

制御工学的視点に基づくりニア誘導モータの 磁束合成を用いた端効果補償

古関隆章* (東京大学) 真野亮(トヨタ自動車)

Flux Synthesis of a Linear Induction Motor for Compensating End-effect Based on Insight of a Control Engineer

Takafumi Koseki* (The University of Tokyo)
Ryo Mano (Toyota Motor Corp.)

Abstract

It is possible to give an arbitrary longitudinal flux distribution in a gap to a linear induction motor if one applies primary ring windings: Authors have named this field excitation as flux synthesis. Authors have proposed a method to avoid thrust reduction in high speed drive in a linear induction motor on account of its end effect, based on the idea of flux synthesis from a control engineers' point of view. The effect of the proposed drive has been verified through field calculation. One can enhance LIM-thrust of 30-40% in high speed drive in return for a slight reduction of efficiency by the proposed scheme for end-effect compensation.

キーワード：リニア誘導モータ, 端効果, 端効果補償, 高速駆動, ベクトル制御, 磁束合成

(Keywords: Linear Induction Motor, End Effect, End-Effect Compensation, High Speed Drive, Field-Coordinates Oriented Control, Flux Synthesis)

1. 研究背景と目的

リニアモータを用いた交通システムは現在、ドイツを始めとするヨーロッパ諸国、カナダ、韓国、日本などにおいて、実用化へ向けた研究が行われている[1]。リニアモータを用いた交通システムには、非粘着駆動であることから、急勾配、急カーブの走行が可能であること、モータ自体が扁平であり車両を小さく製作できることから、建設コストの削減や環境への配慮が可能であるといった利点が存在する。しかし、LIMには端効果[2]が存在し、高速域において鉄心の利用率が低下し、推力が十分に得られなくなる問題が存在する。現状のリニア地下鉄などでは、モータそのものがある速度の範囲で端効果の影響をできるだけ回避できるよう設計され、同時に高すべりかつ低速で運転することで運転上端効果の影響が顕著とならない工夫[3]がなされている。しかし、この運転方法は、誘導モータは本来低すべり領域で電気的特性が良いという観点から、モータ性能を犠牲にした消極的対策であるとも言える。

この端効果に対し、入口端の起磁力を積極的に引き上げる対策が提案されている[4]。ここでは、制御工学的視点から新しい補償方法を提案する。これにより、鉄心の利用率を上げ、モータとしての性能を少しでも引き出すことで高速域における推力を十分に確保し、現状よりも高速な駆動を可能とすることを目標とする。なお、制御工学的視点とは、以下のことを意味する。

LIMの内部現象を詳細に分析するのではなく、全体として電気的な一次遅れ系であるという大雑把な現象把握に基づく。

端効果を「完全に端効果を除去しよう」とするのではなく、「適度に補償を行う」という思想を中心とする。

2. LIMの端効果

LIMは、一次巻線に多相交流を通电することにより、ギャップ中に進行磁界を発生し、これと対向した二次導体板上に誘導された渦電流との作用によって推力が働き、進行磁界の速度、す

なわち同期速度よりもすべりの分だけ遅れて二次側が直線運動するモータである。

端効果の一般的な解釈は以下のように説明される。図1において、二次導体板上で磁束を観測している観測者は、一次側の入口および出口端部を通過する際に急激な磁束変化を観測しようとするが、足元の二次導体板に、この急激な磁束変化をさまたげようとする渦電流が発生するため、観測者は実際には緩やかな磁束変化を観測する。その結果、磁束密度を空間的に見てみると、図2に示すような形となる。ここで、出口端の端効果は特性に大きな影響を与えないことが知られているが、入口端における磁束の落ち込みは推力低下に結びつき、特に高速域において顕著に現れる。

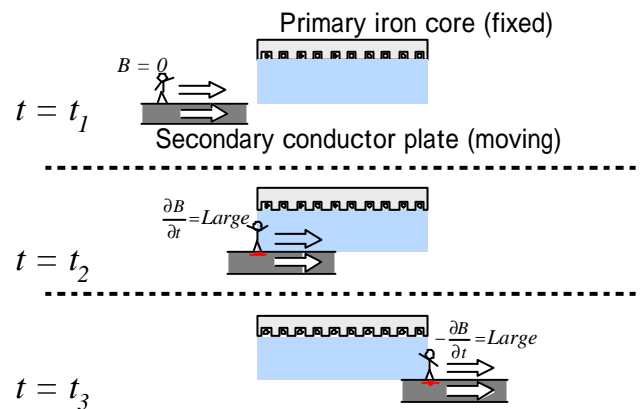


図1 端効果の一般的な解釈
Fig. 1 Intuitive understanding of longitudinal end-effect of a LIM

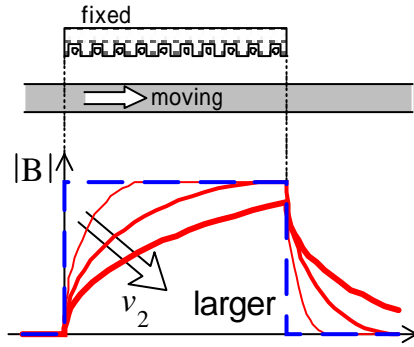


図2 端効果の現れ方 (磁束の空間分布)
Fig. 2 Speed dependency of end effect (Flux distribution)

