

# 可變速 電動機 制御系의 現況과 展望

白 壽 鉉\*

## 目 次

- |                    |                |
|--------------------|----------------|
| 1. 머릿말             | 4. 制御系 構成의 高度化 |
| 2. 可變速 電動機 驅動系의 動向 | 5. 맺는말         |
| 3. 電力用 半導體 素子の 進歩  | 參考文獻           |

### 1. 머릿말

電動機의 可變速 驅動과 制御는 工業製品の 生産에 있어 가장 重要한 基本技術의 하나이며 그 性能은 近年에 와서 많은 向上을 가져왔다. 또 最近에 와서는 에너지 節減을 目的으로 하는 可變速 驅動系의 開發普及에 많은 實現을 가져왔으며 이 分野에 많은 興味를 갖게 하는 것 또한 중요한 觀心이 아닐 수 없다.

從來 高性能의 可變速 驅動系의 大部分은 直流 Leonard System이며 機械의 整流構造로 인한 保守面의 問題는 있지만 鐵鋼壓延, 工作機, 抄紙機 등 高速應答이나 높은 精密度의 制御를 요구하는 應用面에 이용되어 왔다. 한편, 交流 可變速 驅動系는 保守面에서 우수하며 大容量化도 直流機에 比하여 有利하지만 制御性, 效率, 經濟性面에서 多少 뒤진다.

그런데 最近 몇 年 동안 電力用 半導體 素子の 進歩, 制御系理論 및 構成의 發達 등에 의하여 直流 變速 驅動에 代替될 수 있는 電動機 驅動系의 實用化가 이루어져 普及이 점차 增大되어가고 있는 實情이다. 또 에너지 節減을 目的으로 하는 可變速 驅動에는 交流 可變速 驅動系가 使用되고 있어 pump, blower, co-

mpressor 등에 널리 普及되어 왔다.

電動機의 可變速 驅動技術에서 가장 重要한 點은 電力用 半導體 素子 開發에 있다. 制御機能을 갖는 電力用 半導體 素子로서 從來 가장 널리 이용되어온 다이리스터(轉流턴-오프形)의 高電壓, 大電流化는 더욱 더 進歩되어 電動機 制御의 大容量化에 공헌한 외에도 1970年代 後半에는 GTO나 power transistor가 더욱 理想的인 電力制御素子로 알려져 보급되기에 이르렀다. 이러한 素子들의 發達は 電力變換器의 小型化, 高速化, 高周波化를 促進하여 電動機 可變速 驅動系의 性能向上에 크게 이바지하고 있다. 또한 最近 電動機 制御의 發展을 도와준 한가지 더 重要한 事項은 制御系의 高度化라고 할 수 있다. 制御의 高度化는 變換器 部分은 물론이고 誘導 電動機의 圓滑한 周波數 制御 혹은 벡터 制御 등 變換器와 電動機 組合의 性能向上, 또한 速度制御系의 構成 즉, 閉루우프 制御에 관한 것 등 여러가지 側面에서 進行되어 왔다. 이것들의 進歩 背景으로서는 理論的인 面外에 I.C, LSI 등의 制御系에서 演算에 이용되는 半導體의 開發이 보다 重要하며 特히 앞으로는 마이크로 프로세서(microprocessor)의 應用을 中心으로 하는 高度化가 이루어질 것으로 생각된다.

\* 正會員 : 東國大 工大 電氣工學科 教授

## 2. 可變速 電動機 驅動系의 動向

從來 電動機의 可變速 驅動方式의 大部分은 直流 電動機를 사용한 다이리스터-레오나드 방식이었으나 直流電動機는 整流子 및 브러시 등의 接觸 通電 및 마모 부분을 갖게 되어 保守 및 安全性에 難點이 있다. 이러한 缺點 없이 交流電動機를 可變速驅動 하는 것이 오래 전부터 要望되어 왔고 여러 觀點에서 研究가 持續되어 왔다.

