

# 결상 시 누전전류 발생과 오동작 방지 기능을 갖는 결상보호기 개발에 관한 연구

## A Study on Development of Open-Phase Protector Having Leakage Current Generation and Incapable Operation Prevention at Open-Phase Accident

곽 동 걸\*  
(Dong-Kurl Kwak)

**Abstract** - In the three-phase power system, when any one-phase or two-phases is open-phase, the unbalanced current flows and the single-phase power supplies to three-phase loads. Specially, motor coil and transformer coil receive over-current. As a result, great damage as well as electrical fire can occur to the power system. In order to improve these problems, this paper proposes that an open-phase detection device is designed by a new algorithm using electric potential difference between the resultant voltage of neutral point and ground, and a control circuit topology of open-phase protector is composed of highly efficient semiconductor devices. It improves response speed and reliability. The control algorithm circuit also operates the cut-off of a conventional residual current protective device (RCD) which flows an enforced leakage current to ground wire at open-phase accident. Furthermore, time delay circuit is added to prevent the incapable operation of open-phase protector about instantaneous open-phase not open-phase fault. The time delay circuit improves more reliability.

**Key Words** : Open-phase faults, Three-phase power system, Open-phase protector (OPP), RCD, Electrical fire

### 1. 서 론

3상 전력을 사용하는 산업현장이나 대형 건물에 있어, 1상 결상 또는 2상 결상사고로 인해 발생하는 피해규모는 매년 증대되는 추세이다. 이는 결상으로 인한 전압불평형, 과부하, 절연노화 등이 주요 요인으로 분석된다[1, 2]. 3상 전력계통에서 상간 단락이나 결상사고가 발생하면 계통에는 불평형 전류가 흐르거나 단상전력이 공급되어 3상 부하 특히, 전동기 코일 또는 변압기 코일에 과전류가 발생하여 화재발생은 물론 전력계통에 큰 피해를 주게 된다. 일본전기협회에서 발표한 통계에 의하면 산업현장의 전동기 고장원인은 결상, 과부하, 축의 마모, 절연노화 등으로 분석하고 있으며, 축의 마모나 절연물의 노화 등 기계적인 원인은 어느 정도 수명을 예측하여 사전에 열화에 의한 고장이나 정전 예방이 가능하나, 결상에 의한 과부하의 경우는 불시에 발생하므로 예측이 불가능하여 전기화재의 주요 요인으로 분류하고 있다. 또한 이에 대한 별도의 보호 방안을 마련하는 것이 매우 중요하다[3-5].

현재 결상사고의 예방은 일반적으로 분전반 내의 배선용차단기(MCCB), 과부하결용 누전차단기(RCD) 또는 열동 과전류계전기(THR), 전자식 모터 보호계전기(EMPR) 등에 의존하고 있으며, 여기서 배선용차단기와 누전차단기는 결상사고에 대한 직접적인

검출 기능이 없이 결상사고 시에 과전류만을 감지하고 검출하여 차단기를 동작시키는 역할을 가진다[6]. 그리고 열동 과전류계전기 및 전자식 모터 보호계전기는 과열이나 과전류가 발생되어야지만 검출이 가능하고 또한 전압불평형률이 70%이상에서 3초 이내에 트립하도록 설계되어 그 응답속도가 느리고 현장에서의 잦은 오동작과 정밀도가 저하되는 문제점을 가진다. 그 결과 3상 전력계통에서의 결상사고에 따른 전기화재는 증대되고 있으며, 이에 따른 인명피해와 재산피해는 증대되는 실정이다[7, 8].

이러한 해결 방안으로, 최근 3상 중성점 전압을 이용한 결상보호기(OPP)가 제안되고 있다[9]. 이는 그림 1과 같이 3상 전원 R, S, T 각 라인에 동일 용량의 커패시터를 성형 결선하여 3상 합성전위의 중성점과 접지(G)간의 전위차를 이용하고, 신뢰성과 속응성이 우수한 고속의 반도체 스위칭 소자들을 이용한 결상보호용 회로 토폴로지라 할 수 있다.

