

## 풍력개발예정지에 대한 대지저항률 측정과 해석을 통한 최적 접지설계

\*장 정호<sup>1)</sup>, 최 형철<sup>2)</sup>, \*\*이 광호<sup>3)</sup>

### Design of optimum grounding system for reserved area of wind turbine system by the ground resistivity measurement and analysis

\*Jeongho Chang, Hyeongcheol Choi, \*\*Kwangho Lee

**Key words** : Ground resistivity(대지저항률), grounding system(접지시스템), safety voltage(안전전압), GPR(대지전위상승)

**Abstract** : 전력설비에 대한 접지시스템의 근본 목적은 인체에 대한 안정성의 확립과 설비의 기능 향상을 위하여 사고 발생 시 고장 전류를 대지로 안전하고 신속하게 방전시키는데 그 목적이 있다. 풍력발전기 접지설계 시 고려해야 할 중요한 설계 요소는 토양조건, 대지저항률의 측정과 분석, 고장전류, 안전전압 결정 등이 있으며, 이러한 설계 파라미터 가운데 대지저항률은 접지설계 방법 및 물량에 미치는 영향이 결코 작지 않으므로 이에 대한 정확한 측정과 분석을 통하여 효율적인 접지 설계를 시행할 수 있어야 한다.

## 1. 서 론

풍력발전기의 구조물은 점점 대형화 추세로 지상에서 100m 이상 높이로 건설되고 있으며, 입지 여건도 해안가나 산 정상이 적합하기 때문에 기상 환경 변화에 따른 낙뢰에 노출 빈도가 많은 구조물이다. Caithness Windfarms Information Forum(CWIF)에서 발표한 1970년대부터 2007년 8월까지 비교적 대규모 풍력발전단지 사고유형 보고서<sup>1)</sup> 통계에 따르면 풍력발전기의 가장 빈번한 고장 발생 부분은 블레이드이며, 고장 원인 가운데 낙뢰가 원인인 경우가 23%에 달하여 강풍 다음으로 높은 빈도를 차지하고 있다. 또한 낙뢰로 인한 피해 발생 시 장기간 보수를 필요로 하기 때문에 전력공급 차질과 경제적 손실 또한 무시할 수 없다. 따라서 직격뢰를 완전히 방지하는 것은 어렵지만 피해 최소화를 위한 최적의 접지시스템을 구성하여야 한다. 본 논문에서는 시화 방아머리 풍력발전기 설치 예정지에 대하여 대지저항률을 측정하고 분석하여 이를 근거로 IEEE Std 80-2000 기준에 의한 목표 접지저항, 접촉전압, 보폭전압 등을 계산하여 안정성을 평가함과 동시에 관련 규정에 적합한 접지설계가 이루어졌는지를 검토한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 설계 결과를 IEEE 기준에 의한 설계 결과와 비교함으로써 설계의 적정성 여부를 판단하고 대지저항률이 설계에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

## 2. 대지저항률 측정과 분석

### 2.1 대지저항률

접지저항은 접지전극의 형상과 재료, 크기, 접지

전극이 매설된 대지를 구성하는 토양의 형태와 조건, 대지 구조 등에 따라 변화하며, 특히 접지 전극이 매설되는 지점의 대지저항률(Ground Resistivity)이 접지의 효과를 크게 좌우하게 된다. 대지저항률은 단면적이 1[m<sup>2</sup>]이고, 길이가 1[m]인 토양의 전기저항으로 정의하며 단위는[Ω·m]로 나타낸다. 대지저항률에 영향을 미치는 요인으로 토양의 종류와 온도, 수분의 양 그리고 계절적 요인이 있다.

<표 1> 토양의 종류와 저항률<sup>2)</sup>

종류	저항률[Ω·m]
늪지 및 진흙	80~200
점토질	150~300
모래질	250~500
사암 및 암반지대	10,000~100,000

### 2.2 풍력개발예정지 대지저항률 측정

토양의 수분 함유량이 증가하면 대지저항률은 급격히 감소된다. 또한 온도가 낮아지면 대지저항률이 증가하므로 접지도체는 동절기에도 얼지 않는 깊이에 매설할 필요가 있다. 대지저항률은 기후나 계절의 영향을 크게 받으며 기온이 낮으며 건조한 겨울에 높고, 여름에 낮게 나타나며 통상

- 1) 한국수자원공사 수자원연구원  
E-mail : chany@kwater.or.kr  
Tel : (042)870-7661 Fax : (042)870-7699
- 2) 한국수자원공사 수자원연구원  
E-mail : hcchoi@kwater.or.kr  
Tel : (042)870-7660 Fax : (042)870-7699
- 3) 한국수자원공사 수자원연구원  
E-mail : KHLLEE@kwater.or.kr  
Tel : (042)870-7650 Fax : (042)870-7699

2배 정도 차이가 난다.

