

분산모듈형 태양광 전력조정기의 독립운전 제어

서정원¹, 박종후[†], 김혜림²

Control Method of Distributed-Module Type Photovoltaic Power Conditioners under Stand-alone Operation

Jung-Won Seo¹, Joung-Hu Park[†], and Hye-Rim Kim²

Abstract - This paper proposes a control method under stand-alone operating mode for distributed-module type photovoltaic power conditioners. In conventional schemes, there are some problems of a controller saturation in the DC-link (or load) voltage controller when overly-heavy load, light load, and the generated PV power reduction occurs, as well as when a transition occurs from an overly-loaded to normal conditions. To overcome these problems, the proposed controller method switches the main control target from DC-link voltage to the maximum power point, which is closer to the stable operating point when it returns to normal operating conditions. For the analysis, a state-plane trajectory was given and the circuit analysis by PSIM simulation was done. For the verification, a prototype hardware with 110[W] and 50[W] dual photovoltaic modules has been implemented. From the results, it can be seen that PV power tracking is successfully done with the proposed method even under a stand-alone operation mode.

Keywords: stand-alone, distributed module, module-integrated, photovoltaic, power conditioner

1. 서 론

태양광 발전은 공간적인 제약이나 외관적, 가격 측면에서 볼 때 다른 신재생 에너지에 비하여 합리적이며 특히 도심 지역의 발전에 있어서의 공간적 제약과 외관적 관심 때문에 이러한 장점들이 부각된다. 태양광 패널을 이용한 소규모 발전은 발전 방식에 있어서의 전력계통 인가 여부에 따라 계통연계형, 독립운전형으로 나뉜다. 계통 연계형의 경우에는 전력변환기 출력단과 맞물려있는 인버터가 PV 모듈의 전력변환기 출력 전압을 일정하게 잡아주는 상태이기 때문에 전력 변환기 출력단 전압이 일정한 상태에서 각각의 PV 모듈은 MPPT (Maximum Power Tracking) 연산을 통해 최대 전력점에서의 전력을 공급 한다.^[1-3]

독립 운전형 태양광 발전 시스템의 경우, 저장장치를 사용하면 전력변환기 출력단의 전압을 유지할 수 있지

만, 가격적 압력이 큰 경우에는 저장장치를 포함할 수 없기 때문에 부하에서 필요로 하는 전력을 적절히 공급할 수 있는 제어기의 필요성이 있다. 더불어 부하에서의 요구 전력이 변화하는 경우에도 PV 모듈의 출력 전력을 부하에서의 요구 전력에 맞게 제어해 주어야 한다. 기존의 제어 방식 중 MPPT를 이용한 PV 모듈의 기존 전력 제어 방식의 경우 각 PV 모듈의 최대 전력만을 출력하기 때문에 부하에서의 요구 전력에 맞출 수 없어 전압 제어 혹은 전류 제어 방식만을 이용하여 PV 모듈의 출력 전력을 부하에서의 요구 전력에 맞게 제어한다.

하지만 PV 모듈의 P-V 곡선은 전압원이나 전류원의 경우와는 달리 비선형이므로 전압 제어 혹은 전류 제어 만으로는 부하에서의 요구 전력을 충족시키지 못하는 경우가 생기게 된다. 그 예로 과부하(부하에서의 필요 전력이 태양광 모듈에서의 최대 발전 전력보다 높을 경우), 경부하(부하에서의 필요 전력이 MPPT를 수행하는 태양광 모듈에서의 최대 발전 전력보다 작을 경우)에서 부하에서의 요구 전력을 적절히 발전하지 못하는 경우, PV의 출력 전력이 감소해서 부하에서의 요구 전력을 충족시키지 못하는 경우, 과부하에서 다시 경부하로 변하여 부하에서의 요구 전력을 일치시키지 못하는 경우 등이 있다. 만일 이러한 문제가 생겨 발전되는 전력이 부하에서의 요구 전력보다 과도하게 낮을 경우 부하 기기

Paper number: TKPE-2013-18-5-6 ISSN: 1229-2214
[†] Corresponding author: wait4u@ssu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University
 Tel: +82-2-828-7269 Fax: +82-2-817-7961
¹ Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University
² Korea Electric Power Research Institute, Daejeon
 Manuscript received Apr. 8, 2013; accepted July 5, 2013

가 동작을 하지 못하는 문제점이 발생한다. 반대로 부하에서의 요구 전력보다 발전 전력이 높아질 경우 정격보다 높은 전압·전류가 발생하여 기기에 손상이 올 수 있다.^[4-7]

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 MPPT 알고리즘과 전압 제어를 복합적으로 사용하는 제어 방식을 제안하였다.

2.1절에서는 기존의 PV 모듈 제어 방식과 독립 운전시에 과부하로의 변화, 경부하로의 변화 시 각각 부하의 필요 전력을 충족하지 못하는 문제에 대해 설명을 하였다. 2.2절에서는 제안하는 제어 방법의 동작 알고리즘에 대한 설명을, 2.3절에서는 태양광 PV 모듈의 독립운전시의 문제점 중 하나인 PV 모듈의 출력전력 저하 혹은 부하 측의 요구전력 상승으로 인한 과부하 상태와 과부하에서 일반적 부하로의 변화 상태에서 제안하는 제어 방법을 이용할 때의 동작에 대해 설명하였다. 또한 2.4절에서는 부하 측의 필요전력이 감소하여 제어가 되지 않는 상태에서 제안하는 제어 방법을 이용할 때의 동작에 대해 설명하였다. 3절에서는 PSIM을 이용하여 제안하는 제어 방식의 타당성을 검증하였다.

2. 독립 운전시 PV 모듈 제어

계통 전력이 연결 되지 않은 상태에서의 PV 모듈의 독립 운전시 회로 구성은 아래의 그림 1과 같다. 3개의 PV 모듈과 이를 제어하는 전력변환기 3개가 그림과 같이 병렬로 연결되고 만약 부하측의 전압이 일정 전압으로 제어된다면 부하의 특성을 저항성 부하로 볼 수 있으므로 본 논문에서는 전력변환기의 출력측 부하를 저항성 부하로 가정한다.

이러한 회로 구성에서 PV 모듈의 독립운전 시에 부하 측의 전압을 일정한 전압으로 제어해 줄 전력변환기 설정 시, 감당할 수 있는 전력의 범위가 가장 넓도록 MPP (Maximum Power Point) 전력이 가장 큰 PV 모

듈의 전력 변환기로 설정해 모듈 출력단 부하 전압 (혹은 직류링크 전압)을 제어해 준다. 출력단의 전압을 제어해 줄 PV 모듈을 제외한 PV 모듈은 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 연산을 통해 각각의 최대 전력을 생산한다.^[8-10]

2.1 기존의 PV 모듈 제어

계통 전원과 연결되지 않은 독립운전 시의 기존의 PV 모듈 제어는 그림 1에서의 전력조절기 출력단의 V_{dc} 를 첫 번째 모듈의 전압 제어를 이용하여 부하에서의 요구 전압에 맞게 제어해 줌으로써 부하에서의 요구 전력에 맞춰 공급해 주었다. 하지만 일반적인 전압원과 다르게 PV 모듈의 전압-전류 관계는 선형적이지 않다.

이때의 전력변환기가 시비를 포화에 의해 고정 시비율로 제어된다면 첫 번째 PV 모듈 전력 변환기의 부하 특성은 정저항 부하의 성격을 가져 그림 2의 왼쪽과 같은 직선의 형태를 가지게 되고, V_{dc} 전압 제어를 한다면 전력 변환기의 부하 특성은 정전력원의 성격을 가져 그림 2와 같이 포물선의 부하 특성 곡선이 그려지게 된다.

