

모터 트러블과
對策의 實際

昨今 各種 用途에의 汎用 인버터(以下, 인버터라 略稱함)가 많이 普及되고 있다. 인버터를 使用함으로써 定速電動機를 손쉽게 變速하는 것이 可能해지고 특히 汎用 籠形誘導電動機(以下 汎用電動機라 稱한다)를 구동하는 경우가 늘어나고 있다. 파워 電氣 素子나 인버터의 設計, 生産 技術의 進보에 따라 인버터의 特性이 大폭 改良, 확대되어 가고 있다. 出力電壓波形도 보다 正弦波에 가까워지고 있고 高調波成分도 적어지고 있다. 그러나 汎用電動機는 본래 正弦波인 商用電源用으로 設計, 製作되고 있어 改善되어 왔다고는 하나 歪波電源인 인버터로 驅動하였을 때 여러가지 問題가 發生한다. 여기서

는 가장 일반적인 不等 펄스幅 PWM 制御方式 電壓形 인버터로 定格出力 37kW 以下の 汎用電動機를 구동하였을 때의 問題점과 對策에 대하여 記述한다.

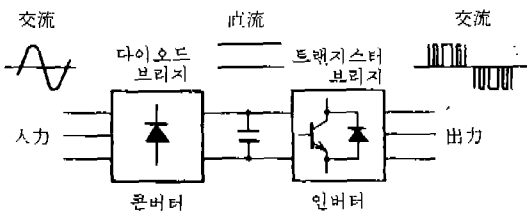
그림 1은 인버터의 構成圖를 표시한 것이다.

1. 高調波電壓과 電動機特性

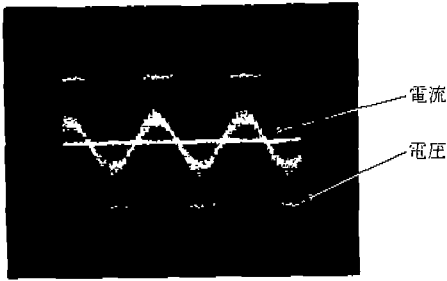
인버터 驅動時의 큰 問題點인 高調波電壓이 電動機特性에 미치는 影響에 대해 思考하여 보자.

가. 出力電壓의 高調波成分

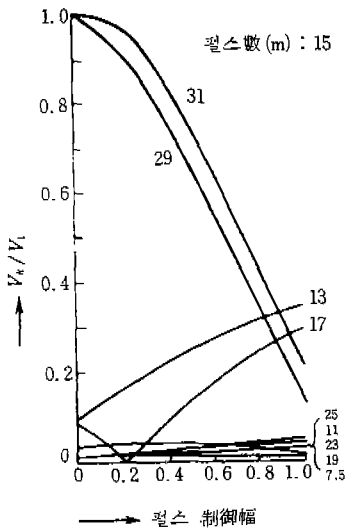
그림 2에 인버터 出力電壓과 電流波形을 표시한다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 不等 펄스幅 PWM 制御方式은 PAM 制御方式과 달리 5, 7 次의 低次成分이 적고 비교적 歪曲이 적은 電壓이 얻어지지만 한편 펄스 高調波라 불리는 高次의 高調波가 크다. 특히 펄스幅을 작게 制御하는 低周波域에서는 현저하다. 그림 3에 인버터 出力電壓의 半 사이클에 포함되는 펄스 數(m)가 15인 경우의 高調波成分을 표시한다. ($2m \pm 1$)



(그림 1) 인버터 主回路構成



〈그림 2〉 인버터 出力電壓, 電流波形



〈그림 3〉 인버터 出力電壓의 高調波成分

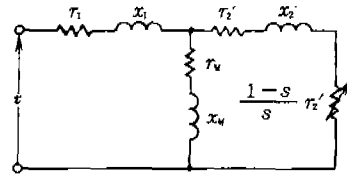
次, $(m \pm 2)$ 次인 29, 31, 13, 17次가 크지만 그보다 低次의 成分은 극히 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 出力電壓 $v(t)$ 는 다음 式으로 표시한다.

