誘導形リニアモータの加速時における 最高エネルギー効率と最大推力

大阪府立大学 平 紗 多賀男
大阪府立大学 石 川 定 夫

1. ま え が き

超高速、長大編成列車の駆動用として用いられる誘導形リニアモータにおいては、その始動から高速定常運転状態にいたる加速期間が非常に長く、加速期間に極めて大量のエネルギーを消費する。また、輸送機関用駆動源の常として極めて大きな始動推力が要求される。高速鉄道用以外にも、制御用など加速期間が短くとも加速、減速を繰り返す加速期間の割合の多い直線運動装置への誘導形リニアモータの応用が多くなると考えられる。したがって、誘導形リニアモータの高速、低スリップの定常運転時の端効果についての研究が必要であると同時に、その始動あるいは加速時における推力、エネルギー効率などの諸特性の解明も是非行なわなければならない。

一般の誘導電動機においては、励磁電流が無視しうるので始動から同期速度にいたるまでの加速エネルギー効率は一次、二次抵抗のいかんにかかわらず理論的に 50% になる⁽¹⁾。しかし、誘導形リニアモータでは空げき長が回転機に比して極端に大きいため、励磁リアクタンスが小さく、励磁電流が非常に大きくなって無視しえなくなる。したがって、その加速エネルギー効率は 50% よりかなり小さくなり、またその値も推力におけると同様、一次、二次抵抗に大きく影響されることになる。

本文では、加速時において速度に応じて二次抵抗を変化する場合と、一定二次抵抗の場合について、加速

時の入出力エネルギー、エネルギー効率、推力および加速時間等の加速特性について解析し、最高エネルギー効率と最大推力あるいは最短加速時間を与える二次抵抗の条件を求めている。これより、誘導形リニアモータにおいては励磁リアクタンスが回転機に比して極端に小さくなるため、二つの条件が非常に接近することを述べ、適当に二次抵抗を設定すれば最大推力かつ最高エネルギー効率に近い加速特性が得られることを示している。これらの理論結果は一部実験的にも実証している。

2. 誘導形リニアモータの加速時特性式

誘導形リニアモータの特性を問題にする場合、端効果を考慮しなければならないことが指摘されている。特に高速用モータでは端効果の影響を大きく受けて、スリップの小さい定常運転時において推力と力率が極端に減少し効率もかなり低下すると言われている⁽²⁾⁽³⁾。しかしながら、この端効果の影響もスリップが 1 から 0.2 程度までの加速時においてはほとんど問題ではなく^{(3)~(5)}、本文で取り扱うような加速時の特性については端効果は無視しても差しつかえなく、一般の誘導機と同様な理論的取扱いが許されるものと思われる。

〈2・1〉 一般誘導電動機の特性式 一般の三相誘導電動機の一相当りの等価回路は第 1 図 (a) のように表わされる。すでによく知られているように、この等価回路により、三相誘導電動機の入力 P_i および出力 P_o は次のように与えられる。

$$P_i = \frac{3V_1^2 [A(r_2 + s r_m) + B s (x_2 + x_m)]}{A^2 + B^2} \dots\dots\dots (1)$$

Maximum Energy Efficiency and Driving Force of Linear Induction Motor in Accelerating Period, By Takao Hirasawa, Member, & Sadao Ishikawa, Member (University of Osaka Prefecture)

平紗多賀男：正員，大阪府立大学工学部電気工学教室
石川定夫：正員，大阪府立大学工学部電気工学教室

第 1 図 誘導電動機の等価回路

Fig. 1. Equivalent circuits of induction motor.

$$P_0 = \frac{3V_1^2(1-s)r_2(r_m^2 + x_m^2)}{A^2 + B^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$A = (r_1 + r_m)r_2 + s(r_1r_m - x_1x_m - x_1x_2 - x_2x_m) \dots\dots\dots (3)$$

$$B = (x_1 + x_m)r_2 + s(r_1x_m + r_mx_1 + x_2r_1 + r_mx_2) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 V_1 ：一次一相の端子電圧、 r_1 ：一次一相の抵抗、 x_1 ：一次一相の漏れリアクタンス、 r_2 ：二次一相の抵抗、 x_2 ：二次一相の漏れリアクタンス、 r_m ：励磁抵抗、 x_m ：励磁リアクタンス、 s ：スリップ

