한류형 전력퓨즈의 차단성능평가 위한 단락시험에 관한 고찰

김대원, 서운택, 윤학동, 정희재, 김맹현
한국전기연구원 대전력시험1실

Consideration On Short Circuit Tests For Evaluation Of Breaking Performance Of Current-Limiting Fuses

Dae-Won Kim, Yoon-taek Suh, Hak-dong Yoon, Hee-jae Jung, Maeng-Hyun Kim
High Power Testing Department Ⅰ, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 한류형 전력퓨즈는 계통의 단락사고로 고장전류가 흐를 때 퓨즈내부에서 발생하는 저항에 의해 고장전류를 회로 고유의 단락전류보다 아주 적은 값으로 제한하고 최소 시간내에 차단하여 회로를 보호하므로 계통기기의 단락용량를 최소한으로 감소시킬 수 있다.
본 논문에서는 이러한 한류형 전력퓨즈의 단락전류 차단성능 평가를 위해 동작책무에 따른 차단성능을 규명하고자 단락발전기를 사용하여 단락전류차단시험을 실시하고 그 결과를 제시하였으며, 또한 차단과정에 따른 스트레스들이 단락시험 시 차단성능에 미치는 영향을 다루고 있다.

1. 서 론

한류형 전력퓨즈는 고압계통선로 단락사고 발생시 전력계통을 차단함으로써 전력기기 및 선로를 보호하는 기기이며, 그 역할은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째 정상운전 조건시에는 회로 또는 기기의 전체 부하전류보다 퓨즈의 정격전류가 커 정상 부하전류를 그대로 통전시켜주어야 하며, 둘째 단락사고시에는 고장전류를 피보호기기 및 회로의 단락강도 이하가 되는 조건, 즉 과도한 동작 I^2t와 overvoltage를 발생시키지 않고 가능한 빠른 차단시간 내에 차단할 수 있어야 한다. 한류형 파워퓨즈의 용도로는 변압기 2차측 단락 및 변압기회로의 고장전류 차단용, 콘덴서 회로의 고장전류 차단용, 차단기 나 개폐기의 차단용량이 부족한 경우 경제적인 측면에서 후비보호용, 회로의 사고전류를 차단하여 케이블 보호 및 사고전류를 차단하여 전동기 회로를 보호하기 위해 사용된다. 따라서 한류형 파워 퓨즈를 실제 계통에 적용하기 전에 퓨즈의 성능을 위한 단락시험을 규정이 IEC 60298-1, IEEE Std C37.41, KS C4612등에 나타나 있다.

한류형 Power fuse의 특성은 정상상태시 부하전류 통전 및 사고시 단락전류 차단 및 부하전류 차단을 동시에 만족시켜야 하기 때문에 최적 설계를 찾기란 쉽지 않다. 즉 퓨즈 링크의 정격전류가 작은 경우는 퓨즈 엘리멘트의 수가 보통 2개 정도 되며 최대 단락전류를 인가하게 되면 그 만큼 빨리 용융되고 소호매질이 빨리 한류작용을 일으키지만, 반대로 퓨즈 링크의 정격전류가 크며 그 만큼 퓨즈 엘리멘트의 개수가 증가되지만 반면에 단락전류 차단시 cut off 전류와 차단시간이 길어지며 따라서 고장에너지 I^2t와 overvoltage가 커지게 되므로 차단이 그 만큼 어려워지게 된다. 결국 한류형 fuse의 최적설계을 위해서는 퓨즈의 시간-전류 특성을 만족하고, 용단 I^2t, 아크 I^2t, 차단시간 및 fuse의 아크전압이 최소가 되도록 아크 프라즈마의 저항특성을 제어할 수 있어야 된다.

반대로 단락시험은 fuse의 상용 운전조건하에서 발생가능한 가장 가혹한 stress를 모의하는 것이므로, 시험시 고장전류 투입 각도와 arc 발생 위상을 조정하여 최대 아크 에너지를 발생시켜주어야 하며, 시험전류의 크기에 따라 나뉘는 시험책무를 구분하여 단락시험을 실시한다.

