

주차설비용 벡터제어 유도전동기 시스템의 약계자제어에 관한 연구

최 철, 이상훈, 김병수, 김철우
부산대학교 전기공학과 전력전자연구소

A study on the Field Weakening Control of Induction Machine System for Parking Facilities

Cheol Choi, Sang-Hun Lee, Byoung-Soo Kim, Cheul-U Kim
Power Electronics Lab. Dept. of Electrical Engineering Pusan Univ.

Abstract

In this paper, a control method for field weakening region of induction machine drive which is based on indirect field oriented control was implemented.

Also, application method of direct field oriented control in the field weakening region using maximum torque control methods which is adaptable for parking facilities was studied.

The implemented method which is based on direct field oriented control method ensures the full utilization of the output torque capability of the machine over the conventional $1/\omega_r$ method. And machine drive system can obtain the robustness to motor parameter variation

1. 서 론

최근의 기계식 입체주차설비는 시스템의 다양성에도 불구하고 주차용 차량에 대한 입·출고 처리 소요시간의 제한을 갖게 된다. 입·출고 처리 소요시간 구성 요소 중에서 상·하강 운전시간의 단축은 전체적인 운전 소요시간을 효과적으로 단축시킬 수 있다.

기계식 주차설비는 대부분 유도전동기를 주 동력원으로 하고 있으므로, 건축물 내·외부에 설치되는 주차설비는 구동장치 설치 공간의 최소화와 경제성을 고려하여 동일한 용량의 유도전동기를 사용하는 경우라면 차량의 운반 처리 능력을 최대화하여야 한다. 특히, 벡터제어 유도전동기 시스템을 갖는 구동장치는 시스템의 소요동력 계산에 있어서 가속시를 고려하여 일정한 여유를 갖게 된다. 구동용 유도전동기의 교체없이 상·하강 운전시간을 단축하기 위한 방법으로는, 주차설비의 확보된 구동능력 범위 이내에서 발생 가능한 토오크를 기준으로 동기속도 이상의 속도구간까지 제어범위를 확대하는, 약계자(field weakening) 제어방법을 고려할 수 있다. 기계식 주차설비의 실제 사용조건을 고려해보면, 시스템의 상·하강 이동거리의 제한과 구동력 계산의 조건 등에 의해 최대 운전구간은 2000[rpm] ~ 3000[rpm] 정도이다.

본 논문에서는 약계자(field weakening)영역에서 간접벡터제어에 의한 회전자속 기준전류를 회전자 각속도 ω_r 에 반비례시키는 방법을 적용한 경우와 전압방정식으로부터 자속각을 연산하고 주어진 전압과 전류의 제한으로부터 기준전류를 제어하는 직접벡터제어에 의한 최대 출력 토오크 제어방법을 적용한 약계자제어에 대한 시뮬레이션을 행하였다.

그리고 실험을 통하여 직접벡터제어시 약계자 천이가 간접벡터제어의 $1/\omega_r$ 기법을 적용한 경우보다 고속영역에서 나타나고 토오크 전류지령에 대한 출력 토오크 추종 및 유도전동기 상수 변동에 강인함을 확인함으로써 직접벡터제어에 의한 약계자 제어의 실용상의 타당성을 입증하였다.

2. 약계자 제어이론

2.1 유도전동기의 속도영역

그림1은 가변전압, 가변주파수 제어를 행하였을 때, 유도전동기의 각 속도제어 영역에 따른 특성 변화를 나타낸 그림이다.

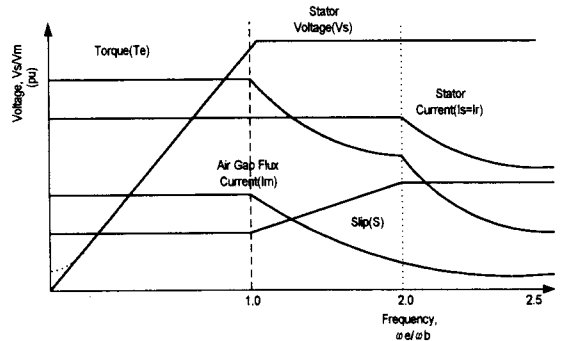


그림 1. 유도전동기의 속도와 토오크 특성 곡선

그림1의 정토오크 구간의 우측 끝단에서, 고정자 전압이 정격전압에 도달하면서부터 정출력 구간으로 접어드는 것을 볼 수 있다. 이 영역에서는 공극자속은 감소하지만, 슬립이 증가함으로써 고정자 전류는 일정하게 유지된다. 이것은 직류 분권전동기에 있어서의 약계자 운전모드와 유사하다. 정출력 영역의 끝단에서는 정동토오크(break down torque)에 도달하고, 여기서부터 다시 주파수를 높이면 속도는 고정자 전류의 감소와 함께 증가된다.

