

## 전기설비의 전기에너지 절약 운영기술 ⑦

자료제공 : 기술연구팀 ☎ 02)875-6524

### 8. 역률 개선

가. 에너지절감을 위한 역률개선

일반적으로 사용되고 있는 전력은 거의 교류이다. 이것은, 변압기 등으로 쉽게 전압을 승강할 수 있고, 사이리스터에 의한 전류제어가 쉽다는 것 등, 직류에 비하여 잇점이 많기 때문이다.

그러나 교류에는 역률의 문제가 있다.

역률의 뜻은 그림 3.4.7(a)에서 유효에너지로서 꺼내지는 유효전력 P와 무효전력 Q의 합성합계(벡터합계)로 공급된 피상전력 R로 무효전력 P를 나눈 것을 말한다.

(1) 피상전력 (R)과 유효전력(P)와 무효전

력(Q)의 벡터합

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

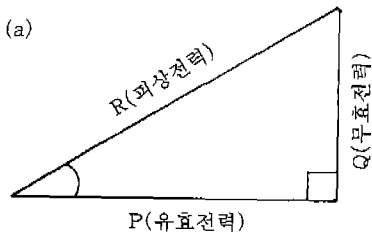
$$(2) \text{역률}(\cos\theta) = \frac{\text{유효전력}(P)}{\text{피상전력}(R)} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

(3) 무효전력 Q=0의 경우

(4) 유효전력 P=0의 경우

그림 3.4.7에서, 무효전력 Q(그림 (b))가 영인상태, 즉 전력을 가장 효율적으로 사용하고 있는 상태에서부터, 유효전력 P가 영인(그림 (c))의 가장 효율이 나쁜 상태까지 역률은 그에 따라 1~0의 사이를 변화한다.

무효전력은 소비에 관계없는 전력이므로, 얼

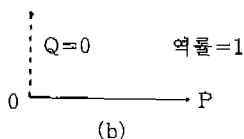


(1) 피상전력(R)과 유효전력(P)과 무효전력(Q)와 벡터합

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$(2) \text{역률}(\cos\theta) = \frac{\text{유효전력}(P)}{\text{피상전력}(R)} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

(3) 무효전력 Q = 0인 경우



(4) 유효전력 P = 0인 경우

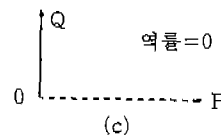


그림 3.4.7 역률의 뜻

핏 보기에 하등의 손실도 없는 것 같이 보이지만, 전기설비로서의 변압기나 전선 등은 그 몫만큼 용량이 큰 것을 설비하여야하고, 또한 그 때문에 무효전류가 기기나 전선의 저항에 의하여 열로 변화하여 손실로 된다.

따라서, 역률은 개선하여 무효전력을 감소시키는 것은 에너지 절감을 권고하는데 있어 매우 유효한 수단으로 된다.

### 나. 전력콘덴서에 의한 역률의 개선

역률을 개선하는 장치로서, 전력콘덴서는 전기기기로서 안정되어 있고, 설치하는데도 변압기 같은 공사로 할 수 있고 설치비용도 전기요금의 절감으로 1~2년에 상각할 수 있는 등 도입의 잇점이 크다.

역률 개선을 하면 무효전력이 감소하고

- 배전선 용량 그대로, 공급전력의 증가
- 전기요금의 절감
- 배전선 계통의 손실 감소
- 배전전압의 개선

등이 있다.

#### (1) 배전선 용량 그대로 공급전력의 증가

배전선 용량이 부족한 경우, 전압강하나 전압변동, 그 위에 배선의 온도상승 등이 발생한다. 이것을 해소하기 위해서는 변전기나 배전선을 증설하는 방법도 있으나, 역률의 개선으로도, 원래의 배전선 용량으로 공급전력을 증가시킬 수 있다.

#### (2) 전기요금의 절감

수용가측의 역률개선의 실시는, 전력회사에서도 배전계통 용량의 증가, 배전손실의 감소, 배전전압의 개선 등의 이익이 얻어지므로, 전력회사에서도 역률 할인 및 할증제도가 있다.

한국전력공사의 경우는, 수용가의 기준 역률은 90% 이상으로 유지되어야 하며, 전력요금 중, 기본요금은 역률의 90%를 상회하는 경우에는 95%까지, 1% 마다 1%씩 할인된다. 역률이 90%에 미달되는

경우에는 매 1%에 대하여 기본요금의 1%씩을 추가한다.

### (3) 배전선 계통의 손실의 감소

공장배전에서의 역률의 개선은, 전선의 저항손실 즉 IR손을 감소 시키는데 효과가 있다. 이 경우, 역률의 개선은 저항 R의 감소가 여러 가지 이유로 할 수 없는 수용가에 있어서는 전류 I를 감소시키고, 그 결과 IR손을 감소시키므로, 효과는 크다.

지금, 그림 3.4.8에서 배전선 전류 I<sub>1</sub>, 역률 cosθ<sub>1</sub>인 것을 배전선의 말단에 전력 콘덴서 I<sub>2</sub>를 설치하여 역률을 개선하여 전류 I<sub>2</sub>, 역률 cosθ<sub>2</sub>로 한 경우, 유효전류 I는 부하가 변하지 않으므로 역률이 변화하여도 같으므로, 다음 식이 성립된다.

$$\text{즉 } I = I_1 \cos \theta_1 = I_2 \cos \theta_2$$

$$\therefore I_2 = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} I_1$$

따라서, 배전손실의 감소는

(배전손실의 감소) = (개선전의 배전손실) - (개선후의 배전손실)

$$= I_1^2 R - I_2^2 R = I_1^2 R - \left( \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} I_1 \right)^2 R$$

$$= I_1^2 R \left[ 1 - \left( \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^2 \right]$$

윗 식을 정리하면

(배전손실의 감소) = (개선전의 배전손실)

$$\times \left[ 1 - \left( \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^2 \right]$$

예컨대 말단부하의 역률은 70%로부터 95%로 개선한 경우, 배전손실은 개선전의 배전손실의 몇 %로 감소하는가는

$$\frac{\text{배전손실의 감소}}{\text{개선전의 배전손실}} \times 100[\%]$$

$$= \left[ 1 - \left( \frac{0.7}{0.95} \right)^2 \right] \times 100[\%]$$

$$= (1 - 0.543) \times 100[\%] = 45.7[\%]$$

따라서, 45.7% 감소한다.

