

Two-Step 구조의 인공신경망을 이용한 3상 PWM 컨버터의 다중 스위치 개방고장 진단

김원재, 김상훈

강원대학교 BIT의료융합학, 강원대학교 전기전자공학과

Multiple Switches Open-Fault Diagnosis Using ANNs of Two-Step Structure for Three-Phase PWM Converters

Won-Jae Kim, Sang-Hoon Kim

Kangwon National University

ABSTRACT

3상 컨버터에서 스위치의 개방고장이 발생한 경우 고장 전류에 직류 및 고조파 성분이 발생할 수 있으며, 보호회로에 의한 고장 감지가 어려우므로 주변 기기에 2차 고장이 발생할 수 있다. 단일 및 이중 스위치 개방고장의 경우 21가지 고장 모드가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 고장 모드를 진단하기 위해 정지 좌표계 d-q축 전류의 직류 및 고조파 성분을 활용하는 two-step 구조의 ANN(Artificial Neural Network)을 제안한다. 고장 시에 발생한 직류 및 고조파 성분 전류는 ADALINE(Adaptive-Linear Neuron)을 통해 얻는다. 고장 진단의 첫 번째 단계에서는 직류 성분을 기반으로 ANN을 이용하여 고장 모드를 6개 영역으로 분류한다. 두 번째 단계에서는 6개의 각 영역에서 직류 성분과 전류의 THD(Total Harmonics Distortion)를 기반으로 ANN을 이용하여 개방고장이 발생한 스위치를 진단한다. 제안된 Two-step 방법으로 고장을 진단하므로써 간단한 구조로 ANN의 설계가 가능하다. 3.7kW급 3상 PWM 컨버터로 실험을 통해 제안된 방법의 효용성을 검증하였다.

1. 서 론

3상 PWM 컨버터는 전력 반도체 소자의 스위칭을 통해 양방향 제어가 가능하여 신재생 에너지, 양방향 계통연계, 가변속 제어 회로 등에 그 사용이 증가하고 있다^[1]. PWM 컨버터를 비롯한 전력 변환 장치의 부품 중 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)와 같은 전력 반도체 스위치의 고장률은 38%로 높은 비중을 차지하고 있다.

전력 반도체 스위치 고장은 단락고장과 개방고장 그리고 간헐적 게이팅 회로 오동작으로 나눌 수 있다. 단락고장은 큰 과전류가 발생하므로 차단기, 퓨즈 같은 보호 회로에 의해 전원이 차단되어 시스템이 중단된다. 그러나 개방고장은 보호회로에 의한 감지가 어려우므로 2차 고장이 주변 기기에 나타날 수 있다. 그러므로, 전력 변환 장치의 신뢰성 향상을 위해서는 전력 스위치의 개방고장을 진단할 필요가 있다. 3상 PWM 컨버터에서 단일 및 이중 스위치 개방고장을 포함한 다중 스위치 개방고장은 고장이 발생한 스위치에 따라 21가지 고장 모드가 존재한다. 이러한 고장 모드들을 수치적인 방법으로 진단하는 경우 복잡한 알고리즘이 요구되며, 노이즈 등에 의해 경부하에서 진단 성능이 저하될 수 있다. [2]에서는 21가지 고장 모드를

진단하기 위해 인공신경망(ANN)을 이용한 방법을 제안하였다. 이 방법은 고장 전류의 패턴을 학습하므로 경부하에서도 비교적 좋은 진단 성능을 갖으나, 복잡한 구조의 ANN으로 인해 많은 연산이 요구된다. 이러한 복잡성 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 정지 좌표계 d-q축 전류의 직류 및 고조파 성분을 이용하는 two-step 구조의 ANN 기반의 고장진단 방법을 제안한다.

