

單相 誘導電動機의 效率的인 運轉을 위한 電力 制御器의 研究開發

論 文
34~2~1

The Development of the Power Controller for the Improvement of Efficiency of a Single Phase Induction Motor

任 達 鎬* · 張 錫 明** · 李 圭 淙***
(Dal-Ho Im · Seok-Myeong Jang · Gyu-Jong Lee)

Abstract

In this paper, a multiple pulse-width modulated ac chopper mode power controller using power transistor is described. The controller is capable of handling up to 1/2 hp of power at any lagging load power factor angle and getting the optimal efficiency operating characteristics. The development, study, and experimental evaluation of the controller with induction motor load is described.

1. 序 論

回轉機械 중에서도, 誘導電動機는 비교적 구조가 간단하여 취급 및 보수가 용이하며, 값이 저렴하다는 등의 여러 장점에 의해 一般 産業界에서 驅動裝置로 널리 사용되고 있다. 最近의 통계에 의하면, 發電되는 電氣에너지의 60% 이상이 電動機에 의하여 소비되고 있으며, 또한 使用되는 電動機의 거의 대부분이 誘導電動機이므로 에너지 절약의 입장에서 誘導電動機의 效率的인 운전은 매우 중요하다고 하겠다^{1)~3)}.

一般的으로, 誘導電動機는 定格負荷의 75%~100%의 범위에서 運轉될 때 最大의 效率를 낼 수 있도록 設計되기 때문에 낮은 負荷에서 運轉될 때에는 力率 및 效率이 현저히 低下되는 特性을 갖는데 이때 負荷條件에 따라 電動機의 入力電壓을 적절히 制御하므로써 效率 및 力率을 向上시킬 수 있으며, 이로써 電動機固有의 損失과 誘導性 負荷로 인한 電動機의 驅動系統에서 發生하는 無効分을 절감시킬 수도 있다.⁴⁾

本 論文에서는, 임의의 負荷條件下에서도 그 負荷의 크기에 따라 電動機의 入力電力을 最少가 되게 自動으로 制御하여 에너지를 절약하므로써 力率 및 效率을

向上시켜 항상 最適效率의 運轉特性을 維持할 수 있도록 하는 펄스幅 變調方式 電力制御器(P. W. M power controller)를 研究開發하고자 한다.

2. 誘導電動機의 效率的인 運轉

2.1 에너지 平衡式과 效率

電氣入力에너지를 機械出力에너지로, 電磁的으로 變換시켜 系統을 驅動시키는 에너지 變換裝置인 電動機는 아래와 같은 에너지 平衡等式을 만족하면서 運轉된다⁴⁾. 즉,

$$\text{電氣入力에너지} = \text{機械出力에너지} + \text{損失에너지} + \text{貯藏에너지} \quad (2-1)$$

또한 電動機의 運轉效率은 다음과 같다. 즉

$$\begin{aligned} \text{效率} &= \frac{\text{機械出力에너지}}{\text{電氣入力에너지}} \times 100 [\%] \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\text{損失에너지} + \text{貯藏에너지}}{\text{機械出力에너지}}} \quad (2-2) \end{aligned}$$

2.2 效率的인 運轉을 위한 方案

2.2.1 最適入力制御

에너지를 節約하고 系統의 效率를 좋게 하기 위해서는 式(2-2)에서, 一定한 크기로 運轉되는 負荷系統에서 機械出力에너지는 固定되므로 鐵損과 銅損 등의 損失에너지와 磁氣的인 貯藏에너지를 最少化하

*正 會 員: 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 王博

**正 會 員: 忠南大 工大 電氣工學科 助教授

***正 會 員: 夫田機械廠 前任研究員

接受日字: 1984年 1月 19日

여 運轉하지 않으면 않된다⁴⁾.

그런데 電動機의 主要 運轉特性으로, 機械的인 出力을 一定한 값으로 유지하면서 供給電壓을 定格으로부터 점차 감소시키면 效率는 線型的으로 향상되고 電動機의 電流는 점차 감소되다가 어느 特定電壓에서는 變曲하여 다시 증가하게 되는, 즉 電動機의 電流와 效率는 特定한 入力電壓에서 각각 最少값과 最大값을 갖게되는 것은 一般的으로 알려진 사실이며 N. Mohan 氏도 究명한 바 있다^{1),2),5)}.

(본 논문의 실험 결과인 4장의그림 15와 표 1을 참고)

여기서 電動機의 電流가 最小가 되는 점에서 效率가 最大가 됨은 負荷電流가 最少가 됨을 의미하며, 이에 의해 電動機內에 저장되는 磁氣에너지와 一般的으로 鐵損과 銅損으로 이루어지는 電動機의 損失에너지의 合도 最少로 된다. 따라서 임의의 負荷條件에서도 入力에너지를 自動으로 制御하여 電動機를 最高의 效率로 運轉하기 위해서는, 電動機의 負荷電流가 最少가 되도록 供給 電壓을 調整하여 最少入力 電力條件이 되도록 해야 하는데 이를 위하여 負荷電流를 制御信號로 使用할 수 있다는 결론을 얻어 이를 위한 電力制御器를 개발하고자 한다.

