

불평형부하 시 전력품질 향상을 위한 독립형 인버터의 다중루프 제어기 설계

조종민, 차한주
충남대학교

Design of Multiloop Control of Stand-alone Inverter for Power Quality Improvement under Unbalanced Load

Jongmin Jo, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 불평형부하 조건에서 전력품질 향상을 위한 독립형 인버터의 다중루프 제어기를 설계하고 실험적으로 검증하였다. CVCF(Constant Voltage Constant Frequency) 제어를 수행하는 독립형 인버터에 정지좌표계 상에서 다중루프 특성을 갖는 전압 전류 제어기를 설계하여 불평형 부하에 안정적인 전력공급을 수행하도록 구현하였다. 전압 제어기는 기본파 및 선택적 고조파 제어특성을 갖는 PR(Proportional Resonant, 비례 공진)제어기를, 전류제어기는 P제어기를 적용하였다. 50kW 독립형 인버터 프로토타입을 구현하였으며, 불평형부하 조건에서 기존 동기좌표계 PI 제어와 비교할 때, 선간전압 THD는 4.3%에서 0.9%, 불평형률은 4.3%에서 0.35%로 개선됨으로써 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

친환경 에너지원인 신재생에너지에 대한 기술개발이 발전함에 따라 마이크로그리드 시장도 급속한 성장세를 보이고 있다. 특히, 설치비용과 낮은 효율성 등의 문제점을 갖는 디젤발전기를 통해 자체적인 전력공급을 수행하는 도서산간 지역은 독립형 마이크로그리드가 해결책으로 부각되고 있다. 독립형 인버터는 CVCF(Constant Voltage Constant Frequency)를 통해 부하에 고품질의 전력을 공급하기 위해서는 안정한 전압과 고정 주파수를 생성하는 제어 알고리즘이 필수적이다. 불평형부하 시, 인버터 데드타임에 의해 출력전압에는 홀수차 고조파가 생성되어 전압왜곡이 발생한다. 이를 보상하기 위해, 동기좌표계 PI 전압제어가 있으나,^[1] 구조가 복잡하고 많은 연산량을 필요로 한다. 따라서, 동기좌표계 PI 제어기를 정지좌표계로 변환하면 PR 제어기로 표현할 수 있으며, 기본파 정상분 및 역상분 제어가 동시에 가능한 간단한 제어구조 알고리즘을 얻을 수 있다^[2]. 또한, 선택적 고조파 보상을 통해 인버터 데드타임에 의해 발생하는 저차 고조파 성분도 보상이 가능하므로 안정한 전압을 부하에 공급할 수 있는 특성을 갖는다. 갑작스런 부하의 변동이나 단락사고에 대한 전류제어기의 역할이 필요함에 따라 전압 제어기 내부에 전류 제어기를 적용하여 과도상태에서의 안정도를 향상시키는 제어기가 적용된다.

2. 불평형부하 독립형 인버터 전압제어 알고리즘

2.1 3상 독립형 인버터 PCS 구조

그림 1은 50kW 독립형 마이크로그리드 인버터 구조로 배터리 저장장치, DC AC 인버터, LCL 필터, Δ-Y 변압기로 구성되어 있다. 표 1은 3상 독립형 인버터의 파라미터를 나타낸다.

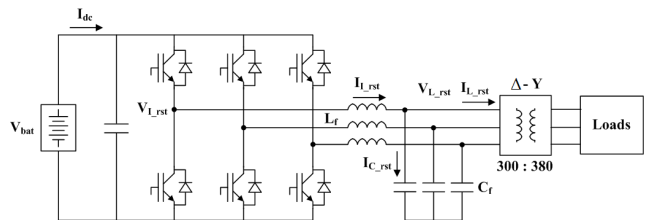


그림 1 독립형 마이크로그리드 인버터 구조

Fig. 1 A stand-alone microgrid inverter structure

표 1 독립형 인버터 파라미터

Table 1 A stand-alone inverter parameters

Parameter	Value
DC 링크전압 V_{dc}	500 650V
스위칭 주파수 f_{sw}	10kHz
필터 인덕터 L_f	0.65mH
필터 커패시터 C_f	50μF
출력전압 V_o	380V _{LL}
출력용량 P	50kW

