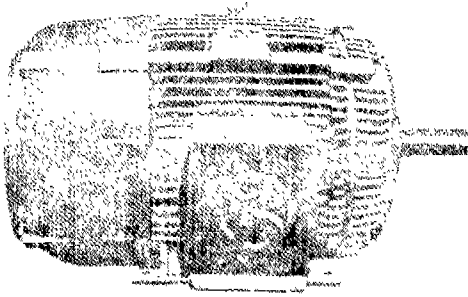


電動機의 電氣節約

Energy Saving Method of Motors

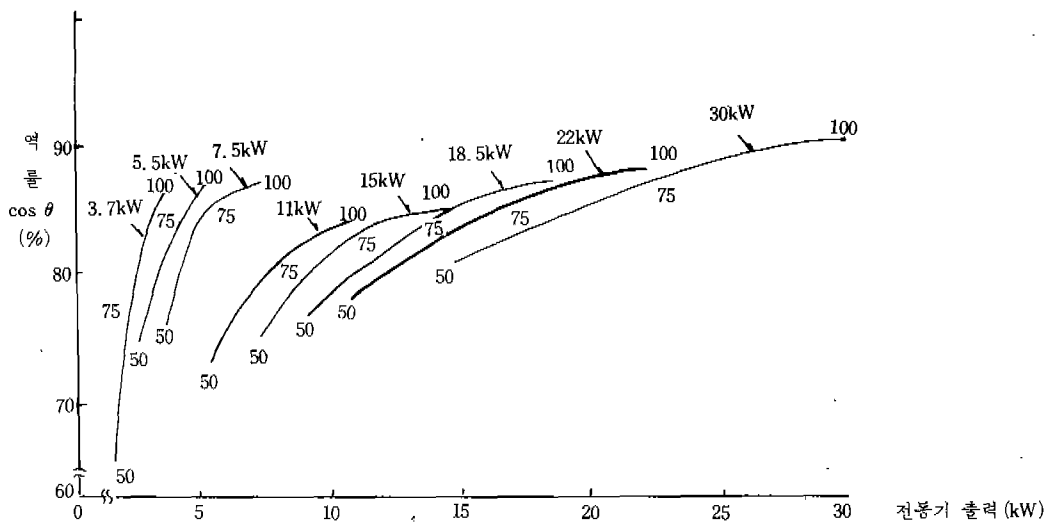


朴 鎬 哲
에너지管理公團

工場에서의 電力使用은 各種 機械設備의 電力源이 되고 있는 電動機에서의 電力消費 比重이 매우 높다. 따라서 電動機의 電氣節約 노력이 주목되고 있다. 電動機는 電氣 에너지를 動力 에너지로 變換하는 設備로 그 種類와 特性도 매우 다양하며 또 電動機가 구동시키는 機械設備도

各各 特性이 있어서 電氣節約을 위해서는 各設備의 全体的인 特性과 技能의 檢討가 필요하다.

그러나 대부분의 경우는 電動機負荷를 조작, 관리하는 작업자들에게 作業管理面에서 電氣節約 노력을 기대할 수 없을 뿐 아니라 設備의 選定時에도 性能(效率), 特性, 신뢰도 등 品質보



〈그림 1〉 電動機의 부하별 역률관계

다는 가격이 낮은 低性能의 電動機 附着이 많고 또한 전동기가 구동하는 機械部門의 軸動力 減少를 위한 研究, 檢討가 부족한 點 등의 문제점을 갖고 있다.

이러한 점에서 本文에서는 電動機의 적정관리와 選定, 機械設備의 制御特性을 檢討해 본다.

1. 負荷力率 改善

電動機는 誘導負荷로서 定格負荷에서는 보통 力率이 80% 程度되지만 低負荷에서는 그림 1과 같이 力率이 극히 낮아진다. 따라서 各電動機에 적정용량의 콘덴서를 개별로 부착하여 力率을 改善함으로써 線路, 變壓器에서 발생되는 主울 熱損을 最少化하도록 해야겠다.

