新都市交通用リニア誘導モータの V/f 一定運転時の動特性

正員 野中 作太郎 (九州大)

正員 藤井 信男 (九州大)

准員 小島 安信 (九州大)

1. まえがき

当研究室では新都市交通用車両用推進装置を対象にした回転形片側式リニア誘導モータ (LIM) 試験装置を設備し、前論文^{(1)~(3)}で推力、垂直力、一次電流、力率、効率などについて各運転周波数における速度特性を実験的に明らかにすると共に、これらの定常特性は二次元の空間高調波解析法で精度良く算定できることを示した。また、加速・減速時の動特性を実験的に検討した結果、実用の加速度範囲での加減速運転において、これらの動作は定常特性曲線上の点を推移することを実験的に確認した⁽⁴⁾。

車両用 LIM の場合、安全性の面からメカニカルクリアランスを十数 mm 程度にとらざるを得ないため、回転形誘導機に比べて一般に力率が悪い。またエアギャップでの漏れ磁束を少なくするためにポールピッチは比較的大きくなり、定格供給周波数が低くなるために定電圧駆動時の各周波数における推力は滑りと共に減少する垂下特性になるなど回転機と特性上異なる点が多い。従って、LIM の速度制御を行うためには、LIM 特有の特性に対応させ、垂直力も考慮した最適な滑り周波数制御、滑り率制御、更にベクトル制御的な高度な推力制御について検討を要する。

一方、できるだけ簡単な速度制御についても検討すべきであり、その代表的な方法として、駆動用インバータに速度・推力などのフィードバック制御をかけないオープンループ状態で、単に周波数と電圧の関係を

一定に保ちながら周波数を増加させる V/f 一定運転がある。

本論文では、LIM をオープンループで運転する場合の動特性について検討する。この場合、各周波数における動作点は前もって確定されていないため、その動特性の算定にはシミュレーションを用いることになる。従って、LIM の特性算定法としてできるだけ計算時間が少ないものが望まれ、ここでは著者がさきに提案した簡易算定法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いる。発生熱蓄積による一次・二次側抵抗の温度変化の影響を除けば、動特性は定常特性曲線上の点を用いて算定できるため、まず電動機動作と発電機動作時の定常特性について考察し、本簡易算定法による計算精度を実測値と比較して示す。次に LIM 試験装置を電圧形 PWM インバータで V/f 一定駆動する場合の加速・減速時の速度、推力、垂直力、一次電流、力率および単位容量あたりの出力の実測特性を示し、計算値との比較を行う。最後に試験機定数を用いて、実車モデルの 1/8 スケールとして、 V/f 一定制御で平たん走行する場合のシミュレーション結果を示す。

2. 発電機動作を含む定常特性およびその実測値と計算値の比較

検討の対象として新都市交通用に設計された片側式 LIM 試験装置⁽¹⁾を用いる。駆動用電源には電圧形 PWM インバータを使用し、周波数 f_1 に対する相電圧の基本波成分 V_1 は次の関係に設定されている。

$$\begin{aligned} V_1 &= 8.2f_1 + 10 \quad (\text{V}) \quad (f_1 < 25.8 \text{ Hz}) \\ &= 221.56 \quad (\text{V}) \quad (f_1 \geq 25.8 \text{ Hz}) \end{aligned}$$

図 1 (a) は各周波数に対応した定電圧駆動時の推力特性を示す。等価二次抵抗が大きいため V_1/f_1 一定で周波数を変化させるときの推力特性は通常のかご形誘

Dynamic Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit under Constant V/f Drive. By Sakutarō Nonaka, Member, Nobuo Fujii, Member & Yasunobu Kojima, Associate (Faculty of Engineering, Kyushu University).

野中作太郎：正員，九州大学工学部電気工学科

藤井信男：正員，九州大学工学部電気工学科

小島安信：准員，九州大学工学部電気工学科

(a) Thrust under constant V/f drive

(e) Primary current under constant V/f drive

(b) Thrust under constant current drive

(f) Power factor

(c) Vertical force under constant V/f drive

(g) Efficiency

(d) Vertical force under constant current drive

(h) Output kW per input kVA

図 1 定常特性の実測値と簡易算定法による
計算値との比較

Fig.1. Comparison between measured and
calculated values for characteristics.

