最適化手法を用いた超電導磁気浮上方式におけるコイル諸元の設計

正員 村井 敏昭 (鉄道総研)

正員 藤原 俊輔 (鉄道総研)

Design of Coil Specifications in EDS Maglev Using Optimization Program

Toshiaki Murai, Member, Shunsuke Fujiwara, Member
(Railway Technical Research Institute)

Eight figure coils for EDS can generate not only levitation force but also propulsion and guidance forces. Besides, on-board power is gained by utilizing a harmonic magnetic field generated by these coils. It is desirable for economic efficiency that these same coils fulfill that many functions, but it is difficult to design these coils balanced for that many functions. In addition, there are various specifications to design these coils because there should be an asymmetric figure between upper and lower coils to elevate the stability between guidance and rolling, improvement of which contributes to build up the take off velocity. On the contrary, some electrical machines are designed by adopting the optimization program. This paper describes application of the optimization program for the coil specifications in EDS maglev which combines propulsion, levitation, guidance and linear generator. Using numerical examples, the specifications for optimizing each function and combined functions are examined and the relationships between the specifications and the functions are revealed.

キーワード：超電導、誘導式磁気浮上、リニアモータ、地上コイル

1. まえがき

超電導磁気浮上式鉄道における推進、浮上、案内システムは、車上の超電導コイルと軌道側の地上コイルから構成され、推進技術は超電導コイルを界磁とする地上一次のリニア同期モータであり、浮上、案内技術は超電導コイルと短絡コイルの誘導電磁力を利用する方式である。

現在、浮上方式として側壁浮上方式⁽¹⁾が検討されており、本方式における8字形の地上コイルは、浮上ばかりでなく、案内及び推進も兼用することができる。例えば山梨の新実験線における浮上案内システムは、浮上と案内を兼用する方式⁽²⁾であり、また最近では、地上コイルのコスト低減が期待できる方式として推進、浮上、案内を兼用する方式が検討されている⁽³⁾。更に地上コイルの反作用磁界を利用した誘導集電方式にて車上に電力を供給する場合⁽⁴⁾、地上コイルは推進、浮上、案内そして集電と多くの機能を兼用することとなる。このように少ない構成機器で多くの機能を受け持つことは、実用化に際して重要な経済性という点から非常に望ましいことではあるが、コイル設計を行うにあたって、これら多種多様な機能を考慮することは容易ではない。また側壁浮上方式では地上コイルの全てのコイル辺が、超電導コイルに近接するので、コイルの

素線に発生する渦電流損失にも注意する必要がある。

また側壁浮上方式では、左右とロール運動の連成が比較的大きく、浮上開始速度等を決定する上での制約となっている。そのためにその特性を向上する方策を検討したところ、上下コイルの形状を非対称とすることが有効であることがわかってきた⁽⁵⁾。このように地上コイル自体も上下各々のコイルの寸法、形状と多くの設計変数を考慮しなければならないことから、従来のような試行錯誤的な方法にて最適諸元を得るのは難しくなっている。

一方、電磁界の数値解析において最適化手法を用いた電気機器の最適設計は、近年、活発に行われており⁽⁶⁾、例えば片側式リニア誘導モータ⁽⁷⁾及び対向浮上方式における地上コイル⁽⁸⁾の設計例がある。また非線形最適化問題を解くソフトウェアも汎用として整備されている。

以上より本論文では、推進、浮上、案内そして集電と多くの機能を兼用する地上コイルについて非線形最適化手法を用いた設計を検討する。まず最適化手法を適用する場合の設計変数、制約条件、目的関数を整理する。次に数値例による検討を行い、浮上、案内、推進、集電のみ機能する場合、またその各々を組み合わせた場合の最適化されたコイル諸元を導出し、様々な設計変数が各特性にどのような影響を与えるか検討する。

