

Pump와 Blower의 가변속 운전에 의한 Energy Saving

黃 龍 夏
(二和電機工業(株) 次長)

■ 차 례 ■

- 1. 머릿말
- 2. Pump, Blower의 일반적 특성
- 3. Pump, Blower에 가변속 Inverter의 실제 적용
- 4. 맺는말

① 머릿 말

최근 원유가의 상승과 자원 고갈에 따라 Energy 절약 방안이 종래에는 생각하지도 않았던, 기계적인 제어에 의해 사용하던 기기에도 관심을 갖게되었다.

최근 전력전자 기술의 진보로 가변속 제어 Inverter로 교류 전동기의 가변속 운전은 신설 설비는 물론 기 설치된 설비에도 적용이 용이하여 Pump나 Blower 등 2 승저감 Torque 특성을 갖는 부하의 Power Saving을 목적으로 적용을 시도하고 있으나 이에따른 Engineering 자료 불충분에 따라 실제 적용하고자 하는 자신감 부족으로 적용을 망설이는 예가 흔히있어 Energy Saving에 대한 기본적인 방향을 제시하고자 한다.

② Pump, Blower의 일반 특성

종래에는 Pump나 Blower 등의 제어는 전동기를 정속도 운전후하고 Valve나 Damper로 흐르는 양을 제어하는것이 일반적이었으나 이러한 기기를 가변속 제어하게되면 대단히 큰 Power Saving이 기대된다.

일반적으로 Pump, Blower의 부하 특성은 그림 1과 같이 표시된다. 여기서,

Q ; 유량
H ; 압력

N ; 회전수
P ; 축동력 이라고 하면
 $N \propto Q$
 $H \propto Q^2$
 $P \propto Q^3$

또는 $P \propto N^3$ 의 관계가 있다.

예를들어 Blower에 대해 설명하면 배출쪽 Damper에서 풍량을 조절하는 경우에 Damper를 완전히 닫아서 풍량을 0으로 해도 축동력은 65% 정도 필요하다.

만약 풍량을 1/2이 되도록 Damper를 조절하면 축동력은,

$$65\% + 35\% \times 1/2 = 82.5\% \text{가 된다.}$$

그러나 가변속 운전을 하게되면 회전속도를 조절해서 원하는 풍량을 얻기 때문에

$$\text{축동력 } P = (1/2)$$

즉, 12.5%로 되며,

그 차이 $82.5\% - 12.5\% = 70\%$ 의 전력이 절감되어 Energy Saving이 된다. (그림 2 참조)

이에따른 Energy Saving을 계획할때는 다음 사항을 고려할 필요가 있다.

1) 가능성 및 Energy Saving 효과

유량의 증감 예를 들면 일정량이 되도록 제어할 필요가 있는가 없는가 또 압력은 어떠한가를 검토해서 Energy Saving 효과가 나타나야 한다.

2) 검토 해야할 요점

① Valve 및 Damper를 없애면 안되는가?

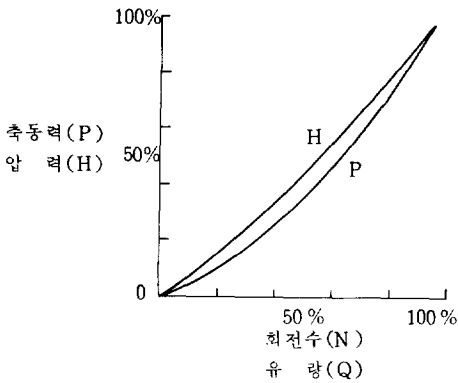


그림 1. Pump, Blower의 부하특성

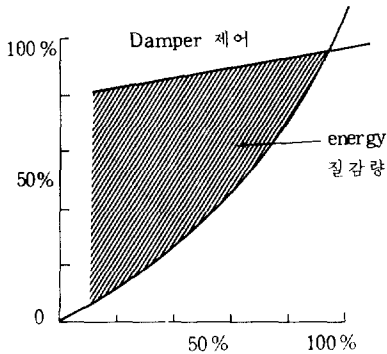


그림 2. 가변속 운전에 의한 Energy Saving

- ② 실제보다 필요 이상의 유량을 보내고 있지 않나?
- ③ 필요 이상의 압력이 나오고있지 않나?
- ④ 필요없는 운전은 되고있지 않나?
- ⑤ 계절, 심야 등에 따라 부하 조건이 바뀌지 않는가?

