

직류 전기선박 발전시스템 병렬운전을 위한 가변이득 드롭 제어 기법

정윤철, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Variable-Gain Droop Control for Parallel Operation of Generation Systems in DC Electric Ships

Yoon Cheul Jeung, Dong Choon Lee
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류 전기 선박의 발전시스템의 병렬 운전시 순환전류 저감 및 직류 전압유지에 효과적인 가변이득 드롭 제어 기법을 제시한다. PSIM을 이용한 시뮬레이션 결과를 보인다.

1. 서론

최근 전기 선박에 대한 관심이 높아지고 있다. 2010년, 중전압 직류배전 선박의 전력 시스템에 대한 IEEE 표준이 제안되고 이러한 추세에 맞춰 국내외적으로 이 분야에 많은 연구가 진행되고 있다.

직류 전기 선박의 배전 시스템은 발전시스템, 에너지 저장장치, 추진부하, 서비스 부하와 같은 전력 변환 장치로 구성되며, 직류 버스에 직접적으로 연결되어 구동된다. 이러한 배전 시스템에서 전력선의 임피던스, 대용량 부하 및 펄스 부하 등으로 인해 출력 전력에 불균형이 발생하므로 병렬운전 기법이 필수적으로 적용되어야 한다. 이를 위해 통신을 필요로 하지 않고 구성이 간단한 직류 V/I 드롭 제어 기법의 적용을 고려한다^[1].

선박에서는 짧은 시간 동안 큰 전력이 요구되는 펄스부하가 동작할 경우 직류버스 전압에 진동이 발생한다. 선박의 직류배전 시스템에서 IEEE 표준인 1709 2010에 의거하여 주 배전선의 직류 전압 레벨에 따라 정상상태 및 과도상태에 대한 전압 변동과 전압강하 보상 조건을 정할 수 있는데, 직류 전압 레벨이 6kV인 경우 발전시스템의 출력 전압은 10% 이내로 유지되어야 한다^[2]. 드롭 제어로 인해 직류버스 전압이 최저 유지 범위 부근의 값이 될 때, 부하가 급변할 경우 직류버스 전압이 유지 범위보다 낮아지는 문제가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 여러 대의 발전기가 설치된 선박 전력 시스템에서 순환전류를 저감하고 직류버스 전압을 일정 값 이내로 유지하며 과도상태에서 전압보상에 효과적인 가변이득 드롭 제어 기법을 제안한다.

2. 시스템 구성 및 모델

그림 1은 전기 선박의 직류 전력 시스템을 나타내고, 표 1은 발전 시스템의 정격 용량 및 부하조건을 보인다. 전력 공급을 위한 AC/DC 변환기는 3 레벨 NPC(neutral point clamped) 컨버터, 부하 연결용 컨버터는 강압형 DC/DC 컨버터를 선정한다. 전력선 임피던스는 저항과 인덕터로 구성된다.

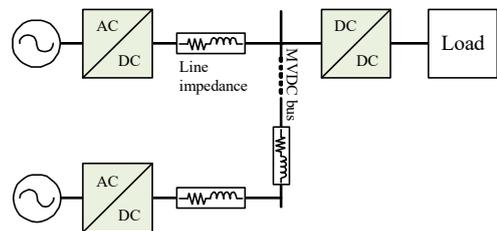


그림 1 직류버스 기반의 전력 시스템

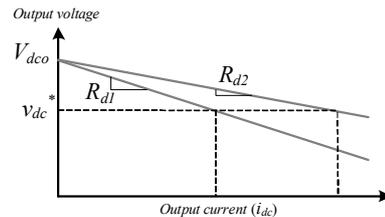


그림 2 직류 V/I 드롭 제어

표 1 발전 시스템의 정격 용량 및 부하조건

직류 버스 전압	6 kV
발전부 (AC/DC 컨버터)	4 MW × 2
부하 (DC/DC 컨버터)	8 MW
전선의 임피던스	0.02 Ω / 0.2 mH

3. 가변이득 드롭 제어기법

본 장에서는 직류 드롭 제어 및 제안하는 가변이득 기법에 대해 논한다.

