

직류단 전압의 고조파 맥동 검출을 이용한 3상 다이오드 정류기의 고장 진단

朴帝旭*, 白丞原**, 金長睦†, 李東椿***, 李敎範****

Fault Diagnosis for 3-Phase Diode Rectifier using Harmonic Ripples of DC Link Voltage

Je-Wook Park, Seong-Won Baek, Jang-Mok Kim, Dong-Choon Lee, and Kyo-Beum Lee

요 약

본 논문에서는 3상 다이오드 정류기의 고장에 따른 해석 및 고장 판별 기법을 제안한다. 입력전원이나 다이오드 소자에 고장이 발생하게 되면 출력 직류단 전압에 큰 맥동을 유발하며 이는 인버터 시스템의 제어 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 커패시터의 수명 단축을 야기한다. 본 논문에서는 입력측의 지락 사고 및 다이오드 개방 사고 시의 직류단 전압 특성을 분석하고, 계통주파수의 6배에 주파수마다 측정된 직류단의 순시전압을 직류단 평균 전압과 비교함으로써 고장의 유무 및 종류를 판별하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 직류단 전압 센서만을 이용하므로 구현이 간단하고 고장 진단을 위한 추가적인 하드웨어가 요구되지 않는다. 실험과 시뮬레이션을 통해 제안한 고장 진단 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

The fault analysis and detecting algorithm for a 3 phase diode rectifier is proposed. The 3 phase diode rectifier is used for the AC power rectifier of the PWM inverter. The input power or diode faults cause the ripples of the DC voltage, degradation of the control performance and life shortening of the DC link capacitor. In this paper, the ripple of the DC voltage is mathematically analyzed for the earth fault of input power and open circuit fault of the diode, respectively. The fault detection and type of fault can be obtained by comparing the average DC voltage and the instant DC voltage which is sampled with 6 times of grid frequency. The proposed method can be easily applicable and doesn't require additional circuit. The experimental and simulation results are presented to verify the validity of the proposed method.

Key Words : Three phase diode rectifier, Earth fault, Open circuit fault, DC link voltage

1. 서 론

†교신저자 : 정회원, 부산대 전자전기공학부 부교수

E-mail : jmok@pusan.ac.kr

*학생회원, 부산대 전자전기공학과 박사과정

**정회원, LG화학 기술연구원 연구원

***정회원, 영남대 전기공학과 교수

****정회원, 아주대 전자공학부 부교수

접수일자 : 2010. 9. 1

1차 심사 : 2010. 10. 4

2차 심사 : 2011. 8. 19

심사완료 : 2011. 9. 1

전기에너지는 부하의 특성에 따라 필요한 형태로 변환되어야 하므로 전기에너지 응용분야에 따라서 전력 변환 기술이 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히 SMPS(Switch-Mode Power Supply)와 AC 모터 드라이브, DC 서보 드라이브 등과 같은 대부분의 전력전

자 응용에서 AC/DC/AC 전력변환기의 사용은 필수 요소가 되고 있다. 그 중에서도 3상 다이오드 정류기는 구조가 간단하고 저가이기 때문에 다양한 전력변환 장치에 널리 적용되고 있으며, 상용 인버터의 입력부는 대체로 다이오드 정류기로 구성되어 있다. 시스템의 운전 중 고장이 발생하였을 경우, 원인을 찾는 작업은 시간과 비용이 많이 드는 일이며 시스템의 구성이 복잡해짐에 따라 그 작업은 더욱 어렵게 된다.

시스템 입력측 고장의 종류는 전원부 고장과 다이오드 고장으로 나뉠 수 있다, 전원부 고장은 선간 단락 사고와 지락 사고로 구분되고, 다이오드 고장은 단락 사고와 개방 사고로 구분할 수 있다, 선간 단락 사고 및 다이오드 단락 사고는 퓨즈를 통해 시스템의 운전이 정지된다^[1]. 따라서 본 논문에서는 전원부의 지락 사고 및 다이오드 개방 사고에 대한 분석 및 고장 진단 알고리즘을 제안하고자 한다.

다이오드 정류기에서 고장이 발생할 경우 직류단의 전압 맥동이 발생한다. 이는 출력단의 인버터의 제어 성능을 감소시키고 직류단 커패시터의 수명을 단축시킨다. 또한 손상된 커패시터는 전체 시스템의 고장이거나 사고를 유발하여 시스템의 안정성을 악화시키는 요인이 된다^[2]. 따라서 3상 다이오드 정류기의 고장상황에 따라 발생하는 직류단의 전압 패턴을 분석함으로써 고장발생 여부 및 고장의 종류를 판별하여 시스템을 보호할 필요성이 있다.