(1)、(2)式より電力効率 η_p ならびに推力 F は

$$\eta_p = \frac{P_0}{P_i} = \frac{(1-s)r_2(r_m^2 + x_m^2)}{A(r_2 + sr_m) + Bs(x_2 + x_m)} \dots\dots\dots (5)$$

$$F = \frac{P_0}{v_s(1-s)} = \frac{3sr_2(r_m^2 + x_m^2)V_1^2}{v_s(A^2 + B^2)} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 v_s ：同期速度

なお、ここではリアモータとの比較のため、トルクではなく推力について示している。

〈2・2〉誘導形リアモータの特性式 一般に誘導形リアモータでは二次側に板状の導電体を用いるので、二次漏れリアクタンスは小さく、また回転機に比して空けき長が極端に大きくなるので磁束密度が低く、励磁抵抗も無視しうるので小さくなり、その等価回路は第1図(b)のように表わすことができる⁽⁶⁾。したがって、その特性式は(1)～(6)式において、それぞれ $r_m = x_2 = 0$ において次のようになる。

$$P_i = \frac{3V_1^2(r_1r_2^2)}{[r_1^2 + (x_1 + x_m)^2]r_2^2} + \frac{s r_2 x_m^2 + s^2 r_1 x_m^2}{+ 2s r_1 r_2 x_m^2 + s^2 (r_1^2 + x_1^2) x_m^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$P_0 = \frac{3V_1^2}{[r_1^2 + (x_1 + x_m)^2]r_2^2} + \frac{(1-s)s r_2 x_m^2}{+ 2s r_1 r_2 x_m^2 + s^2 (r_1^2 + x_1^2) x_m^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta_p = \frac{1-s}{1 + s r_1/r_2 + r_1 r_2/(s x_m^2)} \dots\dots\dots (9)$$

$$F = \frac{3s r_2}{v_s \{ [r_1^2 + (x_1 + x_m)^2] r_2^2 + \frac{x_m^2 V_1^2}{+ 2s r_1 r_2 x_m^2 + s^2 (r_1^2 + x_1^2) x_m^2} \}} \dots\dots\dots (10)$$

なお、始動から定常運転状態にいたる加速期間の入出力エネルギー、エネルギー効率および加速に要する時間等はその運転状態によって変わるが、本文ではモータそのものの特性に的を絞るため、以下の解析において、次のような条件を設けることにする。

(i) モータの二次出力によるエネルギーはすべて運動エネルギーに変換され、位置のエネルギーは考えないものとする。

(ii) 空気抵抗、摩擦などによる機械損は考慮しない。

3. 可変二次抵抗における最高効率と最大推力

まず、本節では加速時においてスリップに応じて二次抵抗を変化しうる場合について考える。二次抵抗を変える方法は、二次導体が板状のものであるとき、車上一次方式で走行パターンに合わせて最適の抵抗率の導体を地上に配置する方法などが考えられる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、端効果防止の一方法として考えられている巻線形の場合は、通常の誘導機と同じように外部可変抵抗を加減することによって行なわれる⁽⁴⁾⁽⁷⁾。

〈3・1〉最高効率とその条件 一般の誘導電動機において、任意のスリップに対して最高効率を与える二次抵抗 $[r_2]_{\eta_m}$ は(5)式について、 $\partial \eta_p / \partial r_2 = 0$ の条件から

$$A(r_2 + sr_m) + Bs(x_2 + x_m) = r_2 \{ (r_2 + sr_m) \partial A / \partial r_2 + s(x_2 + x_m) \partial B / \partial r_2 + A \}$$

上式から

$$[r_2]_{\eta_m} = s \sqrt{x_2^2 + \frac{r_1(r_m^2 + x_m^2 + 2x_2x_m)}{r_1 + r_m}} \dots\dots\dots (11)$$

