

ESCO에서의 인버터 적용

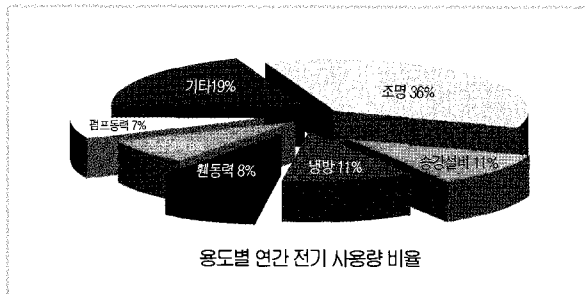


김선조 ETS대표이사

1. 전기 에너지 소비

국내의 에너지 소비와 경제비표와의 관계는 에너지 소비증가율이 경제성장율을 앞질러 선진국과 비교해서 에너지 효율이 낮게 나타난다.

건축물의 에너지 소비원별 현황을 보면



도표에서와 같이 모터 부분이 전체 사용 전기에너지 비용의 약 40%를 차지함을 알 수 있다.

국내의 전동력 부분에서의 ESCO 사업 실적은 사업건수 면에서 주로 조명에 치우쳐 ESCO 사업을 한다. 이는 모터 부분의 ESCO 사업에 따른 절감량 계산이 어렵기 때문이다. 여기에는 진단 방법, 진단기간, 진단 시기, 부하율 진단, 운전 패턴, SYSTEM에서의 물리적(유체)의 절감 가능 범위, 또한 전기적 SYSTEM 구성 등에 대한 지식과 경험이 필요하다.

모터부분의 에너지 절감기의 대표적 기기인 인버터를 인버터의 기능별로 절감원리와 절감 계산 방법, 절감량 계산의 예를 들어 전기 동력의 최대 소비처인 모터에서의 인버터에 의한 에너지 절감의 이해를 높이고자 한다.

2. 인버터의 원리

인버터란 모터(유도전동기)를 원하는 속도로 운전하기 위해 주파수를 가변시킬 수 있도록 한 전원장치(전력 변환기)이다.

모터(유도전동기)의 회전 속도 N은 극수 P, 주파수 f, 모터의 슬립을 s라 하면 아래의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{120 \times f}{P} (1-s) (\text{rpm})$$

주파수 F를 가변시키면 임의의 회전속도 n을 얻을 수 있다. 이러한 원리를 응용하여 주파수를 변화시켜 모터의 속도를 가변하는 것이 인버터이다.

실제 모터에서 토크를 확보하려면 주파수에 따라 전압도 가변해야 된다.

모터 발생 토크는 주파수와 전압의 비에 비례한다.

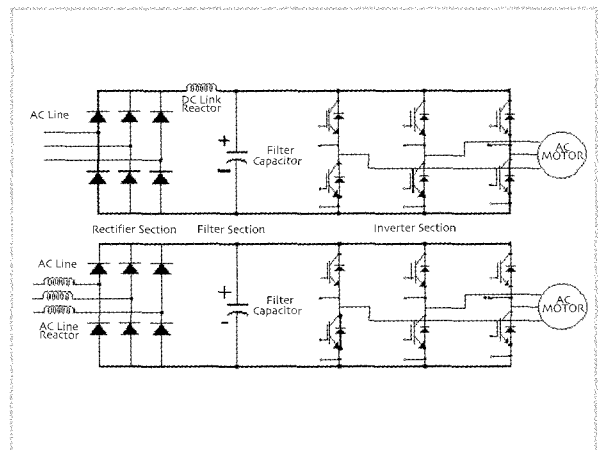
$$T \propto \frac{f}{V} \times I$$

T: 토크
f: 주파수
V: 전압
I: 전류

따라서 인버터는 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)라고도 한다.

2.1 인버터의 기본구성

인버터는 컨버터부, 인버터부, 제어부로 구성된다.



