励磁機なしブラシレス円筒形4極三相同期発電機

終身員 野 中 作太郎 (近畿大)

正 員 大 本 真 生 (日立機電工業)

A Brushless Cylindrical-Rotor 4-Pole Three-Phase Synchronous Generator Without Exciter

Sakutaro Nonaka, Member (Kinki University), Masao Oomoto, Member (Hitachi Kiden Kogyo)

A suitable structure for small-capacity generator must be simple, robust, highly reliable and maintenance-free.

The authors present an original brushless cylindrical-rotor type 4-pole three-phase synchronous generator without excitor. The stator is provided with a 4-pole three-phase main winding and a 2-pole single-phase exciting winding, and rotor field coils are connected with diodes, respectively, so as to make the same pole magnetic field as the stator main winding. The each field coil is consisted of a half-wave rectification circuit. The rotor field excitation is controlled proportionally by the stator dc exciting current.

By the scheme that the stator main winding is connected to leading capacitors at the terminals for shunt excitation, and connected to the full-wave rectifier at the neutral point and the rectified current supplied to the stator exciting winding for series excitation, a brushless self-excited three-phase synchronous generator has been achieved.

In this paper the circuit configuration of the generator and the experimental results using a 2kVA prototype machine are shown.

キーワード：ブラシレス同期発電機，三相発電機，円筒形発電機，他励発電機，自励発電機，半波整流回路

1. ま え が き

近年，発展途上国などで配電線が普及していない地域での家庭用電化製品の使用，屋外工事の照明・電動工具用，漁船の集魚灯，さらにレジャー用や停電時の非常用などに小型エンジン発電機の需要が増加している。

これら小容量交流発電機は，一般に厳しい環境下で使用されることが多く，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が望ましいので，構造が簡単堅牢で，操作・保守が容易でかつ信頼性の高いことが必要である。永久磁石発電機は最も簡単なブラシレス構造で，励磁機が不要であり，他の回転機に比べて効率が低いという特徴を有しているが，界磁調整ができないという欠点がある。

野中の考案になるブラシレス自励形単相同期発電機^{(1)~(5)}は，単相機特有の電機子反作用による逆相分回転磁界を利用して，回転子界磁巻線に誘導する2倍周波数の起電力をダイオードで半波整流するだけの非常に簡単なブラシレス構造の発電機である。この場合，回転子は突極形でも円筒形でもよく⁽⁴⁾，各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，界磁巻線のインダクタンスは巻線の抵抗に比べて大きいので，界磁起電力の1サイクルを通じて殆ど流れ続けダイオードで阻止されて不導通となる期間は

極めて短い。換言すれば界磁巻線はダイオードを通してほぼ短絡されている状態にあり，界磁電流の交流分によって，逆相分回転磁界は殆ど打ち消され，エアギャップ磁束はほぼ正相分回転磁界だけになることが，解析結果から明らかになっている⁽²⁾。この現象は，かご形単相誘導電動機において，その原理を回転磁界説で説明するとき，すべり $s=1$ （静止時）では正相分回転磁界と逆相分回転磁界は等しいが， $s \approx 0$ の同期速度付近では逆相分磁界によって回転子に誘導される電流成分は，周波数 $(2-s)f$ が高くなり力率が悪くなるので，その起磁力は固定子逆相分回転磁界を打ち消し，エアギャップ磁束は殆ど正相分回転磁界になるのと同じで，回転子巻線が低抵抗で短絡されていることが重要なポイントである⁽⁶⁾。特に円筒形回転子に平衡二相界磁巻線又は平衡三相界磁巻線を施せば正弦波発電機⁽⁷⁾と同様の原理で逆相分回転磁界を効果的に吸収でき，電機子には基本波の起電力だけを誘導し，高周波による波形のひずみを抑制できる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。従ってこの発電機の機械振動や騒音は極めて小さい。

また界磁半波整流回路の特徴は，物理現象として界磁巻線の鎖交磁束が最大から減少しようとした時に界磁起電力が正になってダイオードが導通し，界磁巻線のインダクタンスが大きく抵抗が小さいので，界磁回路の時定数は比較的大きく2倍周波数でダイオードがオン・オフを繰返す周