기존의 정류기 고장 진단 알고리즘으로는 각각의 소자의 전압과 전류를 검출하는 방식^[3-14], Neural Network를 이용한 방식^[5,6], 웨이브렛 분석을 이용한 방식^[7-19]이 있다. 이러한 알고리즘은 고장 진단을 위해 많은 검출 소자를 사용해야 하거나 구조가 복잡하고 연산량이 많아지는 단점이 있다.

3상 다이오드 정류기에서 전원라인 사고 및 다이오드 소자 고장에 따라 발생하는 직류단 전압은 일정한 주기로 맥동 성분을 가지므로 본 논문은 직류단 전압만을 검출하여 고장의 유무 및 종류를 판별하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 고장 검출 방식은 직류단의 평균 전압과 계통주파수의 6배에 해당하는 주파수로 샘플링된 직류단 전압의 크기를 비교함으로써 고장의 유무 및 고장의 종류를 판별할 수 있다. 또한 직류단에 사용되는 전압 센서 하나만으로 고장의 유무 및 종류를 판별할 수 있으므로 구현이 간단하고 고장판별을 위한 추가적인 하드웨어가 요구되지 않는 장점이 있다. 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 검증한다.

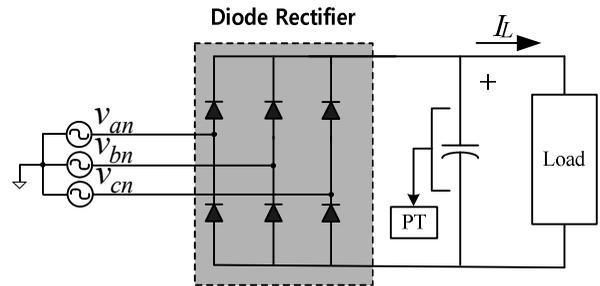


그림 1 3상 다이오드 정류기 구조
Fig. 1 3-phase diode rectifier

2. 3상 다이오드 정류기 구성 및 동작원리

그림 1에 3상 다이오드 정류기의 구조를 나타내었다^[10]. 상전압의 실효치를 V 라고 가정하면 상전압 수식을 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[11].

$$\begin{aligned} v_{an} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ v_{bn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \frac{\pi}{6}) \\ v_{cn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \frac{\pi}{6}) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에 따라 각각의 선간전압은 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} v_{ab} &= v_{an} - v_{bn} = \sqrt{6} V \sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi) \\ v_{bc} &= v_{bn} - v_{cn} = \sqrt{6} V \sin(\omega t - \frac{1}{3}\pi) \\ v_{ca} &= v_{cn} - v_{an} = \sqrt{6} V \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad (2)$$

3상 다이오드 정류기는 임의의 한 상의 선간 전압이 출력전압 v_{dc} 보다 클 경우 다이오드가 도통되어 커패시터가 충전되고 v_{dc} 가 선간전압보다 커지면 다이오드는 꺼지게 된다. 부하를 통해 커패시터가 방전하게 되면 v_{dc} 는 다시 감소하며 위의 과정을 반복하게 된다. 따라서 출력전압의 최대값은 선간전압의 첨두치와 동일하며 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{dc-peak} = \sqrt{6} V \quad (3)$$

직류단 커패시터의 충전과 방전이 반복됨에 따라 직류단 전압에 맥동이 발생하게 되는데 맥동전압 v_r 은 근사적으로 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

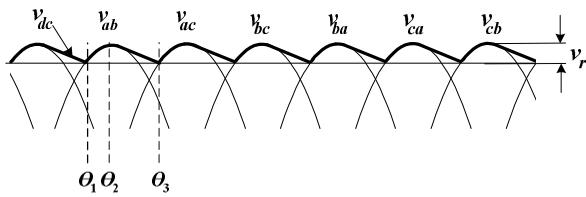


그림 2 정상동작일 경우 다이오드 정류기 동작 파형
Fig. 2 Voltage and current waveform of 3-phase diode rectifier with the normal operation

$$v_r \approx \frac{\pi}{3} \frac{I_L}{\omega C} = \frac{\pi}{3} X_C I_L \quad (4)$$

식 (4)를 통해 알 수 있듯이 직류단 커패시터 C 의 용량이 크다면 v_{dc} 가 선간전압의 첨두치에 가까운 값으로 일정하게 유지되고 다이오드의 도통 시간이 매우 짧다. 따라서 입력 전류는 선간전압의 첨두치 부근에서 펄스형태가 된다. 이러한 직류단 전압의 맥동 성분은 6개의 다이오드가 $\pi/3$ 간격으로 도통됨에 따라 전원 주파수의 6배 차수로 나타나며 이를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 θ_1 은 v_{ab} 가 $V_{dc-peak} - v_r$ 이 되는 시점이므로 (3)과 (4)에 의해 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{\pi X_C I_L}{3\sqrt{6} V}\right) - \frac{1}{3}\pi \quad (5)$$

