

MVDC to LVDC 모듈형 DC/DC 컨버터 스테이션에서의 전압 센서 오차를 고려한 Droop Resistance 설계 방법

박인제, 김성민
한양대학교

Design Method for Droop Resistance Considering Voltage Sensor Errors in MVDC to LVDC Modular DC/DC Converter Stations

Inje Park , Sungmin Kim
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 전압 센서 오차를 고려한 모듈형 DC/DC 컨버터의 droop 저항 설계 방법을 제안한다. 다수의 컨버터 모듈을 병렬 연결할 경우, 컨버터 간의 임피던스, 턴 수 등의 불일치로 인해 전력 불평형이 발생한다. 모듈형 컨버터의 전력 균형 제어는 컨버터 시스템의 수명 및 효율 향상을 위해 필수적이다. 분산 제어 기법의 하나인 droop 제어는 모듈 간의 통신 없이 모듈 간의 전력 평형을 이룰 수 있지만, 모듈 간의 선로 저항과 전압 센서 오차에 민감하다는 단점을 갖는다. 기존의 연구들은 droop 저항의 선형적 오차를 발생시키는 선로 저항에 중점을 높게 두었지만, 모듈형 DC/DC 컨버터의 경우 모듈 간의 거리가 매우 가까워 선로 저항 보다는 직류단 전압 센서 오차의 영향이 두드러진다. 본 논문에서는 이 전압 센서 오차가 droop 제어에 미치는 영향을 분석한다. 모듈형 DC/DC 컨버터의 모듈 간 출력 전류 편차가 설계된 범위 이하가 되기 위한 전압 센서 오차 제한 조건을 제시하고 이를 반영하여 droop 저항을 설계하는 방법을 제안한다.

1. 서 론

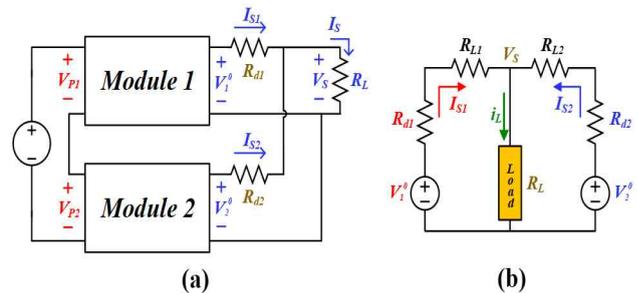
최근, ESS, 재생 에너지, 데이터 센터와 같은 DC 배전 네트워크가 증가함에 따라 DC 송/배전 시스템 역시 많은 관심을 받고 있다. DC 송/배전에 있어 핵심 장비인 DC/DC 컨버터의 경우 중전압 DC(MVDC)를 저전압 DC(LVDC)를 변환하는 역할을 담당한다. 현재까지는 수십 kV의 MVDC 전압을 감당할 수 있는 전력 반도체 소자가 존재하지 않기 때문에, 주로 다수의 컨버터를 직렬 입력, 병렬 출력 구조로 모듈화하여 MVDC to LVDC 변압을 수행한다.

모듈형 컨버터 스테이션에서 각 모듈 간에는 센서 오차, 변압기 턴 수 그리고 임피던스의 불일치 등이 존재하며, 이는 모듈 간의 입력 전압과 출력 전류의 불평형을 초래한다. 이런 모듈 간의 전력 불평형은 특정 모듈의 과부하를 초래하여 소자의 수명을 단축하며 전체 시스템의 효율성, 신뢰성, 안정성 등을 감소시킨다. 모듈형 컨버터 스테이션을 균형 제어하는 방법은 크게 중앙 집중형 제어 방법과 분산형 제어 방법 두 가지로 나눌 수 있다. 마스터-슬레이브 통신을 이용하는 중앙 집중형 제어 방법의 경우, 각 모듈의 정보를 실시간으로 마스터에서 받아 모듈이 균형된 전력을 전달할 수 있도록 제어하기 때문에 효과적인 균형 제어를 수행할 수 있다. 하지만, 모듈의 개수가