$$v(t) = \sqrt{2} (V_1 \sin \omega t + V_5 \sin 5 \omega t + V_7 \sin 7 \omega t + \dots + V_k \sin k \omega t) \quad (1)$$

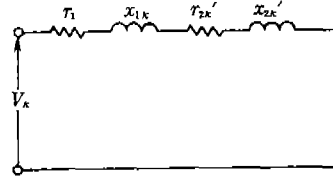
여기서 V_k : k 次의 時間高調波電壓 크기
 ω : 基本波의 角周波數

나. 等價回路와 發生損失

그림 4에 많이 사용되는 電動機의 T形 等價回路를 든다. k 次高調波에 대한 回轉子의 슬립



(a)



(b)

- r_1 : 一次抵抗
- r_2', r_{2k}' : 二次抵抗 (-次換算值)
- s : 슬립
- x_1, x_{1k} : 一次누설 리액턴스
- x_2', x_{2k}' : 二次누설 리액턴스 (-次換算值)
- r_M : 鐵損抵抗
- x_M : 勵磁 리액턴스

〈그림 4〉 電動機의 等價回路

s_k 는 다음 式으로 부여된다.

$$s_k = \frac{kN_s \pm N}{kN_s} \quad (2)$$

여기서 N_s : 基本波의 同期回轉數

N : 回轉子の 回轉數

\pm : 基本波와 同方向回轉의 高調波일 때 (-), 반대는 (+)

k 가 클 때 $kN_s \gg N$ 로부터 $s_k \approx 1$ 이 되며, k 次高調波에 대한 等價回路는 그림 4 (b)와 같이 回轉子를 拘束하였을 때의 回路라 생각하면 된다. 이 때문에 高調波電流에 의한 銅損이 증가한다. 특히 2次銅損은 $r_2 k$ 가 表皮效果에 의하여 증대되기 때문에 增加率이 크다. 大體의인 기준으로 1次銅損은 基本波와 동등한 크기의 正弦波電流로 구동한 경우에 대하여 10~30%增, 2次銅損은 30~50%增이 된다. 高調波에 의한 鐵損증가도 있으나 일반적으로 작으며 無視하여도 된다. 4極電動機의 損失構成은 개략 1次銅損 40%, 2次銅損 20%, 鐵損 30%, 機械損 기타가 10% 정도이므로 同一周波數로 正弦波電源

에 대하여 約 10~20% 損失이 증가하게 된다.

다. 空隙磁束과 電磁振動力

인버터로 구동하였을 때의 電動機捲線 起磁力 \mathcal{F} 는 다음 式으로 표시된다.

$$\mathcal{F}(\theta_1) = \sum_k \sum_\nu a_{k\nu} \cos(\nu p \theta_1 - k \omega t) \quad (3)$$

여기서 θ_1 : 固定子側에 固定된 座標에서의 角度

$a_{k\nu}$: 高調波起磁力의 크기

ν : 空間高調波次數

p : 極對數

空隙磁束密度는 起磁力 \mathcal{F} 와 空隙 퍼미언스 (磁氣抵抗의 逆數)의 곱으로 구하여지고 電磁振動力 F 는 空隙磁束密度의 2乘에 比例하기 때문에 固定子側에서 본 電磁振動力 $F(\theta_1)$ 은

$$F(\theta_1) = \sum_{k_s} \sum_{k_r} F_1 \cos \left\{ (k_s Z_s \pm k_r Z_r \pm p) \theta_1 - \left(\frac{k_r Z_r}{p} \pm q_1 \right) \omega t \right\} \quad (4)$$

回轉하고 있는 回轉子側에서 본 電磁振動力 $F(\theta_2)$ 는

$$F(\theta_2) = \sum_{k_s} \sum_{k_r} F_2 \cos \left\{ (k_s Z_s \pm k_r Z_r \pm p) \theta_2 - \left(\frac{k_s Z_s}{p} \pm q_2 \right) \omega t \right\} \quad (5)$$

여기서 Z_s : 固定子 極數

Z_r : 回轉子 極數

k_s, k_r : 0, 1, 2, ...

