

배전선로용 단상 무효전력 보상기의 무효전력제어

심우식, 조종민, 김지찬, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Reactive Power Control of Single-Phase Reactive Power Compensator for Distribution Line

Woosik Sim, Jongmin Jo, Jichan Kim, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 배전선로 안정화 구현을 위한 무효전력 보상기의 새로운 무효전력 제어기법을 제안하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 무효전력제어 알고리즘의 성능을 검증하였다. 무효전력 제어는 동기좌표계 d축 전류성분 제어를 통해 수행되고, DC 링크 전압을 일정하게 유지하기 위한 전압 제어와 이에 필요한 유효전력은 q축 전류성분 제어를 통해 구현된다. 제안된 무효전력 제어기법에 포함된 DC 리플 보상방식은 추출된 DC 전압의 오프셋 성분을 제거하는 HPF(high pass filter)부와 HPF 위상 특성으로 인해 발생한 위상변화 특성을 보상하기 위한 지연함수부로 구성되며, 리플성분이 보상된 전압을 전압제어기 피드백 성분으로 적용하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 DC 전압 리플 보상방식이 적용된 무효전력 제어 기법이 적용된 경우 전류 THD가 크게 향상된 결과로부터 제안된 알고리즘의 성능을 검증하였다.

1. 서론

최근, 화석연료에만 의존하였던 과거와 달리 환경오염으로 인해 신재생에너지에 대한 관심이 높아짐에 따라 풍력, 태양광 등 친환경적인 신재생에너지 시장이 빠르게 증가하고 있으며, 이에 따라 많은 연구가 이루어지고 있다. 이로 인해 산업분야 및 가정에서도 에너지에 대한 인식이 변화하고 있으며 국내외적으로 저압계통에 분산전원인 신재생 에너지 연결이 증가하는 추세이다. 이로 인하여 저압계통에 연계된 부하의 전력품질에 문제가 생기고 있어 저압계통 전원품질을 안정화 하는데 어려움을 겪고 있다. 저압계통 전원품질 개선을 위한 방법들 중 저압계통에 무효전력 및 전압조정이 가능한 무효전력 보상을 통한 배전 선로 안정화에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 다양한 FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 설비가 활발하게 연구되고 있다. 무효전력 보상을 하는 시스템 SVC(static var compensator) 와 STATCOM(static synchronous compensator)은 계통에 병렬로 연계되어 고속의 연속적인 무효전력 보상을 통해 모선 전압을 제어한다. 또한, 이를 통하여 과도안정도 향상, 전력 동요 억제, 저주파 진동 억제 등의 역할을 하게 된다. SVC는 가변 리액터와 가변 커패시터를 병렬로 구성하며 사이리스터와 연결된 구조로써 1세대 전력보상 설비이며, 대용량화와 가격에서 장점이 있다. STATCOM은 다른 보상장치 보다 빠른 응답특성을 얻을 수

있는 2세대 전력설비이며, 연속적인 무효전력 보상이 가능하다^{[1][2][3]}. 그러나 저압 배전선로에서의 무효전력 보상기의 전력변환기는 단상 시스템에서의 계통 측의 전류와 전압에 의해 DC-링크의 120Hz DC 전압 리플이 필연적으로 발생하여 전류제어에 영향을 미친다. 따라서 알고리즘을 개선하고 DC 전압 리플이 발생하는 문제를 해결하는 연구가 필요하다.

본 논문은 무효전력 제어는 p-q 이론을 기반으로 동기좌표계 d축 전류 제어를 통해 무효전력제어를 하며, DC 링크 전압제어가 필요하므로 동기좌표계 q축 전류 제어를 하였다. 또한 DC 링크 전압에 120Hz 성분인 리플 보상기법을 적용한 알고리즘을 제안하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통해 DC 전압 리플 보상에 따른 리플 저감 특성으로 전류 파형 개선을 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 무효전력 보상 알고리즘

2.1 단상 무효전력제어 인버터시스템 구성

그림 1은 단상 무효전력 제어를 위한 인버터시스템 구조이다. DC 링크와 IGBT를 이용한 풀브릿지 구조로 되어 있으며 필터는 LC필터를 사용하여 계통에 연결된다.

