

건축물에 시설되는 수변전설비의 내진설계 검토사항 및 설계 방안에 대한 고찰

(The Application and Seismic Design Method of Electrical Facility Installed in the Building)

김기현* · 이상익 · 배석명 · 조성국

(Gi-Hyun Kim · Sang-Ick Lee · Suk-Myong Bae · Sung-Gook Cho)

요 약

전력공급에 중요한 설비가 집중되어 있는 건축물 내의 수변전설비가 내진시설이 고려되지 않은 경우 지진 발생 시 전력 시설물 낙하, 이동 등으로 인한 설비 피해 및 전기화재 등 제2의 피해가 발생할 수 있다. 하지만 수변전설 내진설계의 필요성에도 불구하고 국내에서는 아직 적용하고 있지 않다. 따라서 건축물 내에 수변전설의 전기설비 내진설계에 관하여 국내 건축구조설계 기준과 일본의 건축전기설비 내진 설계·시공 매뉴얼을 참조하여 건축물 내에 시설되는 수변전설비의 내진 설계 방법 및 내진 설계 예를 제시하였다.

Abstract

In the case of that not considered seismic design at transformer vault which is equipped with many important electrical facilities, the facility is damaged, electrical fire breaks out and another damage may be caused due to earthquake. But seismic design has not yet applied to transformer vault in the country. Regard to seismic design method of electrical facility installed inside the building, the seismic design procedures for electrical facility is presented in this paper, which has been developed by referring "Building design standard" of domestic code and "Manual of seismic design and construction for building electrical facility" in japan. This paper may help engineers perform detail seismic design, construction and reliability inspection of electrical pipes and facilities.

Key Words : Earthquake, Seismic Design, Electrical Facility, Transformer Vault

1. 서 론

지진재해대책법(2008.3.28) 제4장 14조에는 전 기사업법에서 규정한 발전용 수력설비 및 화력설비, 송전설비, 배전설비, 변전설비에 대하여 내진 설계 기준을 정하고 필요한 조치를 취하도록 규정

* 주저자 : 전기안전연구원 주임 연구원
Tel : 031-580-3057, Fax : 031-580-3052
E-mail : ghkim7151@kesco.or.kr
접수일자 : 2009년 4월 20일
1차심사 : 2009년 4월 27일
심사완료 : 2009년 5월 13일

하고 있다. 기존의 원자력, 화력 및 수력발전소는 규모 6.5에서 규모 5.4 정도의 지진에 견디도록 각각 내진 대책을 강구하도록 규정하고 있다[1-2]. 하지만 전력공급에 중요한 설비가 집중되어 있는 건축물 내의 수변전설비는 내진설계가 고려되지 않아 지진 발생시 설비 이동 및 낙하 등으로 전기 공급 기능의 정지 및 피난시설 작동불가로 인한 인명피해와 재산 손실이 크게 발생할 수 있다. 지진이 많이 발생하는 일본의 경우는 수변전설 전기설비에 대한 내진설계방법(건축전기설비 내진설계 및 시공매뉴얼)이 제시되어있고 내진 시설에 대한 검사가 이루어지고 있다[3-4]. 물론 국내는 일본과 상황은 다르지만, 그에 대한 대책은 필요하다고 판단된다. 따라서 본 논문은 그림 1에서 제시하고 있는 전기설비 내진설계 개념도와 같이 국내 '건축구조설계기준'을 기준으로 하고 일본의 '건축전기설비 내진설계 시공 매뉴얼'을 참조하여 건축물의 수변전설에 설치되는 전기설비의 내진설계 방법 및 예제를 제시하였다. 본 내용은 추후 건축물 내의 수변전설에 설치된 전기설비의 내진설계 및 내진보강 시공에 대한 신뢰성 검증에 위한 검사 및 점검 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

