

# 아크차단기의 필요성에 관한 연구

(Research on Necessity of Arc Fault Circuit Interrupter)

박치현 · 배석명 · 임용배 · 김기현 · 최명일

(Chee-Hyun Park, Suk-Myeong Bae, Yong-Bae Lim, Gi-Hyun Kim, Myung-Il Choi)

## 요 약

전력사용이 증가함에 따라 전기설비에 의한 전기화재 수가 늘어나고 있다. 통계에 따르면 전기화재가 화재원인 중 가장 많은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 전기화재를 정확히 찾아낼 수 있는 조사방법이 개발되지 않고 있는 실정이다. 이 논문은 전기화재 원인과 아크차단기의 특성에 관하여 분석한다. 아크에 의한 위험을 수학적 분석을 이용한 전력계산을 통하여 분석하고 단락회로에 의한 위험성과 비교한다. 또한 아크차단기와 기존의 누전차단기와 비교를 통하여 아크차단기의 필요성을 제기한다.

## 1. 서 론

전기적인 고장은 충전된 도체들 사이 또는 도체와 대지나 전기시스템의 접지된 부분 사이에서의 절연강도 저하에 의한 비정상적인 상태로 정의할 수 있다. 특히 전선의 절연체와 같은 고체 절연체에서의 고장은 과도한 기계적 인장이나, 절연체에 인가된 가혹한 서비스 환경, 노화, 코로나 현상 등에 의해 원인이 될 수 있다.

열악한 운전 환경과 습기, 작은 금속조각, 오염 등은 결합이 있는 충전된 도체와 다른 전위를 갖는 계통 사이의 절연체에 전기적인 도전 경로를 형성시킨다. 이렇게 형성된 도전경로는 계통에서 서로 다른 전위 사이에 완전한 단락 회로를 즉각 발생시키지 않고 고저항을 갖는 경우가 많다. 따라서 완전한 단락을 형성하기까지의 고장 전류는 제한되어 고장의 위치로부터 상부에 연결될 배선용차단기에 의해 검출되지 않는 경우가 많다. 그런 고장은 검출되기에 충분한 전류를 흐르지 못하게 하고 화재 위험을 발생시킬 수 있는 아크를 지속적으로 유지시켜, 치명적 물질·인적 피해를 유발시킨다. 따라서, 이러한 피해를 차단할 수 있는 시스템이 반드시 요구된다.

본 논문에서는 기존의 누전차단기 및 배선용차단기와 아크차단기의 비교를 통하여 아크차단기의 필요성을 제기한다.

## 2. 본 론

### 2.1. 아크의 특성

#### 2.1.1 물리적 특성

아크는 절연 매질을 전기적으로 관통하는 지속적인 발광방전 현상으로, 보통 부분적인 전극의 승화를 동반한다. 일반적으로 공기에 의해 음극(cathode)과 양극(anode)이 분리되며, 아크의 중심온도는 5,000~15,000℃ 정도이다. 높은 이온화 가스 압력은 아크의 영역에서 생성된다.

#### 2.1.2 전기적 특성

##### (1) 일반화된 아크고장의 특성

아크고장 시 고주파 잡음이 전압과 전류에서 나타나고, 아크에 의한 전압 강하가 있다. 또한 아크에 의한 전압 때문에, 전압 차에 대한 보상 기능이 없는 회로에서의 아킹전류는 동일 회로일 경우 정상상태의 전류보다 낮다. 그리고 아크전류의 상승 비율은 정상전류에 대한 상승률보다 일반적으로 크고, 각각의 반주기에서 아킹전류는 전류가 zero crossing 전에 거의 소멸되고 zero crossing을 지난 후에는 다시 나타난다. 이렇게 zero crossing 부분에서 그림 1과 같은 파형이 나타나는 것을 “shoulder”라고 한다. 일반적으로 전압의 파형은 방형파에 가까우며, 산발적으로 정상전류 사이에서 순간적으로 높게 나타나는 경우가 많다.