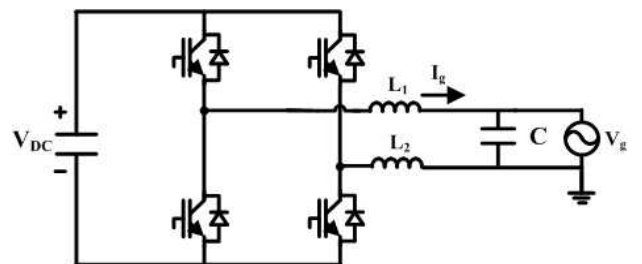


그림 1 단상 인버터시스템 구성 회로도
 Fig. 1 Single Phase Inverter System Configuration Schematic

2.2 제안된 무효전력 보상 알고리즘

본 논문에서 제안된 배전선로용 단상 무효전력 보상기의 무효전력 제어 알고리즘은 p-q이론으로 d축 전류제어 q축 전류제어를 통해 무효전력 제어와 DC 링크 전압제어를 한다. 제안된 알고리즘은 무효전력 보상기 시스템 안에 DC전압 리플 보상을 하도록 구성되며, 제어기 구조는 그림 2과 같다.

무효전력 제어 알고리즘은 그림 2에서 파란색 블록을 제외한 구조이다. 동기 좌표계에서 구현되며 계통전류(I_g)를 인가

받아 d축 정지 좌표계성분인 I_{ds} 로 사용하며 I_{ds} 을 90° 위상 지연을 시키는 All Pass Filter를 사용하여 q축 정지좌표계 성분인 I_{qs} 로 변환을 한다. I_{ds} , I_{qs} 인 정지좌표계 성분들은 동기좌표계로 좌표변환을 하여 I_{de} , I_{qe} 로 표현을 한다. I_{de} 는 무효전력을 PI 제어기로 제어하여 출력되는 I_{de_ref} 값을 추종하게 되며, I_{qe} 는 DC 링크 전압을 단상 전력 계산식으로부터 계산하여 I_{qe_ref} 값을 추종하게 된다. d축과 q축 성분을 디커플링한 후 제어기에서 나온 V_{de_cmd} 와 V_{qe_cmd} 를 정지 좌표계로 변환하여 최종적으로 전압의 정지 좌표계에서의 지령치를 생성한다.

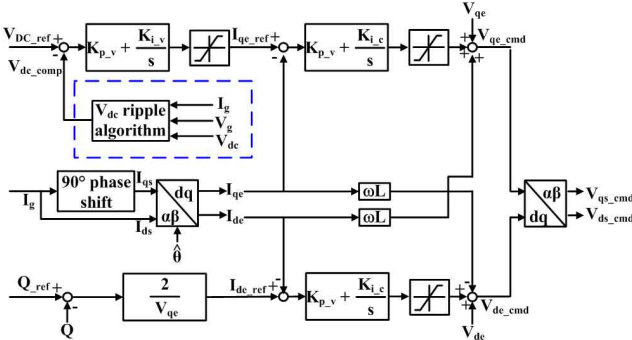


그림 2 제안된 무효전력 보상기 제어기 구조
Fig. 2 The proposed reactive power compensation controller structure

2.3 DC 전압 리플 보상기법

단상 시스템에서는 계통전압과 계통전류를 곱한 무효전력 성분($V_g \cdot I_g$)은 120Hz 성분이 나타나며, 무효전력이 5kVar 일 때 평균전력이 0인 것은 수식 (1)로 확인할 수 있다. 그림 2에서 점선으로 표시된 블록의 내부 구조는 그림 3이며 DC 링크 전압 리플을 보상하는 기법을 나타낸다. DC 링크 전압에 존재하는 리플 성분을 계산은 수식 (2)이며 수식에 나온 V_{dc} 는 실측 DC 전압이다. DC 전압 리플 보상기의 적분기 출력전압에서 오프셋 전압이 존재하여 High Pass Filter부에서 DC 성분 저감 특성을 이용하여 오프셋 전압을 제거해준다. 그러나, High Pass Filter의 위상특성으로 인해 High Pass Filter 출력의 위상이 실측 DC 전압 리플성분 보다 진상인 특성을 갖는다. 지연함수부에서 위상지연 특성을 이용하여 실측 DC 전압 리플 성분의 위상과 동일하게 맞춰서 실측 DC 전압의 리플을 보상 해주면 DC 전압(V_{dc_comp})으로 출력된다. 제안된 DC 전압 리플 보상기법에 따른 리플 저감 특성으로 인해 전류 THD를 향상시킬 수 있다.

$$V_g \cdot I_g = 2V\cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$= V\sin(2\omega t)$$

$$V_{DC\ ripple} = \frac{1}{C} \int (V_g \cdot I_g / V_{dc}) dt \quad (2)$$

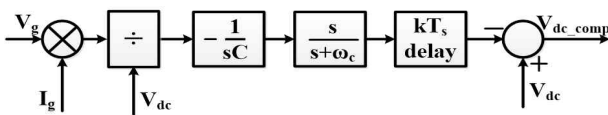


그림 3 DC 전압 리플 보상기법
Fig. 3 DC voltage ripple compensation technique

3. 시뮬레이션 결과

그림 4는 무효전력 보상기의 무효전력 제어를 위한 단상 인버터 시뮬레이션의 회로도를 나타낸다. DC 링크와 IGBT를 이용한 풀브리지 구조로 되어 있으며, 표 1은 단상 인버터의 파라미터 값을 나타낸다.