등을 검토하여 투자비와 회수기간 등을 고려하여 경제성 여부를 판단, 계획을 세워야 한다.

다음절부터 이에 관련된 설명을 하기로 한다.

③ Pump, Blower에 가변속 Inverter의 실제적용

앞에서 설명한 Power Saving 을 위해 Inverter 를 실제로 적용할때 이에대한 기본적으로 결정하여야 할 사항을 예를들어 설명 하고자한다.

1) 부하 Torque 특성의 결정

부하를 구동 하는데 필요한 Torque 는 속도에 따라 변화한다.

예를들면 Pump 나 Blower 는 회전을 시작할때

거의 Torque 가 필요치 않지만 속도를 증가함에 따라 점차 Torque 가 필요하게된다. 각 Torque 특성에 대해 설명하면

① 정 Torque 특성

속도가 변화해도 Torque 의 크기가 변화하지 않고 Power (P)는 속도에 비례하는 부하특성,

$$\text{즉 } P \propto N \cdot T \propto N$$

예를들면 권상기, 기중기 등

② 정 출력 특성

속도가 변화하면 이에 역비례 해서 Torque 가 변화하는 부하로서 Torque 가 거의 속도에 반비례하며 Power 는 일정한 부하특성,

$$\text{즉, } P \propto N \cdot T \propto N \cdot \frac{1}{N} \propto \text{일정}$$

예를들면 장력이 일정한 압연기, 공작기계, 압축기 등.

③ 저감 Torque 특성

속도가 저하함에 따라 Torque 가 감소하는 부하로서 Torque 가 거의 속도의 2승에 비례하며, Power 는 속도의 3승에 비례하는 부하특성,

$$\text{즉 } P \propto N \cdot T \propto N \cdot N^2 \propto N^3$$

예를들면 Pump, Blower 등, 이와같은 부하 Torque 특성에 부합되는 전동기와 부하 Torque 특성에 부합되는 Inverter 를 선정 하는 것이 Motor 의 Speed 를 Control 하는 경우에 효율 개선을 크게 할 수 있다.

또한, Torque 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\text{즉, } T_o = 974 \times 90 / N_o \text{ (Kg / m)}$$

여기서

T_o ; 전부하 Torque

N_o ; 전부하 회전수

P_o ; 전부하 출력

따라서 여기서는 2승저감 Torque 특성으로 결정한다.

2) 운전 Pattern의 결정

운전 방법에는 연속사용, 단시간사용, 반복사용등이 있으며, 부하와 목적에 따라 다르기 때문에 여기서는 공장 집진 Blower 를 예로해서 그림 4와 같은 Pattern 이라고 가정한다. 실제로 운전 Pattern 을 결정 하려면

유량(Q) - 압력(H)

특성 곡선에 의해 유량및 압력의 조정 범위를 결정하고, 이에따른 회전수 제어 범위가 결정된 후에 만들어진다.

	정 Torque 특성	정출력특성	저감 Torque 특성
부하 Torque 특성	<p>T = 일정</p> <p>회전수(N)</p>	<p>정Torque 정출력</p> <p>Motor Torque 부하 Torque</p> <p>$T \propto \frac{1}{N}$</p> <p>회전수(N)</p>	<p>Torque</p> <p>$T \propto N^2$</p> <p>회전수(N)</p>
출력 특성	<p>출력(P)</p> <p>$P \propto N$</p> <p>회전수(N)</p>	<p>정Torque 정출력</p> <p>Motor 출력 부하동력</p> <p>$P \propto N$ $P = \text{일정}$</p> <p>회전수(N)</p>	<p>(P)</p> <p>$P \propto N^3$</p> <p>회전수(N)</p>
V / F 특성	<p>전압(V)</p> <p>주파수(f)</p>	<p>회전수(N)</p> <p>주파수(f)</p>	<p>(V)</p> <p>$V \propto f^2$</p> <p>주파수(f)</p>

그림 3.

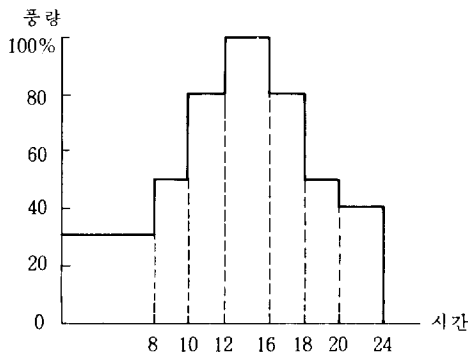


그림 4

3) 전동기 출력의 결정

전동기를 정격용량 이상으로 크게 선정하게 되면 일반적으로 40% 이하의 부하에서는 전동기 효율이 대단히 나빠지므로 Power Saving 면에서 볼때 좋지 않다.

