

3상 전동기 결상에 의한 전기화재 보호를 위한 장치 개발 연구 A Study on Device Development for Electrical Fire Protection on Open Phase of Three-Phase Motor

최신형[†] · 곽동걸* · 김진환*

Shin-Hyeong Choi[†] · Dong-Kurl Kwak* · Jin-Hwan Kim*

강원대학교 제어계측공학과, *강원대학교 방재전문대학원
(2011. 11. 8. 접수/2012. 1. 31. 수정/2012. 2. 10. 채택)

요 약

3상 전동기를 이용하는 3상 전력계통에서 1상이 결상되면 계통에는 불평형 전류가 흐르거나 단상전력이 공급되어 전동기 코일의 과전류로 인한 화재발생은 물론 전력계통에 큰 피해를 주게 된다. 최근 3상 전동기 결상검출 방식으로는 열동 과전류계전기와 전자식 모터 보호계전기가 대다수 이용되고 있으며, 이들은 선로의 과열이나 과전류가 발생되면 검출하고 차단기를 동작시키는 방식으로 감지속도가 느리고 오동작과 정밀도가 떨어지는 문제점이 있다. 이들을 개선하기 위하여 본 논문에서는 반도체 소자를 이용한 새로운 결상보호용 제어회로 토폴로지를 설계하여 감지속도와 정밀도를 향상시키고, 소형 경량으로 제작되어 현장의 3상 전동기 제어반에 용이하게 장착시킬 수 있는 장점이 있다. 그 결과 제한한 결상 보호장치는 3상 전동기를 보호하고 결상으로 발생하는 전기화재를 최소화시키고 그리고 전력계통의 안정적인 운전에 기여할 수 있을 것이다. 제한한 결상 보호장치는 다양한 동작특성 실험을 통하여 그 성능과 신뢰성이 입증된다.

ABSTRACT

In the three-phase power system using the three-phase motor, when any one-phase is open-phase, the unbalanced current flows and the single-phase power supplied by power supply produces over-current to motor coil. As a result, the enormous damage and electrical fire can be given to the power system. Recently, the thermal over-current relay (THR) or electronic motor protection relay (EMPR) is mostly used as the open-phase detection device of the three-phase motor. When the over-current or overheat of electric line is generated, it detects and operates circuit breaker, but there is the defect that the sensing speed is slow, the operation can be sometimes failed, and the precision is decreased. In order to improve these problems, this paper is proposed a new control circuit topology for open-phase protection using semiconductor devices. Therefore, the proposed open-phase protection device (OPPD) enhances the sensing speed and precision, and has the advantage of simple fitting in the three-phase motor control panel in the field, as it manufactures into small size and light weight. As a result, the proposed OPPD protects the three-phase motor, minimizes the electrical fire from open-phase, and contributes for the stable driving of the power system. The performance and confidence of the proposed OPPD is confirmed by a great variety of the experiments of operation characteristic.

Key words : 3-Phase motor, Open-phase faults, Electrical fire, THR, EMPR, OPPD

1. 서 론

오늘날 산업현장의 전기사용 증가로 인한 전기사고가 대형화되고 있으며 그 피해규모도 매년 증대되는

추세이다. 2010년도 소방방재청 통계분석에 의하면 산업현장에서의 전기사고는 단락사고 31.5%, 절연열화 19.9%, 과부하·과전류사고 7.6%, 접촉불량 6.4%, 누전·지락 6.36% 그리고 선로의 압착·손상사고 6.06% 등으로 분석되었다.^{1,2)}

이러한 전기사고에서 단락, 절연열화 그리고 과전류

[†]E-mail: cshinh@kangwon.ac.kr

사고는 전체 전기사고의 50% 이상을 차지하고 있으며, 사고의 주요 원인은 산업현장에서 사용되는 3상 전동기의 결상으로 인한 전압불평형, 과부하, 절연노화 등이 주요 요인으로 분석되었다. 이는 3상 전동기를 이용하는 3상 전력계통에서 상간 단락이나 1상이 결상되면 계통에는 불평형 전류가 흐르거나 단상전력이 공급되어 전동기 코일의 과전류로 인한 화재발생은 물론이고 전력계통에 큰 피해를 주게 된다.^{3,4)} 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 중요하다고 보고하고 있다.^{5,6)}

