

전기화재에 따른 진공차단기의 견전성 평가

(A Study on the Evaluation of Reliability of the Vacuum Circuit Breaker
for the Electrical Fire)

최홍규* · 박준열**

(Hong-Kyoo Choi · Joon-Yeol Park)

Abstract

Fire-hited electrical equipment has possibility of deterioration. So its replacement is essential in terms of safety. However, the economic burden is increased. Therefore, the replacement or re-use of it is to be determined by tests. But the research of Integrity Assessment on Fire-hited electrical equipments is very rare.

In this paper, we tested to determine the replacement or re-use of Fire-hited vacuum circuit breaker. And provided the data for the integrity assessment through the analysis of its deterioration.

Key Words : Fire-hited Electrical Equipments, Vacuum Circuit Breaker, Integrity Assessment

1. 서 론

국내에서 발생하고 있는 화재에 대한 원인 분류는 크게 방화, 실화, 자연적 원인, 미상 등 네 가지로 구분된다. 그 중 실화 원인 분류는 크게 발화요인, 발화열원, 최초 착화물로 구분하고 있으며, 발화요인별로는 전기, 기계, 화학적 원인, 부주의 등으로 분류하고 있

다. 최근 10년간 나타난 전기화재건수를 보면 계속적으로 발생건수가 줄어들지 않고 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 최근 국내에서 발생한 화재를 보면 47,318건(2009년)으로 순수 전기적 요인으로 발생한 화재건수는 9,391건으로 19.8%의 높은 점유율을 차지하고 있다[1].

전기화재가 특고압 수전의 변전실에서 일어나는 경우 수용가의 전체 정전은 불가피하며, 복구하는 시간 역시 장시간 소요되어 생산 장애를 초래하여 심각한 피해를 유발하게 된다. 특고압 수전설비에서 차단기는 중요한 전력설비이다. 전력계통에 이상이 발생하면 이상개소를 계통으로부터 분리하여 계통의 사고과급 방지와 전기 공작물의 손상을 최대한도로 줄이기 위하여 고장 시 보호계전기와 차단기가 협조하여 보호 시스템을 구성하여 정상상태의 전류를 투입, 통전, 차단할 수 있고, 또한 회로단락과 같은 이상적인 상태

* 주저자 : 홍익대학교 과학기술대학 전자·전기공학과 교수
** 교신저자 : 홍익대학교 전자전기공학부 교수
* Main author : Professor, Department of Electronics and Electrical Engineering, College of Science and Technology, Hongik University
** Corresponding author : Professor, Department of Electronic and of Electrical Engineering, Hongik University
Tel : 044-860-2610, Fax : 044-863-7605
E-mail : gomandol@naver.com
접수일자 : 2013년 2월 14일
1차심사 : 2013년 2월 16일
심사완료 : 2013년 5월 6일

에 있어서도 전류를 끊고 일정시간의 통전, 차단이 가능하도록 설계된 개폐장치이다[2].

전기화재로 인한 화재의 원인을 입증하고 규명하기 위해 선행 연구 자료가 국내·외에서 이미 많이 진행되고 있는 상태이나, 화재로 인한 전력설비의 재사용 검토에 관한 수용가 판단에 근거를 제시할 자료연구는 미비한 상태이다.

본 연구는 전기화재와 관련한 외부화염에 의해 2차 피해를 당한 22.9kV 변전소내 특고반 차단기를 대상으로 재사용여부를 결정하기 위하여 절연저항, 점접점 접촉저항, 코일저항, 유전정접, 부분방전 등의 전기적 진단기술과 개폐특성, 진공압력 등의 기계적 진단기술을 활용하여 열화의 정도를 정량적으로 분석한 후 건전성을 평가 할 자료를 제공하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시험 및 검사항목

진공차단기의 건전성을 평가하기 위해서는 (표 1과 같이) 전기적 진단항목과 기계적 진단기술을 활용하여 열화의 정도를 평가하여야 한다[3].