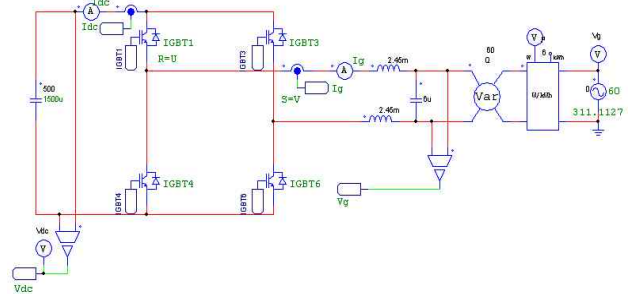


그림 4 단상 인버터 시뮬레이션 회로
Fig. 4 Single phase inverter simulation circuit

표 1 단상 인버터 파라미터
Table 1 Single phase inverter parameter

파라미터	값
DC전압(V_{DC})	500V
스위칭 주파수(f_{sw})	10kHz
인덕터(L)	5mH
DC 링크 커패시터(C_{DC})	1500uF
계통 전압(V_g)	단상 220V, 60Hz

그림 5는 DC 전압 리플 보상기법 적용 유무에 따른 계통전류, I_{de} , I_{qe} , DC 전압 V_{dc} 시뮬레이션 파형이다. 0.25초 이후에 DC 전압 리플 보상기법을 적용하였으며, 보상 전 DC 전압 리플은 9V이고 보상 후에는 1V로 리플 전압이 줄어든 것을 확인하였다. DC 전압은 500V로 전압 제어되고 있으나 무효전력 성분으로 인해 2고조파 성분은 존재한다. 하지만 DC 전압 리플 보상에 따른 리플저감 특성으로 인해 계통전류 I_g THD가 향상되고 I_{de} 는 I_{de_ref} 를 I_{qe} 는 I_{qe_ref} 도 0.15초 이내에 안정 상태로 도달하는 것을 확인하였다.

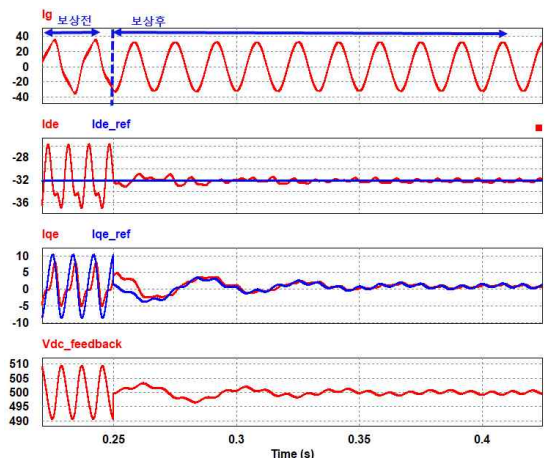


그림 5 DC 전압 리플 보상기법 적용 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveform applied DC voltage ripple compensation technique

4. 실험 결과

제안된 무효전력 보상기의 무효전력 제어를 위한 단상 인버터 실험장비 구성은 그림 6과 같다. 시뮬레이션과 동일한 파라미터를 적용하여 실험 하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였다.

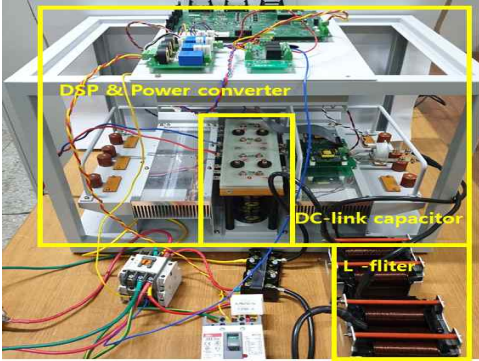


그림 6 단상 인버터 실험장비 구성
Fig. 6 Single-phase inverter experiment equipment configuration

그림 7은 DC 전압 리플 보상기법 적용 유무에 따른 계통전류, I_{de} , I_{de_ref} 실험 파형이다. 보상 신호를 주었을 때 DC 전압 리플 보상기법을 적용하였으며, DC 전압 리플 보상에 따른 리플저감 특성으로 인해 보상 전 계통전류 I_g THD보다 보상 후 계통전류 I_g THD가 향상되고 I_{de} 는 I_{de_ref} 를 0.15초 이내에 안정 상태로 도달하는 것을 확인하였다.

