

# TRIAC 位相制御에 의한 誘導電動機의 節電回路設計에 관한 연구

論 文  
2-4-4

A Study on the Power Saving Circuit for Induction Motor by the TRIAC Phase Contr

朴 贊 元\*  
(Chan - Won Park)

### 요 약

TRIAC 위상제어 방식은 교류전력의 제어에 편리한 방법으로 많이 응용되고 있다. 유도전동기는 부하변화에 따라 역율과 효율이 변화하며 특히 무부하와 경부하에서는 큰 전력손실을 유발한다.

본 연구에서는 TRIAC 위상제어 방식을 이용하여 유도전동기의 기계적부하에 따른 최적의 전압을 공급함으로써 효율과 역율을 개선시켜 전력손실을 줄이는 것을 기본동작원리로 하며 종래의 구조의 복잡성과 경제성 및 실용성을 크게 개선 하는데 설계의 주된 목표를 두었다.

제안된 절전회로는 실험결과 부하의 변화가 빈번한 곳에 운용되는 소형유도전동기에서 상당한 절전 효과가 나타났다.

### Abstract

In this study, the power saving circuit for Induction motor is introduced. The main principle of the proposed circuit is that the optimal voltage in proportion to the motor load is controlled by the TRIAC Phase Control.

As a result of this experiments, the system showed power saving effects which were 43% for unload, 20% for half load and improved power factor about 5% for full load of the induction motor.

The proposed power saving circuit is specially effective to the small induction motor of which the load is changing frequently.

### 1. 서 론

교류기의 일종인 유도전동기는 기계적인 구조가 간단하고 견고하며 보수가 용이하다는 등의 많은 장점이 있으나 특성이 비선형이기 때문에 제어가 곤란하며 부하변동에 따라 역율이 변화 되는 등 효율이 좋지못한 결점이 있다.<sup>1)</sup> 특히 무부하 에서 전부하에 이르기까지 부하변화

가 빈번한 용도로 운용되는 곳에서는 무부하와 경부하시에 역율이 떨어져 큰전력 손실을 유발하게 된다.

이에 대한 대책으로 수년전부터 유도전동기의 절전운전장치에 대한 고안이 몇가지 소개되고 있으나<sup>2~4)</sup> 회로가 복잡하고 절전장치 자체의 소비전력이 크며 동시에 전동기값에 비해가격이 비싸 실용성의부족으로 아직 잘 보급되지 못하고 있는 실정이다.

\*正會員：江原大學校 工大 電氣工學科 助教授·工博

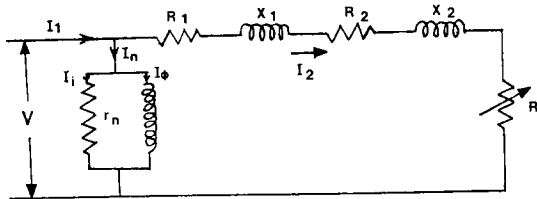


그림 1. 유도 전동기의 등가회로.  
Fig. 1. Equivalent circuit of induction motor.

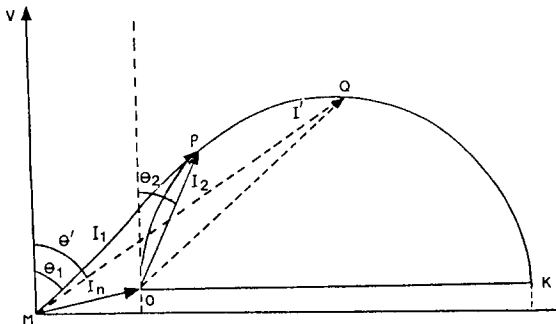


그림 2. 유도 전동기의 원선도  
Fig. 2. Circle-diagram of induction motor.

이에 본연구에서는 유도전동기의 운전시 기계적 부하가 감소될 때 전류의 늦음으로 역율이 감소됨에 따라 증가되는 무효전력을 위상전압제어로 최대한 감소시켜 역율과 효율을 개선시키는 것을 기본원리로 하는 절전장치를 매우 간단한 회로로 고안하여 유도전동기에 장착이 가능하도록 설계하였다.

본연구는 기계적 부하의 변화가 빈번한 곳에서 운용되는 단상소형유도전동기에 주로 적용되며 실제 운용해 본 결과 상당한 절전효과가 나타났다.

