

전력용 콘덴서용 Fuse 설계 및 적용 기술에 관한 연구

이병윤
한국전기연구원

A Study on Design and Application of Fuse for Shunt Power Capacitors

Byeong-Yoon Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 초고압 송전선의 조상설비나 안전도가 요구되는 변전설비 등에서 역률 개선용으로 사용되는 전력용 콘덴서의 Fuse를 설계하기 위해 Fuse 용단시험을 통해서 구한 Fuse 설계 데이터를 제시하고자 한다. 그리고, 제시한 데이터를 이용하여 주어진 사양의 전력용 콘덴서에 대하여 요구되는 실제 Fuse를 선정하여 적용하고 시제품을 제작하여 Fuse 동작시험을 실시한 결과를 제시하고자 한다.

1. 서 론

전력용 콘덴서[1-3]는 Fuse의 사용 여부 및 적용 방식에 따라, Fuse가 없는 방식, 외장형 Fuse가 장착되어 있는 방식, 내부 소자별로 각각 내장 Fuse가 장착되어 있는 방식으로 나눌 수 있다[4]. 여기에서 대상으로 하는 Fuse는 내장형 Fuse이다. 내장형 Fuse 방식의 전력용 콘덴서는 초고압 송전선의 조상설비용이나 특히 안전도가 요구되는 변전설비용 등으로 사용되고 있다. 통상 콘덴서 뱅크는 여러 대의 단기 콘덴서의 직렬 및 병렬 결선으로 구성된다. 만약 콘덴서 뱅크 운전 중에 고장이 발생했을 경우 Fuse는 고장의 영향을 최소화하기 위해 고장이 발생한 콘덴서 또는 단기 콘덴서 내부의 최소한의 소자 부분만을 전원으로 분리하여 절연시켜주는 기능을 한다. 콘덴서에 내장된 Fuse는 콘덴서 내부 각 소자와 직렬로 결선되어 있으며, 유전체의 절연과 파괴가 발생함과 동시에 동작되도록 특수 설계된 금속 재질을 사용해야 한다. Fuse가 용단되는 경우는 크게, 고장소자로 돌입되는 전류에 의하여 Fuse가 용단되는 경우와 병렬로 결선된 소자에 저장된 에너지가 고장소자로 방출되어 Fuse가 용단되는 경우가 있을 수 있다. 한편, Fuse 자체의 저항에 의해서 손실이 발생하므로 고효율화 측면에서 손실을 줄일 수 있도록 설계해야 한다. 따라서, 전력용 콘덴서용 내장 Fuse의 재질 및 치수선정은 다음의 조건을 만족하도록 설계되어야 한다.

- 콘덴서 내전압 검사 중에는 우발적으로 Fuse가 용단되지 않아야 한다.
- 정상운전 중에 소자에 고장이 발생하여 돌입전류나 방전에너지가 고장소자로 방출되는 경우 Fuse는 용단되어야 한다.
- 고효율화 측면에서 Fuse 자체에서 발생하는 저항 손실이 최소가 되도록 설계되어야 한다.

위와 같은 Fuse의 설계 조건을 찾기 위해 Fuse를 여러 가지 형상으로 제작하여 용단시험을 실시하고 Fuse 형상에 따른 고유저항과 용단 에너지를 측정하였다. 그리고, Fuse를 콘덴서의 사양에 따라 적용하기 위한 기술을 개발하기 위해서 Fuse 내장형 모델 콘덴서를 제작하고 Fuse의 동작특성 시험을 실시하였다. 이후에 각각의 연구 내용에 대하여 그 결과를 기술하겠다.

2. 전력용 콘덴서용 Fuse 설계 및 적용기술

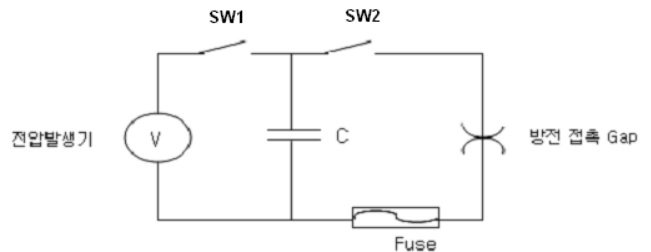
2.1 전력용 콘덴서용 Fuse 용단 시험

전력용 콘덴서용 Fuse의 대표적인 재질로는 Cu와 Ag가 사용되고 있다. 그동안 국내에서는 Fuse의 재질로 Ag를 사용해왔는데, Ag는 Cu에 비해 전기전도도가 좋아 Ag 재질의 Fuse가 Cu 재질의 Fuse에 비해 콘덴서 내부에서 발생하는 손실을 상대적으로 줄일 수 있지만 고가이어서 가격 경쟁력 측면에서 적용하기가 어려운 실정이 되었다. 따라서 Cu 재질의 Fuse로 대체하기 위해 설계데이터를 확보하고 적용하기 위한 기술 개발이 요구되었다.

