

분산형전원과 계통연계 기술

안종보 | 한국전기연구원 신재생에너지 그룹장

김응상 | 한국전기연구원 신재생에너지그룹 책임연구원

1. 서론

분산형전원(Dispersed Storage and Generation : DSG)이란 신재생에너지를 이용한 소규모 발전 시스템으로서 풍력, 태양광, 연료전지, 소수력, 가스 엔진, 가스터빈 등이 실용화되고 있으며 에너지원의 효율적인 운용이나 전력품질 및 신뢰도의 유지 측면에서 배전계통과 연계하여 운전되는 경우가 대부분이다. 분산형전원은 풍력, 가스엔진, 가스터빈, 소수력발전과 같이 유도발전기와 동기발전기를 사용하는 회전형 분산발전과 태양광, 연료전지 등과 같이 전기적인 출력이 직류이거나 가변속 풍력발전과 같이 출력 전압과 주파수가 가변되어 직접 전원으로 사용할 수 없는 경우에 직류-교류 변환장치인 인버터를 이용하는 정지형 분산발전으로 대별될 수 있고, 용량에서도 수 kW급에서 수 MW급이 이르는 범위가 설치, 운용되고 있으며 다수의 제작사들이 다양한 기능 및 성능의 분산형전원 장치들을 제작, 공급하고 있는 실정이다.

배전계통에 연계되는 분산형전원들은 배전계통의



모든 전기설비와 직·간접적으로 접속되어 일부의 사고나 고장이 전체에 파급될 가능성이 있으므로 분산형전원을 배전계통에 연계운전하기 위해서는 발전설비나 계통의 이상시 혹은 정상운전시에 그 영향을 최소화하기 위한 규제가 요구된다. 계통연계기술의 중요한 기술적인 범주는 전력품질과 보호시스템이다. 본고에서는 분산형전원의 도입 증가와 더불어 계통연계의 기술적인 문제점과 최근의 국내외적인 계통연계표준의 동향 및 관련 기기의 개발 상황에 대해 정리하고자 한다.

2. 분산형전원 계통연계의 기술적 요구사항

계통연계표준의 공통적인 요구사항들을 전력품질과 보호 시스템 차원에서 정리하면 다음과 같다.



(1) 보호시스템

분산형전원이 도입되는 배전망에 있어서 보호시스템의 기술적인 문제가 발생하는 이유는 기존의 배전망이 배전계통이나 공장, 빌딩 등의 수용가내 배전은 기본적으로 상위의 전력계통에서 하위의 부하로 단일방향으로 전력이 흐르는 것을 전제로 하여 제어·보호가 이루어지는 반면, 수용가측에 설치된 분산형전원이 발전을 하면 수용가측에서 전력계통 방향으로 역방향의 전력조류가 발생될 수 있기 때문이다. 이와 관련된 기술적인 요구사항들은 아래와 같다.

○ Isolating Switch 혹은 Separation Device

전력사업자의 관심 중의 하나는 정전이나 고장복구 중에 분산형전원에 의한 갑작스런 전원인가로 인한 작업자의 안전문제이다. 이를 방지하기 위하여 전력사업자는 분산형전원과 전력계통 사이에 임의로 재투입이 되지 않는 분리차단기의 설치를 요구하게 된다. 이 차단기의 정격은 적용 분야에 따라 다르지만 정격부하전류, 단시간전류정격 및 전압정격을 만족해야 하며 분산형전원이 요구하는 고장차단정격을 만족해야 한다. 뿐만 아니라 이 차단기는 분산형전원 내부의 차단기와 인터록(interlock)될 필요가 있으며 이는 비동기 상태로 전력계통과 접속되는 것을 방지하기 위해서 이다.