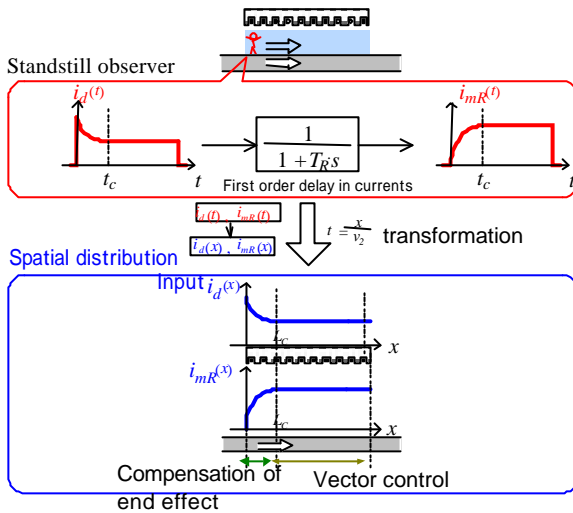


図3 端効果補償のアイデア
Fig. 3 Idea of end-effect compensation

3. 新しい端効果補償法の提案

端効果補償法を提案する前に、本研究の根底にある端効果のとりえかたを説明する。本研究では、端効果の本質は d 軸電流に対して磁化電流が一次遅れの形で立ち上がる」とことにあると考える。つまり、誘導機の d/q 軸理論[5]より与えられる(1)式を端効果の本質と見る。

$$T_R \frac{di_{mR}}{dt} + i_{mR} = i_d \quad (1)$$

すると、端効果の発生によって推力が得られなくなるのは、入口部分では、q 軸電流 i_q が立ち上がっているにもかかわらず磁化電流 i_{mR} が立ち上がっていないためであると説明される。そこで本研究では、この d 軸電流から磁化電流までの時定数 T_R が、二次導体板の材質により定まるものであり、速度にほとんど依存しないことに注目し、LIM の入口部分において i_d を多めに投入することで i_{mR} を「適度に」速く立ち上げ、モータとしての性能が出せる領域を確保することで端効果を補償する方法を提案する。提案手法は、図 3 を用いて以下のように説明される。

まず、のように希望の $i_{mR}(t)$ (希望の立ち上げ速さ)を決め、それを実現するように $i_d(t)$ を生成し、 $i_d(t)$ を変数変換することで $i_d(x)$ を作って LIM に投入する。すると、のような $i_{mR}(x)$ が実現され、通常のベクトル制御を行う「ベクトル制御区間」でモータの性能が出せることになる。なお、における希望する i_{mR} の立ち上げ速さは、図 3 中に示される「端効果補償区間」の長さを定めることにより与えられる。

以上、端効果補償法のアイデアをまとめると、入口部分を

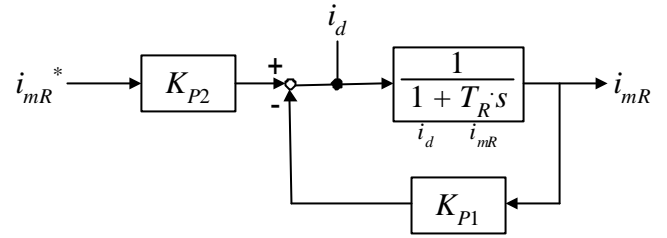


図4 d 軸電流を与える方法
Fig. 4 Method to decide d-axis current.

端効果補償区間とすることにより、その部分で d 軸電流を適切に多めに投入することで磁化電流の立ち上がりを速め、後ろに控えるベクトル制御区間でモータとしての性能を引き出し、推力を確保する、とすることができる。

4. d 軸電流の与え方

ここでは、提案した端効果補償の概念を実現するための d 軸電流の形として、2 通りを説明する。

まず、どちらの d 軸電流の与え方にも共通するのは、 i_{mR} の希望立ち上げ時定数の設定法であるが、これは端効果補償区間長 L_c と二次速度 v_2 に対して以下のように設定する。

$$t_{mR} = \frac{L_C}{kv_2} \quad (2)$$

なお、 k は時定数の何倍の時間がたったところで立ち上がりきったと判定するかを示すものである。

一つ目の i_d の与え方は、図 4 に示すブロック図を用いて考えることにより希望する i_{mR} の立ち上がりを実現する方法である。 i_{mR} の指令値をステップとすると、 i_d の空間分布は(3)式のように与えれば良いことが導出される。

$$i_d(x) = \left[\left(\frac{kv_2 T_R}{L_C} - 1 \right) e^{-\frac{kx}{L_C}} + 1 \right] i_{d0} \quad (3)$$

