

**풍력발전단지 연계 전용선로 보호용 거리계전 알고리즘**

권영진, 강상희, 최동민, 장성일  
 명지대학교 차세대전력기술연구센터

**A Distance Protection Algorithm for a Transmission Line to Interconnect a Wind Farm to a Utility System**

Y.J Kwon, S.H Kang, D.M Choi, S.I Jang  
 NPTC Moyngji University

**Abstract** - This paper presents a distance protection algorithm applied to the linked line for interconnecting wind farm with the utility. The capacity of wind farm is lower than utility system and its fault current level is very low. When a high resistance fault occurs in the linked line, it is difficult to detect accurate fault distance because of reactance effect. By using the characteristic of equivalent source impedance of induction generator which is compensated by capacitor bank and characteristic of the capacity of wind farm, this paper proposes improved distance protection algorithm applied to the linked line. A series of PSCAD/EMTDC simulation results have shown effectiveness of the proposed algorithm.

**1. 서 론**

현대 산업사회의 에너지 소비 증가에 따른 석탄, 석유 등의 화석 에너지 고갈에 대비하고, 화석에너지 사용으로 인한 환경 오염문제를 감소시키기 위해 친환경적이고 에너지원이 풍부한 대체에너지 분야에 대한 관심이 고조되고 있다. 이런 환경으로 청정에너지이며 분산형 전원으로 풍력발전의 전력계통 연계기술은 필수 불가결한 핵심요소 기술로써 최근 들어 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있다. 이 연구 분야 중 시스템 보호관점에서는 크게 분산전원 자체 보호와 연계계통 보호 및 단독운전 검출의 3개 분야로 연구가 진행되고 있다.

풍력발전 연계계통의 보호 분야의 연구로써는 분산전원의 계통 병입으로 인한 고장전류의 변동에 따른 보호협조의 조정, 분산전원의 특성을 반영한 보호계전기의 정정을 변경하여 고장검출 능력의 향상[1], 풍력발전단지 내외부 외란에 대하여 풍력발전기가 탈조하지 않는 범위의 CCT(Critical Clearing Time)를 결정[2], 정상분 임피던스의 제적을 이용한 풍력발전단지 내외의 고장과 정상상태를 구별[3]하는 방법 등이 소개되었으나 본 논문의 목표인 송전계통 연계선로의 거리계전에 관한 방법은 연구된 바가 없다.

국내에서 현재까지 분산전원은 전용선을 통해 연계할 경우 주를 배전선에 연계를 하여 왔으나 향후 발전단지의 용량이 커지고 대규모화 될 경우 154kV 이상 급의 송전계통에 직접 연계될 수도 있다. 풍력발전단지를 송전계통에 연계할 경우 주보호 및 후비보호 요소로 사용할 수 있는 거리계전을 분산전원 계통에 적용할 경우 유틸리티 계통에 비해 약전원이며, 전원의 출력이 지속적으로 변하는 분산전원의 특성과 고저항 고장 등의 영향으로 고장시의 현상이 일반 송전선로의 고장과는 다르게 나타날 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이런 경우에도 대응할 수 있는 분산전원이 설치된 계통의 특성을 반영한 거리계전 알고리즘을 제안하고 사례연구를 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

**2. 본 론**

**2.1 연계 전용선로의 거리계전기 적용**

최근 발표된 한국전력공사의 “분산형 전원 배전계통 연계 기술기준”에 따르면 특고압 배전선로를 기준으로 전력용량이 3MW초과하는 경우는 전용선로로 연계하여야 하며 이 경우 발전설비의 출력용량은 10MW이하로 규정하고 있다.[4] 따라서 10MW이상의 대단위 분산전원이 계통에 연계될 경우에는 여러 회선으로 연계를 하거나 154kV 이상 급의 송전계통에 연계하여야 한다. 분산전원을 송전선로에 연계하는 경우 원칙적으로 “송변전 전기설비 이용규정”을 따르도록 되어 있으며, 계통의 보호는 한국전력공사의 “타사 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 지침”에 따른다.

