

横磁束型リニア波力発電機の応答曲面法を利用した設計法

渡辺 隆嗣* 申 重燮 古関 隆章 (東京大学) 金 弘中 (Kovery. Co. Ltd)

A Design of a Transverse Flux Linear Wave Generator Using Response Surface Methodology

Ryuji Watanabe, Jung-Seob Shin, Takafumi Koseki (The University of Tokyo), and
Houng-Joong (Kovery.Co.Ltd)

Recently, a lot of generators using renewable energy have been discussed and we also design a transverse flux linear wave generator. Basically, transverse flux-type has 3-D flux path, so 3-D numerical study is essential. However, it takes long time to analyze. To solve this problem, the simplified design method using response surface methodology will be discussed.

キーワード：横磁束型, 波力発電, 応答曲面法, 簡易設計法

(Transverse flux type, Wave generator, Response surface methodology, Simplified design method)

1. はじめに

近年、再生可能エネルギー応用に向けた研究が進められており、波力発電も例外ではない。波力は自然エネルギー中ではエネルギー密度が高く、小さな体積で大きなエネルギーを取り出すことが可能であるため、波力発電の製作コストや視覚的影響は小さい[1]。各国で研究開発のプロジェクト数は100以上と言われている。日本では航路標識用の発電装置や実験用として10を越える発電装置が作られている[2]。洋上風力発電に比べても面積を4分の1から5分の1にできる事や発電量を見積りやすい点などが優れているとされる。

波力発電において、リニア型の発電機は回転型の発電機と比べてギアや直線運動-回転運動の変換機なしに駆動することが可能である。そのため、メンテナンス性の低下や操作性の向上が利点として挙げられるが、一方で出力密度が低いという問題点が存在する。

実用化に向けては発電機の高出力密度化が必要であり、本研究では磁束が三次元的に流れる横磁束型のモデル[3]を扱い高出力密度化を図っている。しかしながら、磁束が三次元的に流れる構造から設計には本質的に三次元過渡解析による数値解析を用いた設計が主流だが、多大な時間と労力がかかる問題点がある。そのため、[3]におけるモデルの設計は十分に最適であるとはいえない。したがって、本論文では三次元状の磁束を考慮できるよう、三次元静磁界解析と応答曲面法を用いて、三次元数値解析の負担を低減し、効率的に高出力設計が可能な簡易設計法を構築したことを報告する。

本論文の構成は1章で背景を述べ、2章で提案モデルの駆動原理について言及し、3章で提案する応答曲面法を用いた簡易設計法の説明を行う。4章で提案モデルの設計と結果を報告し、5章でまとめる。

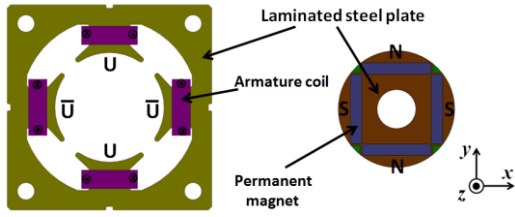
2. 提案モデルの駆動原理

図1に今回提案するモデルの3相発電機の基本ユニットを示す。回転機汎用電機子を用い、シンプルな構造にすることで、置き換えが容易で組み立てが簡単になることから初期コストを抑えることができる。

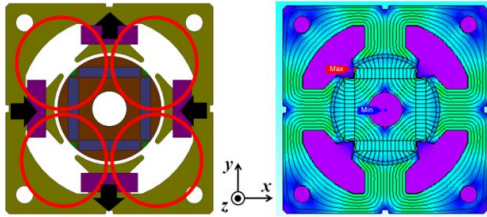
図1(a)は電機子ユニットと界磁ユニットの構成を示しており、電機子ユニットは基本的に偶数の突極部を持ちその突極部にコイルを集中巻にしてある。今回4極機について示す。そしてそれぞれの集中巻のコイルは隣り合う突極で逆向きに巻かれている。界磁ユニットは突極と同じ数の永久磁石が配置されており、電機子ユニットと同じように隣り合う永久磁石の界磁方向は逆向きとなっている。