전동기는 다소간 과부하가 되어도 문제가 되지 않음으로 가능한 범위 내에서 정격 용량을 결정해야 한다.

또한 Duty Cycle 이 1시간 이내일 경우에는 2

승 평균 부하를 구해서 전동기 출력으로 적용하면 Saving 효과가 커진다.

여기서는 이해의 편의를 위해 100% 풍량일때 최대출력 100 Kw 전동기로 결정한다.

4) Motor 정격전압의 결정

큰 공장의 경우 400 V 배전이 주류이며, 정격 전압이 높아지면 부하전류가 감소하여 선로 손실이 감소하므로 전동기의 정격 전압은 400 V로 한다.

5) 극수의 결정

극수는 보수에 문제가 있고 8극기 이상은 효율과 역률이 낮아 운전 특성이 나쁘다.

따라서 4극 또는 6극으로 한다.

6) Motor 종류의 결정

유도 전동기에서는 Cage 형과 권선형이 있지만 Cage 형은 권선형과 비교하여 효율이 약 5% 정도 좋고 Torque 는 다소 떨어지나 Cage 형의 경우 최대 Torque 가 250% 까지 문제가 없으므로 여기서는 Cage 형을 선택한다.

7) Motor 제어를 위한 각종 방식의 비교

각종 방식을 비교 할 때는 공기동력(실용상에는

축동력을 말할 경우가 많다.)에 대해서 전동기 입력이 얼마나 되는가를 비교해야 한다. 이것을 그림 5에 표시했다.

극수 변환이 효율은 가장 좋으나 앞의 운전 Pattern 에는 적용이 불가하므로 V.V.V.F 제어 가 가장 좋다.

표 1과 그림 5에 의한 비교표를 만들었다.

표 1에서 굵은 선으로 표시한 부분은 전동기 입력의 50% 이상이 손실로 되는것을 표시한 것이며, Energy Saving 의 관점에서 볼때 적당치 않음을 알 수 있다.

표 1과 그림 5에서 알 수 있듯이

- ① 전 영역에서 Inverter 제어가 가장 효율이 좋다.
- ② 출구 Damper 제어는 Energy Saving 이 거의 되지 않는다.
- ③ 풍량이 90% 이상에서는 입구 Damper 제어, 2차 저항제어, Inverter 제어방식이 비슷하다.
- ④ 풍량 80% 이상에서는 입구 Damper 제어와 2차 저항 제어가 거의 비슷하다.
- ⑤ 풍량 50% 이하의 제어에서는 Inverter 이외

에는 좋지 않다.

- ⑥ 풍량이 100%, 50%의 2단계 제어에서는 극수 변환이 가장 효율이 좋다.

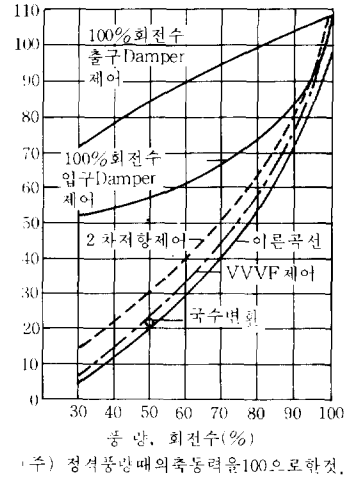


그림 5. 송풍기, 전동기에 소비전력 특성곡선

표 1. 송풍기, 전동기의 소비전력 특성

풍량 (%)	축동력	출구 Damper 제어		입구 Damper 제어		2차 저항제어		V.V.V.F		극수 변환	
		전동기입력	총손실	전동기입력	총손실	전동기입력	총손실	전동기입력	총손실	전동기입력	총손실
100	100	107	7	106	6	108	8	108	8	106	6
90	72.9	103.5	30.6	84	11.1	86	13.1	79	6		
80	51.2	99.5	48.3	72.5	21.3	68	16.8	55	3.8		
70	34.3	95	60.7	68	33.7	52	17.7	38	3.7		
60	21.6	89.5	67.9	64	42.4	30	17.4	25	3.4		
50	12.5	84	71.5	60	47.5	29	15.5	15	2.5	14	1.5
40	6.4	77.5	71.1	56	49.5	21	14.6	9	2.6		
30	2.7	71	68.3	52	47.3	15	12.3	5	2.3		

(주) (1) 숫자의 풍량은 전력이며, 풍량 100%때의 축동력을 100으로 한 것임.
 (2) 총손실=전동기 입력-이론상 축동력

8) 속도 제어용 전원장치의 결정

7) 항에서 검토한 결과 그림 4와 같은 운전 Pattern 에서는 System 구성이 간단하고 Energy Saving 효과가 크고 기 설치된 Motor 에도 적용이 가능하며 시동 장치가 별도로 필요치 않은등 장점이 많은 Inverter 를 채택한다.

