

배전선로 안정화를 위한 전압보상기의 무효전력 제어기법

서정진, 조종민, 김영록, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Reactive power Control of Voltage Compensator for stabilization Distribution Line

Joungjin Seo, Jongmin Jo, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 저압 배전선로의 전압 조정을 위해 상태관측기와 반복제어기를 적용한 무효전력 제어 알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션 및 실험으로 이를 검증하였다. 무효전력 보상기는 단상 풀 브리지 인버터 구조이며 전압제어 시 DC 전압을 일정하게 유지하기 위한 전압 제어와 전류 제어기로 구성된다. DC 리플 보상방식은 상태관측기로 만들어낸 출력 값, DC 링크 리플 성분을 보상한 값을 전압제어기 피드백 성분으로 사용하여 전압을 일정하게 제어하였다. 무효전력을 안정하게 주입하기 위해 기본과 성분은 PI제어기로 제어하고 반복제어기를 PI제어기와 병렬로 연결하여 저차 고조파를 보상하였다. 반복 제어기는 동기 좌표계에서 구현됨에 따라 홀수와 고조파 성분을 제거하는 역할을 한다. 제안한 제어기법은 5kVar 단상 인버터 시스템으로 실험을 진행하였으며, 상태관측기와 반복제어기가 적용된 경우 THD가 9%에서 2%로 향상됨을 확인함으로써 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

1. 서론

최근 심각해진 환경오염 문제로 인해 정부의 신재생에너지 확대 사업이 활발해지며 자연스레 풍력, 태양광 등 친환경적인 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 그에 맞춰 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 산업분야 뿐만 아니라 가정에서도 에너지에 대한 지식과 인식이 변화하고 있는 추세이며 국내에서 기존의 화력이나 원자력발전소가 아닌 저압계통에 풍력 발전이나 태양광 발전, 소형 열병합 발전 등 중소규모의 전원을 분산 배치하는 분산전원 도입이 증가하고 있다. 저압계통에 분산전원의 연계가 증가됨에 따라 기존의 저압계통 운영 방식으로는 과도한 분산전원 수용으로 인해 전기품질 저하, 규정 전압 이탈, 단락용량 증대, 단독운전에 의한 계통운영의 안전성 저하 등 문제가 생기게 된다^[1]. 그 결과 저압계통 전원품질 개선을 위해 저압계통에 무효전력 및 전압조정이 가능한 무효전력 보상을 통한 배전선로 안정화에 대한 다양한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

본 논문에서는 동기좌표계 d축 전류제어를 통해 무효전력 제어를 하고, q축으로 전압제어를 사용하고 있다. 전압제어기 피드백 성분에서 120Hz 전압 리플 성분을 제거하기 위해 상태관측기를 사용하였고, 홀수차 저차 고조파 성분을 보상하기 위한 반복제어기가 PI제어기와 병렬로 연결된 구조를 제안하였다. 상태관측기와 반복제어기를 적용하여 고조파 보상에 따른

전류 파형이 개선됨을 시뮬레이션과 실험으로 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 무효전력제어 알고리즘

2.1 단상 무효전력제어

그림 1은 DC 링크 캐패시터, IGBT를 사용한 풀 브리지 인버터, LCL 필터를 사용하여 계통에 연결되는 배전선로용 단상 전압 보상기 구조이다.

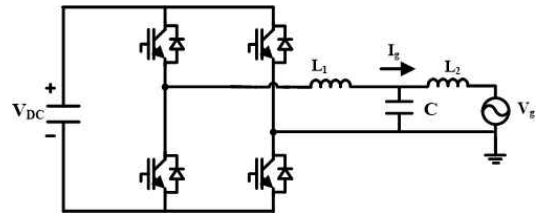


그림 1 단상 인버터 시스템 구성 회로도
 Fig. 1 Single Phase Inverter System Configuration Schematic

2.2 제안한 무효전력 보상기 제어 구조

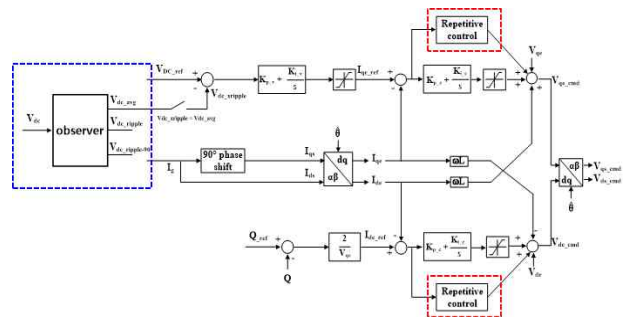


그림 2 제안한 무효전력 제어기 구조
 Fig. 2 The proposed reactive power compensation controller structure