표 1. 진공차단기 시험 및 검사항목
Table 1. Vacuum Circuit Breaker Testing and Inspection Items

특성 분류	시험 및 검사항목
전기적 진단	절연저항 측정
	점접점 접촉저항 측정
	코일 저항 측정
	유전정접 시험
	부분 방전 시험
기계적 진단	차단기 동작특성 시험
	진공도 측정

2.2. 사례 연구

화재사고가 발생한 변전소 내에는 총 60면 중 56면에 진공차단기가 설치되어 있었으며, 화재로 인한 화

염 및 그을음으로 오염상태가 심하여, 진공차단기에 대한 Cleaning 및 Overhaul이 필요한 상태였다.

따라서 진공차단기에 대한 시험 및 검사는 오염상태와 Cleaning 및 Overhaul후로 각각 2회씩 실시하였으며, 이에 따른 측정값의 변화를 검토하였다.

본 논문에서는 56대의 진공차단기중 (표 2에서 처럼) 10대에 대해서 그 측정값을 비교 평가한다.

2.2.1 접촉저항 및 진공도 측정

표 2. 접촉저항 및 진공도 측정 결과 값
Table 2. Contact Resistance and Degree of a Vacuum Measurement Results

시료 번호	접촉저항 $\mu\Omega$			진공도 측정
	R	S	T	
1	32.5	29.3	31.3	양호
2	31.3	32.1	29.1	양호
3	30.1	31.0	30.4	양호
4	28.5	30.0	30.0	양호
5	30.8	30.7	31.1	양호
6	29.4	31.1	29.4	양호
7	33.7	32.4	34.3	양호
8	31.8	31.9	33.5	양호
9	32.3	33.7	32.9	양호
10	30.6	31.2	31.3	양호

※ 제작사 접촉저항 기준 : 35.3 $\mu\Omega$ 이하, 진공도 : 누설전류 0.3mA이하 일 것.

표 2 시료 중 3번, 6번 시료는 화재사고 당시 오염 및 손상이 심하여 사고현장이 아닌 다른 장소에서 반입한 진공차단기이나, 사고 현장의 진공차단기와 동일 제작사에서 동일시기에 납품된 차단기로서 본 사례연구의 건전성 평가에 비교 시료로 참고 사례가 될 수 있다.

표 2의 결과값을 보면 전기화재로 인하여 진공차단기 내부의 각 상 접촉저항 및 진공도에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다.

2.2.2 차단기 동작특성

차단기의 동작시퀀스와 동작시간 등을 측정하여 차단기의 기계적 특성을 파악하는 동작특성시험 표 3과

전기화재에 따른 진공차단기의 건전성 평가

그림 1을 보면 전체 시료의 시험 값이 제작사 기준값을 만족함을 알 수 있다. 각 상의 동작 최대값과 최소값의 차이인 개리차도 기준치 3ms를 초과하지 않는 정상상태이다.

표 3. 차단기 동작특성 시험
Table 3. Breaker Operating Characteristic test

시료 번호	동작특성					
	투입특성(close) ms			차단특성(Open) ms		
	R	S	T	R	S	T
1	47.7	47.35	48.25	31.8	32.65	31.7
2	50.25	49.9	49.95	32.4	32.35	31.35
3	50.55	51.05	51.05	38	36.45	37.55
4	68.4	67.8	68.1	44.9	45.15	45.15
5	47.9	48.15	48	30.1	29.75	28.95
6	49.65	49.1	49.3	32.7	32.85	33.1
7	47.8	48	48.25	32.25	32.45	32.6
8	47.6	47.05	47	28.25	30.15	28.75
9	49.9	49.65	50.25	35.05	34.35	34.05
10	49.65	49.55	50	31.6	31.65	30.6

※ 제작사 동작특성 기준 : 투입 100ms이하, 차단 50ms이하[4]

