UDC 621.313.333:621.87

巻線形誘導電動機の反覆使用

子安英次* 奥山吉彦*
Eiji Koyasu Yoshihiko Okuyama

Intermittent Periodic Duty of Wound Rotor Induction Motor

Synopsis

In this paper, the thermal characteristic of the wound rotor type induction motors with intermittent duty, i.e. the relation of the available outputs between totally enclosed fan cooled type and totally enclosed self-ventilated type, and that of cyclic duration factor and starting cycles to the motor outputs, are described.

I. まえがき

クレーン，ホイストなどの荷役機械や鉄鋼補機などに使用される巻線形電動機は，多く反覆定格として用いられる．このたび新しく当社で系列化された1形巻線形電動機は全閉外扇形を採用し，連続定格の電動機としてのみならず，適用出力を変更して反覆定格のクレーン用電動機としても，有効な冷却効果と出力特性が得られる方式である。

本稿において，従来クレーン用として多く用いられた全閉自冷形と全閉外扇形との比較，反覆定格の場合の負荷時間率と出力の関係を述べ，さらに反覆定格において1回の負荷周期が鉄鋼補機のごとく，非常に短い用途に適用したときの出力の決定方法について理論的に検討した。

II. 全閉自冷形と全閉外扇形の比較

従来のクレーン用モータは，短時間定格で全閉自冷形を用いるのが慣習であったが，これはわが国の技術が主として英米の規格[1]を基礎として発達したことが原因である．一方欧州大陸で[2]発達した反覆定格の考え方は，クレーン用としては理論的に妥当なもので，近年この定格はIEC 規格[3]にも採用されわが国においてもクレーン用電動機として反覆定格で表示する傾向が増大しつつある。

今回当社で開発した新系列巻線形電動機も全面的に反覆定格によって表示してあるが，従来 30 分または1時間定格で表示された電動機は，負荷時間率ではどの程度に相当するか，また全閉外扇形電動機を反覆定格で使用したとき，全閉自冷形の電動機に比べどのようにすぐれている点があるか，などについて検討してみる必要がある。

今温度上昇時定数が T_a の連続定格全閉外扇形の電動機を，出力 P_c で連続運転した時，その飽和温度上昇値 θ_c が規格温度上昇値に等しくなったとする．一方この電動機を出力 P_c，負荷時間率 ε で反覆運転した時，その温度上昇値 θ_A は周知のとおり次式で示される．[4] ここで T_b は電動機の冷却時定数である。

$$\theta_A=\theta_c\frac{\varepsilon}{\varepsilon+(1-\varepsilon)\dfrac{T_a}{T_b}} \quad \cdots\cdots(1)$$

今連続定格の電動機を電気装荷と磁気装荷の配分率を一定にしさらに反覆定格の時の温度上昇が，連続定格のそれに等しくなるよう反覆定格電動機を設計したとする．温度上昇と損失および電動機出力と損失は比例すると仮定すれば，この場合の反覆定格出力 P_A は次式で示される。

$$\theta_A\frac{P_A}{P_c}=\theta_c \quad \cdots\cdots(2)$$

式(2)を式(1)に代入することにより

$$\frac{P_A}{P_c}=\frac{\varepsilon+(1-\varepsilon)\dfrac{T_a}{T_b}}{\varepsilon} \quad \cdots\cdots(3)$$

なる関係が得られる．今電動機を単一なる発熱体と考えた場合の等価的な重量を G，比熱を C，表面積を O，放熱係数を h で表わすと，熱時定数 T_a，T_b は次のように表わすことができる。

$$T_a=\frac{G\cdot C}{O\cdot h_a} \qquad T_b=\frac{G\cdot C}{O\cdot h_b} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで h_a は全閉外扇形とした時の表面放熱係数，h_b は外被を冷却風が通過しない時，すなわち全閉外扇形の停止中または全閉自冷形とした時の温度上昇中および冷却中の表面放熱係数を示す．式(4)を式(3)に代入すると

$$\frac{P_A}{P_c}=1+\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\cdot\frac{h_b}{h_a} \quad \cdots\cdots(5)$$