2.2.2 力率改善

電動機중에서도 가장 많이 사용되는 誘導電動機는 본질적으로 力率이 나쁘다는 결점이 있다. 變壓器와 달라 磁氣回路에 空曠이 있으므로 回轉磁界를 만들기 위하여 電源에서 供給해야 할 勵磁電流가 커지고 또 卷線의 누설 리액턴스도 있기 때문이다. 그러나 최적 효율로 電動機가 운전되기 위하여 入力電壓이 적절히 감소되면 磁化電流도 감소되며 力率 또한 改善될 수 있다⁷⁾.

3. 電力制御器(power controller)

電壓을 制御하는 方法으로, 一般的으로 널리 使用되는 사이리스터 (thyristor)의 位相制御方式은 큰 交流電力을 비교적 쉽게 制御할 수 있는 잇점이 있지만 位相制御의 固有한 特性으로 인한 몇가지 제한이 있다.

즉, 位相制御回路에서는 line power factor가 load power factor와 一致하는 것은 負荷電力이 최대가 될 때 뿐이며 항상 load power factor 보다 작게 되고 낮은 負荷에서는 그 차이가 더욱 심하게 된다⁶⁾.

高調波 特性에 관하여 볼 때에도 位相制御方式에서는 入力이나 負荷電流에서 매우 큰 歪曲과 高調波성분을 含有하게 되며 負荷가 작을 때는 매우 커진다⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 사이리스터에 의한 位相制御方式에 비해 回路의 應答速度가 빠르며 誘導性 負荷에서도 비교적 넓은 범위로 출력전압을 제어 할 수 있는 特性을 갖는⁷⁾ 電力用 다알링톤 트랜지스터 (darlington power transistor) 素子를 使用한 Multiple P. W. M 交流초퍼方式을 택하여, 出力電壓을 制御하므로써 電動機가 最適의 電力으로 驅動될 수 있게 하는 電力制御器 (power controller)를 설계하고자 한다.

3.1 시스템의 動作概要

그림 1에 電力制御器의 시스템의 구성 및 그 원리를 간략하게 블록선도로 설명 하였다.

즉, 처음 電動機에 電源을 投入하면 定常電流보다 數倍가 더 큰 起動電流가 흐르는데 이 큰 過渡電流로부터 電力用 트랜지스터 (以下, T_R)를 보호하기 위하여 起動電流保護回路는 처음 3초동안 繼電器를 작동시켜 T_R 양단을 短絡시킨다.

起動이 완료되어 電動機가 定常상태에 이르면 繼電器의 接点이 떨어짐과 동시에 T_R 에 의하여 電力이 制御되기 시작한다. 電力用 T_R 에 의하여 制御되기 시작하면 곧 이어 電壓減少命令 (initial decrement command) 신호가 발생되어 電動機供給電壓은 1

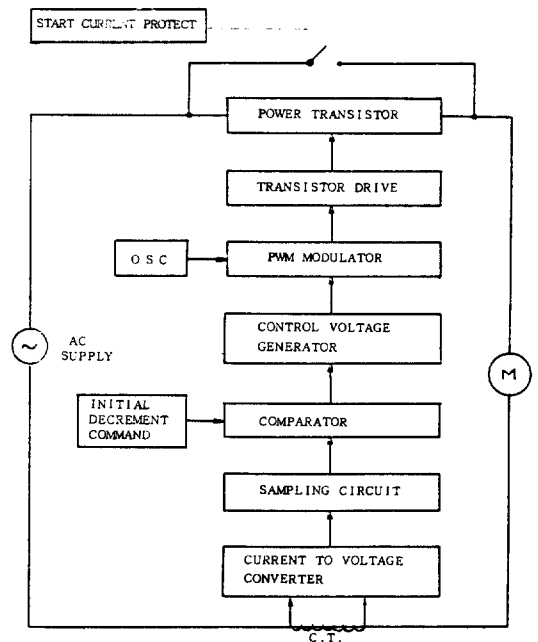


그림 1. 시스템의 블록선도

Fig. 1. System block diagram

[V]씩 減少된다. 이때의 負荷電流는 變流器(C. T)에 의하여 檢出되며, 電流-電壓變換器(current to voltage converter)에 의하여 直流電壓으로 變換된 후, 比較器(comparator)에 入力되어 電壓減少命令信號가 발생하기 이전의 電動機 電流와 比較된다. 그림 2에서와 같이 初期電流를 A라 하면 電壓減少후의 電流는 B가 되며 比較器에 의하여 比較된 후 $A > B$ 이면 電動機의 電壓은 다시 감소된다. 이때의 電流는 C가 되며 B와 C가 比較된 후 $B > C$ 이면 電壓은 또 다시 감소된다. 이와 같은 과정을 반복하여 G에까지 도달하면 $F = G$ 가 되어 電流는 減少 또는 增加하지 않고 安定상태에 이른다.

