UDC 621.313.292-8: 537.633.2
531.767.082.74

論文

52-B 19

新形式のブラシなし直流速度発電機について

正員 須藤 二 全 (群馬大)

正員 戸 恒 明 (群馬大)

非会員 佐々木 義 智 (群馬大)

1. ま え が き

各種制御系における速度検出あるいは速度帰還要素として、これまでドラッグカップ形2相誘導速度発電機及び直流速度発電機が多く用いられてきた。

前者はブラシなどの機械的摺動部分を持たない簡易な構成と回転子の慣性モーメントが小さく、高度な対称性を有する点で優れているが、静止時の残留電圧、出力電圧の位相角推移などの問題^{(1)~(6)}を有している。

一方、後者は本質的に残留電圧、位相角推移などの問題がなく、出力電圧傾度が大きい点で優れているが、その構造上、回転子の慣性モーメントが比較的大きく、ブラシ及び整流子による摩擦トルク、火花障害及びリップル電圧などの問題を有している。

又、近年、各種形式のブラシレス・サーボモータが多く用いられる傾向にあり、これに見合ったブラシなしの直流速度発電機の開発が要望されている。

しかしながら今日まで、これに関する報告はあまりなされておらず、かつて酒井氏及び筆者らの1名によってなされた試作報告⁽⁷⁾以外にはほとんど見当たらない。

筆者らは各種制御系に適用し得るブラシなし形式の直流速度発電機について研究をすすめ、このたびドラッグカップ形2相誘導速度発電機のもつ簡易な構成を生かした新形式のブラシなし直流速度発電機を試作し、

一応、満足すべき結果を得たので、ここにその基本的な動作特性の解析と試作結果について報告する。

2. 動作特性の解析と考察

〈2・1〉 試作発電機の構成と動作原理 第1図は永久磁石界磁、ドラッグカップ回転子及びホール素子から成る新形式のブラシなし直流速度発電機の基本原理図であり、その動作は次のように説明される。

すなわち、発電機の回転子軸が一定速度 ω で駆動された場合、ドラッグカップ回転子には直流磁界に基づく速度起電力を生じ、定常状態において第1図に示すような一定の電流分布を生ずる。この回転子電流によって界磁磁界と直角な方向に発生する磁界 B がホール素子の面に垂直に印加されるようにホール素子を配置し、ホール素子の電流端子(1-2)に直流電流を供給すれば、その電圧端子(3-4)からは回転子軸の回転速度に比例した大きさの直流ホール出力電圧が発生する。このホール出力電圧は入力速度の正、逆転に伴ってその極性が変化するので、これを利用してブラシなしの直流速度発電機を構成させることができる。

第1図 新形直流速度発電機の基本原理

Fig. 1. Basic principles of a new type DC rate generator.

New Type Brush-less DC Rate Generator. By Tsugumasa Suto, Member, Akira Tozune, Member, Yoshisato Sasaki, Non member (Faculty of Engineering, Gunma University.)

須藤二全: 正員, 群馬大学工学部電気工学科

戸恒 明: 正員, 群馬大学工学部電気工学科

佐々木義智: 群馬大学工学部電子工学科

第 2 図 動作解析の説明図

Fig. 2. Schematic diagram for performance analysis.

〈2・2〉 出力電圧表示式の誘導 動作特性の解析に当たり、回転子周辺の磁束密度 B_θ が下記のように正弦波状に分布するものと仮定し、

$$B_\theta = B_m \sin \theta_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

第 2 図に示すようにドラッグカップ回転子上に 1 ターンの仮想コイルを設け、その有効軸長及び半径を l , r とする。

いま、静止状態にある回転子を $\omega(t)$ なる任意の速度入力で駆動した場合を考えれば、前記仮想コイルに生ずる速度起電力 $e(t)$ は次のように表わされる。

$$e(t) = 2 B_m l r \omega(t) \sin \theta_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$\theta_i = \theta(t) + \theta_0$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