期内では鎖交磁束の減衰は極めて小さく、鎖交磁束は最大値のまま、ほぼ一定に保持される⁽²⁾⁽⁵⁾。普通の単相発電機でも界磁を直流で他励磁する場合、界磁電流は負荷電流に応じて大きく脈動するので⁽⁷⁾半波整流の励磁効果は界磁を他励する場合と何ら遜色なく、却って負荷電流に比例して界磁電流の直流分が増加するので直巻励磁効果が得られ、また固定子補助巻線にコンデンサを接続することによって進相電流により電圧確立が容易になると共に分巻励磁効果が得られるので、AVRなしでも平複巻特性となる⁽²⁾。

以上の理由でこの発電機は、数百ワットから数キロワットまでのポータブル発電機としてヤマハ発動機(株)や本田技研工業(株)などで量産され、世界的に普及している。一方、従前から単相発電機より出力が大きいブラシレス三相発電機の開発が強く要望されていた。

これに応えるために先に野中は固定子に三相主巻線と、これとは極数の異なる直流励磁巻線を施し、回転子はブラシレス単相発電機と同様に各極界磁コイルにダイオードを接続して半波整流回路とする種々の固定子直流励磁ブラシレス三相同期発電機を提案してきた^{(8)~(19)}。三相発電機の場合は固定子直流励磁によって静止磁界ができ、同期速度で回転する界磁巻線がこれを切ることで界磁起電力を生じ、各界磁電流は半波整流回路を流れるため単相機の場合と全く同じ原理で大幅に脈動するが、その交流分によって静止磁界は殆ど打ち消されると共に大きな界磁巻線インダクタンスにより各界磁鎖交磁束はほぼ一定に保持され、主巻線と同じ極数の界磁極を構成する。これにより主巻線からはほぼ正弦波の平衡三相出力が得られる。突極機による実験結果は非常に良好であった^{(10)~(13)}。

このように三相機でも回転子を半波整流回路で構成すれば各界磁巻線はダイオードで短絡状態になっているので固定子に異極磁界を重畳しても励磁用の静止磁界は回転子電流の交流分によって相殺され、エアギャップ磁束中には殆ど残存しないので回転軸の径方向に振動性応力が生じることはなく、異常な機械的振動や騒音を発生することはない^{(10), (13)}。

著者は最近、円筒形回転子の4極ならびに2極のブラシレス三相同期発電機の実験機を試作し、その研究結果を報告してきた。本稿では、ブラシレス円筒形4極三相同期発電機⁽¹⁹⁾について構造と動作原理及びその特性について述べるとともに、自励発電機としての回路構成と実用性を検討する。紙面の都合で2極機については稿を改めて報告したい。

2. ブラシレス三相同期発電機他者の方式

著者以外にも近年この分野の開発研究は活発に進められている。例えば、柴田氏ら⁽²¹⁾は固定子巻線として極数の異なる2組の巻線を用いる代わりに、従来速度制御用として用いられていた極数切換誘導電動機と同様の固定子巻線を利用して、タップで2分割した各相のコイルが並列になる極数の少ない三相結線と各相のコイルが直列になる2倍

極数の三相結線をそれぞれ三相出力巻線と直流励磁巻線とに併用するもので、固定子巻線の構成が簡単になったように見えるが、極数の少ない方の巻線は1/2短節巻となり、基本波の短節巻係数は0.71に減少し、効率の悪い巻線となる。更に各コイルには負荷電流と直流励磁電流が重畳して流れるため、それに応じた大きな断面積の銅線を用いる必要があり、固定子に極数の異なる主巻線と励磁巻線を別々に施す方式と比べてそれほど有利とは考えられない。また、文献(12)p.483とp.484に指摘したように、柴田氏らの初期の論文では回転子にもそれぞれ極数の異なる主界磁巻線と励磁用巻線が施されていたため、構造が複雑であり、著者の界磁巻線半波整流方式に比べて電気装荷が大きくなっていた。なおまた、回転子励磁巻線には整流器を介して主界磁巻線が接続されているため、固定子励磁巻線による磁界はあまり打ち消されず結果としてエアギャップには異極磁界が共存することになり、極数の組合せでは不平衡磁気吸引力による振動と騒音が発生すると考えられる⁽²⁰⁾。なお、文献(21)では回転子構造を簡略化するため、励磁巻線を界磁巻線に共用して、励磁巻線に誘導する交流起電力を全波整流して、固定子主巻線と極数の等しくなる励磁巻線の端子に直流を供給しようと試み、結果的には励磁巻線は著者の提案してきた半波整流回路に帰結している。

