

DC 마이크로그리드의 DC 버스 전압제어를 위한 Interlinking 컨버터의 PI-IP 혼합제어기 설계 및 분석

김태규*, 이훈*, 최봉연*, 강경민*, 김미나*, 원충연*
 성균관대학교*

Design and Analysis of PI-IP Hybrid Controller of Interlinking Converter for DC Bus Voltage control in DC Microgrid

Tae-Gyu Kim*, Hoon Lee*, Bong-Yeon Choi*,
 Kyung-Min Kang*, Mina Kim*, Chung-Yuen Won*
 Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

This paper proposes a design and analysis for a PI-IP hybrid voltage controller with a combination of PI and IP voltage controller for stable voltage control of DC bus voltage. Transient characteristic of DC bus voltage is improved by designed setting variable value and control method in the variable load and power generation conditions.

1. 서 론

DC 마이크로그리드에는 AC 계통과 다양한 분산전원 및 민감한 디지털 부하가 연계되기 때문에 Interlinking 컨버터는 부하와 발전 전력량의 변동에도 안정적인 DC 버스의 전압제어가 요구된다. 본 논문에서는 DC 버스 측의 발전 및 부하 변동에 강인하고 안정적인 DC 버스 전압제어를 수행하기 위해 PI, IP 전압 제어기를 혼합한 PI-IP 혼합 전압 제어기에 대한 설계 및 분석을 수행한다. 분산전원 및 부하 변동에 따라 혼합제어기의 설정 변수값 α 을 제어함으로써 기존 제어 방식에 비해 설계된 혼합제어기가 DC 계통 전압제어를 안정적으로 수행한다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. Interlinking 컨버터의 구성 및 제어기 설계

2.1 DC 마이크로그리드와 Interlinking 컨버터 구성

DC 마이크로그리드 및 Interlinking 컨버터의 구성도는 그림 1과 같으며, 태양광 시스템 및 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)가 DC 버스에 연계되었다. Interlinking 컨버터는 AC 버스 및 DC 버스를 연계하는 역할로서 외부 환경에 의한 분산 발전의 변동과 다양한 부하 변동 조건에서 DC 계통 전압을 750[V]로 유지되도록 전압제어를 수행한다.

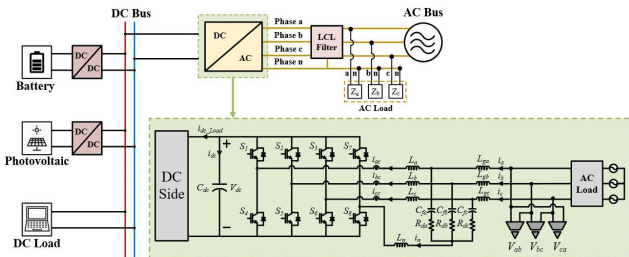


그림 1 DC 마이크로그리드 및 Interlinking 컨버터의 구성도
 Fig. 1 Diagram of DC Microgrid and interlinking converter

2.2 Interlinking 컨버터의 제어기 설계 및 분석

AC 버스와 DC 버스 연계를 위한 Interlinking 컨버터의 제어기 구성은 그림 2와 같다. 각 제어기의 이득값은 Matlab의 SISOtool을 사용해 도출하였다. 제어기의 구성은 DC 계통 전압을 제어하기 위한 외부 루프와 AC 버스 전류를 제어하기 위한 내부 루프로 구성된 이중 제어 루프 방식을 적용했다.

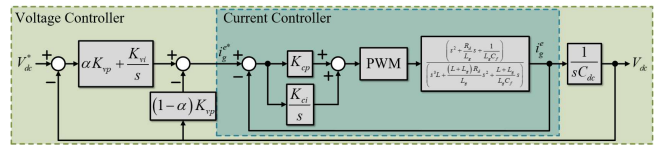


그림 2 Interlinking 컨버터 제어기 블록도

Fig. 2 Block diagram of interlinking converter controller

2.2.1 PI 전류 제어기 설계

전류 제어기는 PI 제어기를 사용하였으며 제어 블록도는 그림 3과 같다. 대역폭은 스위칭 주파수 20[kHz]의 1/20인 1[kHz](6283.2[rad/s])로 선정하고 위상여유는 77°로 설계하였다.

