

# 비선형 부하 보상을 고려한 고정자 좌표계 제어 기반의 계통 동기화 개선

임경배<sup>1</sup>, Desmon Petrus Simatupang<sup>1</sup>, 최재호<sup>1</sup>  
 충북대학교<sup>1</sup>

## Seamless Grid Synchronization of PR control based Voltage Controlle with Considering the Non-linear Load under Islanded Mode

Kyungbae Lim<sup>1</sup>, Desmon Petrus Simatupang<sup>1</sup>, Jaeho Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

### ABSTRACT

본 연구는 독립 운전 모드의 P+MR 기반의 전압 제어기의 계통 동기화 방식을 조사한다. 계통 복전 후 계통과의 재연결을 위한 계통 동기화가 고정자 좌표계 하에서 제어가 수행되는 경우, 독립운전하에서 정전압, 정주파수를 가지는 교류 지령 전압은 계통 전압으로 대체되는데 이 부분에서 고정자 좌표계 제어하의 현재 출력 전압과 계통 전압의 위상 차이에 기인하여 상당한 전압 오차가 발생할 여지가 있고 이러한 전압 오차 발생은 심각한 전압 과도 상태를 야기할 수 있게 된다. 추가적으로, 인버터의 출력 단에 연결된 부하가 비선형 부하라면 부하에서 생성되는 고조파에 기인하여 위에 언급된 전압 과도 상태가 더욱 심각해질 수 있다. 본 논문에서는 위에 언급된 문제를 해결하기 위한 대책으로 독립 운전 모드하에서의 전압 제어를 위해 사용되는 P+MR 제어 기반의 비선형 부하를 고려한 매끄러운 계통 동기화 방식이 제안되었다. 제안된 매끄러운 계통 동기화 방식은 실험 결과를 통해 검증된다.

### 1. 서론

계통 연계 인버터는 계통 연계 모드에서 전류 제어를 필요로 하며 제한된 고조파 전류 범위 내에서 전력을 공급하도록 할 의무를 가지며 이러한 고조파나 리플은 인버터의 출력에 LC 또는 LCL 필터를 연결함으로써 경감이 가능하다. 그러나 계통 연계형 인버터는 계통사고가 발생하거나 전략적인 독립운전이 필요될 시 계통과 분리된 후 독립운전모드로 전환되고 전압원으로 동작되어야 한다 [1]. 반면에 이러한 독립운전모드에서의 인버터는 의도적 독립 운전이 불필요해지거나 계통이 사고로부터 복전되었을때 독립운전으로 구동되고 있다가 계통과 동기화된 후 재병입함으로써 계통과 연계되어 운전되어야 한다. 이를 위해 계통과 연계되기 전, 인버터는 복전된 계통 전압의 위상에 출력 전압을 동기화 시켜야 한다. 그렇지 않으면 계통과 인버터 출력 전압간의 서로 다른 위상으로 인한 순시 전압 차이로 인해 심각한 과도 응답이 야기될 수 있다.

이때 PLL 기법의 적절한 사용은 계통 동기화를 위한 필수적인 기법 중 하나로 간주되어 왔다. 이러한 PLL 기법을 활용하여 [2,3]에서는 독립운전 모드로부터 계통 연계 모드로 전환하기 위하여 PI 를 활용한 동기좌표계 기반의 내부 전압 루프를 갖는 간접 전류 방식을 통해 적절한 계통 동기화를 실현하였다. 하지만

[2,3]에서는 내부 전압 루프 지령 전체를 외부 전류 루프 제어기 출력으로부터 획득하기 때문에 독립운전과 계통 연계운전간의 독립성이 결여되며 이로 인해 계통연계모드에서 독립 운전으로 전환된 후 출력 전압 매그니튜드는 외부 전류 루프 제어기 출력에 위치한 리미터의 문턱값으로 제어가 유지되고 있다.

따라서 [4]에서는 PR 기반 간접 전류 제어 방식을 활용하고 전압 지령을 따로 전향보상함으로써 독립 운전 시 유동적인 제어가 가능하도록 하였다. 또한 고정자 좌표계 제어의 경우 계통 동기화 시작 시점에서 계통 전압과 인버터 출력 전압의 서로 다른 위상으로 인한 막대한 교류 전압 오차로 인해 심각한 과도 전압 발생이 야기된다는 점을 이슈화하였고 고정 d-q 값 할당 방식을 추가함으로써 이 문제를 대폭 해결하였다. [2,3]와 마찬가지로 고조파 보상을 사용하지 않기 때문에 비선형 부하로 인한 전압 왜곡에 대처하기 힘들다.

