励磁機なしブラシレス三相同期発電機の解析

正員 野 中 作太郎 (九州大)

正員 袈裟丸 勝 巳 (九州大)

正員 堀 田 一 夫 (東京電力)

Analysis of Brushless Three-Phase Synchronous Generator Without Exciter

Sakutaro Nonaka, Member, Katsumi Kesamaru, Member (Kyushu University), Kazuo Horita,
Member (Tokyo Electric Power Co.)

Recently a demand for small-capacity generators is increasing as electric sources in small ships and automobiles or as portable electric sources driven by engines.

It is desired that the structure of small-capacity generators is simple and robust, and that the generators are highly reliable, easily maintained and controlled.

This paper describes an analysis of the original brushless synchronous generator without exciter. The output voltage can be adjusted in the wide range by controlling the stator DC current. To analyze the characteristics of this generator, the finite element method is applied. It is found that the results of theoretical analysis agree well with the experimental results.

キーワード：ブラシレス同期発電機，半波整流回路，有限要素法，磁界解析

1. ま え が き

近年，省力化・自動化の進展，家庭電化の普及につれて電気機器の使用は急速に増加している。これら電気装置を電力会社の配電線から受電しにくい場所でも使用したい欲求，停電時の最小限の電力確保など必然的な要求がある。

一般に，小容量交流発電機は，夏の炎天下や冬の極寒，砂漠の砂ぼこりのなか，振動の激しい車や船，腐食性ガスの多い工場など厳しい環境のもとで使用され，しかも長期間保守点検を要しないメンテナンスフリーであることを要求される。このような過酷な条件に耐えられる発電機は，構造が簡単堅牢で，操作・保守が容易であり，信頼性の高いことが必要である。

永久磁石形およびクローポール形同期発電機は励磁機が不要であるが，前者は切削加工が困難で，高価であり，かつ界磁調整ができないこと，後者は機械寸法が大きく複雑になるなど問題がある。野中が開発したブラシレス自励形三相同期発電機^{(1)~(3)}は，単相電機

子反作用による逆相分回転磁界を利用し，界磁巻線に誘導する2倍周波数の電圧をダイオードで半波整流することによって自動的に界磁起磁力を得るようにしたもので，自動電圧調整器（AVR）なしで定電圧特性が得られるため，ポータブルエンジン発電機として国内数社で量産され，国内外に広く普及している。しかしこの方式の発電機は定速駆動用に適している。そこで著者らは，可変速駆動にも適用できる固定子直流励磁ブラシレス三相同期発電機および単相同期発電機を考案し報告した^{(4)~(6)}。この発電機は固定子に極数の異なる二つの巻線を施し，回転子は各界磁巻線にダイオードを接続して半波整流回路とするだけの簡単なブラシレス構造であり，3kVA 試作発電機による実験結果は良好な特性を示した^{(7)~(9)}。

柴田らは，固定子巻線に交流または直流励磁電流を供給するブラシレス自励方式を提案している。この方式は，回転子に主界磁巻線とこれと極数の異なる励磁用三相巻線を施すため，構造が複雑であった⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。最近，その改善策として，回転子は並列接続した2個

の界磁巻線の中間点に単相全波整流回路を接続し、その出力を各界磁巻線の両端から供給する方式を提案している⁽¹²⁾⁽¹³⁾が、回路動作上は4個の巻線を半波整流回路とした構成となっており、著者らがかねがね提案し実用化しているブラシレス同期機^{(1)~(3)(7)(14)}と同様に、界磁は半波整流回路に帰結している。従って、柴田の方式は、著者らが考案した前記固定子直流励磁ブラシレス発電機⁽⁷⁾と原理的に同一である。

著者らは、励磁機なしブラシレス同期発電機の一例として、固定子に2極直流励磁巻線と4極三相主巻線を有する場合について報告し、近似解析により発電機励磁特性を理論的に解明、更に試作発電機による実験結果を示してその実用性を明確にした。また、実験により得られた電流値を用いて有限要素法による磁界解析を行い、発電機内部の磁束分布を求め、界磁電流の大幅な脈動にもかかわらず、回転子は鎖交磁束を一定に保持しながら回るなど、半波整流回路の有用性を示し、発電機動作を視覚的にも明らかにした⁽⁷⁾。

