http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2014.19.1.41

독일 계통 연계 규정에 기반 된 대용량 태양광 발전 시스템의 계통 안정화를 위한 제어 전략

배영상[1], 김래영†

Control Strategy for a Grid Stabilization of a Large Scale PV Generation System based on German Grid Code

Young-Sang Bae[1], and Rae-Young Kim†

Abstract - The rising penetration of renewable energy resulted in the development of grid-connected large-scale power plants. Therefore, grid stabilization, which depends on the system-type or grid of each country, plays an important role and has been strengthened by different grid codes. With this background, VDE-AR-N 4105 for photovoltaic (PV) systems connected to the low-voltage grid and the German Association of Energy and Water Industries (BDEW) introduced the medium-voltage grid code for connecting power plants to the grid and they are the most stringent certifications. In this paper, an optimal control strategy scheme for three-phase grid-connected PV system is enhanced with VDE-AR-N 4105 and BDEW grid code, where both active/reactive powers are controlled. Simulation and experimental results of 100kW PV inverter are shown to verify the effectiveness of the proposed implemental control strategy.

Keywords: BDEW, grid stabilization, power control, VDE-AR-N

1. 서 론

오늘날 전 세계적으로 분산발전 시스템의 중요성이 증대되면서 신재생 에너지가 각 국가에서 차지하는 비중은 상이하지만 계속해서 증대 되고 있다. 이 중에서 태양광 발전 시스템의 중요성과 필요성은 두말 할 여지가 없으며 세계 시장에서는 이미 발전소 단위의 대용량 계통 연계형 태양광 인버터가 수 MW ~ 수 백 MW까지 점차 확대되고 있다[1]. 이러한 대용량 계통 연계형 태양광 인버터는 각 국가 별 계통 규정 및 설치 유형에 따라 주로 중전압 계통에 연계하지만 저압 연계도 한다[2]. 따라서 각 국가의 저압 및 중전압 계통 연계 규정은 계통 안정도 및 신뢰도 향상을 목적으로 끊임없이 재정비 되고 있고 이를 기반으로 계통 연계형 인버터의 제어기를 설계해야 함은 필수 불가결한 요소이다.

Paper number: TKPE-2014-19-1-6
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr, Dept. of Electrical and Biomedical Eng., Hanyang University
Tel: +82-2-2220-0341 Fax: +82-2-2220-0570
[1] Dept. of Electrical Eng., EECS Lab, Hanyang University
Manuscript received Oct. 29, 2013; accepted Nov. 29, 2013

한편, 일반적으로 계통 연계형 태양광 인버터 시스템에서 사용하는 전류 제어는 최대 전력 점 추종(MPPT: Maximum power point tracking) 제어기에서 나온 출력을 계통전류의 지령치로 설계하여 태양광 어레이로부터 계통에 최대 유효전력을 공급한다[3]-[8]. 그러나 이러한 전류제어만으로 저압 및 중전압 계통에 연계하여 계통 규정에 맞게 안정화 제어를 시행한다는 것은 실제 치명적인 단점이 있다. 대표적인 근거를 살펴보면 현재 신재생 에너지의 높은 투입 율에 따른 계통의 주파수는 전력의 공급과 소비의 양의 비율에 따라 그 크기가 가변되고 더욱이 계통 전압은 그 규정 범위(예: ±10%) 내에서 순간 전압 강하 또는 상승이 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 국가의 계통 연계 규정[7]-[12]에서는 계통의 상황에 따라 엄격하게 무효전력뿐 만 아니라 최대 전력 점 추종 제어에 따른 유효전력 공급의 양을 규제하고 있는데 일반적인 전류제어만을 사용한 계통 연계형 인버터는 이러한 상황에서 이 규정들에 부합되기가 어렵다.

본 논문에서는 세계적으로 가장 엄격한 규정인 독일의 에너지 수자원 사업 협회의 계통 규정(BDEW: German Association of Energy and Water Industries)

과 VDE-AR-N 4105 규정에 부합되는 순시 전력 이론을 기반으로 한 3상 대용량 태양광 발전 시스템을 위한 전력 제어 전략을 제시한다. 제안된 제어 전략의 타당성을 검증하기 위하여 100kW급 태양광 인버터의 시뮬레이션과 실험을 실시하였고 기존 전류 제어기와의 비교를 통해 그 필요성을 증명하였다.

2. 독일 계통연계 규정의 고찰

2.1 동적 계통 지원(Dynamic Grid Support)

2008년 독일 BDEW는 E-ON 규정을 근간으로 하여 계통 연계 신재생 에너지 발전 시스템에 대한 규정을 발표하였고 이를 지속적으로 재정비하여 왔다.

이 규정의 시험 항목들은 FGW의 기술 지침서들[13]-[14]을 기준으로 정해졌으며 크게 정적 계통 지원(Static Grid Support)과 동적 계통 지원(Dynamic Grid Support)으로 분류된다. 여기에서 동적 계통 지원인 FRT에 대한 요구 사항은 그림 1과 같이 나타나며 저압 계통 연계 규정인 VDE-AR-N 4105와 구별된다.

기본적으로 태양광 인버터는 계통 전압이 정격전압 V_{rated}에서 0%로 전압강하가 발생하는 사고 후 150msec 이하 동안 계통과 분리되지 않도록 동작 하여야 하며 이후에도 그림 1과 같이 경계선 1위의 영역 A 에서는 정상적으로 동작해야 한다. 영역 B 에서는 영역 A 와 같이 계통에서 분리 되지 않도록 동작하거나 계통 운영자의 동의를 조건으로 고장 발생 순간 분리가 가능 하지만 곧 바로 재접속 동작하여야 한다. 그리고 영역 C 에서는 계통과 순간적 분리는 가능하지만 고장 해제 이후 2초 이내에 재접속해야만 한다. 또한, 재접속 후에 유효전력의 공급은 초당 정격 유효전력의 10% 기울기로 이행되어야 한다. 한편, 영역 D에 대해서는 계통 연계 유지에 대한 구체적인 요구 사항은 정의하지 않고 있다.

그림 2는 계통 전압이 정격전압의 10%이상 전압 강하가 발생하는 경우 전압을 제어하기 위한 무효전류 주입에 대한 규정을 보여준다. 추가로 이 무효전류는 20msec 내에 수식 (1)과 같이 전압강하의 비에 대하여 최소 2p.u의 비율로 계통에 고장이 발생하는 동안 주입함으로써 계통 전압을 지원하여야 한다. 따라서 이러한 동적 계통 지원 기능을 계통전압 제어 기능이라고도 한다.