“타사 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 지침”에 따르면 송전계통에 연계되는 분산전원의 총 발전용량을 기준으로 30MVA 이상 급은 Pilot 계전방식+후비보호로 구성하고 30MVA 이하 일 경우 Non-Pilot 계전방식을 사용하도록 규정하고 있다.[5] 이때 거리계전기는 30MVA 이상급 계통의 후비보호용으로 30MVA 이하급 계통의 주보호 요소로 사용될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 유틸리티 계통에 비해 약전원단으로써 작용하는 분산전원의 특성과 연계계통에서 고장저항을 포함하는 고장발생시의 문제점을 검토하고 이를 보완할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

**2.2 거리계전기방식에서 고장저항의 영향 및 보정**

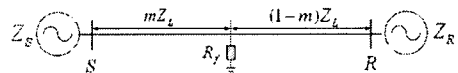


그림 1. 송전계통의 고장

여기서,  $m$  Fault Distance(p.u),  $Z_L$  Line Impedance  
 $Z_S, Z_R$  Source Impedance,  $R_f$  Fault Resistance

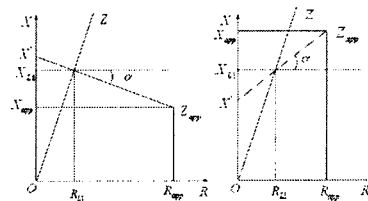


그림 2. 임피던스 보정

여기서,

$R_{app}, X_{app}$ : apparent resistance, reactance[Ω]  
 $R_L, X_L$ : actual positive-sequence resistance, reactance[Ω]

그림1과 같은 고장저항이 포함된 송전계통의 지락고장시 거리계전기 측정 임피던스는 식(1)과 같다.

$$Z_{app} = \frac{V_{app}}{I_{app}} = Z_{app} = Z_{L1} + R_f \cdot \frac{3I_{f0}}{I_{s1} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{s0}} \quad \text{식(1)}$$

$$= Z_{L1} + R_f \left| \frac{3I_{f0}}{I_{s1} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{s0}} \right| e^{j\alpha}$$

이 때 고장점까지 거리  $Z_{L1}$ 이외에 고장저항  $R_f$ 로 인해 거리계전기에서 측정되는 임피던스  $Z_{app}$ 는 Under/Over Reach 하게 된다. 그림2에서 실제고장지점까지의 임피던스는 직선  $X'-Z_{app}$ 와  $O-Z$ 의 교점이며 다음 식(2),(3)을 이용하여 구할 수 있다.[6]

$$X' = X_{app} + R_{app} \cdot \tan \alpha \quad \text{식(2)}$$

$$R_{L1} = \frac{X'}{L \cdot \frac{X' - X}{R_{app}}}, \quad X_{L1} = \frac{L}{R} \cdot \frac{X'}{L \cdot \frac{X' - X}{R_{app}}} \quad \text{식(3)}$$

위의 방법으로  $Z_{app}$ 를 보정할 때 그림2의 각도  $\alpha$ 가 중요한 변수가 된다. 각도  $\alpha$ 는 식(4)와 같이 취득 가능한 자단 영상전류  $I_{s0}$ 로 표현되는 첫 번째 항의 위상각과 전류분배계수인  $I_{s0}$ 와  $I_{f0}$  비의 위상각으로 나누어 나타낼 수 있다.[6]

$$\alpha = \text{Arg} \left[ \frac{I_{s0}}{I_{s1} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{s0}} \right] + \text{Arg} \left[ \frac{1}{\left( \frac{I_{s0}}{I_{f0}} \right)} \right] \quad \text{식(4)}$$

