

## 회전자 저항제어에 의한 권선형 유도전동기 구동 시스템의 소프트 제동

전기전자 및 자동화공학부  
전 태 원, 최 명 규

### <요 약>

회전자 저항제어에 의한 권선형 유도전동기 구동 시스템은 정밀한 속도 또는 위치제어가 필요 없는 응용분야에 적합하다. 본 논문은 이 구동 시스템에서 외부 회전자 저항제어와 함께 발전제동과 직류제동 방식을 적용하여 기계적인 충격 없이 제동되는 기법을 제시하였다. Matlab의 simulink로 시뮬레이션을 수행하여, 이 소프트 제동기법에 대한 타당성을 확인한다

## Soft Braking for a Rotor Resistance Controlled Wound-Rotor Induction Motor Drive System

School of Electrical Eng. and Automation  
Tae-Won Chun and Meong-Kyu Choi

### <Abstract>

The rotor resistance controlled wound-rotor induction motor drive system is suitable for applications not requiring precise speed and position regulation. In this paper, the soft braking method without mechanical shock is proposed using both the dynamic braking and the dc braking with a external rotor resistance control. The braking method is verified with the simulation results using a MATLAB/SIMULINK.

## 1. 서 론

유도전동기 속도제어 방식은 주파수 제어, 고정자 전압 제어, 회전자 저항 제어, 극수 제어 등이 있다. 이 속도제어 방식에서 주파수 제어를 사용한 벡터제어 방식은 직류전동기와 같은 토크 특성을 가지면서 정밀한 속도 및 위치 제어가 가능하다는 장점 때문에 근래에 가장 많이 사용되는 속도제어 방식이다.[1] 그런데 이 벡터제어를 사용한 유도전동기 구동 시스템은 전력회로 및 제어 시스템이 상당히 복잡하다는 단점이 있다. 따라서 overhead 크레인 등 정밀한 위치 또는 속도 제어가 필요 없는 응용 분야에서는 저속에서 큰 회전력을 얻을 수 있으며, 속도제어가 극히 단순하고, 제작비용이 싸다는 장점이 있는 권선형 유도전동기의 회전자 저항 제어 방식이 벡터제어보다 더 적합하여 많이 사용되고 있다.

그런데 이 저항제어는 외부에 연결된 회전자 저항의 손실 때문에 전동기 효율이 떨어지며, 또한 속도 제어 범위가 상당히 제한되어 있다는 큰 단점이 있다. 특히 회전자 저항제어만으로는 전동기를 어느 속도 이하로 제어할 수 없으므로, 전동기의 기동과 제동이 반복되는 응용 분야에서는 전동기의 제동 방법이 큰 문제가 된다.

이 제동문제를 해결하기 위한 방법으로 회전자의 슬립 에너지를 전원으로 환원시키면서 속도제어하여 회생제동이 가능한 슬립전력 환원제어 (Slip power recovery control) 방식이 있다.[2,3,4] 그러나 이 제어 방식은 전력 및 제어회로가 상당히 복잡하고, 전동기속도가 정격속도 근처까지 증가되었을 때 회전자 전압이 상당히 낮아져 슬립제어가 거의 불가능하다는 문제점이 있다. 또 다른 방식은 회전자 저항으로 전동기를 최대한 감소시킨 후, 전동기 3상 단자 중 2상의 단자를 서로 바꾸어 역방향 토크를 인가하여 전동기를 제동하는 역상 제동방식 방식이 있다. 이 역상 제동방식은 제어가 단순하여 실제 산업설비에 많이 사용되고 있으나, 역상 제동 시 갑자기 역방향 토크가 인가되므로 전동기 전류가 급격히 증가되고 기계적인 충격이 크다는 문제점이 있다. 또한 회전자제 대신 직류자속을 인가하여 제동하는 직류제동 (Dc braking) 방식 역시 기계적인 충격이 있으므로 상당히 저속에서만 적용할 수 있다. 마지막으로 유도전동기의 기계적 에너지를 저항으로 소비시켜 전동기 속도를 감소시키는 발전제동 (Dynamic braking) 방식은 제동시간이 너무 길다는 문제점이다.

따라서 본 논문에서는 위에 언급한 제동방식 중 발전제동 (Dynamic braking) 방식과 직류제동 (Dc braking) 방식을 적절히 조합시켜 기계적인 충격없이 부드럽게 제동시키는 제동기법을 제시한다. Matlab의 simulink를 사용한 시뮬레이션을 수행하여, 본 논문에서 제시한 제동방법에 대한 타당성을 확인한다.

