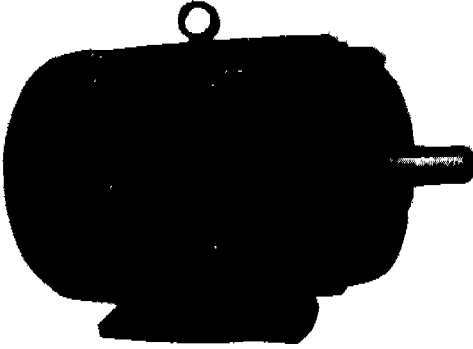


# 電動機設備의 에너지 節減技術



에너지 節減에 사용되는  
各種 電動機

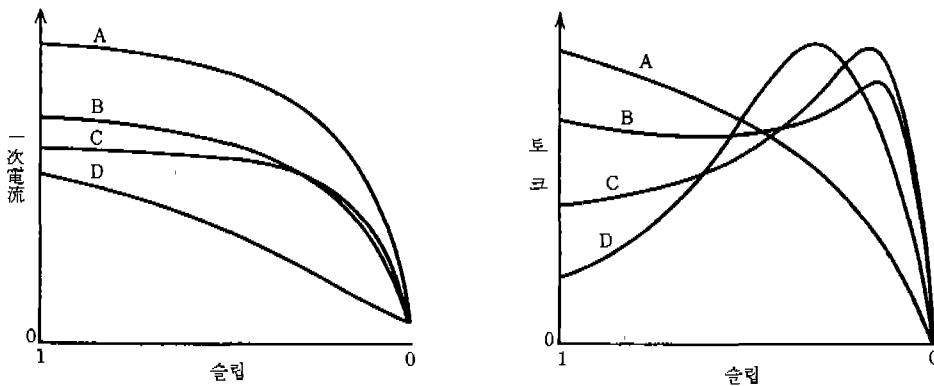
## 高抵抗籠形電動機와 效果的인 사용방법

### 1. 電動機의 特性和 구조

高抵抗 籠形電動機란 三相誘導電動機의 농형 2차 도체의 저항을 일반적인 誘導機에 비해 수 배 이상 크게 한 電動機로서 2차저항의 저항성분이 크고 力率을 크게 개선하기 때문에 적은 기동전류로 큰 기동 토크를 얻을 수가 있다. 그림 1은 다른 보통농형(A 곡선), 二重농형(B 특성) 및 深溝농형(C 곡선)과 여기에 기술하는 고저항

농형(D 곡선)의 대표적인 토크-슬립 특성과 1차전류-슬립 특성을 비교한 것이다.

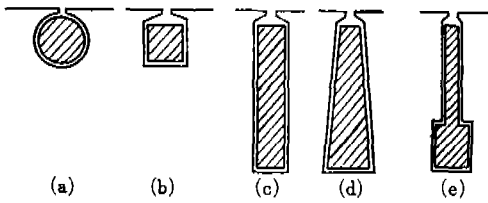
특성을 보기 쉬운 L형 원선도로 비교하면 그림 2와 같이 된다. 그림은 보통농형전동기의 圓線圖상에 2차저항만 6.6배로 증대시킨(실제로는 형상을 바꾸지 않고 저항치만 6.6배로 하는 것은 방열, 기타사정으로 곤란하지만 비교를 위하여 가정한다) 고저항 농형전동기의 원선도를 중첩시킨 것으로 電源조건, 1차捲線, 2차 리



A: 普通籠形, B: 二重籠形, C: 深溝籠形, D: 高抵抗籠形

〈그림 1〉 各種 籠形誘導電動機의 슬립 特性 比較





〈그림 3〉 高抵抗 籠形回轉子 바 断面의 各種

다.

도체와 短絡環과의 접합에는 銀땜질이 일반적으로 사용되는데, 高温時의 강도 관계로 용접하는 방법도 채택된다.

#### 나. 回轉子導體의 構造

數 kW 정도 이하의 소용량 전동기에서는 그림 3의 (a)나 (b)와 같이 圓形棒 또는 角棒材가 사용되는데, 中·大容量이 되면 특수농형에 의해 기동시에 2次抵抗을 크게 잡아 운전시에 손실을 경감시키는 목적과 熱의 放散面적을 증대시킬 목적을 겸한 深溝構造로 하는 예가 많다. 그림 3 (c), (d), (e)는 그중의 대표적형상을 표시하고 있으며, 深溝效果와 기동시에 도체상부에 발생한 熱량을 조금씩 하부도체에 분산 방열시키기 위하여 여러가지 형상이 설계되고 있다.

