

SUMT 法による高速片側式リニアインダクション モータの設計パラメータの最適化について

樋 口 剛*・野 中 作太郎**

Optimized Parameters of the High-Speed Single-Sided Linear Induction Motors Using a SUMT Technique

by

Tsuyoshi HIGUCHI*・Sakutaro NONAKA**

The problem of optimizing the parameters of the high-speed single-sided linear induction motor (SLIM) is approached using nonlinear programming.

Five principal design parameters are chosen as the independent variables, and the materials of the secondary reaction rail is expressed as their objective function. The power factor-efficiency product, the maximum flux density in teeth and the primary length are selected as constraint function.

Optimization problem is mathematically formed by use of the design formulas of SLIM approximately taking into account the end effect, skin effect and airgap leakage. The sequential unconstrained minimization technique (SUMT) and the simplex method are used to solve the problem.

The method is applied to the SLIM for the propulsion of the 300 km/h magnetic levitated vehicle of about 20m length and 27 tons weight.

1. まえがき

リニアインダクションモータ (LIM) は、電磁力により非接触で推力を発生することができるため、高速で低公害の磁気浮上式鉄道の推進装置として開発が進められている。

高速 LIM では、一次鉄心や一次巻線部分が有限であり、また二次側がシート状でエアギャップが比較的大きいなどの構造的特徴に起因して、高速領域において特性が大幅に劣化する端効果や表皮効果及びエアギャップ漏れ磁束の影響などが問題となり、その最適設計法の確立が望まれている。

近年、電子計算機の発達に伴って電気機器の設計に数値計画的手法を応用する方法がいくつか発表されている¹⁾²⁾。筆者らは先に、実用規模の磁気浮上式鉄道

用高速片側式 LIM (SLIM) に関して設計方針を提案し³⁾、設計の手順を示す⁴⁾と共に設計パラメータが運転特性やモータ重量・二次側地上設備資材に及ぼす影響を詳細に検討したが⁵⁾、本稿では SLIM の設計に非線形最適化手法を導入して、運転特性や設計上及び製作上の制約を考慮しながら設計パラメータの最適化を計る方法について検討している。

最適設計問題を数値計画的手法を用いて解析する場合、まず最適性の判断の基準となる目的関数や制約条件を独立変数の関数として定式化する必要がある。高速 LIM の特性算定は空間高調波解析法⁶⁾により行うことができるが、式が級数の形で表されるため最適設計問題の定式化にはより簡単な形のもの望ましい。

本稿では、筆者らが先に端効果を無視した二次元解

昭和59年4月28日受理

*電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

**九州大学工学部 福岡市箱崎 (Department of Electrical Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

析に端効果波の概念を導入して導出した、端効果、表皮効果、エアギャップ漏れ磁束の影響を考慮できる近似特性計算式⁷⁾を用いている。

数値例として巡航速度 300 km/h、推力 2 ton の高速 SLIM の最適設計問題を考え、非線形最適化問題の一解法である SUMT 法により解析を行っている。

2. 非線形最適化問題⁸⁾

SLIM の最適設計は \mathbf{x} を l 個の独立変数 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_l)$, $g_i(\mathbf{x})$ を n 個の制約関数, $F(\mathbf{x})$ を目的関数とすると次のような非線形最適化問題として表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} g_i(\mathbf{x}) &\geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ \text{の条件下で} \\ F(\mathbf{x}) &\text{を最小にする } \mathbf{x} \text{を求める} \end{aligned} \right\} (1)$$

このような制約条件のある非線形最適化問題を解くには制約条件を利用する勾配射影法や制約のない問題へ変換して解く変換法などがある。

変換法は、目的関数 $F(\mathbf{x})$ と制約関数 $g_i(\mathbf{x})$ を組み合わせて変換関数 $P(\mathbf{x}, r_k)$ を作り、その最適解を求めることにより元の制約条件のある非線形最適化問題を解くというもので外点法と内点法に大別される。

内点法において、 n 個の不等式制約 $g_i(\mathbf{x}) \geq 0$ を持つ場合の変換関数は次のように表される。

$$P(\mathbf{x}, r_k) = F(\mathbf{x}) + r_k \sum_{i=1}^n \varphi\{g_i(\mathbf{x})\} \quad (2)$$

