

Pre-Condition 시험을 고려한 Puffer식 차단기의
진상소전류 차단성능에 관한 연구

안희섭, 윤정훈, 이종철, 최종웅, 오일성, 이성호
(주)LG산전

A Research on Dielectric Characteristics of Small Current Interruption
Considering Pre-Condition Test for Puffer Type Circuit Breaker

Heui-Sub Ahn, Jeong-Hoon Yoon, Jong-Chul Lee, Jongung Choi, Il-Sung Oh, Sung-Ho Lee
LG Industrial Systems

Abstract - This paper presents the small current interruption capability of SF₆ puffer circuit breaker considering pre-condition. Firstly, the change of dielectric strength of the 3 breakers was compared with testing breakers as clean contacts and eroded contacts after 3 shots of T60 according to new IEC 62271-100 standard. Also the dielectric strength curve of each model was calculated through flow and electric field simulations. From these results, we could modify the empirical equation, being used to predict the dielectric strength of small current interruption capability, considering the effects of pre-condition.

1. 서 론

차단기는 전력계통에 고장이 발생할 경우, 고장전류를 자동적으로 차단하여 계통과 다른 전력기기를 보호하는 역할을 한다. 차단기에서 진상소전류 차단책무는 대전류 차단책무와 함께 차단기가 갖추어야 할 기본 성능 중의 하나이다.

2001년 IEC규격 62271-100의 개정으로 진상소전류 차단시험은 기존규격에 비해 훨씬 가혹해졌다. 대표적인 변화로는 재발호의 확률에 따라 차단기는 C1과 C2의 등급으로 구분되며 전체적인 시험횟수도 증가하였다. 특히 C2등급은 사전시험(pre-condition test)으로 T60(단차단락고장 차단전류의 60%)책무에 해당하는 전류를 3회 차단후 실시하여야 한다. 사전시험 시 주입되는 전류와 이에 따른 아크의 영향으로 시험 후 접점이나 노즐에 손상이 발생하며 결국 차단기의 절연내력이 사전시험이 없는 경우에 비해 저하된다. 따라서 사전시험을 고려한 진상소전류 차단성능에 관한 연구는 차단기의 차단능력에 대한 신뢰성의 제고 차원에서 점점 중요해지고 있다.

차단기의 차단성능을 예측, 평가하기 위해 CAE를 이용하는 방법은 널리 사용되고 있다[1]. 일반적으로 진상소전류 차단성능의 예측은 유동과 전계가 결합된 실험식을 통하여 절연내력을 구한다. 이러한 해석적인 절연성능 예측방법은 다양한 모델에 적용되어 검증이 되었고 계속 연구가 진행되고 있다[2]. 그러나 차단성능 예측에 사용되는 실험식은 접점이나 노즐의 손상이 없는 경우에 적절한 것으로 사전시험에 의해 손상된 접점 등의 영향을 충분히 고려할 수 있는 지에는 충분한 연구가 진행되지 않았다. 만약 사전시험의 영향을 해석적으로 충분히 고려할 수 없다면 이것의 영향을 고려할 수 있는 실험식의 변경에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 동일한 조작력을 가진 3종류의 차단기로 T60시험을 하지 않은 조건과 T60시험을 한 조건에 대해 각각 진상소전류 시험을 실시하여 T60시험이 소전류 차단성능에 미치는 영향에 대해 분석을 하였다. 또한

차단성능의 해석적 예측을 위해 현재 사용하고 있는 실험식과 시험결과를 비교하여 실험식의 적용가능 여부에 대해 연구를 하였다.

2. 차단 성능 시험 및 성능 예측

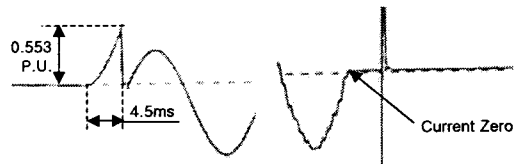
시험에 사용된 3종류의 차단기는 동일한 구조와 조작력을 가지고 있으며 각 모델별로 소후부 형상에 약간의 차이가 있다.

2.1 모델 "A"

모델 A는 T60시험을 하지 않은 상태에서는 차단시험에 성공하였으며 T60시험 후 차단에 실패하였다.