## 2. 회전자 저항제어 방식

다음 그림 1은 회전자의 변수를 고정자 축으로 변환시킨 유도전동기의 근사 등가회로이다.[5]

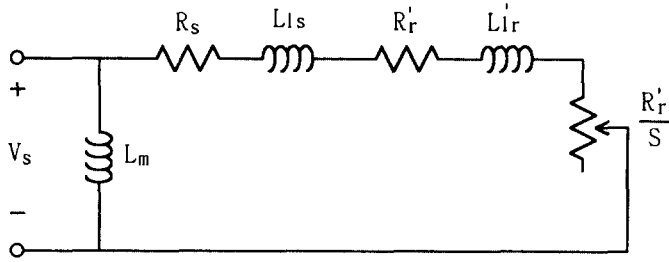


그림 1 유도전동기의 근사 등가회로

Fig. 1 Approximate equivalent circuit of induction motor

이 등가회로에서 전동기 토크 식은 다음과 같이 유도된다.

$$T_e = 3 \left( \frac{P}{2} \right) \frac{R'_r}{s \omega_e} \frac{V_s^2}{\left( R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \omega_e^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2} \quad (1)$$

(여기서 P는 극수,  $\omega_e$ 는 동기각속도, s는 슬립이다.)

식 (1)에서 최대 토크  $T_{em}$ 는 다음 식과 같다.

$$T_{em} = \frac{3}{4} \frac{P}{\omega_e} \frac{V_s^2}{R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_e^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2}} \quad (2)$$

식(1)의 토크 식에서 토크는  $R'_r/s$ 의 함수이므로, 동일한 전동기 토크에서 회전자 저항이 증가되는 비율에 따라 슬립이 증가되는 (즉 속도가 감소되는) 비례추이 (Proportional shift)가 된다. 또한 식(2)에서 전동기의 최대 토크는 회전자 저항에 무관함으로 회전자 저항의 변화에 대한 전동기의 토크-슬립(또는 속도)의 특성곡선은 그림 2와 같다.

이 특성곡선에서 회전자 저항이 증가되면 속도가 감소되고, 반대로 저항이 감소되면 속도가 증가하게 된다. 따라서 전동기의 기동 시에는  $R_5 \rightarrow R_4 \rightarrow R_3 \rightarrow R_2 \rightarrow R_1$ 의 순서로 변화시켜 전동기속도를 증가시키고, 제동 시에는  $R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$ 의 순서로 회전자 저항값을 변화시켜 전동기속도를 감소시킨다..

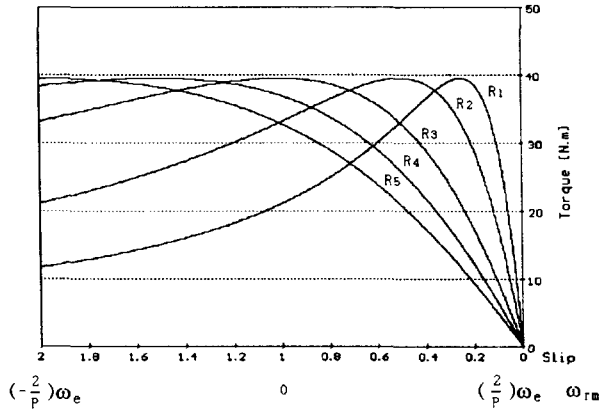


그림 2 토크-슬립 특성곡선

Fig. 2 Torque-slip characteristics curve

### 3. 소프트 제동 기법

회전자 저항제어에 의한 권선형 유도전동기 구동시스템에서 외부 회전자 저항제어와 함께 발전제동과 직류제동 방식을 적용하여 기계적인 충격 없이 제동하는 기법을 기술한다. 먼저 전체 시스템 구성에 대하여 설명한 후, 소프트 제동제어 방법에 대하여 기술한다.

#### 3-1. 시스템 구성

그림 3은 소프트 제동기법을 포함한 회전자 저항제어에 의한 권선형 유도전동기 구동시스템의 구성도이다.