그림 2에서의 A점은 원치 않는 동작점이며, B점은 불안정한 동작점이다. 따라서 원하는 출력이면서 안정한 동작점은 C점 한 점이 된다고 보고되었다. 다시 말해 A점은 안정하긴 하지만 원하는 제어 값을 얻을 수 없는 지점이며, B점은 A점이나 C점으로 이동하려고 하여 불안정한 동작점이 된다. C점은 태양전지의 전압원 영역에서 하나의 동작점이 형성되어 안정한 동작점이라 할 수 있다. 동작점이 A점으로 정해진 상태에서 B점이 존재하게 되면 C점으로 갈 수 없게 된다. 시비율 동작범위의 최대치 설정 값에 따라 B점은 존재하기도 하고 안 하기도 한다. 이를 통해서 부스트 컨버터 출력전압 제어가 결정된다. 태양 전지가 전압원 영역에서 동작점이 형성될 때에는 시스템이 안정적으로 동작하나, 전류원 영

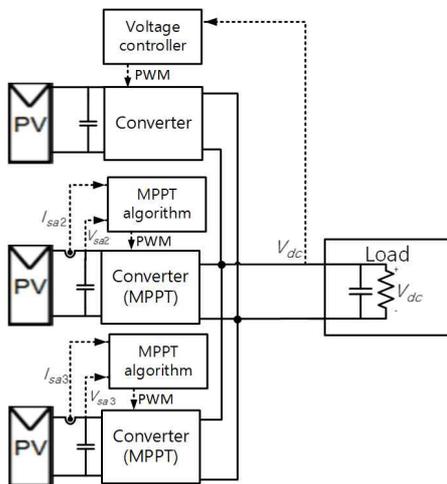


Fig. 1 PV controller scheme with stand-alone condition

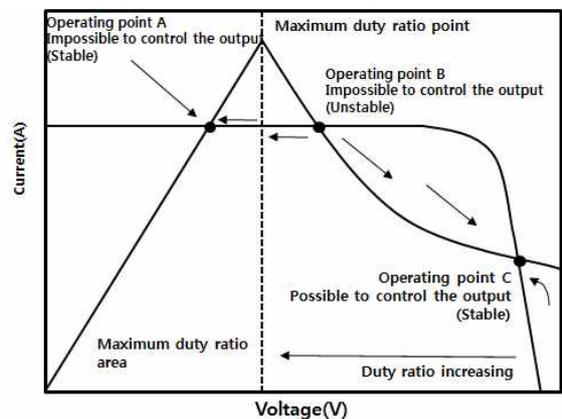


Fig. 2 A PV V-I characteristic and a load characteristic curves in stand-alone condition

역에서 동작점이 형성될 때에는 시스템이 불안정하게 되는 것이다.^[11-15]

그림 3(b)에서의 V_{dc} 는 그림 1에서의 부하 전압이며 $V_{dc,con}$ 은 PV1 제어기의 출력전압, 즉 도통율이다. 초기의 정상 동작 상태에서는 그림 3(a)에서의 일반적 부하 특성 곡선에 의하여 그림 3(a)에서의 동작점 C에서 전압을 추종하며 이때의 파형은 그림 3(b)에서의 (1)과 같다. V_{dc} 는 원하는 전압인 120V로 추종하는 것을 볼 수 있다. 그러나 과부하 혹은 PV 모듈의 MPP 전력이 감소하였을 경우에는, 그림 3(a)의 과부하시 부하 특성 곡선이 형성된다. 부하에서의 요구 전력이 증가하여 과부하로 변하게 되면 전력조절기의 부하 특성 곡선과 PV 모듈의 V-I 곡선과의 접점이 존재하지 않아 전력변환기의 동작점이 그림 3(a)의 동작점 이동 경로 ①과 같이 동작점 C에서 동작점 A로 수렴하게 되고 이때의 파형은 그림 3(b)에서의 (2)와 같다.

그리고 전력변환기의 동작점이 다시 일반적인 부하로 되돌아올 경우에, 그림 3(a)에서의 정상적인 동작점 C로 전력변환기의 동작점이 이동하지 못하고 그림 3(a)의 동작점 이동 경로 ②와 같이 새로운 동작점 A'로 수렴해 전력변환기가 정상적인 동작을 하지 못하게 된다. 이때의 동작 그래프는 그림 3(b)의 (3)과 같이 부하전압이 110V가 된다.

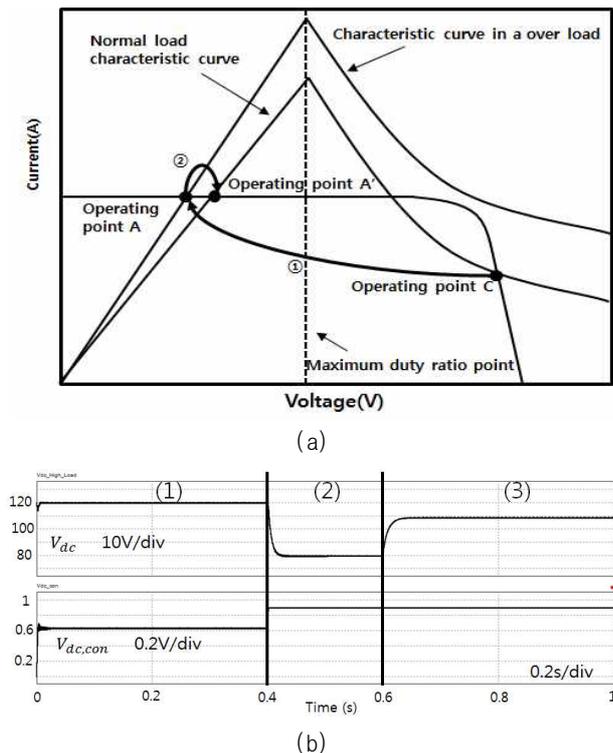


Fig. 3 Load characteristic curve and operating waveform with step changes to overly-heavy load
(a) PV-Load characteristic curve
(b) Operating waveform

반대로 경부하시에는 그림 4(a)와 같은 부하 특성 곡선이 형성된다. 그림 4(b)에서의 V_{dc} 와 $V_{dc,con}$ 은 그림 1과 같다. 초기의 일반적 부하 특성 곡선상의 정상 동작 상태에서는 그림 4(a)에서의 동작점 C에서 정상 동작을 하지만 (부하전압 120V) 부하의 필요 전력이 MPPT를 수행하는 PV 모듈의 발전 전력의 합보다 작아지게 되면 그림 4(a)에서의 경부하시 부하 특성 곡선으로 변화되어 동작점 이동경로 ①과 같이 V_{dc} 를 제어하는 PV 모듈의 동작점은 시비율 최소값으로 이동하여 제어기가 포화된 상태로 동작하게 되고, 결국 첫 번째 모듈과 MPPT를 하는 여타 PV 모듈의 전력의 합이 요구되는 부하보다 증가하여, 제어하고자 하는 전압 이상의 전압이 출력되게 된다. 이때의 파형은 그림 4(b)에서의 (2)와 같이 부하전압이 135V가 된다.^[16-18]

2.2 제어 알고리즘

2.1절에서 보이는 바와 같이 과부하일 경우, 경부하일 경우, 과부하에서 경부하로 부하가 변경될 경우, PV 모듈의 출력 전력이 줄어들었을 경우에, 기존 독립운전 PV 모듈 제어 방식은 부하에서의 요구 전력을 충족시키지 못하거나 오히려 초과하는 문제가 발생하였다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서 제안하는 제어 알고리즘은 아래의 그림 5와 같다.

