UDC 621.313.333 : 621.333 : 621.318.38

論文

56-B56

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

正員 野中 作太郎 (九州大)

正員 樋口 剛 (九州大)

1. ま え が き

高速・低公害の磁気浮上式鉄道の実現を目指して反発形 LSM 推進方式、吸引形 LIM 推進方式などいずれもが実用車の概念設計の段階に入っている。

従来、高速 LIM に関して研究開発のため各国で製作された試験車や実験装置はいずれもモータ長が 4m 以下 (例えば、アメリカ LIMRV⁽¹⁾: 10 極・3.81m, 同 TLRV⁽¹⁾⁽²⁾: 5 極・2.58m, 西ドイツ EET-01⁽³⁾: 8 極・2.87m, 日航 HSST-01⁽⁴⁾: 14 極・2.14m, 九州大学試験装置⁽⁵⁾: 4 極・1.55m) であり、理論的研究もモータ長の短い LIM を対象に進められてきた^{(1)~(11)}。そのため、短一次形 LIM 特有の端効果が顕著に現われ、高速領域での特性劣化が過度に問題視される結果となり高速 LIM の研究の大半が端効果の解明とその軽減策に傾注されてきた。従来から極数を増してモータ長を長くすれば端効果を軽減できることは理論的に指摘されていたが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、このことを積極的に LIM 設計に応用しようとする研究は不十分であった。

磁気浮上式鉄道の将来構想として、1 車両の長さを 20m 程度と想定すると、搭載する LIM (一次側) の長さは台車の構造、浮上案内システムの配置、鉄心の機械的強度などを考慮しながら比較的自由に選定することができる。

本論文は、従来端効果による特性劣化を防ぐ方法として提案されてきた一次巻線結線による方法⁽¹⁰⁾や、補償巻線による方法⁽⁶⁾⁽¹¹⁾などモータ長の短い LIM を対象とした設計方針にとらわれずに、本質的に端効果の影響を軽減するためモータ長を十分長くし極数を多くした“細長く薄い LIM”を設計することを提案するのである⁽¹²⁾。ここで、厚さを薄くすることはスロット

深さを浅くすることによって一次漏れリアクタンスをできるだけ小さく設計することを意味し、更にモータを細くすることはリアクションレールの幅、従って二次側設備資材の軽減を計るものである。

この設計方針の妥当性は、実際に実用規模の磁気浮上列車推進用の片側式リニアインダクションモータ (SLIM) を設計し、空間高調波解析法⁽¹³⁾を用いて端効果の影響を考慮した特性計算を行なうことにより確認される。またそのような SLIM を設計するにはどの程度のモータ長が必要であるかを検討し、更に設計パラメータが特性に及ぼす影響を明らかにしている。

2. 実用規模の高速 SLIM の設計例

〈2・1〉 設計例 表 1 は巡航速度 300km/h, 1 車両の長さ 20m, 重量 27t, 所要推力 2,000kg の磁気浮上列車推進用車上一次片側式 LIM の設計例を示す。1 車両あたり 1 SLIM を車体下部中央に装着することを想定して、その支持機構、機械的強度、一様なメカニカルクリアランスの維持には若干問題が残るが、モータを極端に長く設計した場合である。設計上の計算式は文献(14)~(16)に依る。

三相、70 極、2,800kVA, 185Hz LIM の一次鉄心寸法は長さ 16.5m, 積み厚 250mm, 高さ 50mm, その重量は約 670kg, 一次巻線はポールピッチ 234mm の二層分布短節巻で、半コイルの長さ 523mm, 銅の重量は 1,020kg 程度となる。図 1(a) はスロット寸法を示し、表 1 に記載されていない値として歯幅 $z_s = 7\text{mm}$, $d_{1s} = 26.75\text{mm}$, $d_{2s} = 4.9\text{mm}$ である。1 コイルの巻数 $N=1$, 導体は 3mm×6mm の平角銅線を 10 本並列に使用するものとし、導体断面積は 174.5mm² である。一次漏れリアクタンス x_1 の算定には、Kilgore の式⁽¹⁴⁾を用いている。二次側リアクションレールは図 1(b) に示すように、厚さ $d_2=5\text{mm}$ のアルミニウム板に厚さ $d_1=10\text{mm}$ の鉄板を張り合わせた構造のものをを用いる。二次導体板の幅 h_2 はオーバハング c だけ一次鉄心積み厚 h より両端に張り出した構

Design Principle of The High-Speed Single-Sided Linear Induction Motors for Propulsion of Magnetically Levitated Trans. By Sakutaro Nonaka, Member & Tsuyoshi Higuchi, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University).