猪上氏ら⁽²²⁾は、これまで提案されているブラシレス三相及び単相同期発電機について励磁方式の分類と実用に際しての問題点を論及すると共に、自励形の三相2極同期発電機について励磁用の固定子及び回転子巻線を10極とし、電機子反作用磁界の第5空間高調波成分を利用して複巻特性を持たせ、かつ回転子に振動性応力を生じないようにした発電機を提案している。抵抗及び誘導性負荷に対し良好な平複巻特性が得られているが、直巻励磁機能を持たせるため第5空間高調波を生じるように試作機の電機子主巻線は固定子32スロット中12スロットしか有効に利用されておらず、結果的に出力に対して機械寸法が大きくなるざるをえない。また、回転子には10極の励磁巻線と2極の界磁巻線が施してあるため過剰の電気装荷となる。この方式は異極共存による機械振動抑止策のために大きな犠牲を払っているように思える。

また、深見氏ら⁽²³⁾は文献(22)の第5空間高調波成分を利用する代わりに、電機子巻線を第2空間高調波が発生するように、わざと2/3短節巻の各相コイルを電気角で120°ずつ隔てて配列し、回転子には電機子の2倍の極数の三相高調波励磁巻線と主界磁巻線を施した三相同期発電機を提案している。進相コンデンサによる分巻励磁効果を併用することによって実験では抵抗負荷に対し良好な平複巻特性を得ているが、主巻線が2/3短節巻なので基本波短節巻係数は0.866になり、回転子も余分な電気装荷を施していることになる。

深見氏らは文献(23)と同じ原理の発電機において、固定子2/3短節巻4極三相主巻線と分離して4極三相コンデンサ巻線を施したものを提案⁽²⁴⁾し、解析⁽²⁵⁾を示している

が、固定子スロット全部を両巻線で有効に利用する利点はあるが、固定子の電気装荷の増加に対して、それだけのメリットがあるのか疑問である。

なお最近、T.F.Chan氏らは回転子には野中の提案した突極4極半波整流界磁巻線⁽¹¹⁾、固定子には柴田氏の提案した極数切換電機子巻線⁽²¹⁾を利用したブラシレス同期発電機の特性解析を報告している⁽²⁶⁾。

3. 突極形回転子と円筒形回転子の比較

著者の経験から、ブラシレス回転子として突極回転子と円筒形回転子とではそれぞれ次のような一長一短がある。

突極形回転子の場合、横軸同期リアクタンスが小さいので抵抗負荷時には電機子電圧降下が減少するので界磁巻線の電気装荷も軽減される。突極磁極片には残留磁束が保持されやすいので、電圧確立が容易であり、自動巻線機による量産に適している。一方、極数の異なる固定子直流励磁による静止磁界を半波整流界磁電流の交流分によって完全に打ち消しにくい。例えば2極発電機⁽¹³⁾の場合、4極の突極回転子にそれぞれ集中巻の界磁巻線を施し、これにNNSSの2極の界磁極ができるようにダイオードを接続するため、同じ極性の磁極中央の鉄心が欠如し、磁束分布がへこんだ形になる。