○ 보호계전기

배전망에 분산형전원이 도입됨에 따라 전력조류의 패턴과 보호시스템에 변화를 초래하게 된다. 이는 기본적으로 연계되는 분산형전원의 시스템 특성에 의존하지만 시스템의 특성에 무관하게 분산형전원이 수행해야 하는 공통적인 요구사항들이 존재한다. 즉, 계통에 연계운전되는 분산형전원은 배전계

통의 변동에 따라서 출력 전압과 주파수를 조절할 수 있도록 설계되어야 한다. 전력사업자는 운영절차에 따라서 규정된 시스템 파라미터를 지정하고 있고 분산형전원은 이 규정된 전압 및 주파수를 벗어난 상태의 검출과 이러한 조건에서의 분리기능을 가져야 한다. 이 기능은 과/저 전압 및 과/저주파수 보호계전기에 의해 구현된다. 이러한 보호계전기는 전압과 주파수에 대한 설정치를 수정할 수 있어야 하며 전압은 2[V], 주파수는 0.1[Hz]의 정밀도를 유지해야 하며 전문기술자만이 설정 변경이 가능하도록 해야 한다.

보호계전기의 설정치는 분산형전원의 용량에 따라 결정되며 일반적으로 용량이 클수록 허용범위를 크게 하는데 이는 트립과 시스템 주파수 변동의 방지를 위해서 이다. 전압과 주파수 계전기는 고립운전 방지용 계전기로도 사용될 수 있다.

역송전을 허용하지 않는 분산형전원은 역전력계전기(Reverse Power Relay)를 장착해야 한다. 이 계전기는 고립운전 방지장치로도 사용될 수 있다.

○ 단독운전 혹은 고립운전 방지(Anti-islanding)

전력사업자는 분산형전원이 전력계통의 부하 일부와 함께 고립되어 운전되지 않아야 한다는 것을 강조한다. 이는 배전계통과 작업자에 대한 위험 때문이다. 이러한 보호를 고립운전방지 기능이라고 하며 모든 전력사업자가 이 기능을 요구하고 있다.

○ 동기투입

지역전력망(Area Electric Power System, Area EPS)에 대한 동기화 재접속은 대부분의 분산형전원에 대해 요구되는 기능이다. 동기발전기에 대해서는 수동 혹은 자동 동기화 방법이 있으며 유도발전기에 대해서는 속도 일치기능 즉, 동기속도 근

처까지 운전 후에 차단기를 투입하는 것을 요구하고 있다. 인버터를 채용한 분산형전원은 내부 제어의 일부인 PLL(Phase Locked Loop, 위상고정루프)에 의해 계통주파수가 자동적으로 동기화된다. 계통 정전 동안 국지적인 부하에 분산형전원이 전력을 공급하는 경우와 같은 전압제어모드의 고립운전 상태에 있을 때는 동기화는 자동적일 필요가 없다. 대신에 재투입시는 동기발전기의 경우와 동일한 동기화 과정을 거쳐야 한다. 어떤 경우라도 동기화에 따른 외란은 표준에 의해 설정된 제한 범위 이내라야 한다. 예를 들면, IEEE 표준 1547은 “분산형전원은 계통접속점(Point of Common Coupling, PCC)에서 통상 전압의 $\pm 5\%$ 이상의 전압변동을 일으키지 않고 동기화되어야 한다.”고 규정하고 있다.

○ 접지

모든 전력사업자는 분산형전원의 접지가 연계되는 시스템의 접지와 협조되기를 요구한다. 분산형전원의 접지는 시스템의 장비에 매우 중요하며 지락사고 검출의 용이성과 지락사고시 중성점의 이동에 의한 과도적인 과전압의 보호 목적으로 대부분의 시스템은 접지하게 된다. 특히, 분산형전원이 연계된 배전시스템의 일부가 정상적인 접지원으로부터 분리될 경우에도 분산형전원은 적절한 접지를 유지해야 한다.

○ 고장 보호 협조(Fault Protection)

분산형전원은 고장의 보호에 있어서 피더 보호장치들과 보호협조를 해야 한다. 일부 연계표준에서는 분산형전원이 연계되는 시스템 상에서 발생하는 모든 고장을 검출해야 한다고 요구하기도 한다. 그러나 분산형전원이 연계된 피더 상에서 발생한 고장과 시스템 상의 다른 위치에서 발생하는 고장을 구별하

는 것은 어려움이 있다. 또한 단락전류에의 기여가 매우 작은 인버터 분산형전원에 대해서 이러한 선택적 고장검출은 거의 불가능하다. 따라서 분산형전원이 연결된 피더 상의 모든 고장에 대해서 트립을 요구하는 것은 실질적으로 그 피더가 아닌 곳에서 발생하는 더 많은 고장들이나 혹은 다른 비고장적인 외란에 대해 분산형전원이 트립되어야 한다는 것을 요구하는 것이다. 이러한 트립의 민감성은 시스템 특성에 부정적인 결과를 가져올 수 있다.

