인공지능 제어기에 의한 SynRM 드라이브의 최대토크 제어

Maximum Torque Control of SynRM Drive with Artificial Intelligent Controller

고재섭*, 최정식*, 김길봉*, 정동화**
(Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Kil-Bong Kim, Dong-Hwa Chung)

Abstract - The paper is proposed maximum torque control of SynRM drive using adaptive learning mechanism-fuzzy neural network(ALM-FNN) controller and artificial neural network(ANN). The control method is applicable over the entire speed range and considered the limits of the inverter's current and voltage rated value. For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current i_d for maximum torque operation is derived.

The proposed control algorithm is applied to SynRM drive system controlled ALM-FNN and ANN controller, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail. Also, this paper is proposed the analysis results to verify the effectiveness of the ALM-FNN and ANN controller.

Key Words : SynRM, ALM-FNN Controller, ANN, Maximum torque control

1. 서 론

SynRM은 회전자 설계를 개선하여 유도전동기 보다 역률과 효율면에서 우수하며[1] 벡터제어 기법에 의한 제어성능이 다른 고성능 교류전동기 보다 양호하다는 것이 입증되었다.[2]

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 벡터제어 SynRM 드라이브는 고속 운전을 위한 약계자 제어가 필수적이며 회전자 속도를 증가시켜 자속전류를 감소시키면 자속을 쉽게 약화시킬 수 있다.[3] 전동기에 의해 발생한 최대토크는 허용 가능한 인버터의 전류정격 및 최대전압에 의존한다.[4] 따라서 전압과 전류 제한을 고려하여 전 속도 영역에서 MTPA(Maximum Torque per Ampere)가 가능한 제어기법을 사용할 필요가 있다.

본 논문에서는 더욱 고성능 및 강인성 제어를 하기 위하여 ALM-FNN(Adaptive Learning Mechanism-FNN) 제어기를 설계한다. 이 제어기를 이용하여 제한 전압과 전류에서 전 고속영역에 최대토크 동작이 가능한 SynRM 드라이브를 위한 최대토크 제어를 제시한다. 정격속도 이하에서는 일정 토크영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 절환하여 일정 출력영역으로 운전한다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 응답성능을 구하고 그 결과를 제시한다.

2. 인공지능 제어기

SynRM 드라이브 시스템을 위한 ALM-FNN 제어기 및 ANN은 그림 1과 같다. FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 메카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어기를 수정한다. FNN의 입력은 속도오차 e 및 속도오차의 변화분 ce 이다. FNN의 출력 Δi_{qs}^{*}는 중심 비퍼지화 방법에 의해 계산한다. 이전 출력 $i_{qs}^{*}(k-1)$에 출력 $\Delta i_{qs}^{*}(k)$를 합하여 최종 $i_{qs}^{*}(k)$를 얻고 이를 전동기의 입력으로 한다.

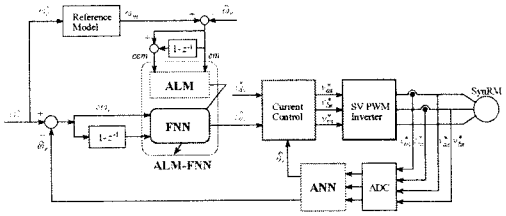

그림 1 ALM-FNN 및 ANN 제어기
Fig. 1 ALM-FNN and ANN controller

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \tag{1}$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT-T) \tag{2}$$

여기서 오차 $em(kT)$는 각 시간순시에서 얻어지는 필요한 속도성능의 측정 정도이다. 퍼지 역모델은 오차 $em(kT)$를 사상하여 프로세서의 입력 $p(kT)$를 변화시키며 $em(kT)$를 영이 되도록 강제화 시킨다. 역모델의 입력은 식(1)과 식(2)와 같이 오차와 오차 변화분으로 정의한다. 퍼지의 수행과정은 FNN 제어기에서 사용한 방법과 유사하게 사용한다. 프로세서에서 변화 $p(kT)$는 입력오차 $em(kT)$에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다.

$$C_i(kT) = C_i(kT-T) + p(kT) \tag{3}$$

여기서 첨자 i는 역모델에 의해 동작하는 i번째 맴버쉽 함수를 나타낸다.