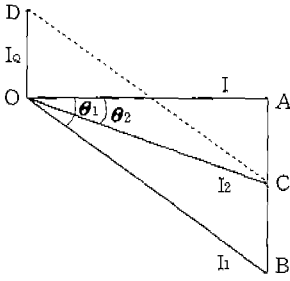


그림 3.4.8 역률개선에 의한 배전선 전류의 벡터

#### (4) 배전전압의 개선

배전선로의 전압강하의 식은, 1상에 대해서는 다음 식으로 표시된다.

$$e = I(R \cos \theta + X \sin \theta)$$

지금, 선로전류 I, 역률  $\cos \theta$ 였던 배전선을 역률을 개선하여 선로전류 I<sub>1</sub>, 역률  $\cos \theta_1$ 로 하였을 때의 배전선로의 전압강하의 감소 V<sub>e</sub>는

$$V_e = I(R \cos \theta + X \sin \theta) - I_1(R \cos \theta_1 + X \sin \theta_1)$$

여기서, 부하전력은 개선전후에 변화하지 않으므로,

유효전류(kW 전류) =  $I \cos \theta = I_1 \cos \theta_1 =$  일정  
식 3.9은 식 3.8에 대입하면

$$\begin{aligned} V_e &= I \cos \theta (R + X \tan \theta) - I \cos \theta_1 (R + X \tan \theta_1) \\ &= I \cos \theta (R + X \tan \theta) \left(1 - \frac{R + X \tan \theta_1}{R + X \tan \theta}\right) \end{aligned}$$

따라서, 전압강하의 감소 V<sub>e</sub>는  
(전압강하의 감소)

$$= (\text{원래의 전압강하}) \times \left(1 - \frac{R + X \tan \theta_1}{R + X \tan \theta}\right)$$

로 된다. 예컨대, 1km의 배전선의 말단의 부하역률을 70%로부터 95%로 개선한 경우, 전압강하의 감소를 원래의 전압강하에 대하여 몇 %로 되는가를 위 식을 써서 계산하여 보면 다음과 같이 된다.

단, 배전선은 CV케이블 100mm<sup>2</sup>, 저항 0.18 Ω/km, 리액턴스 0.08 Ω/km로 한다.

$$R = 0.18 \Omega, X = 0.08 \Omega \text{ 이므로}$$

$$\cos \theta = 0.7 \text{ 일 때 } \tan \theta = 1.02$$

$$\cos \theta = 0.95 \text{ 일 때 } \tan \theta = 0.33$$

을 위식에 대입하면

$$\frac{\text{전압강하의 감소}}{\text{원래의 전압강하}} \times 100[\%] =$$

$$\left(1 - \frac{R + X \tan \theta_1}{R + X \tan \theta}\right) \times 100[\%] = 21.1\%$$

이와 같이, 배전선이 말단의 부하의 역률을 전력콘덴서에 의하여 개선하면, 원래의 전압강하의 21.1% 감소시킬 수 있다.

### 9. 배전설비에서의 에너지절약 요령

- (1) 단상3선식 배전방식은 동량을 경감시킨다.
- (2) 배전선을 굵게 함으로써 선로손실을 경감시킨다.
- (3) 배전전압을 높게 하면, 동일 전력을 보낼 경우 전류가 적어지므로 전선의 전압강하가 적어진다.
- (4) 전선의 임피던스를 적게 하든가, 배전거리를 짧게 하면 전선의 전압강하가 적어진다.
- (5) 전압변동을 적게 하려면, 높은 전압으로 배전하든가 배전의 임피던스를 적게 하든가 한다.
- (6) 전력콘덴서의 자동개폐로 역률을 개선하고 전압을 올리기도 한다.
- (7) 전력손실과 전압강하가 적은 네트워크방식이나 뱅킹방식의 배선방식을 선정한다.
- (8) 전압강하와 배전손실이 가장 적은 배전방식은 3상4선식이다.
- (9) 전압조정장치로는 부하전압조정기나 부하시 탭변환변압기 또는 유도전압 조정기를 사용하여, 시시각각의 전압 변동을 조정한다.

### 제5절 전동기설비의 에너지절약 운영

#### 1. 전동기설비의 에너지절약 대책

전동기는 생산 설비의 중추 역할을 하는 기

계이다. 따라서 그 설비에 알맞은 전동기를 선정하여 효율적으로 운전하고 관리하는 일은 생산성의 향상뿐만 아니라 에너지를 절약한다는 차원에서 중요한 과제라 하겠다.

가. 적합한 전동기의 선정

생산 설비에 사용하는 전동기는 에너지 절약이라는 견지에서 각종 설비와 알맞은 지를 검토하고, 나아가서 전동기에 걸리는 부하 상태 및 부하의 시간적 변화 상태를 검토하여 그 부하와 사용 조건에 가장 적합한 전동기를 선정하여야 한다.

선정 기준은,

- (1) 언제나 정속도로 운전하는 전동기는 고효율전동기로 교체하고,
- (2) 정속도로 운전하는 전동기를 사용하는데 부하변동이 있는 경우 그 부하에 적합한 변속도 전동기로 교체하고 회전수 제어를 하며, 에너지 절약효과를 높이도록 한다.