Fuse는 크게 양극의 결선부와 Fuse 동작부로 구성되는데, 여기에서는 Cu와 Ag에 대하여 Fuse의 결선부는 고정시켜 두고, Fuse의 동작부의 길이를 변경시켜가면서 Fuse의 용단에너지를 측정하였다. 용단에너지는 <그림 1>에 도시한 바와 같은 용단시험회로를 이용하여 측정하였다. 먼저, 스위치 SW1을 닫고 스위치 SW2를 열어둔 상태에서 전압

생기로부터 에너지를 공급받아 콘덴서 C에 저장시킨다. 콘덴서에 에너지 저장이 완료되면 스위치 SW1을 개방시키고 스위치 SW2를 닫는다. 그리고 방전접촉 Gap을 통해 Fuse에 전류를 흘려 Fuse가 용단되는 에너지를 측정하였다.

<표 1>은 Fuse의 두 재질인 Cu와 Ag에 대하여 결선부를 고정시키고 Fuse 동작부의 길이를 변경시켜가면서 측정한 방전에너지와 Fuse의 저항값을 정리하여 제시한 것이다. 그리고 <표 2>는 Cu 재질의 Fuse에 대하여 Fuse의 동작부는 고정시키고, Fuse의 결선부를 변경하여 Fuse의 용단에너지에 있어서의 변화가 있는지를 확인한 시험 결과를 제시한 것이다. <표 2>에 제시된 바와 같이 Fuse 결선부의 길이는 Fuse의 용단 에너지와 무관함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 Fuse 자체의 용단특성은 유지하면서도 Fuse의 전체 길이를 줄임으로써 Fuse의 저항을 감소시켜 저항손실을 줄일 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.



<그림 1> 전력용 콘덴서용 Fuse 용단시험회로

<표 1> Fuse의 재질 및 형상에 따라 측정된 방전에너지와 저항값.

Fuse material	Fuse 형상 (결선부-Fuse동작부-결선부)			
	C1-L0-C1	C1-L1-C1	C1-L2-C1	C1-L3-C1
Cu 직경 D1	-	22.28 mΩ	18.00 mΩ	15.52 mΩ
	-	122 Joule	122 Joule	113 Joule
Cu 직경 D2	22.0 mΩ	18.50 mΩ	16.00 mΩ	14.80 mΩ
	200 Joule	170 Joule	160 Joule	150 Joule
Ag	-	16.77 mΩ	13.97 mΩ	12.04 mΩ
	-	122 Joule	113 Joule	105 Joule

<표 2> Fuse의 결선부 길이에 따른 저항값 및 방전에너지 비교

Fuse material	Fuse 형상 (결선부-Fuse부-결선부)	
	C1-L1-C1	C2-L1-C2
Cu 직경 D1	22.28 mΩ	17.57 mΩ
	122 Joule	122 Joule

2.2 Fuse 내장형 전력용 콘덴서의 Fuse 동작특성 시험

이 섹션에서는 위에서 제시한 Fuse 설계데이터를 Fuse 내장형 콘덴서의 Fuse 설계에 적용한 사례 및 Fuse 동작특성 시험 결과를 제시하고자 한다. Fuse의 설계 및 동작시험을 위해 제작된 모델콘덴서의 사양은 <표 3>과 같다.

Fuse를 콘덴서에 적용하기 위한 조건을 국제규격 IEC 60871-1 및 4를 참고하여 정리하면 다음과 같다[5-6].

- ① 콘덴서의 Routine 및 Type test 조건에서 Fuse가 동작되지 않을 것.
 - a. Routine test - Discharge test on internal fuses : $1.7 \cdot U_n$ DC, Once
 - b. Type test- Short circuit discharge test: $2.5 \cdot U_n$ DC, 5 times/10min

- ② 고장발생시 오직 고장소자의 Fuse만 동작할 것.
 - a. Disconnecting Lower voltage limit : $0.9 \cdot U_n \cdot \sqrt{2}$ DC
 - b. Disconnecting Upper voltage limit : $2.2 \cdot U_n \cdot \sqrt{2}$ DC

위의 Fuse 설계 조건을 1758VAC 1P 60Hz 111kvar에 적용해 보면 다음과 같다.

