

한류형 퓨즈 신뢰성 시험 기술

조국희, 조문수
한국전기연구원

Reliability Test Technology of Current Limiting Fuse

Kook Hee Cho, Moon Soo Cho
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 배전 계통에서는 전동기의 시동 전류, 변압기의 여자돌입전류, 콘덴서의 고주파 과도 돌입전류 등의 과전류가 흐르므로, 회로 보호용 한류 퓨즈가 엘리먼트의 피로나 열화 등에 의해, 예기치 못한 용단이 발생한다. 이 경우 고장을 미연에 방지하기 위해, 한류 퓨즈의 신뢰성을 보다 향상시키기 위해서는 제품 특성의 균일성을 확보함으로써 그 사용 실태에 대응해서 적절히 교환하는 것이 필요하다.

1. 서 론

배전 계통에서는 통상 운전에서 전동기의 시동 전류, 변압기의 여자 돌입 전류, 콘덴서의 전원 투입시 고주파 과도 돌입전류, 기타 기기 운전과 병행하여 맥동 전류 등의 과전류가 흐른다. 이와 같이 과전류가 반복해서 흐르는 회로에 보호기기로서 한류 퓨즈를 사용할 경우, 퓨즈가 통상 운전에서 예기치 않은 용단이 일어나는 것이 보고 되고 있다. 한류 퓨즈는, 차단기구상 차단될 수 있는 전류에 한한이 있다. 통상 이 한한이하의 보호는 진공개폐기 등 다른 직렬 보호기기에 의해 행해지고 있다. 그러나 한류 퓨즈가 동작 할 수 없는 과전류 통전을 반복해서 받으면 엘리먼트의 피로나 열화 등에 의해 예기치 않은 용단이 발생해 차단 불능에 도달하는 것도 생각 할 수 있다. 이와 같은 오동작을 미연에 방지하고 한류퓨즈의 신뢰성을 보다 높이기 위해서는 제품 특성의 균일성 확보와 함께 사용실태에 대응해서 한류 퓨즈의 적절한 교환을 행하는 것이 필요하다. 이 때문에 한류 퓨즈 엘리먼트의 과전류 반복 통전시 대한 열화기구를 규명하는 것이 급한 실정이다. 여기서 전동기 보호용 퓨즈의 사용실태를 상정해 과전류 반복 통전 조건에 대한 퓨즈의 열화 특성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 반복 피로의 메카니즘

2.1.1 피로 파괴의 특징

방향이 변동하는 응력에 의해 생기는 피로를 피로 파괴라 한다. 피로에 관해서 이것은 충분히 확립된 특징 있는 현상으로서 다음과 같은 사항이 발생한다.

- (1) 연성재료에 있어서도 거시적 소성 변형이 일어나지 않고 파괴한다.
- (2) 반복 응력 진폭이 정적 파괴 응력보다 낮아지고 탄성 한계 이하에서도 파괴된다.
- (3) 일정한 응력진폭 S에 대해서 이 반복횟수 N 후에 파괴한다. S와 N 사이에는 그림 1과 같은 관계가 있다.
- (4) 철강류에서 이 응력 진폭 이하에서는 무난히 반복해도 파괴하지 않는 한계가 존재한다.(그림 1도 곡선①) 이 한계 응력 진폭이 내구한도에 있으면서 파괴한다.
- (5) 탄성 한계에 비해서 적은 일정한 정적응력(평균응력)을 반복해 응력을 가해도 피로강도는 별로 영향을 받지

않는다.

- (6) 일정 응력 진폭 S에 대한 파괴될 때까지의 반복횟수 N의 영향이 크다.
- (7) 현미경으로 조사하면 피로 파괴까지의 소성변형 모양 등은 정적(한 방향 응력) 시험의 경우 파괴까지의 소성 변형과 유사하다. 따라서 정적 시험에서는 변형이 전 반적으로 일어나는 것에 반해 피로 시험은 현미경적 영역으로 국소화 하고 있다.
- (8) 반복 응력에서는 금속이 미끄러지는 면에서 돌출하여 미끄러지는 면을 따라 들어가 채워지는 것이 관찰되었다. 한 방향 응력 시험에서는 이것을 관찰할 수 없었다.
- (9) 소소재에 대해 일정 진폭의 반복 왜형을 부가한 경우, 반복에 따라서 왜 경화하지만 이 정도 이상의 왜경화를 진행 시킬 수 없고, 상당한 양의 소성왜를 주는 것이 필요하다. 일단 미리 가공 경화를 실시한 재료에서는 반복에 의해 연화해 이 정도 이상의 소성왜를 부가한 후는 연화도는 거의 포화한다.

