

배전급 고압 한류형 퓨즈의 IEEE 적용에 관한 고찰

김대원, 서운택, 윤학동, 김맹현
한국전기연구원

A Study on Application of IEEE on High-voltage Current Limiting Fuses for Distribution System

Kim Dae-won, Suh Yoon-Taek, Yoon Hak-Dong, Kim Maeng-Hyun
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문은 배전계통에서 단락사고 발생할 때 나타나는 매우 큰 단락전류를 일정한 값 이하로 제한하여 계통의 다른 기기들에 대한 단락용량을 감소시키는 고압 한류 퓨즈에 대해 IEEE에서 다루는 퓨즈의 분류 및 정의, 동작원리, 적용방법 및 보호협조 방법 등을 체계적으로 제시하였다.

본 논문에서는 각 단원별로 그 세부내용을 다루고자 한다.

2. 본 론

1. 서 론

2.1 CL fuses의 동작 및 원리

퓨즈는 전력계통 뿐만 아니라 산업분야의 적용에 이르기 까지 그 분야가 매우 넓다. 국내에서도 퓨즈의 사용이 증가하면서 기존에 해외에서 수입해 사용해 오던 방법을 지양하고 국내에 개발시험을 받은 퓨즈만이 사용이 가능하도록 관련법이 개정되면서 국내 퓨즈산업에도 큰 변화가 나타나고 있다. 특히 한류 퓨즈는 다른 비 한류 퓨즈와 비교해 상당히 높은 수준의 기술수준을 필요로 하기 때문에 일부 선진국가만이 그 기술을 보유하고 있으며 국내에서는 그 기술 수준이 세계수준과는 상당히 거리가 있어 앞으로도 기술개발에 상당한 투자와 노력이 필요하다. 또 한편으로는 선진국에서는 이미 퓨즈 기술이 60년대를 거쳐 70년대에 이르러 기술개발이 상당히 활발하였으나 기술개발 또한 거의 완성을 보았다. 그 후 특별한 기술적인 진전 없이 진행되어 많은 기술적인 자료들이 사라지고 체계적인 관리의 부족으로 퓨즈를 배우고자 하는 초심자들이 많은 어려움들을 겪고 있는 실정이다. 퓨즈와 관련된 국제규격으로는 유럽이 중심이 된 IEC와 북미의 IEEE가 대표적이다. 최근 퓨즈기술의 재정립과 퓨즈의 올바른 적용을 위해 IEEE에서는 "정격전압 1-38 kV 한류퓨즈의 동작, 분류, 적용 및 보호협조를 위한 IEEE 가이드" IEEE C37.48.1을 2002년도에 재정하여 발표하였다. 여기에서는 실제 퓨즈 사용자들에게 퓨즈의 종류 및 적용방법에 대한 설문조사에서 50% 미만의 엔지니어만의 그 정확한 의미를 이해할 뿐 나머지 엔지니어들은 그러한 기초지식의 부족상태에서 퓨즈를 사용하고 있는 것으로 밝혀졌다. IEEE에서 기존에 퓨즈와 관련된 규격으로는 정의 (C37.40), 시험(C37.41), 정격 (C37.42-47), 적용안내 (C37.48) 등이 있다. 한편 퓨즈시장에 full range 퓨즈기술의 도입에 따라 변화가 무엇인지를 조사하면 IEEE Switchgear 위원회 산하 고압 퓨즈 Subcommittee에서는 위에서 언급한 기존의 규격으로는 사용자가 퓨즈를 이해하고 사용하기에는 미흡함을 느껴 워킹그룹을 구성하여 새로운 규격제정에 착수하였다. 1970년대 말부터 및 1980년대에 새로운 퓨즈 기술은 full range 퓨즈 개발을 낳았는데 그 이전에는 일반목적용 퓨즈 및 백업 한류퓨즈에 산업에 사용되었다. 이렇게 퓨즈의 종류가 나뉘는 것은 한류 퓨즈는 고 전류 차단은 쉽지만 저 전류 차단이 어렵기 때문이다. IEEE의 워킹그룹은 특히 full range 퓨즈에 대한 워킹그룹이 되었으며 따라서 full range 퓨즈의 적용 및 보호협조에 추가적인 적용 정보들을 만들었다. IEEE C37.48.1은 크게 범위, 참고문헌, 퓨즈 동작 및 이론, 한류 퓨즈의 형식, 급 및 정의, 적용 및 보호협조의 6개 단원으로 구성되어 있으며

IEEE C37.48.1은 한류 퓨즈의 사용과 관련하여 사용자가 한류 퓨즈의 동작원리 및 특징을 이해하고 정확한 지식을 갖고 적용 및 보호협조를 위해 사용자에게 도움을 주고자 IEEE PES에서 2002년도에 새롭게 제정한 규격이다. 여기서는 한류의 퓨즈를 사용하기 전에 알아두어야 할 시간-전류 곡선(TCC), 한류의 의미, 회로차단 및 회복 그리고 퓨즈의 구성 및 동작 등을 다루고자 한다.