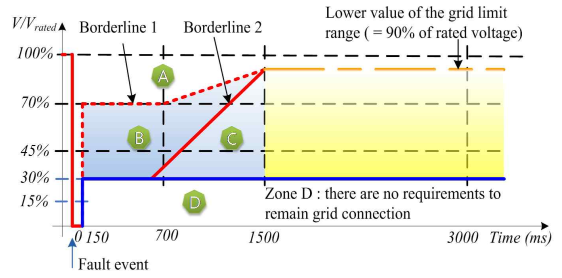


Fig. 1 Limiting curves of voltage at the grid connection point when grid voltage fault

$$k=\frac{\triangle I_{Re}/I_{rated}}{\triangle V/V_{rated}}\geq 2(p.u) \qquad (1)$$

여기서 V_{rated} 는 정격 전압, V_{Pre}는 사고 발생 이전의 전압, V는 사고 발생 동안의 순시 전압, I_{rated} 는 정격 전류, I_{Re_pre}는 사고 발생 이전의 무효전류, I_{Re}는 무효 전류, $\triangle V=V-V_{pre}$ 와 $\triangle I_{Re}=I_{Re}-I_{Re_pre}$이다.

2.2 계통 주파수에 종속 된 유효전력 제어

독일 계통 규정에서 태양광 인버터를 비롯한 신재생 발전 시스템은 다음 수식과 같이, 만약 계통 주파수가 50.2Hz를 초과 한다면 Hz당 정격 유효전력의 40%의 기울기로 순시 유효전력을 축소해야만 한다.

$$\triangle P=20P_m\times\frac{50.2Hz-f_{grid}}{50Hz}\ at\,50.2Hz<f_{grid}<51.5Hz \qquad (2)$$

그리고 계통 주파수가 50.05Hz 보다 작아졌을 때에 비로소 유효 전력을 복원시킬 수 있다. 또한 계통 주파수의 운전 범위는 47.5Hz 보다 낮고 51.5Hz를 초과하면 동작을 즉시 멈추어야 한다. 그림 3 은 이러한 순시 유효전력과 계통 주파수의 관계를 잘 나타내고 있다. 여기서, ΔP 는 전력 감소량, P_M은 순시 가용 전력을 나타내며 f_{grid}는 계통 주파수를 나타낸다.

2.3 정적 계통 지원(Static Grid Support)

일반적으로 계통 연계형 태양광 인버터 시스템은 절연 변압기 또는 송전 선로, 인버터의 손실을 피하기 위하여 유효 전력 제어를 기준으로 설계했다. 따라서 계통 규정에 적합한 무효전력 제어를 위해서는 인버터의 용량을 증가 시켜야만 한다. 즉, 정격 유효전력이 아닌 증가 된 정격 피상전력으로 인버터의 용량을 산출해야만 한다.

무효전력의 설정 기준은 다음에 따르는 항목들에 대해 계통 운영자의 지령에 따라 조절 혹은 고정되어 제어 가능 해야만 한다.

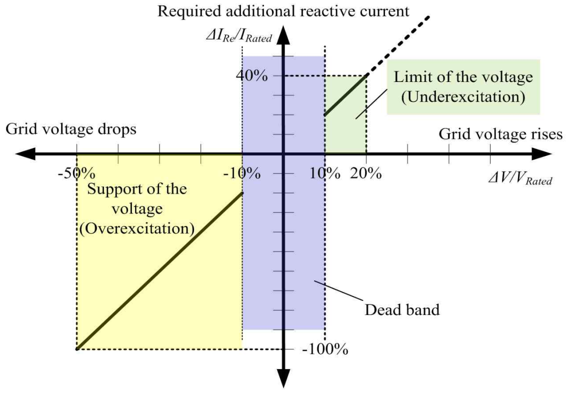


Fig. 2 Voltage support when grid fault exceeds 10 % of the rated voltage

1) 고정 된 역률
2) 고정 된 무효 전력
3) 계통 전압에 종속되어 조절 가능 한 무효전력
4) 유효 전력에 종속되어 조절 가능 한 역률

그림 4는 계통의 사고 시와는 다르게 계통이 정격전압 범위 내에 있는 동안에도 k인자에 의한 기울기로 무효전력을 공급해야 한다는 규정을 보여준다. 여기서 $k=\Delta Q/\Delta V$이며 ΔQ는 주입된 무효 전력, ΔV는 수식 (1)과 같은 값이다.

그림 5는 태양광 인버터가 지상 0.95 ≤ PF ≤ 진상 0.95 범위내의 모든 동작 지점에서 무효전력을 제공해야만 한다는 것을 보여준다. 이 범위는 계통 운영자의 요구에 의해 0.8까지도 낮아질 수 있다.

3. 3상 계통 연계형 태양광 인버터 시스템에서 계통 안정화를 위한 제어 전략

3.1 종래의 제어 전략

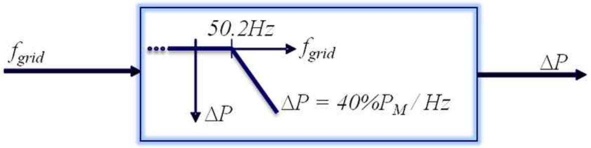


Fig. 3 Active power reduction depends on the grid frequency

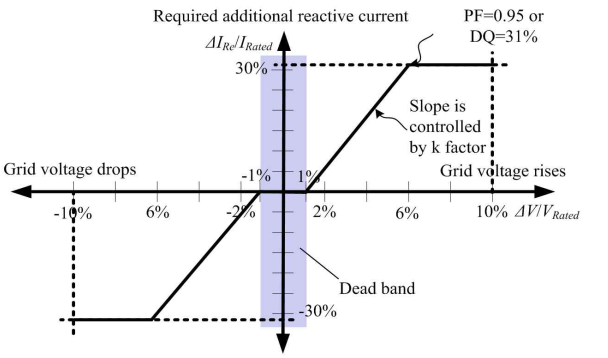


Fig. 4 Reactive power curve depending on the grid voltage's variations

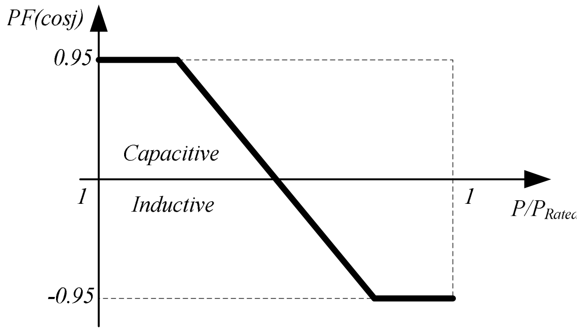
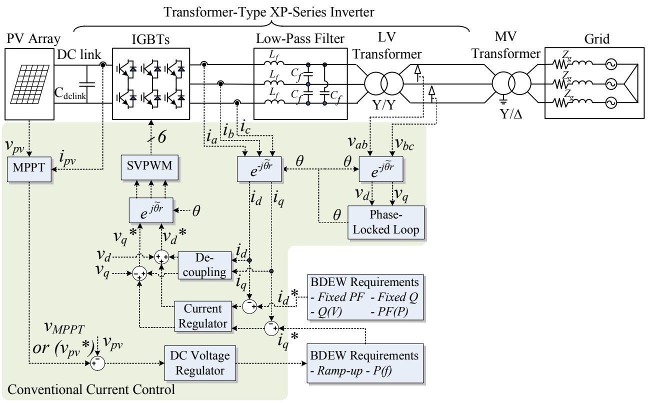


