

저압 분전반 3상 및 N상 결상감지회로에 관한 연구

정희중*, 곽동걸**, 이봉섭**, 전준호**, 신종근**

*(주)삼우씨엠건축사사무소, **강원대학교

A Study on Low Voltage Distribution Board 3-Phase and N-Phase Open-Fault Detection Circuit

Hoe-Joong Jeong*, Dong-Kurl Kwak**, Bong-Seob Lee**, Jun-Ho Jeon**, Jong-Keun Shin**

*SAMOOCM Architects & Engineers, **Kangwon National University

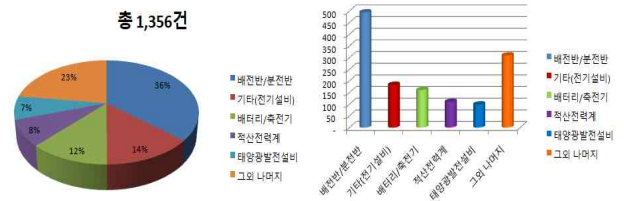
ABSTRACT

This study discusses a open phase detection circuit topology that can quickly and accurately identify and diagnose three-phase and N-phase open phase that may occur in low-voltage distribution panel. The proposed open phase detection circuit is expected to optimize the operation of various electrical industrial facilities, improve safety, and prevent potential accidents in industrial sites. The proposed technology detects three-phase and N-phase open phase using the concept of three-phase synthetic voltage. It is also configured to remotely send and share notifications to the manager's smartphone based on Internet of Things (IoT). The proposed IoT-based low-voltage distribution panel three-phase and N-phase open phase detection device improves the reliability and precision of the detection function by applying digital devices and microcomputers, and can be manufactured in a compact and lightweight form. Therefore, it is expected to be useful for preventing open phase in the power system of industrial sites as it minimizes the space occupied within the low-voltage distribution panel and has the advantage of economical manufacturing.

회로는 3상 합성전압과 계통에 연결된 단상 부하를 이용하여 N상 결상사고를 감지하는 알고리즘을 제안한다. 또한 결상사고 발생 시 마이컴을 통한 IoT 플랫폼을 설계하여 원격으로 관계자의 모바일폰으로 경보 메시지를 전송하는 원격 알람시스템을 제안한다. 제안한 결상감지장치는 소형·경량으로 제작이 가능하여 설치의 용이성과 제작에 따른 경제적 이점이 주어진다.

2. 전기화재 사고사례 분석

국가화재정보시스템의 자료 분석을 통한 2012년~2021년(10년)에 발생한 화재 통계자료를 유형별로 분석해 보면, 건축 및 구조물에서 발생한 화재가 총 40,113건 중 25,426건으로 63% 이상으로 분석되었다. 또한 2019년~2023년 통계자료 데이터 분석에서 전체 화재건수 1,356건 중 그림 1과 같이 배전반/분전반 화재가 494건(36%) 차지하는 것으로 분석되었다.^[5]



(a) 전기적 유형 분석그래프 (b) 전기적 유형별 화재건수

그림 1. 전기적 발화요인 분석 그래프

Fig. 1 Analysis graph of electrical ignition factors

1. 서 론

저압 분전반의 3상 및 N상 결상은 전력계통의 불평형 전압, 전류로 인하여 과전압, 과전류에 따른 화재 및 기기손상 등의 문제를 일으킨다. 특히 전동기 부하의 경우 결상으로 인한 전압 불평형은 전동기의 효율을 감소시키고 전류의 증가에 따른 열축적, 코일의 열화, 절연 파괴 등의 원인이 되고, 이에 따른 기기의 손상, 화재, 정전 등 산업현장의 설비 규모에 비례한 막대한 재산피해를 발생시킨다.^[1-3] 더욱이 자동화로 구동되는 산업현장의 정전 및 화재는 생산량 중지, 공정 과정의 리부트 등 복구를 위한 경제적, 시간적 손실, 실업률 증대 등의 문제점을 동반한다. 또한 최근 N상의 결상으로 인한 피해사례가 증대되어 N상 결상에 대한 연구의 필요성이 증대되는 실정이다.^[4]

이러한 결상사고에 대한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 3상 전압을 검출하여 결상사고를 감지하는 새로운 기법의 결상감지 회로 토폴로지를 제안한다. 특히 제안한 결상감지

이러한 배전반 및 분전반 화재사고는 대부분 결상사고로 인한 것으로 그림 2에 저압 분전반 결상사고의 사례도를 보인다.