저자 소개
* 고재섭 : 順天大學 電氣工學科 碩士課程
* 최정식 : 順天大學 電氣工學科 碩士課程
* 김길봉 : 順天大學 電氣工學科 碩士課程
** 정동화 : 順天大學 電氣工學科 正敎授 · 工博

3. ANN에 의한 속도추정

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도 및 추정 회전자 자극의 위치는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k)+\Delta\hat{\omega}_r(k)\\ &= \hat{\omega}_r(k)-\frac{\Delta W_2(k)}{T}\\ &= \hat{\omega}_r(k)-\frac{\eta}{T}\{\frac{1}{c}[i_{qm}(k)-\hat{i}_{qm}(k)]\hat{i}_{dm}(k-1)\\ &\quad -c[i_{dm}(k)-\hat{i}_{dm}(k)]\hat{i}_{qm}(k-1)\}-\frac{\alpha}{T}\Delta W_2(k-1)\end{aligned} \tag{4}$$

$$\hat{\theta}(k+1)=\hat{\theta}(k)+T\cdot\hat{\omega}_r(k) \tag{5}$$

4. 약계자 제어

4.1 전압과 전류 제한

본 논문에서는 공간 전압벡터 PWM을 사용하며 최대 고정자전압 $V_{s\max}$는 $V_{dc}/\sqrt{3}$이다. 이와 같은 조건하에서 기준전압 V_d^*와 V_q^* 및 전류 제한 조건은 다음 조건을 만족한다.

$$V_d^{*2}+V_q^{*2}\le V_{s\max}^2 \tag{6}$$

$$i_d^{\,2}+i_q^{\,2}\le i_{s\max}^2 \tag{7}$$

전압과 전류를 평면상에 나타내면 그림 2와 같다.

4.2 약계자 제어의 동작

전압과 전류의 제한조건을 모두 고려할 경우 약계자 영역의 제어 가능한 기준전류의 영역은 전압제한 타원과 전류제한 원의 공통영역이다. 그림 3의 최대토크 곡선과 전류제한 원의 교점은 일정 토크영역과 약계자 제어영역의 전환점이 된다.

SynRM의 출력과 일정 전력영역의 지령 토크는 다음과 같다.

$$P_{out}=\omega_m T_e=\frac{2}{P}\omega_r T_e \tag{8}$$

$$T_e^*=\frac{P\cdot P_{out}}{2}\cdot\frac{1}{\omega_r}=\frac{T_{e\text{-}rate}^*\cdot\omega_{r\text{-}rate}}{\omega_r} \tag{9}$$

지령 토크가 변화하는 약계자 제어영역에서 동작모드는 그림 4와 같이 세 개의 영역으로 구분한다.

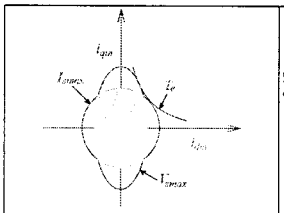

그림 2 전압제한 타원과 전류제한 원
Fig. 2 Ellipse of Bounded Voltage and Circle of Bounded Current

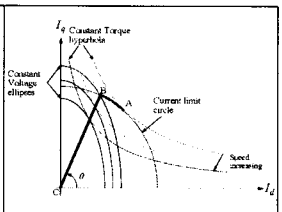

그림 3 SynRM의 약계자 동작
Fig. 3 Field weakening operation of SynRM

모드 Ⅰ : 일정 최대토크에 의한 전류제한 영역
모드 Ⅱ : 전류와 전압의 제한영역
모드 Ⅲ : 전압제한 영역

5. 최대토크 제어

전압과 전류 제한조건을 동시에 만족시키기 위한 기준 전류벡터는 그림 4의 운전 속도에서 타원과 원의 공통영역에 존재해야 한다. 이 영역에 존재하는 i_q와 i_d의 조합 중에서 출력 토크를 최대로 하는 조합을 구하기 위한 함수 F로 정의한다.

$$F=\frac{T_e}{k_t}=i_d\cdot i_q \tag{10}$$

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. 최대토크를 위한 최적의 i_q와 i_d의 조합을 구할 경우 영향을 주는 제한조건에 따라 약계자 영역은 두 구간으로 나누어진다.

