

전력용 커패시터 사고 사례 조사 분석

김중겸\*, 박영진\*, 이은웅\*\*, 김일중\*\*\*, 조성수\*\*\*\*  
 강릉대\*, 충남대\*\*, 호서대\*\*\*, 삼화컨덴서\*\*\*\*

Research Analysis for Trouble Case of Power Capacitor

Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, Eun-Woong Lee, Il-Joong Kim, Seung-Su Cho  
 Kangnung Univ, Chungnam Univ, Hoseo Univ, Samhwa Condenser Corp

**Abstract** - 전력용 커패시터는 부하의 역률개선과 선로 전류의 감소에 의한 변압기 용량의 여유와 선로의 리액턴스나 저항에 의한 전압강하가 감소로 전압이 안정되어 부하설비의 생산 능력과 제품의 품질 향상에 도움이 되기 때문에 송배전 회로망 또는 부하설비에 설치 운영되고 있다. 한편 부하의 변동에 따른 역률조정을 위한 스위칭 동작과 비선형 부하 등의 사용은 고조파 전류의 유입으로 전압 및 전류 스트레스를 증가시킬 수 있다. 커패시터는 낙뢰와 같이 일시적인 과전압에 의해 커패시터를 고장 나는 것도 있지만, 오랫동안의 스트레스로 고장이 나는 경우가 많아 커패시터가 고장 나는 정확한 원인 분석을 체계적으로 한 보고서가 많지 않다. 본 연구에서는 국내의 일부 발표된 자료를 가지고서 커패시터가 전기품질 변동에 의해 고장이 일어날 수 있는 원인 등을 찾아 분석하였다.

1. 서 론

수용가에 사용되는 부하가 점차 자동화됨에 따라 전기 품질에 대한 질적 향상이 더욱 높아지고 있다. 전기품질은 대부분 전압에 관한 것으로서 전압품질에서의 변화는 전류품질에도 영향을 미쳐 전원 및 부하 시스템에 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 새그나 스웰과 같이 일시적으로 전원 및 부하에 영향을 주는 요소 외에도 고조파나 전압 불평형과 같이 운전 중 지속적으로 시스템에 영향을 주는 요소도 있다.

전력용 커패시터는 부하에 필요한 무효전력을 공급하기 때문에 시스템의 역률개선, 전압의 안정, 선로 및 변압기 손실 저감에 따른 전원용량의 안정적인 확보 그리고 전력손실 저감을 위해 전원 및 부하측에 설치되고 있다. 또한 전력변환장치와 같은 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 줄이기 위해서 리액터와 함께 수동형 필터로도 사용된다[1].

커패시터의 수명에 큰 영향을 미치는 요소로서는 온도, 전압 그리고 전류 등이다. 전기품질 변동에 따라 커패시터에 영향을 주는 것은 전압과 전류이지만, 전류의 영향을 결국 온도에 영향을 주기도 한다. 특히 과대안고조파 전류가 콘덴서에 유입될 경우 과열, 소음발생, 진동 그리고 소손의 결과를 낳을 수 있다 또한 커패시터의 개폐시에 발생하는 과도 과전류도 고장의 한 원인이 될 수 있다[1~4].

역률 보상을 위해 설치되는 커패시터는 부하 용량이 일정하지 않을 경우 진상에 따른 문제를 해소하기 위해 스위칭을 할 경우 발생하는 과전압이 문제가 될 수 있으며, 고조파를 줄이기 위한 필터로 사용될 경우 직렬형 공진에 의해 전압 및 전류에 의한 스트레스로 커패시터는 높은 스트레스를 받아 고장의 한 원인이 될 수 있다.

또한 기기의 오조작 또는 오결선에 의해 전원 투입시에도 큰 돌입전류 및 과전압으로 소손되는 경우도 있다 [5,6].

본 연구에서는 전력용 커패시터가 전기품질의 변화에 의해 어떤 영향을 받아 고장이 났는지에 대해 보고서에 기술된 내용의 검토와 실제 확인된 결과 등을 분석하여 사고 저감을 위한 기초 자료를 마련하고자 한다.

2. 국내의 자료 조사 분석

2.1 국내자료 조사 분석

우리나라 송배전계통에서 사고사례에 대한 분석은 한전에서 하고 있고, 수용가 설비의 일부분에 대한 사고 분석은 전기안전공사에서 관리하고 있지만, 기타 수용가에서 발생하는 사고에 대해서는 자료입수가 없어 정확한 원인 및 대책마련이 매우 어렵다.