界磁ユニットを電機子ユニットの中心部に挿入した図が図1(b)である。この時の磁束の流れは赤のループで、2次元解析の結果を見ると、コイルと永久磁石の数を同一にしているため安定した磁路が確保されていることがわかる。よって2次元面では安定した状態となっている。

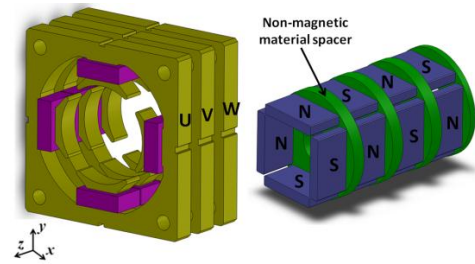
Z方向に電機子ユニットと界磁ユニットを配置したものを図1(c)に示す。電機子ユニットは三相発電機なので電氣的に120°位相がずれたU相V相W相を配置する。界磁ユニットは隣合うユニットで界磁方向が逆になるように配置し、界磁ユニットが外部の力によって稼動することで電機子ユニットのコイルに誘導起電力が誘起され発電される。



(a) 電機子側と界磁側のユニット (The armature and field unit.)



(b) 磁気回路 (Magnetic circuits.)



(c) 動作方向の形状 (Configuration along moving direction.)

図1 三相発電機の基本ユニット

Fig.1. Fundamental configuration of the three-phase unit.

3. 提案モデルにおける簡易設計手法

〈3・1〉 三次元静磁界解析による出力算定 本研究では横磁束型のモデルを扱っているため磁束が三次元状に流れる。したがって、漏れ磁束も三次元状に形成されるため、従来の磁気回路ベースの簡易設計手法だと磁気回路の構成が複雑になり、また誤差も大きくなる。また本モデルは突極型であり、dq 軸インダクタンス値は異なり、三次元静磁界解析でインダクタンス値を求める必要がある。そこで以下に三次元静磁界解析ベースで d 軸下のティースに流れる界磁側磁束 ϕ_f と dq 軸インダクタンス値を求めることで発電機の実出力値を見積もることを提案する。以下の計算では一相における出力を算定し、三相における出力は算出した出力に 3 倍することで求まることに注意していただきたい。それぞれインダクタンス値はコイルの巻数 N とある適当な電流 I より式(1)と(2)で表される。

$$L_d = N \frac{\phi_d - \phi_f}{I} \dots \dots \dots (1)$$

$$L_q = N \frac{\phi_q}{I} \dots \dots \dots (2)$$

また進行方向に対してティースに流れる界磁側磁束を式(3)で表すと、無負荷誘起電圧は式(4)、その実効値は式(5)で表される。

$$\phi(t) = \phi_f \cos \omega t \dots \dots \dots (3)$$

$$e(t) = N\omega\phi_f \sin \omega t \dots \dots \dots (4)$$

$$E_f = \frac{\omega N \phi_f}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (5)$$

ただし式中の ω は駆動角速度とする。

ここで突極型の発電機のフェーザ図を図2に示す。また、図3に等価回路図を示す。図2, 3より、式(6), (7)のように逆算して d 軸電流と q 軸電流を求める。このとき、出力は式(8)で表される。ただし r_a は内部抵抗で R は負荷抵抗である。

$$I_d = \frac{(R + r_a)E_f}{(R + r_a)^2 + (X_q - X_d)(R + r_a) - X_q^2} \dots \dots \dots (6)$$

$$I_q = \frac{X_q E_f}{(R + r_a)^2 + (X_q - X_d)(R + r_a) - X_q^2} \dots \dots \dots (7)$$

$$P = E_f I_q - I_d I_q (X_d - X_q) - r_a I_a^2 \dots \dots \dots (8)$$

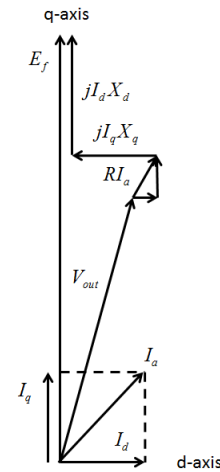


図2 発電機モードにおけるフェーザ図
Fig.2. Phasor diagrams for generator operation.