ここで i_{d0} はベクトル制御区間において与える d 軸電流である。ここで、(3)式の与える空間分布の概形は、図 5 の部分で例として示した形をしており、 i_d を入口端部で不連続かつ最も大きく投入する形となっているが、このような方法は

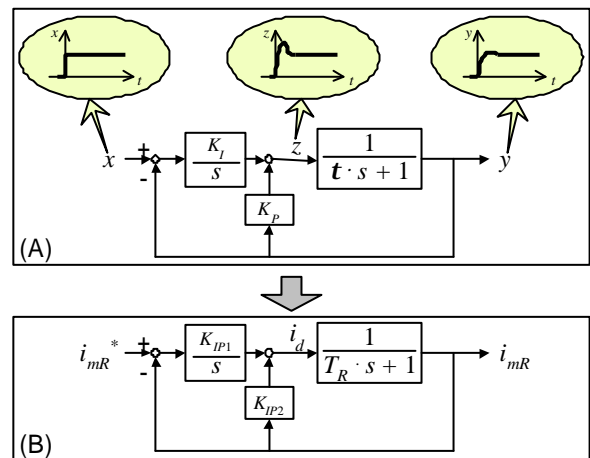


図5 IP 制御系のステップ応答波形にヒントをえた d 軸電流の与え方
Fig. 5 Method to decide d-axis current based on the analogy of IP-controller.

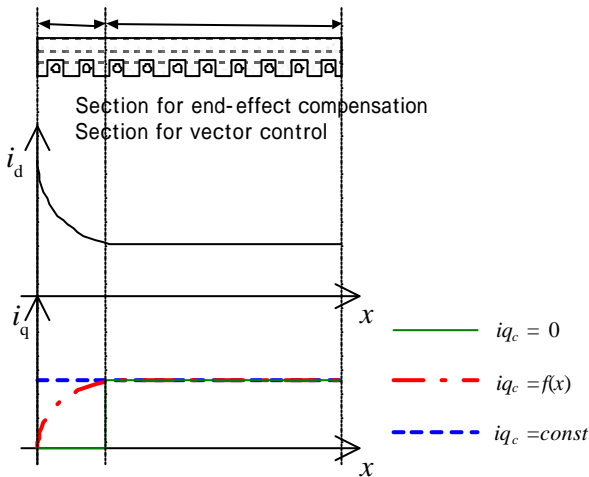


図6 q軸電流の与え方
例として、d軸電流を指数関数的に与えた場合
Fig. 6 Spatial distribution of q-axis current input

工学的観点からやや不自然である。そこで、二つ目の i_d の与え方として、入口端部におけるd軸電流の連続性を考慮した方法を以下に示す。これは、図5に示すようなIP制御系のステップ応答における各部の波形にヒントを得たものであり、図5に示すブロック図を用いて同様に考えることで与えるべき i_d の空間分布は(4)式のように導出される。なお、この方法では i_{mR} の希望立ち上がり時定数 τ_{mR} のほかに、 i_{mR} の振動特性を与えるを設定する必要があるが、 $\tau_{mR} = 2$ の場合を、「Kessler標準形」と呼ぶ[6]。

$$i_d(x) = [P_1 + P_2 \exp(-sx/v_2) \cos(wx/v_2) + P_3 \exp(-sx/v_2) \sin(wx/v_2)] i_{d0} \quad (4)$$

ただし、

$$K_{IP1} = \frac{k^2 v_2^2 T_R g}{L_C^2}, \quad K_{IP2} = \frac{k v_2 T_R g}{L_C} - 1$$

$$P_1 = 1, P_2 = -1, \quad P_3 = \frac{2K_{IP1} T_R - K_{IP2} - 1}{\sqrt{4K_{IP1} T_R - (K_{IP2} + 1)^2}}$$

$$s = \frac{K_{IP2} + 1}{2T_R}, \quad w^2 = \frac{4K_{IP1} T_R - (K_{IP2} + 1)^2}{4T_R^2}$$

