UDC 621.313.323:621.333

論文

53-B 60

鉄道用同期形リニアモータのセクション 切換の検討

正員 西條 隆 繁 (鉄道技研)

1. ま え が き

車輪とレールを使用する現在の鉄道に代るものとして、リニアモータを用いた浮上式鉄道が検討されている。この場合、リニアモータの固定子は地上に、移動子は車上にそれぞれ配置されるが車両走行に必要なエネルギーは、固定子、移動子いずれの側に供給してもよく、固定子に供給する形式を地上一次式、移動子に供給する形式を車上一次式と一般に呼んでいる。

リニアモータの代表形式には誘導形と同期形があるが、従来発表されているリニアモータ特性の検討論文は前者に関するものが圧倒的に多い。それは、リニアモータ特性そのものに関しては、前者の方が後者より相対的に取扱いが複雑であるからと考えられる。しかし、後者の同期形リニアモータは車上一次式にすることが実用的に難しく、地上一次式となることが多い。従って、同期形リニアモータを用いた鉄道を実用化するにはリニアモータそのものの研究のほかに、地上コイルへの電力供給とその制御に関して実用的な検討を行うことが肝要である。特に、き電セクション切換の問題は地上一次式リニアモータを鉄道用として実用化できるか否かを決める重要検討事項の一つと考えられる。

筆者はこのような事情にかんがみ、車上に界磁を置き、地上に電機子コイルを置く形式の同期形リニアモータをモデルに選び、列車長、列車運転速度、セクション切換スイッチ動作速度などと、き電セクション長との関連、き電セクション長を種々に変えた場合のリニアモータ特性および給電特性などについて一般式を誘導し、実用的に考え得る範囲の数値計算例を示すとともに地上一次式リニアモータを利用する場合の列車運転条件並びに適用上の諸問題について考察したのでその結果を報告する。

2. リニアモータ電力変換制御系の構成

今回、解析の対象としたリニアモータシステムは、

Feeding Section Problem of Linear Synchronous Motor for Railway. By Takashige Saijo, Member (Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways).
西條隆繁: 正員, 鉄道技術研究所

第1図 地上一次式同期形リニアモータの構成
Fig. 1. Construction of stator power feeding type linear synchronous motor.

車上に界磁を置き、地上に電機子コイルを置く形式の、一般にリニアシンクロサモータ (LSM) と呼ばれている同期形リニアモータであり、第1図にその構成の概要を示す。第1図の車上界磁は超電導界磁の形で描いてあるが、これは常電導形式であっても本論文の解析結果は本質的に適用可能である。また、地上コイルは3相120度巻の例を示しているが、ほかの巻き方であっても一向に差支えない⁽¹⁾。

第1図に示すリニアモータを基本として、第2図に示すようなリニアモータ電力変換制御システムが構成される。地上に連続して設置された地上コイルは、列車長 d より少し長めの距離 D ごとに電氣的に区分され、セクション切換スイッチを介して交互にき電線 A と B に接続される。き電線 A と B には全く同じ仕様の電力変換器がそれぞれ接続されており、列車がき電セクションを順次移っていく場合にも列車に推進力変動が起きないようにセクション切換えを行ない、電力の安定供給を図っている。

き電線を2回線ではなく、3回線、4回線、……設け、サイクロコンバータも3台、4台、……、設置する構成も考えられるが、現象解析の基本思想は変わらないので、実用上最も一般的である上記の二重き電方式(き電線2回線、電力変換器2台)の場合について検討を行なうことにする。

3. セクション長と列車運転速度

〈3・1〉 セクション切換操作のモデル 前章に述

第 2 図 同期形リニアモータ電力変換制御系の構成

Fig. 2. Power feeding and control system for linear synchronous motor.