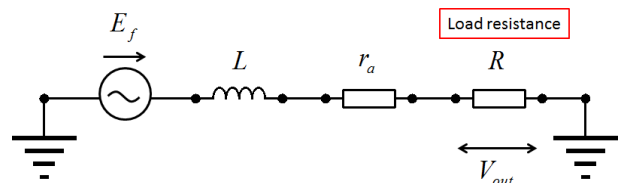


図3 発電機モードにおける等価回路
Fig.3. Equivalent magnetic for generator operation.

〈3・2〉 応答曲面法 応答曲面法はシステムから観測されたデータに基づいて統計的近似法を介して、設計変数と目的変数の応答の関係性を評価し、モデルを構築する手法である[4]。応答は一般に実際の実験やコンピュータシミュレーションから得られる。本論文ではコンピュータシミュレーションによる数値解析から応答を観測し、応答曲面法によってモデルの寸法である設計変数を決定する。

応答曲面とは(9)式に表したように n 個の予測変数因子 x_i から予測される応答 y の関係式を近似したものである。

$$y = f(x_1 \cdots x_n) + \varepsilon \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここで ε はランダム誤差と呼ばれる。一般に関数 f は未知かつ複雑であり、取り扱いが簡単にするため多項式が多く用いられている。多くの場合一次多項式か二次多項式が用いられるが、今回は複数の因子が影響し合う交互作用を考慮するため二次多項式を用いる。また、二次多項式への近似は最小二乗法を用いて、式(10)で表される。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \cdots (10)$$

回帰式の係数 β の推定に用いる実験点の組の総数を n 、変数(変換後の変数)の数を k とすると線形回帰モデルは行列表示で(11)式になる。

$$y = X\beta + \varepsilon \cdots \cdots \cdots (11)$$

X は設計変数の水準の行列であり、 β は回帰係数のベクトルであり、 ε はランダム誤差のベクトルである。ランダム誤差の二乗和を最小化することから最小二乗関数 L は

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)' (y - X\beta) \cdots (12)$$

となる。 ε は ε の転置行列である。未知ベクトルである β の推定ベクトル $\hat{\beta}$ は次式を満たす必要がある。

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2X'y + 2XX'\hat{\beta} = 0 \cdots \cdots (13)$$

それゆえ、推定ベクトル $\hat{\beta}$ は(14)式で書かれ、近似応答 \hat{y} は(15)式で与えられる。

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \cdots \cdots (14)$$

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \cdots \cdots (15)$$

応答曲面を作成するための実験計画は 3 水準系や D-最適計画など様々な手法が存在する[5][6]。本報告では、少ない実験回数で適切な応答曲面を作成するため中心複合計画(CCD)を用いた。CCD は二次の応答曲面を作成する際に幅広く用いられている[7]。

CCD は 2 水準全因計画と $2k$ 軸上の距離 α の点からなる。

$\alpha > 1$ の場合は先に指定した水準の範囲を超えて実験することを要求している。一般には変数空間全体を一度に近似する応答曲面を作成することはしないで、その中の一部だけを取り出して応答曲面近似することが多いため α が 1 を超えても問題はない場合が多い。もし $\alpha = \pm 1$ とした場合にはそれぞれの面の中心点を加えた三水準系の実験計画を作成することと同義となる[8]。

近似式によって得られた応答曲面の誤差が範囲内にあるかを確かめる必要がある[9]。 N を実験の総数として、応答 y の平均まわりの変動を表す偏差の平方和 SST は

$$SST = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \cdots \cdots (16)$$

SST は二つの要素に分割することができ、近似曲線作成の回帰による平方和(SSR)と誤差による平方和(SSE)である。SSR は(17)式で表され、SSE は(18)式で表される。

$$SSR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2 \cdots \cdots (17)$$

$$SSE = \sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2 \cdots \cdots (18)$$