동력부(컨버터부와 인버터부) 그림

3. 인버터에 의한 에너지 절감

3.1 인버터 기능별 에너지 절감 방법

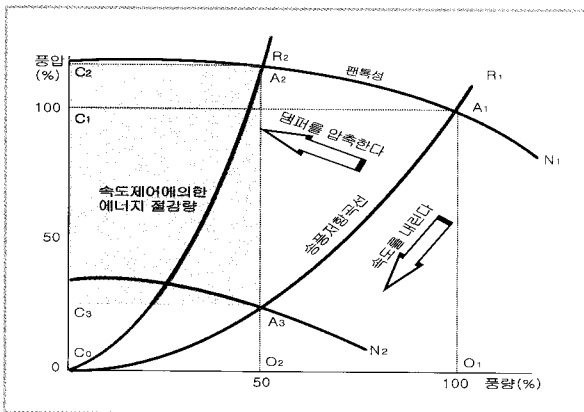
인버터의 기능	에너지 절감 방법
주파수의 조정	정속 기계의 가변속화
전압의 조정	전동기의 고효율 운전
전력의 CONTROL	기계에너지의 회생
높은 변환 효율	가변속 구동 SYSTEM의 대체

3.2 팬부하의 에너지 절약

일반적으로 팬의 설비용량은 장래의 설비 보강, 경년변화에 의한 능력저하를 예상하여 여유를 두고 설계한다.

이 경우에는 댐퍼를 조정하여 정격풍량으로 할 필요가 있다. 댐퍼에 의한 조정을 인버터 등에 의한 속도제어로 하면 에너지 절감이 가능하게 된다.

2승 저감 부하인 팬에서 에너지가 절감되는 원리를 살펴 보면



팬의 풍량 풍압 특성

팬의 동작점은 송풍 저항 곡선 R₁과 팬의 특성곡선 N₁의 교점 A₁으로 된다.

A₁은 100% 풍량(정격)시 동작점을 표시하고 있으며 동력은 C₀Q₁A₁C₁으로 둘러 쌓인 면적이 표시 된다.(동력은 풍량과 풍압의 곱에 비례한다)

풍량을 50%로 하기 위해 댐퍼를 닫으면 송풍 저항곡선은 R₁에서 R₂로 변화하여 동작점은 A₂로 이동한다. 이 때의 동력은 C₀Q₂A₂C₂로 둘러 쌓인 면적이 된다.

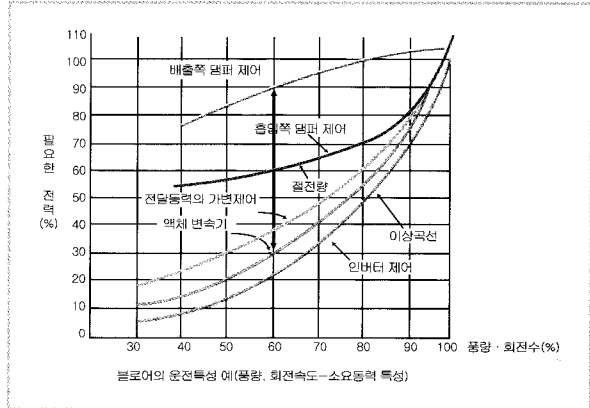
인버터로 제어할 경우 팬의 특성은 N₁에서 N₂로 변하므로 동작점은 A₃로 이동한다.

이때의 소요 동력은 C₀Q₂A₃C₃로 둘러 쌓인 면적이 된다.

여기서 면적의 차(C₂A₂C₃A₃)가 에너지를 절감할 수 있는 부분이 된다.

아래 도표는 풍량제어 방식별 동력 특성을 나타내었다. 인

버터 제어 방식이 시스템 특성에 가장 근접한 풍량제어 방식으로 다른 제어 방식과 비교하여 에너지를 절감할 수 있음을 알 수 있다.