2.2 $1/\omega_r$ 기법을 적용한 약계자 제어

유도전동기의 고속 운전을 위해 가장 많이 사용하는 약계자 제어방식은 기준속도이상에서는 속도에 반비례로 자속성분 전류 또는 회전자속을 감소시키는 개루프 방식이다. 회전자속을 줄이기 위해 d축 기준전류 i_{ds}^* 를 줄이고 q축 기준전류 i_{qs}^* 는 전류 정격을 최대한 활용하기 위해 d축 기준전류의 감소에 따라 반대로 증가한다. d축의 기준전류는 유도전동기의 무부하전류를 d축의 정격전류로 두고, 회전자 각속도는 동기속도에 대한 단위속도 비율로 나타내면 이때의 관계식은 식(2.1)와 같다.

$$i_{ds}^{e*} = \frac{I_{ds-rate}}{\omega_{rpu}} \quad (2.1)$$

$$i_{qs}^{e*} = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds}^{e*2}} \quad (2.2)$$

여기서, $I_{ds-rate}$: d축의 정격전류

ω_{rpu} : 회전자 각속도의 p.u.값

식(2.1)와 식(2.2)를 조합하면 식(2.3)과 같이 정리된다.

$$i_{qs}^{e*2} + \left(\frac{I_{ds-rate}}{\omega_{rpu}}\right)^2 = I_{smax}^2 \quad (2.3)$$

이 식은 회전자속이 $1/\omega_r$ 에 따라 감소될 때, q축 기준전류 i_{qs}^{e*} 의 궤적이 속도의 증가에 따라 전류제한 원을 따라 이동하는 것을 의미한다.

2.2 최대 토오크제어 영역

이용 가능한 DC 링크전압과 적용되는 PWM 방법에 의해 결정되는 전압제한은 최대 고정자 전압을 V_{smax} 라고 할 때 식(2.4)을 만족해야 한다.

$$V_{qs}^{e2} + V_{ds}^{e2} \leq V_{smax}^2 \quad (2.4)$$

여기서, V_{ds}^e 은 d축 전압이고 V_{qs}^e 은 q축 전압이다. 그리고 최대 고정자 전류 I_{smax} 는 인버터의 전류정격과 기기의 열정격에 의해서 제한된다. d축 기준전류와 q축 기준전류는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$i_{qs}^{e*2} + i_{ds}^{e*2} \leq I_{smax}^2 \quad (2.5)$$

이 식은 주어진 전류정격에서 제어할 수 있는 기준전류의 궤적을 의미한다. 이와 같은 전류제한조건을 만족하기 위해서 기준전류 즉, d축 기준전류 i_{ds}^{e*} 와 q축 기준전류 i_{qs}^{e*} 는 식(2.5)을 만족해야 한다. 전류제한궤적은 속도에 무관하게 일정값의 반지름을 갖는 원의 궤적을 나타내지만 전압제한궤적은 속도가 증가함에 따라 그 속도에 해당하는 타원의 궤적이 작아지게 된다.

전동기의 기준전압과 전류는 상술한바와 같이 주어진 전압과 전류의 제한조건을 항상 만족하도록 설정되어야 한다. 주어진 기준전압과 전류의 제한조건하에서 제어 가능한 기준 토오크분 전류 i_{qs}^{e*} 와 기준 자속분 전류 i_{ds}^{e*} 의 범위를 구하기 위한 동기좌표계의 고정자 전압방정식을 고정자 전류와 회전자속이 포함된 식으로부터 식(2.6)과 같다.

$$V_{ds}^{e*} = r_s i_{ds}^{e*} + \sigma L_s \frac{di_{ds}^{e*}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} p \lambda_{dr}^{e*} - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*} \quad (2.6)$$

$$V_{qs}^{e*} = r_s i_{qs}^{e*} + \sigma L_s \frac{di_{qs}^{e*}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} p \lambda_{qr}^{e*} + \omega_e L_s i_{ds}^{e*}$$