θ_2 는 v_{ab} 가 최대가 되는 시점, θ_3 는 θ_1 보다 $\pi/6$ 지난 시점으로 각각 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_2 = \frac{\pi}{6} \quad (6)$$

$$\theta_3 = \theta_1 + \frac{\pi}{6} \quad (7)$$

3. 고장 발생시 3상 다이오드 정류회로 해석

3.1 전원측 지락 사고

전원측의 임의의 한 상에 지락사고가 발생한 경우 사고가 난 상은 정류기로부터 개방되어 있으므로 해당 상의 다이오드가 항상 꺼지는 상태로 동작하게 되어 방전구간이 정상동작일 경우보다 길어지게 된다. 그림 3은 A상의 지락사고 발생시의 출력 직류단 전압의 파형을 나타낸 것이다. 이와 같은 경우 단상 전파 다이오드 정류기와 동일한 동작특성을 가진다. 한 상이 지락이 발생한 경우 출력전압의 맥동성분에는 2차 고조파가 나타난다.

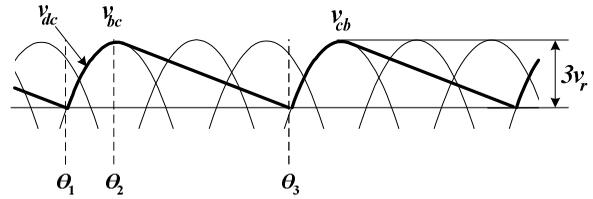


그림 3 전원라인 지락사고일 경우 출력전압 파형
Fig. 3 DC output voltage with the earth fault of AC power source

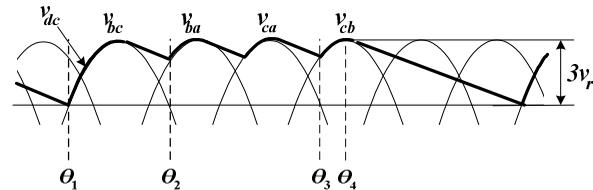


그림 4 다이오드 소자 개방사고일 경우 출력전압 파형
Fig. 4 DC output voltage with the open-circuit fault of the diode

그림 3에서 θ_1 은 v_{bc} 가 $V_{dc-peak} - 3v_r$ 이 되는 시점이므로 (3)과 (4)에 의해 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{\pi X_C I_L}{\sqrt{3} V}\right) + \frac{1}{3}\pi \quad (8)$$

θ_2 는 v_{bc} 가 최대가 되는 시점, θ_3 는 θ_1 보다 $\pi/6$ 지난 시점으로 각각 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_2 = \frac{5}{6}\pi \quad (9)$$

$$\theta_3 = \theta_1 + \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

3.2 다이오드 개방 사고

다이오드 소자의 개방고장은 다이오드 소자 내부적으로 선로가 단선이 된 경우로 정의한다. 개방고장의 경우 개방된 다이오드로 펄스 형태의 전류가 흐르지 않는다. 개방된 다이오드가 A상의 상위단 다이오드라면 v_{ab} 가 출력 직류단 전압보다 큰 구간에서 전류가 흐르지 않으므로 이 구간동안 커패시터는 충전되지 않고 방전 된다.

따라서 그림 4와 같이 정상 동작일 경우보다 방전되는 구간이 길어짐에 따라 출력전압의 맥동은 증가하게 된다.

그림 4에서 θ_1 은 v_{bc} 가 $V_{dc-peak} - 3v_r$ 이 되는 시점, θ_2 는 v_{ba} 가 $V_{dc-peak} - v_r$ 이 되는 시점, θ_3 는 v_{cb} 가

$V_{dc-peak} - v_r$ 이 되는 시점, θ_4 는 v_{cb} 가 첨두치가 되는 시점으로서 각각 (11)-(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{\pi X_c I_L}{\sqrt{6} V}\right) + \frac{\pi}{3} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{\pi X_c I_L}{3\sqrt{6} V}\right) + \frac{2}{3}\pi \quad (12)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{\pi X_c I_L}{\sqrt{6} V}\right) - \frac{2}{3}\pi \quad (13)$$

$$\theta_4 = \frac{11}{6}\pi \quad (14)$$

4. 고장 검출 알고리즘

3상 다이오드의 고장 검출은 직류단의 평균전압에서 부하를 고려하여 설정된 고장 검출 계수 V_{uv} 를 뺀 전압 V'_{avg} 와 계통 주파수보다 6배 높은 주파수 $6f_g$ 마다 샘플링된 순시 직류단 전압 V_{dc} 를 비교함으로써 추정할 수 있다. 그림 5와 같이 순시전압 V_{dc} 가 V'_{avg} 보다 작을 경우 *UV Flag*(Under Voltage Flag)를 트리거 하여 고장으로 판별한다.