접지설계에 있어서 중요한 사항으로 접지시공 부지에 대한 토양의 특성을 파악하는 것이다. 시화 풍력개발 예정지는 1,500[kW] 용량의 발전기 2대를 설치 할 계획으로 2007년 9월 현장 측정을 시행하였다.



Fig.1 풍력개발 예정지



Fig.2 측정 장비



Fig.3 현장 측정

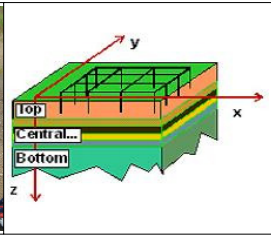


Fig.4 대지분석 지층구조

### 2.3 대지저항률 해석

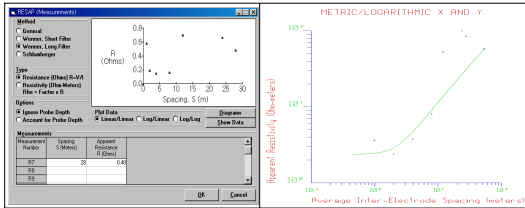


Fig.5 측정값 입력

Fig.6 분석 그래프

각 호기별 설치 예정지에 대하여 3회씩 측정하였으며 측정결과는 다음과 같다.

1호기	1차	2차	3차	평균값(Ω.m)
		22	18	7

2호기	1차	2차	3차	평균값(Ω.m)
		22	19	24

시화 방아머리 풍력발전기 설치 예정지의 대지저항률을 Wenner의 4전극법으로 측정한 결과 #1호기 예정지는 16[Ω.m]이었으며 #2호기 예정지에 대한 측정 결과는 22[Ω.m]으로 낮은 결과값을 나타냈다. 이는 측정지가 해안에 가까운 위치로 토양에 수분이 많이 함유된 지대의 특성을 보이는 것으로 추정되며, 약 2배에 달하는 계절적 변동 요인과 측정 시 기상여건 그리고 설계 상 안전 여유를 고려하여 대지저항률은 설계 시 100[Ω.m]를 적용하기로 한다.

## 3. 풍력개발예정지 접지설계

지락사고 시 지락전류에 의한 위험전압으로부터 인체의 안전을 확보하기 위한 IEEE Std 80-2000에서 제시한 접지 설계 과정은 다음과 같다.

### 3.1 접지선 굵기 산정

접지선에 강력한 고장전류가 흐르면 주열열에 의해서 최악의 경우 용단하는 경우도 있으므로 충분한 전류용량의 도체가 선정 되어야 한다.

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

$$= 12.5 \times 0.5 \times \sqrt{\frac{1 \times 0.00393 \times 1.7241 \times 10^4}{3.422 \ln \left[ 1 + \left( \frac{1083 - 40}{234 + 40} \right) \right]}} = 22 [mm^2]$$

- $I_f$  : 22.9kV 최대 단락전류 (=12.5 kA)
- $A$  : 도체 단면적 [mm<sup>2</sup>]
- $T_m$  : 도체의 최대용단온도 [°C] 용융접속
- $T_a$  : 주위온도 (=40 [°C])
- $\alpha r$  : 저항의 열계수 (=0.00393)
- $\rho r$  : 접지도체의 저항 [ $\mu\Omega/cm$ ] (= 1.7241)
- $K_0$  :  $1/\alpha_0$  (=234)
- $\alpha_0$  : 0°C에서의 저항의 저항온도계수
- $t_c$  : 고장 지속 시간 [sec]
- TACP: THERMAL CAPACITY FACTOR [h/cm<sup>2</sup>/°C] (= 3.442)
- 도체전류 분류율 50% 적용

여기서 고장전류는 일반적으로 1선 지락전류를 반영하는 것이 보통이나, 최대 단락전류를 적용하여 여유를 확보했으며 도체의 굵기는 설치 환경, 유지보수, 기계적 강도 등을 고려하여 100[mm<sup>2</sup>]로 결정한다.