べたりニアモータ電力変換制御系において列車走行に伴うセクション切換操作は、主として下記の事項に留意して行なわれなければならない。

(1) セクション切換により列車に推進力変動が生じないこと。

(2) 列車不在の部分の地上コイル励磁が少なく、励磁効率が高いこと。

(3) 無電流切換または限電流切換が可能なこと。

これらの条件を満たす基本的な方法として、第 1 表に示す操作手順が考えられる。

さきに示した第 2 図は、列車が $n-1$ セクションから n セクションに全部進入し終わった直後の状態を描いたものであり、このことを検知すると第 1 表に示す一連の操作手順が実行される。すなわち、まずき電線

B の電流を零にし、 $n-1$ セクションのスイッチ開放、 $n+1$ セクションのスイッチ投入という操作を無電流状態で実行し、それを確認のうえサイクロコンバータ B のゲートを開け、き電線 B に電流を通电する。

これら一連の操作は、列車の後尾が n セクションに進入し終わった時点から、列車の先頭が $n+1$ セクションに進入するまでの間に行なわれなければならない。

〈3・2〉 列車運転速度とセクション長

上述の操作手順から考えると、き電セクション長は長ければ長いほど切換操作の余裕が大きくとれるとともに、セクション切換スイッチの総設備個数が少なくてすむことになる。しかし一方、セクション長を長くすると LSM 給電特性が悪化することは明白である。従って、列車運転に支障を及ぼさない最小のセクション長を明らかにしておく必要がある。

列車運転速度とき電セクション長の関係を解析するため、セクション切換操作を列車運行ダイヤに重ね合わせて描いたものが第 3 図である。同図において横軸は時間、縦軸は距離をそれぞれ表わしており、図中に記載した t_f , t_r , t_0 , t_s , t_s' および T は、それぞれ下記の内容を表わしている。

t_f : セクション通电開始操作所要時間, t_r : セクシ

第 1 表 地上一次式リニアモータのセクション切換操作手順

Table 1. Time chart of sectioning operation on linear motor coil.

	サイクロコンバータ A	サイクロコンバータ B	セクション切換制御装置	$n-1$ セクション	n セクション	$n+1$ セクション
初期状態	き電線 A 電流通電中	き電線 B 電流通電中		スイッチ投入状態	スイッチ投入状態	スイッチ開放状態
時 間	↓	↓	サイクロコンバータ B にゲートブロック指令を出す		列車が全部 n セクションに進入したことを検知	
			き電線 B の出力電流を零にし、 サイクロコンバータ B にゲートブロック指令を出す			
			$n+1$ セクションスイッチ投入指令, $n-1$ セクションスイッチ開放指令	$n-1$ セクションスイッチ開放		$n+1$ セクションスイッチ投入
			時間調整タイマー			
			サイクロコンバータ B に出力電流通電指令			$n+1$ セクションに列車進入のための準備完了
切換完了状態	き電線 A 電流通電中	き電線 B 電流通電中		スイッチ開放状態	スイッチ投入状態	スイッチ投入状態

第3図 列車運行とセクション切換操作の関係

Fig. 3. Relationship of sectioning operation to train running plan.

ン通電停止操作所要時間, t_v : 列車走行時間 (セクション通過時間), t_s : 列車走行時間 (セクション渡り時間), t_s' : スイッチ開閉操作所要時間, t_s' : セクション切換操作余裕時間, T : セクション通電時間

いま,

v : 列車運転速度, d : 列車長, D : セクション長とすると, 第3図より,

$$D = v t_v \quad \dots\dots (1), \quad d = v t_s \quad \dots\dots (2)$$

$$T = t_f + t_v + t_s + t_s' \quad \dots\dots (3)$$

であるから,

$$D = d + v t_e \quad \dots\dots (4)$$

$$D/d = 1 + (v/d) t_e \quad \dots\dots (5)$$

但し,

$$t_e = t_f + t_r + t_s + t_s' \quad \dots\dots (6)$$

(実効切換操作時間)

なる関係が導かれる。また, セクション給電効率 η_s を $(t_s D)/(T D)$ で定義すると, その値は次のようになる。

$$\eta_s = \frac{t_s}{T} = \frac{d/v}{\frac{D}{v} + \frac{d}{v} + t_f + t_r} \quad \dots\dots (7)$$