交流可變速 驅動은 直流電動機의 可變速 驅動에 比해서 (가) 電動機의 最高速度 및 容量의 增加, (나) 電動機의 設置環境條件의 緩和, (다) 維持 및 保守의 간편화 등의 特徵을 갖는다. 이러한 特徵은 直流電動機가 갖고 있는 브러시와 整流子가 交流電動機에는 없으므로 制御系의 構成上 바람직한 것이라 할 수 있다.

交流可變速 驅動<sup>[1]</sup>의 最近 動向에는 크게 2 가지 흐름이 있는 데 하나는 從來 直流機가 利用되어 온 것이 대체되어 交流可變速 驅動을 適用하고자 하는 것으로 우수한 制御特性이 要求되어 지며 또 다른 하나의 흐름은 定速驅動에서도 아무런 支障없이 에너지를 節減할 수 있기 때문에 省 에너지로 可變速 驅動化하자는 것이다. 한편 使用者의 立場에서 본 交流可變速 驅動의 問題點은 그 방식이 極히 多種, 多樣하고 또한 각기 다른 特徵을 지니고 있어 目的에 符合되게 最適의 選擇을 해야 할 必要가 있다.

直流可變速 驅動에서 電鐵을 除外한 大部分의 直流 電動機는 他勵磁 電動機이며 電力變換回路도 位相 制御 整流器나 쇼커回路에 限定된다. 그런데 交流可變速 驅動의 電動機로는 籠型 誘導電動機, 捲線型 誘導電動機 및 同期電動機가 있고 電力 變換回路로서는 電壓形 인버터, 電流形 인버터, 싸이크로 콘버터 등이 있으며 더욱 電壓變換器의 制御方式까지를 包含하면 그 組合은 莫大하다.

### 2-1 直流機 代替를 위한 可變速 驅動系

直流機 代替의 高性能 制御用 驅動裝置로 이용되는 것은 無整流子 電動機와 籠型 誘導電動機의 可變 周波數 制御가 있다. 無整流子 電動機는 電源이나 電動機의 逆起電力으로 轉流시키기 때문에 回路構成도 간단하며 制御性能도 우수하여 製紙工業을 비롯한 여러 分野에 널리 쓰여지고 있다. 無整流子 電動機는 自制式이므로 位置檢出器를 必要로 하지만 最近에는 電動機의 電壓에서 位置를 檢出하는 방식의 實用化가

이루어짐에 따라 더욱 向上된 性能을 나타내고 있다.

인버터로 驅動되는 籠型 誘導電動機系에서는 周波數 制御로 精密한 速度制御가 實用化되었으며 過渡特性에 우수한 벡터制御의 技術이 開發되어 實用化에 이르게 되었다. 벡터制御는 籠型 誘導電動機의 一次電流를 磁束成分과 토크 成分으로 나누어 獨立의 方式로 制御하는 方式로 直流電動機와 같은 形態의 原理로 制御되는 우수한 長點을 갖는다.

### 2-2 에너지 節減을 위한 可變速 驅動系<sup>[2]-[4]</sup>

에너지 節減用 可變速 驅動으로서의 펌프, blower, compressor 등에 應用되어 널리 普及되어 있다. 원래는 大容量의 것에서 시작되었지만 最近에는 電力 料金の 引上和 함께 小容量의 것에 까지 適用되고 있다. 驅動方式으로는 籠型 誘導電動機의 可變 周波數 驅動, 셀비어스 方式, 無整流子 電動機가 이용되고 있다. 특히 大型 fan과 mixed flow pump 등에 사용하는 大容量(3000A, 4000V의 例)의 경우 可變速 驅動系로 (가) 電流形 인버터, (나) the wound rotor slip recovery system, (다) the synchro-converter (or brushless D. C. system)을 各各 사용하여 比較分析한 Toshiba international corporation의 研究資料에<sup>[5]</sup> 의하면 初期 施設備는 4極과 6極 電動機를 基準으로 할 때, (가)의 경우 110~130 [\$/hp], (나)의 경우 75 [\$/hp]이며, (다)의 경우 100~120 [\$/hp]이 되며 速度에 대한 效率特性은 그림 1과 같다.