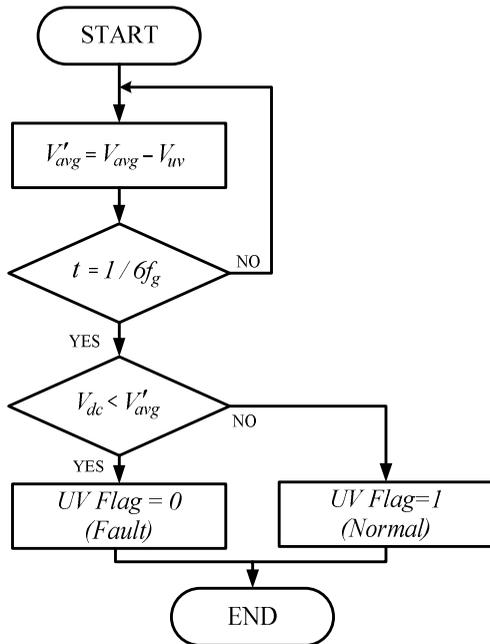


그림 5 제안한 고장 진단 알고리즘 순서도
Fig. 5 Flowchart of the proposed fault detection process

또한 *UV Flag*의 주파수를 분석하여 고장의 종류를 판별할 수 있다. 그림 6에 *UV Flag*를 이용하여 고장의 종류를 판별하는 원리를 나타내었다. 그림 6(a)는 정상적인 동작에서는 직류단 전압을 나타낸 것으로 V'_{avg} 보다 $6f_g$ 마다 샘플링된 순시 직류단 전압이 항상 크므로 *UV Flag*가 항상 1을 가진다. 그림 6(b)는 지락사고의 직류단 전압 파형을 나타낸 것으로 계통주파수의 2배에 해당되는 주파수로 *UV Flag*가 0이 됨을 알 수 있다. 그림 6(c)는 다이오드 개방 사고 시의 직류단 전압파형을 나타낸 것으로 계통 주파수로 *UV Flag*가 0이 됨을 알 수 있다. 따라서 *UV Flag*가 0이 되는 시점의 주기를 검출함으로써 고장의 종류를 판별할 수 있다.

그림 7은 제안한 다이오드 고장 검출 알고리즘의 블록도를 나타낸 것이다. $6f_g$ 의 주파수로 *Sampling Index*를 1씩 증가시키고 *Sampling Index*가 0에서 5가 되는 동안 *UV Flag*가 0으로 트리거된 횟수를 카운트하여 고장의 유무 및 종류를 판별한다.

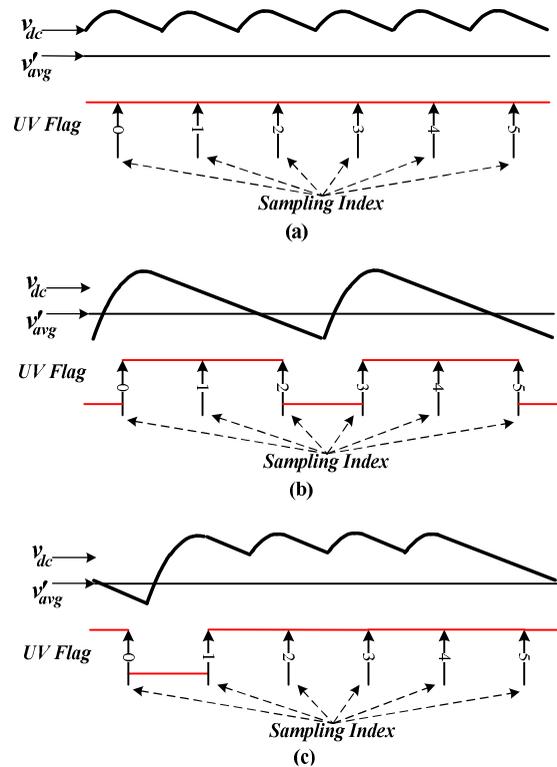


그림 6 *UV Flag*를 이용한 고장 종류 판별 (a)정상 동작 (b) 계통 지락 사고 (c) 다이오드 개방 사고
Fig. 6 Detection of type of fault using *UV Flag* (a) Normal condition (b) earth fault (c) Open circuit fault of the diode