여기서 자속의 변동은 주로 약계자 영역에서 속도에 따라 변동하기 때문에 무시할 수 있고 전류의 변동에 의한 전압강하 역시 전류가 급격히 변동하지 않는 경우라면 무시할 수 있다. 또한 고속영역에서는 고정자 저항에 인가되는 전압은 인덕턴스에 인가되는 전압에 비해 매우 작은 값이므로 뒷 식에서 고정자 전압강하에 의한 항을 무시하면 다음과 같이 간단하게도 표현할 수 있다.

$$V_{ds}^{e*} = -\omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*} \quad (2.7)$$

$$V_{qs}^{e*} = +\omega_e L_s i_{ds}^{e*}$$

식(2.7)을 전압제한식에 대입하면 식(2.8)을 얻는다.

$$(\omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*})^2 + (\omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 \leq V_{smax}^2 \quad (2.8)$$

2.3 고정자 저항을 고려한 약계자 제어

전압제한조건과 전류제한조건하에서 출력 토오크를 최대로 하는 최적의 기준전류를 다음과 같은 약계자 영역($\omega_{base} < \omega_e < \omega_1$)에서 구할 수 있다. 이 영역의 범위는 기준주파수 ω_{base} 로부터 최대슬립에 도달할 때까지의 주파수 ω_1 이다. 여기서 기준주파수 ω_{base} 는 약계자 운전의 시작주파수로 정의한다. 식(2.6)에 고정자저항을 고려한 전압제한식을 표현하면 식(2.9)와 같다.

$$(r_s i_{qs}^{e*} + \omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 + (r_s i_{ds}^{e*} - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*})^2 = V_{smax}^2 \quad (2.9)$$

이 식으로부터 최대 출력 토오크 발생을 위한 최적의 기준전류를 구할 수 있다.

3 실험

간접벡터제어와 직접벡터제어를 적용한 시뮬레이션과 실험사의 약계자 제어는 22[kW] 4극 유도전동기를 대상으로 하였다. 실험에 적용한 모터의 정격 및 상수는 표1과 같다.

표 1. 유도전동기 정격 및 상수

정격출력	22[kw]
정격전압	AC 380[V]
정격전류	44[A]
정격속도	1746[rpm]
Lm	21.328[mH]
Lls	0.687[mH]
Llr	1.03[mH]
Rs	0.0915
Rr	0.178

시뮬레이션과 실험에서 직류링크전압은 540[V]로 일정하게 유지하였고, 인버터의 최대허용 전류는 정격전류의 2배로 선정하였다. 시뮬레이션은 Mitchell & Gauthier Associate사의 시뮬레이션 전용 소프트웨어 ACSL을 사용하였다.

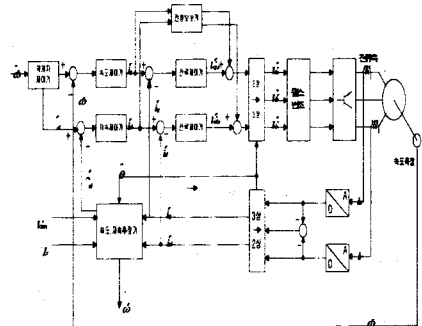


그림 2 DSP제어기를 사용한 벡터제어의 블록선도

실험에서는 정토크영역 및 정출력 운전 영역에 있어서의 제반 특성을 살펴보았다. 앞서 논한 유도전동기 벡터제어를 위한 전체 시스템의 구성은 그림 2과 같다.

그림 3에서 속도지령 ω_{ref} 는 900[rpm], 1800[rpm], 3000[rpm]을 스텝으로 입력하여 측정된 실험파형이다. 회전자 속도 ω_{rpm} 은 속도 지령에 따른 응답을 나타낸다. d축 기준전류 $i_{dse-ref}$ 는 고속운전영역에서 약제자 상태를 보인다. q축 기준전류 $i_{qse-ref}$ 는 속도 지령에 따른 가·감속시의 전류변화를 나타낸다.

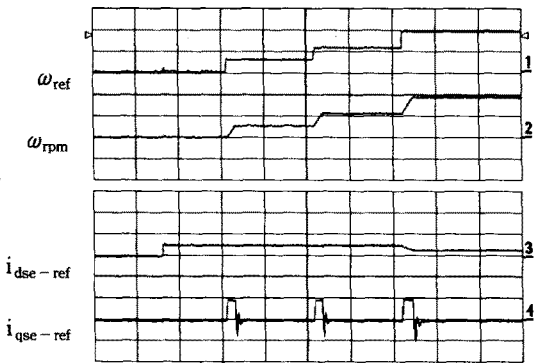


그림 3. 속도 응답 곡선과 d-q 기준 전류

그림 4는 직접벡터 제어형 약제자제어에서 스텝상으로 변하는 지령속도에 대한 토크 변동 파형과 이때의 d-q축 기준 전류를 나타낸다.

