

에너지사용합리화를 위한 전동력설비의 재검토

— 전동기용량의 선정법 —

역/대한전기기사협회 기술실

전동기는 산업의 모든 분야에서 사용되고 그 용도는 다방면에 걸쳐 여러가지 부하가 요구하는 특성에 합치한 많은 종류의 전동기가 사용되고 있다. 일반적인 생산공장에서는 전동기가 소비하는 전력은 전체의 약 50%를 넘게 점유한다고 하니, 전동기의 능력을 충분히 발휘하여 귀중한 전력을 유효하게 활용하는 것은 전력절감이나 설비의 유용한 활용면에서 볼 때 매우 필요하다고 본다. 전동기의 능력을 충분히 활용하려면 전동기의 특성을 파악하고 부하와 사용목적에 적합한 용량, 정격, 토크특성을 갖는 전동기를 선택하여야 한다.

여기서는 가격이 저렴하고 기계적으로 튼튼하고 보수하기가 쉽기 때문에 가장 많이 사용되는 3상 유도전동기에 대하여 전력절감을 하고자 하는 입장에서 전동기용량의 선정법에 대하여 기술한다.

1. 사용과 정격

전동기의 부하에는 송풍기, 펌프와 같이 연속운전되는 것, 서터, 게이트 등의 단시간 정격인 것, 혹은 크레인, 엘리베이터, 공작기계 등과 같이 거의 일정한 주기에 시동·운전·제동·정지 등의 여러가지를 조합시켜 반복 사용되는 것이 있다. 이를 사용이라 하고 다음과 같이 정의되어 있다.

가. 사용의 종류·기호 및 정의

(1) 연속사용 (S_1)

실질적으로 일정한 부하로 전동기가 열적평형(熱的平衡)에 도달하는 시간 이상 계속 운전되는 사

용을 말한다.

(2) 단시간 사용 (S_2)

실질적으로 일정한 부하로 전동기가 열적평형에 도달하지 않는 범위의 지정시간 계속운전한 후 전동기를 정지하고 다음 시동시까지 전동기의 온도와 냉매온도 (일반적으로는 주위온도)와의 차가 2°C 이내까지 떨어지는 사용을 말한다.

(3) 반복사용 (S_3)

실질적으로 일정한 부하의 운전시간 및 전압이 인가되지 않는 정지기간을 1주기로 하여 이것이 반복되는 사용을 말한다. 이때 운전시간, 정지기간은 각기 시동 및 제동조건이 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 있다.

(4) 시동의 영향이 있는 반복사용 (S_4)

S_3 의 사용에 대하여 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 없는 시동기간이 있는 점이 다르다. 제동조건이 온도상승에 끼치는 영향을 무시할 수 있는 것으로 한다.

(5) 전기제동을 포함한 반복사용 (S_5)

S_3 의 사용에 대하여 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 없는 시동기간과 전기 제동기간이 있는 점이 다르다.

(6) 반복부하 연속사용 (S_6)

실질적으로 일정한 부하의 운전시간 및 무부하운전기간을 1주기로 하고 이것이 반복되는 사용을 말한다. 이 경우 운전시간, 무부하운전기간은 각기 전동기가 열적평형에 도달하는 시간보다도 짧고 또 시

동 및 제동조건이 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 있어야 한다.

(7) 전기제동을 포함한 반복부하 연속사용 (S_7)
온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 없는 시동기간, 실질적으로 일정한 부하의 운전기간, 온도상승이

끼치는 영향이 무시될 수 없는 전기제동기간을 1주기로 하여 이것이 반복되어 사용되는 사용을 말한다. 이 경우 전압이 인가되지 않는 기간 및 정지기간이 없고 운전기간은 전동기가 열적평형에 도달하는 시간보다 짧다.

(8) 변속도 반복부하 연속사용 (S_8)

2이상의 다른 회전속도에 각기 대응하는 일정한 부하 (예를들면, 유도전동기의 경우는 극수의 전환으로 생긴다)의 운전기간을 1주기로 하고 이것이 반복되는 사용을 말한다. 이 경우 전압이 인가되지 않는 기간 및 정지기간이 없고 각기의 전동기의 회전속도에서의 운전기간은 전동기가 열적평형에 도달하는 시간보다 짧은 것으로 한다.