誘導形リアモータの場合は上式で、 $r_m = x_2 = 0$ において

$$[r_2]_{\eta_m} = s x_m \dots\dots\dots (12)$$

(11) および (12) 式から、最高効率を与える二次抵抗は

スリップに比例し、 $[r_2]_{\eta m}/s$ は一定となる。したがって、この条件を満足しながら加速する場合は比例推移により一定推力駆動になる。誘導形リアモータにおいては $[r_2]_{\eta m}/s$ は x_m のみによって定まる。この x_m の値は空けき長が大きいため一般回転機のそれに比して非常に小さく、最高効率を与える二次抵抗の値はかなり小さくなる。(9), (10) および (12) 式より、誘導形リアモータの最高電力効率ならびにその推力はそれぞれ

$$\eta_{pm} = (1-s)/(1+2r_1/x_m) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$[F]_{\eta m} = \frac{3V_1^2}{2v_s} \cdot \frac{1}{r_1 + x_1 + x_m/2 + (r_1^2 + x_1^2)/x_m} \quad \dots\dots\dots (14)$$

さて、(12) 式の最高効率の条件を満足しながら一定推力で加速する場合、速度 v_e に達するに要する時間 t_e の間に加えられる入力エネルギーは

$$\begin{aligned} [W_i]_{\eta m} &= \int_0^{t_e} [P_i]_{\eta m} dt = M \int_0^{v_e} \frac{v}{\eta_{pm}} dv \\ &= \frac{Mv_e^2}{1-s_e} \left(1 + 2\frac{r_1}{x_m}\right) \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

ただし、 $[P_i]_{\eta m}$: 最高効率条件における P_i ,
 $P_0 = vF$, $F = Mdv/dt$, M : 被加速体の質量,

s_e : v_e におけるスリップ

一方、出力エネルギー、すなわち被加速体の持つ運動エネルギー W_0 は $Mv_e^2/2$ であるから、一定推力加速での最高エネルギー効率

$$\eta_{em} = \frac{W_0}{[W_i]_{\eta m}} = \frac{1-s_e}{2(1+2r_1/x_m)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

また、この場合の加速時間は (14) 式より

$$\begin{aligned} [t_e]_{\eta m} &= Mv_e/[F]_{\eta m} \\ &= \frac{2Mv_e^2}{3(1-s_e)V_1^2} \cdot \left(r_1 + x_1 + \frac{x_m}{2} + \frac{r_1^2 + x_1^2}{x_m}\right) \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

〈3・2〉 最大推力とその条件 一般の誘導電動機において、任意のスリップに対して最大推力を与える二次抵抗 $[r_2]_{Fm}$ は (6) 式について $\partial F/\partial r_2 = 0$ の条件により

$$A^2 + B^2 = 2r_2(A\partial A/\partial r_2 + B\partial B/\partial r_2)$$

これより

$$\begin{aligned} [r_2]_{Fm} &= s \sqrt{x_2^2 + \frac{(r_1^2 + x_1^2)(x_m^2 + r_m^2)}{(r_1 + r_m)^2}} \\ &\quad + \frac{2x_2x_m + 2x_1x_2(x_m^2 + r_m^2)}{(x_1 + x_m)^2} \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

誘導形リアモータの場合は上式で、 $r_m = x_2 = 0$ において

$$[r_2]_{Fm} = Ds x_m = D[r_2]_{\eta m} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、

$$D = \sqrt{\frac{r_1^2 + x_1^2}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}}$$

(18) および (19) 式から、最高効率条件の場合と同様に、最大推力を与える二次抵抗はスリップに比例し、この条件を満足しながら加速するときは一定推力駆動になる。(10) および (19) 式より誘導形リアモータの最大推力は

$$F_m = \frac{3V_1^2}{2v_s} \cdot \frac{1}{r_1 + (r_1^2 + x_1^2)/(Dx_m)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

この場合の電力効率は (9) および (19) 式から

$$[\eta_f]_{Fm} = \frac{1-s}{1+(D+1/D)r_1/x_m} \quad \dots\dots\dots (21)$$

また、速度 v_e にいたるまでに加えられる入力エネルギーは、(15) 式と同様に

$$\begin{aligned} [W_i]_{Fm} &= M \int_0^{v_e} \frac{v}{[\eta_f]_{Fm}} dv \\ &= \frac{Mv_e^2}{(1-s_e)} \cdot \left\{1 + \left(D + \frac{1}{D}\right) \frac{r_1}{x_m}\right\} \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