## 2. 기본원리 및 이론

일반적으로 유도전동기는 변압기와는 달리 1차와 2차(고정자와 회전자)사이에는 airgap이 존재하므로 그림1과 같이 2차측을 1차측으로 환산한 3상 유도전동기의 간이동가회로로 해석하면 오차가 많고 단상 유도전동기에의 적용에도 다소차이가 있으나 개략적인 해석과 원리도출을 위하여 유도전동기에 대한 간이동가회로를 사용하면 고정자와

회전자에 흐르는 전류  $I_2$ 는<sup>1)</sup>

$$I_2 = \frac{V}{\sqrt{(R_1 + R_2 + R)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (1)$$

로 되고 기계적부하  $R = R_2 \cdot (1 - S)/S$  이므로, 이때 유도 전동기의 출력 P, 동손  $P_c$ , 철손  $P_i$ 는 각각

$$P = I_2^2 R$$

$$P_i = I_2^2 (R_1 + R_2)$$

$$P_c = I_2^2 r_n$$

으로 되므로 만일 입력전압 V를 P를 변화시키지 않는 범위내에서 줄일 수 있다면 동손과 철손은 인가전압에 따라 조금씩 감소할 것이다.

그림2는 무부하전류  $I_0$ 을 고려했을 때의 전압벡터 V에 대한 전류벡터  $I_2$ 의 궤적을 나타내는 유도전동기의 원선도로서 그림과 같이 전류벡터  $I_1$ 이 원에 접하게 될 때 전압과 전류의 위상각  $\theta_1$ 은 최소가 된다. 즉, 최대역율을 나타낸다. 따라서 통상 유도전동기의 전부하는 그림2의 MP부근에서 설계되며 유도전동기는 부하운전시 전부하 상태에서 효율이 가장 좋고 경부하나 과부하에서는 나빠지는 특성을 갖게 된다.

한편 유도전동기의 최대 회전력(Torque)은

$$T_{max} = \frac{V^2}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2})} \quad (3)$$

이므로 전압의 제공에 비례한다.

또 유도전동기의 Slip-Torque 곡선인 그림3에서 보는바와 같이 인가전압 V가 변화하면 곡선도 변화한다. 따라서 부하 Torque  $T_L$ 을 일정하게 유지하면 인가전압을 달리 했을 때 전동기의 Slip이 변화한다. 이로부터 입력전압을 감소시키더라도 Slip과 torque와의 관계를 적절히 조절하면 출력 P가 적절히 조절될 수 있음을 알 수 있다. 또한 부하 변동으로 인해 torque가 줄어들 때 입력전압을 그에 따라 적절히 조절하면 그만큼의 에너지를 절약할 수 있을 것이다. 더우기 소형유도전동기에서는

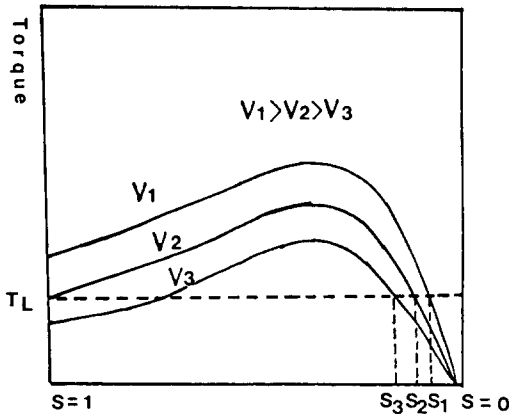


그림 3. 유도 전동기의 Slip - Torque 곡선.  
Fig 3. Slip - Torque curves of induction motor

무부하전류가 전체전류의 대부분을 차지하므로 인가전압을 감소 시키면 무부하전류의 감소영향이 다른 영향보다 매우 클 것으로 예상되며 무부하전류는 대부분 자화인덕턴스에 의한 무효전류가 대부분이므로 인가전압의 감소는 무효전류 감소에 의한 역률개선의 가능성을 시사해 준다.