である。

5. 一次電流の与え方

ここでは、q軸電流の与え方も含め、一次電流の与え方を説明する。

q軸電流の与え方は、本研究では図6に示す3通りを検討している。「 $i_{qc} = 0$ 」「 $i_{qc} = f(x)$ 」「 $i_{qc} = \text{const}$ 」はそれぞれ、「端効果補償区間ではq軸電流はゼロとする」「端効果補償区間で与えるq軸電流は磁化電流と同じ形で与える」「q軸電流はLIM全域で一定の形で与える」方法である。「 $i_{qc} = f(x)$ 」の方法に対する端効果補償区間におけるq軸電流の空間分布は、ベクトル制御区間で与えるq軸電流を i_{q0} とおくと、以下ようになる。

d軸電流の空間分布を指数関数的に与えた場合：

$$i_q(x) = (1 - \exp(-kx/L_C)) i_{q0} \quad (5)$$

入口端部におけるd軸電流の連続性を考慮した場合：

$$[Q_1 + Q_2 \exp(-sx/v_2) \cos(wx/v_2) + Q_3 \exp(-sx/v_2) \sin(wx/v_2)] i_{q0} \quad (6)$$

ただし、

$$Q_1 = 1, Q_2 = -1, Q_3 = -\frac{K_{IP2} + 1}{\sqrt{4K_{IP1} T_R - (K_{IP2} + 1)^2}}$$

である。

以下では、以上のように与えられたd軸電流とq軸電流を与える方法について説明する。

定常状態において、 i_{mR} と i_q は以下の関係で一対一に対応している。

$$2pf_1 s = \frac{i_q}{T_R i_{mR}} \quad (7)$$

本研究では、 i_{mR} と i_d は一対一に対応しているため、すべりと i_q / i_d は一対一に対応している。つまり、 i_d と i_q に対して、すべりが位置の関数として与えられることになる。しかし、一次電流を与えるためには、振幅の情報も必要になる。この振幅情報は、以下の式で与えることができる。

$$i_{labs} = \frac{2}{3} \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (8)$$

以上より、一次電流を与えることが可能となるが、すべりを位置によって変化させる、という特殊なことを行うためには、一次周波数を位置によって変化させるか、ポールピッチを位置によって変化させることが必要となる。本研究では、隣接する異周波数の間に過渡現象が発生することを避けるために、後者の方法を採用する。数値解析を行う際の具体的な一次電流の与え方の手順は、以下のとおりである。

入口端部に、与えられた振幅で位相が0の電流を与える。

今見ている点(の直後にこの操作を行う場合は入口端部の点を示す)における局所的なポールピッチの値から次の離散点の位相を算出する。

「次の離散点」の振幅は今見ている振幅と同じと仮定し(つまり、今見ている点と次の離散点の間だけ見ると、振幅が一定の正弦波交流が存在しているように見える)、「次の離散点」における電流を与えるが、ここではその実部のみを取り出す。

「次の離散点」に与えられている振幅に対して得られた実部を実現するための位相を計算する。なお、虚部を与えなければ二つの位相(と2 - , 0 <)が候補として残ってしまうが、で計算された位相が未満ならば、以上であれば2 - とする。

「次の離散点」に与えられた振幅と、で得られた位相により、「次の離散点」の電流とする。

一度を行ったあと、からまでを繰り返すことにより、全領域に対して電流を与えることができる。なお、で入口端部の位相を0と決めているが、本論文では定常状態を仮定し、すべての評価値をフェーザで考えるので、この値をいくつに定めても結果に変化を与えない。

6. 解析に用いるLIMのモデルと解析方法

本研究の解析で用いるLIMのモデルを図7に示す。また、その推力、効率特性を図8に示す。解析では、一次元解析を行うが、磁束はすべて二次導体板に垂直な成分のみ持っているものとする。また、これを簡単に行うために、一次鉄心はLIMの両端で切れておらず、無限長であるとする。解析では、定常状態を仮定する。解析は、コントロール・ボリューム法により離散化を行い、対流拡散項については指数法を適用するが、数値的にはゼロ割回避のためにべき乗法を用いて計算する[7]。

推力の特性より、端効果が発生することにより推力の最大値が低下していること、推力の最大値を与えるすべりが大きいほうへ移動していることがわかる。また、効率の特性より、すべりが

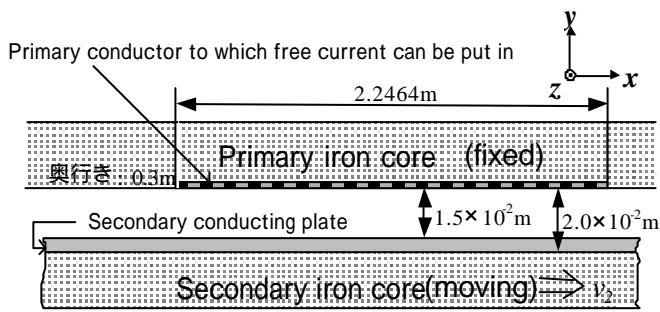


図7 LIMの解析モデル

Fig. 7 One-dimensional analysis model of LIM.