θ_1, θ_2 : 固定子 및 回轉하고 있는 角度

q_1 : 0, 2, $k \pm 1$, $2k$

q_2 : 0, $1-k$, $2(1-k)$

〈표 1〉 主要 電磁振動力의 周波數次數

	基本波에 의한 것	펄스 高調波에 의한 것	
	$\frac{Z_r}{p} \pm 0$	$k \pm 1$	$2k$
固定子側	20, 22, 24	28, 30, 32	58, 62
回轉子側	$\frac{Z_s}{p}$	$\frac{Z_s}{p} \pm (1-k)$	$\frac{Z_s}{p} \pm 2(1-k)$
	18	12, 48	42, 78

또 (4), (5)式은 基本波에 대한 슬립 $s_1 \approx 0$ 으로 하였다. (4), (5)式의 右邊 괄호內의 第2項이 電磁振動力의 周波數 次數를 표시하고 소음 主成分의 周波數次數가 된다.

一例로서 $Z_s=36$, $Z_r=44$ 의 4極機를 펄스數 $m=15$ 로 구동하였을 때의 주된 電磁振動力의 周波數次數를 표 1에 표시한다.

2. 電動機側에 발생하는 주요 트러블과 原因

汎用電動機를 인버터 運轉하였을 때의 電動機側에 발생하는 주된 트러블의 原因을 표 2에 표시한다.

以下, 표중의 주된 것에 대하여 설명하는데, 트러블의 內容, 程度는 인버터, 電動機의 特性이나 設計, 製作內容에 따라 크게 영향 받으므로 대책에 있어서는 메이커와 충분히 상의하여

〈표 2〉 電動機側에 발생하는 주된 트러블과 原因

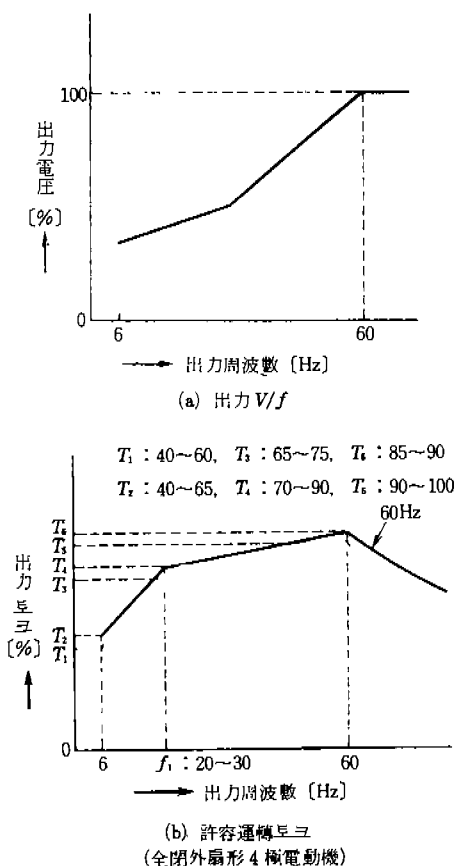
주된 트러블	原 因
低速側의 發生 토크의 低下	· 電動機內部抵抗에 의한 電壓降下 · 電壓波形的 왜곡
發生損失의 增加와 低速側에서의 溫度上昇	· 高周波에 의한 損失增加 · 低速時의 冷却效果 減少
高速側에서의 發生 토크의 低下	· 인버터의 出力電壓值의 固定
騒音의 發生 및 增大	· 高調波에 의한 電磁音의 發生 · 構造體와의 共振 · 高速運轉時의 通風音의 增大
振動의 發生 및 增大	· 高調波에 의한 電磁振動의 發生 · 설치部, 負荷連結部의 振動, 共振 · 構造部品の 共振
脈動 토크의 發生 과 그에 의한 振動	· 低次(특히 5, 7次) 高調波에 의하여 發生하는 6次的 振動 토크
機械的 強度	· 高速運轉時의 遠心力, 인벌런스
軸受壽命	· 高速運轉時의 機械的壽命, 구리스壽命
軸電壓의 增加	· 高調波成分에 의한 增加
서지 電壓과 絶緣 強度	· 인버터의 轉流動作

實施할 필요가 있다. 여기에 기술하는 내용은 일반적인 것으로서, 또, 各數値에 대하여는 기준치로 생각하기 바란다.