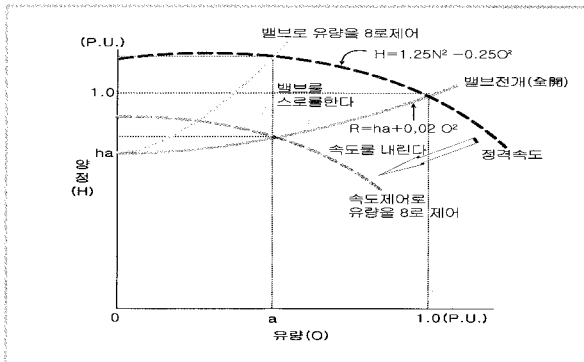
3.3 에너지 절감 계산에

댐퍼 제어시 전력과 인버터를 적용한 경우 전력량을 계산하는 방법

H-Q 특성 DATA로부터 팬의 특성을 2차식으로 근사시키면 $H=1.03N^2+0.56NQ-0.59Q^2$ 에서 댐퍼 전개시 전력을 A₁, 압축 했을 때 전력을 A₂라 하면

$$A_1\eta=H_1Q_1, A_2\eta=H_2Q_2$$

H₁, Q₁ : 댐퍼 전개시의 풍압 풍량
H₂, Q₂ : 댐퍼 압축시의 풍압, 풍량



2차식으로 환산한 풍량특성에 댐퍼 압축시의 풍량 특성을 적용하면

$$0.59Q_2^3-0.56Q_2^2-1.03Q_2+r=0_3(r-A_2/A_1)$$

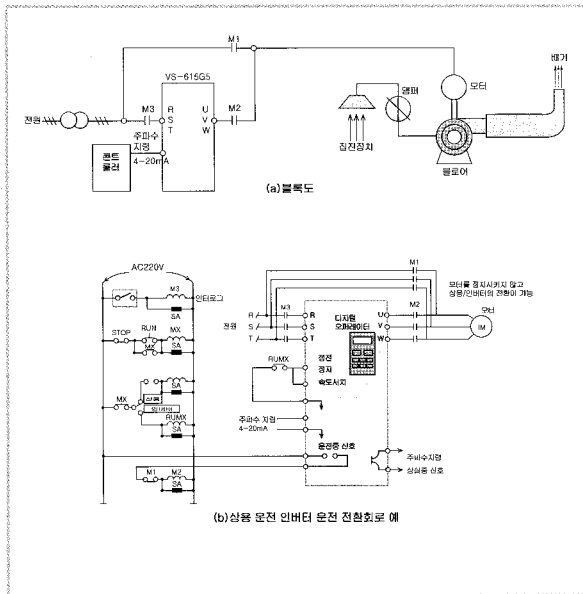
여기서 Q₂가 댐퍼를 압축했을 때의 풍량이 된다.

$$Q_2=0.74r^3-0.82r^2+1.08r$$

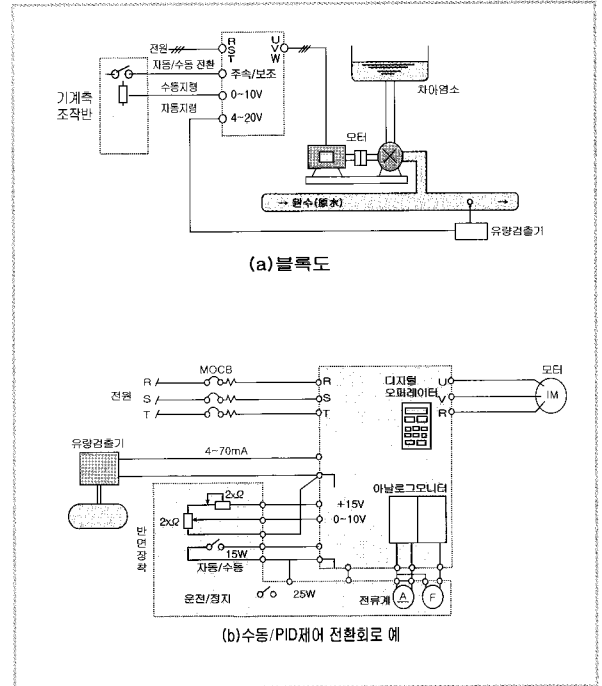
인버터를 사용하여 풍량을 Q₂로 한정우의 동력은 풍량의 약 3제곱에 비례하므로 P_{INV}=Q₂³A₁/η_{INV} 에너지 절감량은

P_{SAVE}=A₂-(0.74r³-0.82r²+1.08r)³A₁/η_{INV}으로 계산할 수 있다.