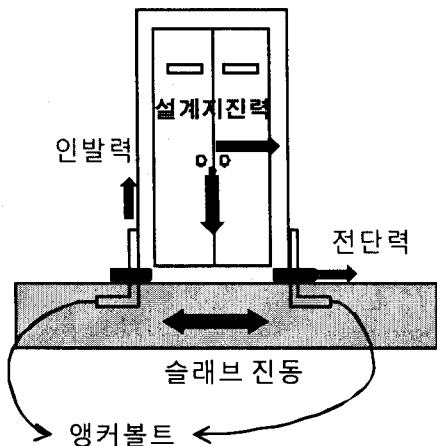


그림 1. 전기설비의 내진설계 개념도
Fig. 1. Idea Diagram of seismic design for electrical facility

2. 본 론

2.1 수변전설비 내진설계 방법 및 검토 사항

1) 설치 장소 및 지반 종류

국내 건축구조설계기준에 따라 건축물 안에 수변전설이 시공될 경우에 그 건축물이 세워지는 지역의 지진 지역계수는 표 1과 같이 서울 등 지진지역 1과 강원도 북부지역 등 지진지역 2로 구분되어 있고, 설치 지역 별로 지진 지역계수가 다르게 적용이 된다[5].

표 1. 지진지역 구분 및 지역계수
Table 1. Classification of earthquake zone and factor

지진 지역	행정구역	지역 계수
1	지진지역 2를 제외한 전지역	0.11
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07

※ 강원도 북부(군, 시): 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
전라남도 남서부(군, 시): 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

표 2. 단주기 설계스펙트럼 가속도 S_{DS}
Table 2. Spectral acceleration of short period

지반종류	지진지역	
	1	2
S_A (경암 지반)	0.293	0.168
S_B (보통암 지반)	0.366	0.233
S_C (매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반)	0.439	0.279
S_D (단단한 토사 지반)	0.527	0.372
S_E (연약한 토사 지반)	0.732	0.559

또한 건축물이 세워지는 장소의 지반은 경암지반 등 5종으로 분류한다. 표 2, 표 3과 같이 지반종류에 따라 설계스펙트럼의 형상을 결정짓는 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도(S_{D1})가 결정된다[5]. 따라서 설치 지역과 설치 장소에 대한 지반 구분에 따른 설계 계수가 옳게 적용이 되었는지에 대한 검토가 이루어져야 한다.

표 3. 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 S_{D1}
Table 3. Spectral acceleration of 1 sec period

지반종류	지진지역	
	1	2
S_A	0.117	0.065
S_B	0.146	0.093
S_C	0.234	0.149
S_D	0.336	0.214
S_E	0.497	0.317

2) 내진등급

건축전기설비의 내진설계를 위하여 설비의 내진등급을 구분하고 각 내진등급에 따라 서로 다른 설계지진력의 크기를 설정한다. 국내는 중약진 지진지역에 대하여 건축전기설비를 대상으로 내진등급을 구분하고 세분화된 설계법을 적용하여도 단일등급을 적용한 경우와 비교하여 정착설계 값에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 기본적으로는 내진등급 B를 적용함으로써 일반적인 내진성은 얻을 수 있다고 판단하므로 보통의 경우에는 기기의 내진등급을 B로 결정한다. 하지만 건축주의 요구나 특별히 설계자가 판단하여 필요한 경우는 표 4와 같이 내진등급을 구분하여 등급별로 서로 다른 설계지진력을 적용할 수 있다. 따라서 내진등급을 고려하여 설계지진력을 계산하고, 정착 설계가 이루어져 있는지에 대한 검토가 되어야 한다.