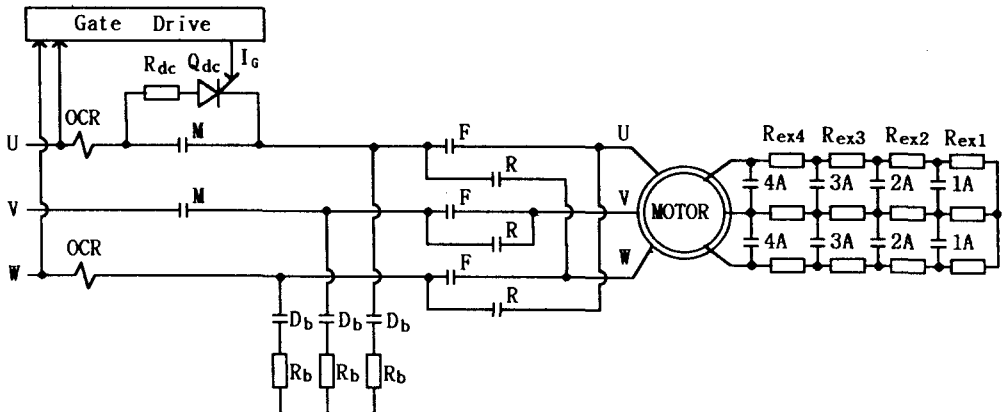


그림 3 회전자저항 제어에 의한 권선형 유도전동기 구동시스템

Fig. 3 Rotor resistance controlled wound-rotor induction motor drive system

4개의 외부 회전자 저항  $R_{ex}$ 가 전자계전기를 통하여 직렬로 연결되어 있으므로 5단계까지 속도제어가 가능하며, 3개의 전자계전기 F는 전동기를 정방향 회전시킬 때 사용되고 계전기 R은 전동기를 역방향 회전시킬 때 사용한다. 전자계전기  $D_b$ 와 저항  $R_b$ 는 전동기의 기계적 에너지가 저항  $R_b$ 를 통하여 소비되어 전동기속도를 감소시키는 발전제동용으로 사용한다. 싸이리스터  $Q_{dc}$ 는 전동기의 직류제동을 위한 것으로, 속도가 0에 가까워질 때 주계전기 M을 오프(off)시키고 싸이리스터의 위상각으로 U상과 W상 사이 흐르는 직류전류 크기를 제어하여 전동기를 정지시킨다.

### 3-2. 소프트 제동 시스템의 동작

소프트 제동 시스템의 동작을 단계적으로 설명하고자 한다. 먼저 회전자 측의 3상 4개 계전기가 모두 온(on)상태로 하여 전동기가 거의 최대속도로 동작하고 있을 때, 그림 4는 이 전동기를 제동하기 위한 동작을 전동기속도와 함께 단계적으로 그린 것으로, 각 구간별 동작상태는 다음과 같다.

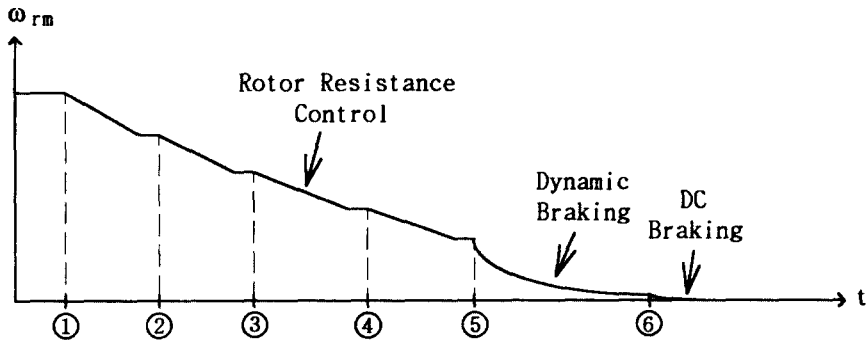


그림 4 소프트 제동 시스템의 동작

Fig. 4 Operation for a soft braking system

1) 외부 회전자 저항을 증가시켜 전동기속도를 감소시킨다. 즉 전동기속도가 감소되는 시간에 따라 각 계전기를 차례로 ① 4A 계전기 오프 ② 3A 계전기 오프 ③ 2A 계전기 오프 ④ 1A 계전기 오프시킨다.

2) ⑤에서 발전제동을 한다.