이러한 사실들을 종합해보면 인가전압을 감소시킬 때 상반되는 두현상이 존재함을 알 수 있다. 즉, 인가전압의 감소는 전전류의 감소를 의미하나 한편으로는 인가전압을 감소하면 Slip 이 증가하게 되고 Slip 이 증가되면 기계적부하 R 의 감소를 초래하는데 이는 일정전압 조건하에서는 전류의 증가를 의미한다. 이런 두가지 상반되는 현상으로 유추하여 볼때, 전압의 감소로 인한 전류의 감소비율보다 전압의 감소에 의한 Slip 의 증가가 보다 크지 않는 범위내에서 전압을 감소시킬 때 전류감소, 손실감소, 역률 및 효율의 증대를 예상 할 수 있다. 이것이 전압조정에 의한 절전의 기본원리이다. 즉, 전부하시의 유도전동기는 역률이 좋고 torque도 크나 경부하 상태에서는 전압과 전류의 위상차가 커져 역률이 나빠지고 torque도 저하된다. 이것을 극복하기 위하여 경부하시는 슬립이 증가하여 속도가 저하되지 않는 범위내에서 인가전압을 감소시키면 전류는 전압과 보다 가까운 위상으로 되어 그부하에서의 보다좋은 최적동작점을 유지하게 된다.

### 3. 회로의 설계

유도전동기의 절전회로는 최초 1976년 NASA 에서 우주선에 사용되는 유도전동기의 전력절감을 위해 Power Factor Controller 란 이름으로 개발되어 특허출원 된 것이 있는데<sup>2-3)</sup> 이것은 op-amp 회로를 이용하여 전압과 전류의 위상차를 검출하고 이신호에 따라 전동기의 부하에 적절한 전압을 제어 하는 것을 기본동작원리로 하는 것으로 어느 정도 절전효과는 달성하였으나 회로자체의 소비전력이 수 w 에서 수십 w 정도로 크고 op-amp 의 온도 드리프트 영향으로 안정도가 떨어지는 등 다소 구조적 복잡성과 경제성이 문제되어 그다지 보급되지 못하였다<sup>4)</sup>

일반적으로 유도전동기에 대한 전압조정은 정현파 전압이 가장 효율이 좋은 것을 감안할때 auto tracking transformer 나, PWM 제어등에 의한 방식을 생각할 수 있으나 이 또한 회로구성이 더욱 복잡해지고 가격이 비싸 소형유도전동기에는 실용적이 못된다. 따라서 본 연구에서는 구조가 간단하고 신뢰성이 우수한 TRIAC 위상제어방식<sup>5)</sup>을 이용하여 다음과 같이 구분하여 회로를 설계하였다.

- 1) 기계적 부하변화에 대한 전동기의 부하전류 검출
- 2) 포토커플러에 의한 제어신호 변환
- 3) TRIAC 점호회로 및 전압위상제어
- 4) 진동, 잡음방지및 점호의 히스테리시스 방지 회로

### 4. 회로의 구성 및 동작

그림4는 설계된 회로이다. 그림에서 유도전동기의 기계적 부하 변동에 따라 증감되는 전류는 C, T에 의해 전압의 변화로 검출되고 이 전압은 포토커플러 내에서 LED 의 광도의 변화로 나타난다 이때 R<sub>6</sub> 은 LED 전류제한용이며 바리스터 Z는 전동기의 기동시와 과부하시 과대전류로 인한 LED 보호용이다. LED 의 광도의 변화는 포토커플러 내에서 포토트랜지스터의 작용으로 a점으로 C<sub>3</sub>의 충전전류를 공급하게 되는데 이때 C<sub>3</sub>의 충전전압이

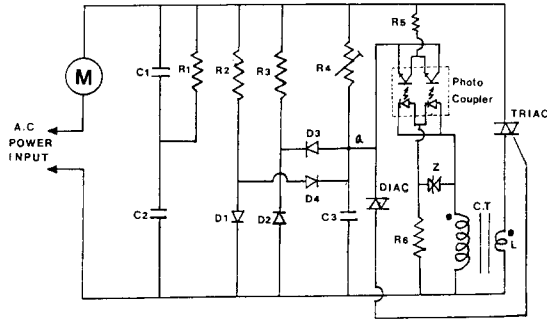


그림 4. 제안된 회로.  
Fig. 4. Proposed circuit.

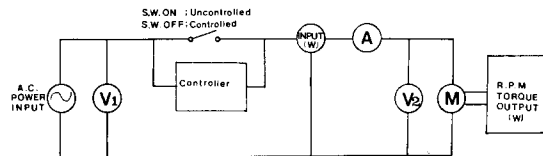


그림 5. 측정 회로도  
Fig. 5. Schematic diagram for measurement.