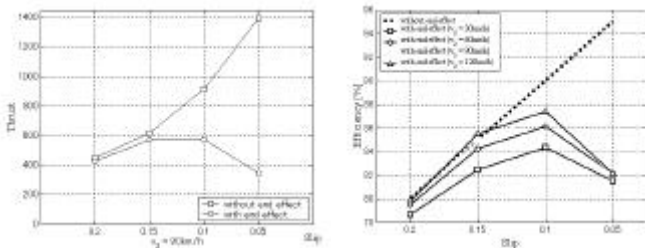


図8 LIMの推力(左)・効率(右)のすべり特性

Fig. 8 Thrust, efficiency characteristics of a model LIM.

小さい領域で効率が低下していることがわかる。なお本研究における効率は、二次損失のみを考慮したものとなっている。

7. 諸量の空間分布からの考察

ここでは、二つのd軸電流の与え方に対する補償の考え方について説明する。なお、以降の議論では、比較をする際にそろえる条件を、ベクトル制御区間における一次電流の絶対値としている。また、補償を行った場合のすべりとは、ベクトル制御区間におけるものを意味する。

図9は、入り口端での一次電流が不連続となる「 $i_{d|x=0} \neq 0$ 」の方法を適用した場合の、同期速度で走行している場合とすべりが0.1で走行している場合の「一次電流密度」「ギャップ中磁束密度」「二次電流密度」「推力密度」の空間的分布図である。同

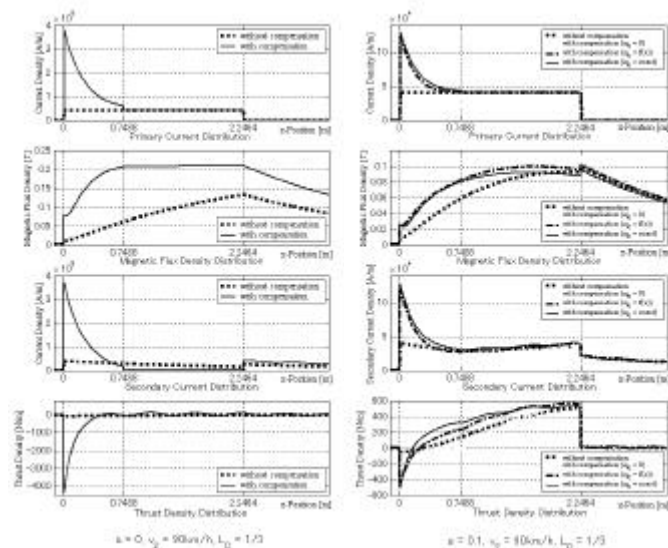


図9 「 $i_{d|x=0} \neq 0$ 」の一次電流、磁束、二次電流、推力分布

Fig. 9 Spatial distribution when $i_{d|x=0} \neq 0$

期速度の場合は、q軸電流が0であり、一次電流分布はd軸成分と等価、磁束密度分布は磁化電流と等価である。同期速度で走行している場合を見ると、磁化電流が端効果補償区間に立ち上げを完了させていることがわかる。次に、すべりが0.1で走行している場合を見ると、入口でd軸電流を大きく投入したことから、磁化電流の立ち上がりは速くなるが、入口端で無理をした分、その位置で制動力が発生することがわかる。なお、このときの一次電流密度のピーク値は、補償を行わない場合の値に対して3倍程度である。

図10は、入口端での一次電流の連続性に配慮した「 $i_{d|x=0} = 0$ 」の方法を適用した場合について、図9と同様のものを示したものである。同期速度で走行している場合を見ると、この場合もやはり、磁化電流の立ち上がりが端効果補償区間に完了している様子が見える。また、すべりが0.1で走行している場合を見ると、入口部分における一次電流が、連続性を保たれた形で与えられていることがわかる。その結果、入口付近における制動力は発生するものの、その大きさは小さくなる様子が見える。しかし、制動力が発生している領域は広がっていることも見てとれる。なお、この場合の一次電流密度のピーク値は、端効果補償を行わない場合に比して、約2.2倍である。

8. 端効果補償区間長の依存性

「 $i_{d|x=0} \neq 0$ 」の方法について、推力の増分と効率の、端効果補償区間長依存性を計算した。推力の増分としては、補償を行わなかった場合の値で規格化した推力を算出した。

