



# IEEE-1547에 준한 발전용 연료전지 시스템의 계통연계운전 규정

■ 김 종 수, 이 병 국 / 성균관대학교 정보통신공학부

## 서 론

산업혁명 이후 근현대사에서 안정된 전력의 공급은 산업발달과 경제성장의 기반이 되어왔다. 현대사회에서는 경제성장과 기술발전에 더불어 인구증가와 삶의 질 향상이 지속되고 있고 이에 따라 전력 사용량 증가는 필연적이라 할 수 있다. 또한 고도의 정보화 사회로 변화됨에 따라 소비자는 보다 안정적이고 우수한 품질의 전력을 요구하고 있다. 그러나 반대급부로 막대한 전력 사용으로 인하여 대용량 발전설비가 증가하고 있고, 발전을 위한 에너지원으로 사용되는 화석연료의 사용량도 증가하고 있다. 여기에는 크게 두 가지 문제점이 따른다. 첫째는 화석연료 사용량 증가에 따른 온실가스 배출과 이에 기인한 지구 온난화 등 환경문제가 되고, 둘째로 화석연료 매장량 제한으로 인한 에너지 부족 문제이다. 이들 문제를 해결하기 위한 대안으로 불과 십 수년 전까지 대용량 원자력 발전소가 고려되었으나 현재는 방사능 유출 및 폐기물 처리 등의 안전성 문제로 인하여 차세대 주 에너지원으로 입지가 약해지고 있고 그 자리는 무한 에너지원이며 친환경 발전이 가능한 연료전지, 태양광, 풍력 등 다양한 신재생 에너지원이 각광을 받고 있다. 신재생 에너지원으로부터 발전된 전력은 대부분 분산전원의 형태를 띄게 되며 상용계통에 연계되어 전력원으로 이용되고 있고, 그 중 수소를 주 에너지원으로 발전하는 연료전지 시

스템은 정부가 주도하는 수소경제사회와 부합되어 더욱 주목받고 있다.

연료전지는 신에너지원인 수소와 산소를 이용하여 발전하는 발전장치이며 주변 환경에 관계없이 연료가 공급되는 한 계속해서 발전이 가능한 상시발전장치이다. 때문에 타 분산전원에 비해 계통전력의 품질에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 발전원리상 직류 전압을 출력하므로 상용계통에 연계되기 위해서는 전력변환장치 (Power Conditioning System, PCS)가 필수적으로 요구된다. 그리고 PCS는 전력전자 기술로 전력제어를 수행하기 때문에 필연적으로 전력품질 문제를 야기시키고 이로 인해 계통에는 원치 않는 전력품질 저하가 발생된다. 때문에 계통운영자는 발전사업자에게 계통에 연계되는 분산전원에 대하여 적절한 규정을 제시하고 이를 지키게 하여 계통 전력의 적절한 품질을 유지시키고 발전사업자는 분산전원 설비가 규격에 준하는 동작을 할 수 있도록 적절히 설비를 제어하여야 한다. 이렇듯 분산전원이 계통에 연계될 경우 계통운영자와 발전사업자 상호간에 지켜야 할 적절한 규정이 존재한다.

본고에서는 타 분산전원에 비해 전력품질 면에서 장점을 갖는 연료전지 발전 시스템에 대하여 고찰해 보고, IEEE-1547 계통연계 규정을 중심으로 분산전원이 계통에 미치는 영향과 계통 운영 측면에서 분산전원의 영향에 대한 규정을 검토하며 규정에 나타난 전력품질 평가기준을 고찰해 본다.

## 본 론

### 1. 분산전원으로써의 연료전지 발전시스템

#### 1-1. 분산전원의 개요

분산전원 (Distributed Generation, DG)은 기존의 집중화된 발전시스템 (Integrated Generation System)과 달리 수용가에 인접해 있고 설비와 계통의 접속점 (Point of Common Coupling, PCC)을 통해 전력계통에 연결되어 있는 전원설비를 지칭한다. 보다 넓은 의미로는 분산전력 공급원 (Distributed Resources, DR)이라 하며 대용량 송전계통 (Bulky Power Transmission System)에 직접 연결되어 있지 않은 전력공급원을 의미하고 발전설비와 에너지 저장설비를 모두 포함한다. 이를 일컫는 용어로는 Embedded Generation, Dispersed Generation, Distributed Generation 및 Micro-Grid 등이 있다. 분산전원의 장점은, CIRED (The International Conference on Electricity Distribution Networks) survey 와 CIGRE (The International Conference on Large High Voltage Electric Systems) report에도 나타나 있는 것처럼, 신재생 에너지를 사용함에 따라 이산화탄소 방출이 감소되고 에너지의 합리적인 사용이 가능하며 에너지원을 다양화 할 수 있게 된다. 또한 발전설비 설치의 장소선정이 용이하고 단기 건설시간 및 저렴한 자본비용으로 건설이 가능하며 부하 근접장소에 발전원이 위치하므로 송전비용이 감소되는 장점을 가진다.

