

3상 유도전동기의 효율적인 2단 제동 기법

(Efficient Two-Stage Braking Method of Three-Phase Induction Motor)

이은영* · 김 용* · 김필수** · 권순도***

(Eun-Young Lee · Yong Kim · Pill-Soo Kim · Soon-Do Kwon)

요 약

본 연구에서는 3상 유도전동기의 2단 제동기법을 제안하였다. 2단 제동기법이란 1단계로 제동용 커패시터에 의한 자여자 제동법을 이용하며, 2단계로 3상 磁氣제동법을 이용하는 것으로 이는 장치의 구성이 비교적 간단하며, 저가의 비용을 필요로 하는 장점을 지니게 된다. 또한 제동특성을 시뮬레이션과 실험으로 확인한 결과 비교적 우수한 특성이 얻어짐을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, two-stage braking method of 3-phase induction motor is proposed. This brake involves two stages. The first stage is capacitor self-excitation braking, and the second stage is three-phase magnetic braking. In several applications, a low cost and effective brake is required for three-phase induction motor. A mechanical friction brake, typical braking method for induction motor requires external energy sources which is not safe, expensive and requires maintenance. Static and dynamic analyses of the proposed brake scheme are along with analytical result, simulated waveforms and experimental waveforms are compared. The experimental results shows good agreement with the simulated results.

1. 서 론

유도기는 직류기와 비교하여 정류자 및 브러시가 없으므로 기계적인 구조가 간단하고, 가격이 저렴하고 소형 경량이며, 기계적 접촉이 없어 마모가 없으

므로 점검과 보수가 필요없는 등 여러 가지 장점들을 지니고 있어서 산업용 구동전동기로 광범위하게 사용되고 있다. 특히 최근에는 고성능 전력용 반도체 소자의 개발로 인하여 정속운전 분야에 국한되어 사용되어온 유도기도 직류기에 뒤지지 않는 속도 제어특성을 지니게 됨에 따라 점차 산업분야에서 유도기의 사용범위가 증가되어 가는 실정에 있다 [1][2][3]. 그러나 이러한 유도기의 여러 응용을 위해서는 기동 및 속도제어 특성과 더불어 안전한 제동

* 정회원 : 동국대학교 전기공학과

** 정회원 : 대림대학 자동차과

*** 정회원 : 대림대학 전자과

접수일자 : 1998. 5. 4.

3상 유도전동기의 효율적인 2단 제동 기법

이 필수불가결한 조건이 된다. 일반적으로 전동기를 전원으로부터 차단하면 회전부분에 축적된 운동에너지는 마찰손, 풍손, 기계적 손실 및 잔류자기에 의한 전자 손실로 인하여 점차 소모되어 정지하게 된다. 이 경우 정지에 오랜 시간이 요구되어 전동기 단독의 경우 약 1분 이상이 소요되며, 특히 큰 관성을 가진 부하의 경우에는 1시간 이상이 소요되는 경우도 있다. 따라서 차륜, 권상기 또는 승강기 등과 같은 기계운전의 경우 운전자에 대한 위험성을 고려하여 비상 정지장치가 필요하며, 운전, 정지가 빈번한 기계운전의 경우 제동장치의 필요성은 더욱 크게 된다. 유도기의 대표적인 제동방법은 기계적 마찰력을 이용하는 것으로, 이 경우 외부 에너지원이 필요하여 안전이 불확실하고 비용이 고가이며 유지보수가 절대적으로 필요하게 된다. 따라서 상기한 장점을 갖추면서 간단하고 비용이 저렴한 3상 유도전동기의 제동방법이 연구되고 있다. 현재 주로 이용되는 제동방법은 기존의 기계적 제동방법을 근간으로 하여 3상에서 단상으로 전환하고 2차측의 저항을 증대시켜 제동하는 단상제동방법, 전원개방후 1차측에 직류를 가하여 2차측에 발생하는 와전류를 이용하는 직류제동방법, 그리고 3상중 2선을 바꾸어 역토크를 발생시키고 정토크와 동일할 때 회로를 차단하여 제동하는 역상(plugging)제동방법 등 여러 제동방법이 이용되고 있다. 그러나 제동방법에 따라 기계적 제동과 병행하는 경우 제동 설비는 물론 에너지 이용 측면에서 비효율적이 될 수 있으며, 또한 유지 및 보수, 안전성, 비용 등의 측면에서 여러 문제를 내포하게 되므로 대상 전동기의 규모에 관계없이 적은 설비비용으로 효율적으로 제동하면서 안전의 확보는 물론 효율적인 에너지를 이용한 확실한 제동효과가 있는 제동방법이 요구되고 있는 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 제동특성이 우수한 2단계 제동법을 제안 하고자 한다. 본 제동법은 2단계로 구성되며, 1단계는 제동용 커패시터에 의한 자여자 제동방법(自動磁 制動方法)을 이용하고 2단계로 3상 자기 제동방법(3相 磁氣 制動方法)을 적용한다. 즉 2단계 제동방법은 우선 자여자를 위한 정전용량을 계산하고, 유도기의 고정자에 커패시터로 직류를 유입시킨 다음 자계가 형성된 후 세 개의 고정자 인입선을 단락시키는 자기제동을 행하고 마지막으로 기계적 마찰에 의하여 3상 유도전동기를 완전히 정지시킨다. 이

