제12장

인버터 응용

12. 1 유도전동기의 원리와 속도제어

12. 2 인버터(VVVF)의 개요와 원리

12. 3 인버터 구동에 따른 전동기의 특성

12. 4 인버터(VVVF)의 적용기술

12. 5 실제 공조설비에 인버터의 적용과 에너지 효과

12. 인버터 응용

12.1 유도전동기의 원리와 속도제어

12. 1. 1 유도전동기의 원리

유도전동기의 〈그림 12-1〉과 같이 고정자권선에 3상교류전압을 인가하면 이것에 의해 회전자계(回傳磁界)가 발생하고 회전자가 이 자속을 끊으면서 회전자도체에 전류가 발생한다. 이 전류는 플레밍 왼손법칙에 의해서 토크(Torque)를 발생시켜 회전자가 회전하게 되고, 회전자가 회전자계와 완전히 동기(同期)해서 회전하게 되면 회전자 내에는 전류가 흐르지 않게되며(토크=0), 이 때를 무부하운전이라고 한다.

이 때 회전자와 회전자계의 속도차를 슬립(Slip)이라고 하며, 이것은 유도전동기의 특성에 중요한 요소가 된다. 또 유도전동기는 자속을 발생시켜 회전자(2차회로)에 에너지를 전달하기 때문에 변압기와 거의 동일한 등가회로가 되며, 대표적인 등가회로도를 〈그림 12-2〉로 나타낼 수 있다. 유도전동기의 슬립과 토크(Slip-Torque), 전류특성은 〈그림 12-3〉과 같이 되며, 유도전동기에 있어서 가장 중요한 특성이다.

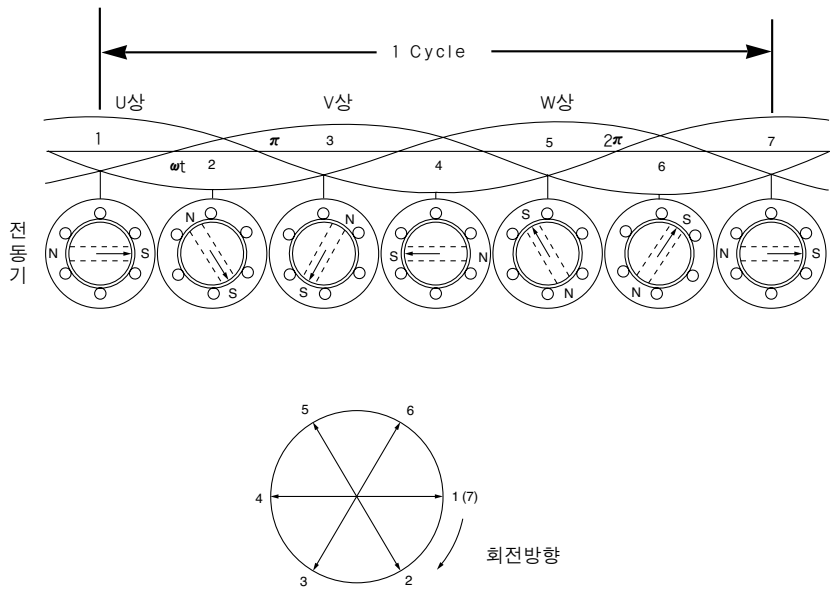
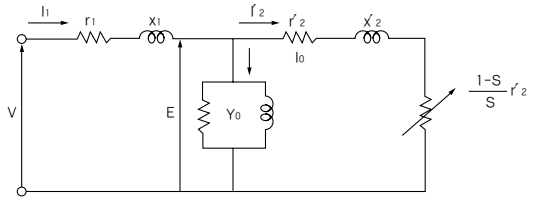


그림 12-1 유도전동기의 회전자계



V : 1차(단자) 전압

E : 내부 유기기전력

I_1 : 1차전류

I_0 : 여자전류

I'_2 : 2차(부하)전류

Y_0 : 여자어드미턴스 $(\frac{1}{r_m + jX_m})$

r_1 : 1차 권선저항

X_1 : 1차 누설리액턴스

r'_2 : 2차저항(1차환산)

X'_2 : 2차 누설리액턴스

S : 슬립

그림 12-2 유도전동기의 등가회로

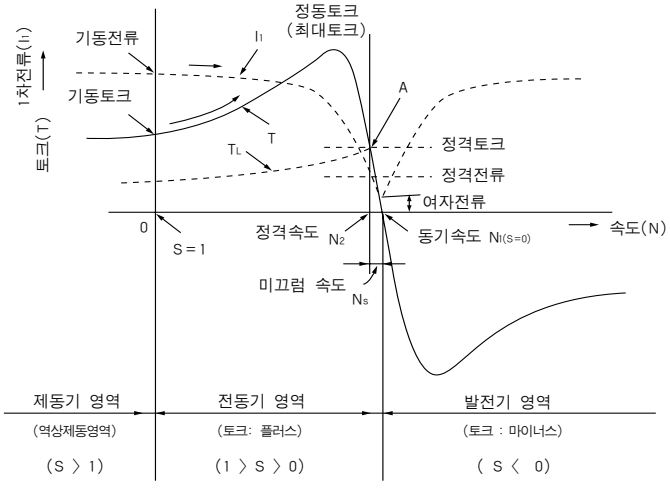


그림 12-3 유도전동기의 일반특성

12. 1. 2 유도전동기의 속도제어

유도전동기의 속도는 다음식으로 얻을 수 있다.

$$N = \frac{120f}{P}(1-S) = Ns(1-S)$$

여기서

N : 전동기 속도(rpm)

f : 1차 주파수

P : 전동기 극수

S : 슬립(Slip)

Ns : 동기속도(同期速度) $= \frac{120f}{P}$ (rpm)

따라서 f, P, S의 파라메터(Parameter)를 변화시키면 전동기의 속도를 변화시킬 수 있다. 속도제어에 있어서 대표적인 방법으로는 다음의 〈표 12-1〉과 같이 분류할 수 있다.

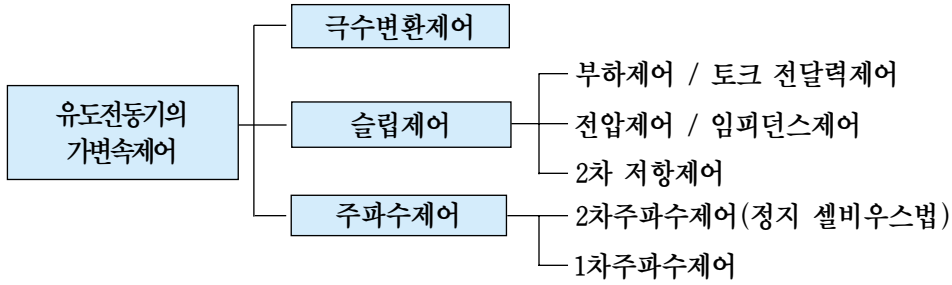


표 12-1 유도전동기의 가변속제어 분류

(1) 극수변환제어

이것은 극수변환(Pole Change)전동기를 이용하여 외부의 극수절환스위치에 의해 고정자권선을 절환함으로써 속도제어를 하는 방법이다.

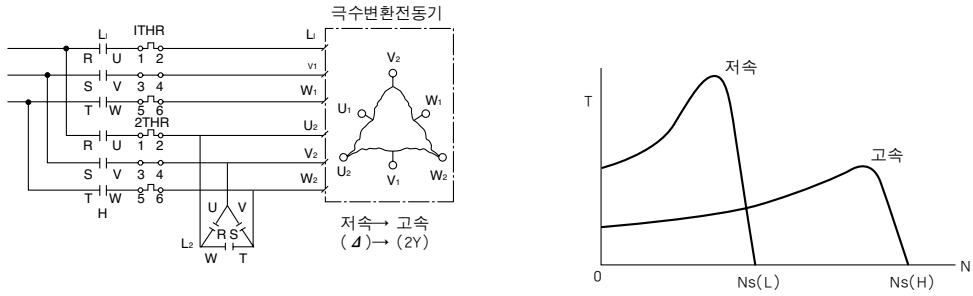


그림 12-4 극수변환법과 특성

(2) 부하제어

이 방법은 별도의 제어용 부하장치 즉 전동기의 출력축에 가변속제어를 할 수 있는 이음매를 설치하여 부하장치의 입력회전속도를 변화하는 것으로서 대표적인 방식은 〈표 12-2〉와 같다.

		(대표례)
일정속도전동기 + 가변속이음매	기계식변속기	가변속피치 풀리와 가요대
		원추마찰차
		금속환
		구면(球面)마찰차
		유성(遊星)콘과 링
	유압식변속기	유체 이음매
		토크 컨버터
		유압클러치
	전기식변속기	맴돌이전류 이음매

표 12-2 가변속 이음매

이 방식은 손실이 커지므로 보통은 과전류조인트를 이용해서 전기적으로 연결시켜 토크의 전달력을 조정함으로써 속도를 제어하는 전기식 변속기방식이 널리 이용되고 있으며 원리는 〈그림 12-5〉와 같다. 이 방법은 조인트(이음매)에 여자전류를 흘려 와전류를 발생시켜 토크를 전달시키는 방법으로 유도전동기와 완전히 동일한 원리이다. 이것은 특히 저속영역에서는 효율저하 및 속도 불안정 등의 결점이 있지만 시스템이 간단하기 때문에 널리 이용되고 있으며 대표적인 전동기로는 VS전동기, IC전동기 등이 있다.

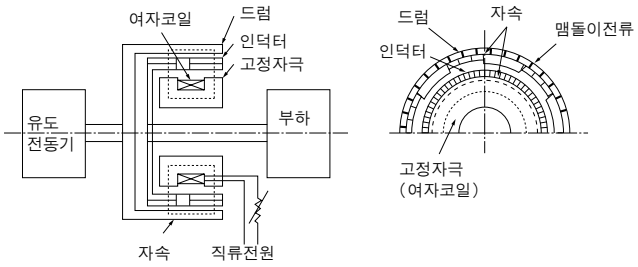


그림 12-5 와전류조인트(맴돌이전류 이음매) 원리도

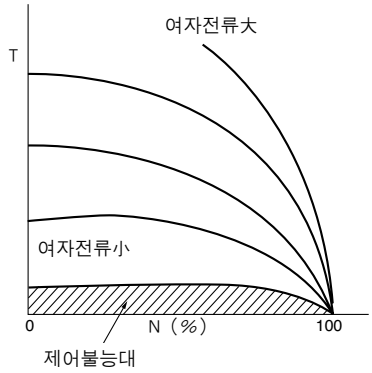


그림 12-6 와전류조인트 특징

(3) 전압제어

이 방법은 전동기의 인가전압(1차전압)을 변화시킴으로써 전동기의 발생토크 특성을 변화, 슬립을 가감하는 방법이다. 〈그림 12-7〉 참조

이때 발생토크는 전압의 2제곱에 비례하므로 토크 T는

$$T = \frac{m_1 sr'_2 V'_1}{9.8NS\{(s_r + r'_1)^2 + s_2(x_1 + x'_1)^2\}} \ (kg \cdot m)$$ 이다.

여기서 m_1 : 상수

기타 : 〈그림 12-2〉 등가회로 정수 참조

유도전동기의 속도제어에 있어서 공통된 것은 슬립제어의 경우 슬립에 비례하는 2차손실이 발생하기 때문에 슬립증가와 함께 운전특성이 나쁘게 된다. 이것 때문에 저속상태에서 출력(토크)가 적어지는 유체부하($T \propto N^2$)에 많이 이용된다. 인가전압 조정에는 IVR, 슬라이닥스, 사이리스터(SCR) 등의 전압조정장치가 이용되고 있으며, 단상전동기의 경우는 리액터의 탭절환에 의한 속도제어가 많이 이용되고 있다. 이 방법은 전동기의 속도가 부하토크의 평형점(平衡点)으로 결정되기 때문에 속도제어범위가 넓지 않은 결점이 있다.

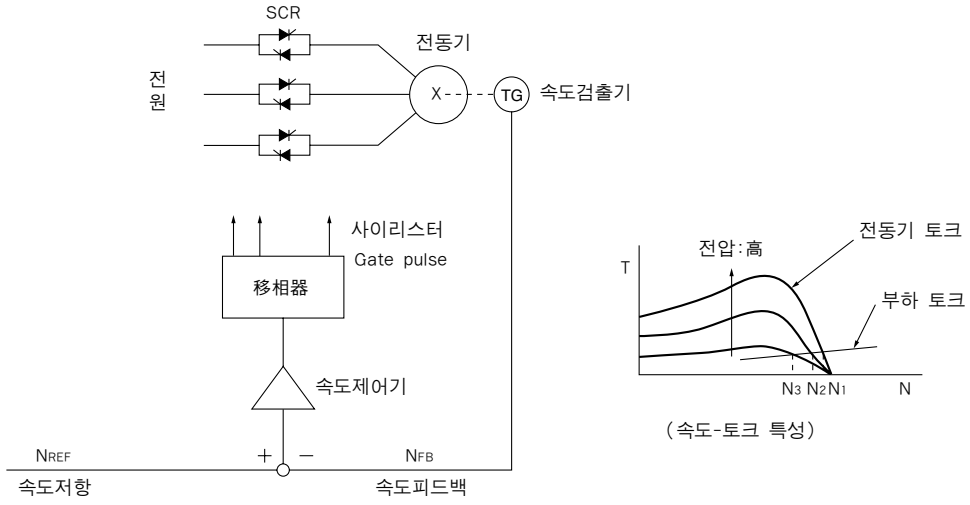


그림 12-7 1차 전압제어에 의한 속도제어법

(4) 2차저항 및 2차주파수제어

a) 2차저항제어

권선형유도전동기에서는 외부에 2차저항을 연결시켜 이 저항을 변화시키면 비례 추이에 의해 토크 특성이 변화한다. 이것을 이용해서 부하토크와의 평형점(平衡点)을 변화시켜, 속도제어를 하는 것이 가능하다. 이를 비례추이를 이용한 속도제어방법이라고 하며 〈그림 12-8〉과 같다. 이 방법은 외부 2차저항의 손실이 크게 되어서, 이 2차손실을 전기적 또는 기계적에너지로 변환하여 효율증가를 꾀한 셀비우스법 및 크뢰머법이 이용되고 있다.

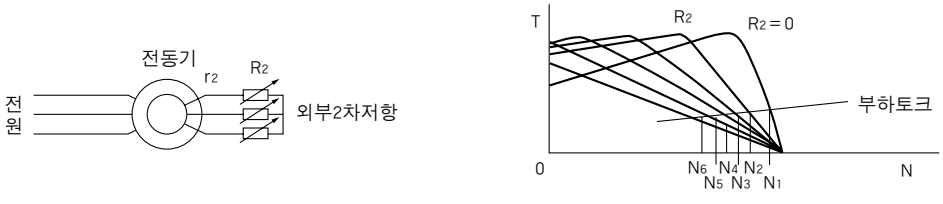


그림 12-8 권선형유도전동기의 2차저항에 의한 속도제어법

b) 2차주파수제어

권선형유도전동기의 2차저항에 의한 속도제어는 반도체 전력소자가 사용되면서부터 정지셀비우스법 즉, 2차회로에서 반대로 임의의 주파수로 여자됨으로써 1차 및 2차주파수의 합성주파수로 운전하는 방법이다. 이 방법에 의해서 권선형유도전동기의 가변속화에 이용되고 있다.〈그림 12-9 참조〉 이 방법은 앞의 외부 2차저항에 소비되는 손실을 타려(他勵) 인버터(사이리스터-레오나드법의 인버터 동작원리와 동일)로 전원을 반환시킴으로서 효율은 좋지만 저속운전시 및 기동시는 2차회로의 전압이 높게되어 고내압(高耐壓)의 소자를 사용해야 하므로 비경제적이기 때문에 2차기동저항기와 조합시켜 속도제어 범위를 제한하는 경우가 많다.

