リニア誘導モータの拘束試験に基づく始動特性算定法

正員 水野孝行 (明電舎)

非会員 久光行正 (明電舎)

正員 市岡忠士 (明電舎)

正員 戸田孝 (明電舎)

A Method of Starting Performance Calculation Based on Lock Test for Linear Induction Motor

Takayuki Mizuno, Member, Yukimasa Hisamitsu, Non-member, Tadashi Ichioka, Member,
Takashi Toda, Member (Meidensha Corporation)

The equivalent circuit of the linear induction motor (LIM) is generally expressed as the same that of the rotating induction motor (IM). Then, the starting performance of the LIM is obtained using results of the no-load test and the lock test similar with the IM.

However, it is almost impossible to perform the no-load test for the LIM in the factory, because it needs a special equipment to move the mover at synchronous speed. Therefore, a new method is required to calculate the performance of the LIM by simple tests without the no-load test.

In this paper, we propose a new method which does not need the no-load test for the starting performance calculation of the LIM. At first, the results of the no-load test and the lock test for the test machine are shown. And an equivalent circuit which is suitable for the performance calculation of the LIM is proposed. Moreover, a method of determining its constants from results of the lock test is discussed.

The starting performance calculation for the LIM was made using the proposed equivalent circuit. The calculated results for the thrust vs. speed, the current vs. speed and the power input vs. slip characteristics were satisfactorily agreed with experimental results.

キーワード：リニア誘導モータ，等価回路，定数決定法，始動特性

1. ま え が き

リニア誘導モータ（以下、LIM と略記）の等価回路は両側式⁽¹⁾、片側式⁽²⁾および円筒状⁽³⁾ LIM を問わず回転形誘導モータ（以下、IM と略記）と同様に扱うことができ、既に解析的に得られた定数により種々の特性算定が行われている。しかし、測定データに基づく特性算定法はほとんど検討されておらず、多くの問題が残存しているように思われる。

LIM の等価回路が IM と同様に表される以上、IM

の規格⁽⁴⁾などに従って無負荷試験と拘束試験を行えば特性が算定できることになる。しかし、直線的に移動する LIM の場合、一般的に無負荷試験は行い難く、実施するためには特殊な試験装置⁽⁵⁾が必要となる。このため、LIM の等価回路定数を拘束試験のみのデータから得ようとする検討^{(6)~(8)}も始まっている。また、二次導体として平板を利用する通常の LIM では、等価的なエアギャップが増大して励磁リアクタンスが相対的に小さくなり、拘束試験時に励磁リアクタンスの影響が無視できなくなる。更に、二次側の定数

が表皮効果の影響により変化するなど LIM の特性算定においてはその構造および特性の特異性のため、IM の算定法とは異なった簡単でかつ正確な算定法が要望される。

そこで本論文においては、特に産業用の搬送システムなどに応用される小容量の低速 LIM を対象に、巻線抵抗測定と拘束試験結果に基づく LIM の新しい始動特性算定法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を提案する。まず、無負荷試験および負荷試験が可能な LIM の実験装置を用い、供試機の基本特性を示す。次に、拘束試験のデータから定数を決定し特性を算定するのに適した等価回路の選定を行い、定数決定法について述べる。本定数決定法は拘束試験時に推力を測定して推力発生に有効に寄与する二次入力と等価的な鉄損を分離し、励磁リアクタンスを含む二次側の定数を適切な関数で近似するものである。従って、一次側の鉄損をはじめ端効果に起因する漂遊損、拘束試験時の励磁電流の影響、二次定数の表皮効果による変化などを同時に考慮することができる。更に、得られた定数により始動特性を算定し、実測値と比較して本特性算定法の妥当性を検討する。この種の低速 LIM では、端効果の影響が比較的少なく、拘束試験により運転時の定数を推定しても実用上十分な始動特性の算定が可能となる⁽¹⁵⁾。

2. 試作機の概要と基本特性

〈2・1〉 試作機の概要 今回試作した試作機は片側式三相 LIM であり、その設計仕様を表 1 に、概略図を図 1 に示す。本試作機は無負荷試験あるいは負荷試験も可能となるように、二次側鉄心をロール状にして二次導体となるアルミ板をロール表面に張付け回転可能としたものである。一次側固定子は軸受により振子状に取付けられ、推力を発生すると二次側回転ロールの回転方向と逆方向に移動しようとする。一次側固定子の端はロードセルにより固定され、この推力を測定できる構成となっている。実推力はこの値をギャップ面に換算して得ることができる。