Engineering Handbook



팬에서의 인버터 적용 예



펌프 시스템 구성예

3.4 펌프에서의 인버터 적용

펌프의 유량 양정 곡선과 양정을 알고 이것을 2차 함수로 근사화시키면 $H=1.25N^2-0.25Q^2$ 으로 나타낼 수 있다 또한 관로 저항(R)을 2차함수로 근사화시키면 $R=h_a+0.02Q^2$ 로 근사화시킬수 있다. 이 때에 유량을 정격 1(P.U.)에서 α (P.U.)로 했을 때의 동력을 밸브로 제어한 경우와 인버터로 제어한 경우를 비교한다. 밸브 제어시 동력 P_B

$$P_B = \frac{\alpha(1.25-0.25\alpha^2)}{6.12\eta^b\eta^m} \times Q_0H_0(\text{kW})$$

인버터 제어시 동력 P_i

$$P_i = \frac{\alpha(h_0+0.2\alpha^2)}{6.12\eta^b\eta^m} \times Q_0H_0(\text{kW})$$

$\eta^b\eta^m$: 밸브 제어시의 모터, 펌프 효율
 η^m : 인버터 제어시 모터, 펌프 효율
 Q_0, H_0 : 펌프의 정격유량(m^3/min), (m)
 절전량 P_s

$$P_s = \frac{\alpha Q_0 H_0}{6.12} \left(\frac{1.25-0.25\alpha^2}{\eta^b\eta^m} - \frac{h_0-0.2\alpha^2}{\eta^m} \right) (\text{kW})$$

로 계산할 수 있다.

3.5 가변속구동 시스템에 대한 인버터적용

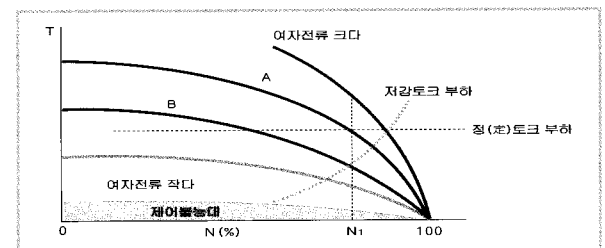
인버터가 일반적이지 못했을 때에는 가변속 시스템으로 와 전류커플링이 장착된 전동기(VS MOTOR), 권선형 전동기의 2차 저항제어가 채용되어 왔으며 현재도 널리 사용된다.

VS MOTOR의 경우 속도 제어를 크게 할수록 커플링부의 로스가 커진다. 인버터로 대체함으로써 커플링부의 LOSS를 없앨 수 있다.

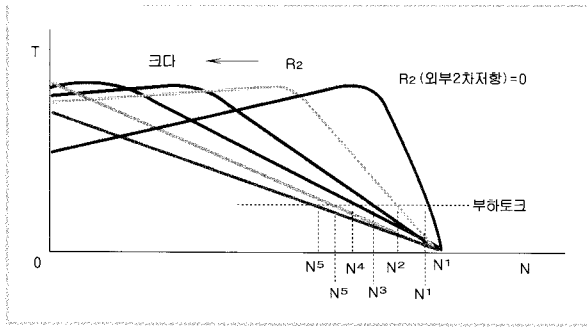
VS MOTOR의 최대 속도가 구동 전동기의 정격속도보다 10~20% 작으므로 인버터에 의해 동일속도에서 10~20% 절감된다.

권선형 전동기의 2차 저항을 변화시켰을 때 토오크 특성을 들었다 2차 저항을 크게하여 토오크 특성을 억제함으로써 슬립을 크게하여 속도를 내리기 때문에 2차 저항에 손실이 발생한다.