분산전원은 발전원의 발전 특성에 따라 그림 1과 같이 분류된다. 일반적으로 상시발전은 신에너지원을

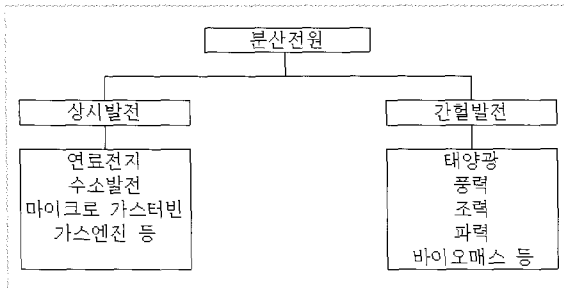


그림 1 발전 특성에 따른 분산전원 분류

사용하는 분산전원으로 전력 발생을 제어할 수 있으며 대표적으로 연료전지 발전기가 있고, 간헐발전은 재생 에너지를 사용하는 분산전원으로 일반적으로 전력의 발생이 제어 불가능한 발전원이 대부분이며 태양광, 풍력 발전이 대표적인 예이다. 그리고 발전기의 형태에 따라 회전기, 정지기 및 복합형으로 분류되며, 전압에 따라 자여자형과 타여자형으로 분류할 수 있다.

#### 1-2. 발전용 연료전지 시스템

연료전지는 사용된 전해질의 종류에 따라 알카리형 (Alkaline Fuel Cell, AFC), 인산형 (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), 직접 메탄올형 (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC), 고분자 전해질형 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC), 용융탄산염형 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), 고체산화물형 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 연료전지 등으로 구분된다. 동작온도에 따라서는 상온 동작하는 저온형과 600℃ 이상에서 동작하는 고온형으로 구분할 수 있으며 대표적 저온형 연료전지로는 PEMFC, 고온형 연료전지는 MCFC와 SOFC가 있다. 그리고 사용용도에 따라 가정 발전용 (Residential Power Generation, RPG)과 상업 발전용 (Industrial Power Generation, IPG)으로 구분할 수 있다. 이 중 고온형 연료전지인 MCFC와 SOFC가 분산발전용으로 주로 사용된다.

발전용 연료전지는 간헐발전원과 달리 연료를 주입하면 지속적인 발전이 가능하므로 계통에 안정적인 전원공급이 가능하고 화학에너지에서 직접 전기에너지를 얻는 에너지 변환과정을 갖기 때문에 효율이 높다. 또한 전기를 생산하는 과정에서 부산물로 고온의 물을 얻게 되는데, 이를 이용하여 현재 배전계통의 가장 중요한 형태의 분산전원인 열병합 발전 (Combined Heat and Power, CHP)이 가능하기 때문에 재정절감 및 환경적 악영향을 감소시키는 매우 큰 잠재력을 가진 발전장치이다. 이를 종합하면 연료전지는 재생 가능한 에너지원이 가진 문제점과 화석 에너지원의 문제점을 해결할 수 있는 가장 효과적 신에너지 원이라 할 수 있다.

이러한 연료전지는 전기에너지 발생 원리인 전기화학적 특성 때문에 그림 2와 같이 직류 전압 및 전류를 출력하고 부하조건에 따라 상당한 비선형성 및 동특성을 나타낸다.

이러한 연료전지 전원을 배전계통에 연계운전하기 위해서는 직류전원을 배전계통의 전압, 주파수 및 양질의 전력품질을 갖는 교류전원으로 변환하는 과정이 필요하며 이는 PCS를 통해 이루어진다. PCS는 전력용 반도체 스위치의 동작을 통해 전력을 변환하기 때문에 필연적으로 전력품질 문제를 야기하게 되고, 이렇게

야기된 전력품질 문제는 전력계통과 인근 부하에 악영향을 미치기 때문에 적절한 규제가 요구된다.