〈2・2〉 実験装置の構成 試験装置は図 2 に示すように試作機を減速機付きの IM と直結し、この IM を再生機能付きのインバータ（負荷用 INV）により速度制御することによって任意の速度および負荷が得られるようになっている。試作機の駆動用電源は電圧および周波数を任意に調整できるインバータ（駆動用 INV）を採用した。また、電圧、電流および入力力はデジタルパワーメータ（DPM）により、推力はロードセルの出力をアンプ（AMP）を通して測定する構成となっている。

表 1 試作機の仕様
Table 1. Specifications of test machine.

定 格		一次巻線	
出力・極数	100 W・6 P	巻線構成	二層巻
電圧・周波数	200 V・10 Hz	短節率	1
同期速度	1.44 m/s	一相直列導体数	1,200
一次鉄心(ギャップ面の寸法)		導体数/スロット	中央部 100 両端部 50
鉄心長	504 mm		
鉄心積み厚	200 mm		
		二次導体	
極ピッチ	72 mm	導体材質	アルミ
毎極毎相スロット数	2	導体厚さ	2 mm
スロットピッチ	12 mm	導体幅	380 mm
スロット幅	8 mm	裏張り鉄板厚	12 mm
スロット深さ	21 mm	裏張り鉄板幅	380 mm
エアギャップ	1.2 mm	ロール外径	764 mm

図 1 試作機の概略図
Fig. 1. Construction of test machine.

図 2 実験装置の構成
Fig. 2. Configuration of test system.

本来、機器の基本特性の算定には電源の時間的高調波による特性への影響を考慮して、M-Gセットなどによる正弦波電源を用いるべきと考える。しかし、数 Hz 程度の低周波数となると発電機の電圧、周波数精度などに問題が生じ実用的でない。従って、ここではインバータを用いることにしたが、高調波電流の影響を軽減するため IGBT (Insulated Gate Bipolar

Transistor) を採用して搬送周波数を 10 kHz としている。このため電流波形は極めて正弦波に近いものとなっている。

測定に用いたデジタルパワーメータは低周波特性を改善したものであり、2 Hz 程度まで安定して測定できる周波数特性をもつ。各測定値は文献(9)、(10)の思想に基づき、電圧についてはほぼ基本波成分を指示する直流平均実効値表示、電流および入力については全実効値表示にて測定するものとする。なお、端効果などの影響により電圧、電流に三相不平衡が存在する場合には三相の平均をとるものとする。

〈2・3〉 無負荷試験結果 図3に10 Hzにおける試作機の無負荷試験の結果を示す。同図より明らかに電圧と電流はほぼ比例関係にあり、磁気的飽和の影響を受けにくいことを示している。すなわち、小容量の LIM では、通常の IM の回路定数に比較して励磁リアクタンスが小さく、電流をはじめ諸特性への磁気的飽和の影響が少ないとみることが出来る。従って、本論文の主題である拘束試験から等価回路の定数を求め特性を算定する場合、拘束試験が定格電圧より低い電圧で行われても、定格電圧での特性算定には十分利用できることになる。

なお、定格電圧 V_1 のときの一次電流を I_0 、入力を W_0 とすると、一次リアクタンス X_1 と等価鉄損抵抗

R_m は次式で計算でき、結果のみ示せば表2となる。

$$X_1 = (R_m^2 + X_n^2) / X_n \dots\dots\dots (1)$$

$$R_m = (R_n^2 + X_n^2) / R_n \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} R_n &= \frac{W_0}{3I_0^2} - R_1 \\ X_n &= \sqrt{\left(\frac{V_1}{\sqrt{3}I_0}\right)^2 - \left(\frac{W_0}{3I_0^2}\right)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 X_1 と R_m は後述の等価回路(図6)に合せて並列接続したときの値であり、一次抵抗 R_1 は無負荷試験直後に測定した値である。

また、無負荷試験時の入力には機械損も含まれるが、図3より明らかにようにその値は極めて小さいので、ここでは機械損を無視して考える。本論文の対象としている LIM は小容量の低速機であり、一般的にも機械損は十分小さく無視して差し支えないものとする。

