

가상 직류기 제어를 이용한 Delta 결선 직렬 연결 H-브리지 컨버터 기반 ESS의 안정도 향상기법

이동환, 정재정
경북대학교

A Stability Improvement Method with Virtual DC Machine for Delta Connected Cascaded H-Bridge Converter Based ESS System

Dong Hwan Lee, Jae-Jung Jung
Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문에서는 가상 직류기 제어를 이용한 Cascade H-Bridge(CHB) 컨버터 기반 에너지 저장 장치 시스템(ESS)의 안정도 향상기법을 제안한다. CHB 컨버터 기반 ESS는 각 서브 모듈에 양방향 DC-DC 컨버터와 배터리를 결합하여 직렬로 연결된 형태를 가진다. 각 서브 모듈의 H 브리지 컨버터와 양방향 DC-DC 컨버터가 모듈의 직류단에 연결되어 있으므로 H 브리지 컨버터의 전압 합성을 위해 직류단 전압을 일정하게 유지해야 한다. 본 논문에서는 직류단 전압 안정도 향상을 위해 직류기의 동특성을 모사하는 Virtual DC Machine(VDCM) 제어 기법을 적용한다. 그리고 오프라인 시뮬레이션을 통해 VDCM 제어 유무에 따른 직류단 전압 특성을 분석하고 비교하였다.

캐패시터에 저장된 에너지를 방출하게 된다. 이는 시스템 자체에 영향을 주므로 개선이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 CHB 컨버터 기반 ESS의 원활한 전압 합성을 위하여 일정한 직류단 전압이 필요하므로 직류기의 동특성을 양방향 DC-DC 컨버터로 모사하는 Virtual DC Machine(VDCM) 제어와 기존의 제어를 비교하여 직류단 전압의 안정도 향상을 위한 전압 백동저감 특성을 오프라인 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

최근 신재생 에너지와 같은 분산전원이 지속적으로 증가함에 따라 다양한 전력전자 컨버터를 사용하여 기존의 송배전 시스템에 연계된다. 따라서 효율적인 에너지 사용 및 관리를 위하여 유연전송시스템(Flexible AC Transmission System; FACTS)과 고전압 대용량 에너지저장장치시스템(Energy Storage System; ESS)을 결합한 시스템의 연구가 이루어지고 있다. 또한 전력변환장치의 계통 접속 비중이 증가함에 따라 전력 시스템의 관성이 저하되므로 교류 계통에서는 주파수, 직류 계통에서는 전압 불안정성을 야기할 수 있다. 그림 1은 본 연구에서 고려된 Delta 결선 Cascade H-Bridge(CHB) 컨버터 기반 ESS 회로도를 나타낸다. 각 상은 Delta 구조로 연결되어 있으며 CHB 컨버터의 각 서브 모듈에 양방향 DC-DC 컨버터와 배터리가 결합되어 있는 형태를 가진다. 상위 제어기에서 CHB 컨버터 기반 ESS에 유효전력 및 무효전력 지령을 전달하면 지령에 관계없이 양방향 DC-DC 컨버터는 셀 캐패시터 전압 제어를 동작하게 된다. 또한 CHB 컨버터 기반 ESS에서는 지령에 따른 유효전력 및 무효전력 제어를 수행하게 된다. 이때 안정적으로 시스템을 운영하기 위해서는 전압 합성을 위한 직류단 전압이 일정하게 유지 되어야한다. CHB 컨버터 기반 ESS가 유효전력 공급 시 관성 및 댐핑성분이 없는 기존의 전압제어를 수행하게 되면 과도상태에서 순간적으로