導機のトルク特性曲線とは異なり、電動機動作特性は、巻線形誘導機において比較的大きな外部二次抵抗を挿入したときのトルク特性に似た垂下特性曲線になる。しかし、このような低速 LIM を定電圧駆動する場合、発電機領域では電動機領域と比較して滑りと共に一次電流が大幅に増大するために、負滑りの増加に

対して推力曲線は飽和しにくい。

図 1 (b) は、(a) 図の実測値を一次電流が 130 A 一定として定電流駆動時の推力特性に換算したものである。5 Hz の低い周波数では滑りが小さくなくても端効果による推力の低下はほとんど見られず、また電動機動作と発電機動作時の最大推力はほぼ等しいが、

周波数の増加に従い端効果の影響が大きくなるため、電動機動作および発電機動作時の最大推力は徐々に減少する。

図1(c)の定電圧駆動時の垂直力特性は、滑りが小さくなるに従い吸引力が大きくなるため、発電機領域では、非常に大きな吸引力を生じる。

図1(d)の定電流駆動時の垂直力特性においては、同期速度で吸引力の最大値が明確に現れ、特に低周波数で吸引力は非常に大きくなるが、滑りの絶対値が大きくなるに従い急速に減少する。従って、定電流駆動モードで滑りを比較的大きな動作点に選定することにより、電動機および発電機動作時において小さな垂直力で運転することができることを示している。

図1(e)の一次電流特性において、端効果の影響に加え、一次漏れリアクタンスと励磁リアクタンスの和に対して一次抵抗の大きさが無視できないため、周波数が大きくなるに従って同期速度での電流は大きくなる。なお、本試験機の一次抵抗 r_1 、一次漏れリアクタンス x_1 、励磁リアクタンス x_m はそれぞれ以下の値である。

$$r_1 = 0.281 \quad (\Omega)$$

$$x_1 = 0.0170 f_1 \quad (\Omega)$$

$$x_m = 0.150 f_1 \quad (\Omega)$$

本対象の LIM の場合、定格周波数は小さく設計されるために端効果がない場合でも、磁束密度をほぼ一定に保つためには、通常の回転形誘導機と比べて $V_1 = C f_1 + V_0$ パターンの V_0 を大きくする必要がある。また励磁リアクタンスが大きく一次抵抗が無視できる場合、同一大きさの滑りにおいて、電動機動作と発電機動作領域における電流値は等しくなるが、LIM の場合、10 Hz 以下では上記条件が当てはまらず発電機動作での電流が大きくなる。

力率、単位容量あたりの出力特性に関しては、LIM 自体の特性を示すために正弦波電圧印加時の特性に換算して表す。

図1(f)の力率において、供給周波数が低いためにリアクタンス成分が小さく一次抵抗の影響が大きいため高滑りにおいて高力率となり、滑りと共に減少する垂下特性になる。また回転形誘導機では同期速度をわずかに超えるところで力率は負になるのに対して、LIM では特に低い周波数で力率が負になる負滑りが大きくなり、発電機領域での力率も低い。従って、LIM で発電ブレーキをかけるとき、電源への回生電力は比較的小さいものとなる。

図1(g)に示す効率において、一次抵抗の影響が大

きいために効率はあまり高くなく、また電動機動作時と発電機動作時の特性曲線間が不連続になる。

図1(h)の単位容量あたりの出力特性において、その最大値はかご形誘導機に比べてかなり大きな滑りで得られ、本試験装置の場合、25 Hz 以上で約40~41%の値になる。

図1(a)~(h)のすべての特性において、実線で示した実測値と一点鎖線で示した簡易算定法⁽⁵⁾⁽⁶⁾による計算値はよく一致している。なお、空間高調波解析法⁽³⁾と本簡易算定法による計算値間には全く差異は見られない。空間高調波解析法の場合、仮想的に LIM 一次巻線を周期的に空間配置する必要があり、その周期間隔によって計算の際に考慮すべき最大次数が変わり、計算時間も変化する。この周期間隔は隣接する LIM の相互干渉を生じない程度の長さが必要であり、むだな計算を避けるために速度、滑りによる出口端端効果の大きさおよび二次導体時定数によって調整されるが、一次鉄心を無限長と仮定しているためかなり長い間隔で設定される。本試験装置定数の場合、定格 25 Hz において滑り 0.1 以下で周期間隔はポールピッチの 50 倍としている。