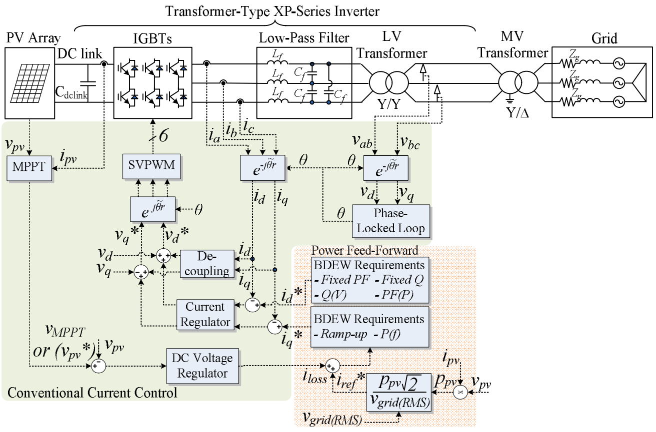
Fig. 5 Power factor depends on active power characteristics

그림 6은 계통 연계 규정에 근거하여 설계 가능한 3상 계통 연계형 태양광 인버터 시스템을 위한 일반적인 전류 제어 설계들[3]-[8]을 보여준다. 여기에서 그림 6(a)는 일반적으로 잘 알려진 종래의 전류 제어 블록도를 나타내며, 최대 전력 점 추종 제어를 통해 측정 된 태양광 전압과 그 지령치가 비교되어 동기 제어 좌표계의 유효전류 지령치(q축 성분)를 발생 시킨다. 또한 태양광 인버터의 출력 전류는 PLL(Phase locked loop)제어를 사용하여 계통 전압과 동기화를 시키고 이 때 무효전류 성분(d축 성분)의 지령 값은 0이다. 그림 6(b)는 이보다 개선 된 전류 제어 블록도를 보여주며, 여기에서 입력 전력은 태양광 시스템 제어의 동적 특성을 향상시키기 위해 직류 단 전압 제어를 통해 피드포워드(Feed forward) 된다. 이 제어는 일반적인 6(a)의 종래 전류 제어보다 태양광 전력에 기반이 되어 출력 전력을 제어 할 수 있고 계통 전압의 변화로 인한 출력 전류 지령치를 발생 시킬 수도 있다.

그러나 이 피드포워드 전력 제어 방법은 출력 전류 지령치의 제한기 때문에 계통 전압의 변화에 따른 일정 출력 전력 제어를 할 수 없고 앞서 설명 된 독일의 계통 규정 혹은 계통 운영자의 지령치를 만족 시킬 수 없



(a)



(b)

Fig. 6 Current control strategy with grid-code certification: (a) conventional and (b) with feed-forward power

다. 이 예시로 그림 7과 같이 가용 무효 전력과 계통 전압 사이의 관계를 나타낼 수 있는데 그림 7(a)와 같이 전류 제어기를 통한 무효전류의 추종치는 계통 전압 크기의 비율로 상승하거나 감소할 수 있다. 따라서 계통 연계형 태양광 인버터는 그림 7(b)와 같이 독일의 계통 규정을 만족하기 위하여 계통 전압의 크기 변화와 관계 없이 일정한 전력 제어를 시행 해야만 한다.

3.2 제안하는 제어 전략

3상 정상분 전압은 다음과 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다[15].

$$x^{abc}(t) = \sqrt{2}\,X\begin{bmatrix}\cos(\omega t)\\ \cos(\omega t-2\pi/3)\\ \cos(\omega t+2\pi/3)\end{bmatrix} \quad (3)$$

그리고 이미 알려진 바와 같이 Park 좌표 변환을 통해 d, q축으로 변환된 전압과 전류의 곱으로 시스템의 순시 유효와 무효전력은 다음의 식 (4),(5)를 통해 쉽게 구할 수 있다[16].

$$p=\frac{3}{2}(v_q i_q+v_d i_d)=\frac{3}{2}(v_{qd})^T\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}i_{qd} \quad (4)$$

$$q=\frac{3}{2}(v_q i_d-v_d i_q)=\frac{3}{2}(v_{qd})^T\begin{bmatrix}0&1\\-1&0\end{bmatrix}i_{qd} \quad (5)$$

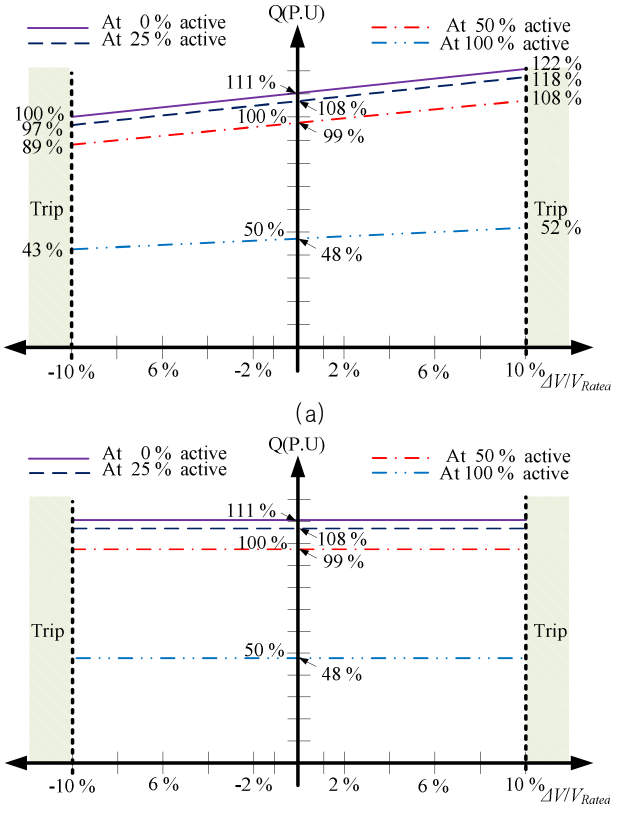


Fig. 7 Relationship between the grid voltage and the available reactive power: (a) current control and (b) power control

본 논문에서는 이를 이용하여 그림 8과 같이 독일의 계통 규정을 만족할 수 있는 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 여기에서 주의해야 할 점은 계통의 유, 무효전력은 순시적으로 다음 수식과 같이 직류성분 “-”과 진동하는 리플 성분“~”으로 분리할 수 있다는 것이다.

$$p=\bar{p}+\tilde{p} \quad (6)$$

$$q=\bar{q}+\tilde{q} \quad (7)$$

따라서 실제 적용에서는 저역 통과 필터(Low-pass filter)를 통해 이를 분리해야 하는데 차단 주파수를 적절히 선정하지 않으면 과도 상태 동안의 응답시간이 길어져 독일의 계통 규정에서 요구하는 응답시간을 만족할 수 없다. 그림 9에서와 같이 규정에서 요구하는 유효전력의 응답시간은 50초이고[14], 만약 응답 시간이 50초보다 크다면 정격 유효 전력의 100%에서 15%로 단계 변화하는 실험을 추가적으로 실시해야만 한다. 또한 독일 계통 규정에서는 그림 10과 같이 유효전력의 100%에서 0%까지 10%씩 단계별로 변화하는 시험에 대해서도 실시를 한다.

