

## 계통연계형 태양광전원 투입에 따른 역률 분석

김상협\*, 이상봉\*, 류승현\*\*  
 성균관대학교, 영동대학교

### A Power Factor Analysis due to Interconnecting Photovoltaic Resource

Sang-Hyub Kim\*, Sang-Bong Rhee\*, Seung-Heon Lyu\*\*  
 Sungkyunkwan University\*, Youngdong University\*\*

**Abstract** - Photovoltaic(PV) resource connected in the power system can be affect to the power quality. To analyze the power quality, this paper simulate the variation of power factor by PV resource connected to the low voltage system. The power factor calculator and full-bridge inverter of PV system are modeled by EMT/P/MODELS. Simulation results according to the PV capacity and load are presented.

#### 1. 서론

현재 급증하는 부하에 대한 원만한 전력공급을 위해 새로운 대용량의 발전소 건설 외에 계통연계형 태양광 발전시스템, 열병합 발전 시스템, 연료전지 발전 등과 같은 소용량의 분산형 전원의 도입이 진행 중이다. 이러한 분산형 전원 중 특히 계통연계형 태양광전원은 무한한 청정 에너지원이라는 점 때문에 새로운 에너지원으로 각광 받고 있다. 종래의 배전계통에 있어서 전력조류는 변전소에서 선로말단을 향한 단방향이었지만, 태양광 전원과 같은 분산형전원이 연계된 배전계통의 경우에는 그 출력용량의 여부에 따라 양방향의 전력조류가 발생할 가능성과 계통운용상 여러 가지의 문제점이 야기될 수 있다[1].

태양광전원들의 직류발전시스템은 인버터로 직류/교류 변환을 하기 때문에 고조파가 발생하게 된다. 고조파의 발생량은 인버터의 방식에 따라 다르지만. 그것이 계통의 허용량을 초과하게 될 경우 전력계통에 접속되어 있는 타 부하기기의 동작에 악영향을 초래할 우려가 있다. 그러므로 이러한 태양광전원과 같은 분산형 전원의 경우에 대해서는 고조파 억제 대책을 확실히 강구해 둘 필요가 있다[2].

역률에 관해서는 계통연계형 태양광전원은 태양광전원 자체의 역률을 단위역률로 운전하는 쪽으로 연구되었으나 태양광전원과 같은 분산형 발전시스템을 계통과 연계하여 태양광전원의 자체 역률을 단위 역률로 운전 할 경우 계통의 역률을 저하시키는 요인이 된다. 특히 태양광 전원에서 유효전력 공급이 증가함에 따라 계통전체의 역률저하 현상이 급격히 발생한다[2].

따라서 본 논문에서는 계통연계형 태양광 전원에 의한 역률변동을 분석하고자 다음과 같이 모의시험 하였다. 첫 번째는 태양광 용량에 따른 계통의 역률변동, 두 번째는 태양광 연계점에서의 부하 변화에 따른 역률변동 분석을 하였다.

#### 2. 계통연계형 태양광전원

태양광전원이 계통에 연계된 경우 태양전지에서 생산된 전력을 태양광전원이 접속된 지점의 부하에 인버터를 이용해 공급하게 되고 이때, 잉여 전력은 계통 접속점을 통해 전력을 공급한다. 공급되는 잉여 전력은 태양광전

원 내부의 인버터에 의해 제어되며, 전압의 품질, 전류의 품질이 결정된다. 계통 접속점은 다른 부하가 연결되어 있으며 이때 연결되어진 부하의 종류에 따라 그 점에서의 역률이 측정된다[3].

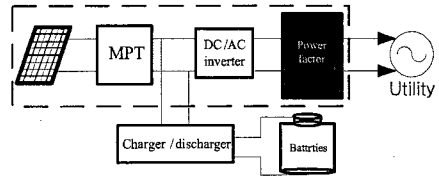


그림 1. 역률 측정기가 포함된 태양광전원 모델

#### 2.1. 태양광전원 등가회로 해석

계통연계형 태양광전원은 그림 2와 같이 배전계통과 연계하여 대규모 발전소를 보완하는 분산전원의 역할을 한다. 모의시험에 사용된 계통구성은 다음과 같다. 배전 계통 전압은 22.9[kV]이고 선의 종류는 EC 160\* N AL 95를 사용하였으며 선로길이는 4[km]이다. 모선 2에서 사용하는 부하는 10[MVA]에 역률 0.9를 사용하였으며 2차 측 계통연계점에 있는 모선 3의 부하는 10[kVA]에 역률 0.9를 사용하였다.