式(3)または式(5)によって全閉外扇形の反覆定格の許容出力を求めることができる。

次に同じ電動機体格で全閉自冷形とすれば冷却係数は

* 川崎工場回転機部

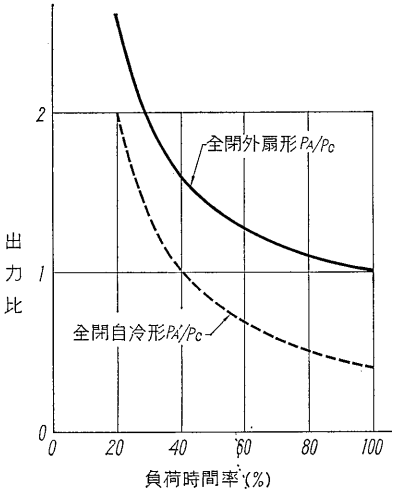
h_a/h_b の割合で低減するから全閉自冷形の連続定格温度上昇値 θ_c' は

$$\theta_c'=\frac{h_a}{h_b}\cdot\theta_c \quad \cdots\cdots(6)$$

となる．また全閉自冷形では温度上昇熱時定数と冷却熱時定数は等しいと考えられるから反覆定格温度上昇 θ_A' は簡単に $\theta_A'=\varepsilon\theta_c'$ と表わされる．これらの関係から θ_A' と θ_c が等しくなるための全閉自冷形反覆定格出力 P_A' は

$$P_A'=\frac{h_b}{h_a\cdot\varepsilon}\cdot P_c \quad \cdots\cdots(7)$$

となる．式(5)と式(7)は全閉多扇形連続定格出力に対応した全閉外扇形反覆定格および全閉自冷形反覆定格の出力比を示す．通常表面リブの配置は全閉外扇形と全閉自冷形とはほとんど等しい面積を有し，放熱係数の比は回転中と停止中の放熱係数の比 h_b/h_a で約0.4程度であるので，これを代入して式(5)，式(7)の関係を図示すると第1図のようになり，明らかに全閉外扇形の方が，実用される負荷時間率の範囲で機械の冷却条件の良いことが解る。

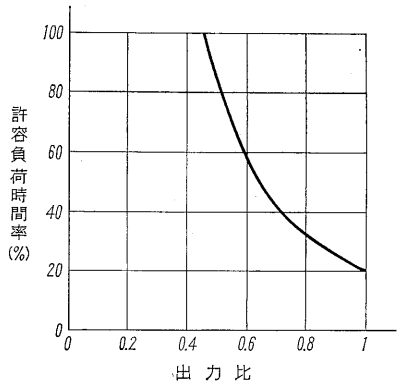


第1図　負荷時間率に対する全閉外扇形と全閉自冷形との出力

Fig. 1. Relation of the motor output between totally enclosed fan cooled type and totally enclosed self-ventilated type

特に近年多く用いられるようになった負荷時間率の大きな荷役機械や鉄鋼補機類に対しては従来の短時間定格の電動機を使用することは，ほとんど通風方式を強制通風冷却形に改造しなければ全閉自冷形は使用に耐えないが，全閉外扇形のクレーン用電動機はすべての負荷時間率に対して適用できる長所を有している。

第2図は従来の約150kW 程度の1時間定格の全閉自冷形クレーン用電動機（JEM 1066）を反覆定格として使用したときに許容される負荷時間率を示したものである。



第2図　従来の1時間定格全閉自冷形電動機を反覆使用した時の許容負荷時間率

Fig. 2. Allowable cyclic duration factor of the totally enclosed self-ventilated type motor (150 kW 1 hour rating)

III. 反覆定格の各種負荷時間率に対する出力

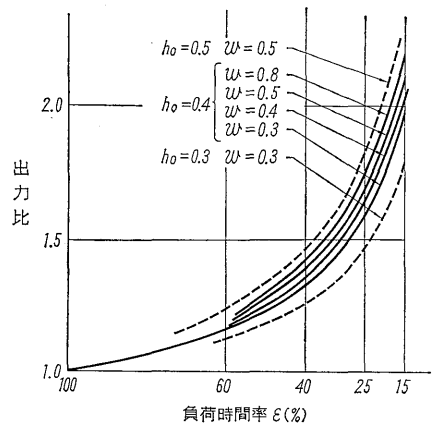
荷役機械はその目的に応じて，種々の負荷時間率を必要とするが，これらに応じて各種の形式や寸法の電動機を用意するのは不経済であるので，電気的や機械的にまったく同一の電動機が負荷時間率が変ったとき，どのような出力を確保できるかを検討するのは有効なことである．電動機は単一時定数を有する発熱体と考え銅損は出力の2乗に比例すると仮定して，反覆定格使用中の定常状態において運転中に発生した熱損失と，休止中も含めた放熱容量とが等しいという条件で方程式を立てると次式のようになる。

$$(p^2W_v+W_c)\varepsilon=\{\varepsilon h+(1\varepsilon)h_0\}(W_v+W_c)\cdots\cdots(8)$$

ここで p は連続定格を基準定格としたとき，それに対する反覆定格の出力比，W_v, W_c はそれぞれ基準定格のときの負荷損および固定損を示す．また h は放熱係数で定格速度における値を1とし単位法で示す．h_0 は停止中の放率係数である．この式を p に関して解くと

$$p=\sqrt{\frac{\varepsilon h+(1-\varepsilon)h_0}{\varepsilon}(1+w)-w} \quad \cdots\cdots(9)$$