러한 2단계 제동방법은 잔류자기를 이용하므로 간단하고 용이하게 확실한 제동이 보장되며, 대용량의 유도전동기에 적용시킬 경우에도 우수한 특성을 나타내리라 판단된다. 특히 본 연구에서는 0.75[kW]와 2.2[kW]의 두 종류의 3상 유도전동기를 대상으로 상기의 순서에 따라, 2단계 제동방법에 요구되는 파라미터를 계산하고 실험을 통한 실측치와 비교함으로써 본 연구에서 제안하는 2단계 제동시스템의 우수한 제동특성을 입증하고자 한다.

2. 2단 제동 시스템

2.1 2단 제동시스템의 기본 동작원리

제동 방법에는 기계적 제동과 전기적 제동의 두 종류가 있고, 전자인 기계적 제동의 경우 유압식, 공기식 및 전자식 제동이 있으며, 모두 기계적 마찰을 이용한다. 전기적 제동에는 발전제동, 회생제동, 유도제동 및 역상제동 등이 있으며 전기적 제동과 기계적 제동을 겸용하여 사용하는 경우가 대부분이다. 본 장에서는 우선 제안한 전기적 제동의 하나인 2단계 제동방법의 기본 원리를 설명하며, 정상상태시 3상 유도전동기의 모델을 이용하여 제동에 대한 정특성과 동특성을 분석하고자 한다. 그림1은 본 연구에서 제안하는 3상 유도전동기의 2단계 제동방법을 나타낸다. 그림1에서 스위치를 닫아 단계1과 단계2의 접촉자 코일에 에너지가 가해지면 접촉자는 활성화되고 커패시터 Cc는 충전된다. 또한 접촉자 코일에 접속되어 있는 3상 유도전동기의 고정자 권선에 인버터로부터 에너지가 가해지면 3상 유도전동기는 회전한다.

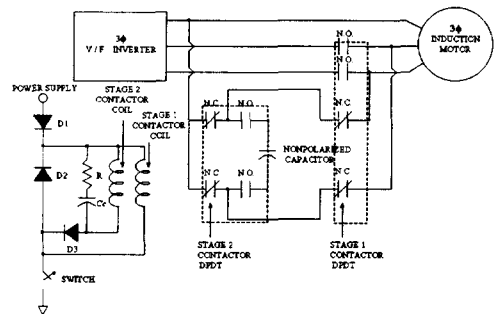


그림 1. 3상 유도전동기의 2단 제동을 위한 회로
Fig. 1. 2-stage braking scheme for 3-phase induction motor

저항 R은 커패시터 Cc의 충전전류를 제한하며, 다이오드 D3는 단계1의 접촉자 코일로부터 단계2의 접촉자 코일을 분리시키는 동작을 한다. 또한 다이오드 D1은 외부전원으로부터 접촉자 코일을 분리시킨다.

