

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04433

研究課題名（和文）リニアモータ標準試験法の開発

研究課題名（英文）Development of Linear Motor Standard Test Method

研究代表者

平原 英明（Hirahara, Hideaki）

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校（能力開発院、基盤整備センター）・能力開発院・准教授

研究者番号：50649209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、リニア誘導モータを停止させた状態で実施できる試験（静止インピーダンス試験および拘束試験（推力測定含む））を用いてリニア誘導モータの運転特性を算定する方法について検討した。平均的な一相分の等価回路をベースとした簡易的な特性算定法と巻線構造による非対称性を考慮した特性算定法をそれぞれ提案し、その妥当性を実機実験により明らかにした。また、回転形の誘導モータの特性算定に用いられる漏れリアクタンスの分離が不要な等価回路（T-I形およびT-II形）をリニア誘導モータに適用した場合の誤差についても検討し、T-I形等価回路の方がリニア誘導モータに適していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リニア誘導モータは、走行距離が有限であることに起因して、回転形の誘導モータのような規格化された標準試験法がなく（無負荷試験や負荷試験が実施困難）、製造メーカーが独自の試験法を用いているのが現状である。そこで、本研究では走行距離が短いリニア誘導モータに対しても実施可能な汎用的な試験法について検討した。本研究の学術的意義や社会的意義は、特殊な試験装置や製造メーカーのみが知り得る設計諸元を一切用いることなく、既設のリニア誘導モータに対して実施できる試験によって、リニア誘導モータの運転時の特性算定を行う点にある。

研究成果の概要（英文）：In this study, a method for determining the operating characteristics of linear induction motors from tests, which can be conducted with the linear induction motor at standstill (standstill impedance test and lock test including thrust measurement), was investigated. A simple characteristic calculation method based on an average equivalent circuit for one phase and a strict characteristic calculation method considering asymmetry due to the windings structure were proposed. The validity of the proposed method was clarified through experiments on actual equipment. The errors occurred when equivalent circuits that do not require leakage reactance separation (T-I and T-II types), which are used to calculate the characteristics of rotary induction motors, are applied to linear induction motors, were also examined. As a result, it was found that the T-I type equivalent circuit is suitable to LIMs.

研究分野：電気機器

キーワード：リニア誘導モータ 静止インピーダンス試験 拘束試験 非対称性 鉄損 T-I形等価回路 T-II形等価回路

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

リニア誘導モータ(以下、LIM と略記)は、原理的には回転形誘導モータ(以下、IM と略記)を展開して直線状にしたモータであり、巻線の構造上、各相の相互誘導回路が非対称となるため、IM よりも複雑な特性を有する。また、走行距離が有限であることに起因して負荷試験の実施が極めて困難であり、これを実施するには、二次側を回転円盤等にした特殊な試験装置(文献)が必要となる。IM において、負荷試験を実施することができない場合には、JEC(文献)等で規格化されている特性算定試験(無負荷試験、拘束試験)から等価回路定数を求め、特性算定を行う方法が広く知られている。しかしながら、LIM においては、無負荷試験の実施すら困難であり、IM の特性算定試験を適用することができない。

このような背景から、無負荷試験を用いずに拘束試験のみを用いた特性算定法(文献)や二次導体を取り除いて等価的に無負荷状態とした等価無負荷試験による特性算定法などがいくつか提案されている(文献 等)。しかしながら、文献 は1相分の等価回路による特性算定法のため、各相の非対称性を考慮できない。文献 等における等価無負荷試験は、LIM の二次導体は裏張り鉄板に接着されているケースが多く、実用上実施困難である。このように、LIM はIM よりも特性が複雑である他、特性算定試験の実施も困難であるため、IM のように規格化された標準試験法がなく、製造メーカーやユーザが独自の方法を用いているのが現状である。

そこで、申請者らは特殊な試験装置や製造メーカーのみが知り得る設計諸元を一切用いることなく、既設の LIM に対して実施できる試験を用いて LIM の運転特性を算定する方法について研究してきた。この方法は、静止インピーダンス試験と拘束試験を組み合わせることで算定した各滑り周波数におけるインピーダンスから LIM の運転特性を算定する方法である。現状では、鉄損の算定精度が悪いことに起因して、推力の算定精度が十分でないことが課題となっている。また、各相の非対称性による不平衡電流とそれに起因した推力脈動も検討すべき課題である。

