

LCL필터를 가진 3상 계통 연계형 인버터에서의 전류 고조파 감쇄를 위한 능동형 전향보상기법

박병준, 최기영, 김래영*
한양대학교

An Active Feedforward Compensation for a Current Harmonics Reduction in Three-phase Grid-connected Inverters with LCL Filter

Byong Jun Park, Ki Young Choi, Rae Young Kim*
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 계통 연계형 인버터 제어에 있어서 계통 임피던스에 의한 계통전압 왜곡을 분석하고 있다. 특히 계통 연계형 인버터의 설계단계에서는 고려되지 않지만, 실제 시스템 구현 시에는 일반적으로 널리 사용되는 저주파트랜스의 누설 인덕턴스에 의한 영향을 살펴본다. 계통 임피던스에 의해 계통 전압의 왜곡이 발생하고 이로 인해 저차 고조파 성분의 전류가 계통으로 유입되게 되는데, 본 논문에서는 이 저차 고조파에 대해 분석하고, 이를 감쇄시키는 기법을 소개한다. 제안하는 방법은 1.5kW 전압형 인버터의 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 신재생에너지를 포함한 분산전원의 보급이 증가하고 있으며, 역률 개선 등의 목적으로 능동형 정류회로의 사용 또한 증가하는 추세이다. 하지만 이러한 계통 연계형 인버터(컨버터)의 경우 기존의 시스템과는 달리 전력품질에 악영향을 주는 고조파 성분을 발생시키게 되며, 이에 따라 전력 품질을 유지하기 위한 규제들이 생겨나게 되었다. 이러한 이유로 효과적인 고조파 감쇄의 방법들이 필요로 하게 되었다.

인버터에서 발생하는 고조파 성분 중 스위칭에 의해서 발생하는 고차 고조파의 경우, L 필터 또는 LCL 필터와 같은 수동 필터를 통해 효과적으로 감쇄시킬 수 있다. 특히 LCL 필터의 경우 동일한 고조파 감쇄효과를 얻으면서도 필터의 크기를 좌우하는 인덕터의 크기를 크게 줄일 수 있다.^[1]

스위칭에 의해 발생하는 고조파가 수~수십 kHz 영역에서 발생하는 반면, 저차의 고조파는 수 kHz 이하의 영역에서 발생한다. 이 저차 고조파의 발생 원인 중 하나로 계통 전압의 왜곡을 들 수 있는데, 이는 계통에 연결되는 다른 부하의 불확정성에 의해 발생할 수도 있으며, 또는 계통내부의 높은 임피던스에 의해 발생할 수도 있다. 본 논문은 계통 임피던스에 의한 저차 노이즈 발생에 초점을 맞춰 연구를 진행하였다. 이와 관련된 문헌들에는 계통 임피던스에 따른 시스템의 안정성 판별에 대한 연구도 있었으며,^[2] 계통 임피던스의 영향으로부터 강인한 전류제어기 설계에 대한 연구도 있었다.^[3] 하지만 계통 임피던스의 영향을 직접 보상하는 기법에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 실제 인버터 시스템을 계통에 연결할 때 안전을 위해 사용하는 절연용 저주파 트랜스의 누설 인덕턴스에 대해 검토하였다. 최근 계통의 임피던스를 예측하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 이는 본 논문의 연구범위

를 벗어나며, 인덕턴스를 알고 있다는 가정 하에 연구를 진행하였다. 본 논문에서는 트랜스의 누설 인덕턴스를 가진 시스템에서 저차 고조파의 발생원인을 분석하고, 이 저차 고조파 성분을 감쇄시키는 전향 보상 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

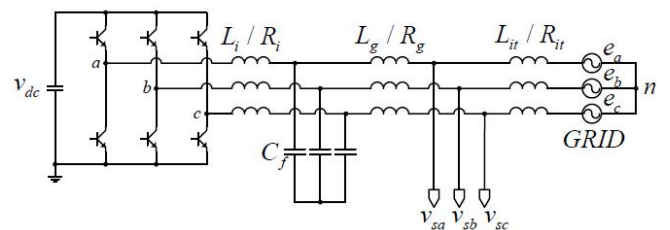


그림 1 LCL필터와 저주파 트랜스를 통해 계통에 연계된 인버터 토폴로지.