그림 1에 사용방법에 따른 전동기의 부하·손실·온도상승의 경향을 표시한다.

나. 정격

전동기에 보증된 사용한도를 정격이라 한다. 출력에 대한 사용한도를 정하는 동시에 전압·회전속도·주파수 등을 지정한다. 이들을 각기 정격출력·정격전압·정격회전수·정격주파수 등이라 한다. 이들의 값은 전동기의 명판에 표시된다. 정격은 다음과 같이 여러 종류로 구분된다.

(1) 연속정격

지정 조건하에서 연속사용할 때 그 전동기에 관한 표준규격에 정하여져 있는 온도상승을 초과하지 않고 기타의 제한에 벗어나지 않는 정격을 말한다.

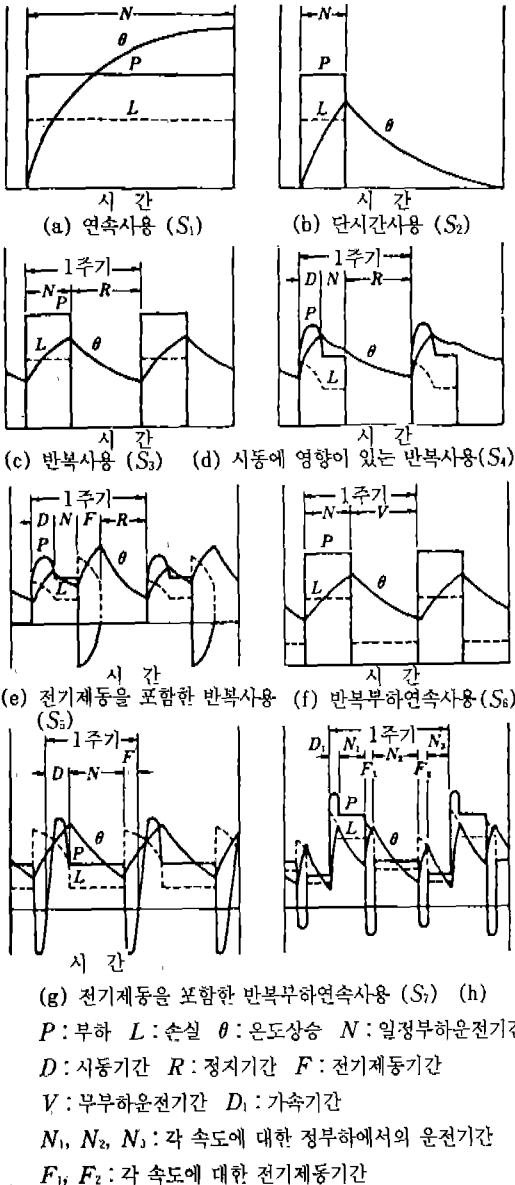
(2) 단시간 정격

냉각상태로부터 시작하여 지정된 일정 단시간 지정조건하에서 전동기를 단시간 사용할 때 그 전동기에 관한 표준규격에 정하여져 있는 온도상승 한도를 초과하지 않고 기타의 제한에 벗어나지 않는 정격을 말한다.

시간의 표준치는 10, 30, 60 또는 90분으로 한다.

(3) 반복정격

지정조건하에서 전동기가 S_3, S_4, S_5, S_6, S_7 또는 S_8 의 사용에 이용될 때, 그 전동기에 관한 표준규격에 정하여져 있는 온도상승 한도를 초과하지 않고 기타의 제한에 벗어나지 않는 정격을 말한다. 전동



<그림 1> 각종 사용에서의 부하·손실·온도상승의 경향

기는 그 사용 행정중의 최대부하 및 부하의 급격한 변동에 견디어야 한다. 특히 지정되지 않을 때는 1 주기의 표준치는 10분의 1, 부하시간율 (%ED)의 표준치 15, 25, 40, 60% ED로 되어 있다.

(4) 등가정격

지정조건하에서 전동기가 S_3, S_4, S_5, S_6, S_7 또는 S_6 의 사용에 쓰여질 경우 사용과 다른 열적에 등가인 연속사용 또는 단시간 사용하는 곳에 대신 쓸수 있다. 이렇게 대신 사용하는데 대한 시험을 하였을 때 그 전동기에 관한 표준규격에 정하여져 있는 온도상승 한도를 초과하지 않고 기타의 제한에 벗어나지 않는 정격을 말하고, 등가연속정격 또는 등가단시간정격이라 한다.