これに対し円筒形回転子の場合、一般にエアギャップを狭く設計できるので、固定子直流励磁によって容易に界磁誘導起電力を発生できるが、反面同期リアクタンスが大きくなり、抵抗負荷や遅れ力率負荷による電圧降下が増大するのでこれを補償するため、回転子界磁巻線の電気装荷が突極回転子の場合より大となる。円筒形回転子には或程度自由に任意の極数の分布短節巻の界磁巻線を施すことができるので、固定子直流励磁に対して平衡二相又は三相巻線を施し、これを流れる半波整流界磁電流の交流分によって重畳した静止磁界をほぼ完全に打ち消すことができる。また、円筒形回転子は強力な楔を使用すれば巻線は遠心力に耐え或程度的高速運転が可能となるので高周波発電機などに適用できる。

4. ブラシレス円筒形4極三相同期発電機の構造

図1は固定子鉄心の36スロット中に、単層同心巻きの4極三相主巻線 W_1 と2極単相励磁巻線 W_e を施して、両巻線の間に相互誘導がないようにしている。図2に示す円筒形回転子の24スロット中には、4極界磁巻線 W_f ($f_1 \sim f_4$)を施し、それぞれにダイオード $D_1 \sim D_4$ を図示の極性に接続することにより半波整流回路とし、4極の界磁極を構成する。なお、界磁巻線は、単相巻線より多相巻線にした方がギャップ中の静止磁界や高調波磁界を吸収し、出力を正弦波化できる⁽¹²⁾。試作発電機の設計定数を表1に示す。

5. ブラシレス他励形三相同期発電機

<5・1> 発電機回路及び動作原理 図3は、ブラシレス円筒形4極三相同期発電機の回路図を示す。固定子及び

回転子巻線はそれぞれ図1と図2に対応する。主巻線端子には進相用のコンデンサ C を接続して、電圧確立を容易にすると共に、進相電流による自動によって分巻励磁効果を

4 極三相主巻線 W_1

2 極単相励磁巻線 W_e

図1 固定子巻線図

Fig. 1. Stator winding.

4 極界磁巻線 W_f

図2 回転子巻線図

Fig. 2. Configuration of the rotor winding.

表1 試作機の設計定数

Table 1. Design parameters of the testing machine.

鉄心	固定子鉄心		回転子鉄心
外径	190 mm		119.2 mm
内径	120 mm		28 mm
積厚	100 mm		100 mm
スロット数	36		24
スロット断面積	137 mm ²		150 mm ²
巻線	固定子巻線		回転子巻線
	主巻線 W ₁	励磁巻線 W _e	W _f (f ₁ , f ₂ , f ₃ , f ₄)
極数	4	2	4
相数	3	1	1
コイル数／相	6	14	2
コイル巻数	25	25	120
直列巻数／相	150	350	240
銅線断面積	φ 0.8 mm × 2	φ 0.8 mm × 2	φ 0.8 mm × 1
ギャップ長	0.4 mm

図3 固定子他励発電機の回路図

Fig. 3. Test circuit of stator separately excited generator.

得、さらに高調波成分を吸収して電圧波形の改善を行う。動作原理を説明すると、励磁巻線 W_e に直流励磁電流 I_e を流すと2極の静止磁界が出来る。この中で、円筒形回転子を回転させると、界磁巻線 $W_f(i_1 \sim i_4)$ にはこの磁界による起電力が誘導される。界磁回路は半波整流回路を構成するので磁極はダイオードの向きに従った整流電流 $i_{f1} \sim i_{f4}$ によって励磁され4極の界磁極を構成する。回転子に対し固定子励磁電流による磁束は、正弦波的に変化する。しかし、界磁の鎖交磁束は界磁巻線の抵抗に比しインダクタンスが大きいので、ダイオードが導通している期間は磁束は変動できず、ほぼ一定に保持される。よって固定子4極主巻線には、普通の同期発電機のように正弦波三相出力が得られる。

この界磁方式によれば、各半波整流界磁電流の交流成分の合成磁界は、2極固定子励磁巻線による静止磁界を打ち消すように作用し、各半波整流界磁電流の直流分は4極の回転磁界を作るので、2極励磁巻線には交流電圧を誘導せず固定子直流励磁による定電圧制御が容易となる。