2. 저차고조파 원인분석

2.1 계통 전압 왜곡

그림 1은 LCL 필터와 저주파 트랜스를 통해 계통에 연계된 인버터 토폴로지를 나타내고 있다. 여기서 v_{dc} 는 dc link 전압, L_i 는 인버터측 인덕터, L_g 는 계통측 인덕터, C_f 는 필터 커패시터, L_{it} 는 저주파 트랜스의 누설인덕턴스를 각각 나타낸다. 또한 $e_a/e_b/e_c$ 는 계통 전압, $v_{sa}/v_{sb}/v_{sc}$ 는 계통의 위상 검출과 전류제어 전향보상을 위해 센싱된 계통 전압을 나타낸다. $R_i/R_g/R_{it}$ 는 각 인덕터의 기생 저항성분을 나타낸다.

LCL 필터를 사용하는 경우라도, active damping 기법을 사용한다면 공진주파수를 대비한 저주파 영역의 특성은 L 필터와 동일하다고 간주할 수 있다.^[4] 또한 전류제어에서 cross coupling항과 계통 전압의 항을 전향보상 한다면 플랜트는 $R-L$ 부하 모델로 취급할 수 있으며, 따라서 전류제어 보상은 pole zero cancellation 기법을 이용한 간단한 PI 제어기를 사용할 수 있다.

이러한 일련의 제어기 설계 과정에서 계통의 임피던스 성분(특히 트랜스의 누설 인덕턴스)을 고려하지는 않는다. 하지만 실제 산업현장에서 계통 연계형 인버터를 사용할 경우 절연을 위한 저주파트랜스를 사용하게 되고, 트랜스의 누설 인덕턴스로 인해 센싱된 계통 전압은 아래의 수식(1)과 같은 왜곡 성분을 가지게 된다. 수식(1)에서 두 번째 곱하기 항은 실제 측정하고자 하는 계통의 전압을 나타내며, 첫 번째 곱하기 항은 트랜스의 인덕턴스 성분으로 인해 왜곡된 전압 값을 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{s_d} \\ v_{s_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_{it} + R_{it} & -\omega_f L_{it} \\ \omega_f L_{it} & sL_{it} + R_{it} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

왜곡 성분으로 인해 전류제어기의 주파수 응답은 아래의 그림.2와 같아진다. 이때 사용된 시스템 파라미터는 표.1과 같다. 그림.2의 페루프 주파수 응답에서 보듯이 100Hz에서 1kHz사이의 magnitude가 증가하고 있으며, 이로 인해 저주파의 고조파 성분이 증폭되어 나타나는 것을 알 수 있다.

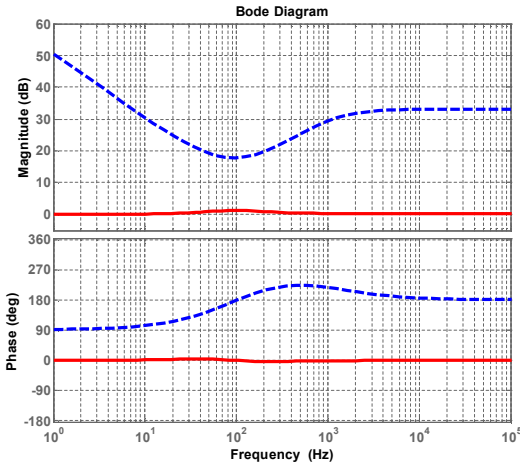


그림.2 왜곡된 계통 전압에서의 출력전류의 주파수 응답 특성 (실선 : 페루프 응답 특성, 점선 : loop-gain 응답 특성)

표.1 시스템 파라미터

P_{inv}	정격 전력	1.5 kW
v_g	계통 선간 전압	220 V _{rms}
v_{dc}	DC link 전압	500 V _{dc}
f_f	기본 주파수	60 Hz
f_{sw}	스위칭 주파수	24 kHz
L_f	인버터측 인덕턴스	300 μ H
L_g	계통측 인덕턴스	220 μ H
R	인덕터 기생 저항성분 합	0.2 Ω
C_f	필터 캐패시턴스	1.5 μ F
L_{it}	트랜스 누설 인덕턴스	560 μ H
R_{it}	트랜스 기생 저항성분	0.5 Ω

2.2 계통 전압 왜곡 보상

전류제어기에서 입력 받는 계통 전압에 수식(1)에서 나타나는 동일한 양의 왜곡 성분을 전향보상하게 되면, 저주파 트랜스의 인덕턴스 성분에 의한 저차 고조파의 영향을 제거할 수 있다. 아울러 설계했던 제어기의 성능을 그대로 사용할 수 있다.