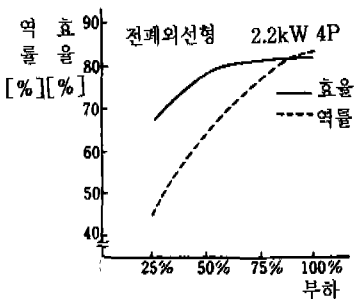
2. 전동기 출력을 결정하기 위한 기초

가. 효율

전동기의 입·출력의 비인 효율은 다음 식으로 표시된다,

$$\text{효율} = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 = \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{손실}} \times 100[\%] \dots(1)$$

전동기의 손실은 크게 나누어 부하에 관계가 없는 철손·기계손·풍손으로 나눈 고정손, 부하에 따라 변하는 1차동손, 1차동손으로 나눈 부하손으로 분류되며 손실의 대부분은 이들로 점유되고 있다. 일반적으로 고정손 ≈ 부하손이며, 전동기효율은 100%부근에서 최대가 된다. 3상유도전동기의 효율·역률과 부



<그림 2> 출력에 대한 효율·역률

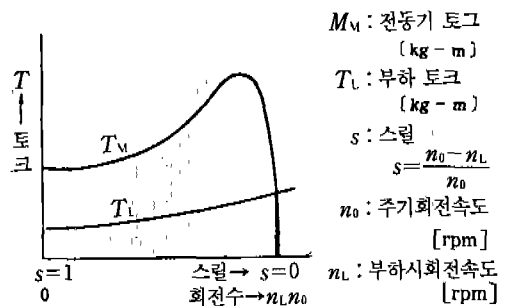
하의 관계를 그림 2에 표시한다.

경부하에서는 효율·역률이 저하되고 50%부하 이하에서는 급격하게 효율이 떨어진다.

전력절감면에서는 100%부하 부근에서 사용하는 것이 바람직하다.

나. 토크

농형 3상유도전동기의 토크를 그림 3에 표시한다.



<그림 3> 토크속도 특성

전동기가 시동·가속하여 회전속도 n_L 에 도달하려면

$$T_s > T_L, T_m > T_L \dots \dots \dots(2)$$

일것이 필요하다. 단시간사용 및 반복사용에 연속정격의 전동기를 썼을 때 연속정격출력보다 큰 출력으로 사용가능한 경우가 있다. 이때 전동기의 온도상승 이외에 시동방식 및 전원전압의 변동을 고려하여 결정하여야 한다. 일반용 3상유도전동기의 시동토크는 다음과 같이 정하여져 있다.

<표 1> 농형 유도전동기의 시동토크

종 류	기 호	시 동 토크	비 고
농 형	C	125% 이상	.저압에만 적용함
제1종 특수농형	K1	100% 이상	
제2종 특수농형	K2	150% 이상	

다. 시동과 제동시의 발생손실

전동기의 용도에는 크레인, 엘리베이터, 탭핑머신과 같이 시동·제동을 빈번하게 하는 것과 원심분리와 같이 플라이휠효과(GD²)가 큰 것을 가속하는 것

이 있다.

이와 같은 용도에서는 시동시 및 전기제동시에 발생하는 손실을 무시할 수 없게 된다.

시동시 및 제동시에 농형 유도전동기의 2차 도체에 발생하는 손실은

$$Q_2 \frac{GD^2 \cdot N^2}{730} (S_1^2 - S_2^2) \frac{T_M}{T_M \pm T_L} [W \cdot S] \dots \dots \dots (3)$$

이 되어 +는 제동시, -는 시동시이다.

여기에

Q_2 : 2차 도체내에 발생하는 손실 [W · S]

GD^2 : 전동기와 부하의 합계 플라이휠효과 [kg · m²]

N : 동기회전속도 [r, p, m]

T_M : 전동기 토크, 또는 제동토크 [kg · m]

T_L : 부하토크 [kg · m]

다음에 고정자에 발생하는 손실은 여자전류를 무시하면

$$Q_1 = \frac{r_1}{r_2} Q_2 [W \cdot S] \dots \dots \dots (4)$$

가 된다.