<5.2> 実験結果 図4は、無負荷特性を示し、固定子直流励磁電流 I_e を変化させた場合の界磁電流の直流平均値 $\bar{i}_{f1}$ と端子電圧 E_{uv} の変化を示す。界磁電流 $\bar{i}_{f1}$ は励磁電流 I_e に比例して変化し、これによって端子電圧 E_{uv} は通常のスリップリングとブラシを有する同期機と同様の無負荷飽和曲線が得られる。図5は、無負荷でコンデンサ容量 C を変化させた場合の電機子進相電流 I_u' による励磁効果を示す。コンデンサ C がない場合と比較すると、十分自励効果があることが確認される。図6は、端子電圧 $E_{uv}=200V$ に

図4 無負荷特性 ($f=60\text{Hz}$)

Fig. 4. No-load characteristics.

図5 C による自励効果 ($f=60\text{Hz}$)

Fig. 5. Self-excitation effects by the C.

図6 C 変更時の負荷特性 ($f=60\text{Hz}$)

Fig. 6. Load characteristics with various C.

保つ際の励磁電流 I_e の調整曲線を示す。コンデンサの容量 C が増加すれば励磁電流 I_e はその分だけ負担が軽減され、進相電流の効果が推測できる。図7は、コンデンサを接続しない場合の三相負荷特性を示す。端子電圧 $E_{uv}=200\text{V}$ 一定にした場合の励磁電流 I_e の調整曲線を実線で示し、励磁電流 $I_e=2.1\text{A}$ 一定の場合の端子電圧 E_{uv} の変化を破線で示す。励磁電流 I_e 一定の場合、円筒形機では横軸同期リアクタンスが大きいため電圧降下が大きく典型的な電圧垂下特

図7 負荷特性 ($f=60\text{Hz}$)
Fig. 7. Load characteristics.

(a) No-load $I_u = 0$ (b) Resistance load $I_u = 4.25\text{A}$
図8 発電機の実験波形 ($f=60\text{Hz}$)
Fig. 8. Experimental waveforms of generator.

性を示す。従って定電圧特性を得るためには、励磁電流 I_e を調整することが不可欠である。図8は、図7の時の(a)は無負荷、(b)は負荷電流 $I_u=4.25\text{A}$ の時の各部の実測波形を示す。無負荷時、抵抗負荷時共にほぼ正弦波の平衡三相出力が得られている。また界磁電流は、出力周波数 $f=60\text{Hz}$ に対して $f/2=30\text{Hz}$ で脈動している。

6. ブラシレス自励形三相同期発電機

<6・1> 発電機回路及び動作原理 図9(a)は、進相コンデンサを固定子主巻線の各相間に接続した場合のブラシレス自励形4極三相同期発電機の回路図を示す。固定子進相コンデンサ C を三相主巻線 W_1 の各相に分離接続し、三相主巻線 W_1 の中性点側に三相全波整流器を接続して負荷電流 I_u に比例した直流励磁電流 I_e を励磁巻線 W_e に供給する⁽¹⁹⁾。図9(a)の場合、コンデンサ C の進相電流による電機子反作用は4極の界磁極に対し磁化作用をする。同時に、励磁巻線 W_e によって負荷電流 I_u に比例する2極静止磁界が構成され、この磁界による界磁誘導起電力はダイオードの向きに従った整流電流 $i_{f1} \sim i_{f6}$ によって4極の界磁極が直接励磁される。この直巻励磁効果は、負荷電流 I_u の電機子反作用による電圧降下を補償する。この方式は、コンデンサ C が常に主巻線 W_1 に接続されている為、電圧確立が容易で、回転速度がある値に達すれば自動的に確立する。 C を各相に接続する場合、図9(b)のように線間に接続する場合に比べて容量的に大となり不利となるが C に流れる電流は各相コイルを循環するだけで整流器の方へは流れない。従って、整流器には負荷電流 I_u, I_v, I_w だけが流れるので、純粋な直巻効果が期待できる。図9(b)は、主巻線端子間に進相コンデンサ C をデルタ接続した場合の自励発電機の回路図を示す。この場合、負荷の増加に伴いコンデンサ電

(a) (b)
図9 自励発電機の回路図
Fig. 9. Test circuit of self-excited generator.