전기안전공사의 안전관리 대행 수용가에서 발생한 사고 기기별 설비 발생현황을 분석하면 총 6,946건 중에서 저압에서는 78.7%(5,465건)을 차지하고 있으며, 고압은 21.3%(1,481건)을 차지하고 있다[5].

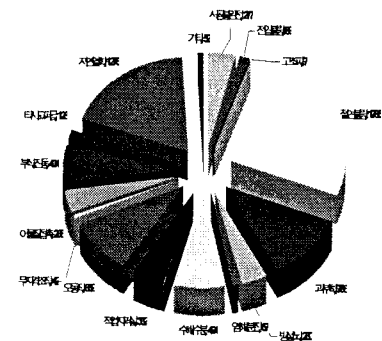


그림 1. 사고 원인별 설비사고 분포

사고원인별 분포를 보면 가장 큰 몫을 차지하는 부분은 절연불량이고, 그 다음으로서는 과부하운전에서 발생한 경우이다. 전기품질에 관련된 항목으로 과부하 운전의 경우 786건이었고, 전압불량의 경우 89건이었으며, 타 사고 파급의 경우 128건이었다. 이들 원인 중에서 전기 품질에 관련된 사항으로서는 정격전압불량, 과부하, 낙뢰/유도뢰, 보호 장치의 오동작, 외부과급 사고, 고조파/전

자과/서지 등이 있었다. 과부하 운전의 경우 전류에 관련된 것으로서 전압품질에도 큰 영향을 줄 수 있다. 전압불량의 경우 전압불평형의 발생으로 부하 및 연결 시스템에 나쁜 영향을 미치고 전류에도 영향을 줄 수 있다. 이 중에서 콘덴서에 관련된 사고는 저압에서는 37건이고 고압에서는 2건으로 낮은 편이다.

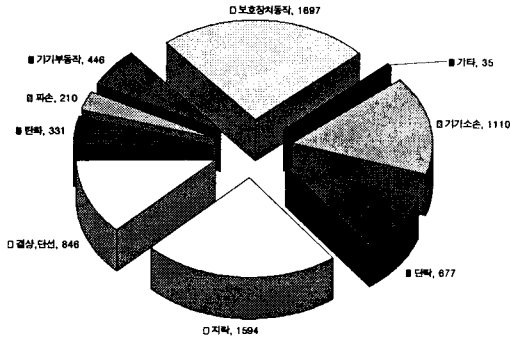


그림 2. 사고 형태별 설비사고 분포

설비사고 형태에서 보면 그림 2와 같이 지락에 의한 사고가 1,594건으로서 전체 전기설비 사고의 22.9%의 점유율을 나타내고 있고, 단순히 보호 장치만의 동작으로 발생한 사고의 경우 1,697건으로 24.4%를 차지하고 있다. 지락사고의 경우 일시적인 전압의 확대를 초래하여 다른 기기에 영향을 주는 것으로서 콘덴서의 경우 스위칭 전압의 영향을 받을 수 있다.

조사 대상 사고 기기의 사용기간별 현황에서 저압이 고압보다 높게 나타났으며, 5년 미만까지 높은 비율로 발생하다 안정화상태에 들어가고서는 고장의 발생빈도가 낮아지다가 10년 정도 이상에서는 고장의 발생비율이 높아짐을 확인할 수 있었다.

전력변환장치와 같은 비선형 부하의 사용시 발생하는 고조파에 의해 콘덴서 및 콘덴서와 관련된 기기의 손상 또는 손상에 대한 조사결과 콘덴서 고장은 24건 중 실제 고조파에 의해 직접적으로 고장은 16건이었고, 변압기와 리액터에 의한 공진의 영향에 의한 고장은 2건, 아크 및 유도가열 등으로 고장이 난 것은 2건, 기동정지 및 순간 정전으로 고장 난 것은 2건이었으며 소음발생으로 교체한 건수도 2건이었다[6]. 이와 같이 대부분이 고조파와 같이 비선형 부하의 운전에 의한 경우가 높은 비율을 차지하고 있으며, 공진 또는 전기품질의 변동에 의한 것이 그 다음으로 차지함을 알 수 있었다. 특히 승강기에 설치된 커패시터의 경우 잦은 고장으로 수시로 콘덴서를 교체하는 경우도 보고되었다. 이는 기동정지에 따른 커패시터의 스위칭에 의한 원인으로 생각된다. 현재까지의 대처방법으로 정확한 원인 규명이 되지 않아 같은 정격의 콘덴서로 교체하거나 기본 값보다 높은 정격전압으로 교체하는 것이 많았다.