나. 효율적 운전

생산설비 중에는 중부하가 경부하로 변하여 여러대의 전동기 중 그 일부는 운전할 필요가 없는데 계속 운전하여 전력을 필요 이상으로 소모하는 사례가 있다. 이런 설비는 부하 상태와 어울리는 운전 스케줄을 작성하여 효율적으로 운전하면 에너지 절약 효과를 높일 수 있다. 또 제곱저감 토크 특성을 갖는 부하, 예를 들면 송풍기나 펌프는 변속도 전동기로 제어하면 에너지 절약 효과가 크다.

또 저효율 전동기를 장시간 연속 운전하면 전력 손실도 클 것이므로 이를 고효율 전동기로 교체하는 문제도 신중히 검토할 필요가 있다.

다. 빈틈없는 관리

아무리 효율이 좋은 전동기를 선정하고 또 효율적으로 운전하더라도 전동기 설비의 관리가 충분치 못하면 소기의 목적을

달성하기 어렵다. 전동기와 같이 회전부가 많은 기계는 점검과 보수를 빈틈없이하여 좋은 상태를 유지하지 못하면 손실이 증가하고 원활한 운전제어를 할 수 없게 되기 쉬우므로 일상적인 점검은 물론 정기적인 정밀점검과 분해 정비 등을 철저히 하며 좋은 효율로 운전할 수 있는 조건을 갖추어야 할 것이다.

그리고 부하기계의 운전상태, 공급전압, 진동, 소음 등도 체크해두면 도움이 될 것이다.

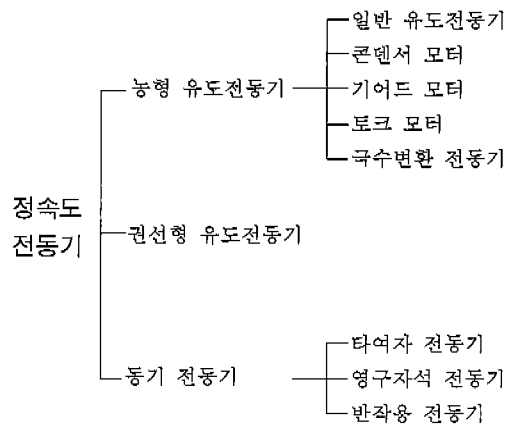
2. 전동기 에너지절약 선정

가. 전동기의 종류

전동기는 일정속도로 운전하는 정속도 전동기와 사이리스터나 트랜지스터 등 반도체소자를 이용한 제어장치 혹은 외부저항 등에 의하여 속도를 제어하는 변속도 전동기로 구별하여 그 특성을 고찰하는 것이 좋겠다.

(1) 정속도 전동기와 효율

정속도 전동기는 다음과 같이 분류할 수 있다.



극수변환 전동기는 연속적으로 변속할 수 없기 때문에 정속도 전동기로 분류되고

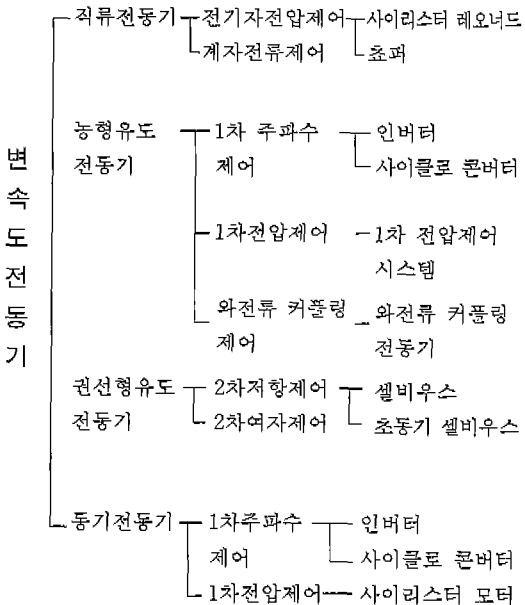
권선형 유도 전동기는 보통 2차저항을 사용하여 기동하지만 기동후에는 2차저항을 단락하고 정속도로 운전하는 점을 상정하였다. 또 반작용 전동기는 토크가 발생하는 원리는 유도전동기와 같지만 동기 속도로 운전하므로 동기전동기에 속한다.

이들 전동기 중에 콘덴서 모터, 기어드 모터, 영구자석 전동기와 같이 효율을 개선할 목적으로 제작한 전동기도 포함되어 있지만 정속도 전동기의 효율은 대체적으로 비슷한 특성을 나타내고 다음과 같은 경향이 있다.

- (가) 용량이 작을수록 효율이 낮고 용량이 클수록 효율이 높다.
- (나) 부하율이 낮을수록 효율이 낮고 부하율이 증가할수록 효율이 높아진다. 그러므로 정속도 전동기를 선정할 때 위에서 설명한 사항들을 고려하는 것이 바람직하다.

(2) 변속도 전동기와 제어원리

변속도 전동기를 제어원리에 따라 분류하면 다음과 같다.



직류전동기는 종전부터 변속도 전동기로 사용하였고 사이리스터를 이용하는 레오너드 제어 방식이 많지만 간혹 계자전류에 의한 제어 혹은 계자전류와 전기자전류 양쪽 제어에 의한 것도 있고 최근에는 쇼퍼제어 방식도 개발되었다. 한편 직류전동기는 제어특성이 우수하므로 특별히 정밀한 속도제어를 할 필요가 있는 용도에 적합하지만 주회로에 정류자와 브러시가 있기 때문에 보수하는 어려움이 있고 대용량화 고속화하는데 한계가 있다.

교류전동기는 변속기술이 직류기보다 복잡하고 제어장치의 가격도 직류 레오너드 시스템보다 고가인 것이 많았기 때문에 과거는 특정한 용도외는 별로 채택하지 않고 있었지만 직류기보다 구조가 간단하고 견고하여 보수성이 우수한 점들을 다시 보게되어 현재는 각종 용도에 널리 사용하게 되었다.

