

아크차단기의 필요성에 관한 연구

박치현, 배석명, 임용배, 김기현, 최명일
한국전기안전공사 전기안전연구원

Research on Necessity of Arc Fault Circuit Interrupter

Chee-Hyun Park, Suk-Myeong Bae, Yong-Bae Lim, Gi-Hyun Kim, Myung-Il Choi
Korea Electrical Safety Corporation Electrical Safety Research Institute

Abstract - 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 조사기법이 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 전기계통의 접지된 부분 사이에서의 절연강도 저하에 의한 비정상적인 상태로 정의할 수 있다. 특히 전선의 절연체와 같은 고체 절연에서의 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 연결된 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.

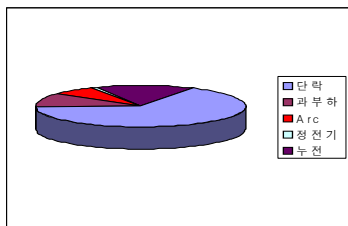
본 논문에서는 기존의 누전차단기 및 배선용 차단기와 아크차단기의 비교를 통하여 아크차단기의 필요성을 제기한다.

2. 본 론

2.1 전기화재 통계

최근 10년간 전기화재 발생현황은 발생건수는 1996년의 10,007건과 비교하여 2005년에는 약간 감소한 9,991건으로 나타났다. 전기화재 통계집에 의하면 전체 화재 중 전기화재가 평균 33.4%의 비중을 차지하고 있다. 전기방호시설이 설치됨에도 불구하고 전기화재가 줄어들지 않는 이유는 산업의 발달로 인하여 전기의 사용량이 증가하기 때문이다. 설비가 사용 중에 물리적인 손상을 받거나 전기에 의한 또는 다른 원인에 의한 과열에 의해 아크고장이 발생될 수 있다.

또한 아크로 인한 화재도 매년 발생한 것으로 통계에 집계되었다. 아크가 직접적인 원인으로 조사되지 않았더라도 그림 1에서 보는 바와 같이 전체 화재 중 전기화재 원인들 중에는 아크로 인한 화재가 10.5% 발생했다.



〈그림 1〉 전기화재 원인 분포

2.2 아크차단기의 필요성

2.2.1 아크차단기와 기존차단기의 차별

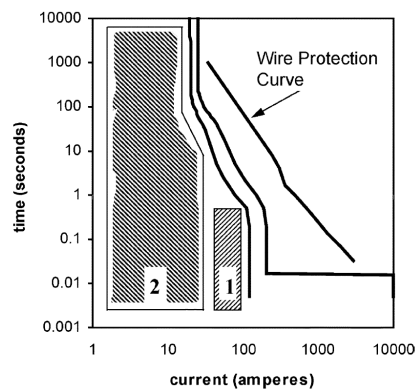
그림 2는 과전류보호를 위한 전형적인 20A용 배선용차단기의 시간-전류특성 곡선으로, 이들 곡선의 조건에 만족되면 배선용 차단기는 해당 회로를 분리한다. 따라서 과전류 보호는 과전류 조건 같은 고장과 함께 아크고장에 대해서도 회로를 보호할 수도 있다. 하지만 배선용차단기는 시간-전류의 조건이 1과 2로 표시된 영역에서는 회로를 분리하지 않는다.

그 곡선은 도체를 통해 흐르는 전류에 의한 줄열에 의해 발생하는 절연체의 열적 손상으로부터 배선을 보호하기 위한 것이지만, 아크의 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 착화시키는 데 충분하다. 이 정도의 전류는 배선용차단기의 동작곡선에서 정상상태의 범위에 속하기 때문이다. 이 범위에서의 아크는 병렬아크 영역이다.

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

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



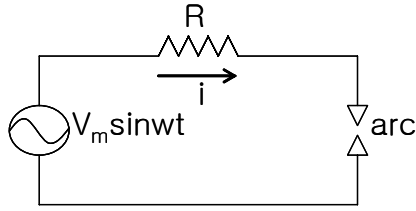
〈그림 2〉 배선용차단기의 전류-시간 동작곡선

2.2.2 아크와 단락의 위험성

1) 전기불꽃

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

2) 아크의 수학적 모델



〈그림 3〉 소스전압, 임피던스, 아크에 대한 등가회로

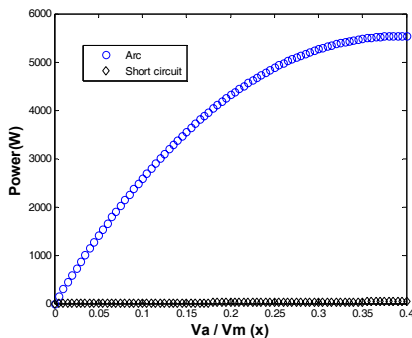
$$I = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{1}{2} + x^2 \right) \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} x \right) - \frac{3}{2} x \sqrt{1-x^2} \right]} \quad (1)$$

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

여기서, $x = \frac{V_a}{V_m}$ 이다.