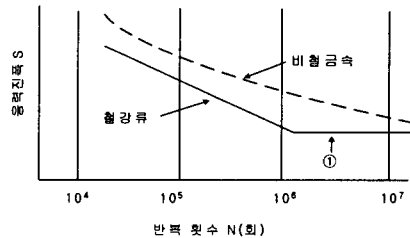


그림 1 S-N 곡선

그림 1은 응력 진폭 S와 파괴까지의 반복 횟수(피로 수명) N과의 관계를 표시한 것으로, S-N 곡선, 피로 곡선, 혹은 Wohler 곡선이라 부르고 있다. 철강의 경우 보통 반복 속도에서는 반복 횟수는 10⁴~10⁷회 정도로 곡선 ①과 같이 수평인 경우가 많다. 이때 피로 강도가 피로 한도에 상당한다. 또한 알루미늄 합금에 의한 비철금속에서는 10⁷회를 초과하여도 파괴 원인으로 피로 한도가 존재하지 않는 것이 많다. 그렇지만, 한류 퓨즈의 엘리먼트 재료로서 많이 이용되고 있는 은에 관한 보고는 거의 없다.

2.1.2 열 충격과 열 피로현상

물체에 급격한 가열 혹은 냉각에 따라 심한 온도 변화 발생과 충격적인 열 응력이 발생한다. 이 현상이 열 충격으로서 재료는 연성을 잃음으로서 위태로운 성질을 가진 파괴가 용이해 진다. 따라서 열 충격은 위성 재료의 경우에 특히 문제가 된다. 즉, 위성 재료에서는 파괴점까지 응력이 왜형과 비례해 증가함으로서 열 왜형이 증대해 열 응력은 용이하게 파괴 응력에 도달한다. 따라서 1회의 열적 부하에서도 파괴가 발생하는 것도 있다. 이것

에 대해서 한류 퓨즈 엘리먼트 재료로서 많이 이용되고 있는 은 등과 같은 연성 재료에서는 아래 서술한 열 피로가 문제이다. 연성 재료는 열 충격만큼 심한 온도 변화가 아닌 큰 온도 변화를 받으면 열 응력이 이 재료의 강복점을 초월해서 소성 왜곡이 발생하여도 직접적으로 파괴하는 것은 아니지만 큰 온도 변화가 반복되면, 즉 열 cycle 수가 많아지면 피로에 의해 균열이 발생해 파괴에 도달한다. 이 현상을 열 피로라 부른다.

봉 양단을 고정해, 이 봉 전체에 일정한 최고 온도와 일정한 최저 온도 사이로 가열·냉각을 반복해 열 cycle 를 받을 경우 그림 2와 같다.

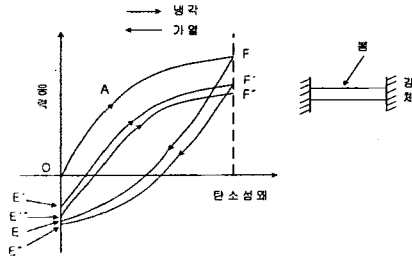


그림 2 열 cycle 응력 왜선도

처음에 봉은 최고 온도에서 고정되어 있다. 봉을 냉각하면 강제단으로 완전히 고정되어 있는 것이 수축으로 인장 응력이 발생해, 응력-왜선도는 OFF로 된다. 다시 가열을 시작하면 응력-왜선도는 처음 OA에서 평행하게 아래로 내려오고, 최고 온도를 보호해 유지하면 응력 이완이 발생해 압축 응력은 감소하여 E'점으로 이동한다. 다시 냉각을 시작하면 응력-왜선도는 E'F'로 상승해 최저 온도에서 F'점에 도달한다.

최저 온도에서 응력이완이 발생하지 않을 때 다시 가열을 시작하면 F'E'로 하강해 최고 온도 E''점에 도달한다. 여기서 재차 응력 이완이 발생해 압축 응력은 감소해 E'''점으로 이동한다. 다시 냉각을 시작하면 곡선은 E''' F''로 그려지고 최저 온도인 F''에 도달한다. 이 E''' F'' 곡선은 E'F'곡선에 가까운 것도 있다. 이 냉각-가열 cycle을 반복하면 응력-왜형도는 hysteresis loop로 그려진다.

