

[Convergence Paper]

전력용 콘덴서의 화재메커니즘과 실제 화재상관관계 연구

백동현

가천대학교 설비소방공학과

The Study Fire Mechanism and Real Fire Correlation of Power Condenser

Donghyun Baek

Gachun Univ., Dept. of Fire&Disaster Protection Engineering

(Received December 18, 2017; Revised December 22, 2017; Accepted December 24, 2017)

요 약

본 논문은 전력용 콘덴서의 화재메커니즘에 대하여 실제 화재사례를 근거로 상관관계를 논한 것이다. 전력용 콘덴서의 고장 메커니즘에서는 7단계, 화재 발생메커니즘은 12단계로 분류되었다. 이 중 5단계인 보호회로의 보호계전기 동작하는 과정은 고장시와 화재발생시의 메커니즘과 동일하였다. 6단계에서부터 화재 발생메커니즘이 적용되어 전력용 콘덴서 내부의 연소현상 및 아크로 인한 가스발생으로 내부압력이 증가되어 화재 발생메커니즘 10단계에서 폭발하였음을 확인하였다. 11단계인 아크 등의 불꽃이 절연유와 함께 외부로 분출되고 2차 사고인 화재 발생으로 확대되었음을 확인하였으며 이와 같은 단계별 상관관계는 화재조사에 많은 기여를 할 수 있다.

ABSTRACT

This research discusses the correlation about fire mechanism based on real fire cases. Electric power condenser failure mechanism is classified into 7 steps and fire mechanism is classified into 12 steps. In the 5th step, the procedure of operating a protection channel of a protection relay was identical in the case of the failure and fire. As the fire occurrence mechanism was applied from the 6th step, internal pressure was increased because of gas generation produced by internal combustion phenomenon and arc. This caused explosion in 10th step of fire occurrence mechanism. In 11th step, the flame such as arc gushed out with insulating oil which caused fire and led to second accident. This kind of step correlation could play an important part to examine fire.

Keywords : Power Condenser, Fire Mechanism, Condenser Bank, Fire Case

1. 서 론

전기회로를 구성하는 소자(element)는 회로에 전기에너지를 공급하는 역할을 하는 능동소자(active element)와 능동소자인 전원으로 부터 공급받은 전기에너지를 소비 또는 변환하여 전기적 기능을 갖게 되는 수동소자(passive element)로 구분된다.

능동소자는 전압전원, 전류전원을 가리키고, 수동소자는 저항(resistor), 인덕터 (inductor), 콘덴서(capacitor)로 단순화할 수 있다. 수동소자인 콘덴서는 자체적으로 에너지를 생성하지 못하여 전압전원이든 전류전원이든 전원으로 부터 전기에너지가 공급되어야만 전기에너지를 소비 또는 변환할 수 있다.

콘덴서는 정전용량(electrostatic capacity)을 이용할 목적

으로 만들어진 장치로서 전기가 통하는 전극을 마주 보게 배치한 후 그 전극 사이에 유전체를 넣어서 만든다. 유전체는 양쪽 전극간의 절연을 유지하는 역할을 할뿐 만아니라 정전용량을 증가시키는 역할도 한다.

콘덴서의 종류는 아주 많으며 사용용도와 유전체의 종류에 따라서 명칭이 다르나 전력계통에 사용하는 것을 ‘고압 전력용콘덴서’라고 부르며 국제전기표준회의(International Electrotechnical Commission : IEC)의 규격에서는 전력용 콘덴서라고 한다. 이러한 전력용 콘덴서의 주요 수요처는 각 국가 전력청 또는 국가단위의 전력 송배전 회사와 대용량 전력을 사용하는 산업시설, 대형 주거시설 및 일반 빌딩, 철도설비 등 전기에너지를 사용하는 모든 곳에 설치되고 있다.

전력용 콘덴서를 비롯한 모든 전기 설비는 외부에 보호

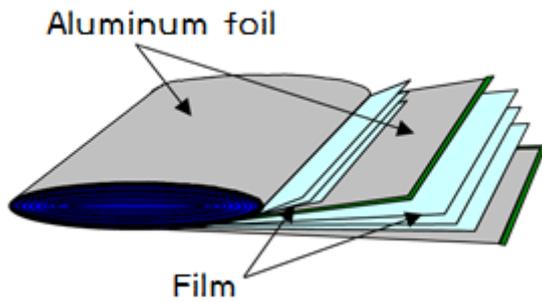


Figure 1. Condenser element.

