

Grid Code의 Fault Ride Through와 독립부하전압 보상을 위한 간접전류제어 계통연계 인버터

윤선재, 오형민, 최세완
서울산업대학교

Utility Interactive Inverter using Indirect Current Control for Fault Ride Through and Voltage Compensation

Sunjae Yoon, Hyungmin Oh, Sewan Choi
Seoul National University of Technology

ABSTRACT

연료전지 시스템의 경우 계통에 Sag 및 Swell 같은 이상이 발생하더라도 계통과 분리되기 전 MBOP 등 독립부하에는 안정적인 전원을 공급하는 것이 중요하다. 기존의 직접전류제어 방식으로는 계통이상 시 전압을 제어할 수 없으므로 독립부하에 계통이상전압이 그대로 걸리게 된다. 본 논문에서는 계통에 Sag 및 Swell 같은 상황이 발생하더라도 무효전류를 제어하여 자체 부하전압을 보상할 수 있는 간접전류제어 전압보상 기법을 이용한 계통 연계형 인버터의 동작을 분석하고 이에 맞는 소자 및 새로운 LCL필터 설계방법을 제안한다.

1. 서론

현재 많이 보급되어 있는 풍력발전 시스템 및 태양광 시스템에서는 계통전압이상 시 즉각적으로 계통에서 분리될 경우 대규모 발전력의 갑작스런 탈락 가능성과 그에 따른 연이은 전압붕괴 발생의 가능성이 우려됨에 따라 계통이상 시에도 무효전력을 주입하며 계통과의 연결을 유지하는 Fault Ride Through(FRT) 기능을 갖출 것을 요구하는 규정(Grid Code)이 강화되고 있는 추세이다.^{[1][2][5]} 그림 1은 독일의 E.ON Grid Code에 따른 FRT 규정인데 계통전압이 정상전압의 0%~70%까지 떨어진 경우에도 150ms동안 계통과의 연결을 유지해야하며 정상전압의 50%까지는 무효전력을 주입하여 계통전압을 보상하도록 하고 있다. 한편, 발전용 연료전지 시스템의 경우에도 위와 같은 규정이 필요로 하게 될 것으로 예상되는데 연료전지 PCS가 이 규정을 준수하기 위해서는 무효전력을 주입하며 FRT를 해야 하는 동시에 MBOP 등 중요부하에 안정적인 전압도 공급해야 할 필요가 있다.

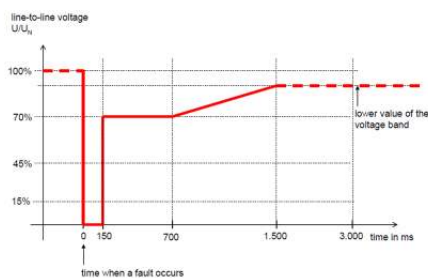


그림 1. 독일의 E.ON Grid Code에 따른 FRT 규정(2006년 4월)

그러나 기존의 전류제어방식으로는 계통이상 시 전압을 제어할 수 없으므로 MBOP 등 자체 부하에 계통의 이상전압이 그대로 걸리게 된다. 이를 개선하기 위해 계통 이상 시에도 인버터 출력전압을 일정하게 제어하여 MBOP 등 자체 부하에 안정된 전압을 공급할 수 있는 간접전류제어 방식을 이용한 전압보상 기법이 제안된 바 있다.^[3] 그런데 FRT와 전압보상을 위하여 추가적인 무효전력을 공급하게 되면 인버터의 정격이 크게 상승되므로 이를 고려한 인버터의 적절한 소자 선정 및 LCL필터 설계가 요구된다.

본 논문에서는 그림 1의 독일의 E.ON Grid Code를 기준으로 계통 전압의 Sag/Swell 이 발생한 경우 FRT와 전압보상을 위하여 간접전류제어 기법에 의한 무효전력 주입 알고리즘을 제안하고 이때 인버터의 정격 상승량 분석을 통하여 이에 맞는 소자 및 LCL필터를 설계하는 방법을 제안한다.