ここで、 r_k は正の数、 $\varphi\{g_i(\mathbf{x})\}$ は区間 $(0, \infty)$ において連続かつ凸で、減少する関数であり、実行可能領域の境界で無限大となるような関数で、SUMT 法では次のように $1/g_i(\mathbf{x})$ が用いられる。

$$P(\mathbf{x}, r_k) = F(\mathbf{x}) + r_k \sum_{i=1}^n \{1/g_i(\mathbf{x})\} \quad (3)$$

ここで r_k は振動パラメータと呼ばれ、 $r_1 > r_2 > \dots > r_k > 0$ と単調減少させて次々に変換関数 $P(\mathbf{x}, r_k)$ の最適解を求めていくと、それら一連の解は $k \rightarrow \infty$ の時に制約のある最適化問題の解に収束する。

計算ではまず \mathbf{x} 及び r_k の初期値 $\mathbf{x}^0 \in R^0 = \{\mathbf{x} \mid g_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n, r_1 > 0\}$ を与え、次に r_k に対して \mathbf{x}^{k-1} を初期値として $P(\mathbf{x}, r_k)$ を最小にする解 \mathbf{x}^k を求め、最適解が収束するまで $r_{k+1} = r_k/c (c > 1)$ と r_k を減少させながら計算を続ける。ここで、実行可能領域の内部 R^0 は空でない、すなわち実行可能な初

期値 \mathbf{x}^0 が存在する必要がある。また、 \mathbf{x}^0 の選び方によって計算時間が左右されるため、独立変数と目的関数や制約条件の関係をあらかじめ把握しておくことが望ましい。

(3)式で得られた制約のない最適化問題の解法として直接探索法や降下法などがあるが、ここでは直接探索法の1つであるシンプレックス法を用いて最適解を求める。Fig. 1 に本稿で用いた解析手順の流れ図を示す。

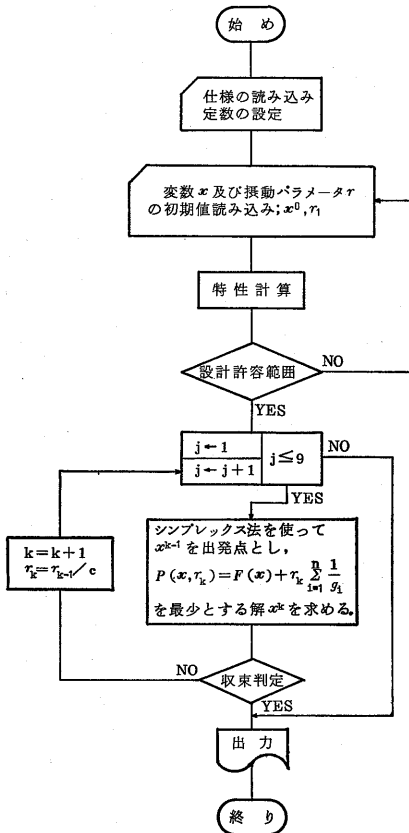


Fig. 1 Flow chart of optimization program

3. SLIM の最適設計問題の定式化

3.1 独立変数

Fig. 2(a), (b)に SLIM のスロット及び構造略図を示す。一次側ステータにおいて、 L : モータ長、 h : 鉄心積み厚、 d_a : 鉄心高さ、 t_s : スロットピッチ、 w_s : スロット幅、 z_t : 歯幅である。一次側とメカニカルクリアランス g だけ隔てて置かれた二次側リアクションレールは厚さ d_2 のアルミニウム板に厚さ d_1 の鉄板を張り合せた構造を持ち、オーバハング c だけ一次鉄心幅 h より両端に張り出したものとする。