DIAC의 트리거전압을 넘어설때 TRIAC이 점호하게 된다. 여기서  $R_4$ 는 전동기의 정격에 따라 적절히 조절된 값으로 설정한다. 또  $R_5$ 는  $R_4$ 와 병행으로 조절하여 포토트랜지스터의 비직선성을 보정하며 한편으로는 전류제한효과도 겸한다. 한편 C.T는 LED가 드레솔드전압 이상에서 충분히 구동될수 있는 전압을 얻기 위함과 동시에 C.T의 1차 권선의 인덕턴스 L은  $C_1, C_2$ 와의 작용으로 Low-pass filter의 역할을 한다. DIAC은 전부하시 점호지연각을 최대한 줄이기 위해 저전압 DIAC을 사용했다. DIAC이 트리거 되면 TRIAC은 사진 1에서와 같이 유도전동기에 전원을 공급하게 되는데 그림 1에서 유도전동기의 기계적 부하 R이 변화하면 전전류  $I_1$ 이 변화되므로 그림 4회로의 동작에 의해 순간적으로 적절한 전압의 위상제어가 자동으로 가능하게 된다. 이때 4개의 다이오드  $D_1 \sim D_4$ 와  $R_2, R_3$ 는 DIAC의 트리거에 따른  $C_3$ 의 방전전하를 전원의 반주기 마다 완전히 방전시켜 TRIAC 점호의 히스테리시스를 방지하기 위한회로이다.

콘덴서기동형 단상유도전동기는 위상제어시 전

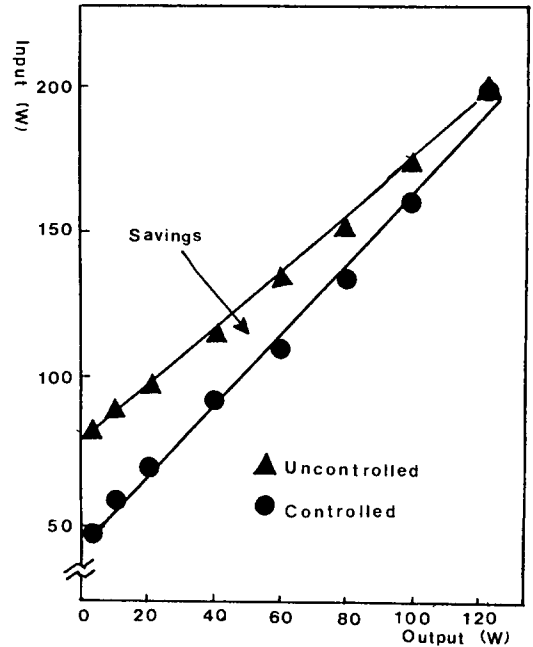


그림 6. 입력 대 출력 특성의 비교.  
Fig. 6. Comparison of input vs. output characteristics.

동기내의 L, C성분의 공진으로 인한 진동과 위상 제어 전압과형으로 인한 노이즈를 유발시키는 경우가 있는데  $C_1, C_2$ 와 C.T의 인덕턴스 성분 L이 노이즈필터의 역할을 하고 저항  $R_1$ 은 공진방지의 damping 저항 역할을 한다. 또한  $R_1, C_2$ 의 직렬회로는 TRIAC의 위상제어에 의한 dv/dt의 상승을 완화해주고 미스트리저를 방지해주는 snubber 회로<sup>7)</sup>로 동작한다.

### 5. 실험과 고찰

그림 4의 회로(controller)를 정격출력 125 w 콘덴서 기동형 단상유도전동기에 연결 하고 그림 5와 같은 실험방법으로 controller를 연결하였을 때(controlled)와 연결하지 않았을 때(uncontrolled)의 각각 입출력에 대한 측정결과는 표1과 같다. 또한 표1의 데이터를 입력(w)과 출력(w) 특성 그리고 역율(%), 에너지 Save(%)를 그래프로 표시한 것이 그림 6, 그림 7, 그림 8이다. 그림 8에 나타

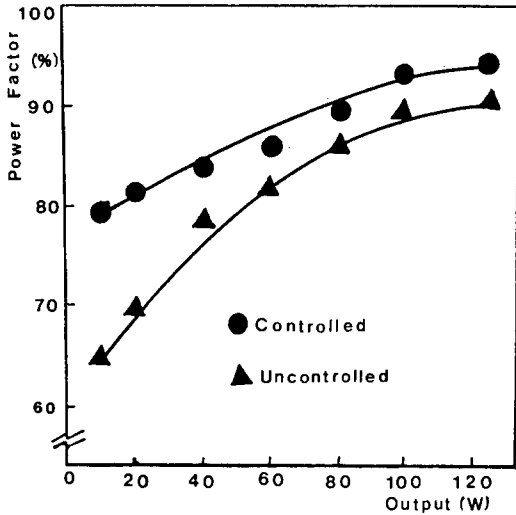


그림 7. 역율-출력 특성의 비교

Fig. 7. Comparison of power factor - output characteristics.