2. 본 론

2.1 한류형 Power Fuse의 구조 및 특징

한류형 Power Fuse는 퓨즈 base, fuse-base 접점, striker 및 퓨즈 링크로 구성되어 진다. 이들 중 차단성능과 직접적으로 관련된 퓨즈링크는 퓨즈 엘리멘트, 소호매질 및 절연외관으로 구성되어 있다. 일반적으로 퓨즈 엘리멘트는 은, 소호매질의 경우 규사(S_iO_2)가 주성분인 고순도의 Silica 모래, 퓨즈외관은 Glass Fiber와 에폭시를 혼합하여 제작하며 소호사의 크기 및 충전도, 퓨즈 엘리멘트의 형상이나 재료, 절연외관의 직경과 길이 등에 따라 단락전류 차단성능이 결정되어 진다. 결국은 퓨즈에 고장전류가 인가되면 내부에서 열팽창에 따른 아크가 발생하게 되며 이 아크 플라즈마의 저항 특성에 따라 전류의 한류 특성이 결정되어 진다.

2.2 한류형 Power Fuse의 차단과정

한류형 Fuse의 차단과정이 그림 1에 나타나 있다. a 구간은 pre-arcing / melting 구간이며, b+c 구간이 arc 구간이다. b구간의 시작시점에서 arc가 시작되면 이때 아크 플라즈마의 급속한 증가로 인해 fuse 양단에 급격한 전압상승이 발생하여 arc 전압의 peak 지점까지 증가하게 된다. 이후에 퓨즈 양단의 전압이 감소하고 전류가 차단된다.

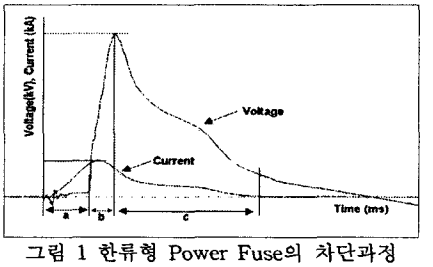


그림 1 한류형 Power Fuse의 차단과정
Fig. 1 Interrupting procedure of current-limiting fuse

2.3 단락전류 차단시험

본 논문에서는 단락발전기를 사용하여 한류형 Fuse의 단락전류 차단성능평가를 위해 IEC 60298-1(2002)에 명시된 시험조건 및 시험방법에 단락시험을 수행하였다. 단락시험을 수행시 회로역률, 시험전류, 시험전압등의 시험조건을 맞춰야 한다. 또한 시험중에는 고장전류 투입각도와 arc 발생 위상을 조정하여 피시품에 가장 가혹한 시험조건을 만들어 주어야 한다.

2.3.1 시험조건 및 단락시험 양

한류형 Fuse의 단락시험에 사용되는 시험양 들 중에 그림2에 $I^2t(kA^2s)$, 그림 3에 TD-1, 2를 위한 TRV, 그림4에 시험회로 역률를 구하는 방법에 제시하였다.

먼저 고장에너지를 구하는 방법을 살펴보자. 용단 I^2t

와 아크기간의 I^2t의 합쳐 동작 I^2t라 하며 동작 전류 파형의 변곡점을 경계로 2개 또는 3개 구간으로 나누어 I^2t는 식 (1)~(3)를 모두 합하여 구할 수 있다

$$I^2t_1 = \frac{t_1}{8}(3i_1^2 + 3i_1^2 + i_3^2) \quad (1)$$

$$I^2t_2 = \frac{t_2}{8}(i_3^2 + 3i_4^2 + 3i_5^2 + i_6^2) \quad (2)$$

$$I^2t_3 = \frac{t_3}{8}(i_6^2 + 3i_7^2 + 3i_8^2) \quad (3)$$

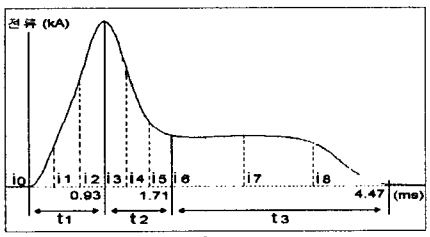
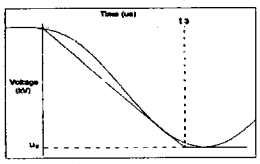


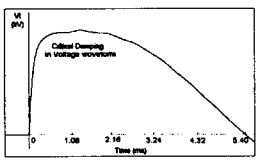
그림 2. I^2t 계산 방법

Fig. 2 Calculation Method of I^2t

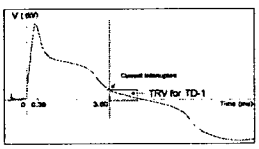
Test duties-1, 2에 TRV는 그림 3에 나타난 것 처럼 2-parameter로 정의되고, Test duty-3의 경우는 Critical damping이어야 한다. 그러나 실제 시험에서는 TD-1의 경우 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 TRV에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.