이 손실은 인버터 사용으로 절감된다. 속도 저감에 대한 발생 로스는 VS모터의 경우와 거의 같다.



VSMOTOR 여자 전류, 토오크 특성



권선형 유도전동기의 2차저항, 토오크 특성

3.6 정토크 부하에서 에너지 절감

VS모터나 2차 저항 제어에서는 속도를 감소시켜 전력이 나간 만큼 손실되므로 전력 절감이 안되나, 인버터 제어에서는 속도 제어에 비례하여 전력이 내려가므로 속도감소분만큼 에너지가 절감된다.

<에너지 절감 계산 예 ①>

구동 전동기의 정격 속도가 1750r/min, 최대 속도 1500r/min인 VS모터를 사용한 컴베이어가 있다. 속도 50%(750r/min)로 운전하는 경우에 VS모터와 인버터 제어의 경우에 전력차 계산.

단, 최대 속도시의 전력은 37kW이다.

VS모터의 경우에 속도를 감속시켜도 전력은 변화하지 않으므로 50% 속도시의 전력은 37kW가 된다. 인버터 제어에서는 속도에 비례하여 전력이 감소되므로 50%속도시의 전력은

$$37 \times 750/1750 = 15.9\text{kW}$$

따라서 전력차는

$$37 - 15.9 = 21.1\text{kW가 된다.}$$

<에너지 절감 계산 예 ②>

구동 전동기의 정격 속도가 1750r/min, 최대 속도 1500r/min인 VS모터를 사용한 블로어가 있다. 속도 50%(750r/min)로 운전하는 경우, VS모터와 인버터 제어의 경우에 전력차 계산, 단, 최대 속도시의 전력은 37kW이다.

VS모터의 경우 50% 속도시의 전력은 회전수의 제곱에 비례하므로

$$37 \times 0.5 \div 2 = 9.25\text{kW}$$

인버터 제어에서는 속도의 3제곱에 비례하므로

$$37 \times (750/1750) \div 3 = 2.91\text{kW}$$

따라서 전력차는

$$9.25 - 2.91 = 6.34\text{kW가 된다.}$$

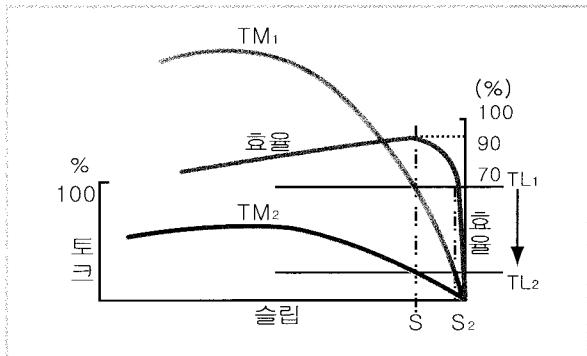
이상의 에너지절감 계산 예에서, 특히 정토크 부하를 VS모

터나 권선형 전동기로 구동하고 있는 경우에 인버터화하면 큰 에너지절감 효과를 기대할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.7 2승저감 부하에서의 에너지 절감

2승저감 부하에서는 회전수의 제곱으로 토오크가 감소되므로 전력은 회전수의 3제곱으로 감소된다.

VS모터에서는 회전수 감소에 의한 전력 감소분이 슬립 손실이 되므로 최종적으로 전력은 회전수의 제곱으로 감소된다.



<부하토크별 효율 특성>

3.8 전동기 공급 전압 최적화에 의한 에너지 절감

전동기 소실은 대부분 철손과 동손이다. 일정 전압에서 경부하시 동손은 감소되는데 철손은 변화하지 않으므로 효율이 감소된다. 철손은 전압의 제곱에 비례하므로 경부하시의 전압을 내리면 철손이 감소되어 효율을 개선할 수 있다.