3.1 V/I 직류 드롭 제어

그림 2는 직류 드롭 제어기의 동작 특성을 보인다. 출력 전류가 증가함에 따라 지령 전압이 감소한다. 드롭 제어기의 이득(R_d)은 가상적인 저항성분으로 간주할 수 있고 식 (1)과 같이 최대 출력 전류(i_{dcmax})와 전압의 허용 변화량(Δv_{dc})으로 표현할 수 있다^[1].

$$R_d = \Delta v_{dc} / i_{dcmax} \quad (1)$$

직류 드롭 제어기는 출력되는 전압을 감소시키는 역할을 하므로 직류전압의 평균값이 시스템에 요구하는 기준전압보다 낮아지게 된다. 드롭 이득이 크면 순환전류의 크기가 감소하지만 지령전압의 크기가 더 감소하게 된다. 이때 부하로 인한 직류버스의 한계조건 이하로 전압이 변동하면 제어기에 입력되는 오차 성분이 작으므로 빠른 보상을 할 수 없는 경우가 발생한다^[1].

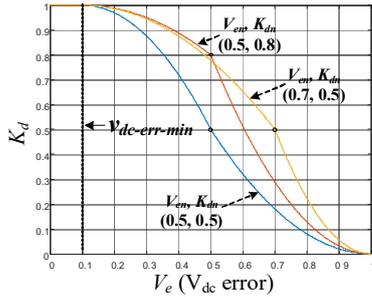


그림 3 가변이득 드롭 제어 기법의 그래프 ($n = 2$)

3.2 가변이득 드롭제어 기법

본 연구에서는 직류전압 오차에 따른 가변 드롭 이득 기법을 제안한다. 직류전압 오차가 정상상태 허용치 내의 값을 가지면 큰 드롭 이득을 유지함으로써 전류의 편차를 줄이고, 허용치보다 오차가 크면 드롭 이득을 빠르게 감소시킴으로써 직류 버스 전압을 허용치 내로 유지되게 한다.

전압오차가 큰 경우 드롭 이득 계수(K_d)는 감소하며, 전압의 오차가 작을 경우 드롭 이득 계수는 1에 근접한 값을 가진다. 드롭 이득은 드롭 이득 계수를 이용하여 식 (2)와 같이 새롭게 계산될 수 있다. 드롭 이득 계수는 직류 버스 전압 오차의 크기에 따라 식 (3) (5)와 같이 세 부분으로 구분되어 결정된다.

$$v_{dc}^* = V_{dc0} - (K_d \times R_d) \times i_{dc} \quad (2)$$

1) 최소 기준 이하 ($V_e \leq V_{e_min}$)

$$K_d = 1 \quad (3)$$

2) 최소 기준 이상, 정상상태 허용기준 이하 ($V_{e_min} < V_e \leq V_{e_n}$)

$$K_d = (2 - K_n) - (1 - K_n) \times \left[1 + \frac{V_e - V_{e_min}}{V_n - V_{e_min}} \right]^n \quad (4)$$

3) 정상상태 허용기준 이상 ($V_{e_n} < V_e \leq V_{e_max}$)

$$K_d = -K_n + K_n \times \left[1 + \frac{V_e - V_{e_max}}{V_n - V_{e_max}} \right]^n \quad (5)$$

여기서 V_e 는 직류전압 오차, V_{e_min} 은 직류전압 오차의 최소치, V_{e_max} 는 직류전압 오차의 최대치, V_{e_n} 은 직류전압 오차의 정상상태 허용치, K_d 는 드롭 계수, K_{dn} 은 전류편차의 비율에 대한 드롭 계수를 의미한다. 그림 3에 n 이 2일 경우, V_{en} 과 K_{dn} 에 따른 가변이득 드롭 제어 기법의 그래프를 보인다.