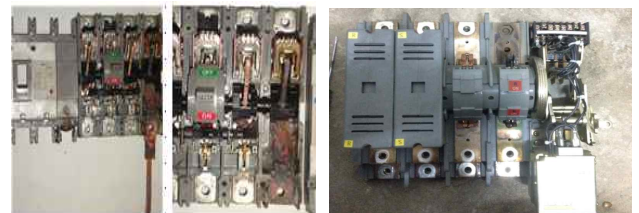
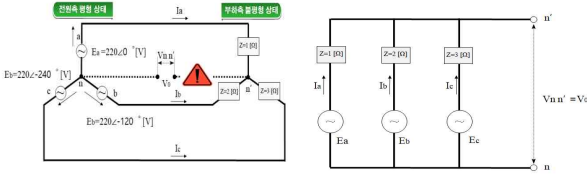


그림 2. 저압 분전반 결상사고 사례도

Fig. 2 Examples of open-phase faults in low voltage distribution boards

3. 저압 분전반 N상 결상사고 해석 알고리즘

그림 3은 3상 4선 배전선로 계통에서 전원측은 각 상별 정상적인 평형상태를 유지하고 부하측은 불평형 부하인 경우를 가정하여, N상 결상사고 시의 회로 구성도를 나타낸다.



(a) N상 결상사고 시 회로망 (b) 등가회로

그림 3. N상 결상 시 회로 구성도

Fig. 3 Circuit diagram for N-phase open-fault

중성점 간의($n - n'$) 단자전압 $V_{nn'} (=V_0)$ 는 그림 3(b)의 등가회로와 밀만의 정리(Millman's Theorem)를 적용하면 식 (1)과 같이 주어진다.

$$V_0 = \frac{E_a Y_a + E_b Y_b + E_c Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} = \frac{E_a (Z_a^{-1}) + E_b (Z_b^{-1}) + E_c (Z_c^{-1})}{Z_a^{-1} + Z_b^{-1} + Z_c^{-1}} \quad [V] \quad (1)$$

그림 3과 같이 $Z_a = 1[\Omega]$, $Z_b = 2[\Omega]$, $Z_c = 3[\Omega]$ 의 부하조건인 경우, 부하측의 각 상전압 E'_a, E'_b, E'_c 를 구하면 다음과 같이 계산되고, 그림 4는 이에 대한 벡터도를 나타낸다.

$$E'_a = E_a - V_0 = (220 \angle 0^\circ) - (72.12 \angle -13.9^\circ)$$

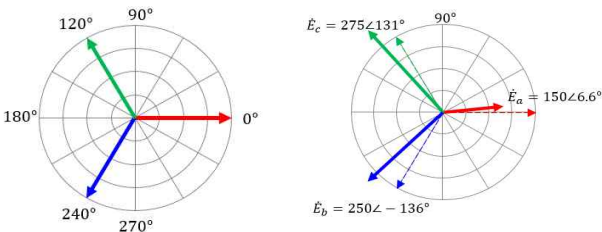
$$= 151 \angle 6.6^\circ [V]$$

$$E'_b = E_b - V_0 = (220 \angle -120^\circ) - (72.12 \angle -13.9^\circ)$$

$$= 249.8 \angle -136.1^\circ [V]$$

$$E'_c = E_c - V_0 = (220 \angle 120^\circ) - (72.12 \angle -13.9^\circ)$$

$$= 275 \angle 131^\circ [V]$$



(a) 3상 정상상태

(b) N상 결상사고

그림 4. N상 결상사고 시 벡터도

Fig. 4 Vector diagram of N-phase open-fault

그림 4와 같이 N상 결상 시 부하측의 각 상에는 불평형 전

압이 공급되어 정상상태의 상전압보다 크거나 적게 나타난다.

그러므로 N상 결상 시 부하에는 과전압 또는 부족전압이 공급되어 부하 기기의 과열 및 오동작에 의한 기기 소손이나 화재 사고의 원인이 된다.