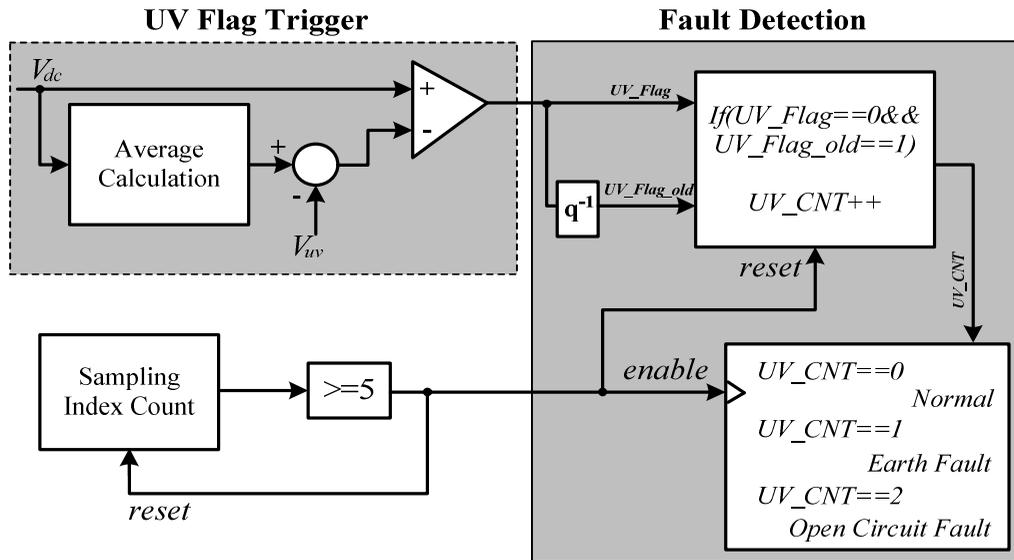


그림 7 제안한 다이오드 정류기 고장진단 알고리즘 블록도
 Fig. 7 Block diagram of the proposed fault detection algorithm for diode rectifier

4. 시뮬레이션 결과

제안한 3상 다이오드 정류기 고장 진단 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션은 Mathwork사의 Matlab Simulink 모델을 이용하였으며^[12] 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 조건
 Table 1 Simulation parameter

전원 입력 측	계통 선간전압	220V
	계통 주파수	60Hz
직류단	직류단 커패시터	2200uF
	부하 저항	150Ω

그림 8은 3상 다이오드 정류기의 정상 동작시의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 고장 검출 계수 V_{uv} 는 부하가 일정하므로 1.5로 고정하였다. 직류단 전압이 계통 주파수의 6배인 360Hz의 맥동 성분을 가지는 것을 볼 수 있으며 직류단 전압이 V_{avg} 보다 항상 크므로 UV Flag가 항상 1을 유지하는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 전원측 A상의 지락사고 발생시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 단상 다이오드 정류기와 동일한 동작특성을 가지므로 직류단 전압이 계통 주파수의 2배인 120Hz의 맥동 성분을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 Sampling Index가 0과 3일 때 각각 UV Flag가 0으로 두 번 트리거 됨을 알 수 있다.

그림 10은 A상의 상위 다이오드가 개방사고가 발생 하였을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. A상의 상위 다이오드가 도통되어야 할 Sampling Index 4, 5구간에서 직류단 전압이 크게 감소하는 것을 볼 수 있으며 Sampling Index 0 구간에서 UV Flag가 0으로 트리거 됨을 알 수 있다. 따라서 UV Flag가 1일 경우는 정상동작, 한 주기 동안 두 번 트리거 될 경우 전원측 지락사고, 한 주기 동안 한 번 트리거 될 경우 다이오드 개방 사고라고 판별할 수 있다.

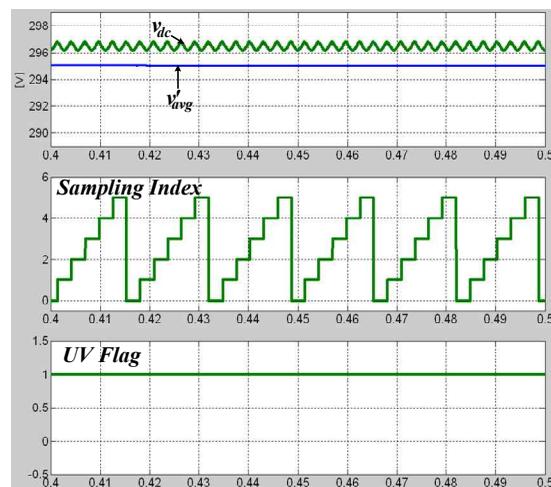


그림 8 정상동작시 직류단 전압, 샘플링 인덱스, UV Flag
 Fig. 8 Simulation result of DC voltage, sampling index and UV flag in normal operation

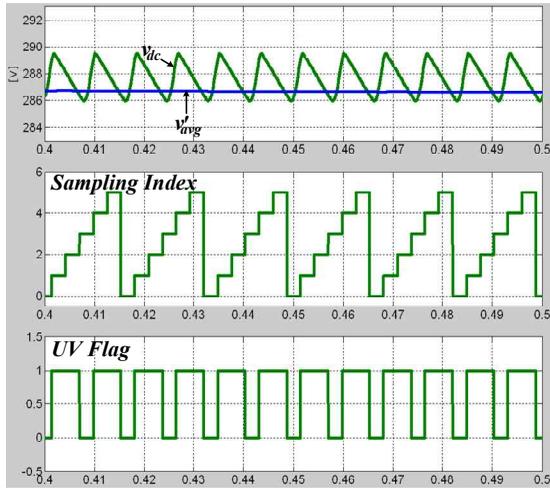


그림 9 전원측의 A상 지락 사고시 직류단 전압, 샘플링 인덱스, UV Flag
 Fig. 9 Simulation result of DC voltage, sampling index and UV flag in earth fault of phase A