簡易算定法では、周期間隔は無限長に設定されているため速度や滑りなどに対する計算量の変化はない。従って、高速になるほどその長所が発揮されるが、本試験機のような低速 LIM の場合でも、25 Hz 時の特性算定時間は簡易算定法を用いた場合、空間高調波解析法と比較して約 1/10 に短縮できることを確認した。

3. 動特性の実測値と計算値の比較

本章では、LIM 試験装置⁽⁴⁾を用いて、速度・推力などのフィードバック制御しない状態で、第2章で示した V_1/f_1 (V/Hz) の関係を保ちながら周波数を時間に比例して変化させ、加速・減速を行う場合の動特性について実測し、計算値との比較を行う。

動特性は定常特性から把握できることが実験的に確認されている⁽⁴⁾。従って、その解析においてここで検討する程度の時間的変化に対しては、変位電流を無視できる程度に場の変化が緩やかであるので、準定常状態での電磁界解析による LIM の定常特性値を用いて動特性を算定できると考えられる。例えば、滑り周波数や滑り一定制御などを行う場合には、各周波数における動作滑りが確定するため特性は容易に算定できる。一方、単に周波数に応じて電圧を供給するだけのオープンループでの運転に対しては、車両の慣性や推力などの相互のバランスで動作点が定まるため、シミュレーションによる解析が必要になる。

本試験装置の場合、二次側のリアクションロータを動かす構造であるため、LIM発生推力 F_x (kgf)と加速度 a (km/h/s)との関係は次式で表される。

$$a = K(F_x - F_m)$$

ここで、 $K = 3.6 \times 9.8 (r^2/J)$ 、 r はリアクションロータの半径で0.7 m、 J は慣性モーメントで320 kgm²、 F_m は機械損に相当する負荷推力であり、実測の結果10 km/h以上ではほぼ一定であったため、ここでは全速度範囲において12 kgf一定と仮定する。この値は、18パーミルの上り坂を走行する場合のこう配抵抗に相当する。

いま、周波数 $f_1 = f_{1,N}$ 、速度 $v_2 = v_{2,N}$ での推力を $\{F_x\}_N$ とすると、そのときの加速度 a_N は次式で得られる。

$$a_N = K(\{F_x\}_N - F_m)$$

ここで、微小時間 Δt の間推力は一定であると仮定し、 Δt ごとの周波数の変化を Δf とすると

$$f_{1,N} = f_{1,N-1} + \Delta f$$

$$v_{2,N} = v_{2,N-1} + a_{N-1} \Delta t$$

の関係が得られ、始動加速時の初期値として $f_1 = f_{1,1} = \Delta f$ 、 $v_2 = v_{2,1} = 0$ を、減速時には $f_{1,1} = f_{1,\max}$ 、 $v_{2,1} = v_{2,\max}$ を与える。各 N に対して上式を繰返し計算することにより、各周波数での速度および滑りが決定され、そのときの推力、垂直力、一次電流、力率および効率が求められる。

図2は、供給周波数を0から30 Hzまで増加させる加速指令時間、および30 Hzから0 Hzまで減少させる減速指令時間がそれぞれ15秒の場合の特性を示す。実線は実測値、一点鎖線は簡易算定法による計算値を示す。なお、計算においては $\Delta t = 30$ ms、 $\Delta f = 0.06$ Hzを用いた。

供給周波数に対する相電圧は第2章で示した関係であり、線間電圧も基本波成分は周波数に比例するが、ここに示した電圧は実効値であり、インバータ出力はパルス列からなる波形で、電圧値によってひずみ率が変化するため直線的にならない。

本試験機の場合、可動部のリアクションロータを直線走行する車両の質量に換算すると約653 kgとなり、慣性が非常に小さいために小推力で加速できる。その小さな推力は、始動直後のごく低い周波数以外では容易に得られるため、オープンループで周波数を時間と共に直線的に増加させる場合、自動的に速度が周波数変化に追従するように一定推力を発生する。各周波数における速度対推力曲線の $s=0$ 付近での傾きは、端効果のために周波数増加に従って次第に緩やかになる

図2 動特性の実測値と計算値の比較 (Case A)

Fig. 2. Comparison between measured and calculated values for dynamic characteristics (Case A).