〈2・4〉 拘束試験結果 図4に拘束試験の結果を示す。拘束試験は周波数2~11 Hz にわたって、ほぼ定格電流となる4 A一定で行った。測定したデータは電圧、入力のほか、推力 T_L (N) である。また、拘束試験の結果は巻線温度に大きく影響を受けるので、各点の測定で一定時間無負荷運転し、巻線温度がほぼ一定となる条件で測定した。この試験中における巻線抵抗は $15.15 \pm 0.15 \Omega$ ($75.3 \pm 3^\circ\text{C}$) の範囲にあった。また、二次側はロール状にしたことで熱容量と放熱効果が大きくなり、温度上昇はほとんど認められず、温度は周囲温度 (20°C) より $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 高い程度であった。なお、一般には巻線温度を管理しての拘束試験は実用的でなく、実使用状態での温度も拘束試験時とは異なる

図3 無負荷試験結果 (10 Hz)
Fig. 3. Results of no-load test (10 Hz).

表2 無負荷試験による一次定数(一相分)
Table 2. Primary constants obtained by no-load test (per phase).

一次巻線抵抗	$R_1 = 14.55 \Omega$
一次リアクタンス	$X_1 = 20.04 \Omega$ (10 Hz)
鉄損抵抗	$R_m = 158 \Omega$ (10 Hz)

図4 拘束試験結果 (4 A)
Fig. 4. Results of lock test (4 A).

った値となる。従って、拘束試験時に一次巻線および二次導体の温度を測定し、後述する方法により得られた定数のうち抵抗分については、実使用状態で推定される温度に換算して用いるべきである。

一般的な拘束試験⁽⁴⁾では印加電圧が定格電圧に比較して十分小さいため、鉄損を無視して一次入力から一次銅損を差し引いて二次銅損とみなしている。しかし、LIMの場合には等価エアギャップが大きく拘束試験時の電圧が定格電圧に近くなることもあり、鉄損も無視できなくなる。また、時間的高調波あるいは端効果などの影響により漂遊損の増大が予想される。そこで推力発生に有効に寄与する二次入力を求めるため、拘束試験時に推力を測定する方法を導入する。推力が得られると同期速度 v_s (m/s) との関係から、二次入力 P_{L2} は(4)式によって求められる。

$$P_{L2} = T_L v_s \dots\dots\dots (4)$$

拘束時にはこの二次入力のすべてが二次銅損とみなせるので、この値を利用すれば、拘束試験時における鉄損、漂遊損などを分離することができ、定数算出の精度が向上する。図4には前述のデータのほか、損失を分離するため一次入力より一次銅損を差し引いた線も描いてある。この結果、拘束試験時の一次入力には一次および二次銅損のほか、約10%の付加的な損失が含まれていることがわかる。この付加的損失を等価鉄損として取扱うことにする。

以上の結果より、拘束試験におけるLIMの等価鉄損は二次銅損に対して無視できなくなり、推力に寄与する有効二次入力と等価鉄損を厳密に分離することが重要と考える。従って、本定数決定法では拘束試験時に推力を測定して二次銅損を決定する方法をとることにする。小容量機を対象とした場合、拘束試験時の推力は比較的容易に測定でき、試験における困難さは伴うものではないと考える。また、等価鉄損が無視できる場合には推力測定を省略して、一次銅損以外の損失がすべて二次銅損であるとすればよい。

3. 等価回路の選定と定数決定法

〈3・1〉 等価回路 IMの特性算定には一般的にT形等価回路が用いられ、その定数決定法もほぼ確立したとみることができる。しかし、無負荷試験が必要であることはもとより、一次および二次の漏れリアクタンスの厳密な分離が困難であり、LIMのように表皮効果の影響により二次定数が変化する場合には好ましくない。また、等価エアギャップがIMに比較して相対的に大きいLIMでは、拘束時にも励磁電流分

図5 π 形等価回路
Fig. 5. π -type equivalent circuit.

図6 LIM特性算定のための等価回路
Fig. 6. Equivalent circuit of LIM for performance calculation.

