ANN을 이용한 SynRM 드라이브의 최대토크 제어

(Maximum torque control of SynRM drive using ANN)

고재섭* · 박기태 · 최정식 · 박병상 · 정동화
(Jae-Sub Ko · Ki-Tae Park · Jung-Sik Choi · Byung-Sang Park · Dong-Hwa Chung)

Abstract

In this paper, a new approach for the Synchronous Reluctance Motor control which ensures producing Maximum Torque per Ampere(MTPA) over the entire field weakening region is presented. In addition, This paper presents a speed sensorless control scheme of SynRM using artificial neural network. Also, by adjusting the base speed for the field weakening operation according to the flux level, the current and voltage limit, the smooth and precise transition into the field weakening operation can be achieved. The proposed scheme is verified validity through simulation.

1. 서 론

벡터제어 SynRM 드라이브는 고속 운전을 위한 약계자 제어가 필수적이며 회전자 속도를 증가시켜 자속전류를 감소시키면 자속을 쉽게 약화시킬 수 있다.[1] 전동기에 의해 발생한 최대토크는 허용 가능한 인버터의 전류정격 및 최대전압에 의존한다.[2] 따라서 전압과 전류 제한을 고려하여 전 속도 영역에서 MTPA(Maximum Torque per Ampere)가 가능한 제어 기법을 사용할 필요가 있다.

고속에서 전동기의 토크의 능력은 약계자 제어 방법에 의존한다. 약계자 제어를 위한 종래의 방법에서는 지령 회전자자속이 IRS(Inverse of Rotor Speed)에 비례하여 변화한다.[3] 이 방법에서는 지령자속이 매우 크며 전류를 조절할 수 있는 전압이득을 충분하게 유지할 수 없다. 따라서 IRS 방법에서는 주어진 한계조건에서 전동기의 토크 능력을 최대로 할 수 없다.

SynRM 드라이브를 위한 위치 및 속도 센서리스 벡터제어의 연구가 다양하게 이루어지고 있다.[4] SynRM은 고유의 돌극 특성과 회전자 위치에 대한 인덕턴스 변화가 빈번하여 유도전동기보다 센서리스 구현이 용이하다.

본 논문에서는 제한 전압과 전류에서 전 고속영역에 최대토크 동작이 가능한 SynRM 드라이브 시스템을 위한 새로운 약계자 제어를 제시한다. 정격속도 이하에서는 일정 토크영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 절환하여 일정 전력영역으로 운전한다. 일정 전력영역인 약계자 동작의 전이는 전압과 전류 제한에서 자속레벨을 조절한다. 드라이브 시스템을 위한 동작은 ANN(Artificial Neural Network)에 의해 속도를 추정하는 센서리스 벡터제어에 의해 수행한다. 본 논문에서 제시한 기법의 출력 토크능력을 종래의 IRS와 비교하여 그 결과를 제시한다.

2. ANN에 의한 속도추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 된 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용된다.

ANN을 위한 이상적인 적용은 비선형 시스템의 추정 분야에 있다. 실질적으로 어떤 이산 비선형 시스템은 지연 입·출력에서 시스템을 표현할 수 있는 NARMAX(Nonlinear AutoRegressive Moving Averge with eXogenous inputs) 모델에 의해서 나타낼 수 있다. 일반적으로 NARMAX 모델은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}(k+1)=\mathbf{f}(\mathbf{y}(k),\cdots,\mathbf{y}(k-d_y),\mathbf{u}(k),\cdots,\mathbf{u}(k-d_u)) \quad (1)$$

여기서 d_u와 d_y는 입력과 출력 벡터 u와 y에서 최대 지연을 나타낸다. 이 모델의 형태는 모델이 전적으로 기지 양으로 표현되기 때문에 시스템의 추정을 추구하는데 이상적이다. 그림 1은 ANN을 이용한 시스템의 추정을 나타낸다. ANN은 시스템의 NARMAX 모델을 추정하는데 사용하며 이를 위해 식(1)에서 필요한 입력과 예측 출력벡터 $\hat{y}(k+1)$로서 ANN의 출력을 구성한다. 시간 $k+1$에서 예측 출력벡터를 실제 출력벡터와 비교하여 식(1)에서 함수 $\mathbf{f}(\cdot)$를 에뮬레이터하기 위하여 학

습한다. 그리고 오차 역전파 알고리즘에 의해 ANN 하중을 새롭게 하기 위하여 오차를 사용한다.