(2) 전력품질

전력품질을 구성하는 요소들 중에서 전압변동과 고조파, 플리커 및 직류인가 등에 대한 요구사항을 정리하였다.

○ 전압변동

전력사업자는 저압의 공급전압을 규정한 적정범위로 유지할 의무가 있으며 분산형전원이 배전계통에 도입되더라도 공급전압이 이 규정범위 내에서 유지되도록 해야 한다. 현재의 배전계통의 전압관리는 변전소에서 부하까지의 전력조류가 단방향이라는 사실을 전제조건으로 하고 있다. 전력조류가 단방향일 경우 전압은 변전소 인출부로부터 배전선말단까지 단조감소하기 때문에 선로의 전압조정은 주상변압기의 탭변환기(Load Tapchanger, LTC)나 스텝전압조정기(Step Voltage Regulator, SVR)와 같은 선로강하보상(Line Drop Compensation)방식으로 비교적 쉽게 수행될 수 있다. 그러나 배전선로에 분산형전원이 연계되어 배전계통으로 역조류가 발생하면 연계지점의 전압이 높아져 배전선로 상의 전압분포는 단조감소 형태로만은 되지 않는다. 이 같은 상황에서 기존의 전압제어방식으로는 적정 전압조정능력을 상실하게 될 가능성이 높다. LDC 전압조정방식이외에



프로그램전압조정방식 및 LDC-프로그램 전압조정 방식의 경우도 선로에 도입된 분산형전원의 연계위치와 정확한 개별운전상태에 대한 실시간정보 없이 적절한 전압조정을 할 수 없게 된다. 특히, 태양광발전이나 풍력발전 등과 같이 기상조건에 의존하는 분산형전원은 발전량의 변동을 미리 예측할 수 없기 때문에 더욱 전압조정이 어렵게 된다. 이와 같은 문제는 선로에 연계되는 분산형전원의 도입용량을 제한함으로써 어느 정도 해결이 가능하지만 분산형전원의 보급 장애요인이 될 수 있다.

○ 고조파

전력전자기술을 이용한 분산형전원용 인버터는 인접한 장비 등에 영향을 줄 수 있는 전류 왜곡을 발생하게 되며 주된 주파수 영역에 따라 다음과 같이 분류될 수 있다.

- 저주파 전류 왜곡(Subsynchronous Current Distortion) : 연계인버터의 전류기준 변화라든지 PWM 컨버터의 비선형성에 기인하며 저주파 및 극저주파 전류의 유입으로 플리커를 유발한다.
- 고조파 전류 : PWM 컨버터는 상대적으로 정현파에 근사한 전류를 흘리게 되지만 계통전압의 왜곡이나 부적절한 조정 등에 의해 고조파 전류가 발생되며 일부 고립운전검출 알고리즘은 의도적으로 저차의 고조파 전류를 흘리는 경우도 있으며 이러한 알고리즘의 설정에 따라서 종합 고조파왜형율(THD)가 중요하게 된다. 고조파에 대한 표준은 IEEE Std. 519나 IEEE Std. 1547 등을 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 스위칭 주파수 고조파 : 전력변환장치의 스위칭 온-오프에 따라 내재하는 고조파 전류로서 LC 필터에 의해 저감될 수 있지만 캐패시터와 계통

임피던스에 의한 공진이 발생할 수 있으므로 수동 혹은 능동 댐핑으로 이러한 공진을 회피해야 한다.

- 고주파 왜곡 : 150kHz 이상의 고주파수 영역의 전류 신호는 EMI로 분류되며 전도 혹은 방사에 의해 주변 기기에 영향을 미치며 EMI 필터의 사용으로 EMI의 방출과 영향을 줄일 수 있다.