が相当量流れることを前提にする必要があることなど種々の問題があるため、IMの算定法⁽⁴⁾をそのままLIMに適用するにはむりがあるように思われる。従って、ここではLIMの特性を拘束試験のみの結果から算定するという目的に対して、最も都合の良い等価回路を考える。

前述のように、本拘束試験では推力を測定して等価鉄損を分離するので、等価回路上鉄損抵抗の取扱いやすい形とする必要がある。図5に示す等価回路は π 形等価回路としてよく知られているが、鉄損抵抗が一次抵抗の直後に挿入されるため、等価鉄損からの鉄損抵抗の算出が容易となる。ただし、図5において、 R_1 :一次抵抗、 x_1 :一次漏れリアクタンス、 X_m :励磁リアクタンス、 R_2 :二次抵抗、 x_2 :二次漏れリアクタンス、 R_m :等価鉄損抵抗、 s :滑りである。

また、IMの等価回路はその電圧方程式を適当な巻数比 α を考慮してテンソル変換することにより、種々の等価回路で表されることが知られている⁽¹¹⁾。文献(12)では図5の π 形等価回路から出発して図6の等価回路を導出している。図6は見掛け上一次漏れリアクタンスが消去された形となっているが、等価変換を行っているため電氣的には図5と同一のものを表している。ただし、図6において

$$\left. \begin{aligned} X'_m &= \alpha X_m = X_1 \\ x'_2 &= \alpha^2 X_2 - \alpha X_m \\ R'_2 &= \alpha^2 R_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

であり、 $\alpha = X_1/X_m$ 、 X_1 ：一次リアクタンス ($X_1 = x_1 + X_m$)、 X_2 ：二次リアクタンス ($X_2 = x_2 + X_m$)である。すなわち、 X_m は表2における X_1 と同一のものである。

従って、図6の等価回路を用いると一次および二次漏れリアクタンスの分離の必要がなく、定数の算出が容易となり無負荷試験を行わない本算定法には適した等価回路と考えることができる。以上の理由により、LIMの始動特性算定のための等価回路としては図6を採用することにする。

〈3・2〉 定数算出式 LIM等価回路を図6とすると、拘束時(滑り $s=1$)の等価回路は図7のように表すことができる。いま、定格周波数 f_n で拘束試験を行い相電圧 V_L 、電流 I_L 、入力 W_L および推力 T_L を測定する。そして、拘束試験終了後ただちに一相巻線抵抗 R_1 を測定したとすると、以下の手順に従って、相電圧を基準ベクトルにとった場合の各部の定数、電圧および電流を決定することができる。

(1) 電源側から見た全抵抗

$$R_L = W_L / (3I_L^2) \dots\dots\dots (6)$$

(2) 電源側から見た全リアクタンス

$$X_L = \sqrt{(V_L/I_L)^2 - R_L^2} \dots\dots\dots (7)$$

(3) 一次電流

$$\dot{I}_L = V_L / (R_L + jX_L) \dots\dots\dots (8)$$

(4) 誘起電圧

$$\dot{V}_{Lm} = V_L - R_1 \dot{I}_L \dots\dots\dots (9)$$

(5) 二次入力 P_{L2} ：(4)式

(6) 等価鉄損

$$W_{Lm} = W_L - 3R_1 I_L^2 - P_{L2} \dots\dots\dots (10)$$

(7) 等価鉄損抵抗

$$R_m = 3V_{Lm}^2 / W_{Lm} \dots\dots\dots (11)$$

(8) 鉄損電流

$$\dot{I}_{Rm} = \dot{V}_{Lm} / R_m \dots\dots\dots (12)$$

(9) 等価二次電流

$$\dot{I}_{L2} = \dot{I}_L - \dot{I}_{Rm} \dots\dots\dots (13)$$

図7 拘束時の等価回路 ($s=1$)
Fig. 7. Equivalent circuit at standstill.

(10) 等価二次インピーダンス

$$\dot{Z}_{2E(s=1)} = R_{2E(s=1)} + jX_{2E(s=1)} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、

$$R_{2E(s=1)} = P_{L2} / (3I_{L2}^2) \dots\dots\dots (15)$$

$$X_{2E(s=1)} = \sqrt{(V_{Lm}/I_{L2})^2 - \{R_{2E(s=1)}\}^2} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、等価二次電流は励磁電流と二次電流の和を表し、等価二次インピーダンスは X_m を含む二次側の全インピーダンスを表すものとする。

一方、任意の滑り s における等価二次インピーダンスを図6の等価回路より求め、抵抗分を $R_{2E(s)}$ 、リアクタンス分を $X_{2E(s)}$ とくと、両式の関係から二次定数 R_2' および x_2' が(17)式および(18)式として求められる。

$$R_2' = \frac{sR_{2E(s)}X_m'^2}{\{R_{2E(s)}\}^2 + \{X_{2E(s)} - X_m'\}^2} \dots\dots\dots (17)$$

$$x_2' = \frac{X_m' \{X_{2E(s)}X_m' - \{Z_{2E(s)}\}^2\}}{\{R_{2E(s)}\}^2 + \{X_{2E(s)} - X_m'\}^2} \dots\dots\dots (18)$$

