

## 시화호 조력발전소 건설공사를 모델로 한 최근접지설계 기법

강동형, 김중득  
한국수자원공사

### The latest grounding design technique with Sihwa tidal power plant construction

Dong-Hyung Kang, Jong-Deug Kim, Sung-Oh Park  
Korea Water Resources Cooperation

**Abstract** - 과거 국내 접지설계는 요구 접지저항값 중심의 설계로 위험전압에 대한 접근은 미흡한 실정이었으나 최근에는 국외에서 중요시하고 있는 접지계의 안전전압에 중점을 둔 접지설계가 이루어지고 있다. 이에 시화호 조력발전소 건설공사의 접지설계를 모델로 하여 최근접지설계 기법을 정리하였다.

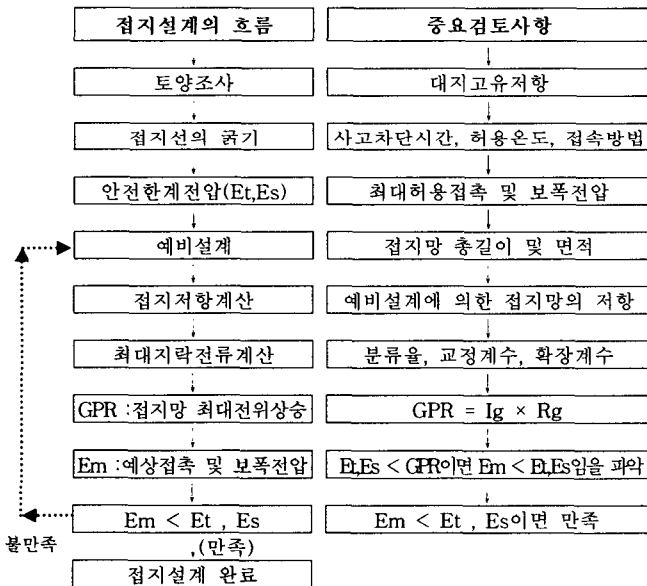
#### 1. 서 론

최근의 접지설계는 IEEE나 IEC 가이드에서 제시하는 설계방식을 채택하고 있다. IEEE나 IEC의 접지설계 목표는 최대고장전류에서도 인간의 안전을 확보하고자 하는 것이며 그 주된 방법은 전위경도의 저감이다. 이는 우리가 과거에 답습하였던 일본 접지설계와 다른 시각으로 접근하는 방식이다. 일본에서 주안점을 두고 있는 접지의 포인트는 접지저항을 저감시키는데 목표를 두고 있으나 최근의 기술동향인 IEEE나 IEC 가이드에서는 안전을 확보하기 위해 전위경감 방식으로 접근한다. 그러나 아직까지도 국내의 기술동향을 보면 단순히 목표접지저항값을 충족시키는 것이 접지의 전부라고 생각하는 기술자들이 많은 것 같다. 이에 본 논문에서는 시화호 조력발전소 건설공사의 접지설계를 모델로 하여 IEEE 가이드와 안전 접지설계 지침을 이용하여 최근의 접지설계기법을 소개하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 IEEE에서 권고하는 접지설계 절차

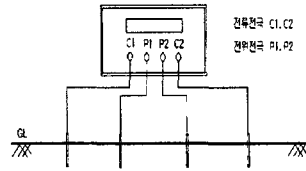
〈표1〉 접지설계 흐름도



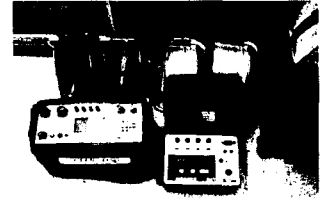
##### 2.2 시화호 조력발전소 접지설계

###### 2.2.1 대지고유저항의 측정

접지설계에 있어서 가장 중요한 사항은 접지 시공대상 부지의 토양특성을 파악하는 것이다. 시화호 조력발전소의 시공대상 부지에 대해 2005.6월과 2006.2월 두 차례 측정하였고 그중 동절기인 2006.2월의 측정값 30[Ω·m]를 적용하여 설계하였다.



