

가상 직류 발전기 기법을 이용한 멀티터미널 DC 시스템의 안정도 향상 기법

이동환, 정재정
경북대학교

Enhancing Stability of Multi-Terminal DC System Using Virtual DC Machine Based Control

Dong-Hwan Lee, Jae-Jung Jung

Kyungpook National University

ABSTRACT

오늘날 전반적인 전력 시스템은 주로 교류 시스템으로 구성되어 있지만, 점차 세계적인 직류 시스템의 설치 및 운영 가속화 추세에 따라 Multi-Terminal Direct Current (MTDC) 시스템이 주목받고 있다. MTDC 시스템은 미래 전력 시스템의 유망한 기술로 각광받고 있으며, 이는 주요 연구 및 산업분야의 관심사 중 하나이다. 본 논문은 MTDC 시스템의 직류 버스단에 순간적인 부하가 투입될 시에도 직류단 전압의 안정도를 보장하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 직류기의 동특성을 모사하는 가상 직류 발전기 기법을 이용한 Active Power Control(APC)을 제안한다. 제안된 방법을 검증하기 위해, 오프라인 시뮬레이션을 통하여 가상 직류 발전기 기법의 유무에 따른 특성을 비교하고 분석하였다.

1. 서론

재생에너지 기반 분산발전원, 에너지 저장 시스템 및 전력 전자 기기로 연결된 부하가 증가함으로써 직류 시스템의 운영 및 제어에 대한 관심이 집중되고 있다. 병렬 운영 전력 전자 기기의 수가 증가함에 따라 직류 시스템은 높은 가용성과 신뢰성을 위해 MTDC 시스템으로 상호 연계되고 있으며^[1], 이는 방사형(Radial), 환형(ring), 망형(mesh)등의 형태로 구성된다. 이러한 시스템의 대표적인 제어 방식 중 드롭 제어는 통신에 대한 부담이 적으며, 이를 통하여 예비력 공유 및 전류, 전압을 조절한다.^[2]

그림 1은 환형 4단자 MTDC 시스템 회로도를 나타낸다. $Z_{12}, Z_{13}, Z_{24}, Z_{34}$ 은 각각 선로 임피던스를 의미하고, V_{in} 은 양방향 DC-DC 컨버터의 입력 전압, $V_{bus1}, V_{bus2}, V_{bus3}, V_{bus4}$ 은 각 컨버터의 버스 전압을 의미한다. 직류 버스단에 직류 부하가 갑작스럽게 투입되는 경우 직류 버스단 전압이 순간적으로 변동하게 된다. 이는 투입되는 직류 부하에 영향을 미치게 되며, 동시에 연결된 대다수의 시스템에 스트레스를 줄 수 있다. 따라서 제안하는 가상 직류 발전기 기법을 이용한 APC를 사용하면 전력 공유 시 제어에서 모의된 댐핑 및 관성 특성으로 인하여 부하에 대한 영향을 최소화시킬 수 있다.

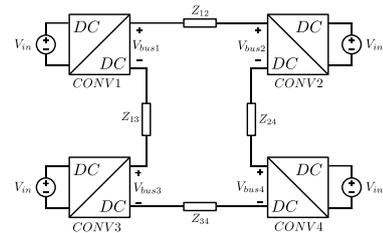


그림 1. 환형 4단자 MTDC 시스템 회로도

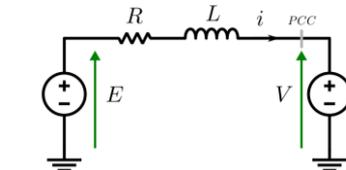


그림 2. 가상 직류 발전기와 직류 계통 등가회로

따라서 본 논문에서는 제안하는 가상 직류 발전기 기법을 소개하고, 제안하는 기법의 안정도 기여에 대한 유효성을 검증하기 위하여 오프라인 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 제안하는 가상 직류 발전기 기법을 이용한 APC

제안하는 방식은 기존의 동기발전기가 계통과 전력 교환을 통해 동기화하는 전력 기반 동기화 방식을 기반으로 제안된다. 그림 2는 가상 직류 발전기와 직류 계통 등가회로를 나타낸다. E 는 가상 직류 발전기의 가상 유도 기전력, V 는 직류 버스단 전압을 나타낸다. 가상 직류 발전기의 출력 유효전력은 식(1)과 같이 유도된다. 따라서, 가상 유도 기전력에 대한 유효전력의 전달함수는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(s) = \frac{E - V}{Ls + R} \cdot V \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial E}(s) = \frac{V}{Ls + R} \quad (2)$$

2.1 동요 방정식(swing equation) 기반 제어

그림 3은 직류기의 대표적인 기계방정식인 동요 방정식 기반 APC 블록 다이어그램을 나타낸다. 그림 3에서 보듯이, 토크 계수 $C_T \Phi$ 를 이용하여 회전 주파수에 따른 가상 유도 기전력을 모사할 수 있다. 유효전력 지령과 출력 유효전력 간의 페루프 전달함수

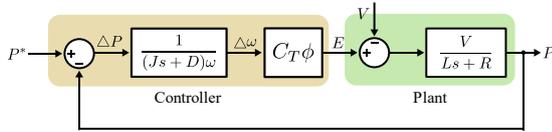


그림 3. Swing equation 기반 APC 블록 다이어그램

는 식(3)과 같다. 식(4)와 같은 2차 시스템 일반항과 비교하면 각 매개변수는 식(5)와 같이 나타난다.