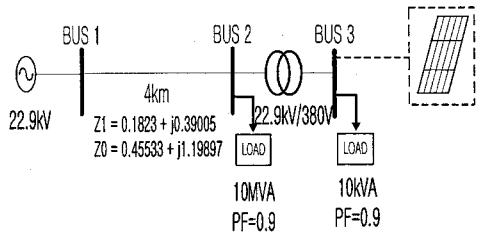


그림 2. 계통연계형 태양광전원 등가회로

#### 2.2. 태양광 PWM 인버터

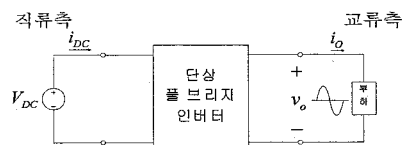


그림 3. 단상 풀 브리지 인버터 모델

그림 3은 단상 풀 브리지 인버터 모델이며, 태양전지와 같은 단일 직류 입력전원으로 부터 단상 교류 출력전압을 발생하여 부하에 공급한다. 태양광전원의 모델링 시 태양광으로부터 발생하는 직류전압을 교류로 변환하는 인버터의 특성분석이 가장 중요하다. 인버터의 특성분석이 가장 중요하다. 본 논문에서는 다음과 같은 PWM(Pulse Width Modulation)제어를 이용해 인버터를 모델링 하였다.

### 2.2.1. 정현파 PWM 제어

정현파 PWM 제어는 인버터의 스위칭 순간이 일정한 규칙에 따라 실시간적으로 결정되는 출력전압 제어방식으로 매 순간 순시적으로 출력전압의 기본파 성분의 크기와 주파수를 제어할 수 있다. 단, 정현파 PWM 제어에서 고조파 성분의 크기는 제어되지 않는다. 그러나 스위칭 패턴의 발생 메커니즘에 일정한 제한을 가지고 출력전압의 한주기당 스위칭의 횟수를 증가시킴으로써 문제가 되는 저차 고조파의 발생을 억제하거나 제거하여 원하는 제어성능지수를 만족시킬 수 있다[4].

$$G_v = \frac{\text{부하상전압의 기본파의 스윙폭}}{\text{직류입력전압의 크기}} \quad (1)$$

식 1은 직류전압을 단상 또는 3상의 교류전압으로 변환하는 인버터에서 인버터 이득(Inverter-Gain)  $G_v$ 는 직류 입력전압과 교류 출력전압의 크기의 비를 나타낸다.

$$SUR = \frac{S_I}{qV_T I_T} \quad (2)$$

식 2는 스위치 활용률을 나타낸 것이다. 전력반도체 스위치의 전력용량은 스위치에 인가되는 최대전압  $V_T$ 와 스위치로 흐르는 최대전류  $I_T$ 의 곱에 비례한다.  $q$ 개의 스위치로 구성된 인버터의 용량은  $S_I$ 라고 한다[4].

### 2.2.2. PWM 동작원리

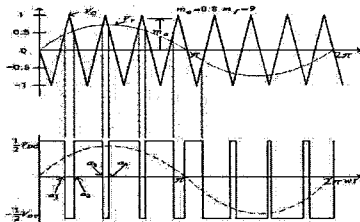


그림 4. PWM 제어신호

그림 4는 정현파의 기준파(Reference Waveform)  $V_r$ 과 삼각파의 반송파(Carrier Waveform)  $V_c$ 를 비교하여 스위칭 순간을 결정하는 방법을 나타내고 있다[4].

$$m_a = \frac{\text{기준파의 진폭}}{\text{반송파의 진폭}} \quad (3)$$

$$m_f = \frac{\text{반송파의 주파수}}{\text{기준파의 주파수}} \quad (4)$$

식 3은 기준파의 진폭변조지수  $m_a$ 를 나타낸 것이다. 주파수  $f(1=2\pi/w)$ 인 정현파이고, 반송파는 진폭 1, 주파수  $f_c(1=2\pi/c)$ 인 삼각파이다. 또한 주파수 변조지수  $m_f$ 는 식 4와 같이 나타낼 수 있다[4].

