

# 慣性負荷を起動する籠形電動機の諸問題

## Problems of Squirrel Cage Induction Motor, starting Load of Large Inertia

桜井 泰 男\*

Yasuo Sakurai

### 内 容 梗 概

籠形電動機は取り扱いが便利であるため広く使用され最近非常に大容量のものにも採用されているが慣性能率の大きい負荷を運転する場合には起動時に回転子導体の負担が大きい。ここには主として起動時に回転子に発生する熱量とそれによつて生ずる問題点を数式を導きだしながら解説した。特に慣性が大きくまた起動頻度が多い場合には最初よりそれに適した設計を施しておく必要があり、一般用電動機を適用できない場合がある。回転子バーに生ずる応力の原因およびこれに対処する設計上の考慮について説明した。

### 1. 緒 言

慣性の非常に大きい負荷に籠形誘導電動機が直結される場合、起動時に回転子バーや短絡環に種々の無理を生じ、使用法や設計が適切でないと電動機の寿命に影響することがある。元来籠形電動機においては、無負荷状態で慣性負荷を定格速度まで上昇せしめるだけでも、回転子に大きな負担がかかるのであるが、加うるに起動時に負荷がかかっていたり起動頻度が特に大であつたりするとバーや短絡環にさらに無理を生ずることになる。

慣性負荷が大きい負荷の例としては、ファン、ブロウ、遠心分離機、または特別な理由ではずみ車を有する機械などがあげられる。水素のように密度の小さいガスを扱うブロウや火力発電所ボイラ用ファンのように高温ガスを扱うものは普通のものに比して直径が大きいので慣性能率が特に大きい。中でもボイラファンは、灰などによる摩耗を考慮して、肉厚を厚くしてあるのでさらに条件が悪い。

一方最近電源容量の増大に伴い、非常に大きい容量のものにも籠形電動機を採用する傾向にあるので、慣性負荷と籠形回転子との関係を再認識すべき時期にあると思う。以下これらの問題について検討を行い、御使用者各位の御参考に供したい。