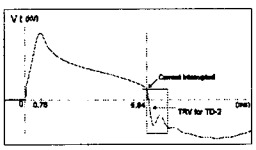
(a) 고유 TRV for TD-1, 2



(b) 고유 TRV for TD-3



(C) 실제 TRV for TD-1



(d) 실제 TRV for TD-2

그림 3. Test duties-1, 2 및 3의 TRV

Fig. 3 TRV For Test Duties-1, 2 and 3

전류의 투입각도를 변화시켜 최대 arc 에너지를 얻을 때 시험회로의 단락역률에 고장전류의 Peak 및 고장에너지 I^2t가 달라지게 된다. 고장전류의 순시값은 단락회로 역률 및 전압영점 후 전류 투입각의 함수로서 그림 4에 시험회로의 단락회로 역률를 구하는 방법을 제시하였다.

$$i_d = I_d exp(-\frac{t}{\tau}) \quad (4)$$

여기서, i_d : 고유전류의 직류분

I_d : 고유전류의 직류분 초기값

또한 투입순간으로부터 적당한 시간 $t_1(\frac{1}{2f} \sim \frac{1}{f})$ 및 t_1의 2배인 t_2에서의 직류분 i_{d1}, i_{d2}를 구하면

$$i_{d1} = I_d exp(-\frac{t_1}{\tau}) \text{ and } i_{d2} = I_d exp(-\frac{t_2}{\tau}) \quad (5)$$

이므로 단락역률은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{t_1}{l_n(\frac{i_{d1}}{i_{d2}})} \quad (6)$$

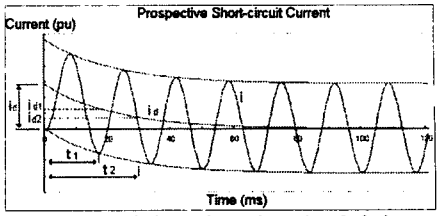


그림 4 시험회로 역률 및 고유 시험전류

Fig. 4 Power factor of Test circuit and prospective test current

2.3.2 단락시험 Test Duties

한류형 Fuse의 단락전류 차단성능평가를 위해 IEC 60298-1(2002)에는 시험조건 및 시험방법이 규정되어 있다. 차단시험은 3개의 Test Duties에 대해 퓨즈의 전 영역에 동작전류에 대한 가장 가혹한 차단조건을 인가하도록 table 1에 따라 수행하여야 한다. TD-1은 정격 최대 차단전류 시험이고, TD-2는 회로의 Inductance에 가장 큰 고장 에너지, I^2t 가 저장되는 시점에서 한류가 발생하는 고유 전류 I_2에 대한 동작을 그리고 TD-3는 정격 최소 차단전류에 대한 차단성능을 검증하기 위한 시험이다. 또한 가장 가혹한 시험조건을 얻기위해 전류 투입각도와 아크 시작 각도를 조정하여 최대 고장 에너지를 피시품에 인가하여 시험을 수행하였다.

Table 1. 차단시험을 위한 Test Duties

Parameters	Test duties		
	1	2	3
상용주파 회복전압	(0.87×4) $^{+5}_{0}$%		$^{+5}_{0}$%
고유 TRV	2-Parameter ($_{-}$, $_{-}$)		Critical Damped
회로역률	$0.07 \le \cos\theta \le 0.15$		
고유전류	I_1 $^{+5}_{0}$%	I_2	I_3 $^{+10}_{0}$%
아크시작 시 순시전류	N/A	From $0.85I_2$ to $1.06I_2$	N/A
투입각도	N/A	From 0° to 20°	Random
전압영점 후 아크시작 각도	For one test : From 45° to 65° For two tests : From 65° to 90°	N/A	N/A
회복전압 지속시간	≥15 s	≥60 s	
시험횟수	3	3	2

2.3.3 단락시험회로

한류형 Fuse의 차단성능을 검증하기 사용된 회로도가 그림 5에 나타나 있다. 시험회로는 단락발전기, Making Switch, Current limiting fuse, 단락변압기, TRV 제어 회로등으로 구성되어 있다. Making switching을 사용하여 전류투입 및 아크시작 각도를 조정하였다.