전압오차의 비율의 최대값($V_e=1$)은 정상상태 전압 및 과도응답시의 전압 기준을 고려하여 선정한다. 전압오차의 최소기준 및 전류 편차율은 적용 시스템에 따라 다르게 선정된다.

4. 시뮬레이션

제안하는 가변이득 드롭 제어기법의 동작을 고찰하기 위해 그림 1에 보이는 시스템에 대해 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션 파라미터를 보인다. 제어기의 효과를 보다 명확히 확인하기 위해 IEEE 표준안 1709 2010에 제안된 기준보다 낮은 전압 제한조건인 정상상태 전압 제한은 8%, 과도상태 전압변동 조건은 2%로 선정한다. 부하는 0.5초 간격으로 5MW에서 7MW로 다시 5MW로 변화한다고 가정한다. 초기 설정된 드롭 이득은 식 (1)을 이용하여 구한다.

그림 4는 발전기 병렬 운전시 출력전압과 전류를 비교한 과

표 2 시뮬레이션 파라미터

Droop gain (R_d)	0.7
V_{e_min} , V_{e_n} , K_{dn} , n	0.1, 0.8, 0.8, 2
전력선 임피던스 (G_1 , G_2)	0.1 Ω / 1 mH, 0.2 Ω / 2 mH

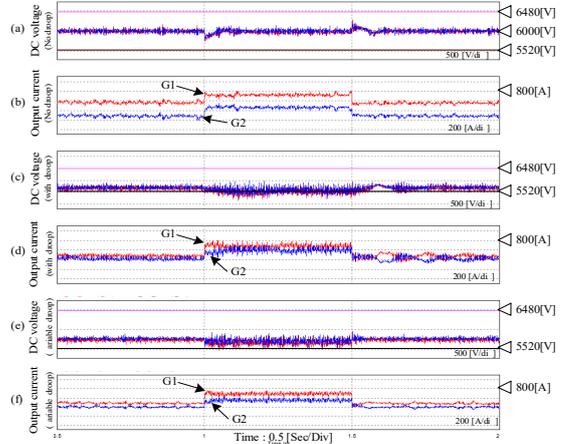


그림 4 발전기 병렬운전시의 출력전압 및 전류 비교

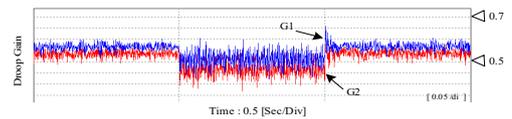


그림 5 가변 드롭 이득

형을 보인다. (a)와 (b)는 드롭 제어가 적용되지 않아 전압은 일정하지만 전류의 편차가 크다. 반면, (c)와 (d)는 드롭제어가 적용되어 전류의 편차는 줄어들었지만, 부하가 증가할 때 직류 전압이 기준치보다 낮아지게 됨을 보인다. (e)와 (f)는 가변이득 드롭 제어가 적용된 결과를 보인다. 일반적인 드롭 제어와는 달리 가변이득 드롭 제어를 적용하면 전류의 편차가 커지지만 출력되는 직류전압의 크기는 직류버스 전압의 제한 조건인 8% 이내로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 출력 전압의 오차에 따라 변화되는 드롭 이득을 보인다. 각 발전 장치의 가변된 드롭 이득($K_d \times R_d$)은 초기 설정된 0.7보다 작은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 직류 전기 선박에서 발전시스템의 병렬운전을 위한 가변이득 드롭 제어 기법을 제시하였다. 8MW 용량의 직류버스 기반의 전력 시스템을 구성하고 선정된 직류버스 전압의 제한조건을 만족하는 것을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

이 논문은 2014년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF 2014R1A2A1A11052748)

참고 문헌

[1] N. Diaz, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "Intelligent distributed generation and storage units for dc microgrids A new concept on cooperative control without communications beyond droop control", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 5, pp. 2476-2485, Sep. 2014.

[2] IEEE Std. 1709 2010, "IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium Voltage DC Power Systems on Ships", IEEE Industry Applications Society, Petroleum & Chemical Industry Committee.