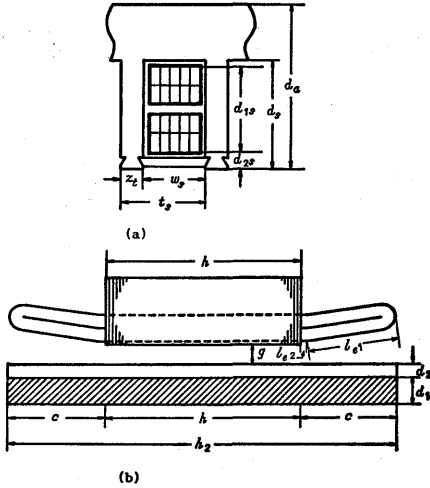


Fig. 2 Dimensions of slot and construction of single-sided LIM
(a) Dimensions of slot,
(b) Construction of SLIM

最適化問題の定式化を行う場合、まず多くの設計パラメータの中から独立変数を選定し、他のパラメータについては適値を与えるか、もしくは独立変数の式として表す。

本稿では、SLIM の特性やモータ重量・二次側地上設備資材に大きな影響を及ぼす、ポールピッチ τ 、鉄心積み厚 h 、極数 p 、二次側アルミニウム板厚 d_2 、オーバハンク長 c を選ぶ。

3.2 目的関数

LIM 製作において所要資材の大半は二次側地上設備が占めるものと考えられる。従ってここでは目的関数 $F(\mathbf{x})$ として次式で与えられる 1 km 当りの二次側重量 $G_{Al2} + G_{Fe2}$ を用いる。なお、定式化に際して SI 単位系を用いることとする。

$$F(\mathbf{x}) = G_{Al2} + G_{Fe2} \\ = (\gamma_{Al2} d_2 + \gamma_{Fe2} d_1)(h + 2c) \quad (4)$$

ここで、 γ_{Al2} 、 γ_{Fe2} はそれぞれアルミニウム、鉄の比重である。

なお、目的関数として他に一次側モータ重量や年間運転コストなども考えられるが、列車の使用状況に応じて最適化の目標を設定すればよい。

3.3 制約関数

設計では、保証特性として定格速度、定格推力の他に最大推力と力率×効率(単位容量当りの出力)を考えているが、最大推力については仕様値が得られるまで定格すべりを変更して最適設計を繰り返すこととし、(1)

式の制約関数としては力率×効率 $\cos\varphi_1 \times \eta$ を与える。

また、一次鉄心歯部での磁束の飽和を防ぐため歯部磁束密度の最大値 B_{tm} に、更にモータの機械的強度や製作上及び列車走行上の制約からモータ長 L について制限値を設ける。

b_1 、 b_2 、 b_3 をそれぞれ $\cos\varphi_1 \times \eta$ 、 B_{tm} 、 L の仕様値とすると、

$$g_1(\mathbf{x}) = \cos\varphi_1 \times \eta - b_1 \\ = \frac{(1 - s_n) r'_{2e}}{\sqrt{(r_1 + r'_{2e})^2 + (x_1 + x'_{2e})^2}} - b_1 \quad (5)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = b_2 - B_{tm} \\ = b_2 - \frac{h}{(h - n_d w_d) k_1 (1 - k_t)} B_m \quad (6)$$

$$g_3(\mathbf{x}) = b_3 - (p + \beta - \frac{1}{mq}) \tau \quad (7)$$

ここで、 s : すべり、 s_n : 定格すべり、 r'_{2e} : 等価二次抵抗、 x'_{2e} : 等価二次漏れリアクタンス、 r_1 : 一次抵抗、 x_1 : 一次漏れリアクタンス、 n_d : 一次鉄心のエアダクト数、 w_d : エアダクト幅、 k_1 : 成層鉄心の占積率、 β : 短節率、 m : 相数、 q : 毎極毎相のスロット数、 $k_t (= w_s / t_s)$: スロット幅/スロットピッチ

