

스위치드 릴럭턴스 전동기의 순시 토크 맥동 저감 기법

김동희, 정해광, 이교범
아주대학교

An Instantaneous Torque Ripple Minimization Method of the Switched Reluctance Motor

Dong Hee Kim, Hae Gwang Jeong, and Kyo Beum Lee
Ajou University

초록

본 논문은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 순시 토크 맥동 저감 기법을 제안한다. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 일반적으로 이중 돌극형의 구조로 인한 토크 맥동과 소음 발생의 단점을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 제어 기법은 퍼지 로직 기반의 최적 턴 오프각 제어와 슬라이딩 모드 제어 기반의 토크 지령 보상 기법을 결합하여 순시적으로 발생하는 토크 맥동을 보상한다. 750W급 전동기 모델의 시뮬레이션 결과는 제안하는 제어 기법의 우수성을 보인다.

1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 최근 회로류 가격의 상승으로 인해 영구자석 전동기의 대안으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 견고한 구조와 낮은 생산 단가 그리고 광범위한 속도 제어의 장점으로 다양한 산업분야에 적용이 가능하다. 그러나 이중 돌극형의 구조로 인해 토크 맥동과 소음이 발생하는 문제점을 갖는다^[1]. 일반적으로 전류파형을 제어하여 토크 맥동을 줄이는 방법으로 토크 분배 함수가 사용된다^[2]. 토크 분배 함수는 상전환 구간에 미리 계산 또는 측정된 특업 테이블을 이용하여 두 상의 과도 토크의 맥동이 최소가 되도록 전류지령을 생성하여 토크 맥동을 저감한다. 그러나 전류 각도 토크의 3차원의 정보를 테이블화하기 어렵고 운전 중 파라미터의 변동에 대해 적절히 대응하지 못하는 문제가 있다.

본 논문은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 순시 토크 맥동 저감 기법을 제안한다. 제안하는 제어 기법은 퍼지 로직을 적용하여 최적의 턴 오프각 시점을 추종하고 슬라이딩 모드 제어 기법으로 토크 지령을 정정하여 토크 맥동을 최소화한다. 750W급 스위치드 릴럭턴스 전동기의 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 제어 기법의 효율성과 우수성을 보인다.

2. 상전환 구간에서의 토크 맥동

그림 1은 상전환 구간에서 임의의 턴 온, 턴 오프각에 따른 토크 맥동을 나타낸다. A상의 턴 오프 시점부터 전류가 소호되면서 출력 토크는 감소한다. 이후 A상 전류는 B상 전류와 중첩되어 과도한 토크로 인한 맥동이 발생한다.

턴 오프각 시점이 빠른 경우 다음 상의 전류가 확보되지 않아 토크 부족으로 인한 맥동이 발생한다. 반면에 전류의 턴 온

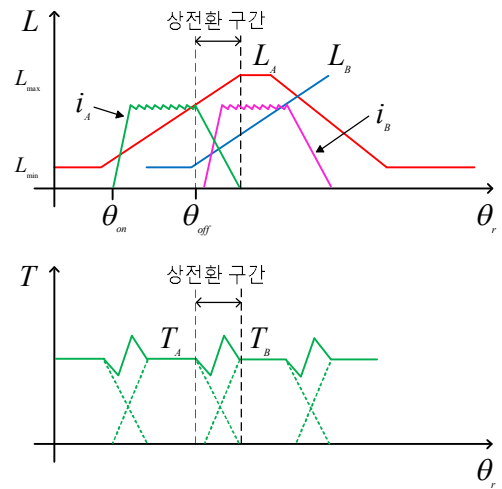


그림 1 상전환 구간에서의 토크 맥동
Fig. 1 Torque ripple in commutation region

프를 늦게 수행하는 경우 다음 상의 전류와 현재 상의 전류가 중첩되어 과도한 토크가 발생한다. 따라서 적절한 턴 오프각 시점의 선정으로 토크 맥동을 저감할 수 있다.

3. 퍼지제어기를 이용한 턴 오프각 제어

상전환 구간에서의 토크 맥동은 토크 지령을 기준으로 토크 부족으로 인한 맥동과 과도한 토크로 인한 맥동으로 구분된다.

제안하는 턴 오프각 제어 기법은 현재상의 턴 오프각 시점부터 현재 상전류와 다음 상전류의 교차시점까지의 토크 오차를 검출하여 이루어진다. 이 때 오차를 적분하여 상전환 구간에서의 토크가 부족한지 과도하게 발생되었는지를 판단한다.