3. 시뮬레이션에 의한 검증

표.1의 파라미터를 가지는 계통 연계형 인버터의 시뮬레이션을 통해 제안하는 보상기법을 검증하였다. 시뮬레이션 결과는 그림.3과 같으며, 이는 부하 크기에 따른 보상전후의 계통 전류 비교파형이다. 이를 통해 보상으로 인한 저차 고조파 감쇄 효과를 직관적으로 알 수 있으며, 부하가 작은 경우 저차 고조파의 영향이 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다. 이 중 감쇄 효과가 가장 큰 10% 부하에서의 저차 고조파 감쇄율은 그림.4를 통해 수치적으로 비교하였다. 이때 5차 고조파의 크기는 4.7%로 감쇄되고, 7차는 45.6% 감쇄된 결과를 보여주고 있다.

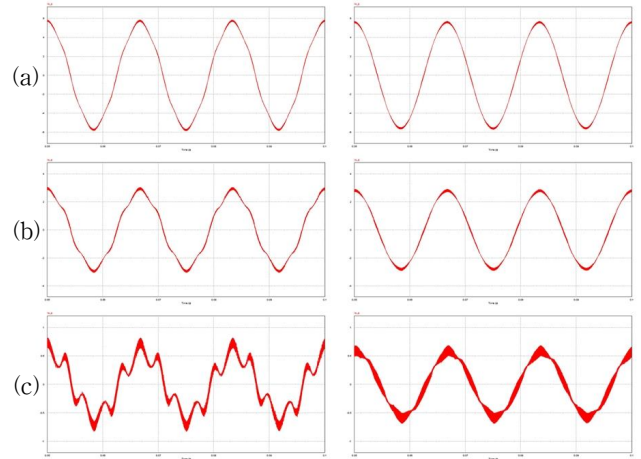


그림.3 계통측 상전류 (왼쪽:보상 전, 오른쪽:보상 후) (a) 100% 부하 (2A/div), (b) 50% 부하(2A/div), (c) 10% 부하(0.5A/div)

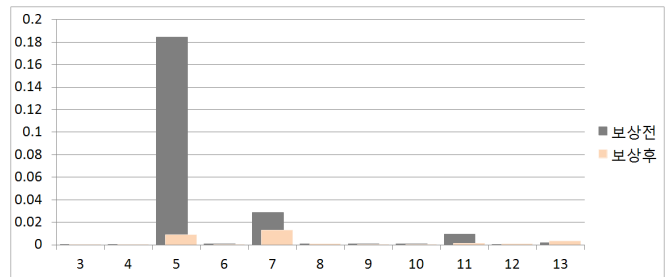


그림.4 10% 부하에서의 저차 보상 전후 노이즈 분석 (x축 : 고조파 차수, y축 : 전류[A])

4. 결론

본 논문에서는 저주파 트랜스의 누설 인덕턴스로 인해 발생하는 저차 고조파의 원인을 분석하였으며, 계통 전압의 왜곡 성분을 전향 보상하여 저차 고조파를 감쇄시키는 보상기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 시뮬레이션 결과를 통해 증명하였다.

참고 문헌

- [1] M. Liserre, F. B laabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL filter based three phase active rectifier", IEEE Trans. Industry Applications, vol.41, pp.1281-1291, 2005.
- [2] M. Liserre, R. Theodorescu, and F. Blaabjerg, "Stability of photovoltaic and wind turbine grid connected inverters for a large set of grid impedance values," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 1, pp. 263-272, Jan.2006.
- [3] I. J. Gabe, V. F. Montagner, and H. Pinheiro, "Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 6, pp. 1444-1452, Jun. 2009.
- [4] J. Dannehl, C. Wessels, and F. W. Fuchs, "Limitations of voltage oriented PI current control of grid connected PWM rectifiers with LCL filters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 2, pp. 380-388, Feb. 2009.