

# 스파스 매트릭스 컨버터로 구동되는 유도전동기를 위한 모델 예측제어 기반의 속응성 향상기법

김정현\*, 이은실\*, 이교범\*, 고영종\*\*  
아주대학교\*, 우진산전\*\*

## Fast Dynamic Control for a Induction Motors Driven Fed by a Sparse Matrix Converters with a Model Predictive Control

Jung Hyun Kim\*, Eunsil Lee\*, Kyo Beum Lee\*, Young Jong Ko\*\*  
Ajou University\*, Woojin Industrial System Co\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 스파스 매트릭스 컨버터로 구동되는 유도전동기에 과도응답특성 개선을 위한 모델예측제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 유도전동기의 파라미터를 이용하여 구한 예측토크와 자속을 통하여 비용함수를 최소화하는 최적의 스위칭 상태를 결정한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 제어 기법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

최근에 인버터를 이용한 전동기의 운전은 에너지가 절약되는 효과로 인해 많이 사용되고 구동 방법도 계속 연구되고 있다. 그 중에서 매트릭스 컨버터는 입력과 출력이 직접 연결되어 교류에서 교류로 전력 변환이 가능하며 직류단에 커패시터가 사용되지 않는 전력변환 장치이다<sup>[1]</sup>. 스파스 매트릭스 컨버터는 기존의 매트릭스 컨버터와 성능은 동일하나 스위치의 개수가 적다. 또한 입력과 출력에서 정현파의 진류특성이 중요하고, 높은 신뢰성과 소형화가 요구되는 분야에서 응용범위가 확대되고 있다. 매트릭스 컨버터의 제어 방법으로는 Venturini Alesina 방법, 공간 벡터 PWM 제어 방법, 캐리어 기반 PWM, 모델 예측 제어 등이 있으며 변조 방법들은 각각 장단점이 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 스파스 매트릭스 컨버터에 모델 예측 제어를 적용하여 빠른 동특성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 2. 스파스 매트릭스 컨버터

매트릭스 컨버터는 전력변환장치에서 가장 많은 부피를 차지하는 전해 커패시터를 사용하지 않으므로 입력 전원이 전력용 반도체 스위치를 통해 출력에 바로 연결되는 전력 변환장치이다. 각 상에서 요구하는 가변 전압, 가변 주파수의 출력 전압을 만들기 위해서 적절한 변조 기법이 필요하다. 일반적인 매트릭스 컨버터는 전력용 반도체 스위치와 입력 필터, 그리고 클램프 회로로 구성된다. 기존의 매트릭스 컨버터에서 스위치의 개수를 줄인 스파스 매트릭스 컨버터는 그림1에서와 같이 12개의 스위치로 구성된다. 입력단은 하나의 IGBT와 4개의 다이오드로 이루어진 스위치 6개로 구성되고 출력단은 기존의 인버터와 같이 스위치와 역병렬 다이오드로 이루어진 스위치 6개로 구성된다.

입력단과 출력단 사이를 가상의 직류단이라고 가정하면, 스위치  $S$ 와 입력 전압에 따른 가상의 직류단은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 스위치  $S$ 는 온 일 경우 1, 오프일 경우 0을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_{dc+} \\ v_{dc-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{bp} & S_{cp} \\ S_{an} & S_{bn} & S_{cn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

위에서 구한 가상의 직류단 전압과 스위치를 통해 출력 전압을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{An} \\ v_{Bn} \\ v_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Ap} & S_{An} \\ S_{Bp} & S_{Bn} \\ S_{Cp} & S_{Cn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{dc+} \\ v_{dc-} \end{bmatrix} \quad (2)$$

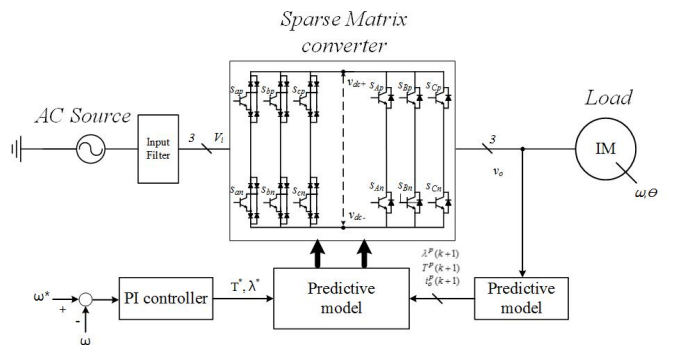


그림 1 스파스 매트릭스 컨버터로 구동되는 유도 전동기의 모델 예측 제어 블록도

fig. 1 Block diagram of the model predictive control for sparse matrix converter

### 3. 모델 예측 제어

모델 예측 제어(MPC, Model Predictive Control)는 제어 대상의 모델을 이용해 상태변수나 출력을 예측하고, 이를 바탕으로 적절한 비용함수와 제약조건을 이용해 최적화를 실행한다. 즉, 매 샘플링 순간마다 지령값과 제어 입력의 변화량 등으로 구성된 비용함수를 최소화시키는 제어입력을 통해 최적의 상태를 결정한다. 모델 예측 제어는 다양한 시스템에 적용이 가능

하고 개념이 직관적이고 이해하기 쉬우며 여러 가지 제약조건과 비선형 특성을 간단하게 포함할 수 있기 때문에 인버터를 이용한 전동기 구동의 특성을 개선할 수 있는 제어방법이다<sup>[9]</sup>.

그림 1은 스파스 매트릭스 컨버터로 구동되는 유도 전동기의 모델 예측제어의 블록도를 나타낸다. 전동기의 파라미터는 스파스 매트릭스 컨버터의 미래의 값을 예측하는 데에 사용된다.