회로를 구성하게 되어 있으나⁽¹⁾ 특별히 제작사에게 요구하지 않으면 전력용 콘덴서는 설치하는 업자가 요구하는 콘덴서, 콘덴서 받침대, 버스바용 애자, 커버나이프스위치, 단로기, 내부결선용 버스바 및 자재로 구성하여 사용하고 있다. 그러나 소용량 콘덴서는 자체 파손되어 사고로만 기록되는 경우가 많아 노출이 잘 되지 않으나 2013년 7월 충남의 한 공장에서 화인 미상의 전력용 콘덴서 폭발 화재가 발생하여 이의 관심이 집중되고 있다.

전기재해의 대표적인 원인은 접속부분에서의 불완전 접촉에 의한 발열이지만 접촉저항은 접촉면에 형성되는 아산화동이나 이물질 삽입, 나사풀림 등에 의한 접촉강도 저하에 의하여 발생한다. 그러나 전력용 콘덴서는 입력측에 접속된 버스바의 커버나이프스위치나 콘덴서 몸체가 가열되어 폭발하기도 한다. 전력용 콘덴서 자체만으로는 콘덴서의 내압상승에 의한 콘덴서 내부 유전체의 열화, 열화에 의한 내압상승이나 고조파에 의한 절연열화, 개폐서지나 이상전압 유입 등 과전압 유입에 의해 발생할 수 있다.⁽²⁻⁴⁾ 고장이나 화재발생 빈도가 적은 전력용 콘덴서의 고장시 메커니즘과 화재 발생메커니즘은 현장에서 매우 중요하나 화재위험에 대한 인지는 낮다. 따라서 전력용 콘덴서의 화재 발생메커니즘과 실제 화재사례에 따른 상관관계를 논하고자 한다.

2. 전력용 콘덴서의 제조 및 시험과 메커니즘

전력용 콘덴서의 유전체 종류에 따른 명칭은 ‘필름 콘덴서’라고하나 국내에서 제작하고 있는 전력용 콘덴서는 5×10^{-6} m 두께의 알루미늄 포일을 전극으로 사용하며, 유전체로는 열가소성(熱可塑性) 재질인 폴리프로필렌필름을 10×10^{-6} m~ 20×10^{-6} m 두께 2매 내지 3매를 접착하여 제조하고 있다. 전극과 유전체를 배치하여 길이 방향으로 감으면 Figure 1과 같은 모양이 되며 이를 소자(Element)라고 한다.

이렇게 만들어진 소자를 여러 개 쌓아 올려서 전기적인 직렬, 병렬 결선을 하면 소체가 만들어진다. 이 소체를 외부에서 접촉했을 때 안전을 위해 전기가 통하지 않도록 절연지를 감싸서 금속으로 된 외함에 넣고 뚜껑을 씌운 다음 진공 상태에서 고순도의 절연유를 주입한다.

2.1 제조 및 시험

콘덴서 내부는 폴리프로필렌 필름과 알루미늄 포일, 절연을 위한 종이, 절연유 등이 주성분이며 외부에서 전기적 에너지가 공급되지 않으면 아무런 기능을 수행할 수 없고 전기적으로도 안전한 물체이다.

유전체는 제품의 내전압 특성을 결정짓는 중요한 자재이기 때문에 입고되어 생산에 투입되기 전에 필름 상태에서 내전압시험을 실시한다.