各 容量에서 적정 콘덴서용량은 표 1과 같다.

2. 配線 굵기의 適定化

電線에서의 損失은 電流密度와 관계된다. 일

〈표 1〉 전동기 용량별 적정 콘덴서 용량

出力 [kW]	콘덴서 용량	
	μF	kVA
0.4	15	0.23
0.75	20	0.30
1.5	30	0.45
2.2	40	0.60
3.7	50	0.75
5.5	75	1.13
7.5	100	1.51
11	150	2.26
15	200	3.02
22	300	4.52
37	500	7.54
40	500	7.54
45	600	9.04
55	750	11.30

반적으로 電線의 굵기선정은 電線의 許容電流表에서 決定하는 것이 보통이나 電線의 길이가 긴 경우에는 케블의 經濟的 굵기 선정법에 依하는 것이 效果적이다.

케블의 法則은 電線의 單位 길이를 基準으로 해서 1年間 電線에서 發生하는 損失電力의 金額과 設置時 單位 길이의 投資費에 對한 이자 및 상각비 등의 경비가 동일하게 되는 굵기를 配線하는 方式이다.

3心 600[V] CV 케이블의 경우 物價表에 의한 대략의 電線價格은

(電線 1m當價格) = $78 \times (\text{電線 굵기 } \text{mm}^2) + 400$ 원으로 된다. 반면 電線 1m에서 發生되는 손실은 (電線 1m當 損失電力) = $I^2 R \times 10^{-3}$ [kW]

$$= I^2 \frac{1}{55} \cdot \frac{1}{A} \times 10^{-3} \text{ [kW]} \text{이다.}$$

따라서 金額은

① 電線 1m當 投資費에 대한 이자 및 상각비 등의 費用

$$W_1 = (\text{電線價格}) \times (\text{이자 및 상각비 比率}) \\ = (78A + 400) \times P \text{ [원/년]}$$

② 電線에서 發生되는 年間 損失電力의 金額 $W_2 = (\text{損失電力}) \times (\text{年間稼動時間}) \times (\text{電力單價})$

$$= (I^2 \cdot \frac{1}{55} \cdot \frac{1}{A} \times 10^{-3}) \times H(\text{h/y}) \times M(\text{W/kWh})$$

따라서 $W_1 = W_2$ 이면

$$(78A + 400)P = I^2 \frac{HM}{55A} \times 10^{-3}$$

이를 정리하여 단면적 $A(\text{mm}^2)$ 을 구하면

$$78A^2 + 400A - \left(\frac{I^2 HM}{55P} \times 10^{-3} \right) = 0$$

$$A = \frac{-200 + \sqrt{200^2 + 78 \times \left(\frac{I^2 HM}{55P} \right) \times 10^{-3}}}{78} \text{ [mm}^2\text{]}$$

가 된다. 만일 계산결과 最大電流가 電線의 許容電流를 넘게 되면 허용전류에 의해 決定한다.

(계산예) 220[V], 50[HP] 電動機의 平均負荷가 80[%]이고 稼動시간은 6000[h/y], 이자율 15[%], 상각비 10[%]일 때 經濟적 電線굵기는? (단 45[W/kWh]이고, 平均역률은 75[%])

$$\text{최대전류} = \frac{37}{\sqrt{3} \times 0.22 \times 0.8} = 121.4 \text{ [A]}$$

$$\text{평균전류} = \frac{37 \times 0.8}{\sqrt{3} \times 0.22 \times 0.75} = 103.6 \text{ [A]}$$

$$A = \frac{-200 + \sqrt{200^2 + 78 \times \frac{103.6^2 \times 6000 \times 45}{55 \times (0.1 + 0.15)} \times 10^{-3}}}{78}$$

$$= 49.48 \Rightarrow 50 \text{ [mm}^2\text{]}$$

따라서 최대전류 121.4[A]의 허용전류에 의하면 38[mm²] 정도로 가능할 수 있으나 경제적인 면에서 50[mm²] 전선을 配線토록 한다.