일반적으로 정상 운전중인 3상 유도전동기를 제동하려면 스위치를 개방하거나 전원공급을 중단하면 된다. 전원이 차단되면 다이오드 D2에 의해 단계1의 접촉자 코일의 자장은 소실되어 N.C.(b점접:동작하면 열리는 접점)위치로 복귀되고 인버터로부터 3상 유도전동기의 인입선 중 두선은 분리되어 제동용 커패시터에 접속된다. 비록 3상 유도전동기 고정자의 전원이 차단되어 전류의 흐름이 중단되거나 영이 되더라도 3상 유도전동기 회전자의 시정수가 상대적으로 길기 때문에 회전자 전류는 계속 잔류하게 된다. 제동용 커패시터가 연결되면 고정자 전류는 인입선에 연결된 제동용 커패시터에 의해 복귀되고 이에 따라 제동 토크가 발생되어 단계1의 자여자 제동이 가능하게 된다. 단계1에 의하여 제동이 되는 동안 커패시터 Cc에 의해 단계2의 접촉자 코일의 자장은 계속 유지되다가 소멸된다.

이 지연시간 후에 단계2의 접촉자도 N.C.(b점접) 위치로 복귀되어 3상 유도전동기로부터 제동용 커패시터가 분리되고 3상 유도전동기의 고정자 권선은 모두 단락되므로 3상 유도전동기의 2단 자여자 제동의 과정이 끝나게 된다. 결국 단계1의 제동방법은 회전자 전류를 크게 하여 지속시키고, 단계2의 제동방법은 고정자 전류를 복귀시켜 제동 토크를 발생시키는 역할을 한다.

2.2 3상 유도전동기 정상상태 모델의 도출

본 연구에서 제한한 2단 제동방법의 효율적인 설계를 위해서는 제동용 커패시터의 적절한 선정이 필요로 된다. 그림2는 3상 유도전동기의 일반적인 d-q 정좌표표계를 나타낸다. 3상 유도전동기의 3상 중 임의의 두상에 커패시터를 연결하면 커패시터가 d축으로 나타나게 된다. 이 경우 d-q기준좌표의 정전용량은 그림3을 참조로 하여 얻을 수 있다[7],[8],[9]

이 경우 a, b, c의 3상 중 b상의 전류는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_b = C(dv_{bc}/dt) \tag{1}$$

식(1)을 적분하고 변형하면 식(2)와 식(3)과 같은

결과를 얻는다.

$$i_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}, \quad i_{qs} = 0 \tag{2}$$

$$v_{bc} = -\sqrt{3} v_{ds} \tag{3}$$

식(1)의 적분식에 식(2)와 식(3)을 대입하면 식(4)와 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\sqrt{3}}{2C} \int i_{ds} dt = -\sqrt{3}v_{ds} - v_{bc}, \quad t = 0 \tag{4}$$

$$v_{ds} = -\frac{1}{2C} \int i_{ds} dt - \frac{1}{\sqrt{3}} v_{bc}, \quad t = 0 \tag{5}$$

따라서 식(5)로부터 2C를 변환하여 C를 구할 수 있으며, 그림2로부터 3상 유도전동기의 상태모델을 식(6)~식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_1 = \int i_{ds} dt \tag{6}$$

$$\dot{x}_2 = i_{ds} \tag{7}$$

$$\dot{x}_3 = i_{dr} \tag{8}$$

$$\dot{x}_4 = i_{qr} \tag{9}$$

상기식을 이용하여 그림2로부터 상태방정식을 구하고 이로부터 제동시스템의 고유치를 확인할 수 있다.

표1은 시험용 유도전동기의 정격에 의한 파라미터를 나타내며, 표2는 표1에 의한 시험용 3상 유도전동

- Lm per phase magnetizing inductance
- LS-Lm per phase stator leakage inductance
- Lr-Lm per phase rotor leakage inductance
- Rs per phase stator resistance
- Rr per phase rotor resistance
- C capacitance
- $\omega_r (=P/2 \omega_m)$ where P is number of poles and ω_m is mechanical speed(radians/sec)