野中作太郎: 正員, 九州大学工学部電気工学科

樋口 剛: 正員, 九州大学大学院工学研究科電気工学専攻

表 1 実用規模高速片側式 LIM の
設計例 (LIM 1)

Table 1. Design examples of a full-scale
high-speed single-sided LIM (LIM 1)

	名 称	記 号	単 位	数 値
定 格	線間電圧	$\sqrt{3}V_1$	V	2,143
	周波数	f_1	Hz	185
	容量	kVA	kVA	2,800
	同期速度	v_1	km/h	311
一 次 側	モータ長	L	m	16.54
	相 数	m		3
	極 数	p		70
	ポールピッチ	τ	mm	234
	鉄心積み厚 (幅)	h	mm	250
	鉄心高さ	d_a	mm	50
	毎極毎相のスロット数	q		3
	スロットピッチ	t_s	mm	26
	スロット幅	w_s	mm	19
	スロット深さ	d_s	mm	33
	コイルピッチ	β		7/9
	1 コイルの巻数	N		1
	1 相の直列巻数	N_{ph}		210
	半コイルの長さ	l_a	mm	523
	一次抵抗	r_1	Ω	0.027
	一次漏れリアクタンス	x_1	Ω	0.394
	(コイルエンド部)	(x_{e1})	(Ω)	(0.207)
ギャップ	コアバック磁束密度	B_{cm}	T	0.8
	歯部磁束密度	B_{tm}	T	1.0
二 次 側	メカニカルクリアランス	g	mm	10
	裏張り鉄板抵抗率	ρ_1	$\Omega\cdot m$	10.5×10^{-8}
	裏張り鉄板厚み	d_1	mm	10
	アルミニウム抵抗率	ρ_2	$\Omega\cdot m$	3.3×10^{-8}
	アルミニウム厚み	d_2	mm	5
	オーバハング	c	mm	100
側	二次導体幅	h_2	mm	450

造にし、 c はポールピッチの半分程度の 100 mm とする。なお裏張り鉄板の幅はレール構成の機械的強度とも関連するが、磁気通路としては h に短縮してもよい。

〈2・2〉 速度特性 図 2 (a)~(c) は $\sqrt{3}V_1/f_1 = 11.6$ V/Hz 一定に保ちながら、供給周波数 f_1 を 30 Hz から 185 Hz まで変化させた場合の定電圧駆動時の速度特性を示す。推力特性において、周波数にかかわらずほぼ一定となり良好な速度制御が得られる。(b) 図において、一次電流は周波数が高くなってもすべりが小さくなれば十分小さな値に減少し端効果の影響が小さいことがわかる。なお定格速度 300 km/h における一次電流密度は 4.3 A/mm² である。力率特性は 185 Hz において最大力率が 67% と高速 LIM としては高い値を示す。

〈2・3〉 端効果の影響 図 3 (a), (b) は $f_1 = 185$ Hz の速度特性において実線は端効果を考慮、点線は無視した場合を示す。すべり $s > 0.3$ では両者はほとんど一致するため図示を省略している。 s の小さな

図 1 片側式 LIM のスロット寸法と構造略図
Fig. 1. Dimensions of slot and construction
of single-sided LIM.

高速領域でも両者はかなり接近していることが確認できる。例えば定格すべり $s = 0.035$ における推力は端効果を無視した場合より 7% 程度減少するのみである。

従って、このような LIM の最適設計には端効果を無視した特性算定式⁽¹⁴⁾が代用できるので、計算時間が短縮されるとともに設計パラメータと特性との関係の把握が容易となる。

3. モータ長と特性の関係

“細長く薄い LIM” では端効果が著しく軽減され、短い LIM と比べて力率も大幅に向上することが明らかになった。しかしモータを細長くすると鉄心積み厚の減少に従って巻線に占めるコイルエンド部の割合が増加するため、コイル端漏れリアクタンスや銅の重量が増加する。更に鉄心の機械的強度が低下し、メカニカルクリアランスの維持が困難になってくる。従ってモータ長をどの程度まで長くすれば端効果の影響が十分軽減され、最適な設計が可能になるかを把握する必要がある。本章では、推力 2,000 kg、速度 300 km/h のモータ長の異なる SLIM を設計し、モータ長が特性や重量に及ぼす影響を明確にする。