3. 電壓의 制御

電動機의 損失은 銅損과 鐵損이 内部에서 發生되는 損失의 85% 程度를 차지하고 있다.

銅損은 固定子 권선과 回轉子에서 전류의 흐름에 따른 抵抗損으로 보통 負荷電流의 제곱에 比例하고 負荷의 토크가 電壓에 대하여 일정하다면 전압의 제곱에 逆比例한다고 볼 수 있다.

한편 철손은 회전자계에 의해서 發生하는 히스테리시스損과 渦電流損으로 전압의 제곱에 비례한다.

$$W = (k_1' + \frac{k_2'}{f}) V^2 + (r_1 + r_2') \frac{\omega_0^2 T^2}{3 V^2} \text{ [W]}$$

k_1', k_2' : 와전류, 히스테리시스 손실정수

r_1, r_2' : 각상의 1차, 2차의 1차 환산 저항치 [Ω]

ω_0 : 회전자계 각속도

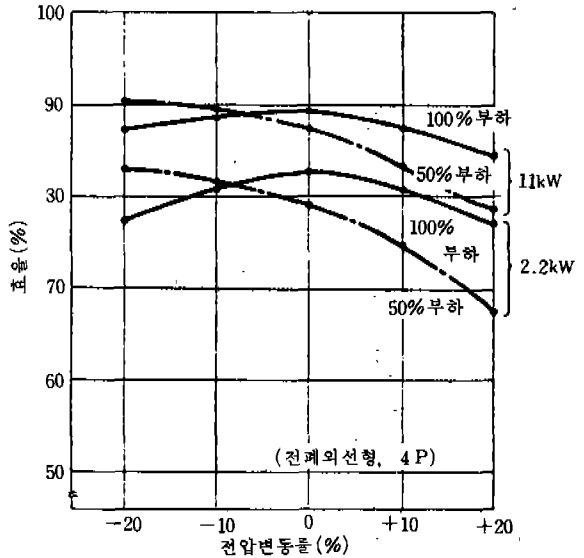
f : 전원주파수

T : 발생토크

이를 미분하여 $dw/dv = 0$ 인 조건을 구하면

$$V = 4 \sqrt{\frac{r_1 + r_2'}{3(k_1' + \frac{k_2'}{f})}} \times \sqrt{\omega_0 T} \text{ [V]}$$

가 되어 손실이 최소인 전압은 $\sqrt{\omega_0 T}$ 에 비례하고 부하율이 감소함에 따라 低下함을 알 수 있고 전압변동에 따른 效率의 變化는 그림 2와 같다.



〈그림 2〉 유도전동기의 전압변동과 효율에

그림 2에서 보는 바와 같이 定格負荷에서는 定格電壓에서 最大效率를 나타내고 低負荷에서는 低電壓에서 效率가 좋아짐을 알 수 있다.

그러나 負荷가 變動되는데 速應하여 電源電壓을 變化시키는 것은 不可能하다.