발전제동용 계전기  $D_b$ 를 온시킨 후 바로 주계전기 M을 오프시켜 유도전동기를 3상 전원에서 분리시킨다. 따라서 발전 제동용 저항  $R_b$ 가 고정자에 연결되어 고정자전류가 이 저항으로 흐르므로 기계적 에너지가 이 저항으로 소비되어 전동기속도가 급격히 감소된다.

3) ⑥에서 직류제동을 수행한다.

발전제동으로 전동기속도가 0에 가까이 도달하였을 때, 동기속도로 회전하는 회전자계 대신 두 상에 직류전류를 인가하여 전동기를 정지시키는 직류제동을 시행한다. M 계전

기와 F계전기를 온시키고, D<sub>b</sub>계전기를 오프시킨 후, 싸이리스터의 위상각으로 U상과 W상 사이에 직류 제동전류를 제어한다. 즉 몇 주기를 거쳐 싸이리스터의 위상각을 180° 부터 0° 까지 점차적으로 감소시켜 직류전류를 서서히 증가시킴으로써 전동기 정지시 충격을 최소화 한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

MATLAB/SIMULINK를 사용하여 회전자저항 제어에 의한 권선형 유도전동기 구동시스템에서 소프트 제동기법에 대한 시뮬레이션을 수행하며, 그림 5는 이 구동 시스템의 MATLAB/SIMULINK 모델을 보인 것이다. 이 모델에서는 권선형 유도전동기를 포함하여 F, R, M 계전기 및 싸이리스트로 구성된 블록과 싸이리스터 게이트 신호발생 블록, 발전제동용 저항 및 계전기 블록, 회전자 저항제어 블록 및 각 부분의 파형측정용 오실로스코프 등으로 구성되어 있다.

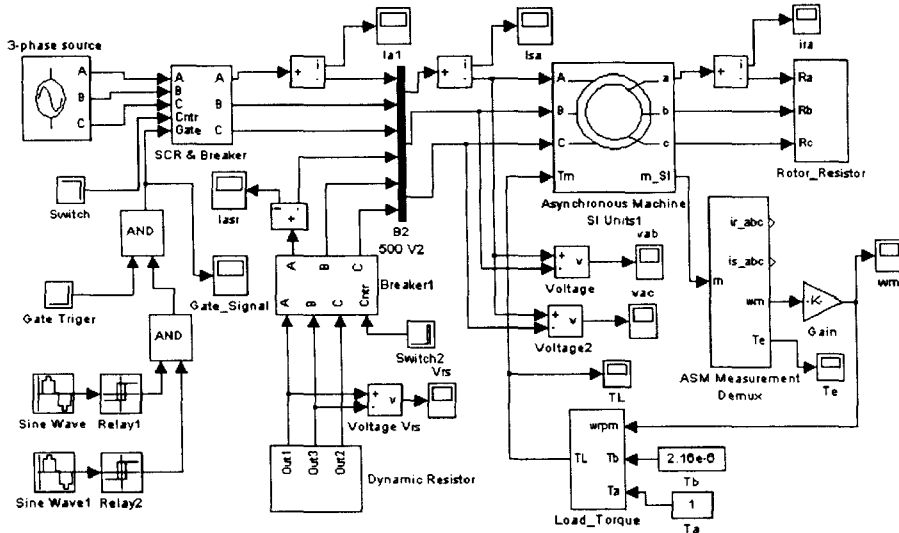


그림 5 권선형 유도전동기 구동시스템의 MATLAB/SIMULINK 모델

Fig. 5 Wound-rotor induction motor drive system model with MATLAB/SIMULINK

여기서 사용된 유도전동기의 정격 및 상수는 표 1과 같다.

표 1 유도전동기 정격 및 상수  
Table 1 Specification of induction motor

정격 출력 및 전압	2.2 [KW], 220 [V]
극 수	4 극
고정자 저항	0.687 [ $\Omega$ ]
회전자 저항	0.646 [ $\Omega$ ]
고정자 누설인덕턴스	2.61 [mH]
회전자 누설인덕턴스	3.92 [mH]
상호 인덕턴스	81.36 [mH]
관성 모멘트	0.0376 [Kg · m <sup>2</sup> ]
마찰 계수	0.003 [Kg · m <sup>2</sup> /s]

그림 6은  $t=1$ 초에서 5.5초까지 계전기 4A부터 계전기 1A까지 순차적으로 오프시킨 후,  $t=6.8$ 초에서 발전제동하고,  $t=7.0$ 초에서 직류제동하였을 때 전동기속도의 시뮬레이션 결과이다. 회전자 저항이 증가됨에 따라 속도가 단계적으로 감소되며, 발전제동 및 직류제동 시 속도가 빠른 속도로 감소되면서 부드럽게 정지됨을 알 수 있다.