그림 3은 유도전동기의 Y- $\Delta$  기동방식 운전회로에서 콘덴서의 오결선으로 과전압의 발생에 의한 소손 사고의 예를 나타낸 것으로서 일시적으로 사고가 확인되는 경우도 있지만, 그림 4와 같이 누적된 결과로 고장이 발생할 경우 사고까지 고장 원인을 찾는 것이 매우 어렵다. 그림 5는 고조파 저감용 필터를 사용한 경우 낮은 임피던스 때문에 고장 난 예를 나타낸 것이다.

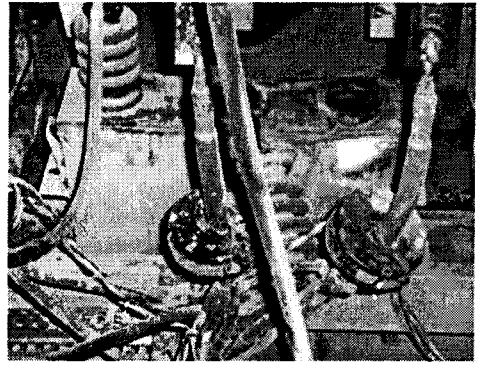


그림 3 잘못된 결선에 의한 사고의 예

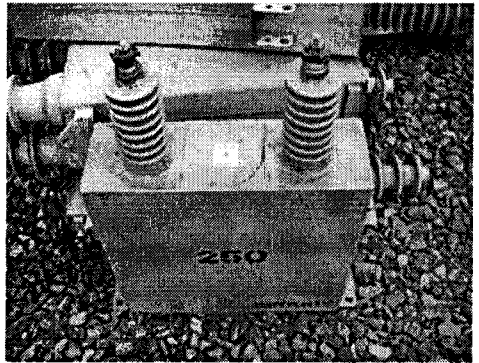


그림 4 내부고장의 일 예

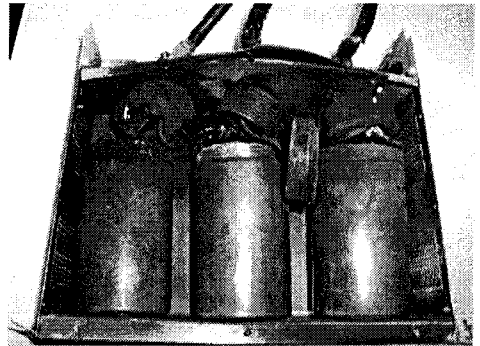


그림 5 고조파에 의한 고장의 예

콘덴서 개폐용으로 적합한 개폐기 또는 차단기가 사용되어야 한다. 예를 들면, 개폐장치는 과도한 과전압을 발생시키는 재점화가 없는 것이어야 한다. 또한 차단기는 장시간 사용시 접점의 마모가 발생할 확률이 높으므로 정기적인 점검 및 교환을 통해 안정적인 사용 환경을 만들어야 한다.

송배전 계통에서 23W 또는 154W용 SC에서 발생한 사고의 경우 차단기 투입 또는 차단시 과전압, 서지전압 및 전류 등의 영향으로 콘덴서와 리액터의 손상을 일으킨 사례도 보고되고 있다[7,8]. 그림 6은 콘덴서용 차단기를 장시간 사용 중 차단기의 접점에서 아크가 발생하여 사고가 난 사례이다.

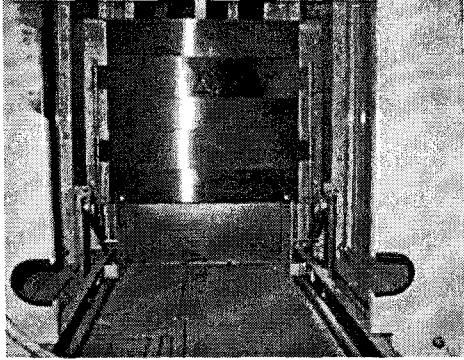


그림 6 커패시터용 차단기 아크 흔적

콘덴서 및 직렬 리액터가 고조파에 의해 영향을 받는 원인은 비선형 부하인 기기에서 발생하는 고조파 전류에 대해 콘덴서를 포함하는 회로의 임피던스가 감소하여 높은 전류가 유입하여 과열, 소손 또는 진동, 소음 등이 발생하게 된다. 특히 전력용 콘덴서에서 중요한 것은 전원과 콘덴서 회로의 임피던스가 전류에 의한 병렬공진을 일으킬 수 있다는 것이다. 병렬 공진이 발생하면 고조파 전류의 증대뿐만 아니라 계통 전체에 대해 전압왜곡을 일으킬 수 있다. 이때 전력용 콘덴서에 리액터가 설치되지 않거나 리액터 용량이 작으면 콘덴서에 많은 전류가 유입하여 소손될 수 있다.