이 loop에 관계된 반복 소성왜가 열 피로의 원인이다. 즉, 이 loop에 관계되는 각 인자는 열 피로에 조금은 영향을 준다. 예를 들면 열 cycle의 최고 및 최저 온도, 평균 온도, 최고 온도의 유지 시간, 반복 속도, 재료의 탄소성형 성질이 그 인자이다. 한류 퓨즈의 과전류 반복 통전에 의한 피로에 대해서는 과전류치, 통전 시간, 휴지 시간, 엘리먼트의 재질, 순도 및 구조 등이 각각 해당하는 것으로 사료된다.

2.2 과전류 반복 통전 특성 시험

공시 퓨즈의 과전류 반복 통전 수명 특성을 구하기 위해 반복 통전 시험을 하였다.

2.2.1 시험 조건

2.2.1.1 공시 퓨즈의 취부 상태

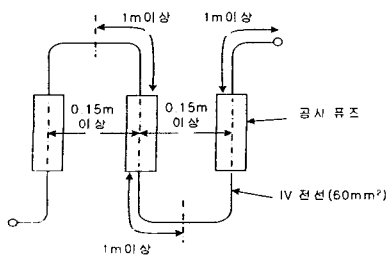


그림 4 공시 퓨즈의 취부 상태 및 접속도체 수법

공시 퓨즈의 취부 방법은 JEC-2330-1986에 의한 온도 시험 조건에 준거해 다음과 같이 하였다.

공시 퓨즈는 그림 4에 표시한 것과 같이 3개를 1조로 해서 150mm 이상의 간격으로 수직 평행하게 취부한다. 접속 도체는 공시 퓨즈의 정격전류가 크므로 큰 단면적이 필요하다. 공시 퓨즈의 정격 전류는 피보호 기기에 따라 다르므로 일반용 퓨즈로 볼 경우 30A 상당으로 최고 크다. 따라서 도체 단면적은 60mm² 이상이 필요할 것으로 판단되며, 도체의 길이는 단자당 1m 이상이다.

2.2.1.2 시험 회로

시험 회로는 가능한 한 많은 시험 횟수를 효율적으로 소화하기 위해 그림과 같은 회로에 적용하였다. 그림 5는 기본적인 시험 회로를 표시하였다.

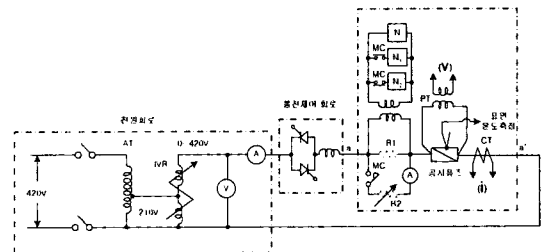


그림 5 기본적인 시험 회로

전원 회로는 420V 전원에서 단권 변압기(AT)와 유도 전압 조정기(IVR)를 경유하는 최대 420V, 50kVA의 전원 용량이 필요하다. 출력 전압과 전류는 각각 전압계와 전류계로 감시 하였다.

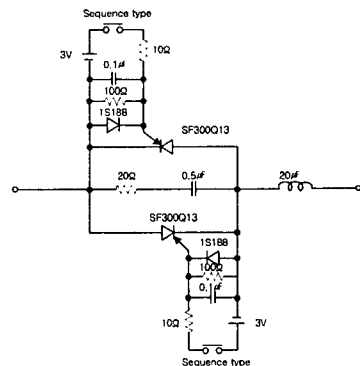


그림 6. 통전시간 제어 회로

통전 회로는 그림 6에 표시된 것과 같이 2개의 SCR을 역극성으로 접속해 sequence type을 이용해서 과전류의 통전 시간 및 휴지 시간을 정확하게 제어 하였다. 통전 제어 회로에서는 SCR의 전류 차단 직후의 회복 전압 상승을 dv/dt를 내리기 위해 SCR과 병렬로 저항과 콘덴서를 삽입하였다. 그 결과 공시 퓨즈가 통전 휴지 중(SCR은 차단상태)에 파단한 경우, 퓨즈 단자간에 전압이 가해짐으로서 파단이 휴지 중에 발생한 것을 검출 할 수 있다.