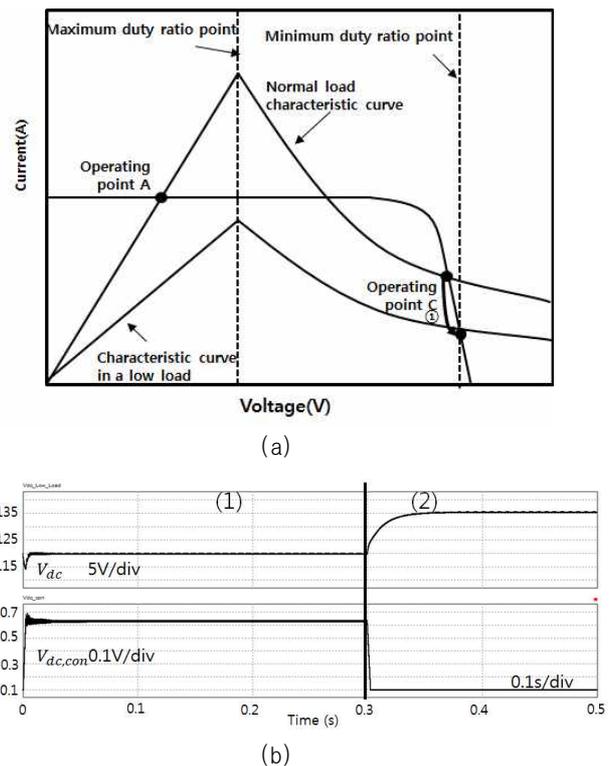


Fig. 4 Load characteristic curves and the operating waveform with step changes to light load
(a) PV-Load characteristic curve
(b) Operating waveform

제안하는 제어 알고리즘에서 PV1이 정상시에 전력변환기 출력단 전압인 V_{dc} 이 목표하는 전압 $V_{dc,ref}$ 을 추종할 수 있도록 전압 루프를 통해 전압 제어를 수행하며 V_{dc} 를 측정한다고 하자. 만약 부하에서의 요구 전력이 증가해 과부하 상태가 될 경우 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 와 비교해 감소하게 되며 제어기에서는 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 일정 전압 이상 감소 할 경우 이를 인지하고 그림 5에서의 우측 과부하 모드로 들어가 PV1의 제어를 V_{dc} 전압제어에서 MPPT 연산으로 변환하고 지속적으로 V_{dc} 를 센싱한다. V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 작을 경우 PV 모듈에서의 발전 전력이 부하에서의 요구 전력을 모두 부담할 수 없다고 판단하고 주기적으로 V_{dc} 와 $V_{dc,ref}$ 의 크기를 비교한다. 만약 부하에서의 요구 전력이 감소하여 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 커질 경우 제어기는 부하에서의 요구 전력을 PV 모듈에서의 발전 전력으로 감당할 수 있다고 판단하고 MPPT 연산에서 쓰였던 시비율 $V_{dc,con}$ 을 전압 제어기 내의 시비율에 적용시켜 줌으로써 안정적인 동작점을 인계 하며 전압 제어모드로 다시 환원시킨다. 이 후 과도상태에서 정상상태로 변환되는 시간을 약 0.1초 기다려 준다.

반대로 부하의 필요 전력이 감소하여 MPPT 알고리즘을 수행하는 PV 모듈의 전력의 합보다 부하의 필요 전력이 작아지게 되면 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 커지게 되고 그림 5에서의 좌측과 같이 경부하 모드로 들어가게 된다. 예를 들어, 제어기에서 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 5V 이상 커지게 되면 동작을 정지시킬 PV 모듈을 찾기 위해

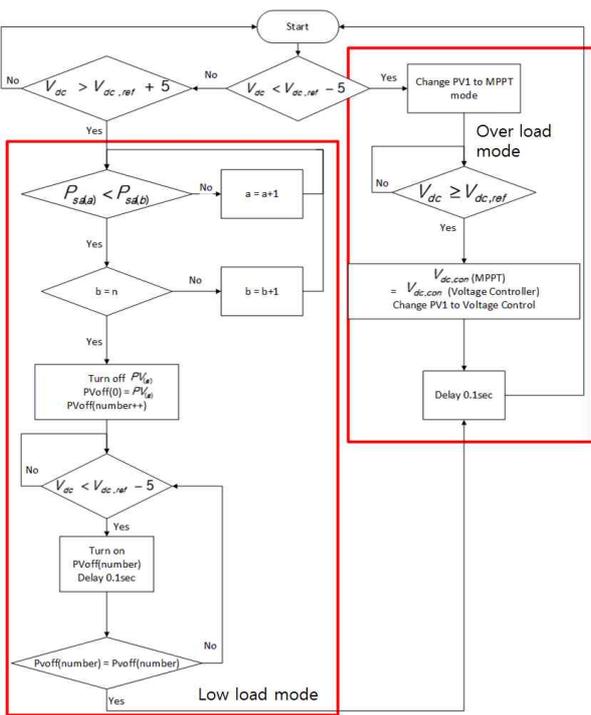


Fig. 5 Proposed controller algorithm

MPPT 알고리즘을 수행하는 각 PV 모듈의 출력 전력을 비교하여 가장 작은 전력을 발전해 내는 PV 모듈을 찾아내 작동을 정지시키며 정지시킨 PV 모듈의 번호를 PVoff(0)에 저장한다. 여기에서의 PVoff(n)은 동작을 정지시킨 PV 모듈의 정보를 기억하기 위한 변수이다. 만약 첫 번째로 정지시킨 PV 모듈이 PV3이고 두 번째로 정지시킨 PV 모듈이 PV2이면 PVoff(0)에는 PV3, PVoff(1)에는 PV2의 정보가 저장된다.

만약 V_{dc} 가 여전히 $V_{dc,ref}$ 보다 크다면 제어기는 다시 MPPT를 수행하는 PV 모듈의 출력 전력을 비교하여 그 다음으로 가장 작은 전력을 생산하는 PV 모듈의 동작을 정지시킨 후 PV 모듈의 번호를 PVoff(1)에 저장한 후 V_{dc} 를 감지한다. 만약 부하의 필요 전력이 증가해 이를 충족시키지 못하여 V_{dc} 가 감소 할 경우 이를 감지하고 PVoff(n)에 저장해 놓았던 동작을 중지한 PV 모듈 중 가장 작은 전력을 생산했던 PV 모듈부터 다시 작동 시키며 부하의 필요 전력을 충족시킨다. 만약 모든 모듈이 다시 작동을 할 경우 0.1초를 기다린 후 초기 상태부터 다시 수행한다.

2.3 과부하시 PV 모듈 제어

다수의 PV 모듈의 정상적인 동작 중에는 전력 변환기의 전압 제어를 통해 부하에서의 요구 전압을 추종한다.