LIM の一次側からエアギャップを介して二次側へ伝達される有効電力は端効果を無視すると次式で与えられる⁽¹⁵⁾。

$$P_{01} = F_n v_1 = s_n v_1^2 B_m^2 (d_2 h \tau p) / (2 \rho_{se} \dots) \quad (1)$$

図 2 周波数変化時の速度特性
($\sqrt{3}V_1/f_1$ 一定)

Fig. 2. Characteristics for various supply frequencies at constant volts/Hz operation.

ここで、 ρ_{2r} : Russell-Norsworthy 係数⁽¹⁴⁾で横方向端効果を考慮したときの二次導体板の等価体積固有抵抗 ($\Omega\cdot m$)

(1)式から同じ定格推力、定格速度の SLIM を設計する場合、エアギャップ磁束密度の最大値 B_m をほぼ一定に保ちながらモータ長を変化するには、鉄心積み厚 h を変化させる必要がある。結果としてリアクションレールの幅 $h_2 = h + 2c$ も h に応じて変えねばならない。表 2 は、に表 1 にした LIM 1 の設計値を基準に B_m 一定、 τ 一定の条件でモータ長をそれぞれ約 8m, 4m, 2m と短くした場合の設計例を示す。以下、表 2～表 4 において各モータのスロットピッチ t_s 、スロット幅 w_s は表 1 と同じ値に固定している。

設計では最大推力の値が定格推力の 200% 程度になるように各モータの定格すべり s_n を決定している。

モータ長が短くなると端効果が大きくなり s_n が大き

図 3 速度特性における端効果の影響
Fig. 3. Influence of end effect on characteristics.

表 2 モータ長変化時の設計定数 (B_m 一定)

Table 2. Design parameters for various primary length. (B_m constant)

名 称	記 号	単 位	LIM2	LIM3	LIM4
モータ長	L	m	8.11	4.37	2.03
線間電圧	$\sqrt{3}V_1$	V	1,896	1,890	1,957
周波数	f_1	Hz	186	189	198
容量	KVA	kVA	2,822	3,336	5,125
定格すべり	s_n		0.04	0.055	0.1
極 数	p		34	18	8
鉄心積み厚 (mm)	h	mm	500	1,000	2,000
鉄心高さ	d_a	mm	52	58	74
スロット深さ	d_s	mm	35	41	57
1 相の直列巻数	N_{ph}		102	54	24
半コイルの長さ	l_a	mm	773	1,273	2,273
一次抵抗	r_1	Ω	0.018	0.013	0.007
一次漏れリアクタンス	x_1	Ω	0.293	0.289	0.316
(コイルエンド部)	(x_{e1})	(Ω)	(0.101)	(0.054)	(0.025)
二次導体幅	h_2	mm	700	1,200	2,200

くなる。図 4 (a) は B_m 一定条件でモータ長 L を変化した場合の特性の相違を示す。横軸は推力 2,000 kg を基準としている。 L が短くなると端効果の影響が強くなり力率、効率が低下するが、モータ長が 8m の LIM 2 の特性は 16m の LIM 1 の場合と大差ないことが認められる。次に表 3 は h 一定、 τ 一定の条件でモータ一次側およびリアクションレールの幅を広げずにモータ長を約 8m, 4m, 2m と短くした場合の設

図4 モータ長変化時の推力・力率・効率特性

Fig. 4. Power factor and efficiency-thrust characteristics for various primary length.

計例を示す。(1)式より h 一定の場合モータ長が短くなると磁束密度 B_m を増加せざるをえないために一次電流、従って導体断面積、スロット深さが増大する。図4(b)はその場合の特性の相違を示す。

(a)図に比べて L の減少に伴う力率低下の割合が大きくなり、モータ長が8mのLIM5の力率はLIM1の場合より約10%低下する。図5(a)はモータ長に対する定格すべりにおける運転特性の変化、同図(b)は一次側鉄および銅重量 G_{Fe1} , G_{Cu1} , ならびに二次側リアクションレールのアルミニウムおよび鉄の1kmあたりの重量 G_{Al2}/km , G_{Fe2}/km の変化の状況を示す。実線は B_m をほぼ一定、点線は h を一定に保った場合を示す。(a)図において定格すべり s_n の増加は端効果の影響の目安となる。従って、モータ長は8m程度あれば端効果の影響を十分軽減できることがわかる。

