

송전선로의 이상전압 원인과 대책

황 치 우

한국전기연구소 송변전연구실장

1. 송전선로의 이상전압 원인

송전계통에 발생하는 사고는 뇌방전 또는 다른 원인에 의한 이상전압에 의한 경우가 많은데, 이상전압은 크게 그 발생원인에 따라 내부이상전압과 외부이상전압으로 나눈다. 내부이상전압은 정상상태에서 회로의 개폐, 고장, 발전기 자기여자, 부하차단 등과 같이 송전계통 내부의 원인에 의하여 발생하며, 외부이상전압은 뇌방전과 같이 송전계통 이외의 원인에 의하여 발생한다.

가. 내부이상전압

(1) 일시과전압

송전선로의 내부이상전압은 계통의 일시적인 과전압과 개폐과전압으로 분류할 수 있다. 계통의 일시과전압이란 전력계통에 있어서 상용주파 전압의 실효치로 나타내며 그 발생원인으로는 계통고장 특히 1선지락고장, 부하차단, 페란티 효과 발전기 자기여자, 공진 등이 있다.

이 중에서 1선지락사고에 의한 과전압이 가장 대표적인 것이며 건전한 상의 과전압은 고장이 제거될 때까지 수백ms 동안 지속된다. 1선지락과전압은 이상전압 억제대책의 근간이 되는 피뢰기의 정격전압 선정시 기준이 되는 전압이다. 1선지락사고시 건전상의 전압상승을 억제하기 위하여 계통의 중성점을 접지하는데 계통 중성점 접지효과에 따라 계통을 유효접지계통과 비유효접지계통으로 분류한다. 유효접지계통에서는 1선지락사고시 건전상의 대지전위상승을 선간전압의 80% 이내로 억제할 수 있으며 계통의 절연레벨을 비유효접지계통에 비해 낮게 잡을 수 있어 절연비용이 저감된다. 우리나라의 154kV, 345kV계통은 유효접지계통에 속한다.

(2) 개폐과전압

전력계통에서는 개폐기조작에 의하여 회로조건이 변화하는데 이때 개폐 서지가 발생한다. 발생된 개폐 서지는 송전선내를 파동형태로 진행하게 되며 회로의 불연속점에서 투과와 반사

가 일어나 중첩된 서지가 송전선내에 나타나게 된다. 개폐 서지는 그 발생원인에 따라 투입 서지, 개방 서지, 아크저락 따위로 분류된다.

(가) 선로 여자시 발생하는 서지

선로가 최초로 여자되면 과도성 진행파 전압이 선로를 따라 진행하게 된다. 이때 발생하는 전압의 크기를 e_r 라고 하면

$$e_r = \frac{Z_0 E}{Z_s + Z_0}$$

단 Z_0 = 선로의 서지 임피던스

Z_s = 투입하는 선로차단기 배후의 계통 서지 임피던스

E = 차단기 투입시 계통전압 순시치

위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 계통의 서지 임피던스가 작으면 발생하는 진행파의 크기는 계통전압 파고치에 근접함을 알 수 있다. 또 이 진행파가 선로종단에 이르면 다음 관계식에 의하여 반사하게 된다.

