

# 스위치드 릴럭턴스 전동기의 응답특성 개선을 위한 모델 예측 제어 기법

김주혜, 김동희, 주성탁, 이교범  
아주대학교 전자공학과

## Model Predictive Control to Improve the Performance of a Switched Reluctance Motor Drives

Ju Hye Kim, Dong Hee Kim, Sung Tak Jou, and Kyo Beum Lee  
Ajou Univ., Dept. of Electrical and Computer Engineering

### 초록

본 논문에서는 모델예측제어를 기반으로 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전류제어기 속응성 개선을 위한 방법을 제안한다. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 광범위한 속도 영역에서 운전이 가능하고 돌극형 구조로써 견고하고 강인한 구조를 갖는다. 그러나 회전자 위치에 따라 인덕턴스가 변하기 때문에 고정 이득을 가지는 비례적분 전류제어기는 과도상태 응답특성이 저하되는 단점이 있다. 모델예측제어 기법을 통해 과도상태 응답특성을 개선한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 제어기법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

최근 희토류 가격의 상승으로 인해 영구자석 전동기를 대체할 스위치드 릴럭턴스 전동기의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 전동기의 성능개선을 위해 턴 온, 턴 오프각 및 파라미터 등을 최적으로 조합시켜서 소음과 토크 리플을 저감시키는 등 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 간단하고 기계적으로 견고하다는 장점을 가지고 있지만, 제어시에 회전각에 따라 인덕턴스 값이 바뀌므로 인덕턴스 값에 즉각적으로 대처할 수 있는 방법이 필요하다<sup>[2]</sup>. 이러한 문제점을 개선하고 전류의 응답특성을 향상시키기 위해서 모델 예측 제어 기법을 제안한다. 1.5kW급 스위치드 릴럭턴스 전동기 기반의 PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 제어기법 효율성과 우수성을 확인한다.

### 2. 스위치드 릴럭턴스 전동기

그림1 (b)와 같은 형상을 가지는 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자 극수가 12개, 회전자 극수가 8개이다. 이 전동기를 구동하는 전력회로는 그림 1(a)와 같은 비대칭 브릿지 컨버터로서 한 상당 두 개의 스위치와 다이오드로 구성되어 있다. 이 컨버터는 다른 구조에 비해 제어의 다양성이 뛰어나고, 각 상의 전류가 독립적이라는 장점이 있다. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 토크 발생을 위해 릴럭턴스의 변화를 이용하므로 회전각에 따라 권선의 인덕턴스가 변화한다<sup>[3]</sup>.

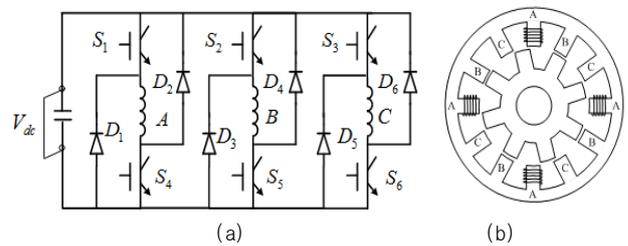


그림 1 (a) 비대칭 브릿지 컨버터  
(b) 12/8 스위치드 릴럭턴스 전동기  
Fig. 1 (a) Asymmetric bridge converter  
(b) 12/8 Switched Reluctance Motor

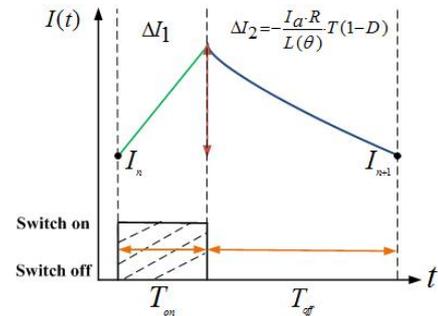


그림 2 예측 전류 계산  
Fig. 2 Predictive current calculation

### 3. 제안하는 모델 예측 제어 기법

스위치드 릴럭턴스 전동기에 적용하는 모델 예측 제어 기법은 한 주기 이후의 전류를 예측하여 최적의 PWM 듀티(Duty)를 계산한다. 예측된 전류와 현재 전류와의 관계는 식 (1)과 같다.

$$I_{n+1} = I_n + \Delta I_1 + \Delta I_2 \quad (1)$$

그림 2와 같이  $T_{on}$  구간에서는 정격전류 25A가 흐를 때 코일 내부저항  $0.16\Omega$ 에 걸리는 전압이  $V_{dc}$ 보다 현저히 낮게 되므로 식 (2)와 같이 전류가 선형적으로 증가한다고 가정하였다.  $T_{off}$  구간에서는 입력전압이 0이기 때문에 저항에 걸리는 전압을 고려하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta I_1 = \frac{V_{dc}}{L(\theta)} \cdot D \cdot T \quad (2)$$

$$\Delta I_2 = -\frac{I_a \cdot R}{L(\theta)} \cdot T \cdot (1-D) \quad (3)$$

여기서,  $L(\theta)$ 는 회전각에 따른 인덕턴스를 나타낸다.

