

巻線形誘導電動機の発電制動トルクの算定

長谷川 誠一

Calculation of dynamic braking torques of slip-ring motor

Seiichi HASEGAWA

(昭和58年10月31日受理)

When direct current is injected into the primary winding of a rotating induction motor, braking torque is produced. The braking torque, expressed in synchronous watts referred to the synchronous speed, is given by the power dissipated in the rotor resistance.

Test results are given for an experimental drive with a 3-phase slip ring motor connected to heavy inertia load.

Computed performance curves, by Harisson's method, give acceptable agreement at low speed with the experimental results.

1. ま え が き

慣性性能率の大きな負荷を駆動する巻線形誘導電動機の制動方法としてしばしば発電制動 (dynamic braking) が機械的制動に併せ用いられる。この方法は電動機と負荷機械の回転部分に蓄積された運動エネルギーを電動機二次回路 (回転子巻線) の抵抗においてジュール熱に変換して放散させて制動するものであるが、制動トルクが電動機回転速度の低下にともなって減少すること、完全に停止した場合の制動トルクが零になるという欠点がある。また電動機の効率の点からは二次巻線抵抗はできるだけ小さいことが望まれますが、誘導電動機のもつ特性上、大きな制動トルクを得るためには二次巻線の抵抗は大きくなければならないという相反する面もある。

一方、前述のような負荷を駆動する電動機をシステムに組込んで運転する場合、起動、停止の時間を適確に把握しなければならない。今回はこの目的の一階梯として Harrison の方法¹⁾による制動トルクの算定を行い、実測値と比較検討してみた。その結果制動による減速過程の低速度範囲では比較的よい近似が得られた。

2. 制動トルクの算定

Harrison の方法とは Graphical construction と称する円線図法的なもので、電動機諸定数と発電制動時の二次巻線起電力を知ることによって制動トル

クを得る。すなわち発電制動時の2次入力がかつて二次巻線回路中で銅損として消費され、これは制動トルクを与えるものとして算定するものである。

図1は制動時の誘導電動機の等価回路である。図中の各定数は次の通りである。

I_1 : 一次巻線電流 (A), V_2 : 二次巻線起電力 (V)

I_2 : 二次巻線電流 (A), R_2 : 二次巻線抵抗 (Ω)

I_m : 磁化電流 (A), R : 二次等価抵抗 (Ω)

X_m, X_2 : 磁化リアクタンスおよび二次巻線もれリアクタンス (Ω), ただし同期速度においての値で、すべて一相あたりである。

ここで I_1 は発電制動のため一次巻線に流す直流励磁電流をこれと等価な交流電流に換算し、巻線比でもって二次側に変換した値である。また二次等価抵抗 R は誘導電動機のすべりを s とすると $R = R_2/s$ という関係にある。図1から次の関係式が得ら

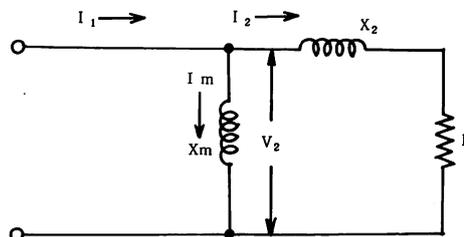


図1 制動時の等価回路

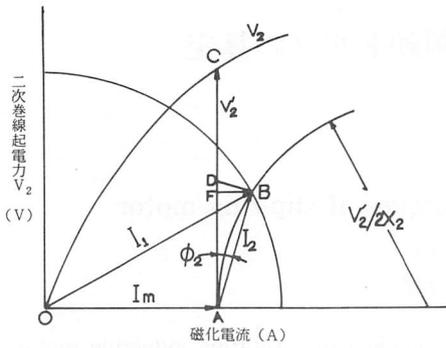


図2 Graphical construction¹⁾

れる。

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_m + \dot{I}_2 \\ \dot{I}_m &= V_2 / jX_m \\ \dot{I}_2 &= V_2 (R + jX_2) \end{aligned}$$