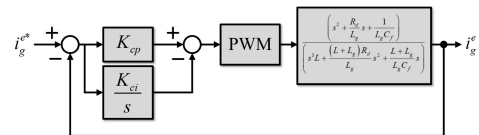


그림 3 PI 전류 제어기 블록도

Fig. 3 Block diagram of PI current controller

2.2.2 PI-IP 혼합 전압 제어기 설계 및 안정도 분석

PI-IP 혼합 전압 제어기의 설계를 위한 제어 블록도 구성은 그림 4와 같으며, 내부 PI 전류 제어기를 포함한다.

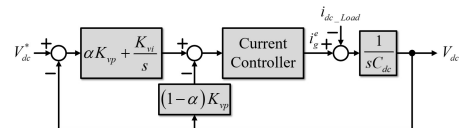


그림 4 PI-IP 혼합 전압 제어기 블록도

Fig. 4 Block diagram of PI-IP hybrid voltage controller

그림 4를 기반으로 한 폐루프 전달함수 G_{hyb-v} 는 식 (2)와 같다.

$$G_{hyb-v}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\left(\alpha K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s} \right) \left(\frac{i_g^c}{i_g^*} \right) \left(\frac{1}{s C_{dc}} \right)}{1 + \left(\frac{i_g^c}{i_g^*} \right) \left(\frac{1}{s C_{dc}} \right) (1 - \alpha) K_{vp}} \cdot \frac{\left(\frac{i_g^c}{i_g^*} \right) \left(\frac{1}{s C_{dc}} \right)}{1 + \left(\alpha K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s} \right) \left(\frac{i_g^c}{i_g^*} \right) \left(\frac{1}{s C_{dc}} \right) (1 - \alpha) K_{vp}} \quad (2)$$

PI 전압 제어기의 대역폭은 전류 제어기 대역폭인 1[kHz]의 1/5인 200[Hz](1256.64[rad/s])로 선정하여 설계하고 위상 여유는 75°로 설계하였다. 전압 제어기는 PI 제어기와 IP 제어기를 혼합한 형태이며, 설정 변수값 α 에 따라 PI 제어기와 IP 제어기의 역할을 모두 수행할 수 있다. 설정 변수값 α 이 0일 때 IP 전압 제어기로서 동작하고 1일 때 PI 전압 제어기로서 동작하게 된다. 설정 변수값 α 이 1에 가까울수록 응답성이 좋아지나 오버슈트가 커지게 되고 0에 가까울수록 응답성은 느려지나 오버슈트가 없어서 민감한 부하에 충격이 가지 않도록 할 수 있는 특성을 갖게 된다. PI-IP 혼합제어기에서는 기존의 PI 전압 제어기와 IP 전압 제어기의 특성을 동시에 갖게 된다.

그림 5는 설정 변수값 α 을 0.2씩 변화시킨 스텝응답과 보드선도의 변화를 나타낸다. 설정 변수값 α 에 따른 대역폭은 표 1에 나타내었으며 PI 제어기의 특성에 가까워질수록 대역폭이 커져 응답성이 빠른 것을 확인할 수 있다.

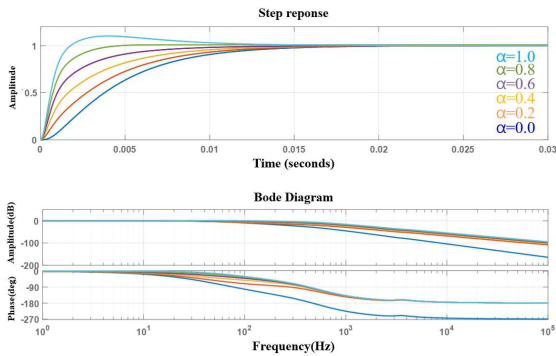


그림 5 설정 변수값 α 에 따른 안정도 판별
Fig. 5 Determination of stability according to setting variable value α

표 1 설정 변수값 α 에 따른 대역폭 변화
Table 1 Bandwidth change according to setting variable value α

설정 변수값 α	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
대역폭 [Hz]	40	42.4	52.5	88.2	171	278

3. 시뮬레이션

DC 마이크로그리드를 모사하여 태양광, ESS를 DC 버스에 연계하였다. 분산전원의 변동 및 DC, AC 계통 측 부하 변동에도 안정적인 DC 버스 전압 제어의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 설계된 PI 전류 제어기와 PI-IP 혼합제어기의 이득값을 비롯한 분산전원의 파라미터는 표2와 같다.