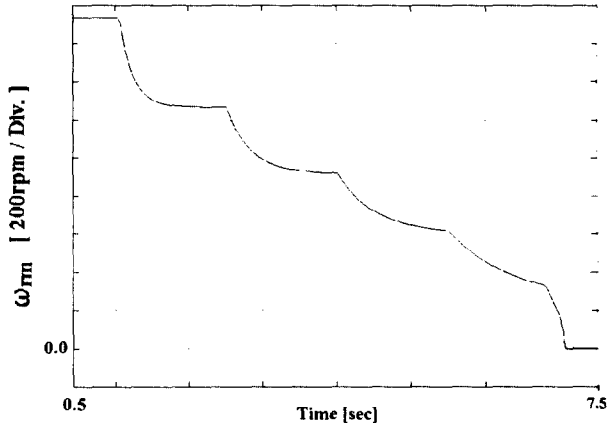
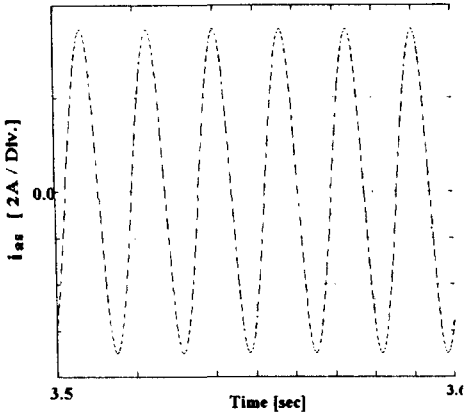
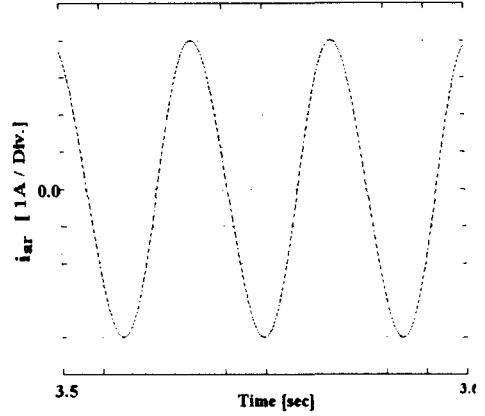


그림 6 전동기속도 제동 특성  
Fig. 6 Braking characteristics of motor speed

그림 7은 계전기 3A가 오프되어 전동기가 약 950 rpm으로 동작하고 있을 때, (a)는 a상 고정자전류  $i_{as}$ , (b)는 a상 회전자전류  $i_{ar}$ 의 파형이다. 그림 8은 회전자 저항제어에서  $t=6.8$ 초에서 발전제동할 시, 고정자 전압  $V_{ac}$  와 a상의 고정자 전류파형을 보인 것으로, 기계적 에너지가 발전제동용 저항으로 소비됨으로써 고정자전압과 고정자전류가 감소된다.