本論文は励磁機なしブラシレス4極三相同期発電機について、電流値も未知数とした、いわゆる“外部電源を考慮した有限要素法”を適用⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾し、鉄心の飽和、回転子ダイオードの断続を含めた発電機特性の厳密なシミュレーションを行い、実験結果との比較によりその妥当性を確認した。また、ギャップの長さが特性に与える影響について解明し、発電機設計の指針を与えた。

図1 ブラシレス三相同期発電機
Fig. 1. Brushless three-phase synchronous generator.

2. 回路構成および構造

〈2・1〉 回路構成 図1に励磁機なしブラシレス4極三相同期発電機の回路を示す。固定子には4極三相主巻線 W_1 とは別に2極直流励磁巻線 W_e を施し、回転子は図では界磁巻線の機械巻が可能で量産に適した突極構造を示すが、当然円筒形回転子でもよい。回転子の界磁巻線 $W_{f1} \sim W_{f4}$ にそれぞれダイオード $D_{f1} \sim D_{f4}$ を接続して半波整流回路とする。この回転子界磁回路方式によれば、固定子直流励磁巻線による2極静止磁界は界磁電流の交流分によってほとんど打消され、励磁巻線に誘導する交流電圧は小さく、固定子直流電流による定電圧制御が容易となる特徴を有する。

〈2・2〉 構造 図2は3kVA試作発電機のギャップ部を誇張した断面図を示す。固定子鉄心の外径216mm、内径145mm、ギャップの長さは0.5mmであり、鉄心積み厚は120mmである。また、試作機の巻線仕様を表1に示す。

図2 発電機断面図
Fig. 2. Cross section of generator.

表1 試作機の巻線仕様
Table 1. Specification of generator winding.

要 目	固定子巻線		回転子巻線
	主巻線 W_1	励磁巻線 W_e	$W_{f1}, W_{f2}, W_{f3}, W_{f4}$
相 数	3	1	—
極 数	4	2	—
スロット数	36	24	—
コイル数/相	6	12	—
コイル巻数	20	34	400
直列巻数/相	120	408	—
巻線の種類	同心巻	同心巻	集中巻

3. 有限要素法による解析

〈3・1〉 仮 定 発電機の有限要素法による解析を行うにあたり、次の仮定を設ける。

- (i) 電磁界は軸方向に一様な二次元場である。
- (ii) 渦電流、ヒステリシスは考慮しない。
- (iii) 巻線を通る電流の表皮効果を無視し、電流は導体断面を一様に流れるものとする。
- (iv) 回転子は一定の定常回転速度 ω_m で回転する。

(v) 4極主巻線と界磁巻線のコイル端漏れ磁束は2極直流励磁巻線の漏れ磁束に比して小さく無視できるものとする。

〈3・2〉 基礎方程式 一般に渦電流を無視した二次元の電磁界の基本方程式は (X, Y) 直交座標系において次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial Y} \right) = -J_0 \dots (1)$$

ただし、 A_z ：ベクトルポテンシャル A の Z 成分、 ν ：磁気抵抗率、 J_0 ：強制電流密度（ここでは負荷電流密度、励磁電流密度および界磁電流密度）

また、図1より、負荷をY結線の純抵抗とし、発電機の電圧方程式を立てると次式ようになる。

主巻線回路について、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi_a}{dt} + Ri_a &= 0 \\ \frac{d\phi_b}{dt} + Ri_b &= 0 \\ \frac{d\phi_c}{dt} + Ri_c &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、 R ： a, b, c 相各主巻線の巻線抵抗を含んだ各相負荷抵抗、 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c ： a, b, c 相各主巻線の磁束鎖交数