## 2. 전력품질의 개요

전력품질은 전력계통의 내외부적 요인에 의해 다양한 영향을 받는다. 먼저 낙뢰 또는 대형 부하의 기동으로 인한 순시전압강하 (Voltage Sag), 갑작스런 부하차단 또는 다른 상의 사고로 인한 순시전압상승 (Swell), 유지보수, 전력선 사고 및 차단기 동작으로 인한 순간, 일시 또는 지속정전 (Momentary, Temporary or Sustained Interruption)과 같은 외적인 요인이 있고, 분산전원용 전력전자 기기 사용으로 인한 고조파 (Harmonics) 및 전압 변화, 태양광 또는 풍력과 같은 간헐 발전원에 의한 전력 변동으로 인한 전압변화, 발전원의 계통 투입 또는 이탈 시 계통 전압 변동 등의 내적인 요인이 있다. 또한 아크, 부하급변 또는 무효전력 변동으로 인한 전압변동 (Flicker) 및 역율, 직류전류 주입 등이 있다. 이러한 전력품질은 전압크기와 이벤트 시간에 의해 구분되며 그림 3은 전력품질의 다양한 형태를 나타낸다.

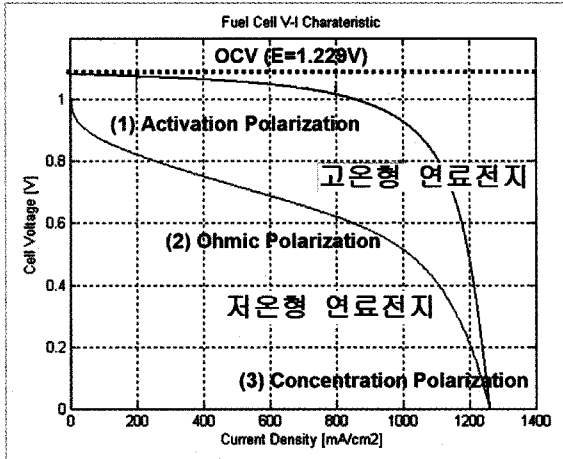


그림 2 연료전지의 전압-전류 특성곡선

## 3. 분산전원의 계통연계 규정 및 전력품질 평가기준

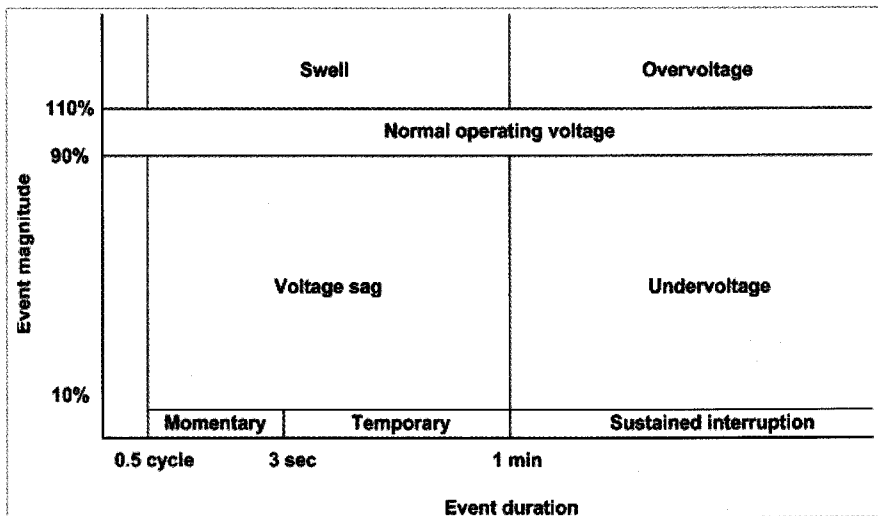


그림 3 이벤트 전압 크기 및 지속시간에 따른 전력품질 평가지표

분산전원을 배전계통에 연계운전하기 위해서는 정상운전 시 뿐만 아니라 발전설비나 계통의 이상 시에도 그 영향을 최소화하기 위한 규제가 요구되며, 이는 전력품질과 보호시스템에 관한 규정으로 구체화 되었다. 본 절에서는 분산형전원의 연계표준으로 IEEE의 SA (Standard Association) 산하 SCC21 (Standards Coordinating Committee

