巻線型二次方式を部分的に採用した短一次リニア誘導モータの諸特性

正員 紙屋 雄史 学生員 深谷 浩司 正員 田 宇鎮 正員 小貫 天 (早稲田大学)

Characteristics of the Short Primary Linear Induction Motor with the Partially Adopted Wound Secondary Member
Yushi Kamiya, Member, Koji Fukaya, Student Member, Jeon Woojin, Member, Takashi Onuki, Member (Waseda University)

This paper describes single-sided Linear Induction Motors (LIMs) with a short primary member. In the machines, a solid-plate conductor is usually used for the secondary. In this study, we propose partial adoption of wound secondary members in the LIMs. Characteristics of the machine are summarized as follows:

- 1) Basic characteristics: The wound secondary shortens the magnetic clearance and makes characteristics of the machine superior compared with the solid-plate conductor one. Further, applying the proportional shifting method, we can improve thrust and efficiency characteristics.
- 2) Primary and secondary winding scheme: Parallel connection is proper for the primary and independently short-circuited scheme for the secondary to obtain stable performance.
- 3) Transient phenomena at the boundary between the wound secondary and the solid-plate one: In the boundary, especially at the end of the solid-plate conductor, undesirable phenomena develop. Thus, we propose a novel boundary structure, which yields stable transient performances.

キーワード：リニア誘導モータ、巻線型二次、有限要素法、電気回路解析、端効果

1. まえがき

現在、交通システムや搬送装置に採用されているリニアモータは、短一次リニア誘導モータ (Linear Induction Motor: LIM) がほとんどである¹⁾。この方式では二次側を全動作領域に敷設する必要があり、通常は全領域にわたってアルミなどの塊状平板導体が用いられている。しかし、塊状導体を使用した場合、構造的に磁気的空隙長が大きくなることが避けられず、機器特性の向上は困難である。そこで、この改善を目的とし、本論文では LIM への巻線型二次方式²⁾の採用を提案し、その機器特性に関して検討を行う。さらに、この方式では外部抵抗を挿入することにより二次抵抗値を自由に変更できるため、誘導機の比例推移現象を利用し、所望の速度で適切な推力・制動力を得られるなど、機器特性の向上が実現可能である。これらの理由から、本研究では巻線型二次方式の始動・制動動作を伴う区間や高い推力を必要とする区間への採用を提案している³⁾。

本論文では、有限要素法電磁界解析と駆動回路解析の連成解析法、ならびに試作機を用いた実験に基づき以下の検討を行う。

- (1) 巻線型二次 LIM の基礎特性
- (2) 一次・二次巻線結線法の違いが機器に与える影響
- (3) 塊状導体区間との境界部を通過する際に生じる過渡現象の把握と特性改善のための新境界構造の提案

2. 巻線型二次を部分的に採用したリニア誘導モータ

本論文で検討する巻線型二次リニア誘導モータの概略図を図 1 に示す。この機器は短一次片側式であり、二次側は塊状導体区間と巻線区間から成っている。巻線型二次方式では二次側も一次側と同様鉄心スロット内にコイルを挿入した構造になっており、また外部抵抗を接続することにより二次抵抗値を自由に変更できるという特長を有している。本研究における供試機を図 2 に、その諸元を表 1 に示す。一次側は 4 極で構成され、各相はデルタ結線されている。

図 1 巻線型を採用した短一次リニア誘導モータ概略図
Fig. 1. Feature of the LIM with the Wound Secondary Member.

図2 供試機
Fig.2. Experimental Machine.

表 1 供試機諸元

Table 1. Specifications of the Experimental Machine.

項目	記号	数値	[単位]
鉄心幅	W_c	0.050	[m]
極ピッチ	τ	0.084	[m]
一次極数	P	4	
一次コイル分布数	q	2	
一次コイル短節数	β	1	
二次導体厚さ(銅)	T_s	0.004	[m]
二次導体幅	W_s	0.090	[m]
機械的空隙長	g	0.002	[m]
定格周波数	f	20	[Hz]

3. 実機運転条件を考慮した解析手法

本論文では有限要素法による電磁界解析に電気回路解析を連成することにより、定電圧源駆動条件とともに二次側の巻線回路を考慮した解析を行う^{(4),(5)}。従って、磁場の考察物理量である磁気ベクトルポテンシャル A に加え、一次・二次回路の電流 I_p 、 I_s を未知数として扱う。以下に三次元電磁界・電気回路連成解析の手順を示す。