여기서 r_1 : 1차 도체저항

r_2 : 1차환산 2차 도체저항

시동시 및 제동시의 전손실 Q 는

$$Q = Q_1 + Q_2 = (1 + \frac{r_1}{r_2}) Q_2 [W \cdot S] = K \cdot E_s \cdot GD^2 [W \cdot S] \dots \dots \dots (5)$$

가 된다. 시동 및 제동시의 발생손실을 표 2에 표시한다.

<표 2> 시동 및 제동시의 발생손실

구 분	스 랫		G	Q
	S ₁	S ₂		
시 동	1	0	1	$E_s \cdot GD^2$
회 생 제 동	-1	0	1	$E_s \cdot GD^2$
역 상 제 동	2	1	3	$3E_s \cdot GD^2$
역 전	2	0	4	$4E_s \cdot GD^2$

여기서

$$K = (S_1^2 - S_2^2) E_s = \frac{N^2}{730} \cdot \frac{T_M}{T_M \pm T_L} \cdot (1 + \frac{r_1}{r_2})$$

시동시 및 제동시의 2차도체에 발생하는 손실은 2

차 저항에 관계없이 생기고 1차 도체에 발생하는 손실은 2차 도체저항이 클수록 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 시동·제동을 빈번히 반복하는 용도에는 2차도체에 고유저항이 높은 재료를 쓴 고저항 농형전동기를 이용한다. 권선형 유도전동기는 시동시 및 제동시에 슬립링을 거쳐 2차회로에 저항을 접속하고 이 저항치를 전환하여 시동을 한다. 2차회로에 접속되는 저항 r_2 의 1차 도체에 발생하는 손실은 1/10이하가 되며 고시동빈도에 적합하다.

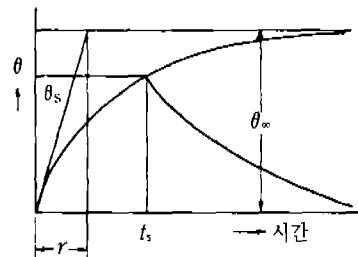
3. 연속사용의 경우

가. 연속사용의 경우

그림 1 (a)에 표시하는 바와 같은 부하가 시간에 관계없이 일정하고 변동하지 않을 때는 부하기기의 효율의 오차, 부하의 사용조건에 따른 변화의 비율 및 전원전압의 변동에 따른 온도상승의 여유를 감안하여 소요동력 P에 대하여 5~25% 정도 가산한 값을 정격으로 한다. 부하에 대한 여유를 너무 크게 잡으면 전동기의 치수가 너무 커져 가격면에서 불리하여 질 뿐만 아니라 특성면에서는 그림 2에 표시하는 바와 같이 경부하가 될수록 효율·역률이 떨어져 전력소비의 면에서도 불리하여 진다. 이 때문에 여유를 보는 것도 부하의 성질을 경험적, 실험적인 견지에서 판단하여 결정하여야 한다.

나. 단시간정격의 경우

그림 4에 표시하는 바와 같은 단시간정격의 경우는 포화온도 θ_{∞} 에 도달하기 전에 전원에서 절리되기 때문에 동일출력의 연속정격의 전동기에 비하여 허



<그림 4> 단시간 정격의 시간과 온도의 관계

용손실을 크게할 수 있어 큰 출력으로 사용이 가능하다. 여기서는 연속정격의 전동기와 동일 냉각방식 일때 동일치수의 전동기로 낼 수 있는 허용출력을 구하여 본다.