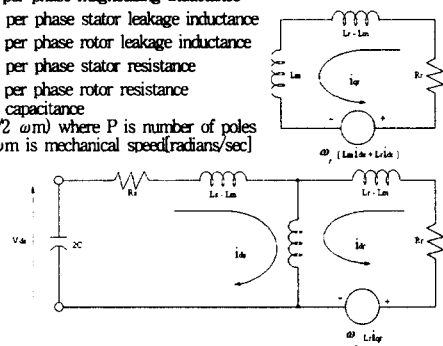


그림 2. 정좌표표계로 나타낸 3상 유도전동기의 d, q 축 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of 3-phase induction motor in stationary reference frame with capacitor in d, q axis

3상 유도전동기의 효율적인 2단 제동 기법

표 1. 3상유도전동기 정격 및 시험 파라미터
Table 1. Ratings and test parameter of 3-phase induction motor

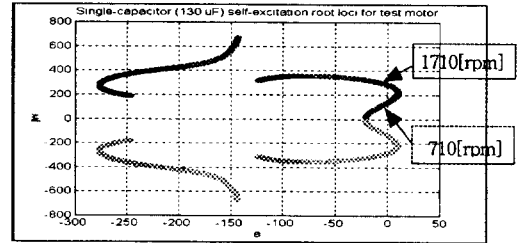
Motor Capacity		0.75[kW]	2.2[kW]
Parameters	Phase	3	3
	Input Voltage [V]	220(Δ), 380(Y)	220(Δ), 380(Y)
	Input Ampere [A]	3.5(Δ), 2.0(Y)	8.8(Δ), 5.1(Y)
	Power [kW]	0.75	2.2
	Frequency [Hz]	60	60
	Pole	4	4
	Rotor Speed [rpm]	1,710	1,735
	Inertia [Kg · m ²]	0.0193792	0.07865
	Efficiency [%]	72	82

표 2. 3상 유도전동기의 등가회로 파라미터
Table 2. Parameters of equivalent circuit in 3-phase induction motor

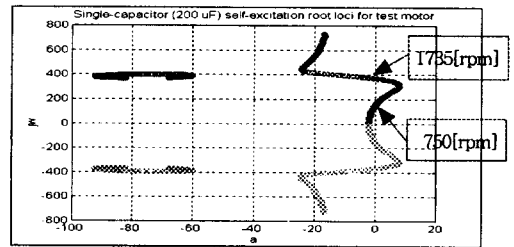
Motor Capacity		0.75[kW]	2.2[kW]
Stator Inductance (L_s) [H]		0.4741	0.2154
Rotor Inductance (L_r) [H]		0.4741	0.2154
Mutual Inductance(L_m) [H]		0.4543	0.2063
Stator Resistance(R_s)(75°C)[Ω]		10.3763	2.5285
Rotor Resistance(R_r)(75°C)[Ω]		9.4725	0.4385

기의 각 파라미터를 나타낸다.

여러 조건하에서의 고유치를 이용하여 안정도 분석을 하였다. 그림3은 표2의 파라미터를 이용하여 두 종류의 시험용 전동기에 대한 커패시터의 근궤적을 나타낸 것이다. 그림3의 경우 우반평면에 위치한 근궤적의 일부분이 불안정 속도범위를 나타내고 있다. 따라서 저속운전과 고속운전 모두 안정되지만 고속 운전이 저속운전보다 긴 시정수를 나타냄을 알 수 있다. 또한 그림4는 2종류의 시험용 전동기에 대한 회전수와 커패시터의 용량변화에 따른 자여자 안정 경계조건을 이용하여 회전수 변화에 따른 제동용 커패시터의 용량을 선정할 수 있다.