기준파와 반송파의 크기를 비교하여 단상 풀 브리지 인버터 스위치  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 를 제어하는 방법은 다음과 같다[4].

$$V_r > V_c: S_1, S_3 \rightarrow on / S_2, S_4 \rightarrow off \rightarrow S_{HB} = \frac{1}{2}, V_0 = \frac{V_{DC}}{2} \quad (5)$$

$$V_r < V_c: S_1, S_3 \rightarrow off / S_2, S_4 \rightarrow on \rightarrow S_{HB} = -\frac{1}{2}, V_0 = -\frac{V_{DC}}{2} \quad (6)$$

식 5와 같이 기준파가 반송파보다 크기가 더 크면 스위치는  $S_1, S_3$ 이 on이 되고  $S_2, S_4$ 이 off가 된다. 기준파가 반송파보다 파형의 크기가 작을 때 식 6과 같이  $S_1, S_3$ 은 off가 되고  $S_2, S_4$ 는 on 된다.

### 2.3. EMTP를 이용한 역률측정기

계통역률을 실시간으로 계산하고자 그림 1에서와 같이 EMTP/MODELS를 이용해 역률을 계산하였다. 역률측정에 관한 기본개념은 전압과 전류의 영점교차시간을 이용하여 계산되도록 하였다[5].

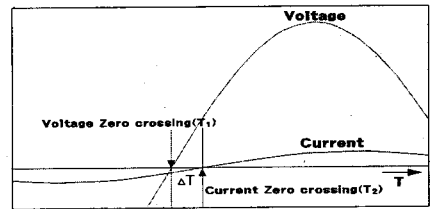


그림 5. ZCP를 이용한 역률측정기

그림 5와 같이 역률 측정기는 ZCP(Zero-Crossing Point)를 이용하여 입력전압, 전류의 영점교차 후 moving window를 이용해 계통운전 중에는 계속 역률을 모니터링 하도록 하였다.

$$\text{Time Difference } \Delta T = |T_1 - T_2| \quad (7)$$

역률 계산은 식 (7)을 이용하여 빠른 연산이 가능하도록 하였고 여기서,  $T_1, T_2$ 는 각각 전압, 전류의 ZCP에서의 시간이다. 시간지연인  $\Delta T$ 를 구하기 위해 식 (8)을 이용해 역률을 계산 하였다.

$$\theta = (360 \times \Delta T) / 1\text{주기 Time, Power Factor (PF)} = \cos \theta \quad (8)$$

### 2.4. 태양광전원 투입에 따른 역률변화

그림 6은 계통연계형 태양광전원에 따른 역률을 나타내었다. X축은 유효전력 P 성분이고, Y축은 무효전력 Q 성분이다.  $P_1$ 은 계통연계형 태양광전원을 투입 전 유효전력이고,  $P_2$ 는 계통연계형 태양광 전원이 투입 후의 유효전력을 나타낸 것이다.  $P_3$ 는 배전계통에 대응량의 태양광 전원이 유입됨에 따른 유효전력을 나타낸 것이다. 계통의 무효전력 Q는 항상 일정하며, 배전계통에 도입되는 계통연계형 태양광전원의 유효전력 공급으로 역률을 저하되는 특성을 갖는다. 전력계통의 운전역률을 어떻게 설정할 것인가는 배전계통에 도입되는 그 규모의 크기에 따라 선로의 전압변동, 손실, 무효전력증가 등의 요소와 관련지어 결정해야할 대단히 중요한 요소이지만 본 논문에서는 태양광 전원 투입에 따른 역률분석만을 모의하였다.

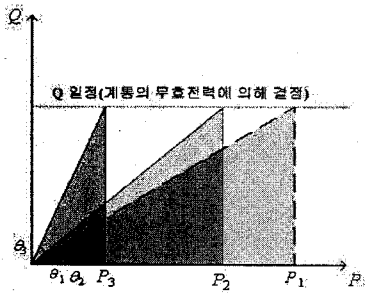


그림 6. 유효전력 변화에 따른 역률변화

### 3. 사례연구 결과

표 2와 그림 7는 태양광전원의 투입 용량에 따른 역률 분석 결과이다. 초기 역률은 0.9로 운전 중이다. 태양광전원은 C상에 투입되도록 하였다. 결과에서와 같이 태양광전원의 용량이 증가됨에 따라 계통의 역률이 저하됨을 확인할 수 있으며 이에 따른 역률 보상이 필요함을 알 수 있다.