한편 제어장치의 주회로용 반도체 소자가 발달하고 제어회로용으로 IC, MSI, LSI, 마이크로 프로세서 등이 실용화되고 또 제어이론의 전개 등 이들 3자가 서로 어울려서 새로운 구동시스템이 개발되었다. 이른바 유도전동기의 슬립과수제어, 유도기와 벡터제어 등이 바로 그것들이다.

이와 같이 신기술이 개발되면서부터 과거 직류전동기를 사용하는 용도에 교류전동기를 많이 사용하고 있다.

나. 에너지절약형 전동기

(1) 고효율 전동기

고효율 전동기는 생산설비 중에서 광범위하게 사용되고 있는 저압 농형 유도전동기의 효율을 보다 높게 만든 것으로 에너지 절약 효과가 기대된다. 표 3.5.1과 같이 재료의 사용량을 증가하고 고급 철심재료를 사용하였으며 손실은 종전의 표준 전동기보다 20~30% 정도 감소되었다.

고효율 전동기의 특징은 다음과 같다.

- (가) 가동시간이 긴 설비일수록 유리하다. 그러나 초기 투자비가 일반 전동기보다 고가이고 가격과 에너지 절약비의

표 3.5.1 고효율 전동기의 개선내용

전 동 기 의 개 선	요 인	저 감 손 실
① 적철심 두께의 증가	1차 전류의 저감	1차 동손
② 전선사용량의 증가	1차권선저항의 저감	
③ 동 또는 알루미늄량의 증가	2차 저항의 저감	2차 동손
	자속밀도의 저감	철 손
④ 고급 철심재료 사용	공극의 적정화	
	회전자 처리 대책	표류부하손
	고조파자속 대책	

분기점은 3년~5년 정도 되는 것이 보통이라고 한다. 또 소용량 전동기일수록 효율을 높이기 쉽고 전동기 제작상 경제성으로 볼 때 높아지는 효율은 2.2kW 이하는 5~10% 정도되고 그 이상은 3~5%정도 된다고 한다.

- (나) 고효율 전동기의 특성은 전부하 슬림이 작고 기동토크도 작기 때문에 기동빈도가 높은 설비의 구동용으로 적합하지 않다.
- (다) 종전에 부하율 100%부근에서 사용하는 것을 설비의 설계변경을 하지 않고 고효율전동기로 교체하면 과부하로 될 염려가 있다.
- (라) 전동기는 일반적으로 부하율 90%부근에서 사용하도록 되어 있고 이 부근에서 최고효율로 된다. 그러므로 고효율전동기도 부하율이 극단적으로 낮은 50% 이하의 경부하로 운전하면 효율이 대단히 나쁘다.

그림 3.5.1은 고효율전동기의 부하율

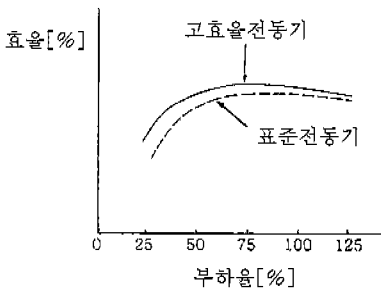


그림 3.5.1 고효율전동기의 부하율과 효율

과 효율의 관계를 나타낸 것이다.

(마) 전원전압이 전동기의 정격전압과 차이가 많으면 효율에 미치는 영향도 크다. 특히 소용량 전동기는 전압이 정격치보다 상승하면 여자전류가 많이 증가되기 때문에 효율이 나빠진다.

이미 설치되어 있는 일반 전동기를 고효율 전동기로 교체하는 경우에 그 효과계산 즉 절약 가능한 조업비용은 다음 식으로 계산한다.

$$A = \alpha PT \left( \frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \times 100$$

여기서 A: 절약가능한 조업비용

$\alpha$ : 전력요금 (원/kWh)

$\eta_1$ : 일반전동기의 효율(%)

$\eta_2$ : 고효율 전동기의 효율(%)

T: 운전시간 (h)

위 식으로 계산한 금액 A가 설비투자비보다 많아지는 시점부터 투자효과를 발휘하게 될 것이다.

### (2) 극수 변환전동기

극수 변환 전동기는 1: 2, 1: 1.5, 3: 4 등 단순변환을 할 수 있고 또 3단, 4단 등 유단변속도 가능하며 다른 변속도 전동기보다 구조가 간단하므로 보수성이 우수하다. 정출력특성과 정토크특성 및 제곱저감토크특성이 있으며 고속운전시 슬림이 작기 때문에 에너지 절약 효과가 기대된다.

표 3.5.2 기동시 발생손실비

	스테이터에 발생하는 손실	로터에 발생하는 손실		합 계
농 형	$Q_s \approx Q_r$	$Q_r$		$2.0 Q_r$
권 선 형	$Q_s \approx 0.1Q_r$	권선내부	외부저항	$1.1 Q_r$
		$0.1 Q_r$	$0.9 Q_r$	

$Q_r$ : 로터에 발생하는 손실

(3) 고저항 농형전동기

일반 농형전동기보다 회전자 저항이 크다. 이 전동기의 특징은

- (가) 기동토크가 일반 농형전동기보다 20~30% 정도 크고 기동전류는 10~20% 감소되므로 전원용량이 적어도 된다.
- (나) 기동특성은 일반 전동기보다 좋은 반면 2차 저항이 크기 때문에 운전시 슬립이 증가하여 운전특성이 나빠진다.
- (다) 기동시 발생하는 손실이 일반 농형전동기보다 적기 때문에 기동빈도가 높고 단속적 점두부하에 적합하다.