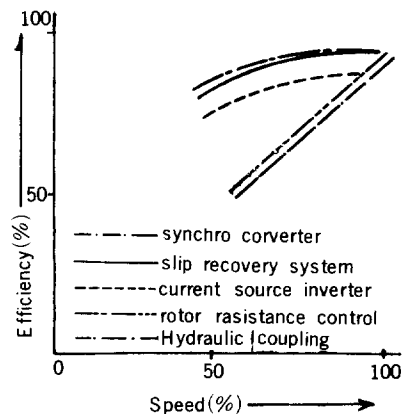


그림 1. 驅動方式에 따른 速度-效率特性

여기서 大容量의 fan, 펌프 등의 應用分野에서 施設備나 效率를 감안할 때 slip recovery system이 가장 效果의인 結果로 分析이 되지만 이들 各 驅動系의

應用과 選擇을 위해서는 産業플랜트의 既存裝備, 速度制御範圍 및 精密度, 適用電動機 容量, 制動特性, 負荷의 種類, 加減速 時間, 並行運轉, 力率 등 複雜한 주위 여건을 고려해야 하기 때문에 이들의 最適如否는 현 時점에서 使用者가 留意 檢討해야 한다는 어려움이 있다.

### 3. 電力用 半導體의 開發

電力用 半導體 素子の 開發은 電力變換裝置로 電動機를 驅動하는 可變速 驅動技術은 電力用 半導體 素子開發에 크게 依存하고 있다.

表 1. 電力用半導體素子の 種類 및 電壓·電流定格

種	類	定格電壓·電流		턴온, 오프時 動作周波數
Diode	一般用	3000 V	3500 A	數 10 kHz
	高速用	3000 V	1000A	
轉流 Turn on, off Thyristor	一般逆阻止形	4000 V	3000A	2~400 μs
	光 Trigger 形	4000 V	1500A	
	高速逆阻止形	1200 V	1500A	20 μs
		2500 V	200A	30 μs
	逆阻止形 GATT	2500 V	1000A	30 μs
	1200 V	400A	5 μs	
Triac		1200 V	1000A (rms)	
自己消弧形 Thyristor	GTO	2500 V	1000A (可制御)	數 10 KHz
	SI Thyristor	2500 V	100A	數 10 KHz
Power Transistor	Single Type	140 V	250A	~100 KHz
		400 V	40A	
		630 V	50A (GAT)	
	Darlington Type	1000 V	400A	數 KHz
	SI Transistor	800 V	60A	> 100 KHz
V·MOS·FET	400 V	11A	> 100 KHz	

表 1 은 最近 電力用 半導體 素子の 最大定格, 概要를 나타낸 것이다. 大容量의 電力用 半導體素子是 다이리스터가 中心을 이루고 있으나 最近 中小容量에 있어서 GTO, power transistor의 發達이 주목할 만한 動向으로 나타나고 있다. 다이리스터는 일반적으로 定格電流의 20 倍에 가까운 尖頭電流에도 견딜 수 있는 能力이 있으므로 可變速 驅動用 變換器에 특히 적합하며 한편으로 高電壓, 大容量化가 이루어지고 있으나 自己消弧能力이 없다는 缺點이 있어 아직 高周波化하는 데에는 限界가 있다.

GTO는 게이트 信號만으로 通電을 on, off 할 수 있다는 特徵을 가지고 있으며 表 1에서 알 수 있듯이 比較的 大電力을 다룰 수 있다는 點에서 우수한 素子이며 制御裝置의 小型化가 가능해 진다. 또한 高速 device로서 인버터의 高周波形 PWM의 高性能化가 가능하며 交流可變速 驅動用 變換器로서 獨特한 分野를 차지하고 있다. 한편, 缺點으로는 on, off 利得이 적다는 點과 빠른 on, off 게이트 信號

를 低電壓 回路로 실현시키지 않으면 안된다는 사실이다.