(보통 변환기의 용량은 전동기출력의 10~30% 정도로 제한한 용도에 적용)

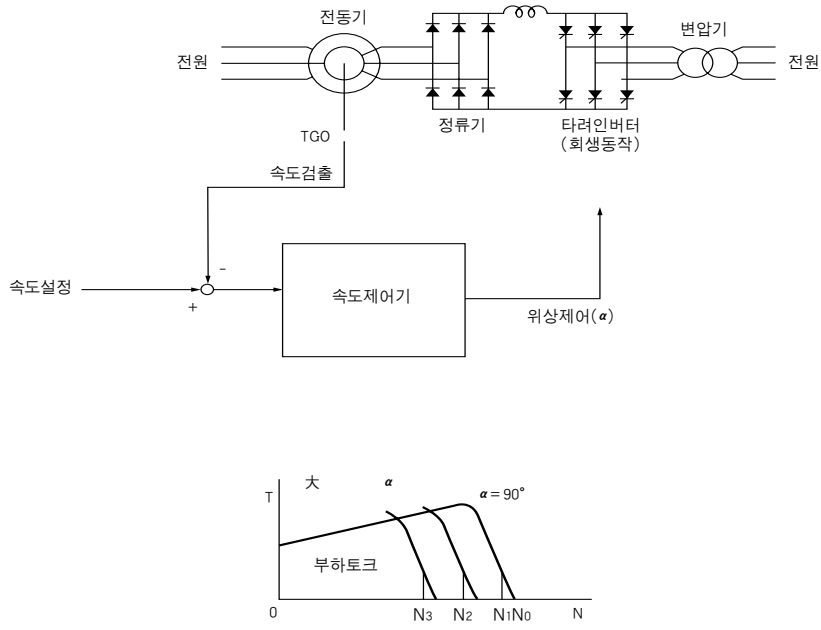
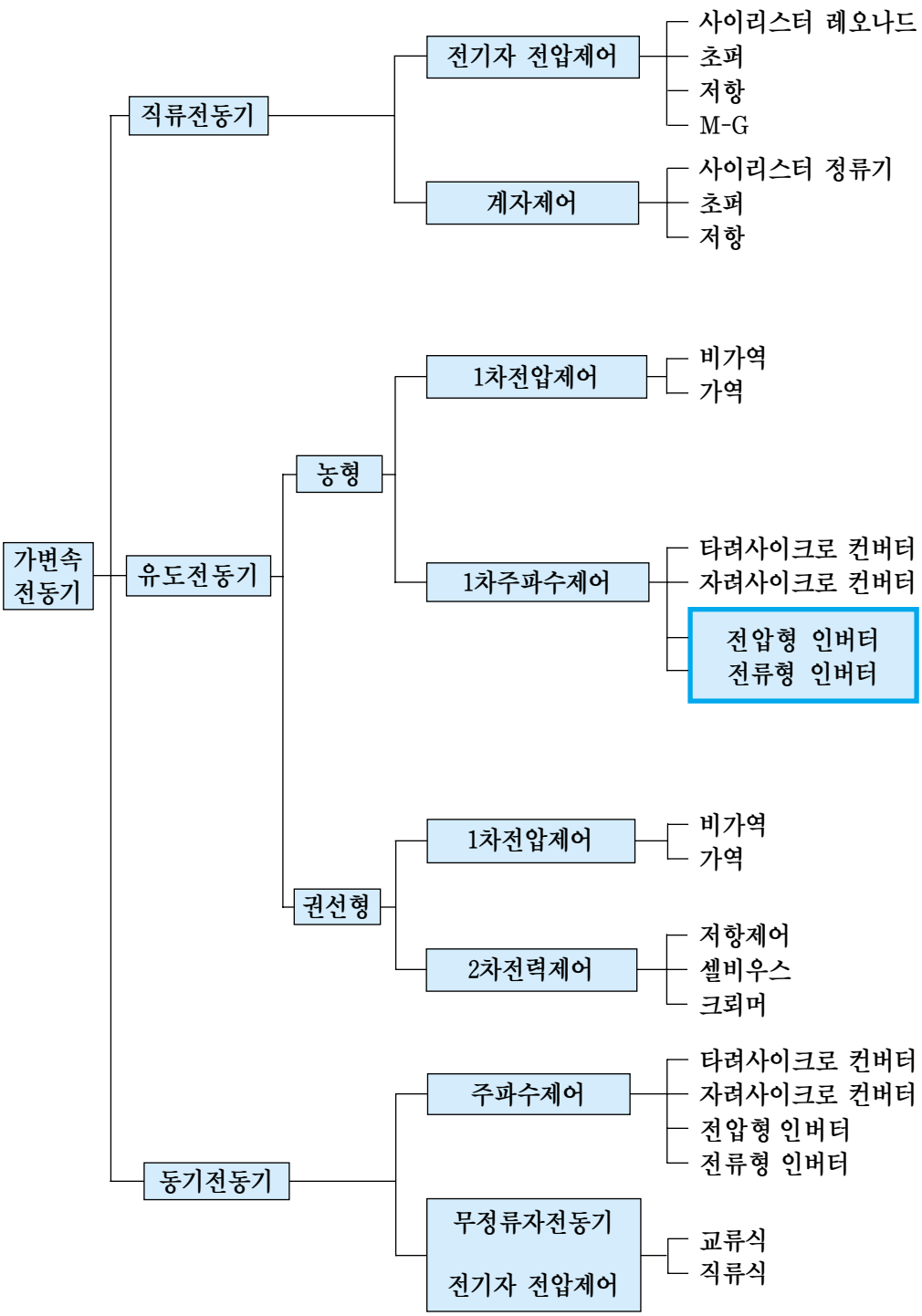


그림 12-9 정지셀비우스에 의한 속도제어법

(5) 가변속전동기의 제어분류



12. 2　인버터(V V V F)의 개요와 원리

12. 2. 1　인버터(VVVF)란

교류전동기에 공급되는 전압과 주파수를 변환시키는 전력변환장치이다.

상용전원으로부터 공급된 전압과 주파수를 부하조건에 맞도록 가변시켜 전동기(유도전동기)에 공급함으로써 전동기가 요구하는 속도로 운전할 수 있도록 제어하는 속도제어장치를 「인버터」라고 한다.

12. 2. 2　인버터의 기본동작원리와 특색

(1) 인버터의 기본회로 구성

상용전원이 인버터에 인가되면 먼저 컨버터부에서 교류전원을 직류전원으로 1차변환시키고 이를 다시 인버터부에서 교류전원으로 변환시키면서 원하는 전압 및 주파수를 출력하도록 되어있다.

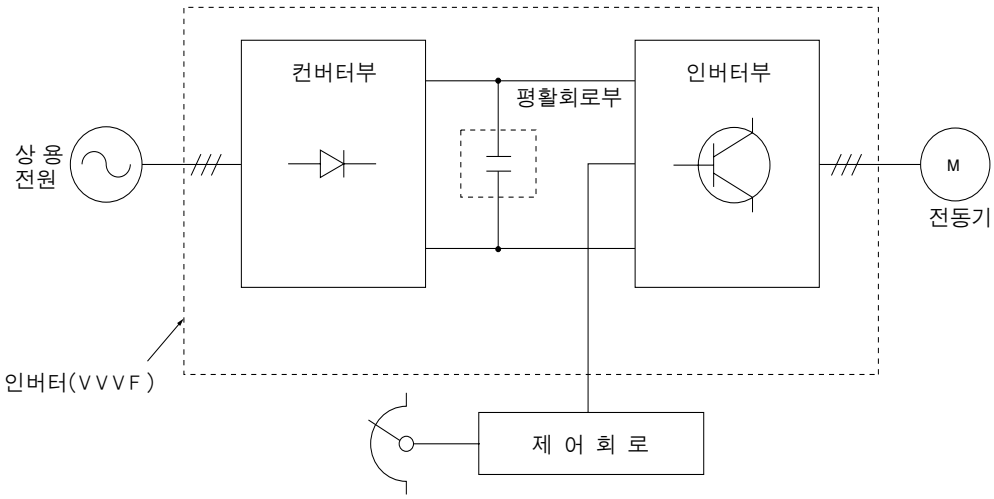


그림 12-10　인버터의 기본회로

(2) 인버터의 동작원리

〈그림 12-11〉에 인버터의 구성을 나타내는 Block Diagram을 나타내었다. 이에 대해 대략적인 동작원리를 설명하면 아래와 같다.

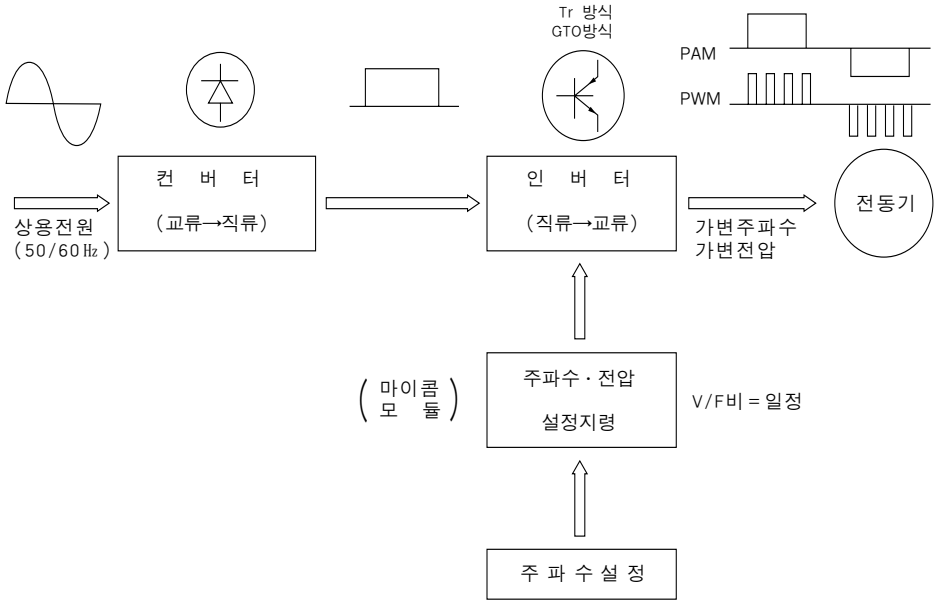


그림 12-11 인버터(VVVF)의 구성

우선 상용전원이 인버터에 들어오면 맨처음 컨버터(다이오드 또는 사이리스터정류기)에 의해 교류전압을 직류전압으로 변환시킨다. 이 때 변환된 직류전압의 맥동(Ripple)을 없애기 위해 전해컨덴서가 이용된다. 이렇게 변환된 직류가 인버터부에 의해 구형파(矩形坡)교류로 변환된다. 이 때 변환된 구형파의 형상에 따라 PAM(Pulse Amplitude Modulation)방식과 PWM(Pulse Width Modulation)방식으로 구분되며, PAM방식으로 할 것인가, PWM방식으로 할 것인가는 인버터의 스위칭소자(사이리스터, GTO 사이리스터, 트랜지스터)의 게이트(사이리스터) 혹은 베이스(트랜지스터)를 제어하는 방식에 따라 결정된다. 이를 결정하는 부분이 바로 마이콤에 의해 모듈화된 주파수·전압설정지령부이며, 여기에서 주파수와 전압비(V/F)가 일정하도록 제어한다.

이렇게 주파수와 전압이 변환된 출력을 전동기에 공급하므로서 원하는 전동기속도를 얻을 수 있다.

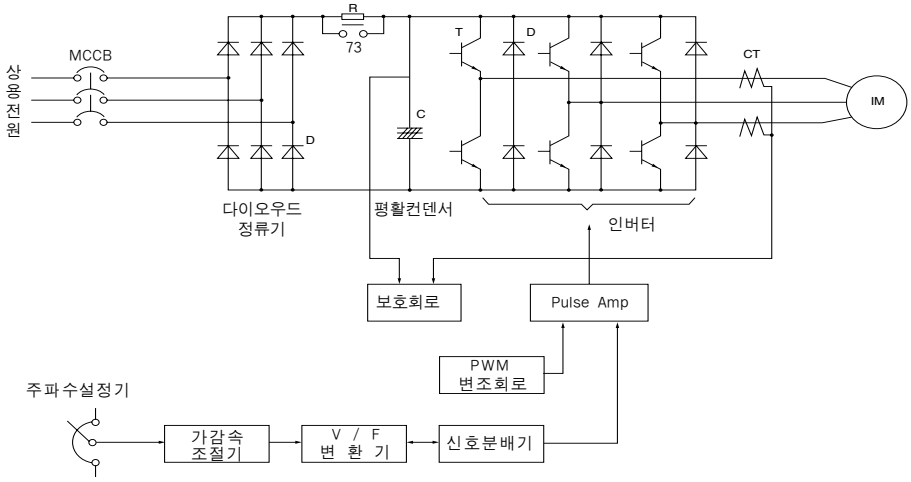


그림 12-12 VVVF 제어회로 구성도

(3) 인버터의 종류와 특색

표 12-3 인버터의 종류

항목	주회로방식	제어방식	인버터부분 적용소자	출력파형	주회로구성		특색
					표준구성	회생필요시	
1	전압형	전압제어	트랜지스터 GTO	V i	컨버터 P 인버터 N IM	가역컨버터 P N	범용성(부하를 택하지 않는다)경제성, 역률이 높다.
2			사이리스터	V i	P N IM		범용성
3			트랜지스터 GTO	V i	P N IM	혹은 브레이크회로 P 저항기 N	범용성 저소음 고역률
4		전류제어	트랜지스터 GTO	V i	P N IM		고응답 고역률
5	전류형	전압제어	사이리스터	i V	IM		고빈도 가감속에 유리(전원에 에너지의 회생이 된다)
6		전류제어	사이리스터	i V			고응답 (전원에 에너지의 회생이 된다)

a) 전압제어와 전류제어

주회로방식은 전압형과 전류형의 2종류로 분류할 수 있고, 제어방식도 전압제어와 전류제어의 두 방식으로 분류된다. 전압제어방식과 전류제어방식은 주회로방식이 전압형과 전류형의 어느 것이더라도 적용할 수 있다. 범용인버터 등에서는 출력주파수에 비례하여 출력전압을 제어하는 전압제어방식이 사용되고 있다. 속응(涑應)제어를 필요로 하는 용도에서는 출력전류를 제어하는 방식으로 하고 있다.

① 전압제어

범용인버터에서는 전압형의 전압제어가 적용된다. 〈표 12-3〉 항목1의 트랜지스터 인버터나, GTO 인버터에서는 인버터부분에서 출력전압 및 주파수를 제어한다. 출력전압의 크기는 반도체스위치의 도통률에 따라 출력전압을 사인파 모양으로 제어할 수 있다. 〈표 12-3〉 항목2와 항목5의 사이리스터 인버터에서는 컨버터 부분에서 출력전압을, 인버터부분에서 출력주파수를 제어한다.

② 전류제어

직류기와 같은 속응성이 요구되는 분야에서는 유도전동기의 토크를 속응제어하기 위해서 전류제어가 적용된다. 〈표 12-3〉 항목6의 전류형 사이리스터 인버터에서는 인버터부분에서 주파수를 컨버터부분에서 전류를 제어한다. 항목4의 트랜지스터나 GTO로 구성되는 전압형의 경우에는 인버터부분의 도통률에 의하여 출력전류를 사인파 모양으로 제어하는 전류제어방식을 적용한다.

2) PAM과 PWM

출력전압 또는 출력전류의 제어는 컨버터부분 혹은 인버터부분에서 행해진다. 이 출력이 제어수단으로서 PAM방식과 PWM 방식이 있다.

① PAM

PAM이란 Pulse Amplitude Modulation의 약칭으로서, 전압원의 전압 E_d 혹은 전류원의 전류 I_d 의 진폭을 바꾸고, 출력을 제어하는 방식이다. 따라서 인버터부분에서는 주파수만 제어하고, 컨버터부분에서 출력의 전압 혹은 전류를 제어한다. 〈그림 12-13〉에 PAM에 의한 전압조정시의 출력전압파형을 고전압시 및 저전압시에 대하여 나타내고 있다.

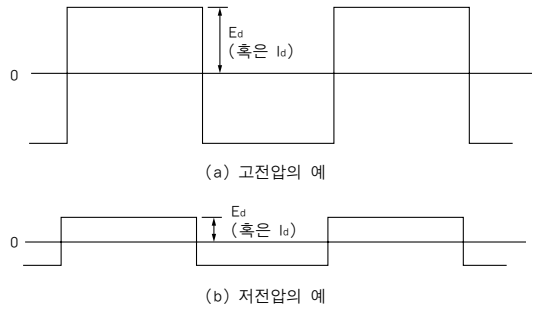


그림 12-13 PAM에 의한 전압조정

〈표 12-3〉 항목 2, 5, 6,의 사이리스터 인버터에서는 전류(傳流)시간이 100~수 100㎲ 필요하기 때문에 고주파스위칭이 어렵고, PWM제어가 곤란하며, 인버터부분에서는 주파수만을 제어하는 PAM방식이 채용된다. 또 항목6의 경우, 저주파수영역에 있어서 PWM제어를 병용한 예이다. 또 트랜지스터인버터나 GTO인버터에 있어서도 고속전동기를 구동하는 용도나, PWM제어에 기인하여 전동기에서 발생하는 자기소음이 문제가 되는 용도에 대하여 〈표 12-3〉 항목3의 초퍼부분에서 출력전압을 제어하는 초퍼PAM 방식이 채용된다.

② PWM

PWM이란 Pulse Width Modulation의 약칭으로서, 출력파형의 반사이클 안에 다수의 펄스열을 만들고, 그 펄스폭의 등가전압을 사인파모양으로 변화시켜 저차(低次)고조파가 적은 매끄러운 출력을 얻는 방식이다.