### 3.2 최대허용 접촉전압과 보폭전압

체중 50[kg]인 경우를 기준으로 허용접촉전압과 보폭전압을 계산하였다.

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

$$= (1000 + 1.5 \times 0.67 \times 3000) \times \frac{0.116}{\sqrt{1.0}} = 468 [V]$$

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

$$= (1000 + 6 \times 0.67 \times 3000) \times \frac{0.116}{\sqrt{1.0}} = 1522 [V]$$

- $Cs$  : 감쇄계수(=0.67)
- $\rho_s$  : 대지고유저항(=100[Ω.m])
- $\rho_s$  : 표면저항(=3000[Ω.m])
- $t_s$  : 고장지속시간(=1초)
- $hs$  : 자갈층의 두께(=0.10m)

### 3.3 예비설계

접지망은 Mesh 방식으로 설계하며, 접지망 포설 면적은  $50 \times 40[m] = 2,000[m^2]$ 로 결정한다. Grid 간격을 10[m]로 할 때 도선의 길이는  $50 \times 5 + 40 \times 6 = 670[m]$ 로 산정한다. 또한 접지 효과 증대를 위하여 접지망 둘레에 추가 도체 180[m]를 포설하는 조건으로 설계하였다.

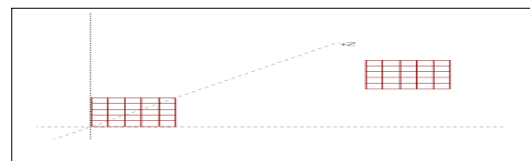


Fig.7. 메시접지망 설계

### 3.4 메시망에 의한 접지저항

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

$$R_g = 100 \left[ \frac{1}{670} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 2000}} \times \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.8 \times \sqrt{20/2000}} \right) \right] = 1.11 [\Omega]$$

- 토양의 대지비저항( $\rho$ ) : 100 [ $\Omega\text{m}$ ]
- 접지도체의 총 길이( $L_T$ ) : 670 [m]
- 접지면적( $A$ ) : 2,000 [ $\text{m}^2$ ]
- 매설깊이( $h$ ) : 0.8 [m]

### 3.5 메시망에 유입되는 접지전류 계산

최대고장전류가  $I_f$ 라면 접지전류  $I_g$ 는 다음과 같이 계산된다.

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

$$I_g = 0.1 \times 1.0 \times 1.2 \times 12,500 = 1,500 [A]$$

- $\beta$  : 지락전류 분류계수(0.1)
- $D_f$  : 비대칭분에 대한 교정계수(1.0)
- $C_p$  : 장치 계통확장 계수(1.2)
- $I_f$  : 최대 지락전류(12,500)

### 3.6 접지망의 최대전위상승(GPR)

IEEE 가이드에 의하여 접지망 전체의 최대전위상승은 접지전류와 접지저항의 곱으로 구한다.

$$GPR = I_g \times R_g$$

$$GPR = 1.11 \times 1,500 = 1,665 [V]$$

GPR이 접지망 내 접촉전압( $E_{tm}$ )과 보폭전압( $E_{sm}$ )과 비교하여,  $E_{tm} < E_{touch50}$  그리고  $E_{sm} < E_{stop50}$  두 조건을 만족하도록 설계하여야 한다. 여기서는 최대 대지전위 상승전압이(1,665V)으로 최대 허용 접촉전압값(468V)을 초과하므로 접지망 내에서의 예상 접촉전압을 재 계산해야 한다.

### 3.7 접지망의 최대예상접촉전압( $E_{tm}$ )의 계산

메쉬전극의 중심부와 4개 모서리 사이에는 전위차가 발생한다. 메쉬전압은 이러한 경우를 고려한 전압으로 전위상승의 전위차를 말하며, 아래의 식에 의하여 구한다

$$E_{tm} = \frac{K_{10} \times \rho \times K_m \times K_i \times I_g}{L_c + [1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right)] L_R}$$