ここで $t_f + t_r$ がほかの所要時間に比べ小さいことを考慮すると, 実用的には, 次式となる。

$$\eta_s = d/(d + D) \quad \dots\dots (8)$$

なお, このような一連のスイッチ切換操作が成立する条件は, 第3図より, (9)式となる。

$$t_v = t_s + t_f + t_r + t_s + t_s', \quad t_s' \geq 0 \quad \dots\dots (9)$$

〈3・3〉 数値計算例 前節で求めた電セクション長と列車運転速度との関係を実用的な前提条件を基に数値計算し, 第4図～第6図に示す。いずれも列車長 d , 切換操作所要時間 t_e をパラメータにとり示し

第4図 列車速度とセクション長の関係

Fig. 4. Relationship between section length and train running speed.

第5図 列車速度とセクション長・列車長比との関係

Fig. 5. Relationship between section length to train length ratio and train running speed.

第6図 列車速度とセクション給電効率との関係

Fig. 6. Relationship between section feeding efficiency and train running speed.

ている。第4図はセクション長 D と列車運転速度 v との関係, 第5図はセクション長・列車長比 D/d と

列車運転速度 v との関係を示す。第6図はセクション給電効率 η_s と列車運転速度 v との関係をそれぞれ示す。

いま、リニアモータ鉄道が実用的に成立する領域を $D/d < 3 \sim 4$, $\eta_s > 0.3$ 程度と考えると, $v = 200 \text{ km/h}$ の場合で $d = 25 \text{ m}$ ならば $t_s \approx 0.8 \text{ s}$, $d = 400 \text{ m}$ ならば $t_s \approx 10 \text{ s}$, $v = 500 \text{ km/h}$ の場合で $d = 25 \text{ m}$ ならば $t_s \approx 0.1 \text{ s}$, $d = 400 \text{ m}$ ならば $t_s \approx 5 \text{ s}$ 程度となる。ちなみに $d = 25 \text{ m}$ は新幹線車両1両分, $d = 400 \text{ m}$ は新幹線車両 16 両分の長さに相当する。

4. セクション長と給電特性

〈4・1〉 給電特性の解析モデルと解析結果 あるき電セクションを列車が進行しているとき, そのき電セクションに関する1相分の簡易等価回路は第7図のようになる。図において E_s はサイクロコンバータ出力電圧, E_m はリニアモータ速度起電力, r および l は列車長 d に対向する部分の地上コイルの抵抗および作用インダクタンスをそれぞれ表わしている。き電セクション長は D であるので, 1セクションあたりの抵抗 R およびインダクタンス L は, それぞれ

$$R = (D/d)r \dots \dots (10), L = (D/d)l \dots \dots (11)$$

であり, き電線のインピーダンスを無視すると, サイクロコンバータ出力側の簡易等価回路は第7図で十分表わし得ることが知られる。

いま, 定常状態において基本波分のみを考えると,

$$\vec{E}_s = \vec{E}_m + \vec{I}(R + jX) \dots \dots (12)$$

但し, $X = \omega L = 2\pi f L$, $f = v/(2\tau)$, v = 列車速度 (m/s), τ = ポールピッチ (m)

第7図 同期形リニアモータ給電系の等価回路

Fig. 7. Equivalent circuit representation of power feeding system for linear synchronous motor.

である。これより, サイクロコンバータの出力 $\vec{P}$ は,

$$\vec{P} = \vec{E}_s \vec{I} = E_m I_m + I_m^2 R + I_x^2 R + j(E_m I_x - I_m^2 X - I_x^2 X) \dots (13)$$

であり, この式の第1項 $E_m I_m$ が車両に推進力を与える電力となる。リニアモータ鉄道の場合, 通常は車上界磁の励磁電流調整が困難であるので, 常に I_m が所定の値で I_x が零となるよう, 出力電流 I の振幅, 周波数, および位相を自由に制御できる電流制御形サイクロコンバータが必要となる。