### 2.3 풍력발전단지가 거리계전기에 미치는 영향

분산전원인 풍력발전단지가 송전계통에 전용선으로 연결될 경우 상대단 유틸리티 계통의 등가 전원용량은 분산전원단에 비해 대단히 큰 값을 가지므로 식(5)와 같이 가정할 수 있다. 상대단에 비해 용량이 작은 분산전원단은 약전원단으로 작용함으로 고장시에 고장전류의 대부분은 상대단 송전계통으로 공급받게 되고 분산전원이 담당하는 고장전류는 작아지게 된다. 이 점은 약전원단에 거리계전기를 적용할 때 고장전류의 부족으로 정확한 임피던스를 측정할 수 없는 현상으로 나타나고 특히, 고장저항이 개입된 고장시에 고장전류는 현격하게 줄어들게 됨으로 거리계전기를 사용한 고장검출이 더 어렵게 된다.

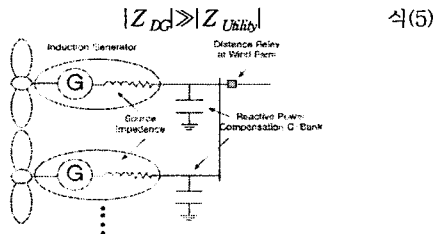


그림 3. 유도발전기로 구성된 풍력 분산전원단지의 구성

유도발전기로 구성된 풍력발전단지의 각 유도발전기들은 그림3과 같이 무효전력 보상을 위한 Capacitor 뱅크들이 설치되어 있다. 이 Capacitor 뱅크는 유도발전기 운전 시에 필요한 무효전력을 공급하며, 개별 발전기들이 어느 정도 부족보상이나 과보상 되기는 하나 분산전원 인출단에서는 무효전력의 입출력이 거의 없게 된다. 분산전원 앞단에 설치된 계전기의 배후전원 임피던스는 개별 유도발전기와 전원임피던스와 Capacitor 뱅크를 포함한 임피던스를 함께 보게 됨으로 무효전력이 보상된 경우 전원임피던스의 허수부보다 실수부의 값이 상대적으로

큰 값을 가지므로 식(6)과 같이 가정할 수 있다.

$$\text{Real Part of } Z_{DG} \gg \text{Imaginary Part of } Z_{DG} \quad \text{식(6)}$$

### 2.4 분산전원단 거리계전기의 임피던스 보정

식(4)의 첫 번째 항의 입력 값은 측정 가능한 전류값이나 두 번째 항의 고장점 전류는 측정 할 수 없다. 따라서 이 두 번째 항을 고장발생거리  $m$ 을 변수로 한 자단 전원 임피던스, 상대단 전원임피던스 및 선로 임피던스로 표현한 전류분배계수의 위상각으로 표현한 식(6)과 같다.

$$\text{Arg} \left[ \frac{1}{\left( \frac{I_{s0}}{I_{f0}} \right)} \right] = \text{Arg} \left[ \frac{Z_{L0} + Z_{s0} + Z_{R0}}{(1-m)Z_{L0} + Z_{R0}} \right] = \text{Arg}[\text{CDF}] \quad \text{식(6)}$$

풍력 발전시스템에서 풍속 따라 출력이 수시로 변동하는 풍력발전단지의 전원 임피던스는 상수 값으로 정할 수 없다는 제약이 따르긴 하나, CDF로 표시한 전류분배계수를 계산할 때 식(5)와 식(6)의 가정을 이용하면 전류분배계수 CDF의 실수부가 허수부보다 상당히 큰 값을 가지며 이것으로부터 다음 식(7)과 같은 결론을 얻을 수 있다.

$$\text{Arg} \left[ \frac{1}{\left( \frac{I_{s0}}{I_{f0}} \right)} \right] = \text{Tan} \left[ \frac{\text{Imaginary Part of CDF}}{\text{Real Part of CDF}} \right] \approx 0 \quad \text{식(7)}$$

식(7)의 결과로부터 송전계통에 비해 용량이 작으며 무효전력 보상을 하는 유도발전기로 구성된 분산전원단에 설치된 거리계전기는 고장저항의 영향으로 발생하는 리액턴스 효과의 보정시 사용하는 식(4)의 각도  $\alpha$ 를 구할 때 두 번째 항 보다는 첫 번째 항의 영향을 지배적으로 받을 것으로 추측된다. 따라서, 본 논문에서는 식(4)의 두 번째 항은 그 값이 첫 번째 항에 비하여 값이 매우 작아 무시할 수 있다고 가정하고 식(4) 첫 번째 항만을 사용하여  $\alpha$ 각을 구한 후 분산전원단 거리계전기에서 측정된 임피던스를 보정하였다.