다음은 IEEE Std. 1547-2003, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems"에서 규정한 전류고조파에 대한 연계 표준이다. 여기에는 부하전류에 대한 최대고조파전류왜곡을 규정하고 있으며 여기서 부하전류는 분산전원이 없는 상태에서 일정 시간 동안(15분 혹은 30분)의 최대부하전류나 혹은 분산전원의 정격 전류를 말하며 우수 고조파 전류는 기수 고조파 전류의 25[%]를 넘지 않도록 규정하고 있다. 또 각 고조파의 합을 종합수요왜곡율(total demand distortion, TDD)로 규정하고 있는데 이는 THD가 기본파에 대한 비율인데 비해 전체 부하전류의 실효치에 대한 고조파 전류비율을 규정하고 있다. TDD는 다음과 같이 정의된다.

$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \times 100$$

○ 플리커(Flicker)

플리커는 전력품질의 중요한 요소이며 과도한 플리커는 소비자의 불만 사항이 된다. 분산형전원이 독립운전시에 전동기의 기동 등 부하외란에 따른 인버터의 전류 상승은 전압강하를 초래하고 이것이 플리커의 원인이 된다. 인버터 출력 임피던스의 저감으로 해결가능하며 이는 빠른 제어 특성 및 높은 전류정격을 필요로 한다. 연계운전의 경우도 약한 배

표 1 최대 고조파전류왜형율

고조파차수, h(우수)	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
퍼센트[%]	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

전망에서는 플리커가 발생할 수 있으며 인버터의 제어루프 설계와 관련이 있다. 분산전원이 발생하는 유효전력의 변동은 부하변동과 유사하게 플리커를 유발할 수 있다. 풍력, 태양광, 연료전지, 마이크로터빈 등 에너지원의 출력이 변동이 있고 인버터 등 전력변환장치가 이런 출력 변동을 흡수할 수 있는 에너지버퍼가 없을 때 출력의 변동에 따른 플리커가 발생한다.

○ 직류 인가

분산형전원이 절연변압기 없이 직접 전력계통으로 연결될 때 직류가 유입될 가능성이 있으며 이는 변압기나 다른 자성기기를 포화시키며 기기의 토오크 맥동을 유발할 수 있다. 연계 제어장치의 고장시도 연속적으로 직류가 인가될 수 있으며 이를 차단할 수 있는 보호기능이 구비되어야 하며 계통연계 운전시에도 제어기능으로 직류가 허용치를 넘지 않도록 제어되어야 한다.

3. 국내외 계통연계 표준

(1) 국제 표준

○ IEEE Std 1547 시리즈

IEEE의 SA(Standard association) 산하 SCC21(Standards Coordinating Committee on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed

Generation, and Energy Storage)이 작성한 국제적인 분산형전원의 연계표준으로서 1547 시리즈라고 명명하고 있다. 현재 IEEE Std. 1547은 2003년 7월, IEEE Std. 1547.1은 2005년 7월에 각각 공표된 상태이며 1547.2 ~ 1547.6까지의 표준은 현재 Working Group에서 검토 중이다. 1547 시리즈의 주요 내용은 다음과 같다.

- IEEE Std. 1547-2003 : Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
- IEEE Std. 1547.1-2005 Standard for Conformance Tests Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
- IEEE P1547.2 Draft Application Guide for IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
- IEEE P1547.3 Draft Guide For Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems
- IEEE P1547.4 Draft Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems
- IEEE P1547.5 Draft Technical Guidelines for



Interconnection of Electric Power Sources Greater than 10MVA to the Power Transmission Grid

- IEEE P1547.6 Draft Recommended Practice For Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems Distribution Secondary Networks

IEEE Std. 1547-2003은 크게 계통연계의 기술 사양 및 요구사항과 계통연계시험사양 및 요구사항으로 구성되며 계통연계 기술사양은 일반적 요구사항으로서 전압변동, 접지, 동기화, 지역 EPS의 의도되지 않는 전력공급, 모니터링, 분리장치, 계통연계의 완전성 등을 다루고 있다. 지역 EPS 상의 고장에 대한 응동으로서 리클로즈의 보호협조, 전압 및 주파수 변동, 동기 탈조, 재투입 등을 다루며 전력품질에 대해서는 직류인가, 플리커, 고조파를 규정하고 있으며 의도되지 않은 고립운전에 대한 기준도 포함된다. 계통연계시험사양은 설계와 제작에 관련된 시험과 계통연계 설치 평가 및 운전시험이 포함된다.