ここで, 速度起電力 E_m は実用上検出不可能な電気量であるので, 車上界磁の位置を連続的に検知できる列車位置検知装置を設置し, これより $I_x = 0$ となるような I_m の正弦波電流パターンを作り, サイクロコンバータの出力電流をこれに追従させるような制御を行なうことを考える。このような考え方で筆者が試作したリニアモータ電力変換制御システムモデルの概略仕様を第2表に, その実験結果の一例を第8図にそれぞれ示す。LSM 地上コイルに誘起する速度起電力は, セクション切換に伴いその大きさが大幅に変化するとともに高調波分を多分に含んでいるが, 第8図に見る

第8図 リニアモータ電力変換制御試験装置における実験例

Fig. 8. Typical oscillogram obtained with testing equipment of power feeding and control system for linear synchronous motor.

第2表 リニアモータ電力変換制御試験装置の概略仕様

Table 2. Cycloconverter and linear motor model in testing equipment of power feeding and control system for linear synchronous motor.

同期形 リニアモータ	軌道延長	104m (ループ状)
	セクション長	4.32m
サイクロン バータ	車体重量	約 2m
	車体重量	約 750 kg
	ポールピッチ	0.24m
サイクロン バータ	最高試験速度	26 km/h (15 Hz)
	入出力容量	3相, 50 Hz, 200V 3相, 0~15 Hz 10 kVA

第 9 図 同期形リニアモータ給電系各部の電圧、電流

Fig. 9. Voltages and currents of every parts in power feeding system for linear synchronous motor.

ようにサイクロコンバータ出力電流は振幅一定の正弦波に制御されている⁽²⁾⁽³⁾。

セクション切換に伴い、列車にはサイクロコンバータ A および B より交互に電力が供給される。いま、列車の界磁極数が十分大きく、かつ車上に平等配置されているものと仮定し、LSM 各部の電圧、電流の変化を図示すると第 9 図のようである。同図でモード I, II, および III の期間における各部電圧、電流の値は第 3 表で算出される。

サイクロコンバータ出力端からみた LSM 効率および力率は、第 9 図に見るように時々刻々変化する。従って、いま地上コイル 1 セクションに対応するサイクロコンバータ A あるいは B のき電 1 回分についての平均効率を η_{mean} 、平均出力を $\cos \varphi_{\text{mean}}$ 、モード III の期間における効率を η_{peak} 、力率を $\cos \varphi_{\text{peak}}$ とし、その値を算出してみると、それぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{\text{mean}} &= (e_p/e_p + e_r) \\ \cos \varphi_{\text{mean}} &= \frac{e_p + e_r}{\sqrt{(e_p + e_r)^2 + e_q^2}} \\ \eta_{\text{peak}} &= \frac{1}{1 + I_m R/E_m} \\ \cos \varphi_{\text{peak}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_m \omega L}{E_m + I_m R}\right)^2}} \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

第 3 表 同期形リニアモータ給電系各部の電圧、電流
Table 3. Voltages and currents of every parts in power feeding system for linear synchronous motor.

モード	I	II	III
LSM 電流	I_m	I_m	I_m
速度起電力	0	$E_m t_i/t_t$	E_m
LSM 端子電圧	$I_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{E_m t_i}{t_t} + I_m R\right)^2 + (I_m \omega L)^2}$	$\sqrt{(E_m + I_m R)^2 + (I_m \omega L)^2}$
同上 (有効分)	$I_m R$	$\frac{E_m t_i}{t_t} + I_m R$	$E_m + I_m R$
同上 (無効分)	$I_m \omega L$	$I_m \omega L$	$I_m \omega L$
LSM 効率	0	$\frac{1}{1 + \frac{I_m R t_i}{E_m}}$	$\frac{1}{1 + \frac{I_m R}{E_m}}$
LSM 力率	$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}}$	$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_m \omega L}{\frac{E_m t_i}{t_t} + I_m R}\right)^2}}$	$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_m \omega L}{E_m + I_m R}\right)^2}}$

