

ブラシレス電動機の研究(第2報)

陶山俊道*・足立宜良**

Study on the Brushless Motor (2nd Report)

Shundō SUYAMA and Takayoshi ADACHI

Abstract

D.C. series motor has a good characteristic between torque and speed. But the mechanical commutator supplying armature with A.C. makes troubles for management of the motor. The brushless motor consists of a squirrel-cage induction motor, a thyristor commutator and a gate circuit. The thyristor commutator is electrical frequency convertor and is substituted for mechanical commutator.

It was already reported that the brushless motor had analytically a similar characteristic of D.C. series motor. In this paper, the experimental torque and efficiency vs. speed characteristics were compared with analytical those. The resistance of the reactor which was connected in D.C. circuit had an effect on those characteristics. The experimental torque characteristics nearly coincided with the analytical that, and it was confirmed that the brushless motor had a similar characteristic of D.C. series motor in analytically and experimentally. But the experimental efficiency was below the analytical that. This difference was due to that the loss of the induction motor did not take into consideration in analysis.

1. 緒言

一般に電車, 巻上機, 掃除機等では, トルクは低速のとき大きく, 高速では小さいという特性を必要とし, これには直流直巻電動機や交流整流子電動機が適している. 電動機が回転するためには, 少なくとも固定子または回転子のどちらか一方は交流である必要がある¹⁾, 直流電動機では, 回転子巻線に交流を供給するために摩擦する機械整流子を有している. また, 交流整流子電動機では, 周波数を変換するため, やはり整流子を有している. 機械的整流子は保守, 点検等の面でかなりわずらわしい問題であり, これらの電動機において大きな欠点となる.

3相かご型誘導電動機と 120° 通電型サイリスタインバータとを組み合わせ, これにゲート回路を接続し, 閉ループを構成してブラシレス電動機を試作した. この電動機は上記の機械的整流子の問題を, サイリスタインバータによる電氣的周波数変換器によって解決し, 直流直巻電動機と類似した速度(n)—トルク(T)特性

を有している利点がある. ブラシレス電動機の n - T 特性について, 理論的解析を行なった結果はすでに報告した²⁾.

この論文では, 作成したブラシレス電動機について, 実験より求めた n - T 特性および効率と, 理論的解析をしたこれらの特性を比較検討し, さらに, 直流回路に接続したリアクトルが n - T 特性にどのように影響を及ぼすかについて実験考察を行なった.

2. ブラシレス電動機の原理

ブラシレス電動機は, 保守, 点検のわずらわしい機械的整流子の役目を, 電氣的な整流子すなわちインバータに置きかえて, 変速度電動機としての特性を持つように構成される.

この電動機のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す. 3相電源を全波整流し, リアクトルを通して十分な直流にする. 得られた直流を, インバータで3相交流に変換して, 誘導電動機の固定子に供給する. インバータの周波数は回転子の回転速度に伴って変化する

* 大学院工学研究科電気工学専攻

** 電気工学教室

る。すなわち、回転子シャフトに取りりつけた円盤にスリットを設け、回転子が一定角度回転するごとに光がスリットを通過し、フォトランジスターに回転数に比例したパルス信号が得られるようにして、この信号でインバータSCRをトリガして転流を行なわせる。このとき、回転子は固定子の回転磁界に対して一定のすべりを持って回転し、一定すべり制御が可能である。ゲート回路は、円盤スリットより得られたパルス信号をカウントし、6個のSCRのうちどのSCRをトリガするかという分配作用を行なう。