推力の増分に注目すると、端効果補償区間長の依存性はすべりが0.05から0.1の間で変化する。すなわち、すべりが小さいと端効果補償区間が長いほど推力の増分がとれるのに対し、すべりが大きいと逆の傾向が現れる。効率に注目すると、端効果補償区間長の依存性が0.1から0.15の間で変化する。すなわち、すべりが小さいと端効果補償区間が短いほど効率の低下が著しくなる。これらのことは、定性的に、「端効果補償区間が短いと無理をする要素が大きく効いてくるが、端効果補償区間が長いと推力を確保する領域が狭くなり、補償が弱くなる」と説明でき、ここにトレードオフ関係が存在することがわかる。

図11に「 $i_{d|x=0} \neq 0$ 」の方法で補償を行った場合の推力の特性を示す。こでの結果、このモデル機で、推力の増分がとれ、極端な効率低下も引き起こさないのは、すべりが0.1の場合で

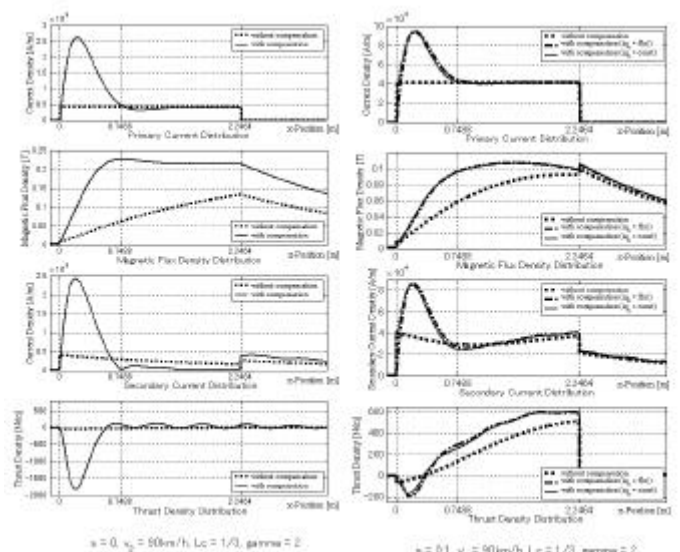


図10 「 $i_{d|x=0} = 0$ 」の一次電流、磁束、二次電流、推力分布

Fig. 10 Spatial distribution when $i_{d|x=0} = 0$

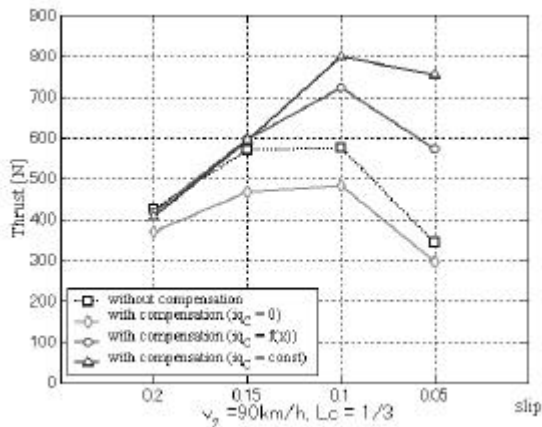


図 11 推力特性 ($I_d|_{x=0} \neq 0$)

Fig. 11 Thrust characteristics ($I_d|_{x=0} \neq 0$)

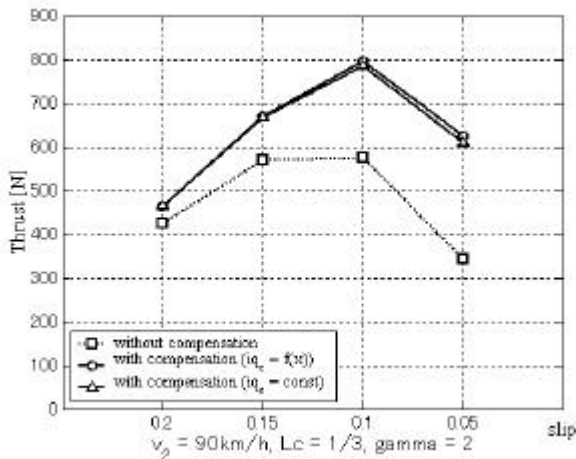


図 12 推力特性 ($I_d|_{x=0} = 0$)

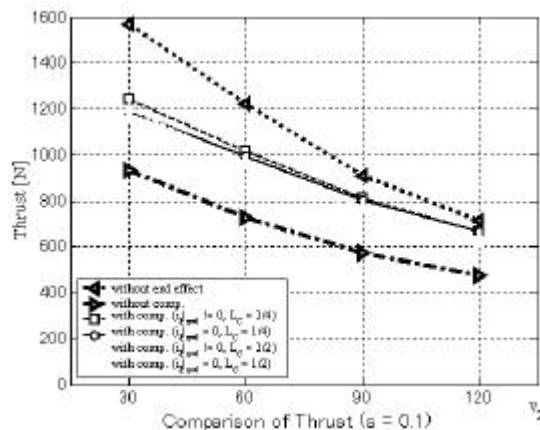
Fig. 12 Thrust characteristics ($I_d|_{x=0} = 0$)