なお、制約条件として温度上昇限度も考えられるが、SLIM は列車下部に装着され高速で移動するため十分な冷却効果が得られる。従ってここでは省略している。

3.4 設計上の関係式

(4)式～(7)式を独立変数で表すための関係式を以下に示す。

等価二次抵抗 r'_{2e} 、等価二次漏れリアクタンス x'_{2e} は、

$$r'_{2e} = k_{e1} r_{2e} \quad (8)$$

$$x'_{2e} = k_{e2} x_{2e} \quad (9)$$

ここで、 r_{2e} 、 x_{2e} はそれぞれ端効果を無視した場合の等価二次抵抗、等価二次漏れリアクタンスで、次のように表わされる⁷⁾⁹⁾

$$r_{2e} = 4m \frac{(k_w N_p h)^2}{p} \frac{h v_1}{\tau} \mu_0$$

$$\times \frac{\sin 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2}{\cosh 2 \frac{\pi}{\tau} (g+d_2 \alpha'_2) - \cos 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2} \quad (10)$$

$$x_{2e} = 4m \frac{(k_w N_p h)^2}{p} \frac{h v_1}{\tau} \mu_0 \times \frac{\sinh 2 \frac{\pi}{\tau} (g+d_2 \alpha'_2)}{\cosh 2 \frac{\pi}{\tau} (g+d_2 \alpha'_2) - \cos 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2} \quad (11)$$

但し、

$$\frac{\pi}{\tau} d_2 (\alpha'_2 + j \beta'_2) = \tanh^{-1} \left\{ \frac{\mu_0}{\mu_2} \lambda_2 \tanh \frac{\pi}{\tau} (d_2 \lambda_2 + d_1 \lambda'_1) \right\} \quad (12)$$

$$\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda'_1 = \tanh^{-1} \left\{ \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\frac{\mu_1}{\mu_0 \lambda_1} + \tanh \frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1}{1 + \frac{\mu_1}{\mu_0 \lambda_1} \tanh \frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1} \right\} \quad (13)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{1 + j \sigma_1 \mu_1 s v_1 \tau / \pi} \quad (14)$$

$$\lambda_2 = \sqrt{1 + j \sigma_2 \mu_2 s v_1 \tau / \pi} \quad (15)$$

$$s = (v_1 - v) / v_1 \quad (16)$$

$$v_1 = v_2 / (1 - s_n) \quad (17)$$

$$N_p h = p q N \quad (18)$$

ここで、 k_w ：巻線係数、 $N_p h$ ：1相の直列巻数、 N ：1コイルの巻数、 v_1 ：同期速度、 v_2 ：巡航速度、 v ：速度、 μ_0 ：空気の透磁率、 μ_1 ：裏張り鉄板透磁率、 μ_2 ：アルミニウム透磁率、 σ_1 ：裏張り鉄板導電率、 σ_2 ：アルミニウム導電率で、 σ_1 、 σ_2 はRussell-Norsworthy係数で横方向端効果を考慮した導電率を用いる。

また、 ke_1 、 ke_2 は端効果を考慮するための補正係数で次式で与えられる。

$$ke_1 = 1 - \frac{1}{p \tau [\{s \pi / (1-s) \tau\}^2 + (1/T')^2]} \times \left[\varepsilon \frac{-p \tau}{T'} \sin \frac{s \pi}{1-s} p \left\{ \frac{s \pi}{(1-s) \tau} - \frac{1}{T'} \tan \varphi \right\} \right]$$

$$+ \left\{ 1 - \varepsilon \frac{-p \tau}{T'} \cos \frac{s \pi}{1-s} p \left\{ \frac{s \pi}{(1-s) \tau} \tan \varphi + \frac{1}{T'} \right\} \right\} \quad (19)$$

$$ke_2 = 1 - \frac{1}{p \tau [\{s \pi / (1-s) \tau\}^2 + (1/T')^2]} \times \left[\varepsilon \frac{-p \tau}{T'} \sin \frac{s \pi}{1-s} p \left\{ \frac{1}{T'} \cot \varphi + \frac{s \pi}{(1-s) \tau} \right\} + \left\{ 1 - \varepsilon \frac{-p \tau}{T'} \cos \frac{s \pi}{1-s} p \left\{ \frac{1}{T'} - \frac{s \pi}{(1-s) \tau} \cot \varphi \right\} \right] \quad (20)$$

$$\tan \varphi = \frac{\sinh 2 \frac{\pi}{\tau} (g+d_2 \alpha'_2)}{\sin 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2} \quad (21)$$