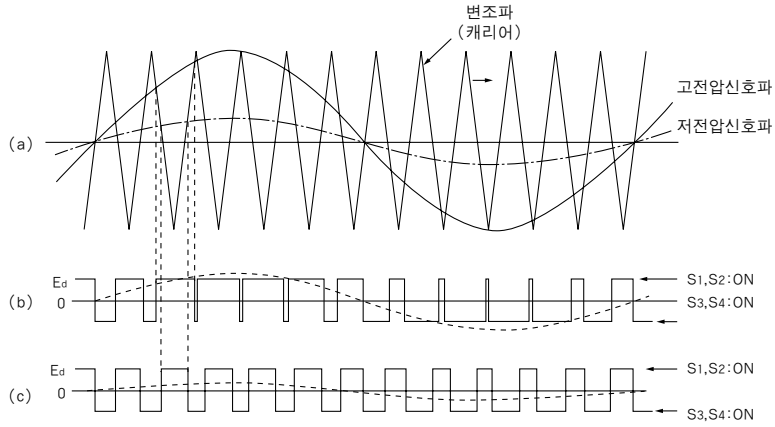
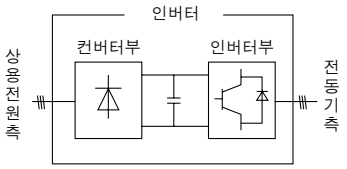
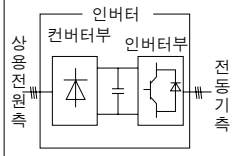
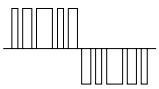
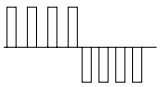
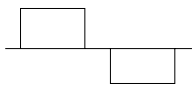
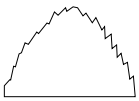
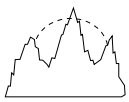
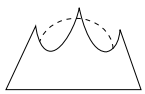


그림 12-14 PWM에 의한 전압조정

〈그림 12-14〉에 PWM인버터에 의한 전압조정의 원리가 나타나 있다. 그림(a)에서, 삼각파형의 변조파와 사인파형의 신호파를 비교하여 그 논리(신호파가 삼각파보다도 큰 때

를 정(正) 논리로 한다)를 취하면 그림(b) 및 그림(c)와 같이 신호파의 진폭에 대응하여 펄스폭의 등가전압이 사인파모양으로 변조된 출력파형을 얻을 수 있다. 단상전압형인버터에 있어서, 정논리로 스위치 S_1, S_2를 ON(S_3, S_4는 OFF)이라 하고, 부논리로 스위치 S_3, S_4를 ON(S_1, S_2는 OFF)이라 하면, 그 출력파형은 신호파의 진폭에 대응하여 그림(b) 또는 (c)가 된다. 〈표 12-3〉 항목1. 4,의 트랜지스터나 GTO 인버터에서는 PWM방식의 적용이 가능하고, 인버터부분만으로 주파수의 제어와 출력의 조정이 가능하다. 따라서 PWM방식에서는 컨버터부분의 출력은 일정한 전압의 직류면 되고, 컨버터부분은 보통 다이오드로 구성되는 경우가 많다.

③ PAM과 PWM 방식의 비교

비교항목 \ 제어방식			PWM제어		PAM제어
			정현파PWM	구형파PWM	
주회로구성					
출력전압파형			부등 Pluse	등 Pluse	구 형 파
					
출력전류파형					
특징	장 점		· 응답성이 좋다 · 전원역률이 높다 · 인버터효율이 높다 · 주회로가 간단	· 응답성이 좋다 · 전원역률이 높다 · 인버터효율이 높다 · 회로가 간단	· 전동기소음이 작다
	단 점		· 전동기에 소음이 약간 발생한다.	· 전동기소음이 크다 · 전류이용률이 나쁘다	· 전동기소음이 작다
	전동기 효율 토크 맥동 전 동		○ ○ ○	△ △ △	○ △ △
	출력전원고조파	저 차 저속에서의 진동등에 영향을 미친다.	작 다	크 다	크 다
		고 차 소음의 음질에 영향을 미친다.	크 다	크 다	크 다

12. 2. 3 인버터의 제어방식

(1) V/f 제어

인버터구동의 주된 전동기는 농형유도전동기다. 이 유도전동기의 1차주파수제어로서 가장 잘 알려져 있는 것이 V/f 제어다. 〈그림 12-15〉의 3상유도기 등가회로에서 토크 τ는 다음 식으로 표현된다.

$$\tau = \frac{3P}{2\omega} \times 2\text{차입력} = \frac{3P}{2\omega} \frac{\frac{r_2'}{s}E^2}{(\omega l_2')^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)}$$

여기에서 $\omega = 2\pi f$, f:인버터 주파수, P:극수, s:슬립이다.

지금 $s = (\omega - \omega_r)/\omega = \omega_s/\omega$($\omega_r$:회전각 속도, ω_s: 슬립각 속도)라 한다면,

$$\tau = \frac{3P}{2\times(4\pi)^2} \times \frac{\frac{r_2'}{\omega_s}}{l_2'^2 + \left(\frac{r_2'}{\omega_s}\right)^2} \left(\frac{E}{f}\right)^2 [\text{N}\cdot\text{m}]$$

으로 되고 E/f=일정하게 제어하면 토크는 〈그림 12-16〉과 같이 ω_s에 대해 동등한 것이 된다. 이 제어는 Lm의 전류가 일정하게 되므로 공극자속일정제어라고도 한다. 실제로는 r_1과 l_1에 전압강하가 있기 때문에 E≒V이다. 만약 (V/f=일정)하게 제어하면 〈그림 12-17〉과 같이된다. 따라서 (E/f=일정)하게 하기위해 r_1 과 l_1의 전압강하를 보정하여 〈그림 12-18〉의 ②와 같은 관계로 제어하는 것을 V/f제어라 한다.

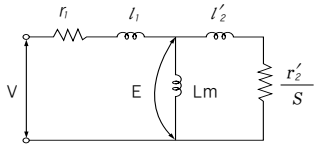


그림 12-15 3상유도기의 등가회로

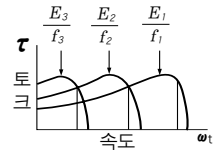


그림 12-16 *E/f* 일정제어

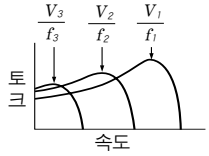


그림 12-17 *V/f* 일정제어

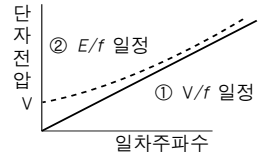
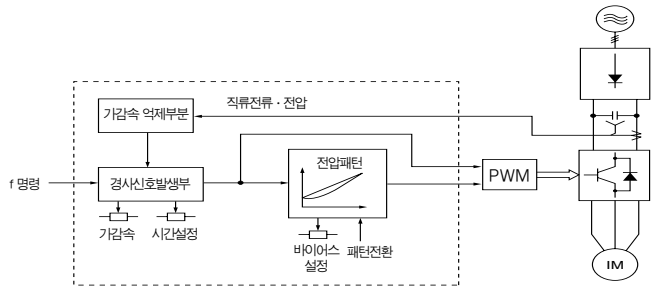


그림 12-18 단자전압의 보정



V/f 제어의 기본구성

(2) 슬립주파수제어

유도전동기의 1차주파수제어에서 E/f 일정제어를 하면 토크-속도 커브는 항상 같은 형태로 된다. 이 토크를 일정한 값으로 제어하는 방법에 슬립주파수제어가 있다.

지금 k를 상수(常數)로서 (E/f=일정)이라 한다면 토크 τ는 다음 식으로 표현되어 〈그림 12-19〉와 같이 된다.

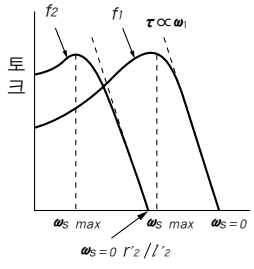


그림 12-19 토크-속도특성

$$\tau = k \frac{\frac{r'_2}{\omega_s}}{l'^2_2 + \left(\frac{r'_2}{\omega_s}\right)^2}$$

여기에서 $\omega_s = 2\pi f_s$로서 f_s는 슬립주파수라하며 회전자권전압의 주파수(2차주파수)를 표현하고 있다. 다시,

$l'^2_2 < \left(\frac{r'_2}{\omega_s}\right)^2$ 이라 한다면 $\tau = \frac{k}{r'_2} \times \omega_s$

으로 되고 토크는 슬립주파수에 거의 비례한다. 따라서 V/f제어에 의해 ω_s일정제어를 하면 정토크운전이 가능하게 된다. 또한 인버터주파수는 〈그림 12-20〉과 같은 제어계를 구성하면 결정된다.

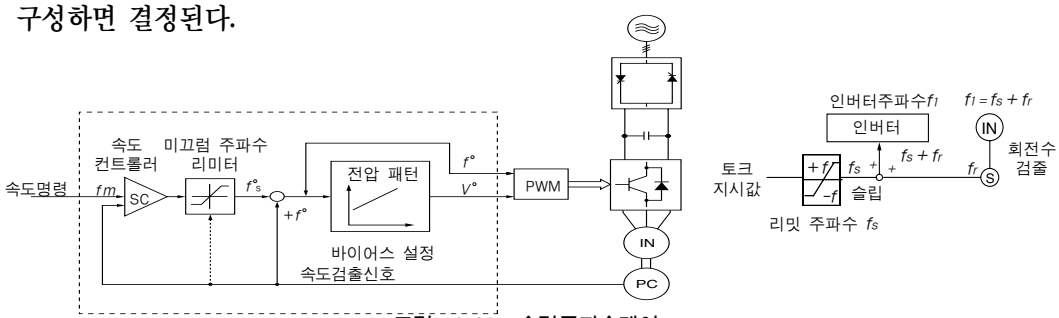
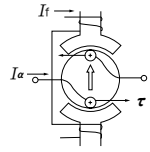


그림 12-20 슬립주파수제어

(3) 벡터제어

직류전동기의 자계전류 I_f와 전기자전류 I_a는 따로따로 제어되어 〈그림 12-21(a)〉와 같이 언제나 직교되고 있으므로 토크 τ은 $\tau \propto \Phi(I_f) \cdot I_a$로 된다. 한편 유도전동기에서는 〈그림 12-21(b)〉에 나타낸 바와 같이 2차권선에 직교하는 자속 Φ_2와 2차전류 i_2는 모두 2차주파수 ω_s로 회전하는 직교벡터로서 직류기와 마찬가지로 $r \propto \Phi_2(i_m) \cdot i_2$로 표현된다. 이 Φ_2와 i_2를 1차측에서 따로따로 제어하는 것이 벡터제어다. 〈그림 12-22〉를 유도기의 2차측에서 본 등가회로라 한다면 다음 식이 성립한다.



(a) 직류전동기

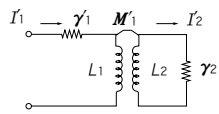
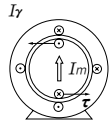


그림 12-22 유도기의 등가회로 (2차환산)



(b) 유도전동기

그림 12-21 전동기 토크

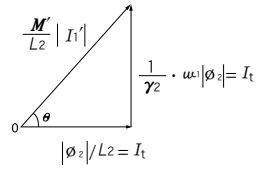
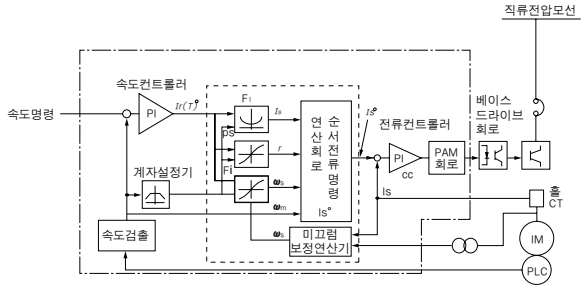


그림 12-23 벡터도

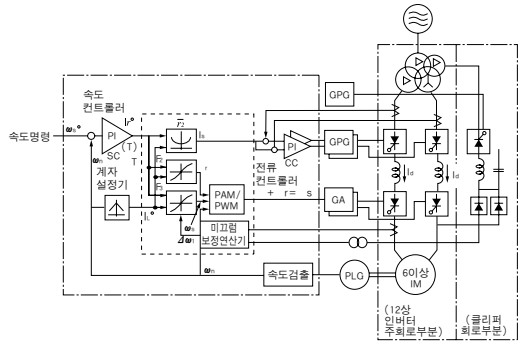
$\dot{\Phi}_2 = M' \dot{I}'_1 - L_2 \dot{I}_2$, $\frac{d\dot{\Phi}_2}{dt} = r_2 \dot{I}_2$ 에서

$$\frac{|\dot{\Phi}_2|}{L_2} = \frac{M'}{L_2} |I'_1| e^{fe} - \frac{1}{r_2} \frac{d|\dot{\Phi}_2|}{dt} - j\omega_s \frac{1}{r_2} \cdot |\dot{\Phi}_2| = I_m$$

지금 $|\Phi|_2$를 일정하게 하면 위 식의 제2항은 제외되기 때문에 〈그림 12-23〉의 벡터그림이 그려진다. 2차자속성분 I_m과 토크 전류성분 I_τ를 분리하려면 2차 자속을 직접 검출하는 방법과 $I_\tau \propto \omega_s$의 관계에서 ω_s의 제어(슬립주파수제어)의 2종류가 있다. 그리고 결정된 1차측 I_1과 ω로 인버터 제어하는데 과도시에도 Φ_2와 I_τ가 항상 직교하도록 유지하려면 제어계가 상당히 복잡해 진다.



전압형 트랜지스터 인버터구성(직류배전시스템)



전류형 사이리스터 인버터구성(다상화 12상)

(4) 각 제어방식의 특성비교

		V/f 제어	슬립 주파수제어	벡 터 제 어
가 감 속 특 성		△ 급가감속제어에 한계있다 4상한운전 시는 0속도 부근에서 데드타임이 있다 과전류 억제능력이 작다	○ 급가감속제어에 한계있다 (V/f 제어보다는 향상된다) 4상한운전시는 보통 좌와 같다 과전류 억제능력: 중	◎ 급가감속시의 제어한계 없다 ◎ 연속적인 4상한운전이 가능 과전류 억제능력 크다
속도제어	범 위	△ 1:10	○ 1:20	◎ 1:100이상
	응 답	————	○ 5~10rad/s	◎ 30~1000rad/s
	정 상 정밀도	○ 부하조건에 따라 주파수분 변동한다.	◎ 속도검출 정밀도·제어연산정밀도에 의존한다.	아날로그 0.5%/TOP 디지틀 0.05%/TOP
토크제어		× (원리적으로 불가)	△ 차량용 가변속 등 외에 일반적으로는 적용하지 않는다.	◎ 적용가능 스톨토크를 제어 가능
범 용 성		◎ 전동기특성의 차이에 의한 조정이 거의 필요없다	○ 슬립 주파수를 전동기 특성에 맞추어 설정할 필요가 있다.	△ 계자분전류·토크분전류, 슬립 주파수 등 많은 제어량을 전동기 특성별로 설정할 필요가 있다.
제어구성		◎ 가장 간단하다	○ 약간 간단하다	△ 약간 복잡하다
오실로그램		그림 12-24	그림 12-25	그림 12-26

(◎ > ○ > △)

a) V/f 제어

V/f제어의 특징을 들면 다음과 같다.

① 제어구성상 가장 간단한 제어방식으로서, 조정요소도 적고, 전동기를 선택하지 않는다는 점에서 범용성이 좋다.

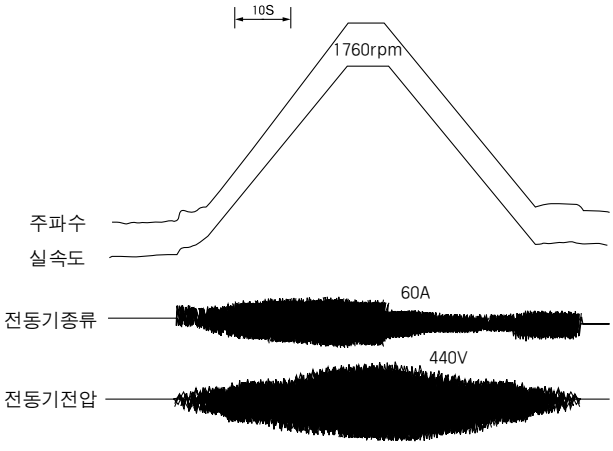


그림 12-24 V/f 제어시의 오실로그램 (유도전동기 40kW, 1760rpm)

② 다른 방식에 비해서 저속영역에서의 전압조정이 어렵고, 보통 1:10 정도의 가변속범위에서 사용된다.

③ 전동기의 속도를 검출하고 있지 않아서 슬립주파수를 직접 제어할 수 없기 때문에 토크의 제어는 할 수 없다.

④ 급가감속시 또는 과대한 부하에 대하여 슬립주파수의 증대로 인한 과전류를 억제하는 능력에 한계가 있다.

⑤ 부하에 의하여 슬립주파수가 변화하고, 전동기의 실속도를 정밀하게 제어할 수 없기 때문에 속도의 균일성을 필요로 하는 용도에 맞지 않다.

b) 슬립주파수제어

슬립주파수제어의 주된 특징을 들면 다음과 같다.

① V/f 제어에 대하여, 슬립주파수의 제어기능이 부가되어 있어서 슬립주파수의 조정이 필요하지만, V/f제어에 대하여 과전류억제, 속도, 정밀도 등의 특성들이 향상된다.

② 저속영역에서의 전압의 조정은 V/f제어와 같이 곤란하지만, 슬립주파수의 제어에 의한 전류제한이 가능하며, 사용속도제어의 범위가 V/f 제어에 비하여 넓어진다.

③ 사용속도범위에 있어서는 10rad/s정도의 응답성을 확보 할 수 있어서 어느 정도의 속도균일성을 필요로 하는 용도에 적용할 수 있다.