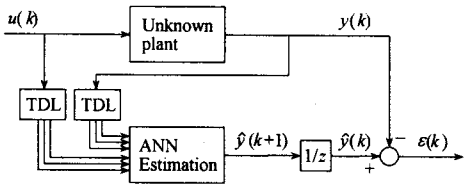

그림 1 ANN을 이용한 시스템 추정
Fig. 1 System estimation using ANN

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T}\{\frac{1}{c}[i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)]\hat{i}_{dm}(k-1) \\ &\quad - c[i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)]\hat{i}_{qm}(k-1)\} - \frac{\alpha}{T}\Delta W_2(k-1)\end{aligned} \quad (2)$$

여기서 T는 샘플링 주기를 나타내며 η는 학습계수이며 학습과정에서 학습율을 나타낸다. 이 계수가 크면 하중 변화가 크다. 실제 구현을 위하여 학습율은 진동이 유발되지 않는 범위에서 큰 값으로 선정한다. 계수 α는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

추정속도를 이용하여 회전자 자극의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (3)$$

그림 2는 신경회로망을 이용한 SynRM의 벡터제어 시스템을 나타낸다.

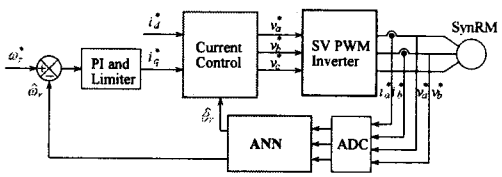

그림 2 SynRM의 벡터제어 시스템
Fig. 2 Vector control system of SynRM

3. 약계자 제어

전동기의 가변속 드라이브 시스템에서 출력토크는 인버터에서 전동기에 공급되는 최대 전압과 전류에 의해 제한된다. 따라서 약계자 영역에서는 인버터의 공급 전압과 전류를 이용하여 전동기의 최대 토크를 발생할 수 있도록 약계자 제어를 수행한다.

전압과 전류의 제한조건을 모두 고려할 경우 약계자 영역의 제어 가능한 기준전류의 영역은 전압제한 타원과 전류제한 원의 공통영역이다. 전압제한 타원은 약계자 영역 중 고속영역에서 고려하였고 최대토크 곡선과 전류제한 원의 교점은 일정 토크영역과 약계자 제어 영역의 전환점이 된다.

SynRM의 출력과 일정 전력영역의 지령 토크는 다음과 같다.

$$P_{out} = \omega_m T_e = \frac{2}{P}\omega_r T_e \quad (2)$$

$$T_e^* = \frac{P \cdot P_{out}}{2} \cdot \frac{1}{\omega_r} = \frac{T_{e-rate}^* \cdot \omega_{r-rate}}{\omega_r} \quad (3)$$

지령 토크가 변화하는 약계자 제어영역에서 동작모드는 그림 3과 같이 세 개의 영역으로 구분한다.

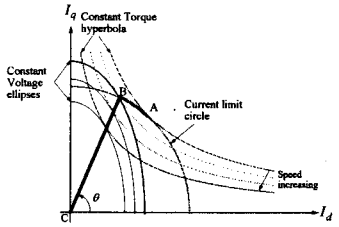

그림 3 SynRM의 약계자 동작
Fig. 3 Field weakening operation of SynRM

모드 Ⅰ : 일정 최대토크에 의한 전류제한 영역

최대토크를 위한 최적 전류각과 전류제한에서 동작하는 최대토크를 발생하는 저속영역이다. 이는 I_d-I_q 평면의 일정 토크궤적에서 A점과 일치하며 토크궤적은 일정 전류원과 접하게 된다. 전압제한은 모드 Ⅰ에서 최고의 속도로 정의한다.

모드 Ⅱ : 전류와 전압의 제한영역

전동기는 A점에서 B점까지 일정 전류원을 따라 동작한다. 이 영역에서는 일정 전압타원의 크기가 감소하므로 속도는 증가하게 된다.