(4) 권선형 전동기

권선형 전동기 기동시 발생하는 손실이 일반 농형전동기보다 적기 때문에 기동빈도가 높은 설비의 구동용으로 적합하다.

표 3.5.2는 기동시 발생하는 손실을 비교한 것이다. 그러나 이 전동기에 2차저항을 접속하여 저속을 얻는 방법은 외부저항 손실이 발생하기 때문에 에너지 절약이라는 입장에서 좋은 방법이라고 할 수 없다.

(5) 클러치 모터

클러치 모터는 플라이휠(fly wheel)에 붙은 유도전동기에 마찰식 클러치 브레이크를 장착한 것으로 기동 정지가 심한 기기의 운전용으로 적합하다. 또 기동시 발생 손실이 적다. 다만, 가동율이 낮은 경우는 무부하 운전시의 소비전력을 무시할 수 없는 때도 있다.

(6) 콘덴서 모터

콘덴서 모터는 콘덴서만으로 기동하게

되어 있어 구조가 간단하다. 또 기동전류가 적고 운전효율이 좋은 편이다.

다. 전동기 소비전력 특성

전동기의 축출력을  $P$ [kW], 회전수를  $N$ [rpm], 부하토크를  $T$ [kg.m]라고 하면 이들 사이에는 다음 관계가 있다.

$$P = \frac{TN}{974} \text{ [kW]}$$

위 식으로부터 회전수가 줄어들면 축출력도 감소된다는 것을 알게 된다. 부하토크는 일반적으로 정토크, 비례토크, 제곱토크의 3종류가 있고 각 토크특성에 대한 전동기의 축출력과 회전수의 관계는 표 3.5.3과 같다.

특히 송풍기나 펌프 같은 제곱저감 토크 특성을 갖는 부하에 대한 전동기의 축출력과 회전수의 관계는

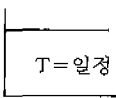
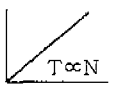

- 회전수가 정격의 80% 인 때 축출력은 정격시의 51.2%
- 회전수가 정격의 50% 인 때 축출력은 정격시의 12.5%이다.

라. 부하의 특성과 전동기 효율

(1) 부하의 특성을 알고 에너지 절약 방법을 생각한다.

부하의 특성에 따라서 적절한 에너지 절약 방법을 생각할 때면 먼저 연속운전인지 간헐 운전인지를 알아야 한다. 연속운전이며 부하의 제어를 댐퍼나 밸브로 하는지

표 3.5.3 전동기의 축출력과 회전수와의 관계

No.1	토크특성	관계식	축출력과 회전수와의 관계	속도-토크 특성도
1	정토크특성	$P = \frac{TN}{974} \propto N$ ( $\because T = \text{일정}$ )	축출력은 회전수에 비례한다.	
2	비례토크특성	$P = \frac{TN}{974} \propto N^2$ ( $\because T = N$ )	축출력은 회전수의 제곱에 비례한다.	
3	제곱토크특성	$P = \frac{TN}{974} \propto N^3$ ( $\because T \propto N^2$ )	축출력은 회전수의 3승에 비례한다.	

않는지, 한다면 변속도 전동기를 사용하는 회전수제어가 알맞다.

또 부하제어를 하지 않는다면 운전효율을 높이기 위하여 적정용량의 고효율전동기가 좋겠다.

간헐운전이면 경부하시 전동기를 정지해도 되는지 검토하여보고 될 수 있으면 시퀀스제어 운전방식을 채택한다.

(2) 전동기의 효율과 용량

전동기의 효율은 잘 알고 있는 바와 같이

$$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 = \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{손실}} \times 100[\%]$$

으로 나타낸다. 그러므로 손실은 전동기의 입력과 출력의 차이이다. 이 손실은 전동기 내부의 전기적 손실과 기계적 손실을 말하고 이것을 될 수 있는대로 적게 만들어야 전동기 자체의 효율이 향상된다. 최근 이러한 목적으로 개발한 것이 고효율전동기이다.

또 부하에 대한 전동기의 최적 용량을 검토하여야 한다. 그림 3.5.2는 일반전동기의 부하율에 대한 효율의 변화를 나타낸 것으로 전동기의 효율은 부하율 75~100%인 때 가장 높고, 50% 이하로 내려가면 효율이 급격히 떨어진다. 그런데 전동기의

용량을 산정할 때 부하변동 혹은 전압변동이 있을 것을 고려하여 용량에 약간 여유를 두지만 이 안전율을 너무 많이 잡아주면 전동기의 용량이 필요 이상으로 커지고 전력손실이 증가한다. 그러므로 전동기는 부하율 90%에서 운전할 수 있도록 용량을 산정하는 것이 가장 효율적이다.

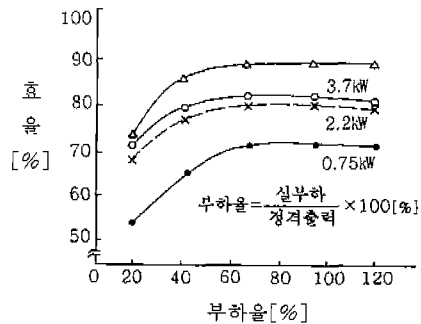


그림 3.5.2 전동기의 부하통일곡선의 예

(3) 전동기 용량과 경제성

설치되어 있는 전동기의 소비전력  $P_{el}$  [kW]는 다음 식으로 계산한다.

$$P_{el} = \frac{100 \times P_m}{\eta} - P_m = \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) P_m$$

여기서  $\eta$ : 전동기 효율 [%]

$P_m$ : 실부하 [kW]



표 3.5.4 손실 비교표

전동기용량 항 목	3.7kW	2.2kW
부 하 율[%]	40	67
전동기효율[%]	82	84
손 실[W]	325	281

표 3.5.5 교류전동기의 회전수제어 방식 예

전동기의 종류	회전수 제어방식
농 형 유도전동기	※ 1차 주파수 제어(VVVF) 와전류 커플링 제어 유체 커플링 제어
권 선 형 유도 전동기	2차 저항제어 ※ 2차 여자제어(정지 셀비우스) ※ 2차 여자제어(초동기 셀비우스)
동 기 전 동 기	※ 1차 주파수제어(VVVF) 무정류자 전동기(사이리스터 모터)

[주] ※표는 슬립 전력손실이 없는 방식

따라서 이미 설치되어 있는 전동기를 그보다 용량이 한 단계 낮은 것으로 교체하는 경우에 경감되는 전력  $P_e$  [kW]는

$$P_e = P_{e1} - P_{e2} = \left( \frac{100}{\eta_1} - \frac{100}{\eta_2} \right) P_m$$

으로 계산하면 된다.

