

ZCT 공진회로를 이용한 DC 전로 누전사고 감지회로에 관한 연구

박근영, 곽동걸*, 최승민*, 안기돈**, 김풍래***
 (주)엘엔씨, *강원대학교, **한국소방안전원, ***나누리시스템

A Study on the Earth Leakage Fault Detection Circuit of DC Line Using ZCT Resonant Circuit

Keun-Young Park, Dong-Kurl Kwak*, Seung-Min Choi*, Ki-Don An**, Pung-Rai Kim***
 L&C co., *Kangwon National University, **Korea Fire Safety Institute, ***Nanuri System co.

ABSTRACT

Recently, the proportion of renewable energy such as solar power and wind power has been increasing as a countermeasure against the climate crisis. As the proportion of renewable energy generation increases, the use of DC power is also increasing along with the increase in the use of ESS. However, unlike the rapid growth of DC power, there is not enough institutional foundation and research on the safety of DC power. Therefore, this paper proposes a DC leakage detector to detect leakage in DC power lines.

1. 서론

최근 국제사회는 지구온난화 등과 같은 환경위기에 대응하기 위한 탄소저감 대책의 일환으로 화석연료의 사용을 제한하고, 2050년까지 기업이 필요전력의 100%를 친환경 재생에너지로 사용하겠다는 RE100 (Renewable Electricity 100%) 캠페인을 추진중에 있다^[1].

최근 국내에서도 태양광, 풍력 등의 신재생에너지의 발전설비가 증가하고 있으며, 이에 따른 에너지 효율성의 증가를 위해 직류기반 시스템의 중요성이 높아지는 추세이다. 더욱이 기존의 광원을 대체하는 LED 조명의 보급확대, 전기자동차의 보급확대 등 직류전원을 이용하는 직류 배전 관련 산업이 발전하고 있으며, 신재생에너지, 전기자동차 등에서 사용되는 ESS (Energy Storage System)의 사용 및 보급의 확대가 증가하는 추세에 있다.

또한 기존 TV, 세탁기, 에어컨 등 다양한 전자기기는 직류기반의 전자기기로써, 교류전원을 인가받아 직류로 변환하여 사용하고 있으며, 태양광, 풍력, 연료전지 등과 같은 신재생에너지원은 대표적 직류 발전설비이다. 이와 같이 직류 발전설비와 직류 전자기기의 보급확대는 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 하지만 직류전원 관련 기술 및 산업의 급격한 성장과는 달리 직류전원의 안전에 대한 제도적 기반이 충분하지 않은 실정이다^[2]. 현재의 전기설비 및 제품의 화재, 감전 등과 같은 전기사고를 예방하기 위한 연구개발은 주로 교류전원 기반의 안전사고 예방에 치중되어 있는 실정이다. 또한 직류전원을 기반으로 하는 LED 조명등, 신재생에너지 설비 등과 같은 직류전원 설비에 기존 교류 누전차단기를 사용하고 있다.

따라서 본 논문에서는 직류 전로에서 발생하는 누전사고를

예방하기 위한 DC 누전검출 회로토폴로지를 제안한다. 제안한 DC 누전검출 회로토폴로지는 영상변류기(ZCT)와 결합된 공진 회로부와 누전사고 시 위상변이를 검출하는 위상변이 검출부 등으로 구성되어, 누전감지의 신뢰성과 속응성을 향상시키는 특징이 주어진다.

2. DC 전로 누전사고 분석

누전에 의해 발생하는 전기사고는 선로와 대지간의 절연불량 또는 절연파괴 등의 원인에 의해 주로 발생하며, 전류가 정상적으로 선로나 기구 등에 흐르지 않고 주변의 금속과 같은 도체나 접지로 흘러 접촉부의 전류에 의한 열로 인해 화재의 발생을 야기하고 절연이 파괴된 부분에 신체가 접촉되면 감전사고를 일으키는 원인이 된다^[3]. 이때 절연이 파괴되는 주요한 원인으로서는 높은 이상전압 등에 의한 전기적 요인과 진동 및 충격 등에 의한 기계적 요인, 산화와 같은 화학적 요인, 온도상승 등에 따른 열적 요인이 대표적이다.



그림 1. 케이블 손상에 의한 DC 접속반 화재
 Fig. 1 DC connection panel fire due to cable damage



그림 2. 케이블 손상에 의한 ESS 화재
 Fig. 2 ESS fire due to cable damage

그림 1은 지난 2016년 경기도의 한 공장 지붕에 설치된 2 MW 규모의 태양광 발전설비에서 발생한 누전사고 사진을 나타내며, 이는 태양광 접속부의 전로에 손상이 발생하여 절연이 파괴되어 발생한 누전 화재사고의 사례이다.

