

3상 전력계통의 결상 및 중성선 단선 사고 감지 회로에 관한 연구

최승민, 곽동걸, 정회중*, 김풍래**

강원대학교, *㈜삼우씨엠건축사사무소, **나누리시스템

A Study on Detection Circuit for Open-Phase Fault and Neutral Line Disconnection Fault in Three-Phase Power System

Seung-Min Choi, Dong-Kurl Kwak, Hoe-Joong Jeong*, Poong-Rai Kim**

Kangwon National University, *SAMOOCM Architects & Engineers co., **Nanuri System co.

ABSTRACT

삼상 전력계통에서 결상사고가 발생하거나 중성선이 단선될 경우 전압불평형에 의해 전력시스템에 심각한 손실을 유발하는 결과를 초래한다. 하지만 기존의 결상 및 중성선 단선 감지 방식은 과열 또는 과전류가 이미 발생한 후에 감지되기 때문에 감지 속도가 느리고 정밀도가 낮다는 한계가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 기존 검출방식의 신뢰성과 속응성을 해결하기 위해 결상 및 중성선 단선사고 발생 시 출력되는 불평형 전압을 감지하여 결상사고 및 중성선 단선사고를 감지하는 새로운 방식의 회로 토폴로지를 제안한다.

1. 서 론

최근 국내에서 지속적인 반도체산업의 성장과 더불어 석유 및 화학과 같은 에너지 다소비 업종의 수출 또한 지속적으로 성장하는 추세이다. 이와같은 에너지 다소비 산업의 지속적인 성장과 산업용 전력의 사용량이 급격히 증가함에 따라 3상 전동기 등을 사용하는 공장 및 대규모 전력설비에서 안정적인 전력의 공급은 필수적이다.

이러한 산업 및 상업 시설에서는 주로 3상 송배전 시스템을 통해 전기를 공급받으며, 송배전 시스템의 안정성은 전력망 운영에 있어 매우 중요한 요소로 작용한다. 하지만 이와 같은 3상 전력 시스템에서 발생하는 결상사고는 장비의 비정상적인 동작, 전력 손실, 나아가 장비 파손 및 화재 등과 같은 안전사고로 이어질 수 있다. 결상사고는 송전 과정에서 전력선 중 하나가 단선되거나 전기적 불연속성을 가질 때 발생하며, 특히 대규모 산업현장에서는 그 피해가 치명적일 수 있다. 산업현장의 3상 전력계통에서 결상사고가 발생할 경우 전동기와 변압기 같은 유도성 부하에 전압불평형을 초래하여 효율을 저하시키고, 전류 증가로 인해 열축적, 코일 열화, 절연파괴와 같은 문제가 발생한다.^{[1],[2]} 이는 산업현장에서 발생하는 전기안전사고의 주요한 원인이 되며 인명 및 재산에 심각한 피해를 초래한다. 또한 3상 4선식 전력계통에서 발생하는 중성선 단선 사고의 경우 중성선과 결합된 단상부하의 임피던스에 따라 선간전압과 같은 과전압이 인가된다. 이로인해 부하 기기의 열화, 코일 및 전선의 절연파괴 등과 같은 문제가 발생하며, 이는 기기의 손상과 더불어 안전사고 발생의 위험이 있다.

이와같은 결상사고 및 중성선 단선사고를 예방하기 위한 기술로는 각 선로에 변류기(CT: Current Transformer)를 설치하

여 전류 불평형을 감지하거나, 영상변류기(ZCT: Zero Current Transformer)를 사용하여 사고를 감지하는 방식이 채택되고 있다. 그러나 이러한 방식들은 외부 노이즈성 전류, 서어지 전류, 전동기 기동 시 발생하는 과도 돌입전류 및 대지 누설전류 등에 의해 오작동할 가능성이 있으며, 3상 전류 변화가 지연될 경우 감지기의 속응성에 문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 전류감지 기법이 아닌 각 상의 전압을 합성하여 결상 및 중성선 단선사고를 검출하는 전압검출 방식을 제안한다. 이는 3상 전원의 각 상에 저항소자를 성형결선시킨 구조로서 결상이나 중성선 단선사고가 발생하지 않은 정상상태에서는 성형결선된 저항들의 중성점 합성전압이 0V로 출력되며, 사고 발생 시 합성전압의 크기가 나타나므로 이를 검출하여 사고를 감지하는 방식이다.