- $K_{10}$  : 메시망 간격 10m 이하일 때  $K_{10} = 2.7159 \times D^2 - 0.4416$ , 10m 초과하면 1
- $\rho$  : 대지저항률 [ $\Omega\text{m}$ ]
- $K_m$  : 메시전압 산출을 위한 간격계수
- $K_i$  : 전위경도 변화에 대한 교정계수
- $L_c$  : 메시도체의 총 길이 [m]
- $L_r$  : 접지봉 1개의 평균 길이 [m]
- $L_R$  : 접지봉의 총 길이 [m]

$$E_{tm} = \frac{0.98 \times 100 \times 0.81 \times 1.75 \times 1,500}{670 + [1.55 + 1.22 \left( \frac{1}{\sqrt{100^2 + 100^2}} \right)] \times 0} = 311 [V]$$

### 3.8 접지망의 최대예상보폭전압( $E_{sm}$ )의 계산

$$E_{sm} = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_g}{0.75 \times L_c + 0.85 \times L_R}$$

- $K_s$  : 보폭전압 산출을 위한 간격계수
- $K_i$  : 전위경도 변화에 대한 교정계수
- $L_c$  : 메시도체의 총 길이[m]
- $L_R$  : 접지봉의 총 길이 [m]

$$E_{sm} = \frac{100 \times 0.26 \times 1.75 \times 1,500}{0.75 \times 670 + 0.85 \times 0} = 136 [V]$$

접지망 내의 예상접촉전압과 예상보폭전압은 허용전압 이하로 기준을 만족한다.

### 3.9 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 설계 검증

접지설계의 안정성과 신뢰성 확보를 위하여 접지설계 프로그램인 CDEGS를 이용하여 IEEE 계산조건과 동일한 조건으로 풍력발전예정지에 대한 시뮬레이션을 시행하였다.

\* 시뮬레이션 결과

- 접지저항 : 0.53 [ $\Omega$ ]
- 최대허용접촉전압 : 479[V]
- 최대허용보폭전압 : 1,569[V]
- 대지전위상승값(GPR) : 792[V]

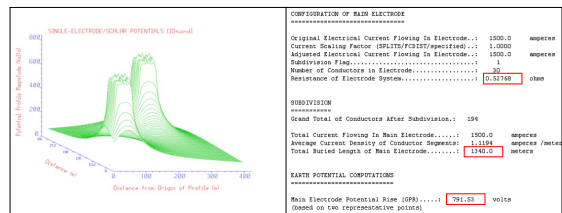


Fig 8. 3차원 GPR 분포 Fig 9. 접지저항과 GPR

GPR이 792[V]로 최대허용접촉전압보다 높으므로 메시망 내에서의 예상전압을 구하여 비교한다.

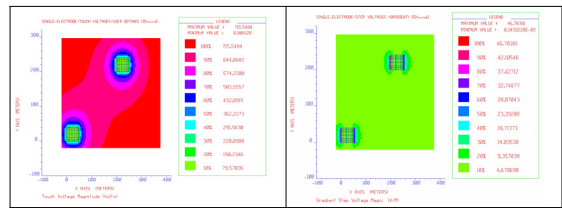


Fig 10. 예상접촉전압 Fig 11. 예상보폭전압

- 메시망 내 예상접촉전압 : 200[V] 이하
  - 메시망 내 예상보폭전압 : 최대 47[V]
- 시뮬레이션 결과 기준에 적합한 안정성이 확보된 설계가 시행되었음을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

최근의 접지설계는 단순한 접지저항의 저감 뿐 아니라 시스템 안정화와 안전전압 확보에도 큰 의미를 두고 있다. IEEE std 80 절차에 의하거나 시뮬레이션에 의한 접지시스템 설계 시 적용되는 대지저항률은 대상 부지의 전위 상승과 그에 따른 설계 물량 산출에 큰 영향을 미치므로, 대지저항률의 정확한 측정과 분석은 시스템의 경제성과 효율을 결정하는 중요한 파라미터임에 틀림없다. 따라서 환경 요소에 제약을 받는 대지저항률의 정확한 측정과 해석을 통한 효율적인 접지설계 방안이 마련되어야 한다.

### References

- [1] 2007.8 Caithness Windfarm Information Forum "Summary of Wind Turbine Accident data to 2007" www.caithnesswindfarms.co.uk
- [2] 高矯健彦 著, 1996 "접지기술입문" 동일출판사
- [3] IEEE Std 80-2000
- [4] 한국전력공사, 2003, 설계기준-2602(접지계설계지침)