한국군사과학기술학회지 제12권 제5호, pp. 667~675, 2009년 10월

학술논문 에너지 부문

# 특수섬유에 의한 전력계통의 고장유발 과정 고찰

## A Study on the Procedure of Fault on Electric Power Systems by Special Fibers

임 완 권* 김 성 식* 정 동 학**
One-Kwon Rim Seong-Shik Kim Dong-Hak Jung

Abstract

Faults can be generated at electric power systems by variety of both certain and uncertain reasons, which may cause harmful effects on electrical apparatuses under operation and stability of electric power system operations, and may also lead to great confusions and inconveniences to individual livings, public works, industrial activities, services, military affairs, etc.. In some cases, intentional inductions of faults are committed for specific purposes, and it is necessary to understand the procedures of fault by some foreign materials.

In this paper, compositions and operations of electric power systems, summaries of electrical fault phenomena and fault protection, and restrictions to power system operation were outlined. And the analogies on the procedure of faults from former papers were introduced, and test results that revealed the validity of those analogies were also introduced.

Keywords : Electric Power System, Power System Operation, Power System Fault, Protective Relay System, Fault Recover, Special Fiber

## 1. 서 론

전력계통은 발전소로부터 수용가 부하설비에 이르기까지, 변전소, 송전선로, 배전선로 등을 경유하여 서로 전기적으로 연결되어 있으며, 발전소는 대체적으로 해안오지나 산간벽지 등에 분포하는 반면, 대부분의 수용가는 도시지역이나 산업단지 등과 같이 발전소로부터 멀리 떨어진 곳에 위치하고 있기 때문에, 일반적으로 장거리 송전계통을 필요로 한다.

또한 수많은 수용가에 전력을 공급하기 위해서 다단의 복잡한 배전계통도 필요로 한다.

전력계통의 주파수를 항상 일정하게 유지하기 위해서는, 계통 전체의 공급전력과 계통 전체의 수요전력이 항상 일치해야 하는데, 아직까지는 대용량의 전력을 물리적으로 비교적 긴 시간동안 저장할 수는 없기 때문에, 실제적으로는 매순간 수요전력과 발전전력이 일치해야 한다.

전력계통은 발전소로부터 부하설비까지 전체가 유기적으로 연결되어 있기 때문에, 어느 일부분에서 고장이

† 2009년 5월 26일 접수~2009년 7월 31일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
** 일렉트로 컨설팅(Electro Consulting)
책임저자 : 임완권(okrim@add.re.kr)

발생하여 큰 동요가 생기며, 특히 이러한 동요가 지속되면 고장이 확산되거나 계통의 건전한 운전이 곤란해지는 등, 계통 전체에의 심각한 영향을 미치게 되기 때문에, 최소한의 고장범위만을 건전 계통으로부터 신속히 분리해야 함은 물론, 고장으로 인하여 발생한 수요와 공급의 불균형을 재빨리 해소할 수 있어야 한다.

전력계통에 고장이 발생하면, 정상으로 복구하기까지 비교적 긴 공급지장이 발생하며, 설비특성, 보수체계, 계통 운용특성이나 능력 등에 따라 정전구간, 정전지속시간, 주파수나 전압의 동요폭 등이 달라진다.

특히, 고장 원인요소의 제거에 긴 시간이 소요되는 경우는 그만큼 복구도 지연되며, 계통 전체가 불안정한 상태로 전이될 가능성도 높아지는데, 본 논문에서 대상으로 하는 특수섬유는 매우 많은 양이 넓은 범위에 걸쳐 전력설비 부근에 산포될 것이기 때문에, 제거와 복구에 매우 긴 시간을 요하게 될 것으로 예상된다.

## 2. 전력계통의 구성 및 운용 개요

### 가. 전력계통의 구성

전력계통의 구성은 Fig. 1과 같이, 다수의 발전소로부터 수많은 수용가에 이르기까지를 연결하는 송전선로, 변전소, 배전선로 등으로 구성되며, 일반적으로 망상(網狀)구조를 갖게 된다.

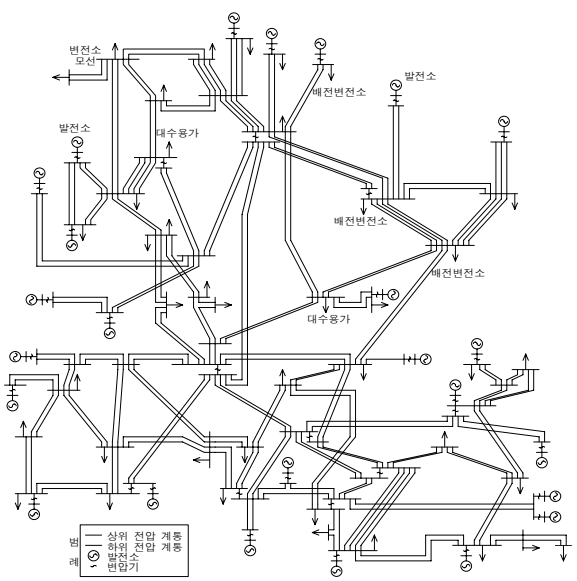


Fig. 1. 전력계통의 구성 예

Fig. 1에서 수많은 배전선로와 수용가는 지면 편의상 나타내지 않았으며, 선 한 가닥은 1회선(3상)을 나타낸 단선도로, 대부분 변전소와 변전소 간은 2회선으로 구성되고 있음을 나타낸다.