θ_0 : 初期角

仮想コイルの抵抗を R , 自己インダクタンスを L とすれば、仮想コイルを流れる電流 $i(t)$ との間に次の関係が成立する。

$$R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = e(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

従って、電流 $i(t)$ は

$$i(t) = (2 B_m l r / L) \varepsilon^{-t/T} \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \omega(t') \sin \{ \theta(t') + \theta_0 \} dt' \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し、 $T = L/R$

となり、仮想コイル周辺の磁気抵抗を $\mathcal{R}$ とすれば、電流 $i(t)$ によって仮想コイル面に直角に生ずる磁束密度 $h(t)$ の横軸成分 $b(t)$ は

$$b(t) = \{ i(t) / 2 r l \mathcal{R} \} \sin \{ \theta(t) + \theta_0 \} \quad \dots\dots (5)$$

となる。いま、回転子全体についての全仮想コイル数を N とすれば、その合成磁束密度 $B(t)$ は

$$B(t) = (N/\pi) \int_0^\pi b(t) d\theta_0$$

$$= (B_m / 2 \mathcal{R} L r) \varepsilon^{-t/T} \left[\cos \theta(t) \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \omega(t') \cdot \cos \theta(t) dt + \sin \theta(t) \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \omega(t') \sin \theta(t) dt \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $L/N \equiv L_r$, $R/N \equiv R_r$

となる。上記磁界中に、その面が磁界の方向と直角になるように配置されたホール素子のホール係数を R_H , その厚みを d とし、これに通ずる直流電流を I とすれば、上記磁束密度 $B(t)$ に基づいて発生するホール出力電圧 $e_o(t)$ は

$$e_o(t) = R_H I B(t) / d \\ = (K R_H I / L_r) \varepsilon^{-t/T} \left[\cos \theta(t) \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \omega(t') \cdot \cos \theta(t) dt + \sin \theta(t) \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \omega(t') \sin \theta(t) dt \right] \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 $K \equiv B_m / (2 d \mathcal{R})$

上記 (7) 式はその回転子軸に任意の速度入力 $\omega(t)$ が加えられた場合の出力電圧の一般表示式である。

〈2・3〉 過渡応答の解析 次に本速度発電機の基本的な応答特性を明らかにするために、回転子軸に下記に示すステップ状速度入力

$$\left. \begin{aligned} \omega(t) &= \omega_0 u(t) \\ \theta(t) &= \omega_0 t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

が加わった場合の過渡応答について考察する。

この場合の発電機出力電圧は (7) 式に (8) 式の条件を適用することにより、次のように表わされる。

$$e_o(t) = (K R_H I / L_r) \omega_0 \varepsilon^{-t/T} \left[\cos \omega_0 t \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \cdot \cos \omega_0 t' dt' + \sin \omega_0 t \int_0^t \varepsilon^{t'/T} \sin \omega_0 t' dt' \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9) 式の積分を解けば、

$$e_o(t) = \frac{K R_H I \omega_0 \varepsilon^{-t/T}}{L_r \{ (1/T)^2 + \omega_0^2 \}} \left[\cos \omega_0 t \left\{ \varepsilon^{t/T} \left(\frac{1}{T} \cos \omega_0 t + \omega_0 \sin \omega_0 t \right) \right\}_0^t + \sin \omega_0 t \left\{ \varepsilon^{t/T} \left(\frac{1}{T} \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t \right) \right\}_0^t \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

となり、これを整理すれば

$$e_o(t) = \frac{(K R_H I / L_r) \omega_0 T}{\{ 1 + (\omega_0 T)^2 \}} [1 - \sqrt{1 + (\omega_0 T)^2} \cdot \varepsilon^{-t/T} \cos \{ (\omega_0 T)(t/T) + \tan^{-1}(\omega_0 T) \}] \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。上記 (11) 式は $\omega_0 u(t)$ なるステップ状速度入力加わった場合の発電機出力電圧の表示式であり、その過渡項に余弦的に変化する減衰振動項を含んでいることが観察される。