표 2 시뮬레이션 파라미터
Table 2 Simulation parameters

Parameters		Symbol	Values
PI 전류 제어기	P 이득	K_{cp}	9.89874
	I 이득	K_{ci}	14346
PI-IP 혼합 전압 제어기	P 이득	K_{vp}	1.373952
	I 이득	K_{vi}	286.24
정격 전력		$P_{ILC, rated}$	20[kW]
출력 선간 전압		$V_{0, (L-L)}$	380[V _{rms}]
DC 버스 전압		V_{dcbus}	750[V _{dc}]
태양광 시스템 용량		$P_{PV, rated}$	1.5[kW]
ESS 용량		$P_{ESS, rated}$	5[kW]

그림 6은 설정 변수값 α 을 0.2씩 가변하며 PI-IP 혼합제어기가 적용된 시뮬레이션 파형을 나타내었다. 좌측 파형은 외부 DC 계통 전압 V_{dcbus} , DC 계통 전력 $P_{Load-dc}$, AC 계통 전력 $P_{Load-ac}$, 태양광 발전 전력량 P_{pv} 과 일사량 S , ESS의 충·방전 전력 P_{ess} 을 나타내었다. 그림 6의 우측에서는 DC 계통 전압과 DC 계통 전력, AC 계통 전력을 0초부터 0.08초까지의 과도상태와 3상 전류의 시뮬레이션 파형을 나타내었다.

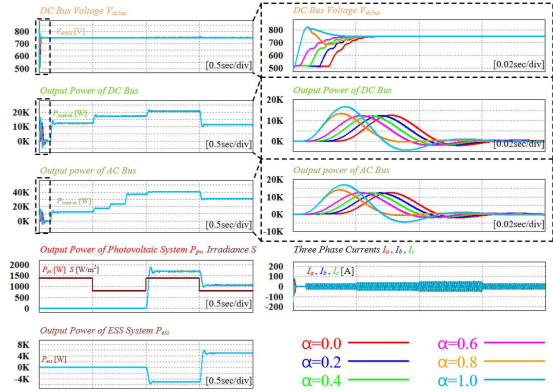


그림 6 다양한 분산 발전 및 부하 변동에서 설정 변수값 α 의 변화에 따른 과도상태와 정상상태 파형
Fig. 6 Waveform of transient and steady state according to setting variable value in various load and power generation condition

4. 결론

본 논문은 Interlinking 컨버터의 전압 제어기를 PI-IP 혼합제어기로 선정하여 설계 후 설정 변수값 α 에 따른 DC 버스 전압의 과도상태를 비교하였다. 제어기 설계는 SISootool을 이용해 내부 전류 제어기의 대역폭은 스위칭 주파수의 1/20인 1[kHz](6283.2[rad/s]), 외부 전압 제어기의 대역폭은 전류제어기의 1/5인 200[Hz](1256.64[rad/s])를 갖도록 설계했다. 설계된 제어기를 설정 변수값 α 의 변화에 따라 대역폭이 40[Hz]에서 278[Hz]까지 변하는 것을 보드선도를 통해 확인하였고, 과도상태에서 DC 계통 전압의 오버슈트와 정착시간을 비교하였다. 이 때, PI-IP 혼합제어기는 설정 변수값 α 의 변화에도 정착시간은 큰 차이가 없고, 설정 변수값 α 가 0.6일 때 PI 제어기의 빠른 반응성과 IP 제어기의 오버슈트가 없는 특성을 모두 갖는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 적절한 설정 변수값 α 을 선정한다면 PI 제어기와 IP 제어기의 특성을 모두 갖는 개선된 특성을 갖는다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이는 향후 DC 마이크로그리드의 전압제어에 관한 연구 시 참고 자료가 될 것으로 사료 된다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 2019381010001B)

참고 문헌

- [1] Kim, Sang-Hoon. "DC, AC, BLDC Motor Control." BogDoo, Korea (2010)
- [2] Sue, S. M., & Pan, C. T. (2008). Voltage - constraint-tracking - based field-weakening control of IPM synchronous motor drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(1), 340-347.