### 나. 운용시스템 구성 개요

매순간의 전력수요, 발전전력, 주파수, 계통 각부의 결선상태, 전력용 기기의 운전상태, 계통 각 지점의 전압과 전류, 연료비 단가, 각각의 발전기의 특정 시점의 발전전력의 증감에 따르는 발전비용의 증감, 선로 각부의 손실전력 등의 다양한 정보를 실시간으로 취득하여, 가장 경제적이면서도 안정적으로 전력계통 전체를 운용하기 위한 운용시스템이 가동된다.

이러한 운용시스템은 Fig. 2와 같이, 각 사이트와 통신 네트워크를 구성하여 관측, 감시, 제어의 기능을 수행하게 되는데, 중앙의 운용시스템(주로 EMS : Energy Management System)을 주축으로 몇 단계의 계층구조로 이루어진다.

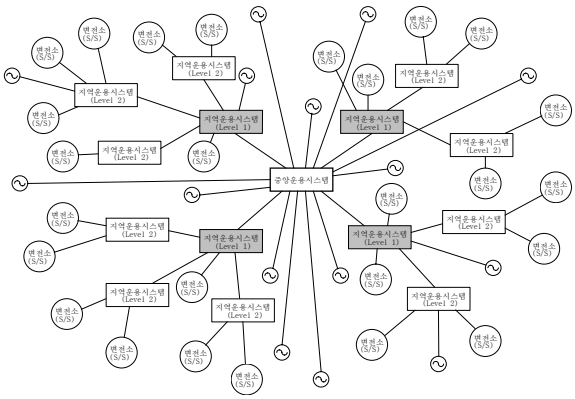


Fig. 2. 전력계통 운용시스템 구성 예

### 다. 계통의 안정적 운용상의 제약사항

전력계통을 운용함에 있어, 안정성과 경제성을 방해하는 요인으로 다음과 같은 사항을 들 수 있다.

- 매순간 수요와 공급이 일치해야 함
- 예고 없이 부하를 사용하거나 중지할 수 있음
- 임의의 곳에서 예고 없는 고장이 발생할 수 있음
- 사소한 고장이 대정전으로 확대될 수 있음

따라서 전력계통을 지속적으로 안정하게 운용하는 것은 매우 어려운 과제이다.

## 3. 송전계통의 고장과 보호

### 가. 고장전류의 크기

Fig. 1과 같은 계통의 어느 한 점에서 고장이 발생했을 때, 고장지점에 흐르는 고장전류는 전원의 용량, 전원으로부터 고장지점까지의 임피던스, 그리고 고장지점의 임피던스(고장임피던스) 등에 의해 결정된다.

고장지점에서 보면, 일반적으로 다수의 발전기가 각각의 경로를 통하여 고장지점과 연결되어 있기 때문에 매우 복잡하지만, 이들 발전기까지의 회로를 등가로 축약하면 고장지점으로부터 양쪽에 하나씩의 발전기가 남게 되고, 이들 양쪽의 발전기도 축약함으로써, 최종적으로는 하나의 발전기와 선로로 표현되는 전원과 고장임피던스로 Fig. 3처럼 나타낼 수 있다[1].

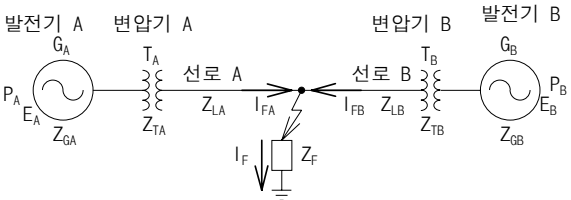


Fig. 3. 고장회로 축약 예

Fig. 3처럼 고장지점 양측의 구성을 A와 B로 간단히 나타냈지만, A측과 B측이 원래 완전히 독립된 상태는 아니고, 실제로는 루프를 형성하고 있었기 때문에 축약과정은 사실상은 간단하지 않다.

Fig. 3을 고장지점에 대해 등가로 나타내면, Fig. 4와 같다. 즉, A측과 B측이 고장지점에 대해서는 서로 병렬이기 때문에, 등가화가 가능하다.

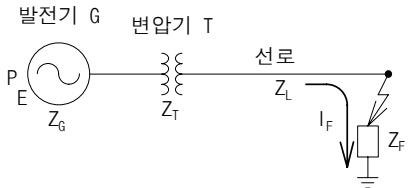


Fig. 4. 등가 고장회로 예(최종 축약)

개념적으로만 나타내면, 고장전류는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$I_F = \frac{E}{Z} = \frac{E}{Z_G + Z_T + Z_L + Z_F} \quad (1)$$

위의 과정에서 발전기, 변압기, 선로 등을 단일 요소로 나타냈지만, 사실은 여러 대의 발전기, 다수의 변압기, 다수의 선로 등 모두가 운전전압과 특성이 다르기 때문에, 이들의 통합과 축약을 위해서는 일정한 규칙을 따라야 한다.

즉, 어느 지점에서의 고장전류는 전원의 크기, 발전기, 변압기, 선로 및 고장임피던스의 크기 등에 따라 결정됨을 알 수 있다.

이런 계산은 손으로 하는 데는 한계가 있으며, 요즈음은 컴퓨터 프로그램에 의해 고장조건을 설정함으로써 예측계산이 가능하다.