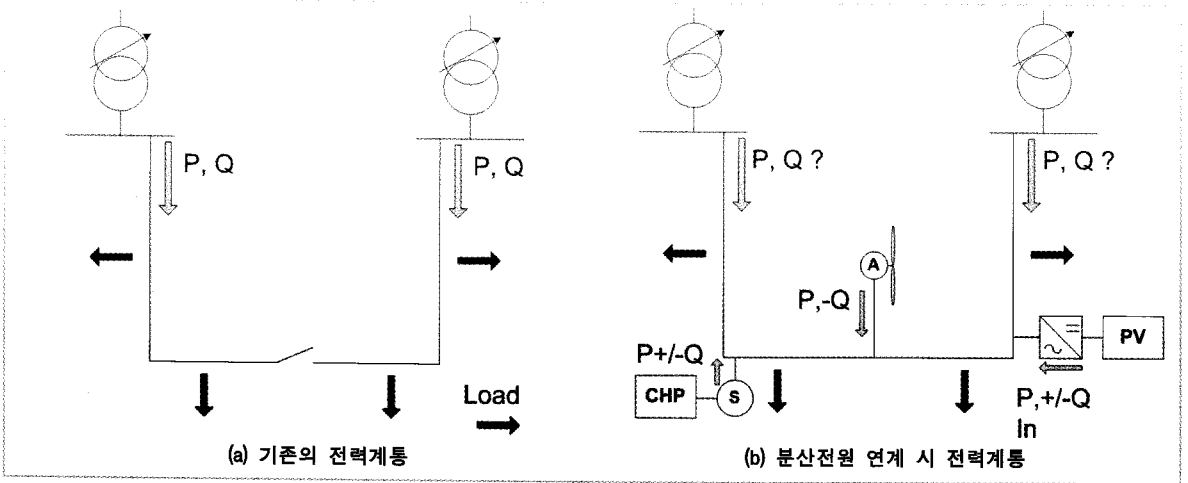


그림 4 분산전원 연계 유무에 따른 계통도

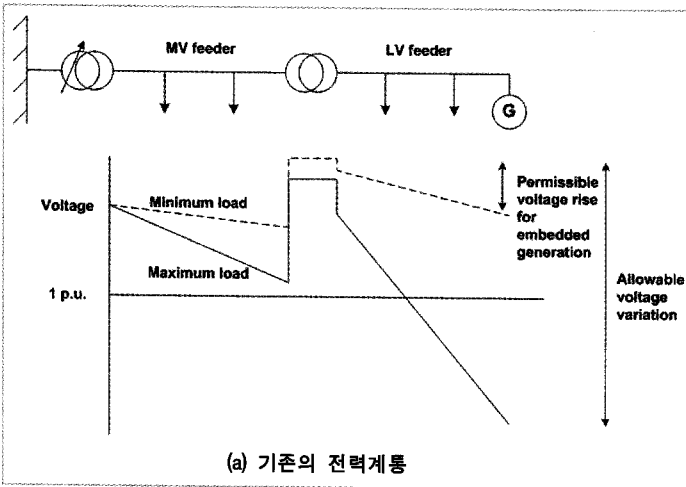


그림 5 분산전원 연계 유무에 따른 전압변동

on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage)이 제공한 IEEE Std. 1547-2003 시리즈를 중심으로 분산전원의 계통연계 규정 및 전력품질 평가 기준을 살펴보고자 한다.

IEEE Std. 1547-2003은 계통연계 기술사항 및 요구사항과 계통연계 시험사항 및 요구사항으로 구성되어 있다. 계통연계 기술사항 및 요구사항은 전압변동, 접지, 동기화 등으로 구성된 일반적 요구사항과, 지역 전력계통 (Area Electric Power System, Area EPS)의 계통이상

시 대응, 전력품질 그리고 고립운전에 대하여 기술하고 있다. 계통연계 시험사항 및 요구조건에서는 설계시험, 제품시험, 계통연계 설비 설치의 평가 등으로 구성되어 있다.

### 3-2. 일반적 요구사항

#### 3-2-1. 전압변동

분산전원이 전력계통에 투입, 이탈되는 경우와 운전 시 기존 발전원이 공급하던 유효전력 중 일부를 분산전원이 공급하는 등의 이유로 인하여 전력계통 및 부하단에는 전압변동이 나타나게 된다. 그림 4, 5와 같이 기존 계통의 단방향 조류의 경우 전압 강하는 단조감소하고 예측 가능하지만 분산전원이 연계운전 시 역조류가 발생되고 전압 강하 또한 단조감소의 형태를 띠지 않으므로 이에 대한 적절한 규제가 필요하다.