가. 許容 토크 範圍에 관한 트러블과 對策

前述한 바와 같이 인버터 驅動時에는 高調波 損失의 發生, 低速側에서의 冷却效果의 감소에 의하여 温度的인 制約이 생긴다. 또 低速域에서는 電動機 内部抵抗에 의한 電壓降下 등에 의하여 토크 부스트(V/f 比를 크게 하는 것)를 하여도 일반적으로 發生 토크는 저하한다.

이상과 같은 理由 등에 의하여 電動機의 運轉 토크에 한계가 있다. 인버터의 出力 V/f 특성과 電動機의 허용운전 토크의 例를 그림 5에 표시한다. 토크는 60Hz, 定格 토크를 100%로 하고



〈그림 5〉 인버터의 出力 V/f 특성과 電動機의 許容運轉 토크

있다. 이들 데이터는 안내서 등으로 메이커로부터 제시되지만 우선 다음과 같은 點에 주의할 필요가 있다.

汎用電動機는 일반적으로 4 極의 全閉外扇形 電動機를 定格電壓으로 운전하였을 때의 것이므로 다른 電動機에는 適用할 수 없다. 또한 電原 電壓이 降下하였을 때는 그 分電流가 增加하기 때문에 許容 토크가 감소한다.

다음에 그림 5 (b)의 許容運轉 토크 特性에 대하여 설명한다.

(i) 60Hz : 60Hz에서 出力電壓이 最大가 되고 그 이상의 周波數에서는 一定하기 때문에 磁束은 周波數에 反比例하여 작아진다. 이 때문에 電流를 一定하게 하여도 速度에 反比例하여 定出力特性이 된다. 실제로는 電動機의 内部 리액턴스에 의한 電壓降下 때문에 定出力曲線보다 낮아진다. 또 高調波損失에 의하여 溫度上昇이 커지기 때문에 60Hz에서 90~100%로 負荷 토크를 조금 작게 할 필요가 있다. 또 인버터의 内部 임피던스에 의한 電壓降下로 出力電壓이 定格電壓보다 작아지는 경우가 있으므로 주의하여야 한다.

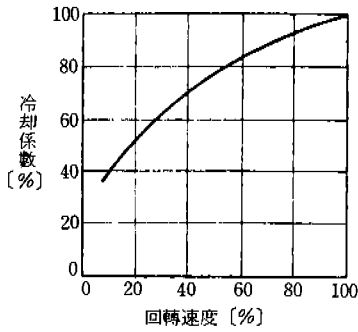
(ii) f_1 에서 60Hz間 : 電動機는 거의 같은 토크를 發生할 수 있지만 冷却效果가 감소하기 때문에 許容 토크는 그만큼 低下된다.

(iii) f_1 [Hz] 以下 : 電動機의 内部抵抗에 의한 電壓降下 및 波形的 歪曲이 커지기 때문에 同一電流值에 대한 出力 토크가 감소한다. 또한 그림 6에 표시하는 바와 같이 冷却效果가 급격히 저하하기 때문에 허용 토크는 대폭 감소된다.

이상에 의해 許容運轉 토크 범위에 관한 대책을 표 3에 표시한다. 표中에 있는 인버터 專用 電動機에는 여러가지가 있는데 汎用電動機와 同一 설치치수의 것이 준비되어 있으므로 교환하여 設置하는 것도 비교적 손쉽다.