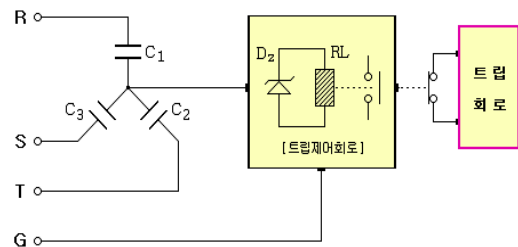


그림 1 중성점 전압을 이용한 결상보호기의 회로 토폴로지  
Fig. 1 Circuit topology of OPP using neutral voltage

\* Corresponding Author : Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, Korea

E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr

Received : November 12, 2014; Accepted : December 10, 2014

상기 제안된 결상보호기는 회로 토폴로지가 간단하고 응답 속  
응성이 우수하며, 소형·경량으로 제작되는 특징이 있어 산업현  
장, 신축건물 등에서 설치 및 취급이 용이하다.

그러나 제안된 결상보호기는 전동기 제어반에 설치되어, 결상  
사고 시에 결상보호기가 동작하고 제어반에 설치된 전자접촉기를  
트립(trip) 차단시키는 제어 알고리즘으로 설계되었다[9]. 이는  
결상보호기 자체에 차단장치가 없으므로 전동기 제어반의 차단장  
치를 이용한 것으로써, 3상 전동기 부하가 아닌 3상 전력계통이  
나 분전반 등에서는 설치가 불가능한 문제점을 가졌다. 특히, 결  
상사고가 아닌 순간적인 결상 또는 일시적인 전압불평형에 대해  
서도 결상보호기가 매우 예민하게 동작하여, 현장에서는 상당한  
피해가 발생되어 현장기술자들이 결상보호기를 제거시키는 등 문  
제점이 발생되고 있다. 이는 회로의 간소화를 목적으로 설계하다  
보니 실제 현장의 조건이나 전력환경 등을 고려하지 않고 설계한  
결과라 할 수 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 실용성이  
우수하고 현장 적응력이 강인한 개선된 결상보호기를 제안하고자  
한다. 제안한 개선된 결상보호기는 삼상 성형 결선한 수동소자의  
중성점 합성전위와 접지 간의 전위차를 이용한 알고리즘으로 결  
상 검출회로를 설계한다는 점에서는 기 제안된 결상보호기와 동  
일한 점이 있으나, 결상사고 시에 강제적인 누전전류를 접지선으  
로 흘러 기존의 누전차단기를 동작시키는 제어 알고리즘 회로를  
부여하여, 산업현장이나 건축물의 3상 전력시스템 또는 분전반  
등 다양하게 사용이 용이한 특징이 주어진다. 또한 제안한 개선  
된 결상보호기는 결상사고가 아닌 순간적인 결상 또는 일시적인  
전압불평형에 대해서 결상보호기의 동작을 방지하기 위한, 오동  
작 방지용 시간지연 회로를 첨부하여 상기의 결상보호기 문제점  
을 해결하고 보호기의 실용성과 신뢰성을 향상시키고자 한다.

## 2. 기존 계전기의 성능분석

전동기 부하 등 3상 전력기기를 사용하는 전력계통에서 1상  
또는 2상이 단선되어 전력이 공급되는 상태를 1상 결상 또는 2  
상 결상이라 말하며, 산업현장에서 3상 부하로 주로 사용되는 3  
상 전동기는 1상 결상사고가 대다수이다. 이러한 3상 전동기의 1  
상 결상은 전동기의 기동과 정지를 담당하는 전자접촉기  
(electromagnetic contactor)의 노후와 잦은 사용으로 인한 접점  
의 접촉불량에서 주로 발생하는 것으로 보고된다. 3상 전동기의  
1상이 결상될 경우 전동기에는 정격전류의 약 1.5배의 전류가 흐  
르게 되고 이에 따른 전동기 내부권선의 열화가 화재의 원인으로  
주목되고 있다. 또한 결상된 상태에서 전동기의 기동 투입 시에  
는 정격전류의 6~8배의 기동전류가 흐르게 되어 모터의 소손은  
물론 심각한 재해를 야기하게 된다[4, 9].