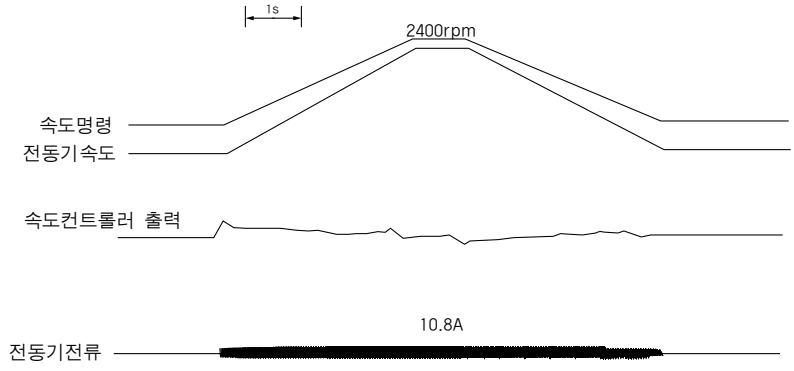


그림 12-25 슬립주파수제어시의 오실로그램 (유도전동기 5.5kW, 1900rpm)

c) 벡터제어

벡터제어의 특징은 다음 점에 있다.

① 제어특성은 다른 제어방식에 대하여 월등 좋고, 직류기와 동등 이상의 제어특성을 실현할 수 있다. 예컨대 속도응답에서는 1000rad/s의 응답을 얻을 수도 있다.

② 과거, 유도전동기를 적용하기 어렵다고 한 고속응답이 요구되는 용도나, 극저속에서 고속까지의 넓은 가변속범위가 필요한 용도, 그리고 빈번한 급가감속운전이나 연속적인 4상한운전 등, 어느 것에나 적용할 수 있다.

③ 토크제어도 가능하고, 전동기가 정지한상태에서 토크를 발생하는 스톨토크도 제어할 수 있다.

④ 제어연산에 전동기상수를 사용하기 때문에 전동기마다의 설정을 요하는 등 전용기로서의 성격이 강해진다.

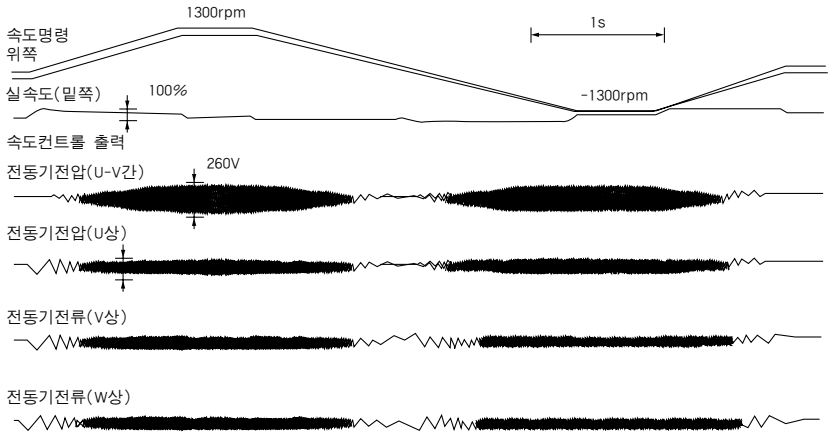


그림 12-26 벡터제어시의 오실로그램 (유도전동기 44kW, 1300rpm)

12. 3 인버터 구동에 따른 전동기의 특성

12. 3. 1 인버터의 선정

1) 인버터를 적용하는 전동기의 극수는 보통 4,6극이 가장 많이 사용되며, 특수전동기(8극이상의 전동기, 단시간정격전동기, 수중전동기등)에 있어서는 전동기의 전류가 인버터의 정격전류 이내가 되도록 인버터용량을 선정한다.

2) 한대의 인버터로 복수대의 전동기를 운전하는 경우, 전동기전류의 합이 인버터의 정격전류 이내가 되도록 인버터용량을 선정한다.

※ 인버터의 정격전류는

① 인버터의 정격전류는 범용전동기의 정격전류와 동등 이상의 값으로 한다.
(인버터정격전류 ≧ 전동기정격전류 × 1.1)

② 인버터의 정격전류는 주로 반도체의 크기로 결정되어 지며, 크게하면 Cost가 올라간다.

※ 정격전류이상에서 사용하면 어떻게 되는가

정격전류이상이라는 것은 과부하상태로 규정된 시간이상 흐르게되면 전동기의 소손을 방지하기 위하여 인버터의 출력을 차단한다. (과부하보호)

12. 3. 2 전원전압의 영향(인버터의 제조업체에 따라 다를 수 있음)

(1) 정격전압이상의 경우

a) 정격전압 ~ 정격정압 × 1.1

특별히 문제되지 않지만 전원전압의 기여분만큼 인버터의 출력전압이 증가.

(전동기의 토크 상승)

b) 정격전압 × 1.1 이상

인버터의 반도체허용전압을 넘어 파괴의 우려가 있으므로 과전압보호동작이 실행될 수 있다.

(2) 정격전압이하의 경우

a) 정격전압 ~ 정격전압 × 0.75

특별히 문제되지 않지만 전원전압의 기여분만큼 인버터의 출력전압이 감소.

(전동기의 토크 저하)

b) 정격전압 × 0.75 이하

인버터의 동작이 불안정할 수 있기 때문에 부족전압 보호동작이 실행됨.

12. 3. 3 전동기의 토크 (인버터의 제조업체에 따라 다를 수 있음)

인버터로 운전할 경우 상용전원에서보다 토크(기동 또는 정동)가 저감한다.

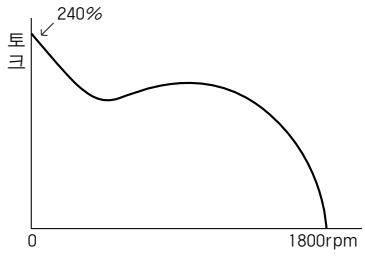


그림 12-27 상용전원 운전시

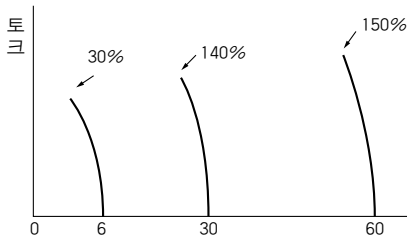


그림 12-28 인버터운전시

※ 토크가 저감하는 이유

인버터는 전동기정격전류의 약 200%(과부하보호)이상의 전류를 흘릴 수 없기 때문이다.

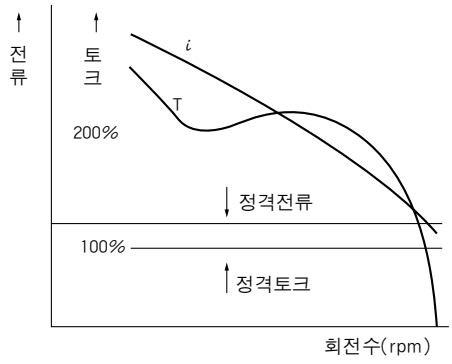


그림 12-29 상용전원 운전시

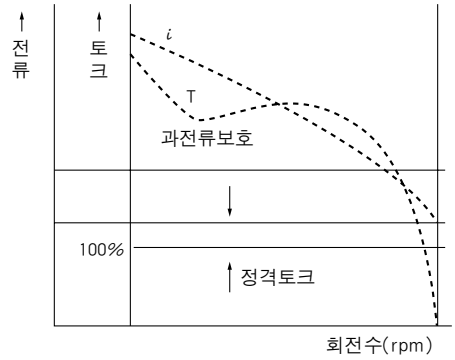
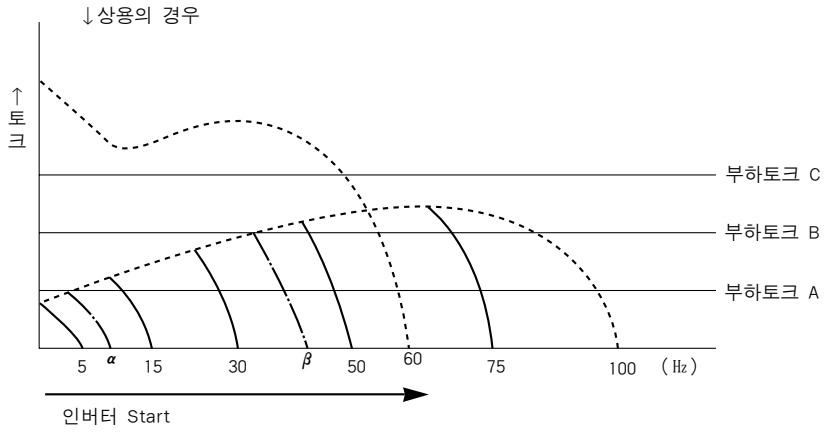


그림 12-30 인버터 운전시

※ 인버터로 운전할 경우 전동기의 기동토크는



인버터의 출력주파수를 60Hz에 설정했을 경우 인버터는 0Hz부터 Start하기 때문에

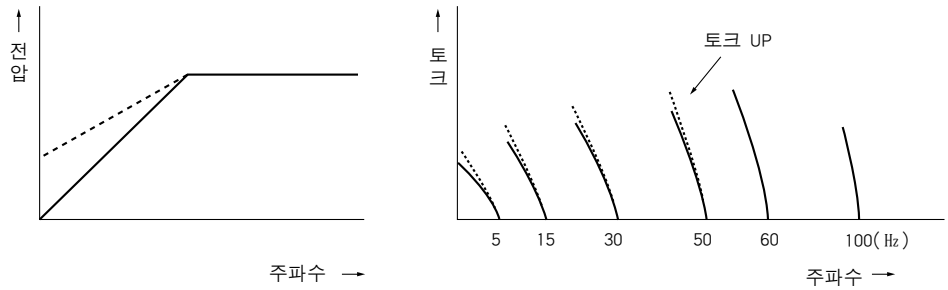
부하 A ⟶ α Hz에서 기동

부하 B ⟶ β Hz에서 기동

부하 C ⟶ 기동하지 않는다. : 상용전원의 경우 기동

※ 인버터로 운전할 때보다 토크를 증대하는 것은 가능한가

인버터내부에 출력전압을 조정하는 Volume(Torque Booster)이 있어 이 Volume을 조정하는 것에 의해 해당분만큼의 증대가 가능하다.



※ 60Hz를 넘어서면 왜 토크가 저감하는가

토크를 저감하지 않으면 전동기 출력이 크게 되어버린다.

$P = 1.027\ NT$

전동기출력이 동일하고 회전수가 크게 되면 토크가 작게 된다. ⟶ '정출력'

12. 3. 4 전동기의 운전

※ 범용전동기를 100Hz로 운전해도 문제는 없는가

베어링의 수명에 관계되는 것으로

4P 전동기 : 3,000rpm-ok
2P 전동기 : 6,000rpm-?

} 부하의 상태에 따라 다르다.
대략 4,000rpm 까지는 문제없다.
그 이상의 경우에는 수명이 단축 될 우려가 있다.

※ 인버터가 운전하는 경우, 전동기의 온도상승은

저속(저주파)운전에서는 전동기의 자냉팬에 의한 냉각능력이 저하하기 때문에 주의를 요한다. (특히 30Hz 이하의 운전)

12. 3. 5 가 · 감속시간 (Soft-Start, Soft-Stop: 인버터의 제조업체에 따라 다를 수 있음)

1) 가속시간이 출하시 5sec로 설정 되었다면,

0Hz ⟶ 80Hz : 5sec (내부의 Volume조정으로 변경가능)

기동시간(가속시간)을 짧게하고 싶다.

↓

가속시간을 최소로 한다. (0 ~ 80Hz : 0.5sec)

빠르게 된다.

그다지 변하지 않는다. ⟶ Stall방지 : 부하의 관성이 큰 경우 주파수를 올려도 전동기의 회전수가 따라가지 못해 전류가 크게되어 버리는 것을 방지한다.

↑

부하의 관성이 크다.

※ 가속시간 구하는 방법

가속시간 : Ta(sec)

GD² : (전동기+부하)의 GD²(kg · m²)

N : 정격회전속도 (rpm)

Tl max : 최대부하토크 (kg · m)

α : 평균가속토크율

α = 1.1 at 6 ~ 60Hz

α = 0.8 at 60 ~ 100 Hz

$$Tm : 정격토크 = \frac{전동기\ 정격출력(W)}{9.8 \times \pi \times N/60} (kg \cdot m)$$

$$Ta \geqq \frac{GD^2 \times N}{375 \times (\alpha Tm - Tl\ max)} (sec)$$

동일한 관성부하라면, 인버터로 운전하면 상용전원에 의한 운전보다 2~3배 시간이 더 걸린다.

인버터로 운전할 경우 전동기의 토크(기동 또는 정동)가 저감하기 때문이다.

2) 감속시간이 출하시 5sec로 설정 되었다면,

80Hz → 0Hz : 5sec (내부의 Volume조정으로 0.5 ~ 30sec로 변경가능)

감속시간을 짧게하고 싶다.

↓

감속시간을 작게 한다.

빠르게 된다. 그다지 변하지 않는다. → 회생 과전압보호:

↑

부하의 관성이 크다.

부하의 관성이 큰 경우 주파수를 내려도 전동기의 회전수가 따라가지 못해 전동기가 발전기가 된다. 파워회로의 전압상승이 허용전압을 넘지 않도록 보호한다.

※ 감속시간을 구하는 방법

감속시간 : Td (sec)

GD^2 : (전동기 + 부하)의 $GD^2(kg \cdot m^2)$

N : 정격회전속도 (rpm)

Tl min : 최소부하토크 ($kg \cdot m$)

β : 평균감속토크율 (0.1~0.2)

$$Tm : 정격토크 = \frac{전동기\ 정격출력(W)}{9.8 \times \pi \times N/60} \quad (kg \cdot m)$$

$$Td \geqq \frac{GD^2 \times N}{375 \times (\beta Tm - Tl\ min)} \quad (sec)$$

회생전력 처리기능을 가진 장치에서는 β의 값을 크게 할 수 있어 감속시간을 대폭 단축할 수 있다.

12. 3. 6 단상전동기의 운전

단상전동기는 원심력스위치, 컨덴서(운전용 or 기동용)를 가지고 있기 때문에 인버터운전에 의한 회전수의 변화 및 주파수의 변화에 따라 악영향을 받는다.

임피던스
- 저항
- 컨덴서 : $1/(2\pi fC)$
- 권선 : $2\pi fC$

→ 주파수가 변화하면 전류치가 크게 변화한다.

컨덴서 또는 권선이 소손할 가능성이 있다.

12.4 인버터(VVVF)의 적용기술

12. 4. 1 V/f 특성곡선과 출력특성

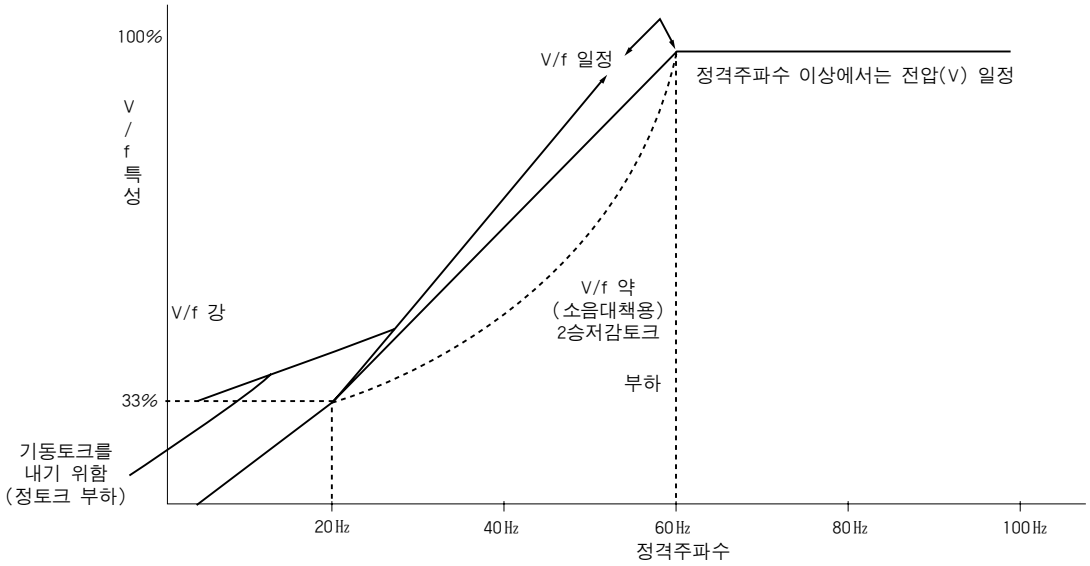


그림 12-31 V/f 특성

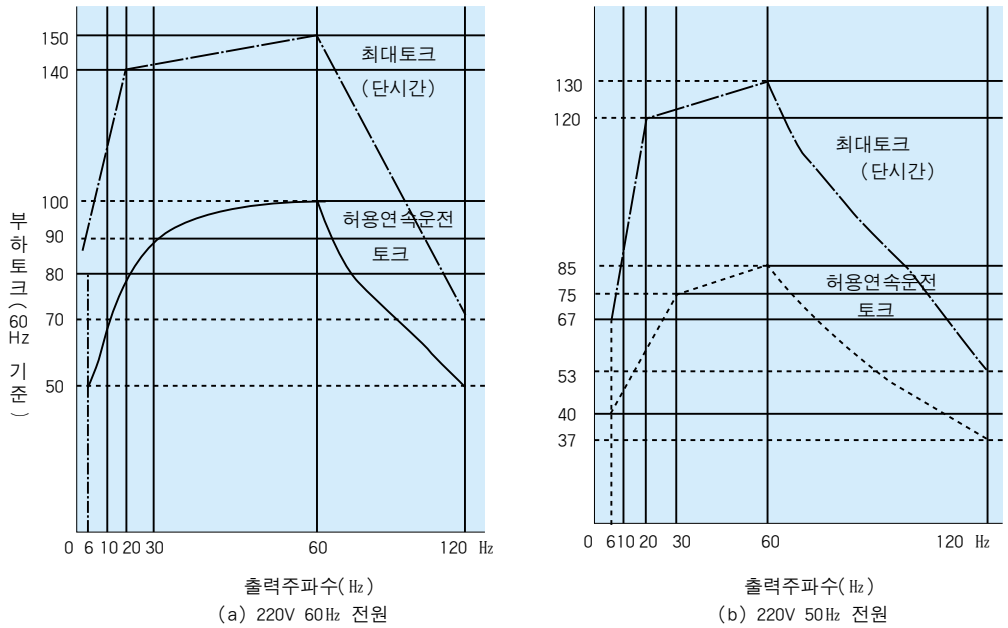


그림 12-32 출력 특성

12. 4. 2 인버터구동의 특징 및 적용분야

(1) 인버터구동의 특징

	인버터구동의 특징	효 과	용도의 예
①	표준전동기를 변속할 수 있다.	기존설치 전동기를 변속할 수 있다.	공조기
②	연속적으로 변속할 수 있다.	항상 최적의 속도를 선택할 수 있다.	공작기계, 교반기
③	기동전류가 작다.	전원설비용량이 작아도 된다.	압축기
④	최고속도가 전원에 좌우되지 않는다	전원주파수에 따라 최대능력이 변화하지 않는다. 또는 주파수에 따라 설계를 변경할 필요가 없다.	펌프, 팬, 컨베이어, 산업기계전반
⑤	전동기를 고속화, 소형화 할 있다.	다른 가변속장치로 실현할 수 없는 고속을 얻을 수 있다.	내면연삭기 섬유기계
⑥	방폭에 대응하기 쉽다.	직류전동기에 비하여 방폭전동기를 소형, 염가로 제작 할 수 있다.	약품기계 , 화학플랜트
⑦	저속에서 토크가 나기 어렵다.	저속에서 단시간, 전동기를 Lock 해도 지장이 없다.	고정치수이송장치
⑧	가감속의 경사를 조정 할 수 있다.	충격을 방지할 수 있다.	반송기계
⑨	농형전동기를 사용할 수 있고, 보수가 필요없다.	전동기의 보수가 필요없다.	프로세스라인, 차량, 엘리베이터