あることがわかる。

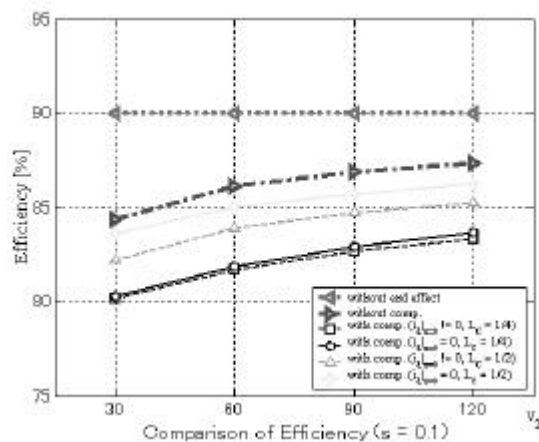
$I_d|_{x=0} = 0$ の方法についても同様に推力の増分と効率について、端効果補償区間依存性を試算した。入口端部の d 軸電流の連続性を考慮する方法では、端効果補償区間依存性の変化は見られなかった。すなわち、どのすべりに対しても推力の端効果補償区間依存性は小さく、効率は端効果補償区間が長いほど良い。図 12 に、 $I_d|_{x=0} = 0$ を用いた場合の推力の特性を示す。ここからも、 $I_d|_{x=0} = 0$ の方法を用いても、推力の増分がとれ、極端な効率低下を伴わずに推力が大きくとれるのは、すべりが 0.1 のときであることがわかる。すなわち、d 軸電流の与え方によらず、すべり 0.1 付近において効果的な端効果補償が行える。なお、図 11 と図 12 から、最大推力を与えるすべりが、補償を行うことにより小さい方向へ移動していることがわかる。これは、モータとしての性能を生かす方向へ動いていることを示す。

9. すべり 0.1 に条件を絞った比較

最後に、端効果補償が効果的に行えると判断されたすべりが 0.1 の場合に条件を絞って、効果的な d 軸電流の与え方や端効果保障区間長を検討する。端効果補償区間長を LIM 全長の 1/4 と 1/2 に設定した場合の諸量空間分布を計算した。その結果、定性的にも明らかだが端効果補償区間が長い方が一次電



(a) 推力
(a) Thrust



(b) 効率
(b) Efficiency

図 13 すべり 0.1 における推力・効率の比較

Fig. 13 Comparison of thrusts and efficiencies at slip=0.1.

流密度のピーク値が小さくて済むことがわかった。推力密度分布からは、端効果補償区間長を長くすることで、入口付近の制動力は小さくできるが、推力の立ち上がりは遅れることが確認された。また、d 軸電流の与え方を変化させることによる諸量の分布に注目すると、入口端部における d 軸電流の連続性を考慮した方法を採用することにより、一次電流密度のピーク値が小さく済むことも確認されている。具体的には、端効果補償区間長が LIM 全長の 1/4 の場合にピーク電流が 30% 強の低下、同 1/2 の場合には 20% 強の低下が実現されることがわかった。また、推力密度分布からは、入口端における d 軸電流の連続性を考慮することで、入口付近の制動力が小さくなる一方で、制動力の働く領域が広くため、推力の立ち上がりは遅くなるが見られた。

図 13 は、この条件を対象とした推力と効率の速度依存性である。まず、推力を見ると、d 軸電流の与え方、端効果補償区間長にかかわらず、端効果の補償を行うことで、端効果が発生しなかった場合の特性に近づくことがわかる。特に高速域において補償効果が良く現れている。端効果補償区間が短いほうがやや大きな推力を与えることがわずかに見られる。効率の観点からは、d 軸電流は入口端部の連続性を考慮したほうが良く、端