전류 지령과 현재 전류값의 오차는 식 (4)와 같고, 식(1)~(4)로부터 한 주기 이후에 전류 값의 오차를 구할 수 있으며 식 (5)와 같다.

$$I_{n\_err} = I^* - I_n \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_{n+1\_err} &= I^* - I_{n+1} \\ &= I_{n\_err} - \frac{V_{dc}}{L(\theta)} \cdot T \cdot D + \frac{I_a \cdot R}{L(\theta)} \cdot T \cdot (1-D) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 전류 지령과 예측한 전류 값의 차이를 0이 되게 하는 PWM 듀티(Duty)를 계산하여 스위칭 한다.

그림 3은 모델예측 제어 방법을 적용한 제어블록도이다.

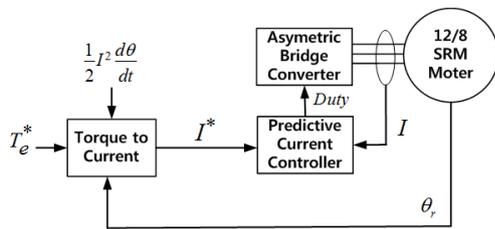


그림 3 제안하는 예측전류제어 기법 블록도  
Fig. 3 Block diagram of a proposed control scheme

#### 4. 시뮬레이션

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 파라미터들을 나타낸다.

그림 4는 비례적분 제어기와 예측전류제어 기법을 비교한 시뮬레이션 파형이다. 0.2초 전에는 비례적분 제어기가 사용되었고, 0.2초 이후는 전류 예측 제어 알고리즘이 적용되었다. 두 번째 파형은 토크이며, 알고리즘 적용 후 응답특성이 향상된 것을 확인할 수 있다. 세 번째 파형은 각 상에서의 회전자 각도에 따른 인덕턴스를 나타낸다.

표 1 3상 12/8 스위치드 릴럭턴스 전동기의 파라미터  
Table 1 Three phase, 12/8 SRM parameter

변수	값	변수	값
상 수	3	고정자 극	12
최대 인덕턴스	0.533mH	회전자 극	8
최소 인덕턴스	0.149mH	고정자 극호각	15°
고정자 저항	0.16Ω	회전자 극호각	15.5°

그림 5는 전류제어기의 확대 파형이다. 위 파형은 비례적분 제어기를 사용하였을 때이고, 아래 파형은 예측전류제어 기법을 적용한 파형이다. 전류의 과도상태 응답특성이 향상되었을 뿐만 아니라 비례적분제어기에 의해 발생하는 오버슈트가 사라진 것을 확인할 수 있다.

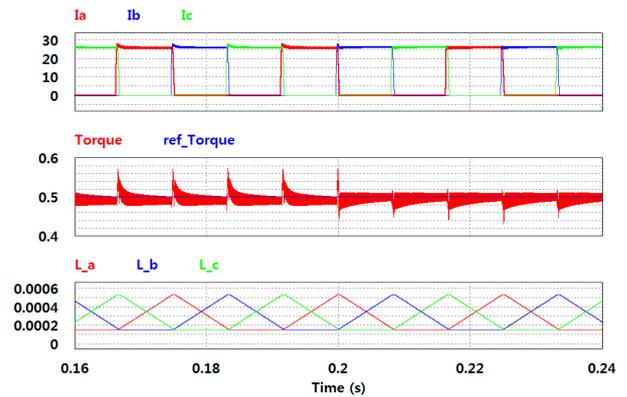


그림 4 예측 전류 제어 적용 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Applying a predictive current control algorithm

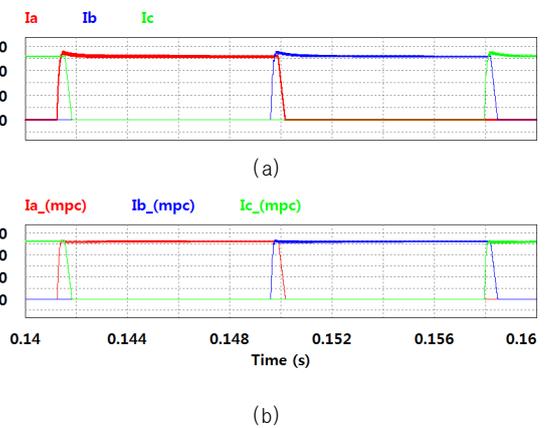


그림 5 시뮬레이션 확대 파형 (a) 비례적분제어 (b) 예측전류제어  
Fig. 5 Current controller of the SRM motor(overall view)

#### 5. 결론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기에서 전류제어기의 속응성을 개선하기 위한 방법을 제안하였다. 전류 예측 제어 기법은 한 주기 이후의 전류값을 예측하여 최적의 PWM 듀티(Duty)를 계산하는 방법이다. 전류예측제어 기법을 적용하여 스위치드 릴럭턴스 전동기에서 전류의 과도상태 응답특성이 개선되는 것을 확인하였다. 1.5kW급 스위치드 릴럭턴스 전동기 기반의 PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 제어기법의 성능을 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012 0861).

#### 참고 문헌

- [1] 정병호, 최연옥, 이강연, 조규배, 정수복, “온라인 턴 오프각 제어를 통한 SRM의 성능최적화,” 전력전자학회논문지, 제 12권 제 1호, pp. 98 106, 2007.
- [2] Y. Sozser and D.A. Torrey, “Optimal turn off angle control in the face of automatic turn on angle control for switched reluctance motors,” IET Electric Power Applications, vol. 1, no. 3, pp. 395 401, May 2007.
- [3] 이교범, “전동기 제어”, 한티미디어, 2013.