安定한 상태에서 電動機電流는 一定週기로 샘플링된다. 만일 負荷變動에 의하여 電動機의 電流가 增加하게 되면 곧 샘플링되어 比較된 후 電壓增加命令信號가 발생되며, 供給電壓이 增加되므로써 電動機電流는 減少하게 된다.

결국은 전동기의 부하상태가 變化하더라도 전류를

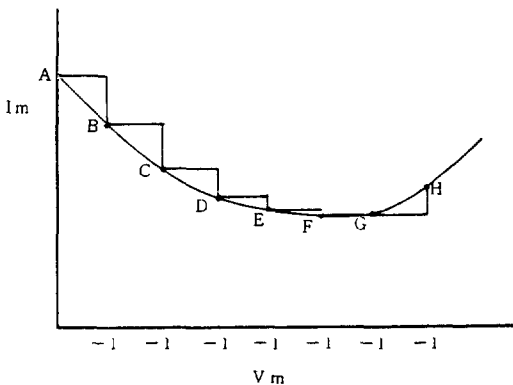


그림 2. 最少電流를 찾기 위한 制御方案

Fig. 2. Control scheme for optimal current

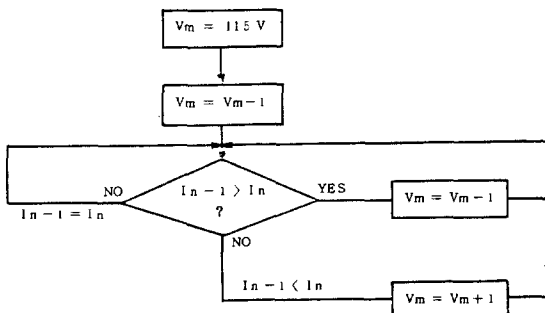


그림 3. 흐름선도

Fig. 3. Flow chart

最少로 維持시켜 전동기가 최소의 電力에너지로 運轉될 수 있도록 한다.

制御電壓發生器(control voltage generator)는 比較器에서 發生되어 나오는 增加 또는 減少命令에 의하여 적절한 直流制御電壓을 發生시켜 P. W. M 變調器(modulator)에 供給하게되며 變調器는 發振器에서 發生되는 搬送波와 直流制御電壓을 變調시키며 이 펄스폭이 變調된 信號는 T_R 驅動回路에 入力된다. 이 T_R 驅動回路는 펄스幅 變調된 信號를 電力制御 T_R 에 공급하여 초핑시키므로써 電動機에 供給되는 實効電壓을 制御할 수 있도록 한다. 그 과정을 흐름선도로 나타내면 그림 3과 같다.

3.2 各 블록의 回路構成 및 動作

3.2.1 單相電力을 制御하기 위한 트랜지스터 回路(single-phase power transistor circuit)

單相回路에서 交流을 초핑하기 위한 스위칭 回路로

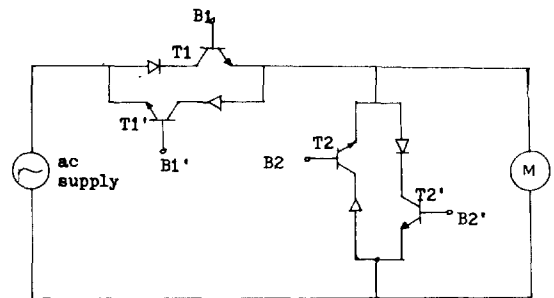


그림 4.1. 초핑을 위한 트랜지스터 회로

Fig. 4.1. Single phase power transistor circuit for chopping

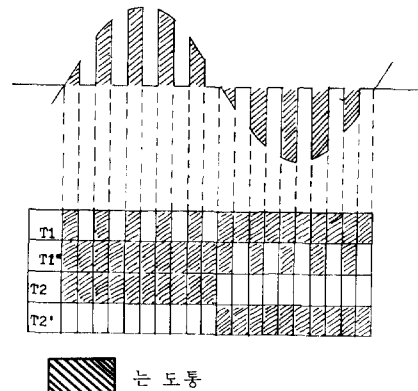


그림 4.2. 출력전압파형과 트랜지스터의 도통순서

Fig. 4.2. Output voltage waveform and conduction sequence transistor

서 그림 4-1과 같이 회로를 구성하였다. 트랜지스터 T_1 과 T_1' 는 負荷와 직렬로 접속되어 있으면서 入力電壓의 十半波와 一半波에서 각각 초핑하고, T_2 와 T_2' 는 병렬로 접속되어 誘導負荷의 경우 電流를 free-wheeling 시킨다.

이때 負荷에 供給되는 實効出力電壓은 초핑 T_R 의 時間比, $\delta = T_{on} / (T_{on} + T_{off})$ 에 의하여 變化되며 出力電壓의 一般式은 다음과 같다 (6), (7).

$$V(t) = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} V \sin \omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{v}{n\pi} \sin \cdot n\pi \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} [\sin(\omega_1 + n\omega_2)t - \sin(\omega_1 - n\omega_2)t] \right\}$$

단, ω_1 : 供給電源 角周波數
 ω_2 : 초핑 角周波數

우수高周波를 제거하기 위하여 초핑周波數 f_c 는 供給周波數 f_s 의 1.200 배로 되어야 하며 본 電力制御器에서는 1,200 (Hz) ($f_c = 20$)로 하였다.