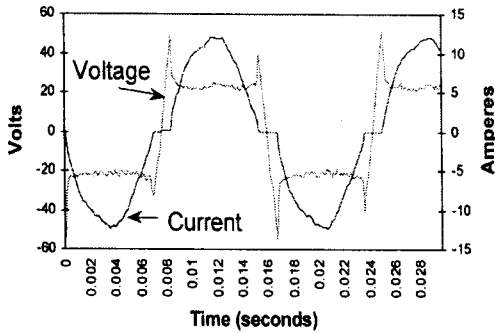


그림 1. 전형적인 아크고장에 의한 전류 및 전압 파형  
Fig 1. Current and Voltage shape due to typical arcing fault

## 2.2 전기화재 통계

최근 10년간 전기화재 발생현황은 표에서 나타난 바와 같이 발생건수는 1989년의 4,525건과 비교하여 1998년에는 약 2.4배가 증가한 10,897건으로 나타났다. 이와 같은 이유는 산업의 발달로 인하여 전기의 사용량이 증가함에 따라 발생건수도 증가하기 때문이다. 설비가 사용 중에 물리적인 손상을 받거나 전기에 의한 또는 다른 원인에 의한 과열에 의해 아크고장이 발생할 수 있다. 또한 아크로 인한 화재도 매년 발생한 것으로 통계에 집계되었다. 아크가 직접적인 원인으로 조사되지 않았더라도 표 1과 그림 2에서 보는 바와 같이 전체 화재 중 전기화재가 평균 33.4%의 비중을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 표 2와 그림 3에서와 같이 화재 원인들 중에는 아크로 인한 것이 상당히 포함된다.

표 1. 최근 10년간 전기화재 통계  
Table 1. Electrical fire statistics during recent 10 years

구분 년도	총화재	전기 화재	점유율 [%]	인명피해 [명] 사망/부상	재산 피해 [백만원]
1996	28,665	10,007	34.9	105/327	51,321
1997	29,472	10,075	34.2	75/273	52,628
1998	32,664	10,897	33.4	88/362	57,647
1999	33,856	11,204	33.1	59/301	54,673
2000	34,844	11,796	33.9	73/389	58,985
2001	36,169	12,300	34	77/381	67,856
2002	32,966	11,202	34	87/375	57,958
2003	31,372	10,670	34	76/365	49,898
2004	32,737	10,450	31.9	30/329	45,042
2005	32,340	9,991	30.9	44/324	44,577

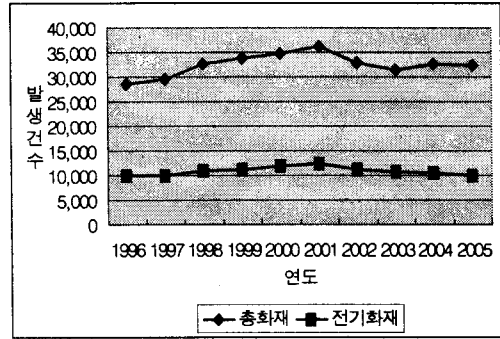


그림 2. 최근 10년간 전기화재 분포  
Fig 2. Electrical fire distribution during recent 10 years

표 2. 전기화재 원인 분포  
Table 2. Cause of electrical fire

원인 년도	계	단락	과부하	Arc (Spark)	정전기	누전
1989	4,525	3,256	410	289	30	430
1990	5,249	3,571	478	381	102	565
1991	6,160	3,793	624	455	125	1,009
1992	6,422	3,822	855	569	66	895
1993	7,153	3,808	915	546	79	1,624
1994	8,619	5,856	795	435	35	1,345
1995	9,307	1,342	837	453	43	726
1996	10,007	6,995	601	275	27	789
1997	10,075	7,164	880	-	51	868
1998	10,897	8,240	793	-	28	792

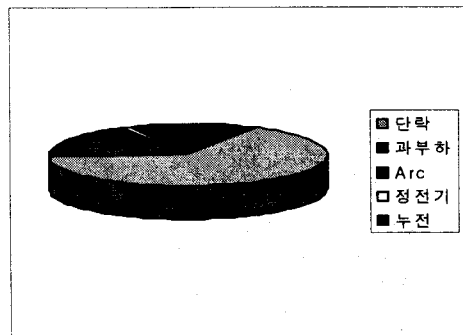


그림 3. 전기화재 원인 분포  
Fig 3. Cause of electrical fire

## 2.3. 아크차단기의 필요성

### 2.3.1 아크차단기와 기존차단기의 차별

그림 4는 과전류보호를 위한 전형적인 20A용 배선용차단기의 시간-전류특성 곡선으로, 이들 곡선의 조건에 만족되면 배선용 차단기는 해당 회로를 분리한다. 따라서 과전류 보호는 과전류 조건 같은 고장과 함께 야킹고장에 대해서도 회로를 보호할 수도 있다. 하지만 배선용차단기는 시간-전류의 조건이 1과 2로 표시된 영역에서는 회로를 분리하지 않는다.