마지막으로 직류 전압 조절기(DC voltage regulator)는 실제 평균 유효전력의 작은 손실 분(P_{loss})으로 추가하여 제어 되었다. 이는 인버터의 스위치 및 배선 뿐 만 아니라 기타 추가적인 요인의 손실분으로 인버터 동작 시 직류 커패시터에 의해 공급될 것이다. 이 의미는 PWM 인버터에서 원활한 전류제어를 만족하기 위해서는 반드시 직류 전압의 크기가 인버터의 제어 출력전압의 최대치보다 더 커야 됨과 일맥상통한다.

앞서 언급 된 바와 같이 계통 연계형 태양광 인버터의 유효전력과 무효전력은 규정의 만족과 더불어 계통 운영자의 요구에 따라 조절이 가능해야 한다. 이 중 무효전력을 지령치에 정확히 추종시키기 위해서는 반드시 인버터의 출력 커패시터의 무효 성분으로 인한 제어의 간섭 분을 다음 수식과 같이 보상 해 주어야 한다.

$$q_c=3i_c v_c=3(v_c/z_c)v_c=3\omega C v_c^2 \quad (8)$$

여기서 ω는 계통의 각 주파수, 그리고 C와 v_c는 각각 필터 커패시턴스와 전압을 일컫는다.

한편, 전압과 전류를 모두 정현파라고 가정하면, 역률은 다음과 같이 피상 전력(s)에 대한 유효전력(p)의 비로써 나타낼 수 있다.

$$PF=\cos(\phi)=\frac{p}{s}\ \text{or}\ \phi=acos(PF) \quad (9)$$

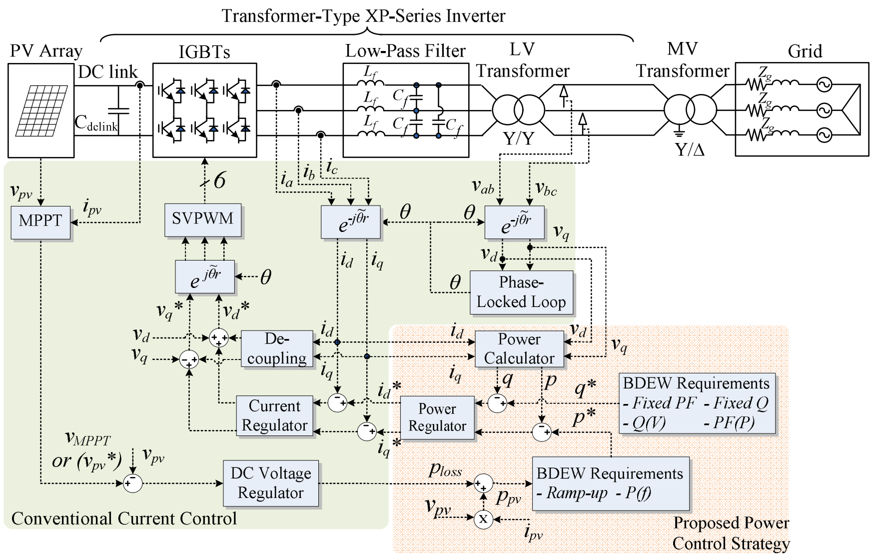


Fig. 8 Proposed power control strategy based on the German grid-cod

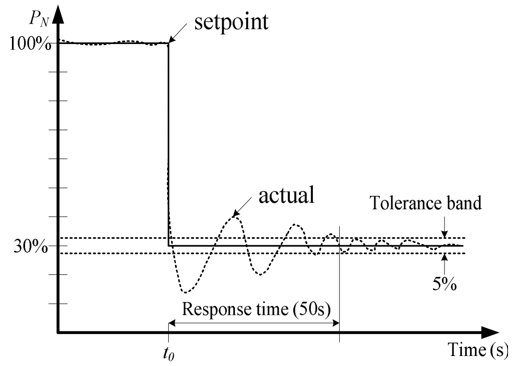


Fig. 9 Response time of power control in the German grid-code

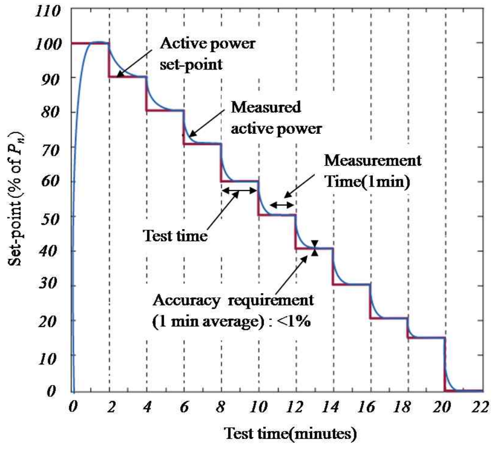


Fig. 10 Active power response test based on the German grid-code

그리고 유효전력과 무효전력 사이의 관계는 다음과 같다.

$$q = ptan(\phi) \text{ or } q = ptan[acos(PF)] \tag{10}$$

따라서 무효전력의 지령치는 수식 (11)과 관계하여 아래와 같이 선택할 수 있다.

$$q^* = p^* \tan[acos(PF^*)] \tag{11}$$

여기서 “*”의 지령치의 표시이며 역률의 조정 가능한 범위는 최소 지상 0.95 진상 0.95 이상이어야 한다.

반면, 유효전력의 지령치는 수식 (9)에 근거하여 지령된 역률과 정격 피상 전력에 따라 제한을 해야 한다.

그림 11은 전력 제어 블록선도이며 개루프와 폐루프의 전달함수는 수식 (12)~(14)과 같이 유도할 수 있다.

$$G_{op}(s) = \frac{K_{pc}K_{pp}s^2 + (K_{pp}K_{ic} + K_{pc}K_{ip})s + K_{ip}K_{ic}}{T_d L_f C_f s^5 + L_f C_f s^4 + T_d s^3 + (K_{pc}+1)s^2 + K_{ic}s} \tag{12}$$

$$G_d(s) = \frac{3}{2}V_{q_grid}\frac{K_{pc}K_{pp}s^2 + (K_{pp}K_{ic} + K_{pc}K_{ip})s + K_{ip}K_{ic}}{D} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} D = & T_d L_f C_f s^5 + L_f C_f s^4 + T_d s^3 \\ & + \left(K_{pc} + 1 + \frac{3}{2}V_{q_grid}K_{pc}K_{pp}\right)s^2 \\ & + \dots + \left[K_{ic} + \frac{3}{2}V_{q_grid}(K_{pp}K_{ic} + K_{pc}K_{ip})\right]s \\ & + \frac{3}{2}V_{q_grid}K_{ip}K_{ic} \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 K_{pp}와 K_{ip}는 전력제어기의 게인, K_{pc}와 K_{ic}는 전류 제어기의 게인, L_f는 필터 인덕턴스, C_f는 필터 커패시턴스, T_d(1.5×T_s)는 PWM 연산 시간 지연, T_s는 스위칭 기간, V_{q_grid}는 계통 전압의 크기를 일컫는다.