2. 제안된 Two-Step 구조의 ANN에 기반한 스위치 개방고장 진단

표 1. 개방고장이 발생한 스위치에 따른 고장 모드

Fault mode	Fault number	Fault mode	Fault number	Fault mode	Fault number
S1	1	S2S3	8	S4S6	15
S1S6	2	S2S4	9	S6	16
S2S6	3	S4	10	S5S6	17
S2	4	S3S4	11	S1S5	18
S1S2	5	S3S5	12	S1S4	19
S1S3	6	S5	13	S3S6	20
S3	7	S4S5	14	S2S5	21
Sector number	Fault mode	Sector number	Fault mode	Sector number	Fault mode
1	S1	2	S2	3	S3
	S1S6		S1S2		S2S3
	S2S6		S1S3		S2S4
4	S4	5	S5	6	S6
	S3S4		S4S5		S2S6
	S3S5		S4S6		S1S5

그림 1은 예로서 3상 PWM 컨버터에서 S1 스위치의 개방고장 상황과 이 경우의 3상 전류를 나타낸다. 이와 같이 스위치의 개방고장 시에는 전류 왜곡이 발생하여 직류 및 고조파 성분이 발생한다. 이러한 성분들은 개방고장이 발생한 스위치에 따라 다르게 나타난다. 표 1은 개방고장이 발생한 스위치에 따른 고장 모드를 나타낸다. 이 경우 21가지의 고장 모드가 존재하며, 이들 모드를 바로 구분하는 ANN은 그 구조가 매우 복잡해질 수 있다. 그러나 표 1에 주어진 것과 같이 한 영역에 3개의 고장 모드가 주어지도록 분류하는 경우, 각 영역에서 3개의 고장 모드를 진단하는 간단한 ANN을 설계할 수 있다. 예를 들어, 고장 모드가 Sec1에 존재하는 경우, 3가지 고장 모드 즉, S1, S1S6 그리고 S2S6 고장 모드 중 하나로 구분하는 ANN 설계가 가능하여 그 구조가 간단해질 수 있다. 이를

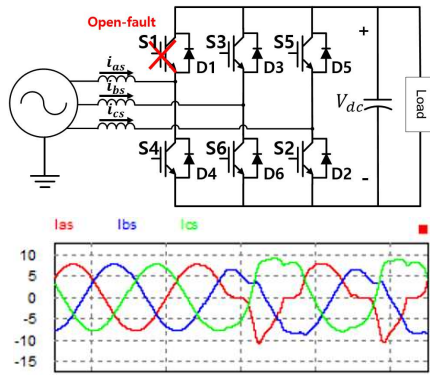


그림 1 3상 PWM 컨버터의 S1 스위치 개방고장 및 3상 전류

위해, 본 논문에서는 정지 좌표계 d-q축 전류의 직류 및 고조파 성분을 활용하는 두 개의 ANN을 직렬로 사용한다. 고장 전류의 직류 및 고조파 성분은 ADALINE(Adaptive-Linear Neuron)을 통해 얻으며, 첫 번째 ANN은 직류 성분을 이용하여 표 1과 같이 6개의 영역 즉, Sec1-6으로 분류한다. 두 번째 ANN은 각 영역에서 직류 성분과 d-q축 전류의 THD 비를 이용하여 개방고장이 발생한 스위치를 진단한다. 이와 같은 two-step 방법으로 간단한 구조의 ANN을 설계할 수 있다. 첫 번째 단계와 두 번째 단계에서 사용된 ANN의 구조가 각각 그림 2와 3에 나타나 있다. 두 ANN은 각각 히든 층에 뉴런을 1개 그리고 2개만 사용하므로 구조가 간단함을 알 수 있다.