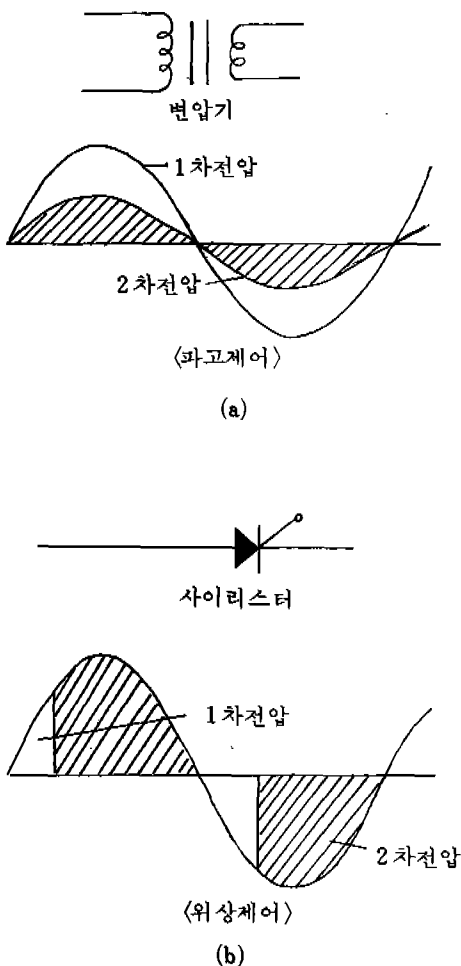
이러한 문제점이 最近 電力用 半導體의 活用으로 해결할 수 있게 되었다.

半導體의 電壓制御方式은 그림 3과 같다.

그러나 實際의 波形은 電動機가 誘導負荷이므로 그림 3의 (b)와 같은 형상이 아니고 파도현상에 의해서 그림 4와 같이 일그러진 파형의 전압이 전동기에 가해지고 負荷電流를 檢出해서 Gate 신호 위상을 조정함에 따라 그 폭을 변화시킬 수 있으며 따라서 實効電壓值가 變動될 수 있다.

따라서 이러한 제어방식은 전동기가 低負荷일 때는 低力率, 低效率이다 다소 개선되나 定格負荷에서는 제어장치의 損失때문에 미부착시 보다 낮아진다.

그러나 대부분의 電動機는 定格負荷에서 運轉되는 경우가 매우 적으므로 이와 같은 제어방식의 효과가 기대된다.



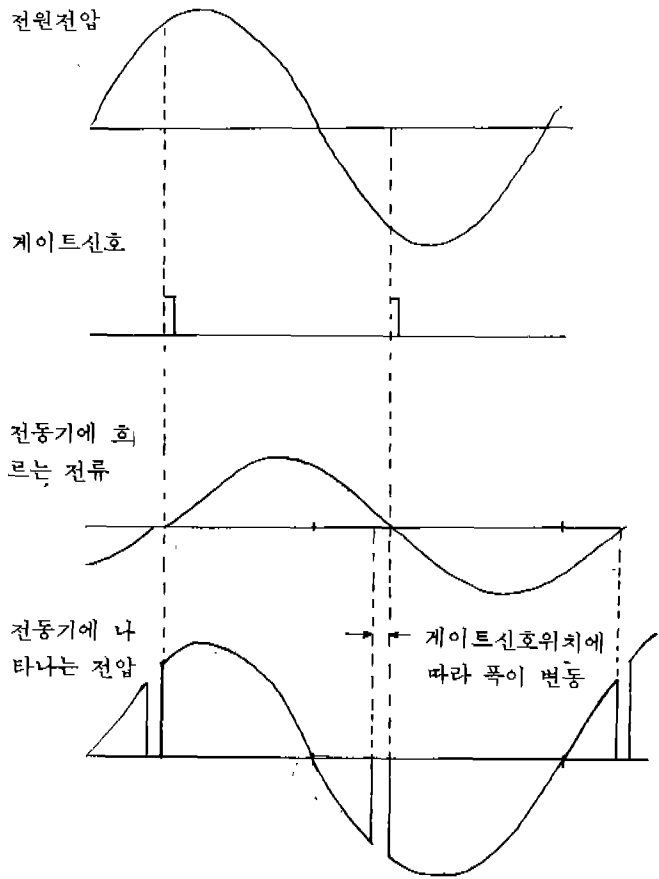
〈그림 3〉 電壓制御 比較

4. 回轉數 制御

電動機는 電力으로 回轉力을 얻는 기기인 만큼 回轉力을 필요로 하는 動力負荷를 回轉數와 關聯시켜 檢討하게 되면 電動機의 消費電力을 最少化할 수 있다.