回帰モデルが適切かを判定する決定整数 R^2 は次式で定義される。

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \cdots \cdots (19)$$

R^2 は SSE が少なければ 1 に近づき、SSE が大きければ 0 に近づく。一般的には 1 に近づくほど良い値となるが、変数を多くすることで R^2 が小さくなるので一概には良いとは言えない。そこで、回帰モデルの良否の比較のために、単位自由度あたりの残差を比較する必要があり、一般には自由度調整済み決定係数が使用され(20)式で表される。

$$R_A^2 = 1 - \frac{SSE / (N - k)}{SST / (N - 1)} \cdots \cdots (20)$$

このとき、 k はパラメータの数であり、 R^2 と R_A^2 が評価指数として扱われる。

〈3・3〉 応答曲面法による簡易設計手法

図 4 に応答曲面法を利用した設計法のフローチャートを示す。始めに変数と変数の水準を決め、変数に影響を受けないパラメータは定数とする。次に変数の水準に従って CCD を用いて応答曲面作成に必要な因子のパラメータを決定する。その後、その因子のパラメータに従って設定した特性値の値を三次元静磁界解析を利用して求める。全てのパラメータに対して特性値を導出したら、応答曲面を作成し、最適点を導出する。その最適点が真値であるか評価をし、真値に近いのであれば最適点とし、遠いのであればパラメータの水準を設計しなおし、再び因子のパラメータ決定を行う。

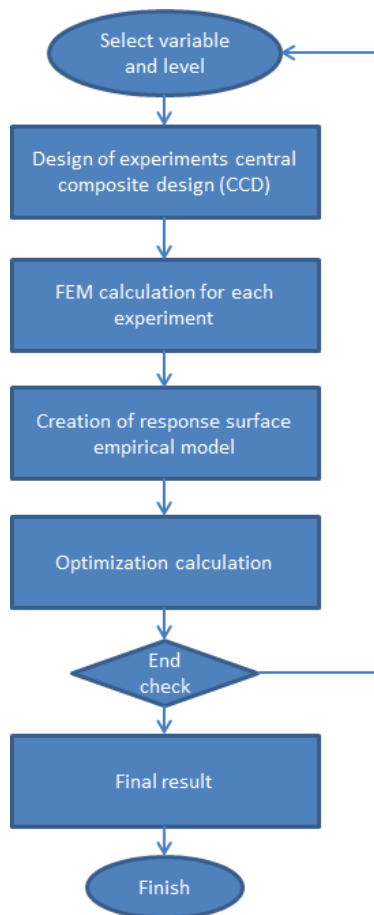


図4 応答曲面法を利用した設計法のフローチャート
Fig.4. Flowchart of a design process using response surface methodology.

4. 提案モデルにおける設計と結果

〈4・1〉提案モデルのパラメータ 提案モデルの仕様を表1に示す。電機子外径は275mm×275mm、エアギャップ長は1mm、コイル直径は1mmで全てのケースにおいて一定値とする。

電機子鉄心と界磁側コアに用いる50JN230(JFE-steel)の線形動作点は1.5Tである。永久磁石には高い磁気特性を有するネオジウム磁石を用いている。また、界磁側コアと比磁性体スペーサの進行方向に対する割合は3:1となっている。

スロットコンビネーションとしては発電機使用で駆動周波数を高くするために3スロット4極のモデルを採用している。

提案モデルの設計変数を図5に示す。本モデルにおける設計変数は3つであり、3因子による2次多項式を用いた応答局面の作成を行う。この3因子は発電機設計にクリティカルに影響する磁気装荷と電気装荷に関するパラメータとなっている。

一つ目の因子 w は電機子鉄心の幅であり、磁気飽和の影響を考慮し、電機子鉄心の磁束密度を1.5T以下に保った状態で、一つの磁気回路上で常に $0.5w$ の幅を確保するように設計を行う。この制約から xy 平面上のコイル幅が自動的に

決定される。つまり、 w を大きくすることで鉄心幅が増大し、コイル幅が縮小する磁気装荷と電気装荷のトレードオフの関係性が成立する。

二つ目の因子 τ_s によって進行方向に対するコイルと電機子鉄心の厚さの和が記述される。 w によってコイル幅が決定しているため電機子鉄心の厚さが求まることになる。またスロットコンビネーションの関係から τ_s を大きくすることで一定のコイル厚に対して、進行方向の電機子厚が大きくなるので相対的に磁気装荷が電気装荷に対して大きくなる関係性が存在する。

三つ目の因子 r によって界磁側コアの半径が決定され、同時に磁石量も比例して変化する。また、 r の変化によって半径方向の電機子鉄心の長さも同時に決定される。これも r が大きくなることによって磁石量の増加に伴う磁気装荷の増大と半径方向の鉄心長の減少に伴う巻数の減少による電気装荷の低下のトレードオフの関係性が成立する。

表1 提案モデルの基本仕様
Table.1 Basic specification of proposal model.