- ① Routine 및 Type test 에서 요구되는 Fuse 강도
 - a. Discharge test on internal fuses ($1.7 \cdot U_n$ DC) : 43 Joule
 - b. Short-circuit discharge test ($2.5 \cdot U_n$ DC) : 92 Joule
- ② 고장순간에 고장소자의 Fuse에 돌입되는 Energy 양
 - a. Disconnecting Lower voltage limit ($0.9 \cdot U_n \cdot \sqrt{2}$ DC) : 215 Joule
 - b. Disconnecting Upper voltage limit ($2.2 \cdot U_n \cdot \sqrt{2}$ DC) : 1282 Joule

- ③ 고장순간에 정상소자가 Fuse를 통해 방출하는 Energy 양
 - a. Disconnecting Lower voltage limit ($0.9 \cdot U_n \cdot \sqrt{2}$ DC) : 24 Joule
 - b. Disconnecting Upper voltage limit ($2.2 \cdot U_n \cdot \sqrt{2}$ DC) : 143 Joule

이 결과로부터 모델콘덴서용 Fuse는 적어도 143Joule보다 높고 215Joule보다는 낮은 용단에너지를 갖도록 선정되어야 함을 알 수 있다. <표 1>로부터 직경 D2의 Cu 재질 Fuse는 모두 대상이 될 수 있음을 알 수 있다. 여기에서는 손실을 고려하여 저항값이 작으면서도 Fuse의 안정적인 동작을 위해 약간의 여유도를 가질 수 있도록 "C1-L2-C1" 타입의 Fuse를 선정하였다. 이하에서는 위의 조건에 따라 설계된 Fuse를 내장한 모델콘덴서에 대하여 실시한 콘덴서 단자-케이스간 내전압 시험, 단자간 내전압 시험 및 Fuse 동작시험에 대하여 기술하겠다.

먼저, 제작된 Fuse 내장형 콘덴서에 대하여 콘덴서 단자-케이스간 내전압시험과 단자간 내전압시험을 실시한 결과를 <표 4>에 정리하여 제시하였다. 그 결과 모델콘덴서 5대 모두 정상적으로 시험을 통과하였다. 다음으로 Fuse 동작특성시험을 실시하였다. Fuse 동작특성시험은 국제규격 IEC 60871에 따라 단락방전시험과 Fuse 단선시험으로 나누어 진행하였다. 단락방전시험의 목적은 내부 결선에서의 결함을 찾아내기 위한 것으로 시험은 다음의 순서로 진행하였다.

- ① 피시폼 콘덴서를 직류 전압에 의해서 충전시킨다. 충전전압은 정격전압의 2.5배이다.

시험전압 = $2.5 \times$ 정격전압

- ② 충전된 콘덴서와 가능한 한 가깝게 배치된 방전 캡을 통해 콘덴서에 충전되어 있는 에너지를 방전시킨다.
- ③ 위의 ①과 ②를 10분 이내에 5회 실시한다.
- ④ 시험 후 5분 이내에 피시폼 콘덴서에 대하여 단자간 내전압 시험을 실시한다.
단, 단자간 내전압 시험전압은 정격전압의 4배이다.
- ⑤ 단락방전 시험 전후에 있어서 정전용량을 측정하고, 두 측정치 사이의 차이가 콘덴서 소자 하나의 절연과피나 내장 퓨즈의 동작에 상응하는 양보다 작아야 한다.

위의 단락방전시험 규격에 따라서 모델콘덴서에 대하여 아래와 같이 시험을 실시하였는데, 모두 정상적으로 시험에 통과하였다.

- 시험전압 : DC $2.5 \cdot U_n = 4,395$ V
- 시험횟수 : 5회/10분 이내
- 방전시험 후 단자간 내전압 시험 7,032 DCV*10s 이상 없음

마지막으로 Fuse 단선시험을 실시하였다. Fuse 단선시험은 국제규격 IEC 60871-4[46], 1996-08의 "Annex A ; A.2 Test procedure (b) Mechanical puncture of the element"에 따라 수행되었으며 그 결과는 <표 5>에 정리하여 제시하였다.