2. 研究の目的

工場内搬送等に用いられる FA システム用の小形低速の LIM を対象とし、LIM を走行させることなく、停止させた状態の試験から得られる測定値を用いて、下記(1)~(3)の手法を開発することを目的とする。

- (1) LIM を停止した状態で実施できる試験から LIM 運転時のインピーダンスを算定する特性試験法を提案する。
- (2) 上記(1)によって算定したインピーダンスから、LIM の始動特性(各滑りに対する電流や推力の特性)を算定する方法を提案する。
- (3) 各相の不平衡電流やそれに起因した推力脈動を算定する方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) LIM の特性算定に適した等価回路の検討

一般に IM の特性算定には、漏れリアクタンスの分離が不要のように T 形等価回路を変数変換して求めた T-II 形等価回路(文献)が用いられている。この回路の一次側および二次側には、厳密には鉄損分の抵抗が付加される必要がある。一般に、これらの鉄損分の抵抗が無視して取り扱われているのは、これらの値が小さく、特性算定の精度にはほとんど影響を及ぼさないためである。しかしながら、IM よりも空隙が大きい LIM においては、励磁リアクタンス x_M に対する一次漏れリアクタンス x_1 の割合が大きい(変数変換に用いる変数 $a (= 1+x_1/x_M)$ の値に関係する)ため、これらの値を無視したことによる誤差が大きくなると考えられる。そこで、T-II 形等価回路および漏れリアクタンスの分離が不要なもう一つの等価回路である T-I 形等価回路を一次側と二次側に加わる鉄損分の抵抗を無視することなく導出し、LIM の特性算定において、誤差の小さい等価回路を明らかにする。

(2) LIM の運転特性の解析と特性試験の検討

LIM の運転特性を解析するために、二次側を回転円盤とすることによって負荷試験が実施可能な回転円盤式 LIM を用いて、正相運転時と逆相運転時の各滑りに対する電流や推力の特性(始動特性)を測定する。また、運転時の各相のインピーダンスの様相を解析し、LIM の特性算定を行うための特性試験について検討する。

(3) LIM の特性算定法の検討

上記(2)で検討した特性試験を用いた特性算定法について検討する。まず、簡易的な手法として、各相電流の平均実効値や平均推力を求めることに対して妥当な算定値を得られる平均的な一相あたりの等価回路(あるいは等価インピーダンス)に基づいた特性算定法について検討する。次に、この手法を三相に拡張し、各相の非対称性を考慮した三相等価回路(あるいは三相等価インピーダンス)を用いた特性算定法について検討する。さらに、算定した各相の不平衡電流を用いて推力脈動を算定する手法について検討する。これらの手法の妥当性については、回転円盤式 LIM による実機実験により明らかにする。

4. 研究成果

(1) T-II形およびT-I形等価回路をLIMに適用した場合の誤差の影響

図1はIMの一般的なT形等価回路である。ここで、 r_1 は一次抵抗、 x_1 は一次漏れリアクタンス、 r_M は鉄損抵抗、 x_M は励磁リアクタンス、 r_2 は二次抵抗、 x_2 は二次漏れリアクタンス、 s は滑りである。図1の回路を電力が不変となるように任意の変数 a で変数変換すると、図2の等価回路となる。図2より、一次側と二次側の抵抗に r_M を含んだ項が加わることが確認される。図2の回路において、 $a = 1 + x_1/x_M$ のように定めれば、図3のT-II形等価回路が得られる（便宜上、T-II形に換算した定数には''を付けている）。IMの場合、 x_1/x_M の値は非常に小さいためこの値を無視した等価回路が用いられる。しかしながら、IMよりも空隙が大きいLIMの場合、 x_1/x_M の値が大きいため、この値を無視した誤差は大きい。一方、図2の回路において、 $a = 1/(1 + x_2/x_M)$ のように定めれば、図4のT-I形等価回路が得られる（便宜上、T-I形に換算した定数には'を付けている）。LIMは、空隙が大きいため x_M は小さいが二次導体はアルミ板のため、 x_2 は非常に小さいと考えられる。すなわち、 x_2/x_M の値が小さいため、この値を無視した等価回路を用いた誤差はT-II形等価回路よりも小さい。

以上、一般の特性算定に用いられる一次側と二次側に加わる鉄損分の抵抗を無視(x_1/x_M や x_2/x_M を無視)した等価回路をLIMに適用した場合、T-II形等価回路よりもT-I形等価回路の方が特性算定における誤差が小さいことを明らかにした。