2. 결상 및 중성선 단선사고 감지장치 설계

본 논문에서는 기존의 3상 전류를 검출하여 결상사고를 감지하는 기법이 아닌, 3상 전압을 검출하여 결상사고를 감지하는 회로를 제안한다. 그림 1은 제안한 결상 및 중성선 단선사고 감지장치의 회로 토폴로지를 나타낸다. 이는 3상 다이오드(D1~D6)로 구성된 전파 정류회로와 성형결선된 동일 저항 R1, R2, R3에 의해 3상의 전압을 합성하여 결상을 감지하는 회로로 구성된다. 이때 3상 다이오드(D1~D6)로 구성된 전파 정류회로는 SMPS부의 전원부로 인가되며, 중성선 단선사고 감지를 위한 트랜지스터 단자에 인가된다.

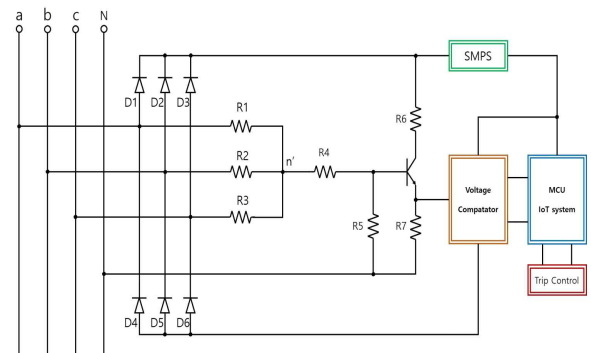


그림 1 제안한 결상 및 중성선 단선 감지회로 토폴로지

Fig. 1 Proposed detection circuit topology for Open-Phase and neutral line disconnection

제한한 결상 및 중성선 단선사고 검출장치의 동작원리를 살펴보면, 결상이 발생하지 않은 정상상태의 경우 트랜지스터의 베이스 단자에 직결된 합성저항(R1, R2, R3)의 중성점(n')은 평형상태를 유지하므로 트랜지스터는 턴-오프된다.

반면 결상의 발생 및 중성선 단선 등에 의해 3상 전력계통에 전압불평형이 발생한 경우 합성저항(R1, R2, R3)의 중성점(n')은 불평형 구간이 발생하게 되며, 합성전압으로 인해 트랜지스터가 턴-온 되고 전압 비교기(Voltage Comparator)에 사고 발생에 대한 전압출력을 발생한다. 그리고 MCU를 동작시켜 사고유무를 감지하게 된다.

이때 MCU는 외부 노이즈나 개폐 서어지 등으로 인해 발생하는 일시적인 사고에 대한 오작동을 방지하기 위해 타이머 회로와 트립 신호 발생기 등의 기능을 포함하여 설계된다. 이러한 설계를 통해 MCU는 일정 시간 동안 사고 상태가 지속되는지 확인한 후, 사고의 최종 발생 여부를 판단하는 기능을 수행하게 된다. 이로써 일시적인 전기사고나 노이즈에 의한 오작동을 줄이고, 실제 사고에 대한 신뢰성을 확보한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서는 결상 및 중성선 단선 사고감지 장치의 신뢰성과 실용성을 확보하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 위해 PSIM 프로그램을 사용하여 설계하였다.

그림 2는 결상이 발생하지 않은 정상상태에서 각 상에 발생하는 전압 파형과 성형 결선된 동일 저항 R1, R2, R3의 중성점에서 출력되는 전압 파형이 나타난다. 이는 교류 평형 3상 전원에서 각 상의 전압 파형 크기는 동일하며, 상호 120°의 위상차가 유지된다.

3상 전압이 평형을 이루므로 성형 결선된 합성저항의 중성점 전압(Vn')에서는 전위 차이가 발생하지 않는다. 따라서 성형 결선된 합성저항의 중성점의 출력전압은 영전압 상태를 나타낸다.

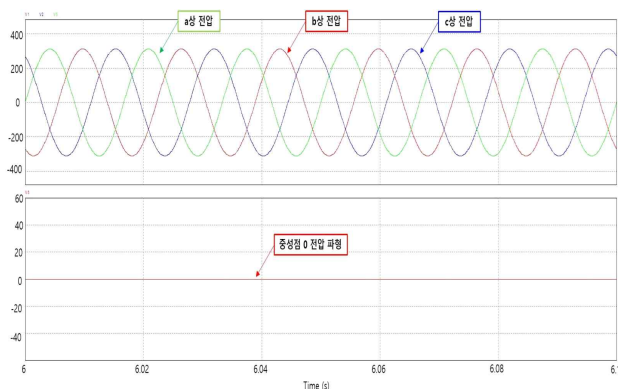


그림 2 정상상태의 중성점 전압출력 파형

Fig. 2 Neutral point voltage waveform in steady state

그림 3은 결상이 발생하지 않은 정상상태 시 전압비교기의 출력단자에서 출력되는 전압파형을 나타낸다. 이는 결상 및 중성선 단선사고의 발생 시 사고의 최종 발생 여부를 판단하여 트립동작을 수행하기 위한 MCU에 동작신호를 인가하는 역할을 수행하며, 정상상태의 경우 MCU에는 영전압이 인가되어 트립동작을 수행하지 않는다.