但し、

$$e_p = \frac{2}{t_t} \int_0^{t_t} E_m t_i dt + E_m t_e$$

$$e_r = (2t_i + t_e + t_f + t_r) I_m R$$

$$e_q = (2t_i + t_e + t_f + t_r) I_m \omega L$$

ここで、列車長 d に対向する区間のみの地上コイルで構成されるリニアモータを考え、その効率および力率を基礎効率 η_0 、基礎力率 $\cos \varphi_0$ と名付けると

$$\eta_0 = E_m/(E_m + I_m R) \dots (15)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{E_m + I_m R}{\sqrt{(E_m + I_m R)^2 + (I_m \omega L)^2}} \dots (15')$$

であり、実用的には $t_f + t_r \ll 2t_i + t_e$ であるので、

$$\eta_{\text{mean}} = \frac{1}{1 + \left(2 + \frac{v t_e}{d}\right) \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right)} \dots (16)$$

$$\eta_{\text{peak}} = \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{v t_e}{d}\right) \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right)} \dots (17)$$

$$\cos \varphi_{\text{mean}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{\tan \varphi_0}{2 + \frac{v t_e}{d}} + \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right) \right\}^2}} \dots (18)$$

$$\cos \varphi_{\text{peak}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{\tan \varphi_0}{1 + \frac{v t_e}{d}} + \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right) \right\}^2}} \dots (19)$$

となる。更に $\eta_0 = 1$ の場合には、

$$\cos \varphi_{\text{mean}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2 + \frac{v t_e}{d}\right) \tan^2 \varphi_0}} \dots (20)$$

$$\cos \varphi_{\text{peak}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{v t_e}{d}\right) \tan^2 \varphi_0}} \dots (21)$$

と、式をそれぞれ簡素化できる。

なお、浮上列車の走行抵抗はほぼ列車速度の2乗に比例するので⁽⁴⁾、リアモータ出力 P_m は、

$$P_m = (\alpha + \beta d) v^3 \quad (22)$$

但し、 α , β は比例定数

と表わすことができ、これよりモード III のときのサイクロコンバータ出力 S , その有効分 P , および無効分 Q はそれぞれ次のようになる。

$$S = P_m \left[1 + \left(1 + \frac{v t_e}{d} \right) \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right) \right] \times \sqrt{1 + \left(1 + \frac{v t_e}{d} \right)^2 \tan^2 \varphi_0} \quad (23)$$

$$P = P_m \left[1 + \left(1 + \frac{v t_e}{d} \right) \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right) \right] \quad (24)$$

$$Q = P_m \left[1 + \left(1 + \frac{v t_e}{d} \right) \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right) \right] \left(1 + \frac{v t_e}{d} \right) \tan \varphi_0 \quad (25)$$

〈4・2〉 η_0 および $\cos \varphi_0$ の検討 き電セクションを考慮したリアモータ給電特性算出の基本となるものは、列車長 d に対応する区間の効率 η_0 および力率 $\cos \varphi_0$ である。一般的には η_0 および $\cos \varphi_0$ はリアモータ設計の考え方により、どのような値にも選ぶことができる。しかし、実用的には各種の制約条件があり、ある範囲の値に限定される。

いま、地上コイルの縦辺および横辺の長さをそれぞれ a および b , 巻数を N とすると、地上コイル1個あたりの抵抗 r_c および区間 d の間の地上コイル1相分の抵抗 r は、それぞれ

$$r_c = 2(a+b)c\rho N/I_m \quad (26)$$

$$r = (d/2\tau) \cdot r_c \quad (27)$$

但し、 c : 地上コイル導体電流密度, ρ : 地上コイル導体固有抵抗

一方、車上界磁の個数を p , ギャップ磁束密度を B とすると、

$$E_m = k_e p B a N v \quad (k_e = \text{比例定数}) \quad (28)$$

であり、これより

$$r = \left(1 + \frac{b}{a} \right) \frac{c d \rho}{k_e p B v \tau} \frac{E_m}{I_m} \quad (29)$$