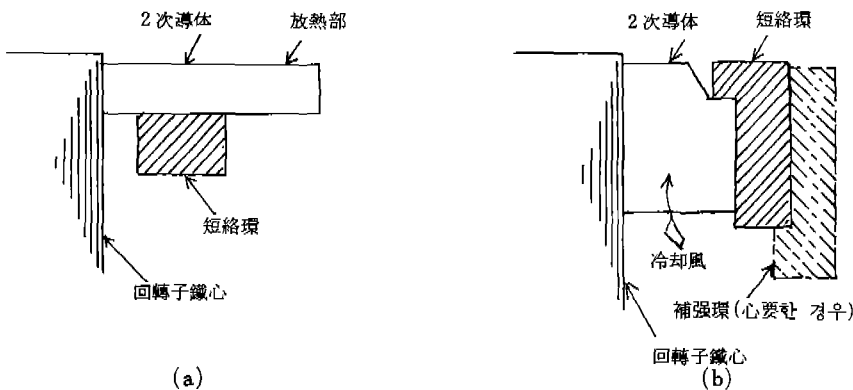
短絡環 부분은 導體端部와 합쳐서 유일한 직

접 공기에서의 熱의 放散부분으로서, 溝內導體의 회전자철심에의 熱의 傳導에는 특별히 다른 수단이 없는데 대하여 이 부분은 여러가지 熱放散을 위한 연구가 시행되고 있는 부분이기도 하다. 그림 4는 그 일례를 표시한 것으로, 그림 a는 그림 3의 圓形棒 또는 角棒의 도체에 角形断面 圓環狀의 短絡環을 단 경우인데, 필요에 따라 도체를 短絡環에서 軸方向으로 연장시켜 방열판의 역할을 시키기도 한다. 그림 (b)는 深溝導體에 대한 短絡環의 일례로서, 도체의 팬 작용을 이용해서 風案內로서의 短絡環과 함께 다량의 냉각풍이 나오는 구조로 되어 있다.

전동기 용량이 커지면 短絡環部에서의 단위체적당 손실 에너지도 (특히 기동 가속시) 커지고 회전에 의한 外力도 부가되어 短絡環의 변형, 變心 등도 발생하기 쉽다. 이 때문에 그림 4 (b)의 點線으로 표시한 바와 같이 短絡環에 補強環을 부착하거나 또는 이 補強環을 회전축에 고정시키는 등으로 異常變形을 방지하는 방식도 취해지고 있다.

#### 다. 其他部分의 構造

회전자 도체에 있어서 다량의 損失이 있을 뿐이고 高抵抗電動機라 하더라도 다른 유도 전동기와 크게 다를 바가 없지만 回轉子의 온도상승이 다른 부분에도 전달되므로



〈그림 4〉 高抵抗 籠形回轉子의 바와 短絡環의 부착구조

(a) 고정자 권선의 절연계급을 일반의 경우보다 上位의 F종 또는 H종을 채택

(b) 축반이 부분의 熱風을 방지하는 구조 또는 耐熱潤滑劑의 채용 등과 같은 고려가 되고 있다.

## 2. 起動特性

前述한 바와 같이 고저항 농형전동기는 低起動電流에서 高起動 토크를 얻을 수 있는 것에 대해 구체적으로 기술하기로 한다.

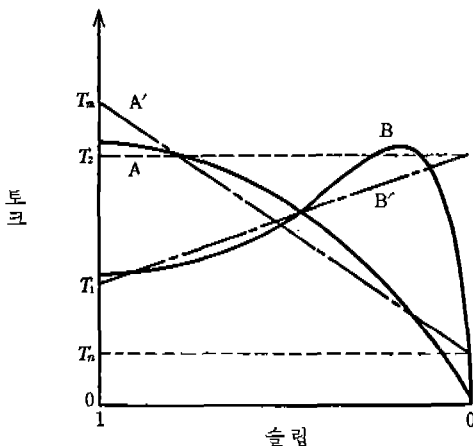
### 가. 高慣性체의 加速特性和 加速時間

지금 그림 5와 같이 고저항 농형과 보통 농형에 대한 토크-슬립 특성곡선 A 및 B를 각각 직선 A' 및 B'에 近似시켜 慣性 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)를 동기속도 ω<sub>0</sub>(rad/s)까지 가속하는 시간을 구한다.

