

# 리클로저의 동작특성을 고려한 계통연계형 태양광발전시스템의 보호 알고리즘

論 文

55B-5-6

## A Protection Algorithm of Grid-Interactive Photovoltaic System Considering Operation Characteristics of Recloser

金應相<sup>\*</sup> · 金슬기<sup>\*</sup>  
(Eung-Sang Kim · Seul-Ki Kim)

**Abstract** - The paper proposes a new protection algorithm for reliable operation of grid-interfaced PV system, which can flexibly interact with conventional protective schemes of power utility grid not only to prevent damages to utility or public persons and utility apparatus caused by malfunction or failure in distribution network protection system, but also to protect a PV system itself from faults or abnormal conditions of the network. The proposed algorithm is based on reclosing characteristics of the distribution system. As a network fault occurs, the new scheme determines whether it is momentary or permanent and responds in a pre-programmed way to the fault. For permanent outage, the proposed algorithm shuts down inverter's operations but monitoring system voltage and frequency at the point of common coupling with grid. When it comes to the momentary outage, Inverter starts stand-by operation mode so that it can be automatically connected to the grid without start-up procedures as soon as the system voltage and frequency returns into the normal operation range. In order to investigate and evaluate the PV system operation, simulation study based on PSCAD/EMTDC has been carried out to verify the performance of the proposed protection scheme.

**Key Words** : Grid Interface, Photovoltaic Generation, PSCAD/EMTDC Simulation

### 1. 서 론

배전선로에서 사고가 발생하면 계통의 변전소 측 계전기나 선로 리클로저가 먼저 동작을 하게 되고 배전선로에 연계되어 있는 태양광발전 등 분산형 전원 측의 보호계전기도 사고를 감지한다. 분산형 전원이 분리되기 전에 선로 측의 재폐로에 의하여 분산형 전원이 비동기 상태에서 계통에 재투입될 수 있어 인버터 등에 무리한 기계적·전기적 충격이 발생되어 시스템이 파괴되거나 소손될 위험성이 있다. 또한, 상용 배전계통에서의 차단기(Circuit Breaker) 또는 리클로저(Recloser)는 배전선에서 사고가 발생하면 선로를 순시차단하고 일정한 시간이 지난 후에 재폐로를 실시한다. 재폐로 후에도 사고가 제거되지 않으면 다시 선로를 차단하고 일정한 시간이 경과한 후 다시 재폐로를 실시하여 사고가 여전히 존재하면 일정회수의 재폐로 후에 영구차단하여 계통으로부터 선로가 복구될 때까지 장기간 분리하는 방식으로 운전된다. 따라서 리클로저 후단의 계통은 리클로저의 순간 차단 시 순간 정전을 영구차단 시 영구정전을 겪게 된다.[1,2]

현재 우리나라에서 보급되고 있는 계통연계형 태양광발전 시스템은 이상과 같은 문제에 대하여 충분히 고려한 보호방식을 갖추지 않고 있으며, 접속되는 분산전원의 용량이 증가됨에 따라 상용계통에서의 보호협조의 실패 문제는 더욱더

심각해질 가능성이 있다. 더욱이, 배전선로에서의 리클로저 동작 등에 의해 순간정전이 발생한 경우에도 영구정전으로 간주하고 차단기를 개방하여 출력을 내보내지 않도록 설계되고 제작되어 운영되고 있어서 태양광 발전시스템의 활용도나 태양에너지의 이용률을 저하시키고 있다.[3,4,5]

본 논문에서는 상기에서 언급한 가능성들을 충분히 고려하여 상용계통 기존의 보호협조 장치들의 운전방식에 유연하게 능동적으로 대처하여 기존 보호체계의 오동작 및 실패로 인한 피해를 방지할 뿐만 아니라, 연계되는 태양광발전시스템 자체 또한 계통의 사고나 이상변동으로부터 보호할 수 있는 지능형 계통연계 및 보호 알고리즘을 개발하였다. 또한, 연계 운전 시 계통의 순간정전과 영구정전을 구별하여 영구정전 시에만 계통으로부터 분리하는 영구정전 검출 알고리즘을 개발하여 상시나 상용 계통정전 시 태양광발전의 정지시간을 최소화하고, 태양광에너지의 이용률을 극대화하여, 계통연계형 태양광발전시스템의 공급신뢰도를 증대시키고자 하며, 제안된 알고리즘은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 활용한 시뮬레이션을 통해서 그 유용성을 검증하였으며, 추후 본 논문에서 제안된 알고리즘을 활용하여 실제 제어기에 적용하여 현장에 직접 적용하고자 한다.

### 2. 기존 계통연계 운전 보호방식

배전선로 고장의 70%~95%는 일시적인 것으로서, 고장 시의 아크의 지속시간이 선로나 절연체에 피해를 줄 정도로 길지 않다면, 선로는 운전 상태로 신속하게 복구될 수 있다. 배전선로에 설치된 보호장치 중 R/C(리클로저)는 전위와 후비 보호장치 간 보호협조를 이루게 하는 중추적 역할을 담당