2. 推進浮上案内兼用方式と誘導集電方式の構成

本検討では超電導磁気浮上式鉄道の支持駆動システムとして推進浮上案内兼用方式、集電システムとして誘導集電方式を取り上げるが、その構成を図1に示す。推進浮上案内兼用方式は、車両側に超電導コイル、地上側に8字形の短絡コイル（地上コイル）が設置される。地上コイルは上下、左右方向をヌルフラックス接続するとともに、前後方向を3相接続して駆動用電源に接続する。浮上力、案内力は車両の移動による上下、左右のヌルフラックス回路の誘導電流によって発生し、推進力は車両と同期した駆動用電源からの3相電流によって発生する⁽³⁾。一方、誘導集電方式は、前述のコイル構成に追加して、車両側に集電コイルを設置し、前述の浮上のための誘導電流が作る磁界のうち、地上コイルが離散的に配置されるために発生する高調波成分を発電機としての速度起電力に利用する。また集電コイルは高調波成分のピッチに合わせて3相回路を構成し、高効率、高力率の電力変換器及び蓄電池を介して車上に電力を供給する⁽⁴⁾。

図1 推進浮上案内兼用方式と誘導集電方式の構成
Fig.1. Composition of PLG system and linear generator

3. 最適化手法の適用

3.1 最適化の方法

地上コイル及び集電コイルの設計を次のような非線形最適化問題に帰着して考える。

$$\begin{aligned} & \text{「}n\text{個の設計変数 } x=(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ において} \\ & m\text{個の制約条件 } g_j(x)=0 \quad (j=1, \dots, m_e) \\ & \quad \quad \quad g_j(x) \geq 0 \quad (j=m_e, \dots, m) \\ & \text{のもと、目的関数 } f(x) \text{ を最小化する」} \end{aligned} \quad (1)$$

このような非線形最適化問題を解くにあたっては、ペナルティ法、拡張ラグランジュ乗数法に代表される変換法と逐次2次計画法など様々な方法があるが⁽⁸⁾、ここでは逐次2次計画法を利用する。逐次2次計画法は、制約条件のある問題に対してラグランジュ関数を定義した時に最適条件を与えるKKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件を連立方程式として、準ニュートン法にて解くものである。

3.2 解析モデルと設計変数

本検討における解析モデルを図2に示す。本解析では、

前提条件を以下のように整理し、問題を簡略化する。

- (1) システムの基本的な諸元である極ピッチ α は一定とする。
- (2) 超電導コイルは、レーストラック形状で、その長さ $2a_0$ 、高さ $2b_0$ 、起磁力 I_0 を一定とし、極ピッチにて連続配置する。
- (3) 超電導コイル外槽は、その高さ L 、板厚 d_s を一定とし、前後方向に無限長な平板として近似する。
- (4) 地上コイルは、ピッチ α を極ピッチの $1/3$ とし、長さ $2a_1$ を隣合うコイルと重ならない最大寸法とする。また上下コイルの高さ $2b_{1u}, 2b_{1b}$ は各々、任意とするが、その長さ $2a_1$ 、断面寸法 $2d_{w1} \times 2d_{d1}$ 、巻数 N_1 は上下コイルで同じとする。また厚さ h_1 で一定な絶縁層で囲まれており、導体断面積 S_1 はある与えられた量とする。
- (5) 地上コイルの巻線は、コイル素線の渦電流損失を低減するために並列数 N_p で分割する。なお導体断面における素線の構成（幅方向及び厚さ方向の素線数 N_{wp}, N_{ϕ} ）は、巻数と並列数の乗数であることのみ考慮する。
- (6) 車両と地上の実空隙（左右空隙） y_0 は一定とする。
- (7) 地上コイルの駆動用電源からの推進電流 I_1 は一定とする。
- (8) 集電コイルは、そのピッチ α を極ピッチの $4/15$ とし、コイル長さ $2a_2$ は隣合うコイルと重ならない最大寸法とする。また上下コイルの高さ $2b_{2u}, 2b_{2b}$ は各々任意とするが、長さ $2a_2$ 、断面寸法 $2d_{w2} \times 2d_{d2}$ は上下コイルで同じとする。なお下コイル高さ $2b_{2b}$ は外槽下面からはみ出さない。

(b) 進行方向 longitudinal

図2 解析モデル
Fig.2. Analytical model

(9)集電コイルは、上下位置を地上コイル中心と同じとし、左右位置を外槽から y_{23} 離れた位置とする。

このような前提条件のもと、地上コイル及び集電コイルの寸法には以下のような関係式が成り立つ。ここでその他の寸法とはコイル取付及び製作に必要な調整寸法等であり、一定とする。