이러한 3상 전동기의 결상사고에 대한 보호 대책은 의무 사항  
이 아니어서 실제 현장에서는 거의 무방비한 상태이며, 현장 관  
리자의 인식과 필요에 따라 부가적으로 설치하는 경우가 대부분  
이다. 현재 전동기를 보호하는 목적으로 열동 과전류계전기 또는  
전자식 모터 보호계전기를 사용하고 있으나, 이러한 보호장치는  
과전류나 과열이 발생되어야지만 검출이 가능하고 또한 전압불평

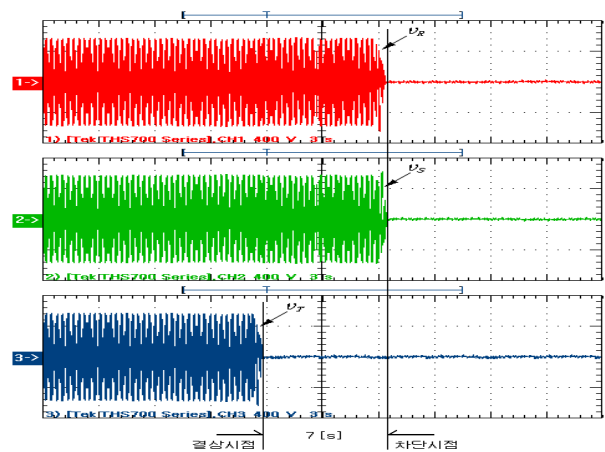
형률이 70%이상에서 3초 이내에 트립하도록 설계되어 있어, 그  
응답속도가 느리고 현장의 환경적 요인에 의한 잦은 오동작과 정  
밀도가 저하되는 문제점을 가진다.

3상 전동기의 보호장치로 대다수 사용되는 열동 과전류계전기  
를 살펴보면, 전동기의 과부하로 인한 과전류가 발생하였을 경우

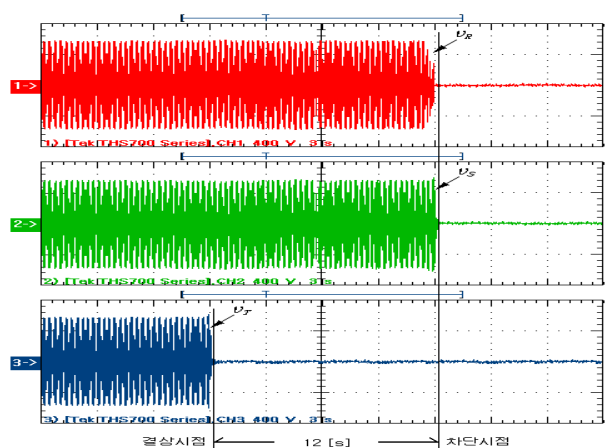
표 1 THR의 주요 사양

Table 1 Principal specification of THR

정격전압 [V]	220 / 380	계전방식	3극 2 / 3 소자형
전류범위 [A]	2.5 ~ 4	동작특성	표준반환시 (Class 10A)
차단시간 [sec]	2 ~ 10 (설정전류 7.2배)	Trip 방식	바이메탈 타입
보호기능	과부하·결상검용	취득규격	KSC 4504 IEC 60947



(a) THR of A-company



(b) THR of B-company

그림 2 1상 결상에 대한 THR의 동작특성 파형

Fig. 2 Operation performance waveforms of THR for 1-phase open-phase fault

내부 릴레이의 열선 가열로 인한 바이메탈(bimetal)의 만곡작용을 이용하여 접점을 개폐하는 원리를 가진다. 표 1은 1.5kW급 3상 전동기의 과부하 및 결상에 사용되는 열동 과전류계전기의 주요 사양을 나타낸다[6].

그림 2는 인위적인 1상 결상에 대한 열동 과전류계전기의 동작성능을 분석하기위한 동작파형을 나타낸다. 열동 과전류계전기는 계전기 제조 전문기업에서 생산된 두 제품(A사, B사)을 사용하였고, 측정범위는 정격전압 380V, 1.5kW (2HP)급 3상 권선형 유도전동기/발전기(M/G세트)를 사용하였으며 정상적인 운전상태에서 인위적으로 1상 결상을 유도하여 측정하였다. 여러 차례의 측정 분석을 통하여 1상 결상에 대해 열동 과전류계전기들은 평균 7~12초에서 트립동작이 이루어졌다. 특히 무부하 또는 경부하시에는 오동작과 동작불능의 문제점을 보였다[9].

이러한 열동 과전류계전기는 과부하나 과전류에 대해 전동기를 보호하는 것이 주목적이며, 결상에 따른 보호능력은 저조한 것으로 분석된다.