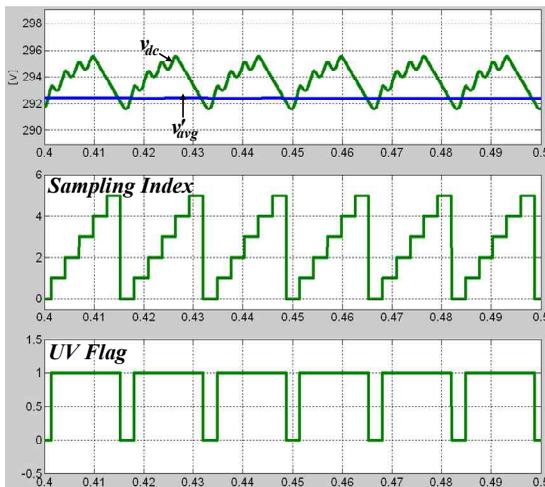


그림 10 A상 상위 다이오드 개방 사고시 직류단 전압, 샘플링 인덱스, UV Flag
 Fig. 10 Simulation result of DC voltage, sampling index and UV flag in open circuit fault of upper diode of phase A

5. 실험결과

정상 동작, 전원측 지락사고, 다이오드 개방사고가 발생한 경우에 대해 고장 진단 알고리즘을 적용하였다. 3상 다이오드 정류기의 직류단 전압을 ADC(Analog to Digital Converter)를 통해 입력 받아 제안한 알고리즘을 적용하였으며 DAC(Digital to Analog Converter)회로를 통해 결과를 오실로스코프로

출력하였다. 사용된 프로세서는 TI(Texas Instrument)사의 TMS320C28346을 사용하였으며 실험 조건은 표 1과 같이 시뮬레이션과 동일하게 설정하였다.

그림 11은 정상동작시의 직류단 전압과 고조파 성분을 분석한 결과를 나타낸 것으로 정상동작시에는 6고조파 성분이 지배적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 12는 정상동작시의 고장 검출 실험 결과를 나타낸 것으로 V_{uv} 는 부하가 일정하므로 1.5로 고정하였다. 직류단 전압이 6고조파를 가지고 맥동의 크기는 약 3V이다. 또한 직류단 전압이 V_{avg} 보다 항상 큰 값을 가지므로 UV Flag가 항상 1을 가짐을 알 수 있다.

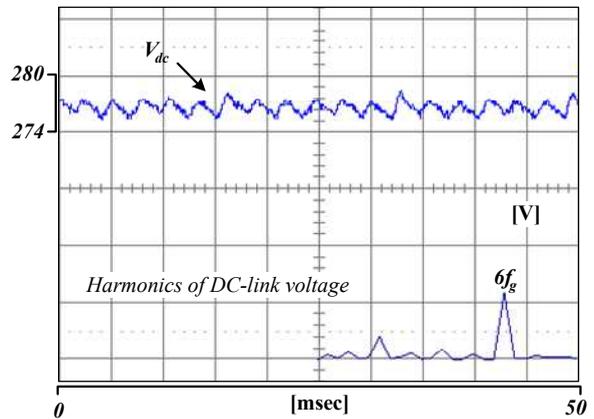


그림 11 정상동작시 직류단 전압과 고조파 성분
 Fig. 11 DC Link Voltage and harmonics in normal operation

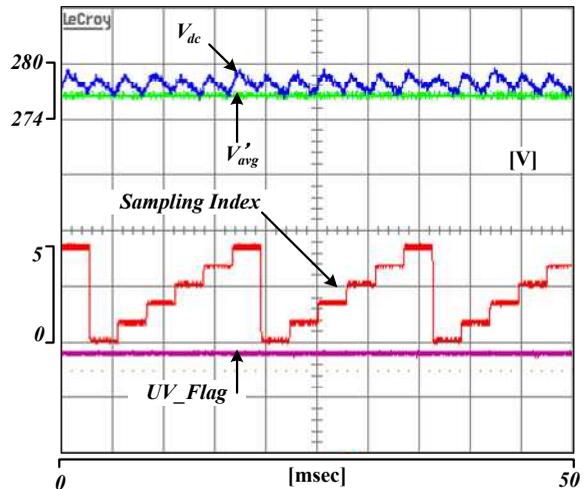


그림 12 정상동작시 직류단 전압, 샘플링 인덱스, UV flag
 Fig. 12 Experimental result of DC voltage, sampling index and UV Flag in normal operation

