

단상 계통연계 인버터의 전압손실과 직류링크 맥동을 고려한 배터리 공칭전압 설계

이진성, 김효성

공주대학교 전기전자제어공학부

Design of Battery Nominal Voltage for Single Phase Line-interactive Inverters considering Voltage Drop and DC Link Voltage Ripple

Jinsung Lee, Hyosung Kim

School of EE and Control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

본 논문에서는 가정용 단상 계통연계 인버터의 전압손실과 직류링크측 맥동 전압을 고려한 배터리 공칭전압 설계법을 제안한다. 일반적으로 가정용 단상 계통연계 인버터는 3kWh 정도의 낮은 에너지용량을 갖는 배터리팩의 수명 관리상 배터리의 공칭전압은 48V 정도로 낮게 설계된다. 단상계통연계형 인버터의 직류링크전압에는 필연적으로 기본주파수의 2배에 해당하는 맥동성분이 포함된다. 이 맥동성분은 계통연계시 전원측 전류에 저차 고조파를 생성하여 전력품질의 저하를 초래하게 된다. 따라서 직류링크측 맥동성분 간섭을 제거하기 위한 피드포워드 제어방식을 채택한 단상계통연계형 인버터의 제어시스템을 수립하고, 인버터의 전압손실과 직류링크측 맥동전압을 고려한 배터리 공칭전압 설계법을 제안하며, 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 에너지 사용의 급격한 증가로 인해 전력망에서 수요와 공급의 원충역할을 하는 Energy Storage System (ESS)에 대한 관심이 높아지고 있다. ESS를 구성하는 단상 계통연계형 인버터는 구조적으로 전원주파수의 2배에 해당하는 맥동을 생성하며, 이로 인해 전원측 전류는 저차 고조파 성분을 포함한다. 이에 대한 해결방안으로 피드포워드 제어에 의하여 M_a 를 보상하는 제어방법은 직류링크측 맥동의 간섭을 제거하여 직류측 전압이 일정한 것과 같은 출력을 얻을 수 있다.^[1] 하지만 맥동률 변화에 따라 M_a' 의 최대값과 발생위치는 변화하므로 맥동을 고려한 배터리 공칭전압 설계가 필요하다. 본 논문에서는 인버터의 전압손실과 직류링크측 맥동을 고려한 배터리 공칭전압을 설계하고, PSIM 시뮬레이션을 통하여 설계전압의 타당성을 검증한다.

2. 인버터의 직류링크 맥동 및 제어 시스템

2.1 직류링크 맥동 및 피드포워드 제어

그림 1에 상용변압기를 사용한 가정용 계통연계 인버터의 시스템을 보인다. 인버터 시스템의 손실이 없다고 가정하면 직류측과 교류측의 순시전력은 같으므로 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$V_{batt}I_{dc} + C_{dc}V_{batt} \frac{dv_{ripple}}{dt} = \frac{P_g}{2}(1 - \cos 2\omega t) \quad (1)$$

식 (1)을 v_{ripple} 에 대해 전개하면 식 (2)와 같고, 직류링크측에는 필연적으로 전원주파수의 2배에 해당하는 맥동을 포함한다.

$$v_{ripple}(t) = \frac{P_g}{4\omega C_{dc}V_{batt}} \sin 2\omega t \quad (2)$$

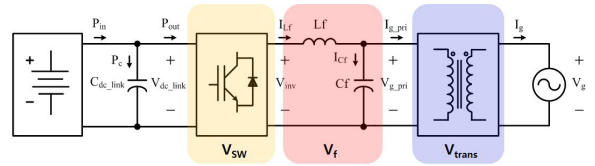


그림 1 변압기형 가정용 계통연계 인버터 시스템

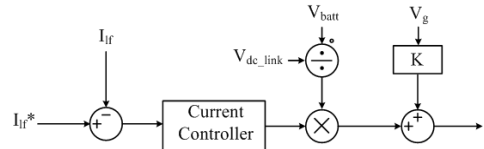


그림 2 단상 계통연계형 인버터의 제어시스템 구성

직류링크측이 식 (2)의 리플을 포함하면 인버터 출력은 식 (3)과 같이 저차 고조파를 포함하게 된다.