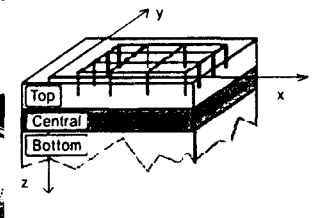
〈그림 1〉 wenner의 4전극법



〈그림 2〉 측정장비



〈그림 3〉 대지고유저항 현장측정



〈그림 4〉 대지분석 지층구조

###### 2.2.2 접지선의 굵기

접지선에 강력한 고장전류가 흐르면 주열에 의하여 최악의 경우 용단될 수도 있다. 따라서 충분한 전류용량의 도체가 선정되어야 하며 접지선의 굵기 선정시 고장전류, 통전시간, 온도 및 재료의 특성값 등을 적용하며 IEEE 표준식은 아래와 같다.

$$A = I_f \sqrt{\frac{t_c \times \alpha r \times \rho r \times 10^4}{TACP \ln\left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)\right]}} \quad [mm^2]$$

$$= 46.8 \times \sqrt{\frac{1 \times 0.00393 \times 1.7241 \times 10^4}{3.422 \ln\left[1 + \left(\frac{1083 - 40}{234 + 40}\right)\right]}} = 166.2 [mm^2]$$

- I<sub>f</sub> : 최대 단락전류 (=46.8 kA)
- A : 도체 단면적 [mm<sup>2</sup>]
- T<sub>m</sub> : 도체의 최대용단온도 [°C]
- T<sub>a</sub> : 주위온도 (=40 [°C])
- αr : 저항의 열계수 (=0.00393)
- ρr : 접지도체의 저항 [Ω/㎡] (= 1.7241)
- K<sub>0</sub> : 1/φ<sub>0</sub> (=234)
- φ<sub>0</sub> : 0°C에서의 저항의 저항온도계수
- t<sub>c</sub> : 고장 지속 시간 [sec]
- TACP: THERMAL CAPACITY FACTOR [ln(°C)] (= 3.42)

위 식에서 가장 눈여겨보아야 할 것은 고장전류와 고장지속시간 및 도체의 최대용단온도이다. 통상의 경우 고장전류는 접지선에 흐르는 전류를 의미하며 1선 지락전류를 반영하는 것이 보통이나 시화호 조력발전소의 경우 최대단락전류를 적용하여 여유율을 확보하였다. 고장지속시간은 기계적 강도를 고려하여 2초를 적용하는 것이 바람직하나 1초를 적용하였다. 적용결과는 166.2[mm<sup>2</sup>]이고 이때 안전설계지침에서 제시하는 도체전류분류율 즉, 접지망에 유입되는 고장전류는 접지망으로 유입시 접속점에서 이로부터 연결된 각 도체로 분산되는

계수 50%를 감안하면,

$$166.2 \times 0.5 = 83.1[m]$$

위 결과로부터 사용도체의 굵기는 100[mm]로 계산되나 기계적인 강도 및 설치 후 유지보수가 어려운 점을 감안하여 150[mm]를 적용하였다. 위 식에서 특이한 사항은 도체최대허용온도를 1083[℃]로 적용한 것이며 이 경우 접지망의 접지선간의 접속은 압축접속이 아닌 Exothermic Weld방식으로 하여야 한다. 따라서 시화조력 접지선의 접속방법은 Exothermic Weld 방식으로 설계하였다.

### 2.2.3 최대허용접촉전압과 보폭전압

시화조력은 IEEE 가이드에서 체중이 50[kg]인 경우의 최대허용 접촉전압 및 보폭전압을 적용하였다.

