上述の剰余磁束は、無限遠点に向かうものと考えられ、一次鉄心端面からの fringing 磁束は本解析の結果と同様に考慮されない。

同様の議論が単層巻 LIM を対象とした他の多層理論⁽²⁾⁻⁽⁴⁾⁽⁶⁾についても言え、これらの理論が単層巻 LIM に対して適用される場合、厳密な解答を与えていないことを意味する。

〈3・2〉 同期速度時の磁束分布と二次うず電流分布

図8に単層巻 LIM の $s=0$ 時の磁束分布と二次うず電流分布、図9に、図8に対応した推力分布を、図10図11には、二層巻 LIM について同様の分布を ωt を $\pi/3$ ずつ変化して示す。

図8から同期速度においても、交番起磁力を打消そうとする電流の存在は明白であり、出口端付近およびそれより外での電流線の形状を除けば、図4の二次静止時と類似した分布をとる。ここで、磁気抵抗を無視した無限長一次鉄心を仮定するため、出口端より外でのうず電流の減衰は緩慢であるが、端効果による二次打消し電流がモータ外へ運び出されてゆく様子を知ることができる。なお、この場合、出口端より外で電流ループが二つに分離するのは、オーバハンギング領域へ磁束が入らないと仮定したため⁽¹⁰⁾、磁束の急変を伴い、大きなうず電流が誘導されることに起因する。

同期速度では、端効果が著しいため、入口端から出口端にかけての磁束分布には、二次側によって打消されずに残った交番起磁力による不均一な磁束線はほとんど現れていない。また、モータ内の磁束分布には、各瞬時において、入口端付近で二次側からの打消し電流が大きくなることから、同一鉄心異極に漏れる磁束が現れ、更に同様の現象が出口端へ向かう過程で、3箇所存在している。これ以外の磁束線は、ほとんどが二次電流の存在しない部分の導体を貫くようになり、力を発生する部分が減少する一方、推力を発生する部分と同程度あるいは、それ以上の制動力を発生する部分がほぼ等しい割合で存在するので、全体として推力は若干負になるが、出口端付近でわずかに正推力を発生する場所が存在するため、最終的には正の推力に推移するものと予想できる。この模様を図9の推力分布から確かめると、瞬時値は大きく正負に変動するが、その時間平均値は $x < 24$ cm の範囲では負の値をとり、 $24 \text{ cm} < x < 90 \text{ cm}$ の範囲では正の値をとることが明らかである。

二層巻 LIM の場合の二次うず電流分布も入口端から $x=40$ cm 付近までは、二次静止時の図6と全く同一であるが、出口端近傍の電流線は、端効果による打

図 8 単層巻 LIM の $s=0$ 時の磁束分布と二次うず電流分布

Fig. 8. Flux and secondary eddy current distributions for a single layered LIM at $s=0$.

図 9 単層巻 LIM の $s=0$ 時の推力分布

Fig. 9. Space distribution of the thrust for a single layered LIM at $s=0$.

消し電流によってモータ外へ大きく引伸ばされ、最終的には他の電流ループに比べて、かなり小さなループを描く電流線となる。

一方、磁束分布は、単層巻 LIM の場合とその定性的な傾向は変わっていない。しかし、二次電流と有効に鎖交する磁束線は負の推力を発生する部分が多くなり、

図 10 二層巻 LIM の $s=0$ 時の磁束分布と二次うず電流分布

Fig. 10. Flux and secondary eddy current distributions for a double layered LIM at $s=0$.

図 11 二層巻 LIM の $s=0$ 時の推力分布

Fig. 11. Space distribution of the thrust for a double layered LIM at $s=0$.

特に出口端付近では顕著になるので、総推力は負になることが予想される。

図 11 から、推力の時間平均値はモータ内で負の値

をとり、特に出口端近傍では、他の場所での 2 倍程度の制動力を発生していることがわかる。

以上の結果から、同期速度における推力発生の様様

の相違が明らかになったが、無限長一次鉄心を仮定する多層理論を単層巻 LIM に適用する限り、交番起磁力による一次鉄心端面での fringing 磁束に起因する制動力は、考慮することができず、高速 LIM といえども、同期速度で推力が負にならないことが確認できた。なお、二層巻 LIM の場合では、両端の単層部で交番磁束が存在するが、進行波磁束に比べてその割合はわずかであるので⁽¹⁰⁾、この影響は無視することができ、従来の無限長一次鉄心を仮定する多層理論でもある程度の正確さで物理現象を把握できるものと思われる。