流 i_{cu} が減少するため、直流励磁電流 I_e は端子電圧 E_{uv} の電圧降下を完全に補償するのは困難になるが、コンデンサの容量は小さくて済む。

<6・2> 実験結果 図10～図12は、実験回路9(a)の時の結果を示し、図13～図16は、実験回路9(b)の時の結果を示す。図10は、コンデンサ C の値をいろいろ変化した場合の抵抗負荷特性を示す。励磁電流 I_e は、負荷電流 I_u に直接比例するため、コンデンサ C の値には無関係に同じ直線となる。コンデンサ C の値を変化することにより、端子電圧は調整可能である。図11は、コンデンサ C を各相にそれぞれ $70\mu\text{F}$ 接続した場合の抵抗負荷特性を示す。界磁電流 $\bar{i}_f$ は負荷電流 I_u の増加と共に増大し、直巻励磁効果を有し、コンデンサ電流による分巻効果と相俟って、平複巻特性となっている。また効率 η は、負荷電流が 3.49A の時、 56.7% となっている。図12は、図9(a)の回路で $n=1800\text{rpm}$ 、 $C=60\mu\text{F}$ とした場合の波形を示す。主巻線端子間には平衡三相出力が得られ、出力波形はほぼ正弦波となっている。図13は、図9(b)の回路でコンデンサ容量を変化させた場合の無負荷電圧特性を示す。コンデンサ容量が増加すれば、電機子電流 $\bar{i}_f$ とともに、励磁電流 I_e も増加し、界磁電流 $\bar{i}_f$ 、端子電圧 E_{uv} は高くなる。この場合励磁電流 I_e は、電機子電流 $\bar{i}_f$ に比例して変化しているが、界磁電流 $\bar{i}_f$ は緩やかな曲線を描いている。図14は、コンデンサ C の値をいろいろ変化した場合の抵抗負荷特性を示す。端子電圧 E_{uv} は、コンデンサ電流による分巻励磁効果と励磁電流 I_e による直巻励磁効果により、複巻特性を示している。また励磁電流 I_e には、負荷電流とコンデンサ電流の両方の整流電流を含むので、負荷電流 I_u に対して比例して増加せず、 I_u の小さい範囲では I_e にコンデンサ電流分による励磁効果が現われ、 E_{uv} の無負荷電圧を押し上げている傾向が見られる。図15は、 $n=1800\text{rpm}$ 、 $C=7.5\mu\text{F}$ とした場合の各部の実験波形を示す。発電機内部には高調波が見られるが、線間端子に接続したコンデンサによって吸収され、出力電圧には正弦波の平衡三相出力が得られる。なお線間電圧のアンバランスが、図8に示す他励回路や図12に示す図9(a)の自励回

図10 負荷特性 ($f=60\text{Hz}$)
Fig. 10. Load characteristics.

図11 $C=70\mu\text{F}$ の場合の負荷特性 ($f=60\text{Hz}$)
Fig. 11. Load characteristics at $C=70\mu\text{F}$.

図12 抵抗負荷時の実験波形
($C=60\mu\text{F}$, $I_u=2.29\text{A}$, $f=60\text{Hz}$)
Fig. 12. Experimental waveforms at resistance load.

図13 無負荷特性 ($f=60\text{Hz}$)
Fig. 13. No-load characteristics.

図 14 抵抗負荷特性 ($f = 60\text{Hz}$)
Fig. 14. Resistance load characteristics.

(a) 無負荷 $I_a = 0$ (b) 抵抗負荷 $I_a = 2.93\text{A}$
図 15 出力電圧と界磁電流の波形
($C = 7.5\mu\text{F}$, $f = 60\text{Hz}$)

Fig. 15. Waveforms of output voltage and field currents of the test generator.