2.1.1 시간 및 전류

일반적으로 퓨즈의 동작은 열적진행과정으로 표현할 수 있다. 정상상태에서 퓨즈 엘리먼트로부터 열이 발생하면 퓨즈 몸체 및 연결부분을 통해 열을 방출하게 되는 데 이과정이 곧 열적 평형을 이룬다. 차단과정에서는 에너지의 입력이 열을 방출할 수 있는 퓨즈의 능력을 초과하게 되고 그 결과 퓨즈 엘리먼트가 녹게 된다. 모든 종류의 고압 퓨즈들은 공통적으로 전류정격 및 melting 특성을 나타내는 열적특성과 전압정격 및 차단정격 특성을 나타내는 차단특성을 갖고 있다. 열적특성과 관련하여 전류정격과 퓨즈 엘리먼트간의 관계를 표시한 곡선이 melting 시간전류특성(TCC) 곡선이다. TCC 커브는 전형적으로 0.01초에서 시작하여 1000초 까지 곡선을 나타낼 수 있다. 만약 사고전류의 진폭이 충분히 크다면 퓨즈는 그의 melting I^2t 에 아주 밀접한 관계를 갖는다. 용단 I^2t 는 상수 값으로 나타내지며, 시간-전류 melting 성능과 관계되어진다. 한편 TCC 곡선에서 나타내지 못하는 0.01초 이하 범위에서의 한류 퓨즈 성능은 고유 사고 값에 대한 파고 전류 let-through 곡선을 가지고 결정하게 된다.

2.1.2 한류작용

한류작용은 그림 1에 나타낸 것처럼 사고전류의 지속 시간을 제한하는 능력뿐만 아니라 고유 사고 전류값이 고유 파고전류치에 도달하지 못하도록 일정한 값 이하로 제한하는 능력을 말한다. 이것은 한류 퓨즈가 비 한류 퓨즈와 다른점이다. 비 한류 퓨즈는 사고 전류를 파고값이 모두 인접 회로에 흐르도록 허용하며 원래 전류영점에서 사고전류를 차단한다. I^2t 는 직접 에너지와 관련된 다. I^2t 는 퓨즈의 용단 특성 뿐만 아니라 사고의 스트레스의 크기를 평가하는데 사용된다. 파고 전류의 제한은 사고 에너지를 줄이는데 결정적인 역할을 하며 아울러 계통에 사용되는 다른 전력기기의 단락용량을 크게 줄여줄 수 있기 때문에 그 효용성이 뛰어나다. 또한 사고 전류가 흐르는 시스템의 모든 장비에 부과되는 전기력과 열적 스트레스를 줄여주는 역할을 한다. 이러한 전자기력과 열적 스트레스는 사고 전류값의 제곱과 지속시간에 곱에 관련되어 있다.