3.2.2 트랜지스터 驅動回路(그림 5)

이 回路는 +, -電源 供給장치와 베이스驅動(Base drive) 回路로 構成되며 交流電源과 制御回路와의 分離를 위하여 opto-coupler 를 使用하였다.

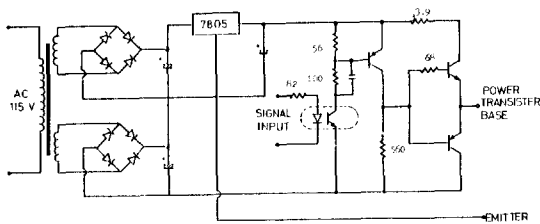


그림 5. 트랜지스터 驅動回路

Fig. 5. Transistor driving circuit

3.2.3 P. W. M 變調器와 發振器(그림6-1, 6-2)

函數發生器, IC 2에서 發生되는 반송파 (3각파) 는 IC 3에 의하여 증폭된 후 IC 4에서 直流制御電壓과 함께 變調된다.

펄스幅 變調된 信號는 IC 5를 통하여 T_R 驅動回路(그림 5)에 供給된다.

그림 6-2 는 P. W. M 變調器의 出力波形이다.

3.2.4 制御電壓 發生器(그림 7)

이 回路는 計數(counter) 回路와 D/A 變換回路로 構成되며 比較器로 부터 電壓減少 혹은 增加 命令信號를 받는다. 이때 比較펄스(compare pulse) 가

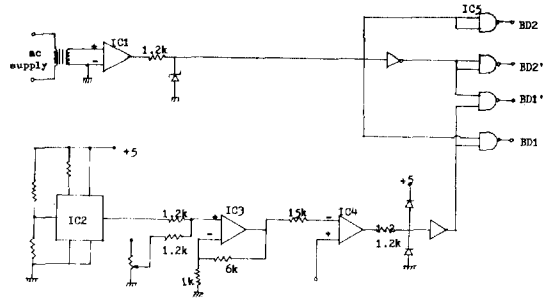


그림 6. 1. P. W. M 變調器, 發振器

Fig. 6. 1. P. W. M modulator and oscillator

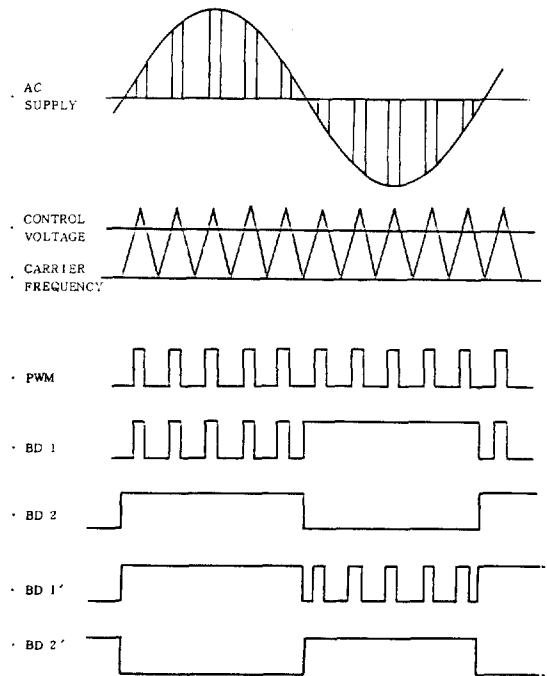


그림 6. 2. P. W. M 變調器의 出力波形

Fig. 6. 2. Waveforms of P. W. M modulator

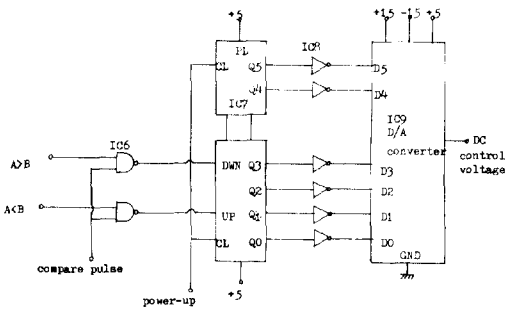


그림 7. 制御電壓 發生器

Fig. 7. Control voltage generator

入力되면 計數回路는 增加 또는 減少計數 (up or down count)를 하여 D/A 變換回路의 出力電壓을 變化시키므로써 적절한 制御電壓을 發生시킨다.

3.2.5 比較器(그림 8)

이 回路는 A/D 變換回路와 디지털比較器 (digital comparator)로 구성된다. 샘플링回路로 부터 入力된 直流電壓은 우선 A/D 變換回路에서 디지털 信號로 變換된 후 8비트 디지털 比較回路에 加해진다. IC12와 IC13에서는 지금 막 入力 데이터B와 이전에 샘플링되어 저장되어 있던 데이터A를 比較하여 A>B이면 電壓 減少信號를 A<B이면 增加信號를 그리고 A=B이면 零지신호를 만들어 制御電壓 發生器(그림 7)에 供給한다.