(2) 인버터구동의 적용효과

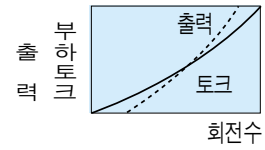
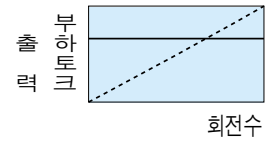
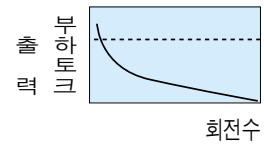
적 용 효 과	분 야 (용도)	적 용 법	종 래 방 식
에너지 절약	블로어, 펌프, 교반기, 압출기, 정방기	(1)가변속운전 (2)상용전원에 의한 정속운전과 인버터에 의한 가변속운전의 조합	(1)상용전원에 의한 일정속운전 (2)댐퍼, 베인 등에 의한 제어 (3)기계식 변속기 (4)액체 이음매
생력화 자동화	반송기계전반	(1)복수대 전동기의 비율속도 운전 (2)연동운전 , 동기운전	(1)기계식 변감속기 (2)1차전압 제어 (3)맴돌이전류 이음매 제어
생산성 향상	공작기계 반송기계 섬유기계	(1)증속운전 (2)쿠션기동, 정지에 의한 불량의 감소	(1)상용전원에 의한 일정속운전 (2)1차 전압제어
설비의 효율화 (설비간소화)	금속가공기계	고주파전동기에 의한 고속운전	M-G 장치
보수 간소화 (악환경대책)	섬유기계(주로 방사기) 공작기계의 주축구동 프로세스 라인 차량구동	직류전동기의 대체	직류전동기
품질향상	공작기계 교반기 섬유기계 조유기(제차기)	무단계의 최적속도 운전을 채택	사용전원에 의한 일정속운전
쾌적성 향상	공조기	압축기의 가변속운전에 의한 연속적 온도제어	상용전원에 의한 ON-OFF제어

(3) 인버터구동의 부하특성에 따른 적용예

a) 부하별 구체적인 적용 예

부하특성	산업구분	기 능	용 도	구체적인 장치명	비 고
2승저감토크부하	Fan	급기 환기	빌딩공조설비	Blower, Cooling Tower	
			냉동, 냉장고 온도제어	냉동, 냉장고	
			노내습도 · 온도제어	건조로, 열풍로	
			건조기 온도, 습도제어	베니어 합판, 어류의 건조 섬유가공(염색)	
			배연, 환기 설비 (흡진)	납땜장치, 도장장치 (섬유가공)	
			축사공조 기 타	양계장, 축사	소음대책, Fan 속도비 요주의
	Blower	풍 압 (부압포함) 이 용	양조설비		
			Inflation 법, Airing	폴리필름 제조기	하절기는 Full가동으로 省 에너지 효과가 없음
			흡착설비	베니어합판자동선별적입장치	
	Pump	급 수 급 유	상하수도Pump		
			상기외급수설비 (중수도, 레져)	Tankless Pump, 양수펌프 분수장치, Pool, 유희설비	ELB 응동에 요주의
			냉각수Pump	공조, 냉동장치, 각종기계용	
			급유설비	NC, 프레스등 각종기계	
		유체이송, 기 타	액화가스 이송설비		
			취부용노즐압력제어	섬유염색, 도장장치	
			약주설비	약품혼합기, 식육주사기	
정토크부하	기계구동	-	원심분리기의 일부	금속절삭분유 분리기	
			교반기의 일부	2승저감특성의 것	
	화학공업 (화학기계)	소재정련, 정제 · 가공 · 처리	압착, 여과, 분리, 혼합 등	압착기, 여과기, 분리기, 혼합기, 각반기, 분쇄기,추출기 등	
	수지, 고무 피혁품제조업	수지정제가공	플라스틱 성형 · 가공	압축성형기, 사출성형기, 압출 성형기 등	
	섬유공업	섬유정제가공	잠사, 면사, 화섬가공	권취기, 준비기계, 편직기, 염색기 세염기	
	금속제품 제조업	소재정련가공	압연, 절단, 권취, 연신	압연기계, 절단기, 권선기, 원심주조기, 컨베어테이블	
	종이가공, 인쇄업	용지정제가공	권취, 인쇄, 마분지, 제조 제본	인쇄기, 권취기, 상자제조기, 제본기	
	식품공업 (가공, 포장)	식품가공	각종 가공, 제조	음료제조용기계, 제과기	
		식품포장	병조림, 통조림, 포장	음료제조용기계, 제과기	
	공작기계	금속소재가공	절삭, 연삭, 치절 등	선반, 보올반, 프라이스반, 연삭반, 치절반	
	제재,목공업	목재가공	절삭, 연마, 조각	제재기, 목공선반, 합판제조기	
	요 업, 토석제품제조업	유리, 시멘트, 토석, 도자기	파쇄, 교반, 이송	연마기, 골재정제기, 점토 교반기	
	하 역 · 수송기공업	제조가공	-	각종컨베어, 대차이송, 리프트, 호이스트	
	환기설비제조업	오니, 오수처리	압착, 교반, 이송	오니압착기, 교반기, 건조기, 컨베어	
	기 타				

b) 부하특성에 따른 적용

구분 / 부하특성	내 용	부하의 종류	부 하 특 성 곡 선
2승저감 토크부하	회전수가 낮아지면 부하를 구동시키기 위한 토크도 작아지는 부하로서, 부하의 토크 특성이 회전수의 2승에 비례하고 동력은 회전수의 3승에 비례한다. 이런 부하에 인버터를 적용하면 에너지 절약 효과가 크다.	Fan Blower Pump	〈 2승저감 토크특성 〉 
정토크 부하	회전수가 달라져도 거의 일정한 토크를 요하는 부하로서, 부하를 구동시키는데 요하는 동력은 회전수에 비례한다.	컨베어 각종 공작기계의 이송장치	〈 정토크 특성 〉 
정출력부하	회전수가 달라져도 동일출력을 요하는 부하로서 회전수를 높이면 필요한 토크는 저감된다.	목공기 권취기	〈정출력특성 〉 

12. 4. 3 송풍기의 특성과 풍량제어

(1) 송풍기의 특성

a) 압력

압력에는 정압(Static Pressure)과 동압(Dynamic Pressure)이 있고 유체의 에너지는 식(12.4.1)과 같다.

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{r} + h = \text{일정} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.1)$$

여기서 V는 유체의 속도, g는 중력가속도 (9.8m/sec²), r는 유체의 비중, P는 압력, h는 기준면에서의 높이다. 식(12.4.1)을 다시 쓰면($rV^2/2g + P + rh$=일정)으로 된다. 여기서 $rV^2/2g$을 동압, P를 정압이라 한다. 동압은 운동에너지이고 P는 유체가 지나면서 물체의 표면에 미치는 압력이다. 전압(Total Pressure)은 동압과 정압의 합을 말한다. 송풍기자체의 전압과 정압은 〈그림 12-33〉을 참고로 다음과 같이 표시된다.

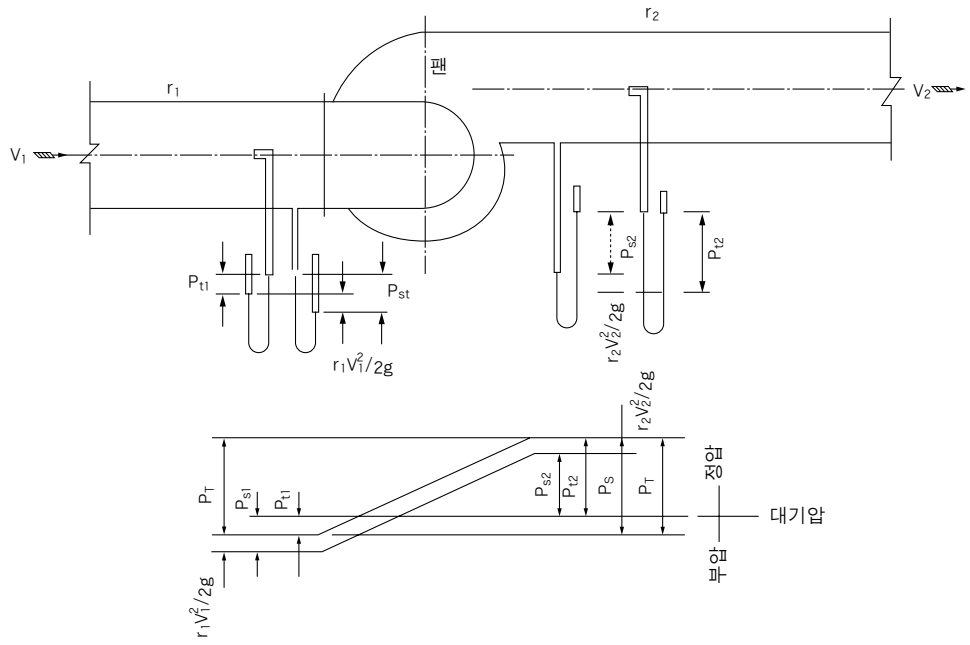


그림 12-33 송풍기 압력분포

전압=송풍기토출구와 흡입구의 전압의 차

$$=P_{t2}-P_{t1}=(P_{s2}-P_{s1})+(P_{d2}-P_{d1}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.2)$$

정압=전압에서 토출구 동압을 뺀 것

$$=P_{t2}-P_{t1}-P_{d2}=P_{S2}-P_{S1}-P_{d1}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.3)$$

이 식에서 편의상 정압을 P_s, 동압을 $P_d=rv^2/2g$, 전압을 P_t라고 하였다. 여기서 P_{s1}은 부의 값이 되고, 그 외는 전부 정의값이 된다. 또한 송풍기의 흡입구, 토출구 어느쪽이 대기에 개방되어 있는 경우는 그곳의 정압은 영(0)으로 한다.

b) 송풍저항

관로에 송풍하는 경우 저항을 받는다. 이 저항에는 풍속과는 무관한 정적저항과 풍속(관로가 일정한 경우는 풍량)의 2승에 비례하는 동적저항이 있다. 송풍을 행하기 위해서는 이 저항을 이길 압력이 필요하고 이 압력을 정압이라 한다. 압력손실이라고 하는 것은 송풍저항과 동일한 의미이고 관내에서의 손실과 장애물에 의한 손실이다.

c) 송풍량

송풍기의 풍량은 토출풍량을 흡입상태로 환산한 것을 말하고 ㎥/min, ㎥/h로 표시한다. 〈그림 12-34〉에 있어서 R을 관로저항, P를 송풍기압력이라 하면 이 송풍기로 송풍할 수 있는 풍량은 관로저항과 정압이 동일한 점, 즉 R곡선과 P_s곡선의 교점 Q_1으로 된다.

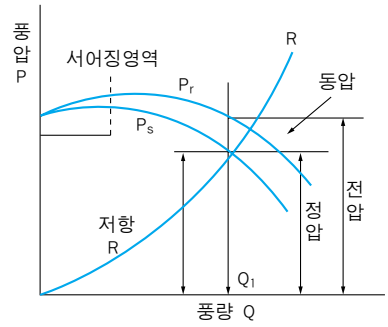


그림 12-34 풍량과 압력의 관계

d) 공기동력

공기동력은 절대압으로 계산한 압력비(P_{S2}/P_{S1})에 따라 다르다.

가) 압력비 1.03 이하

$$L_T = \frac{QP_T}{6120}\,[kW] \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.4)$$

나) 압력비 1.03 ~ 1.07

$$L_T = \frac{Q}{6120}\{(P_{S2} - P_{S1})(1 - \frac{P_{S2} - P_{S1}}{2kP_{S1}})(P_{d2} - P_{d1})\}\,[kW] \cdots (12.4.5)$$

다) 압력비 1.07 이상

$$L_T = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{QP_1}{6120}\{(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{k-1}{k}} - 1\}$$

$$= \frac{K}{K-1} \cdot \frac{r \cdot Q}{6120} RT\{(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{k-1}{k}} - 1\}\,[kW] \cdots\cdots (12.4.6)$$

여기서 Q : 흡입상태로 환산한 공기량 [m^3/min]
K : 단열계수로 공기의 경우 1.4
P_1 : 흡입절대전압[mmAgabs]
P_2 : 토출절대전압[mmAgabs]
R : 공기의 가스정수로 29.46kg · m/°K
T : 흡입온도(°K)

약 2%의 오차를 허용할 경우는 압력비 1.03이하의 식을 사용하여도 무방하다.

e) 송풍기축동력과 전동기출력

축동력(L)은 공기동력을 송풍기효율(η_F)로 나눈 것이고 전동기출력(L_M)은 축동력에 여유율 (1.05~1.15)을 가한 것이다.

$$L = L_T / \eta_F [kW] \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.7)$$

$$L_M = (1.05 \sim 1.15)L[kW] \cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.8)(a)$$

$$L_{M1} = L_M / \eta_M / [kW] \cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.8)(b)$$

f) 송풍기토크

송풍기의 토크곡선은 회전수의 2승에 비례한다. 〈그림 12-35〉참조

이를 식으로 표시하면

$$T_F = 974 \cdot \frac{L_o}{N_o} \left(\frac{N}{N_o}\right)^2 = T_O \cdot \left(\frac{N}{N_o}\right)^2 [kg\text{-}m] \quad \cdots\cdots (12.4.9)$$

No는 정격속도[rpm], Lo는 정격속도에서의 축동력 [kW], To는 정격속도에서의 토크 [kg · m]이다. 이론적으로 속도 영(0)일때의 토크는 영(0)이지만 정지마찰력이 있기 때문에 〈그림12-35〉와 같은 곡선으로 된다.