분산전원은 PCC에서의 전압을 능동적으로 조정해서는 안되며, ANSI C84.1-1995, Range A.에 규정된 전압변동 범위를 유지해야 한다. 규정된 전압변동 범위는 공급자 전압 (Service Voltage)은 공급정격전압의  $\pm 5\%$  이고, 사용자 전압 (Utilization Voltage)은  $+6/-13\%$  이다.

### 3-2-2. 접지

분산전원의 접지는 발전시스템의 장비에 매우 중요하며 지락사고 검출의 용이성과 지락사고 시 중성점의 이동에 의한 과도적인 과전압의 보호 목적으로 대부분의 시스템은 접지하게 되며, 계통운영자는 분산전원설비를 접지할 경우 기존계통과 협조되기를 요구한다. 특히 분산전원의 연계로 인하여 지역 EPS에 지락사고 전류 등의 기여도가 100%로 넘으면 안되고 계통에 접속된 타 설비의 접지 과전압을 일으켜서는 안된다.

### 3-2-3. 동기화

분산전원이 계통에 투입되면 선로의 임피던스로 인하여 분산설비의 PCC 또는 부하단에서의 전압과 전류 위상이 변하게 된다. 이러한 변화는 부하단에서 볼 때 전력품질의 이상으로 나타나기 때문에 이에 대한 적절한 조치가 필요하다. 연계되는 분산발전의 형태에 따라 동기화 하는 방법을 정리하면 다음과 같다.

- 동기발전기 : 수동 또는 자동 동기화방법
- 유도발전기 : 속도 일치기능 (동기속도 근처까지 운전 후 투입)
- 인버터 : 위상고정루프 (Phase Locked Loop, PLL)

연료전지의 경우 인버터를 채용하여 계통에 연계되므로 안정적인 PLL 설계 및 구현이 필수적이다. 규격에서는 분산전원이 계통에 병렬 연계 시 PCC에서의 전압변동이 계통 공급전압의  $\pm 5\%$ 를 넘지 않도록 동기화될 것을 규정하고 있다. 표 1은 분산전원의 계통연계 시 요구되는 동기화 규정이다.

표 1 동기화 규정

총발전용량 (kVA)	주파수 차 ( $\Delta f$ , Hz)	전압 차 ( $\Delta V$ , %)	위상각 차 ( $\Delta \theta$ , °)
0-500	0.3	10	20
> 500-1,500	0.2	5	15
> 1,500-10,000	0.1	3	10

### 3-2-4. 지역 EPS의 의도되지 않은 전력공급

계통이 가압되어 있지 않을 경우 분산전원은 계통에

전력을 공급하면 안된다. 분산전원이 지역 EPS에 전력을 재투입하기 위한 조건은 ANSI C84.1-1995, Table 1의 Ragen B에 규정된 것처럼, 정격전압이 120Vac일 경우는 106~132V (-12%/10%)이고 주파수는 59.3~60.5Hz (-1.2%/0.8%)이다.

### 3-2-5. 모니터링

분산전원이 일정용량 이상일 경우 운영자는 발전설비의 상태를 측정하고 감시할 수 있어야 한다. 발전용량이 250kVA 이상일 경우 연결상태, 유효전력 및 무효전력 그리고 분산전원 연결지점의 전압을 모니터링할 수 있는 설비를 반드시 갖추어야 한다.

### 3-2-6. 분리장치

계통 운영상 필요할 경우 접근이 용이하고 잠금장치가 가능하며, 육안 식별이 가능한 분리장치를 지역 EPS와 분산전원설비 사이에 설치해야 한다.

### 3-2-7. 계통연계의 건전성 확보

계통에 연계된 분산전원 설비는 주변 설비로 인해 유입되는 전자파 간섭 (EMI) 및 서지에 대하여 충분한 내구성을 가져야 하고 또한 계통 자체의 품질 문제가 발생되더라도 분산전원의 안정적 동작은 확보되어야 한다. 때문에 규격은 다음과 같은 대책을 가져야 한다.