ところで、車上界磁の個数 p は、必ずしも列車長 d をポールピッチ τ で除した数だけ設置しなければならないというわけではないから、

$$d/p = \tau' \quad (30), \quad \tau'/\tau = k_\tau \quad (31)$$

なる定数 k_τ を定義すると $k_\tau \geq 1$ であり、(29)式は次のようになる。

$$r = \left(1 + \frac{b}{a} \right) \frac{k_\tau c \rho}{k_e B v I_m} \frac{E_m}{I_m} \quad (32)$$

(15)式にこの関係を入れると、

$$\eta_0 = 1/(1+\zeta) \quad (33)$$

但し、

$$\zeta = \frac{I_m r}{E_m} = \left(1 + \frac{b}{a} \right) \frac{k_\tau c \rho}{k_e B v I_m} \quad (34)$$

が得られる。

一方、地上コイル1個分のインダクタンスを l_c とすると地上コイルの時定数 T_c は次式で表わされる⁽⁵⁾。

$$T_c = \frac{l_c}{r_c} = \frac{\mu_0 r_0^2 k_c k_m k_l}{2(a+b)\rho} \quad (35)$$

但し、 μ_0 =透磁率, k_c =地上コイルの占積率,

k_m =インダクタンス補正係数

$$k_l = (a+b) \{ \log_e(2ab/r_0) - 1.75 \}$$

$$-a \log_e(a+g) - b \log_e(b+g) + 2(g+r_0)$$

$$g = \sqrt{a^2 + b^2}$$

ここで r_0 は地上コイルの仕上り半径であり、

$$r_0 = \sqrt{I_m N / (k_c c \pi)} \quad (36)$$

で表わされるが、一方、浮上式列車の走行抵抗を考えると(22)式および(28)式より、

$$I_m N = \frac{(\alpha + \beta d) v^2}{m n k_e p B a} \quad (37)$$

但し、 m =地上コイルの相数, n =地上コイルの並列回路数

なる関係があるので、(36)式の r_0 は

$$r_0 = \sqrt{\frac{(\alpha + \beta d) v^2 k_\tau \tau}{m n k_c k_e \pi a c d B}} \quad (38)$$

となる。前節で述べた力率の式、(15')式に上述の関係を入れると下記の関係が得られる。

$$\cos \varphi_0 = \frac{1+\zeta}{\sqrt{(1+\zeta)^2 + (\zeta \omega T_c)^2}} \quad (39)$$

但し、 $\omega = \pi v / \tau$

〈4・3〉 数値計算例 前節で誘導した諸式に実用的な前提条件を入れ、同期形リアモータの基礎効率 η_0 および基礎力率 $\cos \varphi_0$ を求めた数値例を第10図および第11図に示す。主な前提条件は $\alpha = 6.35$, $\beta = 0.0432$, $a = 0.4$, $b = k_b \tau$, $k_b = 0.53$, $k_e B = 0.3$, $c = 6 \times 10^6$, $\rho = 2.78 \times 10^{-8}$ (Al を想定), $m = 3$, $k_\tau = 1$ または 2 , $\tau/a = 1 \sim 8$ である。 α および β は、参考文献(4)記載の走行抵抗計算式(2km程度のトンネル内)の比例定数をMKS単位系に換算したものである。

リアモータ基礎効率および基礎力率の計算結果を参考にし、 $\eta_0 = 0.98$, $\cos \varphi_0 = 0.95$ という場合を例にとり、リアモータ効率 η , 力率 $\cos \varphi$, 皮相入力

第 10 図 列車長、列車速度とリニアモータ基礎効率の関係

Fig. 10. Relationship between train length, train running speed, and basic efficiency of linear motor.