그 곡선은 도체를 통해 흐르는 전류에 의한 줄열에 의해 발생하는 절연체의 열적 손상으로부터 배선을 보호하기 위한 것이지, 야킹의 영향으로부터 회로를 보호하기 위한 것은 아니기 때문이다.

영역 1은 배선용차단기와 같은 과전류 보호장치에 의해 검출되지 않는 단락회로 영역이다. 이 영역에서 아크로부터의 에너지는 짧은 시간에 인화성 물질이나 유기절연물질을 착화시키는데 충분하다. 이 정도의 전류는 배선용차단기의 동작 곡선에서 정상상태의 범위에 속하기 때문이다. 이 범위에서의 아크는 병렬아크영역이다.

영역 2는 아크전류가 부하와 직렬상태일 때 갖는 낮은 에너지 영역이다. 물질의 착화는 아크발생 지속 시간이 길지 않는 한 영역 1에서보다는 적게 발생된다. 하지만 야킹은 절연체와 같은 물질을 가로지르는 아크 트래킹에 의해 이 영역 정도의 전류가 유지될 수 있다.

아크 검출의 관점에서 두 영역 사이의 구별은 중요하다. 그림 4에서와 같이 영역 1의 병렬아크가 일반적으로 영역 2의 직렬아크보다 고장전류가 좀더 높다.

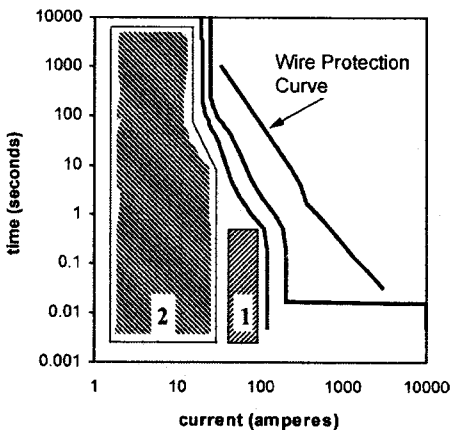


그림 4. 배선용차단기의 전류-시간 동작곡선  
Fig 4. Current-time curve of wiring circuit breaker

### 2.3.2 아크와 단락의 위험성

#### 1) 전기불꽃

화재원인으로서의 전기불꽃은 개폐기나 콘센트를 조작할 때에 발생하는 불꽃이 문제가 된다. 단로기를 제외한 전부가 어떤 일정한 전압이상의 전압이 가해진 회로의 차단 때에 불꽃을 낸다. 그러나 회로중에 인덕턴스를 포함할 때는 회로전압이 아크발생전압 이하라도 과도현상에 의한 전압상승으로 차단할 때 아크 또는 glow를 내는 일이 있다. 그리고 전기불꽃은 아니지만 백열전구와 같은 전등도 우리가 파손되면 필라멘트가 노출되어 전기불꽃과 같은 위험이 있으며 전기설비에서 발생하는 전기불꽃은 모두가 점화원이 될 수 있다.

#### 2) 아크의 수학적 모델

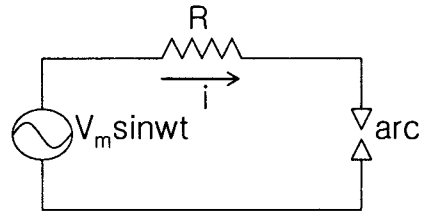


그림 5. 소스전압, 임피던스, 아크에 대한 등가회로

Fig 5. Equivalent circuit of source voltage, impedance, arc

$$I = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left[ \left( \frac{1}{2} + x^2 \right) \left( \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} x \right) - \frac{3}{2} x \sqrt{1-x^2} \right]} \quad (1)$$

$$P = \frac{V_m^2}{R} \frac{2}{\pi} x \left[ \sqrt{1-x^2} + x \left( \sin^{-1} x - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $x = \frac{V_a}{V_m}$ 이다.