5.1 약계자 영역 Ⅰ ($\omega_{base}<\omega_r<\omega_1$)

이 영역의 범위는 기준속도 ω_{base}로부터 최대 속도에 도달할 때까지의 속도 ω_1이다. 여기서 기준속도는 약계자 운전이 시작될 때의 속도이다. 그림 5의 운전 가능영역에서 함수 F를 최대로 하는 점, 즉 출력토크를 최대로 하는 점은 전압제한 타원과 전류제한 원의 교점인 C점이다.

5.2 약계자 영역 Ⅱ ($\omega_r>\omega_1$)

운전속도가 더욱 증가하면 타원은 더욱 감소하게 되어 결국에는 그림 8과 같이 타원의 대부분이 원에 포함하게 된다. 영역 Ⅱ의 시작속도 ω_1은 전압 제한조건만을 고려하였을 경우, 최대토크를 발생시키기 위한 운전 점(×점)이 타원과 원의 교점(●점)과 일치할 때 나타나는 속도이다. 따라서 ω_1 이상의 운전속도에 대해서는 전압 제한조건만 출력토크에 영향을 준다. 그림 6은 이 영역에서 운전속도의 증가에 따라 최적의 기준 전류벡터의 궤적을 나타낸다. 이 영역에서는 영역 Ⅰ에서와는 상이하게 운전속도가 증가하면 i_d와 i_q가 동시에 감소한다.

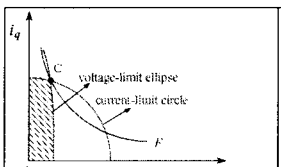

그림 4 제시된 방법에서 기준전류
Fig. 4 Reference current vector in proposed method

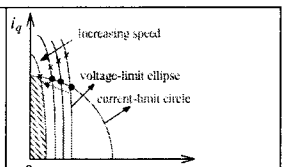

그림 5 약계자 영역 Ⅰ에서 최적 기준전류의 궤적
Fig. 5 Trajectory of optimal current reference vector in field weakening region Ⅰ

5.3 최적의 기준전류

전류 및 전압 제한식을 동시에 만족하는 기준전류의 영역은 그림 8의 빗금친 부분으로 나타낼 수 있다. 식(10)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.

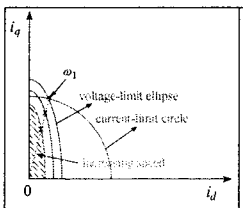

그림 6 약계자 영역 Ⅱ에서 최적 기준전류의 궤적
Fig. 6 Trajectory of optimal current reference vector in field weakening region Ⅱ

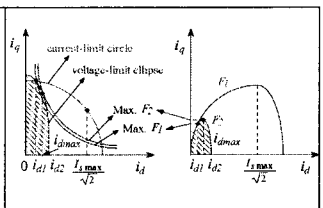

그림 7 최적 기준전류
Fig. 7 Optimal current reference

그림 8은 SynRM의 최대토크 제어의 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도와 위치를 추정하고 최대토크 제어에 의해 각 운전영역에서 최대토크가 되는 i_d를 구하여 운전한다.

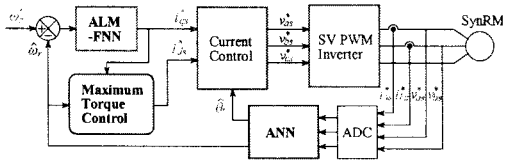

그림 8 SynRM의 최대토크 제어 시스템
Fig. 8 Maximum torque control system of SynRM

6. 시스템 운전과 결과

그림 10은 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 3[N·m]로 인가하였을 경우의 응답특성이다. 이 경우 PI, ALM-FNN 제어기의 응답특성을 비교하였다.

그림 11는 그림 10의 응답특성을 명확하게 분석하기 위하여 확대한 그림이다. 그림 11(a)는 초기 기동상태의 응답특성이며 ALM-FNN 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 응답특성이 양호하게 나타난다. 그림 11(b)는 부하인가에 따른 응답특성을 나타낸다. 이 경우에도 ALM-FNN 제어기가 PI 제어기 보다 오버슈트도 작고 빠르게 안정화하고 있다.