しかし、現段階で求められる諸量は(16)式までであり、二次定数は X_m' が不明であるため決定できない。

4. X_m' および二次定数の決定法

無負荷試験を行わないで X_m' を決定する方法として、著者らが提案⁽⁹⁾したように、異なった周波数の数点の拘束試験の結果から図式的に決定する方法がある。しかし、測定点が多くなること、作図が必要なことなど簡便な方法とは言い難い。また、二次定数は表皮効果の影響を受けて滑りによって変化するので、滑りの関数として表すことが望ましい。ここでは、 X_m' を含む等価二次インピーダンスの近似式を用いて、 X_m' および二次側の定数を算出する方法を考える。

〈4・1〉 等価二次インピーダンスの近似式

一般に、LIMの二次電流は渦電流となり無限の自由度をもって流れる。従って、この現象を無限個の二次回路を用いて表すことにすれば、二次側の等価回路は図8のように考えることができる。ただし、 $r_1, r_2, r_3, \dots, x_1, x_2, x_3, \dots$ は各二次回路の抵抗、漏れリアクタン

図8 表皮効果を考慮した二次側等価回路
Fig. 8. Secondary equivalent circuit taking skin effect into consideration.

スを表す。本特性算定のための等価回路は図6を採用するが、厳密には図6の二次側は図8の合成を表していることになる。

図8より合成インピーダンスを求め、各リアクタンス分が周波数に比例することを考慮すれば、等価二次インピーダンスの抵抗分およびリアクタンス分が滑り s と周波数 f の関数として表され、それぞれ(19)および(20)式となる⁽¹⁵⁾。

$$R_{2E}(s) = f \frac{b_1(sf) + b_2(sf)^3 + b_3(sf)^5 + \dots}{a_1 + b_2(sf)^2 + a_3(sf)^4 + a_4(sf)^6 + \dots} \quad (19)$$

$$X_{2E}(s) = f \frac{c_1 + c_2(sf)^2 + c_3(sf)^4 + c_4(sf)^6 + \dots}{a_1 + a_2(sf)^2 + a_3(sf)^4 + a_4(sf)^6 + \dots} \quad (20)$$

ただし、係数 $a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots, c_1, c_2, \dots$ は図8の等価回路定数で決まる定数であるが、本特性算定法ではこれらの係数を拘束試験 ($s=1$ の状態) によって求めることになる。

詳細は省略するが、異なった周波数での拘束試験を数回行い、各周波数における等価二次インピーダンスが得られると、有理関数近似の方法⁽¹³⁾に従って上式の各係数を決定することができる。この場合の近似精度は拘束試験のデータの数、上式において何次の項まで考慮するかに依存する。

しかし、実際に図4に示す2~11 Hzの10点でのデータを基に、(19)式および(20)式の分子分母の第2項まで考慮した場合と、同様に第5項までを考慮した場合とで有理関数近似法により各係数を求め、 R_{2E} および X_{2E} を算定すると結果は両者ともほとんど同一であった⁽¹⁵⁾。すなわち、この場合の等価二次インピーダンスは(19)式および(20)式の第2項まで考慮すれば十分近似できることになる。

従って、ここでは(19)式および(20)式の分子分母の第2項までをとり、更に分子分母を b_1 で除して(21)式および(22)式の形で等価二次インピーダンスの抵抗およびリアクタンスを表すことにする。

$$R_{2E}(s) = f \frac{sf + b_2'(sf)^3}{a_1' + a_2'(sf)^2} \quad (21)$$

$$X_{2E}(s) = f \frac{c_1' + c_2'(sf)^2}{a_1' + a_2'(sf)^2} \quad (22)$$

また、現実の算定法としては、前述の有理関数近似などの数値解析を用いなくても、比較的容易に定数が決定でき、ある程度の精度が確保されれば十分であると考えられる。そこで、拘束試験の回数を少なくして、測定データから直接係数が得られる実用的な方法を検討する。

〈4・2〉 等価二次インピーダンスの決定法 (21)

式および(22)式の係数を決定するにあたり、係数は全部で5個あるので一周波数の拘束試験では決定できない。異なった任意の3周波数での拘束試験の結果を用いれば、(21)式および(22)式を連立させた方程式により各係数を決定できる。ここでは便宜上定格周波数 f_n とその(1/2)周波数および(1/4)周波数における拘束試験の結果より各係数を算出することにする。