그림 2는 제안한 배전선로 안정화를 위한 무효전력 보상기 구조이다. 무효전력제어 방식은 동기좌표계 d축과 q축 전류제어를 통해 무효전력 제어와 DC링크 전압제어를 수행한다. DC 링크 리플을 보상하기 위해서 상태관측기가 적용되었고 d축, q축 PI 제어기에 병렬로 반복제어기로 구성된다. 제어기는 동기좌표계에서 구성되며 계통전류를 인가받아 d축 정지좌표계인 Ids로 사용하며 Ids는 All Pass Filter를 사용하여 90° 지연시켜 Idq로 변환하며, 정지좌표계인 Ids, Idq를 동기좌표계로 좌표 변환

하여 I_{de} , I_{qe} 로 변환한다. I_{de} 는 무효전력을 PI 제어기로 제어하여 출력되는 I_{de_ref} 를 추종하게 되고, I_{qe} 는 DC 링크 전압 유지를 위해 PI 제어기를 통해 계산된 I_{qe_ref} 를 추종하게 된다. d축과 q축 성분을 디커플링하여 나온 값인 V_{de_cmd} , V_{qe_cmd} 를 정지 좌표계로 변환하여 전압의 정지 좌표계에서의 지령치를 생성한다.

2.3 DC 링크 리플 보상을 위한 상태관측기

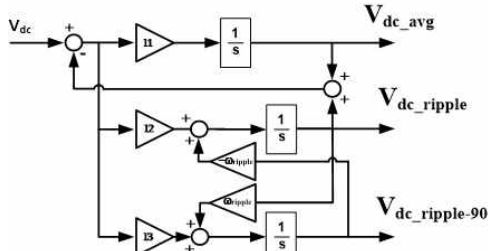


그림 3 DC 링크 전압 상태관측기
Fig. 3 DC link voltage state observer

그림 3은 제안한 상태관측기의 블록도이다. 상태관측기의 출력은 DC 링크 전압의 평균값을 추종하는 V_{dc_avg} , DC 링크 전압의 리플 값인 V_{dc_ripple} , 리플 값의 90° 지연된 값인 $V_{dc_ripple-90}$ 가 계산되며, 세 가지 출력 중 전압유지를 위해 DC 링크 전압의 피드백 성분으로 사용되는 것은 V_{dc_avg} 이다. 여기서 l_1, l_2, l_3 는 비례이득이고 식 (1)에서 임의의 s값을 넣어주어 비례이득이 결정되며 w_{ripple} 은 DC 링크 전압주파수의 2배인 120Hz이다 [2]. 상태관측기의 비례이득을 조정하여 평균값과 리플 성분에 대해 추종하여 제어기 보상 성능을 향상시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s^3}{w_{ripple}^2} \\ 3s - \frac{s^3}{w_{ripple}^2} \\ w_{ripple} - \frac{3s^2}{w_{ripple}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.4 반복제어기 보상 기법

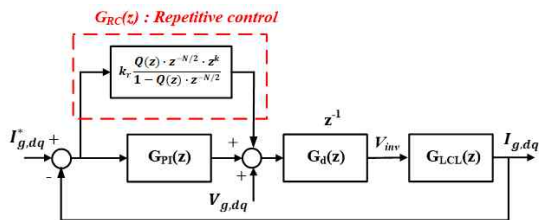


그림 4 반복제어기가 적용된 무효전력 제어 모델
Fig. 4 Repetitive control applied reactive power control model

그림 4는 제안한 반복제어기가 적용된 무효전력 제어 등가 모델이다. 기본과 성분은 PI 제어기를 통해 제어하고 저차 고조파 성분을 보상하기 위해 반복제어기가 PI 제어기에 병렬 연결된 구조이다. 반복제어기는 동기좌표계에서 구현되어 정지좌표계 흡수차 고조파 성분을 제거하게 되고 이산시간 함수부로 구현된다. 고조파를 제거하는 역할을 하는 저역통과필터는 식 (2), 시간지연 함수부는 식 (3)과 같이 나타내며, 이를 적용하면 반복제어기 전달함수인 식 (4)와 같이 도출 된다.

$$Q(z) = \alpha_{1z} + \alpha_0 + \alpha_{1z}^{-1} = \frac{z + 2 + z^{-1}}{4} \quad (2)$$

$$z^{-N/2} \quad \therefore N = f_s / f \quad (3)$$

$$G_{RC}(z) = k_r \frac{Q(z) \cdot z^{-N/2} \cdot z^k}{1 - Q(z) \cdot z^{-N/2}} \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 결과

그림 5는 배전선로용 무효전력보상기 시뮬레이션 회로도를 보여준다. DC링크 커패시터, LCL 필터, IGBT를 이용한 풀 브리지 구조로 되어 있으며 표 1은 시스템 파라미터를 나타낸다.