하지만 위에 언급된 [2,3,4]는 인버터가 비선형 부하를 공급하는 경우, 고조파 보상이 적용되지 않았으며 특히 [3]의 경우 고조파 전압 강하에 대한 분석을 통한 전압 지령 획득이 어렵다는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 고조파 보상의 적용에 있어 장점을 갖는 PR 제어를 활용한 [4]에 고조파 보상을 추가하여 고정자 좌표계 기반의 고조파 보상을 고려한 매끄러운 계통 동기화를 실현하고자 하였다. 제안된 방식은 실험실 규모의 실험을 통해 입증되었다.

### 2. 본론

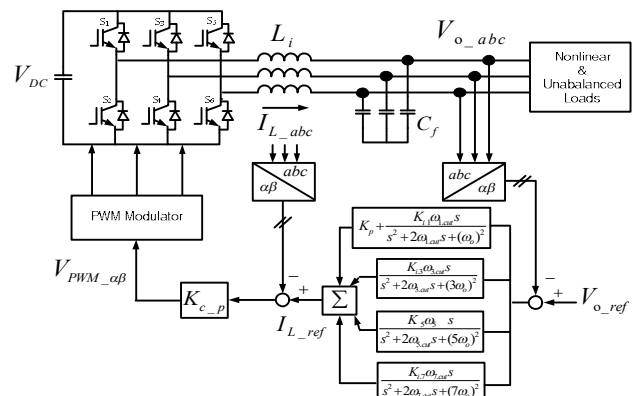


그림 1. 독립운전모드의 P+MR 기반의 멀티루프 제어방식.

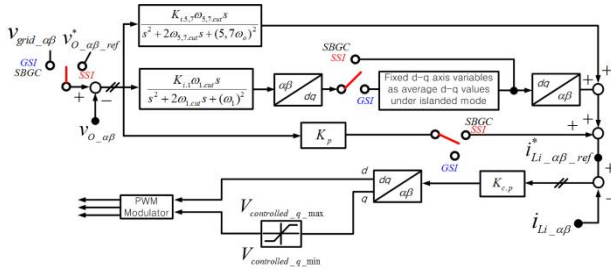


그림 2. 독립운전모드의 P+MR 기반의 멀티루프 제어방식. SSI(Steady State of islanded mode)→SBGS(Standby mode of grid synchronization)→GSI(Grid synchronization of islanded mode)→SBGC(Standby mode of grid connection)).

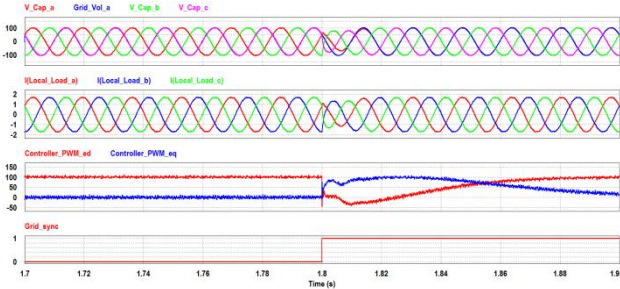


그림 3. 선형부하 연결 시 그림 2의 계통 동기화 절환을 위한 고정 d-q 값 할당 방식 부제시 파형(위부터: 출력전압, 부하전류, PWM 전압, 계통 동기화 신호)

서론에서 언급한 것처럼 본 논문에서는 독립운전모드 내 계통 동기화 과정 시 독립적인 제어가 가능하도록 전압 지령을 전부 간접 전류 제어의 외부 전류 루프의 제어출력으로 얻는 것 대신 제어 출력에 지령전압 전향보상값을 추가하여 외부 전류 루프의 제어 작용을 경감하고 동시에 독립운전 시 제어의 독립성을 증대시켰다.

본 논문에서는 이에 추가적으로 이러한 전압 전향보상이 추가된 고정자 좌표계 제어 시 계통 동기화로의 절환 특성을 개선한 [4]에 그림 1의 보다 단순한 형태의 공진 제어 기반 고조파 보상 기법을 결합하여 그림 2와 같이 제어기를 구성하였다. 그림 2에서 확인가능하듯 기본파에 대해서 기존의 고정 d-q 값 할당 방식을 활용하여 계통 동기화 시 인버터 출력과 계통간의 서로 다른 위상에 의해 발생하는 순간적인 막대한 전압 오차에 기인한 계통 동기화 절환 특성 저하에 대처하였고 비선형 부하 연결에 의해 발생하는 5,7 차 고조파에 대하여 그림 2와 같이 각 차수에 해당하는 공진 제어기를 추가하여 제어 출력에 전향보상함으로써 정상상태 전압 품질을 개선하였다. 따라서 제안된 방식을 통해 정상상태 전압 품질과 계통 동기화가 동시에 개선되는 효과를 획득가능하다.