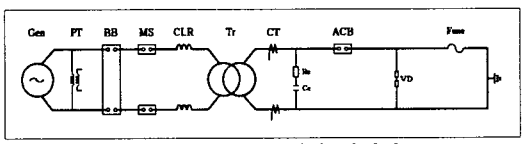


그림 5 차단시험을 위한 시험회로

Fig. 5 Test circuit for interrupting test

2.4 시험결과

단락발전기를 사용하여 24 kV 급 한류형 Power Fuse에 대해 실제 차단시험을 실시한 결과가 그림 6부터 그림 10에 나타나 있다. 또한 퓨즈 링크 정격전류에 대해 퓨즈의 차단성능에 결정적인 영향를 미치는 많은 요인들 중에서 아크 플라즈마 저항 특성, 고장전류의 기울기 di/dt, 최대 아크 voltage, 고장에너지 I^2t 및 차단시간

에 대한 시험결과를 Test duty-1 및 2로 구분하여 가혹도를 비교 분석한 결과를 나타내었다. 먼저 그림 6은 실제 시험시의 아크 프라즈마 저항 곡선으로 고장전류가 퓨즈에 인가되고 나면, 휴즈가 melting 된다. 이때 퓨즈 양단의 전압은 zero 상태이며 아크가 발생하면서 퓨즈의 아크 플라즈마 저항이 급격하게 상승하면서 퓨즈의 전압도 급격히 상승하게 되고, 이때 전원측 전압과 퓨즈 전압의 같게 되는 시점에서 고장 전류는 peak값에 이르고 fuse 전압이 전원전압 보다 크게 상승하면 감소되기 시작하고, 회로에 저장된 에너지에 의해 아크 전압은 최대치까지 도달하게 된다. 그리고 나서 아크 전압이 감소하고 전류가 차단되게 된다.

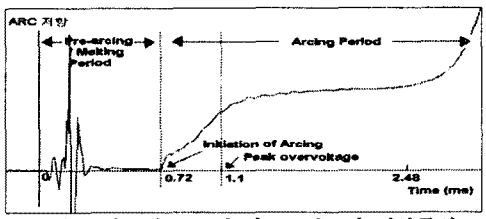


그림 6 한류형 fuse의 아크프라즈마 저항특성

그림 7은 cut off를 지나 전류의 음의 기울기부터 아크 전압 최대치에 도달할 때 까지 di/dt에 대한 시험결과다. TD-1의 di/dt가 TD-2 보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있으며 이것은 그림 6의 아크 플라즈마 저항의 변화율과 아주 밀접한 관계를 갖는다. TD-2의 경우는 TD-1에 비교해 볼 때 di/dt의 강하율, 즉, 퓨즈 저항의 상승률, 경사가 완만하고, 그림 8에서 보는 것처럼 아크 전압이 약간 작고 결국은 그림 9에 서 보는 것처럼 TD-1에 비해 고장전류의 차단시간이 길어짐을 알 수 있다.