Power transistor는 다이리스터에 비해서 3倍 정도 의 큰 wafer面積을 必要로 하지만 小容量으로 高周波 動作을 要求하는 分野에서는 高度의 制御能力을 활용하는 可變速 變換器로서 매력있는 存在가 되고 있다. 아울러 高周波에서만 動作이 可能的한 PWM이 可能하며 現在 50kw 정도까지 實用化가 되고 있다. 또한 장래성이 있는 素子로서는 매우 높은 周波數에서 動作하는 靜電誘導形 素子나 MOSFET形 素子가 있고 容量이 커진다면 劃新的인 장치 開發이 될 것으로 보인다. 또 光 다이리스터의 開發 普及은 任意的 多樣한 回路構成이 可能케 된다는 點에서 興味롭게 기대된다.

### 4. 制御系 構成의 高度化<sup>[6]</sup>

電動機의 可變速 驅動系에서 制御精密度, 動特性

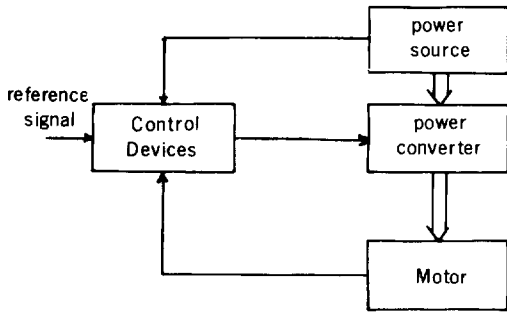


그림 2. 可變速驅動制御系

의 빠른 應答의 要求는 最近 들어 점점 높아 가고 있으므로 이에 符合되는 制御裝置의 開發도 급속한 발전을 하고 있다. 그림 2는 可變速 電動機 制御系의 概念을 나타낸 것으로 電力 變換器는 負荷에 접속된 電動機가 要求되는 動作을 할 수 있도록 制御된 電力을 供給한다. 制御裝置는 電源 및 負荷에서의 檢出信號(電壓, 電流, 토오크, 速度 및 位置 등)와 基準信號를 比較하여 電力變換器에 적절한 게이트 信號를 보낸다. 制御의 目的은 토오크, 速度, 位置 등을 正確하게 하거나 高速應答으로 制御하는 것 외에 이와 관련된 電動機의 토오크 脈動의 輕減, 力率의 改善, 에너지 效率의 向上 등도 고려되어 진다.

制御裝置로서 從來에는 analog 回路가 주로 이용되어 왔지만 制御系가 高度化됨에 따라 digital化 되는 傾向에 있으며 最近에는  $\mu$ -processor의 도입이 시도되고 있다. 制御裝置로서  $\mu$ -processor를 이용하는 경우 制御의 機能은 hardware의 設計만이 아니고 software의 開發까지도 可能해지는 特徵이 있다. 또  $\mu$ -processor를 이용하는 경우의 또 하나의 利點은 制御系의 不必要한 別途의 機能 即 sequence, trouble shooting, monitoring, rocking 등의 機能도 特別한 hardware를 附加하지 않고도 수행될 수 있다는 點이다. 可變速 制御系 構成의 高度化는 여러가지 部分에서 이루어지고 있다.

電力變換器 部分에서는 位相制御整流器 또는 싸이크로 콘버터에 있어서 循環電流制御 또는 非對稱點弧制御에 의한 力率改善, 變換器의 多重化에 의한 入出力 電流波形的 改善 등이 있다. 電力變換器와 電動機의 組合部分에서는 PWM 인버터에 의한 토오크 脈動의 輕減, 無整流子 電動機의 轉流餘角에 의한 力率 및 效率의 向上이 있으며 또한 籠型誘導 電動機의 vector 制御가 있다. 또 可變速 驅動系에서 閉루우프 制御에 대해서 생각하면 다음과 같다.

速度制御系를 例로 든다면 檢出量으로서 電動機의 電流와 速度가 있으며 各各 電流루우프와 速度루우프가 이루어진다. 이들 루우프의 補償裝置로는 一般的으로 PI controller가 이용되어 制御精密度 및 動特性의 向上이 도모되어 진다.