### 3. 제안한 개선된 결상보호기의 회로구성 및 동작원리

제안한 개선된 결상보호기를 그림 3에 나타낸다. 제안한 결상보호기는 결상 시 누전전류 발생과 오동작 방지 기능을 첨부한 개선된 결상보호기라 할 수 있다.

제안한 결상보호기는 3상 전원 R, S, T 각 라인에 동일 용량의 커패시터를 성형 결선하여 3상 합성전위와 접지(G)간의 전위차를 이용하여 결상을 검출하고[9], 고속의 반도체 소자들을 이용하여 제어회로를 구성하였다. 또한 3상 다이오드 성형회로를 이용하여 결상 사고 시에 접지선으로 강제적인 누전전류를 발생하기 위한 누전전류 발생회로를 결부하였다. 이는 각종 3상 전력 시스템이나 분전반 등에 기 설치된 누전차단기(RCD)를 결상 사고 시에 차단기로 활용할 수 있다는 특징이 주어진다. 그림 4는 제안한 결상보호기와 분전반과의 결선 예시도를 나타낸다.

그리고 결상사고가 아닌 순간적인 결상 또는 일시적인 전압불평형에 대해서 결상보호기의 예민한 오동작을 방지하기 위하여, 제어회로의 반도체 스위칭소자 SCR의 게이트(gate) 단자에 RC 적분회로와 제너다이오드를 이용하여 오동작 방지용 시간지연 회로를 설계하여 해결하였다.

제안한 결상보호기의 동작원리를 살펴보면, 정상상태에서는 성형 결선된 3상 커패시터의 중성점 전압과 3상 다이오드 성형회로의 중성점 전압이 0 V이므로 이상전압 검출없이 안정상태가 유지된다. 그러나 결상이나 3상 전압불평형이 발생하면 성형 결선된 3상 커패시터( $C_1 \sim C_3$ )의 중성점 전압이 나타나게 되고 다이오드 전과정류기( $D_a \sim D_d$ )에 의한 전하 커패시터  $C_4$ 에는 직류전압이 발생된다. 이 직류전압의 크기가 제너다이오드  $D_{z1}$ 과 적분기 내의 제너다이오드  $D_z$ 의 제너전압의 합보다 크게 되면 제너다이오드들은 도통되고 스위칭 소자 SCR의 게이트를 트리거(trigger)시킨다. 그리고 SCR의 턴-온에 의한 릴레이 RL이 여자(excitation)되고 릴레이 접점의 동작에 의한 트립회로를 동작시키는 일련의 동작원리를 가진다. 그리고 결상사고 시에 보호회로의 동작을 표시하기위한 LED가 점등된다.

또한 결상사고에 따른 3상 다이오드( $D_1 \sim D_3$ ) 성형회로의 중성

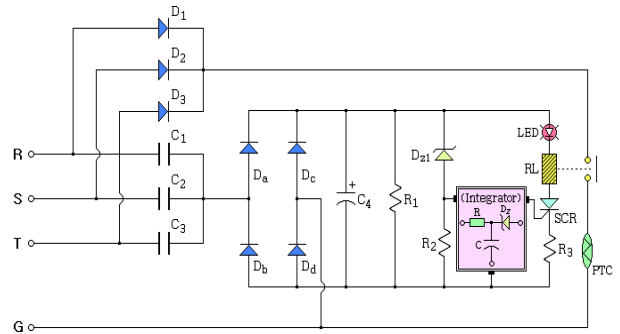


그림 3 개선된 결상보호기의 회로 토폴로지

Fig. 3 Circuit topology of improved OPP

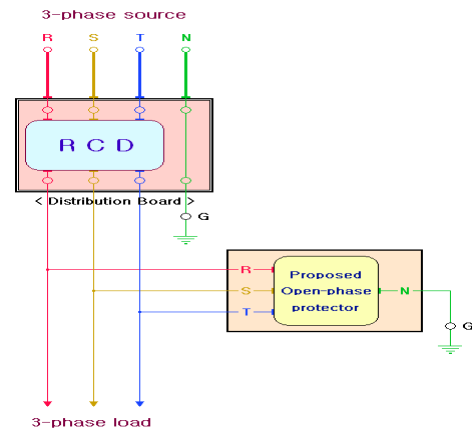


그림 4 제안한 결상보호기의 결선도 일례

Fig. 4 An example of wiring diagram of proposed OPP

점 전압은 트립회로 동작 시 즉, 릴레이 접점의 동작에 의해 접지선으로 강제적인 누전전류를 발생시키는 전원으로 이용되며, 누전전류의 발생으로 인해 기존에 설치된 RCD를 차단하여 계통을 보호하는 원리를 가진다[그림 4 참조].