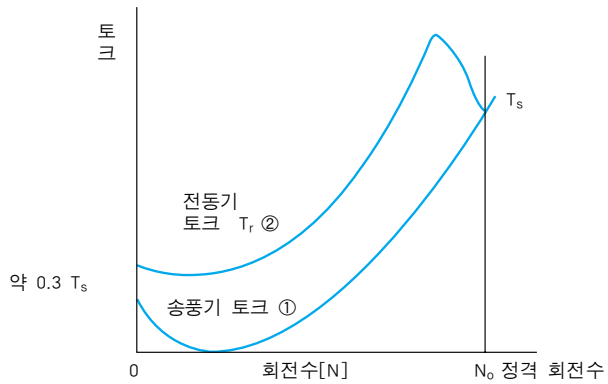


그림 12-35 토크 곡선

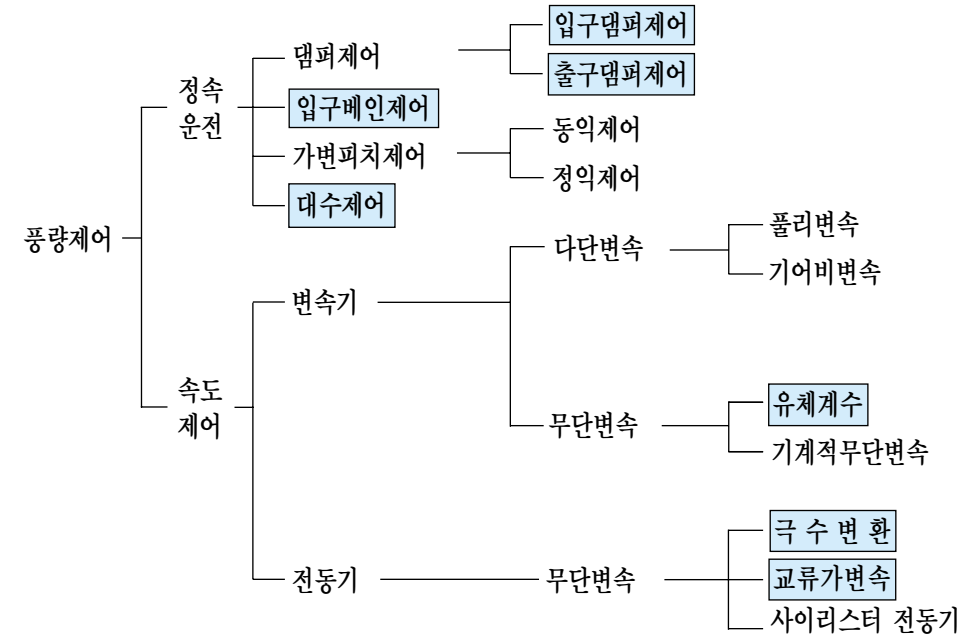
(2) 송풍기풍량제어

송풍기풍량제어는 크게 나누어서 구동장치의 회전수를 일정히하고 송풍기측에서 제어하는 정속운전과 구동장치의 회전수를 변화시키는 속도제어로 〈표 12-4〉와 같이 분류한다. 여기서는 발전보일러용 송풍기에 일반적으로 채용하는 댐퍼제어법과 베인제어법, 그리고 관심의 대상인 속도제어법에 대하여 알아본다.

a) 토출댐퍼제어

토출구에 설치된 토출댐퍼개도에 의하여 풍량제어를 하는 방법으로 〈그림 12-36〉에 보이는 바와 같이 토출댐퍼의 개도를 조절하여 공기저항을 변화시켜 풍량을 조절한다. 댐퍼의 저항은 손실로 되기 때문에 이 방법은 가장 간단하지만 동력측면에서는 비경제적인 방법이다.

표 12-4 풍량제어 분류



는 잘 사용하고 있는 방법

또한 송풍기의 동작점은 전개시의 압력곡선을 따라 변화하기 때문에 저풍량영역에서 불안정영역이 있어 저풍량영역까지 연속운전하는 것은 진동발생원인으로 되어 좋지 않다. 〈그림 12-36〉은 정압효율(η_S)과 운전효율(η_R)을 나타낸 것이다.

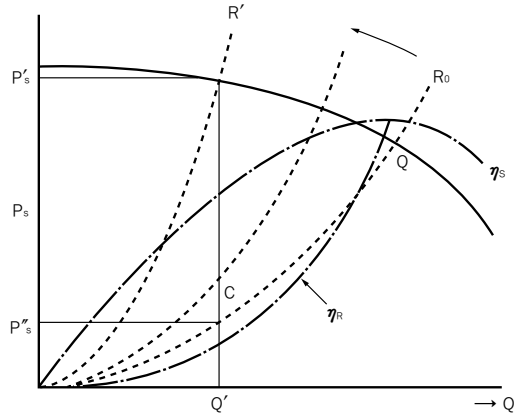


그림 12-36 정압효율(η_S)와 운전효율(η_R)

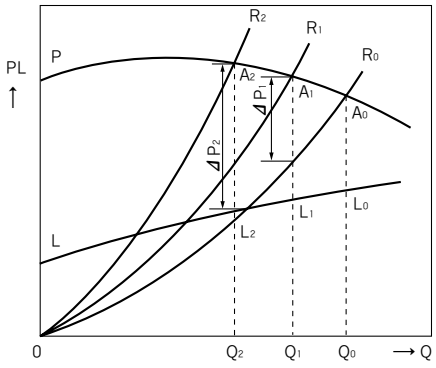


그림 12-37 토출댐퍼성능 설명도

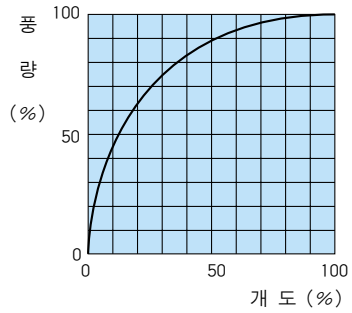


그림 12-38 댐퍼, 베인개도와 풍량

b) 입구댐퍼제어

송풍기흡입측에 설치된 입구댐퍼개도에 의하여 풍량을 제어하는 방법으로서 〈그림 12-39〉와 같이 입구댐퍼에 의한 개도조절로 인해서 흡입측의 압력은 하강하여 부압으로 된다. 이 방법은 흡입기류에 팬날개의 회전과 동일방향의 선회작용을 줄 수 있기 때문에 출구댐퍼제어 보다는 제어특성, 제어효율이 좋고 댐퍼개도를 줄임으로써 팬의 동작점은 저항곡선상을 이동하고 우하향곡선이 되기 때문에 서어징역이 줄어들어 저풍량영역까지 연속운전 할 수 있다.

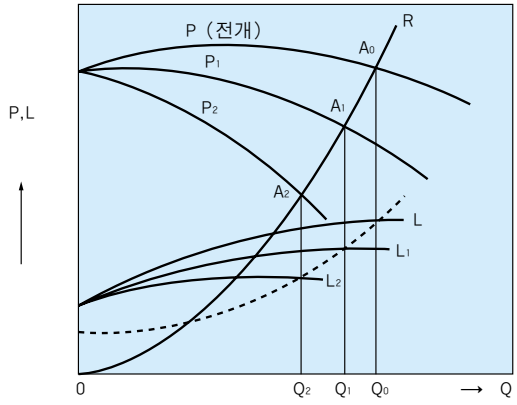


그림 12-39 입구댐퍼의 성능설명도

C) 베인제어

팬날개의 흡입측에 8~16매의 방사상의 가동날개를 장치하고 그 각도를 변화시킴으로써 팬날개 입구의 절대속도 선회량을 변화시켜 풍압, 풍량을 제어하는 방법으로 〈그림 12-40〉의 속도선도를 사용하여 그 제어원리를 다음과 같이 설명한다.

Euler의 기초식에 따라 팬날개의 회전방향과 동일한 방향으로 선회를 주면 Cu_1이 크게 되어 이론수두(Pthoo)가 감소하여 동력도 감소한다.

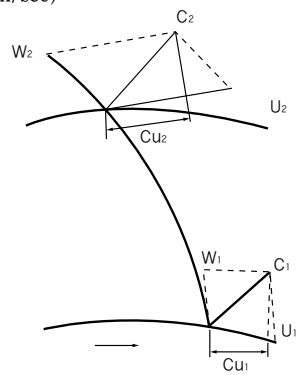
$$Pthoo = \frac{r}{g}(U_2 Cu_2 - U_2 Cu_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.10)$$

U : 팬날개의 원주속도(m/sec)

C : 유체의 절대속도(m/sec)

W : 유체의 상대속도(m/sec)

Cu : 절대속도의 원주방향성분(m/sec)



[1] 익근 차출구

[2] 익근 차입구

그림 12-40 후향식팬날개입구, 출구에서의 속도선도

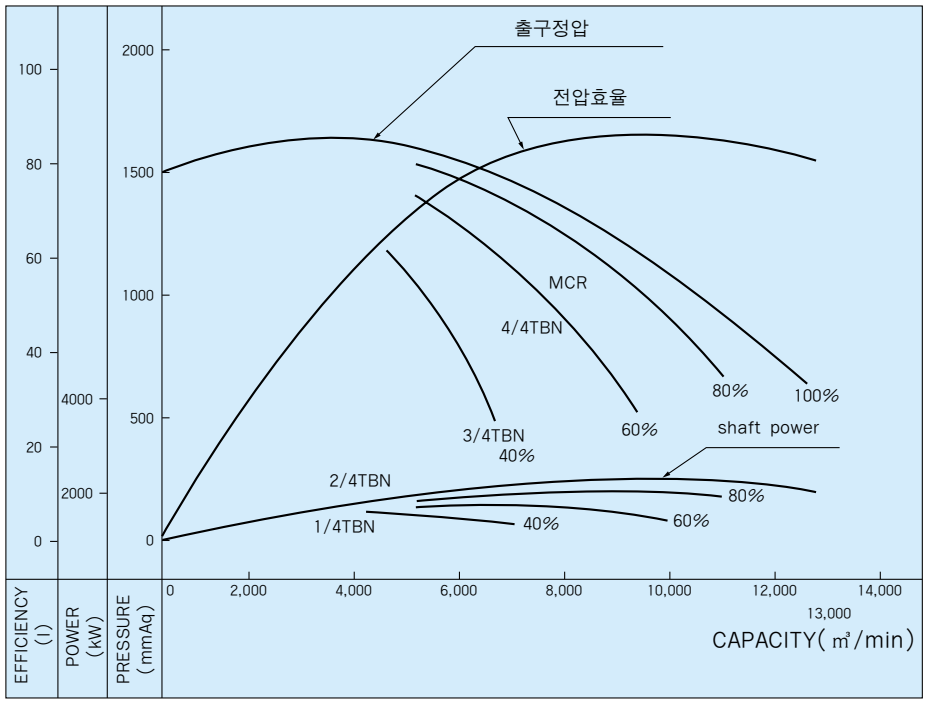


그림 12-41 평택화력 FDF 특성곡선

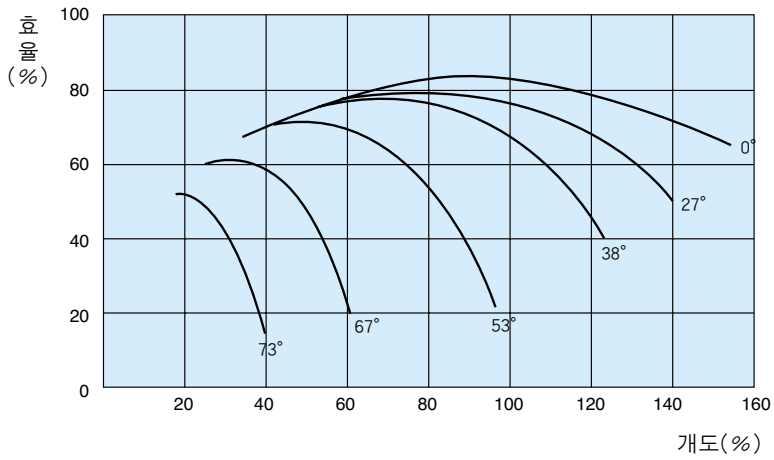


그림 12-42 베인개도별 효율곡선

장점으로서 토출댐퍼, 입구댐퍼제어보다도 제어특성, 제어효율이 좋고 또한 베인개도를 줄이면 우하향곡선으로 변화되고 팬의 동작점은 저항곡선을 따라 이동하기 때문에, 저풍량영역까지 연속운전할 수 있다. 〈그림 12-41〉은 평택화력 FDF의 특성곡선을 보인다. 또한 〈그림 12-42〉는 개도변화에 따른 일반적인 효율곡선을, 〈표 12-5〉는 영월화력 FDF용 베인제어시 효율을 나타낸 것이다.

표 12-5 영월화력 FDF베인효율

부 하 [%]	25	50	80	100	110	설 계
풍 량[㎥/s]	11	20.6	31.4	38.9	42.6	47.2
효 율 [%]	5.3	19	43	63	74	82
축 력[kW]	87.5	126	181	231	261	310

d) 속도제어

송풍기의 속도를 변화시키면 각각의 속도에 대한 송풍기의 특성곡선이 얻어진다. 이때 속도를 변화시킴에 따라 풍량, 풍압 및 축동력의 변화는 관로저항곡선이 일정하다고 하면 다음과 같다.

풍량 $Q \propto N$

풍압 $P \propto N^2$ ·····(12.4.11)

축동력 $L \propto QP \propto N^3$

송풍기는 〈그림 12-43〉과 같이 회전속도에 의해서 결정되는 압력곡선과 저항곡선이 만나는 점이 동작점이 되고 이 때의 풍량을 송풍하게 된다. 속도제어에 의한 풍량제어방법은 가장 경제적이고 저풍량영역까지 연속운전이 가능하다. 〈그림 12-44〉는 속도제어에 따른 효율의 변화를 나타낸 것이다. 풍량제어방식의 각각에서 알 수 있는 바와같이 속도제어를 제외하고는 저풍량에서 효율은 급격한 감소를 보인다. 다만 속도제어에서만 풍량의 변화에 따라 효율곡선이 평행이동하고 있어 효율은 거의 일정하다.

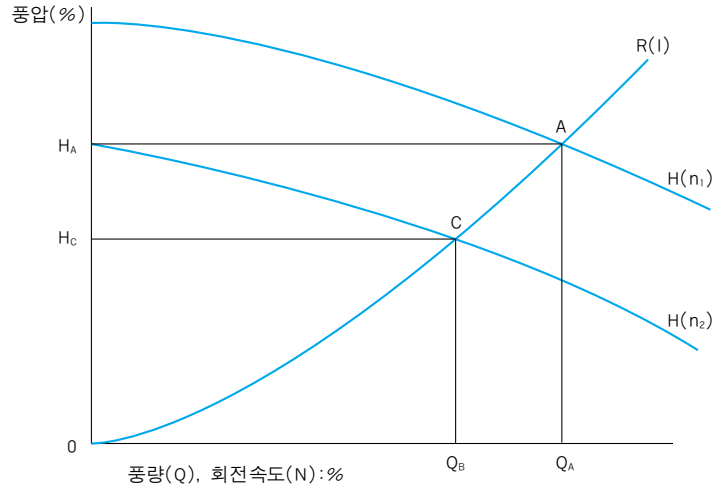


그림 12-43 속도제어시 풍압곡선과 동작점

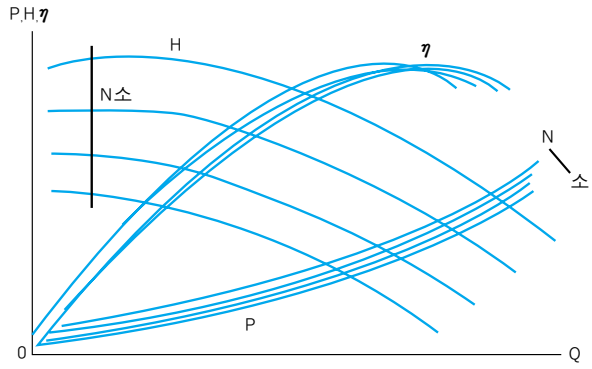


그림 12-44 속도제어에 따른 효율변화

(3) 제어방식별 입력

〈그림 12-45〉는 송풍기풍량제어방법별 입력특성곡선을, 〈그림 12-46〉은 풍량변화에 대한 효율곡선을 나타낸다.