전동기의 운전점은 정격부하 토크 TL_1 과 전동기 토크 TM_1 의 교점이며 이때의 슬립은 S_1 , 효율은 90%이다

부하가 가벼워져 토크가 TL_1 에서 TL_2 로 되었다면, 슬립은 TL_2 와 TM_1 의 교점으로 결정되는 S_2 로 변하게 된다. 이 때의 효율은 70%이다

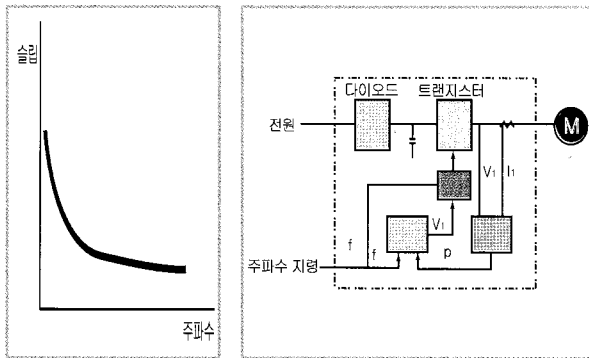
공급전압이 일정할 때 부하가 가볍게 되면 효율이 저하된다.

부하 토크가 TL_2 로 감소했을 때 토크 특성이 TM_2 가 되도록 전동기의 공급전압을 조정하면 슬립은 S_2 에서 S_1 로 복귀하므로 효율도 정격시의 효율 90%로 복귀한다.

이와 같이 부하에 따라 공급 전압을 제어함으로써 전동기를 항상 최대효율로 운전하는 것이 가능하다.

효율이 최대로 되는 슬립은 주파수에 따라 변하므로 운전 주파수에 따른 최적의 슬립이 되도록 전압을 조정할 필요가 있다

Engineering Handbook



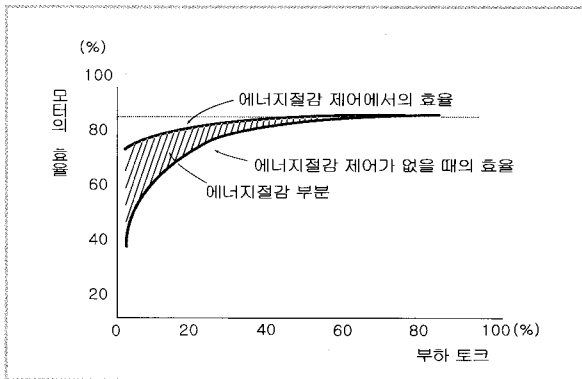
<인버터 전압 연산 내부 BLOCK도>

에너지 절감제어 인버터의 제어 블록을 들었다. 외부에서의 신호는 주파수 지령 뿐이고 에너지 절감제어는 모두 인버터에서 처리된다.

1차 전류 I와 1차 전압 V_1 에서 전동기의 입력전력 P를 계산하여 P와 주파수에서 전동기의 효율이 최대가 되는 슬립과 그 슬립에서의 출력전압 V_r 를 계산한다. 이 V_r 와 f에 의하여 PWM화로서 트랜지스터를 제어하여 전동기에 주파수 f, 전압 V_r 를 제공한다.

<효율 개선 특성>

아래 그림에 에너지절감 제어의 유무에 따른 전동기 효율의 비교를 들었다.

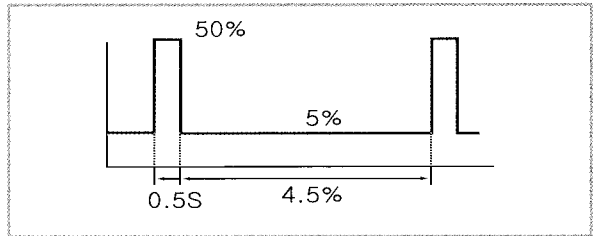
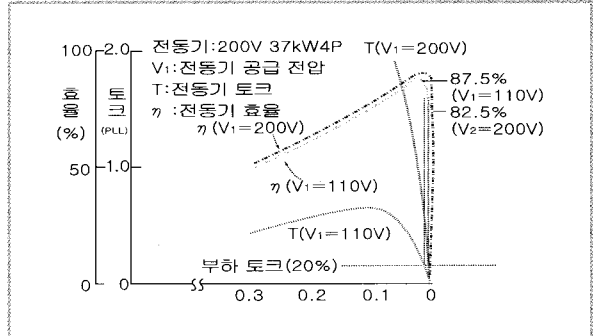


부하가 가벼울수록 효율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 다음 그림은 부하가 20%로 감소된 경우에 이 에너지절감 제어에 의한 효율의 개선과 토크 특성을 계산한 것이다. 효율이 82.5%에서 87.5%로 개선되어 있다.