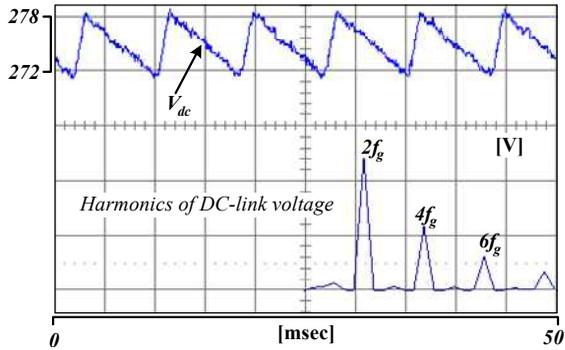


그림 13 전원측 A상 지락 사고시 직류단 전압과 고조파 성분
Fig. 13 DC Link Voltage and harmonics in earth fault of phase A

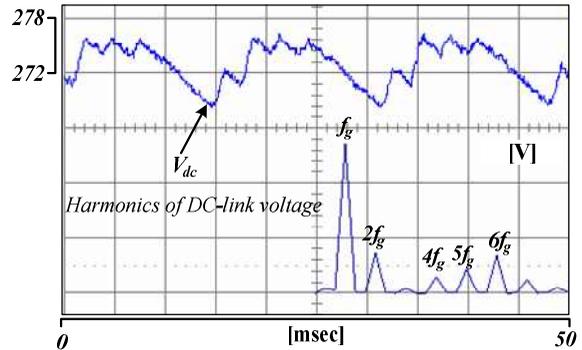


그림 15 A상 상위 다이오드 개방 사고시 직류단 전압과 고조파 성분
Fig. 15 DC Link Voltage and harmonics in open circuit fault of upper diode of phase A

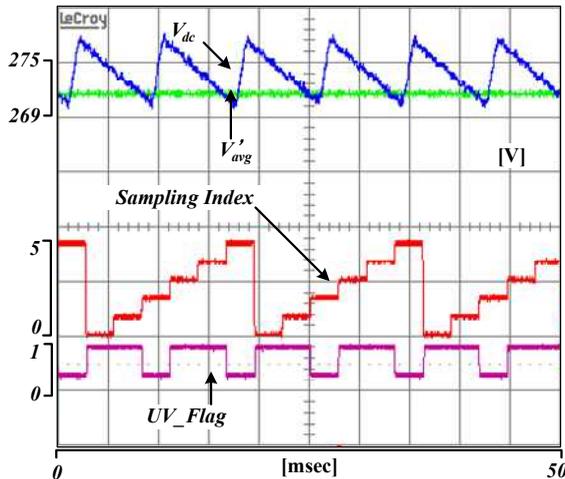


그림 14 전원측의 A상 지락 사고시 직류단 전압, 샘플링 인덱스, UV Flag
Fig. 14 Experimental result of DC Voltage, sampling index and UV flag in earth fault of phase A

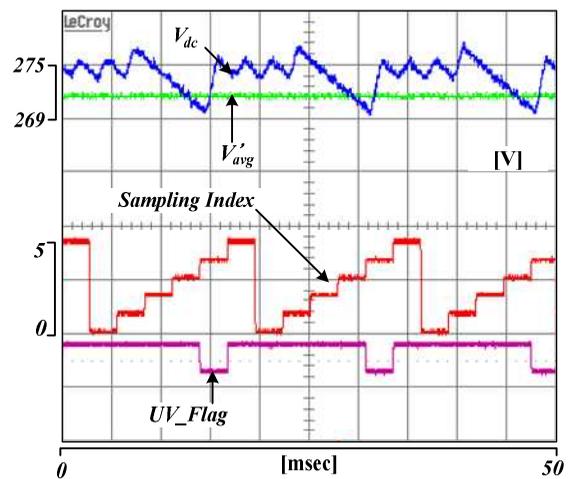


그림 16 A상 상위 다이오드 개방 사고시, 샘플링 인덱스, UV Flag
Fig. 16 Experimental result of DC voltage, sampling index and UV Flag in open circuit fault of upper diode of phase A

그림 13은 전원측의 A상 지락사고 발생시의 직류단 전압과 고조파 성분을 나타낸 것으로 단상 다이오드 정류기와 동일하게 동작하여 2고조파와 그 배수에 해당하는 고조파가 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 14는 전원측 A상의 지락사고 발생시의 고장 검출 실험을 나타낸 것으로 직류단 전압이 2차고조파를 가지며 맥동이 정상동작 시보다 약 3배 증가한 9V인 것을 확인할 수 있다. 그리고 UV flag는 Sampling Index가 각각 2와 5일 때 각각 0으로 트리거 됨을 알 수 있다.

그림 15는 A상 상위 다이오드 개방사고시의 직류단 전압과 고조파 성분을 나타낸 것으로 기본파에 해당하는 주파수로 맥동을 가지며 그 차수에 해당하는 고조파가 나타남을 알 수 있다. 그림 16은 A상 상위 다이

오드를 개방했을 경우의 고장 검출 실험 결과를 나타낸 것으로 A상 상위다이오드가 도통되는 두 구간에서 직류단 전압이 선형적으로 감소하며 나머지 구간에서는 정상동작과 마찬가지로 6고조파를 가짐을 알 수 있다. 또한 최대 맥동의 크기는 정상동작시의 3배인 9V로 나타남을 알 수 있다. UV flag는 DC전압이 가장 낮은 Sampling Index가 4인 구간마다 60Hz로 트리거 된다.