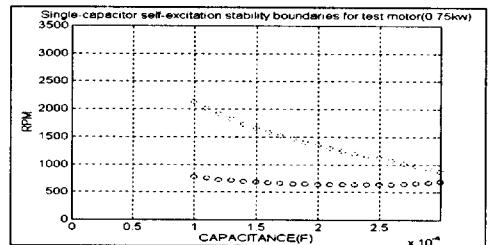
(a) 0.75 [kW] induction motor



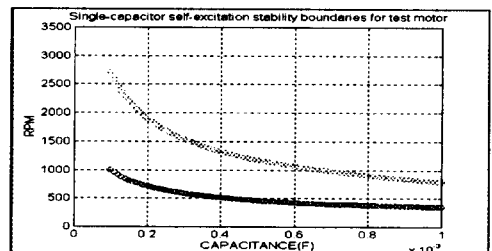
(b) 2.2 [kW] induction motor

그림 3. 시험용 전동기의 커패시터에 대한 특성상의 근궤적

Fig. 3. Characteristic root loci for single-capacitor of tested motor



(a) 0.75 [kW] induction motor



(b) 2.2 [kW] induction motor

그림 4. 시험용 전동기에 대한 커패시터 자여자 안정 경계

Fig. 4. Single-capacitor self-excitation stability boundaries for test motor

2.3 제동 시스템의 동특성 해석

본 연구에서는 동특성 해석을 위하여 두가지 단계의 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 단계로서 제동용 커패시터를 이용한 자여자 발전제동에 관련된 시뮬레이션이며, 두 번째 단계로 자기제동과 관련된 시뮬레이션이다. 이러한 두가지 단계의 시뮬레이션은 다음의 다섯 부분으로 세분화된다.

첫째 3상 유도전동기의 정상전류에 대한 초기조건이 정해지면 우선 자계각을 가정하여 제동을 제어하도록 한다.

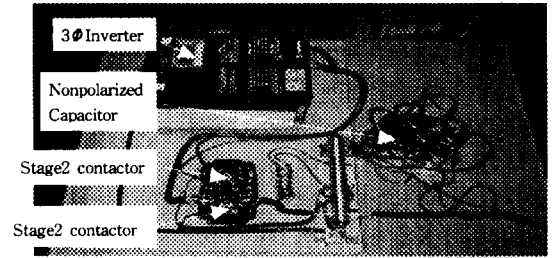
둘째 3상 유도전동기의 정상전류를 이용하여 고정자 권선의 개회로 상태를 검토한다.

셋째 제동용 커패시터를 이용하여 자여자 제동을 수행한다.

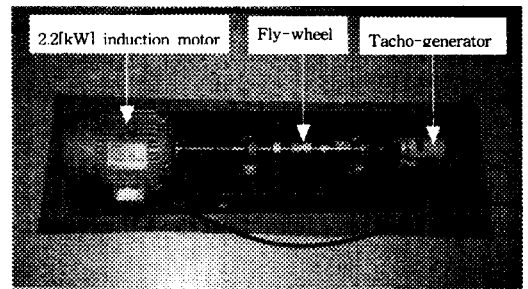
넷째 제동용 커패시터가 개회로 상태가 되면 3상 유도전동기의 정상전류를 d축으로 제정의 한다.

다섯째 고정자 권선의 3상 단락을 통한 자기 제동을 구현하도록 한다.

상기한 다섯 단계의 시뮬레이션은 MATLAB을 이용하였다.



(a) control apparatus



(b) 2.2 [kW] 3-phase induction motor drive apparatus

3. 실험결과 및 검토

3.1 실험장치

그림5는 본 연구에서 제안하는 3상 유도전동기의 2단 제동 실험장치를 나타낸다. 0.75[kW] 및 2.2[kW]의 3상 유도전동기 두 종류를 대상으로 제동실험을 하였으며, 전동기의 관성과 부하의 관성을 표1과 같게 하였고, 그림1의 Cc를 조정하여 단계1의 지연시간을 0.13초로 하였다. 또한 자여자 제동을 위한 제동용 커패시터로는 무극성 커패시터로서, 용량은 0.75[kW]의 3상 유도전동기를 1500[rpm]으로 운전하는 경우 175[μ F] (50[μ F] 2개와 75[μ F] 1개를 병렬 연결)로 하였으며, 2.2[kW]의 3상 유도전동기의 경우 1500[rpm]으로 운전하는 경우 250[μ F] (75[μ F] 2개와 50[μ F] 2개를 병렬 연결)를 선정하여 사용하였다. 이용된 인버터는 정격 출력용량 230[V], 16[A], 0.5~60[Hz]의 SPWM방식이다. 측정용 오실로스코프는 2-Channel의 FLUKE 105B를 사용하였다.

