

Fault Ride Through와 독립부하전압 보상 기능을 갖는 계통연계 인버터의 최적설계

김형진, 최세완, 윤선재*
 서울과학기술대학교, *LS산전

Optimized Design of Utility Interactive Inverter for Fault Ride Through and Voltage Compensation

Hyungjin Kim, Sewan Choi, Sunjae Yoon*

Seoul National University of Science and Technology, *LS Industrial Systems Co., Ltd.

ABSTRACT

독립부하가 존재하는 분산발전시스템에서 FRT 기능을 수행하는 경우, 계통의 이상전압이 인버터의 독립부하에 그대로 걸리게 되는 문제가 있다. 이에 따라 FRT 기능을 준수함과 동시에 독립부하에도 일정한 품질의 전압을 공급할 수 있는 전압보상기법^[2]이 제안된 바 있다. 이때 무효전류 주입에 의해 IGBT의 전류정격이 증가되는데 본 논문에서는 인버터의 정격 상승량 분석을 통하여 이에 맞는 스위치를 선정하고 인버터의 모델을 고려한 전압보상기법 제어기 설계 기법을 제안한다.

1. 서론

최근 분산발전시스템의 용량이 증대함에 따라 계통이상시 분산발전시스템 자체의 보호를 목적으로 이를 계통과 분리하는 경우 계통붕괴 발생의 가능성이 우려되고 있다. 따라서 계통이상시에도 발전시스템을 계통과의 연결을 유지하도록 하는 Fault Ride Through(FRT) 기능이 요구되고 있는 추세이다. 그림 1은 독립부하가 존재하는 분산발전시스템을 나타내며 FRT 동작시 계통의 무효전류를 제어하여 독립부하에 일정한 품질의 전압공급이 가능한 전압보상기법^[2]이 제안된 바 있다. 일반적으로 Swell 발생시 인버터를 Ride Through하게 되면 그림 2와 같이 설계된 m_a 값에 따라 과변조가 발생하여 Ride Through를 불가능하게 만든다. 본 논문에서는 과변조 없이 FRT 기능이 가능한 전압보상기법을 해석하고 이때 인버터의 정격 상승량 분석을 통하여 이에 맞는 스위치 선정 및 인버터의 모델을 고려한 제어기 설계 기법을 제안한다.

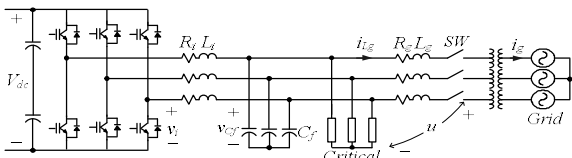


그림 1 독립부하가 존재하는 계통연계시스템 구성도

2. 인버터 최적설계

정상적인 계통연계시 커패시터전압과 계통전압의 관계는 다음과 같다.

$$\vec{V}_{Cf} = \vec{V}_{Lg} + \vec{U} \quad (1)$$

그림 3은 계통전압 이상시 전압보상 제어기법의 동작 원리를 나타내는 벡터도이다. 이때 계통이상시 독립부하의 전압을 보상하기 위한 인버터의 무효전류 지령치는 아

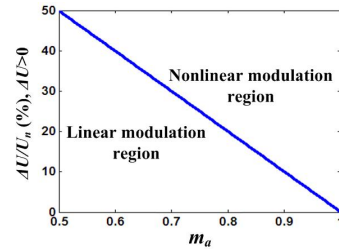


그림 2 Swell시 m_a 에 따른 선형변조영역 (SPWM, $V_{dc}=2PU$)

래와 같다.

$$I_{Lg}^d = V_{Lg}^q / \omega L_g, \quad (V_{Lg}^q = U_n - U) \quad (2)$$

본 논문에서는 계통전류를 제어하기 위해서 3상 동기좌표계 PI제어기를 사용한다. 3상 동기좌표계 PI제어기와 단상 정지좌표계의 PI제어기는 과도상태가 거의 같기 때문에^[3] 그림 4와 같이 단상 정지좌표계 PI모델로 간소화하여 시스템의 안정도 판별이 가능하다. 전체 시스템의 페루프 전달함수는 아래와 같다.

$$\frac{I_{Lg}(s)}{I_{Lg}^*(s)} = \frac{K_p s + K_i}{As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + K_i} \quad (3)$$

여기서 $A=C_L L_g$, $B=C R_i$, $C=C_L R_g + C_f R_i R_g + L_g R_i$, $D=L_i + R_i R_g + K_p$ 임.