以上のようにすると、直流直巻電動機において、電機子の回転速度によって周波数が変化すると同様な結果を得ることができる。

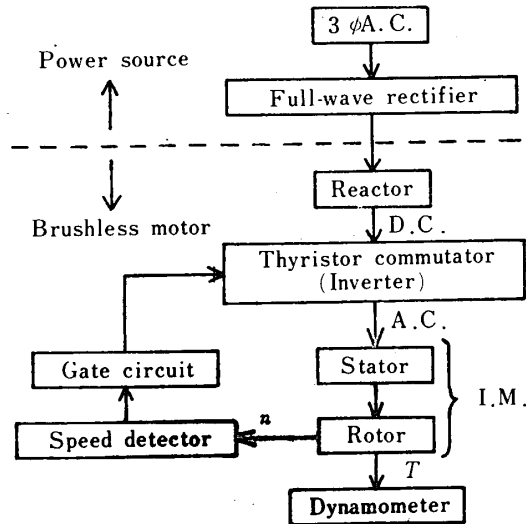


Fig.1 Block diagram of brushless motor

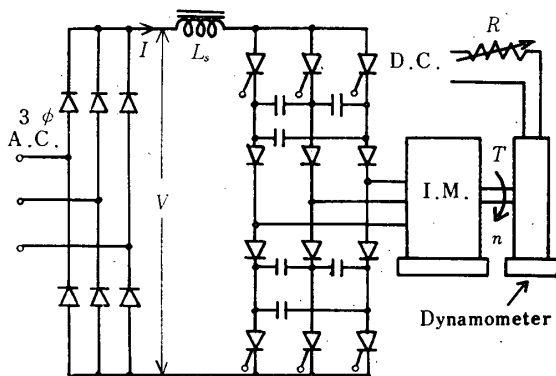


Fig.2 Schematic diagram of brushless motor

3. 実験装置

使用した実験装置をFig. 2に示す。この装置を構成する各装置はつぎの通りである。

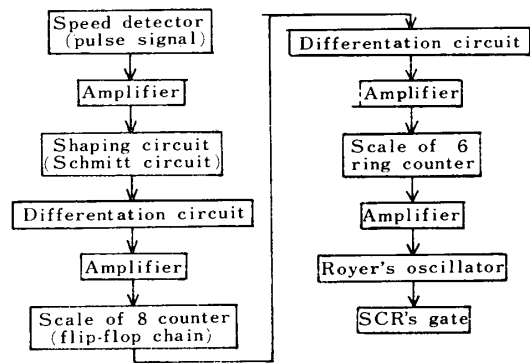


Fig.3 Block diagram of gate circuit

- 1) 整流回路は、尖頭逆電圧 400V, 平均整流電流 50AのSi ダイオード 6 個を使用した全波整流器である。
- 2) リアクトル L_s はつぎの 2 種類を使用した。
 - インダクタンス 600mH, 電流容量 20A, 抵抗 1.5Ωのもの 3 個
 - インダクタンス 1200mH, 電流容量 30A, 抵抗 1.9Ωのもの 1 個
- 3) インバータはつぎの 4 種類を用い、くわしい回路構成はFig. 2に示す。
 - SCR: 尖頭逆耐電圧 400V, 平均順電流 50A, 尖頭ゲート順電圧 10V, 尖頭ゲート電流 2 Aのもの 6 個
 - Si ダイオード: 尖頭逆耐電圧 300V, 平均順電流 20Aのもの 6 個
 - 転流コンデンサ: 容量 20μF, 定格電圧 400V, 電流 3 A, 周波数 60Hz, 1.2kVAのもの 6 個
 - 転流補助回路: 起動時に転流コンデンサをあらかじめ充電しておくための回路である。
- 4) 3 相かご型誘導電動機はこの目的に特別設計したのではなく、通常のものである。
馬力 7.5HP, 定格電圧 200V, 電流 19.5A, 周波数 60Hz, 回転数 1,800r.p.m., 4 極, 安川電機製作所
- 5) 渦流制動型動力計
馬力 1 HP, 直流励磁電圧 100V, 回転数 1,800 r.p.m., 昭和電機製造 K.K. (昭和37年製作)
- 6) 速度検出装置はつぎのものから成る。
 - 円盤 (ベーク板)
直径 24.5cm, 厚さ 2.7mm
スリットの数 $\begin{cases} s=0.04 \cdots \cdots 100 \text{個} \\ s=0.20 \cdots \cdots 120 \text{個} \end{cases}$
(直径 2.8mmφ)
 - フォトランジスタ: 遮断周波数 20kHz, PD 3 L (NEC)