여기서 PTC 서미스터는 누전전류의 증대로 인한 소자의 소손 및 접지선로의 과열 방지를 위하여 접속된다.

또한 결상보호기에 사용된 제너다이오드  $D_{z1}$ 은 일시적 전압변동이나 미세한 3상 불평형 전압에 대해서 결상보호기가 동작하는 것을 방지하기위하여 일정 제너전압 이상에서만 동작하도록 설정하는 기능을 가진다. 여기서 제너다이오드의 제너전압 선정은 결상 또는 3상 불평형 전압을 고려하여, 다음의 중성점 전압  $V_n$ 의 결과식(식 (2))을 이용하여, 현장의 전력계통 조건과 주위 환경을 고려하여 산정하면 된다.

여기서  $V_a, V_b, V_c$ 는 R, S, T상에 대한 각 상전압의 크기를 나타낸다[9].

정격전압 380 V, 3상 4선식 전력계통에서 전압불평형률은 30% 이하로 규정하고 있으므로, 제안한 보호회로의 전압검출용 제너다이오드  $D_{z1}$ 의 제너전압은 약 60~150 V 사이에서 현장의 여건과 사용 환경을 고려하여 선정하면 된다.

$$\dot{V}_n = \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 - V_1V_2 - V_2V_3 - V_3V_1} \quad (1)$$

$$\angle \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(V_2 - V_3)}{V_1 - V_2 - V_3}$$

$$|\dot{V}_n| = |\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c| \quad (2)$$

$$= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 - V_1V_2 - V_2V_3 - V_3V_1}$$

그리고 결상사고가 아닌 순간적인 결상이나 일시적인 전압불평형에 대해서 결상보호기의 예민한 트립동작을 방지하기 위하여, 릴레이(RL)의 동작용 스위칭소자 SCR의 게이트 단에 RC 적분기를 사용하여 RC시정수를 이용한 시간지연 회로를 설계하였고 제너다이오드  $D_z$ 를 이용하여 SCR의 예민한 트리거 동작을 예방하였다. RC시정수는 통상 결상사고 시 2~3 사이클에서 결상보호기의 동작을 고려하여 30 ms ~50 ms로 설계하면 적절하다. 또한 제너다이오드  $D_z$ 의 제너 설정전압은 RC시정수와 적분용 커패시터 C의 충전전압을 고려하여 5~10 V로 선정하였다.

그림 5는 제작한 결상보호기의 외형도를 나타낸다. 회로구성이 간단하여 소형·경량으로 제작되고 설치가 용이한 장점이 있다. 또한 제안한 결상보호기는 기술적 제어원리가 간단하고, 고속형 반도체 소자들을 이용한 구조로 설계되어 감지속도가 우수하고 정밀도가 높아 그 신뢰성이 증대되는 이점이 주어진다. 표 2는 제안한 결상보호기의 설계에 사용된 소자부품의 회로 정수값을 나타낸다.



그림 5 제작한 결상보호기 외형도  
Fig. 5 Photographs of manufactured OPP

표 2 제안한 결상보호기의 회로정수  
Table 2 Circuit parameters of proposed OPP

커패시터 $C_1 \sim C_3$	22nF / AC450V	제너다이오드 $D_{z1}$	$V_z=50V,$ 10W
다이오드 ( $D_1 \sim D_3$ )	$V_{rr}=600V,$ 50W	전력용 릴레이 RL	50V, 2A (1a, 1b)
커패시터 $C_4$	50 $\mu$ F/100V, Electrolyte	SCR	60V, 1A
방전용 저항 $R_1$	1M $\Omega,$ 0.5W	제너다이오드 $D_z$	$V_z=10V,$ 10W
저항 $R_2, R_3$	10k $\Omega, 1k\Omega /$ 0.5W	적분기 RC_시정수	30ms

#### 4. 제안한 결상보호기의 동작특성 분석

제안한 결상보호기의 동작성능을 분석하기 위하여 그림 6에 특성분석을 위한 실험장치를 나타낸다[9]. 그림 7은 무부하 상태에서 인위적인 1상 결상사고 실험분석을 통해 측정된 동작파형이고, 그림 8은 정격전압 380 V, 1.5 kW급 3상 권선형 유도전동기/발전기 세트를 운전시킨 상태에서 인위적인 1상 결상을 유도하여 측정된 동작파형을 나타낸다.