S 、列車所要電力 P_m を計算し、図に示したものが第 12 図～第 14 図である。いずれの場合も車両は現行新幹線車両と同等の大きさを想定し、列車長は 25m (1 両) ～400m (16 両) の間、セクションスイッチ実効切換操作時間は 0.5～10 秒の間、それぞれ変化して数値を求めている。

図から明らかなように、リニアモータ基礎効率および基礎力率を 98% および 95% というように比較的良好な値に選んでも、列車長 25m の場合にはリニアモータ総合特性が非常に低下している。この特性低下を防止する一つの方法は、実効切換操作時間を 0.1 秒程度にすることであるが、機械スイッチを使用しながら第 3 図の操作を 0.1 秒以下にすることは技術的に非常に困難と考えられる。もちろん、サイリスタスイッチの使用が可能であるが、経済的負担が膨大なものになることは明らかである。

(a)

(b)

第 12 図 列車長、列車速度とリニアモータ効率の関係
Fig. 12. Relationship between train length, train running speed, and linear motor efficiency.

第 11 図 列車長、列車速度とリニアモータ基礎力率の関係

Fig. 11. Relationship between train length, train running speed, and basic power factor of linear motor.

5. 考 察

以上の解析結果を基に、地上一次式リニアモータ鉄道実用化の一つの問題点である、き電セクション切換について考察してみると次のようなことが言える。

(1) 地上一次式リニアモータを用いた鉄道において必然的に必要になるき電セクション切換操作は、電力変換器出力側からみたリニアモータ効率および力率を、条件によっては著しく低下させる。

(2) 上述の効率および力率の低下は、列車運転速

第13図 列車長、列車速度とリニアモータ力率の関係
Fig. 13. Relationship between train length, train running speed, and power factor of linear motor.

第14図 列車長、列車速度とリニアモータ皮相入力および列車駆動電力との関係

Fig. 14. Relationship between train length, train running speed, driving power, and apparent power of linear motor.

度が高いほど、列車長が短いほど、またき電区分スイッチ操作時間が長いほど著しい。

(3) 従って、列車運転速度が高い場合は列車長を長くした方がエネルギー効率的に有利である。但し、列車運転速度が高く、かつ列車長が長いと所要電力の絶対量は大きくなるので、電力供給面で別の困難な問題が生ずることはもちろんである。

(4) 従って、一般的に地上一次式リニアモータを用いた鉄道は、小単位の輸送には不向きであり、連続、大容量、高速輸送に適したシステムである。

(5) また、地上一次式リニアモータを用いた鉄道

は、列車編成両数を可変にすることが難しいシステムである。

(6) 前項より、ある列車運転条件を想定し建設した地上一次式リニアモータ鉄道を、建設当初と異なる運転条件で営業を継続することは相当困難と考えられる。従って、地上一次式リニアモータ鉄道を建設する場合は将来を予測し、適切なシステム設計を行なうことが肝要である。

6. あとがき

以上述べたように、き電セクション切換はリニアモータ系全体の特性を条件によっては非常に悪くする。現象的にこれは誘導形リニアモータの端効果によく類似しており、一般に同期形リニアモータの特長といわれている高効率、高力率もこれにより相当減殺される可能性がある。従って、考察にも述べたように、大容量、高速輸送を目的とする鉄道以外に、地上一次式リニアモータを用いる場合は格別の配慮が必要と考えられる。

鉄道用リニアモータとして各種の形式が各所で研究されている。本論文がそれらの適用分野の検討にすこしも役立てば幸いである。終りに、本論文をまとめるにあたり、御指導いただいた東京大学教授 関根泰次博士、鉄道電化協会浮上式鉄道電力供給委員会の委員各位、鉄道技術研究所電力機械研究室 山添博士室長および室員各位に深甚の謝意を表する。

(昭和51年9月21日受付、同52年3月7日再受付)

文 献

- (1) 西條: 電学論B, 96, 369 (昭51-8)
- (2) 西條, 他: 昭50 電気学会全大 856
- (3) 西條, 他: 昭51 電気学会全大 781
- (4) 山本: 鉄道技研報告 916, 287 (昭47-3)
- (5) 電気学会: 電気工学ハンドブック 83 (昭42-1)