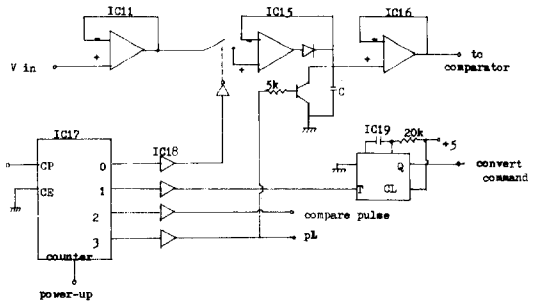


그림 9.1. 샘플링 回路
Fig. 9.1. Sampling circuit

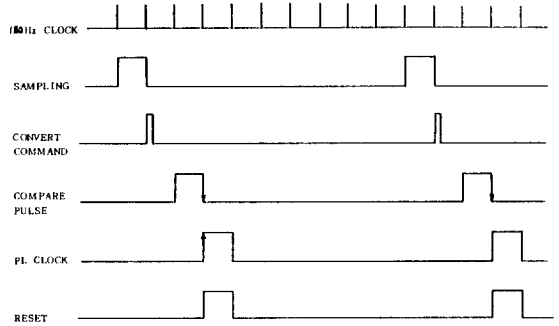


그림 9.2. 타이밍 圖
Fig. 9.2. Timing diagram

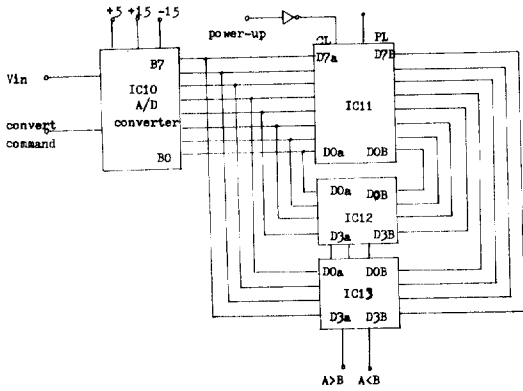


그림 8. 比較器 回路
Fig. 8. The circuit of a comparator

3.2.6 샘플링回路(그림9.1)

이 回路는 타이밍回路와 피크검출回路로 구성되며 入力된 直流電壓은 스위치S를 통하여, 샘플링 信號에 의하여 IC 16을 통하여 比較器(그림 8)에 供給된다.

3.2.7 電流-電壓變換器(그림10)

이 回路는 負荷電流를 檢出하는 變流器(C.T)와 雜音을 제거하기 위한 60 [Hz], band pass filter, 그리고 交流-直流 變換回路로 구성된다. 變流器에 의하여 檢出된 負荷電流는 IC 20에서 여과된 후 절대치增幅器 IC 21과 IC 22에서 直流電壓으로 變換되어 샘플링 回路(그림 9.1)에 供給된다.

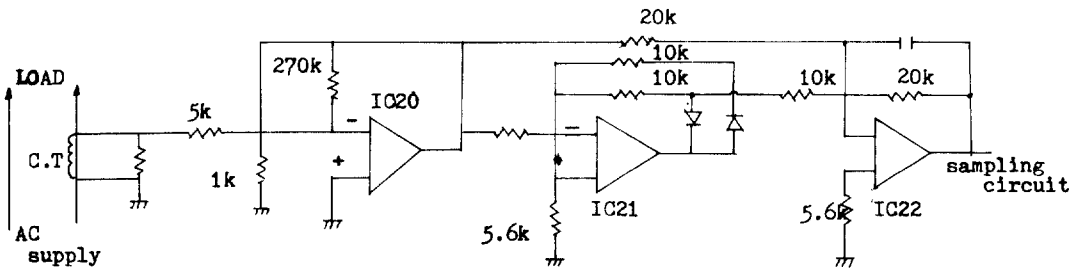


그림 10. 電流 - 電壓 變換器
Fig. 10. Current to voltage converter

3.2.8 起動電流 保護回路(그림11)

이 回路는 power-up one-shot 回路와 過電流 保護回路로 구성되며 電源이 投入되는 순간 IC 23은 3초동안 出力을 내어 繼電器를 작동시킨다. 이 계전기의 接点は 電力制御 T_R의 兩端을 단락하여 起動電流을 側路로 by-pass 시키므로써 出力制御 T_R을 保護하게 된다.