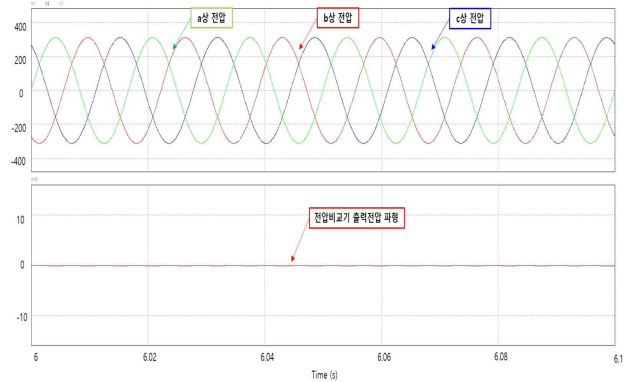


그림 3 정상상태에서 전압비교기 출력파형

Fig. 3 Output waveform of voltage comparator in steady state

그림 4는 1상 결상이 발생한 상황에서 3상 전원에서부터 출력되는 각 상의 전압 파형과, 성형결선된 동일 저항 R1, R2, R3의 중성점에서 나타나는 전압 파형을 보여준다. 3상 전력계통에서 1상 결상이 발생하면 전압불평형이 발생하게 되며, 이에 따라 성형 결선된 저항들의 중성점에서도 불평형 구간이 나타난다. 이로 인해 중성점에서는 불평형으로 인한 전압 파형이 생성되며, 정현파 형태의 전압 파형이 발생하는 특징을 보인다. 이는 결상사고가 발생한 상태에서 전압불평형이 중성점 전압을 변화시키는 결과를 나타낸다.

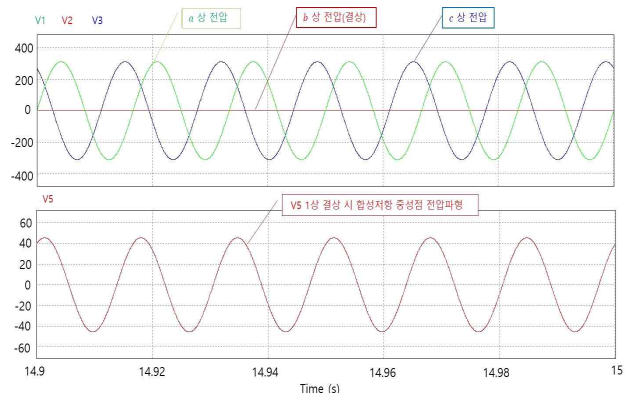


그림 4 결상상태의 중성점 전압출력파형

Fig. 4 Neutral point voltage waveform in open-phase fault

그림 5는 중성선 단선 시 발생하는 전압불평형을 나타내며, 중성선과 연결된 각 상의 단상 부하에 공급되는 전압 파형과 NPN 트랜지스터의 베이스 단자에 공급되는 전압 파형을 나타낸다. 중성선이 단선되면, 각 상과 중성선 사이에 연결된 단상 부하에는 선간전압이 공급되며, 이로 인해 각 부하에 공급되는 전압의 크기가 다르게 나타난다. 이러한 전압불평형으로 인해 각 상에 연결된 단상 부하에는 정격전압을 초과하는 과전압이 인가될 수 있으며, 이는 부하가 소손되는 사고의 원인이 될 수 있다.

즉, 3상 전원의 불평형으로 인해 성형 결선된 저항의 중성점에서 전압이 발생하며, 이 전압은 NPN 트랜지스터의 베이스 단자에 인가된다. 이는 결상사고 시와 동일한 동작 원리를 가지며, 그림5와 같이 중성선 단선에 의해 발생한 전압 불평형이 NPN 트랜지스터의 베이스 단자에 전압을 인가하게 된다. 이때 트랜지스터의 동작은 결상사고와 동일한 메커니즘을 통해 이루어진다.