고조파에 의해 콘덴서 및 콘덴서와 관련된 기기의 소손 또는 손상에 대한 조사결과는 다음과 같다[6]. 조사결과에서 콘덴서 고장은 24건 중 실제 고조파에 의해 직접적으로 고장은 16건이고, 변압기와 리액터에 의한 공진의 영향에 의한 고장은 2건, 아크 및 유도과열 등으로 고장이 난 것은 2건, 기동정지 및 순간정전으로 고장난 것은 2건이며 소음발생으로 교체한 건수도 2건이다. 이와 같이 대부분이 고조파와 같이 비선형 부하의 운전에 의한 경우가 높은 비율을 차지하고 있으며, 공진 또는 전기품질의 변동에 의한 것이 그 다음으로 차지함을 알 수 있다. 특히 승강기에 설치된 커패시터의 경우 잦은 고장으로 수시로 콘덴서를 교체하는 경우도 보고되었다. 이는 기동정지에 따른 커패시터의 스위칭에 의한 원인으로 생각된다. 현재의 대처방법으로 같은 정격의 콘덴서로 교체하거나 기본보다 높은 전압정격으로 교체하는 것이 많았다.

## 2.2 국외자료 조사 분석

커패시터가 전기품질 중에서 과전압, 과전류에 의해 동작불능 또는 절연파괴 또는 소손이 되는 경우가 대부분을 차지하고 있지만, 실제 일시적인 영향으로 고장이 날 경우보다 시간의 경과에 따라 고장이 날 경우 정확한 원인분석을 파악하기가 매우 어렵다. 또한 사고가 외관상에 드러나는 경우도 있지만 콘덴서 내부에서 발생하는 경우에는 분리하여 조사하지 않으면 찾기가 매우 어렵다. 그래서 사고원인의 분석이 어려워 통계자료를 구하는 것은 찾기가 쉽지 않다. 그러나 전기품질에서 고조파와 같은 경우 조사 분석한 사례는 종종 보고되고 있다[2,9].

'91~'94년 일본에서 조사한 내용으로 고조파에 의해 영향을 받은 발생기기 339대의 분석현황에서 그림 7과 같이 콘덴서와 직렬 리액터가 거의 대부분(91% 정도)을 차지하고 있다. 그 장애의 주요 내용은 커패시터의 소손, 이상 음, 과열 등이다[2].

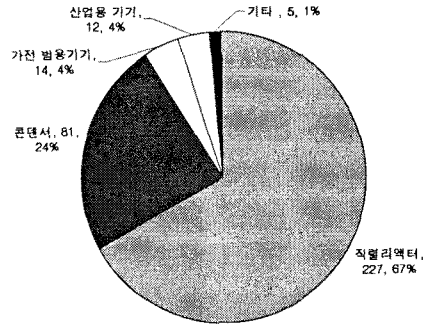


그림 7 고조파 장애 기기 종류

장애 양상에 대한 분석은 아래 그림 8과 같다. 고조파에 의해 가장 많이 발생하는 현상으로서 이상 음이 가장 높은 비중을 차지하며, 그 다음으로서는 기기의 소손과 과열이다. 특히 콘덴서는 고조파에 가장 밀접한 관계를 가지므로 가장 쉽게 영향을 받을 수 있는 가능성을 가지고 있다.

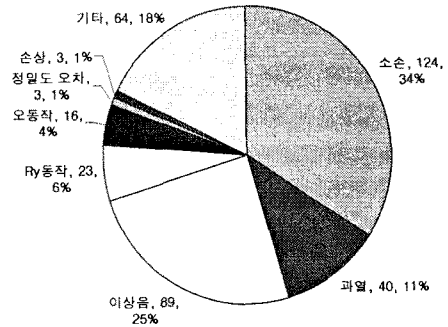


그림 8 고조파 장애 결과

공장, 빌딩 등의 업무용 기기에 추가해서 일반 가정에서도 반도체를 이용한 기기가 증가하고 있고, 가전제품에도 인버터를 사용한 기기가 증가하고 있다. 그림 9는 2001년도 고조파에 의한 장애의 조사에서 대상 75대중에서 콘덴서 및 리액터 등의 조상설비에서 장애가 가장 높았고, 다음으로 가전·범용품에서의 피해도 25%를 차지하고 있었으며 전체적으로 넓은 범위에서 고조파의 영향을 받고 있었다[3]. 앞의 그림 7에서 고조파에 의한 장애 발생기기에 대해 직렬리액터가 상대적으로 사고의 발생 비율을 줄였지만 콘덴서의 비율은 높아졌다는 것을 알 수 있다.