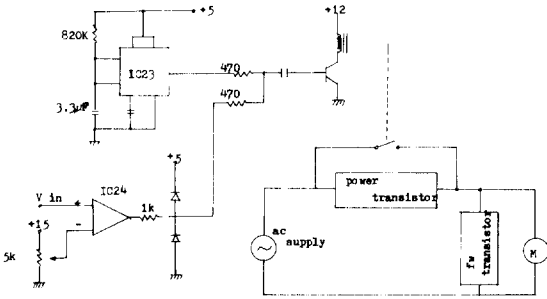


그림 11. 起動電流保護回路

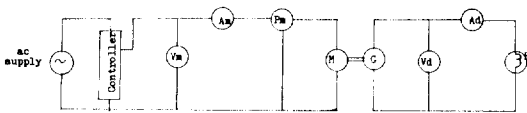
Fig. 11. Starting current protector circuit

4. 實驗

4.1 實驗方法

電動機의 特性試驗에는 單相, 1/3 [H·P], 全負荷 定格 115 [V], 5.8 [A], 1725 [rpm]의 分相起動型 誘導電動機를 使用하였으며 直流發電機를 電動機 軸에 機械的으로 接續하여 可變負荷로 利用하였다.

먼저 그림 12와 같이 試驗裝備를 구성하고 電力制御器를 手動모드(manual mode)로 한 다음 手動으로 入力電壓을 可變하면서 電流가 最少되는 點을 人爲的으로 找으며 定格負荷의 80%, 60%, 40%



- V_m : 交流 電壓計
- A_m : 交流 電流計
- P_m : 電力計
- M : 誘導 電動機
- G : 直流 發電機
- V_d : 直流 電壓計
- A_d : 直流 電流計
- R : 電球 負荷

그림 12. 實驗을 위한 回路

Fig. 12. Experimental circuit

에서의 電動機特性을 測定하였다.

다음 그림 12의 電力制御器를 自動모드(auto-mode)로 한 다음 負荷를 定格의 80%, 60%, 40%로 可變하면서 各各의 경우의 電動機 特性을 測定하여 電力制御器를 使用하기 전의 것과 比較하였다.

그림 13은 實驗裝備를 찍은 사진이며 그림 14-1, 2는 各各 電力制御器에 誘導負荷와 抵抗負荷를 接續한 경우의 電流와 交流電壓의 P. W. M 초핑波形이다.

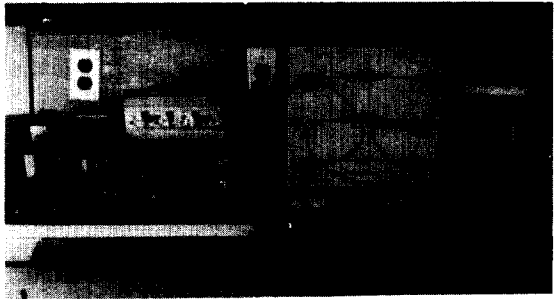


그림 13. 實驗裝置

Fig. 13. The photograph of experimental devices

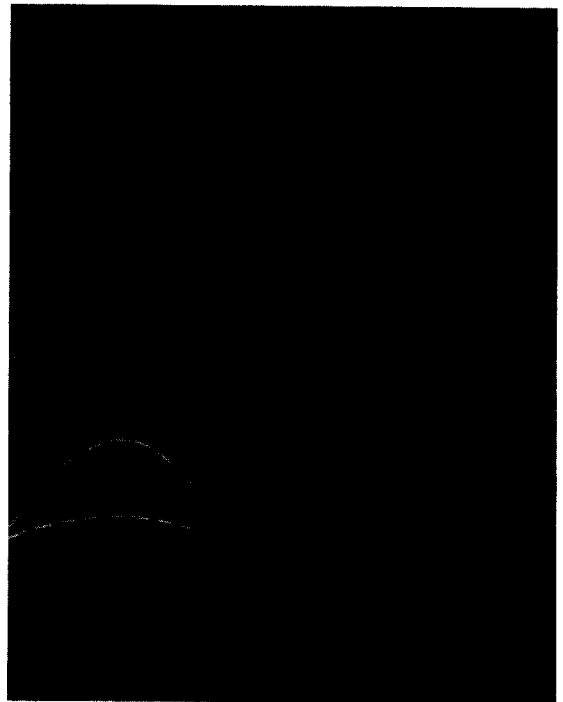


그림 14. 電流 - 電壓波形 (1)誘導負荷 (2)抵抗負荷

Fig. 14. Waveforms of current & voltage

(1) inductive load (2) resistive load)

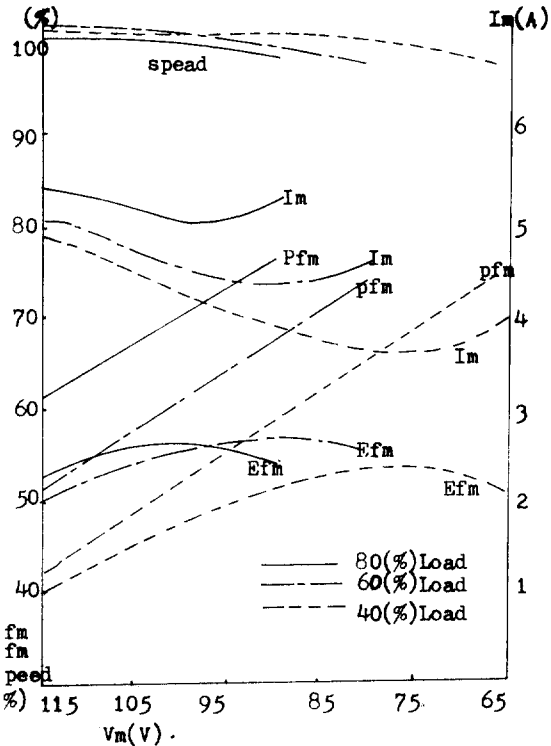
4.2 實驗結果 및 考察

實驗에 의해 얻은 結果를 표 1 과 그림 15, 16, 17 로 나타내어 다음과 같이 검토해보기로 한다.