3.1 電磁界支配方程式 三次元直交座標系において、磁気ベクトルポテンシャル A を考察物理量として用いると、電磁界支配方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -(J_p + J_s) + \sigma \left(\nabla \phi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (1)$$

μ : 透磁率, J_p : 一次電流密度, J_s : 二次電流密度,
 σ : 導電率, ϕ : 電気スカラーポテンシャルである。

3.2 回路方程式 定電圧駆動解析を行うために、電磁界支配方程式と連立すべき回路方程式を導入する。一次側コイルのデルタ結線された端子間について、印加電圧を v 、総鎖交磁束を Φ 、コイル抵抗を R とすれば、キルヒホッフの第二法則より次式が成り立つ。

$$\frac{d\Phi}{dt} + R_p i_p = v \quad (2)$$

また、二次側コイルについては電源を考慮しないため次式が成り立つ。

$$\frac{d\Phi}{dt} + R_s i_s = 0 \quad (3)$$

3.3 連成 上記の電磁界解析と電気回路解析は次のように連成される。電流と電流密度、総鎖交磁束とベクトルポテンシャルの関係は、 S_c をコイル導体断面積、 S_e をコイル有効面積、 N をコイル巻数、 dI をコイルループに沿った微少区間として、次のように表される。

$$i = JS_c \quad (4)$$

$$\Phi = N \int_{S_e} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = N \oint_l \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (5)$$

以上の(1)~(5)式を連立することにより、ベクトルポテンシャルと一次・二次電流を同時に算出することができる。

以上述べた手法により解析を行うが、時間微分項に関しては後退差分法を使用し、走行子の移動を表現する手法としては、可動部を節点ピッチずつずらす方法を採用した⁽⁶⁾。

4. 巻線型リア誘導モータの諸特性

4.1 基礎特性 本節では巻線型 LIM の基礎特性に関して、解析および実験結果から通常の塊状導体二次型 LIM と比較検討を行い、その優位性を示す。

巻線型二次、塊状導体型二次それぞれの静止時における空隙磁束密度分布を図3に示す。また、図4、5に推力、効率特性を示す。巻線型二次方式では二次側も一次側と同様鉄心スロット内にコイルを納めた構造であるため、塊状導体方式と比較して磁気的空隙長を短くすることができる。そのため、一次側と二次側の磁気結合が強まり、空隙磁束密度は大きくなる。また、その結果、推力や効率などの機器特性も向上する。同様の観点からラダー型二次が採用される場合もあるが、巻線型の場合はさらに外部抵抗を挿入することによって二次抵抗値を自由に変更できることから、図4において確認される比例推移現象を利用した推力特性の向上が可能であるという特長を有している。なお、次節に述べる理由から、ここでは一次巻線結線法は短節分布巻で各極並列、二次巻線結線法は全節巻でコイル毎に短絡した結線法とし、供給電圧は毎極毎相 4.8[V]とした。

図3 空隙磁束密度分布(静止時)

Fig.3. Magnetic Flux Density Distribution (at a standstill).

図4 すべり-推力特性

Fig.4. Slip versus Thrust Characteristics.

図5 すべり-効率特性

Fig. 5. Slip versus Efficiency Characteristics.

4. 2 一次・二次巻線結線法 短一次 LIM に巻線型二次方式を部分的に採用するにあたり、塊状導体区間との境界領域通過時には二次側構造の違いから巻線の結線法ごとに様々な異なった現象が生じると考えられ、選択によっては特性の悪化を招く恐れがある。そこで、本節では巻線区間および塊状導体区間、さらにそれらの境界部での良好な走行を可能にする一次・二次巻線結線法を明らかにする。

(1) 二次巻線結線法 ここでは、二次コイルを全節巻とし、それぞれ独立に、もしくは隣り合う極のコイルを数極分直列に結線した場合についての特性の比較検討を行う。なお、一次側は相毎に各極を並列に結線している。

二次側の結線法の検討モデルは次に示す3種類を用いる。

- (a) 各コイルそれぞれを独立に短絡
- (b) 1 極長分離れた 2 つのコイルを直列に結線
- (c) 1 極長分離れた 3 つのコイルを直列に結線

独立短絡結線の場合、二次電流は一次鉄心に面したコイルにのみ流れる。しかし、2 極・3 極直列結線の場合は一次側に対向していないコイルにも二次電流は流れる。故に、一次側の前後にも磁束が発生し、短一次 LIM の一次側の有限性を補い、推力が増すとともに安定した走行特性を得ることが期待できる。

各二次巻線結線法を採用した場合の静止時における二次電流分布を図6に、空隙磁束密度分布を図7に示す。独立短絡結線の場合、二次電流は一次側に対向している二次コイルにのみ流れているが、2 極・3 極と直列結線長が長く

図6 二次電流分布 (測定値)

Fig.6. Secondary Current Distribution (Measured).