또한 에너지절감 제어시의 토크에 주목하면 전동기의 최대 토크는 부하토크의 약 3배로 되어 있으며 안정된 에너지절감 제어 운전이 보장되고 있다.

<에너지 절감 계산 예>

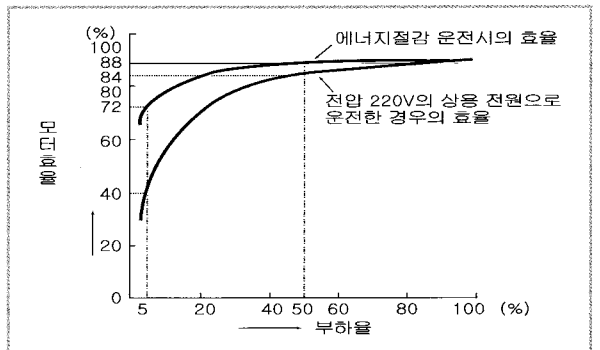
단조가공기에 적용한 경우, 단조가공기는 절단시에만 부하가 가해지고 대기시에는 거의 무부하 상태로 된다.



단조기 운전 주기 GRAPH

이 기계의 상용 전원에서의 운전과 에너지절감 제어 인버터 운전의 전력을 비교한다.

- ▶전원: 220V 60Hz
- ▶적용 전동기: 220V 7.5W 4극
- ▶인버터 효율: 95%
- ▶운전 사이클: 50% 부하 0.5초
5% 부하 4.5초
- ▶가동시간: 6000H/년
- ▶전력단가: 50원



부하율-효율 특성

이상의 기계 사양에서 다음과 같이 전력을 계산할 수 있다.

- 상용 운전
- ▶50% 부하시: $P_{150} = 7.5 \times 0.5 / 0.84 = 4.6kW$

- ▶5% 부하시 : $P_{15} = 7.5 \times 0.05 / 0.4 = 0.9\text{kW}$
- ▶평균 전력 : $P_1 = (P_{150} \times 0.5 + P_{15} \times 4.5) / 5 = 1.29\text{kW}$

● 인버터 제어

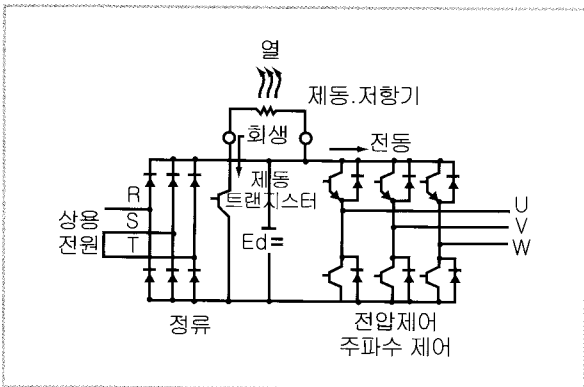
- ▶50% 부하시 : $P_{250} = 7.5 \times 0.5 / 0.88 = 4.26\text{kW}$
- ▶5% 부하시 : $P_{25} = 7.5 \times 0.05 / 0.72 = 0.52\text{kW}$
- ▶평균 전력 : $P_2 = (P_{250} \times 0.5 + P_{25} \times 4.5) / 5 / 0.95 = 0.94\text{kW}$

여기서 연간

$(1.29 - 0.94) \times 6,000 = 2,100\text{kWh}$, $2,100 \times 50 = 105,000$ 원의 전력 요금을 절약할 수 있다.