즉

(1) 電動機의 一般의인 特性(그림 15)

그림 15는 電力制御를 手動모드로 하여 負荷를 變



I_m : 電流, P_{fm} : 力率, E_{fm} : 效率

그림 15. 電動機의 特性 (力率, 效率, 速度, 電流 - 電壓)

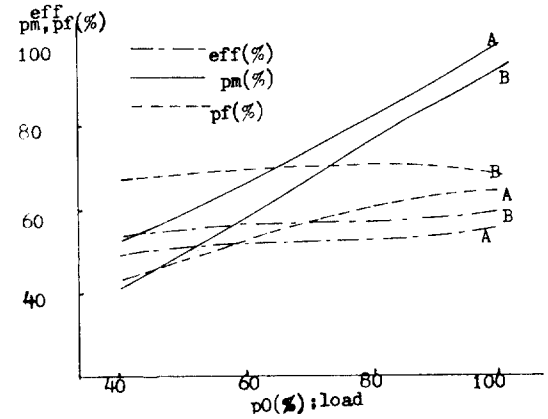
Fig. 15. Characteristics of a motor (power factor, efficiency, speed, current. Vs. voltage)

化시켜가며, 또한 같은 負荷상태에서도 電壓을 점차 감소시켜가면서 效率, 力率, 電動機의 負荷電流, 速度 等の 電動機의 一般의인 特性을 구하여 그래프로 나타낸 것으로 이를 檢討하여 보면

(i) 電壓은 一定하고 負荷만 變化시키는 경우: 負荷가 감소함에 따라 效率는 감소, 速度는 증가, 電動機의 負荷電流는 감소하며 力率은 나빠지는 것을 볼 수 있다^{1), 2), 5)}.

(ii) 負荷는 一定하고 電壓만 變化하는 경우: 같은 負荷에서도 電壓을 감소시킴에 따라 效率는 어느 電壓까지는 증가하다가 감소하게 되며 負荷電流는 감소하다가 증가하게 되므로 이로부터 負荷電流가 最少가 될 때 效率가 最大로 됨을 볼 수 있다.

따라서 본 논문의 2.2.1에서 제시한 바와 같이 電動機를 주어진 負荷에서 最大 效率로 運轉하려면 負荷電流가 最少인 點에서 運轉하면 되므로 電流를 制



E_f : 效率(%), P_m : 入力電力(%) P_f : 力率(%)

그림 16. 부하에 따른 效率, 入力전력, 역률

Fig. 16. Efficiency, input power, power factor. VS. load

표 1. 實驗結果

Table 1. Experimental results

負荷 (%)	條件	P_m (W)	V_m (V)	I_m (A)	P_f	E_{ff} (%)	rpm (%)
100	A	450	115	6.0	0.65	0.56	100.0
	B	420	105	5.8	0.69	0.60	99.0
80	A	380	115	5.4	0.61	0.53	101.0
	B	350	100	5.0	0.70	0.57	99.7
60	A	300	115	5.0	0.52	0.50	101.8
	B	265	90	4.3	0.68	0.57	99.7
40	A	240	115	4.8	0.43	0.42	102.4
	B	185	75	3.5	0.67	0.54	99.7

A; CONTROLLER 사용전, B; CONTROLLER 사용시

御信號로 하는 電力制御器를 개발 할 수 있는 타당성이 입증됨을 알 수 있다 1), 2), 5)

또한 速度는 電壓을 감소시키에 따라 약간 감소하게 되며 力率은 향상됨을 볼 수 있다. 이는 Mohan 氏가 實驗한 結果와도 잘 일치한다 2).

(2)開發된 電力制御器의 性能試驗結果인 圖1은 負荷를 變化시키며, 各各의 負荷에서 本 研究에서 研究開發한 制御器 (power controller)를 使用 할 때 (B)와 그렇지 아니 할 때 (A)의 電動機 特性을 구하여 作成된 것으로 이를 그래프로 그린 것이 圖16이다.

圖16에서 制御器를 使用 할 때, 電動機에서 所要되는 入力電力이 감소하여 效率이 증대되며 力率도 개선 됨을 볼 수 있다. 또한, 力率, 效率, 入力電力 모두가 負荷가 증가하게 되면 아울러 증가 됨을 알 수 있다.

圖17은 制御器를 使用할 때와 使用하지 않을 경우의 各各의 電流·電壓特性을 그린 것으로 使用하지 않을 경우 (A), 負荷가 증가되더라도 電源電壓은 一定하며 電流는 증가 됨을 볼 수 있다.