フォトトランジスタで得られたパルス信号は、増巾、整形 (Schmitt 回路)、微分されてゲート回路に送られる。

7) ゲート回路はFig. 3のブロックダイアグラムに示される装置から構成されるが、くわしい回路説明は省略する。

フォトトランジスタからSCRゲートまで、総合的に見た最高作動周波数は5kHz (実験結果) である。

4. 速度—トルク特性

4.1 計算式

ブラシレス電動機は、電機子に3つの巻線を持った直流機として見る事が出来るので、これを2巻線軸に座標変換を行なって解析したトルク T と電圧 V の式はつぎのように表わされる²⁾。

$$T = \frac{1}{\tau} 2p \frac{M^2}{L_K} I^2 \left\{ \frac{\sin^2 \varphi}{\chi K} \times \left\{ \xi \cos \left(-\frac{\pi}{3}s + \frac{\pi}{6} - 2\varphi \right) - \cos \left(\frac{\pi}{6} + 2\varphi \right) - \xi^2 \cos \left(\frac{\pi}{6} - 2\varphi \right) + \xi \cos \left(-\frac{\pi}{3}s + \frac{\pi}{6} + 2\varphi \right) \right\} - \tau \sin \varphi \cos \varphi \right\} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1)$$

$$V = I \left[\left[2R + \frac{2}{\tau} \frac{M^2}{L_K} \sin \varphi \left\{ \frac{\xi}{K} \times \left\{ \sin \left(\frac{\pi}{3}s + \varphi \right) - \xi \sin \varphi \right\} - \sin \left(\frac{\pi}{3} - \varphi \right) \right\} \right] \right] \quad (\text{V}) \quad (2)$$

ただし

- ω_0 : 電動機の同期角速度
- τ : 転流からつぎの転流までの期間 ($=\pi/3\omega_0$)
- p : 極対数
- R : 座標変換後の1次巻線抵抗
- R_K, L_K : 座標変換後の2次巻線抵抗, インダクタンス
- M : 座標変換後の1次2次相互インダクタンス
- χ : 時定数の逆数 ($=R_K/L_K$)
- s : すべり
- φ : 位相角 ($=\tan^{-1}\chi/(1-s)\omega_0$)
- ξ : τ によって定まる定数 ($=e^{-\chi\tau}$)
- K : ξ, s の関数 ($=1 + \xi^2 - 2\xi\cos\pi s/3$)

ここで、速度 n と同期角速度 ω_0 には

$$n = \frac{30(1-s)}{\pi p} \omega_0 \quad (\text{r.p.m.}) \quad (3)$$

の関係がある。したがって、(1), (2)式から

$$T = V^2 \cdot f(n, s) \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (4)$$

となって、この $n-T$ 特性式は V, s をパラメータに持つ式となる。ただし、 $f(n, s)$ は n と s の関数であるが、(1), (2)式より非常に複雑になるのでここでは省略する。

4.2 リアクトルの影響

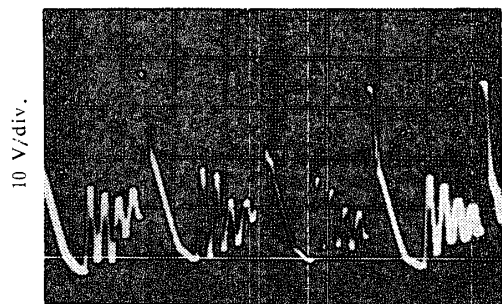
4.1で述べた $n-T$ 特性の式を求めるにあたってリアクトル L_s は直流入力電流が1 mode にわたって平滑であると見なせるほど大きな値を有するものと仮定した。また式の中では1 mode 中に L_s の磁束鎖交数の増加分として

$$\frac{1}{\tau} L_s \left[i(\tau) - i_+(0) \right] \quad (5)$$

として現われた²⁾。 $i(\tau), i_+(0)$ は転流前後の直流回路の電流であり、ともにほぼ直流電流 I である。したがって(5)式は零となるので省略した。

また、リアクトルは電流の平滑作用をするだけでなく、転流コンデンサとともに、転流による固定子巻線のエネルギー受授に関与する。このことは、Fig. 4のリアクトルの両端電圧波形がきれいな直流でないことから確認できる。

ところで、実際に実験を行なってみるとリアクトルの値が変わると、同一速度でもトルクの値が異なった。これは、リアクトルの純抵抗分による電圧降下が影響を及ぼすためと思われる。この電圧降下が、低速で入力が大きいきに大きくなり、インバータ入力電圧はこの影響で一定に保つことができない。これには電圧計をリアクトルの後に接続すれば、電圧一定制御ができそうであるが、前述のように転流による固定子巻線のエネルギー受授に関与することから、電圧波形が乱れるのでこの目的は達成できない。