### 2.5 사례연구

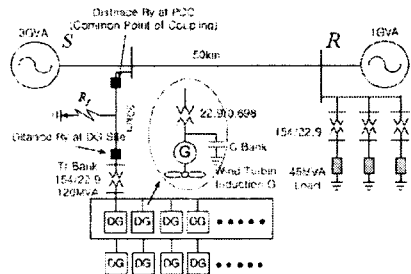


그림 4. 풍력발전단지 모델 계통

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 그림4와 같이 PSCAD/EMTDC를 이용하여 풍력발전 단지를 모델링하였다. 풍력발전기는 농형 유도기 모델의 회전속도와 토크 제어로 직입 연계 방식을 사용하였으며, 각 발전기는 4개의 Capacitor로 구성된 Capacitor 뱅크제어를 통해 무효전력보상을 하였다. 풍력발전단지의 1기의 용량은 2MW로 총 용량 100MW로 구성하였고, 정격출력으로 운전상태되는 상태에서 고장저항을 0.30[Ohm]으로 10[Ohm]씩 변경하면서 고장을 모의하였다.

#### 2.5.1 보정전 거리계전기 측정 임피던스

그림5,6은 풍력발전단에서 0.15[p.u]지점에 고장저항을

10[Ohm]씩 변경 하면서 모의한 고장에 대하여 거리계전기가 측정된 임피던스 제척이다. 유틸리티 측은 고장전류가 크므로 고장저항에 의한 영향만 나타나는 반면, 분산전원측은 약전원단으로 고장저항 고장시 전류가 작아지게 되고, 고장시 발생하는 전압강하 때문에 유도발전기는 무효전력의 요구가 줄어들게 되고, 이로 인해 Capacitor 뱅크로부터 단시간 진상 무효전력이 사고지점으로 유입되게 되어 그림6과 같이 제척이 4사분면에 크게 치우쳐 있음을 볼 수 있다.

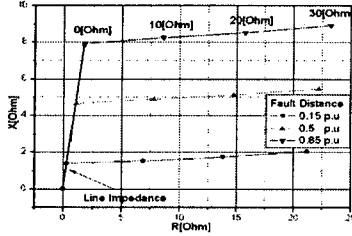


그림 5. 보정전 유틸리티측 거리계전기 측정 임피던스

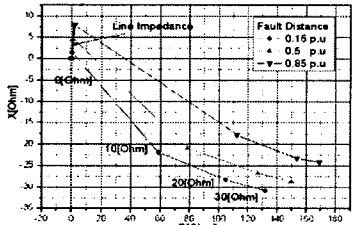


그림 6. 보정전 풍력발전단측 거리계전기 측정 임피던스

### 2.5.2 보정후 거리계전기 측정 임피던스

그림7,8은 풍력발전단에서 0.85[p.u]지점 고장저항 30[Ohm]인 1선 지락고장에 대하여 2.3절에서 제안한 방법을 사용하여 유틸리티 측과 분산전원 측의 거리계전기에서 측정된 임피던스를 보정한 결과를 고장시점부터 도시한 것이다. 풍력발전단 측에서 측정된 임피던스가 보정 전에는 4사분면의 부동작 범위에 있다가 그림8에서와 같이 0.85[p.u] 지점의 R,X값에 근접하여 동작범위로 수렴됨을 확인할 수 있다. 다만 제척이 진동을 하는 것은 고장발생 후 발전기의 과도특성에 기인한 것으로 생각된다.