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \times C_s(hs, k) \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + 1.5 \times 0.77 \times 3000) \times \frac{0.116}{\sqrt{1.0}} = 517.94 [V]$$

$$E_{step50} = (1000 + 6 \times C_s(Hs, k) \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

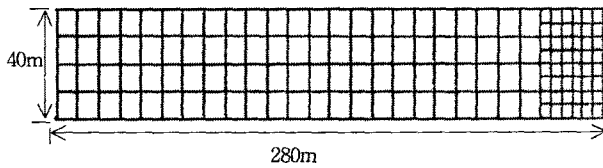
$$= (1000 + 6 \times 0.77 \times 3000) \times \frac{0.116}{\sqrt{1.0}} = 1723.76 [V]$$

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[ 1 - 0.106 \left( \frac{1 - \rho}{2hs + 0.106} \right) \right]$$

- $C_s$  : 감쇄계수(=0.77)
- $\rho$  : 대지비저항(=30[Ω·m])
- $\rho_s$  : 표면저항(=3000[Ω·m])
- $t_s$  : 고장지속시간(=1초)
- $hs$  : 자갈층의 두께(=0.15m)

### 2.2.4 예비설계

예비설계란 매쉬간격, 매쉬 도체의 총길이 및 면적을 적절히 가정하여 그것으로부터 접지저항을 구하고 고장전류로부터 계산한 접지전류와의 함수관계에서 접지망내의 최대전위상승인 GPR을 추정하는 기본적인 데이터를 제공하기 위한 것이다. 시화조력의 경우 아래와 같이 예비설계 하였다.



<그림 5> 접지망의 구조(평면)

- 매쉬간격 : 10m
- 접지도체 총길이 : 2560m
- 접지면적 : 11200[m<sup>2</sup>]

### 2.2.5 접지저항

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \times \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

- 대지비저항( $\rho$ ) : 30 [Ω·m]
- 접지도체의 총 길이( $L_T$ ) : 2560 [m]
- 접지면적( $A$ ) : 11200 [m<sup>2</sup>]
- 매설깊이( $h$ ) : 0.8 [m]

상기의 식에 의하여 접지저항  $R_g$ 는 0.138[Ω]로 계산되었다. 이식은 예비설계에서 전위상승(GPR)을 추정하여 안전기준을 충족시키기 위한 매설도체길이를 구하고자 하는 것이다.

### 2.2.6 매쉬에 인입되는 접지전류의 계산

접지사오의 형태는 여러 가지가 있다. 즉, 지락전류의 값을 결정할 때는 다양한 경우를 고려한 종합적인 계산이 필요하다. 최대고장전류가  $I_g$ 라면 접지전류  $I_g$ 는

$$I_g = \beta \times D_f \times C_p \times I_g [A]$$

- $\beta$  : 지락전류 분류계수
- $D_f$  : 비대칭분에 대한 교정계수

- $C_p$  : 장차의 계통확장 계수
- $I_g$  : 최대 지락전류

접지전류는 가공지선의 임피던스와 접지저항에 반비례하여 흐르는데 최적설계를 위하여 정확한 계산이 필요하나 일반적으로 지락전류의 40 ~ 60%가 접지망내에 유입되는 것으로 추정하고 있다. 이와 관련하여 한전설계지침에서는 지락전류의 분류계수로 아래의 값을 제공하고 있으며 시화조력은 아래의 <표2>로부터 분류율 20%를 적용하였다.

<표2> 지락전류 분류계수( $\beta$ )

선로수	2개 이하	3~5개	6개 이상
접지저항			
3Ω 미만	20%	15%	10%
3Ω 이상	17%	12%	10%

일반적으로 계통이 확장되어 용량이 증대하면 고장전류도 증가한다. 따라서, 이점을 고려하여 1.0 ~ 1.5의 계통확장계수  $C_p$ 를 적용한다. 또한, 비대칭분의 교정계수( $D_f$ )로 한전설계지침에서 제시하는 1.0을 적용하였다.

<표3> 비대칭분에 대한 교정계수

고장 지속 시간		교정계수 ( $D_f$ )
초	주파수(60Hz 교류)	
0.008	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 또는 그 이상	30 또는 그 이상	1.0

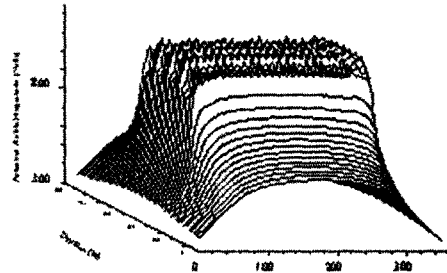
종합하면 접지전류는 아래와 같이 계산된다.