5 mmsec/div.
 $L_s=1.8 \text{ (H)}, V=40 \text{ (V)}, I=6 \text{ (A)}, n=2100 \text{ (r.p.m.)}$

Fig.4 Waveforms of reactor L_s voltage

4.3 実験および考察

n - T 特性および効率 η を得るための実験要領はつぎの通りである。

- 1) ブラシレス電動機に供給する直流電圧 V を一定に保つ。このとき動力計励磁電流は零にしておく。
- 2) インバータ SCR を外部から強制的にトリガして起動する。この信号は、パルス発生器の信号を6進リングカウンタ前段に加えて得る。
- 3) 起動後、動力計励磁電流を変化すると速度 n 、動力計指示値 W が変化し、出力と負荷(動力計)のバランスがとれたところで落ち着く。
- 4) 入力電圧 V (V)、入力電流 I (A)、電動機回転数 n (r.p.m.)、動力計回転数 n_p (r.p.m.)、動力計指示値 W (g) を測定する。
- 5) 3), 4) を繰り返す。

(3)式および4.2節からも分るように n - T 特性式のパラメータとして直流電圧 V 、すべり s 、リアクトル L_s の3つが考えられる。

直流電圧 V とすべり s をパラメータとしたときの n - T 特性の実験結果を Fig. 5 と Fig. 6 に実線で示す。また、(4)式にもとづき計算して得られた特性をこれらの図中に点線で示す。なお、計算に使用した本電動機定数は、 $R=0.286\Omega$ 、 $R_K=0.175\Omega$ 、 $L_K=14.6\text{mH}$ 、 $M=61.8\text{mH}$ である。ただし、電動機定数を算定するとき仮定を含んでいるので L_K ならびに M の値は多分に誤差を含んでいる。

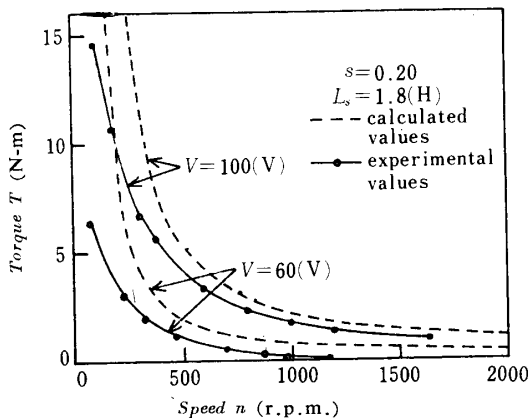


Fig. 5 Torque vs. speed characteristics (V parameter)

Fig. 5 は $s=0.20$ 、 $L_s=1.8\text{H}$ において V をパラメータとしたときの、理論と実験を比較した n - T 特性図である。 $V=100\text{V}$ の場合も、 $V=60\text{V}$ の場合も、ともに測定値が理論値よりも小さく、この傾向は低速に

おいて著しい。この原因としては、計算に使用した電動機の定数値が正確でないこと、実験における入力に比べて電動機の無負荷損の占める割合が大きいことが考えられる。また4.2節で述べたように、リアクトルの純抵抗分のため入力電圧を一定に保つことができないことも上げられる。これらの理由のため、低速では著しい違いが見られるものと考えられる。

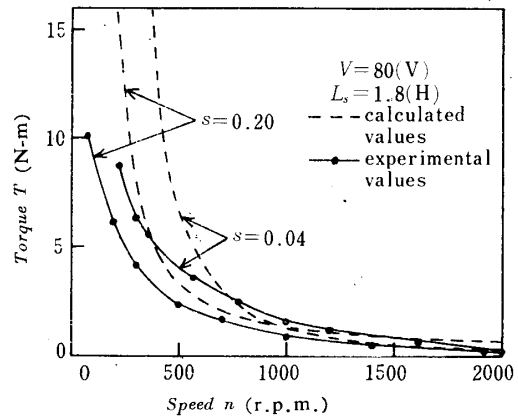


Fig. 6 Torque vs. speed characteristics (s parameter)