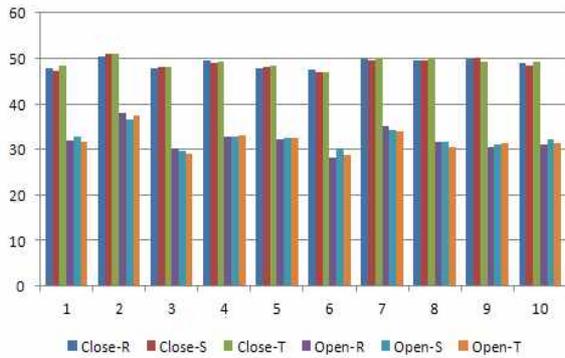


그림 1. 차단기 동작특성 그래프
Fig. 1. The Graph for Breaker Operating Characteristic

따라서 화재피해를 입은 차단기의 기계적 특성인 접촉저항, 진공도 측정, 차단기 동작특성 등의 시험값들을 보면 화재로 인한 직,간접 피해시 차단기의 기계적 특성 변화는 크게 발생하지 않음을 알 수 있다.

2.2.3 절연저항 및 코로나 측정

표 4. 절연저항 및 코로나 결과값
Table 4. The result of Insulation resistance and Corona

시료 번호	절연저항 GΩ				코로나 dB
	Cleaning 전		Cleaning 후		
	상-대지	상-상간	상-대지	상-상간	
1	0.2	1.1	76	529	82
2	0.3	1.1	5	21	89
3	3000	3000	3000	3000	3
4	20	87	45	181	31
5	0.2	1.1	13	679	100
6	3000	3000	3000	3000	1
7	5.9	25.8	11.2	48.9	100
8	679	2370	1630	3000	15
9	2.6	10.5	30	119	100
10	0.8	15	68	348	48

※ 제작사 절연저항 기준 : 2GΩ이상 일 것.

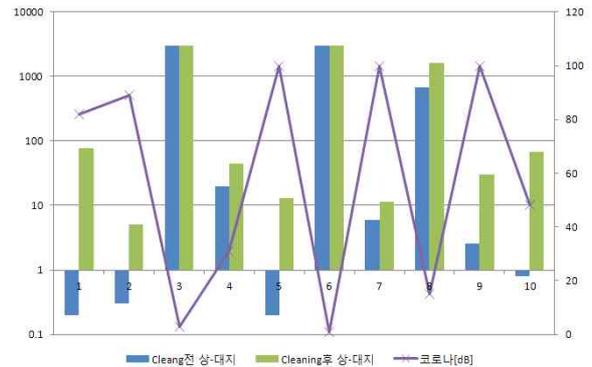


그림 2. Cleaning 전후 절연저항과 코로나 관계
Fig. 2. The before Cleaning and after Cleaning, the Insulation Resistance and the Relationship Between the Corona

표 4와 그림 2를 보면 절연저항값이 Cleaning 전후를 비교하면 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 시료 1, 2, 5, 10번의 경우 상-대지간 절연저항값이 기준치 2GΩ이하 또는 근접하였으나, Cleaning을 실시한 후에는 기준값을 초과하였다.

즉 진공차단기 표면 및 하우징부분의 이물질 등을 제거함으로써 어느 정도의 절연저항을 확보할 수 있지만, 건전한 시료 차단기 3번, 6번에 비하면 절연저항이 상당히 저하되어 있으며, 이에 가압시 코로나 발생 등 부분방전 현상이 발생하는 것을 알 수가 있다. 실제로 현장조사 기간 중 우천 등 습도가 높은 날에는 절연저항이 낮은 차단기반에서 코로나 소음의 발생이 매우 높게 나타났다.

2.2.4 유전정접 시험(Doble Test)

절연재료에 교류전압을 가했을 때 재료가 이상적인 유전체라면 전압과 전류의 위상차 θ 는 90° 가 되지만 일반적인 절연재료에서는 $\theta < 90^\circ$ 가 되어 전압과 같은 상의 전류성분 I_R 이 흘러 유전체손이 발생하게 된다[5].