2.2 불평형 부하 시 데드타임에 의한 전압왜곡

인버터 데드타임과 스위칭 소자의 전압강하에 의한 인버터 출력전압 간 오차는 필터 인덕터 전류의 방향에 의존한다. 불평형부하 시, 3상 인덕터 전류는 평형상태를 이루지 못하기 때문에 각 상의 오차 전압은 서로 다른 형태로 발생한다. 따라서, 각 상의 오차에 포함된 고조파 성분 또한 불평형 상태를 이루므로 출력 선간전압은 불평형의 홀수배 고조파를 발생시킨다. 식 (1)은 불평형부하 시 데드타임에 의해 발생하는 3상 출력 전압성분을 나타낸다.

$$V_{L_{rst}} = V_{L_{rst}}^f + V_{L_{rst}}^{3rd} + V_{L_{rst}}^{5th} + V_{L_{rst}}^{7th} + V_{L_{rst}}^{9th} \dots \quad (1)$$

2.3 불평형부하 시 전압-전류 제어 알고리즘

그림 2는 불평형부하 시 정지좌표계 전압 전류 제어기 구조로, PR 전압 제어기와 P 전류 제어기로 구성된다. 동기좌표계 축에서의 기본파 정상분 및 역상분 PI 제어기를 라플라스 변환을 이용하여 주파수 변조과정을 통해 정지좌표계로 변환하면 식 (2)와 같은 PR 제어기를 유도할 수 있으며 해석은 지면 관계상 생략한다. 따라서, PR 전압 제어기는 간단한 제어구조를

통해 불평형부하 조건에서도 기본파 정상분, 역상분 전압성분의 정상상태 오차를 제어할 수 있다. 또한, 선택적 고조파 보상 기법을 통해 인버터 데드타임에 의해 출력전압에 포함된 홀수 차 고조파 성분의 보상이 가능하다. 다중루프 제어로서 전압 제어기 내부에 P 전류 제어기를 통해 부하에 공급하는 전류제어를 수행한다. 그림 3은 3rd, 5th, 7th 선택적 고조파 보상기법이 적용된 PR 제어기의 주파수 응답특성을 나타낸다.

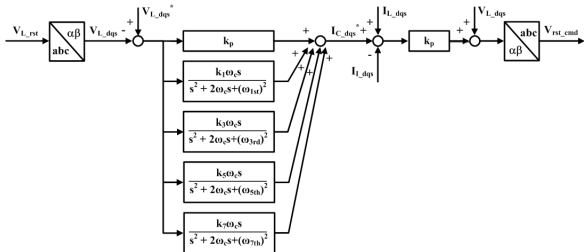


그림 2 불평형부하 시 PR + P 제어기 구조
Fig. 2 PR + P controller structure under unbalanced loads

$$G_{PR} = K_p + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (2)$$

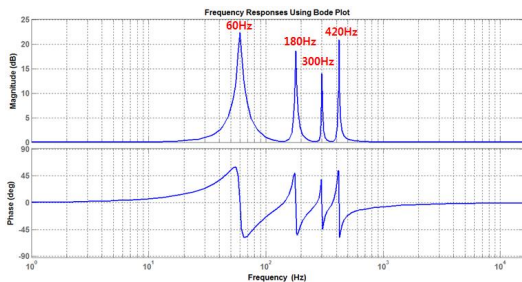


그림 3 PR 전압 제어기 주파수 응답특성
Fig. 3 PR voltage controller frequency response characteristic

2.4 실험결과

그림 4는 불평형부하 시 기본파 PR 전압제어기와 전류 P 제어기를 적용한 경우 부하 측 3상 선간전압, 상전류 및 FFT 결과이다. 불평형부하는 R상 15kW, S상 15kW, T상 20kW 용량의 저항부하이다. 3상 선간전압의 THD는 2.06%이며, 불평형률은 IEC 61000 4 30 규격에 이거한 식 (3), (4)로부터 0.35%로 계산된다. 불평형부하에 의해 기본파 역상분 성분이 발생하지만, PR 제어기를 통해 정상분 및 역상분 제어가 모두 가능하므로 3상 선간전압이 평형으로 제어됨을 확인할 수 있다.