なお、(11) 式中の $(\omega_0 T)^2$ なる項は、その速度特性に非直線性を導入するものであり、良好な特性を得るためには

$$(\omega_0 T)^2 \ll 1 \quad \text{rad}^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる関係を満足することが望ましく、このような条件が成立する場合には、(11) 式は次のように簡略化され、一次遅れ系と同様な表示式が得られる。

$$e_0(t) = (K R_H I / L_r) \omega_0 T (1 - e^{-t/T}) \quad \dots (13)$$

ここでは、(11)、(13) の両式を用いてステップ応答特性を計算し、両者を比較して考察した。

すなわち、 $K R_H I / L_r \equiv 1$ とおき、通常回転子時定数 T と動作速度の範囲を考慮して、 $\omega_0 T$ を 0.1, 0.25, 0.5 の 3 通りに選び、それぞれについての応答特性を計算し、基準化した時間 t/T について第 3 図に示した。同図の実線は (11) 式による計算結果で、 $\omega_0 T$ が 0.1 及び 0.25 の場合は単純な 1 次遅れ系とはほぼ同様な応答特性を示し、 $\omega_0 T = 0.5$ の場合にのみ、初期の立上りに続いて僅かではあるが、振動的な応答を生じていることが観察される。又、同図の破線は (13) 式による計算結果であり、これらは、1 次遅れ系の応答を示すことは明らかであるが、 $\omega_0 T = 0.1$ の場合には (11) 式による精密計算結果と 1% 以下の誤差範囲で、立上り特性から最終値に至るまで完全に一致することが確かめられた。しかしながら、 $\omega_0 T$ が 0.25 から 0.5 と増加するにつれて (11) 式中に含まれる $(\omega_0 T)^2$ の項の影響が増大し、両者間に大きな相違を生ずることは同図に示されたとおりである。以上の結果から

$$\omega_0 T \leq 0.1 \quad \text{rad} \quad \dots\dots\dots (14)$$

なる関係が成立する場合には、出力電圧のステップ応答は、事実上、回転子の電気的時定数 T によって定まる 1 次遅れ系の応答と見なすことができる。

このような回転子の電気的時定数 T に基づく出力電圧の応答遅れは、ドラッグカップ回転子の素材に高抵抗材料を用いるか、そのギャップ長を比較的大きく選定することによって改善が計られるが、一方、これによって出力電圧感度が低下し、 S/N 比が悪化するのので十分な注意が必要である。

しかしながら、本文に述べた試作機の電気的時定数 T は 0.2~0.8 ms 程度のかかなり小さな値であり、通常のサーボモータのタコジェネレータに用いる場合に

第 3 図 出力電圧のステップ応答特性

Fig. 3. Step response characteristics on the output voltage.

は、このような応答遅れは実用上、何んら問題にならないものと考えられる。

〈2・4〉 定常特性の解析 出力電圧の定常応答特性は (11) 式における過渡項である第 2 項を省略することにより次のように表わされる。

$$E_0 = (K R_H I / R_r) \cdot \frac{\omega_0}{1 + (\omega_0 T)^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

この場合の速度特性には $(\omega_0 T)^2$ なる項に基づいて次式で示される非直線誤差 ε_v が導入される。

$$\varepsilon_v = \frac{(\omega_0 T)^2}{1 + (\omega_0 T)^2} \times 100 \quad \% \quad \dots\dots\dots (16)$$

従って、回転速度に正しく比例した直流出力電圧を得るためには、その最高動作速度 ω_{0m} において $(\omega_{0m} T)^2 \ll 1 \text{ rad}^2$ なる関係が成立することが必要であり、この条件が満足される場合には (15) 式は次のように表わされ、理想的な出力電圧特性が得られる。

$$E_0 = (K R_H I / R_r) \omega_0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