したがって、一定最大推力で加速される場合のエネルギー効率

$$[\eta_e]_{Fm} = \frac{W_0}{[W_i]_{Fm}} = \frac{1-s_e}{2\{1+(D+1/D)r_1/x_m\}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

最大推力の場合における、(21), (22) および (23) 式の $(D+1/D)$ は最高効率の対応する (13), (15), (16) 式においては 2 になっている。また、この場合の加速時間は最短時間となり、その値は

$$\begin{aligned} t_{em} &= Mv_e/F_m \\ &= \frac{2Mv_e^2}{3(1-s_e)V_1^2} \left(r_1 + \frac{r_1^2 + x_1^2}{Dx_m}\right) \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

〈3・3〉 最高効率と最大推力条件における特性比較

可変二次抵抗における最高効率と最大推力条件を示す二次抵抗を比較すると、(12) と (19) 式より

$$[r_2]_{Fm}/[r_2]_{\eta m} = D \quad \dots\dots\dots (25)$$

上式より $D=1$ の場合は両条件が等しくなり、最大効率かつ最大一定推力で運転されることになる。第2図に x_1/x_m に対する D の値を r_1/x_1 をパラメータにして示す。空けき長の小さい回転機では x_1 に比較して x_m は非常に大きく、したがって、 D の値は零に近くなり、両条件は大きくかけはなれることになる。しかし、空けき長が極端に大きくなるリアモータでは非常に小さくなり、 x_1 と同程度か、逆に小さくなることもありうる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。したがって、 D の値も 0.5 より大きくなり、両条件はかなり接近してくる。

第2図 D および $D+1/D$ の値
Fig. 2. Values of D and $D+1/D$.

第3図 両条件におけるエネルギー効率
Fig. 3. Energy efficiencies on both conditions.

最高エネルギー効率と最大推力条件でのエネルギー効率をスリップについて一般化するため、(16)および(23)式を $(1-s_e)$ で除した値を x_1/x_m に対して第3図に示す。リニアモータのように x_1/x_m の値が大きくなるとエネルギー効率は低下し、 r_1/x_1 の値が大きくなるとその低下の度合も大きくなる。(16)と(23)式より

$$\frac{(\eta_e)_{Fm}}{\eta_{em}} = \frac{1+2r_1/x_m}{1+(D+1/D)r_1/x_m} \dots\dots\dots (26)$$

式中 $(D+1/D)$ の値は第2図に示されているように、 $x_1/x_m > 1$ のリニア・モータの領域では2に近くなり、第3図および第5図に示されるようにその領域では最高エネルギー効率と最大推力条件でのエネルギー効率はほとんど等しくなる。

最高効率条件での推力と最大推力については、(14)と(20)式にそれぞれ $2v_s/(3V_1^2)$ を、また加速時間については(17)と(24)式にそれぞれ $3(1-s_e)V_1^2/(2Mv_s^2)$ をかけて第4図に示す。(14)と(20)式より、

$$\frac{F_m}{(F)_{\eta m}} = \frac{r_1 + x_1 + x_m/2 + (r_1^2 + x_1^2)/x_m}{r_1 + (r_1^2 + x_1^2)/Dx_m} \dots\dots\dots (27)$$

第4図 両条件における推力と加速時間
Fig. 4. Driving forces and accelerating times on both conditions.

第5図 両条件におけるエネルギー効率、
推力および加速時間の比

Fig. 5. Ratios of energy efficiencies, driving forces and accelerating times on both conditions.

加速時間は一定推力の下では推力に逆比例するので、両条件の加速時間の関係は推力と逆の関係になる。第5図に示されるように、推力、加速時間についてもエネルギー効率と同様に $x_1/x_m > 1$ の領域では両条件における特性の差は小さくなる。

4. 一定二次抵抗における最高エネルギー効率と最短加速時間

前章においては二次抵抗を変化しうる場合について述べたが、一般に板状の二次導体の抵抗をスリップに

応じて変化させる事は実際問題としては困難である。本章では一定二次抵抗の場合について、前章同様、加速時の最高エネルギー効率、あるいはまた最大平均推力すなわち最短加速時間を与える二次抵抗値およびその場合の特性について述べる。