各々の周波数での等価二次インピーダンスを求め、 f_n における値を

$$\dot{Z}_{2E} = R_{2E} + jX_{2E} \quad (23)$$

$f_n/2$ における値を

$$\dot{Z}'_{2E} = R'_{2E} + jX'_{2E} \quad (24)$$

$f_n/4$ における値を

$$\dot{Z}''_{2E} = R''_{2E} + jX''_{2E} \quad (25)$$

と表すことにする。ただし、 X''_{2E} は係数の算出に使用しない。

(23)~(25)式の値と、試験時の周波数および $s=1$ を考慮して(21)式および(22)式の各係数を求めると、

$$\left. \begin{aligned} a_1' &= A_1 f_n^2 \\ a_2' &= A_2 \\ b_2' &= B_2 / f_n^2 \\ c_1' &= C_1 f_n \\ c_2' &= C_2 / f_n \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= (-R_{2E} + 5R'_{2E} - 4R''_{2E})/D \\ A_2 &= (R_{2E} - 20R'_{2E} + 64R''_{2E})/D \\ B_2 &= 16(5R_{2E}R''_{2E} - R_{2E}R'_{2E} \\ &\quad - 4R'_{2E}R''_{2E})/D \\ C_1 &= \{(8X'_{2E} - X_{2E})A_1 + (2X'_{2E} \\ &\quad - X_{2E})A_2\}/3 \\ C_2 &= \{4(X_{2E} - 2X'_{2E})A_1 + 2(2X_{2E} \\ &\quad - X'_{2E})A_2\}/3 \\ D &= 64R'_{2E}R''_{2E} + R_{2E}R'_{2E} \\ &\quad - 20R_{2E}R''_{2E} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

以上により各係数が求まり、これを(21)式および(22)式に代入すれば任意の周波数、滑りにおける等価二次インピーダンスを求めることができる。

また、 X'_m は $X_{2E}(s)$ の $s=0$ のときの値であるので、(22)式より

$$X'_m = X_{2E}(s=0) = (c_1'/a_1')f \quad (28)$$

として求めることができる。

なお、定格周波数運転時を考えれば、 $f=f_n$ として

表 3 近似式の係数算出結果
Table 3. Coefficients of approximate formulas.

算定周波数	10 Hz		
拘束試験周波数	10 Hz	5 Hz	2.5 Hz
$R_{2E}(s=1)$	5.892	2.050	0.580
$X_{2E}(s=1)$	16.21	9.286	5.432
A_1	0.1028	C_1	2.070
A_2	0.1015	C_2	1.242
B_2	0.2035	—	—
X_m	20.14 Ω	R_m	131.1 Ω

図 9 拘束時等価二次インピーダンス
Fig. 9. Equivalent secondary impedance at standstill.

$$R_{2E}(s) = \frac{s + s^3 B_2}{A_1 + s^2 A_2} \quad (29)$$

$$X_{2E}(s) = \frac{C_1 + s^2 C_2}{A_1 + s^2 A_2} \quad (30)$$

$$X'_m = C_1 / A_1 \quad (31)$$

と表すことができる。

〈4・3〉 各定数の算出結果 表 3 には $f_n=10$ Hz, $f_n/2=5$ Hz および $f_n/4=2.5$ Hz の 3 周波数における拘束試験の結果より求めた $R_{2E}(s=1)$, $X_{2E}(s=1)$ の各値, および前述の係数算出方法に従って計算した各係数を示す。また, 表 3 の係数を用いて (21) 式および (22) 式により算定した拘束時 ($s=1$) における等価二次インピーダンスの周波数に対する近似曲線と, 各周波数における拘束試験の結果より (6)~(16) 式に従って求めた値 (実測値からの計算値) との比較を図 9 に示す。図 9 より, 実測値からの計算値と近似式との誤差が低周波領域にて若干存在するものの, 全般的に本近似式により等価二次インピーダンスの抵抗分およびリアク

図 10 二次定数の滑りに対する変化
Fig. 10. Frequency characteristics of secondary constants.