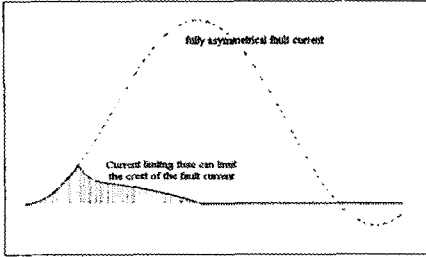


그림 1. 고유단락전류와 한류작용에 의한 실제 차단전류

2.1.3 회로차단 및 회복작용

그림 2는 한류 퓨즈의 동작 원리를 이해하기 위한 회로 다이어그램이며 그 차단과정은 식(1)부터 식(4)에 의해 표현 되어질 수 있다. 한류 퓨즈에 의한 회로 및 회복과정과 비 한류형 퓨즈와의 차이점은 다음과 같이 설명되어 진다. 먼저 전류 제한작용이 일어나기 위해서는 반드시 퓨즈 아크 전압이 시스템 전압을 초과하여야 한다. 그리고 비 한류 퓨즈의 매우 작은 아크 전압을 발생하므로 아크 전압 역시 매우 작고 퓨즈에 의한 에너지 흡수 또한 작다. 또한 그들은 회로의 원래 전류영점에서 사고전류를 차단하게 된다. 아크 소호 순간이 보통 전압 피크점이 되며 따라서 시스템의 과도회복전압(TRV)을 견뎌야 한다. 다른 한편으로 한류 퓨즈는 상대적으로 높은 아크 전압을 발생하며 강제적으로 전류의 제한 작용을 하게 된다. 시스템 인덕턴스는 더 높은 아크전압을 발생시키며 아크를 유지시키는 역할을 한다. 또한 퓨즈는 인덕턴스에 저장된 많은 에너지를 흡수하게 된다. 소호는 시스템의 전압 영점에서 발생하며 전압영점은 대칭 사고전류의 경우 1/4 cycle 근처에서 비대칭 사고전류의 경우 1/2 cycle 지점에서 나타나게 된다. 한류 퓨즈는 차단과정중에 유효 에너지를 흡수하기 때문에 회로에 일정한 저항 성분을 추가시키는 작용이 발생한다. 따라서 매우 큰 무효성 회로는 차단과정중에 동적변화를 경험하게 되며 매우 큰 유효성 회로로 바뀌게 된다. 결국 전압과 전류가 거의 동상이 된다.

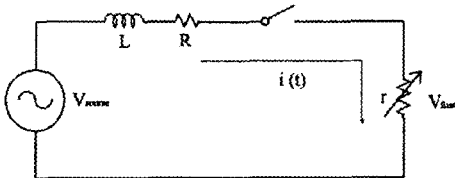


그림 2 한류 퓨즈의 동작을 위한 회로 다이어그램

$$V_{source} = i(R + r) + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$V_{source} = ir + L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$V_{fuse} = V_{source} + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$I = \int \frac{V_{source} - V_{fuse}}{L} dt \quad (4)$$

그림 은 실제 한류 퓨즈에 대한 단락시험의 결과 파형으로서 전압 및 전류 곡선을 나타내고 있으며 위의 식 (4)와 관련하여 설명이 가능해 진다. 한류의 퓨즈의 차단과정을 보면 먼저 투입 스위치에 의해 퓨즈에 사고전류가 인가되면 퓨즈 엘리먼트가 녹기 시작하고 (melting 주기) 그 이후에 퓨즈 엘리먼트가 녹고 난후 아크전압이 발생한다. 아크전압이 시스템전압보다 높게 되면 한류작용이 발생이 하여 cut-off 전류가 결정되며, 이때 퓨즈의 maximum 아크전압이 파고치에 도달한 후 감소하게 되

고 전압 영점 근처에서 전류가 차단되고 나면, 퓨즈 양단에 전원전압 및 회로 특성에 따른 회복전압이 나타난다. 한류 퓨즈는 이러한 차단과정중에 나타나는 에너지 I^2t 에 의해 그 차단 성능이 결정되며, 이 아크 에너지는 사고가 발생한 순간, 즉 사고 전류가 대칭 인지 비대칭 인지에 따라 그 크기가 결정된다.

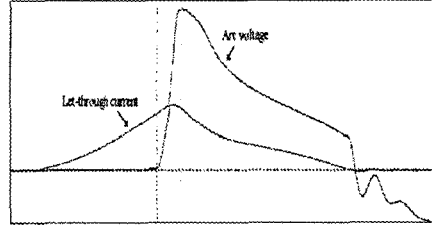


그림 3 한류 퓨즈의 차단 시험시 전압 및 전류 파형

2.1.3 Fuse 구성 및 동작

한류 퓨즈는 외관적으로는 퓨즈 몸체, 캡, indicator로, 그리고 그 내부에 차단과 관련된 퓨즈 엘리먼트와 소호 매질인 실리카 Sand로 구성되어져 있으면 그림 4는 실제 모습을 나타낸다. 엘리먼트는 많은 노치 구조로 되어 있으며 다중 지역에서 melting과 아크에 의해 높은 아크 전압을 발생하게 되면 아크 제한작용 과정에 아크전압을 상승시키는 역할을 하며 실리카 Sand는 차단과정중에 전형전인 아크 및 에너지 흡수 재질이다. 여기서 한류 퓨즈는 퓨즈 엘리먼트의 차단체무에 따라 형상을 달리하게 되는데 그 이유는 저 전류 차단체무는 한류 퓨즈에 있어 매우 어려운 기술 분야이며 그들의 연속전류 이상에서 최소 차단정격을 갖는다.