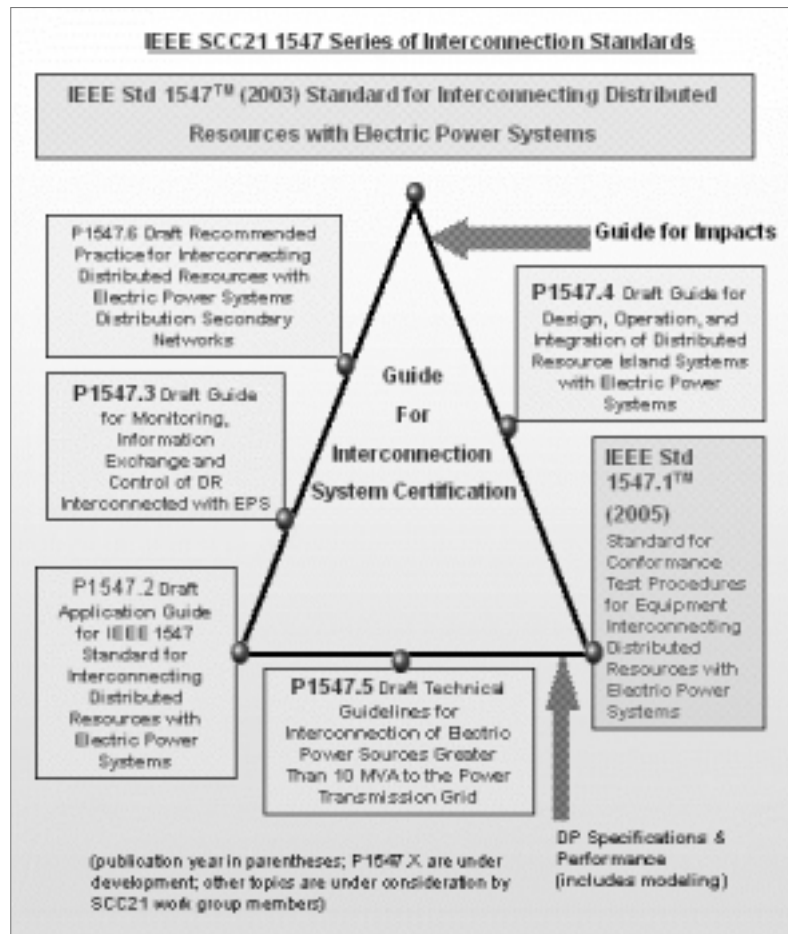
○ UL 1741

2001년 1월에 발효된 UL 1741 표준, “Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent

Power Systems”은 단독운전되거나 계통연계운전되는 분산형전원의 인버터, 컨버터, 충전기 및 제어기 모듈뿐만 아니라 이들을 결합한 교류모듈에 적용된다. 이 표준은 독립적으로 사용되는 인버터, 컨버터 및 제어기의 구조, 안전성, 출력특성, 전력망과의 호환성, 기기의 정격, 표시방법, 제작 및 양산 시험방법을 규정하고 있으며 이 중에서 인버터의 출력특성 및 전력망과의 호환성 부분에서 계통연계에 관련된 기준들을 포함하고 있다.

- 계통연계 인버터의 출력 특성 : 출력정격, 직류

그림 1. IEEE Standard 1547 시리즈의 구성



입력범위, 출력전류의 고조파왜곡, 직류분 인가 등이 포함되어 있으며 특히 전류고조파에 있어서는 우수, 기수 고조파의 실효치 전류왜곡 범위를 규정하고 있다.

- 전력망과의 호환성 : 배전망 전압 및 주파수의 변동과 고립운전방지 기능에 의한 인버터 출력의 자동차단 기능 및 자동 혹은 수동 복구 기능이 포함되어 있다.