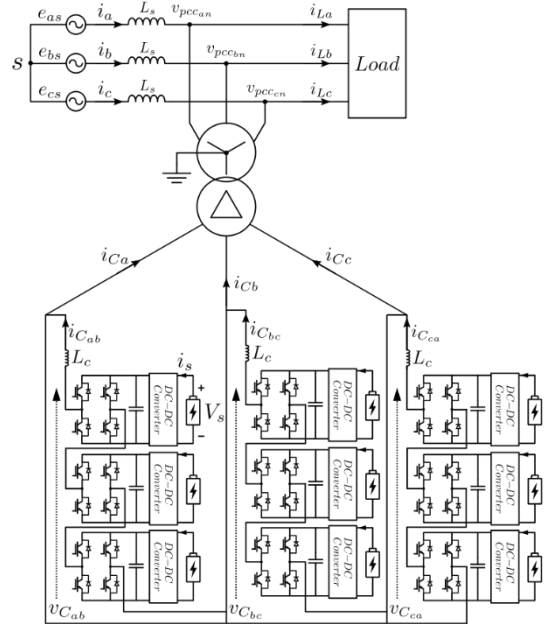


그림 1. Delta 결선 CHB 컨버터 기반 ESS 회로도

2. 양방향 DC-DC 컨버터의 VDCM 제어알고리즘

2.1 직류기 모델

직류기 등가 모델은 그림 2(a)와 같다. 여기서 v_f, i_f, R_f 는 각각 여자 전압, 여자 전류, 계자 권선 저항을 나타낸다. 등가 회로 방정식, 토크 평형 방정식 및 전력 평형 방정식은 식(1)-(3)으로 나타낼 수 있다. 식(1)은 출력 전압 $v_{out,m}$, 전기자 권선의 유도 기전력 E , 전기자 권선 저항 R_a 와 출력 전류 $i_{out,m}$ 에 대한 관계식을 유도할 수 있다. 댐핑 계수 D , 관성 계수 J 를 이용하여 기계적 토크 T_m 과 전기적 토크 T_e 의 관계를 알 수 있다.

P_m 은 기계적 출력, P_e 는 전기적 출력, P_D 는 댐핑에 의한 파워, P_{iner} 는 관성에 의한 파워이다. ω 와 ω_n 은 회전자 속도와 정격 회전자 속도를 의미하며, $K_{e,m}$ 와 $\lambda_{f,m}$ 는 토크 계수(역기전력 계수)와 계자 권선에 의해 전기자 권선에 쇄교하는 자속이다. 따라서 직류기가 어떠한 교란에 의하여 전력 변동이 발생하였을 경우, 회전자의 운동에너지를 흡수 또는 방출하여 전력 차이를 보상하여 $v_{out,m}$ 의 변동을 억제하는 것을 알 수 있다.

$$\begin{cases} v_{out,m} = E - R_a i_{out,m} \\ E = K_{e,m} \lambda_{f,m} \omega \end{cases} \quad (1)$$

$$T_m - T_e - D(\omega - \omega_n) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_m - P_e - \frac{\omega_n D}{K_{e,m} \lambda_{f,m}} (E - v_n) \\ P_D = \frac{\omega_n D}{K_{e,m} \lambda_{f,m}} (E - v_n) \\ P_{iner} = \frac{\omega_n J}{K_{e,m} \lambda_{f,m}} \frac{d(E - v_n)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_e = \omega T_e \approx \omega_n T_e \quad (4)$$

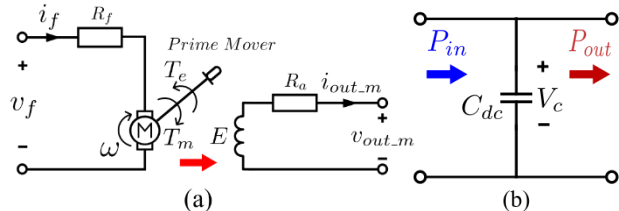


그림 2. 직류기와 캐패시터 사이의 관성과 댐핑 맵핑 : (a) 직류기 등가 모델 (b) 직류단 캐패시터

2.2 캐패시터 모델

그림 2(b)의 직류단 캐패시터 전력 평형 방정식은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} - P_{out} = V_c C_{dc} \frac{dv_c}{dt} \quad (5)$$