나. 高速運轉時的 트러블과 對策

인버터의 出力周波數가 계속 커져가고 있으며 120Hz이상 내는 것도 많다. 한편 汎用電動機는



〈그림 6〉 回轉速度와 冷却係數

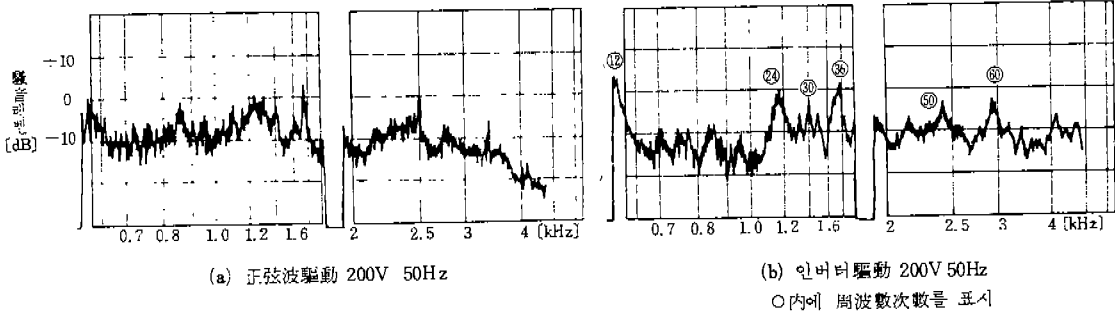
60Hz 以下の 사용을 전제로 設計, 製作되고 있기 때문에 60Hz를 넘는 범위에서 사용하는 경우에는 電動機의 機械의 強度, 振動, 베어링 壽命 등에 충분히 주의할 필요가 있다. 표 4에 高速 運轉時의 トラブル 原因과 대책을 표시한다. 高速 運轉時의 トラブル은 특히 위험하기 때문에 電動機의 定格을 초과하여 사용할 때는 메이커에 문의하여야 한다. 특히 既設 電動機를 高速 運轉할 때는 충분한 注意를 하여야 한다. 또 負荷

〈표 3〉 許容運轉 토크 範圍에 관한 トラブル의 對策

周波數範圍	現 狀 對 策	變 更 對 策
i 50 또는 60Hz 以上	<ul style="list-style-type: none"> · 인버터 受電電壓의 체크와 適正化 · 負荷 토크의 輕減(팬, 펌프 등의 外徑의 小形化) 	<ul style="list-style-type: none"> · 電動機의 코일 다시 감기 · 專用電動機^(註)로 교환 (注: 인버터전용 定出力 電動機 등)
ii $f_1 \sim 50$ 또는 60Hz	<ul style="list-style-type: none"> · 인버터 出力 V/f 上昇 · 別置 팬에 의한 冷却 · 인버터 受電電壓의 체크와 適正化 · 負荷 토크의 輕減(특히 콘베어, 工作機 등) · 運轉範圍의 재검토 	<ul style="list-style-type: none"> · 專用電動機^(註)로 교환 (注: 인버터전용 定 토크 電動機, 節電形 電動機 등) · 인버터 容量 上昇
iii f_1 [Hz] 以下	<ul style="list-style-type: none"> · 인버터 出力 V/f 上昇 단, 過勵磁에 주의할 것 · 別置 팬에 의한 냉각 · 負荷 토크의 輕減 · 運轉範圍의 재검토 	<ul style="list-style-type: none"> · 專用電動機로 교환 (ii 項과 같음) · 인버터 容量 상승

〈표 4〉 高速運轉時의 トラブル과 對策

現 象	原 因	對 策
回轉體의 機械의 強度 (특히 2極機의 高速運轉은 주의를 要함)	遠心力 各部의 언밸런스	메이커의 許容回轉數範圍內인 것을 確認하고 그것을 벗어날 때는 專用電動機로 한다
振動增加	各部의 언밸런스	回轉部分(負荷, 커프링 포함)의 밸런스 修正
共振, 異音의 發生	回轉周波數와 電動機 各部 및 설 치부의 固有振動數의 接近	설치부의 強度, 剛性變更에 의한 固有振動數를 弄다
騒音의 增加	冷却 팬 音 베어링 音의 增加	小徑 팬, 他冷却方式으로 變更
베어링 壽命의 低下 (특히 2極機의 高速運轉은 주의를 要함)	dN 值 上昇에 의한 機械의 壽命 低下 베어링 發熱增加에 의한 壽命低下	耐熱 구리스의 채택, 구리스 교환형으로 변경 프렉시블커플링에 의한 直結方式의 채택