<그림 2>는 Fuse 단선시험 장비를 보인 것이다. Fuse 단선시험은 일반 시험 특히 단자간 내전압 시험을 종료한 후에, 콘덴서를 <그림 2>와 같이 절연유가 담긴 통에 반쯤 잠기게 한 상태에서 케이스 표면에 구멍을 뚫고 단자 간에 전압을 인가하는 것으로 시작한다. 인가 전압이 최대치에 도달하면 케이스 표면에 뚫어놓은 구멍을 통해서 에어실린더를 동작시켜 금속침을 투입하여 소자에 기계적인 힘을 가함으로써 소자의 전극간에 전기적인 단락을 유도한다. 이후 Fuse의 동작특성을 확인한다. <그림 3>은 고장이 발생한 콘덴서 소자와 Fuse의 용단에 의해 분해된 Fuse의 잔해물을 보인 것이다. 이 그림으로부터 고장이 발생한 콘덴서 소자와 직렬로 결선된 Fuse가 정확히 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

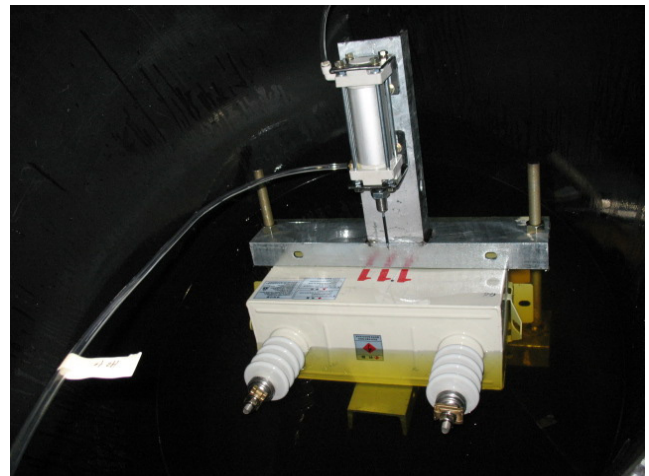
<표 3> Fuse의 설계 및 동작특성시험용 모델콘덴서 사양

시작품 정격	1758VAC 1P 60Hz 111kvar, 총 5대
형 식	전력용 고압 콘덴서 (Fuse 내장형)
전위경도	80.3 V/um
결선 구성	1직렬 × 10병렬
Fuse 요구사양	IEC 60871-1

<표 4> 모델콘덴서의 단자-케이스간 및 단자간 내전압시험 결과

단자-케이스간 내전압시험 50,000 VAC 10s	단자간 내전압시험 7,032 DCV 10s
N=5, R=0	N=5, R=0

단, N=시료수, R=불량수임.



<그림 2> Fuse 단선 시험 전경



<그림 3> 고장이 발생한 소자와 Fuse가 용단되어 생성된 잔해

〈표 5〉 Fuse 단선시험결과

구 분	Lowest voltage limit 2238 DCV	Highest voltage limit 5470 DCV
초기용량 [μF]	11.94	11.96
시험 후 용량 [μF]	10.68	10.65
용량변화 [%]	89%	89%

※ Test Method reference
IEC 60871-4:1996 ; Annex A A.2 Test procedure
(b) Mechanical puncture of the element

3. 결 론

본 논문에서는 초고압 송전선의 조상설비나 안전도가 요구되는 변전설비 등에서 역률 개선용으로 사용되는 전력용 콘덴서용 Fuse의 설계 및 적용 기술에 관하여 고찰하여 보았다. 먼저, Fuse의 용단시험을 실시하여 Fuse의 재질과 형상에 따른 용단에너지를 데이터베이스화함으로써 향후, 전력용 콘덴서의 Fuse 설계에 적용할 수 있도록 하였다. 그리고, 제시한 데이터베이스를 이용하여 Fuse 내장형 모델콘덴서의 Fuse 설계에 적용하고 단자-케이스간 내전압시험, 단자간 내전압시험과 같은 일반시험과 단락방전시험 및 Fuse 단선시험 등의 Fuse의 동작특성시험을 실시하여 Fuse가 설계된 대로 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다. 이로써, 그동안 고가의 Ag 재질의 Fuse 타입에서 탈피하여 Cu 재질용 Fuse에 대한 설계기술을 확보하게 되어 향후, 국내 전력용 콘덴서 제조사의 가격 경쟁력에 미력이나마 도움이 될 것으로 기대해 본다.

[감 사 의 글]

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지 • 자원기술개발사업의 연구결과입니다. 본 연구의 결과를 위해 도움을 주신 삼화콘덴서공업주식회사 관계자 여러분께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", CRC Press Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2005
- [2] R.E. Marbury, "POWER CAPACITORS", Westinghouse Electric Corporation, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., pp.64-66, 1949
- [3] 大森武司 외 1인, "전력용 콘덴서", 전기서원, pp.15-30, 1965
- [4] "고효율 진상용 콘덴서 개발", 에너지 • 자원기술개발사업보고서, p.19, 2008
- [5] IEC 60871-1:2005, Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V -- Part 1: General
- [6] IEC-60871-4:1996, Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V -- Part 4: Internal fuses