図7 空隙磁束密度分布 (測定値)

Fig.7. Magnetic Flux Density Distribution (Measured).

なるにつれ、走行子の前方および後方のコイルにも流れるようになり、一次側中央部に関して対称な山型となっていることがわかる。また、二次電流分布における脈動は独立短絡結線に比べ2 極直列・3 極直列となるにつれ大きくなっている。これは直列に結線したコイルグループの配置の違いによりそれぞれの総鎖交磁束量が大きく異なるために生じる現象である。さらに、2 極・3 極直列結線の場合、磁束密度分布は二次電流密度分布とは反対に、一次側中央部に関して対称な谷型となっており、また脈動も大きい。

また、走行特性として推力時間変化に関する検討を行ったが、直列に結線することによる推力の増加および脈動の低減は図れておらず、むしろ漏れ磁束の増加が推力の低下につながっていることを確認した。詳細については紙面の都合上省略する⁽³⁾。

以上の検討から、巻線型二次 LIM の二次巻線結線法としては、特性の安定性、構造の簡単さなどの面から独立短絡結線が妥当であるといえる。

(2) 一次巻線結線法 ここでは、同相の一次コイルを直列に結線した場合、各極並列とした場合の特性の違いについて検討を行う。我々が提案している巻線型二次方式の採用の場合、二次側として (a) 同一の抵抗値を有するコイルから成る巻線区間、(b) 異なる抵抗値を有するコイルから成る巻線区間、(c) 巻線区間と塊状導体区間の境界部、(d) 塊状導体区間の 4 つの場合がある。これらすべての状況において安定した特性を示す一次側結線法に関して検

討を行ったが、ここでは紙面の都合上最も一般性のある (b) の場合のみ結果を示す⁹⁾。なお、一次側コイルは短節分布巻であり、二次側巻線の結線法は前述の結果から独立短絡結線としている。

図 8 に静止時空隙磁束密度分布を示す。一次巻線を並列結線した場合において、異なる二次抵抗値領域における磁束密度分布の差は軽減されている。これは、表 2 のように、直列結線の場合は一次側各コイルに流れる電流はほぼ等しいのに対し、並列結線では各相各極毎に二次側の状況に応じた電流が流れるためであり、その結果、磁束密度分布がより均一に保たれる。従って、並列結線の場合には異なる二次領域上を通過する際にも、一次走行子にバランスよく推力・垂直力が発生し、安定した特性が得られる。ただし、端効果の影響や二次側の状況によっては、一次側のあるコイルに過大な電流が流れる危険性があるため、機器設計の際にコイル導線の容量を十分に検討する必要がある。

4.3 巻線・塊状導体型境界部における過渡特性 短一次 LIM に巻線型二次を部分的に採用した場合、塊状導体区間との境界部を走行子が通過する際に複雑な過渡現象が生じ、それにより機器特性が悪化することが懸念される。そこで本節では、それら過渡特性に関して詳細に検討し現象を把握するとともに、スムーズな境界部通過特性を実現する新たな境界構造の提案を行う。

図 9, 10 に考察対象とする境界構造を示す。走行子が境界部を通過する際、巻線区間から塊状導体区間へと進行する場合 (A 種境界) と、逆に塊状導体区間から巻線区間への進行する場合 (B 種境界) がある。また、二次構成としては巻線区間と塊状導体区間を単に隣り合わせに配置した構造 (0 種構造) と、境界部にラダー型を採用した構造 (1

種構造) が考えられる。1 種構造は本論文において提案するもので、巻線区間単層部の空きスロットにラダー型のように導体を挿入することで単層部における二次導体量の不足を補い、同時に構造の緩やかな移行を実現しようとするものである。以上 4 種類の境界構造を用い検討を行った。なお、一次・二次巻線結線法については前節までの検討から、一次側並列結線、二次側各コイル独立短絡結線を採用している。さらに、走行子はすべり $s = 0.5$ で区間境界部を通過すると仮定して検討を行うため、 $s = 0.5$ において巻線区間での推力と塊状導体区間での推力がほぼ等しくなるように二次コイル抵抗値を設定している。