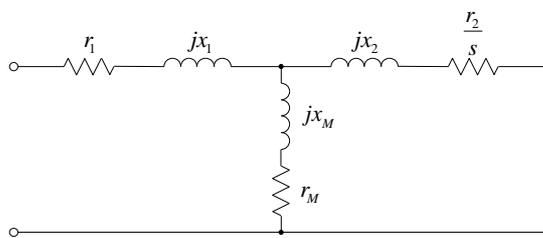


図1. T形等価回路

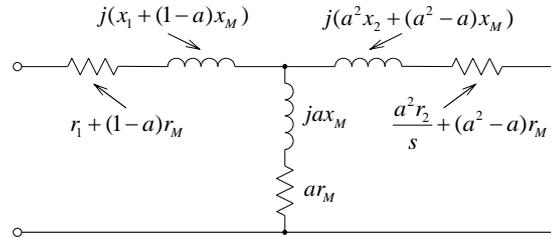


図2. 任意の変数 a で変数変換した等価回路

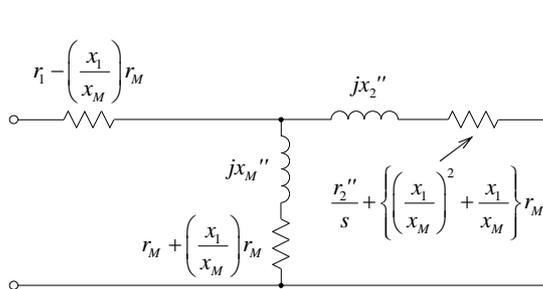


図3. T-II形等価回路

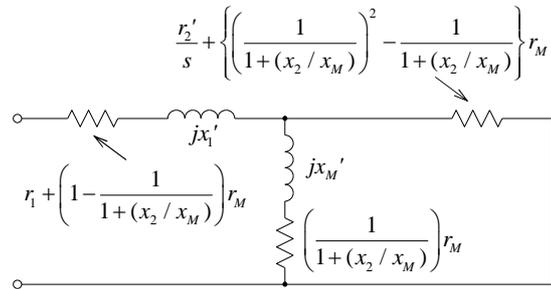
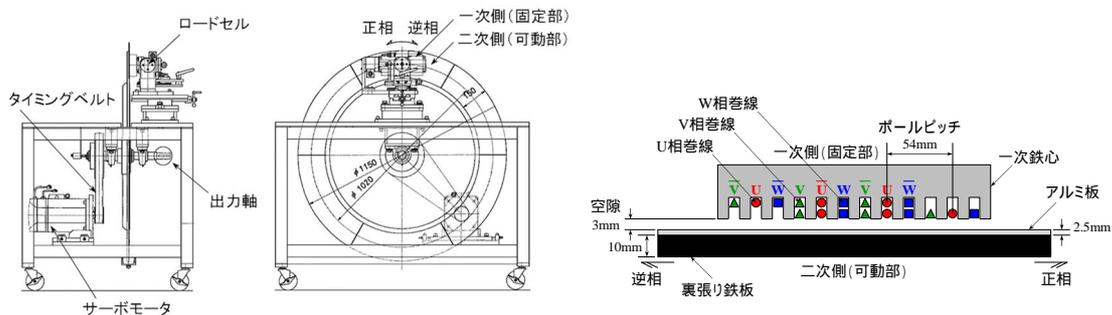


図4. T-I形等価回路

(2) 正相および逆相運転時の各相のインピーダンスの評価 回転円盤式LIM

図5(a)は、本研究で供試機として使用した回転円盤式LIMの装置概要である。一次側の片側式LIMに三相交流を印加すると、二次側の円盤が回転する。この円盤の出力軸に連結されているサーボモータを回転数制御することにより、任意の負荷（滑り）におけるLIMの特性を測定できる。図5(b)は、一次側と二次側の構造である。一次巻線の構造より各巻線相互の磁気回路が非対称であることがわかる（U相巻線（印）の磁氣的結合が他の相よりも大きい）。また、回転円盤は出力軸側から見て、正相運転時に反時計回りに回転し、逆相運転時に時計回りに回転する。すなわち、正相運転時はV相巻線（印）のある端部が入口端、W相巻線（印）のある端部が出口端に相当し、逆相運転時はW相巻線が入口端、V相巻線が出口端に相当する。