그러므로 연간 운전시간을  $H_y$  [h] 라고 하면 연간 경감할 수 있는 전력량  $P$  [kWh]는

$$P = P_e \text{ [kW]} \times H_y \text{ [h]}$$

에너지 절약 효과를 검증하기 위하여 실례를 들어보자. 어느 공장에서 전동기의 정격출력이 3.7kW인데 실제부하는 1.48kW로 부하율이 40%에 불과하다. 이 경우에 한 단계 낮은 2.2kW전동기로 교체하여

부하율 67% ( $= \frac{1.48}{2.2} \times 100$ )로 운전하였

을 때 전력손실을 비교하면 표 3.5.4와 같다. 결국 2.2kW 전동기를 사용하여 44W의 전력손실을 경감하게 되었고 연간 경감할 수 있는 전력량은 윗식을 이용하여 계산하면 된다.

### 3. 회전수제어에 의한 에너지절약

펌프의 유량 혹은 송풍기의 풍량 제어는 전동기를 일정 회전수로 운전하고 밸브 혹은 댐퍼를 조정하여 이들을 제어하였다. 그러나 이와 같은 밸브제어 혹은 댐퍼제어는 그림 3.5.3을 보면 알 수 있는 것과 같이 에너지 절약상 효과적인 방법이라 할 수 없고 최근에는 전동기의 회전수를 바꾸는 방법(회전수 제어)을 채택하는 경우가 많아졌다.

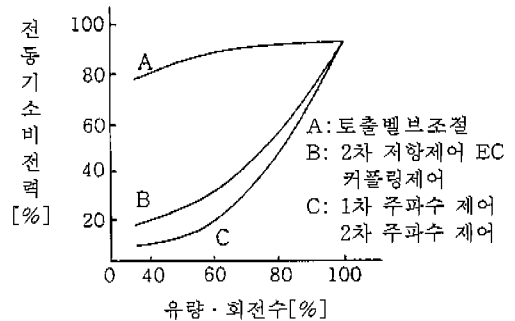


그림 3.5.3 제어방식과 소비전력

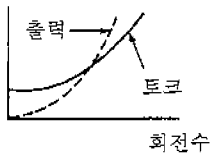
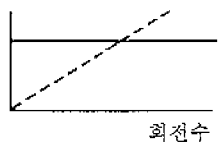
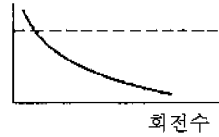
#### 가. 회전수 제어방식

교류전동기의 회전수제어 슬립전력 손실이 있는 방식과 없는 방식으로 구분되고 에너지 절약이라는 관점에서 볼 때 표 3.5.5와 같은 방식이 있다.

##### (1) 1차 주파수제어

이 방식은 가변전압 가변주파수(variable voltage variable frequency: VVVF) 인버터를 이용하여 농형 전동기에 인가하는 전압과 주파수를 바꿔서 회전수를 제어하는 방식이다(그림 3.5.4) VVVF는 전동기의

표 3.5.6 부하특성에 따른 VVVF의 적용

구분 부하 특성	내 용	부하의 종류	부하 특성곡선
제공저감 토크부하	회전수가 낮아지면 부하를 구동시키기 위한 토크도 작아지는 부하로서, 부하의 토크특성이 회전수의 제곱에 비례하고 동력은 회전수의 3승에 비례한다. 이런 부하에 인버터를 적용하면 에너지 절약효과가 크다.	팬 블로어 펌프	〈제공저감 토크 특성〉 부하토크 출력 회전수 
정토크부하	회전수가 달라져도 거의 일정한 토크를 요하는 부하로서, 부하를 구동시키는데 요하는 동력은 회전수에 비례한다.	컨베이어, 각종공작기 계의 이송 장치	〈정토크특성〉 부하토크 출력 회전수 
정출력부하	회전수가 달라져도 정출력을 요하는 부하로서 회전수를 높이면 필요한 토크는 저감된다.	목공기 권취기	〈정출력특성〉 부하토크 출력 회전수 

정격속도를 80% 이하로 변속하는데 적합하고, 효율도 좋다. 또 이미 설치된 전동기 설비를 변속하고자 하는 경우는 기설 전용 기시스템을 활용할 수 있는 VVVF가 가장 유리하고 권선형 전동기와 동기 전동기를 제어할 수도 있다.

VVVF의 응용분야는 표 3.5.6과 같이 부하특성에 따라 각기 다르다.

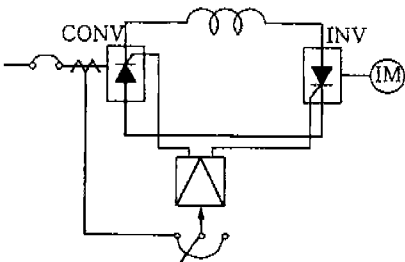


그림 3.5.4 1차 주파수제어

(2) 와전류 커플링 제어

이 방식은 그림 3.5.5와 같이 농형 유도 전동기에 와전류와 속도검출용 교류발전기(PG)를 직결하고 EC의 여자전류를 제어하여 전동기의 전달토크를 제어하는 것으로 부하측 회전수를 부하변동과 상관없이 광범위하게 무단계로 제어할 수 있다.