- 전자파 간섭으로부터의 보호 : IEEE Std C37.90.2-1995에 준한 EMI 대응 능력으로 EMI에 의한 영향으로 계통연계 시스템의 동작이 변화되거나 오동작을 일으키면 안됨.
- 서지 대응 능력 : IEEE Std C62.41.2-2002 또는 IEEE Std C37.90.1-2002에 따른 조건하에서 전압과 전류 서지에 대한 내력을 가져야 함.
- 내전압 능력 : 계통 정격 전압의 220%에 해당하는 내전압 대응 능력

### 3-3. 지역 EPS의 이상에 대한 대응

낙뢰, 지락과 같은 사고 또는 유지, 보수와 같은 인위

적 이유로 계통에는 비정상적 상황이 발생할 수 있다. 이때 계통에 연계된 분산전원은 계통 유지보수자나 그 외 인력의 안전을 보장할 수 있도록 그리고 계통에 연계된 다른 장비가 손상되지 않도록 적절한 협조가 필요하다.

3-3-1. 전압

계통에 연계된 설비는 각 상의 실효전압이나 기본파 주파수를 검출한다. 검출된 전압을 근거로 계통전압의 이상이 나타나면 표 2와 같이 규정된 전압에 대해 규정된 시간 내에 계통에서 분리되어야 한다.

표 2 이상전압에 대한 계통연계 시스템의 대응

전압범위 (기준전압의 비, %)	고장제거시간 (s)
$V < 50$	0.16
$50 \leq V < 88$	2.00
$110 < V < 120$	1.00
$V \geq 120$	0.16

고장제거시간은 고장발생 시부터 분산전원이 계통에 전력공급을 중단할 때까지 시간을 나타낸다. 분산전원의 용량이 30kW 이하의 경우는 최대고장제거시간이고, 30kW 이상의 경우는 기본고장제거시간이다.

3-3-2. 주파수

전압의 경우와 같이, 계통의 주파수가 규정된 범위를 벗어나면 분산전원 설비는 계통에서 분리되어야 한다. 표 3은 이상주파수에 대한 계통연계 시스템의 대응을 나타낸다.

표 3 이상주파수에 대한 계통연계 시스템의 대응

발전용량	주파수 범위 (Hz)	고장제거시간 (s)
$\leq 30\text{kW}$	$> 60.5$	0.16
	$< 59.3$	0.16
$> 30\text{kW}$	$> 60.5$	0.16
	$< \{59.8 - 57.0\}$ (조정가능)	0.16 - 300 (조정가능)
	$< 57.0$	0.16

고장제거시간은 전압이상의 경우와 동일하게 고장 발생 시부터 계통에 전력공급을 중단할 때까지의 시간이며, 조정가능한 저주파 트립 설정은 지역 EPS 운영자와 협의할 수 있다.

3-3-3. 동기탈조

강성비 (Stiffness ratio)가 20 이하인 동기기를 분산전원 발전기로 사용할 경우에는 동기 이탈이 발생하였을 시 즉각 계통으로부터 분리하여야 한다.

3-4. 전력품질

전력품질의 규정은 분산전원의 형태에 따라 계통이 받게 되는 영향에 대하여 적절한 규제를 정의한 것으로 직류전류 주입제한, 플리커 제한, 고조파, 그리고 고립 운전 등에 대해 정의한다. 전술한 바와 같이 연료전지 발전기의 경우 상시 발전이 가능한 발전원이므로 전력품질에 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있으나 발전설비의 비정상적 제어 등으로 인해 전력계통에 영향을 줄 수 있으므로 적절히 제어되어야 한다.

3-4-1. 직류전류 주입제한

분산전원에 의해 발생된 직류전류가 계통에 유입되면 계통 설비 중 변압기 또는 기타 자성기기를 포화시키는 문제가 발생된다. 따라서 이에 대한 적절한 대책과 규정이 필요하다. 규격에서는 분산전원 연계점에서 정격출력전류의 0.5% 이상의 직류전류를 주입할 수 없도록 규정하고 있다.

3-4-2. 플리커 제한

부하의 급변 또는 분산전원이 공급하는 유효전력의 급변 등으로 인한 인버터의 전류 상승은 결국 전압강하를 초래하게 되고 플리커의 원인이 된다. 플리커는 수용가에서 느끼는 전력품질에 직접적인 악영향이므로 적절히 규제되어야 한다.