〈4・1〉 最高エネルギー効率とその条件 二次抵抗 $r_2=R_2$ 一定として、その入力エネルギーは

$$\begin{aligned} [W_i]_{R_2} &= M \int_0^{v_e} \frac{v}{[\eta_p]_{R_2}} dv \\ &= \frac{M v_e^2}{1-s_e} \left\{ 1 + \frac{(1+s_e)r_1}{2R_2} - \frac{r_1 R_2}{(1-s_e)x_m^2} \ln s_e \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

ただし、 $[\eta_p]_{R_2}$: $r_2=R_2$ における電力効率
最高エネルギー効率の条件は最小入力エネルギーの条件に等しく、その二次抵抗の値は(28)式より

$$[R_2]_{\eta_m} = G x_m \quad (29)$$

ただし、

$$G = \sqrt{\frac{1-s_e^2}{-2 \ln s_e}}$$

この場合の二次抵抗も x_m に関係して与えられる。 $s_e < 1$ であるから $\ln s_e < 0$ となり、 G は常に正の値である。第6図に s_e に対する G の値を示す。始動 ($s=1$) から s_e にいたるスリップの算術平均値 $G'=(1+s_e)/2$ と比較して、 s_e が小さいほどその差は大きくなる。一定二次抵抗におけるエネルギー効率は(28)式より

$$\begin{aligned} [\eta_e]_{R_2} &= W_o/[W_i]_{R_2} \\ &= \frac{1}{2 \{ 1 + (1+s_e)r_1/2R_2 \}^*} \\ &\quad * \frac{-s_e}{-r_1 R_2 \ln s_e / (1-s_e)x_m^2} \quad (30) \end{aligned}$$

第7図に、(29)式の $[R_2]_{\eta_m}$ を基準にとった $R_2/[R_2]_{\eta_m}$

第6図 G と H の値
Fig. 6. Values of G and H .

第7図 一定二次抵抗におけるエネルギー効率
Fig. 7. Energy efficiencies for constant secondary resistance.

$[R_2]_{\eta_m}$ と上式の $[\eta_e]_{R_2}$ の関係を示す。 r_1/x_m の小さい回転機の場合は R_2 によってはエネルギー効率はたいしてかわらないが、 r_1/x_m が大きくなるリアモータでは(29)式の条件からはずれるとエネルギー効率はかなり低くなることがわかる。最高エネルギー効率は(29)と(30)式より

$$[\eta_{em}]_{R_2} = \frac{1-s_e}{2(1+2Hr_1/x_m)} \quad (31)$$

ただし、

$$H = \sqrt{\frac{-(1+s_e) \ln s_e}{2(1-s_e)}}$$

可変二次抵抗における(16)式とこの(31)式を比較すると、

$$\frac{[\eta_{em}]_{R_2}}{\eta_{em}} = \frac{1+2r_1/x_m}{1+2Hr_1/x_m} \quad (32)$$

両者の差異は H のみで示される。第6図に H の値を示したが、 s_e が小さくなるにつれ H は1より大きくなり、一定二次抵抗と可変二次抵抗の最高エネルギー効率の差が大きくなる。第8図にこれら計算結果を示した。 r_1/x_m が小さいと H による影響も小さいがリアモータのように x_m が小さく、 r_1/x_m が大きくなるとその差もやや顕著に現われてくる。

始動から速度 v_e に達するに要する加速時間は

$$\begin{aligned} [t_e]_{R_2} &= \int_0^{v_e} \frac{M}{[F]_{R_2}} dv \\ &= \frac{2Mv_e^2}{3(1-s_e)V_1^2} \left\{ r_1 + \frac{(1+s_e)(r_1^2+x_1^2)}{4R_2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{[r_1^2+(x_1+x_m)^2 R_2]}{2(1-s_e)x_m^2} \ln s_e \right\} \quad (33) \end{aligned}$$

第 8 図 可変二次抵抗と一定二次抵抗における最高エネルギー効率

Fig. 8. Maximum energy efficiencies for valuable and constant secondary resistances.