(16) 式に基づいて動作速度の最大値を $\omega_{0m} \text{ rad/s}$ 及び $N_{0m} \text{ rpm}$ で表わし、 $\omega_{0m} T \text{ rad}$, $N_{0m} T \text{ rev}$ と非直線誤差 ε_v との関係を計算した結果を第 1 表に示した。

同表に見られるように $\omega_{0m} T$ の増加と共に非直線誤差は漸次、増大するが、 $\omega_{0m} T \leq 0.1 \text{ rad}$, あるいは $N_{0m} T \leq 0.955 \text{ rev}$ なる関係が満足される場合には、その非直線誤差 ε_v は 1% 以下となり、出力電圧近似式 (17) 式が誤差 1% 以内で成立し、理想的な定常応答特性が得られることになる。

3. 実験結果の考察

次に試作発電機の定常応答特性の実験結果について述べる。試作したブラシなし直流速度発電機、ドラッグ

第 1 表 定常特性における非直線誤差に及ぼす $\omega_{0m} T$ の影響

Table 1. Effects of $\omega_{0m} T$ on the nonlinearity error in steady-state response characteristics.

$\omega_{0m} T$ (rad)	$N_{0m} T$ (rev)	ε_p (%)
0.05	0.478	0.25
0.10	0.965	0.99
0.15	1.43	2.20
0.20	1.91	3.85
0.25	2.39	5.88
0.30	2.87	8.26
0.35	3.34	10.9
0.40	3.82	13.8
0.45	4.30	16.8
0.50	4.78	20.0

(注) ω_{0m} : rad/s, N_{0m} : rpm, T : s

カップ回転子及びホール素子の写真を第 4 図に示す。試作機の界磁用マグネットには H 社製ハイレックスを、ホール素子には D 社製の 5 GF-MS-IFS を用いた。

本実験には回転子の電気的時定数がそれぞれ 0.82, 0.41 及び 0.21 ms である A, B, C 3 機種の供試発電機を用い常温 25°C にて、0~8,000 rpm の速度範囲にわたり、出力電圧の速度特性を実測し、これを第 5 図に示した。

図の低速度領域においては良好な直線性が観察されるが、回転速度の増加に伴って漸次、出力電圧特性に飽和の傾向を生じ、この傾向は時定数 T が最も大きい A 機において特に顕著に現われている。これは先に述べた非直線誤差に基づくものであり、その影響をより明確に考察するため各供試機についての特性計算式を用いた。

すなわち、各供試機についての低速度領域における出力電圧こう配の実測結果から (15) 式の出力電圧傾度 $K R_H I / R_r$ を定め、回転速度を N_0 rpm を用いて表わせば、各供試機について、それぞれ、次の特性計算式が得られる。

$$A \text{ 機: } E_0 = 2.48 \times 10^{-2} N_0 / (1 + 7.37 \times 10^{-9} N_0^2) \quad \text{mV} \dots (18)$$

$$B \text{ 機: } E_0 = 1.09 \times 10^{-2} N_0 / (1 + 1.84 \times 10^{-9} N_0^2) \quad \text{mV} \dots (19)$$

$$C \text{ 機: } E_0 = 5.25 \times 10^{-3} N_0 / (1 + 4.84 \times 10^{-10} N_0^2) \quad \text{mV} \dots (20)$$

(18)~(20) 式により各供試機の出力電圧特性を計算し、これを第 5 図に示した。

各供試機についての計算結果は同図に見られるように、いずれも実験結果と極めて良く一致し、前記の特性解析が妥当であり、且つ、これにより十分な精度で

a=ドラッグカップ回転子
b=ホール素子

第 4 図 試作直流速度発電機と主要部品

Fig. 4. DC rate generator manufactured for trial and its principal parts.

第 5 図 試作直流速度発電機の速度-出力電圧特性

Fig. 5. Speed-output voltage characteristics on the sampled rate generators.