규격에서는 분산전원으로 인해 지역 EPS상의 다른 수용가에서 인지할 만한 플리커를 발생시키면 안된다고 규정한다. 참고로 한전에서 규정한 “분산형 전원 배전계통 연계 기술기준”에서는 발생하는 플리커를 다음과 같이 정량화 해서 규제한다.

- 단시간(10분)  $E_{psti} \leq 0.35$
- 장시간(2시간)  $E_{plti} \leq 0.25$

표 4 전류의 최대 고조파 전류 왜곡률

고조파차수	h<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	TDD
백분율 (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

3-4-3. 고조파

분산전원은 발생하는 전력을 계통에서 요구하는 전력으로 변환하기 위하여 전력변환기를 필수적으로 채용한다. 전력변환의 중요한 기술인 전력전자기술이 적용됨에 따라 파형에는 필연적으로 왜곡이 발생된다. 이 영향으로 파형에는 다양한 주파수 영역의 고조파가 발생되게 되며 이에 대한 적절한 규제가 필요하다.

규격에서는 분산전원이 평형 선형부하를 공급할 때 PCC에서 지역 EPS로의 고조파 전류 주입이 표 4를 초과하지 못하도록 규정하고 있다.

여기서, 전류는 분산전원이 없을 경우의 Local EPS의 최대 부하전류 (15분 또는 30분)와 분산전원의 정력 전류용량 중 큰 값 (분산전원과 PCC 사이에 변압기가 있는 경우 PCCfn 환산된 값)을 기준으로 하며, 짝수 고조파는 각 구간 고조파 허용치의 25% 이하로 제한한다. 참고로 한전의 규정은 10분을 평균한 40차까지의 종합 평균 왜형률 (Total Demand Distortion, TDD)이 5%를 초과하지 않도록 차수별 제어하는 것으로 규정한다. TDD는 전체 부하전류의 실효치에 대한 고조파 전류비율로 규정되며 다음과 같다.

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

3-5 고립운전

전력계통에서 다양한 원인에 의한 사고로 계통 차단기가 개방될 경우 분산전원설비는 고립운전 (Islanding) 상태가 된다. 고립상태인 분산전원이 계속하여 계통에 전력을 공급하게 될 경우 계통의 전력품질을 확보할 수 없으며 계통 작업자는 위험에 노출된다. 때문에 규격에서는 고립운전 상황이 발생되면 분산전원이 단시간 내에 계통에서 분리될 것을 요구한다. IEEE 1547에서는 분산전원과 지역 EPS의 일부가

PCC에 에너지를 공급하는 상황에서 의도적이지 않은 고립운전상황이 발생될 경우 분산전원은 2초 내로 지역 EPS에

에너지 공급을 중단할 것을 요구한다. 참고로 한전 규정은 분산전원 설비가 고립운전상태 시 최대 0.5초 이내에 계통으로부터 설비를 분리할 것을 요구하고, 0.5초 이내에도 계통의 정상운용, 설비운전, 안전 등에 영향을 주어서는 안된다고 규정한다.

맺음말

에너지 수급 및 환경문제와 이에 대한 정부의 정책 그리고 다양한 신재생에너지원의 기술개발이 부합되어 분산전원의 보급은 급격히 증가할 것으로 예측된다. 또한 기술발전 및 삶의 질 향상으로 인하여 전력품질에 민감한 전기전자 기기를 사용하는 수용자는 급격히 증가하고 있다. 따라서 전력의 고품질화는 필수적으로 요구되며 이를 위해 계통운영자와 발전사업자 사이에 명확한 규정이 필요하다. 본고에서는 분산전원이 계통에 연계될 때 반드시 지켜야 할 연계규정에 대하여 살펴보았다. 규정의 명확한 이해와 준수를 통해 전력품질을 높이고 이로 인해 분산전원의 적용이 더욱 활성화 될 것을 기대한다.

참고문헌

1. IEEE Std, 1547TM-2003 : IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems
2. 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준, 2005. 4. 20, 한국전력공사
3. N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, "Embedded generation," The Institution of Electrical Engineers
4. 이병국, "연료전지 분산전원용 전력전자 시스템의 개발현황 및 전망," 전력전자학회지 제8권 6호, pp.40-45, 2003.12
5. 송중환, "분산 발전 계통에서의 전력품질 규정," 전력전자학회지 제10권 6호, pp.33-37, 2005.12
6. 안중보, 김웅상, "분산형전원과 계통연계 기술," Journal of the Electric World, pp.12-20