앞의 Fig. 2의 계통운용시스템에는 이러한 계산프로그램을 설치해 두고 필요시에 언제라도 활용할 수 있도록 하며, 계통 전체의 최근의 모든 데이터도 지속적으로 갱신하여 보유할 필요가 있다.

### 나. 고장보호와 보호계전

#### 1) 고장의 유형

전력계통은 전체 국토에 넓게 분포되어 있어 자연적 고장요인에 항상 노출되어 있는데, 농어촌이나 산간벽지처럼 시설의 분포밀도가 낮은 곳에서는 자연적 요인에 의한 고장이 잦은 반면, 대도시나 산업단지처럼 시설이 조밀하고 작업이나 공사가 많은 곳은 상대적으로 인위적 고장요인이 많다고 볼 수 있다.

##### 가) 평형고장

3상 선로에 모두 동등한 크기의 고장전류가 흐르게 되는 고장으로, 3상이 서로 접촉하는 3상 단락고장이 대표적인 예이다.

실제로는 잘 발생하지는 않지만, 가장 가혹한 경우이기 때문에 설비나 기기의 고장대비 설계를 위해 검토하는 경우가 대부분이다.

3상 지락고장은 결과적으로는 3상 단락고장과 같으며, 평형고장에 해당한다.

##### 나) 불평형고장

3상 선로의 고장전류가 같지 않은 경우인데, 가장 빈번한 것은 1선 지락고장이며, 수목이나 중장비 등과 같은 이물 접촉에 의한 고장, 낙뢰에 의한 고장 등이 이에 해당한다.

2상 단락, 2상 지락 등도 3상의 전류가 같지 않기 때문에 불평형고장에 해당된다.

2) 고장보호

계통의 어느 지점에 고장이 발생한 경우, 고장지점으로부터 전원에 이르기까지의 모든 설비에 고장전류가 흐르게 되어, 적절히 대처하지 않으면 다수의 설비에 피해를 초래하게 된다.

실질적으로는 최소한의 고장구간을 계통으로부터 빠르게 분리함으로써, 고장전류의 지속을 멈추도록 하는 방법을 택하는데, 이렇게 함으로써, 설비 자체의 손상을 최대한 억제하는 것은 물론, 계통 전체의 안정성의 확보에도 기여하게 된다.

3) 보호계전

고장보호를 위한 현실적인 방법으로, 보호계전기를 적용하게 되는데, 이는 고장이 발생했을 때, 미리 설정한 논리와 알고리즘에 따라 고장지점에 직접 연결된 최근단의 모든 차단기를 개방함으로써, 고장지점의 전압을 제거하게 된다.

일반적으로, 고장 발생 후 5~6 주기(약 80~100㎳) 정도에 차단기를 개방하도록 하고 있고, 만약의 경우, 보호계전기나 차단기 자체의 고장에 대비하여 몇 단계의 백업계전기를 구비하는 것이 일반적인데, 백업기능은 일반적으로 다음 변전소의 주계전기와 차단기가 담당하기 때문에 백업계전기가 동작하면 정전범위가 훨씬 넓어진다.

백업계전기의 동작시간은 주계전기의 동작시간에 여유를 고려한 충분한 지연시간을 설정해야만 주계전기와의 협조가 원활하지만, 지나치게 크게 하는 경우는 계통의 안정성 확보에 어려움이 있을 수 있으므로, 적절한 협조가 필요하다.

## 4. 특수섬유에 의한 전력계통 고장발생 과정

### 가. 검토대상 고장 유형

특수섬유에 의한 전력계통의 고장은 어떤 형태로도 가능하기는 하지만, 살포방향, 비중, 길이 등 섬유의 거동에 관련된 특성과, 고장의 진행속도를 고려하면 1선 지락고장이나 2상 단락고장이 대부분을 차지할 것으로 예상되며, 3상 단락고장이 발생할 가능성은 매우 작은 것으로 볼 수 있다.

고장발생의 유형으로는, 대부분의 시설(변전소나 송전선로)에서 최상부에 가공지선이 배치되기 때문에, 1선 지락고장이 2상 단락고장에 비해 훨씬 발생가능성이 높을 것으로 예상된다.

1선 지락고장의 경우, 섬유에 인가되는 전압은 상간 운전전압의 $1/\sqrt{3}$ 이 인가되는데 비해, 2상 단락의 경우는 상간의 운전전압 전체가 인가되지만, 상대적으로 섬유의 길이도 길어지기 때문에, 두 경우에 있어서의 고장의 진행은 정량적으로 큰 차를 나타내지는 않을 것으로 판단된다.

편의상 여기서는 1선 지락고장에 대해 검토하도록 하였다.

### 나. 고장진행 Flow

몇몇 대상 시설 중에서 가공송전선로에서의 고장의 진행을 살펴보면, 일반적으로 Fig. 5와 같은 흐름으로 이루어진다[2,3].