A 種境界通過時のある一次コイルに流れる電流値の時間変化を図 11 に、推力の時間変化を図 12 に示す。0 種構造では、走行子が二次巻線区間単層部を通過する際に一次電流の振幅は小さくなる。これは、巻線区間単層部では二次電流量が二層部に比べて少ないことに起因するものである。従って、二次電流量の不足がラダー型に挿入された塊状導体に流れるうず電流によって補われている 1 種構造では、一次電流の振幅は境界部通過時においても減少せず、滑らかな境界部通過特性が得られる。一方、推力は 0 種構造上を通過している時間帯に大きく脈動しており、また平均値も減少している。この現象は機器特性に多大な影響を与えるものと思われ、以降詳細な検討を試みる。

図 13, 14 に A 種境界での発生推力分布、二次電流分布をそれぞれ示す。ここで、 T_1 は図 12 に示すように推力が

図 8 空隙磁束密度分布 (異なる二次抵抗値)

Fig.8. Magnetic Flux Density Distribution
(with Different Secondary Resistance Values).

表 2 一次電流値 (解析値)

Table 2. Value of Primary Current (Analysis Result).

	一定抵抗巻線		可変抵抗巻線		巻線・塊状導体境界	
	直列	並列	直列	並列	直列	並列
平均値 [A]	1.45	1.46	1.39	1.39	1.44	1.48
最小値 [A]	1.41	1.29	1.32	1.21	1.39	1.18
最大値 [A]	1.49	1.81	1.45	1.80	1.47	2.02

図 9 境界構造

Fig.9. Boundary Structures.

図 10 A-1 種境界構造

Fig.10. Structure of the Boundary Region A-1.

図 11 一次電流時間変化

Fig.11. Primary Current versus Time.

図 12 推力時間変化

Fig.12. Thrust versus Time.

脈動の中で極大値をとる瞬間であり、 T_2 は極小値をとる瞬間である。また、図 14 において図中矢印の大きさが電流密度の大きさを表している。0 種構造においては、塊状導体端部でうず電流の流れが制限され、スムーズに渦状に流れない瞬間がある。その結果、境界部において負推力が発生し、推力が低下する。すなわち、導体長の有限性による端効果が生じ、特性が悪化している。この過渡的な現象は時間 $t = T_2$ において顕著である。一方、 $t = T_1$ においてはうず電流がスムーズに流れているため、境界部において負推力は発生しない。そのため、推力は極大となる。また、巻線区間単層部では二次電流量が少ないため発生推力が小さくなり、その結果、境界部通過時には全体的に推力が減少する。一方、1 種構造においては、導体端部は巻線区間と構造的に重なっているため、負推力の発生は抑制されているといえる。また、同時に巻線区間単層部における二次導体量の不足が補われているため、単層部において発生推力が減少することなく、特性は安定している。以上の検討から、A 種境界上通過時には、巻線区間単層部の影響により推力が低下し、さらに塊状導体端部（進行磁界出口端）における端効果により周期的に負推力が発生するため推力はさらに低下し、脈動も大きくなることが明らかになった。しかし、これらの機器特性に悪影響を与える諸現象は、1 種構造を採用することにより大幅に軽減されており、提案構造の有効性が示されたといえる。

一方、B 種境界通過時には、巻線区間単層部の影響によ

(a) $t = T_1$

(b) $t = T_2$

図 13 推力分布瞬時値

Fig.13. Instantaneous Thrust Force Distribution

り推力が低下し、塊状導体端部における端効果により時間的脈動も大きくなるが、提案構造を用いることにより特性が安定することを確認している。なお、紙面の都合上 B 種境界に関する詳細な結果は省略する。

5. まとめ

本論文では、片側式短一次リニア誘導モータのさらなる特性・制御性の向上のために、巻線型二次方式の部分的採用を提案し、その機器特性に関し検討を行った。そして、巻線型二次方式を LIM へ部分的に採用する場合に留意すべき点を明らかにした。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 巻線型二次方式を採用することにより一次側と二次側の磁気結合が強まり、推力や効率などの機器特性が向上することを示した。また、二次巻線抵抗を可変にすることにより、比例推移現象を利用し、諸特性の制御が可能であることも確認した。
- (2) 巻線型二次を部分的に採用する場合、二次巻線結線法としては独立短絡結線が、一次巻線結線法としては並列結線が有効であるとの結果を得た。
- (3) 二次巻線区間と塊状導体区間との間の境界部を走行子が通過する際に、巻線区間単層部と塊状導体端部において特性が悪化することを明らかにした。また、これらの特性の悪化を抑制するためにラダー型を一部採用した境界構造を提案し、その有効性を示した。

図 14 二次電流分布の様子を示す説明図

Fig.14. Secondary Current Distribution.