모든 機械損은 무시하고 부하의 慣性 모멘트만으로 한 경우

(1) 고저항 농형에 대하여 : 慣性체에서의 印加 토크는 角速度 ω = 0에서 T<sub>m</sub> [N·m], 同期角速度 ω<sub>0</sub>에서 T<sub>n</sub>이 되기 때문에

$$T_m - (T_m - T_n) \frac{\omega}{\omega_0} \quad (1)$$



(그림 5) 토크-슬립 특성

로 표시되고 관성 모멘트 J가 角加速度 dω/dt에서 가속하는 데 필요한 토크와 平衡하기 때문에

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - (T_m - T_n) \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2)$$

가 되며, 이 미분방정식을 풀어

$$\int \frac{J\omega_0}{T_m\omega_0 - (T_m - T_n)\omega} d\omega = \int dt + C$$

$$\therefore \frac{J\omega_0}{T_m - T_n} \log_e |T_m\omega_0 - (T_m - T_n)\omega| = t + C$$

$$\therefore T_m\omega_0 - (T_m - T_n)\omega = e^{\left(\frac{-T_m - T_n}{J\omega_0} t + K\right)}$$

t = 0에서 ω = 0의 條件으로 e<sub>x</sub> = T<sub>m</sub>ω<sub>0</sub>가 되므로 上式을 整理하여

$$\omega = \frac{T_m}{T_m - T_n} \omega_0 \left(1 - e^{\frac{T_2 - T_1}{J\omega_0} t}\right) \quad (3)$$

따라서, 角速度 ω가 ω<sub>0</sub>에 도달하는 時間 t<sub>a</sub>는

$$t_a = -\frac{J\omega_0}{T_m - T_n} \log_e \left| \frac{T_n}{T_m} \right| \quad (4)$$

가 된다.

(2) 보통농형에 대하여 : 고저항농형의 경우와 같이 慣性체에서의 印加 토크가 ω = 0로 T<sub>1</sub>, ω = ω<sub>0</sub>로 T<sub>2</sub>가 되어

$$T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\omega}{\omega_0} \quad (5)$$

$$\therefore J \frac{d\omega}{dt} = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\omega}{\omega_0} \quad (6)$$

$$\therefore \int \frac{J\omega_0}{T_1\omega_0 + (T_2 - T_1)\omega} d\omega = \int dt + C$$

$$\therefore \frac{J\omega_0}{T_2 - T_1} \log_e |T_1\omega_0 + (T_2 - T_1)\omega| = t + C$$

$$\therefore \omega = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \omega_0 \left(e^{\frac{T_2 - T_1}{J\omega_0} t} - 1\right) \quad (7)$$

따라서 이 慣性체가 角速度 ω<sub>0</sub>를 얻기까지의 時間 t<sub>b</sub>는

$$t_b = \frac{J\omega_0}{T_2 - T_1} \cdot \log_e \left| \frac{T_2}{T_1} \right| \quad (8)$$

가 된다.

그림 5의 토크에 그림에 비제한 수치를 가정하여 기동시간을 試算해 본다.

高抵抗籠形으로, T<sub>m</sub> = 40N·m, T<sub>n</sub> = 7N·m이

라고 하면

$$\begin{aligned} t_a &= -\frac{J\omega_0}{40-7} \times \log_e \left| \frac{7}{40} \right| \\ &= J\omega_0 (-0.0303) \times (-1.743) \\ &= 0.0528 J\omega_0 \text{ [秒]} \end{aligned}$$

普通籠形으로,  $T_1 = 16N \cdot m$ ,  $T_2 = 33N \cdot m$ 이라고 하면

$$\begin{aligned} t_b &= \frac{J\omega_0}{33-16} \times \log_e \left| \frac{33}{16} \right| \\ &= J\omega_0 (0.0588) \times (0.784) \\ &= 0.0426 J\omega_0 \text{ [秒]} \end{aligned}$$

가 되어 高起動 토크이기는 하나 高速時에 토크가 저하하기 때문에 그 반대의 경향이 있는 보통 농형보다 기동완료까지는 많은 시간이 필요하게 된다.