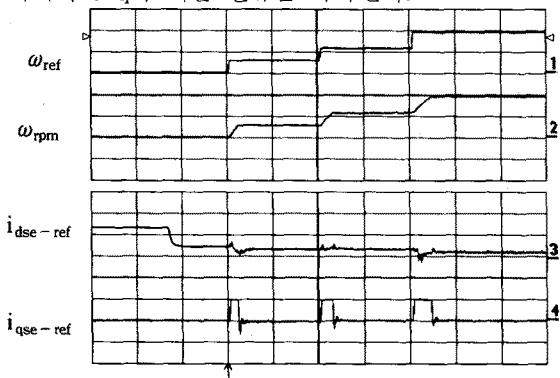


그림 4. 토크 변동과 d-q축 전류 지령치

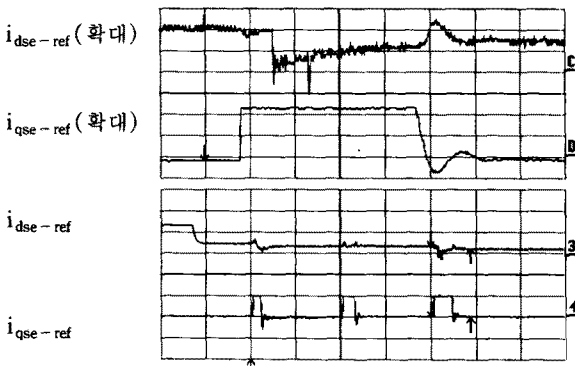


그림 5. d-q축 기준 전류

그림 5는 그림4에서의 d-q축 기준전류파형과 이 파형에 대한 확대파형을 나타내고 있고, 확대된 파형으로부터 d축 기준전류가 고속영역에서 감소하는 동안 q축 전류는 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

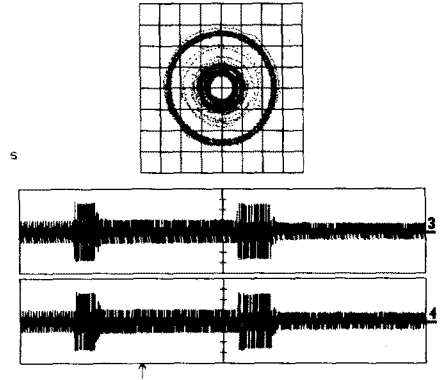


그림 6. d-q축 고정자 전류

그림 6은 속도 제어 구간에 걸친 전류 제한 원을 확인하기 위한 d-q축 고정자 전류와 이에 대한 리샤주 파형을 나타낸다.

4. 결 론

벡터제어 유도전동기 시스템을 갖는 주차설비 구동장치의 고속화 운전에 있어서 약제자 제어이론의 효과적인 적용을 고려할 수 있으며, 이와 같은 경우 간접벡터제어에 주로 적용하는 $1/\omega_r$ 방법은 동기속도를 고정된 상태에서 사용하기 때문에 약제자 천이점 결정이 확실적이고, 그 출력 특성이 제어기의 이득과 유도전동기 상수 설정에 따라 크게 영향을 받게 된다.

이와 같은 여건을 고려하여 직접벡터 제어형 약제자제어 알고리즘을 고속 운전용 주차설비에 적용 가능한 형태로 유도 해 보았고, 이를 시뮬레이션과 주차설비용 22[kW] 유도전동기에 대해 적용하여 검증해 보았다.

(참 고 문 헌)

- [1] R.J.Kerkman, T.M.Rowan and D.Leggate "Indirect field-orientated control of an induction motor in the field weakening region" IEEE IAS. vol 28, no4 , July/August pp.850-857, 1992.
- [2] S. H. Kim, S. K. Sul, and M. H. Park "Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region" in Conf. Rec. IEEE-ICON Annu.Meeting, pp599-604, 1994.
- [3] Novotny Lipo "Vector Control and Dynamics of AC Drives".Clarendon Press · Oxford, 1996.