9) Inverter 용량 산출

Inverter 용량은 적용되는 전동기의 부하에 의해

서 결정된다.

다시 말해서 Motor 부하를

PM (KW), Motor 효율을 η_M , 역률을 Cos Q, Inverter 효율을 η_V 라고하면 Inverter 의 용량 P (KVA) 는 여유 계수를 1.05로 하여

$$P = \frac{1.05 \times PM}{\eta_M \times \text{Cos } Q} \times \frac{1}{\eta_V}$$

$$= \frac{1.05 \times 100 \times 10^3}{0.94 \times 0.85} \times \frac{1}{0.95} = 138 \text{ KVA}$$

따라서 Inverter 의 용량은 140 KVA 로 된다.

※ 주의사항

① GD² 이 큰 부하를 단 시간내 가속할 경우에 Torque 를 크게 하려면 v/f 비의 전압 V 를 올릴 필요가 있다.

이 경우에는 가속 전류가 크기 때문에 Inverter 의 용량을 크게할 필요가 있다.

② 단시간 내에 GD² 이 큰 부하를 사용할때 시동 전류는 Inverter 의 과부하 내량 (보통 정격의 150%) 을 초과하지 않아야 한다.

10) Inverter Type 의 결정

Inverter 회로구성 형태에 따라 전압형과 전류형이 있고 SCR, GTO, Transistor 등을 주 소자로 사용한 형태가 있다.

그러나 각각 특징이 있고 용도에따라 적용방법, 부하의 크기, 제어 조건등 고려 해야할 사항이 많다.

여기서는 출력 파형에 고조파 함유량이 적기 때문에 Motor 발열과 소음이 적으면서 종합 효율이 좋고 전원 측으로 역류되는 고조파 함유량이 적은 2 승저감 Torque 특성을 갖는 Sine Wave PWM 방식의 Transistor Inverter 를 선정한다. (그림 6 참조)

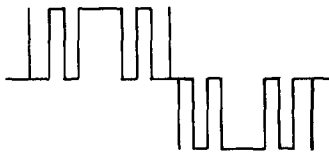


그림 6. 등가정현파 PWM 제어의 출력파형

11) Inverter 전원 용량의결정

① 전원 변압기의 용량

PWM 방식의 전원 변압기 용량 ≥ 부하용량 (KW) × 1.4 × Cos Q

② 자가 발전의 경우 발전기 용량

발전기 필요용량 ≥ Inverter 의 총용량 (KVA) × 2.5

따라서 전원변압기 용량은

$$140 \text{ KVA} \times 1.4 \times 0.9 \text{ (Inverter 역률)} = 176.4 \text{ KVA} \approx 180 \text{ KVA}$$

그러므로 3 φ 440 V 180 KVA 를 결정한다.

* 만약 입력 변압기 용량이 10배 이상되면 Inv-

erter Maker 측과 협의가 필요하다.

왜냐하면 전원 변압기의 Impedance 에 따라 Inverter 입력측에 Reactor 를 넣어 Impedance 를 조절할 필요가 있다.

참고로 설명하면 Transistor Inverter 에 공급전원 용량을 10 KVA 미만은 기본적으로 100 KVA 이해야 되어야한다.

10 KVA 이상은 Inverter 용량이 약 10 배 까지 허용된다.

왜냐하면 Transistor Inverter 에 전원을 접속하면 직류 평활용 Capacitor 에 돌입 충전 전류가 흐르게 되는데 이 충전 전류의 값이 순변환 DIODE 의 허용 전류치 (I²t) 보다 크게되면 DIODE 는 파손된다.

따라서 이 조건을 만족치 못할때는 외부에 필요한 Reactance 를 넣어서 Impedance 를 맞추어야한다.

여기서 설명하는 140 KVA 용 Inverter 에 필요한 Reactance 값은 Inverter 설계상 약 150 μH 정도가 필요하다.

