

인덕터 내부저항을 고려한 LCL 필터의 능동댐핑 특성

김용중, 김효성

공주대학교 전기전자제어공학부

An active damping method based on virtual series resistances with inductors of LCL filter for three-phase grid-tied inverter

Yong Jung Kim, Hyosung Kim

School of EE and control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

최근 에너지 저장장치의 사용과 신재생에너지를 이용한 분산발전의 규모가 점차 확대됨에 따라 계통에 원활한 전류주입과 주입전류의 스위칭 고조파 리플성분 저감을 위해 LCL 필터를 이용한 계통연계형 인버터가 널리 사용되고 있다. 이러한 계통연계형 인버터의 주입전류 특성은 LCL 필터에 종속적이기 때문에 정밀한 주입전류제어를 위해 LCL 필터의 정확한 해석이 요구된다. 본 논문에서는 명확한 LCL 필터 해석을 위해 LCL 필터의 인덕터 직렬 내부저항을 고려한 LCL 필터 특성을 해석하였으며, 이러한 해석을 기반으로 LCL 필터 공진현상에 따른 주입전류의 THD를 저감하기 위한 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 기법을 제안하고 HILS 실험을 통해 제안하는 능동댐핑 기법의 성능을 검증하였다.

1. 서론

분산발전 및 에너지 저장장치의 계통연계를 위한 전력변환 장치로써 LCL 필터 기반의 계통연계형 인버터가 널리 사용되고 있다. LCL 필터는 기존 L 필터에 비해 경제적이고 고조파 전류리플에 대한 억제력이 뛰어나다는 장점이 있지만, L 필터에서 존재하지 않던 공진현상이 발생하는 단점이 있다. 또한 계통연계형 인버터의 주입전류 특성은 필터의 특성과 매우 밀접하게 관련되어 있기 때문에 정밀한 주입전류제어를 위해서는 정확한 필터해석이 필수적이다. 하지만 기존의 LCL 필터해석에서는 인덕터의 직렬 내부저항을 고려하지 않고 순수 인덕터로서 해석하였기 때문에 LCL 필터의 공진현상만 파악할 뿐 LCL 필터에서 인덕터 직렬 부적항의 정확한 역할에 대한 해석은 아직 명확하게 이루어지지 않았다^[1].

본 논문에서는 인덕터의 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터를 해석하고 이러한 해석을 기반으로 인덕터의 직렬저항을 제어적으로 모의함으로써 LCL 필터 공진현상에 따른 주입전류의 THD를 저감하기 위한 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 기법을 제안하고 HILS 실험을 통해 제안하는 능동댐핑 기법의 성능을 검증한다.

2. 인덕터의 직렬저항을 고려한 LCL 필터 특성

그림 1은 LCL 필터의 인덕터 직렬내부저항을 고려한 3상 계통연계형 인버터 토폴로지를 나타낸다. 여기서 V_{dc} 는 dc link전압, L_f 는 인버터 측 필터인덕터, L_g 는 계통 측 필터인덕터를 나타내고 R_f , R_g 는 각 인덕터의 직렬내부저항을 나타낸다. 그림 2는 인덕터 직렬 내부저항을 고려한 LCL 필터 블록다이어그램을 나타낸다.

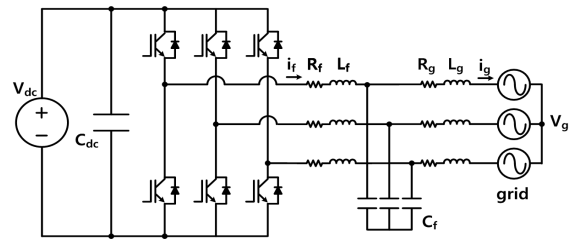


그림 1 LCL 필터의 인덕터 직렬내부저항을 고려한 3상 계통연계형 인버터

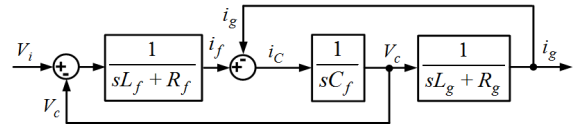


그림 2 인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터 블록다이어그램

$$\frac{I_g}{V_I} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{s^3 + s^2 \left(\frac{R_f}{L_f} + \frac{R_g}{L_g} \right) + s \left(\frac{R_f R_g}{L_f L_g} + \frac{1}{L_f C_f} + \frac{1}{L_g C_f} \right) + \frac{R_f + R_g}{L_f L_g C_f}} \quad (1)$$