Symbol	Quantity
External radius of armature	275[mm]×275[mm]
Air gap	1[mm]
Diameter of armature conductor	1[mm]
Material	
Armature core	50JN230
Field core	50JN230
Parmanent magnet	N50M
Non-magnet spacer	Aluminum
Coil	Copper
Slot combination	3slot-4pole

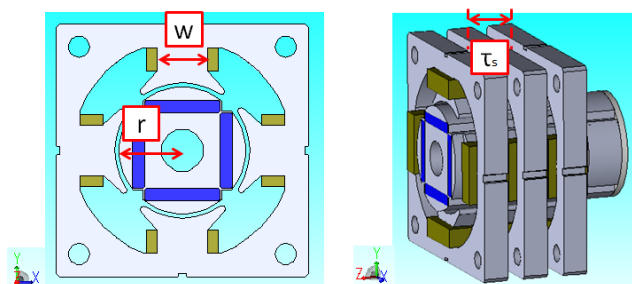


図5 提案モデルにおける設計変数
Fig.5. Design variables of proposal model.

〈4・2〉応答曲面法による提案モデル設計 表2に中心複合計画を用いた応答曲面作成に必要な3因子のパラメータと三次元静磁界解析を用いた場合の特性値を示す。今回は特性値として出力密度と磁石量あたりの出力の値を設定しているが、波力発電応用を考える際に、技術目標として発電機自身の出力密度を上げることと、発電機自身の低コスト化が必要であるためにこの2要素を特性値としている。

表 2 CCD を用いたデータテーブルと実験結果
Table.2 Data table and experimental results using CCD

Exp	w [mm]	τ_s [mm]	r [mm]	Power density [W/m ³]	Power per magnet volume [W/m ³]
1	50	80	55	4.43E+04	1.48E+06
2	60	80	55	2.67E+04	8.92E+05
3	50	90	55	4.05E+04	1.36E+06
4	60	90	55	2.52E+04	8.44E+05
5	50	80	65	4.83E+04	1.11E+06
6	60	80	65	3.73E+04	8.58E+05
7	50	90	65	4.75E+04	1.09E+06
8	60	90	65	3.65E+04	8.40E+05
9	45	85	60	4.96E+04	1.36E+06
10	65	85	60	2.48E+04	6.83E+05
11	55	75	60	3.87E+04	1.07E+06
12	55	95	60	3.49E+04	9.59E+05
13	55	85	50	2.85E+04	1.19E+06
14	55	85	70	4.78E+04	9.33E+05
15	55	85	60	3.65E+04	1.09E+06
16	45	65	65	3.40E+04	7.15E+05
17	45	65	70	3.07E+04	4.59E+05
18	50	80	60	4.65E+04	1.28E+06
19	40	85	60	5.46E+04	1.63E+06



(a) w 因子(“w” factor)



(b) τ_s 因子(“ τ_s ” factor)



(c) r 因子(“r” factor)

図 6 各因子に対する磁束密度の応答

Fig.6. Response of the magnetic flux density to each factor.

図 6 はパラメータに設定した各因子に対する磁束密度の応答である。この結果から磁束密度に強く影響をおよぼすのは w 因子であり、磁気飽和を考慮して 1.5T 以下に磁束密度を抑えるため、w は 48mm に決定された。

このとき、評価指数である R^2 と R^2_A はそれぞれ出力密度に関しては 0.984 と 0.968、磁石量あたりの出力に関しては 0.984 と 0.969 となり、いずれも十分に評価基準を満たしている。

図 7 に τ_s 因子と r 因子に対する特性値の応答を示す。具体的には出力密度と磁石量あたりの出力の 2 つの特性値とこの 2 つの特性値から得られる望ましさを表す関数が示されている。