励磁巻線回路について、

$$\frac{d\phi_e}{dt} + L_e \frac{di_e}{dt} + Re i_e = E_e \dots (3)$$

ここで、 ϕ_e ：励磁巻線の磁束鎖交数、 L_e ：コイル端漏れインダクタンス、 Re ：巻線抵抗、 E_e ：直流励磁電圧

界磁巻線回路について、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi_{f1}}{dt} + R_{f1} i_{f1} &= 0, \frac{d\phi_{f2}}{dt} + R_{f2} i_{f2} &= 0 \\ \frac{d\phi_{f3}}{dt} + R_{f3} i_{f3} &= 0, \frac{d\phi_{f4}}{dt} + R_{f4} i_{f4} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

ここで、 $\phi_{f1}, \phi_{f2}, \phi_{f3}, \phi_{f4}$ ：各界磁巻線の磁束鎖交数、 R_f ：各界磁巻線の抵抗

(2)～(4)式における時間微分項を有限な微小時間 Δt を用いて後退差分近似を行うと

例えば、励磁巻線回路について、

$$\omega_m \frac{\phi_e^t - \phi_e^{t-\Delta t}}{\Delta \theta_m} + Re i_e^t + \omega_m L_e \frac{i_e^t - i_e^{t-\Delta t}}{\Delta \theta_m} = E_e \dots (5)$$

ここで、 $\Delta \theta_m = \omega_m \Delta t$

以上の基礎方程式を基に、外部電源を考慮した有限要素法を適用して解析を行うが、有限要素法として解くべきマトリックスは文献(15)、(16)と同じとなるので、ここでは省略する。

〈3・3〉 解析手法 図3に解析手順の流れ図を示す。発電機回転子の回転は固定子スロットのコイルを回転方向と反対方向に1スロットずつ移動することによって模擬した。従って、スロットの高調波による影響は考慮していない。また、鉄心の磁気飽和による非線形性はニュートンラプソン法を用いることで考慮した。その鉄心材料の $B-H$ 特性は磁気抵抗率 ν と B の関数として、次式のような区間多項式近似を用いた。

$0 \leq (B-0.2)^2 \leq 4$ のとき

$$\nu = 2.873[86 + 14\{(B-0.2)^2\}^5]$$

$$\frac{\delta \nu}{\delta B^2} = 201.110\{(B-0.2)^2\}^4(1-0.2/B)$$

$(B-0.2)^2 > 4$ のとき

$$\nu = 2.873[17,920\{(B-0.2)^2\} - 57,258]$$

図3 解析手順

Fig. 3. Flow chart for analysis.

$$\frac{\delta \nu}{\delta B^2} = [17,920 \times 2,873(1 - 0.2/B)]$$

回転ダイオードの境界条件は、巻線誘起電圧がダイオード順電圧降下 0.7 V で ON、電流零で OFF とし、各界磁回路の断続状態を考慮した。

4. 解析結果

モデルの有限要素分割に際して、磁束の非対称性を考慮して発電機全領域について、図 4 のように一次三角形要素によって要素数 1,960、節点数 1,028 に分割した。

発電機の実数は以下のようである：

$$R_e = 7.0 \Omega, L_e = 0.01 \text{ H}, R_f = 3.0 \Omega$$

図 4 分割図

Fig. 4. Finite element subdivision.

図 5 無負荷電圧特性

Fig. 5. No-load characteristics.

図 5 は発電機ギャップの長さに対する無負荷電圧の変化を示し、端子電圧 E_{ab} は、励磁電流 I_e が約 2 A 以下ではギャップの長さにほぼ反比例して減少するが、それ以上では磁気飽和に起因して単調に減少する。無負荷時の磁束分布を $\theta_m = 0, 40^\circ$ の各場合について図 6 に示す。界磁電流は半波整流回路を流れるため大幅に脈動するが、界磁磁束は変化せずほぼ一定に保持されているのが確認できる。

図 7 は無負荷時における回転子鎖交磁束、固定子鎖交磁束および電圧の波形を示す。回転子界磁磁束 $\psi_{r1} - \psi_{r4}$ は図 6 の磁束分布で示したように、ほぼ一定に保持されているが、図 7 から界磁抵抗によるわずかな減衰が見られる。

$\theta_m = 0^\circ$

$\theta_m = 40^\circ$

図 6 回転角に対する無負荷磁束分布

Fig. 6. Flux distributions with rotor angles at no-load.

