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

正員 柴田 福夫 (金沢工大)

正員 直江 伸至 (金沢工大)

Fundamental Characteristics of a Brushless and Self-Excited Sinusoidal-Wave Single-Phase Synchronous Generator Having a Two-Phase Field Winding Excited by a Half-Wave Rectified Current

Fukuo Shibata, Member, Nobuyuki Naoe, Member (Kanazawa Institute of Technology)

It is desired from viewpoints of maintenances and constructions to make single-phase synchronous generators brushless and self-excited type.

A novel brushless and self-excited single-phase synchronous generator was devised by one of the authors. The stator exciting current is made to flow simultaneously with the load current in the armature winding. Thus, the iron core for the magnetic circuit can be both as one for the synchronous generator itself and as one for the exciter.

Experimental studies of the brushless and self-excited single-phase synchronous generator of which the rotor winding is used both as a rotor exciting winding and a field winding are described in this paper.

In the proposed generator, the rotor is provided with a balanced two-phase field winding, in order to improve the voltage wave distortion. The terminal voltage of this generator can be kept constant, in spite of the load variation.

Therefore, the proposed synchronous generator can be expected to be used widely.

キーワード：同期発電機，回転電気機械，電源，電力発生装置

1. ま え が き

小形船舶や工事用およびレジャー用のポータブル電源として、単相同期発電機の需要が急増している。この単相同期発電機が使用される場所の多くは屋外であるため、発電機は堅牢で、保守が容易なことが要求される。このため、単相同期発電機はブラシレス自励方式が望まれる。このような、ブラシレス単相同期発電機については、幾つかの研究がなされている^{(1)~(3)}。

著者らの一人は、固定子電機子巻線と変成器とを結合して電機子巻線内に負荷電流と固定子励磁電流を同時に流し、発電機本体に励磁機の機能を内蔵した、ブ

ラシレス自励単相同期発電機⁽⁴⁾⁽⁵⁾を考案した。

著者らは、さきに電機子巻線の間端子間に励磁電流を供給するための励磁電力供給巻線を施したブラシレス自励単相同期発電機^{(6)~(9)}を報告した。この発電機は、電機子巻線内に流れる負荷電流によってつくられる磁極の極数と同じ極数の励磁電力供給巻線と界磁巻線、および電機子巻線内に流れる固定子励磁電流によってつくられる磁極の極数と同じ極数の回転子励磁巻線によって構成される。この発電機の回転子には、励磁巻線と界磁巻線とが施されるため巻線構成上不利である。また、界磁巻線を全波整流回路によって励磁するために、単相同期機の電機子反作用の逆相分回転

磁界が効果的に利用できない。

本研究では、上記の発電機^{(6)~(9)}の回転子構造の改善および電機子反作用の逆相分回転磁界を効果的に利用する、ブラシレス自励単同期発電機^{(10)~(12)}について報告する。本発電機の固定子巻線は文献(6)~(9)と同様であるが、回転子巻線は励磁巻線と界磁巻線とを兼用した回転子巻線(以後、この回転子巻線を界磁巻線と記す)であるところが異なる。この発電機の巻線構成は、固定子に電機子巻線と励磁電力供給巻線、回転子に界磁巻線が施される。電機子巻線内に流れる固定子励磁電流によってつくられる磁極によって界磁巻線に交流電圧が誘導される。この交流電圧を整流して、界磁を励磁する。負荷電流が流れると界磁巻線に2倍の周波数の交流電圧が誘導される。この交流電圧を半波整流して、固定子励磁電流による分巻成分に負荷電流による直巻成分を加え合せ、複巻特性とする。界磁巻線は正弦波発電機の考えと同じように平衡二相巻線として、電機子反作用による逆相分回転磁界を吸収し、端子電圧波形を正弦波とする。電圧の確立は、励磁電力供給巻線のコンデンサと発電機の残留磁気によって容易となる。本方式は文献(3)の回転子ダイオードの接続方法と類似する点はあるが、基本的な考え方が異なる。文献(3)は突極界磁を用い、励磁電流を直流電源で供給する他励式である。これに対して、本方式は円筒二相界磁巻線を用い、励磁電流を励磁電力供給巻線で供給する自励式である。