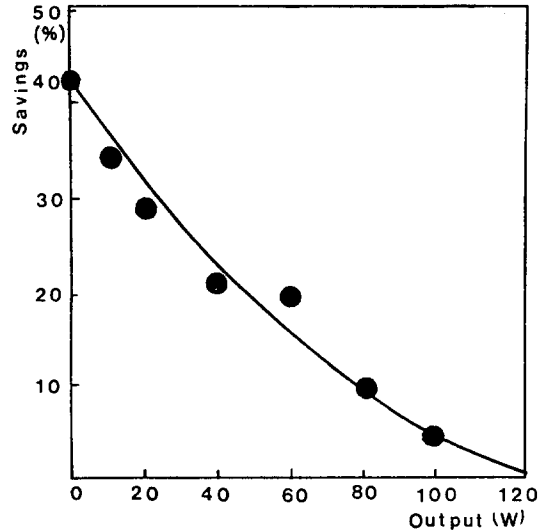


그림 8. 절전-출력 특성.

Fig. 8. Characteristics of savings - output

표 1. 실험치의 비교.

Table 1. Comparison of Experimental data.

	출 력 (W)	0	10	20	40	60	80	100	125
Uncontrolled	전원전압 (V <sub>1</sub> )	110	110	110	110	110	110	110	110
	입 력 (W)	80	88	97	115	136	153	174	199
	전 류 (A)	1.21	1.23	1.27	1.31	1.49	1.63	1.80	2.00
	Torque(kg-m)	.	0.003	0.006	0.011	0.017	0.023	0.028	0.035
	회전수(R.P.M)	3583	3572	3565	3551	3541	3520	3506	3481
	효 율 (%)	.	11.4	20.6	34.8	44.1	52.3	57.5	62.8
	역 율 (%)	60.0	64.6	69.2	79.5	82.7	85.3	87.7	90.3
Controlled	전 압 (V <sub>2</sub> )	70	75	79	86	90	96	100	106
	입 력 (W)	47	58	69	91	109	138	166	199
	전 류 (A)	0.89	0.97	1.08	1.25	1.42	1.61	1.78	2.00
	Torque(kg-m)	.	0.003	0.006	0.011	0.017	0.023	0.028	0.035
	회전수(R.P.M.)	3579	3571	3552	3533	3516	3507	3492	3467
	효 율 (%)	.	17.2	29.0	44.0	55.0	58.0	60.2	62.8
	역 율 (%)	75.2	79.5	81.1	84.7	85.4	89.7	93.2	94.3
전력절감(W)	33	30	28	24	27	15	8	0	
전력절감(%)	41.3	34.0	29.0	20.9	20.0	9.8	4.6	0	

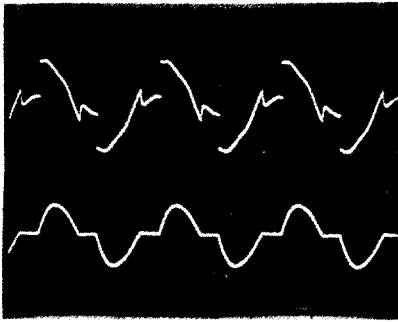


사진 1. 무부하시의 유도 전동기의 전압과 전류파형.

Photo 1. Voltage and current waveforms of I. M. for no load.

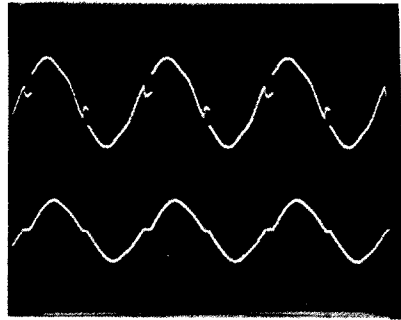


사진 2. 50%부하시의 유도전동기의 전압과 전류파형

Photo 2. Voltage and current waveforms of I. M. for half load.