참고로 이 慣性체를 一定 토크  $T_0 = 25N \cdot m$ 으로 가속하였다고 하면 角速度  $\omega$ 는 시간에 비례하여

$$\omega = (T_0 / J) t \quad (9)$$

가 되기 때문에  $\omega_0$ 에 도달하는 시간  $t_0$ 는

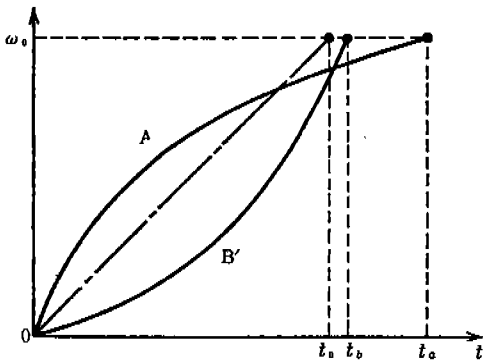
$$t_0 = \frac{J\omega_0}{T_0} = J\omega_0 \left( \frac{1}{25} \right) = 0.04 J\omega_0 \text{ [秒]}$$

가 된다.

이들 관계를 그림으로 표시하면 그림 6 과 같이 된다.

#### 나. 起動加速中の 2次抵抗損

앞의 가항에서 기술한 기동시간중에 2차도체



(그림 6) 加速特性

내에 발생하는 損失 에너지를 구하려면 回轉子에 전달된 에너지에서 慣性체에 저축된 에너지를 빼면 제산이 된다.

誘導電動機의 2차전력  $P_2$ 는 발생 토크와 동기각속도  $\omega_0$ 와의 곱인 同期 와트와 같다.

따라서 고저항 농형전동기에서 회전자 각도  $\omega$ 에 있어서의 2차전력  $P_2$ 는 (1)식에  $\omega_0$ 를 곱하여

$$P_2 = \omega_0 \left\{ T_m - (T_m - T_n) \frac{\omega}{\omega_0} \right\} [W] \quad (10)$$

가 된다. 그러므로 (4)식의 加速時間中에 2차회로에 공급된 모든 에너지  $W_2$  [J]는 (10)식의  $\omega$ 에 (3)식을 대입하여 기동후의 어느 시간에서의 電力을 얻을 수 있고

$$P_2 = \omega_0 T_m e^{-\frac{T_m - T_n}{J\omega_0} t}$$

가 되므로 이를  $t=0$ 에서  $t=t_a$ 까지 積分하여 구해지며

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^{t_a} \omega_0 T_m e^{-\frac{T_m - T_n}{J\omega_0} t} dt \\ &= \left[ -\frac{J\omega_0^2 T_m}{T_m - T_n} e^{-\frac{T_m - T_n}{J\omega_0} t} \right]_0^{t_a} \\ &= \frac{J\omega_0^2 T_m}{T_m - T_n} \left( 1 - \frac{T_n}{T_m} \right) = J\omega_0^2 [J] \quad (11) \end{aligned}$$

한편 보통농형전동기의 2차에 공급된 電力은 上記한 바와 같이 (5)식과 (7)식에 의해

$$P_2 = \omega_0 \left\{ T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\omega}{\omega_0} \right\} = \omega_0 T_1 e^{\frac{T_2 - T_1}{J\omega_0} t}$$

그러므로 (8)식의 기동시간  $t_b$ 秒중에 2차회로에 공급된 쏠 에너지  $W_2$ 는

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^{t_b} \omega_0 T_1 e^{\frac{T_2 - T_1}{J\omega_0} t} dt \\ &= \left[ \frac{J\omega_0^2 T_1}{T_2 - T_1} e^{\frac{T_2 - T_1}{J\omega_0} t} \right]_0^{t_b} \\ &= \frac{J\omega_0^2 T_1}{T_2 - T_1} \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = J\omega_0^2 [J] \quad (12) \end{aligned}$$

가 되어 어느 경우라도  $J\omega_0^2$  [J]를 소비한다.