2.2.1.3 시험 전류 패턴

시험 전류 패턴은 그림 7에 표시된 것과 같이 시간 좌표에 시험 전류의 통전시간 $T_s=10s$ 로 하였고 그 시간에 대한 용단 전류(10초 용단 전류) I_{10} 을 용단 특성으로부터 구하였다. 이 용단 전류치를 기준으로 시험 전류 I_s 와 용단 전류 I_{10} 과의 비를 S로 표기하고 이것을 과전류 계수 S라 부른다. 즉, 계수 S는 다음 식에 의해 표기된다.

$$S = I_s / I_{10}$$

여기서, $0 \leq S \leq 1$ 의 범위에서 I_s 를 결정한다.

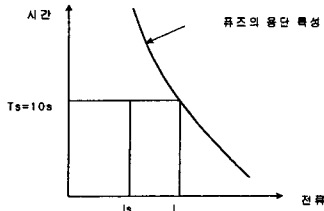


그림 7 시험 전류치 결정법

2.3 한류 퓨즈의 과전류 반복 통전 수명을 고려한 대책

2.3.1 퓨즈 엘리먼트의 형성

과전류 반복 통전에 의한 파단 혹은 용단 개소는 직선 길이 및 파부 엘리먼트를 포함해서 모두 notch 부에 있었다. 특히 직선 길이 엘리먼트의 경우 상부 갭 내에 모두 집중하고 있다. 이것은 과전류 통전 중의 엘리먼트 팽창분의 흡수가 주로서 소호사의 자유도가 비교적 높고 상부 갭내의 엘리먼트 변형으로 행해지고 있기 때문이다. 또한 파부 엘리먼트의 경우 파단 혹은 용단하는 notch의 위치는 퓨즈통내의 위치보다도 파현상에 대한 위치에서 결정된다. 즉 엘리먼트의 파형상에 대한 notch의 위치를 대략 5가지로 분류하고 파단 및 용단하는 notch의 위치는 아래에 표시한 것과 같이 발생한다.

- ① 형태 내부의 중앙
- ② 형태 내부의 굴곡부 근처
- ③ 굴곡부
- ④ 형태 사면(경사진 면)의 굴곡부 근처
- ⑤ 형태 사면의 중앙

그리고 notch당 파단 혹은 용단의 발생율은 ①~⑤의 위치가 높다. 특히 ①의 위치는 14%로 대단히 높고 ②의 위치는 0.7%로 가장 낮으며 ③의 1/20이다. 과전류 통전시의 엘리먼트 신장분은 주로 notch부의 굴곡에 의해 흡수된다. 그래서 notch 부의 굴곡각이 가장 적은 ①은 파단 혹은 용단하기 어렵다고 말할 수 있다.

이상에서 한류 퓨즈의 과전류 반복 통전 수명을 길게 하기 위한 방법으로서,

- ① 직선 길이 엘리먼트는 상부 갭 부근에 엘리먼트의 신장을 흡수하는 기구를 설계한다.
- ② 파부 엘리먼트의 경우 notch 위치를 형태의 중앙에 일치 시키는 것이 추리된다.

2.3.2 과전류 반복 통전 수명의 예측 수법

한류 퓨즈의 과전류 반복 통전 수명을 예지 혹은 추정하는 방법으로서

- ① 퓨즈통의 표면 온도를 감시한다.
- ② 퓨즈 단자간 저항을 관리한다.
- ③ 퓨즈통의 X선 촬영으로 엘리먼트의 변형을 관찰한다. 등을 생각할 수 있다.

①에 대해서는 과전류 반복 통전 횟수가 증가함에 따라 퓨즈통의 표면 온도는 상승하는 경향을 인식할 수 있지만 수명을 예지할 수 있는 정도는 아니다. 또한 ②는 퓨즈의 저항을 측정해 초기치와 비교하여 열화 판정을 하는 방법이다. 퓨즈의 저항이 파단 혹은 용단 직전에 급상승하는 것은 알지만, 퓨즈 열화 도중에 저항 측정을 검출하는 것은 곤란하다. ③은 퓨즈 엘리먼트의 변형 상태를 X선 촬영으로 관찰해 엘리먼트가 국부적으로 표 1에 나타낸 바와 같은 변형에 근접하는 경우, 또는 엘리먼트 전체가 굽어져 퓨즈통 내벽에 근접하는 경우 수명을 판정하는 방법이다. 엘리먼트 전체가 굽어진 경우에는 퓨즈통의 표면 온도 상승이 불균일한 것을 고려할 수 있다. 이것을 thermovideo 나 thermotape 등으로 관찰하는 방법도 고려할 수 있다.