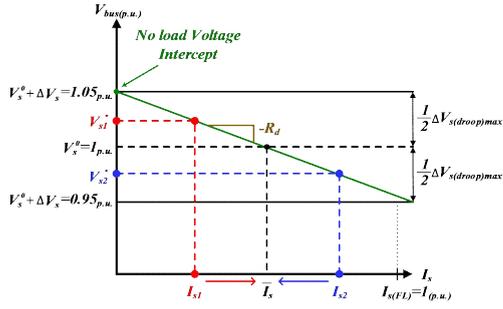
증가함에 따라 통신 라인 및 시스템 구축 비용이 증가하며, 통신 라인 문제 발생으로 인한 전체 시스템 붕괴 가능성 역시 커져, 신뢰성, 안정성이 낮아지는 단점이 존재한다. 이와 반대 개념에 있는 분산형 제어 방법은 다른 모듈과의 통신 없이 독립적으로 균형 제어를 수행할 수 있어 안정성이 높으며, 모듈 확장성 역시 높다. 분산 제어의 대표적인 방법의 하나인 droop 제어는 모듈의 출력 전류에 따라 전압 지령을 가변하여 출력 전류 균형 제어를 수행하며, 다른 분산형 제어 기법^[1]에 비해 구현이 간단하다는 장점이 존재한다. droop 제어의 성능을 감소시키는 주요 요인에는 선로 저항과 전압 센서 오차 두 가지가 존재한다. 이 중 선로 저항은 출력 전류 변화에 따른 droop 저항의 선형적 변화를 초래해 droop 성능 감소에 더 큰 영향을 주지만, 모듈형 컨버터 스테이션에서 모듈 간의 선로는 매우 짧아 그 영향은 매우 적다. 전압 센서 오차는 droop 저항을 평행 이동시키며, 이는 무부하 상태에서의 순환 전류를 발생시키기 때문에 불필요한 손실을 초래한다. 모듈형 컨버터 스테이션에서의 droop 제어 시에는 선로 오차보다 전압 센서 오차의 영향이 지배적이므로, 이에 대한 정밀한 고려가 요구된다.

본 논문에선 전압 센서 오차가 droop 제어에 미치는 영향을 분석하고, 모듈 출력 전압 변동 범위 조건과 모듈 간 허용 출력 전류 조건을 만족하는 센서 오차 범위 제한 조건을 유도한 뒤, 이를 반영하여 droop 저항을 설계하는 방법을 제안한다.

세 개의 DAB 컨버터 모듈을 입력 직렬, 출력 병렬 구조로 연결한 PLECS 시뮬레이션 모델을 통해 본 논문에서 제안하는 방법의 타당성을 검증한다. 본 연구에서는 계산상 편의를 위해 pu(Per Unit) 시스템을 사용하며, 공칭 전압을 1pu라 할 때, ±5% (0.05pu)의 DC 버스 출력 전압 변동과 정격 출력 전류 1pu 기준 10% (0.01pu)의 모듈 간 출력 전류 편차를 허용한다.



<그림 1> 2 병렬 모듈형 컨버터 스테이션
(a) 2개 모듈 병렬 연결 구조도 (b) 등가 회로도



<그림 2> droop 제어를 적용한 모듈의 droop 그래프

2. 본 론

2.1 일반적인 Droop 설계 방법

Droop 제어는 가상의 droop 저항, R_d 를 통해 모듈 간의 출력 전류 균형 제어를 수행한다. <그림 1>은 출력이 병렬로 연결된 두 컨버터 모듈과 그 등가 회로를 나타낸다. Droop 제어에서의 출력 전압 지령은 식 (1)과 같다. Droop 제어를 적용시 모듈의 출력 전류에 대한 출력 전압 그래프는 <그림 2>와 같이 나타나며, 출력 전류에 따라 각 모듈에서의 출력 전압 지령을 가변하여 출력 전류 균형 제어를 수행한다.

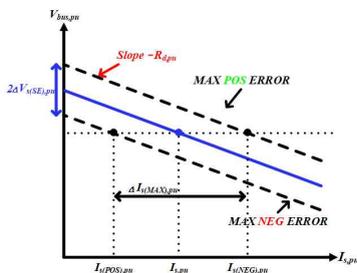
$$V_s^* = V_s^0 - R_d I_s \quad (1)$$

일반적인 직선형 droop 제어에서 droop 저항이 클수록 출력 전류 균형 제어 성능이 좋으며, 최대 droop 저항은 전압 변동 허용 범위, ΔV_s 에 따라 제한된다^[2]. 최대 droop 저항은 최대 droop 가능한 전압 범위, $\Delta V_{s,droop,max,pu}$ 를 정격 전류, $I_{s(FL),pu}$ 로 나눈 값이며, 이를 반영한 출력 전압 지령 식은 <그림 2>를 참고하여, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{s,pu}^* = V_{s,pu}^0 + \Delta V_s - \frac{\Delta V_{s(droop)max,pu}}{I_{s(FL),pu}} \cdot I_{s,pu} \quad (2)$$

2.2 Droop 제어에서의 출력 전압 센서 오차 영향

위 droop 설계 방식을 사용할 경우, 선로 저항과 센서 오차가 없다고 가정한다면, 모든 전압 변동 범위를 droop 저항 설계에 사용할 수 있다. droop 저항이 클수록 출력 전류 균형 제어 성능이 좋으며, 모듈 간의 정상 상태 출력 전류 편차는 0이 된다. 하지만 앞에서 언급했듯이 출력 전압 센서에 오차가 존재할 경우는 모듈 간의 출력 전류 편차가 발생한다. <그림 3>과 같이 출력 전압 센서의 오차가 존재할 경우, 발생하는 모듈 간의 출력 전류 오차는 droop 저항이 작을수록 커지며, 전압 센서 오차를 반영한 모듈 1, 2의 정상상태 출력 전압은 <그림 1. b>과 식 (1)을 통해 식(3)과 같이 나타난다.