부하에서의 요구 전력이 상승하여 전체 PV 모듈에서의 출력 전력이 이를 충족하지 못할 경우, V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 5V 작아질 때까지 그림 6에서의 ①과 같이 전력변환기의 동작점이, 유일한 동작점인 동작점 A의 방향으로 이동하게 된다 (그림 3 참조). 따라서 전력변환기 출력단의 전압 또한 감소하기 시작하는데 만약 전력변환기 출력단의 전압이 기준 전압보다 5V 이상 떨어질 경우, V_{dc} 를 제어하는 PV1 모듈의 전력변환기는

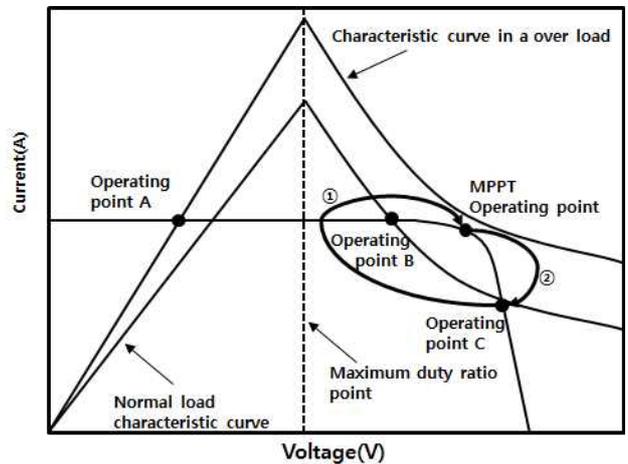


Fig. 6 Heavy load V-I Characteristic curve with distributed-Module type power conditioner

출력전압 제어모드에서 MPPT 제어모드로 전환하여 전체 PV에서 발전 할 수 있는 최대한의 전력을 생산함으로써 부하에서의 요구 전력에 최대한 근접한 전력을 발전하면서 동작점을 부하곡선에 근접하게 위치시킨다. 이후에, 부하의 필요 전력이 감소하여 전력조절기의 부하 특성 곡선과 PV 모듈의 V-I curve가 만나 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 와 같아질 때까지 동작점을 MPPT에 유지시켜 MPPT에서의 컨트롤 전압 $V_{dc,con}$ (MPPT)를 전압 제어기에서의 제어기 컨트롤 전압 $V_{dc,con}$ (Voltage Controller)로 전환한다. 이 때 그림 6에서의 ②와 같이 전력 변환기의 동작점 B와 동작점 C 사이의 영역에 동작점이 만들어져 안정된 동작점 C로 동작점이 이동할 수 있도록 유도하고 전압루프를 다시 동작시키고 정상상태로 돌아올 동안 기다린 후 알고리즘을 처음부터 다시 수행하도록 한다. 이는 3장에서 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

PV1 모듈의 MPP 전력이 감소하여 부하에서의 요구 전력을 충족시키지 못하는 경우에도 그림 6와 같이 V-I curve가 변화하여 동작점 A만이 남아있게 된다. 이 경우 마찬가지로 동작점이 A 포인트로 수렴하는 방향으로 움직이므로 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 5V 이상 낮아지게 되고, 부하특성곡선과 PV 모듈의 V-I curve가 만나서 그림 6에서 보이는 바와 같이 동작점 B와 동작점 C가 형성될 때까지 MPPT 알고리즘을 수행하여 동작점을 MPP에서 유지한 후 동작점 B와 C가 형성되면 $V_{dc,con}$ (MPPT)를 $V_{dc,con}$ (Voltage Controller)로 환원하여 정상 동작을 수행할 수 있게 한 후, 정상 상태로 돌아오면 그림 5의 알고리즘을 처음부터 다시 수행한다.

2.4 경부하시 PV 모듈 제어

반대로 부하에서의 요구 전력이 감소하여 전체 PV 모듈의 출력 전력이 부하에서의 요구 전력을 초과할 경우에는 전력변환기 출력단 전압이 증가하며 그림 7에서의 ①과 같이 시비율이 최소일 때의 동작점에 수렴하게 된다 (그림 4 참조). 그러나 전력변환기 출력단의 전압이 기준 전압보다 5V 이상 증가할 경우, 제안된 제어 알고리즘이 동작하여 V_{dc} 를 제어하는 PV1 모듈을 제외한 PV 모듈의 MPP 전력을 비교하고, 부하에서의 요구 전력에 인접할 때까지 MPPT 동작을 하는 PV 모듈 중 가장 작은 전력을 갖는 모듈의 전력변환기부터 전력 생산을 순차적으로 정지시킨다. 또한 정상상태로 돌아올 경우를 대비하여 정지시킨 PV 모듈의 번호를 순차적으로 저장한다.

이렇게 함으로써 V_{dc} 를 제어하는 PV1 모듈을 제외한 PV 모듈에서의 출력 전력이 감소하게 되므로 V_{dc} 를 제어하는 PV 모듈에서 부담해야 하는 전력이 증가하게 되므로, 그림 7의 '변화된 부하 특성곡선'에 의해서 ②와 같은 동작점 이동으로 동작점 C'가 시비율 동작영

역 내에 다시 생성되고, 제어기는 추종하고자 하는 $V_{dc,ref}$ 를 추종할 수 있게 된다. 만약 부하에서의 요구 전력이 다시 증가해서 전체 PV 모듈에서의 출력전력이 부하에서의 요구 전력을 충족시키지 못 할 경우, 부하에서의 요구 전력을 충족시킬 때까지 PV 모듈 중 가장 최근에 전력 생산을 중단한 PV 모듈의 전력변환기부터 순차적으로 작동시킨다. 가장 이전에 중단시킨 PV 모듈까지 재가동을 시키면서 정상상태로 돌아올 동안 기다린 후 알고리즘을 처음부터 다시 수행한다.

3. 시뮬레이션

그림 8(a)는 PV 모듈의 독립운전 상태에서의 전력추종을 테스트하기 위해 PSIM 소프트웨어로 구현한 결선도이고 그림 8(b)는 이를 제어하기 위한 제어기이다. 그림 8(a)에서의 PV1은 MPP에서 120W, 39V, 3A이고 PV2는 80W, 21V, 3.8A이고 PV3는 50W, 18V, 2.8A이다. PV1은 MPP에서의 파워가 가장 크므로 부스트 컨버터의 출력단 전압 V_{dc} 를 120V로 제어하기 위한 전압 제어를 수행하며, PV2와 PV3는 각각의 최대전력점을 추종하기 위해 Perturb-&-Observe (P&O) MPPT 알고리즘을 수행한다. PV1과 PV2, PV3의 전압은 각각 V_{sa1} , V_{sa2} , V_{sa3} 이다.

그림 8(b)의 DC_Link 블록은 독립운전 제어 알고리즘과 PV1의 제어가 통합된 블록이다. 정상적인 동작 상태에서는 V_{dc} 를 전압 레퍼런스 $V_{dc,ref}$ 에 추종시키는 전압 제어를 수행하여 PV1에 결선된 부스트 컨버터의 PWM 시비율을 결정하고, 부하에서의 필요 전력이 증가해 과부하 상태가 되면 PV1의 MPPT를 수행하여 부스트 컨버터의 PWM 시비율을 결정한다. 또한 부하의 상태가 경부하 상태가 되게 되면 Power_Check 출력핀을 이용하여 MPPT 연산을 수행하여 PV2와 PV3의 PWM 시비율을 결정하는 MPPT2 블록과 MPPT3 블록에 부

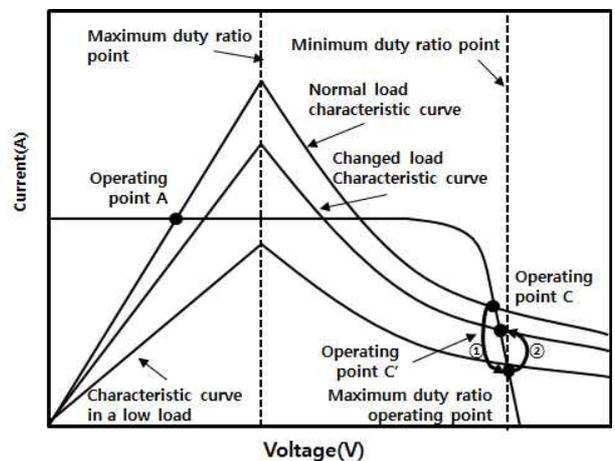


Fig. 7 Light load V-I characteristic curve with distributed-Module type power conditioner

하 상태 정보를 전달해 의 PV2와 PV3에 결선된 전력 조절기의 동작 혹은 동작 정지를 조절한다.