$$\frac{I_g}{V_I} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{s^3 + s^2 \left(\frac{1}{\tau_f} + \frac{1}{\tau_g} \right) + s \left(\frac{1}{\tau_f \tau_g} + \frac{1}{L_f C_f} \right) + \frac{1}{\tau_f L_f C_f} + \frac{1}{\tau_g L_g C_f}} \quad (2)$$

$$\frac{I_g}{V_I} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{\left(s + \frac{1}{\tau} \right) \left(s^2 + \frac{1}{\tau} s + \frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f} \right)} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_{res}\tau} \quad (4)$$

식 (1)은 그림 2의 블록다이어그램에 따른 인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 전달함수를 나타낸다. 식 (1)에서 인덕터와 직렬내부저항의 비를 각 인덕터의 시정수로 표현한다면, 인버터 측 필터인덕터의 시정수는 τ_f 로 나타낼 수 있고 계통 측 필터인덕터의 시정수는 τ_g 로 나타낼 수 있다. 식 (2)는 식 (1)의 인덕터와 직렬내부저항의 비를 시정수로 표현한 전달함수를 나타낸다. 이 때, τ_f 와 τ_g 가 τ 로 동일하다면 인덕터의 직렬내부저항을 고려한 전달함수는 식 (3)과 같이 1차 시스템과 2차 시스템으로 정리할 수 있고, 인덕터 직렬내부저항에 의한 감쇠비 ζ 는

식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)는 LCL 필터의 감쇠비 ζ 가 인덕터의 시정수에 종속적임을 의미하고 이는 인덕터 가상 직렬 저항을 이용한 능동댐핑의 가능성을 시사한다.

3. 가상 인덕터 직렬저항 능동댐핑 제어

그림 3은 인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터해석을 기반으로 하는 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 전류제어 블록도이다. 제안하는 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑은 3개의 피드포워드 제어 경로를 가지며, 각각의 피드포워드 제어 대상은 인덕터 전류 및 계통전류, 커패시터 전압이다. 이 때, 계통전류는 기본적으로 주요한 제어대상이기 때문에 측정이 필수적이며, 계통전압은 계통전류와 마찬가지로 주입전류의 PLL을 위해 필수 측정 대상이다. 커패시터전압은 계통전압과 동기하므로 커패시터전압의 피드포워드 제어는 계통전압 피드포워드 제어로 대체 할 수 있다. 그러므로 제안하는 능동댐핑은 기본적인 계통전류 제어를 위한 계통전류 및 계통전압 측정 이외에 인덕터 전류의 측정을 요구한다.

$$R_f = 2\zeta\omega_{res}L_f \quad (5)$$

$$R_y = 2\zeta\omega_{res}L_y \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 가상 인덕터 직렬저항 능동댐핑을 위한 가상 직렬저항 설계법을 나타내며, 가상 직렬저항 설계법은 인덕터 직렬내부저항을 고려한 전달함수 해석에 따른 식 (4)를 통해 유도되었다. 이를 통해 가상 직렬저항은 공진주파수, 감쇠비 및 인덕턴스에 비례함을 알 수 있다. 본 연구에서는 Typhoon Hil사의 HILS 장비인 HIL 400을 이용하여 하드웨어 구현 및 제안하는 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 전류제어기의 성능을 검증하였다. 표 1은 제안하는 능동댐핑의 검증실험을 위한 3상 계통연계형 인버터 설계사양을 나타낸다. 그림 4는 제안하는 능동댐핑 제어가 적용되지 않은 계통전류 파형을 나타내며, 그림 4를 통해 능동댐핑이 적용되지 않은 계통주입전류 파형의 경우 LCL 필터에 의한 공진전류성분이 크게 나타남을 알 수 있다.