또한 制御器를 使用할 경우 (B)는 負荷가 증가하면 電動機의 電壓·電流特性 모두가 증가하게 되며 使用하지 않을 경우보다도 그 特性값이 작게되어 效率·力率特性의 改善은 물론 절연에 까지도 좋은 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 따라서 圖1, 圖16, 17로 부터 電動機의 運轉時에 本 電力制御器를 使用할 경우 負荷條件에 따라 入力電壓과 電力을 自

動으로 제어하여 最適의 力率 및 效率로 運轉됨을 확인 할 수 있었으며 또한 本 制御器의 性能이 매우 양호함을 알 수 있다.

5. 結 論

1. 電力用 다알링톤 트랜 지스터 (darlington power transistor)를 스위칭 素子로 使用한 P. W. M 交流 制御方式의 電力制御器 (power controller)를 研究開發하여 실제로 實驗하여 본 結果, 單相 誘導電動機가 定格이하의 負荷에서 運轉될 때 負荷條件에 따라 最適의 入力電力으로 自動으로 制御되어 效率 및 力率이 향상 됨을 볼 수 있었다.

2. 最適效率로 運轉 될 때에 電動機의 速度가 負荷에 따라 變하여 (圖1), 100% 負荷時에는 定格速度의 99.0%, 80%, 60%, 40% 負荷時에는 定格速度의 99.7%로 감속되므로, 本 電力制御器는 定速度 運轉이 요구되는 負荷가 아니고 定格速度의 1% 이하 정도의 速度오차를 허용할 수 있는 負荷에서라면 本 制御器는 電氣에너지를 절약하는 면에서 많은 도움이 될 것으로 믿어진다.

3. 本 電力制御器의 制御回路의 대부분을 차지하는 TTL IC 素子를 CMOS 素子로 대체하고, 回路를 좀 더 效率의으로 設計한다면 制御器 자체의 效率도 매우 좋아지리라 생각된다.

4. 電力用 트랜 지스터를 使用하면 응답속도나 高調波特性 등이 다른 방식에 비해 비교적 우수한 장점을 갖지만 현재에는 가격이 비싸고 취급전력에도 제한이 있어 보다 큰 定格의 電動機를 制御하기는 어려운 실정이나 현 추세로 볼 때 가까운 장래에 해결 될 수 있으리라 사료된다.

本 연구는 지금까지 알려진 실험적 결과를 토대로 하여 效率改善의 方案을 찾았으나 앞으로 供給電壓, 電流, 效率, 速度 등의 電動機特性의 상호 관련을 구명 할 수 있는 數式的인 모델을 세워 理論的인 解析을 아울러 함과 동시에 이로부터도 타당한 方案을 찾아 效率改善의 理論的인 근거를 제시하고자 한다.

또한 本 制御器의 3相誘導電動機에의 적용이나, 位相制御方式보다 훨씬 우수 할 것으로 예상되는 高調波特性의 확인이 가능 할 것으로 생각되나 이는 다음 기회에 연구하고자 한다.

參 考 文 獻

1) N. Mohan, "Improvement in energy efficiency

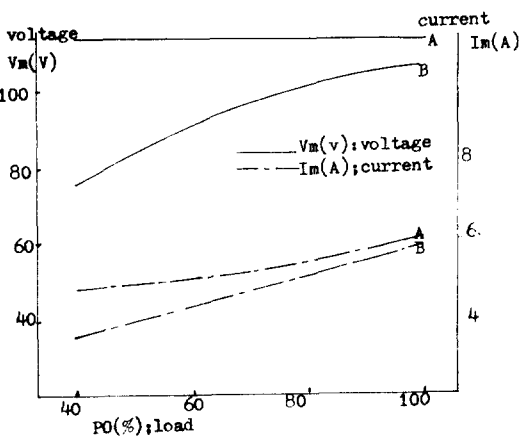


圖17. 부하에 따른 전압, 전류 변화 (A; 제어기 사용前, B; 제어기 사용시)

Fig. 17. The behavior of current & voltage. Vs. load

- of induction motors by means of voltage control", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 99, No. 4 July/Aug 1980.
- 2) "Energy efficiency of electric Motor", A Report prepared for U.S. department of energy, Report No. HCP/M50217-01, Reprinted April 1978.
 - 3) 박민호, 설승기, "VV-VF 제어에 의한 3상 유도전동기의 고효율화 운전에 관한 연구", 대한전기학회지, Vol. 30, No. 7, pp. 454-459 July 1981.
 - 4) 임달호, 이승원 "전기기기" 보성문화사, 22~77 (1980)
 - 5) 박민호, "유도기기" 동명사, 463, 1981
 - 6) Bruno Cotta, Maurizio Mazzucchelli, Giuseppe Sciutto "AC chopper regulation using power transistor", Proceedings of Powercon 8, G1-4 pp. 1-8 1981
 - 7) Alexander Mozdzer, Bimal K. Bose, "Three phase ac power control using power transistor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-12, No. 5, September/October, 1976.