전동기의 온도상승은 다음식으로 표시할 수 있다.

$$\theta_s = \frac{Q}{A}(1 - \epsilon^{-t_s/\tau})$$

$$= Q = (1 - \epsilon^{-t_s/\tau}) \dots\dots\dots (6)$$

- 여기서 θ_s : 단시간 사용시의 온도상승 [deg]
- $\theta_\infty = Q/A$: 연속운전시의 온도상승 [deg]
- $C = C/A$: 열시정수 [S]
- C : 열용량 [$W \cdot S/C^\circ$]
- A : 열방산계수 [$W \cdot S/C^\circ$]
- Q : 발열량 [W]

연속정격시의 발열량 Q 와 단시간 정격시의 발열량 Q^1 의 경우의 온도상승을 같이 하려면 아래의 식이 성립한다.

$$\theta_s = \frac{Q^1}{Q} \theta_\infty (1 - \epsilon^{-t_s/\tau}) = \theta_m$$

$$\frac{Q^1}{Q} = \frac{1}{1 - \epsilon^{-t_s/\tau}} \dots\dots\dots (7)$$

이 되어 t_s 를 짧게 할수록 Q^1/Q 를 크게할 수가 있다. 단시간 정격의 경우 권선의 온도상승은 동손의 영향이 커진다. 동손은 출력의 2승에 비례하여 단시간 정격과 연속정격의 허용출력비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{P^1}{P} = \sqrt{\frac{Q^1}{Q}} = \sqrt{\frac{1}{1 - \epsilon^{-t_s/\tau}}} P^1 = P \sqrt{\frac{1}{1 - \epsilon^{-t_s/\tau}}} \dots\dots (8)$$

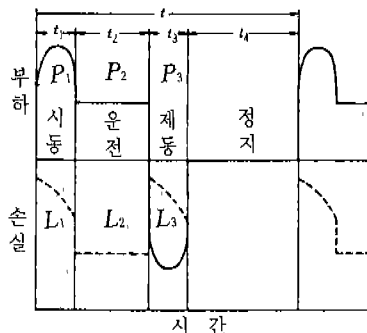
여기서 P^1 : 단시간정격시의 허용출력

P : 연속정격시의 허용출력

전동기의 열시정수는 형식별로는 개방형보다 전폐형이, 극수가 적은것 보다 큰것이 크고 또 전동기 치수가 커짐에 따라 커진다. 일반적으로는 0.5~1.5시간이다. 온도상승면에서 허용출력을 구하는 방법을 기술하였으나 시간정격이 극단적으로 짧은 경우에는 허용출력은 매우 커지기 때문에 온도상승 이외에 전동기 토크와 부하토크와의 관계, 구조면에서는 축 및 축반이의 강도를 고려하여 결정하여야 한다.

다. 반복사용의 경우

반복사용은 운전기간 및 정지기간이 열적평형에 도달하는 시간보다 짧고 실질적으로 일정한 부하가 반복되므로 온도는 그림 5의 곡선에 따라 상승하고 최종적으로 θ_1 과 θ_2 의 온도가 된다. 여기서는 1주기의 기간이 10분이하의 경우를 상정하여 사용조건 S_3, S_4, S_5, S_6, S_7 의 경우에 대하여 손실평균법을 이용하여 각기의 반복사용시의 전동기의 허용출력을 구하여 본다.



<그림 5> 부하와 손실의 관계

(1) 손실평균법

손실평균법은 1주기중의 발생손실이 평균하여 발생하는 것으로 평균발생손실을 구하여 연속사용의 부하 몇 kW의 손실과 같은 것인가 라는 것으로 정격을 정하는 방법이다.

그림 5에 표시하는 반복운전시의 1주기의 평균손실 La 는 다음과 같이 표시된다.

$$La = \frac{L_2 + L_3 t_2 + L_3}{t_e} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 L_1 : 시동시 발생손실 [$W \cdot S$]

L_2 : 운전시 발생손실 [W]

L_3 : 전기제동시 발생손실 [$W \cdot S$]

t_e : 등가주기 [S]

등가주기 t_e 는 가속·감속·정지기간에는 냉각효과가 저하되는 것을 고려하여 주기 t 대신 쓰고 아래 식으로 표시할 수 있다.

$$Te = \alpha t_1 + t_2 + \alpha t_3 + \beta t_4 \dots\dots\dots (10)$$

여기서 α 는 가감속시, β 는 정지시의 냉각계수라 하고 표 3에 그 일례를 표시한다.

<표 3> 냉각계수

형 식	α	β
개방형	0.6	0.3
전폐외선형	0.7	0.4

이와같이 하여 구한 평균손실 L_e 를 연속정격의 발생손실과 비교하여 전동기의 온도상승 및 허용출력을 구한다.