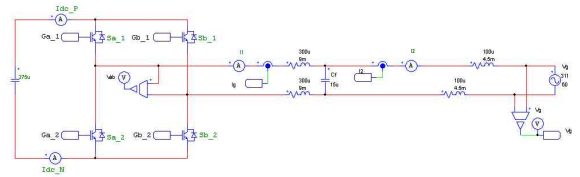


그림 5 시뮬레이션 회로
Fig. 5 simulation Schematic

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 simulation parameter

파라미터	값
DC 전압(V_{dc})	500V
스위칭 주파수 (f_{sw})	10.2kHz
L_1 필터(L)	600uH
C 필터(C)	15uF
L_2 필터(L)	200uH
DC 링크 커패시터(C_{dc})	375uF
계통 전압(V_g)	단상 220V
계통 주파수(f)	60Hz

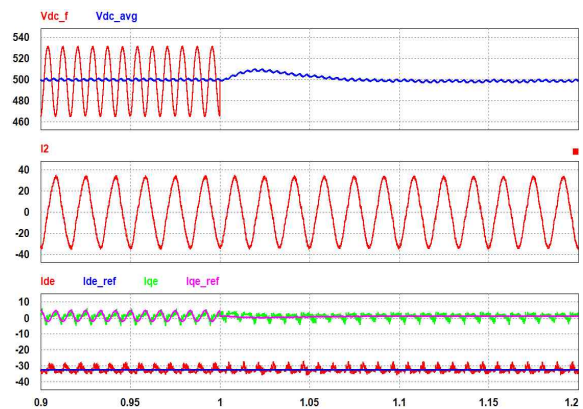


그림 6 DC 전압 리플 보상을 위한 상태관측기 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveform state observer for DC voltage ripple compensation

그림 6은 상태관측기 보상 전, 후에 따른 DC 전압제어 피드백, V_{dc_avg} , 계통 전류, I_{de} , I_{qe} , 시뮬레이션 파형이다. 1초 이후에 상태관측기를 적용하였으며 보상 전 DC 링크 전압 리플은 약 66V 이며 보상 후에는 약 2V로 크게 줄어든 리플 전압이 전압제어 피드백 성분으로 들어가고 있는 것을 확인하였다. 리플

저감 특성으로 인해 계통 전류 THD가 향상되었고 I_{de} , I_{qe} 는 저차 고조파성분으로 인해 리플 저감의 효과를 크게 보지 못하였다. 그림 7과 그림 8은 반복제어기 적용 전, 후 계통 전류와 I_{de} , I_{qe} 시뮬레이션 파형이다. 홀수차 고조파 제거로 인해 동기좌표계 I_{de} , I_{qe} 의 리플성분의 감소를 확인하였고, 보상 전 계통전류 THD는 7.9%에서 보상 후 2%로 THD가 개선됨을 확인하였다.

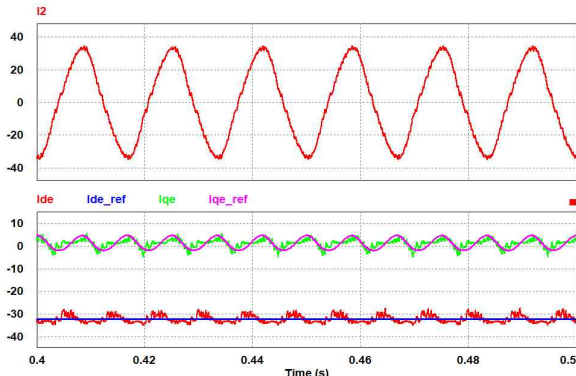


그림 7 반복제어기 적용 전 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation waveform before applied repetitive control

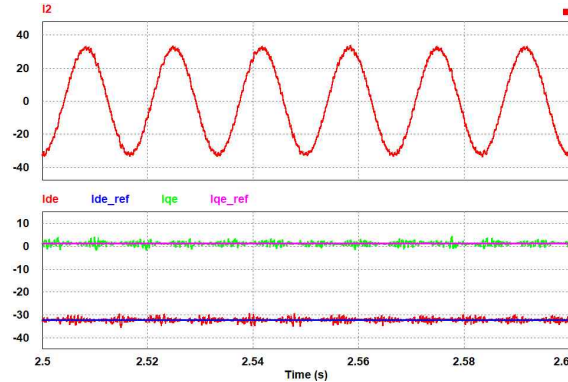


그림 8 반복제어기 적용 후 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Simulation waveform applied repetitive control

4. 실험 결과

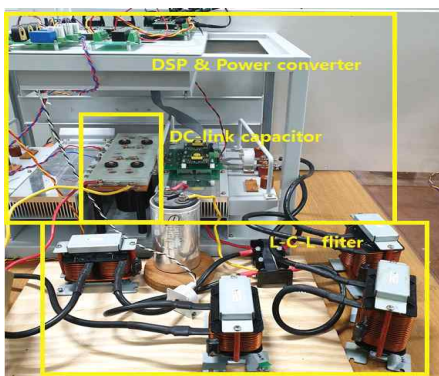


그림 9 실험장비 구성
Fig. 9 experiment equipment configuration

배전선로용 무효전력 보상이 실험장비는 그림 9와 같으며, 시뮬레이션과 동일한 파라미터를 적용하였다. 그림 10은 상태관측기 보상 전, 후에 따른 DC 전압제어 피드백, $V_{dc,avg}$, 계통 전류, I_{de} , 실험 파형이다. 무효전력 성분으로 인해 2차 고조파 성분은 존재하지만 전압제어 피드백 성분으로 리플이 제거된 값이 들어감으로써 계통전류 THD가 향상됨을 확인하였다. 그

림 11은 상태관측기와 반복제어기 적용 전, 후에 따른 계통 전류와 I_{de} 파형이다. 홀수차 고조파 성분의 제거로 인해 반복제어기 적용 전 THD 약 9%, 적용 후 THD 약 2%로 반복제어기 적용 전과 비교하였을 때 THD가 크게 향상됨을 확인하였다.

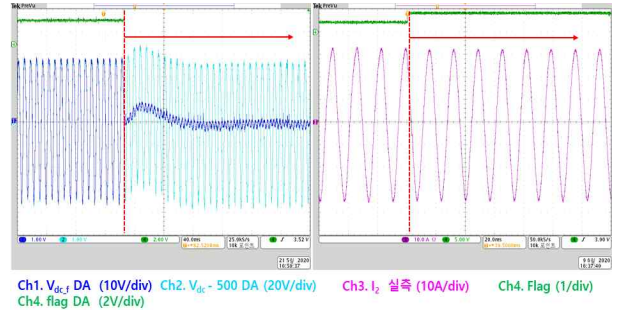


그림 10 DC 전압 리플 보상을 위한 상태관측기 실험 파형
Fig. 10 Test waveform State observer for DC voltage ripple compensation

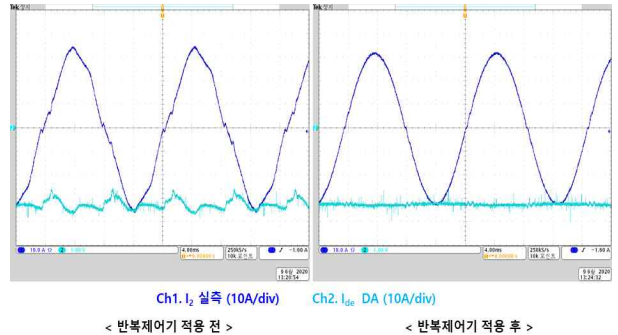


그림 11 반복제어기 적용 전,후 실험 파형
Fig. 11 Test waveform before and after applied repetitive control

5. 결론

본 논문은 상태관측기 및 반복제어기를 이용하여 배전선로 안정화 구현을 위한 알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 본 논문의 알고리즘 성능을 검증하였다. 단상 시스템에서 계통측 전류와 전압에 의해 생기는 120Hz DC 전압 리플을 상태관측기에서 나온 출력 중 $V_{dc,avg}$ 를 전압제어 피드백, 즉 DC 링크 리플이 보상된 값을 넣어주어 리플 저감의 효과를 확인하였다. 저차 고조파 보상을 위한 반복제어기는 PI 제어기와 병렬 연결된 구조를 적용하였고, 반복제어기가 동기좌표계에서 구현됨에 따라 홀수차 고조파 성분을 제거하는 역할을 수행하며 이는 이산시간 함수로 구현하였다. 상태관측기와 반복제어기가 모두 적용한 경우 시뮬레이션 및 실험을 통해 전류 THD가 약 9%에서 2%로 향상된 결과를 보여줌으로서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 오윤식, 조규정, 김민성, 김지수, 김철환, “협조 제어를 이용한 분산전원 연계 배전계통의 전압조정 방식 개발”, 전기학회논문지, 66(9), 1309-1316, 2017.9
- [2] 김형수, 최중우 “배전용 정지형 보상기의 상태관측기를 이용한 순시유효/무효전력 보상”, 전기학회논문지 57(8), 1377-1382 2008.08