표 4. 내진등급에 따른 설계지진력의 할증계수
Table 4. Extra factor of design seismic force by level

기기 설치층	기기의 내진등급			적용 층 구분
	내진 등급 S	내진 등급 A	내진 등급 B	
상부층 옥상 및 옥탑	2.0	1.5	1.0	
중간층	2.5	1.67	1.0	
지하층 및 1층	2.5	1.5	1.0	

표 4에서 상부층의 정의로는, 2~6층의 건축물에서는 최상층을, 7~9층의 건축물에서는 상층의 2개 층,

10~12층의 건축물에서는 상층의 3개 층, 13층 이상의 건축물에서는 상층의 4개 층을 상부층으로 정한다. 중간층의 정의로는 지하층과 1층을 제외하고 상부층에 해당하지 않는 층을 중간층이라 한다[3]. 내진등급은 설계기기의 응답배율을 고려하여 결정한다.

3) 건물 높이 및 전기설비 시설 위치

수변전설이 설치되는 건축물의 높이가 70[m] 이하인지, 70[m] 초과인 지를 검토를 해야 한다. 70[m] 이하의 경우에는 등가정하중[4]에 의한 설계지진력으로 내진설계를 해야 하고, 70[m] 초과인 경우에는 건축물의 동적해석에 의해 결정되는 설계지진력으로 내진설계가 이루어져야 하기 때문이다. 또한 전기설비가 시설되는 위치가 지하 층, 옥내 건물 층, 옥상 등 건물 안에 시설되는 장소의 높이가 건물 전체 높이와 함께 검토되어야 한다. 이 높이는 수평방향 설계지진가속도계수(α_H)를 계산하기 위한 자료가 되기 때문이다. 따라서 건축물의 높이와 전기설비가 설치되는 장소의 높이를 정확히 적용하여 내진설계가 이루어질 수 있도록 검토해야 한다.

(1) 등가정하중에 의한 설계지진력

수변전설이 시설되는 건축물이 일반적인 구조의 건축물(높이 70[m]이하, 강구조, 콘크리트강합성구조, 철근콘크리트구조)에 설치되는 기기의 경우는 설계지진력은 식 (1)과 (2)를 적용하여 결정한다[5]. 다음 식은 국내 건축구조설계기준에서 제시하는 등가정하중(F_p)의 식이다.

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{DS} W_p}{R_p I_p} \left(1 + 2 \frac{z}{h} \right) \quad (1)$$

식 (1)의 계수에서 a_p (중복계수로서 전기설비에 대하여 1.0을 적용), I_p (건축전기설비의 중요도계수이며, 인명안전과 관련된 비구조요소로 지진 후에도 작동이 필요한 경우이므로 1.5를 적용), R_p (건축전기설비의 반응수정계수로서 정착부에 작용하는 설계지진력은 탄성설계지진력을 기준으로 산출되어야 하므로 1.0을 적용) 값을 국내 기준에 적용하여[5] 수평 등가정하중(F_H)의 식을 다음과 같이 간략히 정의

하였다.

$$F_H = F_p = 0.6 S_{DS} \left(1 + 2 \frac{z}{h} \right) W_p \quad (2)$$

여기서

S_{DS} : 단주기설계스펙트럼가속도로서 설계응답스펙트럼 곡선의 정상부 가속도

z : 건물의 밑면으로부터 건축전기설비가 설치된 슬래브까지의 높이

h : 건물의 밑면(기초 하단)으로부터 지붕층까지의 평균 높이

W_p : 전기설비의 운전 중량

이로부터, 수평방향의 설계지진가속도계수 (a_H)는 다음과 같이 표현된다.

$$a_H = \frac{F_H}{W_p} \quad \text{또는} \quad a_H = \frac{F_p}{W_p} \quad (3)$$

수직방향 설계지진력은 식 4와 같이 수평방향 설계지진력의 1/2을 적용한다.

$$a_V = (1/2)a_H \quad (4)$$

여기서

a_V : 수직방향 설계지진가속도계수

(2) 건축물의 동적해석에 의한 설계지진력

건축물 높이가 70[m]를 초과하는 건축물에 설치하는 전기설비에 대해서는 동적해석방법을 적용하여 설계지진력을 구한다. 건축물의 각 층에 발생하는 진동 응답가속도 $G_f(m/sec^2)$ 는 설계스펙트럼 가속도 곡선[5-6]에서 제시하고 있는 스펙트럼 곡선에 부합하는 인공지진가속도를 입력운동으로 사용하는 시간이력해석법 등의 동적해석법을 이용하여 결정한다.