つぎに、 $V=80\text{V}$ 、 $L_s=1.8\text{H}$ において、すべり s をパラメータとしたときの特性図を Fig. 6 に示す。 $s=0.20$ の場合は Fig. 5 と同様であるが、 $s=0.04$ では $n=700$ r.p.m. 以上で、測定値より計算値が小さい。また $s=0.04$ と 0.20 について比較すると、理論値では、低速で $s=0.04$ の方がトルクは大きく、高速で逆になっている。これに対し、実験では全域にわたって $s=0.04$ の方が大きくなっている。この相異についても、計算に使用した電動機定数の値の誤差等が影響しているのではないかと考えられる。

ここで、一般にかご型誘導電動機は、負荷に応じて数%のすべりで運転し、巻線型誘導電動機においては比例推移によって数%から20%ぐらいのすべりで運転を行なうことができる。このかご型誘導電動機をブラシレス電動機として運転すると、たとえば、本実験における20%のように、大きいすべりまで任意に設定できることは、巻線型誘導電動機と同じ特性を示すことになる。しかし、巻線型誘導電動機はすべりが増加するにつれて、2次挿入抵抗による銅損が増加するが、このブラシレス電動機におけるカゴ型誘導電動機ではすべりの増加に対してかような損失変化が生ずることはない。さらに、負荷変化に対応して同期速度は変化するが、すべりは常に一定であるという特長を持っている。

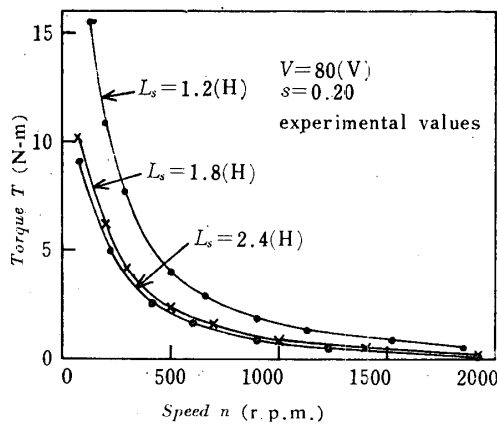


Fig. 7 Torque vs. speed characteristics (L_s parameter)

つぎに、直流回路に接続されたリアクトル L_s をパラメータとし、 $V=80V$ 、 $s=0.20$ 一定として測定した $n-T$ 特性を Fig. 7 に示す。 L_s の小さい方がトルクは大きく、 $L_s=1.8H$ と $2.4H$ の差は、 $L_s=1.2H$ と $1.8H$ の場合の差ほど大きくない。

この原因としては、 L_s が純抵抗分を持っていることが上げられる。 L_s の抵抗を直流で測定したところ $L_s=1.2H$ で 3.0Ω 、 $L_s=1.8H$ で 4.6Ω 、 $L_s=2.4H$ で 4.9Ω であった (3章参照)。したがって、 L_s が大きいとリアクトルの抵抗による電圧降下は大きくなり、実際にインバータにかかっている電圧 V は $80V$ より小さくなるため、トルクも小さくなると考えられる。このため、3種類の L_s におけるトルク曲線の差は、リアクトルの抵抗の差と傾向が類似している。

5. 効 率

ブラシレス電動機の入力 P_i は、入力電圧 V 、電流 I (実験においては、整流器出力の電圧、電流とする) とおくと

$$P_i = VI \quad (W) \quad (6)$$

である。出力 P_o は、計算においてはトルク T (N·m) が分っているので、電動機回転速度を n (r.p.m.) とするとつぎのように同期ワットで表わすことができる。