<표 2> 태양광전원 투입 용량에 따른 역률분석

|   | [kVA]  | 태양광전원용량[kW] | PF         |
|---|--------|-------------|------------|
| 1 | 221.24 | 16.035      | 0.9→0.8329 |
| 2 | 221.24 | 34.19       | 0.9→0.8093 |
| 3 | 221.24 | 51.888      | 0.9→0.7935 |
| 4 | 221.24 | 64          | 0.9→0.7878 |
| 5 | 221.24 | 145         | 0.9→0.7718 |

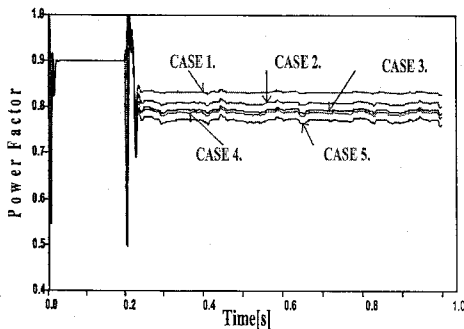


그림 7. 태양광 용량에 따른 역률

표3과 그림 8은 부하변화에 따른 역률분석을 시행하였다. 역률분석을 위해 EMTP는 1 초간의 모의를 진행하였고, 태양광전원 용량은 고정인 상태에서 부하용량이 늘어날수록 계통의 역률은 증가함을 알 수 있다.

<표 3> 부하변화에 따른 역률분석

| Case[kVA] | 부하 임피던스         | PF          |
|-----------|-----------------|-------------|
| 1         | 129.96+j62.9425 | 0.9→0.76232 |
| 3         | 43.317+j20.979  | 0.9→0.77454 |
| 5         | 25.992+j12.5885 | 0.9→0.78485 |
| 7         | 18.857+j8.9     | 0.9→0.79472 |
| 10        | 12.916+j6.294   | 0.9→0.80439 |

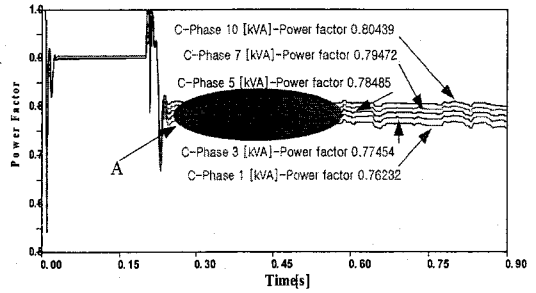


그림 8. 부하변화 따른 역률

그림 9는 그림 8의 A지점을 자세하게 분석하기 위해 확대하였다.

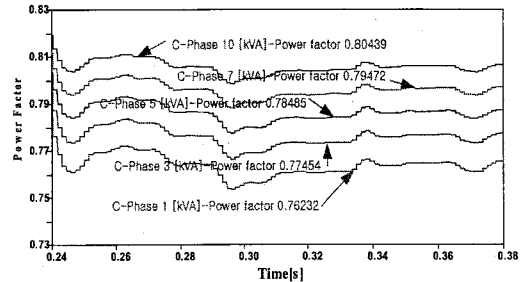


그림 9. 부하변화에 따른 역률변화 확대

### 4. 결론

본 논문에서는 계통연계형 태양광전원의 투입에 따른 역률변화를 분석하였다. 태양광전원, 부하변동에 따른 역률을 EMTP를 이용해 분석하였으며 이에 따른 서로간의 영향을 비교하였다. 계통의 부하가 고정인 상태에서 태양광전원의 용량증가는 계통역률을 저하시키는 요인임을 확인하였으며 이에 따른 역률보상대책이 필요함을 확인하였다. 향후, 태양광전원의 MPT(Maximum Power Tracking)와 같은 정확한 모델링을 통해 실제 계통적용을 위한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 출연금으로 수행한  
특성화대학원사업의 연구결과입니다.

(영문 : This work is outcome of the fostering project of the Specialized Graduate School supported financially by the Ministry of Knowledge Economy (MKE)

### [참 고 문 헌]

- [1] 조영준 김홍성 목형수 "계통연계형 태양광 발전 시스템에서의 전원측 역률 개선" pp. 17-19 전력전자학회대회 논문집 1997년 7월
- [2] 김호용 김재연 김응상 "분산형전원의 배전계통 도입전망과 대책" 전기학회지 제45권 10호 pp. 23-31
- [3] Yu-Kang Lo, Jin Yuan Lin, Tin-Yuan Wu, "Grid-connection Technique for a Photovoltaic system with power factor correction", IEEE ,16-18 Jan. 2006.
- [4] 노의철 "전력전자공학" 동일출판사
- [5] 김상협, 이상봉, 김철환, 류승현, "EMTP를 이용한 태양광 연계 계통의 역률제어기 구현", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2008년 7월