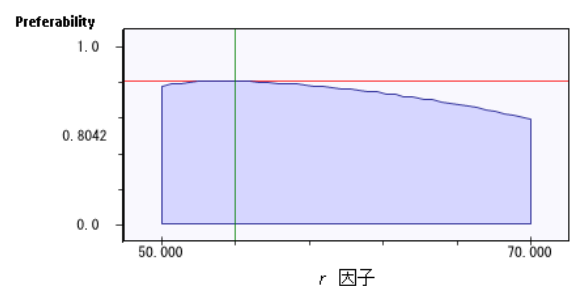
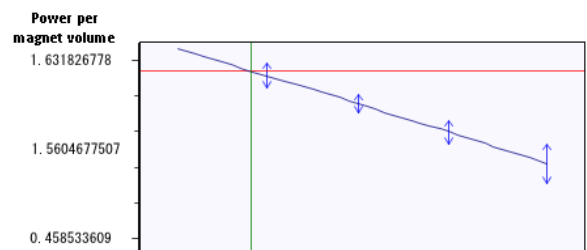
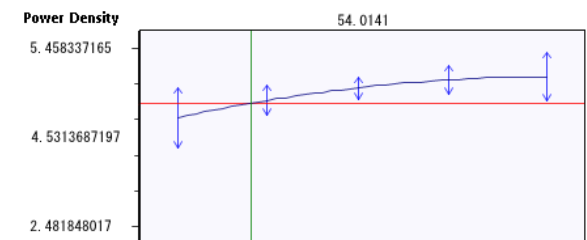
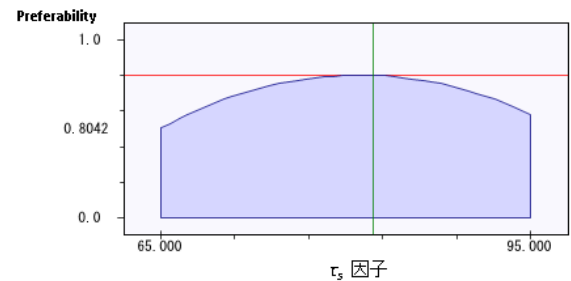
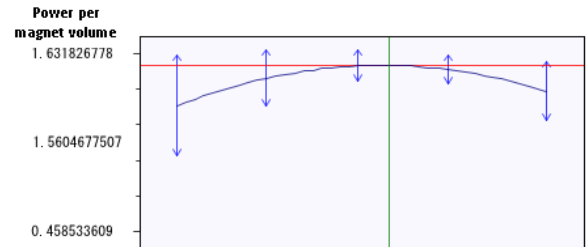
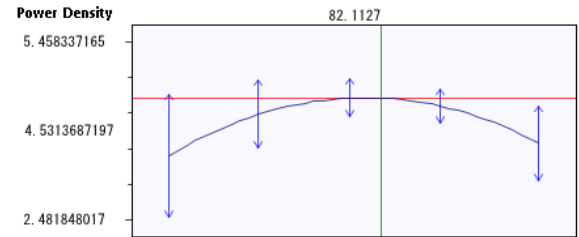


図 7 τ_s 因子と r 因子に対する特性値の応答
Fig.7. Response of the characteristic value to τ_s and r factor

望ましさを表す関数はそれぞれの特性値を正規化し、足し合わせたものを特性値の数で割ることで得られる。この時、単純に足し合わせるのではなく重みづけを変えて行うことで重要な特性値と重要でない特性値について比重を変えることも可能である。本報告では 2 つの特性値に対する重みづけは 1 : 1 で行われている。

この望ましさを表す関数から最適点は τ_s は 82.1127、 r は 54.0141 と得られた。設計において 1mm 以下を考慮することは現実的でないため、最適点を τ_s は 82、 r は 54 として以降の議論を進める。

表 3 得られたモデルの比較
Table.3 Comparison of obtained model

Model	w [mm]	τ_s [mm]	r [mm]	Power density [W/m ³]	Power per magnet volume [W/m ³]
Response surface method	48	82	54	4.53E+04	1.56E+06
3D static analysis	48	82	54	4.52E+04	1.54E+06
3D transient response analysis	48	82	54	4.21E+04	1.40E+06

表 3 に応答曲面法で推測される特性値と三次元静磁界解析によって得られる特性値と三次元過渡応答解析による特性値を比較したものを示す。いずれも応答曲面法によって得られたパラメータ値を使用する。