현장의 전기사고 예방은 전적으로 분전반 내의 배선용차단기에 의존하고 있으며, 배선용차단기는 상시상태의 전로를 수동 또는 전기조작에 의해 개폐가 가능하고 과부하 및 단락 등의 사고 발생시 자동으로 전로를 차단하는 기구로써 최근에는 누전과 과부하 검출으로 제작되고 있다.⁷⁾ 그러나 이러한 배선용차단기는 결상사고에 대한 검출 기능이 없으므로 3상 부하 특히 3상 전동기를 사용하는 곳에는 필히 열동 과전류계전기(THR) 또는 전자식 모터 보호계전기(EMPR)를 사용하도록 규정하고 있다. 이러한 보호장치들은 과전류나 과열이 발생되어야지만 검출이 가능하고 또한 전압불평형률이 70% 이상에서 3초 이내에 트립하도록 설계되어 그 응답속도가 느리고 현장에서의 잦은 오동작과 정밀도가 저하되는 문제점을 가진다. 이러한 이유로 산업현장에서의 전기화재는 증대될 수 있다.^{8,9)}

이들을 개선하기 위하여 본 논문에서는 3상 성형 결상한 커패시터의 합성전위와 중성점의 전위차를 이용한 새로운 결상보호용 제어회로 토폴로지를 설계하여 감지속도와 정밀도를 향상시키고, 또한 반도체 소자를 이용한 제어회로 설계가 참신하고 간단하여 소형, 경량으로 제작되어 현장의 3상 전동기 제어반에 용이하게 장착시킬 수 있는 장점이 주어진다. 그 결과 제안한 결상 보호장치는 3상 전동기를 보호하고 결상으로 발생하는 전기화재를 최소화시키고 그리고 전력계통의 안정적인 운전에 기여하게 된다. 제안한 결상 보호장치는 다양한 동작특성 실험을 통하여 그 성능과 신뢰성이 입증된다.

한국화재소방학회 논문지, 제26권 제1호, 2012년

2. 기존 결상 보호기의 성능분석

전동기 부하 등 3상 전력기기를 사용하는 전력계통에서 1상 또는 2상이 단선되어 전력이 공급되는 상태를 1상 결상 또는 2상 결상이라 말하며, 산업현장에서 3상 부하로 주로 사용되는 3상 전동기는 1상 결상사고가 대다수이다. 이러한 3상 전동기의 1상 결상은 전동기의 기동과 정지를 담당하는 전자접촉기(electromagnetic contactor)의 노후와 잦은 사용으로 인한 접점의 접촉 불량에서 주로 발생하는 것으로 보고된다. 3상 전동기의 1상이 결상될 경우 전동기에는 정격전류의 약 1.5배의 전류가 흐르게 되고 이에 따른 전동기 내부 권선의 열화에 의한 화재의 원인으로 주목되고 있다. 또한 결상된 상태에서 전동기의 기동 투입 시에는 정격전류의 6~8배의 기동전류가 흐르게 되어 모터의 소손은 물론 심각한 재해를 야기하게 된다.⁴⁾ 이러한 3상 전동기의 결상사고에 대한 보호 대책은 의무 사항이 아니어서 실제 현장에서는 거의 무방비한 상태이며, 현장 관리자의 인식과 필요에 따라 부가적으로 설치하는 경우가 대부분이다. 현재 전동기를 보호하는 목적으로 열동 과전류계전기 또는 전자식 모터 보호계전기를 사용하고 있으나, 이러한 보호장치는 과전류나 과열이 발생되어야지만 검출이 가능하고 또한 전압불평형률이 70% 이상에서 3초 이내에 트립하도록 설계되어 있어, 그 응답속도가 느리고 현장의 환경적 요인에 의한 잦은 오동작과 정밀도가 저하되는 문제점을 가진다.

