송전선로 인접 매설관에 대한 유도 간섭 저감책의 최근 현황

이동희
수원대학교 전기전자정보통신공학부 조교수

1. 서 론

현재 우리나라는 70년대 이후의 고도 경제 성장에 따라 가스, 석유, 수도 등의 지하매설관 및 전력,통신용의 지하케이블 등 소위 지중매설 금속관의 매설 길이도 비약적으로 증가하였으나, 급속한 경제성장에 따른 물동량의 급격한 증가에 대처하기 위한 지속적인 전철화 사업의 확장에 따라 이들 지중매설배관(pipeline)의 전식 및 토양부식의 위험성이 높아져 그 방호대책이 중요한 사회문제로 대두되고 있다.

특히 용지 이용의 효율화, 또는 지역적인 제한에 의해 매설관을 송전선에 근접시켜 포설하는 경우 매설관은 송전선로 또는 그 설비로부터 전기적인 간섭을 받아 손상, 부식 등의 장해를 일으킬 수 있다. 매설관에 이와 같은 영향을 미칠 가능성이 있는 송전선으로는 특고압직류송전선과 특고압교류송전선이 있으며 전자의 경우에는 송전설비로부터의 대지귀로전류가, 후자의 경우에는 송전선로의 유도작용 등이 주요인으로 지적되고 있다.

한편 외국의 경우에도 배관, 철도, 통신선로 및 그 유사 구조물에 대한 송전선로의 간섭효과에 관한 연구가 활발히 추진되어[1-3], 캐나다의 경우 1987년에 배관과 송전선로 공동사용에 대한 예비표준이 제정된 후 1991년에 그 내용이 일부 개정[4]된 바 있으며, 유럽에서는[5] 1992년 7월에 "금속배관에 대한 고전압 교류 전력계통의 영향에 관한 지침"이라는 제하의 예비조서가 CIGRE의 한 작업팀(Working Group)에서 발간되었다.

송전선과 관로를 공유하는 공용관로(joint-use corridor) 내의 배관에 대한 교류 간섭은 유도성 성분과 도전성성분으로 이루어지며, 이 유도성간섭 및 도전성간섭의 기구에 대해서는 이미 여러 문헌에서 잘 알려져 있으나[6-8], 전형적인 선로용지에 대한 간섭 영향을 산정하기 위해서는 도체배치, 송전선 및 매설관의 전기적 특성, 전력계통 파라미터에 대한 지식뿐만 아니라 토양구조에 대해서도 정확히 알아야 할 필요가 있다.

본 고에서는 매설관에 미치는 송전선의 영향을 개괄적으로 살펴보고 특히 유도성 및 도전성 간섭효과 및 그 저감책에 대한 최근의 연구 성과를 정리해 보았다.

2. 교류송전선의 영향

교류송전선이 매설관에 미치는 영향은 일반적으로 정전유도, 전자유도 및 저항성유도의 3가지 작용으로 분류되며, 또한 선로의 운전상태에 대해서는 정상운전시 및 사고시로 구분하여 고찰하고 있다.

$$V_p=\left(\frac{\log f/d}{\log 2h_1/r}\right)V\ [V]$$

단, $f=\sqrt{(h_1+h_2)^2+x^2}$

$d=\sqrt{(h_1-h_2)^2+x^2}$ (1)

h_1: 단일송전선의 지상높이[m]
h_2: 매설관의 등가지상높이[m]
r : 송전선의 등가반경[m]
x 송전선과 매설관의 수평거리[
V_1 : 송전선의 대지전압[V]

2.1 정전유도

가공송전선에 병행하여 지상에 놓여져 있는 비접지상태의 금속관에 유기되는 정전유도전압은 단일송전선과의 위치관계로부터 근사적으로 다음 식에 의해 구해진다[9].

이 정전유도전압은 가공송전선 가까이에 또장피복시킨 매설용 금속관을 비접지에 가까운 상태로 놓아둔 경우에 발생하는 현상으로서 매설용관 자체에 대해서는 악영향을 미치지 않는다. 그러나 매설관 건설시 작업자의 안전을 확보하기 위해 초고압송전선 가까이에서 매설관을 취급하는 경우에는 접지시켜 둘 것이 요망된다.

2.2 전자유도

송전선과 관로를 공유하며 병행

포설되어 있는 매설관에 대한 교류 간섭효과는 전자유도에 의한 유도성 성분과 도전성 성분에 의한 저항결합효과로 분류된다.

전자유도에 의한 유도성 간섭효과는 정상부하시 및 선로 사고시 모두 발생되는 현상으로서, 이는 송전선로에서 발생되는 자계에 의해 매설관에 유기되며, 송전선의 특정 상전류에 의해 매설관에 생기는 전자유도전압은 다음 식과 같이 표시된다.

$$V_P = 2\pi f l M I \quad [V]$$

단, f : 전력주파수
l : 병행구간 길이
M : 송전선의 특정상과 매설관 사이의 상호인덕턴스 [H/km]
I : 송전선의 특정상을 흐르는 전류

이 상호인덕턴스 M은 송전선과 매설관과의 위치관계, 대지(토양) 저항율 및 주파수에 의해 정해지며, 양자가 병행 또는 교차하는 경우에 대해 산출 가능하다.

송전선 각 상의 전류는 120 ° 위상차를 가지며, 각각 매설관에 유도작용을 미침과 동시에 이들이 서로 중첩되므로 전체로서 매설관에 유기되는 전압은 각상의 MI의 불평형에 기인한다. 따라서 상시 운전조건 하에서 매설관에 유기되는 전압 및 유도 전류는 송전선 사고시의 경우에 비해 월등히 작다. 그러나 이 유도현상은 지속적으로 작용하기 때문에 조건에 따라서는 유도된 전류의 유출입에 의한 매설관의 교류전식, 피복도장의 열화 또는 전기방식설비에 미치는 악영향 등이 문제가 된다. 매설관에 흐르는 이 전류는 송전선과 매설관 사이의 전자유도에 의한 경우와 송전선 접지계통으로부터 유출입되는 경우가 고려되고 있다.

한편 송전선 사고시의 유도작용에 대해 살펴보면, 우선 송전선에 단락사고가 발생하여 선로에 정상 및 역상전류가 흐르는 경우 (2)식에서 각상의 MI의 불평형이 커져 매설관에 상시운전시보다 큰 전압이 유기된다. 또한 송전선에 지락사고가 발생하여 선로에 영상전류가 흐르는 경우에는 그에 의한 전자유도를 직접 받아 매설관에는 상시의 경우에 비해 큰 전압이 유기된다. 송전선 사고시 매설관에 유기되는 전압은 일반적으로 지락사고시의 경우가 크므로 매설관에 대한 보호대책은 지락사고를 대상으로 검토되고 있다.

송전선 지락사고시 매설관에 유기되는 전압 및 유도되는 전류의 크기는 사고전류의 크기에 의해 정해지나 매설관의 접지조건이나 송전선과의 평행접근긍장에 크게 좌우된다. 특히 매설관에 유기되는 전압은 그 대지 어드미턴스가 작을수록 즉 매설관의 대지 누설저항이 클수록 큰 값으로 된다. 송전선 사고시 매설관에 큰 이상전압이 유기되면 매설관의 도장피복이나 절연 플렌지를 절연파괴시키거나 매설관 제설비에 손상을 입히는 경우가 있으며 이에 대한 대책으로서 다음과 같은 방안이 제시되어 있다[10].

1) 매설관을 송전선으로부터 가능한 한 멀리 떨어뜨려 포설한다.
2) 매설관을 방식용전극에 의해 분포접지시킨다.
3) 매설관 제설비를 보호하기 위해 피뢰기 등을 취부한다.

2.2.3 저항성유도(Resistive Induction)

동일한 전해질을 공유하는 전력계통의 접지구조와 지중 매설구조물 간에는 저항결합효과(Resistive Coupling Effect)에 의해 교류 전류 또는 전압의 형태로 에너지 전달이 일어날 수 있다. 즉 송전선 지락사고시(또는 뇌격시) 지락점에서는 지락전류의 일부가 대지로 유출되기 때문에 그 근방의 대지전위가 상승하며, 근접 포설된 매설관과 그 주위 대지 간에 전위차가 생긴다. 이와 같이 동일한 전해질을 공유함으로써 발생하는 저항성결합효과에 의해 유도되는 전압을 저항성유도전압이라 하며 이 전위차에 의해 매설관의 도장피복에 큰 전압이 가해지면 이를 절연파괴시키는 경우가 있다.

송전선에 지락사고가 일어나 지락점의 접지체로부터 대지로 전류가 유출되는 경우 대지저항율이 균일하다고 가정하고 원방대지를 기준으로 한 접지체의 전위 V_0 및 접지체로부터 D[m] 떨어진 지점의 대지전압 V_D는 다음 식과 같이 주어진다.

$$V_0 = I_0 R = I_0 \rho / 2\pi a \quad [V] \qquad (2)$$

$$V_D = I_0 R a / D = I_0 \rho / 2\pi D \quad [V] \qquad (3)$$

단, I_0는 접지체로부터 대지로 유출되는 지락전류, ρ는 대지저항율 [Ωm], R은 접지체의 접지저항[Ω], a는 접지체의 등가구면반경[m]이다.

이에 의해 접지체로부터 D[m] 떨어진 지점에 포설되어 있는 매설관의 도장피복에는 이 지점의 대지전위 V_D와 매설관의 전위 간의 차에 상당하는 전압이 가해진다. 윗 식에서 알 수 있는 바와 같이 접지도체를 통해 대지로 유출되는 전류가 일정할 경우, 배관에 유도되는 저항성유도전압의 크기는 대지저항율과, 접지도체와 배관간의 이격거리에 좌우된다.

3. 저감시스템(Mitigation System)

저감시스템은 전력계통의 정상

운전시 및 사고시 접촉전압과 도장막 스트레스전압을 허용가능한 수준으로 경감시키기 위해 필요하다. 여기서는 현재까지 개발되어 있는 각종 저감방식에 대해 그 효과를 비교해 보고 아울러 최근에 제안된 저감방식에 대해 검토해 본다.

3.1 집중접지(Lumped Grounding)

집중접지법은 가장 간단하고 보수적인 저감책으로서 유도성간섭성분에 대해서만 효과를 가지며, 원방대지에 대해 배관전위를 허용가능한 수준으로 감소시킬 수 있도록 매설배관의 전략적위치(일반적으로 배관 피크전위 위치)에 접지계통을 접속시킨다.

도장처리가 잘 되어 있는 매설배관이 과전상태에서 접지되어 있지 않은 경우 배관 전위상승효과의 대부분은 도장피복 양단 간에 나타난다. 따라서 매설배관 부근의 대지, 즉 국부대지(local earth) 전위는 기본적으로 0전위인 원방대지(remote earth)전위이고 이 원방대지에 대한 배관전위는 국부대지인 경우와 거의 같다. 이와 같은 매설배관 부근에 나금속체를 매설하여 전기적으로 접속시키면 (예를 들어 희생양극 또는 접지봉 등) 이 접지에 의해 배관의 절대전위가 감소할 뿐만 아니라 나금속체 근방의 대지전위가 증가하며, 따라서 국부대지에 대한 배관전위는 원방대지 즉 절대전위에 대한 배관전위에 비해 현저히 저감된다.

그러나 이와같은 집중접지법은 배관 근방에 매설된 도체가 국부대지전위를 상승시키며, 이에 따라 국부대지에 대해 배관전위를 감소시킨다는 점을 고려하지 않고 있다는 점에서 그 설계기준이 과도하게 보수적으로 된다. 즉 대지저항율이 높은 지역의 경우 이 방식에서 요구되는 접지계통은 허용불가능할 정도로 과대해 진다. 아울러 저항성유도효과를 고려하지 않고 있는 것도 이 방식에서의 주요 결점이다.

3.2 상쇄선기법(Cancellation Wire Technique)

유도성간섭효과만을 저감시키고자 하는 또다른 방법으로는 상쇄선기법[3]이 있다. 이는 송전선으로부터 방사되는 전자에너지가 적절히 배치된 상쇄선에 포획되어 배관전위를 감소시키는 효과에 기초한 방법으로서 이 경우 배관전위는 상쇄효과에 의해 상쇄선에 유기된 전위와 위상각이 달라진다.

이 상쇄선은 유기전압에 대해 최대상쇄효과를 얻기 위해 송전선과 평행하게 최적간격을 두고 매설시킨 나도체로서, 일반적으로 송전선을 중심으로 매설배관 반대측에 위치하며 상쇄선의 한쪽 끝 부분은 배관에 접속되고 타단은 비접속상태로 해 둔다.

그러나 상쇄선에 의한 유도전압 저감기법은 송전선의 정상운전기간 동안은 배관전위를 효과적으로 억제하는 반면, 송전선로부지 중 배관 반대측의, 정상상태에서는 고전위가 예상되지 않는 상쇄선의 비접속단(free end)에 과대전위를 발생시킴으로써 안전사고를 야기시킬 수 있다. 또한 이 기법은 매설관용 부지 외에 그 반대측에 추가적인 부지가 소요되므로 무시할 수 없는 비용 항목인 토지수용비의 상승을 초래하는 결점이 있다.

3.3 전계제어선(Gradient Control Wires) 기법

과도한 배관전위를 고효율적으로 저감시키는 방법으로서 전계제어선을 매설하는 기법이 있다. 이 방법은 유도성 및 도전성 간섭효과를 모두 감소시킬 뿐 아니라 음극방식(Cathodic Protection)효과도 제공한다.

이 전계제어선은 단일 또는 다수의 아연나도체를 배관에 규칙적으로 접속시키면서 배관 가까이에 평행하게 매설한다. 신설 배관의 경우에는 일반적으로 매설관구(trench)의 바닥에 설치하고, 건설작업 중 배관 접지용으로 사용할 수도 있다. 기설 배관의 경우에는 보통 배관 상부 약간 윗쪽에 매설토록 하며 따라서 설치비용이 최소화된다. 그림 1에 대표적인 전계제어선 설치 방식에 대한 개략도를 나타내고 있으며, 이 경우 매설 깊이 58", 배관 양측에서의 이격거리 30"에 규칙적인 간격으로 배관에 접속된 두 선으로 구성되어 있다.

유도성 간섭에 대해 이 제어선은 배관에 대해 접지효과를 제공함으로써 원방대지에 대한 배관전위의 절대치를 낮출 뿐만 아니라, 또한 배관과 국부전위 간의 전위차를 감소시키도록 배관 근방에서의 대지전위를 상승시켜 결과적으로 접촉전압과 피복 스트레스 전압이 현저히 감소된다.

이와 유사하에 도전성간섭에 대한 경우, 전계제어선은 매설배관과 배관 주위 대지 간에 전류가 흐르도록 함으로써 이들 간의 전위차를 감소시킨다. 결과적으로 근접 사고구조체로부터 발생되는 대지전위는 감소하고 사고구조체로부터 배관으로 전달되는 전위는 증가한다.

그림 2 및 그림 3에 이격거리 1[m], 매설깊이 1.1[m]의 아연 쌍도선을 배관과 평행하게 100[m] 길이로 설치한 전계제어선의 성능을 비교 도시하였다. 이로부터 선로 사고시 철탑 근방 배관 상부

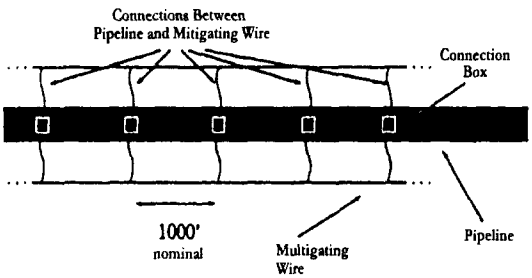

그림 1. 대표적인 전계제어선 설치 개요도

대지전위가 745[V]에서 370[V]로 낮아지고 아울러 철탑 근방의 배관전위는 140[V]로 상승되어 결과적으로 최대접촉전압을 730[V]에서 230[V]로 즉 68%나 감소됨을 알 수 있다.

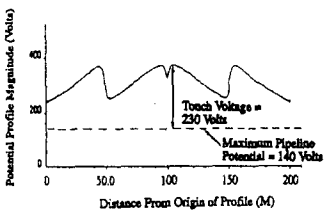

그림 2. 전계제어선 매설시 대지 표면전위

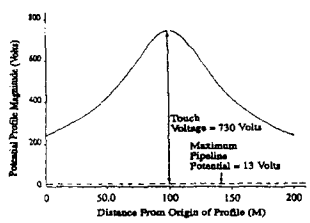

그림 3. 저감대책 비적용시 사고 철탑 근방 배관 직상방의 대지표면전위

한편 전계제어선의 재질은 아연이기 때문에 이는 매설관에 대해 광범한 영역에 걸쳐 희생양극으로 거동하고 또한 이들이 접속되는 배관의 상당한 길이에 대해 음극방식효과를 제공한다.

현대적인 배관설비에 대해 이들 제어선을 희생양극으로 고려하는 경우, 매설배관에 흘려주는 음극방식전류에 기초하여 선재의 소모량을 계산하고 간섭 레벨 저감용으로 광범한 영역에 걸쳐 제어선이 포설된다고 가정하면 수백년 이상의 수명이 예상되고 있다.

4. 간섭 레벨에 대한 토양구조의 영향

도장처리가 잘 된, 즉 절연처리가 잘 되어 있는 배관의 경우 토양(즉 대지) 구조는 유도성 간섭 레벨에 대해서는 미소한 영향을 미치나 도전성 간섭 레벨은 토양구조의 함수로서 10배 이상의 크기로 변화할 수 있다. 예를 들어 접지계통용 구조체가 매설되어 있는 토양 매질의 효과를 조사해 보면, 접지구조체로부터 그다지 깊지 않은 아래쪽에 저저항율 토양층이 배치되어 있으면 대지표면전위가 접지구조체로부터의 거리가 증가함에 따라 상대적으로 급격히 감쇠한다.이와 반대로 접지구조체가 고저항율 토양층이 하부에 배치된 저저항율 토양층 중에 매설되어 있는 경우 대지표면전위는 매우 완만하게 감소한다[11].

R.D.Southey[3] 등이 대표적인 토양구조에 대해 원방대지에 대한 배관전위의 백분율로 접촉전압 및 보폭전압을 조사한 연구 결과 다음과 같은 사항을 보고하고 있다.

1) 국부대지전위를 상승시키고 이에 따라 접촉전압을 배관 GPR (Ground Poential Rise)의 극히 작은 값으로 감소시키는 전계제어선의 유효성은 토양구조의 함수로서 한자리수 이상의 크기로 변화한다.

2) 접촉전압은 토양층 저항율비(soil layer resistivity contrast ratio)의 함수이다. 실제로 전계제어선은 그 하부 토양층의 저항율이 높은 저저항 토양층에 포설되는 경우 가장 유효하다.

3) 저감선의 단위길이당 접지저항은 토양층 절대저항율의 함수이다. 이 접지저항은 토양층의 두께나 저항율비의 여하한 조합에 대해서도 토양 저항율에 직접 비례한다.

5. 결 론

송전선로와 관로를 공유하는 지중매설배관에서의 교류간섭효과는 특히 전자유도에 의한 유도성 간섭성분과 저항성결합효과에 의한 도전성성분이 주된 역할을 하여, 유도효과에 의한 전류 유출입 부위에서의 교류부식효과, 매설관에 유도된 전압이 전기방식설비에 미치는 악영향, 송전선 사고시 매설관에 유기된 전압에 의한 매설관 피복도장의 손상 그리고 송전선 사고시 대지전위상승에 의한 매설관 피복도장의 손상 등 지중 매설배관에 대해 각종 사고 요인으로 작용하게 된다.

본 고에서는 지중 매설관에 미치는 송전선의 영향을 유형별로 구분하여 정리하고, 아울러 이 교류간섭효과를 저감시키기 위한 대

책을 소개하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

종래부터 제안되어 있는 집중접지방식은 상대적으로 효과가 월등히 떨어지며, 상쇄선방식은 상대적으로 고비용에 안전사고를 야기시킬 수 있음에 비해 최근에 제안된 전계제어선기법은 유도성 및 도전성 간섭 성분을 모두 경감시킨다.

또한 토양구조는 교류 간섭레벨과 전계제어지선의 동작성능에 큰 영향을 미치며, 따라서 간섭레벨의 정확한 예측과 이에 대한 유효한 저감대책을 수립하기 위해서는 토양구조에 대한 정확한 모델링이 필수적임을 고려해야 한다.

참 고 문 헌

1. F,Dawalibi et al., Power line Fault Current Coupling to Nearby Natural Gas Pipelines, Volume 1&2, EPRI Report EL-5472, 1987
2. J.E.Drakos, "Study of Problems Associated with Pipelines Occupying Joint-Use Corridors with AC Transmission Lines", Canadian Electrical Association (CEA) Research Project RP 75-02, Volume 1, 1979
3. R.D.Southey et al., "Recent Advances in the Mitigation of AC Voltages Occuring in Pipelines Located Close to Electric Transmission Lines", IEEE Trans. Pow Del., vol.9, no.2, pp.1090-1097, 1994
4. Principles and Practices of Electrical Coordination Between Pipelines and Electric Supply Lines, Canadian Standards Association(CSA) Standard C 22.3 No.6-M1991, 1991
5. Guide Concerning Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines, CIGRE Working Group 36.02 Preliminary Guide 36-92(WG02)17, July 1992
6. F.Dawalibi et al.,"Analysis of Electrical Interference from Power Lines to Gas Pipelines Part 1 : Computation Methods", IEEE Trans. Pow. Del., vol.4, no.3, pp.1840-1846, 1989
7. F.Dawalibi et al., "Analysis of Electrical Interference from Power Lines to Gas Pipelines Part 2 : Parameter Analysis", IEEE Trans. Pow. Del., vol.5, no.1, pp.415-421, 1990
8. F.Dawalibi et al., "Computerized Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2, pp. 40-48, 1986
9. 電蝕土壤腐蝕ハンドブック, 電氣學會電蝕防止研究委員會, 1986
10. 送電機能向上に關する研究報告(その3), 用地對策 : 電力中央研究所,送電機能研究委員會(40-9)
11. F.Dawalibi et al., "Measurement and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilayer Soils", IEEE Trans. Pow. Del., vol.6, no. 4, pp.1483-1490, 1991

< *이 동희 위원* >