0.5Ω의 저항을 가진 110V 내의 아크를 고려한다. 아크전압  $V_a$ 는 70V이다.  $V_m$ 은 155V이고  $x$ 는 0.452이므로 식(1), (2)를 이용하면 아크에 의한 전력을 구할 수 있다.

전력은  $(155)^2 / 0.5 \times 0.1134 = 5449[W]$ 이다.

이제 아크가 발생한 지점에서 단락이 발생했다고 가정한다. 전류는  $110 / 0.5 = 220A$ 이다. 접촉부위에서의 저항은 압력, 접촉면적, 금속표면의 성질 및 기타 다른 여러 인자들에 의해 좌우된다. 대표적인 값은 0.0005Ω이다. 단락회로에 있어서 전압은  $220 \times 0.0005 = 0.11V$ 이고 전력은  $220 \times 0.11 = 24.2W$ 가 된다.

위의 계산에서 알 수 있듯이 아크의 전력은 단락 회로보다 수 백배 크다. 아크내의 전류는

아크자체로 제한된다. 이 전류는 작기 때문에 방호장치가 빠르게 회로를 개방하는데 실패한다. 아크내의 전력은 매우 높고 작은 부분에 집중되기 때문에 방호장치가 회로를 개방하기 전에 오랜 시간동안 지속되어 상당한 손상을 줄 수 있다. 반면에 단락회로에 있어서 높은 전류가 발생하지만 전력은 매우 낮다. 더욱이 높은 전류 때문에 방호장치가 빠르게 동작할 것이고 전체 에너지는 아주 작다. 그림 6은 전원 전압에 따른 아크와 단락과의 전력을 비교한 그림이다. 그림에서 보듯 전압이 커질수록 아크에 의한 전력과 단락에 의한 전력의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 분석을 통하여 아크에 의해서는 상당한 손상이 발생할 수 있고 단락회로에 의해서는 손상이 작다고 할 수 있다.

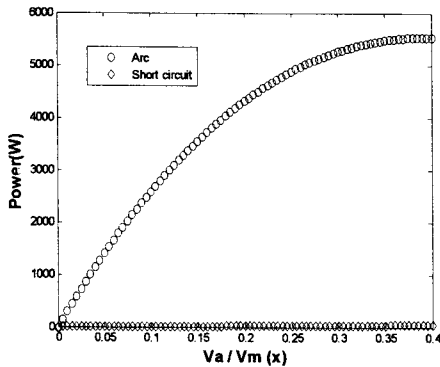


그림 6. 아크 때 단락 회로의 전력  
Fig 6. Power of arc and short circuit

### 3. 결 언

배선용차단기와 누전차단기가 대부분의 가정에 보급되었음에도 불구하고, 전기에 의한 화재는 좀처럼 감소되지 않고 있다. 이에 대한 원인은 아크고장에서 찾을 수 있다. 앞에서 검토한 바와 같이, 아크고장에 의해 흐르는 단락 전류는 배선용차단기에 의해서는 보호되지 않는다. 이는 아크고장 시 흐르는 전류가 정상상태의 전류보다 오히려 적거나 약간 많이 흐르는 정도로 차단기의 동작범위의 관점에서는 정상상태에 있기 때문이다.

국내에는 공칭전압으로 220V를 사용하기 때문에 주변국에 비해서 전기재해에 대한 위험도가 높고 발생률 또한 높다. 따라서 이를 저감시키기 위해

서는 아크분석 알고리즘의 다양한 개발을 통해 귀찮은 트립이 발생되지 않는 아크고장회로차단기의 도입을 가능하게 하여야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] George D. Gregory, etc., "More about Arc-Fault Circuit Interrupter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, 2004
- [2] Pete Theisen, etc., "Enhancing Aircraft Electrical System Safety and Uptime", The 8th Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft, 2005
- [3] Tammy Gammon, etc., "Conventional and Current-Dependent Methods for Predicting RMS Arc Currents in Building Systems", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Conference, 2001
- [4] George D. Gregory, etc., "The Arc-Fault Circuit Interrupter: An Emerging Product", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, 1998
- [5] Robert A. Pappas, etc., "Arc Fault Circuit Breaker Development and Implementation", Eaton Technical Paper
- [6] [http://ecmweb.com/mag/electric\\_basics\\_arcfault\\_protection/index.html](http://ecmweb.com/mag/electric_basics_arcfault_protection/index.html)