T' はSLIMにおける端効果波の減衰時定数で次式で示される。

$$T' = v_2 (x_{m t} + x_{2 t}) / \omega_1 r_{2 t} \quad (22)$$

(22)式の $x_{m t}$ 、 $x_{2 t}$ 、 $r_{2 t}$ は端効果により生じた二次電流に対する二次回路定数で、(10)式、(11)式に $\tau = (1-s)\tau$ を代入した時の値 $r_{2 e t}$ 、 $x_{2 e t}$ より求めることができる。 $x_{m t}$ はすべり $s=0$ 時の $x_{2 e t}$ の値、 $r_{2 t}$ 、 $x_{2 t}$ はそれぞれ次式により求められる。

$$r_{2 t} = \frac{s r_{2 e t} x_{2 e t}^2}{r_{2 e t}^2 + (x_{2 e t} - x_{m t})^2} \quad (23)$$

$$x_{2 t} = \frac{x_{m t} (x_{2 e t} x_{m t} - r_{2 e t}^2 - x_{2 e t}^2)}{r_{2 e t}^2 + (x_{2 e t} - x_{m t})^2} \quad (24)$$

一次抵抗 r_1 は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$r_1 = K_r \rho \frac{2 N_p h l a}{2 A c_1} \quad (25)$$

但し、 K_r ：交流実効抵抗の補正係数、 ρ ：一次巻線の体積抵抗率、また J_1 を一次巻線電流密度とすると半コイル長 $l a$ 、一次巻線の導体断面積 $A c_1$ は、

$$l a = h + 1.5 \tau \beta \quad (26)$$

$$A c_1 = I_1 / a J_1 \quad (27)$$

I_1 は次の一次有効電力 P_{g1} の式より求めることができる。

$$P_{g1} = F n v_1 \quad (28)$$

$$= m I_1^2 \left\{ 4 m \frac{(k_w N_p h)^2}{p} \frac{h v_1}{\tau} \mu_0 \right\} \\ \times \frac{\sin 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2}{\cosh 2 \frac{\pi}{\tau} (g + d_2 \alpha'_2) - \cos 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2} \quad (29)$$

開放スロットで m 相二層巻線の一次漏れリアクタンス x_1 は Kilgore の式を用いると次のように与えられる¹⁰⁾。

$$x_1 = 16 m f_1 h \frac{(k_w N_p h)^2}{p} \times 10^{-7} \\ \times \left\{ \frac{K_{x1}}{k_w^2} \frac{20}{m q} \left(\frac{d_{2s}}{w_s} + \frac{d_{1s}}{3 w_s} \right) + \frac{4}{h} (2 l_{e2} + l_{e1}) \right\} \quad (30)$$