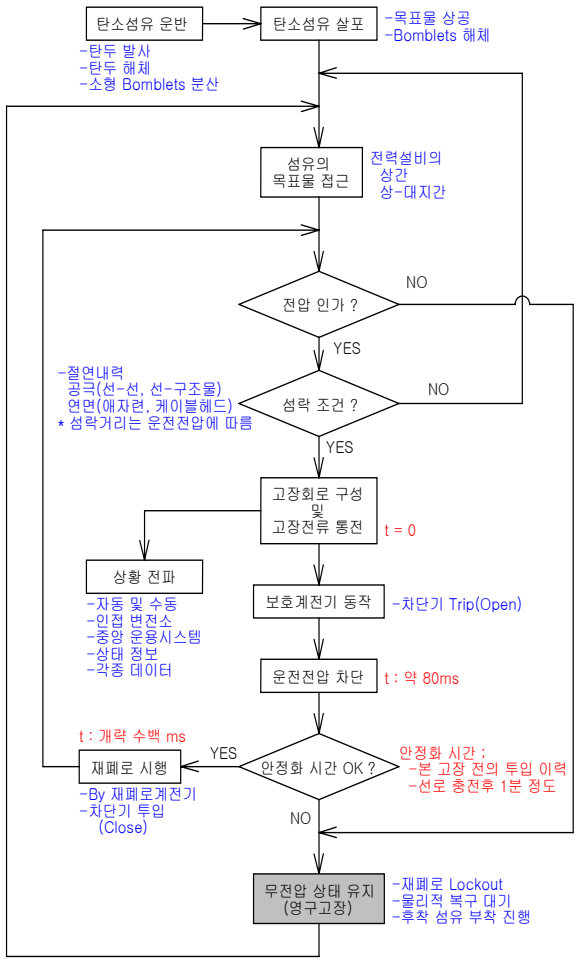


Fig. 5. 가공송전선로의 고장

가공송전선로의 대부분을 차지하는 1선 지락고장은 운전전압이 없어지면 해소될 수 있는, 수목접촉이나 낙뢰침입 등의, 일시적인 고장이 많아 Fig. 5에서처럼 자동 재폐로 기능을 1회 부가하는 것이 일반적이다. 즉, 고장이 발생하여 아크가 발생했더라도 전압을 제거했다가 인가하면, 고장요인이 제거되어 다시 정상운전이 가능한 경우가 대부분이다.

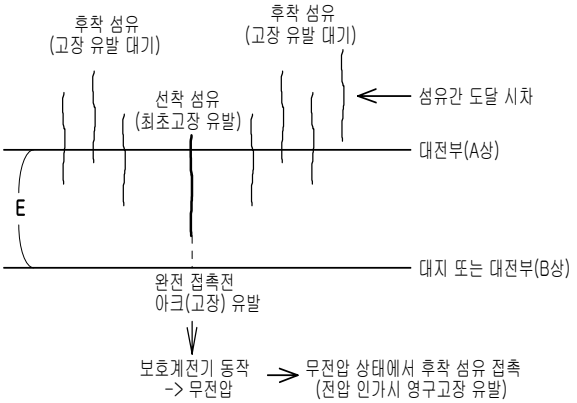


Fig. 6. 특수섬유의 시간차 혼촉

도체까지의 도달시각이 다른 다수의 특수섬유에 의한 경우는 수목의 경우와는 달리, 처음 접촉된 섬유에 의해 고장이 발생하여 재폐로를 행하더라도 계속하여 섬유가 부착되기 때문에 영구고장으로 진행되는데, 이러한 현상은 Fig. 6처럼 설명할 수 있다.

### 다. 고장발생의 유추

#### 1) 특수섬유의 특성

여기서 검토한 특수섬유의 전기저항은 1m당 수백Ω 정도에 이르며, 열처리 온도가 수천℃ 정도이다. 따라서 전력계통에 접촉하여 고장을 일으키려면 열처리 온도보다 높은 용융온도를 얻을 수 있는 충분한 전류가 흘러야 하며, 따라서, 섬유의 저항값이 작을수록 고장에 이를 가능성이 커진다.

#### 2) 공극 절연파괴

전압이 인가된 공극에 섬유가 접근하면, 공극에 비해 섬유의 저항이 매우 작기 때문에, 모든 전압이 공극에 인가(식 (2), $E_G$)된다. 공극이 점차 작아지면, 어느 순간 공극의 절연이 파괴되어 이온상태에 도달함으로써 공극은 양호한 도체상태로 바뀐다.

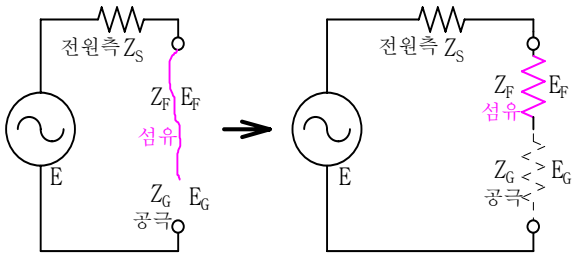


Fig. 7. 공극에의 전압 인가

$$E_G = \frac{Z_G}{Z_S + Z_G + Z_F} \cdot E = \frac{\infty}{Z_S + Z_F + \infty} \cdot E = E \qquad (2)$$

#### 3) 전류 통전 및 섬유 가열

공극의 절연이 파괴되어 이온상태에 도달함으로써 대부분의 운전전압은 섬유에 인가되고 섬유의 저항에 반비례하는 전류(식 (3), $I_F$)가 섬유를 통하여 흐르게 되는데, 이때 발생하는 열에 의해 섬유가 가열된다.

$$I_F = \frac{E_F}{Z_F} = \frac{E}{Z_S + Z_F} \qquad (3)$$

여기서, 전원측 임피던스 $Z_S$는 식 (1)의 분모에서 고장점의 임피던스 $Z_F$를 제외한 나머지 모두의 합으로, 계통이 크거나, 고장지점이 전원에 가까운 경우는 작은 값을 나타낸다.