유전체인 폴리프로필렌 필름과 전극인 알루미늄 포일을 권취하면 소자가 만들어지며 공장의 생산지시서에서는 사용된 필름의 고유생산번호를 기입하여 품질사고 시에 원자재를 추적할 수 있게 하고 있다. 또한 소자 권취단계에서 이물질 혼입이나 제작상 결함을 검출하기 위해 소자(element)에 전압을 인가하는 내전압시험을 실시 한다. 마지막 공정은 제품별 결선이 정상인지 확인하며 측정값을 생산지시서에 기입하게 된다. 결선이 완료되고 나면 사용시에 인체의 접촉으로 인한 사고를 방지하고자 절연지를 이용하여 소체를 절연처리해 안전도를 높이고 있다. 이 소체를 철재로 된 함(case)에 삽입하여 함침(impregnation, 含浸)공정으로 생산지시서와 함께 이관한다. 그러면 각 제조사 마다 정해진 진공도와 온도를 유지하면서 제품내부의 습기를 제거한 후 고순도 절연유를 각각의 필름과 필름 사이, 필름과 알루미늄 포일 사이에 며칠 동안 함침을 실시한다. 이 작업이 끝나면 품질관리 항목으로 진공도와 온도, 함침시간 등에 대해 확인하며 별도의 함침관리도를 통해서 작업조건을 관리 및 기록하게 된다. 함침이 완성된 제품은 도장(painting)만 하지 않은 완제품 상태이므로 이 상태에서의 시험은 국제전기기술위원회(IEC)의 시험규격을 따른다.⁽⁵⁾

2.2 전력용 콘덴서 고장메커니즘과 화재 발생메커니즘

2.2.1 고장메커니즘

전기기기는 만약에 있을지 모를 고장에 대비하기 위해 보호회로를 구성하고 이 보호회로의 주요 구성기기는 고장을 감지하는 보호계전기와 차단기로 구성된다. 전력용콘덴서의 고장 메커니즘은 제조공정이나 접속설비의 설치를 고려할 때 다음의 순서로 일어난다.

- ① 외부 고장요인인 과전압이나 과전류가 인가되는 경우
- ② 제품 자체의 하자로 인한 절연내력 약화
- ③ 콘덴서 내부 소자(element) 고장
- ④ 콘덴서 내부 단락회로 형성
- ⑤ 보호회로의 보호계전기 동작
- ⑥ 차단기로 사고 회로의 전원 차단
- ⑦ 콘덴서 고장만으로 사고 종료

전력용 콘덴서의 파손, 소훼, 고장시에 기록자료가 있으면 얼마나 큰 과도전류나 과도전압이 발생했는지 알 수 있

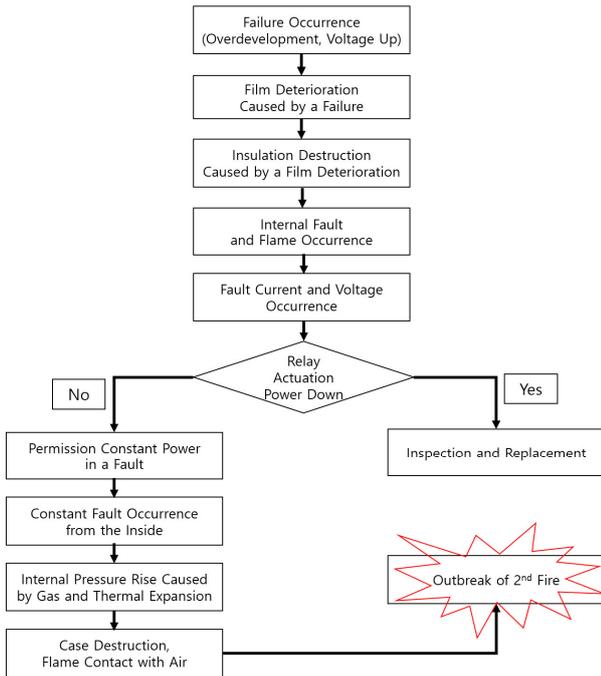


Figure 2. Electric power condenser failure mechanism.

으나 그렇지 않으면 알 수 없어 화재발생 인자를 찾기가 곤란하다. 단로기나 커버나이프스위치 사용시 불완전 접촉에 의한 아크 발생이나 접속부의 나사풀림등에 따른 저항값의 급격한 증대등으로 화재가 발생할 수 있으며 설치된 전기기기들의 주위 환경등도 무시할 수 없다.

2.2.2 화재 발생메커니즘

Figure 2의 전력용 콘덴서 고장메커니즘은 외부 보호회로가 정상적으로 작동한 경우에 발생하며 기기의 1차 고장이라고 한다. 하지만 외부 보호회로가 정상적으로 동작되지 않으면 다음과 같은 화재 발생메커니즘을 갖는다.