상기 3종 방법은 감시하는 퓨즈의 과전류 통전 내력을 알 필요는 없지만 1개 퓨즈의 수명 추정법으로서 과전류 값 크기와 통전 횟수를 가지고 수명 추정하는 방법이 있다. 즉 과전류 크기와 통전 횟수를 알도록 누적 도수계

를 설치해, 퓨즈의 과전류 통전 내력으로부터 수명을 추정하는 방법이 있다.

표 1 한류 퓨즈의 반복 과전류 통전 수명 예지 방법의 비교

번호	예지법	경제성	용이성	신뢰성	종합평가
1	표면 온도	○	○	○	○
2	단자 저항	○	○	△	△
3	X선 촬영	△	○	○	○
4	누적 도수	△	○	○	○

2.4 반복 수명을 고려한 적용

여기서 과전류는 과전류의 통전시간이 10초 정도의 전동기 시동 전류이다. 이 조건에 대한 한류 퓨즈의 과전류 반복 수명은 과전류의 크기와 간격으로 결정되므로 다음과 같은 특징이 있다. 과전류 반복 간격이 20분 이상인 경우는 과전류 통전에 의한 퓨즈 링크의 온도 상승은 휴지 시간 중에 충분히 발열해 과전류의 크기가 $S=0.9$ 인 경우에도 거의 주위 온도 근처까지 저하한다. 그리고 이때 반복 수명은 S의 증가와 함께 서서히 저하하는 경향을 나타내었다. 또한 과전류 반복 간격이 10분인 경우, 과전류 통전에 의한 퓨즈 링크의 온도 상승은 휴지 시간 중에 저하시켜도 최고 온도 상승 값이 반복 간격 20분 이상인 경우보다 높았다. 그리고 S의 증가에 따라 반복 수명은 현저하게 저하한다. 특히 $S=0.9$ 와 0.8 이하에서는 약 1자리수가 변한다.

우선적으로 반복 수명을 길게 하기 위해서는

- (1) 파부 엘리먼트 등을 이용한다. 반복 수명을 길게 하기 위한 구조의 퓨즈를 이용한다.
- (2) 최대 과전류 값을 $S=0.6$ 이하로 한다.
- (3) 과전류 반복 간격은 적어도 휴지 시간 중에 퓨즈 링크 표면 온도가 거의 외부 온도까지 저하할 수 있도록 한다.

게다가 수명 추정을 위해서는

- (4) 과전류 값의 크기와 반복 간격 및 횟수를 감시한다.
- (5) X선 촬영으로 엘리먼트의 변형 상태를 관찰한다. 등을 수행하고, 퓨즈의 교환 시기를 예측하는 것이 필요하다.

3. 결 론

한류 퓨즈는 다음과 같은 수명 예지 대책이 필요하다.

- (1) 퓨즈통의 표면 온도 상승의 감시 : 엘리먼트가 퓨즈통에 근접한 경우에는 검은 label 혹은 적외선 영상장치 등에 의해 국부적인 온도 상승을 감지한다.
- (2) 퓨즈 단자간 저항의 변화 검출 : 열화 도중에 검출하는 것은 어렵지만, 파단 직전에 전기 저항이 급상승하는 것을 이용한다.
- (3) X선 촬영에 의한 엘리먼트의 변형 관찰 : 엘리먼트에 국부적 변형이 있는 것은 퓨즈통 내면의 이상접근 등으로 검출한다.
- (4) 과전류 누적 도수계에 의한 반복 횟수의 감시 : 과전류가 크면 과전류 반복 횟수를 누적 도수계에 의해 감시해, 퓨즈의 S-N 특성과 비교하여 교환한다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. W. Mikulecky, "Pre-Test Determination of Current for Maximum Thermal Arc Energy Release in Current Limiting Fuses" IEEE PES Summer Meeting Paper, F75-556-1, July 1975
- [2] M. Hudis, "New Test Facility Examines Arc Interruption Technology" Allis Chalmers Engineering Review 41, pp. 8-11, 1976