2.1.1 진상소전류 차단시험

그림 1은 모델 A의 T60시험을 3회 실시한 후의 진상소전류 시험결과를 나타낸다. 차단기는 전류영점(Current Zero)에서 순간적으로 전류를 차단하나 4.5ms 후 절연파괴가 발생하여 전류차단에 실패하였다. 재발호가 발생한 시간은 전류영점 후 약 4.5ms후이며, 과도회복전압은 최대전압의 약 55% 정도였다. 이러한 재발호는 총 24회 시험 중에 1회가 발생하였으며 발생한 위치는 전체 스트로크(stroke)의 약 40%지점이다. 위 시험의 결과로부터 T60 사전시험이 진상소전류의 차단성능에 주는 영향을 정성적으로 알 수 있었다.



(A) Voltage between contacts (B) Interruption Current

Fig. 1 Voltage and Current of the failed test

2.1.2 진상소전류 차단성능 예측

진상소전류의 차단성능을 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 식 (1)을 사용하였다. 여기서, a와 b는 실험에서 결정되는 실험 상수이다[3].

유동 및 전계 해석에서 밀도 ρ 와 전계 E를 구하며 이 값으로 차단기의 절연내력(Dielectric Strength) V_{bd} 를 계산한다. 계산된 절연내력을 전류차단 후 극간에 인가되는 과도회복전압(Transient Recovery Voltage ; TRV)곡선과 비교하여 차단성능을 평가한다. 식 (2)는 과도회복전압을 나타내는 식이다. 여기서, V_n 은 차단기 정격전압, F_k 는 전압계수, F_p 는 차단기 점절 수를 나타낸다.

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E} \quad (1)$$

$$V(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_n \times (1 - \cos(\omega t)) \times F_k \times F_p \quad (2)$$

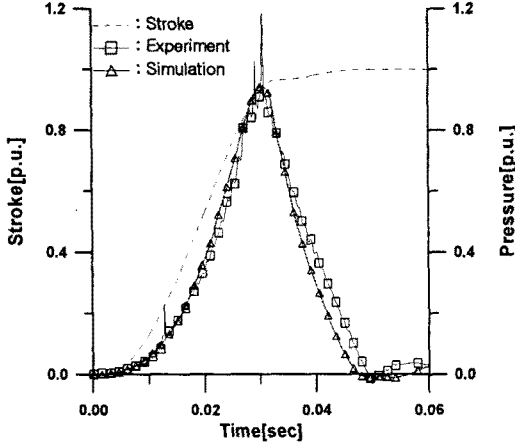


Fig. 2 Comparison of pressure at compression chamber

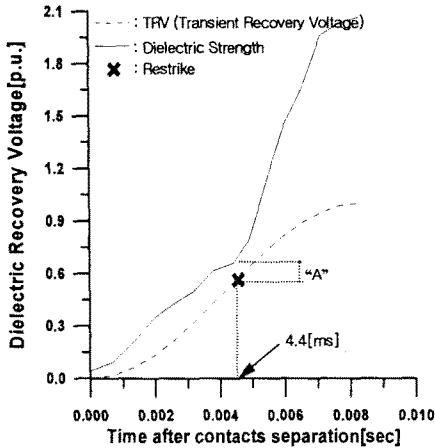


Fig. 3 Dielectric Characteristics of the Model A

그림 2에 유동해석의 정확도를 검증하기 위해 실험으로 측정이 가능한 압축실의 무부하 압력상승을 해석결과와 비교하였다. 해석결과는 실험결과와 거의 유사하며 이로써 절연내력의 예측에 사용되는 밀도 값은 차단기내부의 유동현상을 적절히 나타낸다고 할 수 있다.

그림 3은 밀도와 전해석 결과를 식(1)에 적용하여 구한 절연내력과 전류차단 후 극간에 인가되는 과도회복전압을 도시한 그림이다. 해석에서 구한 차단기의 절연내력이 인가되는 과도회복전압보다 크므로 이 차단기는 진상소전류 차단성능을 확보하고 있다고 판단된다. 시험결과와 비교했을 때 모델 차단기는 T60을 하지 않은 조건에서 진상소전류 차단에 성공하였으며 이는 해석결과와 잘 일치한다.

또한 이 차단기는 T60을 3회 실시 한 후 소전류 차단 시험에 실패하였다. 해석결과와 시험결과를 비교하면 해석으로부터 구한 절연내력이 회복전압의 차이가 가장 작은 곳은 개극 후 약 4.4ms이 지난 후이다(Fig.3). 이것은 시험에서 절연이 파괴된 4.5ms와 비교하면 거의 동일한

시점이 된다. 위의 결과로써 T60시험에 의한 차단기의 성능저하는 그림 3의 "A"부분 이상이 됨을 알 수 있었다.