$$v_g = M_a \times (V_{batt} + V_{ripple} \sin 2\omega t) \quad (3)$$

$$\text{이 때, } M_a = \hat{M}_a \sin \omega t$$

따라서 기존 M_a 를 식 (4)와 같이 교정하면 인버터의 출력은 식 (5)와 같이 직류링크측 맥동의 간섭을 제거할 수 있다.

$$M_a' = M_a \times \left(\frac{V_{batt}}{V_{batt} + V_{ripple} \sin 2\omega t} \right) \quad (4)$$

$$v_g = M_a' \times (V_{batt} + V_{ripple} \sin 2\omega t) = M_a \times V_{batt} \quad (5)$$

2.2 피드포워드 제어에 의한 M_a'

M_a' 은 식 (6)과 같고, 그림 3에 k 값 변화에 따른 M_a' 함수의 최대값과 발생위치의 변화를 나타낸다.

$$M_a' = \frac{1}{1 + k \sin 2\omega t} \times \frac{\hat{V}_g}{V_{batt} N} \sin \omega t \quad (6)$$

$$\text{이 때, } k = \frac{\hat{V}_{ripple}}{V_{batt}}$$

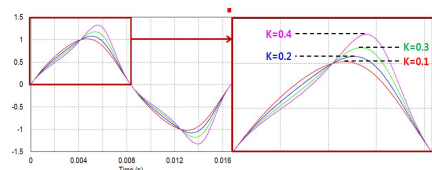


그림 3 k값 변화에 따른 M_a' 의 변화

3. 배터리 공칭전압

3.1 배터리 최소전압 설계 기준

식 (7)과 같이 최대변조지수, 전압효율, 맥동을 고려한 배터리의 최소 전압은 전원전압보다 항상 높게 설계되어야 한다. 따라서 식 (8)의 조건을 만족하는 배터리전압을 설계해야 한다.

$$V_{batt} + \hat{V}_{ripple} \sin 2\omega t \geq \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{\hat{M}_a V_{eff} N} \sin \omega t \quad (7)$$

$$1 \geq \frac{1}{V_{batt} + \hat{V}_{ripple} \sin 2\omega t} \times \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{\hat{M}_a V_{eff} N} \sin \omega t \quad (8)$$

설계조건을 최대값 위치는 식 (7)을 미분함으로써 식 (9)와 같이 전개된다.

$$0 = -2t^2 + \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{2\hat{V}_{ripple} \hat{M}_a V_{eff} N} t + 1 \quad (t = \cos \omega t)$$

$$t = \frac{A \pm \sqrt{A^2 + 8}}{4} \quad (-1 < t < 0) \quad (9)$$

이 때, $A = \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{2\hat{V}_{ripple} \hat{M}_a V_{eff} N}$, N = 권선비, \hat{M}_a = 최대변조지수

3.2 배터리 공칭전압 설계 순서

본 논문의 계통연계형 인버터 사양은 다음과 같다.

- 전원(v_g): 220V
- 전원주파수(f_g): 60Hz
- 최대변조지수(\hat{M}_a): 0.9
- 권선비(N): 30:220
- 전압 효율(V_{eff}): 87%
- 정격전력(P_{rate}): 3kW
- C_{dc} , L_f , C_f : 4080uF, 280uH, 50uF

① 직류링크 전압에 따른 \hat{V}_{ripple} 을 구한다.

효율은 식 (10)과 같고 전원전압이 1.1[pu]로 증가할 때 맥동을 고려하지 않은 배터리 최소 전압은 식 (11)과 같다.

$$V_{eff} = \frac{V_{batt} - (V_{SW} + V_f + V_{trans})}{V_{batt}} \quad (10)$$

$$V_{batt} = \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{\hat{M}_a V_{eff} N} = 59.58 V \quad (11)$$

$$\hat{V}_{ripple} = \frac{\hat{P}_g}{4\omega C_{dc} V_{batt}} = 16.37 V \quad (12)$$

② 미분함수에 각 파라미터를 대입하여 최대값 위치를 찾는다.

$$t = \frac{A \pm \sqrt{A^2 + 8}}{4} = -0.386 \approx \sin 113^\circ \quad (13)$$

③ 최대값 위치에서의 전압을 연산한다.