이에 대하여 慣性 모멘트  $J$  [kg·m<sup>2</sup>]가 角速度  $\omega_0$  [rad/s]에 도달함으로써 저축된 에너지  $W_p$  [J]는

$$W_F = \frac{1}{2} J \omega_0^2 \text{ [J]} \quad (13)$$

이기 때문에 電動機의 2次導体에서 소비되는 손실 에너지는 고저항농형, 보통농형을 불문하고 또 加速時間의 大小에 관계없이  $J \omega_0^2 / 2$ 가 되어 慣性体에 저축된(전동기에서 공급한) 에너지와 같게 된다.

#### 다. 起動加速中の 1次回路의 損失

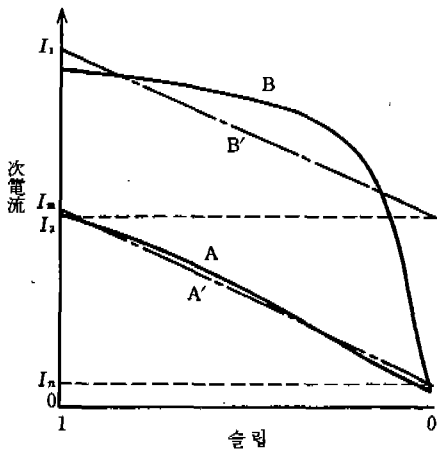
그림 5의 토크 슬립 특성에 대응하는 1차전류-슬립의 특성을 그림 7의 A 곡선과 B 곡선으로 하고 1차권선중의 抵抗損을 계산하기 위해 각각 A' 및 B'의 直線으로 근사시킬 수 있다고 하면 고저항 농형전동기의 1차전류는 角速度  $\omega$ 에 대해서

$$I = I_m - (I_m - I_n) \frac{\omega}{\omega_0} \quad (14)$$

가 되기 때문에 이  $\omega$ 에 (3)식을 대입하여

$$I = I_m - (I_m - I_n) \frac{T_m}{T_m - T_n} (1 - e^{-\frac{T_m - T_n}{J \omega_0} t}) - \frac{1}{T_m - T_n} \{ (I_n T_m - I_m T_n) + (I_m - I_n) T_m e^{-\frac{T_m - T_n}{J \omega_0} t} \} \quad (15)$$

따라서 1차권선 1相의 抵抗値를  $r_1$  [ $\Omega$ ]이라 하면 (4)식에 의한 기동시간  $t_a$  초 사이에 1차권



〈그림 7〉 1次電流 슬립 特性

선 1相에서 소비하는 損失 에너지  $W_H$  [J]는

$$W_H = \int_0^{t_a} r_1 I^2 dt = r_1 \frac{J \omega_0}{(T_m - T_n)^3} \left[ -a^2 \log_e \left| \frac{T_n}{T_m} \right| + 2ab \left( 1 - \frac{T_n}{T_m} \right) + \frac{b^2}{2} \left\{ 1 - \left( \frac{T_n}{T_m} \right)^2 \right\} \right] \quad (16)$$

여기서,  $a \equiv (I_n T_m - I_m T_n)$

$$b \equiv (I_m - I_n) T_m$$

한편, 普通籠形電動機의 1次電流는 그림 7에서

$$I = I_1 - (I_1 - I_2) \frac{\omega}{\omega_0} \quad (17)$$

가 되고, 이  $\omega$ 에 (7)식을 代入하여

$$I = I_1 - (I_1 - I_2) \frac{T_1}{T_2 - T_1} (e^{\frac{T_2 - T_1}{J \omega_0} t} - 1) = \frac{1}{T_2 - T_1} (I_1 T_2 - I_2 T_1) - (I_1 - I_2) T_1 e^{\frac{T_2 - T_1}{J \omega_0} t} \quad (18)$$

따라서 1次捲線 1相의 저항을  $r_1$ 이라 하였을 경우 (8)식에 의한 기동시간  $t_b$  사이에서 抵抗  $r_1$ 에서 소비하는 에너지  $W_L$ 은 다음과 같이 된다.

$$W_L = \int_0^{t_b} r_1 I^2 dt = r_1 \frac{J \omega_0}{(T_2 - T_1)^3} \left[ c^2 \log_e \left| \frac{T_2}{T_1} \right| - 2cd \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) + \frac{d^2}{2} \left\{ \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^2 - 1 \right\} \right] \quad (19)$$