그림 9는 부하에서의 요구 전력이 스텝으로 증가 했다가 원래대로 감소 할 경우에서의 부스트 컨버터의 출력 전압(V_{dc}), 각 PV의 전압(V_{sa1} , V_{sa2} , V_{sa3}), 그리고 부스트 컨버터의 출력단 전압을 제어하는 부스트 컨버터1의 컨트롤 전압 $V_{dc,con}$ 의 파형이다.

(1)의 상태에서는 부하에서의 요구 전력이 PV 모듈에서의 출력 전력으로 충분히 감당이 되는 상태에서의 동작 파형이다. 이 상태에서의 부스트 컨버터1은 전력변환기의 출력 전압인 V_{dc} 의 전압이 원하는 120V 전압이 되도록 제어하고, 부스트 컨버터2와 부스트 컨버터3는 각 PV 모듈의 최대 전력점인 21V와 18V를 찾기 위해 MPPT 연산을 수행하고 있다.

동작상태 (2)에서는 부하에서의 저항이 감소되어 전체 PV에서의 최대 출력 전력인 250W를 초과하게 된다. 이

때 PV에서의 출력 전압이 부하에서의 요구 전력을 충족 시키지 못 하므로 기존의 제어 방식에서는 그림 6(b)에서와 같이 시비율 최대값 제한 동작점 A에서 부스트 컨버터1이 동작하지만, 제안하는 제어 방식에서는 제어하고자 하는 120V의 전압에서 5V 이상이 감소하게 되면 부스트 컨버터1의 제어 알고리즘을 MPPT 제어로 변화시켜 PV1도 MPPT 알고리즘을 수행하게 된다. 이로 인해 부하에서의 요구 전력에 최대한 근접한 전력을 생산하며 부하에서의 요구 전력이 PV 모듈에서의 생산 전력으로 감당이 되는 수준으로 감소할 때까지 기다린다.

동작상태 (3)에서는 부하에서의 저항이 증가하여 필요 전력이 감소하고, 부하특성 곡선이 다시 PV 모듈의 V-I 커브와 만나게 되어 V_{dc} 전압이 120V로 회복되고, 제어기는 MPPT에서의 시비율 $V_{dc,con}$ 을 전압 제어기의 $V_{dc,con}$ 으로 인계해준다. 이는 2.3절에서 설명한 바와 같이 부스트 컨버터의 동작점이 동작점 B와 C 사이에서 유지하고 있어서, 부하 특성곡선이 PV 커브와 만날 때 C점으로 복귀하기 때문이다.

그림 10은 부하에서의 요구 전력이 스텝으로 감소했다가 다시 원래의 부하로 돌아왔을 경우에서의 부스트 컨버터 동작 파형이다. 그림에서의 파형은 순서대로 출력 전압, PV2와 PV3의 전압, PV1의 전압, PV2와 PV3의 전류, 그리고 부스트 컨버터의 출력단 전압을 제어하는 부스트 컨버터1의 컨트롤 전압 $V_{dc,con}$ 의 파형이다.

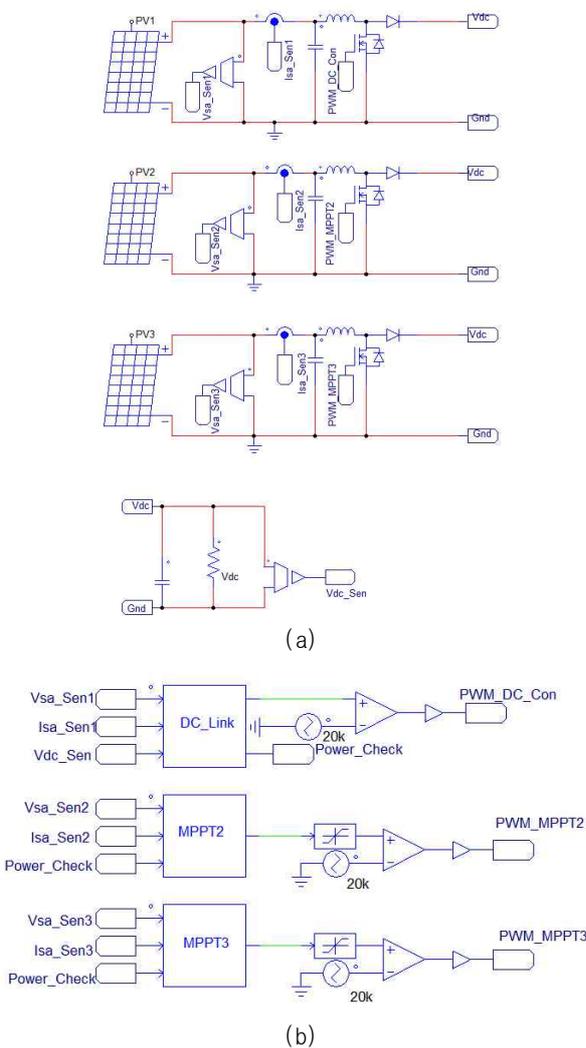


Fig. 8 Multi-module Photovoltaic system in stand-alone operation
(a) power stage
(b) Controller circuit

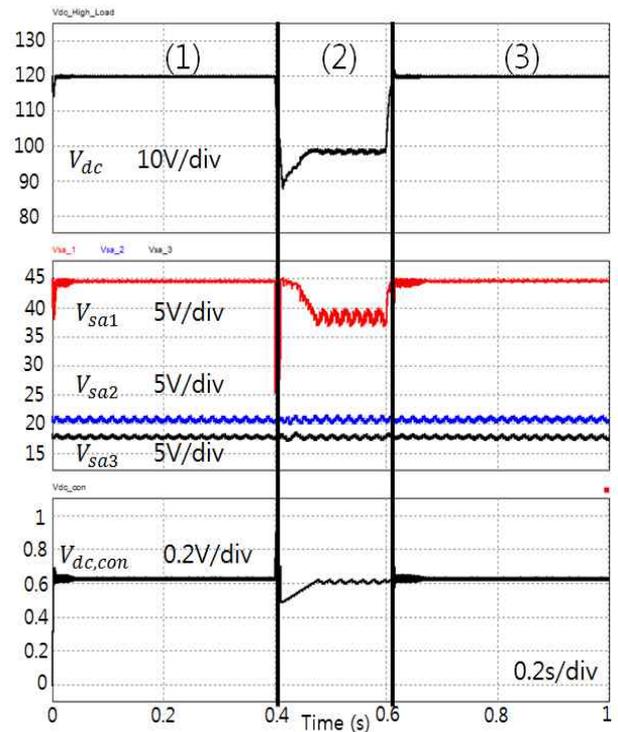


Fig. 9 Distributed-module type power conditioner waveforms in step-change to overly-heavy load

동작상태 (1)과 동작상태 (5)에서는 부하의 요구 전력이 205W, 동작상태 (2)와 동작상태 (4)에서는 125W, 동작상태 (3)에서는 70W이다.