(2) 허용출력을 구하는 방법

그림 5에 표시하는 사용을 예로하여 구하여 본다. 여기서 시동 및 제동기간의 발생손실이 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 없다. 시동시 및 제동시의 발생손실은 (5)식과 표 2에서

$$\text{시동시 발생손실 } L_1 = E_s \cdot GD^2 = C \cdot E_s \cdot GD^2 \quad (11)$$

$$\text{제동시 발생손실 } L_3 = K \cdot E_s \cdot GD^2 \\ = C \cdot K \cdot E_s \cdot GD^2_M \dots (12)$$

여기서 K 는 제동방식에 의하여 값이 다르다(표 2 참조). 또 C 는 관성계수라 하고 다음과 같이 표시된다.

$$C = \frac{GD^2_M + GD^2_L}{GD^2} = \frac{GD^2}{GD^2_M}$$

여기서 GD^2_M : 전동기의 플라이휠효과 [kg · m²]
 GD^2_L : 전동기축 환산의 클라이휠효과 [kg · m²]
 GD^2 : $GD^2_M + GD^2_L$ [kg · m²]

1주기중의 발생손실이 연속사용시의 허용최대손실과 같은 부하까지 사용이 되므로 (11), (12)식에 대입하면

$$\frac{C \cdot E \cdot (1+K) + L_2 t_2}{\alpha(t_1+t_3) + t_2 + \beta t_4} = L \dots\dots\dots (13)$$

일반적으로 $\alpha(t_1+t_3) \ll \beta t_4$ 이므로
 $t_1=0, \quad t_3=0$

라 하면 $t \approx t_2 + t_4$

$$t_2 = t \frac{\%ED}{100}$$

가 된다. 여기서 %ED(Einshalt Dauer)는 부하시간율이라 부르고, 1주기간의 부하기간의 비율을 말

하고 백분율로 표시된다.

$$t_4 = t(1 - \frac{\%ED}{100})$$

가 되어 (13)식은

$$\frac{C \cdot E_s \cdot (1+K) + L_2 \cdot ED \cdot t}{t \cdot ED + \beta t(1-ED)} = L$$

여기서 $ED = \frac{\%ED}{100}$

$$t = \frac{C \cdot E_s(1+K)/L}{ED(1-\beta - \frac{L_2}{L} + \beta)}$$

$$Z = \frac{3600}{t} = \frac{3600L}{C \cdot E_s(1+K)} [ED(1+\beta - \frac{L_2}{L}) + \beta]$$

여기서 Z : 1시간당의 1주기의 반복빈도

$$\frac{L_2}{L} = 1 - \beta + \frac{\beta}{ED} - \frac{Z \cdot C \cdot E_s(1+K)}{3600L \cdot ED} \dots\dots\dots (14)$$

가 되어 반복사용시의 허용출력 P' 는 연속사용시의 허용출력 P 와의 비율로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{P'}{P} = \sqrt{\frac{L^2}{L}} = \sqrt{1 - \beta + \frac{\beta}{ED} - \frac{Z \cdot C \cdot E_s(1+K)}{3600L \cdot ED}} \dots (15)$$

여기서 $C \cdot E_s(1+K)$ 는 1주기중의 시동 및 제동시의 발생손실의 합계이니가 1주기중에 시동과 제동을 몇회 반복할 때는 그 발생손실을 더하여 주면 된다. 또 L_2 는 일정부하로 하였으나 1주기중에 운전부하가 변할 때는 손실평균법에 의하여 평균손실로서 L_2 를 구하고 L_2 대신 사용할 수 있다.

(15)식은 전기제동을 포함한 반복사용 (S_3)의 경우에 해당된다.

(가) 반복사용 (S_3)의 경우

시동 및 제동조건이 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 있는 사용조건이므로 (15)식에서

$$C \cdot E_s(1+K) = 0$$

이 되어

$$P' = P \sqrt{1 - \beta + \frac{\beta}{ED}}$$

로 구하여 진다.

(나) 시동의 영향이 있는 반복사용 (S_1)의 경우

제동조건이 온도상승에 미치는 영향을 무시할 수 있는 사용조건이니가 (15)식에서 $K=0$ 으로서 구할 수 있다.