動力負荷는 토크와 회전수의 곱으로 표시되며 또 토크는 그 자체가 회전수와 관련되므로 토크의 性質에 따라서

- ① 토크가 일정한 부하
- ② 토크가 회전수의 제곱에 비례하는 부하



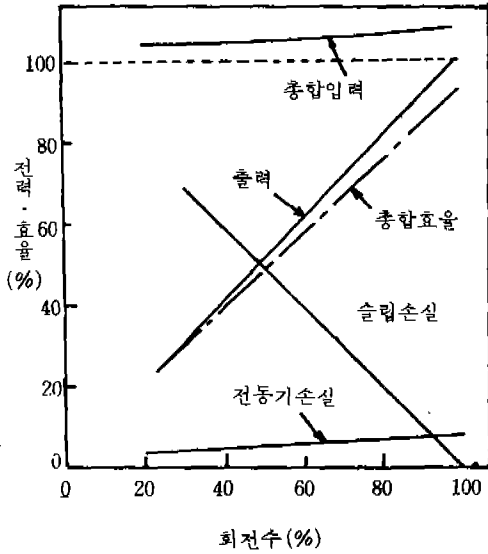
〈그림 4〉 전동기에 나타나는 전압

③ 일정출력의 특수부하로 나눌 수 있다.

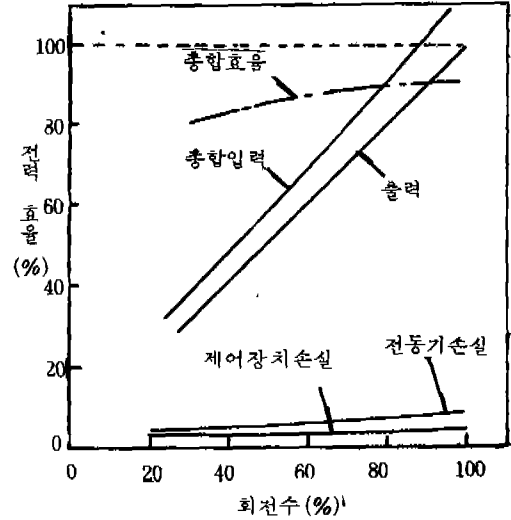
토크가 일정한 부하로는 크레인, 권상기 등의 중력부하나 컨베이어, 초지기 등의 마찰부하를 들 수 있고 토크가 回轉數의 제곱에 比例하는 負荷로는 펌프, 送風機, Blower等 流体移送 負荷가 代表的이다. 이 밖에 一定出力의 負荷로서 정절삭 공작기계, 전동차량 등이 있다.

표 2는 動力負荷의 種類를 나타낸다.

回轉數 制御裝置는 制御對象 機器의 필요로 하는 制御범위, 제어의 精度 및 機器의 容量과 制御回轉數等에 따라 선택되어야 할 것이나 같은 特性의 범위에서는 制御效率이 우수한 것



〈그림 5〉 정토크 부하시 특성(1)
(2차저항제어, VS 전동기)



〈그림 6〉 정토크 부하시 특성(2)
(VVVF, 셀비우스방식, 무정류자전동기)

〈표 2〉 動力負荷의 分類

負荷의 種類	實際負荷의 例	關係式	Graph
토크가 일정한 부하 (중력부하, 마찰부하)	크레인, 컨베이어, 초지기, 권상기, Compressor	$T = \text{일정}$ $P = kn$	
토크가 회전수의 제곱에 비례하는 부하 (유체부하)	펌프, fan, Blower, 송풍기	$T \propto n^2$ $P = kn^3$	
출력일정부하 (특수부하)	정전식공작기계, 전동차륜	$T \propto \frac{1}{n}$ $P = \text{일정}$	

을 선택해야겠다.