2. 간접전류제어를 이용한 전압보상기법

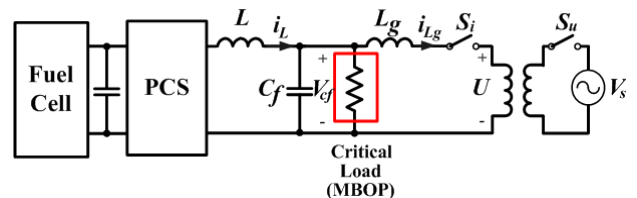


그림 2. 연료전지 발전시스템 구성도

그림 2는 연료전지 발전시스템의 구성을 나타낸다. 제안한 무효전력주입 알고리즘은 계통연계 시 계통전압이 정상범위를 벗어날 경우 계통에 주입하는 유효전력은 줄이고 무효전력 주입을 통해 FRT를 수행함과 동시에 독립부하전압을 안정하게 유지하도록 한다. 그림 3(a),(b)는 Sag 발생 시의 벡터도와 그의 보상동작 시의 벡터도를 나타낸 것이다. Sag 발생 시 보상 동작이 없는 경우 그림 3(a)와 같이 점선에서 실선으로 계통전압과 커패시터 전압이 감소하여 중요부하에 계속해서 안정된 전압이 공급되지 못하지만, 전압보상기법을 적용할 경우, 그림 3(b)와 같이 무효전류를 주입하여 커패시터 전압을 계통 정상시와 같은 크기로 유지 시킨다. 마찬가지로 방법으로 Swell 발생 시에도 그림 4(b)와 같이 보상하여 커패시터 전압을 일정하게 유지한다.

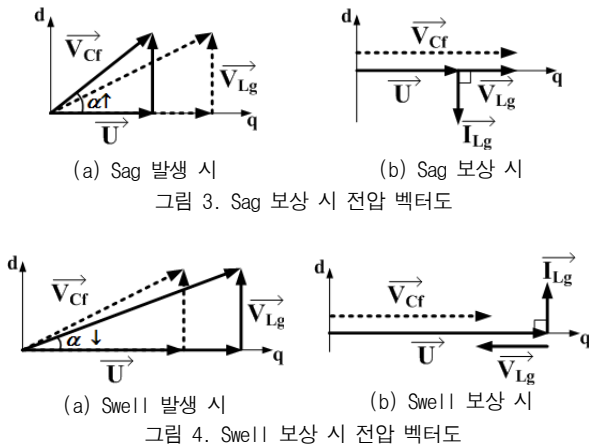


그림 3. Sag 보상 시 전압 벡터도

그림 4. Swell 보상 시 전압 벡터도

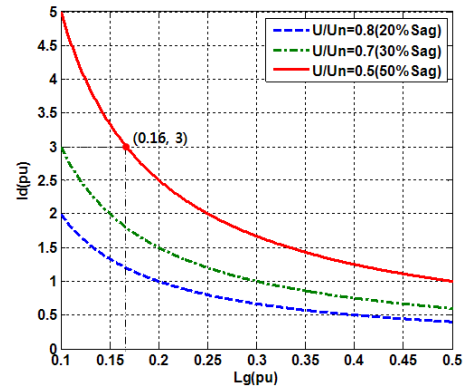


그림 5. Sag 보상 시 Lg 값에 따른 무효전류량

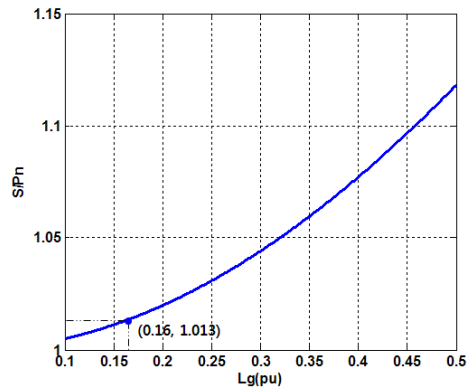


그림 6. 계통정상 시 Lg 값에 따른 정격증가량

3. 독립부하전압 보상을 위한 LCL 필터설계

3.1 독립부하전압 보상 시 인버터 출력 분석

Sag/Swell시 독립부하전압 보상을 위해 주입해야 할 무효전류량은 다음과 같다.

$$V_{Lg}^q = (1-r)U_n \quad (1)$$

$$I_{Lg}^d (= I_d) = \frac{V_{Lg}^q}{\omega L_g} \quad (2)$$

여기서 $r = U/U_n$ 임. 그림 5는 식(1)과 (2)를 이용하여 Sag 발생 시 L_g 값에 따른 인버터가 보상해야 할 무효전류량 I_d 를 PU값으로 나타낸 그래프이다. 그림 5로 부터 전압보상을 위한 무효전류량은 계통 측 인덕터 L_g 값이 클수록 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 6과 같이 L_g 값이 클수록 정상적인 계통 연계 시 전압강하가 커져 피상전력이 증가하게 됨으로서 효율이 감소하게 된다. 그러므로 계통정상시의 피상전력 증가량과 계통이상시의 무효전류 증가량을 Trade off하여 적절한 L_g 값을 선정하는 것이 바람직하다.