本論文では、上記の特長をもったブラシレス自励正弦波単同期発電機^{(10)~(12)}の回路構成と原理を述べ、実験から特性を考察して、本発電機の基礎特性を明らかにする。

2. 回路構成

〈2・1〉 固定子 図1および図2にブラシレス自励単同期発電機の回路構成を示す。

電機子巻線 W_a には、実線で示す負荷電流と破線で示す固定子励磁電流を同時に流すことで、1対2の極数関係の磁極をつくるように巻線を施す。すなわち、電機子巻線 W_a は負荷電流でつくられる磁極と固定子励磁電流でつくられる磁極の二種類の磁極をつくる。固定子励磁電流(電機子巻線内の電流)は交流または直流のいずれでもよい。固定子励磁電流が交流電流の場合を交流励磁方式、直流電流の場合を直流励磁方式と本論文では記す。交流励磁方式において、励磁電力供給巻線 W_{es} は、コンデンサ C を通して電機子巻線 W_a の中間端子間に接続される。直流励磁方式におい

図1 ブラシレス自励単同期発電機の回路図(交流励磁方式)

Fig. 1. Circuit diagram of brushless self-excited single-phase synchronous generator (AC exciting system).

図2 ブラシレス自励単同期発電機の回路図(直流励磁方式)

Fig. 2. Circuit diagram of brushless self-excited single-phase synchronous generator (DC exciting system).

て、励磁電力供給巻線 W_{es} はコンデンサ C と整流回路を通して、電機子巻線 W_a の中間端子間に接続される。

〈2・2〉 回転子 前論文⁽⁸⁾では、固定子励磁電流によってつくられる磁極の極数と同じ極数の回転子励磁巻線と、負荷電流によってつくられる磁極の極数と同じ極数の界磁巻線が施されていた。本発電機では

前論文⁽⁶⁾の回転子励磁巻線と界磁巻線との両者の機能をもった界磁巻線 W_f を設ける。端子電圧波形を正弦波とするために界磁巻線 W_f は W_{fd} と W_{fq} が施される。 W_{fd} と W_{fq} は負荷電流によってつくられる磁極の極数の電気角で、 90° の位置に設ける。基本的には、界磁巻線 W_f は上記の二点を考慮して巻けばよい。本論文では、図 1 および図 2 のように回転子の界磁巻線 W_f は、実線で示す電流と破線で示す電流を同時に流すことで互いに 1 対 2 の極数関係にある二種類の磁極をつくるために、各相の界磁巻線 W_{fd} 、 W_{fq} のそれぞれに中間端子を設ける。

3. 動作原理

(3・1) 交流励磁方式 無励磁、無負荷状態において、励磁電力供給巻線 W_{es} と電機子巻線 W_a との間に接続されたコンデンサ C に流れる電流による増磁作用と界磁の自励作用で、電機子巻線 W_a と励磁電力供給巻線 W_{es} に交流電圧が誘導される。その交流電圧によって電機子巻線 W_a の中間端子間に固定子交流励磁電流が供給される。固定子交流励磁電流は、単相交流であるため交番磁界をつくる。この磁界によって界磁巻線 W_f には 3 倍の周波数の交流電圧が誘導される。例えば、この交流電圧は図 1 の界磁巻線 W_f の破線で示すようになる。負荷電流が流れると、負荷電流によって 2 倍の周波数の交流電圧が誘導される。これらの交流電圧がダイオードによって整流されて界磁巻線 W_f に界磁電流として供給され、界磁極を形成する。この界磁極によって、電機子巻線 W_a と励磁電力供給巻線 W_{es} に電圧が誘導される。界磁巻線 W_f は回路構成で示したように平衡二相巻線であり、単相同期機の電機子反作用の逆相分回転磁界によって、二相交流電流が流れて、端子電圧波形を正弦波とする。

(3・2) 直流励磁方式 直流励磁方式が交流励磁方式と異なる点は、固定子励磁電流でつくられる磁界が静止磁界であり、この磁界によって界磁巻線 W_f に誘導される電圧の周波数が 2 倍となることである。

4. 実験

(4・1) 実験装置 実験機は 2 kW、220 V、4 極の円筒形三相同期発電機を使用した。図 1 および図 2 のように接続するために、電機子巻線の U 相を単相電機子巻線 W_a として使い、励磁電力供給巻線 W_{es} は V 相を使った。界磁巻線 W_f に接続するダイオードは、界磁電流を測定するためにブラシとスリップリングを通して外部で接続した。実験機の巻線仕様は表 1 に示す。実験機の固定子鉄心の内径および外径は、

表 1 実験機の巻線仕様

Table 1. Winding specification of test machine.