ため、5 Hz以上では動作滑り周波数は周波数増加に伴い、わずかながら増加している。一方、動作点は小推力を発生する低滑りになるため、一次電流は定格130 Aに比べてかなり小さく、加速・減速時の吸引力としての垂直力は推力の大きさの4倍以上にもなり、単位容量あたりの出力も小さい。力率は始動直後および制動停止直前では周波数がほとんど零であるため、リアクタンス成分がなくなって力率1になるが、周波数の増加に従い、急激に減少する。

実測値と計算値は全般にわたり、よく一致している。なお、 $15 \leq t \leq 29$ sにおいて、動作点は30 Hz時の定常特性上を推移しているにもかかわらず、一次電流および力率で実測値と計算値の間に若干の差が見られるのは、二次導体温度の考慮が不十分なためと考えられる。計算では図1の定常特性で示したものを使用

図3 動特性の実測値と計算値の比較 (Case B)

Fig.3. Comparison between measured and calculated values for dynamic characteristics (Case B).

しているが、実験において試験機は二次回転形であるため、非常にゆっくりとした加速で行う定常特性の測定時には熱の蓄積により最大 30°C 程度温度が上昇するのに対して、動特性の測定では時間が短いため温度上昇はほとんどない。定常状態において二次導体の温度が 30°C 上昇すると一次電流は 7.5% 程度小さくなるが、推力はほとんど変化しないことが確認されている。

図3は加・減速動作時に定格推力を発生するように加速、減速指令時間をそれぞれ 3.33 秒と 4.04 秒に調整した場合の動特性を示す。なお、この場合の計算には $\Delta t = 6.6 \text{ ms}$, $\Delta f = 0.06 \text{ Hz}$ を用いた。

加速において周波数の増加が速いため、これに速度が遅れずに追従するためには、高推力を要する。しか

図4 加速度の実測値と計算値の比較

Fig.4. Comparison between measured and calculated values for accelerations.

し、現設定の V_1 対 f_1 のパターンでは、図1(a)の定常特性に見られるように 10 Hz 以下では、最大推力が小さいために 20 km/h 程度になるまでは速度の追従が遅れがちであるが、垂下推力特性によって高滑りほど大きな推力を発生するため、このようなオープンループ運転でも常に追従性を良くする方向に作用する。従って、速度 20 km/h、周波数 15 Hz 以上において、速度は周波数変化に十分対応して増加している。また 20~60 km/h の加速期間では、動作滑りが適度な大きさになるため、垂直力は推力の 2/3 程度になり、力率および単位容量あたりの出力はほぼ最大値に達する。

減速において、図1(a)で示したように発電機領域では推力特性曲線の飽和が見られずに大きな負推力が発生し、また、12 kgf の負荷推力が制動力として作用するために、加速時に比べて周波数に対する速度変化が大きい。

一方、周波数が小さくなったときに生じる非常に大きな吸引力には注意を要するが、実際の場合には低周波数においても無理に LIM による回生ブレーキを使用する必要はないと考えられる。本運転条件においても、シミュレーションの結果は実測値とよく一致する。

図4は、図2 (Case A) と図3 (Case B) の場合の速度に対する加速度を示す。Case A の場合の加速度はほぼ全範囲で一定になっている。本試験機の場合、定格推力は 320 kgf に対して車両換算質量は 653 kg と小さいため、定格推力で運転する Case B の場合大きな加速度になる。推力 2.56 t、質量 23.5 t の実車両モデルに対して、本試験機の LIM の推力は 1/8、質量は 1/36 であるため、試験機の加速度は約 4.5 倍になっている。

4. 動特性のシミュレーション

推力 2.56 t、満車時質量 23.5 t の実車モデルに対し

図5 動特性のシミュレーション
Fig. 5. Simulation of dynamic characteristics.