- ① 외부 고장요인인 과전압이나 과전류의 인가(과도현상, 전압상승)
- ② 제품 자체의 하자로 인한 절연내력 약화(Film절연열화 및 파괴)
- ③ 콘덴서 내부 소자(element) 고장
- ④ 콘덴서 내부 단락회로 형성
- ⑤ 보호회로의 보호 계전기가 동작하지 않음
- ⑥ 계전기가 동작하지 않으면 차단기가 차단되지 않으므로 사고 회로에 전원이 계속 인가
- ⑦ 추가적인 콘덴서 내부 소자 고장 발생
- ⑧ 내부 연소현상 및 아크로 인해 가스 발생
- ⑨ 밀폐 기기인 콘덴서 특성상 내부 압력 증가
- ⑩ 케이스 폭발
- ⑪ 내부에서 지속되고 있는 연소나 아크 등의 불꽃이 절연유와 함께 외부로 분출
- ⑫ 2차 사고인 화재 발생으로 확대

Table 1. Service Condition and Bank Rating

	Types	Condition	Unit	Notes
Service Condition	Ambient Temperature	-20~+40	℃	below 35 ℃, Average 24 Hours
	Altitude	less than 1000	m	
	Installation Place	interior		
	Humidity	85	%	AT32 ℃
Bank Rating	Circuit Voltage	158	kV	
	Constant	3	Phase	
	Frequency	60	Hz	
	Unit Capacity	137+137	Mvar	
	Capacity of all	274	Mvar	

이 메커니즘은 1차 고장으로 인한 보호회로가 정상적으로 동작하지 않은 경우에 발생되며 이를 2차 사고라고 한다. 보호회로의 구성과 보호계전기 동작특성시간 등의 세팅은 아주 중요하여, 외부 전문업체의 자격을 갖춘 자에게 의뢰(보호계전기 코디네이션:Relay Coordination)한다. 궁극적으로 콘덴서 고장메커니즘에서는 보호계전기가 동작되지 않아 차단기가 차단되지 않으므로 사고회로에 전원이 계속 공급되게 된다. 이와 같이 되므로 콘덴서 내부소자가 고장을 발생시키고 내부연소 현상이나 내부압력이 증가하면 외함(Case)이 폭발하게 된다.

3. 전력용 콘덴서 정격과 화재환경

3.1 사용조건과뱅크정격

콘덴서는 변압기 시험용설비에 전원을 공급하는 변압기의 전류 부족분을 보상하기 위한 콘덴서 뱅크에 적용하기 위한 것으로 사용조건과 뱅크정격은 Table 1과 같다.

관련규격으로는 IEC 60871-1을 적용하고, 단상단로기는 IEC 60129를, 콘덴서 설치시 필요한 지지에자는 ANSI C 29.9의 규격을 따른다. 또한 모든 재료와 가공은 별도의 지시가 없는 한 IEC 및 KS규정에 따르도록 하고 있다.

전력용 콘덴서 뱅크의 조작은 단로기에 의해 전원을 투입하거나 차단하여 이루어지며 콘덴서 용량은 사용자의 조정에 따라 동작하는 단로기에 의해 조정할 수 있다.

전력용 콘덴서 뱅크의 보호방식은 공급범위에서 제외하고 있으며 뱅크시스템 전체를 보호하기 위해서 과전류, 과전압 및 기타 사고에 대하여 신속히 회로를 차단시켜야 하며 자세한 사항은 승인원으로 대체하고 있다.

시험회로는 보통의 콘덴서를 이용하는 경우 Figure 4와 같이 시험전압에 도달하기까지의 시간지연을 가지고 완만하게 상승하는 회로로 운전된다.

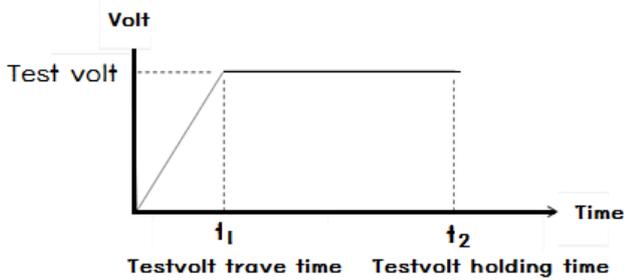


Figure 3. Operating test circuit.



Figure 5. Site of condenser connection fire explosion.