† 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 책임연구원

E-mail : eskim@keri.re.kr

\* 正會員 : 한국전기연구원 선임연구원

接受日字 : 2005年 3月 24日

最終完了 : 2005年 4月 17日

하는 것으로서, 고장 발생 시 선로를 순시로 차단한 후 곧 자동으로 재폐로(선로재 가압)시켜, 순시고장을 제거 후 즉각적인 서비스 복구가 이루어지며(순간정전이라 함), 일반적으로 3회의 재폐로를 거친 후에도 고장이 제거되지 않는 경우 영구고장으로 간주하여(영구정전이라 함) 고장구간을 선로로부터 분리시키는 기능을 갖는다. 따라서 중소형 규모의 분산전원이 연계되는 저압배전계통에서는 선로 고장에 대한 리클로저의 동작에 의하여 순간 및 영구 정전이 결정된다. 분산전원은 고장으로 계통으로부터 분리된 후, 계통의 정상운전이 재개되면, 정상상태임을 판별한 후 신속하게 계통에 재접속되어 운전을 계속할 필요가 있다.[5,6]

전력계통의 고장으로 배전계통 측의 전력공급이 없어진 경우에도 분산전원이 계통으로부터 분리되지 않고 부하에 전력을 계속해서 공급하게 되면 단독운전 상태가 발생한다. 단독운전 상태가 지속되는 경우, 전기설비나 선로보수원 등의 작업원에게 치명적인 영향을 초래할 수 있을 뿐만 아니라 연계선로의 복구조작이 지연되고, 계통의 전원 투입 시 비동기 투입이 발생하여 수용가 또는 분산전원의 설비가 피해를 입을 수도 있다. 현재 상태로서는 배전선로에 분산전원의 연계가 적은 편이어서 일반적인 보호기능에 의한 개별적인 대응이 가능할 수 있겠지만, 소용량의 분산전원이 다수 도입되는 상황이라면, 분산전원 측에서 계통의 전원 상실을 검출하여 자동적으로 계통으로부터 분리하는 방법 등의 새로운 기술이 적용되어야 한다.

현재 국내에서 정지기를 사용하는 분산전원의 대부분을 차지하는 계통연계형 PV 시스템은 계통 측에 고장 또는 이상 상태가 발생하여, 접속점의 전압이 정격전압의 90% 미만으로만 내려가면 저전압으로 판단하여 운전을 정지한다. 계통에 재접속하기 위해서는 계통이 복전된 후 일정시간 후에 운전자 또는 소유자가 수동으로 운전스위치를 조작하여 태양광발전시스템을 운전 복구시키거나 규정으로는 분리 후 복귀시에는 항상 5분후에 복귀하도록 규정하고 있다. 그러므로 리클로저의 동작에 따른 순간적인 선로 고장 또는 순시적인 계통 동요 또는 전압이상에 대해서도 태양광발전장치는 운전 정지되어 불필요한 정지시간을 가지게 되며, 운전 재개를 위하여 수동으로 직접 스위치를 조작하거나 아니면 5분 후에 연계하여야 하는 번거로움이 커져, 타 전원에 비해 초기 투자비가 대단히 높은 태양광발전시스템을 경제적이고 효율적으로 운전하는 데 걸림돌이 되고 있다.[7]

우리나라 상용계통에 접속되고 있는 대부분의 PV 시스템의 계통연계장치가 그 용량에서 차이가 있을 뿐 비슷한 규격과 기능을 가지고 있다. 이는 PV 시스템 자체의 보호기능을 수행하고 있으나, 선로의 재폐로 협조, 고장 복구 후 자동 재접속, 단독운전 방지 등의 문제에 대하여 충분히 고려한 보호방식을 갖추지 않고 있다. 발전 및 부하, 전력망이 서로 유기적인 체제를 이루고 있는 전력계통에서 연계된 계통망의 보호협조 방식이 고려되지 않는 분산전원의 보호장치 운전전략은 연계 계통의 보호체제의 오동작 및 실패를 야기할 수 있으며, PV 시스템의 공급신뢰도를 저하시키는 요인이 되고 있다. 배전계통에 접속되는 분산전원 시스템의 수와 용량이 증가될수록 상용계통에서의 보호협조의 실패 문제는 더욱더 심각해질 가능성이 크다.

**2.1 리클로저의 동작특성**

선로인출차단기 또는 리클로저(Recloser)는 배전선에서 사

고가 발생하면 선로를 순시차단하고 일정한 시간이 지난 후에 재폐로를 실시한다. 재폐로 후에도 사고가 제거되지 않으면 다시 선로를 차단하고 일정시간이 경과한 후 다시 재폐로를 실시하여 사고가 여전히 존재하면 일정회수의 재폐로 후에 영구차단하여 계통으로부터 선로를 복구될 때까지 장기간 분리하는 방식으로 운전된다.

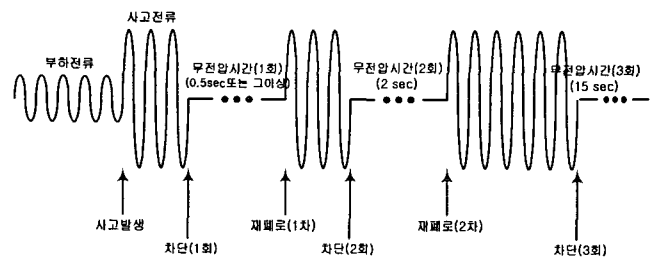
현재 한국전력 22.9kV 배전계통의 일반적인 재폐로 방식에서 선로인출차단기(CB)는 선로보호계전기과 자동재폐로계전기의 조합으로 재폐로 되며 총 2회의 재폐로를 시행한다. 제 1회는 0.5sec의 고속도 재폐로를 하며 제 2회는 15sec 저속도 재폐로를 하며 그 후에는 영구적으로 차단한다. 한편 리클로저는 총 4회까지 재폐로를 할 수 있으며 4회로 정정한 경우 3회 재폐로 후 4회에는 선로를 개방하게 된다. 순시동작과 지연동작 횟수는 필요에 따라 임의로 조합할 수가 있으나 순시동작은 반드시 지연동작에 선행하여야 한다. 표 1은 한국전력공사에서 운영하고 있는 리클로저 유형별 재폐로 시간을 나타내고 있다.