여기서,  $c \equiv (I_1 T_2 - I_2 T_1)$

$$d \equiv (I_1 - I_2) T_1$$

前述한 토크에 부가해서 그림 7의 電流를 가정하여 試算하면

고저항 농형에 대하여  $I_m = 26A$ ,  $I_n = 3A$ 라고 하면 1相分の 1차손실 에너지

$$W_H = 1.33 r_1 J \omega_0 \text{ [J]}$$

또 보통농형에 대해서  $I_1 = 48A$ ,  $I_2 = 25A$ 라고 하면 동일하게 1相分の 1차손실 에너지는

$$W_L = 62.9 r_1 J \omega_0 \text{ [J]}$$

가 되어 고저항 농형의 損失은 보통농형의 경우의 1/50이나 되는 큰 差가 된다.

전류치의 直線假定은 반드시 적절하지는 않으나 보통농형에서는 低速으로 큰 전류가 흐르면서 加速中인 低速에서의 체류시간이 길고, 한편 고저항 농형에서는 低速時的 기동전류 자체가 매우 적고 동시에 高토크이기 때문에 大電流域을 빨리 통과하므로 실제의 差가 이 정도는 안되어도 큰 差가 있는 것은 定性的으로 이해되리라 생각된다.

### 3. 高抵抗 籠形誘導電動機의 利點과 缺點

이상, 기술한 바와 같이 2次回路를 高抵抗으로 한 유도전동기의 보통농형전동기와의 相違로서

(a) 기동시 高 슬립 영역에서 2배 가까이 큰 기동 토크를 얻을 수 있다.

(b) 기동시 全 슬립 범위에 걸쳐 기동전류가 1/2 가까이 되어 적고 또 力率이 좋다.

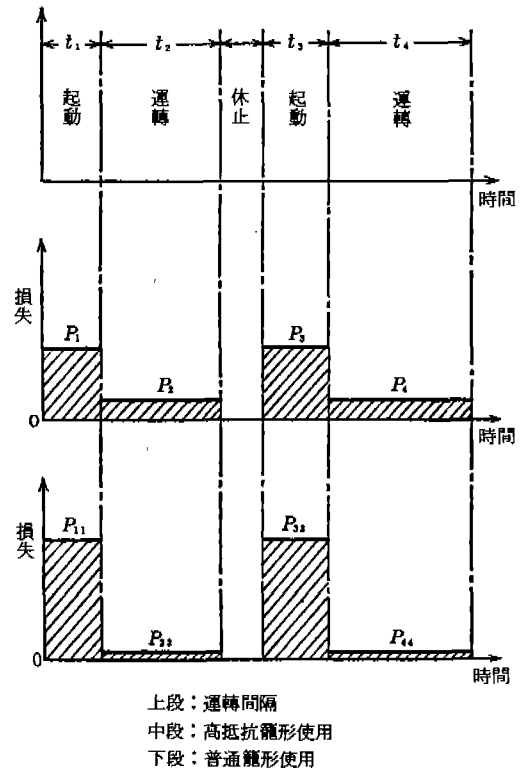
(c) 토크-슬립 특성이 垂下特性이 되기 때문에 정격 토크에서의 슬립이 매우 커지고 따라서 운전효율이 낮다.

(d) 高慣性負荷를 포함하여 부하 기동시에 入力電流가 적기 때문에 1차권선의 銅線이 매우 적다.

등을 들 수 있다.

이상에 의해 고저항 농형의 利點과 缺點을 정리하면 다음과 같다.

利點: 기동시에 적은 에너지로 負荷를 기동할 수 있고 또 기동전류가 적기 때문에 電源變動이 적다.



〈그림 8〉 斷續運轉에서의 損失의 比較

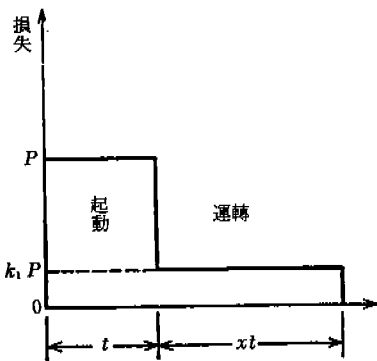
缺點: 정격부하에서의 운전은 슬립이 크고 또 효율이 대단히 나쁘다.