ここで、 d_{1s} 、 d_{2s} 、 l_{e1} 、 l_{e2} は Fig 2 (b) に示した値で、 K_{x1} 、 d_{1s} は、

$$K_{x1} = \frac{1}{4} (3 \beta + 1) \quad (31)$$

$$d_{1s} = 2 A c_1 / w_s \quad (32)$$

$$w_s = k_t t_s \quad (33)$$

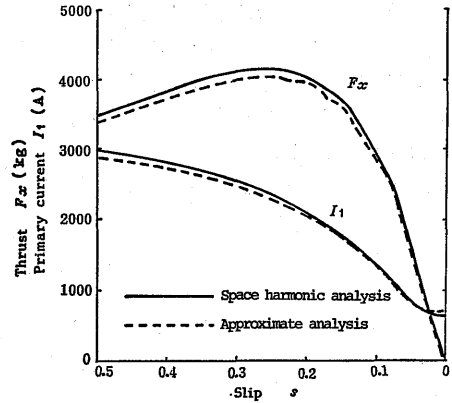
$$t_s = \tau / m q \quad (34)$$

但し、簡単化のために $A c_1$ は連続変数であると仮定している。

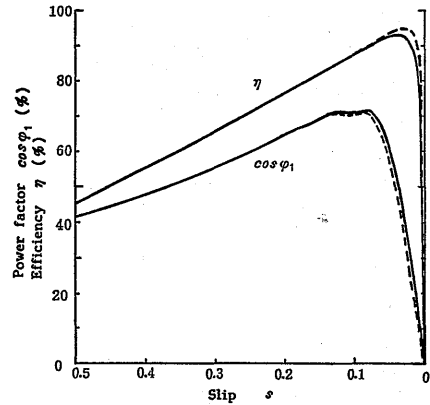
(6)式におけるエアギャップ磁束密度の最大値 B_m は、

$$B_m = 2 \sqrt{2} m I_1 \frac{k_w N_p h}{p \tau} \mu_0 \\ \times \sqrt{\frac{\cosh 2 \frac{\pi}{\tau} (g + d_2 \alpha'_2) + 1}{\cosh 2 \frac{\pi}{\tau} (g + d_2 \alpha'_2) - \cos 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta'_2}} \quad (35)$$

なお、特性計算式は二次元解析より導出したものであるが、一次側ステータにおいて平滑一次鉄心を仮定している。従ってスロットの影響を考慮するために、



(a)



(b)

Fig. 3 Comparison between the calculated values by space harmonic analysis and two dimensional approximate analysis
(a) Thrust and primary current
(b) Power factor and efficiency

ここではカータ係数¹⁰⁾を用いて等価平滑鉄心にギャップ長を換算している。Fig. 3は速度 300 km/h、推力 2 ton、モータ長 8 m の高速 SLIM の定数を用いて近似特性計算式の精度を検討したものである。近似解(点線)は空間高調波解析法による計算結果(実線)とよく一致し、十分な精度を有することがわかる。

4. 数値例による検討

Table 1は巡航速度 300 km/h、1車両の長さ 20 m、重量 27 ton、所要推力 2 ton の磁気浮上式鉄道用車上一次片側式 LIM について、 $\cos \phi_1 \times \eta \geq 60\%$ 、 $B_{tm} \leq 2$ Tなる条件下で行った最適設計結果を示す。LIM 1はモータ長に制限を設けない場合、LIM 2、LIM

3はモータ長を8m, 6mに制限した場合である。
 メカニカルクリアランス $g=10\text{mm}$ とし、定格すべり s_n が異なるのは最大推力が定格推力の200%程度になるように s_n を選定しているためである。

計算式において、 A_{c1} 及び極数 p を連続変数として扱っており、Table 1に示した p は解に最も近い偶整数を示したものである。

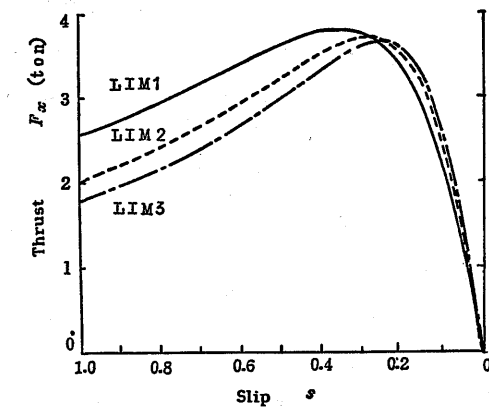
相数, 並列回路数, 1コイルの巻数, 一次巻線電

流密度はそれぞれ $m=3, a=1, N=1, J_1=4.3\text{ A/mm}^2$, 毎極毎相のスロット数 $q=4$ に固定し短節率 $\beta=10/12$, スロットピッチに対するスロット幅の比 $k_t=0.77$ とする。また、裏張り鉄板厚 d_1 は、特性的には4mm程度で十分であり、リアクションレールの機械的強度を考慮して決定すべきであることを明らかにしているが³⁾, ここでは $d_1=10\text{mm}$ としている。