모드 Ⅲ : 전압제한 영역

속도를 더욱 증가시키면 전류가 감소하게 되고 이 경우에 전류제한에 있는 전류를 발생시키기 위하여 일정 전압은 불충분하다. 전동기는 일정 토크궤적이 일정 전압타원에 접해 있는 최적조건에서 동작한다. 즉, 토크는 B점 이상의 속도에 대한 각 값에서 최대화가 된다.

4. 최대토크 제어

전압과 전류의 제한조건을 동시에 만족하고 전동기 최대토크를 발생하는 최적의 기준전류를 구한다. 전압과 전류 제한조건을 동시에 만족시키기 위한 기준 전류 벡터는 그림 4의 운전 속도에서 타원과 원의 공통영역에 존재해야 한다. 이 영역에 존재하는 i_q와 i_d의 조합은 수없이 많이 존재한다. 이들의 조합 중에서 출력 토크를 최대로 하는 조합을 구하기 위한 함수 F로 정의한다.

$$F = \frac{T_e}{k_t} = i_d \cdot i_q \tag{4}$$

이 함수를 최대로 하는 기준전류를 구하면 최대토크를 발생하는 최적의 기준전류를 구할 수 있다. 즉, $dF/di_d = 0$을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.

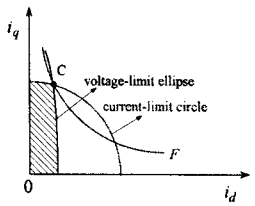

그림 4 제시된 방법에서 기준전류
Fig. 4 Reference current vector in proposed method

전류 및 전압 제한식을 동시에 만족하는 기준전류의 영역은 그림 5의 빗금친 부분으로 나타낼 수 있다. 식 (4)의 함수를 최대로 하는 기준전류를 구하면 최대토크를 발생하는 최적의 기준전류를 구할 수 있다. 즉, $dF/di_d = 0$을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.

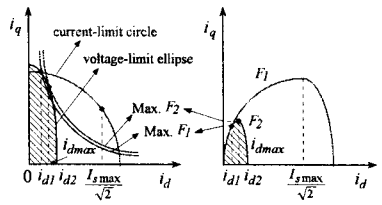

그림 5 최적 기준전류
Fig. 5 Optimal current reference

그림 6은 SynRM의 최대토크 제어의 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도와 위치를 추정하고 최대토크 제어에 의해 각 운전영역에서 최대토크가 되는 i_d를 구하여 운전한다.

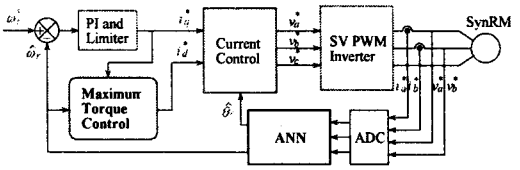

그림 6 SynRM의 최대토크 제어 시스템
Fig. 6 Maximum torque control system of SynRM

5. 시스템 운전과 결과

5.1 시스템의 운전

그림 7은 ANN에 의하여 속도추정이 이루어지며 최대토크 제어가 수행되는 시스템의 블록도를 나타낸다.

SynRM의 ANN에 의하여 추정속도를 구하고 지령속도와 추정속도 사이에서 속도오차를 구하여 속도제어기를 수행한다. 이 출력은 기준 정격토크이며 정격속도 이하에서는 일정 토크영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 약계자 제어인 일정 출력영역으로 운전한다. 그리고 최대토크 제어기를 거쳐 기준 전류를 구한 후 센서리스 속도 제어기를 동작한다.

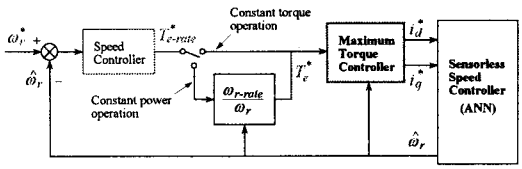

그림 7 ANN의 속도추정에 의한 최대토크 제어의 블록도
Fig. 7 Block diagram of maximum torque control with speed estimation of ANN

5.2 결과 및 고찰

그림 8은 팬 부하를 인가 시켰을 때 지령속도를 0.5[sec] 후에 1200[rpm], 1.5[sec]후에 3600[rpm]으로 속도를 변화시켰을 때의 IRS의 응답특성을 나타낸다. 그림 8(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고 그림 (b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 그림 (c)는 지령 q축 전류와 실제 q축 전류, 그림 (d)는 지령 d축 전류와 실제 d축 전류를 나타낸다. 약계자 영역에서 자속분 전류인 d축 전류는 감소되고 일정전력을 발생시키기 위하여 q축 전류는 증가되고 있다. 그림 (e)는 발생토크를 나타내고 그림 (e)는 자속을 나타낸다.