그림 2는 ESS 직류접촉반의 절연이 파괴되어 직류접촉반에서 화재사고가 발생한 사례로써, 압착손상 및 절연성능의 저하에 따른 누전 화재사고로 분석되었다.

3. 제안한 DC 전로 누전감지 회로토폴로지

그림 3은 제안한 DC 전로 누전사고 감지 회로토폴로지를 나타낸다. 회로구조는 영상변류기(ZCT)를 이용한 공진회로부, 공진주파수 발생을 위한 함수발생기(삼각파 발진기), 그리고 누전사고 시 위상변이를 검출하는 위상변이 검출부, 설정된 누설전류 크기와 비교하기 위한 누설전류 상태 비교부 등으로 구성된다. 또한 누전사고 감지 시 전원차단을 위한 트립제어 회로부가 추가된다. 여기서 트립제어 회로부는 트립코일을 구동하기 위한 트립코일 구동부와 연동되게 설계된다.

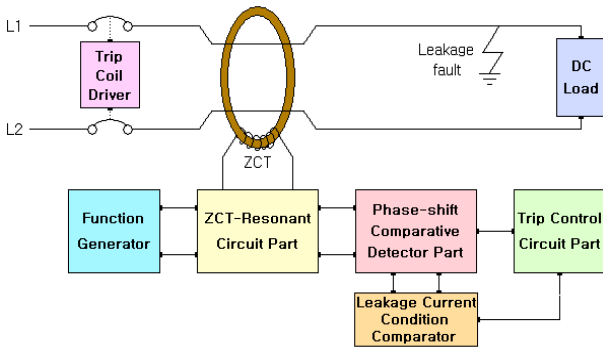


그림 3. 제안한 DC 누전감지 회로토폴로지
Fig. 3 Proposed DC earth leakage detection circuit topology

제안한 누설전류 상태 비교부는 설치장소의 전력환경이나 전력조건 등을 고려하여 누설전류의 크기(15 mA, 30 mA 등)를 설정할 수 있고, 또한 개폐 서어지나 외부 노이즈 등에 의한 순간적인 누설전류 발생에서 누전감지 회로의 작동을 방지하기 위한 시간지연 회로가 포함된다.

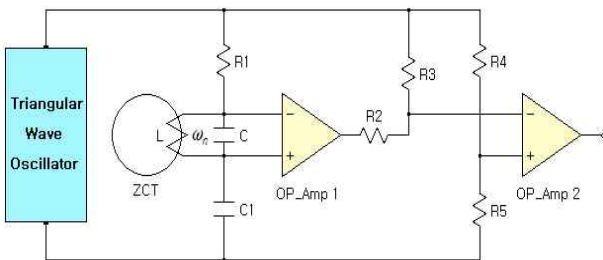


그림 4. 공진회로부와 위상변이 검출부
Fig. 4 Resonant circuit part and phase shift detection part

그림 4는 본 논문에서 제안한 DC 누전사고 감지회로의 주요 동작 회로부인 ZCT를 이용한 공진회로부와 위상변이 검출부의 부분 회로도도를 나타낸다. ZCT 코일의 인덕터 L과 커패시터 C를 이용하여 병렬공진 회로를 형성하고, 공진회로부에는 공진주파수와 동일한 주파수를 가지는 삼각파가 공급된다.

여기서 병렬공진 각주파수 ω_a 와 공진주파수 f_a 는 식 (1)과 같이 주어진다. R_f 은 ZCT 코일의 내부저항이다. 공진회로의 양호도(quality factor)를 높이기 위해서는 내부저항 R_f 이 적은 ZCT의 선정이 요구된다. 또한 저항 $R_2 \approx R_3, R_4 > R_5$ 로 설계된다.

$$\omega_a = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_f^2}{L^2}}, \quad f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_f^2}{L^2}} \quad (1)$$

그림 4의 OP_Amp 비교기의 출력을 살펴보면, 삼각파 공급전원의 부의 반주기에 대해서는 비교기 OP_Amp 1의 출력이 High이고 비교기 OP_Amp 2의 출력은 Low로 형성되어 회로의 동작에는 아무런 변화가 없는 휴지상태이지만, 정의 반주기에 대해서는 누전감지를 위한 대기상태를 유지한다. 즉 위상변이 검출부는 삼각파 공급전원의 정의 반주기에 대해서만 누전감지를 실행하는 조건을 가진다.