#### 4) 섬유 용단과 아크전류 형성 및 고장발생

섬유에 발생하는 열에 의해 섬유가 용단되면, 도체간 공극 전체가 이온상태인 아크로 바뀌게 되면서 매우 큰 전류가 흐르게 되는데, 이는 바로 고장상태에 이른 것을 의미한다.

#### 5) 보호계전기 동작

아크(고장)전류가 일정시간(보통 2~3 주기) 지속되면 보호계전기는 고장으로 인식하여 해당차단기를 차단하도록 신호를 출력하게 되고, 이 신호를 받은 차단기는 차단과정을 시작하는데, 실질적인 차단에 개략 2~3 주기가 소요되므로, 고장전류기 흐르기 시작하면서부터 5~6 주기 정도에 고장이 제거된다.

위의 전체 과정을 유추했던 예를 나타내면 Fig. 8과 같다[4].

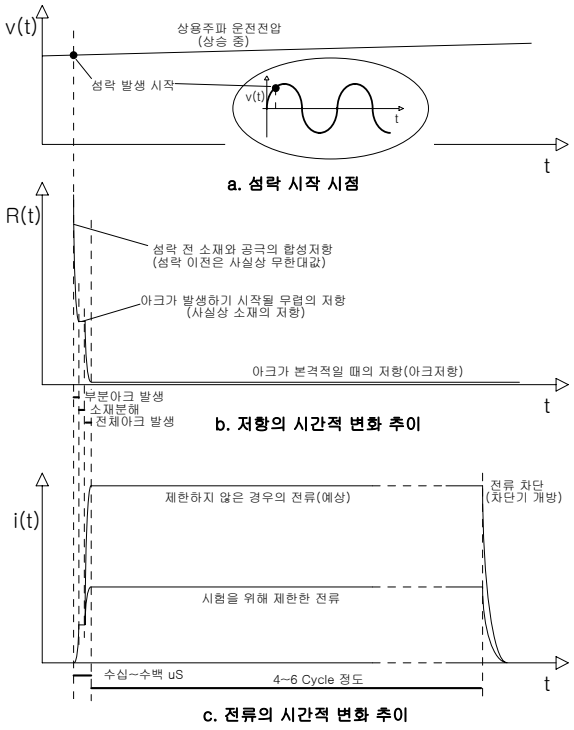


Fig. 8. 고장전류의 형성 및 소멸(추정)

### 라. 실험적 고찰

다양한 특수섬유의 특성 파악을 위한 시험결과에서 위의 추정 과정을 확인할 수 있었다.

#### 1) 시험회로 및 시험방법 개요

식 (3)에서 고장임피던스($Z_F$)가 정해진 경우, 전원전압($V$)과 전원측 임피던스($Z_S$)에 의해 고장전류가 결정되며, 본 시험을 위한 단락발전기 세트는 필요에 따라 이들을 조정할 수 있다.

시험회로의 개요를 나타내면 Fig. 9와 같다.

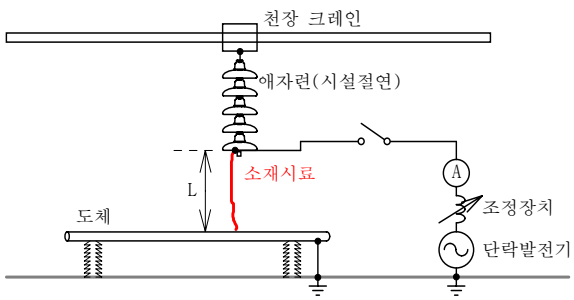


Fig. 9. 시험회로 개요

#### 2) 시험조건

시험전압은 6.6kV로 하였고, 고장전류는 3kA로 설정하였는데, 실제 전력계통의 특정 지점에서 고장이 발생한 경우 고장전류의 크기를 상정할 수 있는데, 작은 고장전류(아크전류)가 흐르게 되는 조건일수록 섬유의 용단은 어려워지기 때문에, 안전역에서의 시험을 위해 고장전류의 크기를 비교적 작은 레벨인 3kA로 하였다.

#### 3) 시료

굵기가 동일한 섬유를 1가닥으로 구성한 시료(시료 A) 3개와, 3가닥으로 구성한 시료(시료 B) 3개에 대하여 동일한 조건에서 시험하였다.

#### 4) 시험결과

측정결과그래프에서 아크전류는 실효치 3kA로 파고치로는 약 4.2kA가 되며, 전류통전 초기의 값을 파악하기 위한 부분스케일의 측정범위는 수백 A로 하였다.

여기서는, 시험결과에 큰 차이는 없기 때문에, 각 시료에 대한 2번씩의 결과만을 나타냈다.

가) 1가닥 시료(시료 A)

① 시험-1

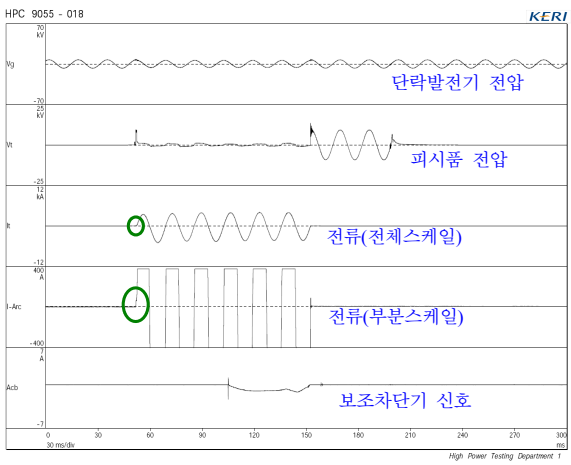


Fig. 10. 시험결과(A-1)

Fig. 10의 아크전류 발생 직전의 전류를 확대하면 Fig. 11과 같은데, 약 65A 정도를 잠시 유지하는 동안 섬유가 용단된 것으로 추정된다(Fig. 12 참조).