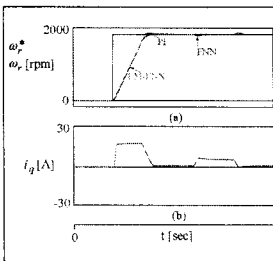

그림 10 PI, FNN 및 LM-FNN 제어기의 응답특성의 비교
Fig. 10 The comparison of response characteristics with PI, FNN and LM-FNN controller

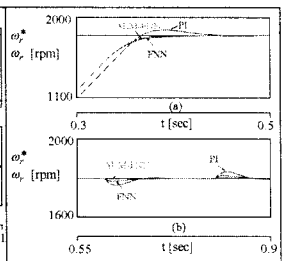

그림 11 초기와 부하인가에 대한 제어기의 응답특성의 비교
Fig. 11 The comparison of response characteristics with starting state and load torque

그림 12는 속도에 대한 IRS의 응답 특성을 나타낸다. 그림 12(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 13은 속도에 대한 최대토크 제어의 응답특성 나타낸다. IRS와 비교하여 전체 전류를 제외한 다른 응답특성은 거의 유사하게 나타난다. 전체 전류의 감소는 최대토크 제어에서 상대적으로 토크가 증가하는 형상을 나타낸다.

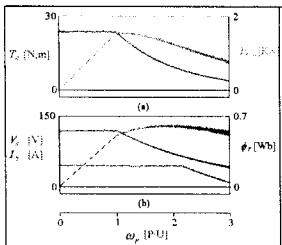

그림 12 속도에 대한 IRS의 응답특성
Fig. 12 Response characteristics of IRS with speed

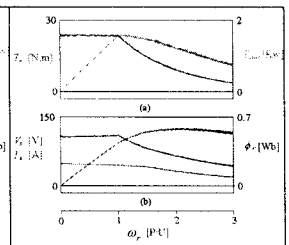

그림 13 최대토크 제어의 응답특성
Fig. 13 Response characteristics of maximum torque control

그림 14에서 약계자 영역에서 최대토크 제어 제어의 전체 전류가 IRS 보다 작은 값으로 나타나므로 최대토크 제어의 효과가 나타난다. 그림 15는 약계자 영역에서 최대토크 제어와 IRS의 단위 전류당 토크와 자속의 비교를 나타낸다. 그림 15(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.

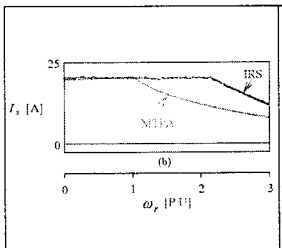

그림 14 IRS와 최대토크 제어의 전체 전류 비교
Fig. 14 Total Current comparison of IRS and maximum torque control

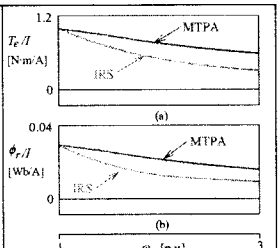

그림 15 IRS와 최대토크 제어의 응답 비교
Fig. 15 Response comparison of IRS and maximum torque control

7. 결 론

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 ALM-FNN 제어기를 이용하여 고성능 속도제어를 이룩할 수 있었으며 ANN을 사용하여 센서리스 제어에 의해 속도를 추정하였다.

최대토크 제어 제어는 기존의 IRS 제어와 다양한 조건의 약계자 영역에서 운전 특성비교하면 동일한 응답 특성을 나타내지만 $d-q$축 전류가 감소하고 있다. 그리고 속도의 증가에 대한 토크와 출력은 같지만 전체 전류의 감소로 단위 전류당 토크가 매우 증가되고 있다. ALM-FNN 제어기는 종래의 PI 제어기에 비해 오버슈트가 작게 나타나고 상승시간이 빠르고 빠르게 정상상태에 도달하였다. ANN에 의한 속도추정도 양호하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 최대토크 제어 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

참고문헌

[1] A. Staton, T. J. E. Miller and S. E. Wood, "Optimization of the synchronous reluctance motor geometry," in Conf. Rec. Electrical machines and Drives, London, UK, pp. 156-160, 1991.

[2] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Conf. Rec. IEEE Power Electron Specialists Conf., pp 425-431, 1993.

[3] T. Senjyu, T. Shingaki and K. Uezato, "A high efficiency control strategy for synchronous reluctance motor considering stator iron loss with EKF," in Proc. ICEE 2000, Kitakyushu, Japan, pp. 179-182, 2000.

[4] M. Ali Unar, D. J. Murray-Smith and S. F. Ali Shah, "Design and tuning of fixed structure PID controller - A survey," Technical Report CSC-96016, Faculty of Engineering, Glasgow University, Scotland, 1996.