路に比べて大きくなっているのは C の容量が小さいので三相負荷抵抗のアンバランスなどに敏感に反応しているためと考えられる。総合的に特性を判断すると図 9 (a) の回路が図 9 (b) の回路より優れている。図 16 は、負荷が急変した場合の過渡波形を示す。これは発電機出力 $P = 804\text{W}$ から 1038W に負荷を急増した場合で、端子電圧 E_{uv} は原動機が 3.4% 急減した影響もあって 8% 程度低下しているが、図から瞬時的に励磁電流 I_e が増加し、結果として界磁電流 i_{f1} も増加して電圧降下を抑制していることがわかる。

図 16 負荷急増時の過渡現象 ($C = 7.5\mu\text{F}$)
Fig. 16. Transient phenomena after a step increase of the load.

7. む す び

以上、円筒形回転子に施した界磁巻線に直接ダイオードを接続することによって半波整流回路とし、固定子側から直流励磁する新構造のブラシレス 4 極三相同期発電機を提案し、試作機による実験結果を述べた。本発電機の特徴を要約すると、

(1) 固定子には主巻線とは極数の異なる直流励磁巻線を施し、円筒形回転子に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、励磁機を有しないため小形軽量でメンテナンスフリーとなる。

(2) 固定子直流励磁巻線による静止磁界は界磁電流の

交流分によってほとんど打ち消され、極数の異なる励磁巻線には交流電圧はほとんど誘導されないで、固定子直流励磁による定電圧制御が容易である。

(3) 固定子直流励磁によって回転子界磁電流を発生させるためには、エアギャップが狭いほど有効であるが、反面同期リアクタンスが大きくなり、それによる電圧降下が大きくなる。これを補償するために固定子三相主巻線と並列に進相コンデンサを使用することが有効であり、発電機内での高調波もコンデンサによって吸収され、ほぼ正弦波の平衡三相交流が得られる。

またこの発電機において、Y 結線の固定子三相巻線の中性点接続を開き三相全波整流器の交流側に接続し、その直流出力を直接固定子励磁巻線に供給すれば負荷電流に比例して界磁電流が増加するため、直巻励磁効果が得られコンデンサ電流による分巻励磁効果と相俟って抵抗負荷時には自動電圧調整器 (AVR) なしで自動的に平復巻特性が得られた。適当な三相誘導性負荷がなかったため実験は行っていないが、誘導性負荷に対しては界磁調整曲線をもっと高くする必要がある。一番簡単な方法は固定子励磁巻線 W の巻数を増加してタップを出し、負荷の力率に対してタップを切替える方式とするか、または三相全波整流器のダイオードをトランジスタ (又はサイリスタ) に置きかえて混合ブリッジにして AVR 動作をさせれば非常に簡単な構造の励磁機なしブラシレス三相同期発電機が得られるので、ポータブルエンジン発電機などに実用性があると考えられる。

(平成10年6月15日受付, 平成10年12月28日再受付)

文 献

- (1) 原田恭介・野中作太郎:「自動形単同期発電機」, 特許第244444号(特公昭33-2367)
- (2) 野中作太郎:「突極自動形単同期機の解析」, 電学誌81, 377~386(昭36-3)
- (3) 野中作太郎:「ブラシ無し自動形単同期発電機」, 電学誌82, 627~634(昭37-4)
- (4) 野中作太郎・幸田一弥:「ブラシなし自動形単同期発電機の特性」, 電学誌91, 1291~1298(昭46-7)
- (5) 野中作太郎・幸田一弥:「ブラシなし円筒界磁自動形単同期発電機の解析」, 電学論92-B, 205~214(昭47-3)
- (6) 野中作太郎:「電気機器Ⅱ」, 森北出版(株)第1版第26刷, 61~66(1998-3)
- (7) 例えば野中作太郎:「電気機器Ⅰ」, 森北出版(株)第1版第27刷, 298(1998-3)
- (8) 野中作太郎・小野正雄・岡田英彦:「ブラシ無し自動形三相同期発電機」, 昭39電気四学会連大, No.588
- (9) S. Nonaka & K. Kesamaru: "Brushless Separately-Excited Three-Phase Synchronous Generator without Exciter", *Proc. of Int. conf. on Electrical Machines*, Budapest, Part 2, 446-449(1982-9)
- (10) 野中作太郎・袈裟丸勝巳:「励磁機なしブラシレス三相同期発電機」, 電学論B, 105, 851~858(昭60-10)
- (11) S. Nonaka & K. Kesamaru: "Analysis of Voltage-Adjustable Brushless Synchronous Generator without Exciter", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-25 no.1, 126-132(1989-1/2)