B_m 一定の場合(b)図に示すように端効果の影響の小さい $L > 8\text{m}$ では G_{Fe1} はほぼ一定となり、 L が減少するとコイルエンド部が減るため G_{Cu1} は減少する。

表3 モータ長変化時の設計定数 (h 一定)Table 3. Design parameters for various primary length. (h constant)

名 称	記 号	単 位	LIM5	LIM6	LIM7
モータ長	L	m	8.11	4.37	2.03
線間電圧	$\sqrt{3}F_1$	V	1,648	1,341	1,251
周波数	f_1	Hz	185	187	193
容量	KVA	kVA	3,123	4,504	8,923
定格すべり	s_n		0.035	0.045	0.075
極 数	p		34	18	8
鉄心積み厚(幅)	h	mm	250	250	250
鉄心高さ	d_a	mm	66	98	180
スロット深さ	d_s	mm	45	69	137
1相の直列巻数	N_{ph}		102	54	24
半コイルの長さ	l_a	mm	523	523	523
一次抵抗	r_1	Ω	0.0087	0.0028	0.0006
一次漏れリアクタンス	x_1	Ω	0.218	0.145	0.103
(コイルエンド部)	(x_{e1})	(Ω)	(0.100)	(0.054)	(0.025)

(a) モータ長による $\cos \phi_1$, η , s_n の変化

図5 定格速度におけるモータ長の速度特性およびモータ重量への影響

Fig. 5. Effects of varying primary length on the performance parameters and motor weights at the normal speed.

しかし $L < 8\text{m}$ では L が減少するに従って端効果の影響が増大し、一次巻線には端効果による二次減磁作用を補償するため大きな励磁電流が流入するので電流密度を一定に設計すると導体断面積およびスロット深さが大きくなり、 G_{Cu1} , G_{Fe1} 共に急増する。また二次側の G_{Al2}/km , G_{Fe2}/km は L の減少に伴い h_2

が増大するので急激に増加する。設計では裏張り鉄板の幅をアルミニウム板と同じ ($h_2 = h + 2c$) にしたが、特性的には h に短縮してもよくこの場合の G_{Fe2}/km は図より低く見積られる。次に h 一定の場合、 L が減少するに従って B_m が増加する。LIM を設計する場合にはエアギャップが大きいことに起因する無効電力の増加を防ぐために、磁束密度を小さく選ぶべきであり、(a) 図に示すように力率は L の減少に従って著しく低下する。このことは表 3 からわかるようにモータの KVA の急増を意味し、車載 VVVF インバータの容量増加の点でも不利になる。また (b) 図に示すように、 h 一定で L を減少すると一次巻線の導体断面積やスロット深さは増大するが、 B_m 増大の効果の方が大きく G_{Cu1} , G_{Fe1} は共に減少する。

二次側の G_{Al2}/km , G_{Fe2}/km は L に関係なく一定である。以上、 B_m 一定または h 一定条件でモータ長と特性および重量との関係を明らかにしたが、 L の変化に対し B_m , h を共に変化させながら設計した場合の関係は先に得られた実線と点線で示す 2 曲線の間に位置するものと考えられる。

LIM 推進浮上式鉄道の建設において、リアクションレールは設備投資に直接影響し、またモータ一次側の重量は列車重量のみならず浮上案内システムのマグネット容量にも関連してくるので、最適設計としては特性向上と重量の軽減の両面から経済性を考慮した総合的検討が必要である。

4. 設計パラメータと特性の関係

従来比較的短い高速 LIM を対象に、端効果を軽減し特性を改善するために二次導体の構造や厚み、オーバハング、極数などの設計パラメータを最適にする研究を行ってきたが⁽²⁾⁽¹³⁾、それらの結果が端効果の著しく軽減された細長い SLIM にも適用できるとは限らない。従って、表 1 に示した LIM 1 の設計値を基準にとり、設計パラメータと特性の関係を空間高調波解析法を用いて理論的に解明する。