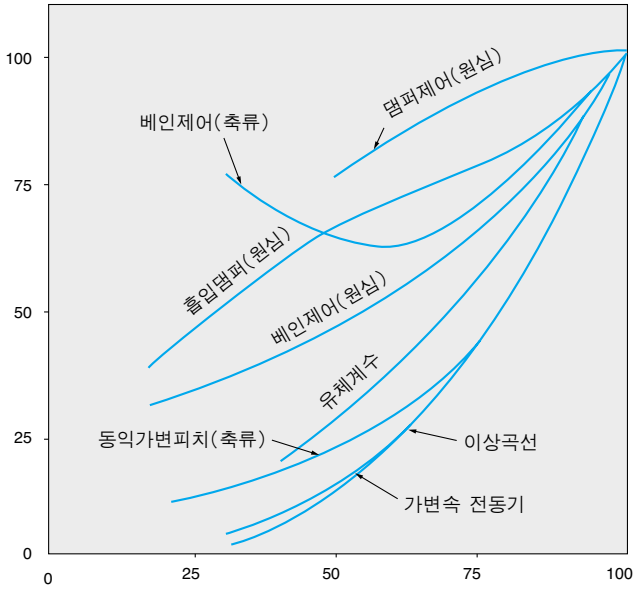


그림 12-45 제어방식별 풍량에 대한 입력

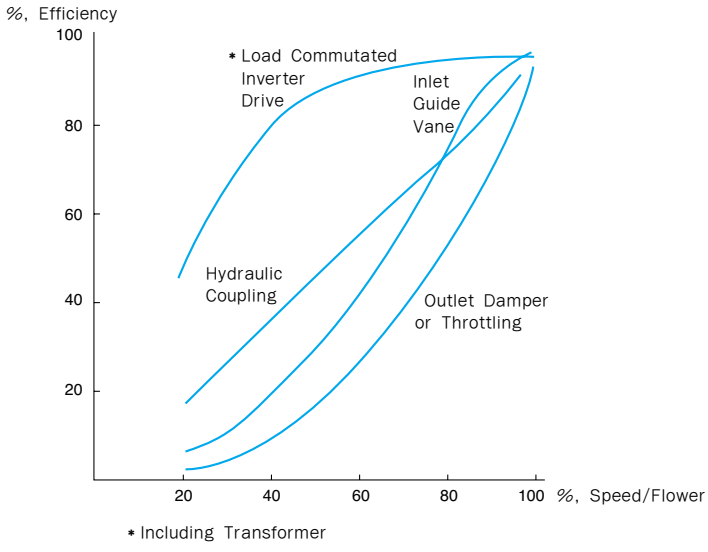


그림 12-46 제어방식별 풍량에 대한 효율

12. 4. 4 펌프의 특성과 유량제어

(1) 펌프의 특성

a) 일반특성

펌프의 사양은 기본적으로 펌프토출량 Q[㎥/min], 전양정 H[m], 회전속도 N[rpm]에 의하여 결정된다. 전양정은 식(12.4.12)로 표시되고 이를 〈그림 12-47〉에 나타낸다.

$$\text{전양정} = \text{흡입전양정} + \text{토출전양정}$$
$$= \text{실양정} + \text{관로손실수두} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.12)$$

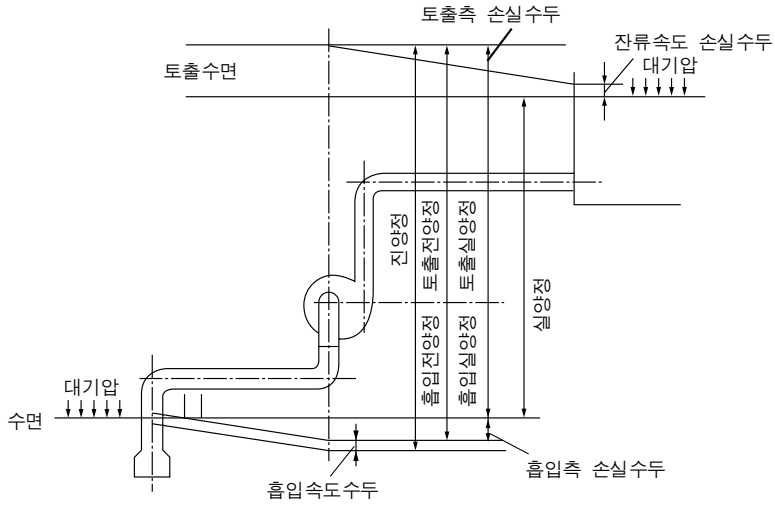


그림 12-47 펌프의 양정

펌프의 일반특성은 횡축에 토출량을 종축에 전양정, 효율 및 축동력을 나타내는 곡선으로 〈그림 12-48〉과 같이 표시하고 특성비교는 백분율을 사용한다.

수동력은 (12.4.13)식으로 표시된다.

$$Lw = 0.163\gamma Q H [kW] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.13)$$

γ : 취급액의 단위체적중량(g/㎤), 물의 경우 1

Q : 토출량[㎥/min]

H : 전양정[m]

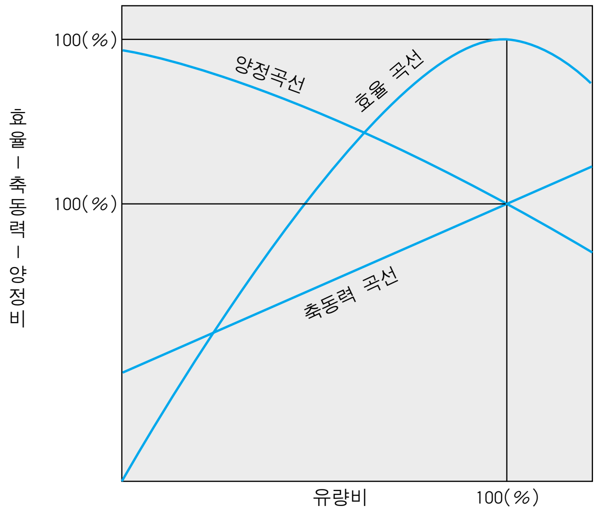


그림 12-48 펌프의 일반특성

펌프의 축동력 L_p는 펌프효율 η_p로 나눈 값이 되고 전동기용량 L_m은 전달장치의 효율 η_n과 여유율로 결정된다.

$$L_P = L_W / \eta_p \quad \cdots\cdots (12.4.14)$$

$$L_m = \frac{L_P (1+\alpha)}{\eta_t} = \frac{0.163 \times (1+\alpha)}{\eta_n \eta_p} QH \ [kW] \quad \cdots\cdots (12.4.15)$$

표 12-6 전달장치의 효율

전달방식	직 결	치 차	유체계수	평벨트	V벨트
전 달 방 식	1.0	0.95 ~ 0.98	0.95 ~ 0.97	0.90 ~ 0.93	0.93 ~ 0.95

펌프에서는 송풍기와 달리 흡입측밸브에 의한 유량제어는 캐비테이숀(Cavitation)현상 때문에 사용해서는 안되고 서어징은 송풍기와 동일하게 저유량영역에서 발생한다.

c) 펌프의 운전특성

펌프의 운전점은 송풍기와 동일하게 유량-양정(수두)곡선상을 이동하고, 펌프의 양정곡선과 관로의 저항곡선의 교점으로 구한다. 관로의 저항곡선은 실양정과 송수관로의 손실수두의 합으로 구하며 〈그림 12-49〉에 나타낸다.

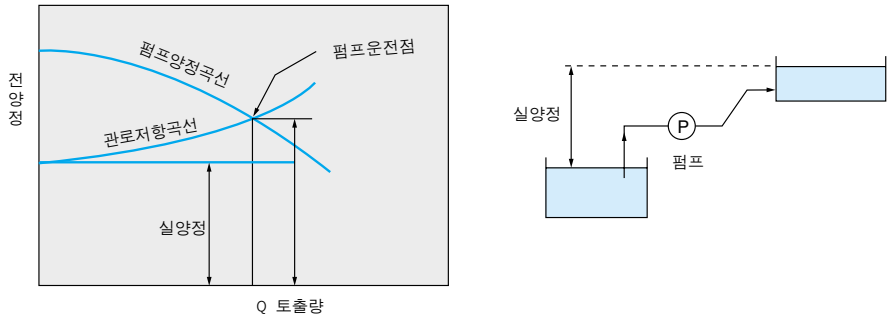


그림 12-49 펌프의 운전점

(2) 펌프의 유량제어

기체나 액체모두 유체이므로 기본이론이 동일하기 때문에 송풍기에서 적용한 이론을 그대로 적용할 수 있다. 다만 제어변에 의한 흡입측제어는 곤란하고 토출측에서만 가능하다. 토출측의 밸브제어는 송풍기에서의 토출댐퍼제어와 동일한 이론으로 효율측면에서 보면 최악의 방법이다. 〈그림 12-50〉은 버터플라이변의 개도와 유량특성을 나타낸 것이다. 펌프의 속도제어는 〈그림 12-51〉과 같이 그 특성이 변화하며 송풍기에서와 마찬가지로 유량, 유압, 동력이 변화해도 저유량에서 펌프를 무리없이 운전할 수 있다.

그 외에 펌프날개의 각도변화에 의한 유량제어가 있어 고효율로 이용할 수 있지만 각도조작기구를 설치해야 하고 구동부의 설계에 제약이 생기며 유량의 변화에 대하여 적응성이 늦는 단점이 있다. 〈그림 12-52〉

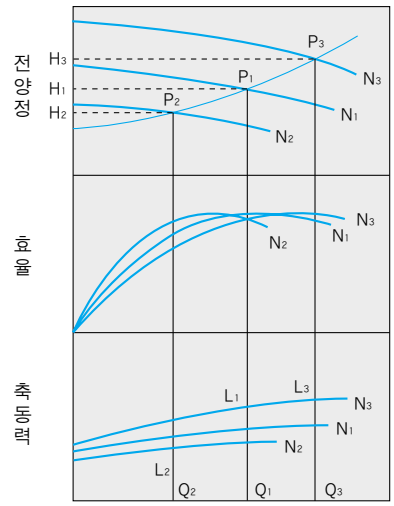


그림 12-51 펌프속도제어시의 특성곡선

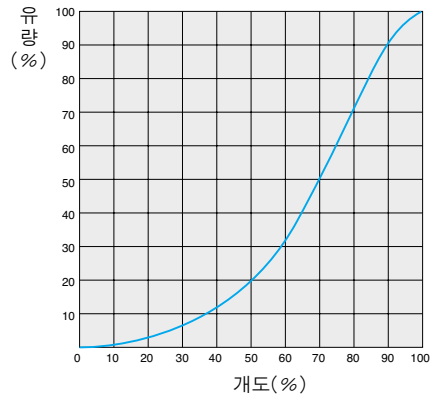


그림 12-50 버터플라이변의 개도와 유량특성

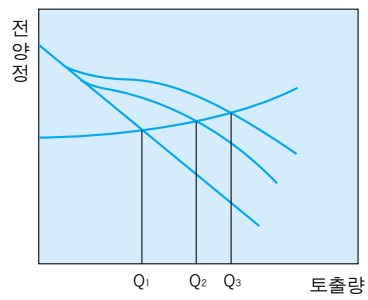


그림 12-52 익각제어 성능곡선

12. 4. 5 가변속장치의 적용기술

(1) 동력절감원리

댐퍼제어와 가변속제어에 따른 송풍기의 동력절감원리를 수식을 통하여 알아보면 〈그림 12-53〉에서 풍량 Q_B에 대한 소요동력의 차를 비교하기 위하여 우선 〈그림 12-53〉의 B점에 대한 동력을 구해보면 식(12.4.16)과 같다.

$$L_B = K \cdot Q_B \cdot P_B / \eta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.16)$$

$= K \cdot Q_B \cdot P_C$: 순수한 일의 양

$+ K \cdot Q_B \cdot P_D$: 댐퍼손실

$+ K \cdot Q_B (P_C + P_D)(1 / \eta - 1)$: 송풍기손실

속도제어일 경우 동일한 유량 Q_B에 대한 C점의 동력을 계산해 보면 식(12.4.17)와 같다.

$$L_C = K \cdot Q_B \cdot P_C / \eta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.17)$$

$= K \cdot Q_B \cdot P_C$: 순수한 일의 양

$+ K \cdot Q_B \cdot P_C (1 / \eta - 1)$: 송풍기손실

댐퍼제어일 경우와 가변속제어일 경우의 소요동력차가 곧 절감할 수 있는 동력이 되므로 차동력 L_D를 구하면 식(12.4.18)과 같다.

$$L_Q = L_B - L_C = K \cdot Q_B \cdot P_D / \eta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12.4.18)$$

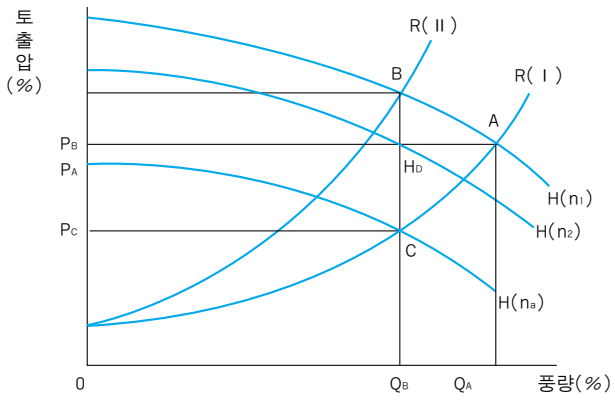


그림 12-53 제어별 팬 특성곡선

(2) 가변속장치의 장단점

장 점	단 점
· Soft Start/Soft Stop · 전원용량 감소 · 동력절감 · 소음감소 · 기동/정지의 시간당 제한이 없다. · 제어의 정밀성 · 구동장치 마모감소	· 자연공진점에서의 진동문제 · 고조파, 노이즈문제 · 토크 맥동문제 · 베어링윤활 · 정류형에서는 정류(Commutation) 서어징 문제 · 냉각력저하

(3) 가변속장치의 용량선정

교류가변속장치의 용량은 주소자가 반도체이므로 반도체소자의 전류용량에 영향을 받으므로 일반적으로 [kVA]단위로 식(12.4.19)와 같이 표시된다.

$$\text{용량[kVA]} = \sqrt{3} \times \text{최대출력전압} \times \text{정격출력전류[A]} \times 10^{-3} \quad \cdots (12.4.19)$$

전동기의 정격용량과 여유율을 고려하여 교류가변속장치의 용량을 선정할 수 있으나 송풍기나 펌프가 과대설계되어 실계통운전시 정격보다 훨씬 낮은 부하로 운전될 때는 이를 고려하여 작은용량의 교류가변속장치를 선정할 수 있다. 또한 1:N방식으로 교류가변속장치 1대로 N대의 전동기를 구동할 경우는 식(12.4.20)를 사용할 수 있으나 이 또한 과대용량일때는 적절히 고려하여 선정할 필요가 있다.

$$P_N = \sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \cdot N \cdot K \cdot 10^{-3} \,[\text{kVA}] \quad \cdots (12.4.20)$$

V_N : 최고주파수에서의 전동기전압[V]
I_N : 최고주파수에서의 정격전류[A]
N : 전동기 대수
K : 여유율 (1.1)

(4) 고조파영향

교류가변속장치에서 발생하는 고조파로 인하여 전력용컨덴서의 가열, 발전기 단부발열 등의 나쁜영향을 미치므로 사전에 이를 검토하여 고조파관리기준 이하일 경우는 문제가 없으나, 이상일 때는 이에 대한 대책을 강구하여야 한다. 〈표 12-7~12-9〉은 각종 고조파관리기준을 나타낸 것이다.

표 12-7 허용 고조파전류

고주파 차수	5	7	11	13	17	19	23	25
허용치	10.6	5.0	2.6	2.2	1.8	1.7	1.8	1.9

표 12-8 허용 고조파전압

계통종별	각차고조파 전압함유율	비 고
154KV 이상	0.5% 이하	전압종합왜율 약 1.0% 이하
66KV이하	1.0% 이하	전압종합왜율 약 3% 이하

표 12-9 외국의 관리기준

	미 국	서 독	영 국	호 주
관리치	전압왜율 일반전력계통 5% 전용계통(컨버터에 접속된 계통) 8%	제5, 제7 합계 5% 제11, 제13 합계 3% (전압왜율 5.8%)	전압왜율 4% 기수고조파 3% 우수고조파 1.75%	전압왜율 5% 기수고조파 4% 우수고조파 2%
전압	2.4~69KV	중간전압모선 30KV, 10KV 등	6.6KV 11KV	33KV 배전계통 포함

12. 4. 6 동력절감 검토

기존 발전설비중 베인제어중인 FDF에 가변속장치를 추가 설치하여 동력절감을 꾀하려고할 경우의 절감량 계산 예를 보인다. 사용자료는 〈표 12-10〉과 같다. 전동기효율은 전동기 출력에 관계없이 발전기부하에 따라 베인제어에서나 속도제어에서 동일하다고 가정한다.

표 12-10 FDF 계통자료

부 하 [%]	25	50	75	100	설 계
풍량[㎥/min · 대]	2.894	4.518	6.656	7.986	9.800
토출압[㎜Aq]	133	339	535	755	1.037
팬 · 베인효율 [%]	5.3	19	40	63	83
전동기효율 [%]	94	94.5	95	96	95
VVVF 효율 [%]	97	97.5	98	98	98
년간운전시간 [Hr]	280	1.000	2.400	3.800	-
FDF 운전대수	2	2	2	2	2

(1) 베인제어시 년간 사용전력량 계산

년간 사용전력량 계산은 부하별 FDF전동기입력을 계산하여 운전시간과 곱한 후 이를 더하면 된다. 부하별 입력은 식(12.4.1~11)을 이용하여 전동기입력을 계산할 수 있다. 이 때 팬 효율은 베인을 사용할 때의 팬과 베인의 종합효율을 사용해야 한다.

계산 결과는 〈표 12-11〉와 같다.

표 12-11 베인제어 입력

부 칙 [%]	25	50	75	100	계
압력[kW/대]	1.262	1.394	1.531	1.628	-
총입력[MWH]	700	2.788	7.350	12.380	23.224

(2) 속도제어시 년간 사용전력량 계산

속도제어시 팬효율은 최대 설계치를 그대로 사용하여 계산하면 〈표 12-12〉와 같다.