0.5Ω의 저항을 가진 110V 내의 아크를 고려한다. 아크전압 V_a 는 70V이다. V_m 은 소스의 최대전압으로써 155V이고 x 는 0.452이므로 식(1), (2)를 이용하면 아크에 의한 전력을 구할 수 있다. 계산된 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 $220 \times 0.005 = 0.11V$ 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 4는 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 4〉 아크 대 단락 회로의 전력

2.2.3 AFCI와 사회적 비용

조사위원회 의원들은 1990년부터 1998년까지 9년에 걸쳐 배전 계통을 포함하여 평균 41,500건의 화재가 발생했다고 보고했다. 이 화재들은 매해 평균 326명의 사망, 1481명의 부상, 6억 4천 6백만 달러의 재산상 손실을 가져왔다. 여기서, 분석을 위하여 미국 소비자 제품 안전 위원회(CPSC)의 부상 비용 모델을 사용하여 사망자 1명이 5백만 달러에 상당하고 화재 관련 부상이 56,000 달러라고 가정한다. 이러한 모델을 이용하여 전기화재의 사회적 비용은 매해 약 23억 6천만 달러에 달할 것으로 예상된다.

이 분석 내용에서, 사회적 비용(Societal Cost)은 전기화재에 관련된 소비자 사망, 부상, 재산손실에 한정한다.

2.2.3.1 주택 노화에 의한 비용

1990년 CPSC의 조사결과에 의하면 주거시설 전기화재의 85%가 20년 이상된 집에 대한 것으로 나타났다. 1999년 Annual Housing Survey에 따르면 1990부터 1998년 기간동안 약 9천 8백 7십만 가구가 있었고 약 7천만 가구가 20년 이상된 것으로

나타났다. 20년 미만된 집에 대해서 사회적 비용은 매해 3억 5천 4백만 달러에 달하는 것으로 조사되었다. 20년 미만인 집이 2천 8백 7십만 호가 있으므로 사회적 비용의 기대치는 한 가구당 12.33달러이다.

20년 이상된 집에 대해 사회적 비용은 매해 이십억 천만 달러에 달한다. 따라서, 20년 이상의 7천만 가구에 대한 사회적 비용 기대치는 매해 한 가구당 28.66달러이다.

2.2.3.2 AFCI의 수명에 따른 경제적 효과

CPSC 기술진은 AFCI가 40년 정도 서비스될 것이라고 보고 있다. 이 논문에서는 AFCI가 30년에서 40년 지속될 것이라고 가정한다. AFCI 사용에 따른 수익은 제품의 수명에 따라 증가할 것이다.

표 1은 몇몇 상황에 따른 AFCI 설치 시 사회적 비용에 대하여 나타낸다. 20년 이상된 주거시설에 화재가 집중되므로 사회적 비용이 설치 개시 년도에 비례하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 사회적 비용은 처음 20년간 매해 12.33달러이고 그 이후로 28.66달러라고 가정한다.

〈표 1〉 AFCI 설치에 따른 사회적 비용

(단위: 달러)

	AFCI 설치에 따른 사회적 비용	
	30년 사용	40년 사용
건축시 설치	324	425
10년 후 설치	429	530
20년 후 설치	572	673

표 2는 AFCI 설치에 따른 사회적 비용 감소분이다. Engineering Sciences 기술진에 의하면 AFCI 기능이 없는 차단기와 비교해서 AFCI가 있는 차단기가 한 가구당 150달러에서 200달러 정도 가격이 높은 것으로 조사되었다. AFCI 설치시 한 가구당 175달러가 추가된다고 가정한다. 사회적 비용 감소분이 오래된 집에 AFCI를 설치할수록 증가하고 기존 시스템 대신 AFCI를 사용할 때 추가로 드는 비용보다 AFCI를 설치함으로써 얻어지는 사회적 비용 감소분이 더 많은 것을 볼 수 있다.

〈표 2〉 AFCI 설치에 따른 사회적 비용 감소분

(단위: 달러)

	AFCI 설치 시 사회적 비용 감소분	
	30년 사용	40년 사용
건축시 설치	203	394
10년 후 설치	267	452
20년 후 설치	287	473

3. 결 론

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 전기화재에 대한 위험도가 높고 발생률 또한 높다. 따라서 이를 저감시키기 위해서는 아크분석 알고리즘의 다양한 개발을 통해 귀찮은 트러블이 발생되지 않는 아크고장회로차단기의 도입을 가능하게 하여야 할 것이다.

[참고문헌]

[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