그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 속도, 토크 및 자속의 응답특성은 IRS와 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 그림 9(c)

와 그림 (d)의 $d-q$축 전류는 전류 제한 범위에서 최대 토크 제어의 위상각을 만족하는 전류가 발생되므로 q 축 전류와 d축 전류가 감소되고 있다. 이는 최대토크 제어에서 전류의 감소에 따라 토크가 증가하고 있는 현상을 나타내고 있다. 따라서 속도 변화에서도 최대토크 제어가 양호하게 수행됨을 알 수 있다.

그림 8과 9 (a), (b)에서 ANN에 의한 추정속도 $\hat{\omega}_r$는 실제속도 ω_r에 양호하게 추종하고 있다.

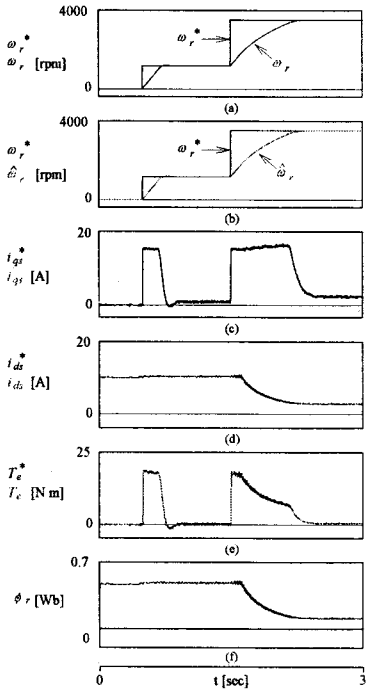

그림 8 속도변화에 의한 IRS의 응답특성
Fig. 8 Response characteristics of IRS with variation of speed

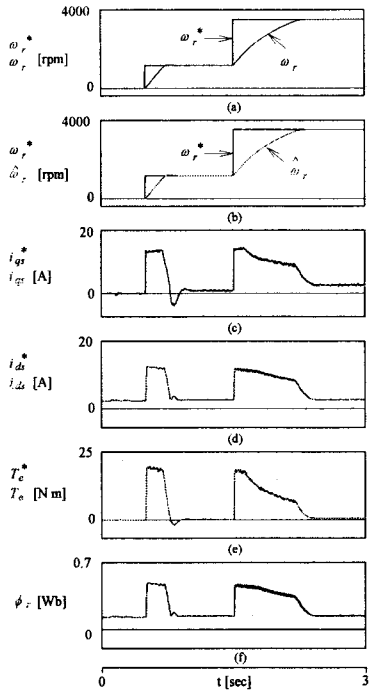

그림 9 속도변화에 의한 최대토크 제어의 응답특성
Fig. 9 Response characteristics of maximum torque control with variation of speed

그림 10은 속도에 대한 IRS의 응답 특성을 나타낸다. 그림 10(a)는 토크와 전력, 그림 (b)는 전체 전압과 전류, 자속의 변화를 나타낸다. 일정 출력영역에서 전력은 일정하게 유지되고 속도가 증가하면 역기전력의 증가하므로 전력이 감소되며 토크와 자속은 감소된다. 전체 전류는 일정하지만 속도가 증가하면 감소되고 전압은 일정하게 유지된다.

그림 11은 속도에 대한 최대토크 제어의 응답특성 나타낸다. IRS와 비교하여 전체 전류를 제외한 다른 응답 특성은 거의 유사하게 나타난다. 전체 전류의 감소는 최대토크 제어에서 상대적으로 토크가 증가하는 형상을 나타낸다.