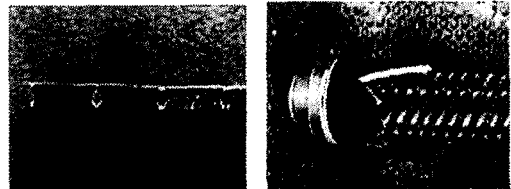


그림 4. 한류 퓨즈의 구성요소

2.2 한류 퓨즈의 분류

한류 퓨즈를 그 용도에 맞게 적절하게 사용하기 위해서는 퓨즈의 유형, 종류 및 정격사항들을 정확하게 알아야 한다. 먼저 퓨즈의 종류는 크게 계통상에서 퓨즈가 사용되는 위치에 따라 전력용 퓨즈와 배전용 퓨즈로 나누어 진다. 전력용 퓨즈는 사고시 임피던스가 매우 작은 위치 즉 변전소에 아주 가까운 곳 혹은 변전소 내의 위치나 피더에서 사용되는 퓨즈를 말한다. 이때 사고 임피던스는 주로 변압기의 인덕턴스가 대부분을 이루기 때문에 회로의 역률은 매우 낮고 X/R은 매우 높다. 이러한 회로에서는 전압과 전류의 위상이 거의 90도에 가깝고 전류 영점이 전압의 피크 점에서 발생하므로 퓨즈가 사고 전류를 차단하기에 가혹한 조건을 준다. 반면에 배전용 퓨즈는 변전소에서 다소 거리가 떨어져 있는 위치에 사용되는 퓨즈를 일컬으며 케이블 저항이 존재하기 때문에 회로의 X/R가 감소되면 퓨즈가 회로를 차단할 때의 스트레스 작아지게 된다.

한류 퓨즈의 유형을 살펴보면 백업 퓨즈, 일반목적용 퓨즈 그리고 full-range 퓨즈로 분류되어진다. 백업 퓨즈는 정격최소차단전류와 정격 최대차단전류사이의 임의의 전류를 차단할 수 있으며, 더 낮은 전류에 대해서는 차단실패를 가져올 수도 있고, 그 적용이 제한되어 있다. 다른 차단장치와 보통 적절로 사용되어 진다. 일반 목적용 퓨즈는 퓨즈가 1시간이상 경과한 후에 녹는 전류! 정격 최대 차단전류 사이의 임의의 사고전류를 차단

수 있으며, 전형적으로 변압기 보호에 사용되면 주위 온도를 고려하여 사용하여야 한다. full-range 퓨즈는 최대 적용가능 온도 조건하에 녹는 최소 전류와 최대 정격 차단 전류 사이의 임의의 연속 전류를 차단할 수 있으며 과부하 혹은 고저항 사고를 보호하는 다른 장치를 필요로 하지 않으며 최대 적용 가능온도를 고려하여야 한다. 결국 한류 퓨즈는 외부적으로는 비슷하지만 각기 다른 역할을 위해서 내부적으로 다른 형태를 취하고 있다. 백업 퓨즈는 단지 주 엘리먼트만으로 구성되어 있고, 일반 목적용 퓨즈는 저전류 차단과정을 이룸도록 추가로 보조 엘리먼트를 갖고 있고, full-range 퓨즈는 적용조건을 만족하기 위한 추가적인 내부 엘리먼트 형상을 갖추고 있다.

2.3 한류형 퓨즈의 적용

퓨즈는 정상상태 운전조건하에서는 부하전류를 통전시키며 경우에 따라서는 과부하전류를 통전시키기도 한다. 즉 퓨즈의 1차 임무는 정상전류를 통전시키는 것이다. 만약 퓨즈가 심각한 과부하나 사고에 의한 매우 큰 전류에 노출될 경우 퓨즈는 녹게 된다. 퓨즈가 녹을 때 사고 전류를 차단하여 과부하 또는 사고가 발생한 부분을 시스템의 나머지 부분으로 분리시키기 위해서는 각각의 경우에 대해서 정확한 종류의 퓨즈 선택이 중요하게 된다. IEEE guide는 계통에 사용되는 여러 장비의 보호에 대해 다루고 있으면 다음과 같은 장비를 포함한다:

- 변압기
- 시스템의 피더 및 구간
- 커패시터
- 모터 및 회로

또한 IEEE guide는 한류형 퓨즈가 전력품질에 어떠한 영향을 미치는 지에 관해서도 간략하게 다루고 있다. 퓨즈의 차단으로 발생하는 파고 아크전압이 시스템 전압을 지지하는 원리이다. 방출형 퓨즈나 리클로저 등이 사고를 제거할 경우 몇 사이클 동안의 저 전압이 발생하게 되는데 이로 인해 컴퓨터 메모리상의 오동작 등 근래에 강하게 부각되는 전력품질의 문제를 한류형 퓨즈가 크게 향상시키는 역할을 한다.