〈4.1〉メカニカルクリアランス 筆者らは、TLRV 推進用両側式 LIM の設計値を用いた解析で、高速運転領域ではメカニカルクリアランス g より端効果の影響が支配的となり安全性の確保のために g を設計値の数倍に拡大しても極端な特性の劣化は生じないことを明らかにした⁽²⁾。しかし、端効果の影響の少ない LIM において g の変化は特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。図 6 (a), (b) は定格周波数 $f_1 = 185 \text{ Hz}$ 、電圧 $\sqrt{3} V_1 = 2,143 \text{ V}$ においてメカニカルクリアランス g を変化した場合の速度特性の変化を示

(a) 推力特性

(b) 一次電流特性

図 6 メカニカルクリアランス変化時の速度特性

Fig. 6. Characteristics for various mechanical clearances.

図 7 メカニカルクリアランスの特性への影響 ($s = 0.035$)

Fig. 7. Effects of varying mechanical clearance on the performance parameters at slip 0.035.

す。 g の増大につれて推力は低下する。(b) 図に示すように、一次電流はすべりの大きな領域では g を増すほど減少するが、 $s = 0.06$ 付近で g の変化に無関係に一定となり、 $0.06 > s > 0$ では励磁リアクタンスの低下に伴い逆に増加する。図 7 は $s = 0.035$ における運転特性について g の変化の影響を示したものである。 $g = 10 \text{ mm}$ の基準値に対して推力は $g = 20 \text{ mm}$ で 83%、 30 mm で 65%、力率×効率 $g = 20 \text{ mm}$ で 75

%, 30mm で 59% に減少し, q の増大に伴う特性劣化の割合は TLRV 推進用 LIM の場合⁽²⁾よりも大きい。ここで力率×効率率は単位容量あたりの出力を表わす。

〈4・2〉 アルミニウム板厚 図 8 (a), (b) は $g=10\text{ mm}$, $d_1=10\text{ mm}$ に固定し, アルミニウム板厚 d_2 を変化した場合の速度特性を示す。(a) 図の推力特性において d_2 を厚くすると端効果や二次漏れリアクタンスの増加の影響で最大値が極くわずかに減少するが, ほぼ比例推移の関係が成立する。図 9 は $s=0.035$ における運転特性についてアルミニウム板厚の変化の影響を示している。 $d_2=0$ の鉄板のみの場合は特性が極端に悪い。一次電流は d_2 とともに増加するが, 推力は $d_2=12\text{ mm}$, 力率は $d_2=6\text{ mm}$ 付近で最大値をとった後 d_2 とともに減少する。従来高速 LIM においては二次導体板は端効果を軽減するために, 数 mm 程度に薄い方が, 特性が良くなる結果を得ていた⁽²⁾⁽¹³⁾。端効果の小さな細長いモータでは d_2 はやや厚めの方が特性が良くなるが建設費用との兼ね合いで決定される。

〈4・3〉 裏張り鉄板厚 $g=10\text{ mm}$, $d_2=5\text{ mm}$ に固定し, $s=0.035$ における運転特性について裏張り鉄板厚 d_1 の変化の影響を検討した結果, $d_1=4\text{ mm}$ 以上では鉄板の表皮効果のために各特性はほぼ一定に

図 8 アルミニウム板厚変化時の速度特性
Fig. 8. Characteristics for various aluminium sheet thickness.

図 9 アルミニウム板厚の特性への影響
($s=0.035$)

Fig. 9. Effects of varying aluminium sheet thickness on the performance parameters at slip 0.035.

なることが確かめられた。ここで鉄板の Skin depth $\delta = 1/\sqrt{2s\omega\sigma_1\mu_1}$ を求めてみると, $\mu_1=500\mu_0$, $\omega_1=2\pi f_1$, $1/\sigma_1=10.5 \times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ のとき $s=1.0$ で $\delta=0.54\text{ mm}$, $s=0.5$ で 0.76 mm , $s=0.035$ で 2.87 mm と非常に小さい。LIM 1 では $d_1=10\text{ mm}$ に選定したが, 特性的には $d_1=4\text{ mm}$ 程度で十分であり, むしろ機械的強度の面から厚みを選定すべきであろう。

〈4・4〉 オーバハング 図 10 は $s=0.035$ における運転特性においてオーバハング c の変化の影響を示したものである。 c を拡大するとうず電流路が広がり, 等価的に二次抵抗 r_2 が減少する。効率はほぼ一定となるが, 推力, 一次電流, 力率は c が増加するに従って増加し, $c/\tau=1/2$ でほぼ一定値に達する。同様の結果が τ の異なる場合においても得られ, c は $\tau/\pi \sim \tau/2$ に選定すればよいことがわかる。

〈4・5〉 スロット幅 図 11 は $s=0.035$ における運転特性についてスロット幅 w_s の変化の影響を示す。但し, 計算では端効果を無視している。 w_s を変

図 10 オーバハングの特性への影響 ($s=0.035$)
Fig. 10. Effects of varying overhang length on the performance parameters at slip 0.035.