**표 1 리클로저의 재폐로 시간**  
**Table 1 Reclosing time of recloser**

| 전<br>자<br>식 | 구분       | 순시후 | 순시후 | 지연  |
|-------------|----------|-----|-----|-----|
|             | IJB-VE 형 | 2초* | 2초  | 15초 |
| ESB 형       | 2초       | 5초  | 15초 |     |

\*표시는 순시로 바꿀 수 있고, 이 시간은 30~40 cycle이며, 구분에서 제작회사의 모델명을 의미한다.

그림 1은 배전선에서 사고가 발생한 경우 재폐로 동작에 따른 사고전류파형을 나타낸 것이다. 이 경우는 3회 재폐로를 실시하고 재폐로시간(무전압시간)은 순시차단의 경우 0.5sec(리클로저의 경우 0.6sec이상) 지연차단(2차 재폐로 후)에는 15sec로 된 경우이다.



**그림 1 리클로저의 차단 및 재폐로 동작방식**  
**Fig. 1 Interruption and Reclosing Scheme of Recloser**

**2.2 기존 태양광발전시스템의 보호방식**

현재 우리나라에서 보급 중인 태양광발전시스템은 계통 접속점의 계통전압이 정격전압의 90% 미만으로만 내려가면 저전압으로 판단하여 운전을 정지한다. 계통에 재접속하기 위해서는 계통이 복전된 후 일정시간 후에 운전스위치를 조작하여 태양광발전시스템을 운전 복구하여야 한다. 그러므로 리클로저의 동작에 따른 순간적인 선로 고장 또는 순시적인 계통 동요 또는 전압이상에 대해서도 태양광발전장치는 운전 정지되어 불필요한 정지시간을 가지게 되며, 운전 재개를 위하여 수동으로 직접 스위치를 조작하여야 하는 번거로움이 커져, 타 전원에 비해 높은 설치비용을 갖는 태양광발전시스템

의 보급에 걸림돌이 되며, 사용자들의 불만이 가중되고 있다.

그림 2는 일반적인 계통연계형 태양광발전장치의 시스템 구성도이다. 그림에서 좌측 태양전지에서 햇빛을 받으면 직류전력이 발생하고 역변환장치에서 직류전력을 교류로 변환한 후 계통전압과 동기를 시켜 계통으로 전력을 공급한다. 주 제어기(Main Controller)는 Sensing Board에서 읽어온 시스템 파라미터 값들과 Relay Board에서 읽어온 각 접점에서의 개방 상태를 바탕으로 출력제어와 보호기능을 수행하며, 이를 위한 인버터의 스위치(그림 2에서 SW1~SW6)에 대한 개폐신호를 IGBT DRIVE를 통하여 전달하고, 보호제어에 의한 계통분리 여부 신호를 전자접촉기(그림에서의 MC)에 전달한다.

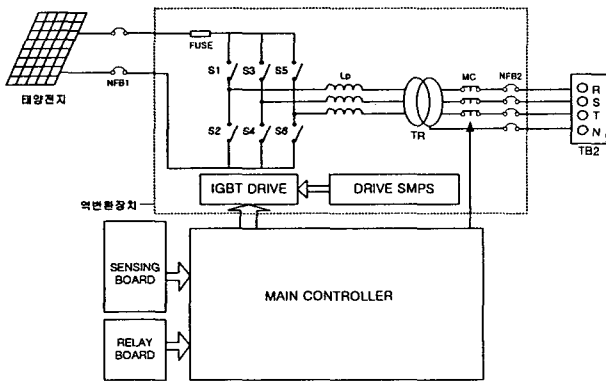


그림 2 계통연계형 태양광발전장치의 시스템 구성도  
Fig. 2 System Configuration of Grid-Interactive PV Generation

여기서, 인버터 스위치 SW1~SW6에 개폐신호를 주지 않아 전력공급이 없는 상태를 게이트 블록이라 하고, MC를 개방한 상태를 계통에서 분리되었다고 한다. 일반적인 태양광발전시스템은 계통전압이 규정전압 90%이하로 떨어지게 되면 내장된 저전압 보호기능에 의해 게이트 블록상태가 됨과 동시에 MC를 개방하여 계통과의 연계를 분리하고 역변환장치 정지 명령을 내리게 되어 있다. 고장이 발생한 경우, 계통이 복전되고 나서 일정시간 이후에 재가동시켜야만 재운전이 가능하도록 되어 있다.