ただし, $(F)_{R_2}$: (10) 式で $r_2 = R_2$ とおいた値
最高エネルギー効率条件での加速時間は (29) と (33) 式より次のように与えられる。

$$[t_e]_{\eta m R_2} = \frac{2Mve^2}{3(1-s_e)V_1^2} \left\{ r_1 + \left(x_1 + \frac{x_m}{2} + \frac{r_1^2 + x_1^2}{x_m} \right) H \right\} \quad (34)$$

(17) 式と (34) 式により, 可変抵抗と一定抵抗の最高エネルギー効率条件での加速時間を比較すると

$$\frac{[t_e]_{\eta m R_2}}{[t_e]_{\eta m}} = \frac{r_1 + \{x_1 + x_m/2 + (r_1^2 + x_1^2)/x_m\} H}{r_1 + x_1 + x_m/2 + (r_1^2 + x_1^2)/x_m} \quad (35)$$

なお, 推力については最も問題となる始動時について (10) と (29) 式より得られる結果と (14) 式で $s=1$ として比較すると,

$$\frac{[F]_{\eta m R_2}}{[F]_{\eta m}} \Big|_{s=1} = \frac{2G(r_1^2 + x_1^2) + 2G(r_1 + x_1)x_m + Gx_m^2}{(1+G)^2(r_1^2 + x_1^2) + 2G(r_1 + x_1)x_m + Gx_m^2} \quad (36)$$

第 6 図に示すように, s_e が小さくなると G は 1 より小さく, また H は 1 より大きくなるので, (35) および (36) 式より, s_e の小さい領域では一定抵抗は可変抵抗の場合に比して加速時間は長くなり, 始動時推力は小さくなることが判る。

〈4.2〉 最短加速時間とその条件 二次抵抗が一定であるので推力はスリップによって変化する。したがって, 前章のように最大推力ではなく, 最大平均推力あるいは最短加速時間の条件について考える。(33) 式において最短加速時間を与える二次抵抗は $\partial[t_e]_{R_2}/\partial R_2 = 0$ より

第 9 図 可変二次抵抗と一定二次抵抗における最大推力と最短加速時間

Fig. 9. Maximum driving forces and minimum accelerating times for valuable and constant secondary resistances.

$$[R_2]_{tm} = DGx_m = D[R_2]_{\eta m} \quad (37)$$

最短加速時間は (33) と (37) 式より

$$[t_{em}]_{R_2} = \frac{2Mve^2}{3(1-s_e)V_1^2} \left\{ r_1 + \frac{(r_1^2 + x_1^2)}{Dr_m} H \right\} \quad (38)$$

可変抵抗の場合の (24) 式とこの (38) 式を比較すると,

$$\frac{[t_{em}]_{R_2}}{t_{em}} = \frac{Dr_1x_m + (r_1^2 + x_1^2)H}{Dr_1x_m + (r_1^2 + x_1^2)} \quad (39)$$

また, $s=1$ における推力について, (10) と (37) 式より得られる結果と (20) 式より

$$\frac{[F_m]_{R_2}}{F_m} \Big|_{s=1} = \frac{2G(r_1^2 + x_1^2) + 2DG r_1 x_m}{(1+G)^2(r_1^2 + x_1^2) + 2DG r_1 x_m} \quad (40)$$

(39) と (40) 式の計算結果を第 9 図に示す。 s_e が小さいほど, 可変二次抵抗の場合に比して一定抵抗の特性は低下する。さらに, エネルギー効率は (30) と (37) 式より

$$[\eta_e]_{tm R_2} = \frac{1-s_e}{2\{1+(D+1/D)Hr_1/x_m\}} \quad (41)$$

可変抵抗と一定抵抗のエネルギー効率の比は

$$\frac{[\eta_e]_{tm R_2}}{[\eta_e]_{Fm}} = \frac{1+(D+1/D)r_1/x_m}{1+(D+1/D)Hr_1/x_m} \quad (42)$$

(41) および (42) 式の計算結果は, 第 8 図の $[\eta_{em}]_{R_2}$ と $[\eta_{em}]_{R_2}/\eta_{em}$ と同じ様な傾向を示す。

〈4.3〉 最高エネルギー効率と最短加速時間条件における特性比較 一定二次抵抗における両条件の二次抵抗の比は可変抵抗の場合と同様に, (37) 式から D となり, リニアモータでは 1 に近い値になる。最高エ

第 10 図 両条件におけるエネルギー効率、推力および加速時間の比 ($s_e=0.2$)

Fig. 10. Ratios of energy efficiencies, driving forces and accelerating times on both conditions. ($s_e=0.2$)