4) 정착 설계

설계지진력이 여러 요소에 의해 계산이 되면 전기설비의 내진안전성을 검토한다. 전기설비가 지진으로 인하여 이동 혹은 전도되는 것을 방지하기 위해서는 다음의 두 조건식을 동시에 만족시켜야 한다.

① (앵커볼트의 허용인장력) > (지진력에 의해 요구되는 앵커볼트의 인장력)

② (앵커볼트의 허용전단력) > (지진력에 의해 요구되는 앵커볼트의 전단력)

정착 설계순서는 설계지진력, F_H 와 F_V 을 입력으로 대입하고 부재에 작용하는 부재력과 부재 응력을 계산하여 이 값이 부재의 단기 허용응력 범위 이내에 있는지의 여부 즉, 부재의 강도와 내력을 판단하는 것이다. 그림 2에서 확인할 수 있는 것처럼 앵커볼트에는 인장력과 전단력이 작용한다. 기기의 제원과 인장력 및 전단력이 작용하는 상황 및 인장력과 전단력에 사용되는 단위를 나타내 주고 있다. 앵커볼트의 인장력 및 전단력을 식 (5)와 (6)에 의하여 계산하여 그에 맞는 크기와 앵커볼트의 설치 위치 및 개수를 선정한다[5-6]. 따라서 앵커볼트 인장력, 전단력을 계산하고 앵커볼트의 허용조합응력 등의 방법을 이용하여 앵커볼트가 규정에 맞게 설계가 되어야 한다. 현장에서는 설계에 제시된 허용내력에 맞는 앵커볼트로 시공해야 한다. 그림 2에서 처럼 앵커볼트의 정착설계가 필요하여 설계된 경우에 그에 따른 설계방법 및 선정된 정착 설비의 성능에 대한 검토가 이루어져야 한다.

앵커볼트의 인장력 계산식

$$R_b = \frac{F_H \cdot h_G - (W - F_V) \cdot \ell_G}{\ell \cdot n_t} \quad (5)$$

앵커볼트의 전단력 계산식

$$\tau = \frac{F_H}{n \cdot A} \quad \text{혹은} \quad Q = \frac{F_H}{n} \quad (6)$$

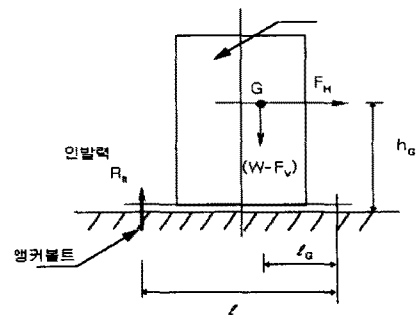


그림 2. 앵커볼트의 작용 힘 및 요소
Fig. 2. Seismic force and resistance of anchor

건축물에 시설되는 수변전설비의 내진설계 검토사항 및 설계 방안에 대한 고찰

2.2 수변전설비 내진설계 예

서울특별시에서 시설되는 건축물에 수변전설비의 전기 설비 중에 변압기의 내진설계에 대한 예제를 제시한다. 본 예제는 건축물 높이가 70[m] 이하이기에 등가 정하중에 의한 설계지진력 계산 방법을 이용하였다.