여기서 P_{in} 은 컨버터의 출력 전력이고, P_{out} 은 직류단 출력 전력이다. 캐패시터 전력은 직류단 캐패시턴스 C_{dc} 와 캐피터 V_c 전압으로 나타낼 수 있다. 직류단 출력 전력이 변동된다고 가정하면 불균형한 전력으로 인하여 캐패시터에 저장된 에너지를 사용한다. 이는 캐패시터의 충전 및 방전으로 인한 전압변동을 야기시킨다. 또한 직류기의 회전자 운동에너지($\frac{1}{2}J\omega^2$) 및 컨버터의 직류단 캐패시터에 저장된 전기에너지($\frac{1}{2}C_{dc}v^2$)가 직류단 전압의 안정성 향상에 기여한다.^[1]

3. VDCM 기반 양방향 DC-DC 컨버터 제어

그림 3은 VDCM의 등가 회로 다이어그램을 나타낸다. 직류기와 VDCM 기반 양방향 DC-DC 컨버터는 표 I과 같이 유사성을 나타낸다. 직류기의 에너지는 원동기에 의해 제공되며, 양방향 DC-DC 컨버터의 관성 및 댐핑 특성은 ESS에서 나오며, 입력 필터는 여자 권선을 모사한다. 가상 관성 J_{vir} 을 모사를 위해 양방향 DC-DC 컨버터의 출력 측 가상 캐패시터 C_{vir} 를 이용한다. 이는 가상 회전자로 간주되어 전압 변동의 관성을 제공하게 된다.

다. 또한 댐핑 성분은 직류단 캐패시터의 기생 컨덕턴스를 이용하여 나타낼 수 있다.^[2] VDCM 제어는 전기자 저항을 모사하기 위해 직류기의 전자기적 방정식을 이용하고, 관성 및 댐핑을 모사하기 위해서 직류기의 전기기계 방정식을 이용한다. 따라서 2절에서 설명한 직류기와 캐패시터 모델의 방정식들을 이용하여 VDCM 제어를 위한 방정식들을 나타낼 수 있다.

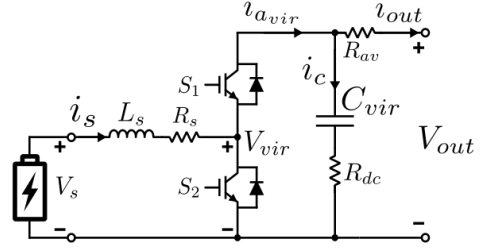


그림 3. VDCM의 등가 회로 다이어그램

표 I. 직류기와 VDCM 비교

물리적 의미	직류기	VDCM
기계적 전력	원동기	ESS
관성 모멘트	회전자(J)	$C_{vir}(J_{vir})$
댐핑 소스	댐핑 계수(D)	$G_{dc}(D_d)$
전기자 권선	R_a	R_{av}
여자 권선	R_f	R_s
전기자 유도기전력	E	v_{vir}
각주파수	ω	ω_{vir}
출력 전압	$v_{out,m}$	v_{out}
여자 계수	$K_{e,m} \lambda_{f,m}$	$K_e \lambda_f$

여기서 G_{dc} 는 직류단 캐패시터의 기생 컨덕턴스이다.

3.1 Electrical Part

직류기의 등가 회로 방정식과 전자기방정식을 이용하여 VDCM의 전자기적 특성을 모사할 수 있다.

$$v_{out} = v_{vir} - R_{av} i_{out} \quad (6)$$

$$v_{vir} = K_e \lambda_f \omega_{vir} \quad (7)$$

$$P_e = \omega_{vir} T_e \approx \omega_{out} i_{out} \quad (8)$$

가상 전기자 유도기전력 v_{vir} 과 가상 전기자 저항 R_{av} 을 이용하여 출력 전류 지령을 얻을 수 있다. 가상 전기자 저항은 물리적인 저항이 아니며 소프트웨어적으로 변경이 가능하므로 출력 전류의 크기를 제어할 수 있다. 또한 저항의 댐핑 성분으로 인하여 순간적인 돌입전류를 방지할 수 있다. 따라서 컨버터 투입 및 탈락 시 안정성을 향상시킬 수 있다.