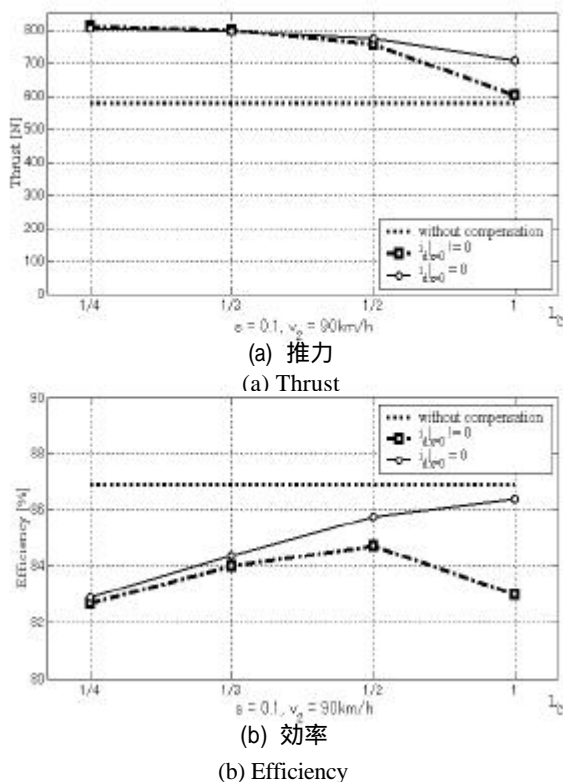


図 14 推力と効率の端効果補償区間依存性
Fig. 14 Dependency of thrust and efficiency on the length of the section for the end-effect compensation.

効果補償区間は短すぎると良くない。以上の推力と効率に関する考察に加え、前述の一次電流密度ピーク値に関する考察を総合すると、今考えているパラメータ範囲では、入口端部におけるd軸電流の連続性を考慮し、すべりが0.1で端効果補償区間がLIM全長の1/2の場合が最も効率良く端効果を補償することになる。このとき、投入する一次電流密度のピーク値は補償を行うことにより約1.8倍となり、効率が1.3%程度わずかに下がるが、約35%の推力向上が見込める。

最後に、ここまで考えていた端効果補償区間長に、この補償区間をLIMの全長とした場合の計算結果を加えて、推力、効率の端効果補償区間長依存性を調べたものを図14に示す。これより、端効果補償区間を短くしていくと、推力が飽和するのに対して効率が悪化していくこと、端効果補償区間を長くしていくと、推力が低下するのに対して効率が飽和していく様子がわかる。よって、設計の際には推力と効率のトレードオフ関係を考慮し適切に短い補償区間長を選ぶのが良い。

10. まとめ

本研究では、端効果の本質をd軸電流から磁化電流までの一次遅れととらえた上で、端効果を補償し、推力を確保する方法を提案した。提案手法は、d軸電流を入口部において適切に大きく投入することで磁化電流の立ち上げを速め、モータとしての性能を出せる領域を増やす、というものであるが、本研究では二通りのd軸電流の与え方、すなわちd軸電流を指数関数的な形で与える方法と「入口端部におけるd軸電流の連続性を考慮した方法」を検討した。その結果、効率と一次電流密度

ピーク値の観点から「入口端部におけるd軸電流の連続性を考慮した方法」を用いることで、効果的な端効果補償が行えることがわかった。またこのとき、q軸電流を磁化電流と同じ形で与え、端効果補償区間長をLIM全長の1/2に設定し、すべりを0.1で運転することにより、一次電流密度のピーク値が1.8倍必要となり効率が1.3%程度下がるものの、最大推力を35%程度増加させることが可能となることがわかった。これらの結果は、本研究で取り上げたLIMに対して具体的に与えたモータ設計値に対してのみ言えることなので、最後にこれらの一般的解釈を記す。

- (1) 補償を行うことにより、最大推力を与えるすべりが小さい方向へ移動する。つまり、端効果補償を行いながら運転する場合は、補償を行わない場合に比べて小さいすべりで運転することができる。
- (2) d軸電流は、入口端部における連続性を考慮して与えたほうが良い。
- (3) 端効果補償区間を短くすると、推力が飽和するのに対して効率が悪化する。また、端効果補償区間を長くすると、効率が飽和するのに対して推力が低下する。つまり、端効果補償区間長は、推力と効率のトレードオフ関係を考慮し「適切に短く」選ぶ必要がある。

今後は、より現実的な一次巻線の構成を前提に、従来の端効果補償法の検討事例に加え、各種この検討で得られた知見を生かして200km/h以上の最高速度を目指したLIMの巻線分布の設計法、高速化に有効な駆動法を再検討してゆきたい。

文 献

- [1] 社団法人 日本地下鉄協会『LINEAR METRO - 21世紀の都市交通システムへの提言 - 』
- [2] 山村 昌 伊藤 春雄 石川 芳寿 電気学会論文誌, Vol. 91, No. 11 (1971)
- [3] 樋口 剛 野中 作太郎 安藤 正博: 電気学会産業応用部門論文誌, Vol. 120-D, No. 8/9 (2000)
- [4] 藤井 信男 原田 敏行 坂本 泰明 栢菅 剛士: 電気学会産業応用部門論文誌, Vol. 122-D, No. 4 (2002)
- [5] Werner Leonhard "Control of Electrical Drives" Springer (2001)
- [6] C. Kessler: Regelungstechnik, Heft 8, pp. 261-266 (1960)
- [7] スハス V. パタンカー (水谷 幸夫 香月 正司 共訳) コンピュータによる熱移動と流れの数値解析 森北出版 (1986)