ブラシレス他励式単相同期発電機の励磁特性

正 員 柴 田 福 夫 (金沢工大)
准 員 小 池 伸 一 (金沢工大)
正 員 直 江 伸 至 (金沢高専)

Excitation Characteristics of Brushless Separate-Exciting Type Single-Phase Synchronous Generator

Fukuo Shibata, Member, Shinichi Koike, Associate (Kanazawa Institute of Technology),
Nobuyuki Naoe, Member (Kanazawa Technical College)

キーワード：発電機，ブラシレス励磁，逆相分回転磁界

1. ま え が き

著者らはさきに、ブラシレス自励単相同期発電機⁽¹⁾⁽²⁾を提案した。これらの発電機は、同期発電機本体に励磁機の機能を内蔵させたものであり、その基本的な特性は既に報告した⁽²⁾。しかし、文献(2)の発電機では、回路構成上、分巻特性しかもたないため、機器設計上工夫が必要である。この設計を適切に行えば、ある程度の負荷に対して電圧変動率が小さくなり、発電機として有用である。

単相同期機の界磁巻線には、電機子反作用の逆相分回転磁界により第二調波の交流起電力が誘導される。この起電力を端子電圧の補償に利用できれば、負荷特性が改善される。しかしながら、文献(2)ではこの逆相分回転磁界の影響について検討していなかった。

本報告では、逆相分回転磁界を考慮したうえで、他励式におけるブラシレス単相同期発電機の励磁特性を解析的および実験的に検討する。

2. ブラシレス他励式単相同期発電機

図1はブラシレス他励式単相同期発電機の回路図である。固定子には、電機子巻線 W_a と直流電源 E_e が設けられている。回転子には、回転子励磁巻線 W_r 、界磁巻線 W_f および回転整流器が設けられている。界磁巻線は、逆相分回転磁界を吸収させ、端子電圧波形を正弦波にするために平衡二相巻線になっている。

抵抗負荷時の本発電機の電圧方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_f \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_{fa} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_a & 0 \\ 0 & r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_{fa} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \cdot i_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

図1 ブラシレス他励式単相同期発電機の回路図
Fig.1. Circuit diagram of a brushless separate-exciting type single-phase synchronous generator.

各巻線の磁束鎖交数は次式となる。

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_{fa} \\ \psi_{fq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{af} \cos \theta_{af} & -M_{af} \sin \theta_{af} \\ M_{af} \cos \theta_{af} & L_f & 0 \\ -M_{af} \sin \theta_{af} & 0 & L_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_{fa} \\ i_{fq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $\theta_{af} = \omega t + \theta_0$, $\omega = 2\pi f$, f : 発電周波数, θ_0 : $t=0$ における W_a と W_f の d 軸との間の電気角, r_a, L_a : W_a の抵抗と自己インダクタンス, L_f : W_f の自己インダクタンス, M_{af} : W_a と W_f の間の相互インダクタンスの最大値

界磁電流は、回転子励磁巻線と整流器を通して供給される直流分の界磁電流 i_{fD} と電機子反作用の逆相分回転磁界による第二調波の交流界磁電流 i_{fA} が重畳する。それぞれの実効値 I_{fD} , I_{fA} は次式となる。

図2 抵抗負荷特性
Fig. 2. Resistive load characteristics.

$$I_{fD} = \frac{6\sqrt{3} x_{ae} I'_{es} - 2e_a \pi}{\pi(r_{er} + R_f) + 6x_{er}} \quad (3)$$

$$I_{fA} = \frac{x_{af}^2 I_{fD}}{4x_f \sqrt{2(R^2 + x_a^2)}} \quad (4)$$

ここで、 $x_{ae} = \omega M_{ae}$ 、 M_{ae} ： W_a と W_{er} の間の相互インダクタンスの最大値、 $x_{er} = \omega L_{er}$ 、 $R_f = r_f/2$ 、 r_f ： W_f の抵抗、 r_{er} 、 L_{er} ： W_{er} の各相の抵抗とインダクタンス、 e_a ：ダイオード順方向電圧降下、 R ：負荷の抵抗（ r_a を含む）、 $x_a = \omega L_a$ 、 $x_r = \omega L_f$

端子電圧 v_a は、逆相分回転磁界の影響により、次々に基本波の起電力が誘導され、次式となる。

$$\begin{aligned} v_a &= v_{a0} + v_{a1} + v_{a2} + \dots \\ &= \sqrt{2} V_{a0} \cos(\omega t + \phi_{a0}) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{an} \cos(\omega t + \phi_{an}) \quad (5) \end{aligned}$$

ただし、それぞれの電圧の実効値 V_{a0} 、 V_{an} は、

$$V_{a0} = \frac{x_{af} R}{2\sqrt{R^2 + x_a^2}} I_{fD} \quad (6)$$

$$V_{an} = \frac{x_{af}^2}{4x_f \sqrt{R^2 + x_a^2}} V_{a(n-1)} \quad (7)$$

$$\phi_{an} = \phi_{a(n-1)} - \frac{5}{4} \pi - \tan^{-1} \frac{x_a}{R} \quad (8)$$

3. 実験結果

実験機は、定格 2 kW、220 V、60 Hz、4 極の円筒界磁形同期発電機の二重星形三相電機子巻線の 1 相だけを使用した。

図2は、固定子励磁電流 I'_{fs} を制御した際の負荷特性を示す。界磁電流の交流分 I_{fA} の実測値は観測波形から得た値である。計算値は(3)、(4)式に数値を代入して求めた。計算値と実測値はよく一致している。 I_{fA} は負荷電流 I_a に比例していることがわかる。 I_{fD} は I'_{es} に比例しており、 I_{fD} と I_{fA} を加えた界磁電流 I_f はほぼ I_{fD} に等しいことがわかる。

図3は、端子電圧 v_a 、界磁電流 i_f の実測波形およ

図3 各部の波形
Fig. 3. Waveforms of part of generator.

び(5)式において逆相分回転磁界の影響を1次まで($n=1$)とした場合の計算波形を示す。 v_a の最大値は実測波形で 115 V、計算波形で 116 V でありよく一致している。 i_f は i_{fD} に i_{fA} が重畳することが実測波形および計算波形からわかる。

4. あとがき

本報告では、ブラシレス他励式単相同期発電機の励磁特性を電機子反作用の逆相分回転磁界の影響を考慮して解析と実験により明らかにした。

(平成4年6月8日受付)

文 献

- (1) F. Shibata: US Patent, No. 3, 573, 578
- (2) 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(平成4)

柴田 福夫 (正員)

大正13年10月31日生。昭和22年京都帝国大学卒業。同年川崎重工入社。現在、金沢工業大学電気工学科教授。工学博士(東京大学)。技術士。IEEE 会員。

小池 伸一 (准員)

昭和43年11月3日生。平成3年3月金沢工業大学電気工学科卒業。現在、同大学大学院修士課程電気電子工学専攻在学中。

直江 伸至 (正員)

昭和39年12月27日生。平成4年3月金沢工業大学大学院博士課程修了。現在、金沢工業高等専門学校電気工学科講師。工学博士。IEEE 会員。