그림 7과 8에서 R, S, T 각상의 전압은 120° 위상차를 가지는 평형전원이 공급되는 상태에서 1상(T상) 결상이 발생되고, 제안한 결상보호기가 동작하여 기존의 RCD에 의한 3상 전원을 차단시키는 동작을 보인다. 그림 7은 무부하 상태에서 1상 결상을 유도한 것으로 결상시점에서 3상 전원 차단까지 약 36 ms가 소요되었으며, 그림 8은 3상 전동기 운전상태에서 측정된 파형으로 결상시점에서 약 48 ms에서 트립동작을 가졌다.



그림 6 동작성능 분석을 위한 실험장치  
Fig. 6 Experiment set for operation performance analysis

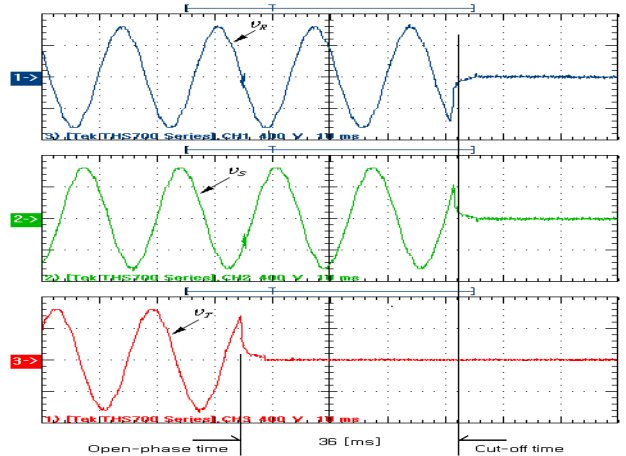


그림 7 1상 결상에 대한 동작특성 파형 (무부하)  
Fig. 7 Operation performance waveforms of 1-phase open-phase fault (no load)

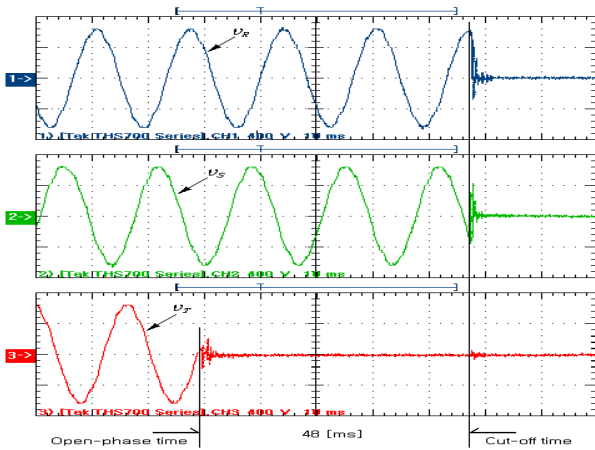


그림 8 1상 결상에 대한 동작특성 파형 (전동기 부하)  
 Fig. 8 Operation performance waveforms of 1-phase open-phase fault (3φ-motor load)

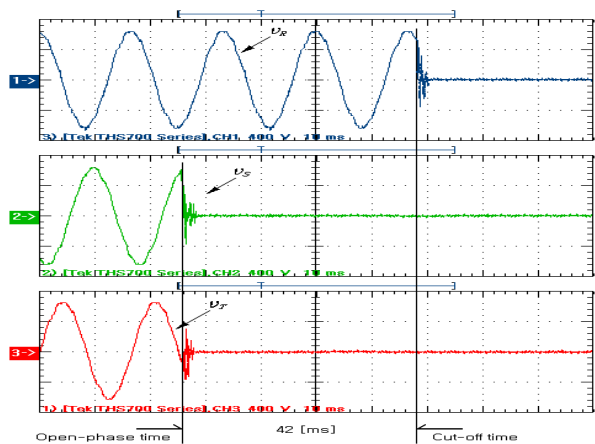


그림 9 2상 결상에 대한 동작특성 파형 (전동기 부하)  
 Fig. 9 Operation performance waveforms of 2-phase open-phase fault (3φ-motor load)

그림 9는 상기의 전동기 부하조건에서 2상 결상사고를 유도하여 측정된 동작 특성파형을 나타낸다. 2상 결상사고가 발생하고 제안한 결상보호기가 동작하여 3상 전원을 차단시키는데 까지 42 ms가 소요되는 양호한 동작특성을 보였다.