- (12) 野中作太郎・袈裟丸勝巳・堀田一夫:「励磁機なしブラシレス三相同期発電機の解析」, 電学論D, 112, 483~489(平4-5)
- (13) S. Nonaka: "A New Brushless Excitation Method for Three-Phase Synchronous Generator", *Proc. Int. Aegean Conf. on Electrical Machines and Power Electronics*, Kusadasi, Turkey, vol.2/2, 474-496(1995-7)
- (14) 野中作太郎・田中典幸・藤吉敦志・安藤 勲:「新方式ブラシレス円筒形 2 極三相同期発電機の特性」, 平6電気学会全大, No. 811
- (15) 野中作太郎・田中典幸:「ブラシレス円筒形 2 極三相同期発電機の進相コンデンサ容量と特性の関係」, 平7電気学会全大, No. 989
- (16) S. Nonaka: "Novel Stator-Excited Brushless Cylindrical-Rotor Type Three-Phase and Single-Phase Synchronous Generators", *Proc. Int. Conf. on Electrical Machines*, Hangzhou, P. R. China, 259-264(1995-8/9)
- (17) 野中作太郎:「ブラシレス円筒形 4 極三相同期発電機の一方式」, 平6電気学会全大, No. 809
- (18) 野中作太郎・大本真生:「ブラシレス円筒形 4 極三相同期発電機」, 平9電気学会全大, No. 1082
- (19) 野中作太郎・大本真生:「励磁機なしブラシレス円筒形 4 極三相同期発電機」, 平10電気学会産業応用部門全大, No. I-11
- (20) 深見 正・宮本隆太郎・宮本紀男:「異極磁界を重量した回転機の径方向電磁力に関する考察」, 電学論D, 114, 1304~1305(平6-12)
- (21) 柴田福夫・香林利男:「励磁機なしブラシレス直流自励三相同期発電機」, 電学論B, 105, 627~633(昭60-7)
- (22) 猪上憲治・山下英生・中前栄八郎・藤川隆幸:「無励磁機方式のブラシレス自励三相同期発電機」, 電学論D, 112, 569~578(平4-6)
- (23) 深見 正・高香 滋・宮本紀男・柴田福夫:「三相同期発電機の新しい自己励磁法」, 電学論D, 114, 1083~1089(平6-11)
- (24) 深見 正・川井隆弘・宮本紀男:「自己調節形ブラシレス自励三相同期発電機」, 電学論D, 115, 1179~1185(平7-9)
- (25) 深見 正・近藤 猛・宮本紀男:「自己調節形ブラシレス自励三相同期発電機の解析」, 電学論D, 118, 788~795(平10-6)
- (26) T. F. Chan, Lie-Tong Yan: "Performance Analysis of a Brushless and Exciterless A. C. Generator", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 1, 32-37(1997-3)

野 中 作太郎 (終身員) 1928年11月12日生。1952年3月九州大学電気工学科卒業。1954年同大学工学部講師, 助教授をへて1967年から1992年まで同教授。ブラシレス同期発電機, パワーエレクトロニクス, リニアモータ, 磁気浮上式鉄道などの研究に従事。1946年電気学会論文賞, 1985年IEEE/IAS論文賞, 1992年電気学会業績賞受賞, 現在, 九州大学名誉教授, 近畿大学九州工学部教授, 学校法人九州電気専門学校校長。工学博士。1980年以降ICEM運営委員会委員, 1986年以降IEEE/IAS電気機械委員会委員。

大 本 真 生 (正員) 1973年4月19日生。1996年3月近畿大学九州工学部電気工学科卒業。1998年3月同大学産業技術研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。同年4月日立機電工業株式会社入社, 現在に至る。在学中はブラシレス同期発電機に関する研究に従事。