표 12-12 년간 절감량

부 하 [%]	25	50	75	100	계
압력[kW/대]	83	327	725	1.262	-
총입력[MWH]	47	654	3.614	9.589	13.904

표 12-13 년간 절감량

부 하 [%]	25	50	75	100	계
베인제어입력 [MWH]	706	2.788	7.350	12.380	23.224
속도제어입력 [MWH]	47	654	3.614	9.589	13.904
절 감 [MWH]	659	2.134	3.736	2.791	9.320

12.5 실제 공조설비에 인버터(VVVF)의 적용과 에너지 절감효과

12.5.1 건물의 개요

가. 건축연건평 : 29,407평

나. 상주인원 : 3,783명

다. 공조면적 : 29,190평

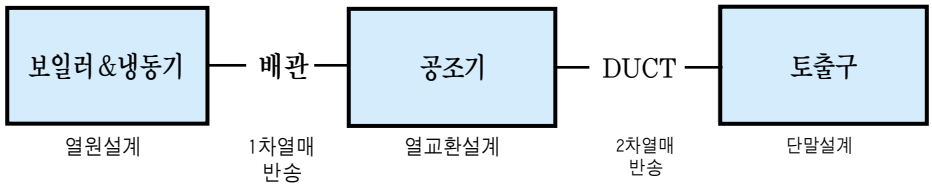
라. 전력시설용량 : 9,318kW

마. 년간전력사용량 : 14,435MWH (88년 실적)

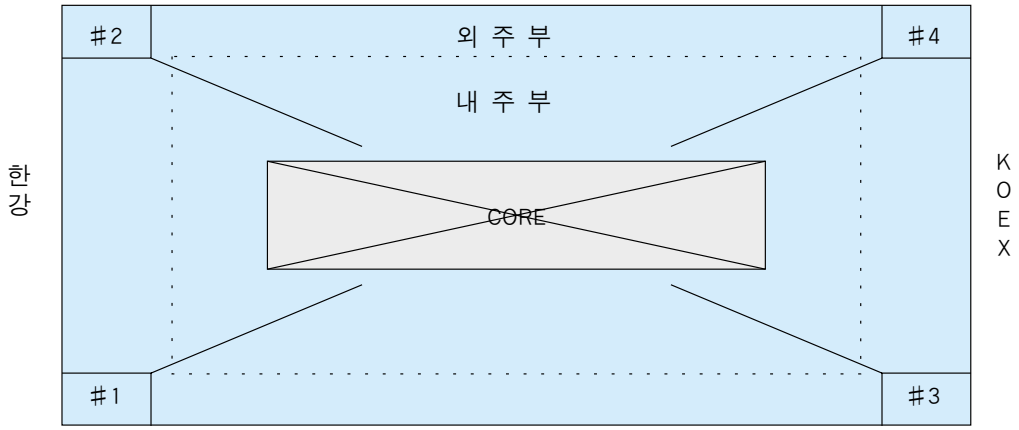
바. 공조시스템

(1) 개념

a) 열원 공급 계통도



b) 공조 Zoning



c) 외주부용 공조기(#1, 4)

창측에서 3M 정도의 거리까지를 외주부라 하며, 외주부용 공조기는 층마다 2대씩 설치되어 있으며, 외기수입없이 실내공기를 여과, 가열, 냉각하여 재순환시키며 취출구는 창문 하부에 창문마다 배치되어 있다.

d) 내주부용 공조기(#2, 3)

외주부를 제외한 전지역을 내주부라 하며, 내주부용 공조기는 층마다 2대씩 설치되어 내주부에 공조공기(여과, 가열, 냉각, 가습된 공기)를 공급한다. 공조기의 공급공기의 25%이상은 실외의 공기(Fresh Air)를 취기하고 75%이하의 공기는 재순환 된다. 취출구는 천정의 조명등에 배치되어 있다.

e) 변풍량방식(VAV : Variable Air Volume)

내주부공조기에 채용되었으며 실내온도 상태에 따라 공기의 공급량을 가감하여 공급하므로, 에너지의 낭비가 적고 실내온도 부하에 적용하기 쉽다.

f) 정풍량방식(CAV : Constant Air Volume)

항상 일정량의 공조공기를 공급하는 방식으로 설치비는 적게드나 실내부하에 적응할 수 없고 따라서 에너지의 낭비요인이 있다

(2)공조기의 현황

a) 사양

-풍 량 : 10,500CMH

-형 식 : Air Foil Type

-풍 압 : 110mmAQ

-전동기: 3상 380V, 60Hz, 7.5HP, 4P

b) 운전조건

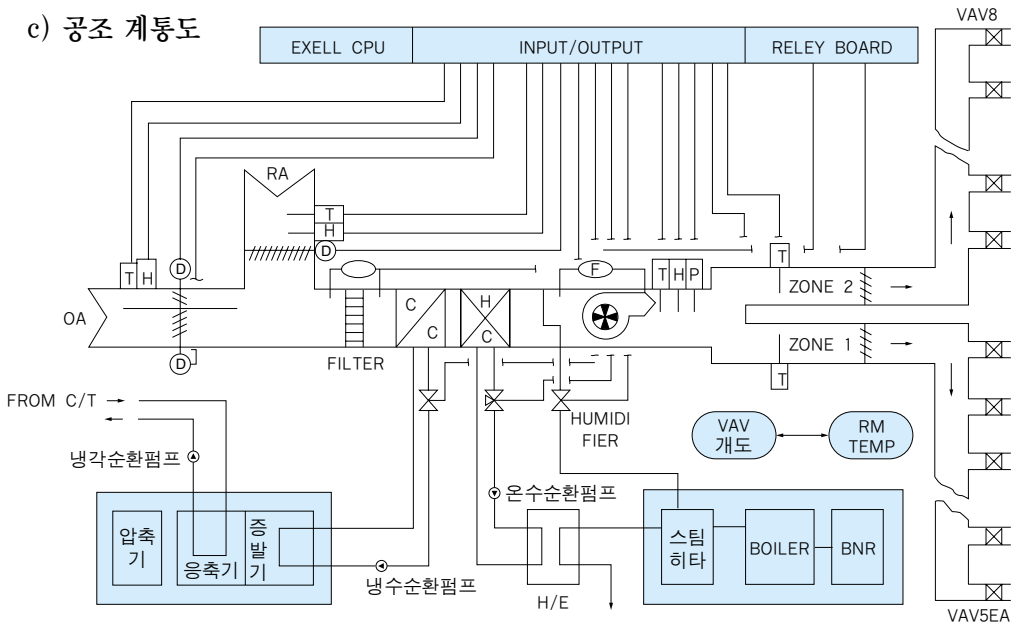
-온 도 : 20 ~ 26℃

-습 도 : 40 ~ 70%RH

-이산화탄소 : 700 PPM

-일산화탄소 : 5 PPM이하

c) 공조 계통도



d) 공조기 가동시간(88년 실적)

월별 공조기 가동시간

단위 : 시간

구분	1월	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1123	124.3	208	238.5	220	216	226	222	238	238.9	213	229.5	236.7
내주부 합 계	5585.6	5370.6	6120.2	5584.1	5502	5727.5	6316	6871.8	6759.5	5579	4862	5282.6

주) 1123 가동합계 : 2,700 Hr 내주부 AHU 합계 : 69,561.3 Hr

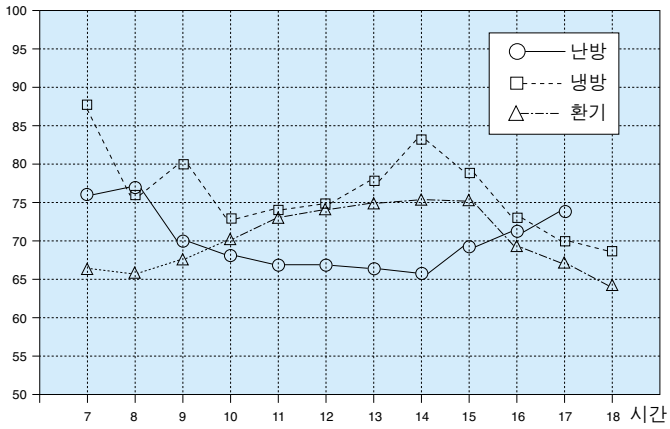
가동시간 구분

구 분	난방가동시간	냉방가동시간	환기가동시간	합 계
1123	1097.5	824.5	778.5	2,700.9
내주부합계	28,241.9	21,216.2	20,103.2	69,561.3

e) 계절별 일일부하 상태(AHU Fan 평균부하율)

TIME	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
난 방	76.0	77.2	70.0	68.2	67.0	67.0	66.4	65.8	69.4	71.2	73.6	-
냉 방	88.0	76.0	74.2	73.0	74.2	74.8	77.8	83.2	79.0	73.0	70.0	68.8
환 기	66.4	65.8	67.6	70.0	73.0	74.2	74.8	75.4	75.4	69.4	67.0	64.0

계절별 일일부하 상태

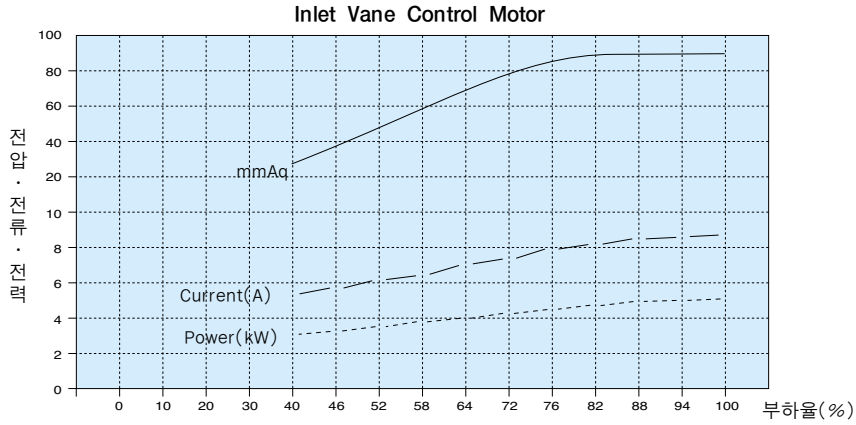


-부하평균

- 난방(07:20 ~16:40) : 70.1%
- 냉방(07:20 ~17:40) : 76.2%
- 환기(07:20 ~17:40) : 70.2%

f) 부하에 따른 Inlet Vane Control Fan Motor의 동력

Power Charactor of Inlet Vane Control															
Power/Load	0	10	20	30	40	46	52	58	64	70	76	82	88	97	100
Vane 개도	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
정압 (mmAq)	*	*	*	*	24	34	47	59	70	79	87	91	91	91	91
Voltage	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
Current(A)-R	*	*	*	*	6	6.4	6.5	7	7.4	7.8	8.5	8.6	9	9	9.3
Current(A)-S	*	*	*	*	5.2	5.5	6.2	6.5	6.7	7.3	7.5	7.9	8.5	8.5	8.6
Current(A)-T	*	*	*	*	5	5.2	5.6	5.9	6.7	6.8	7.4	7.7	7.5	8	8
Average	*	*	*	*	5.4	5.7	6.1	6.5	6.9	7.3	7.8	8.1	8.3	8.5	8.6
Power	*	*	*	*	3.1	3.2	3.5	3.7	3.9	4.1	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9



(3) 인버터(VVVF) Control 공조기

a) 인버터 사양

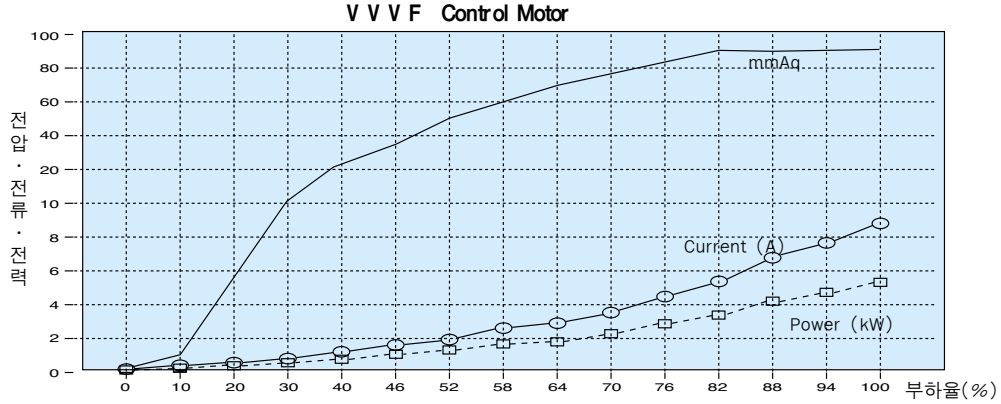
- Input : Voltage 400/440V, 3상
  Freq. 50/60Hz
- Output : Capacity 7.5 kVA
  Voltage 400/440V, 3상
  Current 10.8A
  Freq. 3~60Hz
- Control : PWM Type
  Syncro Start
  Free Run Stop
- DCL : 없음
- Efficiency : Above 95%

b) 인버터 제어방법 : 덕트압력에 연동한 전동기회전수제어

(주파수 설정 신호 : DC 0~10V)

c) 부하에 따른 Control Fan Motor 동력

Power Charactor of VVVF Control															
Power/Load	0	10	20	30	40	46	52	58	64	70	76	82	88	94	100
상당Vane 개도	*	*	*	*	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Frequecy	1	6	12	18	24	26	30	34	37	41	44	48	52	56	60
정압 (mmAq)	0	1.1	4.9	12	22	34	49	58	69	76	82	90	89	90	91
Voltage	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
Current(A)-R	0	0.4	0.5	1	1.5	2	2.6	3.1	3.5	4	5	6	7	8.2	9.2
Current(A)-S	0	0.2	0.4	0.7	1	1.3	1.5	2.5	2.6	3.5	4	5	6.5	7.4	8.4
Current(A)-T	0	0.2	0.2	0.6	0.7	1.1	1.2	1.6	2	2.6	3.8	4.6	6	6.7	8
Average	0	0.3	0.4	0.8	1.1	1.5	1.8	2.4	2.7	3.4	4.3	5.2	6.5	7.4	8.5
Power	0	0.2	0.2	0.5	0.6	0.9	1	1.4	1.6	2	2.5	3.1	3.9	4.4	5.1



12.5.2 인버터 에너지절감 효과분석

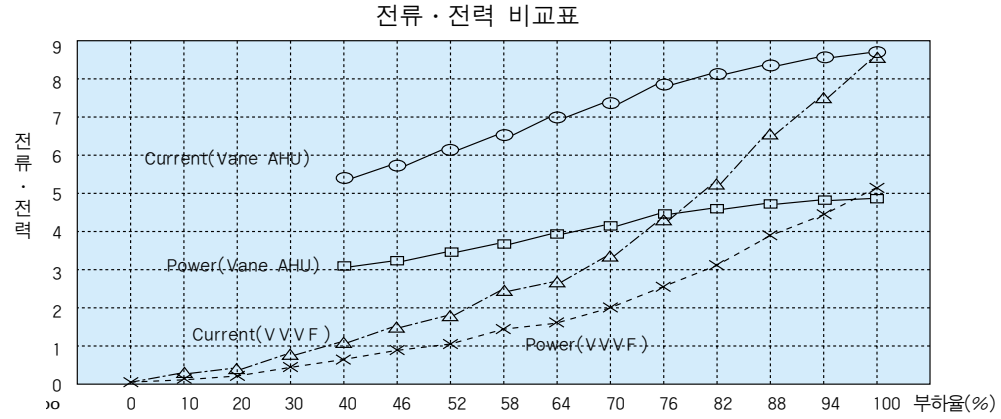
(1) 소비전력 비교표

부 하 율(%)		0	10	20	30	40	46	52	58	64	70	76	82	88	94	100
Van 개도		0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
전류 평균	기존					5.4	5.7	6.1	6.5	6.9	7.3	7.8	8.1	8.3	8.5	8.6
	시험	0	0.3	0.4	0.8	1.1	1.5	1.8	2.4	2.7	3.4	4.3	5.2	6.5	7.4	8.5
전력 평균	기존					3.1	3.2	3.5	3.7	3.9	4.1	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9
	시험	0	0.2	0.2	0.5	0.6	0.9	1.0	1.4	1.6	2	2.5	3.1	3.9	4.4	5.1

1) 전력산출식 : 전압×전류×$\sqrt{3}$×역률(기존 : 0.86, 시험 : 0.9적용)

2) 평균 부하율의 전력절감량 및 절감율

- 난방(70.1%) : 4.20kW-2.13kW=2.07(49.3%)
- 냉방(76.0%) : 4.41kW-2.53kW=1.88(42.6%)
- 환기(70.2%) : 4.25kW-2.22kW=2.03(47.8%)



(2) VAV System

a) 전력절감효과

- 난방기 : 2.07×1097.5Hr = 2,271.8kWH(58,460.7kWH)
- 냉방기 : 1.88× 824.5Hr = 1,550.1kWH(39,886kWH)
- 환기기 : 2.03× 778.5Hr = 1,508.4kWH(40,809.5kWH)

합 계 = 5,402.3kWH(139,156.7kWH)

※ ( )속은 내주부 전체

b) 전력절감율

$$1-\frac{2.13\times1,097.5+2.53\times824.5+2.22\times778.5}{4.20\times1,097.5+4.41\times824.5+4.25\times778.5}=0.468$$

c) 년간 절감비용(인입 3300V, 업무용전력요금 적용)

₩ 49.8/kWH×5,402.3 = ₩ 269,034

d) 투자비용 : ₩ 1,380,000

e) 투자비 회수기간 : 5.1년

a) 전력절감효과

- 난방기 : (4.89-2.13)×1,097.5Hr = 3,029.1kWH(77,947.6kWH)
- 냉방기 : (4.89-2.53)× 824.5Hr = 1,945.8kWH(50,070.2kWH)
- 환기기 : (4.89-2.22)× 778.5Hr = 2,078.6kWH(53,675.5kWH)

합 계 = 7,053.5kWH(181,693.3kWH)

b) 전력절감율

$$1-\frac{2.13\times1,097.5+2.53\times824.5+2.22\times778.5}{4.89\times2,700.9}=0.534$$

c) 년간 절감비용(인입 3300V, 업무용전력요금 적용)

₩ 49.8/kWH×7,053.6 = ₩ 351,269

d) 투자비용 : ₩ 1,380,000

e) 투자비 회수기간 : 3.9년

(4) 본사 내주부용 전공조기에 적용시 효과

- 년간 139,157kWH, ₩ 6,930,000