$$\frac{\partial P}{\partial P^*}(s) = \frac{C_T \phi V}{D\omega R + C_T \phi V} \cdot \frac{\frac{D\omega R + C_T \phi V}{J\omega L}}{s^2 + \frac{JR + DL}{JL}s + \frac{D\omega R + C_T \phi V}{J\omega L}} \quad (3)$$

$$H(s) = k \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

$$k = \frac{C_T \phi V}{D\omega R + C_T \phi V}, \quad 2\zeta\omega_n = \frac{JR + DL}{JL}, \quad \omega_n^2 = \frac{D\omega R + C_T \phi V}{J\omega L} \quad (5)$$

2.2 PI 제어기 기반 제어

그림 4는 PI 제어기 기반 APC 블록 다이어그램을 나타낸다. 유효전력 지령과 출력 유효전력 간의 폐루프 전달함수는 식(6)과 같다. 동요 방정식 기반 APC와 유사한 동특성을 가지도록 하기 위해 식(5)를 이용하여 식(6)과 비교하여 식(7)과 같은 PI 제어기 이득값이 선정된다. 직류 버스단 전압과 출력 유효 전력에 대한 전달함수는 식(8)과 같이 나타나며, 식(9)와 같은 정상상태 값을 가진다.

$$\frac{\partial P}{\partial P^*}(s) = \frac{\frac{K_p C_T \phi V}{L}s + \frac{K_i C_T \phi V}{L}}{s^2 + \frac{R + K_p C_T \phi V}{L}s + \frac{K_i C_T \phi V}{L}} \quad (6)$$

$$K_p = \frac{1}{C_T \phi V} \cdot \left(\frac{JR + DL}{J} - R \right), \quad K_i = \frac{1}{C_T \phi V} \cdot \frac{D\omega R + C_T \phi V}{J\omega} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V}(s) = -\frac{\frac{V_s}{L}}{s^2 + \frac{R + K_p C_T \phi V}{L}s + \frac{K_i C_T \phi V}{L}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V}(0) = 0 \quad (9)$$

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안하는 가상 발전기 기법을 이용한 APC를 오프라인 시뮬레이션인 PLECS 프로그램으로 500MW MTDC 시스템을 구성하고 제어 방식을 검증하였다. 시뮬레이션 매개변수는 다음과 같다. 정격 전력은 500MW, DC 캐패시터 전압은 1MV, DC 캐패시터 캐패시턴스는 225 μF, 컨버터 측 DC 전압은 0.9MV, DC 선로 인덕턴스는 100mH, 관성 시간 상수는 10s, 가상 전기자 저항은 16.5Ω이다. 본 시뮬레이션은 PI 제어기 기반 제어로 수행하였다. 시뮬레이션 시나리오는 0.5s까지 직류 버스단 전압을 1MV로 부스팅하고, 5s부터 CONV2의 직류 버스단에 1pu 직류 부하가 투입되고, 10s에 2차 제어가 실행된다. 이때, V-P 드롭을 이용하여 1차제어를 실시하였다. 드롭 계수는 0.1V/kW로 설정하였다. 또한, 각 선로의 길이는 150km, DC 선로의 저항은 0.011Ω/km, 인덕턴스는 0.519mH/km, 캐패시턴스는 0.19 μF/km으로 설정된

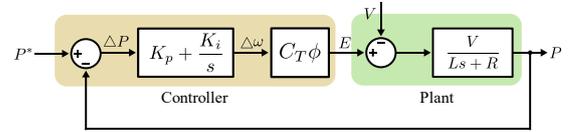


그림 4. PI 제어기 기반 APC 블록 다이어그램

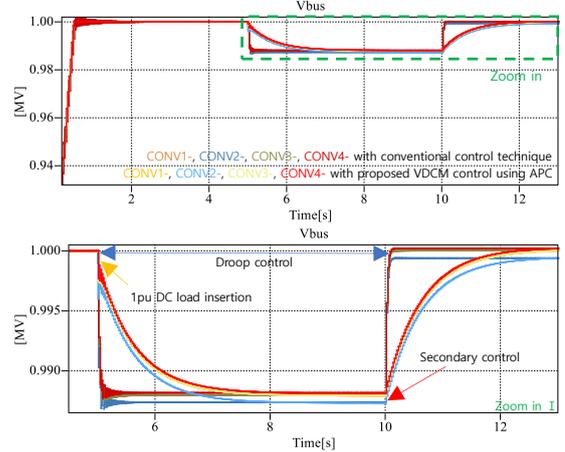


그림 5. 제안하는 제어 유무에 따른 각 컨버터의 직류 버스단 전압

π -section line)를 사용하였다. 그림 5는 제안하는 제어 유무에 따른 각 컨버터의 직류 버스단 전압을 나타낸다. 선로의 특성을 분포정수모델을 적용하여 모델링하였기 때문에 부하가 투입되는 인근 컨버터가 영향을 더 미치는 것을 알 수 있다. 제안하는 제어 방법을 사용할 경우 관성 및 댐핑 특성으로 인하여 직류 버스단 전압이 순간적으로 감소하지 않으며, 안정도가 향상하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전력 기반 동기화 방식을 기반으로 제안하는 가상 직류 발전기 기법을 이용한 APC를 적용하고 분석하였다. 이 방식은 교류 시스템의 가상 동기발전기 기반 제어 방식과 유사하게, 직류 시스템에서도 가상 직류 발전기의 특성을 모사한 방식이다. 따라서 제안하는 방식의 타당성을 검증하기 위해 500MW MTDC 시스템 시뮬레이션을 구성하였고, 직류단 부하 투입 시 제안하는 방식이 직류 버스단의 안정도 향상에 기여하는 것을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2024년 착수 사외공모 기초연구 사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R23X005-8)

참고 문헌

- [1] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "DC Microgrids—Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3528–3549, May 2016.
- [2] F. Gao, R. Kang, J. Cao and T. Yang, "Primary and secondary control in DC microgrids: a review," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 227–242, March 2019.