1) 설계조건

다음의 조건은 예제를 위하여 임의로 가정된 값이다.
 건축물 위치 : 서울특별시(지진구역 1, 표 1 참조)
 건축물 개요 : 안전 빌딩(18층, h=54.0[m])
 기초 지반종류 : 단단한 토사 지반(지반분류 S_D)
 설비 종류 : 수변전설 변압기(100[kVA], 중량 W=490[kg])
 설치 위치 : 8층 슬래브 상단(z=23.0[m])

2) 설계 정수

건물 평균 높이 : h=54.0[m]
 건축전기설비가 설치된 슬래브 높이 : z=23.0[m]
 지역계수 : A=0.11
 단주기 설계스펙트럼 가속도 : $S_{Ds}=0.527$

3) 설계지진가속도계수

변압기의 중심에 작용하는 설계지진력은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} F_p &= 0.6 S_{Ds} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) W_p \\ &= 0.6 \times 0.527 \times \left(1 + 2 \times \frac{23}{54}\right) W_p \\ &= 0.6 W_p \end{aligned}$$

위의 값을 식 3에 대입하면 수평방향 설계지진가속도계수는 다음과 같이 결정된다.

$$\alpha_H = \frac{F_p}{W_p} = \frac{0.6 W_p}{W_p} = 0.6$$

수평설계지진가속도계수를 식 4에 적용하여 수직방향 설계지진가속도계수를 결정한다.

$$\alpha_V = \frac{1}{2} \alpha_H = \frac{1}{2} \times 0.6 = 0.3$$

4) 변압기 정착 설계

변압기 중 유입변압기 100[kVA], 중량 W=490[kg] 인 경우로서 다음 그림 3의 사양과 같은 변압기에 대하여 내진설계를 수행한다.

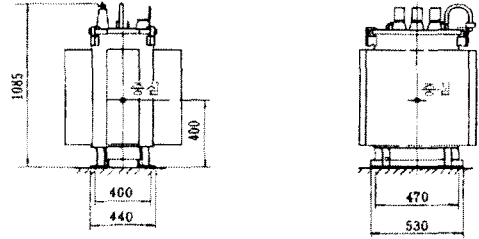


그림 3. 유입식 변압기(100[kVA])
 Fig. 3. Oil-filled Transformer(100[kVA])

수평방향 설계지진가속도계수(α_H)가 계산식에 의해 0.6으로 정해져 있기에 그 값에 의해 앵커볼트의 크기 및 개수를 다음과 같이 계산하여 정한다.

① 앵커볼트의 설계 예($\alpha_H=0.6$ 의 경우)

수평방향 설계지진가속도계수 : $\alpha_H=0.6$
 기기의 중량 : W=490[kg]
 수평방향 설계지진력 : $F_H = \alpha_H \cdot W = 2,883$ [N]
 수직방향 설계지진력 : $F_V = \frac{1}{2} F_H = 1,442$ [N]

중심 높이 : $h_C=40$ [cm]

중심 위치 : $\ell_C=24$ [cm](장변), $\ell_C=20$ [cm](단변)

앵커볼트의 검토 : 전도 모멘트에 대해 불리한 단변 방향에 대해 검토한다.

- 한쪽 옆의 볼트 개수 $n_1=2$ 개
- 앵커볼트의 총 개수 n=4개
- 볼트 간격 $\ell=40$ [cm]

식 (5), (6)을 이용하여 인장력과 전단력을 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{2883 \times 40 - (490 \times 9.81 - 1442) \times 20}{40 \times 2} \\ &= 600 \text{ N/개} \end{aligned}$$

$$Q = \frac{F_H}{n} = \frac{2883}{4} = 720 \text{ N/개}$$

따라서 앵커볼트의 선정은 허용인장력과 앵커볼트의 총 개수와 직경을 고려하여 표 5와 같이 변압기

고정용 앵커볼트의 직경 및 개수를 얻게 된다.

검토 등에 대해서 추후로 더욱 관심을 가지고 연구해야 할 부분이라고 사료된다.