(2) 국내 표준

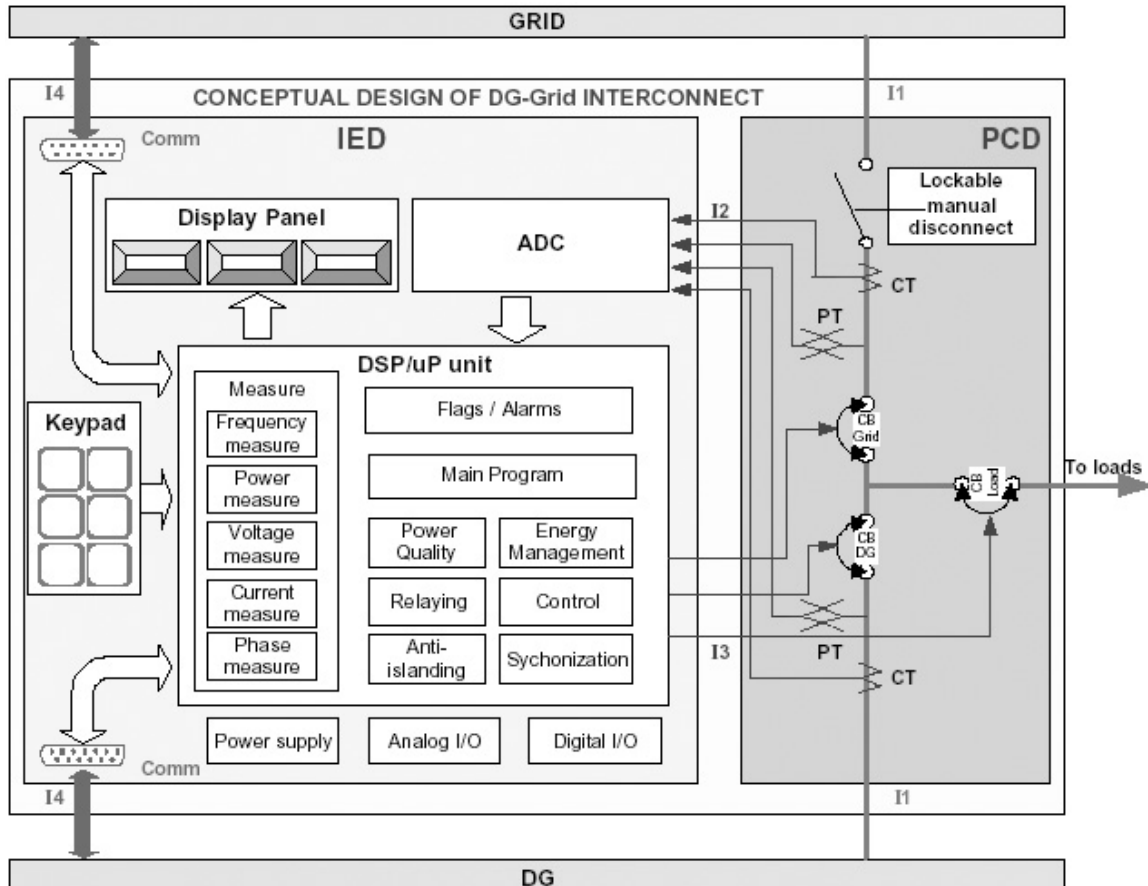
국내에서는 분산형전원의 계통연계에 관련된 기

술기준은 연구차원에서 진행된 바는 있으나(대체에너지 발전시스템 계통연계 기술지침, 한국전기연구원, 2004) 국가적인 표준으로서 적용되고 있는 규정은 없고 전력회사인 한국전력공사의 배전용 전기설비 이용규정 중 “분산형 전원 배전계통 연계 기술기준”과 송·배전계통에 적용하고 있는 “발전기 병렬 운전 연계선로 보호업무 기준서”가 있다.

○ 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준

이 기준의 특징은 연계를 저압과 특고압(22.9kV) 배선선로로 구분하고 저압의 경우 원칙적으로 전력

그림 2. 개념적인 계통연계 기기 구성도





용량이 100kW 이하로 제한하고 있으며 특히 20kW 이상은 전용선로에 연계할 것을 규정하고 있다. 이때 전력용량은 수전전력의 용량, 또는 계통연계에 관련된 분산형전원 발전설비의 출력용량 중 큰 쪽을 의미한다. 특고압 연계는 원칙적으로 10,000kW 이하로 분산형전원 발전설비용량을 제한하고 있으며 특히 3,000kW 이상은 전용선로에 연계해야 한다고 규정하고 있다.

연계기술기준은 공통사항과 저압 배전선로 연계, 특고압 배전선로 연계로 구분하여 기술하고 있으며 전술한 전력품질 및 보호에 관련된 세부 기술기준을 기술하고 있다.