ここで $w=W_c/W_v$ である．当社の全閉外扇形電動機で10～100kW の範囲で調査した結果，h_0 はほぼ0.35～0.45の値を得たので一応0.4とし，w の値を一般的な0.4～0.8として ε と p の関係を数値計算すると第3図のような関係となる．この関係から負荷時間率が異なるときの出力を容易に求めることができる．負荷時間率が



第3図　負荷時間率と出力の関係

Fig. 3. Relation of cyclic duration factor to output

25% 以下の値については，最大出力，ブラシ電流密度などを考慮すると，この特性曲線よりやや下った値とする必要がある。

IV. 反覆定格巻線形電動機の始動ひん度による出力低減率

巻線形電動機を反覆使用するときは通常始動ひん度の影響は少ないと考えられ，通常1回の負荷周期を 10 分と決めている．クレーン，鉄鋼補機などの荷役用に用いられる巻線形誘導電動機はしばしば負荷周期が短く高始動ひん度で使用される場合がある．このような用途で特に全閉外扇形あるいは開放保護形を用いると，始動ひん度が高く加速制動時間が，1サイクルの負荷周期に対して無視できない時間となるために通常の反覆使用の出力を確保できない場合が生ずる．このような場合には通常の反覆使用の出力に対し始動ひん度による出力低減率を乗ずる必要が生ずる．この出力低減率はどのように示されるか理論的に誘導してみる．ここで使用される記号を以下にまとめる。

a：平均加速トルクと定格トルクとの比
$$a=T_a/T_N\fallingdotseq I_a/I_N \quad \text{(p.u.)}$$

c：慣性モーメントの増加率
$$(GD^2_L+GD^2_M)/GD^2_M \quad \text{(p.u.)}$$

ε：負荷時間率 (p.u.)

e：始動ひん度 $S=0$ のときの負荷時間率 ε における出力と負荷時間率1における出力との比 (p.u.)

GD^2_L：負荷，ブレーキ等々の電動機軸換算慣性モーメント (kg-m²)

GD^2_M：電動機の慣性モーメント (kg-m²)

h：冷却係数(定格速度における値を1.0とする)
$h=1$：定格速度時　h_0：停止時　h_a：加速中の平均値

I：電流

m：負荷時間率が ε で始動ひん度が S のときの出力と，始動ひん度 $S=0$ のときの出力との比(出力低減率) (p.u.)

n：定格速度(ここでは同期速度と等しいとおく) (rpm)

P：出力 (kW)

S：始動ひん度 (回/hr)

T：トルク
T_a：平均加速トルク　T_b：定格トルク (kg-m)

t_a：始動時間 (sec)

t_e：1サイクル毎の通電時間
$$t_e=3{,}600\,\varepsilon/S \quad \text{(sec)}$$

W：損失 (p.u.)

電動機の加速トルクは
$$T_a=emT_{1,0}(a-1) \quad \cdots\cdots(10)$$

以下各記号に付けるサフィックスは，最初に負荷時間率，次に始動ひん度を表わすものとする。

また定格トルクは
$$T_{1,0}\fallingdotseq\frac{P\times 10^3}{n} \quad \cdots\cdots(11)$$

始動時間 t_a は
$$t_a=\frac{C\cdot GD^2_M\cdot n}{375\cdot Ta} \quad \cdots\cdots(12)$$

であるから，式(10)，(11)，(12)より
$$t_a=\frac{C}{e\cdot m\cdot(a-1)}\cdot\frac{n^2}{375{,}000}\cdot\frac{GD^2_M}{p_{1,0}} \quad \cdots\cdots(13)$$

となる．次に始動時間と通電時間との比 t_a/t_e を求めてみる．$t_e=3{,}600\,\varepsilon/S$ なる関係式と式(13)より
$$\frac{t_a}{t_e}=\frac{C}{e\cdot m\cdot(a-1)}\cdot\frac{n^2}{375{,}000}\cdot\frac{GD^2_M}{p_{1,0}}\cdot\frac{S}{3{,}600\,\varepsilon} \quad \cdots\cdots(14)$$

となる。

熱的な関係式から同様に t_a/t_e を求めてみよう．式(15)の左項が始動ひん度 0～6回/h_r 程度の低始動ひん度における1周期当りの損失であり，右項が始動ひん度 S のときの1周期当りの温度上昇を考慮した等価損失である．簡単のために損失は出力の2乗に比例するものとすると，
$$t_e\,Wp_{\varepsilon\cdot0}=\frac{1}{h_a}\cdot t_a\cdot m^2\cdot a^2\,Wp_{\varepsilon\cdot0}+(t_e-t_a)\cdot m^2\cdot Wp_{\varepsilon\cdot0} \quad \cdots\cdots(15)$$

$$t_e(1-m^2)=t_a\cdot m^2\left(\frac{a^2}{h_a}-1\right)$$

$$\frac{t_a}{t_e}=\frac{1-m^2}{m^2\left(\frac{a^2}{h_a}-1\right)} \quad \cdots\cdots(16)$$