$$I_g = 0.2 \times 1.0 \times 1.2 \times 46.8 [kA] = 11232 [A]$$

### 2.2.7 접지망의 최대전위상승(GPR)

IEEE 가이드에 의하여 접지망 전체의 최대전위상승은 접지전류와 접지저항의 곱으로 구할 수 있다. 따라서,

$$GPR = I_g \times R_g = 11232 \times 0.138 = 1550 [V]$$



<그림 6> 3차원GPR 분포

상기 식에서 계산된 GPR이 2.2.3의 최대허용보폭전압과 최대허용접촉전압 이내에 위치한다면 2.2.4 예비설계의 접지망을 구성하는 것으로 접지설계가 종료되나 GPR이 최대허용접촉전압을 크게 상회하므로 접지망내 접촉전압( $E_{tm}$ )과 접지망내 보폭전압( $E_{sm}$ )을 검토하여,

$$E_{tm} < E_{touch50} \text{ 그리고 } E_{sm} < E_{step50}$$

를 검증하여야 한다. 만일 위 조건을 만족하지 않는다면 예비설계의 접지망 구성을 위 조건이 만족될 때까지 재계산하여 선정하여야 한다.

### 2.2.8 접지망의 최대예상접촉전압( $E_{tm}$ )의 검토

매쉬전극은 대규모 접지계통에서 이용하는 접지방식이다. 매쉬를 포설하는 경우 매쉬전극의 중심부와 4개 모서리 사이에 전위차가 발생한다. 매쉬전압은 이러한 경우를 고려한 전압으로 전위상승의 전위차를 말하며, 아래의 식에 의하여 구한다.

$$E_{tm} = \rho \cdot K_m \cdot K_1 \cdot \frac{I_g}{L_{touch}} (V)$$

시화조력은 매쉬간격 10m로 아래의 계산식을 이용하였다.

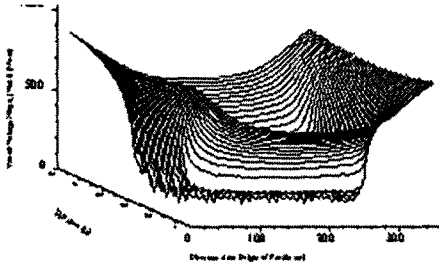
$$E_{tm} = k_{10} \cdot \rho \cdot K_m \cdot K_1 \cdot \frac{I_g}{L_{touch}} (V)$$

$$= K_{10} = 2.7159 \times D^{0.4416} = 0.9825 (\text{간격}10m)$$

- $K_m$  : MESH 전압 산출을 위한 간격계수
- $K_i$  : 전위경도 변화에 대한 교정계수
- $L_{touch}$  : 총길이( $L_{touch} = L_c + (1.55 + 1.22(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}))L_R$ )  
(접지봉이 없으므로  $L_{touch} = L_c$ )
- $L_c$  : MESH의 총 길이
- $L_R$  : 접지봉의 총 길이

IEEE가이드에 의한 계산을 수행한 결과 접지망내 계산 접촉전압은 아래와 같다.

$$E_{tm} = 0.9825 \times 30 \times 0.909 \times 2.094 \times \frac{11,232}{2,560} = 246.2(V) < 517.9(V)$$



<그림 7> 3차원 접촉전압 분포

계산결과 접지망의 최대예상접촉전압 246.2V가 안전전압인 허용접촉전압 517.9V이내에 위치함을 확인하였다.

### 2.2.9 접지망의 최대예상보폭전압( $E_{sm}$ )의 검토

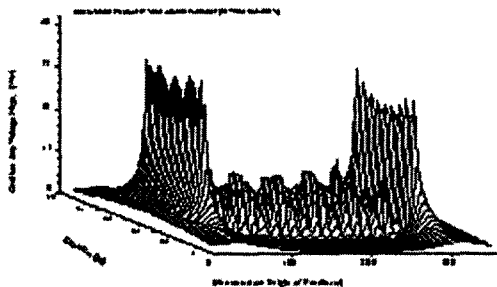
메쉬가 대규모인 경우 전류는 메쉬의 중심부보다 모서리 부분으로 많은 전류가 흐른다. 따라서, 중심부와 모서리 사이에 전위차가 발생한다. 이때 최대예상보폭전압은 아래의 식으로 구한다.