〈그림 7〉 騒音周波數分析

側, 連結部に 있어서도 동일한 트러블이 예상되므로 兼하여 검토하여야 한다.

다. 騒音의 트러블 對策

1. 위에서 記述한 바와 같이 인버터의 出力 電壓에는 수많은 時間 高調波가 포함되고 있고 空間高調波와 함께 여러가지 電磁振動力을 발생한다. 이 때문에 正弦波電源에 比하여 騒音이 증가한다. 그림 7에 표 1에 相當하는 電動機를 正弦波電源과 인버터로 無負荷運轉하였을 때의 騒音周波數分析을 표시한다. 표 1의 펄스 高調波에 의한 騒音成分이 크게 나타나 있는 것을 알 수 있다.

여기서는 比較的 問題가 되는 60Hz 以下로 驅動하였을 때의 電磁騒音의 대책에 대하여 기술한다.

(1) V/f 特性을 變化시킨다

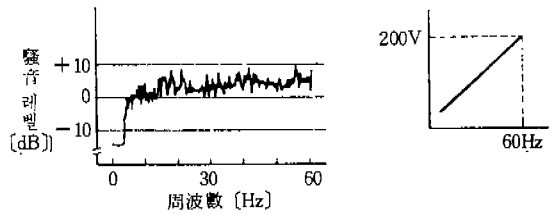
電磁振動力은 磁束密度의 2 乘에 比例하므로 토크의 問題가 없는 범위에서 電壓을 내린다. 특히 팬, 펌프 등의 1 乘低減 토크 特性의 負荷인 경우 有效하다.

그림 8 (b)에 V/f 特性을 變化시켰을 때의 騒音特性을 표시한다. 30Hz 以下에서 약 3~5 dB (A) 低減하고 있다.

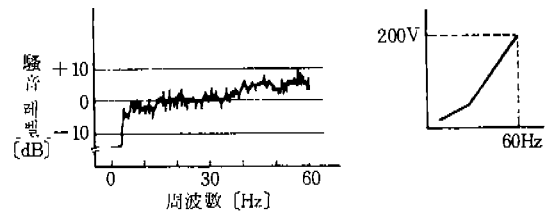
(2) AC 리액터를 넣는다

인버터와 電動機 사이에 AC 리액터를 넣어

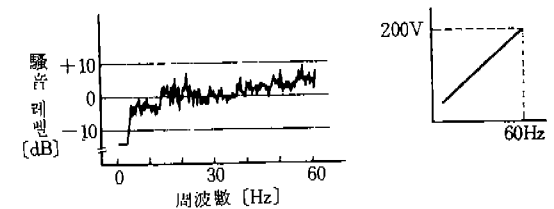
高調波成分을 억제한다. 그림 8 (c)에 AC 리액터 有無에서의 騒音特性을 比較한다. 約 3~5 dB (A)의 低減이 되고 있다. 그러나 AC 리액터를 넣으면 리액터의 電壓降下에 의하여 電動機 端子電壓이 떨어져 토크가 작아지는 것에 주



(a) 對策前



(b) V/f 特性變更



(c) AC 리액터 挿入 (V/f 는 (a)와 같음)

〈그림 8〉 V/f 特性變更, AC 리액터의 效果

의할 필요가 있다.