図 7 無負荷時における磁束鎖交数と電圧の波形

Fig. 7. Waveforms of flux linkages and voltage at no-load.

図 8 は 3 kW 負荷時のギャップの長さ 0.2, 0.5, 1.0 mm の各場合の電流波形を示す。界磁電流の波形から、ギャップの長さにかかわらず θ_m のほぼ 90° 区間において、ダイオード 1 個は非導通となることがわかる。しかし、ダイオードが導通している三つの界磁巻線によって非導通の界磁巻線の磁束が一定に保持される⁽⁷⁾。

5. 実験結果との比較

図 9 は励磁電流 I_e を変化して求めた無負荷飽和曲線を示す。界磁電流の直流平均値 $\bar{i}_{f1} (\cong \bar{i}_{f2} \cong \bar{i}_{f3} \cong \bar{i}_{f4})$ は励磁電流 I_e に比例して変化し、実験機のギャップの長さは 0.5 mm であるが、理論値は実験値とよく一致している。

図 10 は電流 I_e を 2.1 A 一定とした場合の負荷特性を示す。界磁電流は負荷およびギャップの長さとは無関係に一定となり、電圧 E_{ab} はギャップの長さが小さいほど垂下特性となる。

図 11 は電圧 $E_{ab} = 220$ V 一定となるように電流 I_e を調整した場合の負荷特性を示す。ギャップが大きい場合、励磁電流 I_e の変化割合は小さくてすむが、そ

図 8 定格負荷時の各部電流波形
Fig. 8. Waveforms of currents with some values of gap length at full load.

図 9 無負荷飽和曲線
Fig. 9. No-load saturation curves.

の値は全体的に大きくなる。すなわち、ギャップの長さを大きくすることによって電機子反作用は低減できるが、同一負荷に対して所要励磁電流、従って界磁電

図 10 負荷特性 ($I_e = 2.1$ A 一定)
Fig. 10. Load characteristics ($I_e = 2.1$ A constant).

図 11 負荷特性 ($E_{ab} = 220$ V 一定)
Fig. 11. Load characteristics ($E_{ab} = 220$ V constant).

流も増大し、銅損が増加する。例えば、定格負荷時においてギャップの長さ 0.2 mm における励磁損は約 130 W、これに対し 1.0 mm での損失は約 240 W とほぼ倍増する。従って、ギャップの長さは機械的に可能な限り小さく設計することが肝要である。

図 12 は 3 kW 負荷時の各部電流の測定波形を示す。本実験機は斜めスロットを採用していないため、スロットリプルが現れているが、これを除けば図 8 の理論波形とよく一致することがわかる。

図 12 定格負荷時の実測波形
Fig. 12. Measured waveforms at full load.

6. むすび

以上、本論文は励磁機なしブラシレス 4 極三相同期発電機について、有限要素法を適用し、鉄心の飽和、回転子ダイオードの断続を含めた発電機特性の厳密な解析を行い、その結果を示した。特に、ギャップの長さが特性に与える影響について解明し、この種の自励発電機ではギャップの長さは機械的に許される限り小さく設計することが望ましいことを確認した。

なお、本発電機は定回転のエンジン発電機ばかりでなく、風力発電やミニ水力発電のように広範囲に速度が変動する用途や、メンテナンスフリーを要求される用途に好適と考えられる。(平成 3 年 7 月 31 日受付)

文 献

- (1) 原田・野中:「自励型単相同期発電機」, 特許 第 244444 号 (特公昭 33-2367)
- (2) 野中:「ブラシ無し自励形単相同期発電機」, 電学誌, 82, 627 (昭 37-4)
- (3) 野中・牟田:「ブラシなし自励形単相同期発電機の特性」, 同