PI controller는 analog 回路로 構成되어 있으나 最近  $\mu$ -processor化 되어지고 있다.  $\mu$ -processor를 制御루우프의 補償裝置로서 이용하는 경우 그 演算機能, 記憶能力을 살려 우수한 制御를 할 수 있다.

그 例로서 Ohmae<sup>[7]</sup> 등이 研究 報告한 다이리스터 레오나드 裝置에서 電流連續에 基礎를 둔 非線型性을 補償한 경우도 있다.  $\mu$ -processor를 이용한 可變速 驅動制御系의 개략적 構成은 그림 3과 같이 表現된다.

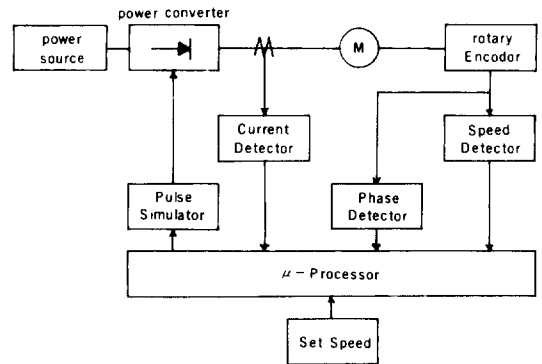


그림 3.  $\mu$ -processor를 이용한 可變速度系의 構成

$\mu$ -processor를 制御裝置로서 이용하는 경우 그 特徵은 다음과 같다.

- (1) 制御의 融通性이 增大되며
- (2) 制御系가 離散值系로 되며
- (3) hardware의 拘束이 적으며
- (4) 小型化와 生産價格이 低廉해 진다.

이와같은 特徵을 有效適切하게 活用함으로써 앞으로  $\mu$ -processor를 이용한 可變速 制御의 性能이 한층 向上되어 나갈 것으로 기대된다. 表 2는 可能한 制御 알고리즘을 나타낸 것이다.

Digital PID는 앞서 서술한 PI 制御이며 종래의 演算增幅器를 基本으로 하여 制御機能을  $\mu$ -processor의 알고리즘으로 代置한 것이다. Digital PLL은  $\mu$ -processor를 이용한 PLL 制御이며 定常誤差의 最小化를 目的으로 한 것이다 有限時間 整定制

表 2. 各制御 알고리즘의 種類 및 機能

制御 알고리즘	要求되는 機能	適用 例	主要 制御 機能	備 考
Digital PID	數 值 演 算	多 數	過 渡 特 性	實 用 化 中
Digital PLL	數 值 演 算 모 - 드 切 換	電 動 機 速 度 制 御	速 度 의 精 密 度	理 論, 實 驗 研 究
有 限 時 間 整 定 制 御	數 值 演 算 記 憶 모 - 드 切 換	電 動 機 速 度 制 御	整 定 時 間	理 論, 實 驗 研 究
最 短 時 間 制 御	數 值 演 算 記 憶	電 動 機 速 度 制 御	整 定 時 間	理 論, 實 驗 研 究
모 델 規 範 制 御	數 值 演 算 記 憶 論 理 判 斷	Sliding mode 에 의 한 電 動 機 速 度 制 御	parameter 變 動 에 따 른 感 度	理 論, 實 驗 研 究
適 應 制 御	數 值 演 算 記 憶 論 理 判 斷	앞 으 로 의 課 題	parameter 變 動 에 따 른 適 應	앞 으 로 의 課 題

御는 制御系가 時間 離散值로 動作하는 것을 이용하여 有限 整定 應答(finite settling response)을 實現한 것으로 이것은  $\mu$ -processor를 digital filter 로서 利用한다.