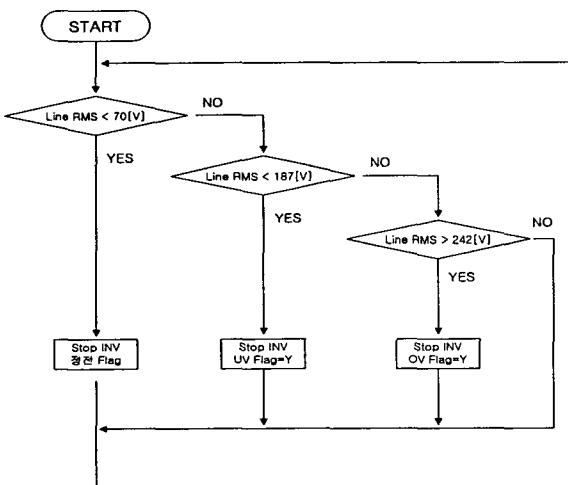


그림 3 기존 PV의 계통연계운전 보호방식  
Fig. 3 Protection Scheme of Conventional PV System

그림 3은 현재 보급중인 태양광발전장치의 정전처리 흐름도이다. 이 경우는 정상 상전압이 220V인 경우로서, 계통전압을 계속적으로 감시하면서, 계통전압이 무전압 수준(70V) 미만이 되면, 역변환장치는 정지되고, 정전선언이 된다. 계통전압이 무전압 수준보다 높으나 저전압 판별 수준(187V)보다 낮으면, 저전압 선언이 되고 역변환장치는 정지된다. 계통전압이 과전압 판별 수준(242V)보다 높으면 과전압 선언이 되고 역변환장치는 정지된다. 그림 3에서 보듯이 현재의 방식은 순간정전 또는 영구정전에 대한 구분 없이 전압이 일정수준이상으로 내려가거나 올라가면 역변환장치가 정지되고 태양광발전장치는 운전이 정지된다.

### 3. 리클로저의 동작특성을 고려한 계통연계운전 알고리즘

본 논문에서는 대부분의 순간정전이 연계선로 고장 등에 의한 리클로저의 재폐로 결과에 따른 것이라는 데에 착안하여, 정전 발생 후 리클로저의 재폐로 시도 시간 동안은 태양광발전시스템을 계통에서 분리하지 않고, 역변환장치가 게이트 블록 상태인 대기모드로 두고 계통 복전 후 바로 운전재개를 가능하도록 하며, 재폐로 시도 시간 이후에도 정전이 계속되면, 영구정전으로 판단하여 태양광발전장치의 운전을 정지하며, 계통 복전 후 계통전압을 일정 간격으로 체크하여 크기 및 주파수가 3회 연속으로 정상범위에 들면 재접속하도록 한다. 이러한 보호알고리즘의 제어 흐름도는 그림 4에 나타냈으며, 구성 및 작용은 다음과 같다.

먼저, 순간정전과 영구정전을 판별하는 방식을 설명한다. 순간정전은 배전선로에 설치된 리클로저의 재폐로 시도에 의해 발생하며, 리클로저는 최대 3회 동안의 재폐로 시도가 실패하면 영구정전으로 간주하여 선로를 영구 차단한다. 따라서 리클로저의 재폐로 시도 시간 이전까지의 정전은 순간정전으로 간주하고, 재폐로 시간 이후에도 정전이 제거되지 않으면 영구정전으로 간주하여, 순간정전과 영구정전을 판별하도록 한다. 리클로저마다 재폐로 시간 정정치가 다를 수 있으므로, 현재 우리나라에서 사용되고 있는 리클로저 재폐로 시간 정정치 중 가장 긴 시간을 기준으로 한다. 앞에서 제시한 리클로저 유형별 재폐로 시간표를 참고하면, 최대 재폐로 시간은 22초(2초+5초+15초)이므로, 리클로저의 재폐로 시도 후의 과도특성 등의 불확실성을 고려하여 24초를 순간정전 및 영구정전 판별기준 시간으로 두는 것이 타당하다. 그림 4에서 태양광발전장치는 정전시간 TIME과 순간정전 상태변수 MO, 영구정전 상태변수 PO는 0으로 초기화된 상태로 운전이 시작된다. 운전개시에 이어 태양광발전장치가 연계된 계통선로 전압의 실효치(Line RMS)를 무전압 V0와 비교한다. V0보다 작은 경우, 일단 계통정전으로 인식하여 MO=1로 순간정전이 선언되며, 타이머가 동작을 개시하면서 정전시간을 체크하게 된다. 이때 인버터는 게이트 블록 상태가 되어 전력공급을 중단하나 계통으로부터 완전히 분리하지는 않아, 계통 복전 시 언제라도 게이트 블록 해제를 통해서 정상운전이 가능한 대기모드가 된다. 정전 발생 후 시간 TIME을 순간정전 및 영구정전 판별기준 시간인 24초와 비교한다. 24초를 초과하지 않으면, 계속 순간정전으로 인식하여 인버터는 게이트 블록 상태를 유지하면서 계통전압을 감

지하여, 무전압 수준 V0와 비교하는 단계로 귀환된다. 정전 시간이 24초를 초과하는 경우, 순간정전 변수는 MO=0로 초기화되면서, PO=1로 영구정전 선언이 되고, 이와 동시에 인버터가 정지되면서 MC가 차단되어 계통으로부터 분리된다. 태양광발전장치가 계통으로부터 분리된 후에도 계통이 복전되면, 역변환장치는 계통전압을 감지하여 V0와의 비교를 수행하는 단계를 수행한다.

Line RMS가 무전압 수준을 초과하는 경우, 계통선로전압 Line Volt의 크기 및 주파수가 현재 한국전력공사에서 규정하고 있는 운전 정상범위(전압크기는 220V의 경우 207~233V, 380V의 경우 342~412V, 주파수는 59.8~60.2Hz)를 만족하는지 판별한다. 정상범위를 만족하더라도 복전 상태 여부의 안정성 있는 판별을 위하여 3회 이상 연속으로 만족하는지를 판별한다. 정상범위를 만족하지 않는 경우, 인버터는 이전의 상태를 유지하면서 무전압 판별하는 부분으로 귀환된다. 3회 연속으로 만족하는 경우, 현재 시스템이 순간정전 선언 상태인지를 판별한다. 순간정전 상태이면, MO=0으로 순간정전 선언이 해제되고, 정전시간 TIME=0으로 초기화되며 인버터의 게이트 블록이 해제된다. 인버터는 계통전압과의 동기제어를 통하여 연계운전을 계속하고 출력을 내게 되고, 무전압 판별하는 부분으로 귀환한다. 영구정전 선언 상태인 경우, PO=0으로 영구정전 선언이 해제되고, 정전시간 TIME=0으로 초기화된다. 인버터의 MC가 투입되며 게이트 블록이 해제되면서 계통전압과의 동기제어를 수행하며, 무전압 판별부로 귀환한다. 영구정전 선언 상태가 아닌 경우, 인버터는 이전 상태를 유지하면서 무전압 판별부로 귀환한다.