E.ON의 Grid Code에 의하면 계통전압이 정상전압의 50%일 때 150ms동안 FRT 해야 하므로 스위치에 150ms동안 정격의 2배 정도의 전류가 흐를 수 있다고 가정하고 이 전류로 전압보상이 가능한 L_g 값을 선정한다. 또한 인버터 출력 스위칭 리플을 보강하도록 L과 C필터를 설계한다.

3.2 소자 선정 및 제안하는 LCL필터 설계방법

Sag/Swell보상 시 인버터 정격증가량을 분석하고 대용량의 설계절차^[4]를 기반으로 하여 3상 380V, 스위칭주파수 5kHz, 300kW정격의 인버터의 Sag/Swell 보상을 위한 제안하는 LCL 필터 설계절차는 다음과 같다.

① 스위치 선정, 인버터 출력전류 스위칭 리플을 선정

3상 380V, 300kW정격에 1.5배 마진을 두어 1000V 700A 스위치를 선정한다. 가정에 의해 이 스위치를 사용하면 150ms동안 최대 1400A의 전류를 흘릴 수 있다. 이는 약 3PU에 해당하는 값이다. 최종 출력 전류의 스위칭 리플율은 0.5%로 선정하였다. 이 때, 인버터 측 인덕터의 스위칭 리플율(=a)은 10%, 인버터 측 인덕터에서 계통 측 인덕터의 스위칭 리플 감쇄율(=b)은 5%로 선정한다.

② 계통 측 인덕터(L_g) 선정

그림 5로부터 계통전압이 정상전압의 50%일 때, 3PU의 무효전류로 전압보상이 가능한 L_g 값은 약 0.16PU이므로 이를 선정한다.

$$L_g = L_b \times 0.16 = 204\mu H \quad (3)$$

$$\text{여기서, } L_b = Z_g / \omega_b = (380^2 / 300000) / (2\pi \times 60) = 1.28mH$$

③ 인버터 측 인덕터의 인덕턴스 값 선정

a=10%로 하기위한 L필터 값은 다음과 같다.

$$L = \frac{V(h_{sw})}{\omega_{sw} \times i(h_{sw})} = \frac{58.46}{2\pi f_{sw} \times 45.58} = 41\mu H \quad (4)$$

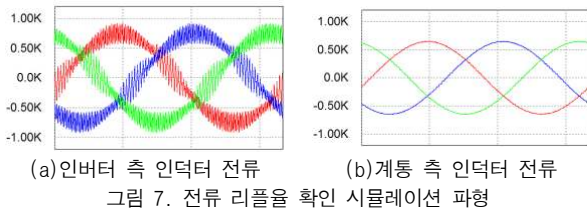
여기서 $V(h_{sw})$ 는 스위칭 주파수 성분의 인버터 출력전압, $i(h_{sw})$ 는 스위칭 주파수 성분의 인덕터 전류로 a=10%로 선정하였으므로 정격전류의 10%에 해당하는 값이다.

④ 커패시터 값 계산

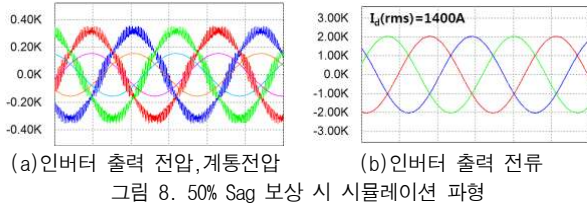
b=5%로 하기위한 C필터 값은 다음과 같다.

$$C = \frac{1-b}{b\omega_{sw}L_g} = 97\mu F \quad (5)$$

PSIM 시뮬레이션을 통해 필터 설계의 타당성을 입증하였다. 그림 7에서 인버터측 인덕터 전류의 리플율은 7.5%이고, 최종 출력 전류의 리플율은 0.48%로 설계 값을 만족하였다. 또한 그림 8에서 계통전압이 정상전압의 50%일 때 커패시터 전압이 보상되며 이를 위해 계통에 주입되는 무효전류량은 약 1400A임을 확인하였다.