特性を考察し得ることが示された。

上記特性計算式に基づいて各供試機の非直線誤差を (16) 式により計算した結果を第 2 表に示した。

同表において、回転子時定数 T の最も大きな A 機の場合には、4,000 rpm において約 11%, 8,000

第 2 表 試作速度発電機における非直線誤差の数値例

Table 2. Numerical examples of nonlinearity errors on the sampled rate generators.

回転数 N_0 (rpm)	非直線誤差 ε_p (%)		
	供試機 A	供試機 B	供試機 C
1,000	0.73	0.18	0.05
1,170	1.00	0.25	0.07
2,000	2.86	0.73	0.19
2,340	3.89	1.00	0.26
3,000	6.22	1.63	0.43
4,000	10.6	2.86	0.77
4,570	13.3	3.70	1.00
5,000	15.6	4.40	1.19
6,000	21.0	6.21	1.71
7,000	26.5	8.27	2.31
8,000	32.1	10.5	3.00

rpmにおいて32%程度の非直線誤差を生ずるが、回転子時定数 T の一番小さいC機の場合には、4,000 rpmにおいて約0.8%、8,000 rpmにおいて3%の非直線誤差にとどまることが示された。なお、同表には各供試機について、その非直線誤差が1%に達する回転速度も併せて示した。

すなわち、非直線誤差の許容値を1%とした場合には、A機では、1,170 rpm、B機では、2,340 rpm、C機の場合には、4,570 rpm以内にその動作範囲が限定されることになる。

4. むすび

以上、このたび開発した、新しい形式のブラシなし直流速度発電機について基本的な動作特性を明らかにし、出力電圧の表示式を示した。又、3機種の試作発電機について出力電圧の速度特性を実測し、その非直線誤差について考察した。

本形式の直流速度発電機は巻線がなく、永久磁石界磁、ドラッグカップ回転子及びホール素子のみから成り、容易に小形化し得る極めて簡易な構造を有している。試作機の回転子の慣性モーメントはA機は $0.34 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$ 、B機は $0.135 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$ 、C機は $0.33 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$ とこれまでの速度発電機にくらべて1けた以上小さな値であり、各種のサーボモータと組合わせても、その加速性に及ばず影響は事実上、無視することができる。

更に回転子には構造的に对称性、均一性の優れたドラッグカップ回転子を使用しているため、従来の直流速度発電機において除去することが困難であった出力電

圧のリップル成分も本形式の場合には本質的に存在せず、試作機による実験結果においても、リップル電圧は全く認められず良好な直流出力電圧が得られた。

本形式の速度発電機における一つの問題点である出力電圧の速度特性における非直線誤差は、その最高動作速度 $\omega_{0m} \text{ rad/s}$ と回転子の電氣的時定数 Ts とが、 $\omega_{0m} T \leq 0.1 \text{ rad}$ なる関係を満足するように回転子の電氣的時定数を選定することにより、事実上その影響を除くことができる。

一方、これによる出力電圧の低下は必要に応じ、IC増幅器などで補うとともに使用するホール素子になるべくホール係数の大きなものを用いるなどの配慮により改善することができる。

なお、今後の問題として出力電圧の温度依存性、ならびに周波数応答特性などが挙げられるが、これについては今後、検討する予定である。

終りに本研究に当り、供試機の製作をはじめ種々、御協力頂いた日本サーボ株式会社開発部ならびに設計部の各位に厚くお礼を述べる。

(昭和50年9月22日受付、同51年5月6日受付)

文 献

- (1) R. H. Frazier: Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs **70**, II, 1894 (1951)
- (2) 須藤: 電学誌 **78**, 1203 (昭 33-9)
- (3) 須藤: 電学誌 **78**, 1421 (昭 33-11)
- (4) 須藤: 電学誌 **79**, 1039 (昭 34-8)
- (5) 須藤: 電学誌 **80**, 873 (昭 35-7)
- (6) 須藤: 電学誌 **80**, 883 (昭 35-7)
- (7) 酒井・須藤: 昭 35 電気学会東京支部大会 No. 140