図 11 スロット幅の速度特性および設計定数への影響 ($s=0.035$)

Fig. 11. Effects of varying slot width on the performance parameters and design parameters at slip 0.035.

化する際にスロットピッチ $t_s = w_s + z_s$ は 26 mm に固定し、更に導体断面積を一定に保つようにスロット深さ d_s を変化する。(a)図からわかるように、 w_s を変化しても効率率はほぼ一定、力率は数パーセント変化する程度で特性に及ぼす影響は非常に小さい。 B_m はエアギャップ、 B_{tm} は歯の磁束密度の最大値を表す。

B_{tm} は w_s を拡大するに従って増加する。(b)図は力率×効率を示す。 w_s を拡大するとスロット深さ d_s が浅くなりスロット漏れリアクタンスが減少するため力率が増加するが、 w_s の拡大とともにカータ係数による等価エアギャップが増加するため次第に力率の増加が抑えられ設計例の場合 $w_s=20$ mm 以上になると逆に力率×効率は低下する。(c)図は一次抵抗 r_1 、一次漏れリアクタンス x_1 、鉄、銅の重量 G_{Fe1} , G_{Cu1} とスロット幅の関係を示す。 w_s を増すに従って歯が小

表 4 ポールピッチ変化時の設計定数

Table 4. Design parameters for various pole pitch.

名 称	記 号	単 位	LIM1	LIM8	LIM9
線間電圧	$\sqrt{3}V_1$	V	2,143	2,370	2,565
周波数	f_1	Hz	165	93	63
容量	KVA	kVA	2,800	2,656	2,894
定格すべり	s_n		0.035	0.04	0.05
モータ長	L	m	16.5	16.3	16.0
極 数	p		70	34	22
ポールピッチ	τ	mm	234	468	702
鉄心高さ	d_a	mm	50	63	82
毎極毎相のスロット数	q		3	6	9
スロット深さ	d_g	mm	33	29	31
コイルピッチ	β		7/9	15/18	22/27
1相の直列巻数	N_{ph}		210	204	198
半コイルの長さ	l_a	mm	523	855	1,108
一次抵抗	r_1	Ω	0.027	0.050	0.060
一次漏れリアクタンス (コイルエンド部)	x_1	Ω	0.393	0.519	0.657
オーバハンダ	c	mm	100	230	350
二次導体幅	h_2	mm	450	710	950

第 12 図 ポールピッチ変化時の推力・力率・効率特性

Fig. 12. Power factor and efficiency-thrust characteristics for various pole pitch.

さくなるため G_{Fe1} が減少する。LIM はエアギャップ磁束密度を高くとれないため歯の磁束密度も普通の誘導機よりも小さい。従ってカータ係数の増加による特性劣化の起らない範囲で、磁束の飽和があまり起きないところまで w_s を広く設計し、モータ重量の軽減を図ることができる。解析において鉄損の影響を考慮すると図よりわずかに力率が増加し、効率が減少する。

〈4・6〉 ポールピッチ 表 4 は LIM 1 の設計値を基準にモータ長および定格速度一定の条件でポールピッチ τ を変化した場合の設計例を示す。モータ長に多少のばらつきがあるのはスロットピッチ t_s 、スロット幅 w_s を一定に設計したためである。図 12 は τ を変化した場合の推力・力率・効率特性を示す。効率は τ が小さいほどよく、力率は $\tau=468$ mm の場合が最もよい。図 13 (a)~(c) は τ を変化した多数の設計例についてそれぞれ定格すべりにおける運転特性、設

図 13 定格速度におけるポールピッチの速度特性および設計定数への影響

Fig. 13. Effects of varying pole pitch on the performance parameters and design parameters at the normal speed.