### 2. 起動時、回転子に発生する熱量

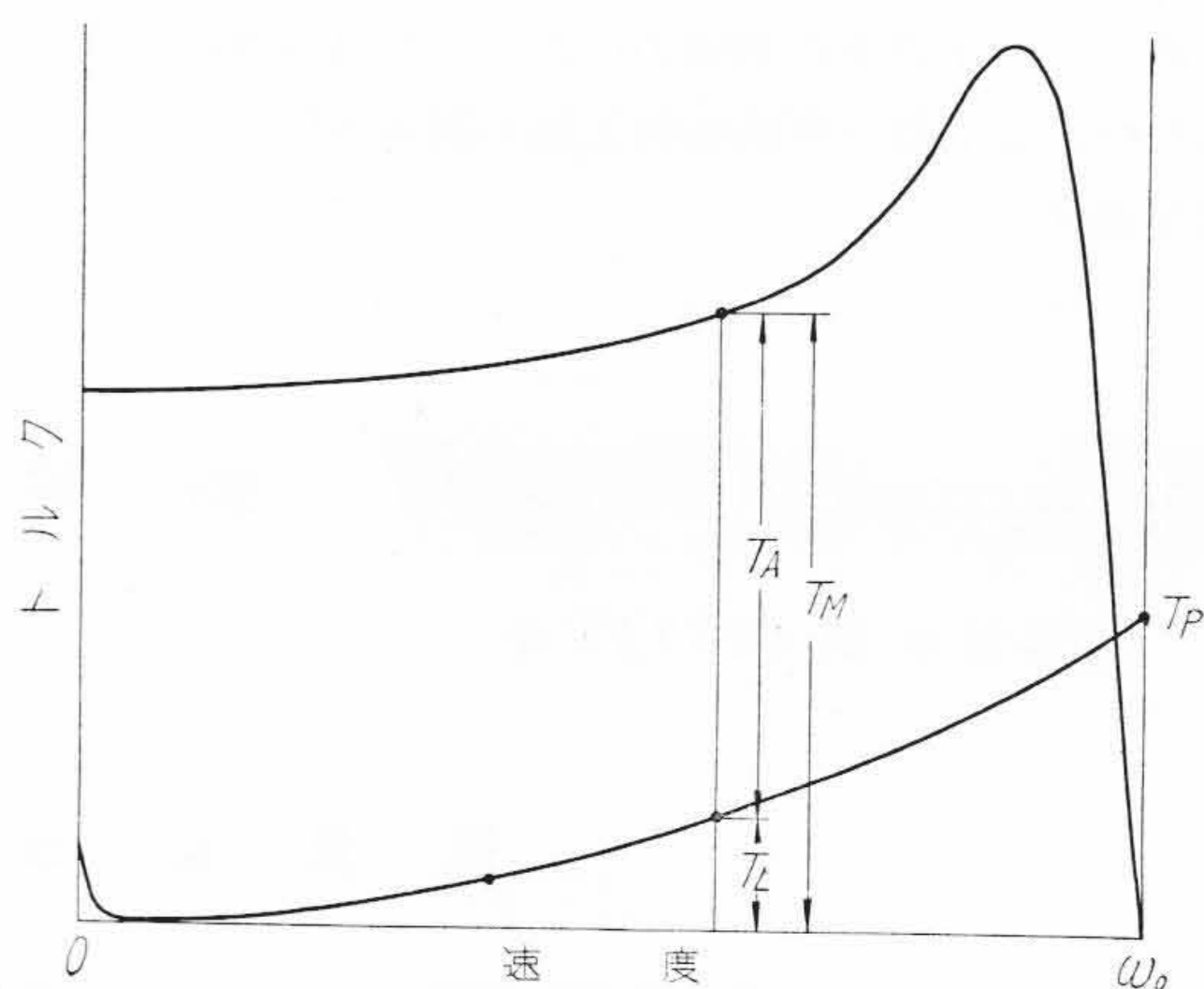
第1図は電動機発生トルク  $T_M$  と所要負荷トルク  $T_L$  との関係を示したもので  $T_M - T_L = T_A$  が加速トルクとなる。力学的関係により

$$I \frac{d\omega}{dt} = T_A \dots\dots\dots (1)$$

$I$  : 負荷および回転子の慣性能率

$\omega$  : 回転角速度

$t$  : 時間



第1図 電動機トルクと負荷トルクとの関係

一方、誘導機の理論でよく知られているように電動機トルク、電流および二次抵抗の間には次の関係がある。

$$T_M = 3 i^2 \frac{r_2}{s} \quad (\text{同期ワット})$$

$$= \frac{3i^2 r_2}{\omega_0 s} \quad (\text{物理単位})$$

$i$  : 一次一相に換算した二次電流

$r_2$  : 一次一相に換算した二次抵抗

$s$  : 回転子のすべり

$\omega_0$  : 同期速度に相当する角速度

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad \text{であるから}$$

$$3i^2 r_2 = T_M (\omega_0 - \omega) \dots\dots\dots (2)$$

角速度0から  $\omega$  に達するまでの時間を  $t$  とすれば、この間に回転子導体に発生する熱量  $W$  は

$$W = 3 \int_0^t i^2 r_2 dt$$

(1)(2)より

$$W = I \int_0^\omega \frac{T_M}{T_A} (\omega_0 - \omega) d\omega \dots\dots\dots (3)$$

となる。 $T_M$  および  $T_A$  (したがって  $T_L$ ) が一定と仮定

\* 日立製作所日立工場

し(あるいは平均値をとり)これを $T_{M0}, T_{A0}, T_{L0}$ とすれば

$$W = \frac{T_{M0}}{T_{A0}} I \left( \omega_0 \omega - \frac{\omega^2}{2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$= \frac{T_{M0}}{T_{M0} - T_{L0}} I \left( \omega_0 \omega - \frac{\omega^2}{2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

同期速度 $\omega_0$ まで加速する間の発生熱量を $W_0$ とすれば(5)式で $\omega = \omega_0$ とおき

$$W_0 = \frac{T_{M0}}{T_{M0} - T_{L0}} \left( \frac{1}{2} I \omega_0^2 \right) \dots\dots\dots (6)$$