그림 12의 (a)와 (b)는 각각 제어기의 주파수 응답 특성과 나이퀴스트 선도이며, 전력 제어를 사용한 본 시스

템이 안정하다 것을 볼 수 있다.

추가적으로 무효전력 제어에서는 기생 무효 성분 및 송전선로 등의 다른 무효전력 성분의 보상도 실제 현장에서 제어 지령치에 더해지도록 해야 정확한 무효전력을 추종할 수 있다.

4. 시뮬레이션

독일 계통 규정을 만족하는 제안된 제어기의 타당성을 검증하기 위해 100kW급 3상 태양광 인버터 모델로 MATLAB 시뮬레이션을 수행 하였으며 표 1은 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터들이다.

그림 13은 정격 10%에서 100%까지 스텝 변화로 유효전력을 지령할 때의 시뮬레이션 결과이며 그림 14는 이때의 계통전압과 전류의 파형이다. 기준 유효전력 지령

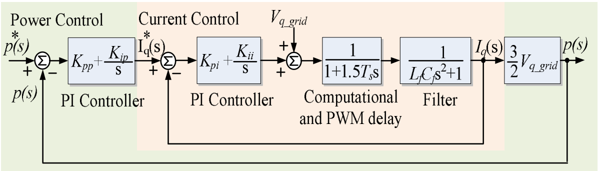
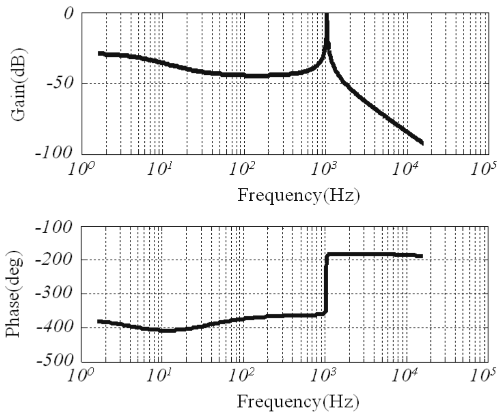
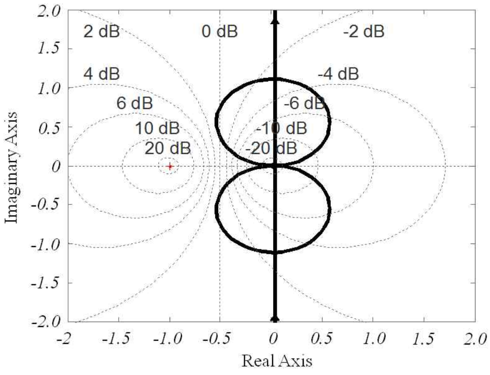


Fig. 11 Equivalent control block diagram of power control structure



(a)



(b)

Fig. 12 (a) Frequency response of closed-loop and (b) Nyquist plot of power control structure

Table 1 System parameters

Rated of inverter Prated P_{rated} MPP voltage range Open circuit voltage V_{oc}	100 [kW] 450~830 [V] 930 [V]
PV array MPP voltage V_{pv} MPP current I_{pv}	 600[V] 165[A]
Grid voltage V_g	380 [V]
Grid frequency f_0	60 [Hz]
Switching frequency f_{SW}	3 [kHz]
Output Filter L_f , C_f	65 [μH], 20 [μF]
Inner transformer	100 [kVA] 310 [V]/380 [V] 1.07 [%]
Medium-voltage transformer	1000 [kVA] 380 [V]/20 [kV] 1.07 [%]

치에 맞게 잘 추종하는 것을 볼 수 있으며, 약간의 무효전력 성분은 필터 커패시터의 보상 성분이다. 이 때 인버터의 출력 전류 지령치는 전력 지령치의 변화를 기반으로 자동 발생 된다.

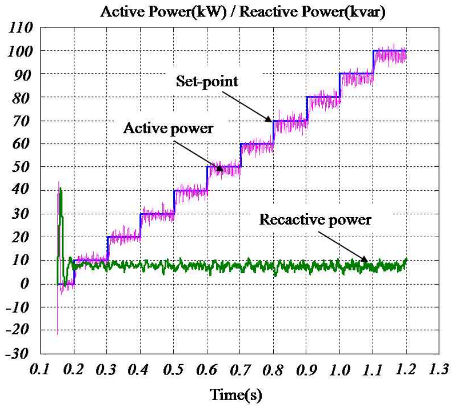


Fig. 13 Active and reactive power when step-changing from 10 % to 100 % of the rated power

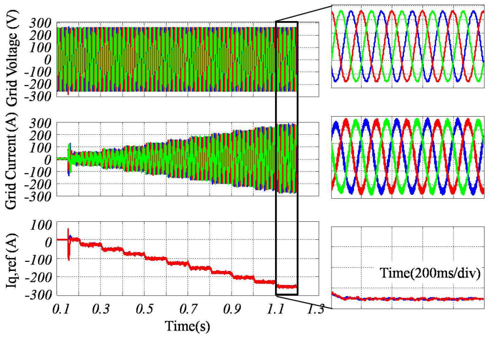


Fig. 14 Grid voltage (top), grid current (middle), grid current's q-axis component and its reference (bottom), normal (left), partial enlarged (right)

그림 15와 16은 앞서 설명 된 바와 같이 각각 계통주파수의 크기 증가에 비례한 유효전력의 축소와 계통 전압의 변화에 대한 유효전력 지령치의 응답을 보여준다.

그림 16에서 보듯이 계통 전압의 변화에도 불구하고 전력 제어는 기준 유효전력 지령치를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다.

그림 17은 지상과 진상의 무효전력의 지령치가 0%에서 100%까지 계단으로 변화할 때에 대한 무효전력의 응답을 보여준다.