(다) 반복부하 연속운전사용 (S_6)의 경우
 실질적인 일정부하의 운전기간과 무부하 운전기간
 을 1주기로 한 반복부하 연속사용이 된다. 시동·제동
 ·정지기간은 고려하지 않아도 되므로 (3)식은

$$\frac{L_2}{L} = 1$$

이 된다.

즉 1주기의 평균손실이 $L_2=L$ 까지 사용되게 된
 다. 그림 6에 표시하는 사용의 경우에 손실평균법으
 로 구하면

$$L_2 = \frac{(L_N t_1 + L_V t_2)}{(t_1 + t_2)} = L$$

여기서 L_N : 부하시 발생손실 [W]

L_V : 무부하시 발생손실 [W]

t_1 : 부하운전기간 [S]

t_2 : 무부하운전기간 [S]

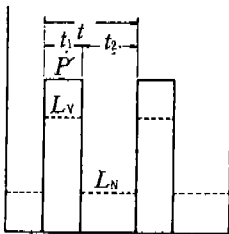
$$L_N = \frac{L(t_1 + t_2) - L_V t_2}{t_1}$$

반복부하운전시의 연속사용시의 허용출력비는

$$\frac{P'}{P} = \sqrt{\frac{L_N}{L}} = \sqrt{\frac{L(t_1 + t_2) - L_V t_2}{L t_1}}$$

$$P' = P \sqrt{\frac{L(t_1 + t_2) - L_V t_2}{L t_1}}$$

로 구하여 진다.



<그림 6> 반복부하 연속사용 (S_6)

(라) 전기제동을 포함한 반복부하 연속사용 (S_7)
 연속사용이므로 %ED=100% 이다.

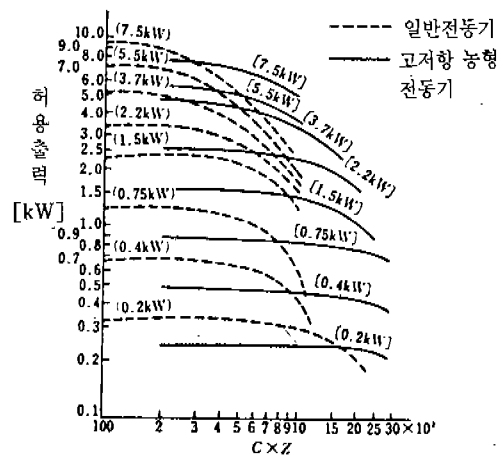
1주기중에서 온도상승에 미치는 영향이 무시할 수
 없는 시동과 제동기간을 포함하므로 (15)식에서 β
 =1, ED=1로 하면

$$PF = P \sqrt{1 - \frac{Z \cdot C \cdot E_s (1+K)}{3600}}$$

로서 P를 구할 수 있다.

이상 반복사용시의 3상유도전동기의 허용출력을
 구하는 방법에 대하여 기술하였다.

시동·제동시의 발생손실이 온도상승에 미치는 영
 향을 무시할 수 없는 S_4 , S_5 , S_7 의 사용은 반복빈도
 가 많은 경우나 부하의 GD^2_L 이 클 때에 해당하고,
 시동·제동시의 손실이 운전시의 손실을 상회하고 전
 동기의 회전자와 가속·감속하기 때문에 많은 전력을
 소비하게 된다. 반복빈도가 많은 용도에서는 GD^2_M
 $>GD^2_L$ 의 경우가 많으니까 온도상승을 내리거나 허
 용출력을 늘리는 목적으로 전동기 치수를 크게 하면
 GD^2_M 이 증가하여 시동·제동시의 손실이 증가하므로
 전동기의 절연재료에 내열성이 높은 재료를 써서 소
 형으로 만들도록 한다. 또 고저항 농형전동기나 권
 선형전동으로서 시동·제동시의 손실을 저하시키도록
 보편적으로 실시하고 있다. 그림 7에 같은 치수의
 일반전동기와 고저항 농형전동기의 40%ED에서의
 $C \times Z$ 와 허용출력의 관계를 표시한다. 여기서 $C \times$
 Z 가 큰 범위에서는 고저항 농형전동기의 허용출력
 이 커져 손실은 적어지는 것을 표시한다.



<그림 7> 전폐외선형 4극 40%ED사용 예