그림 5와 6은 각각 페루프 전달함수의 K_p 와 K_i 값을 변화시켰을 때 극점의 위치를 보여준다. 시스템이 안정하기 위해서는 K_p 를 0.00516보다 작게 설계되어야 하며 댐핑을 크게 하기 위해서는 K_i 값을 작게 설계해야 한다.

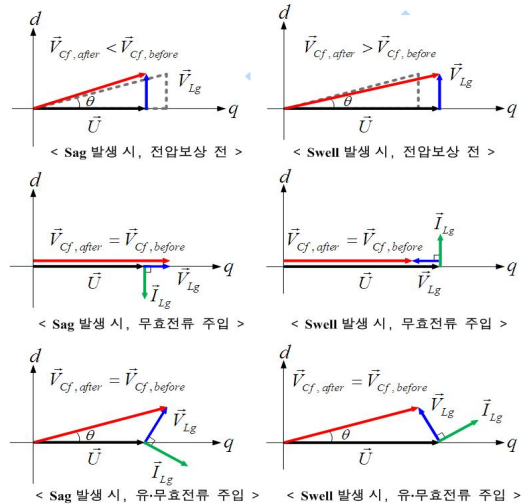


그림 3 FRT 동작시 전압보상기법의 동작원리 벡터도

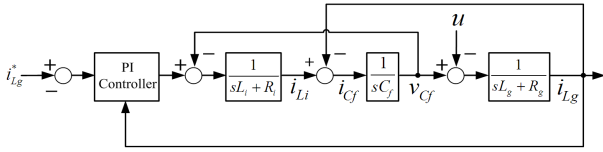


그림 4 3상 정지차표계 PI제어기의 단상등가 블록도

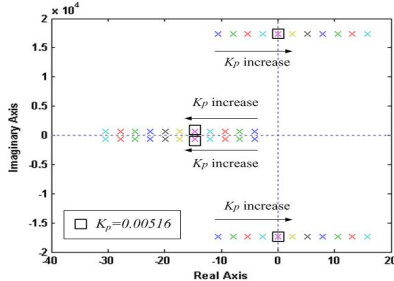


그림 5 단상 정지차표계 PI모델의 K_p 값 변화에 따른 극점의 위치 ($K_i=100, 0 \leq K_p \leq 0.01$)

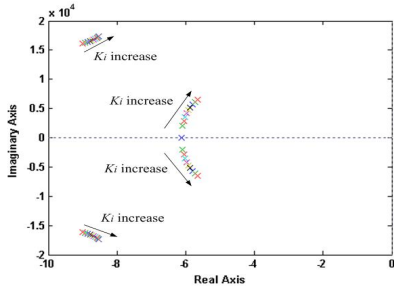


그림 6 단상 정지차표계 PI모델의 K_i 값 변화에 따른 극점의 위치 ($K_p=0.001, 1 \leq K_i \leq 10000$)

그림 7은 계통이상시 L_g 값에 따른 스위치 전류 $I_{sw, fault}$ 의 rms값을 나타내며 L_g 값이 증가할수록 $I_{sw, fault}$ 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, L_g 를 0.134PU보다 작게 선정할 경우, IGBT는 150ms동안 정격전류의 2배를 견딜 수 있으므로 유효전류 주입과 관계없이 IGBT는 인버터 전류정격의 2배로 선정하면 계통전원 50% Sag, Swell 같은 이상시 독립부하의 전압보상이 가능하다. 그러나 그림 8과 같이 L_g 값이 클수록 정상적인 계통연계시 전압강하가 커져 인버터의 피상전력이 증가하게 됨으로써 효율이 감소하게 된다. 그러므로 계통정상시의 피상전력 증가량과 계통이상시의 무효전류 증가량을 고려하여 적절한 L_g 값을 선정하는 것이 바람직하다.