	固定子	回転子
種類	電機子巻線	界磁巻線
相数	3	2
極数	4 極と 8 極を兼用	4 極と 8 極を兼用
スロット数	36	24
コイルの巻数	22	60
コイルの種類	二層重ね巻	二層重ね巻
コイルピッチ	2/3 短節巻 (4 極基準)	2/3 短節巻 (4 極基準)

図 3 無負荷特性

Fig. 3. No-load characteristics.

それぞれ 110.5 mm、300 mm である。

(4・2) 実験結果

(1) 無負荷特性 図 3 は回転速度 1,800 rpm において、励磁電力供給巻線 W_{es} を開放し、電機子巻線 W_a の中間端子に外部の電源から直流電流を供給した場合(回路図は付図 1 を参照)の無負荷特性を示す。図から、界磁電流 I_{fd1} (i_{fd1} の直流平均値)は、固定子励磁電流 I_{es} (直流)に比例して変化していることがわかる。

(2) 負荷特性 図 4 は交流励磁方式において、コンデンサ $C=67 \mu\text{F}$ としたときの抵抗負荷特性を示す。負荷変動に伴う端子電圧 V_a の変動は小さく、ほぼ 170 V 一定となっている。固定子交流励磁電流 I_{es} による界磁電流に、負荷電流 I_a の逆相分回転磁界による界磁電流が加わるため、端子電圧 V_a は、ほぼ一定に保っている。界磁巻線 W_f には巻線抵抗、ダイオードの損失およびブラシの接触抵抗の違いによって、無負荷のときの界磁電流 I_f ($i_{fd1} \sim i_{fd2}$ の直流平均値)に違いが生じる⁽²⁾。固定子交流励磁電流 I_{es} と負荷電流 I_a とによる単相同期機の逆相分回転磁界で、界磁

図 4 抵抗負荷特性(交流励磁方式)
Fig. 4. Resistive load characteristics (AC exciting system).

図 6 抵抗負荷特性(直流励磁方式)
Fig. 6. Resistive load characteristics (DC exciting system).

図 5 コンデンサ C による抵抗負荷特性
(交流励磁方式)
Fig. 5. Resistive load characteristics for variation of condenser C (AC exciting system).

図 7 コンデンサ C による抵抗負荷特性
(直流励磁方式)
Fig. 7. Resistive load characteristics for variation of condenser C (DC exciting system).

巻線 W_{fd} と W_{fq} に交流電圧が誘導する。これらの交流電圧は W_{fd} と W_{fq} が異なり、それをダイオードで整流するため各々のダイオードの導通の時刻も異なり、界磁電流に不平衡が生じる。効率は 1.7 kW 負荷時で約 70% であった。

図 5 は交流励磁方式において、コンデンサ C の容量を変化させたときの抵抗負荷特性を示す。コンデンサ C の容量によって固定子交流励磁電流 I_{es} が調整される。コンデンサ C の容量が大きいと、固定子交流励磁電流 I_{es} が大きくなり、端子電圧 V_a および界磁電流 I_f を上昇させる。コンデンサ C の容量が小さいときは固定子交流励磁電流 I_{es} が小さくなる。そのため、負荷電流 I_a による逆相分回転磁界によつての界

磁電流が大きくなり、過複巻特性となる。コンデンサ C の容量を適当にすれば、固定子交流励磁電流 I_{es} による分巻成分と負荷電流 I_a による直巻成分とが加え合せられて平複巻特性となる。従つて、所定の端子電圧および定電圧特性を得るには、各巻線の巻数とコンデンサ C の容量を調整する必要がある。

図 6 は直流励磁方式において、 $C=56\mu F$ としたときの抵抗負荷特性を示す。負荷変動に伴う端子電圧 V_a の変動は交流励磁方式に比べて若干大きく、電圧変動率は 10% 程度 (1.4 kW 時) となっている。端子電圧 V_a が負荷電流 I_a の増加に伴って減少している理由は、固定子交流励磁電流 I_{es} の減少と電機子巻線 W_a 内の励磁電流が直流であるため、固定子励磁電流

図 8 誘導性負荷特性(交流励磁方式)

Fig. 8. Inductive load characteristics (AC exciting system).