(3) 電動機 및 構成部品の 設置構造等の 檢討

電磁振動力의 周波數와 電動機 및 構成部品 설치부의 固有진동수가 近접하여 共振音을 발생 하는 경우가 있다. 電動機의 設置構造는 스탯 볼트 부착 등 剛性이 약한 방법은 극력 피하는 것이 바람직하다. 또 펜 커버 등이 振動音을 발생할 때는 설치부에 고무패킹을 끼우면 효과가 있다. PWM 인버터는 PAM 방식에 비하여 振動 토크가 작아 문제가 되는 일은 적으나 負荷와의 連結도 리깃한 방식은 피하고 타이어 커플링이나 플렉시블 커플링 등 高調波回轉振動을 흡수하는 방식을 채용하는 것이 좋다.

(4) 專用電動機의 採用

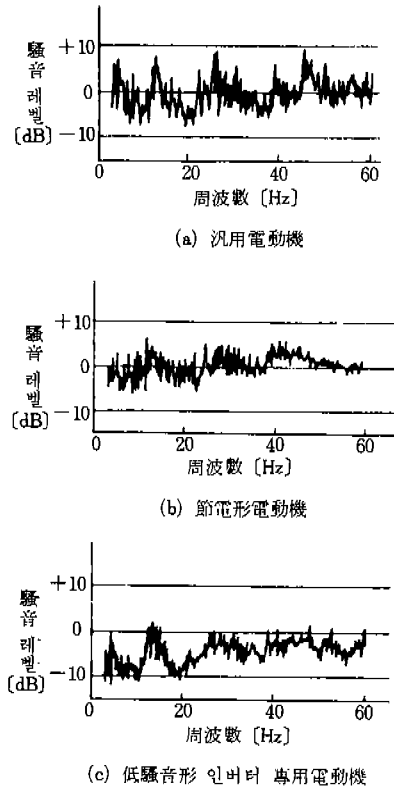
汎用電動機와 설치치수를 동일하게 한 低騒音形의 인버터 專用電動機는 内部의 漏洩 리액턴스를 크게 하여 高調波成分의 역제를 도모한 것으로, 運轉周波數 범위 전반에 걸쳐 低騒音化가 되고 있다. 또 節電形電動機도 高效率化 때문에 汎用電動機에 比하여 低磁束密度設計로 되어 있으며 그만큼 低騒音으로 되어 있다. 그림 9에 汎用, 節電形, 인버터 專用 低騒音形 電動機의 騒音을 비교하여 표시한다.

라. 서지 電壓과 絶緣強度

인버터의 轉流動作에 의하여 서지 電壓이 發生한다. 電壓形 인버터는 電流形 인버터에 비교하면 서지 電壓은 작아 문제가 되는 일은 드물지만 電壓의 上昇이 急激(dV/dt 가 大)하기 때문에 電動機의 電源側 코일에 서지 電壓이 集中하게 된다. 특히 既設의 電動機를 인버터 驅動하는 경우는 絶緣劣化의 상황 등을 조사하여 필요에 따라 와니스 處理의 추가, 코일 다시감기 등과 같은 대책이 필요하다.

마. 軸電壓

軸電壓이란 電動機의 軸端間 또는 軸과 베어



〈그림 9〉 各種 電動機의 騒音比較

링(어스)間에 發生하는 電壓으로, 原因으로서는 電動機의 磁氣의 不平衡에 의한 것과 靜電誘導에 의하는 것이 있다. 이 電壓이 커지면 베어링을 통하여 放電, 베어링을 손상시키게 된다. 인버터 驅動의 경우, 軸電壓은 正弦波電源에 비하여 高調波에 의한 영향으로 약간 증가하지만 일반적으로는 문제가 잘 안된다.

☆ ☆ ☆

以上 汎用電動機를 汎用 인버터로 驅動할 때 發生하는 트러블과 對策에 대하여 기술하였다. 汎用 인버터로 驅動하는 電動機는 대개 汎用電動機이다. 그렇기 때문에 이것들을 組合할 時의 問題點을 精確하게 파악하여 有效한 對策이나 防止策을 강구하는 것이 중요한 技術課題로 되어 있다. 本稿가 汎用 인버터를 活用하고 있는 技術者 各位의 參考가 되었으면 다행이겠다.