이러한 조건에서 위상변이 검출부의 동작원리는 누전이 없는 정상상태에서는 OP_Amp 1과 OP_Amp 2의 반전(-) 입력단자에는 동일 위상의 삼각파가 공급되고, 비교기 OP_Amp 2의 반전 입력단자의 전압 크기를 비반전 입력단자보다 높게 설정하여 OP_Amp 2의 출력은 Low로 나타난다.

그러나 누전사고가 발생한 경우, ZCT의 리액티브의 변화로 인해 OP_Amp 1의 반전(-) 입력단자에는 삼각파 공급전원보다 위상이 앞선 전압이 입력되어, OP_Amp 2의 출력에는 위상차 만큼의 구형파 출력전압을 발생시킨다. 이 구형파 출력은 후단의 트립 제어회로부로 인가되어 계통의 전원을 차단하거나 경보신호를 전송하는 역할을 수행한다.

만약 OP_Amp 2의 구형파 출력이 일시적인 누설전류로 인한 매우 짧은 위상차 동작에 의한 구형파 펄스전압일 경우, 펄스전압이 트립 제어부로 전송되는 것을 방지하기 위하여 시간지연 회로를 통하여 감지 동작의 지연을 보완한다.

4. 실험결과 및 검토

제안한 DC 전로 누설전류 감지회로의 동작특성을 분석하고 실용성을 검증하기 위하여 실험을 실행하였다.

실험장치 구성은 상용전원 AC 220 V를 다이오드 전파 정류회로와 평활용 커패시터 2,200 μ F를 통하여 약 310 V의 DC 전압원을 설계하고, 부하단에는 저항부하 1 kW, 100 Ω 을 연결하여 구성하였다. 또한 누전 발생은 반고정 가변저항(0~200 k Ω)을 직류 전압선과 접지선로에 연결하여 임의적인 접촉저항을 만들어 동작특성 실험을 수행하였다.

공진주파수 발생을 위한 삼각파 발진기는 진폭 10 V, 주파수 1 kHz로 설계하였고, ZCT, R1(동조 저항) 등 각종 회로소자들은 공진주파수 1 kHz에 준하여 회로정수값을 선정하였다.

그림 5는 누전이 없는 정상상태의 동작특성 파형으로써, 그림 4의 OP_Amp 1의 반전 입력단자 전압파형(CH 1)과 OP_Amp 2의 반전 입력단자 전압파형(CH 2)을 나타낸다.

그림 6은 정상상태인 그림 5의 동작특성에서의 OP_Amp 2의 입력파형(CH 1)에 대한 OP_Amp 2의 출력파형(CH 2)을 나타낸다. 정상상태에서는 두 비교기 OP_Amp 입력단자에 인가되는 삼각파 전압의 위상차가 거의 무시할 정도이므로 OP_Amp 2의 출력파형은 매우 짧은 폭의 펄스형 구형파가 출력되어, 시간지연(0.2 ms) 회로를 통하여 무시되었고 정상상태를 표시하였다.

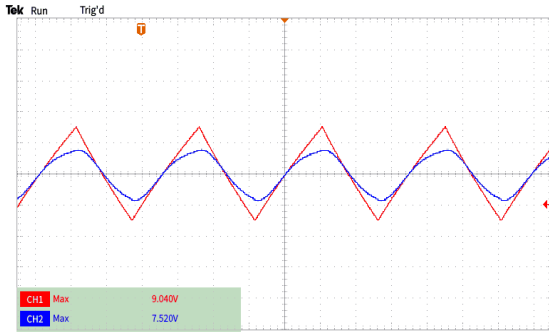


그림 5. OP_Amp 1(CH 1)과 OP_Amp 2(CH 2)의 입력 파형 [정상상태]
 Fig. 5 Input waveforms of OP_Amp 1(CH 1) and OP_Amp 2(CH 2) [normal state]

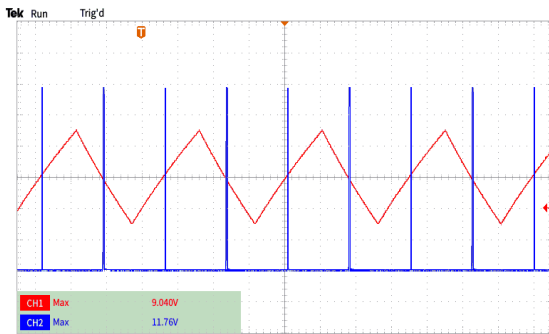


그림 6. OP_Amp 2의 입력전압(CH 1)과 출력전압(CH 2) [정상상태]
 Fig. 6 Input voltage(CH 1) and output voltage(CH 2) of OP_Amp 2 [normal state]