(地上コイル寸法に関する関係式)

$$\begin{aligned} a &= 2a_1 + 2d_{w1} + 2t_1 + \text{その他の寸法} \\ z_{1U} &= b_{1U} + d_{w1} + \text{その他の寸法} \\ z_{1B} &= b_{1B} + d_{w1} + \text{その他の寸法} \\ S_1 &= 2d_{w1} \times 2d_{a1} \\ N_1 \times N_p &= N_{wp} \times N_{\phi p} \\ y_1 &= d_{a1} + t_1 + y_a + y_3 + 2d_{a2} + y_{23} \end{aligned} \quad (2)$$

(集電コイル寸法に関する関係式)

$$\begin{aligned} 2z &= 2a_2 + 2d_{w2} + \text{その他の寸法} \\ L/2 + z_1 &= 2b_{2B} + 2d_{w2} + \text{その他の寸法} \\ z_{2U} &= b_{2U} + d_{w2} + \text{その他の寸法} \\ z_{2B} &= b_{2B} + d_{w2} + \text{その他の寸法} \\ y_2 &= y_3 + y_{23} + d_{a2} \end{aligned} \quad (3)$$

すなわち設計変数として各速度における均衡変位 z_1 、地上コイルの上コイル高さ $2b_{1U}$ 、下コイル高さ $2b_{1B}$ 、導体断面幅 $2d_{w1}$ 、巻数 N_1 、幅方向素線数 N_{wp} 、集電コイルの上コイル高さ $2b_{2U}$ 、断面幅 $2d_{w2}$ 、断面厚さ $2d_{a2}$ 、集電コイルと外槽の間隔 y_{23} を選択すれば、その他の諸元は(2)(3)式によって一意的に決まる。

3.3 制約条件と目的関数

推進、浮上、案内、集電の各々について求められる特性を定常的なものだけ取り上げ、整理すると次のようになる。(浮上特性)

(1)車両を支持するために必要な浮上力が得られること。
(2)浮上力とともに発生するループ電流損失による抗力(走行抵抗)ができるだけ小さいこと。

(案内特性)

(3)車両を支持するために必要なばね定数が得られること。
(4)浮上開始速度を低減するためにばね定数ができるだけ大きいこと。

(推進特性)

(5)車両がある速度で走行する場合の走行抵抗に見合う推力が得られること。

(6)モータの効率または効率×力率ができるだけ大きいこと。

(集電特性)

(7)車内電源として必要な電力が集電できること。
(8)誘導集電装置が全負荷を賄える速度を低減するために集電電力ができるだけ大きいこと。

ここで(1)(3)(5)(7)項は制約条件、(2)(4)(6)(8)項は目的関数を表している。また(2)(6)項は合わせて次のような特性として表現でき、浮上開始速度及び誘導集電装置が全負荷

を賄うべき速度が既に決められているとすると、本条件が推進、浮上、案内、集電を兼用する場合の最終的な目的関数と考えられる。更に側壁浮上方式ではコイル素線の渦電流損失による抗力が無視できないので、走行抵抗に含める必要がある。

(9)車両が走行するために必要な電源容量(走行抵抗×速度/効率/力率)ができるだけ小さいこと。

以上より前節の設計変数も考慮し、具体的な制約条件を次のように定義する。

(1)項の浮上力に関しては、浮上開始速度 v_1 、最高速度 v_2 における台車あたりの浮上力 F_a が必要浮上力 F_{a*} であること。

$$F_a(z_1(v_1), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) - F_{a*} = 0 \quad (4)$$

$$F_a(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) - F_{a*} = 0 \quad (5)$$

(3)項のばね定数に関しては、低速時の等価ばね定数が小さいので、浮上開始速度 v_1 における台車あたりの等価案内ばね定数 F_{yy*} 、等価ロールばね定数 $M_{\phi\phi*}$ が必要案内ばね定数 F_{yy*} 、必要ロールばね定数 $M_{\phi\phi*}$ 以上であること。

$$F_{yy*}(z_1(v_1), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) - F_{yy*} \geq 0 \quad (6)$$

$$M_{\phi\phi*}(z_1(v_1), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) - M_{\phi\phi*} \geq 0 \quad (7)$$