이 방식은 커플링내에 슬립으로 인한 전력 손실이 발생하고 그 슬립손실은 부하의 특성에 따라서 각기 다르다. 즉, 제공 토크 부하인 경우는

$$P_i \cong P_o(1-S)^2S = P_{on}^2(1-n)$$

정토크부하인 경우는

$$P_i \cong P_oS = P_o(1-n)$$

여기서,  $P_o$ : 정격출력[kW]

S: 슬립

M: 회전수(rpm)

그러므로 저속으로 될수록 효율이 심하게 나빠지기 때문에 저속영역에서 운전하는 일이 많은 경우 또는 비교적 부하용량이 큰 용도에는 적합하지 않다.

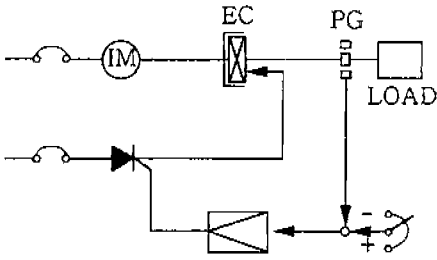


그림 3.5.5 와전류 커플링제어

(3) 유체 커플링 제어

이 방식은 그림 3.5.6과 같이 농형 유도전동기와 유체 커플링을 짝지어서 전달토크를 제어하여 회전수를 제어하는 것이다. 이 방식도 슬립 손실이 발생하기 때문에 회전수가 낮을수록 효율이 심하게 저하한다. 또 슬립손실은 나)에서 적용하는 수식과 같다.

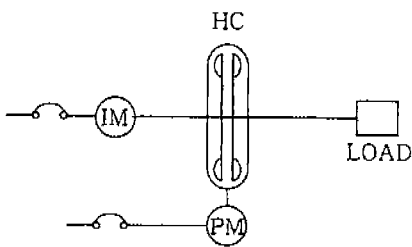


그림 3.5.6 유체 커플링제어

(4) 2차 저항제어

이 방식은 그림 3.5.7과 같이 권선형 유도전동기의 2차저항을 조성하여 비례추이 특성에 의한 토크특성을 바꿔서 회전수를 제어하는 것이다. 이 방식은 조작하기 쉽

고 경제적이지만 2차 저항 장시간 큰 전류가 흐르게 되므로 전류용량이 큰 저항기가 필요하고 또 저항기의 열손실이 많기 때문에 효율이 나쁘다는 것이 결점이다. 이 방식의 회전수제어 범위는 정격회전수의 50%정도가 적당하다고 한다. 그러나 송풍기와 같이 제곱토크부하는 회전수가 낮을 때 부하가 가볍기 때문에 손실이 적고 회전수도 안정된다.

또 2차저항으로 액체저항기를 사용하는 경우는 전해액의 온도에 따라서 고유저항값이 변하게 되므로 연속운전할 때는 주의하여야 한다.

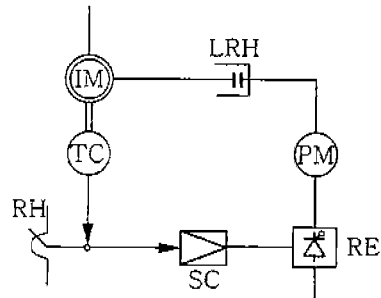


그림 3.5.7 2차 저항제어

(5) 2차 여자제어

이 방식은 권선형 유도전동기의 2차 슬립전력을 기계 에너지로 변환하여 축출력으로 이용하는 크레머 방식과 전기 에너지로서 전원으로 반환하는 셀비우스 방식이 있다. 또 셀비우스 방식은 정지 셀비우스 방식과 초동기 셀비우스방식으로 분류된다.

정지 셀비우스방식은 그림 3.5.8과 같이 권선형 유도전동기의 2차전력을 정류하여 직류전력으로 변환하지만 정류된 직류는 맥류가 크기 때문에 직류리액터를 통하여 평활한 직류로 만든다.

이것을 인버터(INV)에 의하여 전원으로 반환하게 되는데 인버터 전압을 조정하여

회전수를 제어하는 것이다. 이 방식은 2차 전력을 전원으로 반환하기 때문에 운전효율이 좋고 회전수제어 범위를 좁게 잡으면 제어장치가 소형이고 값도 저렴하다.

초동기 셀비우스방식은 그림 3.5.9와 같이 정지 셀비우스방식과 같은 원리에 의한 것이지만 2차 여자장치로서 가역 전력 변환장치(CYCLO CONV)를 사용하기 때문에 전원측에서 변환기를 통하여 2차권선에 전력을 공급할 수도 있어 전동기의 동기속도를 중심으로 그 상 하에 걸쳐서 회전수 제어를 할 수 있다는 것이 특징이다.

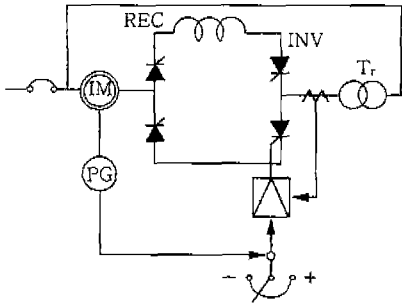


그림 3.5.8 정지 셀비우스제어

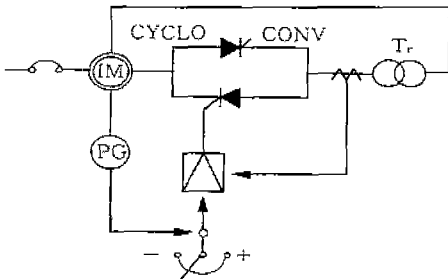


그림 3.5.9 초동기 셀비우스제어

(6) 사이리스터 모터

사이리스터 모터는 직류전동기의 브러시와 정류자로 된 기계적 정류기구를 사이리스터나 트랜지스터의 스위칭으로 치환한 것으로 그림 3.5.10과 같이 전기자가 유도

전동기의 고정자와 같은 구조이고 회전자의 자극은 계자 코일의 틀에 고정되어 있다. 또 회전부에 코일이 없기 때문에 슬립링이나 브러시가 없고 구조가 간단하다.