式(14)と(16)より

$$\frac{1-m^2}{m^2\left(\frac{a^2}{h_a}-1\right)}=\frac{C}{e\cdot m\cdot(a-1)}\cdot\frac{n^2}{375{,}000}\cdot\frac{GD^2_M}{p_{1,0}}\cdot\frac{S}{3{,}600\,\varepsilon}$$

この式を m に関して整理すると

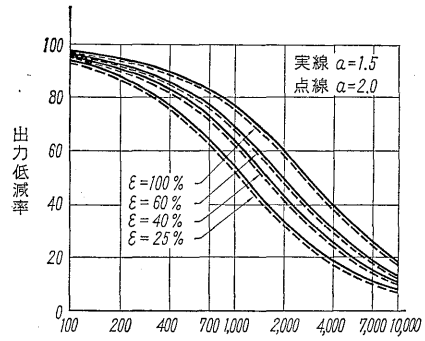
$$m^2+m\cdot\frac{(a^2-h_a)\cdot C\cdot S}{h_a\cdot(a-1)\cdot e\cdot\varepsilon\cdot 3{,}600}\cdot\frac{n^2\cdot GD^2_M}{375{,}000\cdot p_{1,0}}-1=0 \quad \cdots\cdots(17)$$

この2次方程式を解くと

$$m=-\frac{(a^2-h_a)\cdot C\cdot S}{(a-1)\cdot h_a\cdot e\cdot\varepsilon}\cdot\frac{n^2\cdot GD^2_M}{2.7\cdot 10^9\cdot p_{1,0}}+\sqrt{\left\{\frac{(a^2-h_a)\cdot C\cdot S}{(a-1)\cdot h_a\cdot e\cdot\varepsilon}\cdot\frac{n^2\cdot GD^2_M}{2.7\cdot 10^9\cdot p_{1,0}}\right\}^2+1} \quad \cdots\cdots(18)$$

となる．この関係に電動機の常数を代入すれば始動ひん度 S のときの出力低減率を求めることができる．試みに当社の新系列全閉巻線形電動機で200kW，10極，負荷時間率 40% のものを例にとって計算した結果は第4図のようになる．図において横軸は負荷による慣性モーメントの増加率と始動ひん度の積であり，縦軸は出力低減率 m を示す．パラメータとし負荷時間率 ε および平均加速トルクと定格トルクとの比すなわち始動時にどの程度の加速トルクを発生させるかをとった。

一般に電動機の容量が増加するにしたがって $GD^2_M\cdot n^2/p_{1,0}$ の値すなわち定格トルクにおける電動機単体の始動時間は増大するので，この例は始動ひん度が出力の低下におよぼす影響の非常に大きい機種をえらんんで示したことになる．なお，10kW程度のものでは第4図の横軸を約 50% 程度始動ひん度を増加して考えてもよい。式(18)の関係で $h_a=0.4$ として代入すれば全閉自冷形をとったときの出力低減率が求まるが，式から解るとおり



第4図　始動ひん度による出力低減率

Fig. 4. Motor output reduction factor by starting cycles

始動ひん度を考慮した場合でも，全閉外扇形は全閉自冷形よりも冷却特性がすぐれていることが解る。

V. むすび

クレーン用電動機の定格として従来は短時間定格が一般的であったが，負荷の使用方法にもっともよく一致した定格として反覆定格が使用されるようになってきた．それにともない従来の全閉自冷形では適用できなかった負荷時間率の大きい用途や始動ひん度の高い用途にも全閉外扇形の電動機が適用され，またその冷却特性の向上から電動機の小形化が達成できるようになってきた。

本稿において反覆定格の荷役機械用として全閉外扇形を用いた時と全閉自冷形を用いた時の比較，反覆定格における負荷時間率に対する出力，および始動ひん度に対する出力低減率に関して述べ当社が発表したE種クレーン用電動機の各種用途への適用上の出力換算の方法について，読者各位の電動機選定上の一助となればと考えその概要を述べた。

参考文献　(1963)　(1957)

(1) NEMA. MG-1. B.S. 2613 etc

(2) VDE. 0530 Teil 1/1.66 (1966)

(3) IEC. Pub. 34-1. Draft. (1964)

(4) 子安：富士時報 38 No. 8 p. 526 (1965)

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。