(a) 装置概要

(b) 一次側と二次側の構造

図5. 回転円盤式LIM

正相および逆相運転時の各相の演算子インピーダンスと損失分布

上記の供試機を用いて負荷試験を実施し、各滑り(1、0.75、0.5、0.25、0)における電圧、電流および入力から各相の演算子インピーダンスを算出した。図6はその結果である。正相および逆相運転において、各相のインピーダンスの平均と端部に位置していないU相のインピーダンスには変化が見られなかった。一方、入口端に位置する相(正相の場合:V相、逆相の場合:W相)のインピーダンスは小さくなり、出口端に位置する相(正相の場合:W相、逆相の場合:V相)のインピーダンスは大きくなる傾向が見られた。また、図7は拘束時の各相の損失分布である。正相および逆相運転において、二次入力および一次銅損はあまり変化していないが、入口端に位置する相の鉄損が大幅に増大し、出口端に位置する相の鉄損が大幅に減少する傾向が見られた。いずれも端部に位置する相に生じる現象のため、この影響は巻線構造に起因した端効果の一種であると考えられる。今後は電磁界解析等によってこの現象を解明する必要がある。

以上、LIMの端部に位置する相のインピーダンスは進行磁界の方向によって様相が異なるため、LIMの巻線構造に起因した非対称性を考慮するためには、運転時と同じ進行磁界におけるインピーダンスを用いる必要があることが明らかとなった。

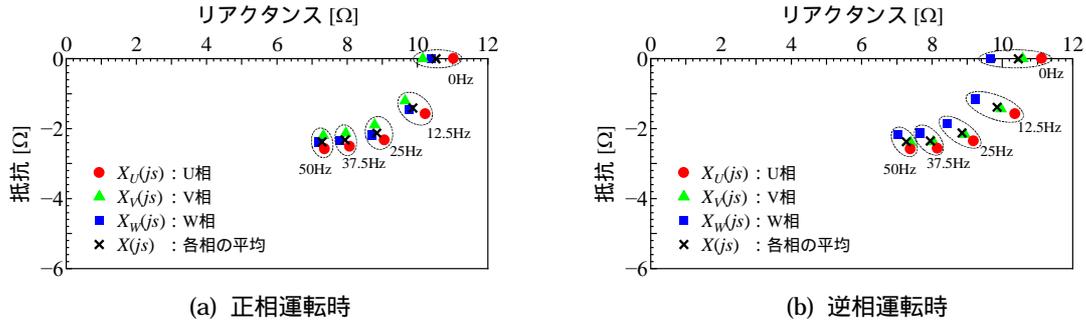


図6. 各相の演算子インピーダンス

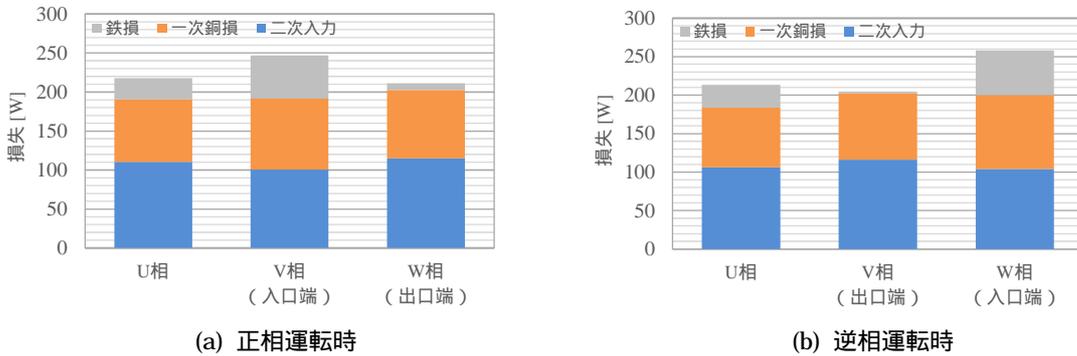


図7. 拘束時の各相の損失分布(100V/50Hz時)