속도 검출용 교류발전기 PG로부터 안정된 전압을 얻을 수 있어 직류 전동기와 같이 섬세한 제어를 할 수 있고 속도 제어 범위가 넓은 무단계의 변속도 전동기이다.

이 전동기는 직류기와 같은 정류한계가 없기 때문에 고속화 대응확화가 가능하고 또 저속영역에서 운전효율도 좋다는 것이 특징이다.

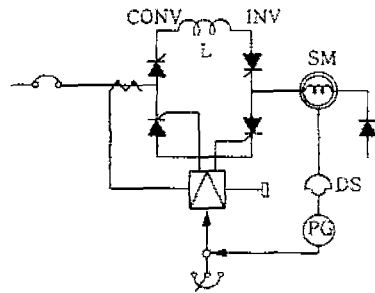
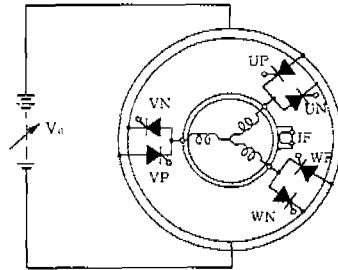


그림 3.5.10 사이리스터 모터

나. 회전수제어에 의한 에너지 절약 효과

한 예로 펌프의 회전수제어에 의한 에너지 절약 효과를 설명하겠다.

먼저 일정 회전수로 전동기를 운전하고 조절 밸브로 수량제어를 하는 경우에 관로저항이 증가한다. 따라서 그림 3.5.11과 같이 R(I)에서 R(II)로 변화하고 따라서 전압정곡

선상을 점A에서 점E로 이동한다.

수량은  $Q_1$ 에서  $Q_4$ 로 감소되고 동시에 양정은  $H_1$ 에서  $H_5$ 로 상승한다. 이로 인하여 축동력은  $P_1$ 에서  $P_2$ 로 변화하게 된다.

다음에 변속도 전동기를 사용하여 수량제어를 하는 경우는 펌프의 수량이 변화하고 그와 아울러 관로 말단의 압력은 언제나 일정하도록 펌프의 회전수를 제어하는데 펌프의 회전수를 90%, 80%, 70%로 하였을 때의 특성변화를 파선으로 나타내고 있다. 수량이  $Q_2$ 인 때, 회전수는 90%, 수량이  $Q_3$ 인 때 회전수는 80%, 수량이  $Q_4$ 인 때, 회전수는 70%로 펌프를 운전하므로 양정도  $H_1, H_2, H_3, H_4$ 로 하강한다.

그러므로 어떤 방법이든지 수량을 제어할 수는 있지만 일정 회전수로 전동기를 운전하고 조절 밸브로 수량제어를 하는 경우는 밸브 저항이 증가하기 때문에 회전수제어와 비교하면 양정이 ( $H_5-H_1$ ) 만큼 증가하고 그 만큼 전력을 많이 소비하게 된다.

이것을 양적으로 검토하여 보자. 일반적으로 펌프의 소비전력  $P$ 는 다음 식으로 나타낸다.

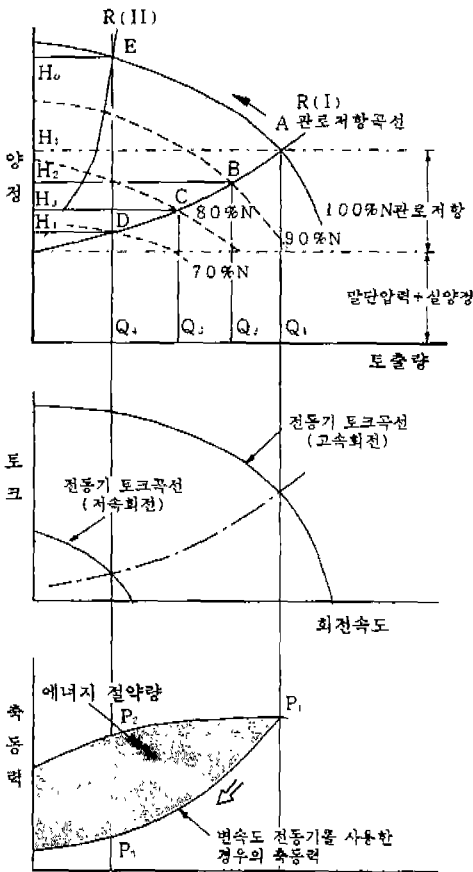
$$P = \frac{KQH}{\eta}$$

여기서 K: 상수

Q: 수량

H: 양정

$\eta$ : 펌프의 효율



조절밸브로 수량제어를 하여 점 E에서 운전한 경우에 펌프의 소비전력  $P_2$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 = KQ_4H_4 + KQ_4(H_5 - H_4) + KQ_4H_5\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$$

회전수 제어를 하여 점 D에서 운전할 경우에 펌프의 소비전력  $P_3$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_3 = KQ_4H_4 + KQ_4H_4\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)$$

결국 회전수 제어를 하면서 얻게되는 절약분  $P_s$ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$P_s = P_2 - P_3 = \frac{KQ_4(H_5 - H_4)}{\eta}$$

☉ 다음호에 계속 됩니다

그림 3.5.11 펌프의 속도제어