동작상태 (1)에서는 부하요구전력이 PV2와 PV3에서의 최대 전력의 합인 130W보다 커서, 각 전력변환기는 V_{dc} 전압 제어와 MPPT를 정상적으로 수행한다.

동작상태 (2)에서는 부하에서의 요구 전력이 80W로 작아져 전력변환기의 출력단 전압 V_{dc} 가 전압 120V보다 높아지므로, 이를 감지 한 후 PV2와 PV3의 MPPT 알고리즘 수행 중의 최대 출력 전력을 비교하여, 비교적 작은 전력을 출력하는 부스트 컨버터3의 동작을 정지시킨다. 그러면 부하요구전력이 PV2 최대전력인 80W보다 커져서 PV1, PV2 모듈은 V_{dc} 전압 제어와 MPPT를 정상적으로 수행한다. 이는 전체 PV 모듈에서의 발전 전력을 감소시켜서 기준전압을 추종하는 방법이다.

동작상태 (3)에서도 마찬가지로 전력변환기 출력단 전압 V_{dc} 가 증가하는 것을 감지한 후 MPPT 알고리즘을 수행하던 부스트 컨버터2의 동작을 정지시킨다. 동작상태 (4)와 동작상태 (5)에서는 반대로 부하에서의 요구 전력이 증가해 V_{dc} 전압이 감소하게 되는데 이를 감지하여 동작을 정지시켰던 순서대로 부스트 컨버터를 다시 동작시켜 부하에서의 요구 전력을 충족시킨다.

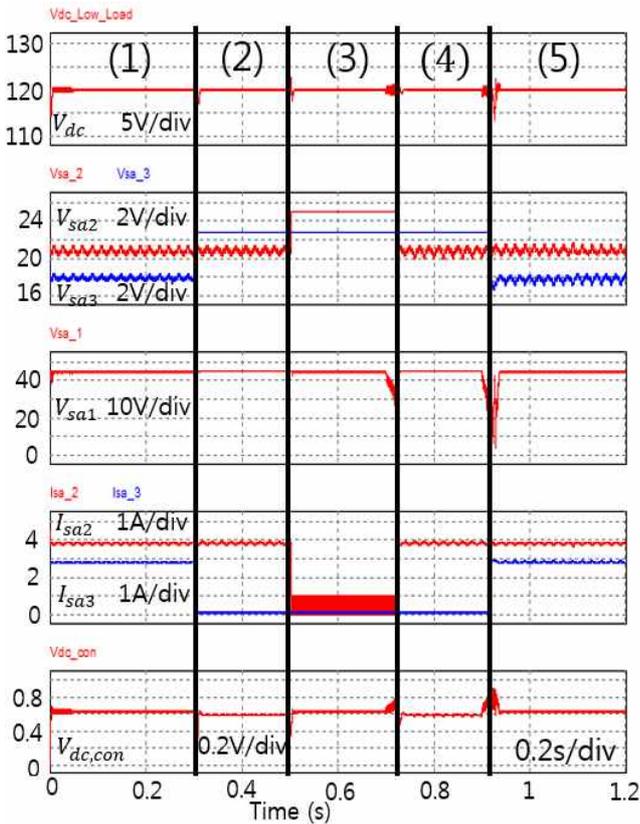


Fig. 10 Distributed-module type power conditioner algorithm in step-load change to a light load condition

그림 11은 기존 알고리즘이 적용되는 방식인 직렬연결 PV 모듈을 하나의 부스트 컨버터로 제어하는 토폴로지를 이용한 단독운전시의 시뮬레이션 결과이다.

그림에서의 파형은 순서대로 부스트 컨버터 출력 전압, 각 PV 모듈 전압, 각 PV모듈 전류, 그리고 전체 태양광 모듈을 제어하는 부스트 컨버터의 PWM 시비율이다. 동작 (1), (3), (5)는 부하의 요구전력이 205W, 동작 (2)의 부하 요구전력은 70W로 부하의 요구 전력이 낮은 상태, 동작 (4)의 부하 요구 전력은 360W로 부하에서의 요구 전력이 발전전력보다 높은 상태이다.

스트링 컨버터를 이용한 태양광 모듈의 제어에서는 직렬로 연결된 PV 모듈을 하나의 컨버터로 제어하기 때문에 부하에서의 요구 전력이 감소하더라도 그림 11의 동작상태 (2)에서 보이는 바와 같이 출력단 전압을 목표하는 전압인 120V로 제어 할 수 있다. 하지만 그림 11에서의 동작상태 (4)에서는 본 논문에서의 2.1장에 제시된 그림 3(b)에서의 동작 상태 (2)와 같이 컨버터의 동작점이 그림 3(a)에서의 동작점 A점에 위치하므로, 다시 부하가 감소하여 동작상태 (5)가 되어도, 컨버터의 DC 출력 전압을 제어하지 못하게 된다.

4. 실험

그림 12는 제안하는 제어 알고리즘을 이용한 분산모듈형 전력조절기 실험을 위해 구축된 실험환경이다. MPP 전력이 110[W]와 50[W]인 PV Array 시뮬레이터

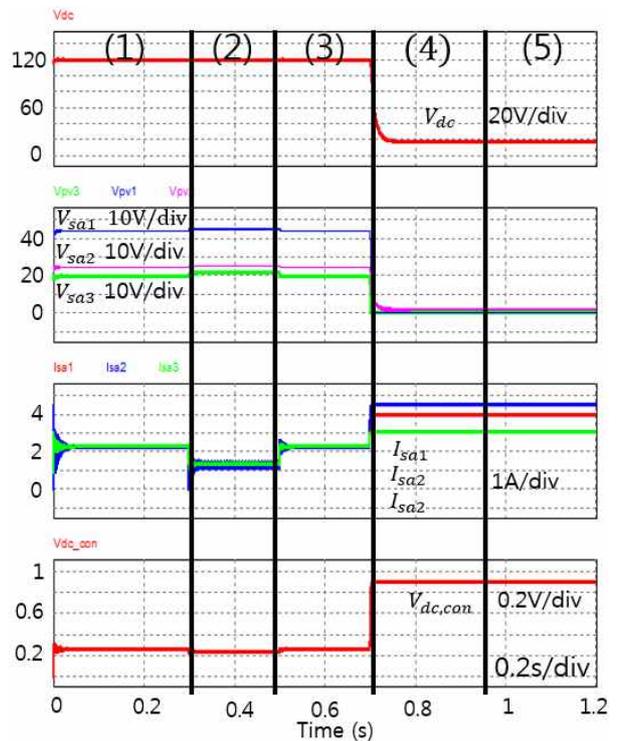


Fig. 11 Key waveform of string converter type power conditioner in step-load change

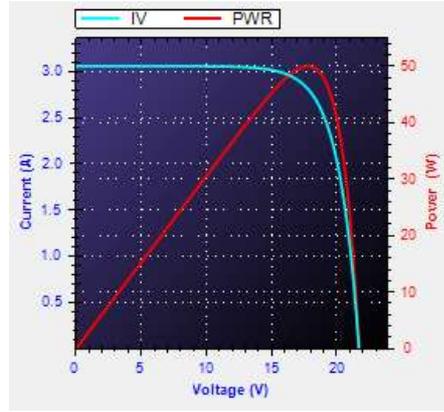
(TerraSAS 사), 가변저항, 풀 브릿지 인버터 그리고 부스트 컨버터를 사용하여 그림 13와 같이 결선해 분산모듈형 전력조절기의 제어에 대한 실험을 하였다.