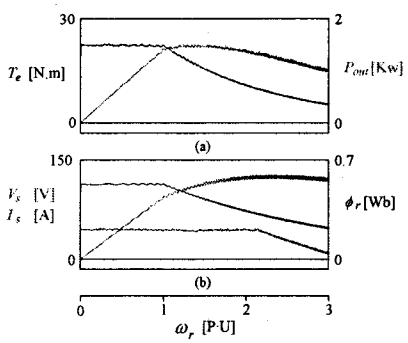

그림 10 속도에 대한 IRS의 응답특성
Fig. 10 Response characteristics of IRS with speed

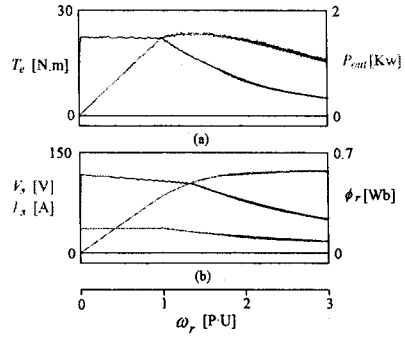

그림 11 최대토크 제어의 응답특성
Fig. 11 Response characteristics of maximum torque control

그림 12에서 약계자 영역에서 최대토크 제어 제어의 전체 전류가 IRS 보다 작은 값으로 나타나므로 최대토크 제어의 효과가 나타난다.

그림 13은 약계자 영역에서 최대토크 제어와 IRS의 단위 전류당 토크와 자속의 비교를 나타낸다. 그림 13(a)는 단위전류당 토크를 비교한 결과를 나타내며 본 연구에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 토크가 크게 나타나고 있다. 그림 (b)는 단위 전류당 자속을 비교한 결과이며 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 자속이 크게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 최대토크 제어 제어의 응답특성이 양호하며 단위 전류당 최대토크도 크게 나타난다.

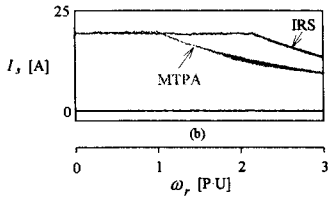

그림 12 IRS와 최대토크 제어의 전체 전류 비교
Fig. 12 Total Current comparison of IRS and maximum torque control

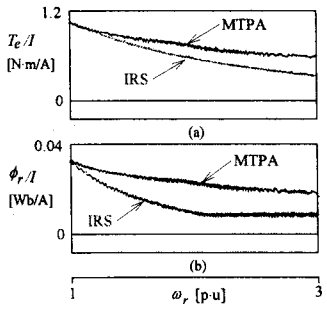

그림 13 IRS와 최대토크 제어의 응답 비교
Fig. 13 Response comparison of IRS and maximum torque control

6. 결 론

약계자를 위하여 종래에 많이 사용되었던 IRS 제어는 회전속도에 반비례하는 기준 회전자자속을 변화시킨다. 그러나 이 방법에서는 단지 전류제한만 고려하였으므로 드라이브 시스템의 최대 토크능력을 완전하게 사용할 수 없다.

본 논문에서는 전압과 전류조건에서 고속영역에서 SynRM의 최대 토크능력을 유지할 수 있는 새로운 약계자 방식을 제시하였다. 드라이브 시스템은 정격속도 이하에서는 일정 토크영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 약계자 영역인 일정 전력영역으로 운전하였다. 또한 ANN을 사용하여 속도 센서리스 벡터제어에 의해 속도를 추정하였다.

최대토크 제어 제어는 기존의 IRS 제어와 다양한 조건의 약계자 영역에서 운전 특성비교하면 동일한 응답특성을 나타내지만 $d-q$축 전류가 감소하고 있다. 그리고 속도의 증가에 대한 토크와 출력은 같지만 전체 전류의 감소로 단위 전류당 토크가 매우 증가되고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 최대토크 제어 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] B. J. Chalmers and L. Musaba, "Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially-laminated rotor," IEEE-IAS Annu. Meet. Conf. Rec., pp. 271-278, 1997.

[2] P. Vas, "Vector control of ac machines," Clarendon Press, pp. 124-126, 1990.

[3] R. Joetten and H. Schierling, "Control of the induction machine in the field weakening range," in Proc. IFAC 1983, pp. 297-304.

[4] M. G. Jovanovic, R. E. Betz and D. Platt, "Sensorless vector controller for a synchronous reluctance motor," IEEE IAS Ann. Meet., pp. 122-129, 1996.