표 5. 선정된 앵커볼트의 규격 및 개수
Table 5. Number and Type of Anchor Bolt

구 분		계 수	$\alpha_H=0.6$
		총 개수	
앵커 볼트	직 경	M10	
	공 법	후시공 접착식 앵커	
비 고		콘크리트 두께 12[cm], 매입깊이 L=8[cm]	

3. 결 론

전기설비기술기준(2007.1.1 시행) 제21조 5항 규정에 의거 수변전실은 지진에 대하여 안전한 구조로 시설하도록 규정하고 있으나[7], 이에 대한 구체적인 설계기준이 없는 상황이므로 현장 적용이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문은 국내 건축법 시행령 제32조에서 내진설계를 시행하도록 규정하고 있는 건축물의 수변전실에 설치되는 전기설비에 대한 내진설계 방법에 대하여 국내 건축구조설계기준을 기본으로 하고 일본의 건축전기설비 내진설계·시공 매뉴얼을 참조하여 설계 방향 및 방법을 제시하였다.

아직 수변전실 내진설계에 대해 일반화가 되어 있지 않은 상황에서 일정 지역을 대상으로 건축물 내에 수변전실비 중 변압기에 대한 내진설계를 예로 제시하여 설계지진력, 수평설계지진가속도, 수직설계지진가속도, 앵커볼트의 선정에 관한 인장력, 전단력을 예로서 계산하여 제시하였다. 이 논문에 제시된 예제는 전기설비의 내진설계 및 시공의 점검과 조사 업무에서 검토되어야 하는 요건과 항목에 대한 참고자료로 이용될 수 있다.

이 논문에서 제시된 예제는 등가정하중법을 적용한 변압기의 내진설계이다. 추후 동적해석법을 이용한 방법에 대한 연구가 필요하며, 등가정하중법과 동적해석법의 장단점 분석 및 점검 항목의 비교 등을 검토할 필요가 있다. 내진설계에 있어서 전기설비를 고정하는 부분 이외에 전기설비 자체도 지진에 대한 대책을 세워서 제작이 되어야 할 것이다. 따라서 제품 자체에 대한 내진설계 및 내진시설의 성능

References

- (1) 법제처, 지진재해대책법, 법률 제 9001호, 2008.3.28.
- (2) 김기현 외 3명, "수·변전설비의 국내외 내진 관련 현황 조사", 대한전기학회 춘계학술대회, 2008. 4.
- (3) 建築電気設備の耐震設計施工マニュアル 改訂新版, 2006. 4, Japan.
- (4) 電気設備工事監理指針 平成9年版, 2007. 9, Japan.
- (5) 국토해양부, 건축구조설계기준, 고시 제2005-81호, 2005. 4. 6.
- (6) 김기현 외 3명, "건축물에 시설되는 수변전설비 내진설계 방안", 한국조명전기설비학회 논문집, 2009. 2.
- (7) 지식경제부, 전기설비기술기준, 고시 제2006-65호, 2006. 7. 4.

◇ 저자소개 ◇

김기현 (金基鉉)

1971년 5월 1일생. 1997년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2000년 8월 동 대학원 졸업(석사). 2008년 2월 동 대학원 졸업(박사). 2000년 6월~2003년 6월 한국전기연구원 재직. 2006년 전기안전 기술사 취득. 2003년 7월~현재 전기안전연구원 주임연구원.

이상익 (李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 호서대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 전국대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 전기안전연구원 선임연구원.

배석명 (裴錫銘)

1956년 10월 22일생. 1984년 창원기능대학교 전기기기 과 졸업. 1981~1997년 한국전기안전공사 근무. 1997년~전기안전연구원 근무. 현 전기안전연구원 전기안전 IT센터 센터장.

조성국 (趙城國)

1966년 7월 6일생. 1993년 인천대학교 토목공학과 졸업. 1993년 2월 동 대학원 졸업(석사). 2004년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1995~1998년 한국전력기술(주). 2004년~현재 인천대학교 공학기술연구소 책임연구원. 2006년~현재 (주)제이스코리아 기술이사.