

분산형전원 연계시 보호협조방안 연구

강대근*, 윤상천*
KEPCO Academy*

A study on the Interconnect Protection of Dispersed Generators

Dea-Kuen Kang*, Sang-Chun Yoon*
KEPCO Academy*

Abstract - 정부의 신재생에너지 확대 보급 사업에 의해 현재 한전의 배전계통에는 다수의 분산형 전원이 연계되고 있으나 기존의 배전계통은 단방향 전력계통으로 설계되어 있으며 다수의 분산전원이 연계되는 경우 배전계통에 많은 문제점이 나타나고 있다. 따라서 기존의 단방향 고장계산 방식에서 분산전원에서 기여하는 고장전류를 함께 고려하는 양방향 보호체계로의 전환 및 분산형전원 영향을 고려한 보호협조 방안이 필요하다. 본 논문에서는 다수의 분산전원이 연계된 배전계통에서 배전계통 고장시 분산전원에 의한 효과를 고려한 보호기기 설정방안을 제시하였다.

1. 서 론

최근 고유가에 따른 대체에너지 개발, 환경보전이라는 사회적 요구 등으로 태양광, 풍력, 연료전지, 수소 등 신재생에너지에 대한 관심이 어느 때보다 높은 시기이다. 신재생에너지는 대규모 집중형 전원이 아닌 전력 수요지 근방에 설치되는 비교적 작은 규모의 분산형 전원으로 배전선로에 연계되고 있다. 분산형전원은 부하 피크 시 유연할 수 있으며, 송전손실의 저감이 가능한 측면으로 보았을 때 긍정적이다. 하지만 분산형전원의 연계는 단방향으로 전기를 공급하던 전통적인 배전방식을 벗어나 양방향 전기공급으로 인한 많은 기술적 검토를 필요로 하게 된다. 특히 배전계통운영 측면에서 능동전원이 병입되어 양방향 조류가 발생하면 역조류 문제와 더불어 보호기기 정격 차단전류 상회가능성, 보호기기의 오동작, 부동작 개연성, 전기품질(전압변동, 고조파, 플리커 등)에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 분산형 전원 병입시 예측되는 일반적 현상을 기본으로 가장 현실적인 보호기기 설정방법을 찾아보고자 한다.

2. 본 론

현재 배전계통에 연계되고 있는 분산전원의 종류는 매우 다양하다. 가장 많이 연계되고 있는 분산전원은 태양광발전이며 그 이외에도 소수력발전, 열병합발전, 풍력발전, 연료전지 등 매우 다양한 분산전원이 배전계통에 연계되고 있다. 분산전원의 종류는 다양하지만 고장특성 관점에서는 크게 3종류로 구분할 수 있다. 즉, 전통적인 발전방식인 동기발전기와 유도발전기 그리고 인버터를 통하여 계통에 연계되는 인버터 기반의 발전기로 아래 표 1과 같이 구분할 수 있다. 따라서, 다양한 종류의 분산전원은 각 분산전원의 발전기가 동기발전기인지 유도발전기 그리고 계통과의 인터페이스가 직접 연계인지 인버터를 통해 연계되는지에 따라 고장특성이 구분될 수 있다. 예를 들어 유도발전기를 채용하고 있는 풍력발전기가 계통에 직접 연계되는 경우 고장특성은 유도발전기로 볼 수 있으며 유도발전기를 채용하고 있다하더라도 인버터를 통해 계통에 연계되는 형태라면 인버터 기반 발전기의 고장특성을 따른다고 볼 수 있다.

<표 1> 고장특성에 따른 분산전원 분류

분산전원 종류	고장특성
열병합발전, 소수력(동기기형) 등	동기발전기
소수력(유도기형), 풍력(유도기 직접연계) 등	유도발전기
태양광, 연료전지, 마이크로터빈 풍력(인버터를 통한 연계, DFIG Type) 등	인버터기반 발전기

2.1 동기발전기(Synchronous Generator) 고장특성

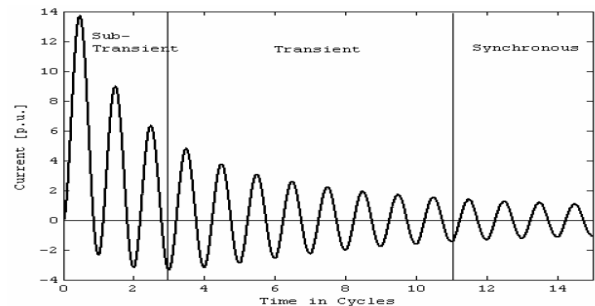
동기발전기의 단자에서 단락고장을 발생시키게 되면 발전기의 단락전류는 아래 식1과 같이 표현될 수 있으며 도식적으로 그림2과 같은 형태의 전류를 얻을 수 있다. 즉, 고장 후 수 사이클 동안