3.2 실측 및 시뮬레이션결과의 비교

본 연구에서 제안한 3상 유도전동기의 2단 제동시

그림 5. 3상 유도 전동기의 2단 제동 실험장치 (2.2 [kW] 전동기의 경우)

Fig. 5. 2-stage braking experimental apparatus for 3-phase induction motor (in case of 2.2 [kW] motor)

동적특성을 분석하기 위하여 0.75[kW]와 2.2[kW]의 3상 유도전동기를 대상으로 실험 및 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구의 시뮬레이션을 위하여 MATLAB과 PSPICE 프로그램을 이용하였으며, 이 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교·검토 하였다.

그림6은 PSPICE 시뮬레이션 회로도를 나타낸다.

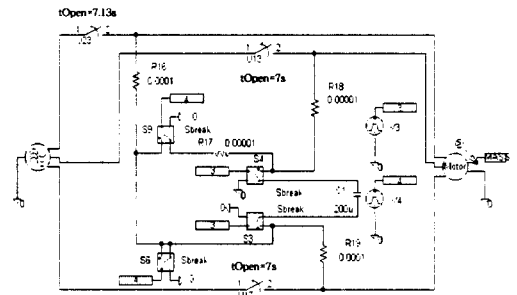


그림 6. PSPICE 시뮬레이션 회로도

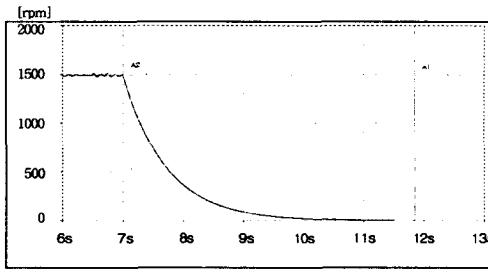
Fig. 6. PSPICE simulation circuits diagram

3상 유도전동기의 효율적인 2단 제동 기법

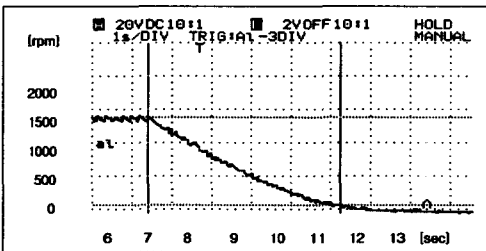
그림의 좌측에 나타난 것은 3상 교류전원의 입력이며, 회로 중간에 삽입된 극소저항들은 흐르는 전류를 알아보기 위하여 삽입한 것으로 회로 동작에는 영향을 미치지 않는다. 또한 우측의 MASS는 3상 유도전동기의 회전수를 검출하기 위한 매크로 파일이다.

그림7~그림10은 여러 조건하에서의 시뮬레이션 결과와 실측 결과를 비교한 것이다. 그림7~그림8은 0.75[kW]의 3상 유도전동기의 경우이며, 그림9~그림10은 2.2[kW]의 3상 유도전동기의 경우이다. 이 중 그림7과 그림9는 각각 0.75[kW] 3상 유도전동기와 2.2[kW] 3상 유도전동기를 대상으로 자연 정지하는 경우를 나타내며, 정지시간이 각각 4.84[sec] 및 6.72[sec]이었다. 그림8과 그림10은 각각 0.75[kW] 3상 유도전동기(1500[rpm], 175[μ F])와 2.2[kW] 3상 유도전동기(1500[rpm], 250[μ F])의 2단 제동에 관한 그래프로서 정지시간이 각각 2.12[sec], 0.56[sec]로서 그림7과 그림9의 자연 정지시간에 비하여 월등히 축소됨을 확인할 수 있다.

표3은 그림7~그림10사이의 시뮬레이션 결과와 실측 결과에서 나타난 제동시간을 비교한 것이다. 또한 표4는 0.75[kW] 및 2.2[kW] 3상 유도전동기의 자연

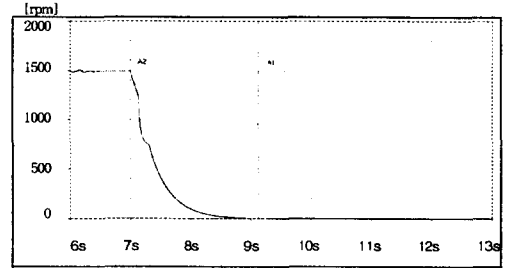


(a) simulation results

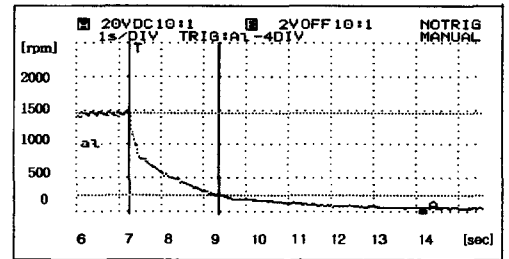


(b) experimental results

그림 7. 0.75 [kW] 3상 유도전동기의 1500 [rpm]에서 자연 정지
Fig. 7. Results in the free stop of the 3-phase induction motor (0.75 [kW], 1500 [rpm])