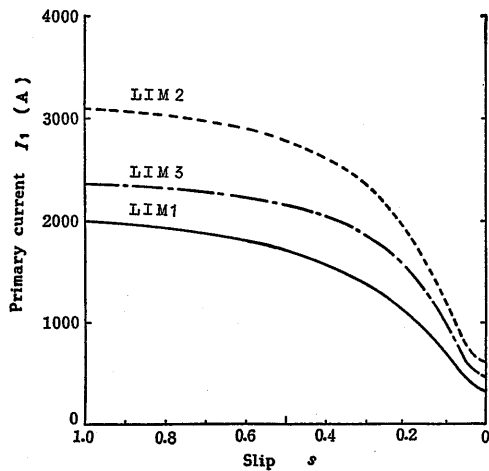
モータ長に制限を加えない場合(LIM1), モータ

Table 1 Design examples of high-speed SLIM

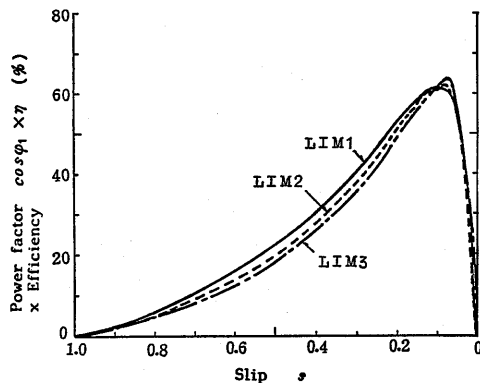
	名 称	記 号	単 位	LIM 1	LIM 2	LIM 3
定 格	線間電圧	V_1	V	2,420	1,506	1,934
	周波数	f	Hz	129	146	179
	一次電流	I_1	A	620	1,022	743
	容量	KVA	kVA	2,597	2,666	2,489
	定格すべり	s_n		0.080	0.075	0.065
	定格推力	F_n	kg	1,934	2,021	1,911
	同期速度	v_1	km/h	326	324	321
一 次 側	モータ長	L	m	27.7	7.6	6.1
	相数	m		3	3	3
	極数	p		78	24	24
	ポールピッチ	τ	mm	352	309	248
	鉄心積み厚	h	mm	172	267	460
	鉄心高さ	d_a	mm	39	54	45
	毎極毎相のスロット数	q		4	4	4
	スロットピッチ	t_s	mm	29	26	21
	スロット幅	w_s	mm	23	20	16
	スロット深さ	d_s	mm	20	31	30
	短節率	β		10/12	10/12	10/12
	1コイルの巻数	N		1	1	1
	1相の直列巻数	N_{ph}		312	96	96
	半コイルの長さ	l_a	mm	612	653	771
	一次抵抗	r_1	Ω	0.055	0.011	0.017
	一次漏れリアクタンス	x_1	Ω	0.547	0.213	0.322
銅重量	G_{Cu1}	kg	1,527	802	740	
鉄重量	G_{Fe1}	kg	715	388	392	
ギャップ	メカニカルクリアランス	g	mm	10	10	10
二 次 側	裏張り鉄板抵抗率	ρ_1	$\Omega\text{-m}$	10.5×10^{-8}	10.5×10^{-8}	10.5×10^{-8}
	裏張り鉄板厚み	d_1	mm	10	10	10
	アルミニウム抵抗率	ρ_2	$\Omega\text{-m}$	3.3×10^{-8}	3.3×10^{-8}	3.3×10^{-8}
	アルミニウム厚み	d_2	mm	5	4	3
	オーバハンゲ	c	mm	13	11	17
	二次導体幅	h_2	mm	198	290	494
	アルミニウム重量/km	G_{Al2}	ton/km	2.465	3.149	4.420
裏張り鉄板重量/km	G_{Fe2}	ton/km	15.570	22.810	38.850	
電気特性	力率	$\cos\phi_1$	%	68.7	68.6	68.2
	効率	η	%	88.5	90.2	91.7



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Performance characteristics of

LIM 1 ~ LIM 3

(a) Thrust-slip curve

(b) Primary current-slip curve

(c) Power factor x efficiency-slip curve

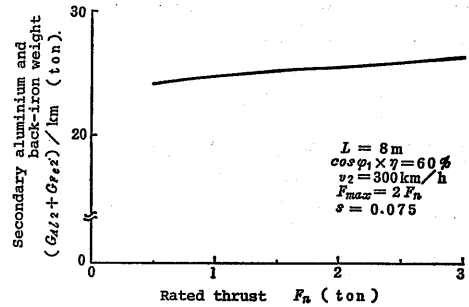


Fig. 5 Effect of varying rated thrust on the materials of the secondary reaction rail.