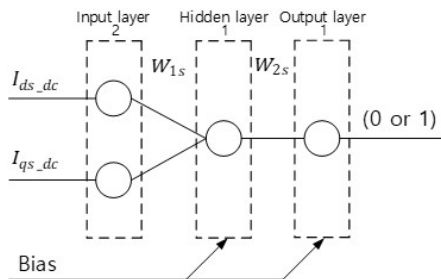


그림 2 첫 번째 ANN의 구조

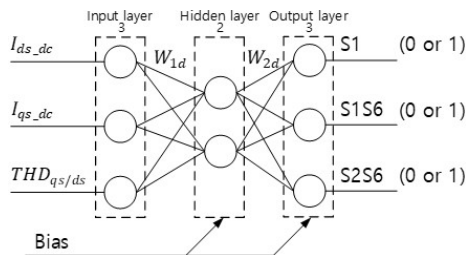


그림 3 두 번째 ANN의 구조

그림 4는 정지 좌표계에서 첫 번째 ANN의 결과를 나타낸다. 이 ANN은 각 영역을 구분하는 경계 직선을 출력하며, 이의 결과로 각 영역에 3가지 고장 모드가 존재함을 알 수 있다. 한 레그에서 두 개의 스위치에 개방고장이 발생한 경우 즉, S1S4, S2S5 그리고 S3S6 고장 모드는 그림 5에 Sec0로 표시된 원 내부에 직류 성분이 존재하므로, 고장 발생 시 직류 성분의 크기가 임계값(Threshold value)보다 작은 경우 Sec0로 분류하며, 이 경우 3상 전류의 영전류 샘플 수를 비교하여 고장이 발생한 스위치를 진단한다.

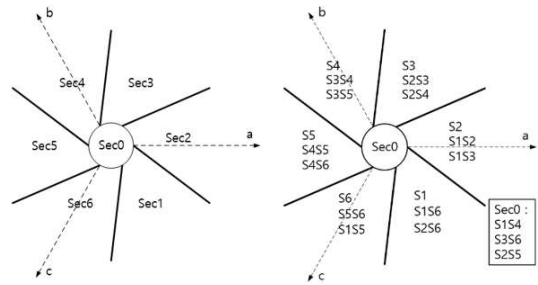


그림 4 정지 좌표계에서 첫 번째 ANN의 결과

3. 실험 결과

제안된 ANN을 사용한 고장 진단의 효용성을 검증하기 위해 3상 PWM 컨버터로 실험을 진행하였다. 그림 5는 S1, S6 스위치에 개방고장이 발생한 경우 제안된 방법의 결과를 나타낸다. 그림 5로부터 고장 모드가 Sec1로 분류되었으며, 고장 모드를 2, 즉, S1S6 고장 모드로 정확히 진단함을 알 수 있다.

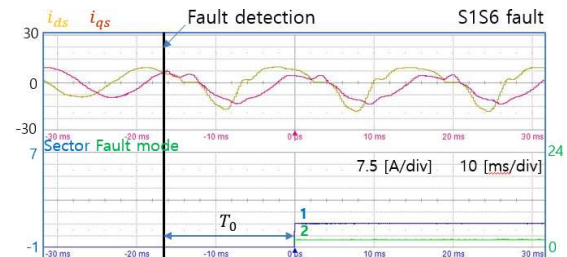


그림 5 S1, S6 스위치에 개방고장이 발생한 경우 제안된 방법의 실험 결과

4. 결론

본 논문에서는 간단한 구조로 3상 PWM 컨버터의 다중 스위치 개방고장 진단을 위해 d-q축 전류의 직류 및 고조파 성분을 이용하는 two-step 구조의 ANN 방법을 제안하였다. 첫 번째 단계에서 직류 성분을 기반으로 ANN을 이용하여 고장 모드를 정지 좌표계에서 6개의 영역으로 분류하며, 두 번째 단계에서는 각 영역에서 직류 성분과 d-q축 전류의 THD 비를 기반으로 ANN을 이용하여 개방고장이 발생한 스위치를 진단하였다. 제안된 Two-step 방법으로 간단한 구조의 ANN 설계가 가능하다. 3.7kW급 3상 PWM 컨버터에 대한 실험을 통해 제안된 방법의 효용성을 검증하였다.

본 연구는 에너지기술평가원(에너지기술개발사업 산업기술헌신사업 : 과제번호 20183010140980)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Sang-Hoon Kim, Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors (Elsevier Inc., Kidlington, 2017), Ch. 7..
 [2] T. Shi, Y. He, T. Wang and B. Li, "Open Switch Fault Diagnosis Method for PWM Voltage Source Rectifier Based on Deep Learning Approach," in IEEE Access, vol. 7, pp. 66595-66608, 2019,