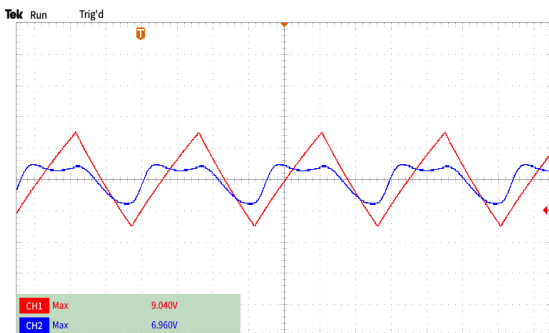


그림 7. OP_Amp 1(CH 1)과 OP_Amp 2(CH 2)의 입력 파형 [누전상태]
 Fig. 7 Input waveforms of OP_Amp 1(CH 1) and OP_Amp 2(CH 2) [leakage state]

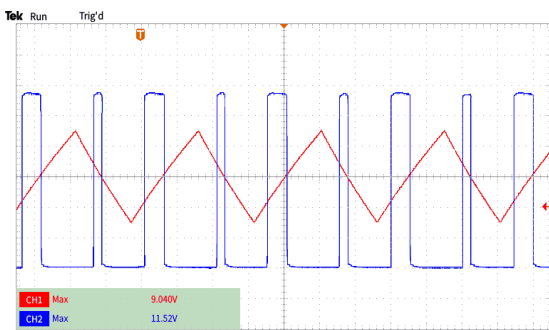


그림 8. OP_Amp 2의 입력전압(CH 1)과 출력전압(CH 2) [누전상태]
 Fig. 8 Input voltage(CH 1) and output voltage(CH 2) of OP_Amp 2 [leakage state]

그림 7은 누전사고가 발생한 경우의 제안한 누전감지 회로의 동작특성 파형으로써, OP_Amp 1의 반전 입력단자 전압파형(CH 1)과 OP_Amp 2의 반전 입력단자 전압파형(CH 2)을 나타낸다. OP_Amp 1의 입력에는 누설전류로 인해 ZCT의 리액턴스 변화로 다소 왜곡적인 전압파형을 보였고, 삼각과 공급 전원과는 진상 전압의 뚜렷한 위상차가 나타남을 알 수 있다.

그림 8은 누전상태인 그림 7의 동작특성에서의 OP_Amp 2의 입력파형(CH 1)에 대한 OP_Amp 2의 출력파형(CH 2)을 나타낸다. 누전사고 시, 두 비교기 OP_Amp 입력단자에는 전압의 위상차가 발생하였고, OP_Amp 2의 출력파형은 위상차가 발생할 때 마다 구형파를 출력하는 감지 동작을 보였다.

제안한 DC 누전감지 회로는 여러 차례의 다양한 누전 발생 실측분석을 통해 우수한 감지성능을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 DC 전로의 누전사고를 감지하는 회로토폴로지를 제안하였고 실측분석을 통하여 실용성과 신뢰성을 검증하였다. 제안한 DC 누전검출 회로토폴로지는 영상변류기(ZCT)와 결합된 공진회로부와 누전사고 시 위상변이를 검출하는 위상변이 검출부, 설정된 누설전류 크기와 비교하기 위한 누설전류 상태 비교부 등으로 구성되었다. 또한 제안한 DC 누전감지 회로는 여러 차례의 다양한 누전 발생 실측분석을 통해 우수한 감지성능을 보였으며, 회로구성이 간단하여 소형 및 경량, 저가로 제작될 수 있는 특징이 주어졌다.

본 논문은 행정안전부의 재난관리(방재안전분야) 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었음.

참고 문헌

- [1] Taeyoung Jin, Jongwoo Kim, Dowon Kim, "Analyzing Contribution of RE100 to the Net-Zero Focusing on Electricity Profile Analysis", Journal of Environmental Policy and Administration, Vol. 31, No. 3, pp. 1-28, 2023.
- [2] Jung-Soo Park, Yu-Rim Choi, "DC Earth Leakage Breaker for Protecting Human Body from Electric Shock in LVDC System for the End User's", KIEE, Vol. 72, No. 1, pp. 1512-1519, 2023.
- [3] Seung-Taek Lim, Ki-Yeon Lee, Dong-Ju Chae, Chan-Hyeok Oh, "Research on Specification of DC Ground Fault Interrupters to Reduce the Risk of Human Electric Shock and Ground Fault", KIEE, Vol. 73, No. 02, pp. 375-381, 2024.