따라서 직류단 전압이 해석한 결과와 동일하게 나타나고 전원 주파수의 6배 주파수마다 평균전압과 순시 전압을 비교함으로써 고장의 종류를 판별 할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 직류단 전압의 맥동을 이용하여 3상 다이오드 정류기의 고장을 진단하는 알고리즘을 제안하였다. 다이오드 개방 사고와 입력측 전원 지락 사고시 특정 주파수의 맥동이 크게 증가한다. 제안한 알고리즘은 직류단 전압의 순시값, 평균전압, 고장검출 계수를 이용하여 전원주파수의 6배에 해당하는 주파수마다 상태를 샘플링하여 직류단 전압을 검출할 수 있다. 제안한 알고리즘은 직류단 전압 센서만을 이용하므로 구현이 간단하고 많은 연산시간을 가지지 않는 장점이 있다. 또한 부하에 따라 고장검출 계수를 최적화하면 전동기와 같은 부하변동이 큰 시스템에서도 적용할 수 있다. 제안한 3상 다이오드 고장 진단 알고리즘은 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (20091020300380-11-2-100) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] Zhuang Jingwu, Zhang Xiaofeng, Yang Feng, et al. "Design and analysis of fault current limiter for generator-rectifier power system", *Proceedings of the CSEE*, Vol. 19, No. 25, pp. 127-130, 2005.
- [2] Yongshuai Zhang, Bo Zhou, Le Zhang, "Fault Diagnosis of Rectification Circuit for Doubly-Salient Electro-Magnetic Wind Generator Using Excitation Current", *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09. IEEE 6th International*, pp. 2279-2283, 2009, May.
- [3] A. Bolopion, J. P. Rognon and D. Royle, "The Use of Microprocessor for Control and Fault Detection of Electronic Power Converters: Contribution to Safety and Maintainability", *IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives*, Lansane, Switzerland, 1983.
- [4] Y. V. Murty, G. K. Duby and R. M. K. Sinha, "Fault Diagnosis in Three-phase Thyristor Converters Using Microprocessor", *IEEE Trans. on Industrial Application*, Vol. 20, No. 6, pp. 1490-1497, 1984.
- [5] Ma Hao, Lee Y s. "Fault diagnosis of power electronic circuits based on neural net network and waveform analysis", *IEEE PEDS '99*, Hong Kong, Vol. 1, pp. 234-237, 1999.
- [6] Long Bo-hua, Tan Yang-hong, Xu Hui, Sun Lei and Wen Juan, "Fault Diagnosis of Power Electronic

Circuits Based on Quantum Neural Network", *Transactions of China Electrotechnical Society*, Vol. 24, pp. 170-174. 2009, Oct.

- [7] Chow T W S, Shi Hai. "Induction machine fault diagnostic analysis with wavelet technique", *IEEE Trans on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 3, pp. 558-565, 2004, Jun.
- [8] ZHAO Gang, ZHOU Bo, "Fault diagnosis of doubly Salient brushless DC generator system based on wavelet packet analysis", *Proceedings of the CSEE*, Vol. 28, No. 8, pp. 121-126, 2008.
- [9] Yin Hang, "Research on implementation and fault diagnosis of doubly salient starter/generator control system", Nanjing University of aeronautics and astronautics, 2008.
- [10] 박종훈, 정승기, "3상 다이오드 정류기에서 전원전압불평형으로 인한 전원전류불평형 해석", *추계 전력전자 학술대회 논문집*, pp. 105-111, 1999.
- [11] 이지명, 이동춘, 임대식, "직류측 센서만을 이용한 3상 PWM 정류기의 제어," *전력전자학술대회 논문집*, pp. 278-281, 2000.
- [12] SIMULINK Model Based and System Based Design, The Math Works Inc., Natick, MA, 2002.

저 자 소 개



박제욱(朴帝旭)

1985년 1월 2일생. 2007년 부산대 전자전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.



백승원(白丞原)

1983년 9월 16일생. 2009년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 부산대 대학원 로봇협동과정 졸업(석사). 2001년~현재 (주)LG화학 기술연구원 연구원.



김장묵(金長睦)

1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001년 3월~현재 부산대 전자전기공학부 부교수. 당 학회 편집이사.



이동춘(李東椿)

1963년 2월 20일생. 1985년 서울대 전기 공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 텍사스 A&M Univ. 방문연구교수. 2004년 미국 Univ. of Wisconsin - Madison 방문연구교수. 현재 영남대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.



이교범(李敎範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.