- 上, 91, 1291 (昭 46-7)
- (4) 野中・袈裟丸: 「ブラシレス三相同期発電機の一方式」, 昭 56 電気学会会大, No. 701
 - (5) 野中・袈裟丸・藤井: 「励磁機なしブラシレス他励三相同期発電機とその特性」, 電気学会回転機研究, RM-82-5 (昭 57)
 - (6) S. Nonaka & K. Kesamaru: "Brushless Separately-Excited Three-Phase Synchronous Generator without Exciter", International Conference on Electrical Machines, Budapest, p. 446 (1982)
 - (7) 野中・袈裟丸: 「励磁機なしブラシレス三相同期発電機」, 電学論 B, 105, 851 (昭 60-10)
 - (8) S. Nonaka & K. Kesamaru: "Analysis of Voltage-adjustable Brushless Synchronous Generator without Exciter", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, IA-25 No. 1, 126 (1989)
 - (9) S. Nonaka & K. Kesamaru: "Magnetic Field Analysis of Brushless 4-pole Single-phase Synchronous Generator without Exciter", International Conference on Electrical Machines, Cambridge, p. 1177 (1990)
 - (10) F. Shibata & T. Fukami: "A Brushless, Self-Excited Poly-phase Synchronous Generator", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-102, No. 8, 2413 (1983)
 - (11) 柴田・直江: 「ブラシレス自励正弦波単相同期発電機」, 電学論 D, 109, 251 (平元-4)
 - (12) 柴田・深見: 「固定子電機子巻線を直流励磁するブラシレス単相同期電動機」, 同上 D, 109, 865 (平元-11)
 - (13) 柴田・直江: 「半波整流平衡二相界磁巻線をもつブラシレス自励正弦波単相同期発電機の基礎特性」, 同上 D, 110, 1005 (平 2-9)
 - (14) 野中: 「自励型三相同期発電機」, 特許 第 272321 号 (特公昭 35-11263)
 - (15) 中田・高橋・藤原: 「外部電源を考慮した有限要素法による単相誘導電動機の解析」, 電気学会回転機・静止器合同研究, BM-81-40; SA-81-30 (昭 56)
 - (16) T. Nakata & N. Takahashi: "Direct Finite Element Analysis of Flux and Current Distributions under Specified Conditions", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-18, 235 (1982)

野 中 作太郎 (正員)

昭和 3 年 11 月 12 日生。27 年 3 月九州大学工学部電気工学科卒業。29 年 4 月同大学工学部講師, 30 年 6 月同助教授, 40 年 4 月九州工業大学教授, 42 年

4 月九州大学工学部教授, 電気機器学講座担当。平成元年 4 月～3 年 3 月九州大学工学部附属超伝導マグネット研究センター長併任, 平成 2 年 6 月改組により電気工学科エネルギー変換機器工学講座担当, 現在に至る。この間, ブラシレス単相同期発電機, 正弦波入出力 PWM 電流形コンバータ-インバータシステム, 超電導モータ, 新交通システム用リニア誘導モータ, 磁気浮上式鉄道などの研究に従事。工学博士。46 年電気学会論文賞, 1985 年 IEEE/IAS 論文賞受賞。58 年度電気学会九州支部長。1980 年以降電気機械に関する国際会議 (ICEM) 運営委員会委員, 1986 年以降 IEEE/IAS 電気機械委員会委員。パワーエレクトロニクス研究会会員。

袈 裟 丸 勝 巳 (正員)

昭和 24 年 6 月 27 日生。47 年 3 月佐賀大学理工学部電気工学科卒業。52 年 3 月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手, 平成元年 7 月同助教授, 現在に至る。ブラシレス同期発電機に関する研究, 磁界解析に関する研究に従事。工学博士。

堀 田 一 夫 (正員)

昭和 42 年 1 月 10 日生。平成元年鹿児島大学工学部電気工学科卒業。3 年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社, 現在に至る。