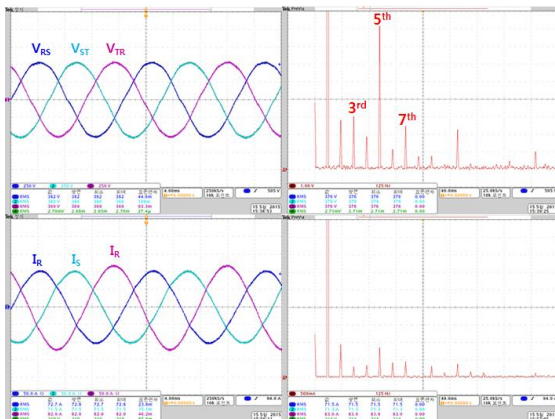


그림 4 기본파 PR + P 제어기를 적용한 3상 선간전압, 상전류
Fig. 4 3-phase line voltage, phase current applying PR + P controller under unbalanced load

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

$$\beta = \frac{|V_{rs}|^4 + |V_{st}|^4 + |V_{tr}|^4}{(|V_{rs}|^2 + |V_{st}|^2 + |V_{tr}|^2)^2} \quad (4)$$

그림 5는 그림 3과 동일한 실험조건에서 3rd, 5th, 7th 선택적 고조파 보상을 포함한 제어기의 실험결과이다. 3상 선간전압의 불평형률은 식 (3),(4)로부터 0.35%로 계산되었다. 또한, 선택적 고조파 보상을 통해 3상 선간전압에 포함된 3rd, 5th, 7th 고조파 성분이 감소하고, THD는 0.9%로 측정되었다. 전류제어기를 통해 전류제어 또한 정상적으로 수행되고 있음을 알 수 있다.

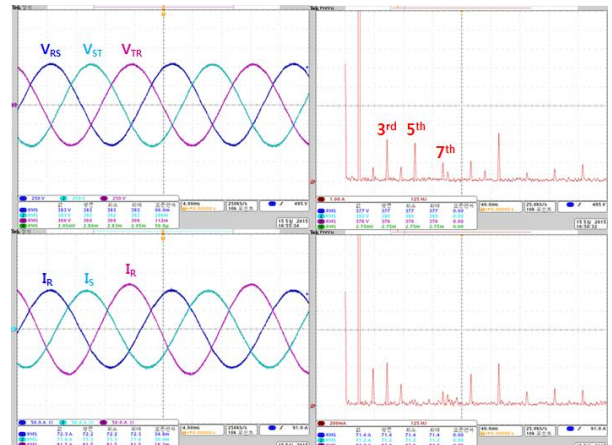


그림 5 선택적 고조파 보상을 포함한 PR + P 제어기의 3상 선간전압, 상전류
Fig. 5 3-phase line voltage, phase current applying selective harmonics compensation PR+P controller under unbalanced load

3. 결론

본 논문은 불평형부하 조건에서 전력품질 향상을 위한 독립형 인버터의 다중루프 제어기를 설계하고 실험적으로 검증하였다. CVCF 제어를 수행하는 독립형 인버터에 정지좌표계 측에서 다중루프 특성을 갖는 전압 전류 제어기를 설계하여 불평형 부하에 안정적인 전력공급을 수행하도록 구현하였다. 전압 제어기는 기본파 및 선택적 고조파 제어특성을 갖는 PR제어기를, 전류제어기는 P제어기를 적용하였다. 50kW 독립형 인버터 프로토타입을 구현하였고, 불평형부하 시 기존 동기좌표계 PI 제어와 비교할 때, 선간전압 THD는 4.3%에서 0.9%, 불평형률은 4.3%에서 0.35%로 개선되었다, 또한, 전류제어도 정상적으로 수행함으로써 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 정진용, 조종민, 이준원, 채우규, 차한주, “불평형부하 시 독립형 인버터의 데드타임 보상기법”, 전력전자학회논문지, 제20권 제2호, 115-121, 2015. 4
- [2] Teodorescu, R, Blaadbjerg, F, Liserre, M, Loh, P.C, “Proportional resonant controllers and filters for grid connected voltage source converters”, IEE proceedings, Vol. 153, pp. 750-762, 2006, September.