110[W] MPP 전력을 갖는 PV1은 전압 제어를 통해 V_{dc} 를 제어하며 50W의 MPP 전력을 가진 PV2는 MPPT 알고리즘을 수행한다. 각 PV모듈은 부스트 컨버터와 연결되며, 부스트 컨버터는 인버터와 병렬로 연결된다. 그리고 부스트 출력단에 결선된 풀브릿지 인버터는 출력 부하에 결선되고, 전압 제어기를 통해 출력 부하의 전압 V_o 을 peak 전압이 40V인 AC 전압을 만들어낸다. Main Controller에서는 부하의 상태에 따라 PV1 모듈이 전압 제어를 수행 할지 MPPT 알고리즘을 수행 할지 결정하고, PV2 모듈의 동작 혹은 정지를 결정한다.

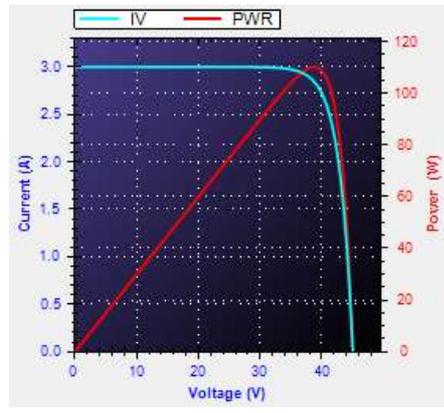
사용한 PV모듈의 V-I곡선, V-P곡선은 그림 14와 같다. 그림 14를 보면 PV1의 MPP는 39[V] 2.8[A], PV2의 MPP는 18[V] 2.8[A]임을 알 수 있다.

그림 15는 정상 동작 상태에서의 파형이다. PV1이 부스트 컨버터 출력 전압인 V_{dc} 를 목표로 한 전압인 60V로 제어하며, PV2는 V_{dc} 가 일정하기 때문에 동작 전압이 일정함을 볼 수 있다. 또한 인버터 출력 전압인 V_o 이 peak 전압이 40V인 AC 전압을 만들어 낼 수 있다.

그림 16은 부하에서의 요구전력이 스텝으로 증가했다가 원래대로 감소할 경우에서의 부스트 컨버터의 출력 전압(V_{dc}), 각 PV의 전압(V_{sa1} , V_{sa2})의 파형이다. (1)의 상태에서는 부하의 요구 전력이 PV 모듈에서의 출력 전력으로 충분히 감당이 되는 상태에서의 동작 파형이다. 이 상태에서의 부스트 컨버터1은 원하는 V_{dc} 의 전압이 원하는 60V 전압이 되도록 제어하고, 부스트 컨버터2 PV 모듈의 최대 전력점인 18V를 찾기 위해 MPPT 연산을 수행하고 있다.



(a)



(b)

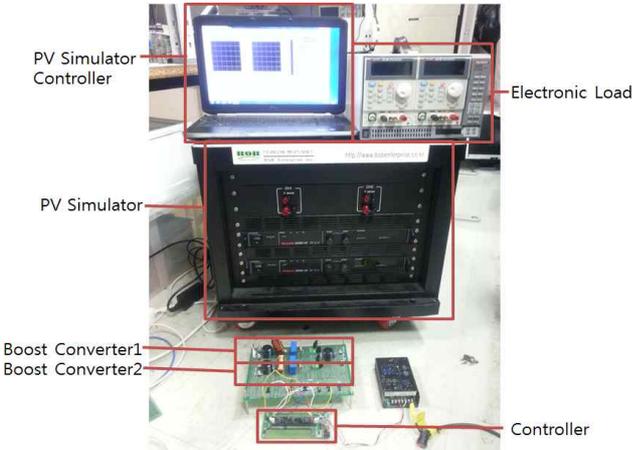


Fig. 12 Hardware experiment set-up

Fig. 14 V-I and V-P curve of PV module
(a) 50W PV curve (b) 110W PV curve

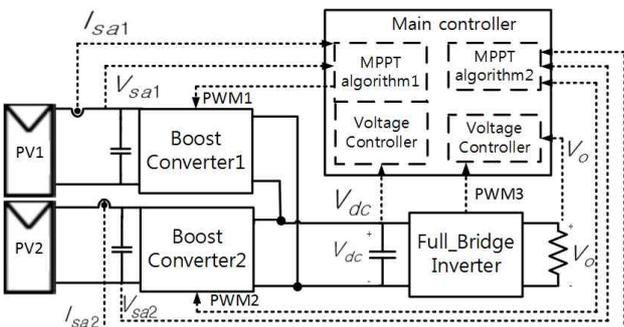


Fig. 13 Multi-module Photovoltaic system hardware in stand-alone operation

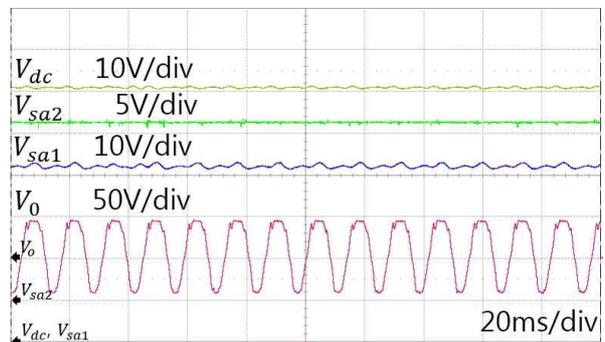


Fig. 15 Distributed-module type power conditioner hardware waveform

동작상태 (2)에서는 부하에서의 저항이 감소되어 전체 PV에서의 최대 출력 전력인 160W를 초과하게 되므로 동작점이 그림 6에서의 불안정 동작점 A쪽으로 이동하게 되고 V_{dc} 가 $V_{dc,ref}$ 보다 5V이상 작아지게 됨을 감지하여 그림 16에서의 동작상태 (2)와 같이 MPPT 모드로 들어가게 된다.

이 후, 동작상태 (3)에서와 같이 부하에서의 요구 전력이 감소하여 V_{dc} 가 원하는 전압인 60V 이상이 되어서 부하의 요구 전력을 PV 모듈에서의 출력전력으로 감당할 수 있다고 판단하고, $V_{dc,con}$ (MPPT)를 $V_{dc,con}$ (Voltage Controller)로 인계하여 정상 동작을 수행 할 수 있게 한 후 정상 상태로 돌아오면 그림 5의 알고리즘을 처음부터 다시 수행한다.

그림 17은 부하에서의 요구전력이 스텝으로 감소했다가 원래대로 증가할 경우의 부스트 컨버터의 출력 전압 (V_{dc}), 각 PV의 전압(V_{sa1} , V_{sa2}) 파형이다. 동작상태 (1)과 동작 (3)에서는 부하에서의 요구 전력이 100W, 동작 (2)에서는 부하에서의 요구 전력이 30W이다.

동작상태 (1)에서는 부하요구전력이 PV2에서의 최대 전력 50W보다 커서, 각 전력변환기는 V_{dc} 전압 제어와 MPPT를 정상적으로 수행한다.

동작상태 (2)에서 부하에서의 요구전력이 PV2의 최대 전력 50W보다 작아지면 V_{dc} 가 증가해 $V_{dc,ref}$ 보다 5V 이상 상승하여 PV2의 동작을 정지시킨다.