(a)인버터 측 인덕터 전류 (b)계통 측 인덕터 전류
그림 7. 전류 리플을 확인 시뮬레이션 파형



(a)인버터 출력 전압,계통전압 (b)인버터 출력 전류
그림 8. 50% Sag 보상 시 시뮬레이션 파형

다른 정격의 스위치를 선정할 경우, LCL필터 값은 표 1과 같으며 스위치 정격의 전류마진이 클수록 L_g 를 작게 설계 할 수 있어 계통정상시의 피상전력 증가량을 줄일 수 있다.

표 1. 스위치 정격에 따른 LCL필터 설계 값

	1000V/800A	1000V/900A	1000V/1000A
L	41uH	41uH	41uH
C	109uF	123uF	146uF
L_g	183uH	162uH	136uH

4. 실험 결과

제한한 3상 출력전압 보상 알고리즘 및 LCL필터설계의 타당성을 입증하기위하여 1kW급 시작품을 제작하여 실험하였으며 시작품을 위해 설계된 필터 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \cdot P &= 1\text{kW} & \cdot V_{LL} &= 110\text{V} & \cdot f_s &= 6\text{kHz} \\ \cdot L &= 1\text{mH} & \cdot C &= 3\mu\text{F} & \cdot L_g &= 5\text{m} \end{aligned}$$

그림 9와 그림 10은 각각 모의계통에 20% Sag, 20% Swell이 발생한 상황이며 제안된 알고리즘에 의해 무효전류를 주입하여 인버터 출력전압을 유지하고 있음을 알 수 있다. 각각의 경우 설계된 필터 값에 의해 약 1.25PU만큼 무효전류가 주입되어야 하며 실험 결과 약 1.2PU만큼 무효전류가 증가한 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 연료전지 발전시스템에서 계통이상 발생 시 FRT와 독립부하전압 보상을 위한 무효전력 보상 알고리즘을 제안하였으며, 무효전력 보상 시 계통 측 인덕턴스 값에 따른 인버터의 정격 상승량을 분석하였다. 이를 통해 그에 맞는 스위칭 소자 및 LCL필터를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘 및 설계 방법은 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

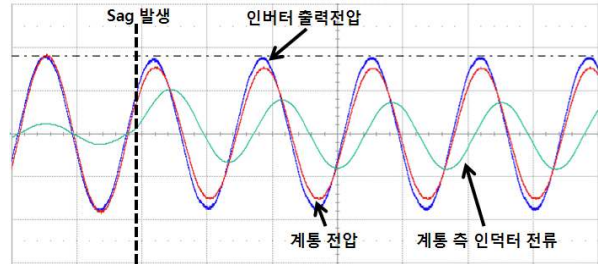


그림 9 Sag 발생 시 제안한 방식의 전압보상 실험파형

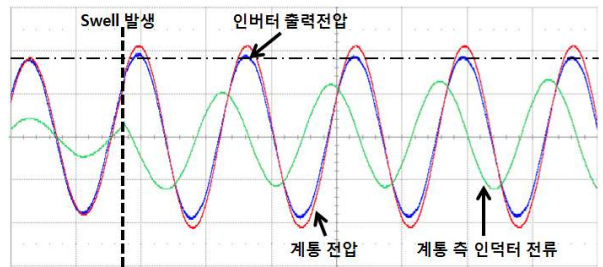


그림 10. Swell 발생 시 제안한 방식의 전압보상 실험파형

참고 문헌

- [1] Qiao, W., Harley, R.G., "Grid Connection Requirements and Solutions for DFIG Wind Turbines" Energy 2030 Conference, 2008. IEEE 17-18 Nov. 2008 Page(s):1 - 8
- [2] 문승일 "풍력발전에 따른 신뢰도 및 계통 운영문제" 대한 전기학회, 전기의 세계 제56권 제4호 2007.4
- [3] 권준범, 윤선재, 최세완, 박가우, 최재호 "계통이상에 강인한 간접전류제어 계통연계 인버터의 전압 보상기법" 전력 전자학회 2009년도 하계학술대회 논문집, 2009. 7
- [4] 명홍재, 권준범, 최세완, 박가우 "대용량 계통연계형 연료전지 PCS의 LCL필터 설계와 공진억제" 전력전자학회 2008년도 학술대회 논문집, 2008. 6
- [5] E.Troester "New German Grid Codes for Connecting PV Systems to the Medium Voltage Power Grid" 2nd International Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants