

# 전류 패턴을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 고장진단

노학승\*, 김동희\*, 정해광\*, 이교범\*

\*아주대학교

## Fault Diagnosis of a Switched Reluctance Motor Using Current Patterns

Hak Seung Ro, Dong Hee Kim, Hae Gwang Jeong, and Kyo Beum Lee

Ajou university

### 초록

본 논문은 전류 패턴을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 스위칭 소자 고장진단 방법을 제안한다. 측정된 4상 전류( $i_a, i_b, i_c, i_d$ )는 정지 좌표계 전류로 변환되고 이를 정지 좌표계에 나타내면 스위칭 소자의 고장에 따른 특정한 형태를 갖는 전류 벡터의 패턴을 얻을 수 있다. 제안한 기법을 통해 스위칭 소자의 개방 및 단락 고장을 진단 가능하다. 제안된 기법은 기존의 기법들과는 달리 추가적인 전류센서나 전압센서가 필요하지 않고, 시스템 모델링이 필요하지 않아 비용적인 측면과 복잡한 계산이 필요하지 않은 장점이 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법의 타당성 및 성능을 검증한다.

### 1. 서론

스위치드 릴럭턴스 모터는 영구자석 모터의 대안으로 많은 관심을 받고 있다. 특히 스위치드 릴럭턴스 모터는 이중 돌극형의 모양으로써 단순한 구조와 낮은 단가, 넓은 속도 범위에 걸쳐 높은 출력을 갖는 장점을 갖고 있다. 따라서 현재 스위치드 릴럭턴스 모터의 최적 이용을 위한 전력변환장치에 대한 토폴로지 및 제어 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 대표적으로 가장 많이 쓰이는 토폴로지는 비대칭 컨버터 구조이다. 각 상을 독립적으로 제어가능하며 제어의 다양성과 함께 상 당 2개의 스위치와 다이오드를 갖는 것이 특징이다.

이러한 전력변환장치의 연구개발과 더불어 그 신뢰성을 높이기 위해 고장을 신속히 진단하는 연구 또한 중요하다. 전력변환장치의 고장은 크게 직류단 캐패시터 고장, 전류센서 고장, 스위칭 소자고장으로 나눌 수 있다. 직류단 캐패시터의 개방 및 단락 고장이 발생하면 정류단과 입력전원에 과전류가 발생하여 입력단에 2차적인 손상을 발생시킨다. 전류 센서의 게인 오차 또는 오프셋 오차가 발생한 경우 출력토크에 리플을 야기

할 수 있다. 스위칭 소자의 경우 개방고장과 단락고장으로 나뉜다. 개방 고장의 경우 권선에 전류를 흘려보내지 못하게 되고, 단락 고장의 경우 권선에 많은 전류를 흘리게 된다. 앞서 설명한 전력변환장치의 고장 중 스위칭 소자의 고장이 가장 빈번히 발생한다. 따라서 시스템의 신뢰성 향상과 유지보수 비용 절감 면에서 스위칭 소자의 고장 진단 기법이 필요하다. 기존의 SRM의 고장진단 기법의 경우 추가적인 센서를 추가하거나 복잡한 계산을 필요로 한다[1].

본 논문에서는 별도의 전류센서를 추가하지 않고, 전류 패턴을 구함으로써 고장의 유형을 진단한다. 제안한 고장진단 기법은 그림 1의 4상 SRM 비대칭 컨버터 토폴로지에 기반한다. 적용된 기법은 기존의 전류 센서로부터 측정된 4상 전류를 이용한다. 따라서 각 개방과 단락고장에 따른 변화를 관찰함으로써 고장의 유형을 진단한다. 제안된 기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 고장진단

제안된 기법은 측정된 4상전류( $i_a, i_b, i_c, i_d$ )를 이용하여 얻은 전류벡터의 정보를 통해 스위칭 소자의 고장유무와 고장이 발생한 스위칭 소자를 판별한다. 전류 벡터를 얻기 위해 4상 전류는 식 (1)을 통해 정지좌표계 전류( $i_{ds}, i_{qs}$ )로 변환된다[2].

$$\begin{aligned} i_d &= (i_a + i_b - i_c - i_d) \times (1/\sqrt{2}) \\ i_q &= (i_a - i_b - i_c + i_d) \times (1/\sqrt{2}) \end{aligned} \quad (1)$$

위 식 (1)의 전류를 각각 가로축에 d축 전류를 세로축에 q축 전류로 표현하면 그림 2와 같은 전류 벡터를 얻을 수 있다. 개방고장의 경우 고장이 발생한 상에 따라 해당 방향으로 전류가 흐르지 않으면서 전류 벡터의 모양이 변화한다. 각각에 따른 전류 벡터는 그림 3과 같다.

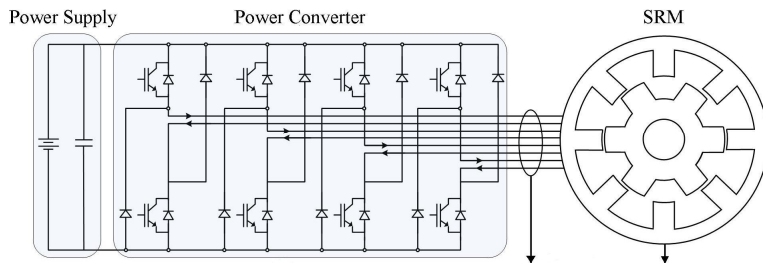


그림 1 4상 비대칭 컨버터로 구성된 스위치드 릴럭턴스 모터 구동 시스템.

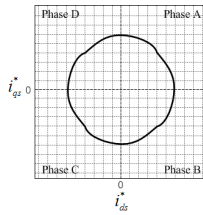


그림 2 정상운전 상태에서의 전류 벡터.

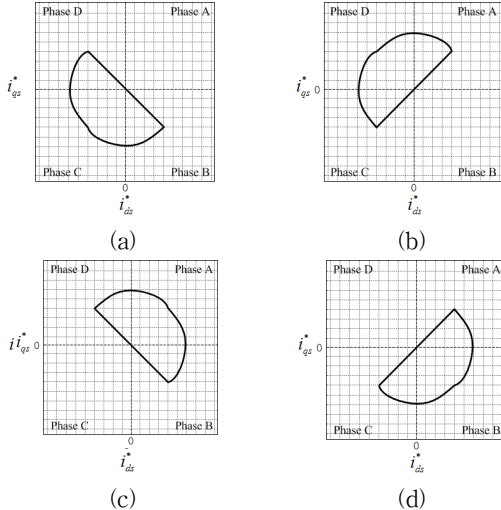


그림 3 각 상의 개방고장 상태에서의 전류 벡터. (a)A상 고장, (b)B상 고장, (c)C상 고장, (d)D상 고장.

단락 고장은 전류 패턴이 2가지로 나뉘게 된다. 먼저 PWM을 발생시키는 스위치가 고장나게 되면 해당 상의 양 스위치가 켜짐으로써 급격한 전류 유입이 발생된다. 반면, 소프트 스위칭을 하기 위해 지속적으로 켜지는 스위치가 고장나게 되면, 일단 해당 상의 구동구간은 일정한 모양을 유지한다. 하지만 다음상으로 전환되는 구간에서 정상상태보다 전류 소호가 느려지면서 벡터 모양이 기존보다 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

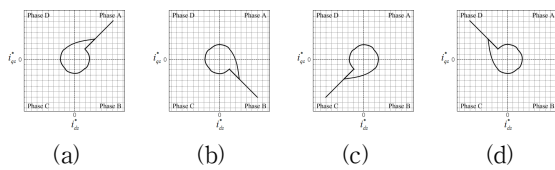


그림 4 PWM 스위치 단락고장상태에서의 전류 벡터. (a)A상 고장, (b)B상 고장, (c)C상 고장, (d)D상 고장.

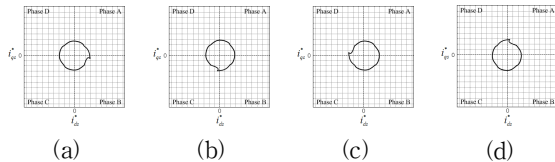


그림 5 고정점 스위치 단락고장상태에서의 전류 벡터. (a)A상 고장, (b)B상 고장, (c)C상 고장, (d)D상 고장.

### 3. 시뮬레이션

제안한 기법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 스위치드

릴럭턴스 모터의 변수들을 나타낸다.

표 1 대상 전동기의 제원  
Table 2 Specification of target motor

변수	값	변수	값
고정자 극	8	최대인덕턴스	88m
회전자 극	6	최소인덕턴스	10m
고정자 저항	2.5Ω	제어 주기	50μs

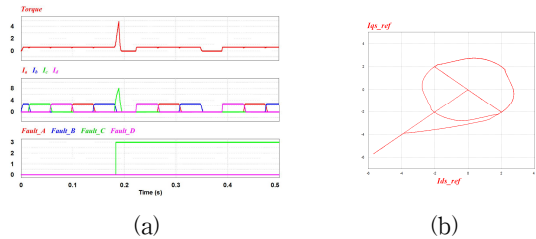


그림 6 C상 단락고장 상태에서의 시뮬레이션 결과. (a)토크, 전류, 고장전단, (b)전류 벡터

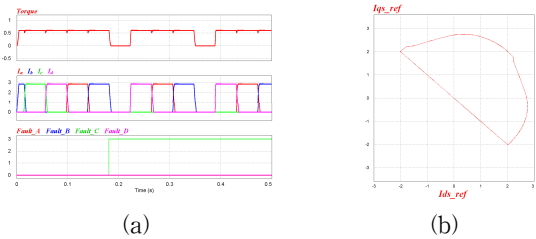


그림 7 C상 개방고장 상태에서의 시뮬레이션 결과. (a)토크, 전류, 고장전단, (b)전류 벡터

스위칭 소자에 단락고장이 발생한 경우 모의실험 결과는 그림 6과 같다. 해당 상에 단락 고장이 발생하게 되면 해당상으로 전류 패턴 모양이 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 7은 개방고장 상태의 모의실험 결과이다. 해당 상으로 전류가 흐르지 않으면서 모양이 변화한 것을 확인 할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 모터의 스위치 고장을 추가적인 센서 없이 전류 패턴을 이용해서 진단하는 방법을 제안한다. 제안된 제어 기법은 전류 패턴의 변화를 통해 각 고장 상태를 진단한다. 1.5kW급 스위치드 릴럭턴스 모터 기반의 PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 제어기법의 성능을 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임.  
(No. 20120000861).

### 참고 문헌

[1] N. S. Gameiro, and A. J. M. Cardoso, "A new method for power converter fault diagnosis in SRM Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 2, pp.653-662, Mar/Apr. 2012.  
[2] 이은실, 이교범 "전류패턴을 이용한 스파스 매트릭스 컨버터의 개방사고 진단," 전력전자학회 학술대회, pp. 419-420. 2011. 7.