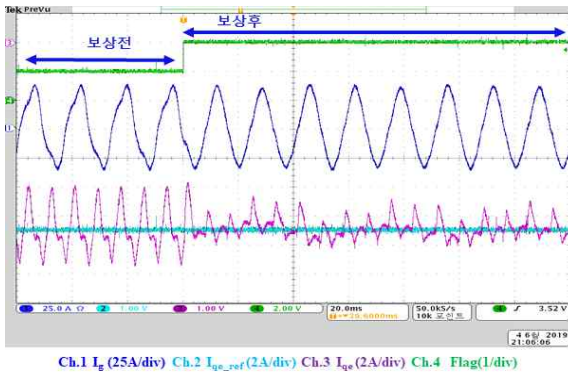


그림 7 DC 전압 리플 보상기법 적용 시 계통전류 실험 파형
Fig. 7 Waveform of Grid Current in DC Voltage Ripple Compensation

그림 8은 DC 전압 리플 보상기법 적용 유무에 따른 DC 전압, I_{qe} , I_{qe_ref} 실험 파형이다. 보상 신호를 주었을 때 DC 전압 리플 보상기법을 적용하였으며, DC 전압은 500V로 전압 제어 되고 있으나 무효전력 성분으로 인해 2고조파 성분은 존재한다. 하지만 DC 전압 리플 보상에 따른 리플저감 특성으로 인해 보상 전 DC 전압 리플은 9V이고 보상 후에는 1V로 리플 전압이 줄어든 것을 확인하였으며, I_{qe} 는 I_{qe_ref} 도 0.15초 이내에 안정 상태로 도달하는 것을 확인하였다.

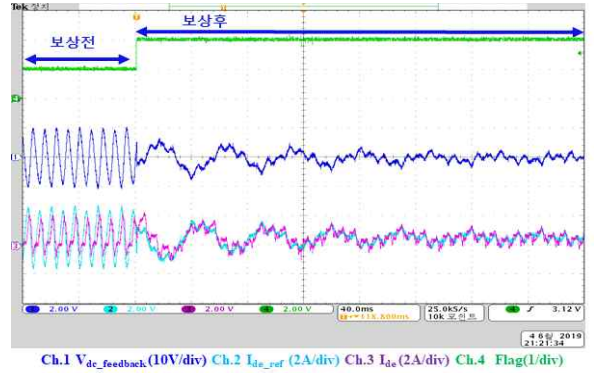


그림 8 DC 전압 리플 보상기법 적용 시 DC 전압 실험 파형
Fig. 8 DC voltage test waveform when applying DC voltage ripple compensation technique

5. 결론

본 논문은 DC 전압의 리플을 보상을 하여 배전선로 안정화 구현을 위한 무효전력 보상기의 새로운 무효전력 제어기법을 제안하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 무효전력제어 알고리즘의 성능을 검증하였다. 무효전력 제어는 동기좌표계 d축 전류성분 제어를 통해 수행되고, DC 링크 전압을 일정하게 유지하기 위한 전압 제어와 이에 필요한 유효전력은 q축 전류성분 제어를 통해 구현된다. 단상 시스템에서의 계통 측의 전류와 전압에 의해 DC-링크의 120Hz DC 전압 리플이 필연적으로 발생하여 제안된 알고리즘에서 DC 리플 보상방식은 추출된 DC 전압의 오프셋 성분을 제거하는 HPF(high pass filter)부와 HPF 위상 특성으로 인해 발생한 위상변화 특성을 보상하기 위한 지연함수부로 구성되며, 리플성분이 보상된 전압을 전압제어기 피드백 성분으로 적용하여 시뮬레이션과 실험을 통해 DC 전압 리플 보상방식이 적용된 무효전력 제어 기법이 적용된 경우 DC 전압 리플이 보상되었음을 확인하였으며, 전류 THD가 향상된 결과로부터 제안된 알고리즘의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 이승민, 김일환, 김호민, 오성보, 이도현, “제주계통의 무효전력보상을 위한 SVC와 STATCOM의 운전특성 비교”, 한국태양에너지학회 논문집, 35(3), 49-56, 2015.6.
- [2] 이재현, 조종민, 차한주 “배전선로용 5kVar 무효전력 보상기 설계”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 153-155, 2018.10.
- [3] Ritwik Majumder, “Reactive Power Compensation in Single-Phase Operation of Microgrid”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp.1403-1416, April 2013