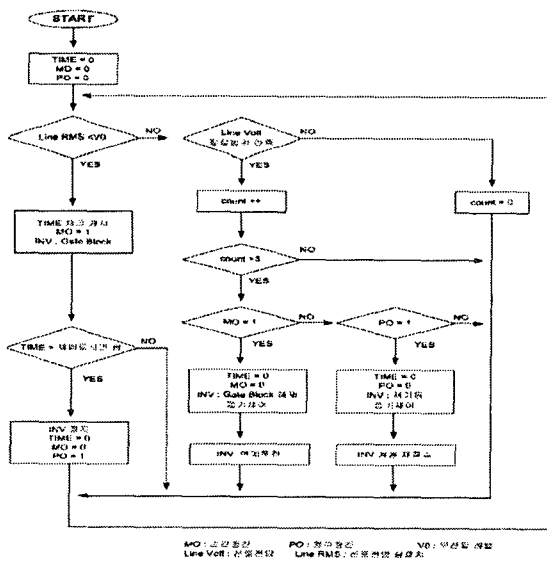


그림 4 제안된 보호 알고리즘의 흐름도  
Fig. 4 Flow Chart of the Proposed Protection Algorithm

#### 4. 계통연계형 태양광시스템 모의 모델

제안된 보호 알고리즘은 계통연계인버터에 내장되어 적절한 보호방식을 수행하도록 되어 있으며 이 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하기 위한 태양광시스템 모델에 대하여 기술한다.

#### 4.1. 계통연계형 PV 시스템의 구성

태양광발전시스템의 일반적 구성은 태양전지 어레이, 축전지와 전력변환기 등 주변기기 등의 조합에 따라 여러 가지 형태로 이용시스템을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 모델링 대상으로 현재 국내 배전계통에 보급중인 계통연계형 PV 시스템을 대상으로 하였다. 일반적인 구성은 그림 5와 같이 태양광으로부터 전기를 발생하는 태양전지 어레이, 어레이의 직류출력을 적절한 출력제어 방식을 이용하여 교류출력으로 변환하는 전력변환장치 그리고 이 교류 출력전압을 연계계통의 전압과 동일한 수준으로 승압하는 연계변압기로 이루어진다.

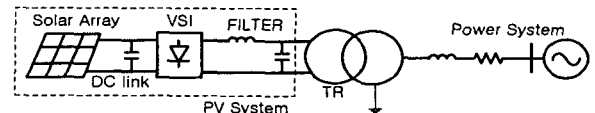


그림 5 계통연계형 PV 시스템 구성  
Fig. 5 Grid-Interactive PV System

#### 4.2. 태양전지 모델링

태양전지 모델링을 위하여 다양한 등가회로 모형이 제시되어 왔다[1,2,3]. 여기서는 이러한 본 논문에 적용된 태양전지 어레이의 모델을 간략하게 소개한다. 본 논문에서는 그림 6과 같은 전류원, 다이오드 및 직렬저항으로 구성되는 태양전지 모듈의 간략화된 등가회로 모형을 이용한다.[5]

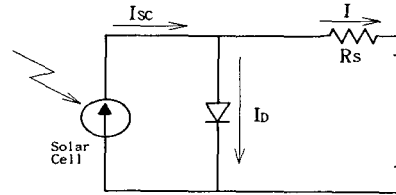


그림 6 간략화된 태양전지 등가회로 모형  
Fig. 6 Simplified Equivalent Circuit Model of PV Cell

모듈이  $N_s \times N_p$  개의 모듈로 구성된 태양전지의 동작특성은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다 [3, 4].

$$I_A = N_p I_{SC} - N_p I_0 \left( \exp \left[ \frac{V_A + I R_s}{n N_s V_T} \right] - 1 \right) \quad (12)$$

- 단,  $I_A$  : 태양전지 어레이의 출력전류 [A]
- $I_{SC}$  : 태양전지 모듈의 단락회로전류 [A]
- $I_0$  : 다이오드 포화전류 [A]
- $V_A$  : 태양전지 어레이의 출력단 전압 [V]
- $R_s$  : 직렬저항 [ $\Omega$ ]
- $n$  : 다이오드 이상정수 (1~)
- $V_T$  : 태양전지모듈의 열전위차,  $V_T = (kT/q) \cdot m$
- $k$  : 볼츠만 상수 ( $1.38e-23$  [J/K])
- $T$  : 절대온도 [K]
- $q$  : 쿨롱 상수 ( $1.6e-19$  [C])
- $m$  : 태양전지 모듈 내의 셀(cell) 수

일반적으로 제조업체에서 제공하는 태양전지 모듈 사양서에서 제시된 규격에서 얻을 수 있는 기본 데이터는 한정되어 있으며, 사양서의 정보로부터 태양전지 모델링에 필요한 모든 파라미터를 직접 얻기가 힘들다. 따라서 직접 구할 수 없는 파라미터의 경우 기본데이터와 관계식의 적절한 관계식을 이용하여 그 값을 유추할 수 있다[3, 4].