(5)項の推力に関しては、高速時の走行抵抗が大きいので、最高速度 v_2 における台車あたりの推力 F_{xp} が必要推力 F_{x*} であること。なお必要推力はループ電流損失による抗力 F_{x1} とそれ以外の走行抵抗 F_{x2} の和とする。また素線の渦電流損失を考慮する場合、必要推力に渦電流損失による抗力 F_{x3} を追加する。

$$F_{xp}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1) - F_{x*}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1, N_{wp}) = 0 \quad (8)$$

渦電流損失を考慮しない場合

$$F_{x*}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1, N_{wp}) = F_{x1}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) + F_{x2} \quad (9)$$

渦電流損失を考慮する場合

$$F_{x*}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1, N_{wp}) = F_{x1}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) + F_{x2} + F_{x3}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1, N_{wp}) + F_{x4} \quad (10)$$

(7)項の集電電力に関しては、誘導集電装置が全負荷を賄うべき速度で検討すべきであるが、便宜的に最高速度とし、最高速度 v_2 における台車あたりの集電電力 P_2 が必要電力 P_{2*} 以上であること。

$$P_2(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, b_{2U}, b_{2B}, d_{w2}, d_{a2}, y_{23}) - P_{2*} \geq 0 \quad (11)$$

また具体的な目的関数に関して次のように定義する。

(2)項の抗力に関しては、最高速度 v_2 における台車あたりの抗力 F_{x1} を最小化する。

$$\text{minimize } F_{x1}(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) \quad (12)$$

(4)項のばね定数に関しては、浮上開始速度 v_1 における台車あたりの等価案内ばね定数 F_{yy*} を最大化する。

$$\text{maximize } F_{\gamma}^*(z_1(v_1), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}) \quad (13)$$

(6)項のモータの効率×力率に関しては、必要推力が一定である場合、必要電源容量は、効率×力率の逆数に比例するので、必要推力を磁気抗力以外の走行抵抗 F_w のみとした時の最高速度 v_2 における台車あたりの必要電源容量 P_s を最小化する。

$$\text{minimize } P_s(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1, N_{wp}) \quad (F_w = F_w) \quad (14)$$

(8)項の集電電力に関しては、最高速度 v_2 における台車あたりの集電電力 P_2 を最大化する。

$$\text{maximize } P_2(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, b_{2U}, d_{w2}, d_{w3}, y_{23}) \quad (15)$$

(9)項の必要電源容量に関しては、最高速度 v_2 における台車あたりの必要電源容量 P_s を最小化する。

$$\text{minimize } P_s(z_1(v_2), b_{1U}, b_{1B}, d_{w1}, N_1, N_{wp}) \quad (16)$$

なお各特性は文献(4)(5)に示すフーリエ級数による計算式を利用する。この場合、各特性が設計変数にて直接、表現できるので、最適化計算に汎用の計算ライブラリを利用できる。本検討では科学計算ライブラリの一つであるIMSLのサブルーチンNCONFを利用した⁽¹⁰⁾。

ところでコイル設計にあたってはその温度上昇について留意すべきであるが、敷設状態によるので、ここでは考慮しない。しかし後述するように各導体断面積にて最適諸元を求めると、別途、温度上昇条件に必要な導体断面積が求まれば、制約条件として課せば良い。

表1 検討条件
Table 1. Specification of system and coil

全体システム	最高速度	500km/h
	浮上開始速度	100km/h
	必要浮上力	230kN/台車
	走行抵抗 (磁気抗力を除く)	20kN/台車
超電導コイル	必要案内ばね定数	1MN/m/台車
	必要ローラばね定数	3MNm/rad/台車
	必要集電電力	50kW/台車
	極ピッチ	1.35m
	長さ×高さ	1.07m×0.5m
外槽	起磁力	700kA
	極数	4極2列/台車
	左右位置	1.49m
	高さ×板厚	0.7m×0.01m
地上コイル	左右位置	1.55m (表面)
	導体抵抗率	$3.1 \times 10^{-7} \Omega \text{ cm}$
	ピッチ	0.45m
	絶縁厚さ	0.01m
	抵抗率	$3.1 \times 10^{-7} \Omega \text{ cm}$
	占積率	0.9
	セクション長比	12極
	推進電流	1000A
集電コイル	ピッチ	0.36m
	占積率	0.75
	導体抵抗率	$1.9 \times 10^{-7} \Omega \text{ cm}$
	コイル数	30個/台車
コンバータ	力率	1.0
	効率	0.9
左右空隙	集電コイル考慮	0.08m
	集電コイル考慮せず	0.1m