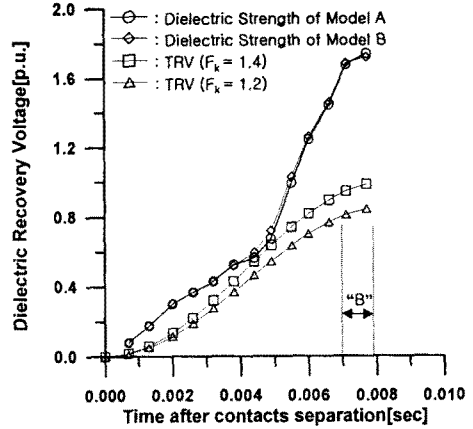
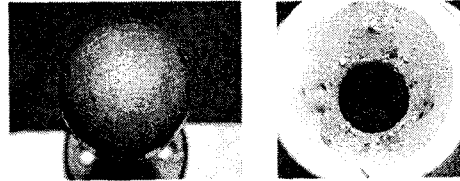


Fig. 4 Dielectric Characteristics of the Model B



(A) Fixed Main Contact (B) Main Nozzle

Fig. 5 Pictures of contact and nozzle after T60 Test

2.2 모델 "B"

모델 B는 모델 A와 비교하여 보조노즐의 형상에서 차이가 나며 모델 A의 시험조건과는 달리 전압계수를 1.2에서 1.4로 변경하여 좀 더 가혹한 과도회복전압의 조건에서 시험을 하였다. 그림 4에 전압계수에 따른 과도회복전압을 표시하였으며 기존에 비해 회복전압의 최대값은 약 20%정도 증가하였다.

2.2.1 진상소전류 차단시험

모델 B는 모델 A와 동일하게 T60시험을 하지 않은 조건에서는 차단에 성공하였고 T60시험을 한 후에는 실패하였다. 재발호가 발생한 위치는 그림 4의 B부분으로 전계스트로크의 약 55~65%인 지점이며 모델 A보다 접점이 더 이동한 후 차단에 실패하였다.

그림 5는 T60시험 후의 접점과 노즐이 손상된 상태를 나타낸다. 가장 심각하게 손상을 입은 부위는 고정접점으로 표면조도가 신봉에 비해 약 6~7배 정도 증가하였다. 이러한 표면조도의 증가는 전계에 악영향을 미치므로 차단성능의 감소를 야기시킨다. 또한 노즐이 아크의 영향으로 손상이 되었으며 특히 노즐목 부위에서 심하게 발생하였다. 노즐목 부위는 유동 및 전계특성과 관련이 있는 부분으로 아크에 의한 노즐의 용삭도 차단성능에 영향을 주는 요인이 된다.

2.2.2 진상소전류 차단성능 예측

그림 4에 모델 B의 절연내력을 모델 A와 비교하여 나타내었다. 모델 B의 여유율은 전압계수가 1.4인 과도회복전압과 비교했을 때 전압계수가 1.2인 모델 A의 여

유율 보다 약 4~5%정도 높았으며 또한 여유율이 가장 작은 곳은 모델 A와 동일한 지점이었다. 모델 B는 차단에 실패하였으나 A모델에서 재발호가 발생한 지점에서는 재발호가 발생하지 않고 이 위치보다 더 이동한 후에 재발호가 발생하였다. 따라서 모델 A의 재발호 지점에서 모델 A, B의 여유율을 비교함으로써 T60시험에 의한 절연성능의 저하를 고려한 소전류 차단성능 예측을 할 수 있다.

모델 B에서 재발호가 발생한 위치는 그림 4의 "B"부분으로 절연내력과 회복전압을 비교하면 충분한 여유가 있는 부분이다. 이 위치에서의 유동해석결과를 살펴보면 노즐 확대부와 고정아크접점사이에 충격파가 발생하고 있다. 그림 6은 노즐과 접점부위의 마하수 분포를 나타내고 있다. 노즐의 발산각이 확대되는 부위에 마하수가 1보다 큰 초음속 유동장이 형성되며 하류장의 유동특성에 의해 충격파가 발생하고 있다.

충격파가 절연성능에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있다[4]. 충격파의 전면에는 밀도가 약한 부분이 존재하고 이 부분에서 절연파괴가 발생할 확률이 높다. 일반적으로 충격파는 압력비와 단면적을 적절히 조절하면 제어를 할 수 있다. 그러나 파퍼식 가스 차단기는 차단원리가 압축된 압력에너지를 이용하는 것으로 차단을 위해서는 기본적으로 필요한 압력이 있으며, 이러한 압력비를 조절하는 것은 쉽지 않다. 또한 접점과 노즐사이의 유로단면적을 넓게 함으로써 충격파의 크기 및 발생위치를 변경할 수 있으나 단면적의 증가로 인한 대전류차단 성능을 고려한다면 변경할 수 여유가 그다지 크지 않다.