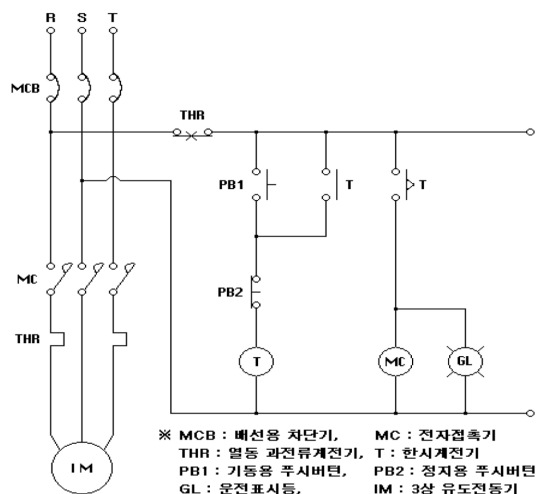


Figure 1. An example of control circuit configuration for THR.

Table 1. Principal Specification of THR

정격전압 [V]	220/380	계전방식	3극 2/3소자형
전류범위 [A]	2.5~4	동작특성	표준반한시 (Class 10A)
차단시간 [sec]	2~10 (설정 전류 7.2배)	Trip방식	바이메탈 타입
보호기능	과부하 · 결상 검용	취득규격	KSC4504 IEC 60947

※ 출처: (주)LS산전, 열동 과전류계전기 GTK-22, GTH-22시리즈.



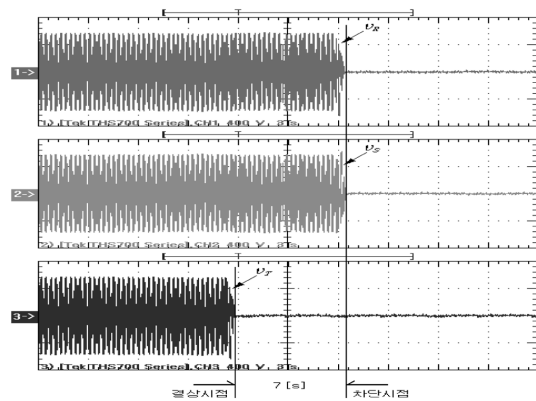
Figure 2. Experiment set for operation performance analysis of THRs.

Figure 1은 산업현장에서 주로 사용하는 열동 과전류계전기를 이용한 3상 유도전동기의 기동 및 정지 회로의 일례를 나타낸다.

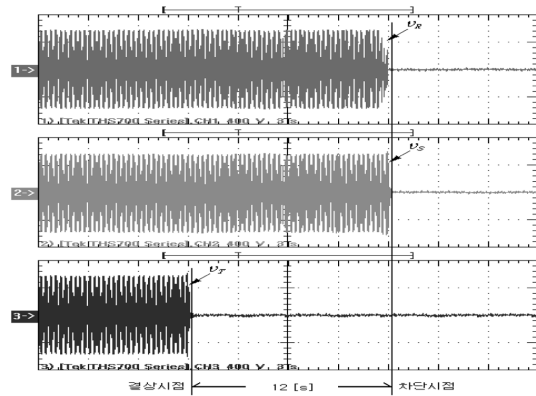
3상 전동기의 보호장치로 대다수 사용되는 열동 과전류계전기를 살펴보면, 전동기의 과부하로 인한 과전류가 발생하였을 경우 내부 릴레이의 열선 가열로 인한 바이메탈(bimetal)의 만곡작용을 이용하여 접점을 개폐하는 원리를 가진다. Table 1은 1.5 kW급 3상 전동기의 과부하 및 결상에 사용되는 열동 과전류계전기의 주요 사양을 나타낸다.⁷⁾

Figure 2는 결상사고에 대한 기존의 열동 과전류계전기의 동작성능을 분석하기위한 실험장치를 나타내며, Figure 3은 인위적인 1상 결상에 대한 열동 과전류계전기의 동작파형을 나타낸다. 열동 과전류계전기는 계전기 제조 전문기업에서 생산된 두 제품(A사, B사)을 사용하였고, 측정범위는 정격전압 380 V, 1.5 kW(2HP)급 3상 권선형 유도전동기/발전기(M/G세트)를 사용하였으며 정상적인 운전상태에서 인위적으로 1상 결상을 유도하여 측정하였다.