### 4.3. 계통연계 인버터 모델링

태양전지에서 발생한 직류전력은 계통연계인버터를 통해서 유효전력과 무효전력으로 계통에 투입될 수 있다. 이 계통연계 인버터는 계통으로 유입되는 적절한 출력제어와 계통 고장 또는 자체 시스템 고장 시 보호동작을 수행한다.

#### 4.3.1 인버터 회로

인버터 모델은 인버터 회로 모델과 인버터 구동을 위한 제어기 모델로 구성된다. 그림 7은 계통연계 인버터의 회로 모델을 나타낸다.

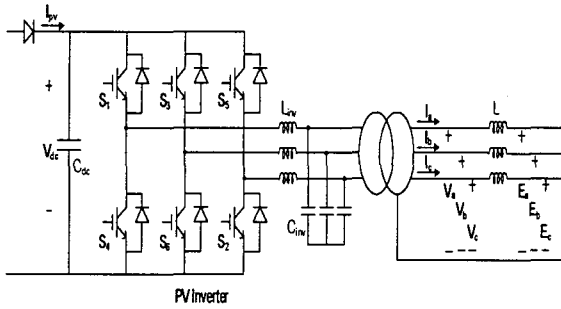


그림 7 계통연계 인버터 회로도  
Fig. 7 Grid Interface Inverter Circuit

#### 4.3.2 출력제어

계통연계인버터는 전류제어형 전압원 인버터로서 출력전류가 기준전류를 추종하도록 제어하여 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력을 제어하며, 지령된 기준전류 추종을 위해서 펄스 폭 변조방식(PWM : Pulse Width Modulation)을 이용한다. 그림 8과 9는 각각 전류제어기와 PWM 발생기를 나타낸다. 전류제어기를 구성하기 위한 다양한 방식이 있으나, 본 논문에서는 feedback linearization[5]에 기반한 간단한 전류제어기를 사용한다. 상위제어기에서 유효전력 출력 제어는 최대전력점 추종기법[1,4,6,7]이 적용되며, 무효전력제어는 역률 1로 설정된다. 각 제어루프의 실제 전류는 기준전류와 비교되며 오차신호는 PI 제어기를 통하여 증폭된다. 증폭된 오차신호는 d축 및 q축의 전압과 전류기여분과 합쳐져서 d축 및 q축의 기준 전압  $V_{d\_ref}$  및  $V_{q\_ref}$ 를 생성한다. 이는 그림 9에서와 같이 dq-abc 변환에 의해 원래 abc 평면에서의 각 a, b, c 상에 대한 기준전압  $V_{a\_ref}$ 와  $V_{b\_ref}$ ,  $V_{c\_ref}$ 로 변환된다. 펄스 폭 변조 방식 (PWM : Pulse Width Modulation)을 기반으로 이렇게 설정된 a, b, c상의 기준전압은 임의의 스위칭 주파수를 갖는 삼각파형과 비교하여 인버터의 각 IGBT에 스위칭 신호를 전달하게 된다.

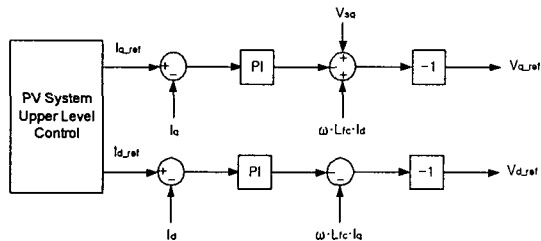


그림 8 전류제어기  
Fig. 8 Current Controller

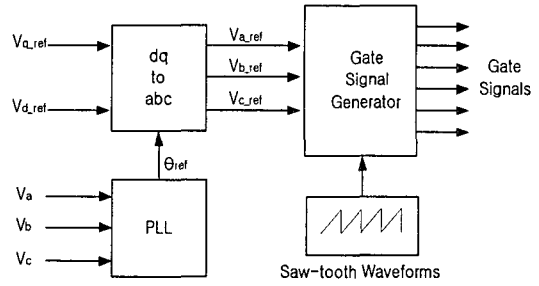


그림 9 PWM 발생기  
Fig. 9 PWM Generator

#### 4.3.3 보호제어

본 논문에서 제안된 그림 4의 알고리즘을 적용한 계통연계 인버터의 보호제어 절차는 그림 10과 같다. 연계계통에 고장 발생 시 과전압/저전압 또는 과전류 검출기능에 의하여 고장을 감지하고, 인버터는 게이트 블록 상태가 되며, 동시에 인버터의 연계 MC 스위치를 차단하여 계통으로부터 분리한다. 순간 또는 영구정전 여부를 검출하여, 순간정전인 시 고장이 제거되고 난 후 재접속 절차가 진행되며, 영구정전인 경우 인버터가 정지되고, 계통 복전 후 시스템은 재 기동하게 된다. 재접속 절차는 고장분리와 역순이며 게이트 블록이 해제된 후 영(0) 전류제어를 실시하여 전류제어가 원활하게 수행되는지 확인한 후 정전압제어를 거쳐서 최대전력점 추종제어로 복귀한다.