エネルギー効率の(31)式と、最短加速時間条件でのエネルギー効率の(41)式を比較すると、

$$\frac{(\eta_e)_{tmR_2}}{(\eta_e)_{R_2}} = \frac{1+2Hr_1/x_m}{1+(D+1/D)Hr_1/x_m} \dots\dots (43)$$

上式は可変抵抗の同種の(26)式とは H を除いて同じ形になる。同様に加速時間ならびに始動時推力について、

$$\frac{(t_{em})_{R2}}{(t_e)_{\eta m R2}} = \frac{r_1 + H(r_1^2 + x_1^2)/(Dx_m)}{r_1 + \{x_1 + x_m/2 + (r_1^2 + x_1^2)/x_m\}H} \dots\dots (44)$$

$$\frac{[(F_m)_{R_2}]}{[(F)_{\eta m R_2}]_{s=1}} = \frac{D\{(r_1^2 + (x_1 + x_m)^2)G^2\}}{[r_1^2 + (x_1 + x_m)^2]D^2G^2} + \frac{2Gr_1x_m + r_1^2 + x_1^2}{+2DGr_1x_m + r_1^2 + x_1^2} \dots\dots (45)$$

$s_e=0.2$ について、(43)、(44)式および(45)式の計算結果を第 10 図に示す。可変抵抗における同種の結果を示す第 5 図とほとんど同じ形となり、一定抵抗の場合も x_1/x_m の値が大きくなると最高エネルギー効率と最短加速時間の両条件における特性はほとんど等しくなることが判る。

5. 実験結果とその検討

〈5.1〉 供試機 この種の実験を行なう事は非常に困難である。本研究では重い負荷を負う列車用リアモータを模擬するために、特別に 2mm の空げき長で設計された定格 1.5kW、200V、6 極の三相巻線形誘導電動機を用い、負荷として直径 350mm、重量 106.25kg の鉄製のフライホイールを負わせた。60Hz において測定された電動機および負荷の定数は次の通りである。

$r_1=0.8\Omega$, $x_1=0.52\Omega$, $r_m=0.35\Omega$, $x_m=6.28\Omega$,
 $r_2=0.8\Omega$, $x_2=0.18\Omega$, $J=1.258\text{kg}\cdot\text{m}^2$ (電動機と負荷の慣性定数)

実験はすべて 60Hz、100V の一定電源により、電動機の同期速度 1,200r.p.m に対し、始動から 1,000r.p.m ($s_e=0.167$) まで加速して行なった。なお、二次抵抗は外部抵抗によって加減した。

〈5.2〉 可変二次抵抗の場合 供試機は回転機としては特に空げき長を大きくしたとはいえ、リアモータの空げき長に比してはるかに小さく、また二次側も巻線形であるため、 r_m ならびに x_2 を無視することは出来ない。したがって、その特性式は一般誘導電動機のそれを用いなければならない。最高効率および最大推力の条件は(11)および(18)式より、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} [r_2]_{\eta m/s} &= 5.40\Omega \\ [r_2]_{Fm/s} &= 0.994\Omega \end{aligned} \right\} \dots\dots (46)$$

両条件の比は

$$[r_2]_{Fm}/[r_2]_{\eta m} = 0.184$$

となり、リアモータの D に相当する値は 1 に比してかなり小さく、両条件はかなりかけはなれたものになっている。第 11 図に入力エネルギー、エネルギー効率および加速時間と r_2/s について、それぞれ実測値を示す。供試機は一般のリアモータの空げき長に比してはるかに小さいとはいえ、入力エネルギーおよびエネルギー効率は r_2/s に対してかなり大きく変化している。また、最高効率条件 $[r_2]_{\eta m/s}=5.40\Omega$ 付近で入力エネルギーおよびエネルギー効率は最小および最大となり、理論の妥当性が裏づけられている。加速時間については電動機の二次巻線そのものの抵抗が

第 11 図 可変二次抵抗における入力エネルギー、エネルギー効率および加速時間

Fig. 11. Input energy, energy efficiency and accelerating time for valuable secondary resistance.