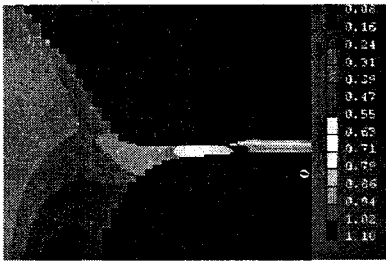


Fig. 6 Mach No. distributions at Nozzle of Model B

2.3 모델 "C"

모델 C는 T60시험 후 진상소전류 차단시험에 성공하였다.

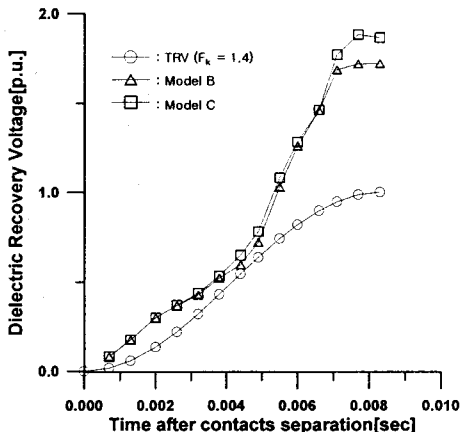


Fig. 7 Dielectric Characteristics of the Model C

그림 7에 B모델과 C모델의 절연내력을 비교하여 나타내었다. C모델의 절연내력이 B보다 다소 높은 것으로

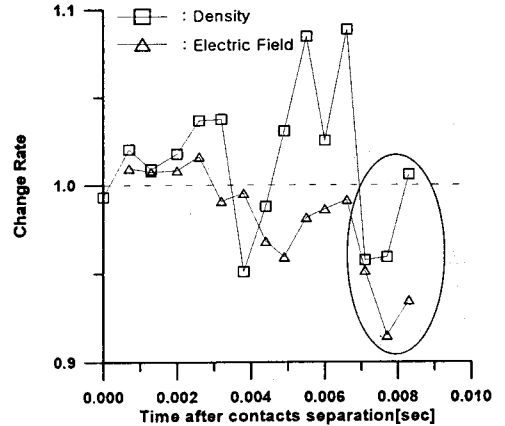


Fig. 8 Density and Electric Field Change between Model B and Model C

나타나며, 특히 B모델의 차단시험에서 재발호가 발생한 부분에서는 상당히 증가함을 알 수 있다.

그림 8은 모델 C의 절연성능을 모델 B와 비교하기 위해 각 시간별 고정아크접점에서 밀도의 최소값과 전계의 최대값을 모델 B를 단위기준으로 하여 비교하였다. 모델 B에서 재발호가 일어난 지점은 타원부분으로 이 부분에서 밀도는 모델 B에 비해 최고 4%정도 감소를 하였지만 전계의 세기는 최고 9%정도 감소를 하였다. 밀도의 감소비율보다 전계의 감소비율이 훨씬 크며 이로 인해 모델 C의 절연내력 성능은 향상되었다.

3. 결 론

T60 사전시험을 고려한 파퍼형 가스차단기의 진상소전류 차단특성에 관해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) T60 사전시험에 의해 접점과 노즐의 손상되며 이로 인해 소전류 차단성능이 저하됨을 알았다.
- 2) 소전류 차단성능 예측을 사용하는 현재의 실험식은 T60을 하지 않은 깨끗한 상태의 차단기에 대해서는 절연내력을 잘 예측하고 있으며 T60시험을 고려하기 위해서는 실험상수에 대한 적절한 변경이 필요하다.
- 3) 차단기 내부에서 발생하는 충격파가 절연파괴에 미치는 영향을 시험결과 및 해석으로 확인을 하였으며, 이 부분의 절연내력 상승을 위해서 전계와 밀도를 적절히 변화함으로써 차단시험에 성공하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. L. Zhang, J.D. Yan, M.T.C Fang, "Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor", IEEE Trans. on Plasma Science, 30, pp. 706-719, 2002
- [2] F. Endo, M. Sato, M. Tsukushi, "Analytical Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF₆ Gas Circuit Breaker", IEEE Trans. on Power Delivery, 4, pp.1731-1737, 1989
- [3] 송기동, 이병윤, 박정엽, 박정후, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석기술 I", 대한전기학회 논문지 50B권 7호, pp. 331-337, 2001
- [4] K. Suzuki, H. Toda, "Development of 550kV 1-Break GCB(Part I)", IEEE Trans. on Power Delivery, 8, pp.1184-1191, 1993