### 3. 실험 및 시뮬레이션

그림 3은 선형부하 연결되었을 때 고정자 좌표계 기반의 고정 d-q 값 할당 방식 부제 시 시뮬레이션으로 계통 동기화 시작 시 인버터 출력과 계통과의 위상차이로 인해 발생하는 막대한 오차에 기인하여 출력 전압 과도 특성이 저하됨을 확인할 수 있다. 그림 4와 그림 5는 각각 비선형 부하 연결 시 고조파 보상 포함 여부에 따른 그림 2의 고정값 d-q 할당 제어 기반의 실험결과를 보여준다. 그림 4에서 보여지듯,

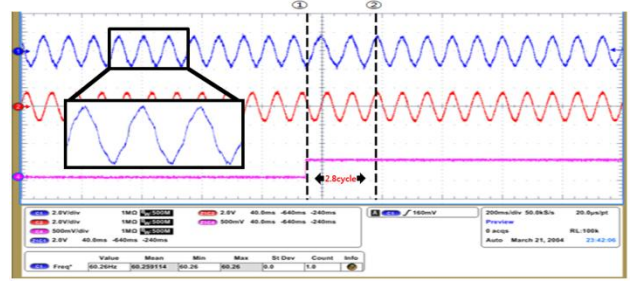


그림 4. 비선형 부하 연결 시 고조파 보상이 미포함된 그림 2의 계통 동기화 방식을 활용한 실험 결과(인버터 출력전압, 계통전압, 계통 동기화 신호)

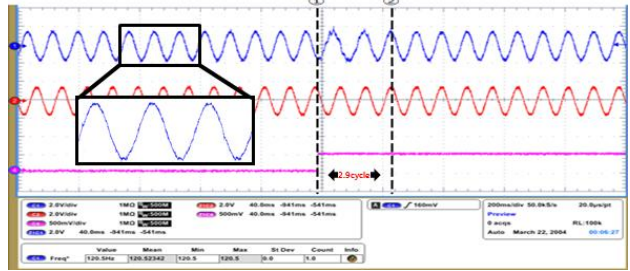


그림 5. 비선형 부하 연결 시 고조파 보상이 포함된 그림 2의 계통 동기화 방식을 활용한 실험 결과 (인버터 출력전압, 계통전압, 계통 동기화 신호)

고조파 보상 방식을 사용하지 않기 때문에 계통 동기화 시 매끄러운 절환 특성을 보이나 계통동기화를 포함한 독립운전모드 시 정상상태 전압이 왜곡되었다.

그림 5에서는 그림 4와 같이 그림 2의 고정 d-q 값 할당 방식을 사용하고 있으며 그림 4와 다르게 고조파 보상을 추가함에 따라 매끄러운 모드 절환 뿐만 아니라 정상상태 전압 품질 역시 개선된 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문은 비선형 지역부하가 연결된 고정자 좌표계 제어 기반의 인버터가 계통 동기화 모드로 절환된때의 제어 방식에 대해 다루고 있다. 제안된 고조파 보상과 d-q 값 할당 방식 기반의 고정자 좌표계 제어가 결합된 방식을 활용하여 계통 동기화 시 매끄러운 모드 절환과 정상상태 출력 전압 왜곡 개선이 동시에 실현될 수 있음을 PSIM 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다.

### 참고 문헌

- [1] K. Lim, J. Jang, J. Lee, J. Kim, and J. Choi, "P+ multiple resonant control for output voltage regulation of microgrid with unbalanced and nonlinear loads," in Proc. Of IPEC' 2014-ECCE Asia, 21G2-2, 2014.
- [2] Z. Liu and J. Liu, "Indirect current control based seamless transfer of three-phase inverter in distributed generation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 29, No. 7, pp.3368-3383, Jul. 2014.
- [3] J. Kwon, S. Yoon, and S. Choi, "Indirect current control for seamless transfer of three-phase utility interactive inverters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 27, No. 2, pp. 773-781, Feb. 2012.
- [4] K. Lim and J. Choi, "Output voltage regulation for harmonic compensation under islanded mode of microgrid," Journal of Power Electronics, Vol.17, No.2, 2017.3, 464-475.