タンス分が良好に近似できることがわかる。

また, 表 3 には (31) 式および (11) 式により計算した定格周波数における X'_m および R_m の値も示しているが, 前述の無負荷試験の結果 (表 2) と比較すると, $X'_m(X_1$ と等価) については良好な一致を示しているといえる。 R_m については, 17% 程度小さめの値となった。すなわち, 拘束試験と無負荷試験における等価鉄損の差が若干現れているものと考ええる。しかし後述するように, 等価鉄損の推力および電流に与える影響は少ないので, 各周波数において拘束試験の結果から求めた R_m を滑りに対して一定であると仮定して検討を進める。

(21) 式および (22) 式により計算される任意の周波数および滑りに対する等価二次インピーダンスと, (28) 式より得られる X'_m の値を (17) 式および (18) 式に代入すれば, この運転状態での R'_2 および x'_2 を決定することができる。図 10 は定格周波数 10 Hz のほか, 8 Hz および 6 Hz での滑りに対する R'_2 および x'_2 の変化の様子を表したものである。これらの図から明らかにように, LIM の二次定数は周波数および滑りによって変化する。一般に二次定数への表皮効果の影響は滑り周波数 (sf) が高くなると抵抗分は大きく, 漏れリアクタンス分は小さくなる傾向にあるが, その特徴をよく表しているといえる。

5. 特性算定結果と実測値との比較

等価回路の定数が得られれば, 等価回路についての電圧方程式より種々の特性は容易に求められるので, 詳細は省略し, ここでは速度—推力・電流特性と損失特性の実測結果と算定結果の比較のみ示し, 本算定法の妥当性を検討する。なお, 実測は図 2 の試験装置に

より巻線温度が拘束試験時とほぼ同程度となる状態で行った。

〈5・1〉 速度-推力・電流特性 図 11 および図 12 に、速度-推力特性および速度-電流特性の実測値と前章で算出した定数を用いた特性算定値との比較を示す。両図より、各運転周波数における推力および電流の実測値と特性算定値は良好に一致していることがわかる。若干ではあるが、電流の誤差が同期速度付近および低速領域において大きくなっている。これは二次インピーダンスの近似式の精度、後述の損失の影響などによるものと思われるが、実用的には十分な精度で算定されているものとする。

〈5・2〉 滑り-損失特性 図 13 に 200 V-10 Hz における滑り-損失特性を示す。図 13 において実測値からの計算値は、各滑りにおける実負荷試験時に一次入

力と電流を測定して、一次銅損は一次電流と巻線抵抗、二次銅損は出力と滑りの関係から、等価鉄損は一次入力より出力、一次銅損および二次銅損を差し引いて求めたものである。また、算定値は前章で算出した定数を用いて等価回路より求めたものである。

図 13 において、二次銅損は実測値からの計算値と算定値が良好に一致するが、特に等価鉄損は同期速度付近での誤差が大きくなっている。等価鉄損の算定値では、算定周波数である 10 Hz の拘束試験により求めた等価鉄損抵抗を一定としているが、実際には滑りによってこの値が変化することを意味している。しかし、小容量 LIM の損失は一次銅損が支配的であり、等価鉄損の全入力に対する割合が比較的小さいこと、本算定法が始動特性を対象としていることなどから等価鉄損抵抗を一定としても実用上問題はないものと考ええる。

推力、二次銅損などについては、拘束試験結果から推力を発生する有効な二次入力を分離して、任意の滑り周波数に対応した二次定数を算出しているため、等価鉄損の影響を受けにくく滑りの全範囲について良好に一致するとみることができる。また、一次電流も等価鉄損抵抗の影響を受けるが、等価鉄損電流は励磁電流に比較して十分小さく無視できるので、一次電流の誤差も少ないことになる。

従って、本算定法を用いれば、同期速度付近の損失に若干の誤差を生じるものの、巻線抵抗測定と拘束試験のみにより LIM の始動特性が良好に推定できるものとする。

図 11 速度-推力特性
Fig. 11. Thrust vs. speed characteristics.

図 12 速度-電流特性
Fig. 12. Primary current vs. speed characteristics.

図 13 滑り-損失特性 (200 V-10 Hz)
Fig. 13. Losses vs. slip characteristics (200V-10Hz).