4. 제안한 결상사고 감지회로 구성 및 동작원리

기존의 결상사고 감지장치는 열동 과전류계전기나 전상식 모터보호계전기 등이 주로 사용된다. 이들의 결상 검출원리는 3상 선로의 과전류를 검출하거나 각 상전류를 검출하는 방식을 가지므로, 전동기 기동 시 돌입 과도전류, 외부 개폐 서어지 전류 등에 대해 오동작을 발생할 수 있다. 또한 3상 전류검출을 위한 변류기(CT)의 사용으로 인한, 설치 또는 교체 시 전원의 차단, 선로의 단선을 통한 계전기 결선 등 설치의 난이점이 주어지고 더욱이 전기기술자의 시공을 요구한다.

이러한 문제들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 기존의 3상 전류를 검출하여 결상사고를 감지하는 기법이 아닌, 3상 전압을 검출하여 결상사고를 감지하는 기법과 회로 토폴로지를 제안한다. 제안한 전압검출형 결상감지 회로는 그림 5와 같이 3상 다이오드 전파 정류회로와 성형결선된 동일 저항 R1, R2, R3에 의해 3상의 전압을 합성하여 결상을 감지하는 회로로 구성된다. 정상상태에서는 3상 성형결선된 합성전압 V_n 이 평형 3상 전압으로 인해 영전압을 가지지만, 1상 결상 또는 2상 결상 시에는 불평형 3상 전압이 공급되어 중성점 n' 에는 불평형 합성전압값이 나타난다. 그리고 결상 시의 합성전압 V_n 은 비교기와 마이컴을 통하여 결상사고를 감지하는 동작원리를 가진다.

또한 마이컴은 외부 노이즈, 개폐 서어지 등에 의한 일시적인 결상에 대한 결상감지 오동작을 방지하기 위한 타이머 회로와 트립신호 발생기 등으로 설계되어, 최종 결상사고 유무를 판단하는 기능이 부여된다.

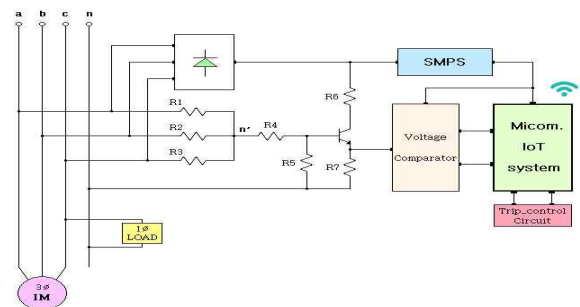


그림 5. 제안한 결상사고 감지회로 블록도

Fig. 5 Block diagram of Proposed open-phase fault detector

그리고 제안한 결상사고 감지회로는 N상 결상 시에도 임의의 단상 부하와 성형결선된 3상 저항(R1, R2 또는 R3)과 루프회로가 형성되어, 즉 불평형 3상 부하의 형태로서 합성전압 V_n 이 나타난다. 그 결과 제안한 감지회로는 N상 결상사고를 감지하는 알고리즘을 가진다.

5. 실험결과 및 검토

제안한 3상 결상 및 N상 결상과 IoT 기반 알람시스템의 동작특성을 분석하고 실용성을 검증하기 위하여 실험을 실시하였다. 그림 6는 제안한 감지장치의 실험장치와 IoT 기반의 스마트폰 원격 알람시스템의 동작유무를 검증하는 사진을 보인다.

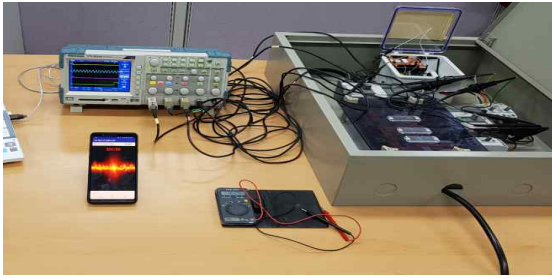


그림 6. 원격 알람시스템의 동작특성 검증을 위한 실험장치
Fig. 6 Experimental set for validating operation characteristic of remote alarm system

그림 7은 a, b, c 각 상의 전압이 120°의 위상차를 가진 평형 3상 전원이 공급되는 상태에서 인위적으로 1상 결상사고를 발생한 경우의 출력측 마이컴의 트립신호 발생 출력파형을 나타낸다. 결상사고가 발생한 후 결상감지 장치가 결상을 감지하여 동작하기 까지 약 214 ms의 응답특성을 보였다.