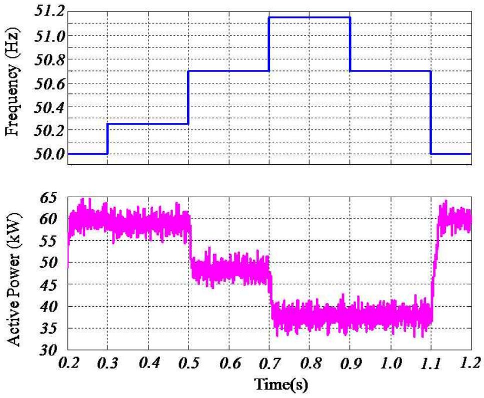
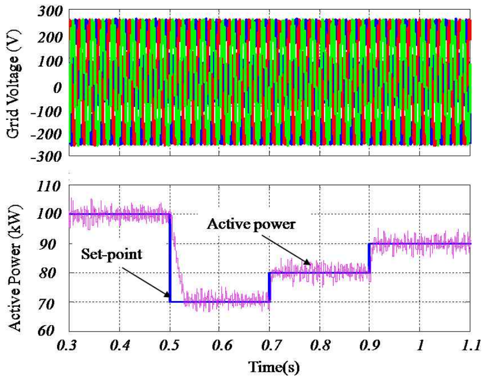
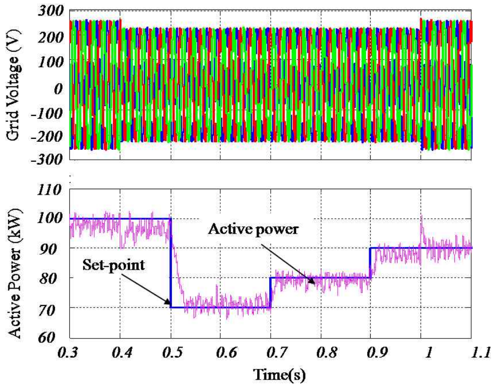


Fig. 15 Active power reduction of the grid frequency's variation



(a)



(b)

Fig. 16 Active power response: (a) normal and (b) grid voltage dip

그림 18은 역률 제어를 실시 한 시뮬레이션 결과이다. 역률 제어에서 지령치에 대한 응답의 평균값은 5%보다 낮아야 규정을 만족할 수 있다.

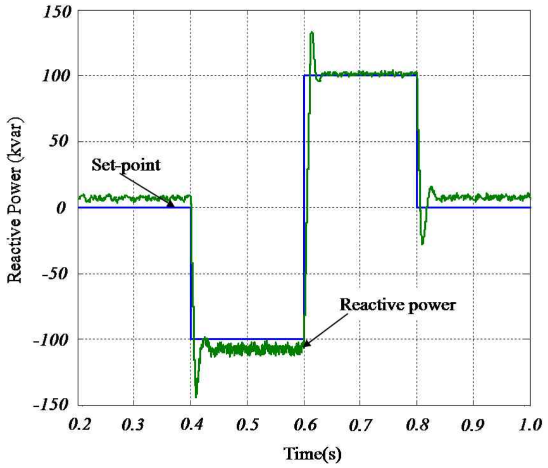


Fig. 17 Reactive power response in the capacitive and the inductive load case

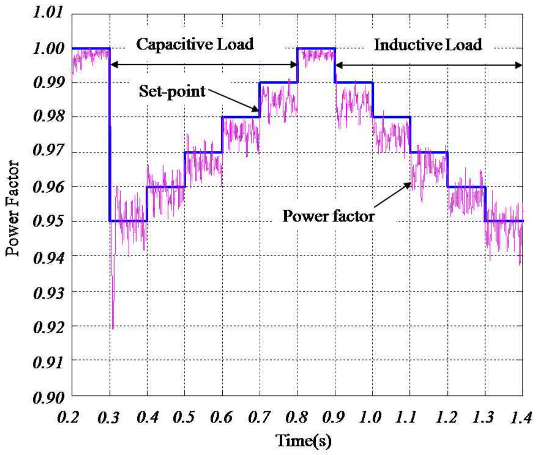


Fig. 18 Power factor response in the capacitive and the inductive load case

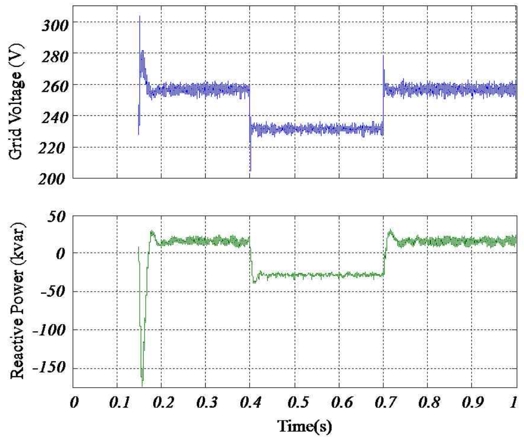


Fig. 19 Reactive power supporting of the grid voltage dip

마지막으로 그림 19는 계통 전압 강하가 정격 범위 내에서 발생할 때 종속되는 무효전력의 지령치에 대한 응답을 보여주며 약 0.02초 내로 제어기의 응답시간을 보인다.

5. 실 험

계통 규정에 근거 한 제안하는 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 20과 같이 100kW급의 변압기 내장형 계통 연계형 인버터를 이용하여 실험을 수행하였으며 실험에 이용 된 파라미터는 표 1과 같다.

그림 21은 시뮬레이션의 그림 13과 같이 유효전력의 지령치를 10%에서 100%까지 10%씩 증가하는 실험 결과이며 규정에 만족하는 작은 오차 범위 내에서 안정적으로 전력 제어가 실행되는 것을 볼 수 있다.

그림 22는 계통의 주파수에 종속되어 지령되는 유효전력의 실험결과이며 그림 23은 계통 전압의 강하가 발생되는 상황에서 유효전력의 지령 값에 대한 응답의 오차정도를 종래의 전류제어기와 비교한 실험 데이터이다. 결과적으로 계통의 전압이 정격 범위 내에서 전압 강하가 발생하여도 본 논문에서 제시한 전력제어는 모두 규정에 만족하여 잘 추종이 되는 것을 볼 수 있다.