3.2 Mechanical Part

직류기의 1차 토크방정식(swing equation)을 기반으로 직류기의 전기기계적 특성을 양방향 DC-DC 컨버터에 모사할 수 있다.

$$\begin{cases} P_{m,vir} - P_e - \frac{\omega_n D_d}{K_e \lambda_f} (v_{vir} - V_n) = \frac{\omega_n J_{vir}}{K_e \lambda_f} \frac{d(v_{vir} - V_n)}{dt} \\ P_{D,vir} = \frac{\omega_n D_d}{K_e \lambda_f} (v_{vir} - V_n) \\ P_{iner,vir} = \frac{\omega_n J_{vir}}{K_e \lambda_f} \frac{d(v_{vir} - V_n)}{dt} = C_{vir} V_n \frac{d(v_{vir} - V_n)}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $P_{m,vir}$, P_e , $P_{D,vir}$, $P_{inner,vir}$ 은 각각 가상 기계적 출

력, 전기적 출력, 가상 댐핑 및 가상 관성에 의한 전력이 다. V_n 은 정격 출력 전압, ω_n 은 정격 각주파수이다. VDCM 기반 양방향 DC-DC 컨버터는 가상 관성 계수 (J_{vir}) 및 댐핑 계수 (D_d)를 소프트웨어적으로 변경하여 제어가 가능하다. 따라서 운전조건에 따라 실시간으로 파라미터를 변경하여 유연한 시스템 운영이 가능하다.

3.3 VDCM 제어 블록 다이어그램

식 (6)–(9)을 이용하여 그림 4와 같은 VDCM 제어 블록 다이어그램을 나타낼 수 있다. 관성 및 댐핑을 모사하는 전기기계적 파트는 외부 전압 루프를 통하여 기계적 토크를 얻으며 계산된 전기적 토크를 통해 가상 각주파수를 출력한다. 전기자 저항을 모사하는 전자기계적 파트는 앞서 얻은 가상 각주파수를 통해 가상 전기자 유기전력을 생성하며 등가 회로 방정식을 통해 출력 전류 지령을 얻을 수 있다. 생성된 전류 지령은 전류 제어기를 통해 PWM 지령을 생성한다.