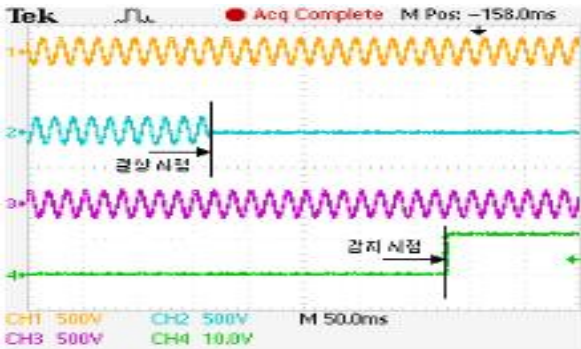


그림 7. 1상 결상 시 동작특성 파형
Fig. 7 Characteristic waveforms of 1-phase open fault

그림 8은 N상이 결상된 상태에서의 출력전압 파형을 나타내며, 결상감지 응답시간은 약 218 ms로 양호한 응답특성을 보였다. 그림 9는 2개의 상이 단선된 2상 결상사고가 발생한 경우로써, 결상사고가 발생한 후 결상감지기의 동작까지 약 225 ms의 응답특성을 보였다.

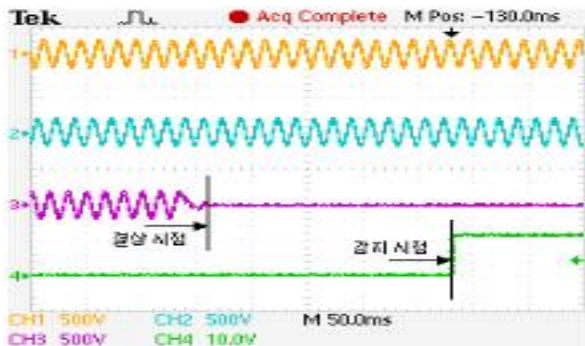


그림 8. N상 결상 시 동작특성 파형
Fig. 8 Characteristic waveforms of N-phase open fault

여러 차례의 다양한 결상사고에 대해 동작특성을 분석한 결과, 제안한 감지회로는 1건의 오동작도 없이 결상사고를 감지

하는 양호한 동작 속응성과 신뢰성을 가졌다.

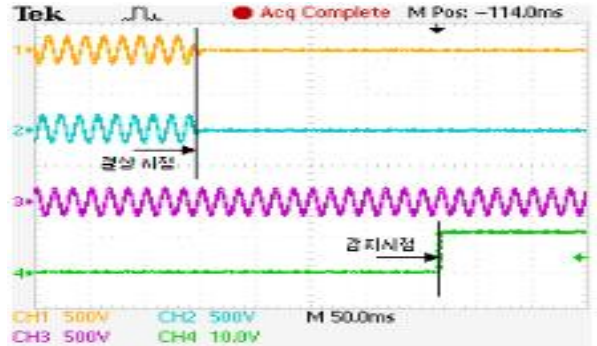


그림 9. 2상 결상 시 동작특성 파형
Fig. 9 Characteristic waveforms of 2-phase open fault

6. 결론

본 연구에서는 저압 분전반의 3상 및 N상 결상감지회로를 전압감지 방식을 이용하여 구성하였다. 제안한 감지회로는 3상 성형결선된 저항들에 의해 3상 합성전압을 이용하여 결상사고를 감지하는 회로 토폴로지로 구성되었다. 특히 제안한 감지회로는 3상 합성전압과 계통에 연결된 단상 부하를 이용하여 N상 결상사고를 감지하는 알고리즘이 적용되었다.

또한 결상사고 발생 시 마이컴을 통한 IoT 플랫폼을 설계하여 원격으로 관계자의 모바일폰으로 경보 메시지를 전송하는 원격 알람시스템이 구축되어 2차적 사고예방이 가능하도록 안전선을 증진시켰다. 또한 제작된 결상감지장치는 소형·경량으로 제작이 가능하여 설치의 용이성과 제작에 따른 경제적 이점이 주어졌다.

참고 문헌

- [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] S.H.Kim, "Why do the low voltage motor must do open-phase protection?", Instrumentation Technology, no. 11, 2002.
- [3] Ogawa Yoshihiko, "Protection System of 3-Phase Induction Motor", Japan Electric Engineer's Association-Electric Technique Lecture, no. 8, pp.1-6, 2010.
- [4] K.O.Choi, and S.H.Hong, "The study on fire risks by floating neutral line", Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Fall Conference, pp. 93-94, 2016.
- [5] KESCO, "Statistical Analysis on the Electrical Accident 2019~2023".