前述のように制動トルクは二次巻線回路内の銅損に等しいとみなして、制動トルク T は

$$T = I_2^2 R = \frac{I_1^2 X_m^2 R}{R^2 + (X_2 + X_m)^2} \quad (W)$$

とあらわされる。ここで X_m は磁気飽和のため定数として扱われない。したがって上式から制動トルクを求められるのは飽和がない場合に限定される。それで図2に示した円線図から二次入力を求める。図2の V_2 曲線は同期速度における磁化電流 I_m に対する二次巻線起電力 V_2 をあらわす。ある直流励磁電流において二次巻線起電力 $V_2'(AC)$ を得たならば制動トルクは次のようにして求められる。 I_m は V_2' によって OA にとられる。直流励磁電流を前述のように変換して I_1 を求め、その大きさを半径とし中心を O にとった四分円を描く。 I_2 はすべり s の関数である可変抵抗 R と一定リアクタンス X_2 の直列回路なので半径 $V_2/2X_2$ の円周上にとられる。この円と四分円の交点 B を得て、 $I_1 = \overline{OB}$ 、 $I_2 = \overline{AB}$ となる。ここで1相あたりの二次入力（同期ワット）は

$$T = V_2' I_2 \cos \phi_2 = \overline{AC} \times \overline{AF}$$

とあらわされ、これが制動トルクを与える。もし A から \overline{AB} に垂直な線を \overline{AC} に対して引きその交点を D とするとその条件における二次等価抵抗は

$$R = \overline{AC} / \overline{AD}$$

とあらわされる。

3. 実験装置

実験に供した電動機は出力 2(kw)、電圧 200(V)、

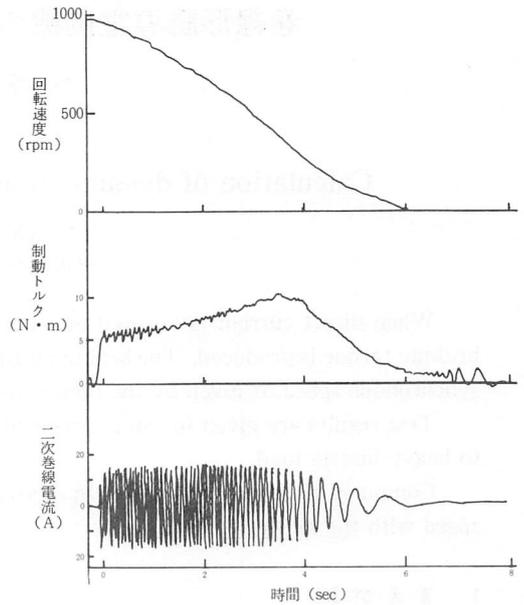


図3 制動時オシログラム
($I_1 = 18A$ 、 $R_2 = 0.21 \Omega$)

電流 9(A)、速度 920(rpm)、6極の三相巻線形誘導電動機である。電動機はトルク変換器²⁾を介して慣性負荷に直結されている。軸端には回転速度を検出するためのロータリエンコーダ(60P/R)がとりつけられている。慣性負荷としては渦電流形動力計(3kw, 1500rpm)を無励磁状態で使用した。文献3)の方法によって慣性能率を測定したところ0.164(kg·m²)で、電動機の慣性能率0.12(kg·m²)に対して十分な値である。また二次巻線回路の抵抗値は電動器附属の起動抵抗器をスリッピングを通じて附加することによって変えた。

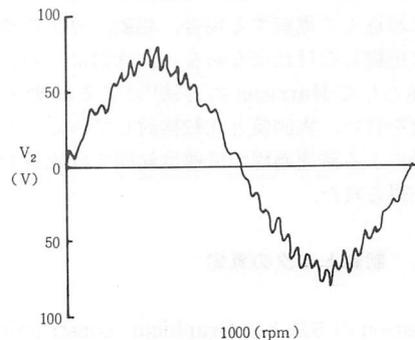


図4 二次巻線起電力波形

巻線形誘導電動機の発電制動トルクの算定

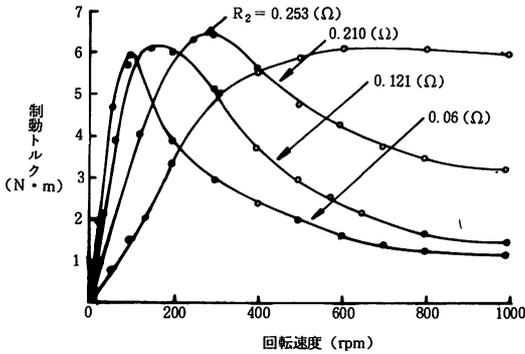


図5 実測値 ($I_1 = 14A$)

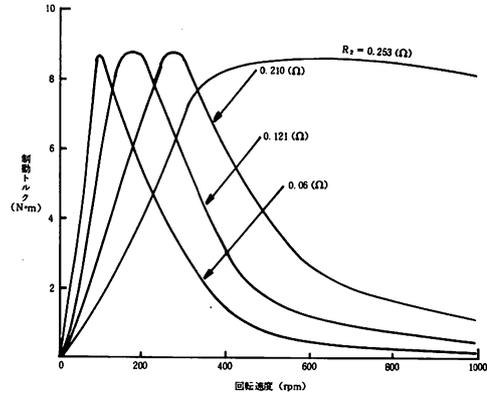


図6 算定結果 ($I_1 = 14A$)