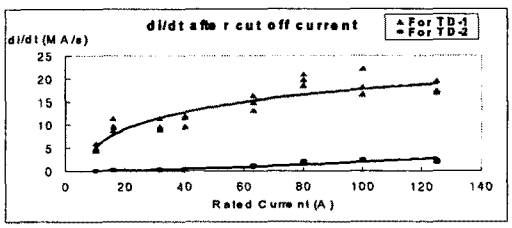


그림 7 한류형 fuse의 di/dt

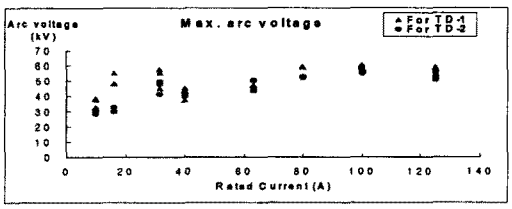


그림 8 Maximum arc voltage

그림 9는 고장전류를 차단 시 발생하는 고장에너지 I^2t 를, 그림 10은 차단시간을 나타내며 고장에너지는 10A 정격에서 아크 에너지가 매우 작았지만, 125A 정격에서는 TD-1의 경우 102 kA^2s이고, TD-2의 경우는 144 kA^2s까지 크게 증가하였다. 결국 고장에너지는 정격전류가 크고, TD-1보다는 TD-2가 훨씬 가혹하다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 10의 차단시간을 보더라도 TD-1의 경우는 4 ms정도인데 반해 TD-2의 경우는 9 ms로 휴즈에 TD-2이 TD-1보다 훨씬 더 가혹하다는 것을 알 수 있다.

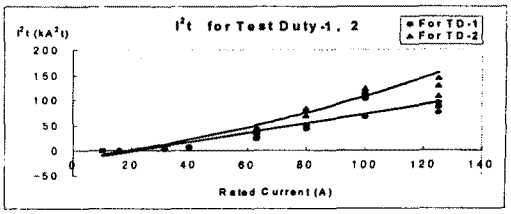


그림 9 한류형 fuse의 고장에너지 I^2t 특성

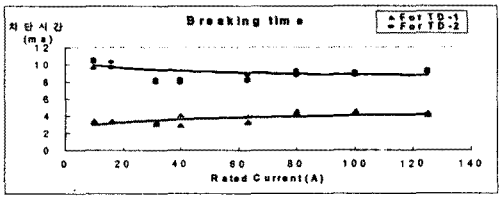


그림 10 차단시간 특성

3. 결 론

한류형 Power Fuse의 차단성능을 검증하기 위해 단락발전기를 이용하여 단락시험을 실시하였다. 또한 차단시험시 퓨즈의 차단성능에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터중에 아크 플라즈마 저항 특성, 고장전류의 기울기 di/dt, 최대 아크 voltage, 고장에너지 I^2t 및 차단시간에 대한 시험결과를 퓨즈의 시험전류에 따른 시험책무 Test duty-1 및 2에 대해 가혹도를 비교 분석하였다. TD-1의 경우처럼 시험전류가 커지면 아크 플라즈마 저항 변화율이 크고, 한류 작용이 그 만큼 어려워지게 되며 Cut off 전류가 커지고, 한편으로는 아크 전압이 높게 되며, 역으로 Cut off 전류 이후 di/dt 의 기울기가 크며 고장 에너지 I^2t가 TD-2에 비해 작고 전류도 빠르게 차단된다. TD-2의 경우처럼 TD-1에 비해 시험전류가 작아지면 아크 플라즈마 저항이 크고, Cut off 전류 이후 di/dt 의 기울기가 완만하며 고장 에너지 I^2t가 TD-1에 비해 크고 전류 차단시간도 길어짐을 알 수 있다. 결국은 고장에너지 I^2t 및 차단시간이 큰 TD-2가 TD-1보다 훨씬 가혹한 스트레스를 발생하게 됨을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 한류형 퓨즈의 단락시험 결과로부터 제작자는 퓨즈 설계 시 휴즈의 차단성능에 영향을 미치는 이러한 파라미터를 최소화 시킬 수 있도록 피시품의 아크 프라즈마의 저항특성을 제어할 수 있어야할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] Lj. Kjovic, S. Hassler, "Application of current limiting fuses in distribution systems for improved power quality and protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997

[2] Lj. A. Kjovic, C. W. Williams, "Comparative analysis of expulsion and current-limiting fuse operation in distribution systems for improved power quality and protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998

[3] Sergio B. Toniolo, Giovanni Cantarella, "Conditions of maximum Arc Energy in operation of Current-Limiting Fuses", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 2, February 1969

[4] A. Petit, G. St-Jean, G. Fecteau, "Empirical Model of a Current-Limiting Fuse using EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1 January 1989

[5] IEC 60282-1, "High-voltage fuses - Current-limiting fuses", 2002-01

[6] KS C 4612, "고압 전류 제한 퓨즈", 2001