4. む す び

高速 LIM における磁束、二次うず電流および推力分布を単層巻線と二層巻線を施した各場合について求め、単層巻線によって生ずる交番起磁力が各分布に大きな影響を及ぼすことを指摘し、これらの比較から、両者における電磁現象の相違を明らかにした。

また、単層巻線の作る交番起磁力によって生ずる磁束は、モータ内の電流線分布から判断してかなり抑えられることが判明したが、打消されずに残った磁束はエアギャップ中の磁束分布を不均一にして、最終的には磁気抵抗を無視した無限長一次鉄心表面に沿って、モータ外へと漏れてゆくため、他の多層理論^{(2)~(4)(6)}と同様に、一次鉄心端面での fringing 磁束による制動力にはなり得ず、計算上、推力を過大評価する傾向があることを指摘した。なお、この傾向は単層巻線を施した低速 LIM においても現れており⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、本論文で指摘した交番起磁力の影響を究明する必要があると思われる。

最後に、本研究に有益な御助言をいただいた大分大学 小川幸吉助教授に深く謝意を表する。

(昭和 57 年 9 月 6 日受付)

文 献

- (1) S.N. Sudan: "Interaction of a Conducting Fluid Stream with a Traveling Magnetic Field of Finite Extension", *J. Appl. Phys.*, **34**, 3, 641 (1963)
- (2) E.R. Laithwaite: "Induction Machines [for Special Purposes]", (book) George Newnes Ltd., London (1966)
- (3) S.A. Nasar: "Electromagnetic Fields and Forces in a Linear Induction Motor, Taking into Account Edge Effects", *Proc. Instn. Elect. Engrs.*, **116**, 4, 605 (1969)
- (4) 山村・伊藤・石川: 「リニア誘導電動機の特性への端効果の影響」電学誌 **91**, 309 (昭 46-2)
- (5) S. Nonaka & K. Yoshida: "Analysis of Linear Induction Motors Using a Space Harmonic Technique", *Transport Without Wheels* (edited by E.R. Laithwaite) pp.187~216. (book) Elek Science, London (1977)
- (6) 岩本・山村: 「高速リニアインダクションモータの端効果特性の研究」電学論 B **92**, 368 (昭 47-6)
- (7) 野中・藤井・篠田: 「高速 LIM 用中空アルミニウムリアクションレールの効果に関する実験的研究」電学論 B **99**, 517 (昭 54-8)
- (8) 野中・幸山: 「高速リニアインダクションモータにおける中空アルミニウムリアクションレールの効果」電学論 B **99**, 525 (昭 54-8)
- (9) 野中・樋口: 「磁気浮上式鉄道用高速片側式リニアインダクションモータの設計方針について」電学論 B **101**, 475 (昭 56-8)
- (10) 野中・古川: 「二次うず電流分布に及ぼす単層巻高速 LIM の交番起磁力の影響」電気学会回転機研究会資料 RM-82-29 (昭 57-2)
- (11) 野中・古川: 「フーリエ級数法とフーリエ変換法による両端部単層の二層巻 LIM の磁束密度分布の検討」昭 56 電気学会全大 No. 776
- (12) 野中・小川・古川: 「単層巻高速 LIM の磁束密度分布と特性解析」昭 55 電気学会全大 No. 736
- (13) W. Deleroi & K.D. Hübner: "Einfluß der Ständerwicklungsanordnung auf das Betriebsverhalten von asynchronen Linearmotoren", *ETZ-A* **95**, 11, 601 (1974)
- (14) S. Yamamura: "Theory of Linear Induction Motors", (book) second edit. University of Tokyo Press, Tokyo (1978)
- (15) M. Poloujadoff, et al.: "Simultaneous Consideration of Finite Length and Finite Width of Linear Induction Motors", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* **PAS-99**, 3, 1172 (1980)
- (16) 野中・古川: 「単層巻線を施した高速 LIM における磁束分布と二次うず電流分布について」昭 57 電気学会全大 No. 778
- (17) 野中・小川: 「端効果およびスロットの影響を考慮したときの高速リニアインダクションモータの磁力線分布」電学論 B **98**, 617 (昭 53-7)
- (18) M.E. Isma'eel: "Theories of Linear Induction Motors with Completely Filled and Half Filled Endslots", *Proc. Instn. Elect. Engrs.*, **125**, 7, 657 (1978)