0.8Ω で、最大推力条件の 0.994Ω 以下の抵抗値について数多くの実験値を得られなかった。しかし、第 11 図の曲線から、実測による最短加速時間の条件は理論値の最大推力条件に近いのではないかと推測される。

〈5・3〉一定二次抵抗の場合 一定二次抵抗については、一般誘導電動機に対する最高エネルギー効率および最短加速時間の条件は複雑になるので与えなかったが、最高エネルギー効率の条件については、(11)(12)および(29)式から、最短加速時間の条件については(18)、(19)および(37)式から、(46)式で $s=1$ とおき、それぞれに G をかけて近似的に得られる。

$$[R_2]_{\eta m} = 2.81\Omega, [R_2]_{t m} = 0.518\Omega \dots (47)$$

ただし、 $G=0.521$

第 12 図に入力エネルギー、エネルギー効率および加速時間と二次抵抗の関係を実測値について示す。最小入力エネルギー及び最高エネルギー効率はその条件の理論値 $[R_2]_{\eta m} = 2.81\Omega$ の付近にあることが示されている。加速時間については可変抵抗の場合と同じ理由により最短加速時間は確認されないが、実測と理論による条件値は大きく離れることはないと思われる。

6. む す び

以上の結果から結論として次の事があげられる。

(1) 誘導形リニアモータは空け長が回転機に比して極端に大きい励磁リアクタンスが小さくなり、励磁電流が大きくなる。したがって、二次抵抗が推力に対すると同じ様に、加速時のエネルギー効率に大きく影響する。

(2) 加速時のエネルギー効率を最高にする二次抵抗値が存在する。二次抵抗をスリップに応じて変化する場合は、この抵抗値とスリップの比を励磁リアクタンスに等しくするように変化させるとエネルギー効率は最高になる。一定二次抵抗の場合は、最終到達速度におけるスリップの値で定まる定数 G と励磁リアクタンスの積に等しく二次抵抗を定めるとエネルギー効率を最高にすることが出来る。

(3) 加速時の平均推力を最大に、すなわち加速時間を最短にする二次抵抗値が存在する。可変二次抵抗の場合は、この抵抗値とスリップの比を電動機定数によって定まる定数 D と励磁リアクタンスの積に等しくすると一定最大推力、したがって、最短加速時間となる。また、一定二次抵抗の場合は、 D と G と励磁リアクタンスの積に等しく二次抵抗を定めると最短加速時間が与えられる。

第 12 図 一定二次抵抗における入力エネルギー、エネルギー効率および加速時間

Fig. 12. Input energy, energy efficiency and accelerating time for constant secondary resistance.

(4) 一般の誘導電動機では、加速時の最高エネルギー効率を与える二次抵抗と最大平均推力を与える二次抵抗は大きくかけはなれた値である。しかし、空け長の大きな誘導形リニアモータにおいては、二つの条件の二次抵抗値は接近し、最高エネルギー効率と最大平均推力の両条件をとともにほとんど満足しうる加速運転条件が得られる。

本文では、電動機の電源は定電圧、定周波数源に限ってきたが、インバータなどの可変周波数源で運転される場合は加速時のエネルギー効率は良くなり、50%を超えることも可能である。このような可変電圧可変周波数源で駆動される誘導形リニアモータの加速時の諸特性についても一応の成果を得ているので、追って発表したい。

最後に、ご指導頂いたロンドン大学の Laithwaite 教授に、また平素ご指導頂いている本学 中村正雄教授に感謝の意を表す。

(昭和 50 年 3 月 24 日受付、同 50 年 10 月 31 日再受付)

文 献

- (1) 広瀬・猪狩：電動力応用 125 コロナ社
- (2) 山村，他：電学誌 90, 459 (昭 45-3)
- (3) 山村，他：電学誌 91, 309 (昭 46-2)
- (4) 山村，他：電学誌 91, 2075 (昭 46-11)
- (5) 宇佐美：リニアモータ 61 (昭 49) 出光書店
- (6) 大野・岸本：三菱電機技報 42, 12, 1581 (昭 43)
- (7) 宇佐美：リニアモータ 63 (昭 49) 出光書店
- (8) 梶野，他：昭 50 電気四学会連大 No. 508
- (9) 曾小川，他：鉄道技術研究資料 25, 10, 477 (昭 43)
- (10) 野中・吉田：九大工学集報 41, 5, 804 (昭 43)