2.3 한류형 퓨즈의 보호협조

한류 퓨즈를 사용할 때 직렬로 연결된 다른 보호 장치들과의 보호협조를 반드시 고려하여 사용해야 한다. 여기에서 다루는 보호협조란 수용가의 정전구간을 최소화하고 퓨즈에 손상을 입힐 수 있는 전류로부터 퓨즈를 보호하기 위한 최적의 협조체계를 찾는 것이다. 일반목적용 및 full-range 퓨즈의 경우에는 한류퓨즈 대 한류퓨즈 협조, 한류 퓨즈 대 방폭형 퓨즈 협조, 방폭형 퓨즈 대 한류 퓨즈 협조, 리클로저 대 한류 퓨즈 협조, 한류퓨즈 대 리클로저의 보호협조, 모터 구동시 퓨즈의 보호협조 등이 있다. 한편 백업 퓨즈의 경우는 반드시 다른 직렬 보호 장치, 예를 들면 방출형 퓨즈등과 사용되어야 한다. 또한 백업 퓨즈는 방출형 퓨즈의 동작시, 과부하시, 돌입전류에 의해 손상을 받지 않도록 보호협조체계를 갖추어야 한다.

3. 결 론

전력계통의 단락용량의 증대로 한류 퓨즈의 사용은 크게 증가하고 있는 반면, 1960년대와 1970년대 기술적인 연구들이 활발히 진행되었고 그 이후 관련 자료들은 물론 기술의 체계적인 전달이 없어 현재는 그 사용자는 물론이고 사양서를 작성하는 엔지니어들조차도 한류 퓨즈의 종류에 따른 정의조차 정확하게 이해하지 못하고 사용하는 경우 많은 것으로 밝혀졌다. 이런 이유로 IEEE PES의 고압 퓨즈 Subcommittee에서 워킹 그룹을 구성하고 한류 퓨즈에 대한 새로운 가이드로서 IEEE Std 37.48.1을 제정하였다. 여기에서는 기존의 퓨즈 관련 규

격, 즉 정의(IEEE 37.40), 시험(IEEE 37.41) 및 적용(IEEE 37.48)만으로는 사용자들이 퓨즈를 사용하기는 부족하다고 판단하고 full-range fuse에 대한 연구와 더불어 한류 퓨즈의 동작원리 및 이론, 종류, 등급 및 분류, 적용 및 보호협조에 관해 체계적으로 정리하였다. 이러한 규격의 제정으로 이제 전세계의 모든 한류 퓨즈 사용자가 한류 퓨즈를 정확하게 이해하고 적절한 사용을 통해 사고로부터 전력계통을 안전하게 보호하고 전력계통의 신뢰도를 높이는 데 많은 기여를 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std C37.41, "IEEE Standard Design Tests for High-Voltage Fuses, Distribution Enclosed Single-pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories", 2000
- [2] IEEE Std C37.48.1, "IEEE Guide for the Operation, Classification, Application, and Coordination of Current-Limiting Fuses with Rated Voltage 1-38 kV", 2002
- [3] IEC 60282-1, "High-voltage fuses - Current-limiting fuse", 2002
- [4] H. M. Pflanz, J.A. Acree, J.S. Schaffer, "Development and testing of power assisted current limiting fuses to 600 amperes and 38kV", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988
- [5] R. Ranjan, G. Frind, C.E. Peterspm, J.J. Carroll, "An advancement in the design and application", General Electric Company, U.S.A
- [6] M.T. Bishop, S.R. Mendis, J.F. Witte, and K.L. Leix, "Selecting Overcurrent Protection for Three-Phase Transformers", IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1996
- [7] F.J. Muench, "Application Consideration and Comparisons of Current Limited Fuses Applied at Transformers and Sectionalizing points", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988
- [8] J.C. Das, "Coordination of Surge Arresters With Medium-Voltage Current-Limiting Fuses", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 38, No. 38, May/June 2002
- [9] H. M. Pflanz, J.A. Acree, J.S. Schaffer, "Development and testing of power assisted current limiting fuses to 600 amperes and 38kV", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988
- [10] R. Ranjan, G. Frind, C.E. Peterspm, J.J. Carroll, "An advancement in the design and application", General Electric Company, U.S.A
- [11] M.T. Bishop, S.R. Mendis, J.F. Witte, and K.L. Leix, "Selecting Overcurrent Protection for Three-Phase Transformers", IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1996
- [12] F.J. Muench, "Application Consideration and Comparisons of Current Limited Fuses Applied at Transformers and Sectionalizing points", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988
- [13] J.C. Das, "Coordination of Surge Arresters With Medium-Voltage Current-Limiting Fuses", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 38, No. 38, May/June 2002