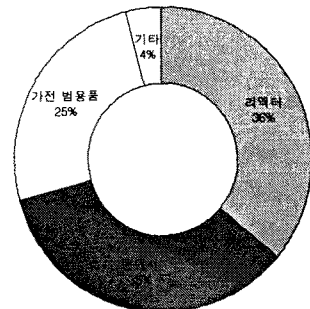


그림 9 기기별 장애 발생 대수

고압 유입변압기, 진상콘덴서, 차단기, 유도전동기, CV 케이블 등의 경년열화에 관한 년 평균 고장률에 대한 설문 조사결과 비선형 농형 유도전동기가 가장 높은 비율을 차지하였고, 가장 낮은 비율은 유입 변압기와 CV 케이블이 차지하였으며, 진상 콘덴서는 유입변압기보다는 높은 비율을 차지하였으며 가동 10년을 경계로 급격하게 경년변화가 높아진다고 조사되었다[9].

콘덴서 및 직렬 리액터가 고조파에 의해 영향을 받는 원인은 비선형 부하인 기기에서 발생하는 고조파 전류에 대해 콘덴서를 포함하는 회로의 임피던스가 감소하여 높은 전류가 유입하여 과열, 소손 또는 진동, 소음 등이 발생하게 된다. 특히 전력용 콘덴서에서 중요한 것은 전원과 콘덴서 회로의 임피던스가 전류에 의한 병렬공진을 일으킬 수 있다는 것이다. 병렬 공진이 발생하면 고조파 전류의 증대뿐만 아니라 계통 전체에 대해 전압왜곡을 일으킬 수 있다. 이때 전력용 콘덴서에 리액터가 설치되지 않거나 리액터 용량이 작으면 콘덴서에 많은 전류가 유입하여 소손될 수 있다.

### 3. 결 론

전력용 커패시터는 전원 및 부하 측에 설치되어 전압 안정 및 손실저감에 따른 설비용량의 증가 그리고 역률 개선 등 다양한 효과를 발휘하고 있다. 그러나 전기품질의 변화에 따라 일시적 또는 장기적으로 스트레스를 받을 경우 고장으로 전기설비 신뢰도를 떨어뜨리는 것은 물론이고 생산중지에 따른 경제적 피해도 크다.

이와 같이 전기품질의 변화 등에 따라 발생하는 커패시터 및 관련 기기의 일시적인 사고 외에 장기적인 스트레스에 의한 고장이 많아 대책 수립을 위한 정확한 사고 조사 결과가 많지 않다.

본 연구에서는 국내외서 전기설비 사고에서 커패시터와 관련된 고장의 원인과 전기품질과의 관계를 조사 분석하였다. 분석결과 수명에 가장 큰 영향으로 작용하는 것은 절연불량, 자연열화, 과부하 및 기기의 오동작에 의한 사고가 많았으며, 전기품질에서 차단기의 개폐 동작에 의한 과전압 및 비선형 부하의 사용에 의한 고조파 전류 등이 커패시터의 사고에 지속적으로 영향을 줄 수 있는 가장 큰 원인제공자라고 판단되었다.

본 연구결과는 현재까지 수집된 자료들을 분석한 것이지만, 향후 추가 자료의 입수를 통해 보다 정확한 사고 통계의 분석을 통해 전력용 커패시터가 받을 수 있는 스트레스 정도를 완화시킬 수 있는 연구를 더 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 과제임(과제번호 : R-2007-3-186)

#### [참 고 문 헌]

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005
- [2] 일본 전기학회 기술보고서 제 521호, "전력용 콘덴서 예방보전기술", 1994
- [3] 일본 전기학회 기술보고서 제 978호, "전력품질조정용 파워일렉트로닉스 적용 동향", 2004년 8월
- [4] A.S.Farag et al., "Failure Analysis of Composite Dielectric of Power Capacitors used in Distribution Systems", pp. 557-564.
- [5] 한국전기안전공사, "전기계해통계분석", 2006, 2007

- [6] 한국전력공사, "고조파 사용실태 조사 및 개선방안 연구", 2002, 02
- [7] 한국전력공사, "23W SC Bank 고장원인 분석 및 대책수립", 2001. 12
- [8] 한국전력공사, "1543W SC Bank 고장원인 분석 및 대책수립", 2001. 4
- [9] 일본 전기학회 기술보고서 제 581호, "工場·빌딩에 있어 電源品質 確保 現状과 対策", 1996년
- [10] 한국전기안전공사, "전기사용장소의 고조파 장해 분석 연구", 1996. 12