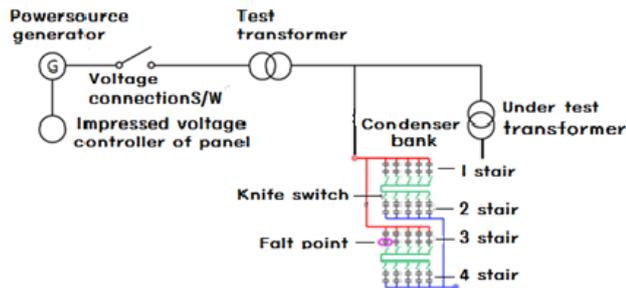


Figure 4. Transformer test circuit and electric power condenser bank wiring diagram.



Figure 6. High temperature cliff destruction shape.

3.2 화재환경

전력용 콘덴서 뱅크는 158 kV 3 P 60 Hz 274 Mvar 1 Set, 158 kV 3 P 60 Hz 274 Mvar 중성선 BUSBAR 지지용 1 Set, 158 kV 3 P 60 Hz 274 Mvar 단로기 처짐 지지용 1 Set이다.

Figure 4는 화재사례 시험회로와 전력용 콘덴서 뱅크결선도이다. 전력용 콘덴서 뱅크선로에서 R상 3단 첫 번째 및 두 번째 콘덴서는 부싱이 연결되는 전면부분이 상대적으로 심하게 수열되고 내압상승에 의해 팽창 변형된 상태였다. 특히 3단 두 번째 콘덴서(고장점)는 내압상승에 의한 팽창폭발로 인하여 경판이 분리되었고 내부의 필름부분이 심하게 연소되어 변형된 상태였다.

설비의 오작동 또는 작업자의 어떤 실수나 오결선이 콘덴서의 고장을 유발할 수도 있는데 이는 사고 이전 시험을 시행할 때 결선 변경 작업이 있을 수 있기 때문이다.

단로기 결선은 콘덴서를 4직렬로 사용할 수 있도록 되어 있었고, 커버나이프스위치를 이용해서 최대 10병렬 회로까지 사용할 수 있는 결선이였다.

사고 당시 시험회로에 사용하지 않은 콘덴서이기는 하지만 커버나이프스위치의 결합이 완벽하지 않은 상태를 현장에서 확인하였다. 이런 상태로 전원이 인가 되었다면 접촉부의 저항에 의해 열이 발생하거나 전기 아크가 발생하였던 것으로 판단된다.

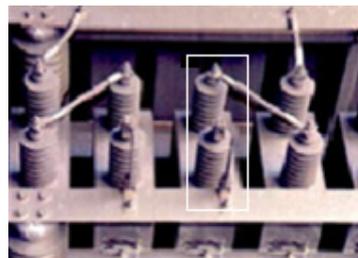
Figure 5는 전력용 콘덴서 고장이 발생하였으나 보호회로 미비에 따른 2차 폭발화재 발생으로 진행된 현장설비이다.

Figure 6은 Figure 4의 전력용 콘덴서 뱅크결선도 고장점에서 발견된 것으로 버스바가 용융직전 자체하중에 의하여 절단된 형태인 고온클리프파괴형태를 보이고 있다.

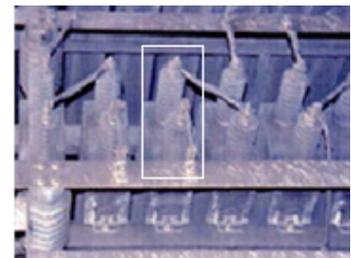
Figure 7은 버스바에서 전력용 콘덴서와 접속된 커버나



(a) Parts before complete destruction by fire



(b) Severed S phase



(c) Normal T phase

Figure 7. Cover knife switch connected incompletely.

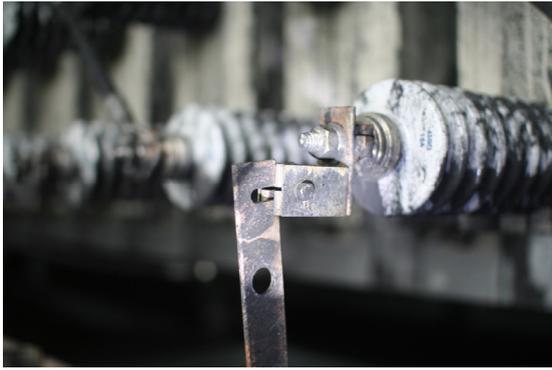


Figure 8. Not connected to cover knife switch.