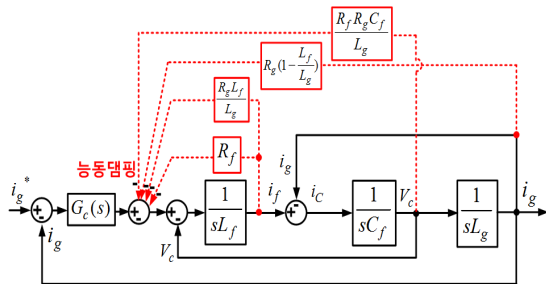


그림 3 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 계통 전류제어 블록도

표 1 3상 계통연계형 인버터 설계사양

정격전력(P_{rated})	3kW
계통 선간 전압(V_g)	380V _{ac}
DC link 전압(V_{dc})	800V _{dc}
계통전원 주파수(f_g)	60Hz
스위칭 주파수(f_{sw})	8kHz
인버터 측 인덕턴스(L_f)	1.541mH
계통측 인덕턴스(L_g)	1.541mH
필터 커패시턴스(C_f)	4.7uF
공진 주파수(f_{sw})	2645Hz

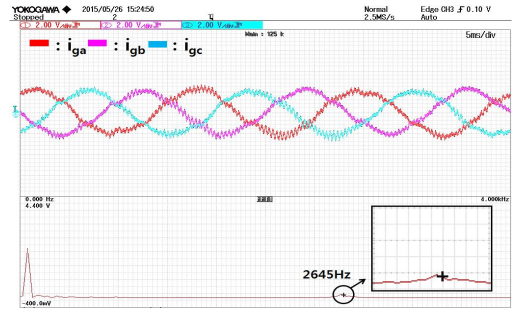


그림 4 제안하는 능동댐핑 미적용 계통전류 파형

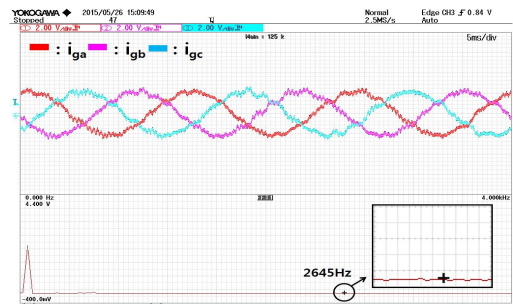


그림 5 제안하는 능동댐핑 적용 계통전류 파형

표 2 제안하는 능동댐핑 적용유무에 따른 계통전류특성 비교

능동댐핑 적용 유무	i_{fres}	THD_i
능동댐핑 미적용	185.9mA	7.94%
능동댐핑 적용	39.8mA	4.37%

그림 5는 제안하는 능동댐핑 제어가 적용된 계통주입전류 파형을 나타내며, 그림 5를 통해 제안하는 능동댐핑 전류제어방식이 LCL 필터의 공진성분이 저감에 효과적임을 알 수 있다. 표 2는 능동댐핑 적용 유무에 따른 전류공진성분 및 전류 THD 비교결과를 나타내며, 표 2를 통해 제안된 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 기법이 능동댐핑을 적용하지 않은 단순 전류제어에 비해 공진전류 억제 효과가 우수함을 확인 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 계통연계형 인버터에 널리 사용되는 LCL 필터의 인덕터 직렬내부저항을 고려한 해석방법을 제시하였고 이러한 해석을 기반으로 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 기법을 제안하였다. 제안된 능동댐핑 기법의 성능을 HILS를 이용한 실험을 통해 검증하였으며, 실험 결과 제안된 인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 기법이 단순 전류제어에 비해 우수한 공진전류 저감효과를 나타냈고 5% 이내의 THD_i 를 확보하였다.

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

참고 문헌

- [1] J. Xu, S. Xie, & T. Tang, "Active Damping Based Control for Grid Connected Filtered Inverter With Injected Grid Current Feedback Only," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, pp. 4746-4758, 2014, Sept.