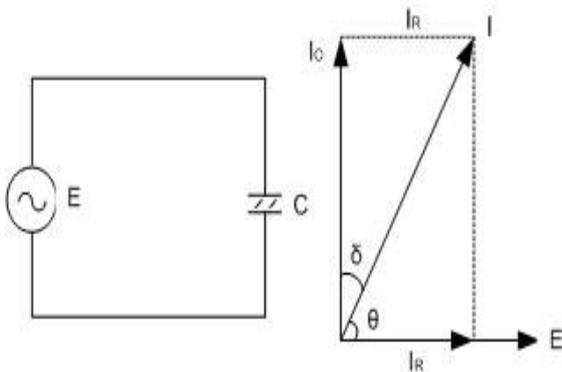


그림 3. Cleaning 전후 절연저항과 코로나 관계
Fig. 3. The before Cleaning and after Cleaning, Insulation resistance and the relationship between the corona

그림 3은 이 관계를 나타내는 벡터도로써 그림 중의 δ 가 유전손각, δ 의 정접 $\tan\delta$ 가 유전정접이다. 유전체 손에 의한 소비전력을 W , 인가전압을 E , 정전용량을 C 라고 하면

$$W = E I \cos\theta = E^2 \omega C_0 \epsilon_s \zeta \cos\theta = E^2 \omega C_0 \epsilon_s \zeta \tan\delta$$

여기서 $\epsilon_s \epsilon$ 는 비유전율, C_0 는 기하학적 정전용량이 되고 W 는 재료의 $\epsilon_s \tan\delta$ 에 비례한다.

따라서 유전율 ϵ 실용적으로는 비유전율 ϵ_s 그리고 유전정접 $\tan\delta$ 는 절연재료에 대한 특성평가의 중요한 지표가 된다.

표 5. 유전정접 시험

Table 5. The Test of Dissipation Factor

시료 번호	유전정접(Doble Test) %					
	Cleaning 전			Cleaning 후		
	R	S	T	R	S	T
1	29.18	27.75	18.56	15.81	13.02	5.82
2	30.37	24.11	26.86	13.45	12.74	13.33
3	0.18	0.11	0.15	0.22	0.11	0.18
4	7.13	7.19	7.47	6.78	7.56	7.22
5	34.96	23.76	32.85	9.28	7.19	4.97
6	0.11	0.13	0.11	0.12	0.16	0.12
7	10.26	7.54	5.68	7.25	5.56	4.4
8	6.99	4.2	3.64	5.15	3.01	3.22
9	28.41	39.65	39.4	22.21	26.03	19.59
10	17.95	11.67	18.56	8	7.73	6.54

※ 장비 제작사 유전정접 기준 : 진공차단부는 0에 가까운 유전손실을 가질 것[6]

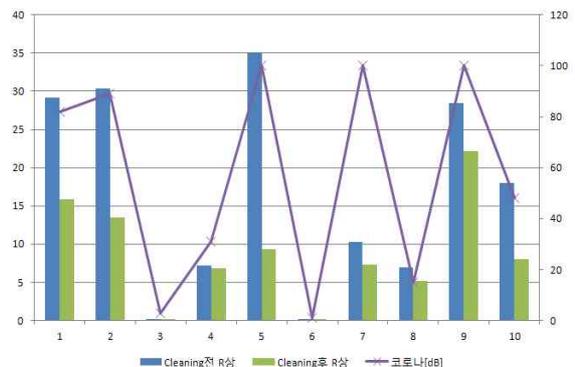


그림 4. Cleaning 전후 유전정접과 코로나 관계
Fig. 4. The before Cleaning and after Cleaning, Dissipation Factor and the Relationship Between the Corona

표 5와 그림 4는 유전정접시험 결과값을 나타내고 있다. 기준 시료 3, 4번의 경우 제작사 및 시험장비의 권장치인 “0”에 가까운 유전정접값을 가짐을 알 수 있다.