実用単位で表わせば

$$W_0 = \frac{T_{M0}}{T_{M0} - T_{L0}} [1.37 \times 10^{-6} (G D^2) N_0^2] \quad (\text{kW} \cdot \text{s})$$

$G D^2$ : はずみ車効果=重量×回転直径<sup>2</sup>(kg-m<sup>2</sup>)

$N_0$ : 同期速度(rpm)

## 2.1 無負荷起動( $T_L=0$ )の場合

理論的に所要負荷トルクが0の場合はないが、実用上0とみなしうる場合には

$$W_0 = \frac{1}{2} I \omega_0^2 \dots\dots\dots (7)$$

すなわち電動機トルクを全部加速トルクに費しうる場合には起動終了までに回転子に発生する全損失は、ちょうど回転体の回転エネルギーに等しい。この式で注目すべきことは $W_0$ が起動所要時間や起動トルクの大小に無関係で回転体の慣性能率のみで定まることである。ゆえに起動補償器や起動リアクトルによつて減電圧起動を行うと起動トルクが減少して所要時間は延びるけれども全発生損失は一定である。これについては後述する。

## 2.2 有負荷起動( $T_L > 0$ )の場合

$T_M, T_L$ が一定と仮定すると(6)式でわかるように $T_L=0$ の場合の $\frac{T_{M0}}{T_{M0}-T_{L0}}$ 倍の熱量を発生する。通常 $T_M, T_L$ は一定でなく特に $T_M$ は数式が複雑なので(3)式を解くことは困難であるが第1図のような曲線により速度の数点について $\Delta W$ を計算すれば $W$ は近似的に求めることができる。ポンプ、ブロワ、ファンのように $T_L$ がほぼ速度の自乗に比例するものにおいて $T_M$ を一定値 $T_{M0}$ と仮定し $T_L = T_P \frac{\omega^2}{\omega_0^2}$ とおいて $W$ を求めると下式のようになりほぼ正確な値を得る。ここに $T_P$ は第1図に示すように同期速度における $T_L$ の値である。

(3)式より

$$\begin{aligned} W_0 &= I T_{M0} \int_0^{\omega_0} \frac{\omega_0 - \omega}{T_{M0} - T_P \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} d\omega \\ &= T_{M0} \left\{ \frac{1}{\sqrt{T_P T_{M0}}} \log \frac{\sqrt{\frac{T_{M0}}{T_P}} + 1}{\sqrt{\frac{T_{M0}}{T_P}} - 1} + \frac{1}{T_P} \log \left( 1 - \frac{T_0}{T_M} \right) \right\} \frac{I \omega_0^2}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2.3 T_{M0} \left\{ \frac{1}{\sqrt{T_P T_{M0}}} \log_{10} \frac{\sqrt{\frac{T_{M0}}{T_P}} + 1}{\sqrt{\frac{T_{M0}}{T_P}} - 1} + \frac{1}{T_P} \log_{10} \left( 1 - \frac{T_0}{T_M} \right) \right\} \frac{I \omega_0^2}{2} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ファンの場合ダンパを閉じて起動しても $T_P$ は通常定格トルクの20~30%の値をもっている。 $T_{M0}=120\%$ ,  $T_P=30\%$ と仮定すると(8)式より

$$W_0 = 1.05 \frac{I \omega_0^2}{2}$$

$T_P=100\%$ とすると

$$W_0 = 1.25 \frac{I \omega_0^2}{2}$$

すなわち無負荷起動の発生熱量に比し、ダンパを閉じた場合で約5%, 全開の場合は約25%増加する。

## 3. 回転子導体の温度上昇

回転子導体が起動時に生ずる変形の原因としては温度上昇のために起る各部の膨脹、大きな起動電流によつて生ずる電磁力、機械的振動など種々考えられるが、このうち温度上昇によるものについて説明する。慣性負荷を起動する場合には前章の $W_0$ によつて急激に温度が上昇する。