計定数、重量について τ の変化の影響を示す。周波数 f_1 および極数 p は τ に反比例する。また τ が増大するとコイルエンド部が大きくなるため、 r_1 , x_1 が増加する。

(a) 図において力率は $\tau=390\text{ mm}$ ($f_1=112\text{ Hz}$) で最大となる。 $\tau<390\text{ mm}$ では、ポールピッチに対するエアギャップの比が大きくなり、二次漏れリアクタンス x_2 が増加するため力率が低下する。 $\tau>390\text{ mm}$ では x_2 は減少するが、一次漏れリアクタンス x_1 が増加し、更に端効果の影響も若干増加するために力率が低下し $\tau=800\text{ mm}$ ($f_1=51\text{ Hz}$) と極端に大きくなると 66 % 以下に減少する。従って、モータ長に対応し

た最適ポールピッチが存在することがわかる。また (c) 図に示すように、 τ の増大につれて一次側鉄重量 G_{Fe1} 、銅重量 G_{Cu1} 、および二次側重量 G_{Al2}/km 、 G_{Fe2}/km が増加する。なお裏張り鉄板の幅をモータ幅 h に短縮し、厚みも $\tau=234\text{ mm}$ の場合 $d_1=4\text{ mm}$ 程度とすれば G_{Fe2}/km は 8 t/km 程度に抑えることができる。しかし τ の増大に伴って d_1 が厚くなり、 G_{Fe2}/km も増大する。

5. むすび

以上、実用規模の磁気浮上列車推進用高速片側式 LIM を設計する場合に、筆者らが提案したモータ長を長く、幅を狭く、厚みを薄くするという設計方針の妥当性が理論的に確認された。必要なモータ長は設計の目標を特性の向上に置くか、重量の軽減に置くかで異なってくるが、 300 km/h の巡航速度に対し 8 m 程度が妥当と考えられる。また、このような高速 SLIM の設計パラメータの特性に及ぼす影響が明らかとなり、特にリアクションレールの設計パラメータおよびポールピッチを適切に選定すれば比較的高い力率が得られることが判明した。

(昭和 55 年 9 月 4 日受付, 同 56 年 2 月 16 日再受付)

文 献

- (1) E. R. Laithwaite 編: "Transport Without Wheels", (1977) Elek Science, London
- (2) 野中・幸山: 「高速リニアインダクションモータにおける中空アルミニウムリアクションレールの効果」, 電学論 B, 99, 525 (昭 54-8)
- (3) A. Lichtenberg: "Elektrodynamisches Schweben im Fernverkehr der Zukunft". ETZ-A Bd. 96, H. 9, 378 (1975)
- (4) S. Nakamura, Y. Takeuchi & M. Takahashi: "Experimental Results of Single-Sided Linear Induction Motor". IEEE Trans. Magnetics MAG-15, 6, 1434 (1979)
- (5) 野中・藤井・篠田: 「高速 LIM 用中空アルミニウムリアクションレールの効果に関する実験的研究」, 電学論 B, 99, 517, (昭 54-8)
- (6) S. Yamamura: "Theory of Linear Induction Motors", (1972) University of Tokyo Press
- (7) S. A. Nasar & I. Boldea: "Linear Motion Electric Machines" (1976) John Wiley & Sons
- (8) 野中・吉田・池口: 「リニアインダクションモータの極数と端効果の関係」, 昭 50 電気学会大会 No. 853
- (9) 岩本・山村: 「高速リニアインダクションモータの端効果特性の研究」, 電学論 B, 92, 368 (昭 47-6)
- (10) 岩本: 「高速リニアインダクションモータの端効果に対する巻線並列結線の影響」, 電学論 B, 92, 649 (昭 47-12)
- (11) 野中・松崎: 「高速リニアインダクションモータの一次巻線方式とその特性の検討」, 電学論 B, 99, 395 (昭 54-6)
- (12) 野中・樋口: 「実用規模の高速輸送用片側式 LIM の設計方針について」, 昭 55 電気学会大会 No. 741
- (13) 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
- (14) 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)
- (15) 野中: 「高速鉄道用リニアモータの設計について」, 昭 42 電気四学会連大 No. 582
- (16) 野中・樋口・小川: 「片側式リニアモータと両側式リニアモータの比較」, 九大工学集報, 52, 5, 591 (昭 54-10)