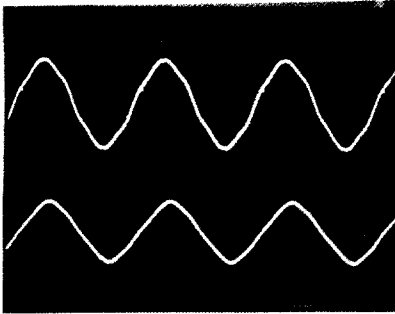


사진 3. 전 부하시의 유도 전동기의 전압과 전류파형.

Photo 3. Voltage and current waveforms of I. M. for full load.

난 바와같이 출력 125w 의 유도전동기에서는 무부하에서 약 43%, 50%부하에서 20%정도의 절전효과가 나타났으며 전부하에서는 절전효과의 차이는 없었으나 그림7에서 역율이 5%정도 개선되었다.

C. T의 직렬연결로 인한 전압강하는 전부하시 0.3V 정도로 전압강하로 인한 문제는 없었으며 기계적 부하 변화에 대한 응답속도는 평균 0.5sec 이내로 충분히 실용성이 있음이 관찰되었다.

위상제어에 의한 인가전압의 감소는 유도전동기의 회전수의 감소를 유발하게 되는데 실측결과 표1에서 나타난 바와 같이 모든 부하범위에 걸쳐 정격전압 인가시 보다 회전수의 감소는 1%이내로 관찰되었으며 실제 사용의 경우 거의 영향이 없을

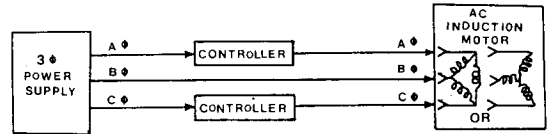


그림 9. 3상 유도전동기의 절전회로

fig. 9. Power saving circuit of 3-phase I. M.

것으로 판단된다.

사진 1, 2, 3에는 각각 무부하시와 50%부하시, 그리고 전부하에서의 유도전동기의 전압파형과 전류파형을 오실로스코프로 관찰하였는데 사진 1과 2에서 TRIAC이 off되어 전류가 흐르지 않는 순간에도 전동기에 인가전압의 약 50%정도가 나타나는 것은 유도전동기의 free-wheeling 순간 발생하는 역기전력에 기인하며 전부하시 전동기에 인가되는 전압이 완전한 정현파로 나타나지 않은 것은 상용전원 자체의 distortion에 의한 것으로 판명되었다.

아울러 3상 유도전동기에서는 그림 9와 같은 연결회로를 구성하여 controller 2개를 부착함으로써 절전이 가능하다. 3상유도전동기의 절전용실험결과 원래 3상 유도전동기 자체가 단상유도전동기에 비해 역율과 효율이 우수하기 때문에 단상유도전동기에서와 같은 큰 Energy save효과에는 미치지 못하였으며 이는 금후의 연구과제이다.

## 6. 결 론

본연구에서는 소형유도전동기의 절전운전장치에 관하여 논하였다.

유도전동기의 기계적부하에 적합한 전압을 TRIAC의 위상제어로 조절하여 역율과효율을 개선시키는 것을 주된 원리로 기계적 부하의 변화에 비례하여 증감하는 부하전류를 검출하고 이를 제어전압으로 피이드백 시켜 포토커플러를 이용하여 TRIAC 위상제어 회로를 구성하였으며 실측의 결과로서 무부하에서 43% 50%부하에서 20%의 절전효과와 전부하에서 5%정도의 역율개선이 관찰되었다.

본연구 에서는 구조적 복잡성을 배제하고 경제적인 면을 고려하여 소형유도 전동기에 간단히 부착 in-package 형태로 사용할 수 있도록 하는데 연구의주된 초점을 두었으며 실제로 부하의 변화가 빈번하고 다수의 유도전동기를 사용하는 곳에 본장치를 부착한다면 상당한 절전효과를 기대할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 1) 천희영, 전기기계, 야정문화사, 1975, pp341-369
- 2) Frank J. Nola, "Power factor control system for A. C. induction motors", United States Patents, 4052648, 1977
- 3) NASA Technical brief., MFS-23280, 1977
- 4) Maw H. See, "Power factor control of a three-phase induction motor", United States Patents, 4333046, 1982
- 5) J. H. Galloway, "Using the TRIAC for control of A. C Power", General Electric Company Application Note 200. 35
- 6) J. R. Donnalley, SCR manual, General Electric Company, 1978
- 7) 박민호, 전력전자공학, 신흥출판사, 1987, pp199~206