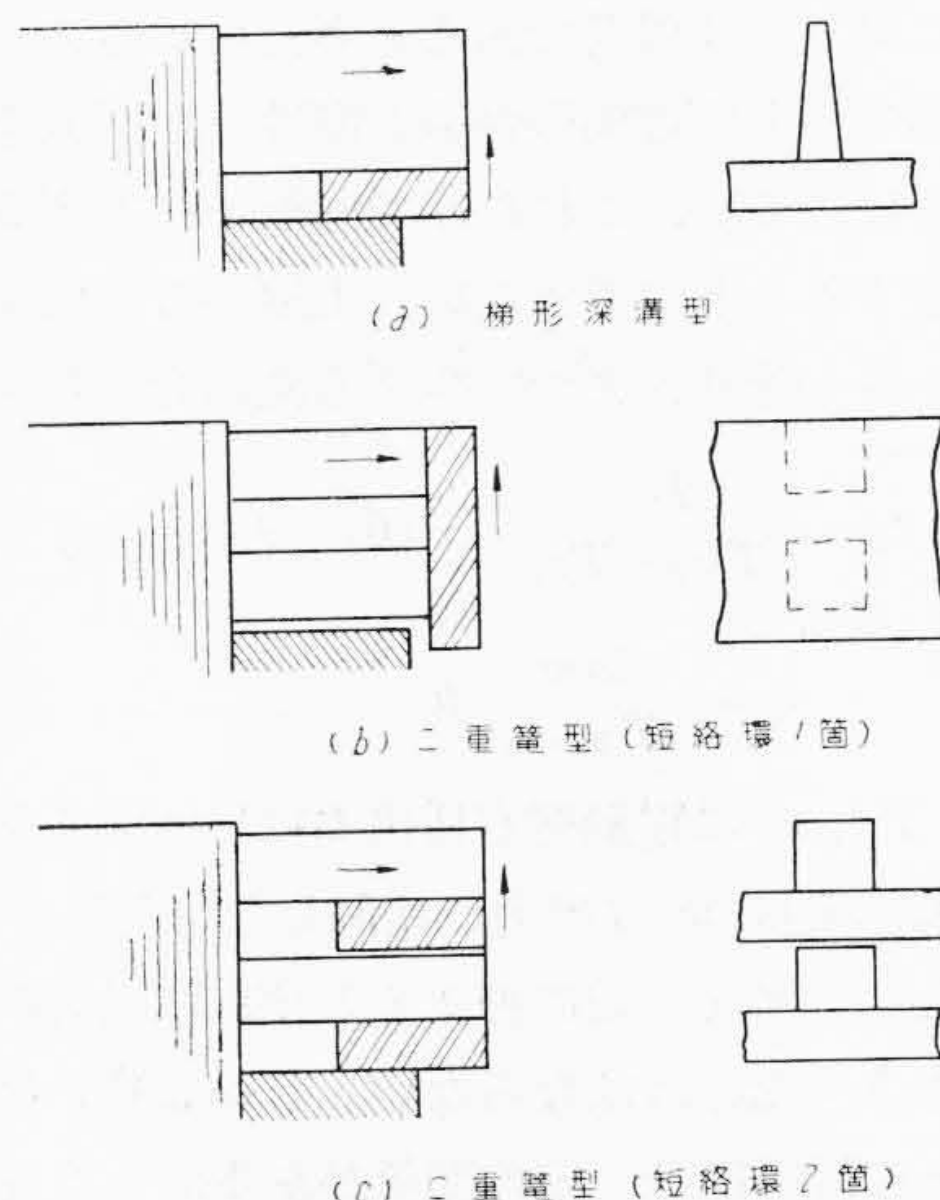
起動時間が短い場合には熱伝導、通風による冷却効果はあまり期待できない。かりに起動中熱の放散がないものとすれば導体の温度上昇 $\theta$ は

$$\theta = \frac{W_0}{\alpha w} \quad (^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (9)$$

$W_0$ : 起動中発生する全熱量(kW-s)

$\alpha$ : 導体の比熱を kW-s/kg $^\circ\text{C}$  で表わしたもの、銅の場合 0.39

$w$ : 導体の重量(kg)