문헌 [4]의 LCL필터 설계절차를 기반으로 제안하는 전압보상기법의 LCL필터 설계 방법은 아래와 같다.

$$L_g = x \cdot L_{base}, \quad (L_{base} = \frac{U_{LL}^2}{\omega_g \cdot P_{inv}}) \quad (3)$$

$$L_i = \frac{0.5 \cdot V_{dc} \cdot U_{LL}}{\omega_{sw} \cdot r_i \cdot P_{inv}}, \quad (r_i = I_{Li, sw} / I_{Li, 1}) \quad (4)$$

$$C_f = \frac{r_i / r_g - 1}{\omega_{sw}^2 \cdot L_g}, \quad (r_g = I_{Lg, sw} / I_{Lg, 1}) \quad (5)$$

3. 실험 결과

그림 9와 10은 각각 모의계통에 20% Sag, 20% Swell이 발생했을 때 제안한 알고리즘에 의해 무효전류만 주입하여 커패시터전압이 정상전압으로 유지하고 있음을 알 수 있다.

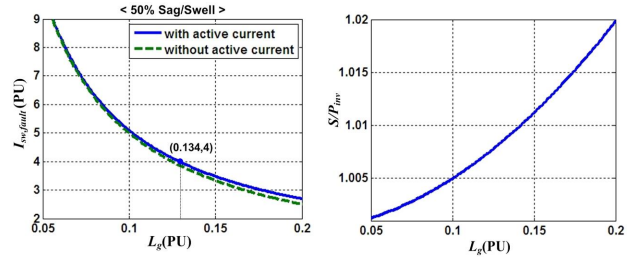


그림 7 전압보상 시 L_g 값에 따른 스위치 전류크기(PU) 그림 8 계통정상 시 L_g 값에 따른 정격증가량(PU)

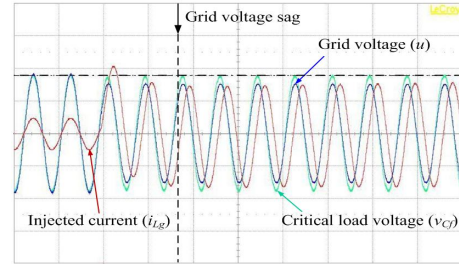


그림 9 20% Sag 발생시 제안한 전압보상기법의 실험파형 ($P_{inv}=1kW, U_{LL}=110V, L_i=1mH, L_g=5mH, C_f=3\mu F, f_{sw}=5kHz, f_g=60Hz, r_i=0.032, r_g=0.002$)

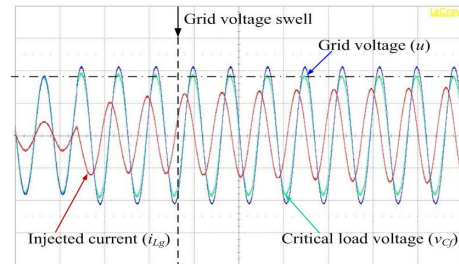


그림 10 20% Swell 발생시 제안한 전압보상 제어기법의 실험파형(실험 정수는 상동)

각각의 경우 설계된 필터 값에 의해 계산된 무효전류 지령치는 1.25PU이고 측정된 값은 1.23PU로 설계조건과 거의 일치하였다.

4. 결론

본 논문에서는 독립부하가 존재하는 분산전원시스템에서 계통이상시 인버터의 정격 상승량 분석을 통하여 이에 맞는 스위치를 선정하고 인버터의 모델을 고려한 전압보상기법 제어기 설계 기법을 제안하였으며 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] E On Netz, "Grid code; high and extra high voltage", E One Netz GmbH, Bayreuth, April 2006.
- [2] 김형진, 최세완, 권준범, "Fault Ride Through와 독립부하 전압 보상 기능을 갖는 계통연계 인버터의 제어기법", 전력전자 학술대회 논문집, 2011, 7
- [3] N. R. Zargari and G. Joos, "Performance investigation of a current controlled voltage regulated PWM rectifier in rotating and stationary frames", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.42, pp.396-401, Aug. 1995.
- [4] S. Yoon, J. Kwon, J. Park, S. Choi, "Indirect Current Control for Seamless Transfer of Three Phase Utility Interactive Inverters", *IEEE APEC 2011*, pp.625-632.