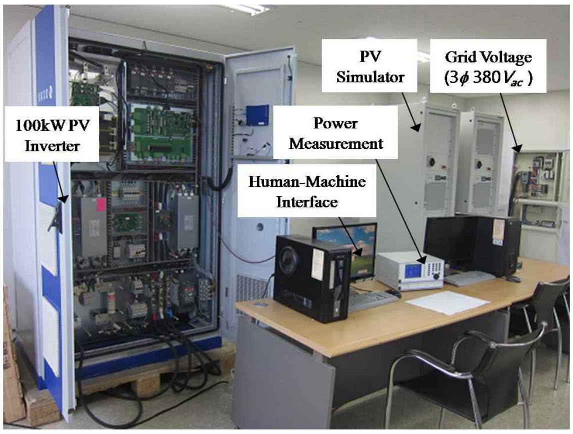


Fig. 20 Front and inside of 100kW PV inverter and (b) its experimental test-bed

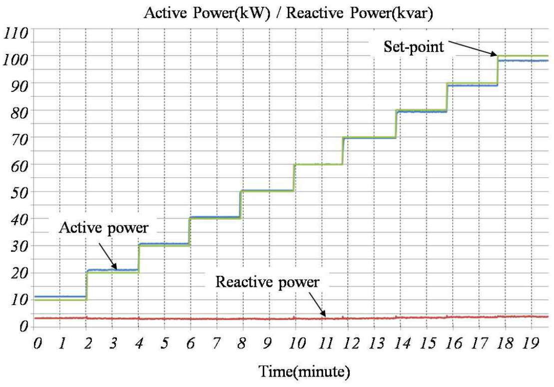


Fig. 21 Ramp-up of the active power set-point

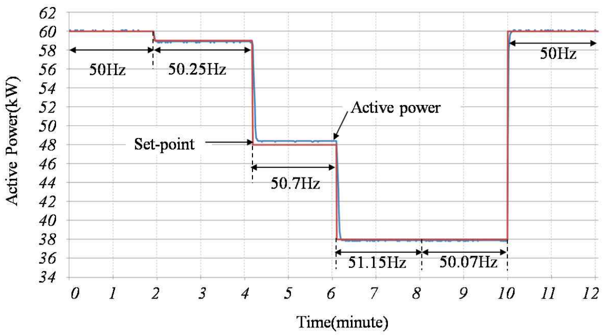
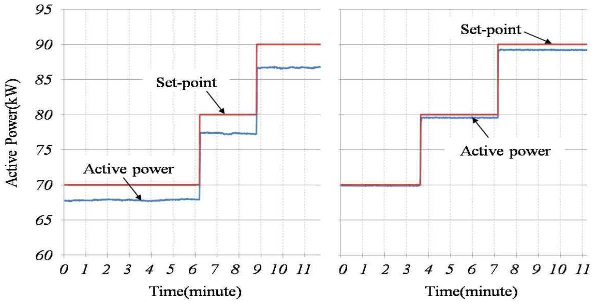


Fig. 22 Frequency dependence of active power (~60 % of rated power)



(a) (b)

Fig. 23 Active power response of the 10 % voltage dip: (a) current control and (b) power control

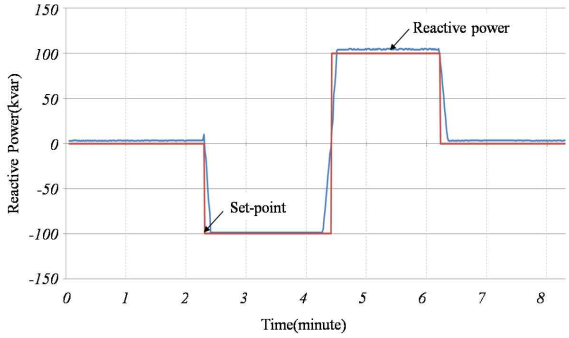


Fig. 24 Reactive power response of step-changed set-point from 100 % to 100 %

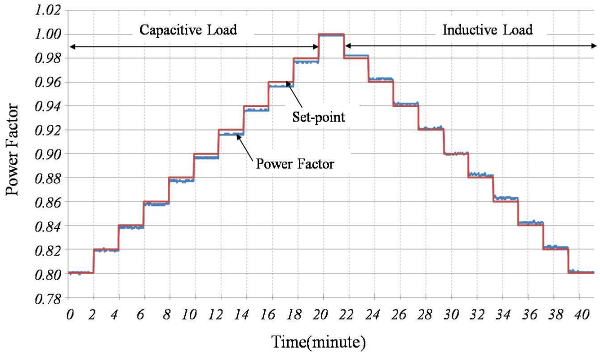


Fig. 25 Power factor response due to capacitive and inductive loads

Table 2 FRT Test Sequences

Test No.	Ratio of fault voltage to initial voltage (V/V_o) (%)	Fault duration(msec)
1	0.05	150
2	0.20~0.25	550
3	0.45~0.55	950
4	0.70~0.80	1400

무효전력에 대한 응답 또한 시뮬레이션과 마찬가지로 그림 24~26과 같이 수행이 되었다. 이 중 역률 제어의 실험은 지상 0.8~진상 0.8까지의 넓은 범위에서 수행하였으며 지령치와 추종치의 오차범위도 BDEW의 규정인 5%범위 이내로 만족하는 것을 확인 하였다.

마지막으로 동적 계통 지원 규정인 FRT 시험은 그림 27과 같은 시험 단지 구성을 갖는 독일 프라운호퍼 태양광 에너지 연구소(Fraunhofer ISE: Fraunhofer