어지며, 전압불평형이 발생한 상태에서 회로는 결상사고를 감지하고 이에 대응하는 방식으로 동작하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 전류 감지 방식의 결상사고 감지기의 오작동 문제를 개선하기 위해 전압 감지 방식을 채택한 결상 및 중성선 단선사고 감지회로를 제안하였다. 이는 전압합성 기법을 통해 결상사고를 감지하며, MCU를 사용하여 노이즈나 일시적인 결상에 대한 오작동을 방지하는 기능을 추가하였다. 또한, 제안된 회로는 시뮬레이션과 다양한 실험을 통해 그 신뢰성과 실용성이 입증되었다. 또한 제안한 결상 및 중성선 단선사고 검출 장치는 전압감지형으로 설계되어 설치와 유지보수가 용이하고 경제적 측면에서 효율성이 높으므로 산업현장에서 활발하게 활용될 것으로 기대된다.

본 논문은 2024년 국립대학육성사업 프로그램 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] D. K. Kwak. "A Study on Development of Open-Phase Protector Having Leakage Current Generation and Incapable Operation Prevention at Open-Phase Accident". The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 64, no. 1, pp. 182~187, 2015.
- [2] Ogawa Yoshihiko, "Protection System of 3-Phase Induction Motor", Japan Electric Engineer's Association Electric Technique Lecture, no. 8, pp. 1-6, 2010

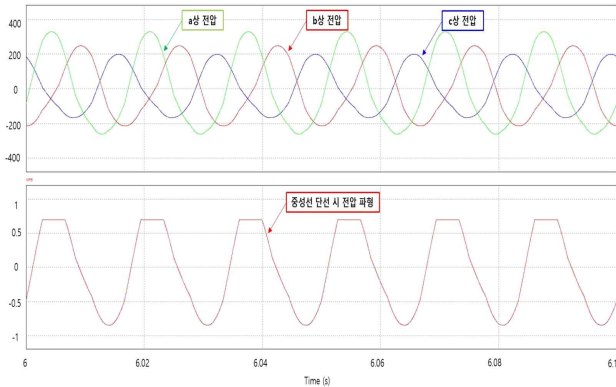


그림 5 중성선 단선상태의 중성점 출력파형

Fig. 5 Neutral point output waveform in neutral line disconnection fault

그림 6과 7은 각각 결상 및 중성선단선 사고 시 전압비교기에서 출력되는 전압의 파형을 나타낸다. 이는 결상 및 중성선 단선사고 발생 시 MCU를 동작시키기 위한 전압비교기의 출력 파형으로써, 전압불평형의 발생 시 출력된다.

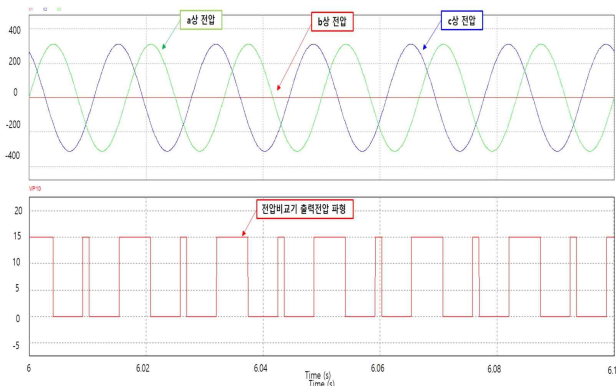


그림 6 결상상태의 전압비교기 출력파형

Fig. 6 Output waveform of voltage comparator in open-phase fault

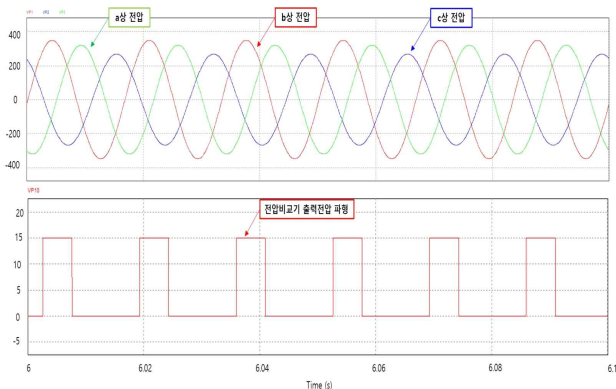


그림 7 중성선 단선상태의 전압비교기 출력파형

Fig. 7 Output waveform of voltage comparator in neutral line disconnection fault