$$E_{sm} = \rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot \frac{I_G}{L_{step}} (V)$$

- $E_{sm}$  : 최대예상보폭전압
- $K_s$  : 보폭전압 산출을 위한 간격계수
- $K_i$  : 전위경도 변화에 대한 교정계수
- $L_s$  : 접지도체의 총 길이( $L_{step} = 0.75L_c + 0.85L_R$ )  
(접지봉이 없으므로  $L_{step} = 0.75L_c$ )
- $L_c$  : MESH의 총 길이
- $L_R$  : 접지봉의 총 길이

IEEE가이드에 의한 계산을 수행한 결과 접지망내 계산 보폭전압은 아래와 같다.

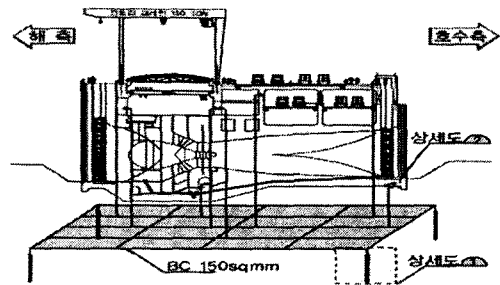
$$E_{sm} = 30 \times 0.545 \times 2.094 \times \frac{11,232}{0.75 \times 2,560} = 200.3(V) < 1,723(V)$$



<그림 8> 3차원 보폭전압 분포

계산결과 접지망의 최대예상보폭전압 200.3V가 안전전압인 허용보폭전압 1723V이내에 위치함을 확인하였다.

### 2.2.10 국제화에 부합한 시화조력 접지설계



<그림 9> 시화조력 접지계통 개요도

메쉬망의 접속부분은 시간이 경과함에 따라 손상될 가능성이 많은 부분으로 압축접속방식이 아닌 발열용융접속을 적용하였고 전력, 통신, 자동제어, 피뢰설비를 통합한 등전위로 구성하였다. 또한, 이종금속간의 접속에 의한 기초철근의 부식 가속화를 방지하기 위하여 메쉬망이 기초철근에 접촉되지 않도록 조치하였다. 특히 전반적으로 WTO 협정에 의한 KSC IEC 60364를 적용한 건축전기설비와 KSC IEC 61024를 적용한 피뢰설비로 설계하였으며 IEEE가이드의 제시내용을 충실히 이행하여 안전전압에 중점을 두므로써 국제화에 부합되게 설계하였다.

### 3. 결 론

최근 전기인들은 접지설계가 접지저항의 저감이 아닌 안전전압의 확보라는데 동의한 것 같다. 그러나 많은 접지관련 서적을 둘러보아도 안전전압을 고려한 시공에 대하여 자세히 언급한 것을 찾기 힘든 실정이다. 최적의 접지설비를 구성하기 위해서는 설계의 의도를 실현할 수 있는 시공방안이 제시되어야 할 것이다. 예를 들어 이종금속의 접속, 구체적으로 메쉬망(구리)과 기초(철근)이 접촉하였을 때 철근의 부식이 가속된다는 이론은 있으나 그 부식의 정도가 구체적으로 제시되지 않고 있다. 그렇다면 건축물의 등전위를 확보하기 위해서 메쉬망과 기초철근 또는 건축물내 철구조물과 의도적으로 접속시켜야 하는지에 대해 혼돈이 발생할 수 있다. 따라서, 최근 추구하는 접지설계의 의도를 실현할 수 있는 시공가이드가 구체적으로 마련되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE std 1050-1996
- [2] 이형수, 김성모 "접지기술입문" 1995
- [3] 한국전력공사 설계기준 2602(접지계 설계지침) 2005
- [4] 최홍규, 최병숙, 송영주 "접지설계 및 설계" p182-264, 2004.
- [5] 정세중 "최근의 접지설계 기술"
- [6] 한기봉 "지질별 접지시공의 최적화 방안"
- [7] 시화호 조력발전소 건설공사 기본 및 실시설계 보고서