은 매우 큰 전류가 흐르고, 다음 10사이클 정도의 과도 기간을 거쳐 정상 상태에 도달한다. 처음 수 사이클 동안 매우 큰 전류가 흐르는 기간을 차과도 기간, 차과도 고장전류라고 하고 다음 얼마간의 과도기간에 나타나는 전류를 과도기간, 과도전류라고 한다.

$$i(t) = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos \omega t - \frac{E\sqrt{2}}{X_d} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

식 1

- E : 전압원 (고장발생 전)
- X_d'' : 차과도리액턴스 (subtransient reactance)
- X_d' : 과도리액턴스 (transient reactance)
- X_d : 동기리액턴스 (synchronous reactance)
- T_d'' : subtransient time constant
- T_d' : transient time constant
- T_a : aperiodic time constant



<그림 2> 동기발전기의 단락고장 전류

이상의 리액턴스들은 동기발전기의 단락고장 발생시 과도 해석을 위한 특정 시간대의 전류 크기 결정에 매우 중요한 역할을 한다. 자가 발전시설이나 전동기의 경우 단락 사고 발생시 차단 시간이 통상 2~3사이클이므로 이때의 고장 전류 크기는 차과도 리액턴스(X_d'')를 사용하여 계산해야 한다. 한편 전력계통에 연계된 발전기의 발전기 모선이나 선로에서 사고 발생할 때는 차단 시간이 보호협조 관계를 고려하여 5~6사이클 후에 차단되도록 되어 있으므로 이 때는 과도리액턴스(X_d')를 사용하여 고장 전류를 계산해야 할 것이다.

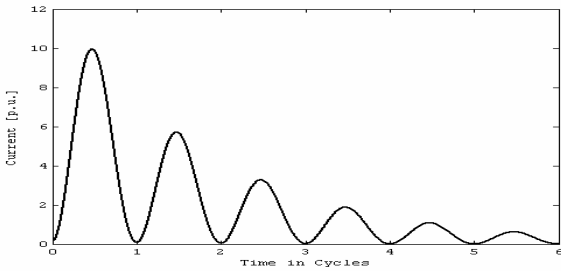
2.2 유도발전기 (Induction Generator) 고장 특성

유도발전기 단자에서의 3상 단락 고장시 고장전류는 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$i(t) = \frac{V\sqrt{2}}{X_s'} \left[e^{-\frac{t}{T_s''}} \cos \alpha - (1 - \sigma) e^{-\frac{t}{T_r''}} e^{j\omega t} \cos(\omega_s t + \alpha) \right]$$

식 2

- V : 단상 RMS 전압 (고장전)
- X_s'' : 차과도 리액턴스 (subtransient reactance)
- T_s'' : subtransient stator time constant
- T_r'' : subtransient rotor time constant
- α : phase angle of stator voltage at the instant of short circuit
- ω_s : synchronous angular speed
- σ : machine leakage factor



〈그림 3〉 유도발전기의 단락고장 전류

위 그림 3은 일반적인 유도발전기의 단락고장 전류를 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 유도발전기의 고장전류는 DC이며 초기 차과도기간에 큰 고장전류를 기여하다가 점차 감소되는 것을 확인할 수 있다.

유도발전기는 차과도 기간에만 고장전류를 공급하므로 동기발전기와 같이 과도 임피던스를 사용할 필요는 없으며, 유도발전기의 차과도 임피던스는 단락고장 발생시 차과도 기간에 초기 전류의 크기로 결정될 수 있으나 유도기는 계통에서 여자전류를 공급받아야 발전이 가능하므로 계통에 고장전류 기여를 양하는 것으로 해석해도 무방하다.

2.3 인버터(Inverter)기반 고장특성

인버터는 전력전자소자들로 구성되어 있으며 이들 전력전자소자는 근본적으로 과전류에 약하다. 즉, 열적 시정수가 매우 작다고 할 수 있다. 따라서, 고장발생시 인버터에서 정격 이상의 과도한 전류를 상당기간 흐르도록 허용한다면 전력전자소자들이 손상될 가능성이 크다. 이러한 이유로 전압제어형인 전류제어형인 인버터는 계통에서 고장 발생시 혹은 내부 계통의 고장 발생시에도 자체적으로 고장을 매우 빠르게 차단한다. 전력전자소자에 ON/OFF 스위칭 제어 신호를 차단함으로써 간단히 구현될 수 있다. 보통 인버터 정격 전류의 150%~200%에 다다르기 전에 과전류 보호가 동작하게 되어 계통 고장 발생시 인버터의 고장 전류 기여 기간은 반주기 이내로 유도기와 마찬가지로 그 영향을 고려하지 않는다.