長 $L=28$ m, 幅 $h=172$ mm と一次側が極端に細長く, 二次側のアルミニウム板厚は $d_2=5$ mm とやや厚めで, オーバハング長は $c=13$ mm と小さめの設計結果が得られる。これは二次側地上設備資材を最小にするという目標に対する設計の方向を示すものであるが, 最適設計問題を数値計画的手法を用いて解析する場合, 特性面からのみ論ずると, このように列車長よりモータが長くなるといった不合理な解が得られることがある。実際の設計においては前述のように LIM の形状にはモータの機械的強度や製作技術, 更に走路との空間的關係など他の要因からも制約が課せられる。

LIM 2, LIM 3 はモータ長に 8 m, 6 m の制限を加えた場合の計算結果を示す。極数は共に $p=24$ であるが, モータ長が 8 m, 6 m と減少するに従って τ はそれぞれ $\tau=309$ mm, 248 mm と減少し, h は $h=267$ mm, 460 mm と増加する。従って 1 km 当りの二次側重量 $G_{Al_2}+G_{Fe_2}$ は 26 ton, 43.3 ton と大幅に増加することがわかる。また, 二次側において c は L に関係なく 10~20 mm が適当であり, d_2 は L の減少と共に $d_2=4$ mm, 3 mm と減少することがわかる。

筆者らは先にモータ長について, 端効果を本質的に軽減し更に二次側資材の節減を計るためには極数の多い「細長く薄い LIM」を設計すべきであること, またポールピッチやアルミニウム板厚については $\tau=200\sim 400$ mm, $d_2=3$ mm 程度がよいことを明らかにしたが, 本計算結果からもその妥当性が確認できる。

Fig. 4 に空間高調波解析法により求めた各モータの速度特性を示す。

Fig. 5 は速度 300 km/h, モータ長 8 m の条件で定格推力を変化して最適設計を行った場合の二次側重量の変化の様子を示す。最大推力は定格推力の 200%程

度とする。図より定格推力が変化しても二次側重量には大きな変化はないことがわかる。

5. むすび

高速片側式 LIM の最適設計の問題を制約条件のある非線形最適化問題として扱い解析を行った。独立変数としてポールピッチ，鉄心積み厚，極数，二次側アルミニウム板厚，オーバハング長を選び，SUMT 法及びシンプレックス法を用いて，運転特性やモータ長に関する制約の下で二次側地上設備資材の最小化を計った。数値例による検討から，最適解は筆者らが先に明らかにした設計パラメータの適値とよく一致することが確認された。

おわりに，日頃御鞭撻を頂く工学部山田英二教授，小山純教授に，また卒業研究として協力された本学卒業生橋純一郎，花田恒弘両氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) R. Ramarathnam & B. G. Desai: "Optimization of Polyphase Induction Motor Design", IEEE Trans., PAS-90, 2, 570 (1975)
- 2) R. W. Menzies & G. W. Neal: "Optimization Program for Large-Induction-Motor Design", Proc. IEE, 122, 643 (1975)
- 3) 野中・樋口: 「磁気浮上式鉄道用高速片側式リニアインダクションモータの設計方針について」, 電学論 B, 101, 475 (昭56-8)
- 4) 野中・樋口: 「高速片側式リニアインダクションモータの設計方法について」, 九大工学集報, 55, 611 (昭57-12)
- 5) S. Nonaka & T. Higuchi: "Study of High-Speed Single-Sided Linear Induction Motor Design" The Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 42, 1 (1982)
- 6) S. Nonaka & K. Yoshida: "Analysis of Linear Induction Motors Using a Space Harmonic Technique", Transport Without Wheels (edited by E. R. Laithwaite) pp. 187~216 (1977) Elek Science
- 7) 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)
- 8) S. L. S. Jacoby, J. S. Kowalik & J. T. Pizzo: "Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems", (1972) Prentice-Hall, Inc.
- 9) 野中・吉田: 「両側式リニアモータの特性解析」, 電学誌, 90, 880 (昭45-5)
- 10) 野中・吉田: 「両側式リニアモータの等価回路定数と特性算定式」, 電学誌, 90, 890 (昭45-5)