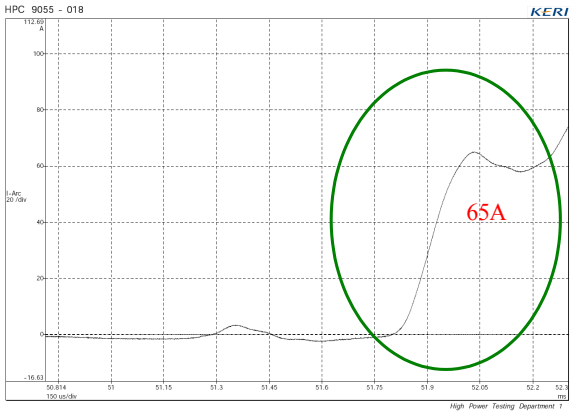


Fig. 11. 아크 전 전류(A-1)

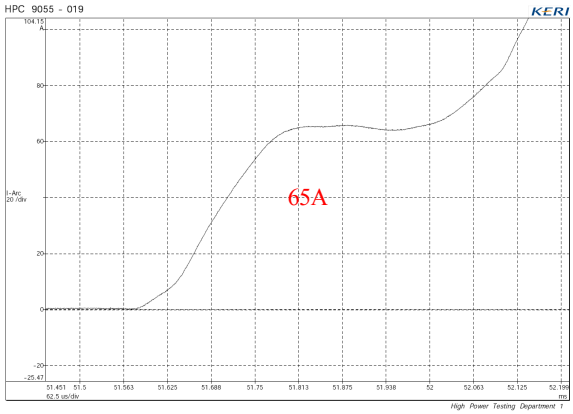


Fig. 14. 아크 전 전류(A-2)

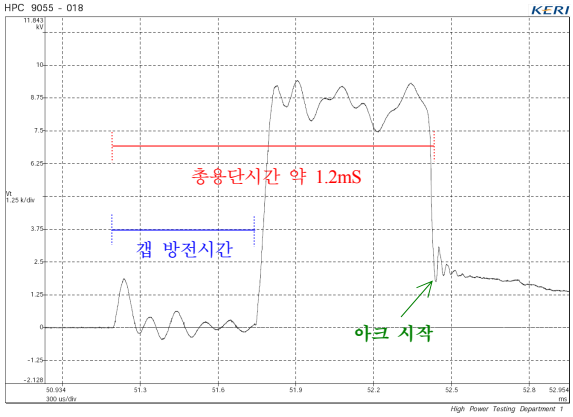


Fig. 12. 시료 용단시간(A-1)

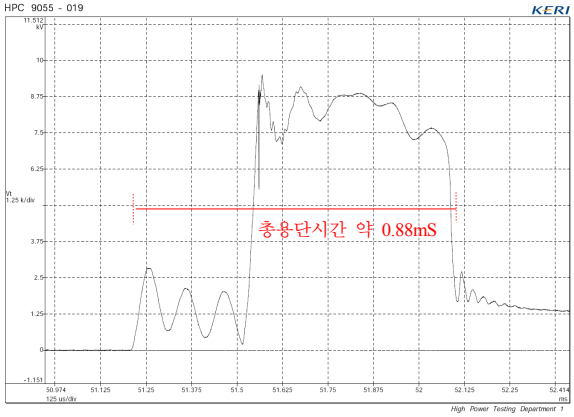


Fig. 15. 시료 용단시간(A-2)

② 시험-2

나) 3가닥 시료(시료 B)

① 시험-1

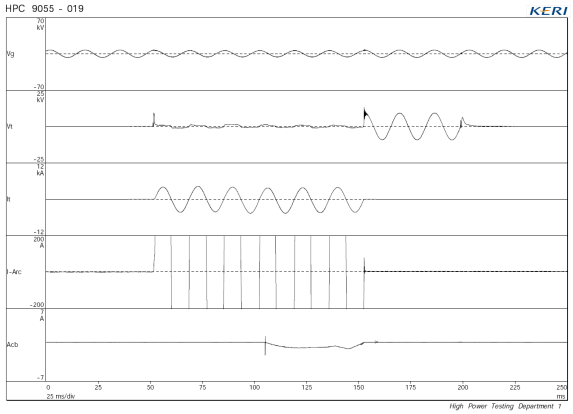


Fig. 13. 시험결과(A-2)

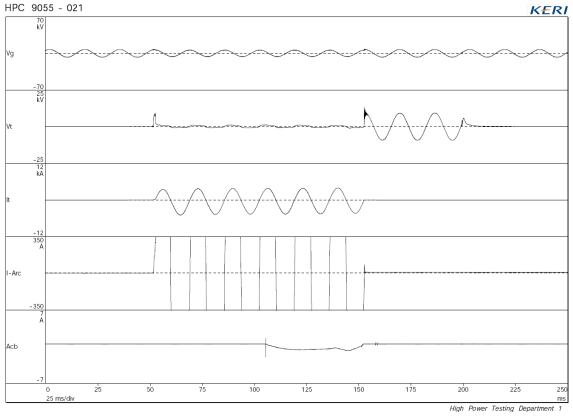


Fig. 16. 시험결과(B-1)

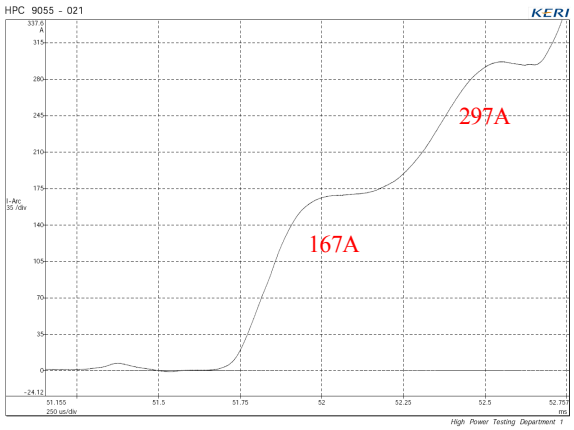


Fig. 17. 아크 전 전류(B-1)

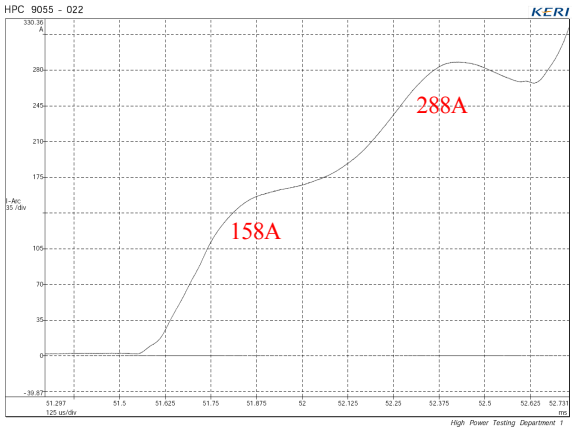


Fig. 20. 아크 전 전류(B-2)

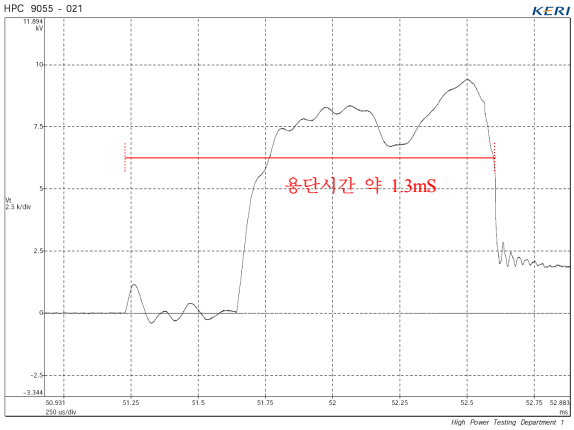


Fig. 18. 시료 용단시간(B-1)

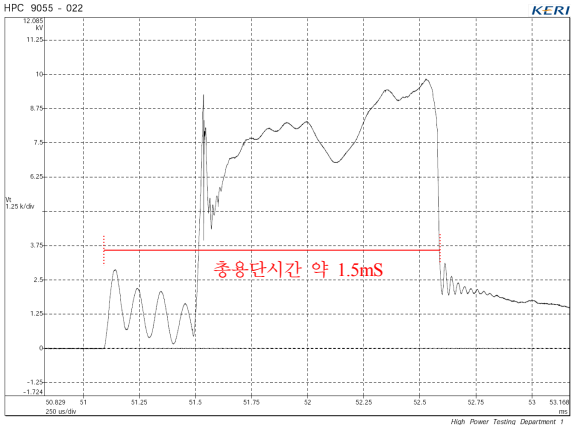


Fig. 21. 시료 용단시간(B-2)

② 시험-2

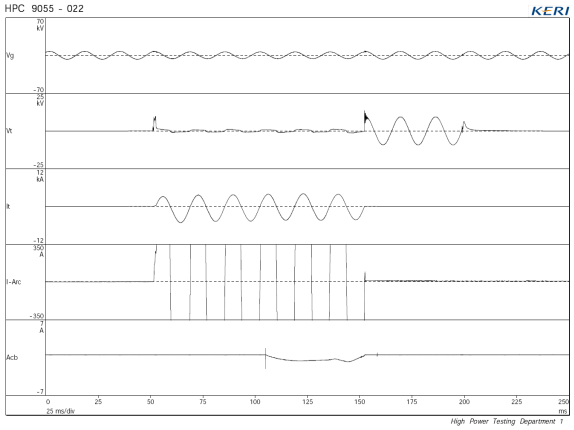


Fig. 19. 시험결과(B-2)

아크 발생 전의 전류의 크기를 보면, 섬유의 굵기가 굵은 시료 B의 경우가 가는 시료 A에 비해 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 굵은 섬유의 저항값이 가는 섬유에 비해 작기(1/3 정도) 때문인 것으로 판단된다.

5) 추정과의 비교

시험결과와 Fig. 8의 추정과정을 비교하면, 전반적으로 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이는 본격적인 아크의 성립 이전에 섬유를 경유한 전류가 흐름으로써 섬유가 열에 의해 용단된다는 추정이 잘 일치하는 것을 나타내는데, 따라서, 만약 섬유의 저항이 너무 커서 이에 흐르는 전류가 너무 작다면, 섬유의 용단에 이르지 못할 것이며, 이 경우는 아크가 형성되지 않을 것임을 추정할 수 있다.

Fig. 17 및 20의 전류의 증가형태가 Fig. 11이나 Fig.

14의 경우와 달리 2중으로 나타난 것은, 전자력(電磁力)의 차에 의해 3가닥의 섬유의 물리적 거동이 서로 다르고, 용단시간이 일치하지 않는 등의 복잡한 현상이 중첩되어 나타난 것으로 보이며, 현재로는 정확히 현상을 규명하는 데는 어려움이 있다.

다음 Fig. 22 및 23은 위의 3가닥 시료의 경우의 다른 예로써, 이 경우는 Fig. 17이나 20에서와 같은 아크 이전의 2중 전류상승 형태가 나타나지 않았는데, 이는 불규칙한 다수 섬유의 경우, 통전경로의 구성이 일정하지 않기 때문인 것으로 추정된다.

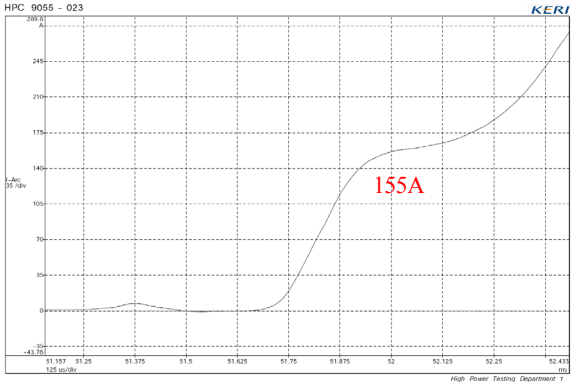


Fig. 22. 아크 전 전류(B-3)

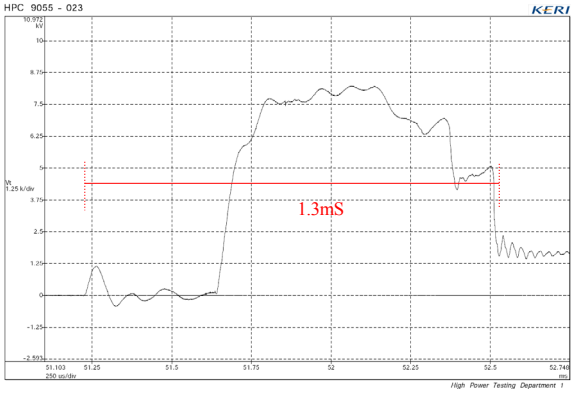


Fig. 23. 시료 용단시간(B-3)

고장전류가 크게 흐르지 않는 계통 조건의 경우는, 아크 이전의 전류가 충분히 형성되지 않기 때문에, 섬유를 용단시킬 수 없어 아크상태에 이르지 않는데, 이는 Fig. 7 및 식 (3)에서 전원측의 임피던스 $Z_S$가 너무 커서 섬유에 큰 전압이 인가되지 않아, 섬유를 용단할 정도의 전류가 흐르지 않기 때문이다.

## 5. 결 론

### 가. 고장전류의 크기

계통의 어느 지점에서 고장이 발생한 경우, 이 고장점에서의 고장전류는, 전원의 용량, 고장점으로부터 전원에 이르기까지의 전원측 임피던스, 그리고 고장임피던스에 의해 결정되는데, 이는 같은 고장조건인 경우 계통의 규모가 클수록, 고장점이 전원측에 가까울수록 커짐을 의미한다.

송전용 기기나 선로의 정격전류는 수 kA 정도이기 때문에, 일반적으로 고장으로 판단하는 전류의 최소 크기는 아무리 작은 계통이라도 5kA는 넘을 것으로 판단된다.

### 나. 시험결과와의 비교

전력계통에 섬유가 부착된 경우, 섬락으로부터 본격 고장(아크 발생)을 거쳐 보호계전기의 동작에 이르기까지의 추정 과정은 실제 계통을 모의한 시험결과와 비교적 잘 일치하였으며, 따라서, 고장을 유발하는 섬유의 요구 특성에 대해 검토한 이론적 과정들이 유용했음을 알 수 있다.

### 다. 섬유의 전기적 요구특성

섬유의 전기적 특성은 저항값으로 표현되는데, 아크 형성 이전의 섬유가 주울열에 의해 용단될 수 있는 정도 이하로 섬유의 저항값이 낮아야 아크를 형성할 수 있으며, 동시에 용융온도도 충분히 낮아야 고장을 유발할 수 있다.

## Reference

[1] 송길영, “최신 송배전공학”, 동일출판사, pp. 273～316, 2001.

[2] 정동학 외, “탄소섬유에 대한 전력설비 및 기타 전기/전자 장비의 취약성 해석기법 연구”, 국방과학연구소 용역결과 보고서, pp. 102～103, 2005.

[3] 송민철 외, “도전성 섬유에 의한 전력설비 정지에 관한 검토”, 제13차 유도무기학술대회논문집, 한국군사과학기술학회, pp. 525～526, 2005.

[4] 임완권 외, “특수섬유에 의한 전력계통 고장”, 2008년 종합학술대회 논문집, 한국군사과학기술학회, pp. 614～617, 2008.