2.4 변압기 결선방식에 따른 고장특성

능동전원인 분산형전원 발전기의 가동여부 및 용량 등에 따라서 배전계통에 미치는 영향은 달라진다. 그러나 발전기를 가동하고 있지 않은 상태 또는 발전기 회로를 차단한 상태에서 특정한 결선된 변압기만 배전계통측에 연결되어 있어도 고장시 고장전류를 기여할 경우가 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 범용으로 사용되는 2권선 변압기 결선방식별로 등가해석방법이 다르며, 가장 범용되고 있는 $Y_g-\Delta$ 결선방식의 경우 영상회로는 배전계통측 1선지락 고장 발생시 지락전류가 발전측 운전여부와 관계없이 동상의 전류가 각 상으로 분류하게 되고, 고장상의 전류는 계통측 전류와 분류된 전류가 합쳐져 고장전류 상승에 기여하게 된다.

Transformer bank connection	Positive and negative sequence connections	Zero sequence connection
	N_1 or N_2 Z_T	No Open
	N_1 or N_2 Z_T	No Open
	N_1 or N_2 Z_T	No Open
	N_1 or N_2 Z_T	No Open

〈그림 4〉 Sequence connections for typical two-winding transformer

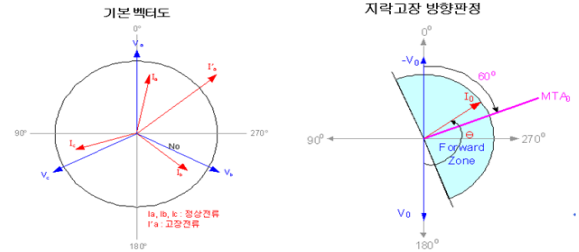
Y_g-Y_g 결선일 경우 변압기 Impedance는 연결된 상태이나 발전기와 연결이 되어있지 않으면, 회로구성이 되지 않아 영향을 고려하지 않아도 된다.

3. 개선방안 검토

3.1 양방향 보호기 활용

기존 단방향만을 고려한 보호기기 운영시 분산형전원에 의한 역조류 발생으로 오동작이 발생할 수 있다, 근본적인 분산형전원 오동작 문제 해결을 위한 가장 좋은 방법은 조류의 방향을 판단하여 선택적으로 동작시킬 수 있는 방향성 보호기기를 운영하는 것이 바람직하다. 그림 4는 기존 고전적인 방향계전기 조류방향 판별방식의 언밸런스 방향판별 문제를 개선한 방식으로 상전압이 아닌 시퀀스 전압 및 전류를 기준으로 방향을 판별하는 기법을 설명하고 있다.

○ 방향판별 벡터도



〈그림 4〉 양방향 보호기기 조류방향 판별 벡터도

3.2 보호협조 검토 Process 정립

분산형전원 연계선로에 대한 보호협조 검토를 위해서는 배전단 위 배전선로 구성현황을 파악 후 임피던스 맵, 분산형전원 관련 제원 및 연계점을 파악하여야 한다.

3.2.1 단락용량 상회여부 검토

분산형전원에 의해 증가된 고장전류가 보호기기의 단락용량을 초과하게 되는지를 먼저 검토한다. 이때 주변압기에 연계되어있는 모든 전원이 정격출력을 낸 상태를 가정 한 후 대상 보호기기 직하에 최대고장 발생을 가정 한 후 차단용량을 상회 할 경우 단락시에 한류기를, 지락초과시에는 NGR을 부설해야 한다.

3.2.2 오동작여부 검토

병행선로 또는 보호기기의 전원측에 발생한 지락고장으로 분산형 전원 연계용 변압기의 접지를 통해 건전선로 또는 부하측으로 역방향 고장전류가 유입되어 보호기기가 오동작 하는지를 검토한다. 이때 고장은 병행선로 또는 대상 보호기기의 전원측 직하에 1선 최대 고장전류를 상정한다. 앞서 변압기 결선방식별 고장특성분석에서 논하였듯이 $Y_g-\Delta$ 일 경우는 변압기만 투입되어있는 경우에서도 고장전류에 기여하고, Y_g-Y_g 결선에서는 발전기까지 연결되어 있으면 고장전류에 영향을 미친다.

3.2.3 부동작여부 검토

분산형전원측 임피던스와 한전계통측 임피던스의 병렬화로 인하여 고장전류가 분류, 감소되어 보호기기가 부동작할 개연성이 있는 지 검토하여야 한다

4. 결 론

본 연구에서는 다수의 분산전원이 연계된 배전계통에서 배전계통 고장시 분산전원에 의한 효과를 고려하여 보호기기를 정정할 수 있음에 따라 보호기기의 오·부동작을 줄여 다수의 분산전원 연계 배전계통에서도 안정적인 전력공급 신뢰도 확보 및 정부의 신재생에너지 보급 정책에 기여하고, 분산전원 사업자 및 일반 고객의 고객만족도를 높이는 유·무형 효과가 기대된다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, ANSI/IEEE Standard 115-1995
- [2] J. Morren, and S. W. H. de Hann, "Short circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator," IEEE Transactions of Energy Conversion, vol. 22, March 2007, pp. 174-180.
- [3] J. Lewis Blackburn Thomas J .Domin Protective Relaying "Principles and Applications"
- [4] Charles J Mozina "Interconnect Protection of Dispersed Generators"