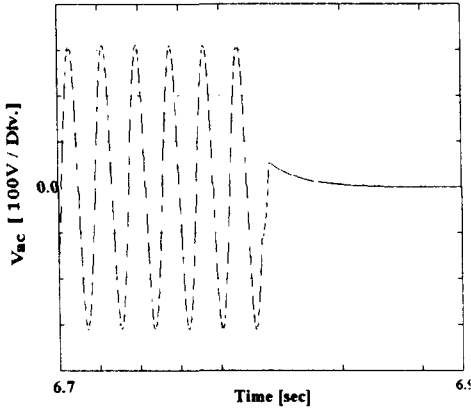
(a) a상 고정자 전류



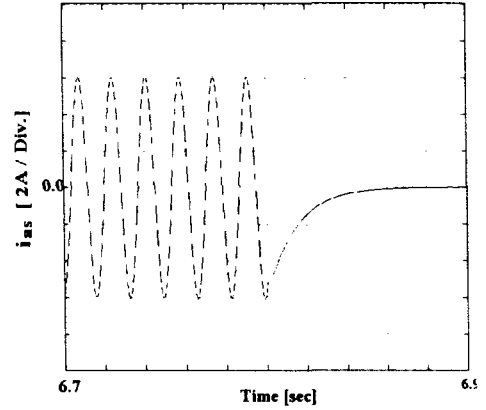
(b) a상 회전자 전류

그림 7 회전자 저항 제어 특성

Fig. 7 Characteristics of rotor resistance control



(a) 고정자 전압



(b) a상 고정자 전류

그림 8 발전제동 특성

Fig. 8 Characteristics of dynamic braking

그림 9는 직류 제동시 a상 및 c상의 고정자 전류파형이다. b상 전류는 0이 되고, 직류 전류가 a상에서 c상으로 흐르므로  $i_{as}$ 는 양의 값을 가지고  $i_{cs}$ 는 음의 값을 가진다.



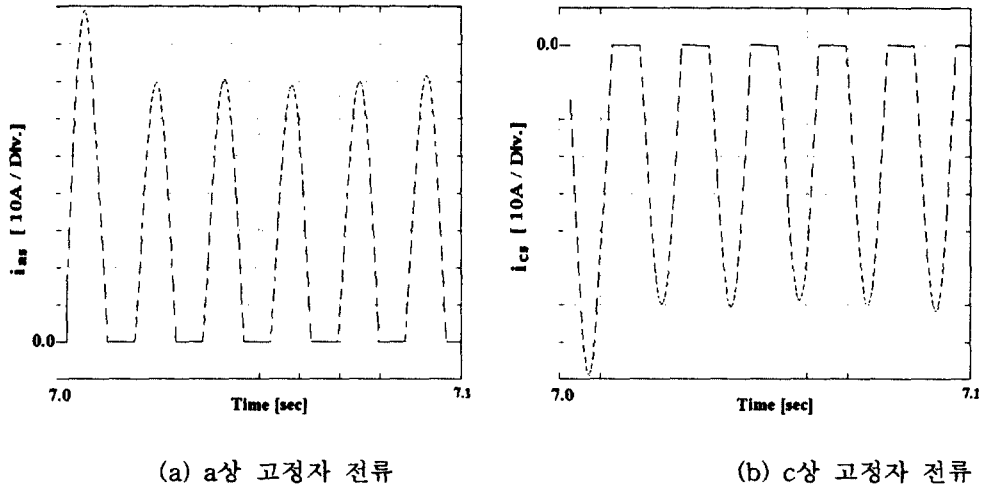


그림 9 직류제동 특성  
 Fig. 9 Characteristics of dc braking

## 5. 결론

회전자 저항제어에 의한 권선형 유도전동기 구동시스템에서 전동기 속도에 따라 발전제동과 싸이리스터 위상각으로 직류 제동전류를 제어하는 직류제동을 조합시켜 기계적 충격이 없는 제동기법을 제시하였다. 이 구동 시스템을 MATLAB/SIMULINK의 모델로 구성하고 시뮬레이션을 수행한 결과, 전동기 속도는 발전제동 및 직류제동 시 큰 폭으로 감소하면서 충격 없이 제동되었다. 또한 발전제동 시 전동기의 축적된 에너지가 발전제동용 저항으로 소비되는 과정과 싸이리스터 위상각으로 제어되는 직류 제동전류 파형 등에서 급격한 전류의 변화가 없음을 보였다.

이 제동기법은 정밀한 속도 또는 위치 제어가 요구되지 않고, 기동 및 정지가 계속 반복되는 응용분야에 적용할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] T.Kume and T.Iwakane, "High-Performance Vector-Controlled AC Motor Drives : Applications and New Technologies", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.IA-23, No.5, Sep./Oct., 1987.
- [2] P.C.Sen and K.H.J.Ma, "Rotor Chopper Control for Induction Motor Drive : TRC Strategy", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.IA-11, pp.43-48, Jan./Feb., 1975.
- [3] A.Smith, "Static Scherbius System of Induction Motor Speed Control", Proc. Inst. Electr. Eng., Vol.124, pp.557-565, 1977.
- [4] T.Wakabayashi, T.Hori, K.Shimzu, and T.Yoshioka, "Commutatorless Kramer Control System for Large Capacity Induction Motor for Driving Water Service Pumps", Conf. Rec. IEEE/IAS Annu. Meet, pp.822-828, 1976.
- [5] B.K.Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, 1986.