○ 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 기준서

동기발전기를 배전계통과 병렬운전할 때 운전 일반적 사항과 보호에 관련된 것을 규정하고 있다. 운전 일반적 사항은 동기검출기능, 전압 및 주파수 변동 최소화, 역송에 관한 것을 기술하고 보호에 관해서는 보호계전기의 설치 및 정정에 관한 사항들을 규정하고 있다.

4. 분산형전원 계통연계 기기 개발 현황

분산형전원은 단독운전(Standalone), 비상용(Standby), 역송전 비허용 연계운전 및 역송전 허용 연계운전방식으로 운전될 수 있으며 연계운전시에는 운전과 보호를 위한 연계기기가 필요하게 되며 이는 다음과 같이 구분될 수 있다.

○ PCD(Power-Carrying Device)

PCD는 배전반, 차단기, ATS(Automatic Transfer Switch) 및 절연이나 접지용 변압기 등이

포함되며 주 목적은 전류의 통전과 차단이며 일부 기기들은 보호기능을 보유할 수도 있다. ,

○ IED(Intelligent Electronic Device)

분산형전원의 발전제어와 보호를 위한 마이크로 프로세서 기반의 프로그램 가능한 제어 및 보호기기가 IED이다. 보호기능으로서는 동기검출, 과/저전압, 과/저주파수, 지락/단락방향, 무효전력, 역전력, 과전류, 차동전류 및 단독운전방지 기능 등이며 일반적으로 통신기능을 보유하고 있고 설정치의 변경이 가능하도록 설계, 제작된다.

○ 인버터(Inverter)

인버터는 직류를 교류로 변환하는 전력변환기기로서 내부에 제어 및 대부분의 보호기능을 내장할 수 있다. 일반적으로 전력사업자는 인버터에 내장된 보호기능에 대한 신뢰가 낮는데 이는 배전시스템급 보호기기가 아니며 또한 보호기능이 전력변환기기와 독립적이지 아니기 때문이다.

현재 상용화된 분산형전원인 풍력발전, 태양광발전 및 마이크로터빈 등은 계통연계에 관련된 보호

그림 3 Universal Interconnect Device (GE)



그림 4 Intertie Protection System(Basler)



기능을 내장하고 있으나 전술한 것처럼 중대용량의 경우 전력사업자의 신뢰를 얻기 어려워 별도의 보호계전기를 설치하는 경향이 있다. 해외의 경우 분산

형전원의 계통연계를 위한 전용 디지털식 보호계전기가 상용화되고 있으며 대표적인 예가 미국 GE (General Electric)사의 Universal Interconnect와 Basler사의 디지털 릴레이인 Intertie Protection System이며 그 외관이 아래의 그림 3, 4에 나타나 있다.

이상에서 분산형전원의 배전계통 연계에 관련된 기술적인 문제와 국내의 표준에 대해 정리하였으며 구체적인 연계 기기의 기능과 사례를 살펴보았다.

〈참고문헌〉

- [1] 분산형전원 계통연계 기술, 전기저널, 2001. 12
- [2] 분산형전원의 배전계통 도입전망과 대책, 대한전기학회지 제45권 제10호 pp 23-31, 1996. 10
- [3] Reliable, Low Cost Distributed Generator/Utility System Interconnect, 2001 Annual Report, GE Corporate Research and Development, Niskayuna, New York, 2003. Aug.
- [4] DG Power Quality, Protection and Reliability Case Studies Report, GE Research & Development Center, September 28, 2001
- [5] Testing of GE Universal Interconnection Device, Z. Ye, D. Finney, R. Zhou, M. Dame, and B. Premerlani(General Electric), B. Kroposki and S. Englebretson(National Renewable Energy Laboratory), August 2003
- [6] Aspects of Different Distributed Generation Technologies- CODGUNET WP 3, 2003-03-14
- [7] Distributed Generation Interconnections: Protection, Monitoring, and Control Opportunities, Donald L. Hornak(Basler Electric Company), N. H. "Joe" Chau(Florida Power and Light Company)
- [8] Distributed Energy Resources Interconnection Systems: Technology Review and Research Needs, N.R. Friedman(Resource Dynamics Corporation), September 2002
- [9] 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준, 한국전력공사
- [10] 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 기준서, 한국전력공사