(3) 提案するLIMの特性算定法

静止インピーダンス試験と拘束試験を用いた特性算定法とその課題

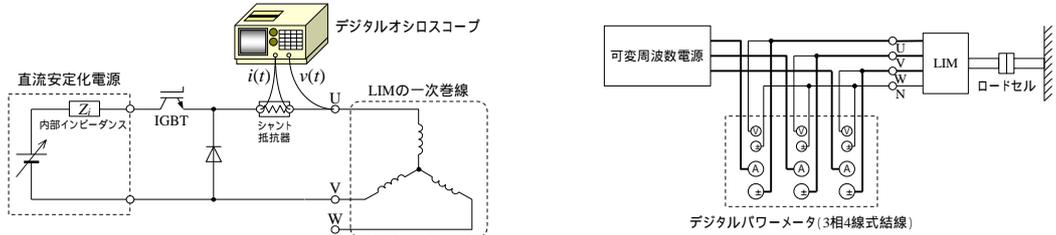
上記(2)の結果より、LIMは進行磁界の方向によって端部に位置する相のインピーダンスの様相が異なる。しかしながら、その平均値は進行磁界の方向によらず一定である。そこで、平均的な一相あたりのT-I形等価回路に基づいた特性算定法を検討した。図8(a)は申請者がモータの静止インピーダンス試験として提案しているステップ応答法である。この試験を用いて算定した平均的な一相分の演算子インピーダンスから無負荷リアクタンスを分離し、滑り1における一次漏れリアクタンスと二次抵抗を算定する。そして、拘束試験時の入力インピーダンスから一次漏れリアクタンスと二次抵抗を分離することで運転時の励磁リアクタンスと鉄損抵抗を算定する。以上、算定した定数を用いて回路計算により運転特性を算定する。図9はその実施例である。電流特性は滑り全域において実測値と良好に一致している。しかしながら、推力においては始動推力に10%以上の差が見られた。この原因を解析したところ、二次抵抗と一次漏れリアクタンスの値が無負荷試験と拘束試験によって求めた値と10%以上の誤差があり、この差が原因でトルクの算定精度が悪化していることがわかった。今後は、ステップ応答法の電圧の印加法等を工夫するなどして、演算子インピーダンスの算定精度を向上させる必要がある。

可変周波数拘束試験(始動推力測定含む)を用いた特性算定法とその課題

LIM運転時の非対称性を考慮するために、文献で提案されている拘束試験に基づく特性算定法を三相に拡張した手法を検討した。図8(b)はその試験回路構成図である。数点の可変周波数による拘束試験を実施し、その時の各相のインピーダンスおよび始動推力を測定する。図7より、各相の鉄損は相ごとに異なるが、二次入力はほぼ同じであることから、本手法では始動推力から求めた二次入力を3で割ることで簡易的に一相当たりの二次入力を求める。各相の入力から銅損と二次入力を差し引くことで鉄損を求め、この鉄損分の抵抗をT-II形等価回路から分離することで演算子インピーダンスを算定し、回路計算により運転特性を算定する。図10および図11はその実施例である。正相および逆相運転において、推力特性は実測値とほぼ一致してい

る。しかしながら、電流特性においては、軽負荷時に入口端に位置する相（図 10 では V 相、図 11 では W 相）の特性に悪化が見られた。これは、図 10(a)および図 11(a)の入口端に位置する相の演算子インピーダンス軌跡の傾向が図 6 の実測値の傾向と異なることによるものである。

今後は、入口端に位置する相の演算子インピーダンスの算定精度の改善が必要である。また、この手法の T-I 形等価回路への適用法や各相の不均衡電流に起因した推力脈動の算定法の検討が課題として残された。