6. あとがき

以上、小容量低速 LIM の特性算定に適した等価回路を提案し、拘束試験と抵抗測定のみによる簡単な試験から、等価回路定数を決定し始動特性を算定する方法について検討した。得られた結果は電流、推力など実測値と算定値が良好な一致を示し、この種の LIM の始動特性算定において無負荷試験の不要な簡便なる一方法が確立されたと考える。

得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 小容量低速 LIM では、等価エアギャップが大きく磁氣的飽和の影響を受けにくい。また、端効果の影響も少ないので、拘束試験によりすべての定数を決定しても、定格電圧における始動特性の算定に十分利用できる。

(2) 拘束試験に含まれる損失には鉄損および漂遊損で構成される等価鉄損が多く含まれ、これを無視した場合には正確な特性算定が不可能となる。この損失は拘束試験時に始動推力を測定して、等価鉄損抵抗として考慮することができる。

(3) LIM の等価回路としては一次漏れリアクタンスを消去した等価回路を用いると便利である。

(4) 定数決定は、定格周波数 f_n , $(f_n/2)$ および $(f_n/4)$ の周波数における拘束試験の結果より X_m' を含む二次側インピーダンスを求め、このインピーダンスを適切な関数で近似することにより、任意の周波数および滑りに対する R_2' , x_2' および X_m' を決定することができる。

(5) 試作機による特性算定結果では算定値と実測値が良好に一致し、十分 LIM の始動特性を検討できるものとする。

なお、滑りに対する等価鉄損の変化、運転特性などに対する検討は今後の課題である。

終りに、本研究に対して種々の御協力を賜った当社名古屋工場の関係者各位に感謝の意を表す次第である。
(平成 3 年 6 月 27 日受付)

文 献

- (1) 野中・吉田:「両側式リニアモータの等価回路定数と特性計算式」, 電学誌, 90, 890 (昭 45-5)
- (2) 野中・樋口:「片側式リニアインダクションモータの近似特性計算式について」, 電学論 B, 102, 565 (昭 57-9)
- (3) 内海:「円筒形リニア誘導モータの寸法倍率特性」, 同上 D, 108, 261 (昭 63-3)
- (4) 電気学会電気規格調査会: JEC-37 誘導機 (昭 54)
- (5) 電気学会磁気アクチュエータ調査専門委員会編: リニアモータとその応用, p. 163 (昭 59-3)
- (6) 惣名・大竹, 他:「片側式 LIM の T 形等価回路における特性算定(1)」, 平 3 電気学会大会, No. 811

- (7) 大竹・関本, 他:「片側式 LIM の T 形等価回路における特性算定(2)」, 平 3 同上, No. 812
- (8) 水野・市岡・戸田:「拘束試験による LIM の励磁リアクタンス決定法」, 平 3 同上, No. 813
- (9) 日本電機工業会: インバータドライブの適用針指 (汎用インバータ), No. 148 (昭 61-6)
- (10) 坪井・山本・日々野:「疑似正弦波法による正弦波 PWM インバータ駆動誘導電動機の運転特性の算定」, 電学論 D, 107, 1231 (昭 62-10)
- (11) 山村: 交流モータの解析と制御 (昭 62) オーム社
- (12) 石崎・平山:「誘導機の特性算定のための定数決定法」, 電学誌, 87, 173 (昭 42-9)
- (13) 宇野: 計算機のための数値計算 (昭 38) 朝倉書店
- (14) 水野・市岡・戸田:「リニア誘導モータの始動特性算定の一方法」, 平 3 電気学会産業応用部門大会, No. 256
- (15) 水野・伊達・戸田:「低速 LIM の拘束試験に基づく始動特性算定法の検討」, 電気学会回転機研究, RM-91-53 (平 3)

水野 孝行 (正員)

昭和 56 年 3 月中部工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月 (株) 明電舎入社。現在、同社名古屋工場に勤務。この間、主として、誘導電動機的设计、研究・開発に従事。56 年、平成 2 年電気学会論文賞受賞。

久光 行正 (非会員)

昭和 46 年 3 月東京電機大学機械工学科卒業。同年 4 月 (株) 明電舎入社。現在、同社名古屋工場に勤務。この間、主として誘導電動機的设计、研究・開発に従事。機械学会会員。

市岡 忠士 (正員)

昭和 45 年 3 月東京工業大学電子物理工学科卒業。同年 4 月 (株) 明電舎入社。現在、同社名古屋工場に勤務。この間、主として、電動機可変速制御の研究・開発に従事。平成 2 年電気学会論文賞受賞。

戸田 孝 (正員)

昭和 32 年 3 月愛媛大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 明電舎入社。誘導機的设计、回転電機およびその制御の研究業務に従事。現在、同社技術総本部技師長。この間、東京電機大学 II 部、群馬高専、岐阜大学工学部などの非常勤講師。IEEE 会員。