$$e_r = \frac{R - Z}{R + Z} e_r$$

단 e_r = 반사파 전압의 크기

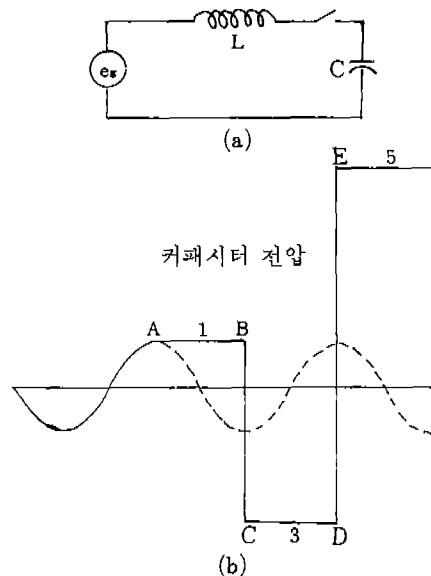
R = 선로종단에서 대지에 연결된 서지 임피던스

위의 식으로부터 반사파 e_r 이 최대가 되는 경우는 R 이 무한히 큰 값, 즉 선로종단이 개방되어 있는 경우이다. 그런데 선로내부의 전압은 입사파 e_r 와 반사파 e_r 의 합으로 주어지므로 최대의 투입 서지가 발생하는 경우는 영(零) 임피던스를 갖는 계통을 종단이 개방되어 있는 선로에 투입하는 때이다. 이때 투입 서지의 크기는 계통최고전압의 2배가 될 수 있다. 이상의 경우는 단상선로인 경우이나 3상의 경우는 3선로가 전자기적으로 결합되어 있으므로 계통최고전압의 3배에 다다를 수 있다.

(나) 선로개방시 발생하는 서지

고장이 없는 단상선로를 개방할 때 발생하는

서지의 설명이 그림 1에 나타나 있다. 연속적인 차단기의 개방 및 투입(또는 재점호)에 의하여 순차적으로 발생하는 커패시터(선로의 정전용량)의 전압생성은 그림 1(b)에 나타나 있다. 즉 종단이 개방된 선로를 A점에서 차단기가 개방되면 커패시터는 계통전압의 최대순간치로 충전된다. 개폐기가 개방된 후에도 송전선로에는 전하가 잔류하게 되므로 전압은 계통전압 최대 순간치로 유지되며 개폐기 개방 1/2사이클 이후에는 계통전압이 반전되므로 2배의 전압으로 충전된다(B점). B점에서 개폐기가 투입되면 커패시터의 전압은 계통전압 최저 순간치 - 1PU로 충전되려고 하며 회로의 유도 리액턴스에 의하여 오버슈트가 일어나 감쇄가 없을 경우 전압은 -3PU에 이르게 된다. 이 때 개폐기가 개방되면 커패시터의 전압은 -3PU로 유지된다. 회로의 개폐기가 1/2Cycle 이후 다시 재투입하게 되면 커패시터는 +1PU의 값으로 충전되려고 하며 회로의 유도 리액턴스에 의하여 오버슈트가 일어나 +5PU의 값으로 충전된다. 이와 같은 경우 1, 3, 5, 7, ... PU로 커패시터의



〈그림 1〉 개방 서지

전압은 계속 증가하게 된다. 실제로 이러한 상황은 차단기 접점간의 회복전압 형태로 나타나는데 차단기가 개방되더라도 용량성회로의 경우 전류 영점(회로전압 최대시)에서 전류가 차단되기 때문이다. 전전한 선로를 투입개방하는 경우에도 똑같은 형태의 과전압이 순차적으로 발생할 수 있다.

(다) 아킹 접지

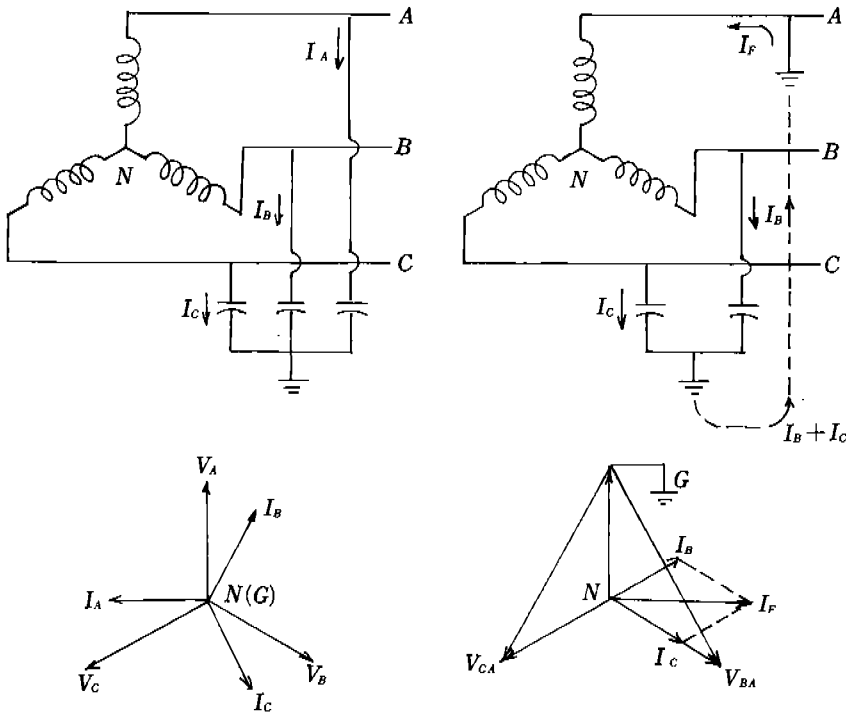
전력계통의 중성점이 비접지되거나 고 임피던스 접지되어 있는 선로에 지락이 발생한 경우 고 전압이 순차적으로 발생하는 수가 있다. 전력계통의 중성점이 비접지로 되면 1선지락시 미소한 충전전류만 흐르게 되므로 어느 의미에서는 계통이 고장상태에 이르지 않았다고 할 수 있다. 계통의 충전전류가 작아 지락시 발생한 아크가 지속적이지 아니할 때에는 이러한 이점을 이용

해 전력공급을 계속 유지할 수 있다.

그림 2에서는 비접지된 계통과 선로의 매지 커패시턴스가 나타나 있는데, 정상상태에서는 그림 2 (a)에 보인 바와 같은 충전전류가 선로에 흐르게 된다. A 상에 지락고장이 발생하면 B, C 상은 순간전압으로 충전되고 따라서 I_B, I_C 의 위상이 변하며 그 크기도 $\sqrt{3}$ 배로 된다(그림 2(b)).

지락점에 흐르는 전류는 $I_B + I_C$ 의 값이 되며 지락전류가 충분히 커 아크가 지속되면 아킹 접지에 이르게 된다. 과도전압은 아크가 전류 영점에서 순간적으로 소멸하고 재점호함에 따라 발생한다.

아크가 소멸되면 A상 선로 커패시턴스 C_A 는 방전되어 있으나 C_B, C_C 는 계통전압에 의하여 충전되어 있으며 커패시턴스의 전하는 회로의 유도 리액턴스를 통하여 방전하게 되는데, 오버슈트가 발생한다. 이 과정에서 아크가 재점



(그림 2) 비접지 계통

호하게 되면 더욱 큰 과도전압이 발생한다.

이러한 일련의 과정은 지락점의 재점호 시간에 따라 큰 차이가 있으나 아크의 소멸과 재점호의 순차적 진행은 과도전압의 점진적인 상승을 가져오며 (나)항에서 언급하였던 차단기의 개방과 투입(재점호)의 순차적 진행에 의한 과도전압 발생양상과 매우 흡사하다.

이러한 바람직하지 못한 현상을 막기 위해 종래에는 중성점을 소호 리액터를 사용하여 고장점 전류를 상쇄시키기도 하였으나 계통이 커지고 이에 따른 충전류가 커져 소호 리액터의 크기기도 커지고 아크의 소호도 따라서 어려워져 현상은 쓰이고 있지 아니하다.

최근의 송전계통에서는 직접접지방식을 대폭 사용하고 있어 큰 문제는 없으나 산업시설의 비접지계통에서 아킹 접지에 의한 설비의 소손이 발생하는 경우가 있다.

나. 외부이상전압

전력계통이 운용된 이래로 뇌격은 송전선로의 최대 단일사고원인이었다. 초고압선로의 고장원인분석 IEEE-IEE 통합위원회 보고에 의하면 230kV 계통의 26% 정전, 345kV 계통의 65% 정전이 뇌격에 의한 것이었다고 한다.

(1) 뇌방전

18세기 Benjamin Franklin씨에 의해 뇌현상이 방전현상이라고 확인된 이래 기상학, 물리학 및 전기공학 분야에서 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 뇌를 발생시키는 뇌운은 주로 적란운이며 이 적란운은 한랭기단과 온난기단이 마주치거나 태양에 의해 대지가 극부적으로 강렬하게 열을 받았을 경우 급속한 상승기류에 의하여 주로 발생한다.

뇌방전은 크게 운대지뇌방전과 운뇌방전으로 나누는데, 문제가 되는 것은 운대지뇌방전이다. 전력계통에서는 뇌격에 관한 각종 물리량의 통계적분포에 근거를 두고 지역적 특성에 걸맞는 내뢰설계를 하고 있는데 이 때 중요한 뇌방전퍼

래미터는 다음 것들이 있다.

i) 빈도계수

ii) 뇌격전류의 크기와 파형

뇌격발생빈도는 관측자가 특정지역에서 귀와 눈으로 뇌격을 관측한 연평균 뇌우 일수로 정의되는 IKL(Isokeraunic Level)로 나타낸다. 그러나 전기공학적 측면에서는 운뇌방전을 제외한 대지뇌방전밀도(Ng)가 중요하므로 IKL로부터 대지뇌방전밀도를 다음과 같은 경험식을 이용하여 산출하고 있다.

$$Ng = (0.1 \sim 0.2) \times IKL \text{ [회/km}^2 \cdot \text{년]}$$

단 Ng : 대지뇌방전밀도

IKL : 연평균 뇌우일수

국내에서는 한국전력공사 기술연구원이 뇌방전특성계수 조사의 일환으로 20년간(1968~1987) 전국 134개 지역(한전 90개소 기상청 44개소)을 대상으로 뇌우일수를 관측 조사하여 자료를 수집하고 있다. 우리나라의 연도별 평균 뇌우일수는 5.8일부터 21.1일까지 분포하며 20년 평균 최대 뇌우지역은 서울근교(17일)이다.

뇌격전류의 크기와 파형에 관해서는 뇌관측이 쉽지 않고 비용이 많이 들기 때문에 전세계적으로도 자료가 많은 편은 아니다. 뇌격전류 크기와 파형은 뇌격전류 파고치(KA)와 상승률(KA/ μ s)로 그 특성을 나타내는데, IEEE 실무위원회에서는 뇌격전류 파고치와 상승률에 대한 누적확률분포곡선을 발표하고 있다.

(2) 뇌과전압

전력계통에 발생하는 뇌과전압에는 뇌격의 침입 양상에 따라 직격뢰와 유도뢰로 분류되는데, 송전선로에 문제되는 뇌과전압은 직격뢰에 의해 발생하는 이상전압이다. 직격뢰과전압은 다시 가공지선의 차폐실패에 의해 직접 송전선로의 상도체에 뇌격이 떨어진 경우와 차폐실패는 하지 않았으나 가공지선 또는 첩탑상부에 뇌격이 가해지고 이로 인해 첩탑전위가 상승되어 상도체와 첩탑간의 애자련섭락에 의해 뇌격이 계통내로 침입하는 역섭락으로 나누어진다.

(가) 차폐실패

차폐실패란 가공지선이 능률적인 차폐효과를 발휘하지 못해 상도체에 뇌격이 가해지는 현상으로 현재의 송전선 뇌격차폐는 뇌격이 지면에 수직으로 가해진다는 가정과 뇌격거리라는 개념을 이용하여 상도체를 차폐하고 있다.

뇌격거리란 뇌격이 뇌방전로를 형성하면서 대지를 향하여 진행하다가 지상의 임의의 물체와 뇌방전로의 끝부분과의 거리가 어느값 이하로 되면 방전로가 일시에 형성되는 거리이다. 그런데 이 뇌격거리는 뇌격전류의 크기가 증가함에 따라 증가하기 때문에 송전선로 상도체의 상부에 가공지선을 설치하면 어느 일정한 크기 이상의 전류치를 가지는 뇌격은 가공지선으로 떨어지게 된다.

한편 어느 일정한 크기 이하의 전류치를 가지는 뇌격은 뇌격이 상방으로부터 지면에 수직방향으로 가해진다는 가정에 의하여 가공지선에 흡인되지 아니하고 직접 상도체에 떨어지는 뇌격도 있게 된다. 송전선의 내뢰설치는 이러한 임계전류치 이하의 뇌격이 송전선에 떨어진다 하여도 큰 문제가 없도록 설계되고 있으나 문제는 뇌격거리의 정확성 및 뇌격의 진입각도가 지면에 수직이라는 가정의 정확성에 있다.

실제로 여러 사람들에 의해 발표된 뇌격거리는 측정자에 따라 많은 차이를 보여주고 있다. 또 일본열도의 서해 연안의 북륙지방, 동북지방, 스칸디나비아반도의 대서양 연안(노르웨이)에서 10월부터 3월까지 발생하는 동계뢰에서는 뇌격 침입각도가 지면과 거의 평행을 이루어 진행하는 경우가 있으며 뇌격전류의 크기, 극성, 방전 에너지가 하계에 발생하는 뇌와 다른 특성을 보여주고 있다.

차폐실패가 발생하게 되면 뇌격전류가 송전선로의 상도체에 주입되고 송전선의 양방향으로 파동성 뇌과전압이 진행하게 된다. 이 때 송전선에 발생하게 되는 뇌과전압은 다음식으로 표현된다.

$$V = \frac{1}{2} I \times Z$$

단 V : 송전선에 발생하는 뇌과전압의 크기(kV)

I : 뇌격전류의 크기(kA)

Z : 송전선의 서지 임피던스

송전선에 떨어진 뇌격에 의하여 발생된 서지성 전압은 파동과 같이 뇌격지점으로부터 양방향으로 나뉘어 진행하게 되며 서지 임피던스가 서로 다른 불연속점(케이블, 기기접속, 개방단, 접지단)에 이르게 되면 진행과는 반사 또는 투과하게 되어 반사파, 입사파와 투과파 등이 서로 중첩되어 선로에 나타나게 된다. 이러한 중첩된 전압의 크기가 송전선 애자현의 절연내력보다 크게 되면 애자현의 섬락은 피할 수 없게 된다.

(나) 역섬락

역섬락현상은 첩탑을 통하여 대지로 흐르는 뇌격전류가 대지에 대한 첩탑의 전위상승을 일으켜 상도체를 첩탑으로부터 절연시키고 있는 애자현이 섬락하는 현상이다. 실제로 애자현에 가해지는 전압은 뇌격전류에 의한 서지성 전압과 첩탑접지저항에서 일어나는 반사파 그리고 상도체에 인가되고 있는 상용주파수 전압이 중첩되어 나타나므로 매우 복잡하다. 결과적으로 애자가 섬락하는 임계치 이상의 뇌격전류에 대해서는 애자가 섬락하게 되며 계통은 1선지락상태로 된다.

큰 뇌격전류를 갖는 뇌격에 대해서는 가공지선에 의하여 직접뇌격이 차폐되었다 할지라도 역섬락이 발생하여 뇌에 의한 피해를 입게 된다. 이때에는 대개의 경우 뇌격전류가 큰 방전 에너지를 가지고 있어 애자의 파손, 유약처리부손상, 전선손상이 일어나고 영구적인 사고로 이행되기도 한다.

2. 이상전압 억제대책

송전선에서는 전술한 바와 같은 제원인에 의해

이상전압이 나타날 수 있으며 이를 완전히 제거하는 것은 거의 불가능하다. 전력계통에서는 계통각부의 절연내력을 합리적으로 정하여 경제성 있는 대책을 취하고 있다.

가. 송전선로에서의 대책

송전선로에 가공지선을 설치하는 것은 뇌의 직격으로부터 송전선을 차폐하기 위하여 실시하며 유효차폐가 되도록 하기 위하여 차폐설계를 실시한다. 차폐가 된다 할지라도 역섬락에 의하여 애자련이 섬락하는 수가 있는데 이를 억제하기 위해서는 탐각저항의 저감이 필수적이다.

대지의 고유저항률이 높은 곳에서는 낮은 탐각저항을 얻기 어려워지며 이때에는 매설지선을 설치하여 탐각저항을 낮춘다. 그러나 매설지선을 포설한다하여도 매설지선의 길이가 100m 이상을 넘게 되면 탐각저항 저감효과가 미미해져 더 이상의 저감효과를 얻을 수 없다.

최근 일본에서는 철탐탐각접지저항 저감을 위해 침형(針型)접지전극을 사용하기도 한다. 송전선에 뇌격시 침형 접지전극의 접지저항 저감효과가 있어 뇌사고를 줄일 수 있다고 알려져 있으나 아직은 평가가 확정적이지 못한 형편이다.

상기의 여러가지 대책을 세운다 하더라도 송전선을 뇌로부터 완전히 보호하는 것은 불가능하다. 송전선의 절연설계에 있어 최종적인 설계목표는 그 지역의 뇌격빈도를 감안하여 실시하는데 보통 1(회섬락/100km·년)정도이다.

애자가 섬락되면 뇌격 에너지가 큰 경우 애자의 연편을 따라 방전하는 아크 에너지에 의하여 애자 파손되어 영구사고로 진행될 수 있으므로 아크흔을 애자련의 양단에 설치하여 방전로가

애자의 연편을 따르지 아니하도록 유도한다. 또 2회선 송전선로가 동일철탐에 가설되어 있는 경우 2개의 선로가 모두 뇌사고에 의하여 정전되는 것을 방지하기 위해 두 선로에 대해 절연내력에 차이를 둔 불평형절연방식을 일본에서 채용한 바 있으나 운용결과 그 효용성에 대해 회의적인 의견이 지배적이다.

나. 변전소에서의 대책

옥외에 시설되어 있는 변전소의 경우 뇌에 대한 직격으로부터 변전소를 차폐하기 위해 피뢰침과 차폐선을 설치한다. 변전소에 인출입하는 송전선에 대해서는 차폐선을 일정길이 이상 설치하여 변전소 인출구 인접송전선에 직접 떨어진 뇌격이 변전소에 침입하지 못하도록 한다.

변전소에는 변압기, 차단기, 계기용변성기, 제어반 등 중요시설물이 밀집되어 있으므로 모든 이상전압에 대하여 확실한 대책이 요구되며 경제적인 이유로 인하여 변압기에 대한 보호가 중시되어 있다.

변압기의 절연레벨을 올리는 것은 기기가격의 상승을 가져오므로 방전전압이 낮은 피뢰기를 사용하는 것이 유리하나 피뢰기의 일시과전압(1선지락 과전압)에 대한 내력이 문제되므로 초고압계통에서는 중성점 직접접지계통을 채택하여 1선지락시 과전압을 낮추고 있다.

계통전압이 345kV를 상회하는 경우 뇌과전압에 의한 스트레스뿐만 아니라 개폐 서지에 대한 스트레스가 큰 문제가 된다. 그런데 개폐서지의 경우 차단기 투입시 투입저항을 직렬로 삽입함으로써 개폐 서지를 용이하게 제어할 수 있으므로 345kV 이상의 초고압계통에서는 투입저항을 넣는 것이 상책이다.

참고문헌

1. Westing house, "Surge Protection of Power System"
2. Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power System", John Wiley & Sons, Inc. 1971.
3. 파기처특정연구개발보고서, 한국전기연구소, "차기초고압기기의 국산화연구" 1989.
4. 小林 忠昌 "각종접지전극의 서지임피던스 측정과 검토", 전기현장기술, 1986.