最 短 時 間 制 御는 最 適 制 御 理 論 에 基 礎 를 두 어 狀 態 벡터 規 劃 을 써 서 最 短 時 間 應 答 을 구 하 는 方 式 이 다. 그 러 나 모 든 狀 態 變 數 가 正 確 히 檢 出 되 는 것 은 아 니 므 로 觀 測 器(observer)가 必 要 로 된 다(그 림 4 참 조).

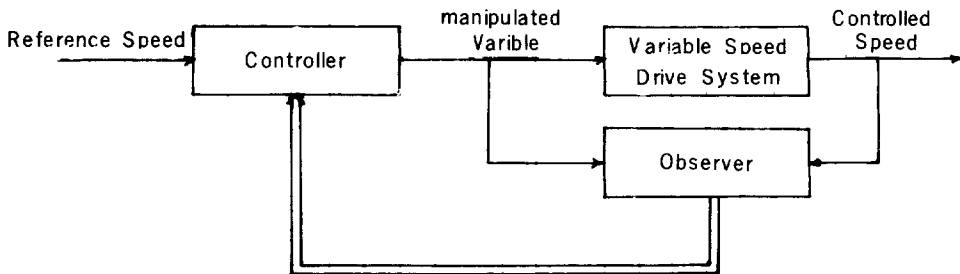


그림 4. 最 短 時 間 制 御 系 의 構 成

모 델 規 範 制 御는 sliding mode 制 御 를 電 動 機 制 御 에 應 用 하 여 制 御 系 統 의 파 라 미 터 變 動 등 에 의 해 制 御 性 능 이 變 하 지 않 는 Robust control 을 目 的 으 로 한 것 이 다.

適 應 制 御는 電 動 機 制 御 의 最 終 目 標 이 며 適 應 制 御 와 最 適 制 御 가 同 時 에 이 룩 되 는 것 이 바 람 직 하 며  $\mu$ -processor 의 進 步 와 더 불 어 많 은 研 究 가 期 待 되 는 分 野 이 다.

### 5. 맺 는 말

可 變 速 電 動 機 制 御 系 는 交 流 可 變 速 驅 動 裝 置 의 본 格 적 인 普 及, 電 力 用 半 導 體 의 發 展,  $\mu$ -processor 의 導 入 등 3 가 지 分 野 의 有 機 的 인 結 合 에 의 해 새 로 운 局 面 에 들 어 서 고 있 다.

電 動 機 驅 動 方 式, 電 力 用 半 導 體 의 種 類, 制 御 策

고리증이 各各 多樣化되며 이들로 組合된 制御 시스템의 分類는 날로 增加되는 추세에 있으며 이러한 現象은 技術進歩에 따라 더욱 複雜 多大할 것으로 豫된다.

여하튼 電動機 制御分野에 관련된 많은 技術人들은 좀더 精密하고 實用的인 技術開發을 위하여 지금도 끊임없이 노력하고 있다는 점을 記憶해야 겠다.

#### 參 考 文 獻

- [1] B.K. Bose; "Adjustable Speed AC Drive Systems," Proc. of the IEEE, vol. 70, pp.116-135, 1982.
- [2] F.N. Klein et al; "Energy Conservation Through the Use of Adjustable Frequency Drives in Industrial Applications," in Conf. Rec. 1980 Annu. Meet. IEEE Ind. Soc. pp. 545-548, 1980.
- [3] E. Leo Douville et al; "Selection and Application of Variable Speed Motor Drive Systems," pp.514-518, 1980.
- [4] 平山勝巳外; "電氣機器における省資源・省エネルギー," 日本電氣學會雜誌, vol. 101, pp. 416~444, 1981.
- [5] C.P. LeNone et al; "Large Adjustable Speed Drives," IEEE Trans., vol. PAS-101, pp.1229-1235, 1982.
- [6] 原島文雄; "電動機制御における現狀と將來の動向," 日本電氣學會雜誌, vol. 102, pp. 33~37, 1982.
- [7] T. Ohmae, et al; "A Microprocessor-controlled Fast Response Speed Regulator with Dual Mode Current Loop for DCM Drives," IEEE Trans., vol. IA-16, pp.388-394, 1980.