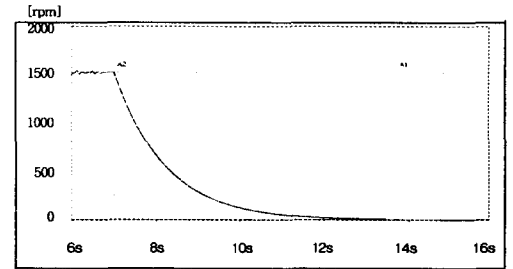


(a) simulation results

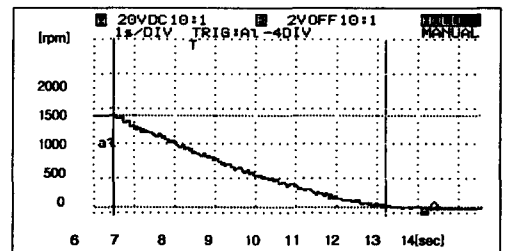


(b) experimental results

그림 8. 0.75 [kW] 3상 유도전동기의 2단계제동
Fig. 8. Results in the 2-stage braking of the 3-phase induction motor (0.75 [kW], 1500 [rpm], 175 [μ F])

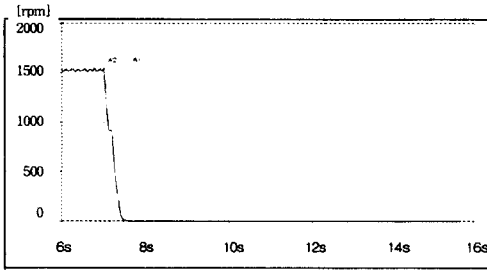


(a) simulation results

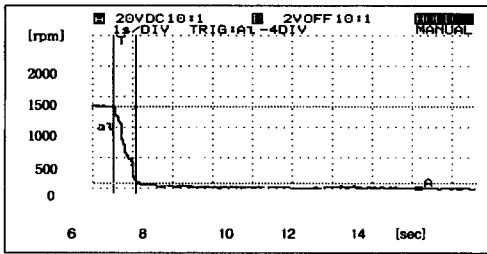


(b) experimental results

그림 9. 2.2 [kW] 3상 유도전동기의 1500 [rpm]에서 자연 정지
Fig. 9. Results in the free stop of the 3-phase induction motor (2.2 [kW], 1500 [rpm])



(a) simulation results



(b) experimental results

그림 10. 2.2 [kW] 3상 유도전동기의 2단계제동
 Fig. 10. Results in the 2-stage braking of the 3-phase induction motor (2.2 [kW], 1500 [rpm], 250 [μ F])

표 3. 제동시간의 비교
 Table 3. Comparisons of braking time

Motor capacity [kW]	Stop	Simulated results [sec]	Experimental results [sec]	Error time [sec]
0.75	Free stop	4.85	4.84	0.01
	2-stage braking	2.13	2.12	0.01
2.2	Free stop	6.71	6.72	- 0.01
	2-stage braking	0.57	0.56	0.01

정지와 2단계 제동결과를 나타낸 것으로서 시뮬레이션 파형과 실험파형을 비교하여 큰 오차가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 종류의 3상 유도전동기를 대상으로 적용이 용이한 효율적인 2단계 제동방법을 제안

표 4. 실측에 의한 자연정지시간과 2단계 제동시간
 Table 4. Experimental 2-stage braking time and free stop

Motor capacity [kW]	Rotor speed [rpm]	Free stop time [sec]	2-stage braking time [sec]	Saving time [sec]
0.75	1710	5.52	2.76	2.76
	1500	4.84	2.12	2.72
	1250	4.36	1.68	2.68
2.2	1735	8.80	1.96	6.84
	1500	6.72	0.56	6.16
	1250	5.48	0.52	4.96