による励磁効果が交流励磁方式に比べて弱いためである。効率は 1.4 kW 時で約 70%であった。

図 7 は直流励磁方式において、コンデンサ C の容量を変化させたときの抵抗負荷特性を示す。コンデンサ C の容量による、無負荷の端子電圧 V_a と界磁電流 I_f の影響は交流励磁方式と同様である。負荷変動に伴う端子電圧 V_a はコンデンサ C の容量が 60 μF , 56 μF および 50 μF のときは、図 6 と同様な傾向を示す。コンデンサ C の容量が 40 μF のときは、負荷電流 6 A 付近から直巻成分が効果的に作用する。従って、端子電圧は負荷電流 6 A 付近から上昇する。

図 8 は交流励磁方式において、コンデンサ $C=67 \mu\text{F}$ としたときの負荷力率 $\cos \theta=0.9$ (遅れ) の誘導性負荷特性を示す。負荷変動に伴う端子電圧 V_a の変動は抵抗負荷特性に比べて、電機子反作用の正相分回転磁界が減磁作用となるため若干大きくなる。電圧変動率は 8% 程度 (1.3 kW 時) となっている。

〈4・3〉 電圧電流波形 図 9 は交流励磁方式、図 10 は直流励磁方式の端子電圧と負荷電流の波形を示す。平衡二相界磁巻線によって端子電圧波形は、ほぼ正弦波となっていることが図からわかる。

無励磁、無負荷の状態とし、励磁電力供給巻線 W_{es} と電機子巻線 W_a の間に接続するコンデンサ C の容量を 67 μF に選び、原動機の回転速度を上昇させたときの電圧の確立過程を図 11 に示す。その確立過程は、発電機の残留磁気によって励磁電力供給巻線 W_{es} に交流電圧が誘導される。その交流電圧によってコンデンサ C を通して、電機子巻線 W_a 内に固定子交流励磁電流 I_{es} が流れる。励磁電力供給巻線 W_{es} は、その電流による自己励磁現象と電機子巻線 W_a を励磁するため次第に電流が増加する。一方、単同期機の電

 1,070 W 抵抗負荷, $C=67 \mu\text{F}$, $f=60 \text{ Hz}$, $V_{es}=214 \text{ V}$ (W_{es} の電圧) $I_{es}=6.3 \text{ A}$, $I_{fd1}=1.51 \text{ A}$

図 9 端子電圧と負荷電流の波形 (交流励磁方式)

Fig. 9. Waveforms of terminal voltage and load current (AC exciting system).

 825 W 抵抗負荷, $C=50 \mu\text{F}$, $f=60 \text{ Hz}$, $V_{es}=159 \text{ V}$, $I_{es}=3.45 \text{ A}$, $I_{fd1}=1.82 \text{ A}$

図 10 端子電圧と負荷電流の波形 (直流励磁方式)

Fig. 10. Waveforms of terminal voltage and load current (DC exciting system).

 図 11 電圧の確立過程(交流励磁方式) $C=67 \mu\text{F}$

Fig. 11. Transient phenomena of voltage built-up (AC exciting system).

機子反作用の逆相分回転磁界のため、界磁巻線 W_f には 2 倍の周波数の交流電圧が誘導される。それを半波整流して励磁する。従って、界磁の自励作用と発電機の飽和特性およびコンデンサ C の充電特性により決まる電圧まで上昇する。

5. あとがき

本発電機は、前論文⁽⁸⁾で報告した発電機の回転子励磁巻線と界磁巻線を一卷線で兼用した、ブラシレス自励正弦波単同期発電機の回路構成と原理を述べ、その基礎特性を実験的に明らかにした。

本論文で提案した発電機は、固定子励磁電流による分巻成分に、負荷電流による直巻成分が効果的に加わり、良好な複巻特性が得られることがわかった。界磁巻線を平衡二相巻線とすることで、電機子反作用による逆相分回転磁界を吸収し、端子電圧波形を正弦波とする。