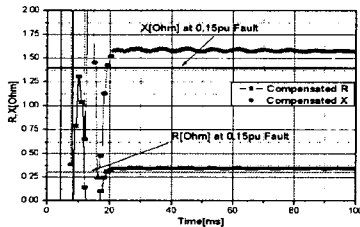


그림 7. 고장거리 0.15[p.u], 고장저항 30[Ohm] 인 경우 유틸리티측 거리계전기 측정 임피던스 수렴

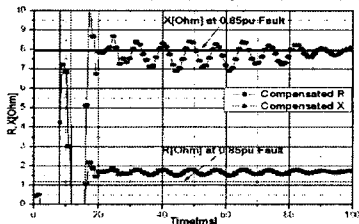


그림 8. 고장거리 0.85[p.u], 고장저항 30[Ohm] 인 경우 풍력발전단측 거리계전기 측정 임피던스 수렴

그림9,10은 그림5,6의 보정전과 같은 고장상황에 대하여 제안한 방법으로 임피던스를 보정한 결과이며, 고장저

항의 영향에 무관하게 고장발생 거리에 근사한 영역으로 임피던스가 수렴됨을 확인할 수 있다. Zone 1 정정의 끝 지점인 0.85[p.u]부분에서 약간 Under-reach하는 경향이 있으나 이 부분은 향후 지속적인 연구를 통하여 보완할 예정이다.

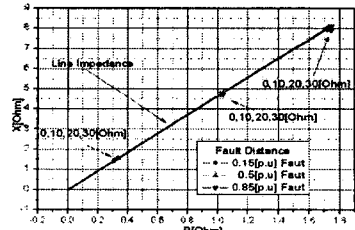


그림 9. 보정후 유틸리티측 거리계전기 측정 임피던스

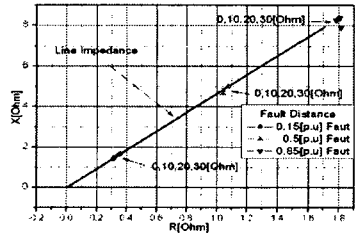


그림 10. 보정후 풍력발전단측 거리계전기 측정 임피던스

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2004-B-121) 주관으로 수행된 과제임.

### 3. 결 론

본 논문에서는 유도발전기로 구성된 풍력발전단지들 전용선로를 통하여 송전계통에 연계할 때 거리계전기를 보호방식으로 사용할 경우, 송전계통에 비해 약전원이며 고장 저항의 영향 및 유도발전기를 사용하는 특성으로 인해 고장시 거리계전기 동작이 일반 송전선로 고장시의 현상과 다르게 나타날 수 있는 현상을 분석하고 이를 보정할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며, 사례 연구를 통해 제안한 알고리즘의 타당성과 거리계전기 동작 성능이 크게 개선됨을 검증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 장성일, 김광호, 권혁완, 김대영, 권혁진, "풍력발전단지 연계 전용선로 보호계전방식의 향상에 대한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 52A, No 15, 675-683, 2003
- [2] Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, "Investigating the Impact to Embedded Generation on Relay Setting of Utilities Electrical Feeders", IEEE Transm. Distrib., Vol. 146, No. 1, 37-44, January 1999
- [3] Haslam, S.J., Crossley, P.A., Jenkins, N, "Design and field testing of a source based protection relay for wind farms", Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 14, Issue 3, 818 - 823, July 1999
- [4] 한국전력공사 배전처, "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준", 2005
- [5] 한국전력공사 계통운영처, "타사 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 지침", 1996.8
- [6] Y.J Ahn, S.H Kang, S.J Lee, Y.H Kang, "An Adaptive Distance Relaying Algorithm Immune to Reactance Effect for Double-Circuit Transmission Line Systems", Power Engineering Society Summer Meeting, Vol 1, 599 - 604 , July 2001