4. 数値例による検討

4.1 検討条件

数値例を用い、前節の最適化手法によって様々な諸元を導き、その設計変数と各特性の関係を検討する。表1に一定値として与える全体システム及びコイル諸元例を示す。

ここでセクション長比は区分制御される地上コイルの1区分あたりの極数と超電導コイルの極数の比を示す。必要集電電力は便宜的に50kW/台車としたが、前節にてその速度を最高速度としているので、実際より緩やかな条件である。導体断面積によっては前節の制約条件が成立しないこともあり、 $0.002 \sim 0.004 \text{ m}^2$ の範囲で検討してその限界を見極める。また集電系(集電コイル)の有無によって厚さ方向の構成が異なるが、集電系を考へない場合、集電コイルの厚さ分を考慮して便宜的に左右空隙を0.1mとする。

4.2 浮上系のみを最適化する場合

(4)(5)式を制約条件、(12)式を目的関数として浮上系のみを最適化した時の各導体断面積における地上コイル諸元及び速度500km/hのループ電流損失による抗力を図3に示す。ここで導体断面比は導体幅/導体厚さ、磁気抗力は台車あたりの数値を示す。この時のコイル諸元、特性の特徴は次のようになる。

- (1)上下コイルの高さは各々、330mm, 420mm程度と大きい。
- (2)導体断面はその断面比が170%程度と幅広な形状で、コイル長さ及び超電導コイルとの距離(図中、SCとの距離)は小さい。すなわちコイル長さよりも超電導コイルとの距離が浮上特性向上に寄与すると考えられる。
- (3)最適化された抗力は各導体断面積にて2.9kN~1.7kNである。

図3 浮上系のみを最適化した時の諸元、特性
Fig.3. Specifications & characteristics at optimizing levitation

4.3 案内系のみを最適化する場合

(4)(5)式を制約条件、(13)式を目的関数として案内系のみを最適化した時の各導体断面積における地上コイル諸元及び速度100km/hの等価案内ばね定数を図4に示す。この時のコイル諸元、特性の特徴は次のようになる。

- (1)上下コイルの高さは各々、220mm, 300mm前後と小さい。
- (2)導体断面はその断面比が110%程度とほぼ正方形となる。
- (3)最適化された等価案内ばね定数は各導体断面積にて0.95MN/m~2.4MN/mである。

図4 案内系のみを最適化した時の諸元、特性
Fig.4. Specifications & characteristics at optimizing guidance

4.4 推進系のみを最適化する場合

(4)(5)(8)式を制約条件、(14)式を目的関数として推進系のみを最適化した時の各導体断面積における地上コイル諸元、速度500km/hの必要電源容量を図5に示す。この時のコイル諸元、特性の特徴は次のようになる。

- (1)上下コイルの高さは各々、255mm, 330mm程度と小さい。
- (2)導体断面はその断面比が32%程度と厚長な形状で、コイル長さ及び超電導コイルとの距離は大きい。すなわち超電導コイルとの距離よりもコイル長さが推進特性向上に寄与すると考えられる。
- (3)最適化された電源容量は、磁気抗力を考慮していないために注意を要するが、3.2MVA程度である。

図5 推進系のみを最適化した時の諸元、特性
Fig.5. Specifications & characteristics at optimizing propulsion

4.5 推進浮上案内系を最適化する場合－渦電流を考慮する場合としない場合

(4)(5)(6)(7)(8)式を制約条件、(16)式を目的関数として、推進浮上案内系を最適化した時の各導体断面積における地上コイル諸元、各特性を図6,7に示す。なおここでは素線の渦電流損失を考慮せず、必要推力として(9)式を考える。

この時のコイル諸元、各特性の特徴は次のようになる。

- (1)上下コイルの高さ及び導体断面比は浮上系及び推進系のみを最適化した場合の数値の間にある。
- (2)等価ロールばね定数は $0.003m^2$ 以下で $3MNm/rad$ 、等価案内ばね定数は $0.0024m^2$ で $1MN/m$ となり、この断面積以下では制約条件を満足する諸元が得られない。