$$P_o = 2\pi \frac{n}{60} T \quad (W) \quad (7)$$

実験においては、動力計回転速度を n_p (r.p.m.)、動力計指示値を W_o (g) とするとつぎのようになる。

$$P_o = \frac{n_p \cdot W_o}{3400} \quad (W) \quad (8)$$

したがって、ブラシレス電動機の効率 η は

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100 \quad (\%) \quad (9)$$

と表わすことができる。 s をパラメータとしたこれらの効率の理論的計算値を Fig. 8 に点線で示す。また、測定値を実線で示す。

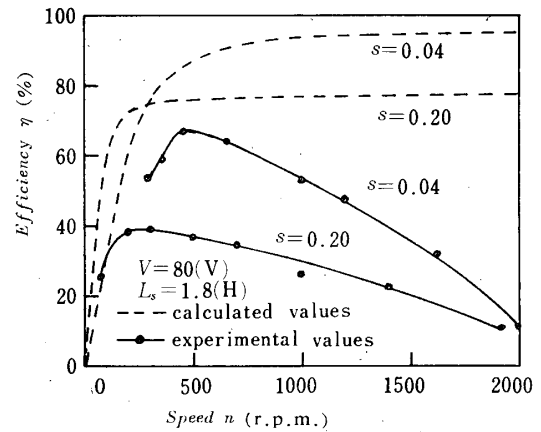


Fig. 8 Efficiency of brushless motor

計算値においては、ブラシレス電動機は非常に良い効率を持っていることが分る。 $s=0.04$ では $600r.p.m.$ 以上で 90% をこえ最高 94.8% に達する。 $s=0.20$ でも $300r.p.m.$ 以上で 75% をこえ、最高 77% に達する。また、 $300r.p.m.$ 以上では $s=0.04$ の方が効率は良いが、それ以下の回転数ではともに効率は急激に悪くなり、 $s=0.20$ の方が効率は上まわる。

実線で示される測定値は理論値よりかなり小さく、異なった様子を示している。これは、理論値では誘導電動機の無負荷損や動力計の損失等を考慮していないためである。これを考慮すると理論値はもっと悪くなる。装置の容量の関係上 $20A$ 以上の電流を流すことができず、入力 P_i が $1kW$ 前後で実験を行なった。したがって誘導電動機の無負荷損 $160W$ ($60Hz$) が大きく影響してくる。無負荷損は周波数によって異なり、低くなれば小さくなる。測定値において高速でかなり効率が悪くなっているのはこのためであると考えられる。

効率の測定値においては、 L_s の銅損が影響するので、Fig. 8 では(6)式の入力から L_s の銅損を差し引いたものを入力として計算を行なった。また、電圧 $V=80V$ 一定としてあるが、 L_s の抵抗による電圧降下のために、正確には $80V$ ではない。

6. 結 言

実験結果ならびに考察を要約するとつぎのとおりである。

- 1) 本ブラシレス電動機は、解析結果からも実験結果からも直流直巻電動機のような変速度電動機としての特性を持っていることが確認された。
- 2) トルク T は電圧 V の 2 乗に比例し、すべり s の小さい方がトルクは大きい。
- 3) 効率の理論値はかなり良い結果が得られ、これもすべりの小さい方が良いことが分った。効率の測定値は理論値よりかなり下まわったが、これは電流容量の関係から小入力で実験を行なったので、無負荷損の影響を受けたためである。この点を考慮すれば、理論より求めた効率も少し低下する。
- 4) 本電動機はすべり一定の運転であり、かご型誘導電動機でありながら、すべり 20% 運転が可能という特長を持っている。
- 5) 直流回路に接続されたリアクトル L_s は、直流電流の平滑作用だけでなく、リアクトル端子電圧波形より、固定子巻線のエネルギー受授に関与することが確認できた。

今後の問題点としてはつぎのようなことが上げられる。

- 1) 現在、通常のかご型誘導電動機を使用している

が、ブラシレス電動機に適した定数を持った電動機を使用する。これは困難な問題であるが、低速から高速にわたって良好な結果が得られるよう考慮しなければならない。

- 2) 効率を良くするには、電流容量を増して、無負荷損の影響をあまり受けない電力で使用する。
- 3) 本実験では、リアクトルの純抵抗分による損失がかなり大きい割合を占めたが、なるべく抵抗の少ないリアクトルを使用する。

最後に、本報告をまとめるにあたり、懇切丁寧なる御指導を賜った橋本清隆教授（西日本工業大学）、ならびに城市久徳氏（日立製作所）に深く謝意を表わします。また、何かとお世話になった本学技官池田隆、大学院生前原弘典、川崎元之、卒論生末沢洋介、徳本勉の諸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 宮入庄太，常広譲：電気雑誌 **OHM**，**10**，49（1962）
- 2) 城市久徳，陶山俊道：山口大学工学部研究報告，**20**，393（1970）
- 3) 常広譲，城市久徳：電気学会誌，**88**，1885（1968）

（昭和45年11月14日受理）