여러 차례의 동작특성을 분석한 결과, 1상 결상에 대해 제안한 결상보호기는 평균 32~50 ms의 양호한 차단동작시간을 가졌으며, 각종 2상 결상에 대해서도 결상보호기는 평균 28~45 ms의 우수한 동작성능을 보였다. 또한 제안한 결상보호기는 결상 사고 시 기존의 RCD를 동작시키기 위하여 강제적인 단락회로가 형성되지만 출력단 PTC 서미스터에 의해 누전전류는 약 수십 mA로써, 접지전류로 인한 접지전압의 상승이 거의 무시되어 인체나 전력계통에는 아무런 영향을 미치지 않았다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 실용성이 우수하고 현장 적응력이 강인한 개선된 결상보호기를 제안하였다. 제안한 결상보호기는 3상 성형 결선한 수동소자의 중성점 합성전위와 접지 간의 전위차를 이용한 알고리즘으로 결상 검출회로를 설계하였으며, 특히 결상사고 시에 강제적인 누전전류를 접지선으로 흘러 기존의 누전차단기를 동작시키는 제어 알고리즘을 부여하여, 산업현장이나 건축물의 3상 전력시스템 또는 분전반 등 다양하게 사용이 용이한 특징이 주어졌다. 또한 제안한 결상보호기는 결상사고가 아닌 순간적인 결상 또는 일시적인 전압불평형에 대해서 결상보호기의 오동작을 방지하기 위한, 오동작 방지용 시간지연 회로를 첨부하여 결상보호기의 실용성과 신뢰성을 향상시켰다.

제안한 결상보호기는 여러 차례의 사고발생 실측분석을 통해 그 성능과 동작특성이 입증되었으며, 제어장치의 구조와 제어방식이 간단하여 소형·경량으로 설계제작이 가능한 장점이 주어졌다. 그 결과 제안한 결상보호기는 전력계통에서의 결상이나 전압 불평형에 의한 전기화재를 최소화시키고, 이상전압 발생에 의한 전력계통의 불안정한 운전을 해소시켜 각종 전기사고를 예방할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음 (관리번호-220140172).

## References

- [1] NEMA, "National Fire Statistics Analyses", 2013.
- [2] KESCO, "Electric Disaster Statistics Analyses", 2013.
- [3] Y. Yamagata, S. Nishiwaki, T. Koshizuka, N. Takahashi, and M. Kosakada, "Ferro resonance by Open-Phase on Transformer with Delta Winding and Grounded Neutral", Transmission and Distribution Conference IEEE/PES, Vol. 1, No. 1, pp. 292-296, 2002.
- [4] Ogawa Yoshihiko, "Protection System of 3-Phase Induction Motor", Japan Electric Engineer's Association-Electric Technique Lecture, No. 8, pp. 1-6, 2010.
- [5] R. N. Anderson, "What Came First? The Arc Bead or the Fire?", EC&M 100, pp. 20-21, 2001.
- [6] LSIS co., "Technical Data of ELB, MCCB and THR ", 2012.
- [7] S. H. Kim, "Why do the low voltage motor must do open-phase protection?", Instrumentation Technology, No. 11, 2002.
- [8] K. W. Kang, M. O. Yoon, S. H. Gu, and Y. J. Song, "A Study on the Reliability Improvement Plan on Electric Leakage & Ground Fault of Low-voltage Electrical Line", Fire Sci. Eng., Vol. 25, No. 6, pp. 136-145, 2011.

- [9] S. H. Choi, D. K. Kwak, and J. H. Kim, "A Study on Device Development for Electrical Fire Protection on Open Phase of Three-Phase Motor", Fire Sci. Eng., Vol. 26, No. 1, pp. 61-67, 2012.

---

저 자 소 개



**곽 동 걸(Dong-Kurl Kwak)**

1990년 경남대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1991년 한국전기연구원 기술원, 1998~2007년 한중대 전기전자공학과 조교수, 2007~현재 강원대 방재전문대학원 부교수.

Tel : 033-570-6823

E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr