

송변전기기의 내진설계기준 제안 Newly Proposed Seismic Criteria of Transmission and Substation Equipments

조양희* 박형기* 송영철** 방기성***
Joe, Yang Hee Park, Hyung Ghee Song, Young Chul Pang, Gi Sung

ABSTRACT

A new seismic design criteria of electric transmission and substation facilities has been proposed. For this propose, the historic data of the earthquake damage and the state-of-the-art of the facilities were carefully reviewed and evaluated. Based on the results, a most reasonable and efficient design criteria has been extracted and proposed for the practical design of the facilities. The criteria is expected to be effectively used for obtaining the seismic safety of newly constructed or extensioning facilities. However, an independent criteria is required to evaluate and improve the seismic capacity of existing facilities

1. 서 론

최근 10여 년간 1985년 9월 19일 멕시코 지진을 비롯하여, 1988년 12월 7일의 Armenia 지진, 1989년 10월 17일의 Loma Prieta 지진, 1994년 1월 17일 Northridge 지진 그리고 1995년 1월 17일 효고현 남부지진 등 대지진들이 세계 도처에서 발생하여 현대 도시의 구조물과 각종 시설물에 큰 피해를 초래하였다. 특히 효고현 남부 지진, 일명 고베지진은 지진 활동성이 매우 낮다고 알려진 지역에서 발생하였기 때문에 우리나라 국민과 정부에 큰 충격을 안겨주었으며 우리나라 국민들에게 지진에 대한 경각심을 일깨워 주고, 지진에 대한 대비를 국가적 차원에서 본격적으로 시작하게 하는 계기가 되었다.

이와 같은 인식에 근거하여 정부는 자연재해대책법에서 내진설계 대상시설을 지정하고 소관 부처에서는 내진설계기준을 설정하여 지진재해를 대비하도록 조치하였다. 건교부에서는 소관 시설에 대한 내진설계기준을 보완하거나 신규로 제정하기 위하여 연구계획을 수립하고 한국지진공학회에 연구수행을 위탁하였다.

* 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수

** 정회원 · 한전전력연구원, 책임연구원

*** 정회원 · 한전전력연구원, 선임연구원

이 결과 이미 1997년 말에 상위개념 내진설계기준을 제정하여 건교부 산하에 있는 각종 주요 대상설비에 대한 내진설계의 요건 및 방법 등을 일관성 있게 제시한 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 이와 같은 상위개념 내진설계기준에 따라 각 설비에 대한 하위개념 상세내진설계기준의 정비도 이미 마무리 단계에 와있는 상황이다.

한전 전력설비의 경우 비록 건교부 소관설비는 아니지만 자연재해대책법에 따라 내진설계가 요구되고 있는 원전에 대해서는 이미 오래 전부터 원자력관련법 등에 준하여 내진설계가 이루어져 왔다. 그러나 수화력발전소 및 송변전설비에 대해서는 명확한 내진설계기준이 없이 건축물설계규준 등에 따라 산발적으로 그 내진설계가 수행되어 왔다고 할 수 있다. 그러다가 최근 건교부에서 제정한 상위개념 설계기준에 자극을 받아 수화력발전소 자체 및 송변전설비에 대한 별도의 내진설계기준이 제정되기에 이르렀다.

이 논문에서는 최근 한국지진공학회에서 한국전력공사의 의뢰를 받아 수행된 연구사업결과로 제시된 송변전설비의 내진설계기준의 개요를 송변전기기를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 송변전설비의 지진 피해 사례

송변전설비 자체는 일반적으로 그 진동특성이 지진의 주진동구간을 벗어나 있고, 진동에 대한 내력이 크기 때문에 지진 피해가 빈번한 시설물은 아니다. 그러나 외국의 경우는 강진발생시 송변전기기의 취약부인 애자의 파손, 기기와 기초부를 연결하는 앵커볼트의 파괴, 기기자체의 진도, 기초부의 파괴 등과 같은 사례가 수 차례 보고된 바 있다. 몇 가지 주요 피해사례를 보면 다음과 같다.

(1) 관동대지진 (일본, 1923)

동경과 요코하마시 전역에서 전력설비의 파괴로 전차의 운행이 중단되고 외부와의 교신이 완전 두절되었다. 지진 발생이후 일주일이나 지나서야 비로소 비둘기를 이용한 지진발생 상황이 외부에 알려지게 되었다. 전등은 초기에 탐색등(search light)의 형태로 높은 지대에서 동경 시내를 비추었으나, 요코하마는 완전한 평야지역이었으므로 이러한 공급조차 받지 못한 채 며칠을 보내야만 했다. 요코하마는 동경에 전력이 복구된 이후에 비로소 동경으로부터 전력을 전송 받을 수 있었다. 전력시설의 파괴로 인한 통신의 두절상황은 지진 발생이후 복구에 대한 가장 큰 지연 요인이 되었다.

(2) Kern County 지진 (미국, 1952)

피해를 받은 송변전시설중에는 앵커(anchor)의 부설로 인한 변압기의 전복, valve damping arrester 및 group switch 애자의 파손, 직류 및 교류 filter의 파손, valve hall의 파괴, 230kV와 500kV 장비의 Porcelain 부품의 파괴 등이 있다.

(3) Loma Prieta 지진 (미국, 1989)

피해를 입은 고전압 변전소와 지역 전력 공급시스템에서 세라믹 부품에 균열이 발생하였으며 절연스위치 및 변압기가 파손되었다.

(4) Valle de la Estrella 지진 (코스타리카, 1991)

138kV Switchyard의 고압 세라믹 장치에는 큰 피해가 없었다. 그러나 일반적으로 이러한 장치는 지진에 가장 취약한 것으로 알려져 있다. protective relay actuation에 의하여 138kV 전력이 지진으로 인하여 차단되었고 약 30분 후에 정상화되었다. 그러나 일부 발전 설비가 지진으로 가동을 멈춘 후 컴퓨터 제어부의 자동 경보장치의 복구에 많은 시간이 소요되었다. 저압 변전소에서 지지대의 파괴로 변압기가 이탈하였다. 34.5kV 송전선에 심한 피해가 있었고, 해안을 따라 변압기의 추락, 지지대의 전복 및 기울어짐, 전력선의 단선 등의 피해가 심하였다. 앵커가 설치되지 않은 변압기가 약 30cm 이동한 경우도 있었다. 완전한 전력 공급이 이루어질 때까지 지진 발생이후 약 8일에서 9일이 소요되었다.

(5) Northridge 지진 (미국, 1994)

지진발생 직후 LA 분지 내의 대부분 지역에 전기공급이 중단되어 200백만 명에 가까운 사람들이 전기를 사용하지 못했으며 전기공급은 지진 발생 후 10일 이내에 대부분 복구되었다. 기초의 파괴로 인해 몇 개의 송전탑이 심각한 피해를 입었으며 진앙 근처에 위치한 고압변전소의 피해가 LA 분지 대부분에 정전을 야기시켰다. 특히 San Fernando 지진 때에도 심하게 피해를 입은 230kV와 500kV 장비의 porcelain 부품과 230kV circuit switcher가 심하게 파괴되어 지진에 취약함을 보여주었다.

3. 대상설비의 종류

송변전설비의 종류는 크게 송전설비와 변전설비로 분류된다. 송전설비는 다시 송전철타와 전력구로 분류되며, 변전설비는 변전설비용기기, 변전설비용구조물, 변전소건물 등으로 세분될 수 있다. 송전설비 중 송전철타는 강재로 그 구조특성상 발생지진력이 크지 않아 지진하중보다는 풍하중이 횡하중설계를 지배하는 경향이 있으므로 별도의 내진설계가 필요없는 경우가 대부분이다. 또 전력구의 경우, 이미 여타설비에서도 대상으로 삼고있는 지하구조물과 그 내용이 대동소이하므로 이 논문의 대상에서는 제외시켰다. 또 변전설비 중 변전소건물의 경우 기존의 건축물설계기준을 적용하여 따라서 그 내진성을 확보할 수 있다.

따라서 이 논문에서는 변전설비용기기와 구조물에 대해서 주로 기술하고자 한다. 변전설비용기기는 편의상 애자형기기와 비애자형기기로 분류하여 취급하였으며, 구조물은 모선, 기기지지구조물, 기초, 연결장치 등이 그 대상이 된다.

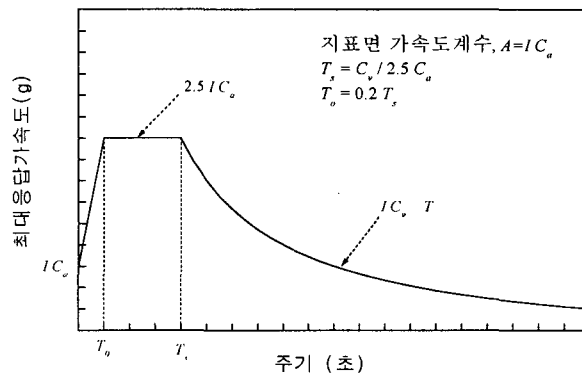
4. 내진등급의 분류, 내진성능목표 및 설계지진

변전설비 중 기기 및 구조물은 기 설비의 취급전압에 따라 내진등급을 분류하였다. 즉 그 취급전압이 345kV 이상인 경우는 내진 I 등급, 345kV 미만의 경우는 내진 II 등급으로 분류하였다. 단, 그 취급전압이 154 kV 미만인 경우는 내진설계대상에서 제외시켰다. 한편, 건물의 경우는 특별한 분류를 두지 않고 내진 I 등급 건축물로 단일화하였다. 특히 건축물 설계기준시에는 별도로 분류되

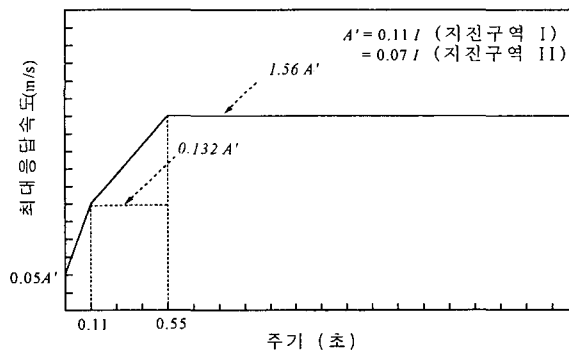
는 등급 중 “특등급”으로 분류하여 적용하였다. 한편, 원전의 변전설비는 별도의 원전내진설계기준을 따라 설계하도록 하였다.

지진발생시 시설물의 성능목표는 시설물의 중요도와 특성 및 설계의 단순화를 위하여 단일성능목표를 선택하였다. 즉, 건교부제시안 중 붕괴방지수준의 지진에 대하여 시설물 특성별로 설계거동한계를 규정하였다. 우선 붕괴방지수준의 지진 발생시 송변전설비가 그 기본적인 기능을 유지해야 한다. 이때 특히 취성이 큰 애자형기기의 경우는 완전한 탄성범위내의 거동을 유지해야하며, 비애자형기와 구조물의 경우 일부 소성거동을 허용하도록 하였다. 이 경우에도 과도한 소성변형, 지반의 액상화, 기초과파 및 안정성상실 등은 방지되도록 하였다.

붕괴방지수준에 해당하는 설계지진의 경우는 건교부 상위개념 내진설계기준에 부합되도록 하여 내진 I 등급 시설의 수평방향 설계지반가속도(A)를 0.154g(재현주기 1000년), 내진 II 등급시설의 경우 A=0.11g(재현주기 500년)를 각각 설계기준지진의 수준으로 설정하였다. 또 수직성분은 특별한 경우를 제외하고는 수평성분의 1/2로 하며, 수평부재를 가진 구조물 등과 같이 꼭 필요한 경우에만 적용하도록 하였다. 설계에 사용되는 표준응답스펙트럼은 그림 1에 보인 바와 같이 건교부 제시안과 동일하다.



(a) 지표면 설계가속도응답스펙트럼



(b) 내진설계기준면 설계속도응답스펙트럼

그림 1 표준설계응답스펙트럼 (감쇠비 5%)

5. 기준제정의 기본방침

변전설비에 대한 내진설계기준 작성은 다음과 같은 기본 방향 및 방침 하에서 제정되었다.

- 건교부의 상위개념 기준에 최대한 부합되도록 한다.
- 일본(JEAG 5003)과 미국(IEEE Std 693 및 ASCE 지침)의 기준을 참조하되 국내 현실에 맞게 보정하여 사용한다.
- 붕괴(혹은 파괴)방지수준의 단일성능목표를 채택한다.
- 신설 혹은 증설설비에만 적용한다.
- 154 kV 급 이상 설비에만 적용한다.
- 기준요건보다 발전된 개념의 적용은 허용한다.
- 변전설비를 기기, 구조물, 건물로 분류하고 기기는 다시 애자형기기(변압기부싱포함)와 비애자형기기(변압기본체, 축전지, 배전반 등)으로 분류하여 취급하였다.
- 변전설비는 지진 발생시 그 기본 기능을 유지하여야 하며, 이를 위해서는 과다변위, 애자 및 연결부의 취성파괴, 사면의 활동, 지반액상화에 대한 안전성이 확보되어야 한다.
- 기기 및 구조물은 활동, 전도, 침하에 대한 안전성이 확보되어야 한다.

6. 기기의 내진설계

기기의 경우는 옥외기기를 대상으로 하고, 애자형기기와 비애자형기기로 구분하며, 애자형기기는 완전한 탄성거동을 유지하며, 비애자형기기는 약간의 비선형거동을 허용하였다. 이를 위하여 애자형기기는 탄성설계법을 적용하여 취성파괴가 방지되도록 하고 있으며, 비애자형기기는 강구조의 경우 소성설계법을 콘크리트구조의 경우는 강도설계법에 따라 설계하도록 함으로써 약간의 소성거동을 고려하도록 하였다.

기기의 내진성 확보를 위해서는 우선적으로 해석적 방법을 사용하되, 불가피한 경우 시험에 의한 방법 즉 내진검증방법을 적용할 수 있으나, 그 내용을 최소화하도록 권장하고 있다. 내진설계시 유연지반인 경우는 지반의 공진효과를 각각 고려하도록 요구하고 있으며, 여타 하중과의 조합은 자중과의 조합만으로 한정하도록 하였다. 또 상세설계시 각종 연결부에서의 충분한 유연성을 확보함으로써 시스템 전체의 내진성을 향상하도록 하였다.

6.1 애자형기기

애자형기기는 차단기, 단로기, 변성기, 변압기부싱 등과 같이 취성이 큰 애자를 포함하고 있는 기기이다. 따라서 이들 기기의 설계를 위한 해석법은 탄성해석법으로서 응답스펙트럼해석법, 유사공진법, 동적해석법 중 택일하여 사용하게 된다. 여기서 적용하는 유사공진법이란 입력지진으로서 기기의 1차모드진동수(공진진동수)에 해당하는 진동수를 갖는 정현파인 공진정현파(resonant sine curve)를 2~3 사이클 동안 반복하여 입력하는 해석법이다. 그림 2는 유사공진법에 의한 옥외변압

기부상의 간편설계절차의 흐름을 나타낸 것이다.

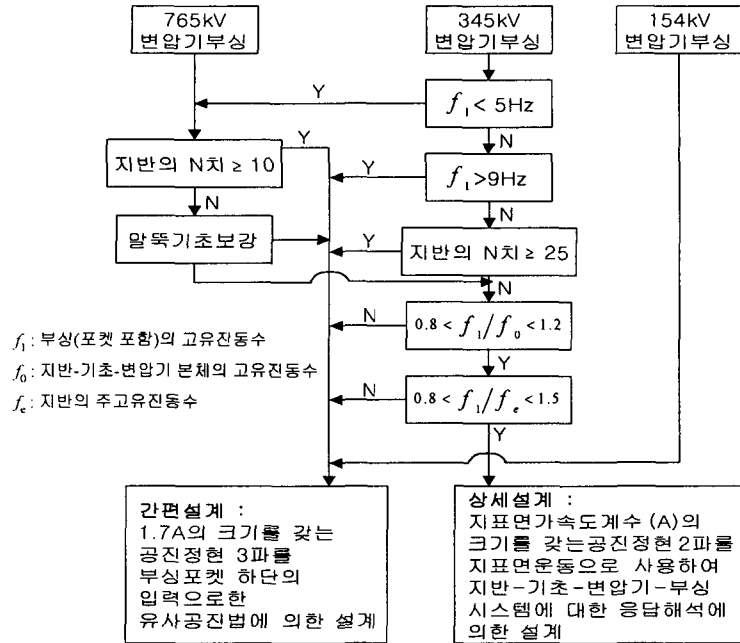


그림 2 유사공진법에 의한 옥외변압기부상의 간편 설계절차

이와 같이 계산된 애자내의 발생응력은 기기공급사에서 제공된 파괴응력의 0.5배 이하가 되도록 설계하여야 한다. 여기서 파괴응력은 애자의 공급사가 실험적으로 확인한 값으로서, 그림 3은 그 예를 보인 것이다.

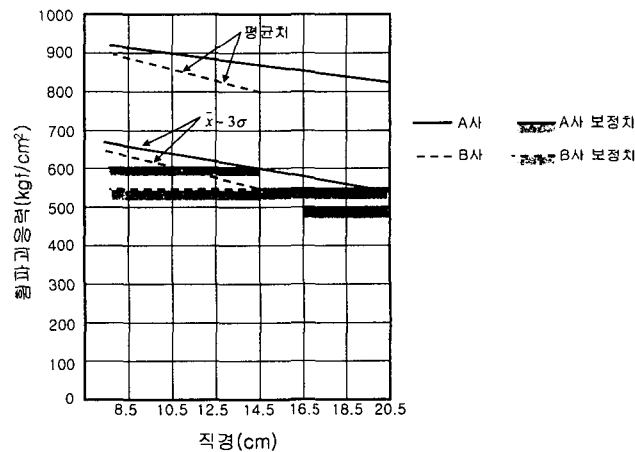


그림 3 자지애자의 휨파괴응력

6.2 일반기기

일반기기는 변압기본체, 축전지, 배전반 등과 같이 애자가 없는 변전소내 기기가 그 대상이며, 이를 위한 해석방법은 등가정적해석법 혹은 응답스펙트럼해석법을 사용한다. 특히 자주 사용되는 등가정적해석시 적용되는 등가정적하중은 지진구역 I의 내진 I 등급의 경우는 수평방향으로 0.154g의 바닥가속도 값을 사용하여, 일반적으로 수직방향지진력은 무시한다. 특수한 경우를 제외하고는 기기자체의 증폭률은 1.7배(변압기본체, 소내용 전원장치 등) ~ 2.5배(배전반)를 사용해도 무방하다.

만약 건물내 기기인 경우에는 1층인 경우 옥외기기와 같으며 2, 3층인 경우에는 지반입력의 2.0배를 바닥판 입력으로 사용할 수 있다. 단, 4층 이상에 설치된 기기의 경우는 별도의 해석에 의한 결과를 사용하도록 하고 있다.

비에자형기기의 경우 일반적으로 기기 자체는 충분한 내진성능(축전지 > 2~3g)을 갖고 있음이 경험적으로 입증되어 있기 때문에, 기기 자체보다는 기기의 전도나 활동, 연결부 등에 대한 내진성 확보가 우선적으로 고려되어야 한다.

7. 구조물의 내진설계

변전설비내 구조물로서는 주로 강재골조구조, 강재모선, 각종 연결장치 등이 있다. 이들 구조물의 내진설계를 위한 해석법으로는 응답수정계수를 이용하는 선형해석(등가정적해석 혹은 응답스펙트럼법)과 비선형응답스펙트럼법 등이 사용된다.

구조물의 경우는 기기와는 달리 수평방향력의 1/2에 해당되는 수직방향 지진력의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 소성화거동에 따른 응답수정계수는 표 1에 보인 바와 같으며, 기타 설계방법은 이미 여타설비에서 규정된 내진설계규정과 대동소이하다. 즉, 강구조물은 건축물설계기준의 강구조설계법에 따라, 콘크리트구조물은 콘크리트구조설계기준에 따라 설계된다.

표 1 시설물의 응답수정계수

시 설 물	응답수정계수
설계지진하에서 탄성영역에 남아 있어야하는 모든 구조물	1
가새의 인장항복이 기대되는 다층의 프레임구조	2
휨모멘트에 저항하는 프리스트레스트 콘크리트로 된 연성프레임	3
휨모멘트에 저항하는 철근콘크리트 또는 구조용 강으로 된 연성프레임	4

8. 결 론

이 연구에서는 지금까지의 송변전설비에 대한 국내외 피해사례를 분석하고, 기존의 관련 기술현

황을 반영하여, 국내 지진 및 기술특성에 적합한 새로운 송변전설비의 기기에 대한 내진설계기준을 작성, 제안하였다. 그 과정에서 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

- 변전설비는 일반적으로 그 구조 및 기능적 특성상 우수한 내진성능을 유지하고 있다. 따라서 지진 발생시 그 자체의 피해보다는 부차애자의 파손, 기기의 진도, 연결부의 파괴, 기초붕괴 등과 같은 피해특성을 갖는다.
- 변전설비의 지진으로 인한 피해의 원인은 내진설계 자체의 부족보다는 시스템구성의 결함, 유지관리의 미비 등에 기인한 것으로 판단되었다.
- 대형지진 다발국가인 일본, 미국 서부 등에서도 지극히 최근에서야 변전설비에 대한 내진설계 기준이 제정, 신설되는 설비에 적용하고 있다. 그러나 기존 설비에 대한 성능평가에 관련된 기준 및 절차 등이 아직까지 정립되어 있지 않다.
- 국내에서는 향후 신설 및 증설되는 설비에는 이 논문에서 제시된 기준의 적용을 통하여 충분한 내진안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 기존설비에 대한 내진성능평가 및 향상을 위해서는 별도의 기준이 정립되어 적용되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한전 전력연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “송·변전 설비 내진설계기준 설정 연구(00PE07)”의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 내진설계기준연구(Ⅱ), 1997. 12.
2. 日本電氣協會, 變電所等における 電氣設備の耐震設計指針, JEAG 5003-1999, 1999.
3. IEEE, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, IEEE Std 693-1997.
4. ASCE, ASCE Substation Structure Design Guide, Draft 7, 2000.