따라서 이 利點과 缺點을 살려서 사용하려면 기동의 빈도가 높고 또 정상운전시간이 짧은 負荷의 운전이 적절하다고 하겠다.

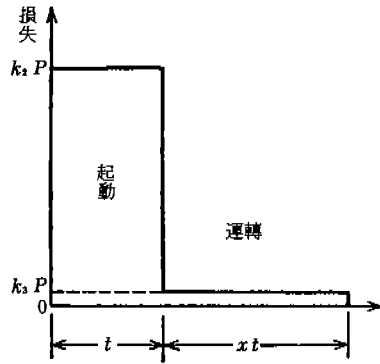
그림 8은 기동, 운전을 高頻度로 반복하는 負荷에 대하여 고저항 농형과 보통 농형을 적용하였을 때의 損失分의 比較를 圖形化한 것으로서 고저항 농형 사용시의 損失 에너지  $W_H$

내가 끈 電燈 한등

다음 世代 밝혀준다



(a) 高抵抗籠形使用



(b) 普通籠形使用

〈그림 9〉 反復負荷起動에서의 損失比較

$$W_H = P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4 \dots$$

보통 농형 사용시의 損失 에너지  $W_L$

$$W_L = P_{11} t_1 + P_{22} t_2 + P_{33} t_3 + P_{44} t_4 \dots$$

의 양자를 비교하여 손실 에너지가 적은 쪽의 電動機를 선택하는 데 사용된다. 이와 같이 하여 예를 들면 그림 9와 같이  $t$  초간에 기동하여  $K_1$  초간의 운전을 하고 냉각후는 이 기동운전을 반복하는 負荷가 있을 때 1사이클의 損失 에너지는 그림 (a)의 경우

$$P_t + k_1 P x t = P_t (1 + k_1 x) \equiv W_H$$

또 그림 (b)의 보통 농형의 경우

$$k_2 P_t + k_3 P x t = P_t (k_2 + k_3 x) \equiv W_L$$

이 된다. 따라서 고저항농형을 사용가능케 하는 조건은  $W_H < W_L$  이고

$$(1 + k_1 x) < (k_2 + k_3 x)$$

$$\therefore x < \frac{(k_2 - 1)}{(k_1 - k_3)}$$

를 만족시키도록 운전시간을 기동시간의  $x$  배 이하로 함으로써 高抵抗籠形電動機에 의한 손실 에너지의 절약으로 연결된다.

이상은 기동, 운전을 반복한다 하지만 電動機의 온도상승이 한번 室温까지 냉각된 후로부터의 반복이다. 回轉子에 가장 에너지가 短時間에 집중하여 발생하는 高慣性負荷의 경우를 포함하여 단시간에서의 고빈도 반복기동에 있어서의 回轉子導體의 熱容量과 온도상승에 대한 限界를

고려하여야 한다.

고저항 농형유도전동기에서는 일반적으로 1회만의 起動時的 許容負荷  $GD^2$ 가 표시되어 있다. 따라서 그 許容値에 가까운  $GD^2$ 이면 다음의 기동은 냉각되기까지 (특히 自己 팬의 電動기에서는 冷却에 오랜 시간을 필요로 하기 때문에 주의) 時間을 둘 必要가 있고 만일 허용 값보다 훨씬 작은 負荷  $GD^2$ 이면 電動기 자체의  $GD^2$ 을 포함한 총  $GD^2$ 에 대한 加速 에너지의 연속 반복의 누적이 허용  $GD^2$  1회의 加速 에너지 이내로 제한할 필요가 있다.

#### 4. 高抵抗電動機의 應用

이런 종류의 電動機의 응용으로서는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

(1) 高慣性負荷로 高起動빈도에의 적용: 畚斗용 엘리베이터, 空氣를 갖는 往復動 컴프레서, 프레스 등

(2) 小起動電流 低使用빈도에의 적용: 뱀게이트의 捲揚機 (비상용 전원용량의 抵減)

(3) 토크의 垂下物性 이용: 瞬間尖頭負荷 (압연기 등)에 플라이휠과 병용한 高슬립에 의한 플라이휠 에너지의 放出, 印加電圧을 다이리스터 등으로 제어하여 可變速을 얻는 電動機.

(다음 호에 계속)