$$1 \geq \left(\frac{1}{V_{batt} + \hat{V}_{ripple} \sin 226^\circ} \right) \times \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{\hat{M}_a V_{eff} N} \sin 113^\circ \approx 1.139 \quad (14)$$

식 (14)의 맥동을 고려하지 않은 59.58V의 전압은 설계 조건을 만족하지 못하므로 직류링크측 맥동을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다. 다시 ①에서 66V로 전압을 높여 설계 시 식 (15)와 같이 1%의 오차로 설계범위를 만족하게 된다.

$$1 \geq \left(\frac{1}{V_{batt} + \hat{V}_{ripple} \sin 222^\circ} \right) \times \frac{\hat{V}_g \times V_{g[pu]}}{\hat{M}_a V_{eff} N} \sin 111^\circ \approx 0.99 \quad (15)$$

④ 배터리 동작 범위를 고려하여 SOC100% 전압을 구한다. 본 논문에서의 배터리 동작범위는 1~0.7[pu]로 가정한다.

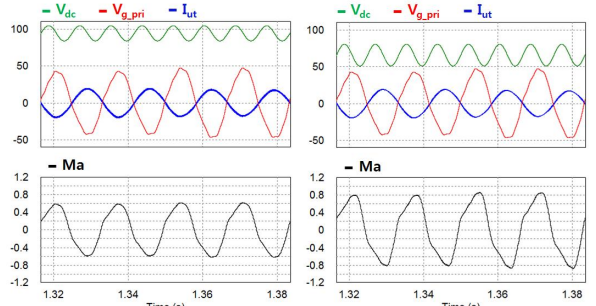
$$V_{nominal} = \frac{V_{batt}}{V_{batt[pu]}} = \frac{66}{0.7} = 94.28 V \quad (16)$$

$V_{nominal}$ 은 다음 파라미터들에 의해 변경 될 수 있다.

- 최대변조지수
- 직류링크 커패시턴스
- 변압기 권선비
- 정격전력
- 배터리 동작범위
- 인버터의 전압 손실

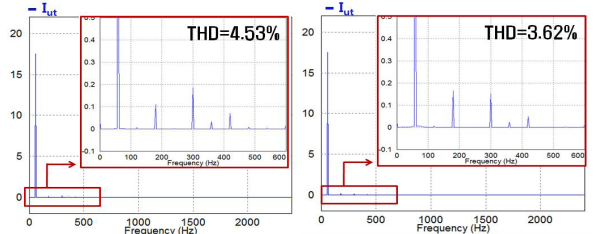
3.3 시뮬레이션

그림 4는 설계전압에 대한 PSIM 시뮬레이션결과이다. 전원 전압의 THD는 6%로 구성하였으며 1.35초에 1.1[pu]로 증가한다. 시뮬레이션 결과 전원전압이 1.1[pu]로 증가함에도 설계 전압에 대한 최대 변조지수는 0.9로 안정되게 동작됨을 확인하였다. 또한 주입전류의 THD는 직류링크측 맥동성분과 전원 측 전압의 고조파 영향에도 5% 이내로 유지 가능하였다.



(a) SOC 100%에서의 전류주입

(b) SOC 0%에서의 전류주입



(c) SOC 100%에서의 전류 FFT

(d) SOC 0%에서의 전류 FFT

그림 4 설계전압에 대한 전류주입시뮬레이션 파형 및 FFT

4. 결론

본 논문에서는 가정용 계통연계 인버터의 공칭전압 설계법을 제안하였다. 직류링크측 맥동의 간섭 제거를 위한 피드포워드 제어방법을 제안하였고, 그에 따른 M_g '의 변화를 분석하였다. 본 논문에서 제안한 설계 사양, 효율, 맥동을 고려한 배터리의 공칭전압 설계는 시행착오적 연산이 필요하지만 인버터 사양에 대한 정확한 배터리공칭전압을 설계할 수 있다는 장점이 있다.

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2012R1A1A2039747)

참고 문헌

[1] Sakly, J, P. Delarue and R. Bausiere, "Rejection of Undesirable Effects of Input DC Voltage Ripple in Single Phase PWM Inverters", Power Electronics and Applications, 1993, Fifth European Conference on. IET, 1993.