この結果より、応答曲面法と三次元静磁界解析の結果の差はほとんど見られず、応答曲面作成に伴う誤差は今回の場合はかなり小さかったと言える。三次元過渡応答の解析結果と比較すると誤差は生じているが、ほぼ近い値が得られており漏れ磁束を考慮した設計法の妥当性が確認された。

また、最適探索にかかる時間は水準を w は 50~60、 τ_s は 80~90、 r は 55~65 として探索を行った際に、応答曲面法を用いた場合は 5mm 間隔でパラメータを設定することができ、CCD による実験テーブル作成で実験数は 19 で十分であったのに対して、応答曲面法を用いず単純に実験を行う場合は $11 \times 11 \times 11 = 1331$ 通りを試す必要がある。さらに本手法によって得られた最適点は始めに定めた水準外であり、CCD による応答曲面法を用いない場合では 1331 通り試しても得ることはできない。

さらに三次元静磁界解析をによる特性値算出では d 軸 q 軸下の数値解析にそれぞれ 5 分から 10 分程度の計算時間で済むが、三次元過渡応答解析を用いる場合であると約 2 日かかる結果が得られ、解析時間の短縮も行った。

5. 結言

本報告では、応答曲面法を用いたリニア型発電機の簡易設計手法の提案を行った。これは三次元静磁界解析を導入することで磁束を三次元状に形成する横磁束型のモデルにおいても漏れ磁束の考慮など容易に行うことができ、かつ高精度な設計が可能となっている。また CCD を用いた応答曲面法による最適点探索も実験数を減らした上で少ない実験数で可能であることが確認された。以上から本手法は妥当性を確保した上で最適点探索時間を大幅に減らすことができたことがわかる。

また、目的関数として出力密度と磁石量に対する出力を設定することで、波力発電設計に必要な高出力密度化と、コストに対する出力を観測することができる。この報告が今後の波力発電設計に資することを期待する。

今後は本モデルの電機子鉄心の極数を 4 極から 6 極や 8 極に変更しての設計や、他の横磁束型リニア発電機のモデルに本設計法を導入し、検討を進めるなどして更なる高出力密度化と低コストでの発電機設計を進めていく必要がある。

文 献

- (1) M. Leijon, R. Waters, M. Rahm, O. Svensson, C. Bostrom, E. Stromstedt, J. Engstrom, S. Tyrberg, A. Savin, H. Gravakmo, H. Bernhoff, J. Sundberg, J. Isberg, O. Agren, O. Danielsson, M. Eriksson, E. Lejerskog, B. Bolund, S. Gustafsson, and K. Thorburn, "Catch the wave to electricity," IEEE Power Energy Mag., vol. 7, no. 1, pp. 50–54, Jan./Feb. 2009.
- (2) 内閣官房 総合海洋政策本部事務局, "平成 24 年版 海洋の状況及び海洋に関して講じた施策"
- (3) Jung-Seob Shin, T. Koseki and Houn-Joong Kim, "Transverse flux type cylindrical linear synchronous motor for large thrust using generic armature cores for rotary machinery," The 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp.795-800, Sept. 2012.
- (4) D.-K. Hong, B.-C. Woo, J.-H. Chang, and D.-H. Kang, "Optimum design of TFLM With constraints for weight reduction using characteristic function," IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 4, pp. 1613–1615, Apr. 2007.
- (5) Jung Ho Lee, "Optimum Shape Design Solution of Flux Switching Motor Using Response Surface Methodology and New Type Winding," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 4, pp. 1637–1640, Oct. 2012.
- (6) Han-yan Huang, Lei Wang, Yun-Tao Chen and Yu-Lan Chen, "Probability-Weighted D-Optimal Designs Considering the Distribution of the Factors," Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences (ICM), vol. 3, pp.22-25, 2011
- (7) J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, and J. H. Lee, "Rotor design on Torque Ripple Reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology," IEEE Trans. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 3479–3481, Oct. 2006.
- (8) G. E. P. Box and N. R. Draper, Empirical Model-Building and Response Surfaces. New York: Wiley, 1987.
- (9) A. I. Khuri and J. A. Cornell, Response Surface Designs and Analyzes. New York: Marcel Dekker, 1996. (2003)