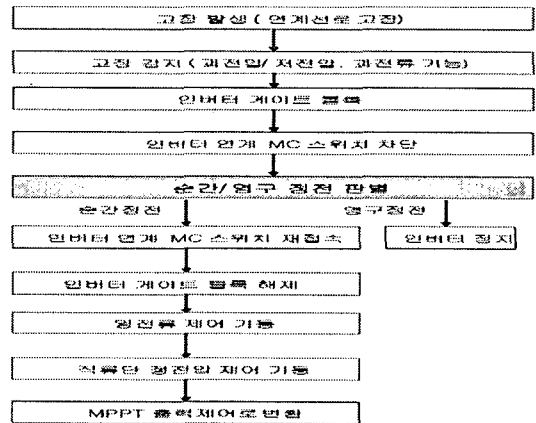


그림 10 계통고장 시 보호제어 절차  
Fig. 10 Protection Control Process for Network Fault

## 5. 계통연계 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 효용성을 입증하고자 PSCAD/ EMTDC 프로그램[8]을 활용하여 모의를 수행하였다. 그림 11은 모의한 계통도를 나타낸다. 변전소(S/S)를 통해 나가는 22.9kV 피더에는 두 대의 리크로저(RC1과 RC2)가 설치되어 있으며, 태양광시스템은 RC2 후단에 22.9/0.38kV 주상변압기를 통하여 연계되어 있다. RC1과 RC2의 사이인 1번 구간에서 3상 고장이 발생하였을 때를 기준으로 태양광인버터의 보호제어 동작을 모의하였다. 두 리크로저 간의 보호협조는 원활하게 수행되고 있으며, 두 리크로저의 순시동작 시간은 0.1초(6cycle), 지연동작 시간은 0.5초 (30cycle)이고, 재폐로 시간은 표 2와 같다고 가정한다. 또한 리크로저가 투입될 때 돌입전류에 의한 리크로저의 동작은 적절한 협조방식에 의해 발생하지 않는다고 가

정한다. 1초 순간에 고장이 발생하여 3초 후 고장이 제거될 때 태양광인버터의 보호동작 특성을 모의하였다.

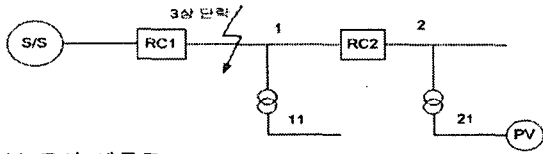


그림 11 모의 계통도

Fig. 11 Simulation System Diagram

표 2 리클로저의 재폐로 시간

Table 2 Reclosing Time of Recloser

| 구분  | 순시 후 | 순시 후 | 지연 후 | 지연 후 |
|-----|------|------|------|------|
| RC1 | 2초   | 2초   | 15초  | 영구차단 |
| RC2 | 2초   | 2초   | 영구차단 | -    |

그림 12는 고장발생과 리클로저에 의한 고장제거 시 제안된 알고리즘에 의한 인버터의 보호동작을 나타낸다. 태양광 시스템의 스위치 변수명은 표 3을 참고한다. 1초 순간에 고장이 발생하여 PV 인버터는 바로 고장을 감지하고 게이트 블록 신호를 발생하고 MC(그림 2 참고)를 차단하였다. 게이트 블록 신호에 의해 인버터 각 스위치(S1-S6)에 전달되는 신호는 모두 0로 되어 인버터의 출력이 차단되었다. 또한 리클로저 RC1은 그림 12에서와 같이 고장전류를 감지하고 개방된 후 2초 후 재폐로가 시도되지만 고장이 제거되지 않은 상태에서 다시 개방된다. 고장은 3초간 지속된 후에 제거되나 RC1이 2차 재폐로를 시도하여 정상전압을 감지하고 투입상태로 된 후에 RC1 후단의 구간들이 정상전압으로 복귀된다. 투입되는 순간(5.2초) 돌입전류가 발생하나, 지속시간이 0.02초 미만으로 일반적인 순시동작시간인 0.1초에 못 미치므로 리클로저에 오동작을 일으킬 우려는 없으나 지속시간이 길어질 경우 적절한 협조방식을 사용하여야 한다.

표 3 그림 12의 변수명과 신호

Table 3 Variable Names and Signals for Figure 12

| 변수             | 신호             |
|----------------|----------------|
| FLT            | 선로고장 인가 신호     |
| FLT Detect     | 고장감지 신호        |
| RC1            | 리클로저 RC1 동작 신호 |
| GATE_SG        | 인버터 게이트 신호     |
| MC             | 연계 MC 동작       |
| En_PWR         | 출력제어 개시        |
| MPPT           | 최대출력제어 개시      |
| S1-S6          | 스위치 ON-OFF     |
| Fault_Duration | 인버터 차단 시간      |
| Ia1, Ib1, Ic1  | 구간 1의 전류       |
| Ea, Eb, Ec     | 인버터 계통측 전압     |
| Va, Vb, Vc     | 인버터 출력전압       |
| Ia, Ib, Ic     | 인버터 출력전류       |
| Pinv, Qinv     | 인버터 유/무효전력     |

태양광인버터는 24초간 게이트 블록 상태로 대기하고, 고장 발생 후 24초 후에 계통전압이 정상전압(Ea, Eb, Ec)으로 복귀한 것을 감지하고, 재접속한다. 그림 13은 재접속 시의 PV 시스템의 스위치들의 동작과 인버터 출력전압, 출력전