회전수 제어방법으로 과거부터 사용되어 오던 여러가지 방법이 있으나 最近 1次周波數 제어方式(VVVF)이 기존의 유도전동기를 그대로 두고 電源側에 제어장치 附着으로 간단히 設置가 가능하므로 많이 보급되는 추세이다.

과거에 가장 많이 사용되어 오던 권선형 유도전동기의 2次抵抗制御나 와전류 커플링 전동기(V.S motor) 및 유체 커플링 전동기는 低速에서 效率이 극도로 낮아지므로 電氣節約 側面에서 다른 制御方式으로 改善을 檢討해야 할 것이다.

그림 5와 그림 6은 回轉數 變化에 따른 特性을 나타낸 것이다.


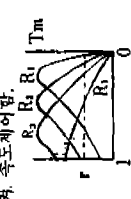
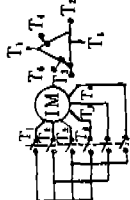
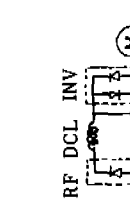
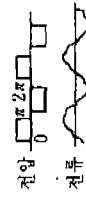
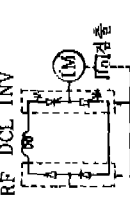
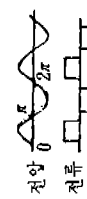
각종 電動機 回轉數 制御方式의 特性은 참고 표와 같다.

5. 其他

소형의 電動機에서는 별 問題가 되지 않으나 大容量이나 直流電動機에서는 電動機 冷却을 위해 별도의 電動機를 附着, 구동하게 된다. 이러한 경우는 主電動機의 溫度를 감지하여 冷却用 電動機를 管理하는 것이 効果적이다.

이 밖에 各種의 機械設備를 自動化하여서 空運轉 時間을 最少化함으로써 不必要한 電力損을 줄여야겠다.

〈參考表〉 電動機의 回轉數 制御 特性

명칭	전동기	사이리스터변환장치		주회구성	제어방식	특징	용도(실제)
		주파수 제어	회전속도 제어				
2차저항제어	권선형 IM (IM:유도) 전동기				2차회로에 저항을 변화시켜 속도제어함. 	1) 2차전력이 저항에서 소비되어 저속시 효율이 매우 나쁘다. 2) 속도제어 범위가 좁다. 3) 구조가 간단하고 가격이 적다 4) 보수가 간단하다.	크레인, 팬상기, 펌프, fan (6P-10,000kW)
극수변환제어	IM				동일권선의 접속변경으로 극수 변환	1) 극수변환에 의한 것이므로 속도 제어가 불연속이다. 2) 권선형의 구조가 복잡하다.	공작기계, 선박의 위저, 대형 펌프 (100kW이하)
1차 주파수	SM IM	自	他		역변환기의 轉流 사이리스터제어 V/f 변환 	1) 출력주파수 0~200Hz~1000Hz가 많다 2) 고정도의 속도제어 3) 부하의 부분적 절리 및 제기동 가능 4) 역률, 효율 양호 5) 보수성, 내환경성이 우수	고속구동방사기, 원심분리기 초기와인더 (용량이 클 때는 다수대로 구동)
	전압형인버터	自	他				
변환제어	IM	自	他		진여자전류와 slip주파수를 제어 	1) 출력주파수 0~120Hz가 많다. 2) IM의 최대 토오크점 부근에서 급속가역운전 3) 역률, 효율이 우수하고 4상한운전 4) 응답성 및 정도가 양호하고 광범위한 속도제어가 용이	1) 중·소용량의 급속가역운전 2) 사이리스터 레오너드가 응용되는 일반기계 철강 테이블 로라, 방사기, 초저와인더 펌프, 블로워 (4P-3000kW)
	전류형인버터	自	他				