하였다. 특히 기존의 단단 제동법에서 문제시 되고 있는 커패시터의 용량선정에 효율성을 기하고 이를 이용하여 이론치와 실측치를 적절히 비교하여 완전한 실험적 입증에 가능하도록 하였다. 2단계 제동방법은 우선 제동용 커패시터에 의한 자연제동방법을 이용하며, 두번째로 자기적인 제동방법으로 잔류자기를 이용하였다. 3상 유도전동기의 무부하 시험과 구속 시험으로부터 구한 각종 파라미터의 타당성을 MATLAB을 이용한 시뮬레이션으로서 확인하였으며, 3상 유도전동기의 안정경계 조건을 통하여 제동용 커패시터의 용량을 선정하였다. 또한 3상 유도전동기의 제동특성에 대해서 PSPICE로 시뮬레이션 하여 실험 결과와 비교하였다. 이 결과 시뮬레이션 결과와 실측치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며 본 연구에서 제안한 제동방법이 유효함을 입증할 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 2단계 제동의 경우 기존의 기계적 마찰제동이나 전기적 제동에 비하여 소요경비가 저렴하며, 비교적 양호한 안정성을 지니고 있을 뿐만 아니라 제동시간의 단축 등과 같이 매우 우수한 제동특성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안하는 제동방법을 이용하여 대용량 3상 유도전동기를 제동하는 경우 에너지 절감에 크게 기여할 수 있을 뿐 아니라 경비의 절감과 안정성의 측면에 있어서 적지 않은 기여가 이루어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

(1) P. L Alger, The Nature of Induction Machine, New York,

3상 유도전동기의 효율적인 2단 제동 기법

- Gordon and Breach Science Publishers, 1965.
- [2] B. K Boes, Adjustable Speed AC Drive Systems, IEEE PRESS, A81, pp.1~21, 1965.
 - [3] R. Joetten, Chr. Lehl, " A Fast Space-Vector Control for Three-Level Voltage Source Inverter", European Conf. on Power Electronics and Applications, FIRENZE, pp.2~170, 1965.
 - [4] George A. Kaufman, Mark J. Kocher, " Fail-Safe Dynamic Brake for Three-Phase Induction Machines", IEEE Trans on Ind. Appl, Vol. IA-20, No.5, pp.1229~1237, 1984.
 - [5] S. S Murthy, G. J Berg, C. S Jha, Ajay K. Tandon, " A Novel Method of Multistage Dynamic Braking of Three-Phase Induction Motors", IEEE Trans on Ind. Appl, Vol. IA-20, No.2, pp.328~334, 1984.
 - [6] A. K Tandon, S. Sreenivasa Murthy, B.P. Singh, " Experimental Studies on a Novel Braking System for Induction Motors", IEEE Trans on Ind. Appl, Vol. IA-20, No.5, pp.1238~1243, 1984.
 - [7] Paul. C. Krause, Analysis of Electrical Machinery, McGraw-Hill, 1986.
 - [8] B. K Boes, Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 1986.
 - [9] Asish. K. De Sarkar, Gunnar J. Berg, " Digital Simulation of Three-Phase Induction Motors", IEEE Trans on P.A and S, Vol.89, No.6, pp.1031~1037, 1970.

◇ 저자소개 ◇

이 은 영 (李殷榮)

1958년 5월 7일 생. 1995년 한국 방송대 전자계산학과 졸업. 1998년 동국대 산업대학원 졸업(석사). 현재 동국대 대학원 박사과정.

김 용 (金龍)

1957년 3월 20일 생. 1981년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1995년 대림전문대학 제어계측과 교수. 현재 동국대 공대 전기공학과 교수.

김 필 수 (金必洙)

1961년 5월 5일 생. 1984년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~1996년 충청전문대학 전기과 교수. 현재 대림대학 자동차과 교수.

권 순 도 (權純道)

1954년 11월 5일 생. 1978년 광운대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 건국대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1983년~1986년 삼성항공 연구소 근무. 현재 대림대학 전자과 교수.