입력전압과 스위칭 상태에 따른 현재의 전압값을 식 (1)과 (2)를 통해 계산하고 현재의 전류값을 알고 있다면 다음 주기의 자속을 예측할 수 있다.

$$\lambda_s(k+1) = \lambda_s(k) + T_s V_s(k) - R_s T_s i_s(k) \quad (3)$$

여기서  $\lambda_s$ 는 고정자 자속,  $T_s$ 는 샘플링 주기,  $V_s$ 는 출력 전압,  $R_s$ 는 고정자 저항,  $i_s$ 는 고정자 전류를 나타낸다.

또한 유도전동기의 전압방정식을 통하여 다음 주기의 전류를 예측할 수 있다.

$$i_s(k+1) = (1 + \frac{T_s}{\tau_\sigma}) i_s(k) + \frac{T_s}{\tau_\sigma} (\frac{1}{R_\sigma} ((\frac{k_r}{\tau_r} - k_r j \omega) \lambda_r(k) + V_s(k))) \quad (4)$$

여기서  $j$ 는 관성 모멘트,  $\tau_r = L_r / R_r$ ,  $\tau_\sigma = \sigma L_s / R_\sigma$ ,  $R_\sigma = R_s + R_r k_r^2$ ,  $k_r = L_m / L_r$ ,  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_m)$ ,  $\lambda_r$ 은 회전자 자속,  $\omega$ 는 회전자 속도를 나타낸다.

위에서 구한 자속과 전류를 통하여 유도 전동기의 토크값을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$T(k+1) = \frac{3}{2} \frac{p}{2} I_m (\lambda_s(k+1) i_s(k+1)) \quad (5)$$

여기서  $p$ 는 극 수이다.

위에서 구한 값을 통하여 비용함수  $g$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = |T^* - T(k+1)| + \alpha |\lambda_s^* - \lambda_s(k+1)| \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 는 가중치이다.

이렇게 구한 비용함수를 최소화 하는 스위칭을 선택하여 지령값을 추종할 수 있다. 또한 비용함수에 항을 추가하여 토크와 자속 이외에도 무효전력, 입력 역률 등의 제어가 가능하며 적절한 비용함수를 결정함에 따라 능동필터 등의 적용이 가능하다.

#### 4 시뮬레이션

본 논문은 제안된 알고리즘의 검증을 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2는 유도 전동기 구동을 위하여 스파스 매트릭스 컨버터의 모델 예측 제어를 적용 하였을 때 유도 전동기의 속도 제어 응답을 나타낸다. 유도 전동기의 속도 지령을 가변 했을 때 속도 제어의 응답이 빠른 것을 확인

할 수 있다. 그림 3은 토크 제어 응답을 확인하기 위하여 토크 지령을 변경한 파형이다. 토크 지령을 변경했을 때 빠른 응답을 확인 할 수 있다.

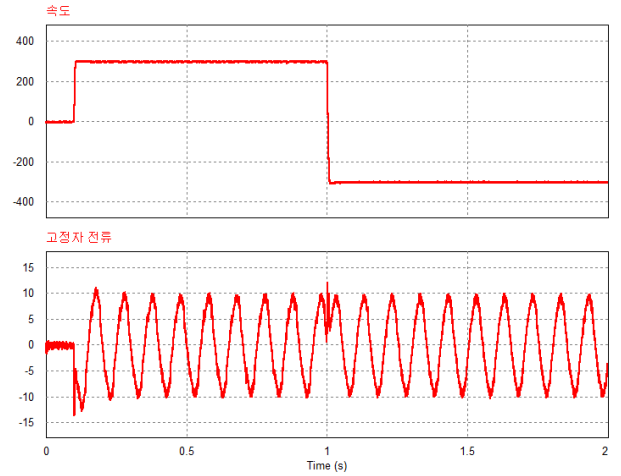


그림 2 모델예측제어를 이용한 유도전동기의 속도 제어  
Fig. 2 Speed control using model predictive control for the induction motor

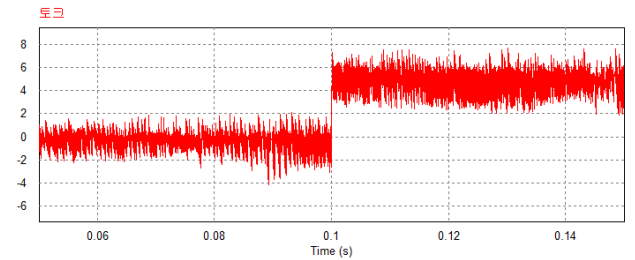


그림 3 모델예측제어를 이용한 유도전동기의 토크 제어 응답  
Fig. 3 Torque control using model predictive control for the induction motor

### 5. 결론

본 논문은 스파스 매트릭스 컨버터로 구동되는 유도 전동기에 과도응답특성 개선을 위한 모델 예측제어 기법을 사용하였다. 유도 전동기의 파라미터를 이용하여 비용함수를 최소화하는 최적의 스위칭 상태를 결정하여 응답특성을 개선한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 제어기법의 타당성을 확인하였다.

본 논문은 국토교통부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.(12PRTD C063745 01)

### 참고 문헌

- [1] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, and A. Weinstein, "Matrix Converter : A technology Review," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, pp.276-288, 2002
- [2] 이교범, "전동기 제어," 한티미디어, 2013
- [3] J. Rodriguez, P. Cortes, "Predictive Control Of Power Converter and Electrical Drives," Wiley, 2012