第2図 回転子バーおよび短絡環の構造

籠形回転子の構造は第 2 図 (a) (b) (c) に示すように種々の形状があるが、いずれも温度上昇によつて生ずる熱応力としてはバーの軸方向の伸びおよび短絡環の半径方向の膨脹が原因している。(a) の深構型において短絡環が固定された構造になつていると、バーが伸び得ないので内部応力を生ずる。(b) の二重籠形は起動時に主として上バーに電流が集中するため下バーとの伸びの差ができる。この構造では短絡環が共通であるため上下バーが互に無関係に伸縮することができず、上バーに圧縮、下バーに引張り応力が生ずる。二重籠形でも (c) 図の形をとると上バーは自由に伸びることができるので応力が発生しない。短絡環が半径方向に膨脹するためにバーを押し上げて曲げモーメントを生ずる点は (a) (b) (c) に共通である。これらの熱応力による影響を小さくするためにはバーや短絡環の熱容量を大にし、かつバーの材質、形状寸法を適正に設計することにより強度を増加させる方法をとる。

#### 4. 起動時間と温度上昇

回転子速度を  $\omega_0$  まで昇速させるに要する時間  $t_0$  は (1)

$$\text{式より} \quad t_0 = I \int_0^{\omega_0} \frac{d\omega}{T_M - T_L}$$

$T_M, T_L$  の平均値をとつて一定と仮定し実用単位で表わすと

$$t_0 = \frac{(GD^2) N_0}{374 (T_{M0} - T_{L0})} \text{ (s)} \dots\dots\dots (10)$$

$$GD^2: \text{ kg-m}^2$$

$$T_{M0}, T_{L0}: \text{ kg-m}$$

$$N_0: \text{ rpm}$$

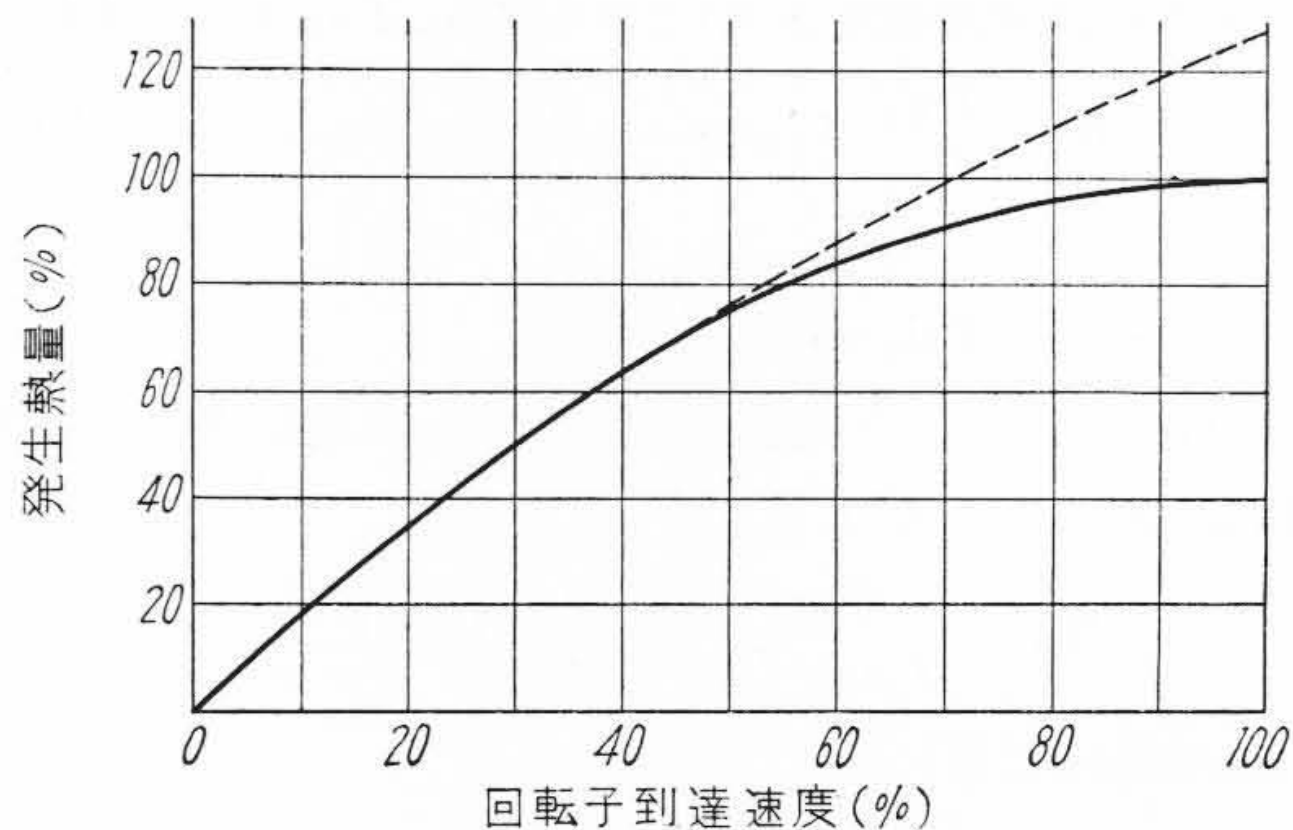
となる。起動時間があまり長いものは電動機容量に対比して  $GD^2$  が大きすぎることを意味し、回転子に無理を生じやすい。一般に 2 極機で全電圧起動を行つたとき起動時間 30 秒をこえるものは通常の設計により製作された回転子に対しては重荷であると考えられる。