(3)ループ電流損失による抗力は導体断面積が大きいほど低減するので、必要電源容量が減少する。

図6 推進浮上案内系を最適化した時の諸元（渦電流損失を考慮せず）
Fig.6. Specifications at optimizing PLG without eddy current loss

図7 推進浮上案内系を最適化した時の各特性（渦電流損失を考慮せず）
Fig.7. Characteristics at optimizing PLG without eddy current loss

一方、素線の渦電流損失を考慮し、並列数を4とした時の各導体断面積における地上コイル諸元、各特性を図8,9に示す。ここで素線断面比は素線幅/素線厚さとする。なおこの時のコイル巻数は19回($0.0024m^2$)～22回($0.004m^2$)となり、コイル諸元、各特性の特徴は次のようになる。

- (1)素線は導体断面積に関係なく、その断面比が55%程度となる。また並列数が4では、ループ電流損失よりも渦電流損失による磁気抗力が大きい。
- (2)導体断面はその断面比が70%～24%と断面積が大きいほど厚長な形状となる。すなわちループ電流損失の低減より、超電導コイルとの距離の増加による渦電流損失の低減が磁気抗力の低減に寄与すると考えられる。
- (3)下コイル高さは420mm前後と渦電流損失を考慮しない場合よりも大きい。これは超電導コイルとの距離が増加したことによる等価ロールばね定数の減少を抑えようとするためであると考えられる。
- (4)ループ電流損失及び渦電流損失による抗力の和は導体断面積が大きいほど増加するので、必要電源容量が増加し、その値は各導体断面積にて4.6MVA～4.9MVAである。

図8 推進浮上案内系を最適化した場合の諸元（渦電流損失を考慮）
Fig.8. Specifications at optimizing PLG with eddy current loss

図9 推進浮上案内系を最適化した場合の各特性（渦電流損失を考慮）
Fig.9. Characteristics at optimizing PLG with eddy current loss

4.6 集電系を最適化する場合

(4)(5)(6)(7)式を制約条件、(15)式を目的関数として集電系を最適化した時の各導体断面積におけるコイル諸元及び速度500km/hの集電電力を図10,11に示す。この時のコイル諸元、特性の特徴は次のようになる。

- (1)地上コイルの導体断面は、その断面比が190%前後と幅広い形状で、コイル長さ及び超電導コイルとの距離は小さい。すなわち超電導コイルとの距離の増加によって生じる地上コイル電流の増加より、コイル長さ及び超電導コイルとの距離の低減による基本波磁界に対する高調波磁界の比率の増加が、集電特性向上に寄与すると考えられる。
- (2)地上コイルの最上辺、最下辺の位置は、導体断面が幅広い形状であることを考慮すると、渦電流損失無しで推進浮上案内系を最適化した場合とほぼ同じである。
- (3)集電コイルの上下コイルの高さは各々、355mm,260mm前後である。またコイル長さは225mm前後、断面幅は125mm前後である。
- (4)集電コイルの断面厚さ及び外槽との間隔の和は、14mm～27mmと地上コイルの導体断面積が大きいほど大きい。これは4.3節で示したように地上コイルの導体断面積を増加することによって等価ばね定数を増加することができるが、その増加分によって超電導コイルとの距離及び外槽と

集電コイルの間隔を拡大し、外槽の渦電流による影響を低減するためであると考えられる。

(5)最適化された集電電力は各導体断面積にて15kW～93kWである。また50kW以上となる導体断面積は0.0028m²以上である。

図10 集電系を最適化した場合の地上コイル諸元、特性
Fig.10. Ground coil specifications and characteristics at optimizing linear generator

図11 集電系を最適化した場合の集電コイル諸元
Fig.11. Linear generator coil specifications at optimizing linear generator

4.7 推進浮上案内集電系を最適化する場合

(4)(5)(6)(7)(8)(11)式を制約条件、(16)式を目的関数として推進浮上案内集電系を最適化した時のコイル諸元及び各特性を図12,13,14に示す。なお素線の渦電流損失を考慮し、並列数を4とする。この時のコイル諸元、各特性の特徴は次のようになる。