以上、巻線型二次方式は構造的に複雑になることは否めないが、その優れた特性を考慮すれば、始動・制動動作を伴う区間や高い推力を必要とする登坂部などの区間へ採用する価値もあると思われる。

最後に、本研究において実験に従事された藤波貴司君に謝意を表す。

(平成 11 年 8 月 26 日受付, 平成 11 年 12 月 13 日再受付)

文 献

- (1)草刈元夫・麻生義雄・磯辺栄介:「都営 12 号線用鉄車輪式リニアモータカーの推進システム」, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-92-50, 1992.
- (2)藤井信男・河村憲太郎・平田征生:「新都市交通用リニアモータの高特性運転方式についての検討」, 平成 4 年電気学会産業応用部門全国大会, vol.213-D, No.12, pp.877-882, 1992 年.
- (3)T.Onuki, Y.Kamiya, T.Iraha, K.Fukaya, W.Jeon: "Improvement of Short Primary Member Linear Induction Motor Performance by Partial Adoption of the Wound Secondary", The 33rd Annual Meeting of the Industry Applications Society St. Louis, Mo. USA, 12-16 Oct. 1998.
- (4)小貫 天・紙屋雄史・原 徳正・栗本佳英:「定電圧源駆動短二次リニア誘導モータの一次コイル結線法の検討」, 平成 8 年電気学会論文誌 D, vol.116, No.12, pp.1283-1288, 1996 年.
- (5)Y.Kamiya, T.Onuki: "3-D Eddy Current Analysis by the Finite Element Method Using Double Node Technique", IEEE Trans. Magn., vol.32, pp.741-744, May 1996.
- (6)T.W.Preston, A.B.J.Reece, P.S.Sangha: "Induction Motor Analysis by Time-stepping Techniques", IEEE Trans. Magn., vol.24, pp.471-474, Jan. 1988.

紙屋 雄史

(正員) 1969 年 8 月 20 日生。93 年 3 月 早稲田大学理工学部 電気工学科卒業, 97 年 3 月 同大学理工学研究科 博士後期課程修了。博士(工学)早稲田大学。96 年 4 月 同大学理工学部助手, 98 年 4 月 運輸省交通安全公害研究所 運輸技術研究員, 99 年 12 月 群馬大学大学院教育学研究科 非常勤講師, 現在に至る。主に、環境エネルギー関連の研究に従事。92 年度 電気学会優秀論文発表賞 受賞。

深谷 浩司

(学生員) 1976 年 4 月 1 日生。98 年 3 月 早稲田大学理工学部 電気電子情報工学科卒業, 同年 4 月 同大学理工学研究科 修士課程入学, 現在に至る。主に、電磁界数値解析に基づいたリニアモータの性能向上に関する研究に従事。

田 宇鎮

(正員) 1967 年 3 月 3 日生。91 年 2 月 韓国建国大学工学部電気工学科卒業。95 年 3 月 早稲田大学理工学研究科修士課程修了。98 年 3 月 同大学博士後期課程修了。博士(工学)早稲田大学。同年 4 月より同大学助手, 現在に至る。主に、電磁界数値解析を用いた特殊電動機の開発に関する研究に従事。

小貫 天

(正員) 1929 年 7 月 31 日生。51 年 3 月 早稲田大学第一理工学部 電気工学科卒業。同年 4 月 通商産業省工業技術院 電気試験所入所。54 年 4 月 早稲田大学理工学部 に奉職, 68 年 4 月 同大学教授, 88 年から 92 年まで同大学理工学研究所 所長。工学博士。主に、リニアモータ, 電磁界数値解析に関する研究に従事。64, 65 年電気学会本部・東京支部 評議員。87 年電気学会論文賞 受賞。IEEE Fellow。