1상(T상) 결상에 대해 A사의 열동 과전류계전기는



(a) THR of A-company



(b) THR of B-company

Figure 3. Operation performance waveforms of THRs for 1-phase open-phase fault.

Figure 3(a)와 같이 약 7[s]에서 트립동작을 보였으며, Figure 3(b)의 B사 제품에서는 약 12[s]에서 트립동작이 이루어졌다. 이는 1상 결상에 대해 다른 2상으로 과전류가 발생하여 열동 과전류계전기가 동작한 것으로써 결상사고에 대해서 매우 저조한 응답속도를 가졌다. 특히 무부하 또는 경부하시에는 오동작과 동작불능의 문제점을 보였다.

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

3. 제안한 3상 전동기 결상 보호장치

3.1 제안한 결상 보호장치의 회로구성 및 동작원리

제안한 3상 전동기 결상 보호장치를 Figure 4에 나

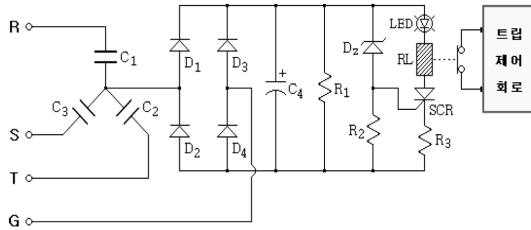


Figure 4. Circuit configuration of proposed OPPD.

타낸다. 3상 전원 R, S, T 각 라인에 동일 용량의 커패시터를 성형 결선하여 3상 합성전위와 중성점 또는 접지(G)간의 전위차를 이용하고, 고속의 반도체 소자들을 이용한 새로운 개념의 결상보호용 제어회로 토폴로지를 제안한다.

회로구성은 성형 결선된 커패시터 C₁, C₂, C₃와 전파저류를 위한 다이오드 D₁~D₄, 전해 커패시터 C₄ 그리고 방전용 저항 R₁을 제어회로 전원단으로 구성되고, 전압 조정용 제너다이오드 D₂와 릴레이 구동을 위한 반도체 스위칭 소자 SCR, 트립회로 동작을 위한 릴레이 RL 그리고 전류제한용 저항 R₂와 R₃으로 제어회로를 구성하였다. 또한 릴레이 동작의 유무를 표시하기 위하여 LED를 부가하였다.

제한한 결상 보호회로의 동작원리를 살펴보면, 정상 상태에서는 성형 결선된 3상 커패시터의 중성점 전압이 0[V]이므로 이상전압 검출없이 안정상태가 유지된다. 그러나 결상이나 3상 전압불평형이 발생하면 3상 커패시터의 중성점 전압이 나타나게 되고 다이오드 전파저류에 의한 전해 커패시터 C₄에는 직류전압이 발생된다. 이 직류전압의 크기가 제너다이오드 D₂의 제너전압보다 크게 되면 제너다이오드는 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 또는 3상 전압불평형에 의한 보호회로의 동작을 표시하기위한 LED가 점등된다.

여기서 제너다이오드(D₂)는 일시적 전압변동이나 미세한 불평형 전압에 대해서 결상 보호회로가 동작하는 것을 방지하기위하여 일정 제너전압 이상에서만 동작하도록 설정하는 기능을 가진다. 여기서 제너다이오드의 제너전압 선정은 결상 또는 3상 불평형 전압을 고려하여 다음의 중성점 전압 결과식(식(3))을 이용하여, 현장의 전력계통 조건과 주위 환경을 고려하여 산정된다. Figure 5는 다중 중성점 접지방식에서 3상 전원계

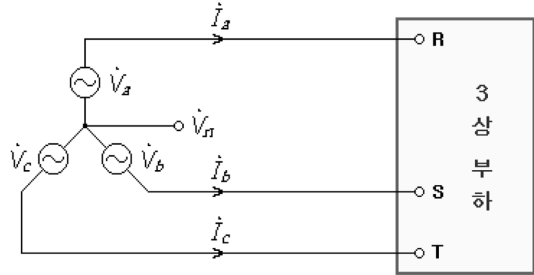


Figure 5. A summary figure of 3-phase electric power system.

통의 중성점 전압을 구하기 위한 개요도이다. 식(1)은 각 상전압에 대한 순시값과 이에 대한 복소수 표기식을 나타낸다. 식(2)는 결상 또는 3상 불평형 전압에 대한 중성점 전압 V_n을 구하기 위한 결과식이고 식(3)은 중성점 전압 V_n의 크기를 나타낸다.

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2}V_1 \sin \omega t & \dot{V}_a &= V_1 \angle 0^\circ \\ v_b &= \sqrt{2}V_2 \sin(\omega t + 120^\circ) & \dot{V}_b &= V_2 \angle 120^\circ \\ v_c &= \sqrt{2}V_3 \sin(\omega t - 120^\circ) & \dot{V}_c &= V_3 \angle -120^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

$$\begin{aligned} |\dot{V}_n| &= |\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c| \\ &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 - V_1V_2 - V_2V_3 - V_3V_1} \end{aligned} \quad (3)$$

정격전압 380[V], 3상 4선식 전력계통에서 전압불평형률은 30% 이하로 규정하고 있으므로, 제한한 보호회로의 전압검출용 제너다이오드의 제너전압은 약 50~120[V] 사이에서 현장의 여건과 사용 환경을 고려하여 선정하면 된다.

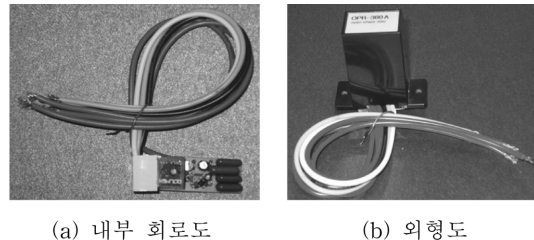


Figure 6. Photographs of manufactured OPPD.

Table 2. Circuit Parameters of Proposed OPPD

커패시터 $C_1 \sim C_3$	100 nF/ AC450V	제너 다이오드 D_z	$V_z = 50$ V/ 10 W
다이오드 $D_1 \sim D_4$	$V_{rr} = 600$ V /50 W	전력용 릴레이 RL	50 V, 2 A (1a,1b)
커패시터 C_4	50 μ F/ 100 V	반도체 스위치 SCR	60 V, 1 A
방전용저항 R_1	1 M/ 0.5 W	저항 R_2, R_3	10 k Ω , 1 k Ω /0.5 W

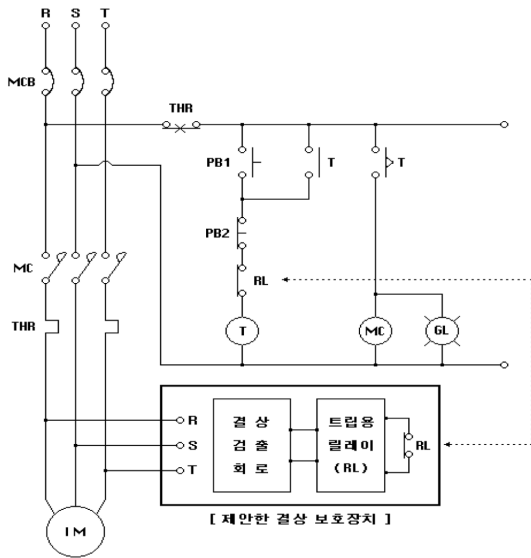


Figure 7. Wiring connection diagram between motor control circuit and proposed OPPD.

Figure 6은 제작한 결상 보호장치의 내부 회로도 와 케이스에 장착한 외형도를 나타낸다. 회로구성이 간단 하여 소형·경량으로 제작되고 설치의 용이한 장점이 있다. 또한 제안한 결상 보호장치는 기술적 제어원리 가 간단하며 고속형 반도체 소자들을 이용한 구조로 설계되어 감지속도가 우수하고 정밀도가 높아 그 신뢰 성이 증대되는 이점이 주어진다. Table 2는 제안한 결 상 보호장치의 설계에 사용된 소자부품의 회로 정수값 을 나타낸다. 특히 전동기 기동시 발생하는 과도 돌입 전류 또는 접촉성 아크 노이즈전압에 의한 중성점 전압이 나타나는 경우 제안한 보호장치의 오동작을 방지 하기위해 전력용 릴레이 RL은 동작시간이 3 ms~5 ms 인 소자로 선정하였다.

Figure 7은 전동기 제어반과 제안한 결상 보호회로 와의 결선도 일례를 보인다. 결상 또는 불평형 전압이

발생하였을 경우, 제안한 보호회로의 트립동작에 의한 전동기 구동용 전자접촉기를 강제적으로 트립시키는 원리를 가진다. 이는 3상 전원부의 결상 검출은 물론 이고 전자접촉기의 노후와 접촉불량에서 발생하는 결 상 또는 전압불평형 사고도 검출하기위하여 Figure 7 에서와 같이 제안한 결상 보호장치는 전자접촉기와 3 상 전동기 부하단 사이에 설치된다.

3.2 제안한 결상 보호장치의 동작특성 분석

제안한 결상 보호장치의 동작성능을 분석하기위하여 Figure 8에 특성분석을 위한 실험장치를 나타낸다. Figure 9는 무부하 상태에서 인위적인 1상 결상사고 시뮬레이 터를 통해 측정된 동작 특성파형이고, Figure 10은 정 격전압 380 V, 1.5 kW급 3상 권선형 유도전동기/발전기 (M/G세트)를 운전시킨 상태에서 인위적인 1상 결상을 유도하여 측정된 동작파형을 나타낸다. Figure 9와



Figure 8. Experiment set for operation performance analysis of proposed OPPD.

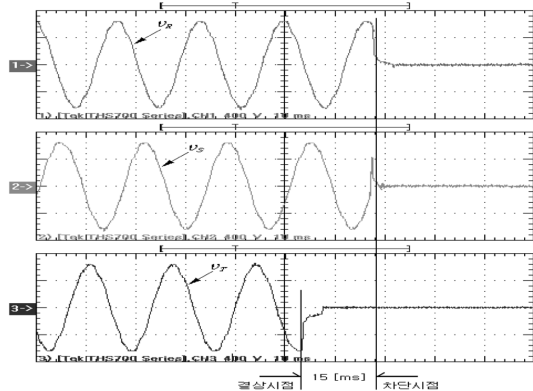


Figure 9. Operation performance waveforms of proposed OPPD for 1-phase open-phase fault (no load).

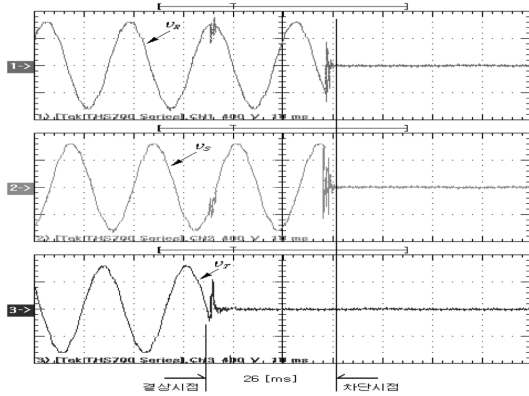


Figure 10. Operation performance waveforms of proposed OPPD for 1-phase open-phase fault (3 ϕ -motor load).

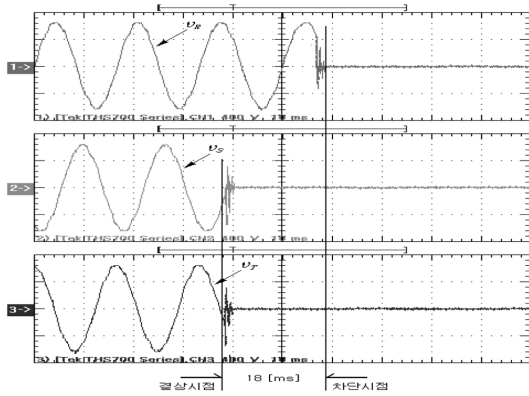


Figure 11. Operation performance waveforms of proposed OPPD for 2-phase open-phase fault (3 ϕ -motor load).

Figure 10에서 R, S, T 각상의 전압은 120° 위상차를 가지는 평형전원이 공급되는 상태에서 1상(T상) 결상이 발생되고, 제안한 결상 보호장치가 동작하여 3상 전원을 차단시키는 동작을 보인다. Figure 9는 무부하 상태에서 1상 결상을 유도한 것으로 결상시점에서 3상 전원 차단까지 약 15 ms가 소요되었으며, Figure 10은 3상 전동기 운전상태에서 측정된 파형으로 결상시점에서 약 26 ms에서 트립동작을 가졌다.

Figure 11은 상기의 전동기 부하조건에서 2상 결상 사고를 유도하여 측정된 동작 특성파형을 나타낸다. 2상 결상사고가 발생하고 제안한 결상 보호장치가 동작하여 3상 전원을 차단시키는데 까지 18 ms가 소요되는 양호한 동작특성을 보였다.

동일조건에서 측정된 상기 기존의 열동 과전류계전기와 제안한 결상 보호장치의 동작특성을 분석해보면,

한국화재소방학회 논문지, 제26권 제1호, 2012년

기존 열동 과전류계전기의 경우 전기화재의 요인이 되는 결상사고에 대해 지연된 동작 차단시간에 의한 비신뢰성과 특히 경부하시에는 오동작과 동작불능의 문제점을 보였으나, 제안한 결상 보호장치는 양호한 차단 응답특성과 높은 신뢰성을 보였다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 전동기를 이용하는 전력계통에서 결상이나 불평형 전압에 의한 전기화재를 최소화하고 전력계통의 안정적인 운전을 위한 새로운 결상 보호회로를 제안하였다.

제안한 결상 보호회로는 3상 성형 결선한 커패시터의 합성전위와 중성점의 전위차를 이용한 제어기법과 고속의 반도체 소자를 이용한 회로 토폴로지로 설계하여 감지속도와 정밀도를 향상시켰다. 또한 기존의 결상보호용으로 사용되는 열동 과전류계전기나 전자식 모터 보호계전기의 저속 응답특성과 비신뢰성의 문제점을 해결하였다.

제안한 결상 보호장치는 여러 차례의 사고발생 시뮬레이터에 의한 실측분석을 통해 그 성능과 실용성이 입증되었으며, 제어장치의 구조와 제어방식이 간단하여 소형·경량으로 설계제작이 가능하였고 이에 따른 제작비용의 감소와 현장의 3상 전동기 제어반에 용이하게 설치할 수 있는 장점이 부여되었다.

그 결과 제안한 결상 보호장치는 3상 전동기를 보호하고 결상으로 발생하는 전기화재를 최소화시키고, 이상전압 발생에 의한 전력계통의 불안정한 운전을 해소시켜 각종 전기사고를 예방할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 행정안전부, “2010년도 화재통계연보”(2010).
2. 한국전기안전공사, “전기재해 통계분석”(2010).
3. 동양기술단, “전압위상감지방식 결상보호기술”, 전기의 세계, Vol.55, No.4, p.16(2006).
4. 김성호, “저압모터는 왜 결상보호를 해야만 되는가”, 계장기술, No.11, pp.1-4(2002).
5. 大川, 美彦, “三相誘導電動機の保護システム”, 日本電氣技術者協會 電氣技術解説講座, No.8, pp.1-6(2010).
6. 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).
7. (주)LS산전, “배선용차단기와 누전차단기 및 열동형

- 과부하계전기 기술자료”(2007).
8. 최규하 외, “차단기류 오동작 분석을 위한 전원왜형 장치 설계 및 개발”, 전력전자학회 논문지, Vol.11, No.5, pp.480-488(2006).
 9. 광동걸, 정도영, “고정밀 전류센서를 이용한 저압배 전계통 이중 보호용 전기화재 방재장치”, 한국화재소 방학회 논문지, Vol.23, No.3, pp.71-76(2009).