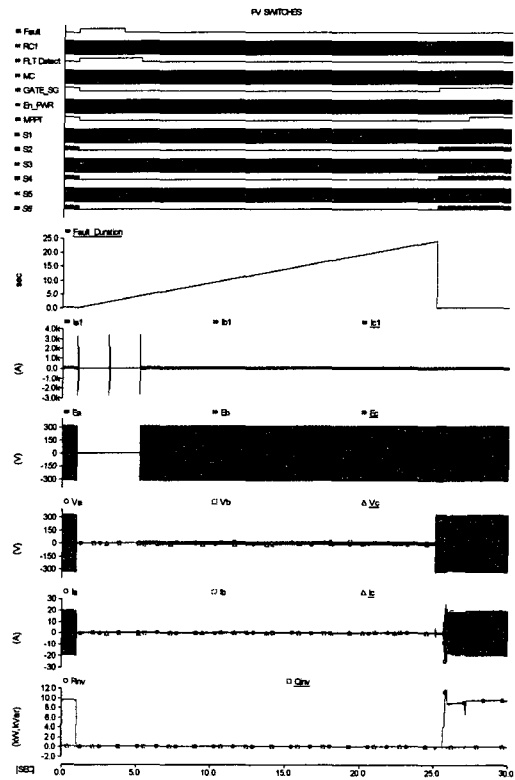


그림 12 고장 시 인버터 보호동작 모의

Fig. 12 Simulation of Inverter Protection Performance responding to Network Fault

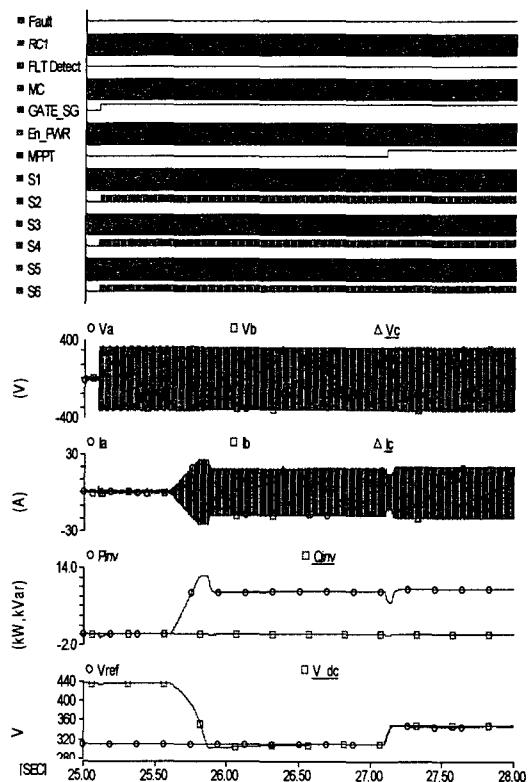


그림 13 재접속 시 과도특성

Fig. 13 Transient behavior of Grid Re-connection

류, 유/무효전력 출력 및 직류단 전압의 과도특성을 나타낸 것이다. 재접속 시에 약간의 과도전류가 흐르고 곧 영 전류 제어에 의해 계통유입전류는 0.5초간 영(0)을 유지한다. 영전류 제어를 통하여 전류제어가 제대로 수행되면 곧 소프트 스타트 기동이 시작되어 인버터는 완만하게 출력을 재 발생하고, 이 때 직류단 전압을 정전압으로 제어하고 정전압제어가 원활하게 수행되므로 1.5초 후에 곧 최대출력제어로 전환한 뒤 운전을 지속한다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지지원 중에서도 최근 국내에서 가장 보급률이 높은 태양광발전시스템이 배전선로에 연계되어 운전 시 기존 배전선로에 설치되어 있는 리클로저의 동작 특성을 고려한 태양광발전시스템의 연계운전 알고리즘을 개발하여 제시하였으며, 본 논문에서 제안된 알고리즘의 효용성을 검증하고자 PSCAD/EMTDC 프로그램을 활용하여 태양 전지, 인버터 및 연계배전계통을 모델링하고 리클로저의 동작 특성 및 연계 태양광발전시스템의 응답 특성을 시뮬레이션 하여 그 결과를 토대로 제안된 알고리즘의 효용성을 검증하였다. 향후 계속적으로 연구를 수행하여 본 논문에서 제안된 알고리즘을 내장한 인버터를 직접 제작하여 실 계통에 연계한 적용시험을 통하여 상업화까지를 계속적으로 연계시키고자 한다. 추후 계통연계형 태양광발전시스템의 실 계통 적용 시 본 논문에서 제안된 알고리즘을 내장한 인버터를 활용한다면 보다 효율적인 태양광발전시스템의 보급으로 더욱 활성화가 기대되며, 지속적인 연구를 통해 제안된 알고리즘을 내장한 인버터를 개발하여 실 계통에도 적용하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Minwon Park and In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, March 2004.
- [2] C. K. Sao, P. W. Lehn, M. R. Iravani, and J. A. Martinez, "A Benchmark System for Digital Time-Domain Simulation of a Pulse-Width-Modulated D-STATCOM", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002, pp. 1113-1120.
- [3] Mohammad A. S. Masoum, Hooman Dehbonei, and Ewald F. Fuchs, "Theoretical and Explanation Analysis of Photovoltaic Systems With Voltage and Current Based Maximum Power-Point Tracking", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, December 2002, pp. 514-522.
- [4] L Zhang, A Al-Amoudi, Yunfei Bai, "Real-time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic Systems", Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475.
- [5] S.K.Kim, E.S.Kim, "PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의해석", 대한전기학회 논문지 54A권 3호, 2005년 3월, pp. 107-116.

- [6] Luis Castaner and Santiago Silvestre, Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.
- [7] Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems. CRC Press, USA, 1999.
- [8] Manitoba HVDC Research Center, PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software User's Manual, 1998.

## 저 자 소 개



### 김 응 상 (金應相)

1962년 6월 21일 생. 1991년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재, 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1330

E-mail : eskim@keri.re.kr



### 김 슬 기 (金슬기)

1972년 5월 7일 생. 1998년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재, 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1332

E-mail : blksheep@keri.re.kr