이프스위치 부분으로 (a)는 화재발생이 없는 정상적인 부분을 나타내고, (b)의 □부분은 S상회로의 고장점에서 커버나이프스위치가 절단되며 화재원인을 가져온 부분, (c)의 □부분은 T상회로로 화염에 의한 끄름이 있지만 커버나이프스위치가 접속되어 있는 부분이다.

전력용 콘덴서를 관련설비와 접속하기 위한 커버나이프스위치를 조작할 때 위치마다 일정하게 결선하지 않으면 통일성 있는 조작위치 선정이 이루어지지 않아 오결선이 있을 수 있다.

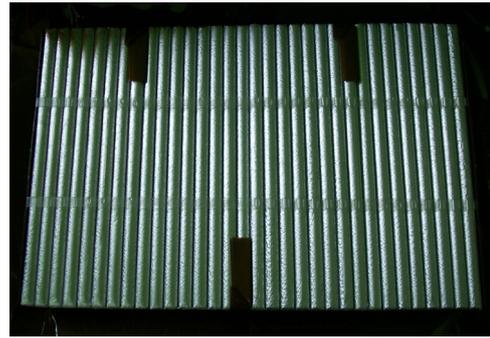
Figure 8은 고장점의 커버나이프스위치가 접속되지 않은 모습으로 접속부분의 발열에 의해 계속 전원을 공급하는 화재 발생메커니즘의 6단계인 것이다.

전기기기의 고장으로 인해 회로가 정상적으로 작동이 되면 콘덴서 자체조사만 하면 됨으로 고장부위의 파악이 쉽다. Figure 9(a)는 고장난 전력용 콘덴서 내부의 고장 부위이며 (b)는 고장 난 소체에서 발견한 파손된 소자이다. 고장난 콘덴서 내부소체는 외관적으로 고장 부위를 찾을 수도 있지만 정확히는 소자의 용량 점검을 통해서 찾아 낼 수 있다.

이를 더욱 정확히 하기 위해서는 사고 당시의 전압, 전류, 기기 고장으로 인해 발생한 단락전류 양과 그 유지시간, 그로 인해서 전기회로의 전원을 차단하기 위해 동작한 계전기의 종류 및 차단기 동작시간 기록들을 살펴보아야 한다. 이 자료로 전기기기의 고장원인을 확실하게 밝힐 수는 없지만, 사고 이후 보호 계전기의 정상적인 동작유무에 따른 고장 콘덴서와 전원의 빠른 분리여부는 확인할 수 있다. 이는 단순히 전력용 콘덴서 1대의 고장으로 끝날 수 있는 상황이 화재로 확대 되었는지 여부를 확인할 수 있는 근거가 된다.

4. 콘덴서 메커니즘과 화재상관관계

전력용 콘덴서의 고장 메커니즘에서는 7단계로 생각하나 화재 발생메커니즘은 12단계로 분류할 수 있다. 이 중 5단계인 보호회로의 보호계전기가 동작하는 과정은 고장시와 화재발생시의 메커니즘과 동일하였다. 그러나 고장메커



(a) The innards of bodies



(b) Malfunction device

Figure 9. Innards of fault condenser and device.

니즘에서는 차단기로 사고 회로의 전원을 차단하여 사고가 종료되는 반면 화재 발생메커니즘에서는 보호계전기가 동작하지 않아서 차단기가 차단되지 않으므로 사고 회로에 전원이 계속 인가되었다. 이로 인해 전력용 콘덴서의 내부 소자가 Figure 9와 같이 소해되어 고장이 발생되었다. 그리고 8단계인 전력용 콘덴서 내부의 연소현상 및 아크로 인해 가스 등이 발생하여 콘덴서의 내부압력이 증가되며 화재 발생메커니즘 10단계인 외함이 폭발하였다. 다음에 11단계인 아크 등의 불꽃이 절연유와 함께 외부로 분출되고 2차 사고인 화재 발생으로 확대된다. 이와 같은 상관관계는 화재발생시 조사에 일익을 담당할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 고장 메커니즘과 화재 발생메커니즘과의 상관관계외에 전기선로의 보호회로 구성과 전력용 콘덴서 받침대, 버스바용 애자, 커버나이프스위치의 접속상황, 버스바의 형태, 단로기, 내부결선용 버스바 및 자재의 구성품등도 확인하여야 한다. 아울러 사고 당시의 전압, 전류, 기기 고장으로 인해 발생한 단락전류 양과 그 유지시간, 전원을 차단하기 위해 동작한 계전기의 종류 및 차단기 동작시간 기록들을 살펴보고 직·병렬접속에 대한 것도 확인하여야 한다.