従って、本方式の単同期発電機はブラシレス自励方式であるため保守が容易となり、小容量単相電源として適用が可能である。

(平成元年7月20日受付, 同2年3月5日再受付)

文 献

- (1) I.R. Smith, J.M. Raven & S.K. Tso: "Brushless and Self-Excited Single-Phase Alternator", *Proc. Instn. Elect. Engrs.*, 114, 1089 (1967-8)
- (2) 野中・牟田: 「ブラシなし自励形単同期発電機の特長」, 電学誌, 91, 1291 (昭46-7)
- (3) S. Nonaka & K. Kesamaru: "Analysis of Voltage-Adjustable Brushless Generator without Exciter", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, 25, 126 (1989)
- (4) F. Shibata: "Electric Machine Arrangements Including Electric Rotating Machines", US Patent, No. 3,573,578
- (5) 柴田: 「単相ブラシなし同期機」, 特許第801991号
- (6) 柴田・直江: 「励磁供給巻線を有するブラシレス自励単同期発電機」, 昭62電気関係学会北陸支部連大, A-31
- (7) 柴田・直江: 「ブラシレス自励正弦波単同期発電機」, 昭63同上, A-26
- (8) 柴田・直江: 「ブラシレス自励正弦波単同期発電機」, 電学論D, 109, 251 (平元-4)
- (9) F. Shibata, T. Fukami & N. Naoe: "A Brushless, Exciterless, Single-Phase Sinusoidal Wave Synchronous Machine Having an Auxiliary Stator Winding", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 4, No. 2 (1989-6)
- (10) F. Shibata: "Construction of Single-Phase Electric Rotating Machine", US Patent, No. 4,656,410
- (11) 柴田: 「回転電気機械の構造」, 特許出願昭59-167208号(特許出願公開昭61-46148号)
- (12) 柴田: 「回転電気機械の構造」, 特許出願昭60-15045号(特許出願公開昭61-173675号)

付 録

1. 他励式直流励磁方式ブラシレス単同期発電機の特長

付図1は他励式直流励磁方式のブラシレス単同期発電機の回路構成を示す。励磁電力供給巻線 W_{es} を開放し(付図1では励磁電力供給巻線 W_{es} は示していない), 電機子巻線 W_a の中間端子間に外部の直流電源 E_e から固定子励磁電流 I'_{es} を供給する。

付図2は、付図1の回路構成において、固定子励磁

付図1 他励式直流励磁方式ブラシレス単同期発電機の回路図

app. Fig. 1. Circuit diagram of brushless single-phase synchronous generator for separate exciting type (DC exciting system).

付図2 抵抗負荷特性(他励式)

app. Fig. 2. Resistive load characteristics (separate exciting type).

電流 $I'_{es}=10$ A 一定としたときの抵抗負荷特性を示す。負荷変動に伴う端子電圧 V_a は、自励方式に比べて低下している。

付図3は固定子励磁電流 I'_{es} を調整して、端子電圧 V_a を一定としたときの、端子電圧 V_a と固定子励磁電流 I'_{es} の関係を示す。

付図4は端子電圧と負荷電流の波形を示す。自励方式と同様に端子電圧波形は、ほぼ正弦波となっている。

付図 3 固定子励磁電流を調整したときの
抵抗負荷特性

app. Fig. 3. Resistive load characteristics
(when stator exciting current is controlled).

740 W 抵抗負荷, $I'_{es}=10.5$ A, $f=60$ Hz, $I_{fd1}=1.86$ A

付図 4 端子電圧と負荷電流の波形(他励式)

app. Fig. 4. Waveforms of terminal voltage
and load current (separate exciting type).

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。53 年同退社。現在、金沢工業大学大学院博士課程教授。工学博士。電動機制御、誘導発電機、ブラシレス励磁機なし同期機、船舶電気推進などの発明で造船学会賞などを受賞。技術士。IEEE 会員。

直江 伸至 (正員)

昭和 39 年 12 月 27 日生。平成元年 3 月金沢工業大学大学院修士課程修了。現在、同大学大学院博士課程電気電子工学専攻在学中。主として、ブラシレス同期発電機に関する研究に従事。IEEE 会員。