3.9 기계적 에너지의 회생에 의한 전력 절감

전동기가 동기속도 이상이 되면 유도발전기가 된다. 동기속도를 초과하는 예로서 인버터운전에서 감속시나 크레인 회생시 등이 있다. 전동기가 발전기로 되면 에너지의 흐름이 전동기에서 인버터로 회생된다. 전원회생 기능을 가진 인버터에서는 컨버터측에도 트랜지스터를 사용하고 있으므로 회생 에너지를 효율적으로 전원으로 되돌릴 수 있으므로 반환된 만큼의 전력을 절약할 수 있다.

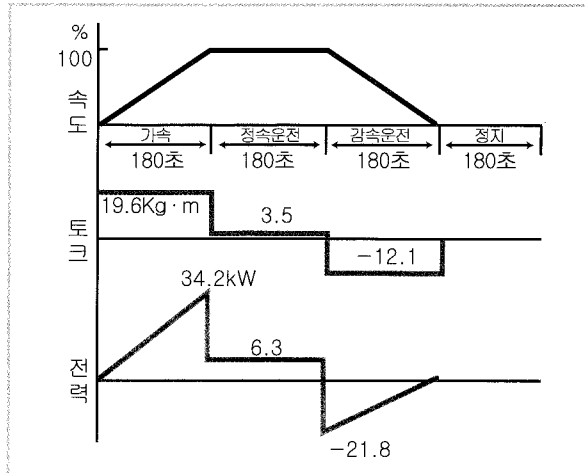


부하율-효율 특성

<에너지 절감 계산 예>

여기서는 원심분리기를 예로 하여 전원 회생 컨버터를 적용하여 감속시의 전력 회생에 의한 에너지절감 효과를 검토한다. 시스템 사양은 다음과 같다.

- 기계의 GD2 : 60kgm^2
- 모터의 속도 : 1750rpm
- 부하토크 : 3.5kgm
- 운전 패턴 : 다음 그림 참조
- 가동 시간 : 5000H
- 전력 단가 : 50원



<절전량의 계산> 부하율-효율 특성

- ▶가속시의 소요 토크는
 $T_{acc} = 600 \times 1750 / 375 / 180 + 3.5 = 19.06\text{kgm}$
 - ▶가속시의 소요 동력은
 $P_{acc} = 19.06 \times 1750 / 974 / 2 = 17.1\text{kW}$
 - ▶일정한 속도중의 소요 동력은
 $P_{con} = 3.5 \times 1750 / 974 = 6.3\text{kW}$
 - ▶감속중의 토크는
 $T_{dec} = 3.5 - 600 \times 1750 / 375 / 180 = -12.1\text{kgm}$
 - ▶감속중의 회생 전력은
 $P_{dec} = -12.1 \times 1750 / 974 / 2 = -10.9\text{kW}$
 - ▶회생 기능이 없는 인버터의 평균 전력은
 $P_{acc} + P_{con} = (17.1 + 6.3) \times 180 / 720 = 5.85\text{kW}$
- 회생기능이 부가되어 있을 때에는 P_{dec} 가 전원으로 반환되므로
- $P_{acc} + P_{con} + P_{dec} = (17.1 + 6.3 - 10.9) \times 180 / 720 = 3.13\text{kW}$
- 절전량은 $5.85 - 3.12 = 2.72\text{kW}$ 가 된다.
- 여기서 연간
 $2.72 \times 5000 = 13600\text{kWh}$, $13600 \times 50 = 680,000\text{원}$ 의 전기 요금을 절약할 수 있다.

4. 결론

전동기 부분의 에너지 절약은 전동기가 구동하고 있는 부하의 특성을 파악하여 특성에 적합한 제어 방식의 선택, 경제성 평가를 거친 후 진행해야 된다.

ESCO 사업을 진행하는 데 있어서 인버터는 2층 저감부하의 감속, 모터효율에 의한 슬립제어, 최적 전압 제어, 전동기의 회생 에너지 제어 등에 매우 유용한 전기에너지 절약 기기이다.