명칭	진동기	사이리스터변환장치 주파수 제어	사이리스터변환장치		주회로구성	제어방식	특징	용도(실적)
			직류전류 부하측	교류전류 원천측				
직류사이리스터 모터	SM	자제	電 源 轉 流	電 動 機 轉 流		<p>상용교류를 직류로 변환후 SCR Commutator로 교류 전력을 공급, 속도제어는 직류전압을 변환하여 행한다</p> <p>직류전압 S상 R상 T상 R상전류 S상전류 T상전류 제어펄스</p>	<p>1) 환경정, 보수성이 우수하다 2) 직류기와 동등의 제어능력이 있다 3) 제어전각 β의 변환에 따라 제어가 4'상한 운전이 가능 4) 직류시스템에 비해 보호가 용이 5) 효율이 높다 6) 시동시에 어떤 진류수단 필요 7) 직류제어형가능, 보상권선제용가능</p>	<p>조지기, 상하수동용 펌프, 불로외 대형동기기의 스타터 (900kW)</p>
			他 勵 (電 源 電 流 및 電 動 機 轉 流)	他 勵 (電 源 電 流)				
교류사이리스터 모터	SM	자제	他 勵 (電 源 電 流 및 電 動 機 轉 流)			<p>진류주파수를 직접 진동기 주파수로 변환한다.</p>	<p>1) ~5) 직류사이리스터와 동일 6) 시동특성 양호 7) 부가기능에 의한 특성개선이 곤란 8) 직류식보다 변환효율 양호</p>	<p>직류사이리스터식과 동일 (500kW)</p>
			SM: 自 制	IM: 他 制				
정현파사이리스터모터	SM IM	SM: 自 制 IM: 他 制	他 勵 (電 源 電 流)		<p>(6상역병렬)</p>	<p>출력전류파형이 정현파제어이다.</p>	<p>1) 출력주파수 0~30Hz가 없다 2) 고압, 대용량에 적합 3) 토오크리플이 매우 작다 4) 역률, 효율이 양호 5) 응답성 정도가 양호 6) 급속가역 4상한 운전</p>	<p>1) 대용량의 증계속 운전 2) 급속가역운전 3) 리니어 모터 구동 (15000kW로 가능)</p>
			他 勵	他 勵				
I차전압제어	IM		他 勵			<p>사이리스터를 역병렬연결, 서로 정·역반사이클을 통전하는 무점정 교류 스위치사 용</p>	<p>1) 취급 및 보수가 간단 2) 저속에서 역률과 효율이 나빠진다</p>	<p>크레인, 압연포기, 컨베이어, fan, 분로워, 펌프 (200kW 정도)</p>

명칭	정전동기	사이리스터변환장치		주회로구성	제어방식	특징	용도(실제)
		주회로제어	전원측				
정자셀비우스	권선형 IM	自	他		INV제어인과 제어 인버터의 직류전압 변화로 도타의 2차전선에 흐르는 전류증강으로 가변속 	1) 최고회전속도는 동기속도 2) 최고 대용량기 제작가능 3) 효율 양호 4) 속도제어 범위가 좁은 경우에는 변환기용량을 저계할 수 있다. 5) 회생운전 불가능 6) 2차슬립전류가 1NV에 의해 전원에 반환	1) 속도제어 범위가 중·대용량기의 한방향을 겨우 2) 급속기동정지를 행하는 용도 3) 펌프, 볼트워, 밀 (6000KW - 420 rpm)
초동기 셀비우스	권선형 IM	自	他		동기속도 부근에서 전원측 전압의 轉流가 행해진다. 他의 전동기전압을 이용하여 전류를 행한다.	1) 최고회전속도 및 동기속도의 2배 정도 2) 교압, 대용량기제작 가능 3) 효율 양호 4) 한방향을전 및 동기속도이상 운전의 경우 변환기용량이 적어진다 5) 회생운전 가능	1) 중·대용량 고속기의 한 방향 운전 2) 펌프, 볼트워의 구동 3) 비철금속 압연기