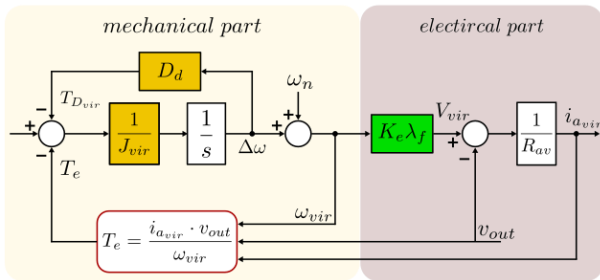


그림 4. VDCM 제어 블록 다이어그램

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 VDCM 제어 알고리즘을 검증하기 위해 1MVA CHB 컨버터 기반 ESS 시스템을 구성하고 오프라인 시뮬레이션인 PLECS 프로그램으로 수행하였다. 레그 당 3개의 H 브리지 서브 모듈로 구성되었으며 셀 캐패시터는 $450 \mu\text{F}$, 셀 캐패시터 하나 당 평균 전압은 4200V이다. 또한 암 인덕터는 20mH를 사용하였다. 변조 기법은 phase shift pulse width modulation (PSPWM) 기법을 이용하였으며, 유니폴라 스위칭 방식을 이용하여 출력 등가 스위칭 주파수는 5kHz, 각 셀의 PWM 캐리어 주파수는 833.33Hz이다. 본 시뮬레이션은 배터리 State-of-Charge (SOC)는 80%로 일정하다고 가정하였다. 시뮬레이션 시나리오는 다음과 같이 0.8s에 계통 단 접속, 1.6s에 CHB 컨버터 기반 ESS에서 계통으로 무효전력 1MVAR를 전송하고, 2.8s에 CHB 컨버터 기반 ESS에서 계통으로 유효전력 1MW를 전송한다. 그림 5는 기존의 제어기법과 VDCM 제어기법을 비교한 시뮬레이션 결과 파형이다. 이때 가상 전기자 저항 R_{av} 은 1Ω 으로 진행하였다. 유효전력 전송 시 셀 캐패시터의 에너지가 방출하여 직류단 전압 맥동이 크게 발생한다. 이때 VDCM 제어 알고리즘을 이용하면 과도 응답 특성이 크게 향상함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전력 반도체 기반 컨버터가 직류기의 관성 및 댐핑 특성을 모사하는 VDCM 제어기법을 알아

보았다. 기존의 컨버터 제어기법과 비교하여 VDCM 제어기법이 직류단 전압의 안정도 향상에 기여하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. VDCM 제어기술은 현재 DC 마이크로그리드를 중점적으로 연구가 진행되고 있으나 다양한 토폴로지에 확장하여 적용 가능하다. 따라서 VDCM 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 CHB 컨버터 기반 ESS에 적용하여 직류단의 안정성 향상 및 동특성이 개선되는 것을 확인하였다.

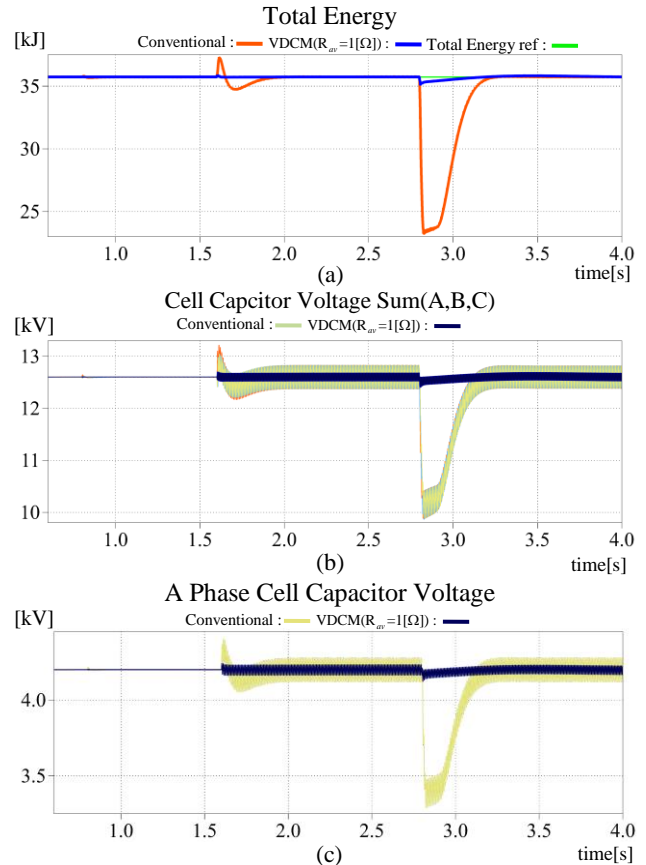


그림 5. 시뮬레이션 결과 파형 (a)전체 캐패시터 에너지 (b) 각상 셀 캐패시터 전압 합 (c) A상 셀 캐패시터 전압

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (20210501010020)

참고 문헌

[1] G. Lin *et al.*, "A Virtual Inertia and Damping Control to Suppress Voltage Oscillation in Islanded DC Microgrid," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 1711–1721, Sept. 2021

[2] Samanta, S., Mishra, J.P. and Roy, B.K. (2018), Virtual DC machine: an inertia emulation and control technique for a bidirectional DC-DC converter in a DC microgrid. *IET Electric Power Applications*, 12: 874–884.