起動時間の大小は電動機容量と慣性との関係を示す一応の目安とはなるが、これだけで回転子に生ずる無理の軽重を判定することはできない。上述のように原因は導体の温度上昇とそれによつて生ずる熱応力に存するからである。

$$t_0 = \frac{I \omega_0}{T_{M0} - T_{L0}} \text{ と (6) (9) とより}$$

$$t_0 = \frac{2\alpha w}{T_{M0} \omega_0} \theta \dots\dots\dots (11)$$

分母の  $T_{M0} \omega_0$  は電動機定格出力に比例する量であるが回転子導体重量  $w$  は出力に比例しないから  $\theta$  と  $t_0$  とは比例しない。 $\theta$  を一定に押えたとすれば出力が大なるほど  $t_0$  は小さくしなければならない。しかし狭い範囲では  $w$  と出力との間にほぼ一定の関係があるから  $t_0$  を一応の目安とすることができるのである。



第 3 図 回転子到達速度と発生熱量との関係

出力または極数の大なるものは短絡環の直径が大きいから  $\theta$  を同じにとると環の伸びの絶対量、すなわちバーに生ずる応力は大きくなる。

前記のようにバーから鉄心または空気への熱放散がないものとすれば  $\theta$  は (9) 式で表わされるが実際には熱放散のために (9) 式より低い値となる。

起動時間が長い場合には短絡環に対する冷却がきくので温度上昇はさらに小さくなる。減電圧起動を行つても全熱量に変化はないが時間が延びて冷却がきいてくるといふ意味で起動補償器、リアクトルなどを使用することは好ましい。しかし有負荷起動については起動電圧の選定に慎重を期さなければならない。(6) 式において  $T_{L0}$  が大きい場合、減電圧によつて  $T_{M0}$  が小さくなると  $\frac{T_{M0}}{T_{M0} - T_{L0}}$  が大となり導体に発生する熱量が増大して逆効果を生むおそれがある。たとえば  $T_{M0} = 120\%$   $T_{L0} = 30\%$  とすると、全電圧起動の場合には  $\frac{T_{M0}}{T_{M0} - T_{L0}} = 1.33$  65% 電圧で起動すると  $T_{M0} = 50.6\%$  となるので  $\frac{T_{M0}}{T_{M0} - T_{L0}} = 2.46$ 、すなわち前者に比して発生熱量が 85% 増加することになる。