표 1은 제안하는 퍼지 규칙으로 식 (1)의 토크 오차 적분값이 제어기로 입력된다. 식 (1)의 값이 0보다 큰 경우는 토크가 부족한 경우로 턴 오프각 시점을 늦춰 토크 맥동을 저감한다. 반면 식 (1)의 값이 0보다 작은 경우 과도한 토크가 발생한 경우로 턴 오프각 시점을 앞당겨 토크 맥동을 저감한다.

$$\int_{\theta_{off}}^{\theta_{cross}} T_{err} dt = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{cross}} (T^* - T) dt \quad (1)$$

표 1 턴 오프각 제어 규칙

Table 1 Rule table for the turn off angle controller

ce/e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	Z	PS	PM
NS	NB	NB	Z	PM	PM
Z	NB	NM	Z	PM	PB
PS	NM	NM	Z	PB	PB
PB	NM	NS	Z	PB	PB

4. 슬라이딩 모드 제어를 이용한 토크 오차 보상

슬라이딩 모드 제어기는 토크 오차에 대해 즉각적으로 토크 지령을 변경하여 토크 맥동을 저감한다. 식 (2)의 토크 오차와 오차의 적분 값을 슬라이딩 평면으로 설정하였다. 이 때 정상 상태의 채터링 현상의 제거를 위해 식 (3)과 같이 경계를 선정하여 불연속적인 스위칭 함수를 연속함수로 대체하였다. 그림 2는 제안하는 토크 맥동 저감 기법의 전체 블록도이다.

$$s = T_{err} + k_i \int T_{err} dt \quad (2)$$

$$u = \begin{cases} U_N \operatorname{sgn}(s) & |s| > \phi \\ U_N s/\phi & |s| \leq \phi \end{cases} \quad (3)$$

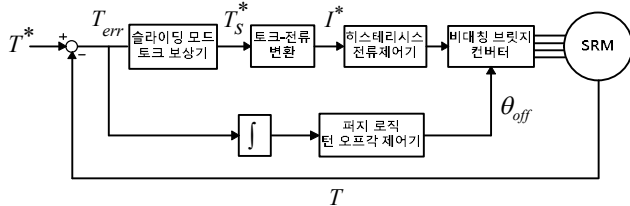


그림 2 제안하는 토크 맥동 저감 기법 블록도
Fig. 2 Block diagram of a proposed control scheme

5. 시뮬레이션

제안한 기법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 파라미터들을 나타낸다.

표 2 4상 8/6 스위치드 릴럭턴스 전동기의 파라미터
Table 2 Four phase, 8/6 SRM parameter

변수	값	변수	값
상 수	4	고정자 극	8
최대인덕턴스	52.7mH	회전자극	6
최소인덕턴스	9.1mH	고정자극호각	23°
고정자 저항	1.3Ω	회전자극호각	23.4°

그림 3은 임의의 턴 오프각을 설정하여 토크 제어를 수행한 결과이다. 토크 부족으로 인한 토크 맥동이 발생하였으며 퍼지 로직 기반의 턴 오프각 제어기는 제어 구간에서 토크 맥동이 최소가 되는 턴 오프각을 추종하였다. 그림 4는 상전환 구간에서 전류의 중첩으로 인해 발생하는

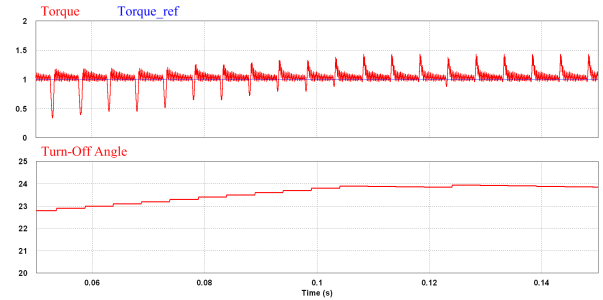


그림 3 퍼지 제어기 기반의 턴 오프각 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Turn off angle control using a fuzzy logic

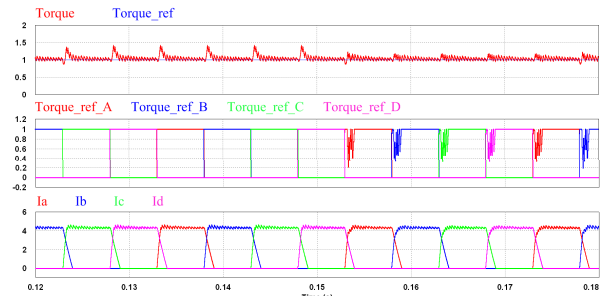


그림 4 슬라이딩 모드 제어 기반의 토크 맥동 저감 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Applying a sliding mode torque ripple reduction algorithm

과도한 출력 토크를 슬라이딩 모드 보상 기법으로 토크 지령을 정정하여 토크 맥동을 저감한 시뮬레이션 결과이다. 제어기는 0.15초부터 동작하였으며 지령 토크의 보상결과 과도한 토크로 인한 맥동이 저감되는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 순시 토크 맥동 저감 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 온라인으로 토크 맥동을 관측하여 순시적으로 토크 맥동이 최소가 되는 턴 오프각과 토크 지령을 발생시킨다. 따라서 운전 중의 외란에 대해서도 강인하며 다양한 전동기 모델에 적용가능하다. 750W급 스위치드 릴럭턴스 전동기 기반의 PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 제어 기법의 성능을 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20120002247).

참고 문헌

- [1] 정병호, 최연옥, 이강연, 조금배, 정수복, “온라인 턴 오프각 제어를 통한 SRM의 성능최적화,” 전력전자학회, 전력전자학회논문지, 제 12권 제 1호, pp. 98 106, 2007.
- [2] M. Rodrigues, P. J. Costa Branco, and W. Suemitsu, “Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors,” IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 48, No. 3, pp. 711 715, Jun. 2001.