이후 동작상태 (3)에서 부하의 요구전력이 증가하여 PV1의 발전전력만으로 감당하지 못 할 경우, 동작을 정지시킨 PV2를 다시 동작시켜 요구 전력을 충족시킨다.

5. 결 론

본 논문에서는 분산모듈형 태양광 전력조절기의 독립 운전 시에 기존의 제어방식에서는 제어가 되지 않았던 과부하와 경부하, PV MPP 전력이 감소했을 경우 및 과부하에서 경부하로의 전환 동작에 대해 살펴보았다. 기존에 제어가 되지 않았던 동작 상태에, 제한한 제어 알고리즘을 도입함으로써 기존 방식을 이용한 제어에서와 같은 오동작을 보완할 수 있음을 이론을 통해 분석하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제한한 알고리즘은 과부하 혹은 경부하를 부스트 전력조절기의 출력전압을 통하여 검출하고, 이상 발생시 기준전압에서 일정범위를 벗어나면 전압 제어모듈의 MPPT 제어로의 전환 혹은 여타 모듈의 MPPT 동작 정지 등을 통하여 정상 동작 범위 내로 발전 전력을 위치시키는 방식이다. 이러한 동작을 통하여 분산형 모듈타입 태양광 전력조절기도 독립운전 모드 동작을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2012년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호 :R13TA02).

References

- [1] Jung-Won Seo, Sol Moon, Jong-Ho Jang, Joung-Hu Park, and others, "DC-link control study in stand-alone operation mode of multiple photovoltaic power conditioning system DC-link control study in stand-alone operation mode of multiple photovoltaic power conditioning system," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 133-134, 2012.
- [2] Bialasiewicz Jan T, "Renewable Energy systems With Photovoltaic Power Generators: Operation and Modeling," *IEEE Industrial electronics*, Vol. 55, pp. 2752-2758, Oct. 2008.
- [3] M. S. Kim, S. H. Lee, J. S. Hong J. H. Choi, and others, "Design of Grid Connected Photovoltaic System with Stand-alone Operation," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 969-972, 2003.
- [4] Hwa-Seok Lee, I. Daniel Thena Thayalan, Joung-Hu. Park, "High efficiency current measurement using resistor and bypass switch," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 103-104, 2012.

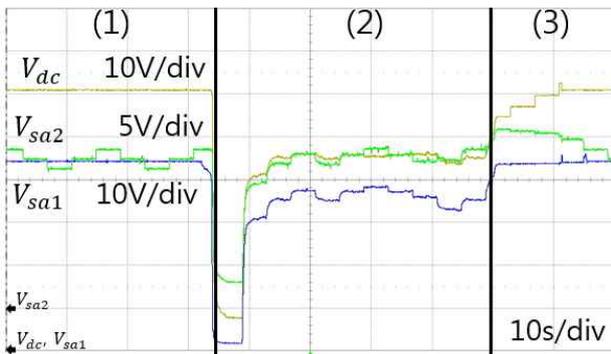


Fig. 16 Distributed-module type power conditioner hardware waveform in step-change to heavy load

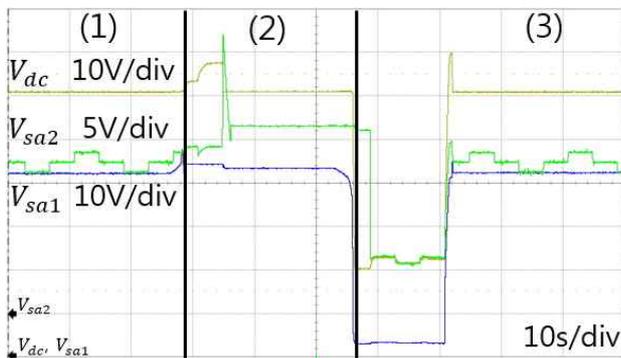


Fig. 17 Distributed-module type power conditioner algorithm hardware working waveform in light load

[5] Hwa-Seok Lee, Daniel Thana Thayalan, and Jong-Hu Park, "Low Power-loss Current Measurement Technique Using Resistive Sensor and Bypass Switch," *JPE*, Vol. 17, No. 5, pp. 416-422, Oct. 2012.

[6] Yong-Sik Lee, Nam-in Kim, Sung-Won Jeong, and Jae-Hyeon Gim, "MPPT control Method comparison of the Stand-alone PV system," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 1386-1387, 2011.

[7] Ji-Hoon Im, Ju-Yeop Song, Jin-Ung An Dong-Ha Lee, and others, "Simulation of the Design of Digital Controller for boost converter on Photovoltaic System," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 62-67, 2010.

[8] Tae-Yeop Kim, Maeng-Hwa Jung, and Gweon-Seong Goh, "The Study of Control Algorithm for Stand alone PV System," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 10-12, 2002.

[9] Wai Rong-Jong Jong, Wang Wen-Hung, and Chung-You Y., "High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System," *IEEE Industrial Electronics*, Vol. 55, pp. 240-250, Oct. 2007.

[10] Valenciaga Fernando, and Puleston Pablo F., "Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy," *IEEE Energy Conversion*, Vol. 20, pp. 398-405, Oct. 2005.

[11] H. S. Bae, J. H. Lee and B. H. Cho, "Large Singnal Stability Analysis of the Solar Array Power System Using the Controlled Load Characteristic," *IEEE Aerospace and Electronic Systems*, pp. 538-547, Apr. 2008.

[12] Cho B. H, Lee J. R, Lee F.C. Y, "Large-signal stability analysis of spacecraft power processing systems," *IEEE Power Electronics*, pp. 110-116, Jan 1990.

[13] Jeong-Hwan Kim, Gwon-Jong Yu, Byung-Gyu Yu, Joung-Hu Park, and others, "Control characteristics study of a stand-alone solar power controller has an energy storage system," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 1071-1072, 2010.

[14] In-Duck Park, Nark-Kuy Sung, Dae-Gwun Kim Bong-Hwan, and others Oh, "Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System by using Current of Solar Cell," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 119-112, 1998.

[15] S. H. Park, H. S. Bae, J. H. Lee and B. H. Cho, "Design of Peak and Charge Current-mode Control for Parallel Module Solar Array Regulator System," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1-5.

[16] Moon-Hwan Kim, Young-Ho Bae, Min-A Lee, and Jae-Eon Kim, "Stand-Alone PV Generation System Modeling," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 1102-1103, 2009.

[17] Ho-Sang Jin, Hee-Jun Kim, and Jawad Ahmad, "Control of MPPT and DC-DC converter for a stand alone solar power system using a single digital controller," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 115-117, 2009.

[18] S. H Shin, D. S. Kim, Z. G. Piao, D. G. Kim, and H. L. Beak, "Battery charge and discharge controller design of Stand-alone PV system using MPPT," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 1263-1264, 2010.



서정원 (徐廷元)

1988년 2월 13일생. 2012년 숭실대 전기공학부 졸업. 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



박종후 (朴種厚)

1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공박). 2007년~2009년 서울대 정보기술사업단 박사후 연구원. 2009년~현재 숭실대 전기공학부 조교수. 당 학회 JPE 편집위원.



김혜림 (金惠林)

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대 물리학과 졸업. 1981년 미 아이오와 주립대 졸업(석사). 1991년 미 코넬대 물리학과 졸업(공박). 현재 한전 전력연구원 책임연구원.