(a) 静止インピーダンス試験 (b) 可変周波数拘束試験（始動推力測定含む）
 図 8 . 提案する LIM の特性算定試験

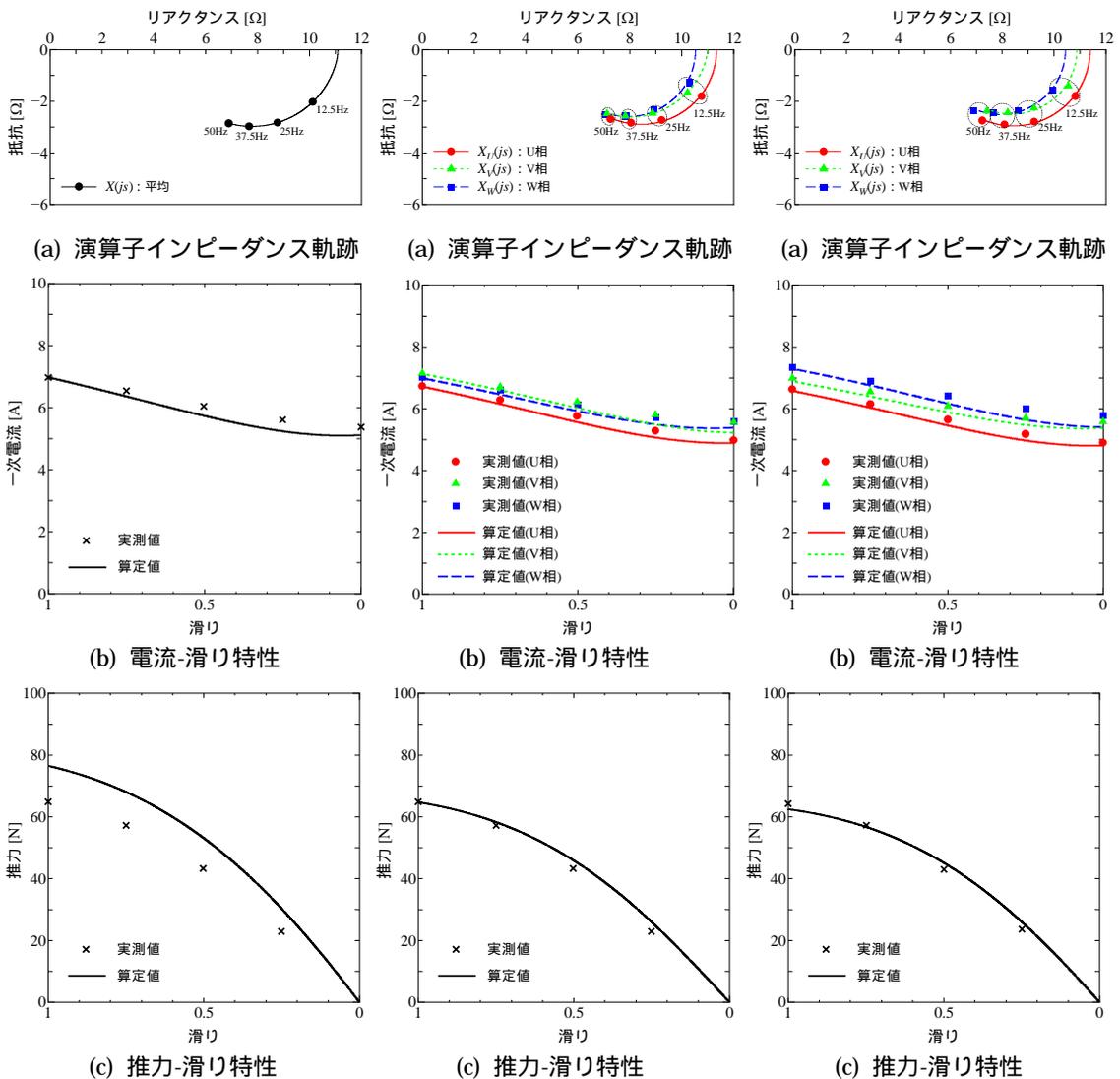


図 9 . 静止インピーダンス試験と拘束試験による特性算定結果（正相運転 100V/50Hz） 図 10 . 可変周波数拘束試験による特性算定結果（正相運転 100V/50Hz） 図 11 . 可変周波数拘束試験による特性算定結果（逆相運転 100V/50Hz）

< 引用文献 >

新谷勉・野島俊則・苅田充二：「簡易試験装置によるリニアモータ評価試験」、電気学会リニアドライブ研究会資料、LD-92-40、pp. 19-28 (1992).
 電気学会電気規格調査会：「電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-2137-2000 誘導機」、電気書院 (2000).
 水野孝行・久光行正・市岡忠士・戸田孝：「リニア誘導モータの拘束試験に基づく始動特性算定法」、電気学会論文誌 D、Vol. 112-D、No. 2、pp. 172-180 (1992).
 杉本英彦・巴正信・松村正三・石井敏昭：「片側式リニア誘導モータの拘束試験に基づく非対称定数算定法」、電気学会論文誌 D、Vol. 113-D、No. 2、pp. 247-255 (1993).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井上樹人・柴 滉大・平原英明・山本 修
2. 発表標題 カッティングモータによる回転ドラム式LIMの試作と特性評価
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平原英明・井上樹人・山本 修
2. 発表標題 A Method for Determining Equivalent Circuit Constant of Linear Induction Motors Using Locked Mover and Standstill Impedance Tests
3. 学会等名 International Power Electronics Conference 2022 (IPEC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上樹人・平原英明・山本修
2. 発表標題 正相と逆相運転時におけるリニア誘導モータの各相の等価回路定数の評価
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 修 (Yamamoto Shu) (00648925)	独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校（能力開発院、基盤整備センター）・能力開発院・教授 (82727)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------