4. 結 果

まず電動機の諸定数の測定を行った。巻線比は二次巻線回路を開放して一次巻線印加電圧を種々変化させてその電圧比を求め、平均して4.0 : 1を得た。その他の定数はいわゆる円線図法によった。その結果二次巻線の抵抗 $R_2 = 0.06 (\Omega)$ 、リアクタンス $X_2 = 0.02 (\Omega)$ を得た。

図3は発電制動時のオシログラムの一例である。制動開始と共に制動トルクは上昇し、減速しだす。減速過程のある速度で制動トルクがピークに達し、その後は減少している。トルク波形がリップルを含んでいるのは回転部分にねじれ振動がおきているためである。二次巻線起電力波形(図4)が高調波を含んでおり、波形解析したところ、トルク波形の周波数成分にほぼ符合していることがわかった。この点の詳細は後報で述べたい。減速過程における回転速度対制動トルク特性をプロットした例を図5に示した。二次巻線回路抵抗が大きい場合、1の項で述べたように制動トルクは減速にともない減少している。しかし抵抗が小さくなると低速度付近で制動トルクがピークを示し、その後は急激な減少を示している。また抵抗の減少にともない、制動トルクがピークを示す速度も低くなる。すなわち制動トルクにおいて比例推移的な変化をなしている。

次に算定についてであるが、図6のような結果が得られた。これは次のような手順で求めた。まず供試電動機を他の電動機によって同期速度(供試電動機の場合1000 rpm)で回転し、一次巻線を直流励磁した。そのときの二次巻線開放状態で二次巻線起電

力 V_2 を測定した。結果を図7に示す。また後で述べる理由から同期速度以外の速度でも同様な測定を行った。この曲線は云うなれば磁化特性に相等するもので磁気飽和的な特性を示している。Harrisonの図解法的方法をそのまま用いるならばあまりに煩雑になるので、数値計算的に求めた。すなわち図7の二次巻線起電力 V_2 と磁化電流 I_m の関係を最小二乗法によって近似し、これをテーブル化してプログラム中に組込んだ。これに他の電動機の諸定数をくりいれて制動トルクの算定を行った。図6にその結果を示した。低速度領域において算定結果は実測値と比較的よく近似した特性が得られたが、高速度領域では実測値より低く算定されている。これは定数として扱われた X_2 の値に問題があるためと考えられる。供試電動機の場合、特に R_2 と値と X_2 の値が比較的近いいため誤差が拡大されたものと思われる。この算定法で用いられた X_2 の値は円線図法の拘束

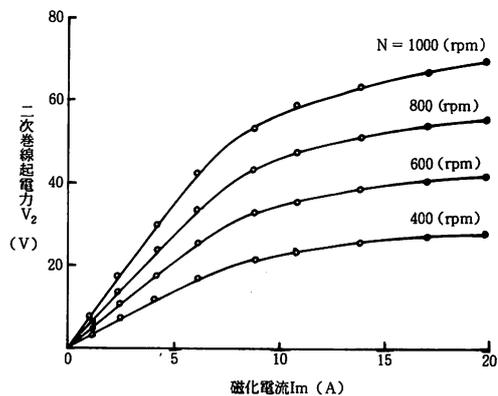


図7 二次巻線起電力特性

試験, すなわち 50 (Hz) における値であるが, 制動中の電動機の周波数は数 Hz から 50 Hz までの広範囲にわたって変化しているため, 磁気飽和の点も含めてこの影響は無視できないものと考えられる。

5. ま と め

以上の結果から今回用いた制動トルクの算定法は簡便ではあるが, 減速過程の高速領域においてはまだ問題がある。筆者は今後この算定法に次の点を加えて検討したい。すなわち図7のように測定した電動機速度低下にともなう V_2 の減少と, 二次周波数の増加 (これは X_2 の値の変化につながる) 等を結びつけた形で方程式化し, これをもとに算定を行うな

らばより正確な結果が得られるものと期待される。

6. 参 考 文 献

- 1) D. HARRISON: The dynamic braking of induction motors, PROC. IEE. Vol. 103-A, (1955)
- 2) 長谷川, 田畑
ストレインゲージによる電動機のトルク測定装置の試作, 秋田高専紀要 No. 12 (1977)
- 3) 滝沢, 小沢
小容量電動機の機械損の算定法, 昭和 42 年電気学会東京支部大会予稿 112