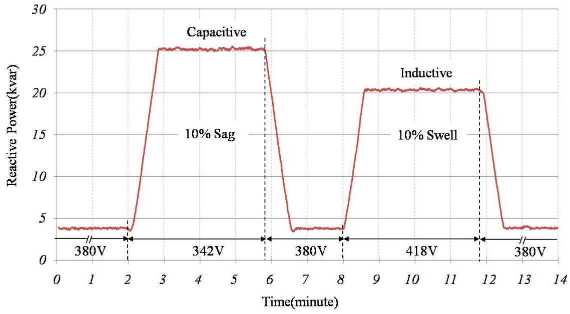


Fig. 26 Reactive power response of the 10% voltage sags or swell

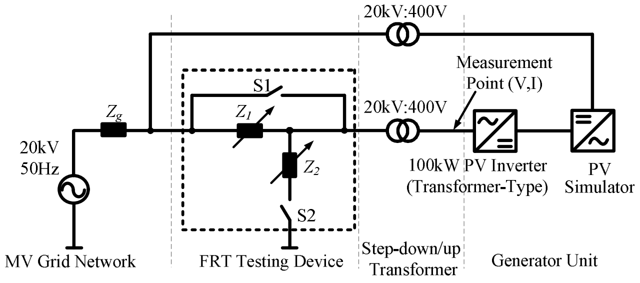


Fig. 27 Configuration of test-bed for FRT

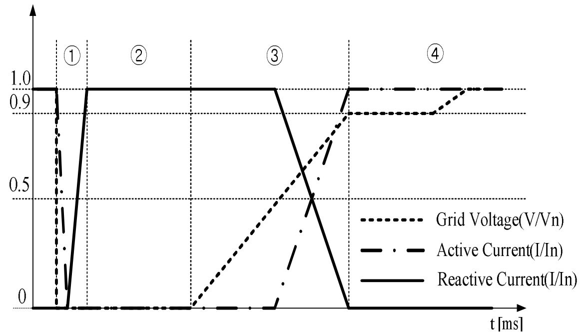


Fig. 28 The implemented control strategy for FRT test

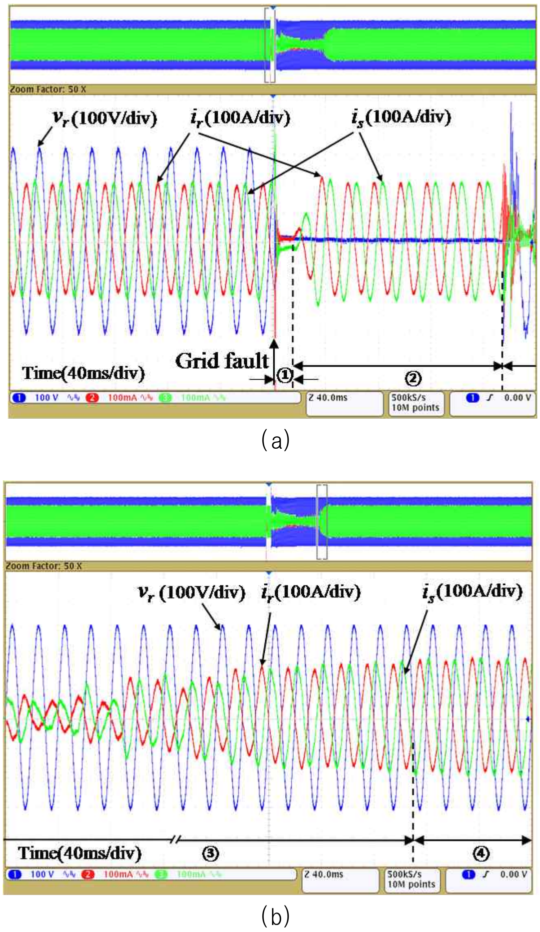


Fig. 29 Experimental result of Test 1: (a) Starting-fault and (b) ending-fault (Symmetrical fault, V/Vo = 0%, 150ms fault duration, 90% of rated power).

Institute for Solar Energy Systems)에서 실시하였다. 앞서 설명한 바와 더불어 그림 27의 S1과 S2를 지침서의 계통과 분리되는 시간의 요구사항에 따라 동작시키며 Z1, Z2의 임피던스 비율로 전압강하에 따른 요구사항에 부합하여 사고 시 계통과 중단 되지 않은 채 무효전력을 공급해야만 한다.

그림 28은 FRT 상황 시에서의 계통전압 강하의 비율에 대한 유, 무효전력의 제어 크기를 나타낸 제어 전략을 나타내고 있으며 이 중 가장 통과하기 힘든 ① 구간의 시험 결과 파형은 그림 30과 같다. 그림과 같이 계통전압이 100%에서 0%로 사고가 발생 했음에도 계통 연계형 태양광 인버터는 약 150ms동안 무효전력을 발생하며 동작이 유지되고 시고 후 복귀 시에도 안정적으로 동작됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 세계적으로 가장 엄격한 규정인 독일의 계통 규정에 근거하여 제안하는 전력 제어 전략을 기존의 전류제어와 비교하여 나타내었다. 제안된 제어

전략의 타당성을 검증하기 위하여 100kW급 태양광 인버터의 시뮬레이션과 실험을 계통 규정에 근거하여 실시하였고 기존 전류 제어기와의 비교 실험을 통해 그 필요성을 증명 하였다. 결과적으로 제안된 제어전략 방법은 BDEW 및 VDE-AR-N 4105 규정의 요구사항과 관련하여 계통전압이 그 정격 범위 내에서 전압강하가 발생 하였을 때 기존의 전류제어가 만족하지 못하는 계통 안정화 목적을 달성 할 수 있었다. 계통 연계형 발전 시스템에서 선진 국가의 계통연계 규정에 부합하기 위함의 노력은 효율적, 안정적인 분산 발전 시스템에 기여를 가져오는 것 뿐 만 아니라 세계시장 진출의 전략이 될 것이다.

References

[1] *PV Power Plants 2011 Industry Guide*, Renewables Insight, 2011.

[2] J. C. Boemer, K. Burges , P. Zolotarev, J. Lehner , P. Wajant, M. Fürst, R. Brohm, T. Kumm, "Overview of German Grid Issues and Retrofit of Photovoltaic Power Plants in Germany for the Prevention of Frequency Stability Problems in Abnormal System Conditions of the ENTSO-E Region Continental Europe," in *Proc. Solar Integration Workshop*, Aarhus, Oct. 2011.

[3] T. Kerekes, M. Liserre, R. Teodorescu, C. Klumpner and M. Sumner, "Evaluation of Three-phase Transformerless Photovoltaic Inverter Topologies," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, No. 9, pp. 2202-2211, Sep. 2009.

[4] Robert Gonzalez, Eugenio Gubia, Jesus Lopez and Luis Marroyo, "Trnsformerless Sing-Phase Multilevel-Based Photovoltaic Inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 7, pp. 2694-2702, July 2008.

[5] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Control of single-stage single-phase PV inverter," in *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1-10, 2005.

[6] E. Paál, Z. Weitzl, and C. S. Choi "Grid Management Functions built in PV Inverters for Distributed Power Generation," in *Proc. ICPE 2011-ECCE Asia*, pp. 2637-2644, 2011.

[7] M. Garc´ıa-Gracia, N. El Halabi, H. Ajami, and M. Paz Comech "Integrated Control Technique for Compliance of Solar Photovoltaic Installation Grid Codes," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 27, No 3, pp. 792-798, Sep. 2012.

[8] J. H. Park, T. H. Jo, H. G. Kim, T. W. Chun, E. C. Nho, H. Cha, "Comparison of current controllers of grid-connected PCS for distributed resources," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 3, pp. 274-280, Jun. 2012.

[9] W. Bartels, F. Ehlers, K. Heidenreich, R. H¨uttner, H. K¨uhn, T. Meyer, T. Kumm, J.-M. Salzmann, H.-D. Sch¨afer, and K.-H. Weck, "Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network," *Technical Guideline of BDEW*, 2008.

[10] "Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks," *VDE-AR-N 4105*, 2011.

[11] E. Troester, "New German Grid Codes for connecting PV systems to the medium voltage power grid," in *Proc. 2nd Int. Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants: Opt. Design, Prod., Grid Connection*, pp. 1-4, 2009.

[12] H. J. Shin, S. K. Sul, "LVRT Control Strategy of Grid-connected Wind Power System," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 2, pp. 182-190, Apr. 2011.

[13] *Technical Guidelines for Power Generating Units. Part 8 Certification of the Electrical Characteristics of Power Generating Units and Systems in the Medium-, High- and Highest-Voltage Grids.* Revision 3, FGW, Kiel, Germany, Mar. 2010.

[14] *Technical Guidelines for Power Generating Units. Part 3 Determination of electrical characteristics of power generating units connected to MV, HV and EHV Grids.* Revision 20, FGW, Kiel, Germany, Oct. 2009.

[15] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *Amer. Inst. Electr. Eng., Trans.*, Vo.l 37, No. 2, pp. 1027 - 1140, 1918.

[16] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (IEEE Press Series on Power Engineering)*, Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2007.

배영상(裵永相)

1979년 11월 30일생. 2005년 서울과학기술대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2008년~2012년 카코 뉴에너지 연구소 선임연구원. 2012년~현재 데스틴 파워연구소 책임연구원. 2011년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정.

김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1977년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 버지니아 공대(Virginia Tech) 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년~2004년 효성중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Post Doc. Researcher. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 조교수. 당 학회 JPE 편집위원, 학술위원.