て、 V_1 対 f_1 一定のオープンループ運転で始動・走行・曲線抵抗を無視して平たん軌道を走行する場合の特性シミュレーションを、試験機定数を用いて 1/8 スケールモデルで検討する。このとき LIM の定格推力 0.32 t に対して満車時の質量は 2.94 t、空車時は 1.96 t になる。従って、試験機の慣性モーメントを満車時を想定して 4.5 倍 (1,440 kgm²) に、また空車時に対して 3.0 倍 (960 kgm²) して用いる。なお、駆動用インバータの周波数対電圧パターンは、最高速度を約 70 km/h にするために、最高周波数を 35 Hz に設定して、0~35 Hz 間の加速・減速指令時間とはともに 20 秒、25 Hz 以下で基本波電圧は周波数に比例、25 Hz 以上で線間電圧の実効値は 440 V 一定とする。

図5と図6はこの場合の特性シミュレーション結果を示す。同一の V/f パターン運転において、質量 m が 2.94 t と 1.96 t の場合の特性をそれぞれ一点鎖線と破線で示す。図5にみられるように、質量が大きく

図6 加速度の比較
Fig. 6. Comparison of accelerations.

なると自動的に動作点が高滑りに移り、一次電流と力率の双方が増加して高推力を発生させるため、結果として 50% の質量変化に対しても走行速度の変化は小さい。図6にこのときの加速度を示す。

一方、始動直後において一次電流は小さな値から増加していくため、推力の立上りが鈍くなり速度の追従性の面では良くないが、垂直力の観点から見ると好ましい動作になる。すなわち、吸引力としての垂直力は、低周波数ほど速度のわずかの増加によって急激に増加するため、吸引力を抑えて始動加速するためには一次電流を抑えると共に高滑りで動作させなければならないが、 V/f 一定運転ではこの条件が自動的に満足される。質量 2.94 t のとき加速時において吸引力は 280 kgf 程度に抑えられ最大推力よりも小さい。

また、LIM の単位容量あたりの出力特性は図 1 (h) で示したように最大値付近が急しゅんな曲線でないため、その付近で滑りが若干変化しても値はあまり変わらない。従って、動作点が異なるこれら 2 種の質量に対してそれぞれ最大値付近の 40% 前後で動作している。

5. 結 論

LIM の特性算定法として提案している簡易算定法⁽⁵⁾は、このような低速 LIM の解析においても、空間高調波解析法と比較して算定精度を損わずに計算時間を大幅に短縮できる。

最大 20 km/h/s の大きな加速度を生じる動特性においても、計算値は実測値とよく一致することから、動特性の算定に定常特性算定式が利用できることを立証できた。また本シミュレーションによる解析法の妥当性を確認した。

V/f 一定のオープンループ運転では、LIM およびインバータ容量を最大限利用する運転ではないが、非常に単純な運転にもかかわらず、LIM 特有の特性を有効に生かし、また過大な吸引力を生じることなく比

較的良好な運転特性が自動的に得られる。

(昭和 63 年 10 月 3 日受付)

文 献

- (1) 野中・藤井・渡辺・小島：「新都市交通用片側式 LIM のアーチ形試験装置」，電気学会マグネティックス研究，MAG-87-158, 65 (昭 62-11)
- (2) 野中・藤井・渡辺・小島：「新都市交通用リニア誘導モータの特性に関する実験的研究」，電学論 D, 108, 477 (昭 63-5)
- (3) S. Nonaka, N. Fujii, T. Watanabe & Y. Kojima: "Test Facility and Test Results of Single-Sided LIM for Urban Transit", Proc. of Int. Conf. on Magnetically Levitated System, p. 111 (1988)
- (4) S. Nonaka, N. Fujii, T. Watanabe & Y. Kojima: "Examination with Test Facility on Dynamic Characteristics of LIM for Urban Transit", Proc. of Int. Conf. on Electrical Machines, p. 27 (1988)
- (5) S. Nonaka & N. Fujii: "Analysis of Linear Induction Motors Using a Simplified Space Harmonic Technique", Proc. of Int. Conf. on MAGLEV and LINEAR DRIVES, p. 179 (1986)
- (6) S. Nonaka & N. Fujii: "Simplified Two-Dimensional Analysis of Linear Induction Motors", *IEEE Trans. on Magnetics*, MAG-23, 2832 (1987)