- (1)地上コイルの導体断面は渦電流損失を低減しようと断面積の増加とともに厚長な形状となる。
- (2)等価ロールばね定数、集電電力は全て3MNm/rad、50kW、であり、等価案内ばね定数は0.0028m²で1MN/mとなる。この断面積以下では制約条件を満足する諸元は得られない。
- (3)集電コイルの高さ、長さ、断面幅はほぼ集電電力を最適化した場合と同じ寸法である。
- (4)最適化された電源容量は各導体断面積にて4.8MVA～5.2MVAと推進浮上案内系を最適化した場合より4%前後増加する。また導体断面積が小さいほど電源容量が小さい。

図12 推進浮上案内集電系を最適化した場合の地上コイル諸元

Fig.12. Ground coil specifications at optimizing PLG & linear generator

図13 推進浮上案内集電系を最適化した場合の集電コイル諸元

Fig.13. Linear generator coil specifications at optimizing PLG & linear generator

図14 推進浮上案内集電系を最適化した場合の各特性

Fig.14. Characteristics at optimizing PLG & linear generator

5. まとめ

超電導磁気浮上鉄道において推進、浮上、案内そして集電と多くの機能を兼用する場合のコイル諸元について非線形最適化手法を用いた設計を検討した。

まず使用する最適化手法及び最適化を行うにあたっての設計変数、制約条件、目的関数を明らかにし、数値例を用いて、様々な特性に関する最適化を行った。その結果、浮上、案内、推進系の各々を最適化する場合のコイル諸元の

特徴、コイル素線の渦電流損失はコイル諸元及び必要電源容量に与える影響が大きいこと、集電電力を最適化する場合、地上コイルの導体断面積を増加すれば、集電電力が増加できること、推進浮上案内集電系を最適化する場合、推進浮上案内系を最適化する場合より若干、必要電源容量が増加することがわかった。また最適化手法を適用することによって推進、浮上、案内、集電の各性能がバランスしたコイル諸元を容易に得られること、またそのような諸元はある導体断面積以上にて成り立つことがわかった。

(平成8年10月22日受付, 平成8年12月11日再受付)

文 献

- (1) 藤原：「浮上コイル側壁配置磁気浮上方式の特性」、電学論、Vol.108-D, No.5, pp.439-446 (1988.5)
- (2) 藤原、藤本：「浮上と案内を兼用する誘導反発式磁気浮上の特性」、電学論、Vol.112-D, No.5, pp.459-466 (1992.5)
- (3) 村井：「推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性」、電学論、Vol.114-D, No.7/8, pp.746-752 (1994.7)
- (4) 村井、長谷川、藤原：「側壁浮上方式における誘導集電の特性改善」、電学論、Vol.117-D, No.1 (1997.1)掲載予定
- (5) 村井、藤原：「上下コイルが非対称な推進浮上案内兼用誘導式磁気浮上の特性」、電学論、Vol.116-D, No.12, pp.1289-1296 (1996.12)
- (6) 宅間、高橋：「電磁界解析の方法とその応用」、電学誌、Vol.115-D, No.1, pp.1-12 (1995.1)
- (7) 樋口、姫野、野中：「非線形最適化手法による新都市交通用片側式リニア誘導モータの設計について」、電学論、Vol.115-D, No.3, pp.1171-1178 (1995.3)
- (8) S.Fujiwara, N.Terauchi: "Study for optimization of ground coils of repulsive type Maglev system", International Conference on MAGLEV & LINEAR DRIVES, pp.95-100 (1986.5)
- (9) 坂和：「非線形システムの最適化」、pp.90-113、森北出版 (1986)
- (10) "User's Manual Fortran subroutines for mathematical application-MATH/LIBRARY Ver2.0 IMSL" pp.1096-1102 (1991)

村井 敏昭 (正員) 1964年11月30日生まれ。1989年3月早稲田大学大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年(財)鉄道総合技術研究所入所、現在に至る。主としてリニアモータ、磁気浮上の研究、開発に従事。工博。

藤原 俊輔 (正員) 1943年4月22日生まれ。1968年東京大学大学院工学系研究科電気工学修士課程修了。同年4月日本国有鉄道入社。現在、(財)鉄道総合技術研究所勤務。この間、リニアモータ、磁気浮上に関する研究に従事。低温工学会会員。工博。