5. 결 론

전기기기의 고장이나 사고 분석은 고장 난 기기 자체에 대한 원인 분석을 통해서 기기의 결함에 대해 분석하고, 기

기 고장이 발생했을 당시의 전기회로의 상황이 가혹하거나 조작상의 오류가 있을 수도 있으므로 그에 대한 원인 분석이 이루어져야 한다.

전력용 콘덴서의 고장 메커니즘과 화재 발생메커니즘과의 상관관계에서는 5단계인 보호회로의 보호계전기가 동작하는 과정은 고장시와 화재발생시의 메커니즘과 동일하였다. 그러나 고장메커니즘에서는 사고 회로의 전원을 차단하여 사고가 종료되는 반면 화재 발생메커니즘에서는 보호계전기가 동작하지 않아서 차단기가 동작하지 않으므로 전원을 차단하지 못해 전원이 계속 인가되었다.

화재사례에서는 R상 3단 2번째 콘덴서 입력측에 연결된 커버나이프스위치의 접점 결합상태가 불량하여 불안전접촉에 의한 발열이 선행되었다. 따라서 콘덴서 뱅크에 구성된 수 개의 콘덴서 중 한 두 개만 가열되어 전력용 콘덴서는 화재 발생메커니즘 8단계인 내부의 연소현상 및 아크로인한 가스발생이 시작된 후 화재 발생메커니즘 10단계인 외함의 폭발하였다. 그리고 불꽃이 절연유 및 도장페인트에 착화하여 12단계인 화재로 확대되었다. 이를 확인할 수 있는 것은 전력용 콘덴서와 접속된 설비인 버스바의 커버나이프스위치 접속부분만 용융된 형태를 발견하였으며, 여타 소락 및 절단된 버스바는 고온클리프파괴형태를 보인 것이다.

고압에 사용하는 전력용 콘덴서는 화재발생빈도가 많지 않고 화재발생도 순간적이므로 연구에 어려움이 있지만 이와 같은 상관관계는 화재사고 발생시 조사에 일익을 담당할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 전력용 콘덴서 자체만 국한시킬 경우에는 콘덴서의 내압상승에 의한 유전체의 열화, 고조파에 의한 절연열화, 개폐서지나 이상전압 유입 등에 의

해 발생 할 수 있다. 따라서 접속부와 관련 설비들과의 상관관계와 화재메커니즘에 대하여는 계속 연구가 필요하다.

References

1. H. G. Choi, "Power Facility Equipment and Design", Seong-andang, pp. 336-347 (2011).
2. Y. B. Lim, S. I. Lee and D. C. Kang, "Development for the System-Based Routine Inspections of Electrical Equipments", 2012 Symposium, KIEE, pp. 364-366 (2012).
3. J. S. Jung, H. S. Kim, S. G. Kim, O. G. Han and C. E. Park, "Correlation Analysis about Loop Impedance and Load Condition" Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., Vol. 61, No. 2, pp. 342-346 (2012).
4. S. G. Kim, J. S. Jung and G. H. Lee, "Development and Analysis of Electric Shock Risk in Relation to International Electrotechnical Commission (IEC) National Application", Korea Electric Safety Corporation, pp. 65-78 (2012).
5. IEC 60871-1, "Shunt Capacitors for a.c. Power Systems Having a Rated Voltage Above 1000 V", Part 1, General, pp. 8-40 (2005).
6. IEC 60871-2, "Shunt Capacitors for a.c. Power Systems Having a Rated Voltage Above 1000 V", Part 2, Endurance Testing, pp. 13-99 (2005).
7. Ministry of Knowledge Economy, "Electrotechnical Regulation & Conformity Criteria Article 38 (Facility of Overcurrent Circuit among Low Pressure Converter)" (2016).