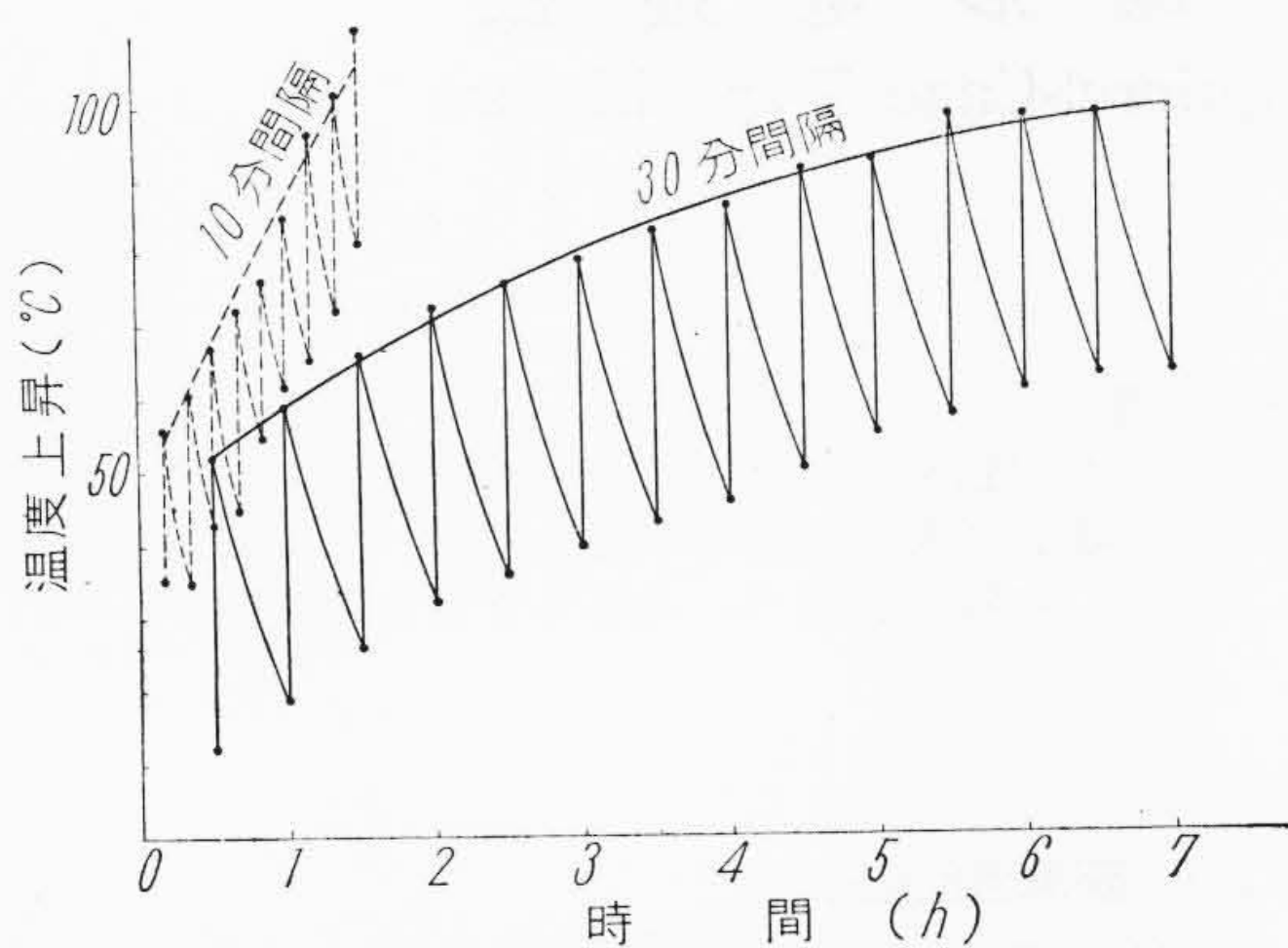
導体内に発生する損失 (kW) は時間的に一定でなく (2) 式で明らかなように起動の最初が最も大きく速度が上昇するに従い直線的に減少する。したがつてバーの温度は起動の初期にすみやかに上昇すると思われる。