따라서 3, 4번 차단기에서는 코로나가 발생하지 않음을 볼 수 있으며, 유전체손실이 큰 차단기 일수록 코로나 발생 빈도가 높음을 알 수 있다.

부분방전으로 발생하는 코로나의 상관관계가 절연 저항보다는 유전정접과 많이 일치하고 있음도 알 수 있다.

2.3. 정밀진단 결과

화재피해를 입은 진공차단기에 대하여 정밀진단을 실시한 결과 차단기 성능 유지에 중요한 기계적 성능(동작특성, 접촉저항, 진공도 등) 및 전기적 절연성능(절연저항, 유전정접)에 있어서 기계적 성능은 화재에 의한 큰 피해가 없음을 알 수 있었다. 그러나 전기적 절연성능에 있어서는 Cleaning 등 일부 개소에 대한 개보수를 실시하였을 때 절연저항과 유전정접 값이 일부 개선되어짐을 알 수 있으나 건전한 시료에 비해서는 회복되지 않음을 할 수 있다.

이는 표 6의 절연재료별 물성 특성을 참고하면 진공 차단기 상간 충전부 절연 격벽으로 사용하고 있는 하우징의 재질이 BMC(Bulk Molding Compound : 불포화 폴리에스테르 등 혼합 성형재)의 운용 온도는 -40 ~ 150°C이다. 이러한 BMC가 200°C이상의 열적 스트레스를 받게 되면 절연저항은 급격히 떨어지며 이후 물성은 회복되지 않은 특징을 가지고 있다[7].

이러한 특성 때문에 화재사고의 진공차단기는 절연 성능이 저하하게 된다.

표 6. 절연재료별 물성 특성
Table 6. The Characteristics of the Physical Properties of Insulating Materials

분류	재료	Class content	열변형 온도	내 아크성	내 트레킹
		%	℃	sec	CTI
열화성재료	BMC	10~20	200<	150~190	600<
	SMC	30	200<	130~150	600<
열가소성재료	ABS	0	80~105	120~130	-
	PBT	30	205~220	100~140	-

3. 결 론

전기화재에 직간접적으로 노출된 진공차단기를 포함한 전기설비는 기계적인 강도 및 동작특성에는 큰 영향이 없지만 열적 스트레스에 의한 물성변화에 따라 절연성능이 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

따라서 전기화재에 노출된 전기설비의 건전성 평가 및 교체·재사용 등을 관정함에 있어서 전기설비의 절연성능에 대한 진단 및 점검 위주로 진행하여야 한다.

본 연구는 2012학년도 홍익대학교 교내 연구비로 수행되었음.

References

- [1] National Emergency Management Agency, Statistical Yearbook of fire(2010).
- [2] Hong-Kyoo Choi et al, "The latest power facilities using equipment design" Sungandang.
- [3] The Institute of Electrical Engineers of Japan "The diagnostic skills of the power equipment" The Korean Institute Institute of Electrical Engineers.
- [4] LSIS Co., Ltd. vacuum circuit breaker Inspection Data.
- [5] KS C 2135 "Testing methods for AC loss characteristics and permittivity(Dielectric constant) of solid electrical insulation" 1996.
- [6] Korea Electric Power "Measurement of deterioration of insulation" manual.
- [7] Composites Research Journal Volume 1, Issue 4 Fall 2007.

◇ 저자소개 ◇



최홍규 (崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 현재 홍익대학교 과학기술대학 전자·전기공학과 교수.



박준열 (朴俊烈)

1950년 3월 20일생. 1974년 서울대학교 졸업. 1977년 서울대학교 졸업(석사). 1987년 서울대학교 졸업(박사). 1988~1989년 City University(London) 객원교수. 1980년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.