이에따른 계산을 해보면 전원 변압기의 Impedance

$$L = \frac{V^2}{V_A} \times \%z \times \frac{1}{2\pi f} \times 10^{-2} (\mu H)$$

V ; 2차 전압

V_A ; 용량

%z ; % Impedance

f ; 주파수

계산예,

용량 ; 500 KVA

전압 ; 440 V

%z ; 3%

주파수 ; 60 HZ

$$L = \frac{440^2}{500 \times 10^3} \times 3 \times \frac{1}{2\pi \times 60} \times 10^{-2}$$

$$\approx 30.8 \mu H$$

배선의 Impedance (3심 Cable) 은 대략 0.2 μH /m 이다.

계산예

입력 Cable 이 100 m 라고 가정하면

$$0.2 \mu H / m \times 100 m = 20 \mu H$$

Inverter 에서 필요로 하는 Reactance 값이 150 μH 이므로

$$150 \mu H - (30.8 \mu H + 20 \mu H) = 99.2 \mu H$$

따라서 99.2 μH 의 외부 Reactor 가 필요하게된다.

12) Energy Saving 효과의 계산

표 1를 참고로 하여 입구 Damper 제어할때와 비교하여 Inverter 를 사용할때의 Saving 효과를 앞의 운전 Pattern 으로 계산하면

① 입구 Damper 제어 일때의 1일 전력량

- 52 KW × 8 시간 = 416 KWH
- 56 KW × 4 시간 = 224 KWH
- 60 KW × 4 시간 = 240 KWH
- 72.5 KW × 4 시간 = 290 KWH
- 106 KW × 4 시간 = 424 KWH
- 계 1.594 KWH

② Inverter 제어일때의 전력량

- 5 KW × 8 시간 = 40 KWH
- 9 KW × 4 시간 = 36 KWH
- 15 KW × 4 시간 = 60 KWH
- 55 KW × 4 시간 = 220 KWH
- 108 KW × 4 시간 = 432 KWH
- 계 788 KWH

③ 년간 전력비

㉠ 입구 Damper 제어의 경우
 $1594 \text{ KWH} \times 365 \text{ 일} \times 60 \text{ 원} = 34,908,600$

㉡ Inverter 제어의 경우
 $788 \text{ KWH} \times 365 \text{ 일} \times 60 \text{ 원} = 17,257,200$

㉢ 년간 전력 절감액
 $34,908,600 - 17,257,200 = 17,651,400 \text{ 원}$

이상에서 설명한 바와 같이 앞의 운전 Pattern 에서 전력 절감이 50% 정도 되는 것을 알 수 있다.

Pump Blower 의 가변속 운전을 할경우 저속으로 운전하는 시간이 많으면 많을 수록 전력비는 이에 3승에 비례하여 떨어지므로 저속운전 시간이 많을 경우에는 Saving 효과는 대단하다.

여기서 투자비에 대한 회수기간을 추정해보면 Inverter 140 KVA 의 Cost 약 20,000,000 원
 설치비 및 부대 시설비 (장소와 적용 방법에따라
 다름)

약 2,000,000 원

Motor 100 KW 의 Coss 약 5,000,000 원

계 27,000,000 원

투자비 회수기간

$27,000,000 \div 17,651,400 \approx 1.5 \text{ 년}$

따라서 1년 만이면 투자비가 회수되고 그후부터는 완전한 Saving 이 된다.

④ 맺는 말

우리나라와 같이 천연 자원이 부족하여 Energy 공급을 수입에 의존하는 나라에서는 Energy 를 절감해야 한다는 것은 국가 시책은 물론 국민 개개인의 생활에서도 우선되어야 함은 물론이다.

그러나 Energy 를 절감하는 방법의 개발이 뒤늦게 이루어지고 있음은 안타깝다.

무조건 절감이라는 말은 성립되지않는다. 같은 효과를 내면서 필요치않은 Energy 소모를 최소한으로 낮추는 방법을 개발해야 할 것이다.

이는 학계는 물론 산업기기를 제작하는 업체의 공동 참여에 의해 끊임없는 연구 개발이 절실히 요구되는 것이다. 미비한 점은 많으나 Inverter 에 의한 Energy Saving 에 관하여 간단한 IDEA 를 제공하였으며, 이에 대한 구체적인 적용방법 등은 지면 관계상 서술치 못하였다.

앞으로 Energy Saving 에 관심있는 분들과 많은 교류가 있기를 바라는 마음 간절하다.