無負荷起動を行う場合にある速度に到達するまでに発生する熱量 (kW-s) の経過を曲線で表わすと第 3 図実線のようになり起動の初期の発生熱量の増加が大きく終期に近づくにしたがつて増加が少ない。同図点線はダンパ全開でファンを起動する場合 ( $T_P = 100\%$ ) である。

#### 5. 起動頻度の影響

##### 5.1 材料の疲労

さきに述べたように起動中にはバーに応力を生ずるがこれがくり返されるといわれるくり返し応力となり材料の疲労を起す結果となる。一般には応力が疲労限界以下に設計してあるので問題はないが、設計予定値以上の苛



第4図 間歇起動を行つた回転子バーの温度上昇曲線

酷な条件 ( $GD^2$  または起動時負荷トルクの増大) で起動され、しかも頻度が非常に大きいと疲労を生ずるおそれがある。1日の平均起動回数が4~5回をこえることが予想される場合には製作者にその旨指示していただき特殊設計を施した方が安全である。

#### 5.2 温度上昇の累積

起動時には一時的に温度が高くなるが起動完了すればトルクも定格トルクに落ち着き冷却もきくので温度は下がりいわゆる運転温度になる。この状態で運転を続行したのち停止すると、停止時の冷却効果は小さいため温度はきわめて徐々にしか下がらない。停止後少時間後に再

起動すると、温度は1回目の起動時よりさらに上がり、バーの応力も大きくなる。

特殊な用途で極端に起動頻度が大になると起動時の温度から運転温度にまで下がらないうちに次の起動が行われることもあり得る。この場合は温度上昇が累積されて高温になりさらにくり返し回数が多いことと相まってバーの寿命を縮めることになる。たとえばポンプの起動停止によつて水位の自動調整を行うにあつて水位の上下限の差を非常に小さく選定した場合や、列車の運行にしたがつて起動停止するトンネルファンなどでこの現象を起すことがある。第4図は起動間隔を変えて間歇起動を行つて温度上昇を測定した実験結果を示す。この実験では起動完了後にただちに電源を切つて自然冷却させたもので実際運転より条件がよい。実線は30分間隔、点線は10分間隔の場合である。

#### 6. 結 言

以上慣性負荷を起動するとき回転子バーに生じる現象につき、主として温度上昇と熱応力の問題を採り上げて論じた。慣性能率が大きい場合には導体の構造、寸法に特殊な考慮を払い、かつ熱容量を大にする必要があるので、電動機の寸法が起動条件に左右される場合もある。 $GD^2$ 、起動時の負荷の大きさ、起動頻度が設計を行うときに判然としておればこれに適した製品を製作することができる。本稿が使用者各位の電動機選定、運転保守の御参考になれば幸である。

#### Vol. 20 目次 No. 1

- ◎電気掃除機 波 沢 秀 雄
- ◎電 球 の 卒 業 試 験
- ◎掃 除 機 の 表 情
- ◎初 荷 風 景
- ◎明 日 へ の 道 標 (浜 街 道 の 空)
- ◎新 し い 照 明 施 設
- ◎暮 し の 科 学
- ◎反 射 型 と 対 流 型
- ◎人 工 頭 脳 ア ナ コ ン 博 士
- ◎日 立 だ よ り
- ◎ミ シ ン の 常 識

誌代 1冊 ¥60 (〒16)

発行所 日立評論社  
東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地  
振替口座 東京 71824 番  
取次店 株式会社オーム社書店  
東京都千代田区神田錦町3の1  
振替口座 東京 20018 番

#### 日立造船技報 Vol. 18 目次 No. 4

- ◎船用熱交換器の圧力降下について
- ◎小型掃海艇の船体応力およびたわみの測定
- ◎アーク・エア・ガウジングの基礎実験
- ◎デリックブームの設計法について
- ◎330トン型まぐろ漁船の冷凍設備の比較
- ◎軸馬力計の改良に関する研究
- ◎モノポールマシンについて
- ◎製 品 紹 介
- ◎特 許 ・ 新 案 紹 介
- ◎日立造船技報総目次(昭和32年度)

本誌につきましの御照会は下記発行所へ御願致します。

日立造船株式会社技術研究所  
大阪市此花区桜島北之町60