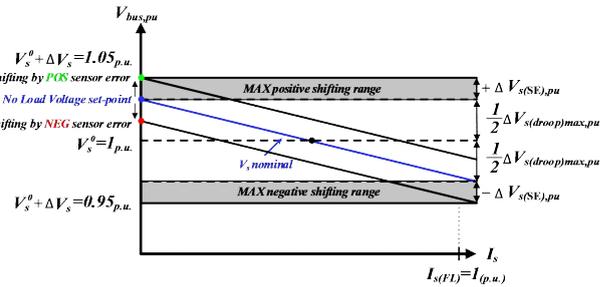
<그림 3> 전압 센서 오차를 반영한 droop 그래프

$$\begin{cases} V_{s1,pu} = V_{s1,pu}^0 + \tilde{V}_{1,pu} - R_{d1,pu} \cdot I_{1,pu} \\ V_{s2,pu} = V_{s2,pu}^0 + \tilde{V}_{2,pu} - R_{d2,pu} \cdot I_{2,pu} \end{cases} \quad (3)$$

이때, 모듈 간의 거리가 가까우므로 선로 저항 R_{L1}, R_{L2} 는 무시하며, $\tilde{V}_{1,pu}, \tilde{V}_{2,pu}$ 는 각 모듈의 출력 전압 센서 오차를 의미한다. 직렬 입력 구조에서 입력단 전압 균형 제어가 잘 이루어진다고 가정하면, 모듈의 출력은 병렬로 연결되어 있으므로 두 모듈의 출력 전류 편차는 식 (4)과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta I_{s(max),pu} = I_{1,pu} - I_{2,pu} = \frac{1}{R_{d,pu}} (\tilde{V}_{1,pu} - \tilde{V}_{2,pu}) = \frac{2\Delta V_{s(SE),pu}}{R_{d,pu}} \quad (4)$$

$\Delta V_{s(SE)}$ 는 전압 센서 오차로 인해 발생하는 최대 출력 전압 변동을 의미한다. 식 (4)는 무부하 상태에서도 출력 전압 센서 오차에 기인한 순환 전류가 발생함을 의미하며, 주어진 조건에 따라 $R_{d,pu}$ 를 0.05pu로 설계할 경우, 1%의 전압 센서 오차만 존재하더라도, 발생하는 전류 편차가 정격 전류의 40%이기 때문에 모듈 간 출력 전류 편차 조건, 10%를 만족할 수 없게 된다.



<그림 4> 전압 센서 오차를 고려한 droop 그래프

2.3 센서 오차를 고려한 droop 저항 설계 기법

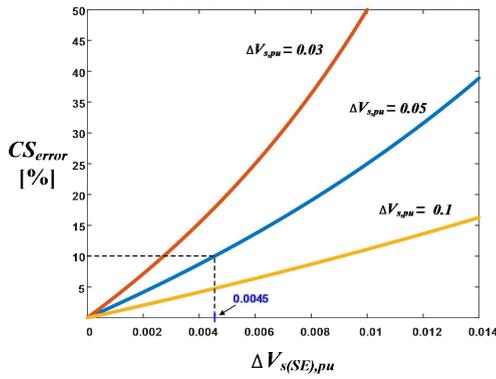
<그림 4>와 같이 출력 전압 센서 오차는 droop 그래프의 전압 축 평행 이동을 초래하기 때문에 출력 전압 변동 범위를 전부 사용할 수 없어 가용 droop 저항이 줄어든다. 목표 전류 편차를 $\Delta I_{s(max),pu}$ 라 하면, 제한된 전압 변동 범위와 목표 전류 편차 간의 관계식은 식(5)와 같이 간단한 유리함수 형태로 표현할 수 있다.

$$\Delta I_{s(max),pu} = \frac{2 \cdot \Delta V_{s(SE),pu}}{R_{d,pu}} = \frac{\Delta V_{s(SE),pu}}{(\Delta V_{s,pu} - \Delta V_{s(SE),pu})} \quad (5)$$

이 식을 통해 전압 변동 범위, $\Delta V_{s,pu}$ 와 목표 전류 편차를 만족하기 위한 최대 전압 센서 오차를 구할 수 있다. <그림 5>를 보면, 전압 변동 범위가 0.05pu 일 때, 10% 전류 편차($\Delta I_{s(max)}$)를 달성하기 위해서는 0.0045pu, 즉 0.45% 이하의 오차($\Delta V_{s(SE)}$) 성능을 지닌 전압 센서를 사용해야 하는 것을 알 수 있다. droop 저항으로 가용할 수 있는 전압 범위는 센서 오차로 인한 전압 변동을 제외한 나머지 범위인 $V_{s(droop)max,pu}$ 가 되며, pu 단위법을 적용하면 정격 전류는 1pu이기 때문에 droop 저항은 $V_{s(droop)max,pu}$ 와 같다.

최종적으로 센서 오차를 고려한 droop 제어에서의 출력 전압 지령은 아래의 식 (6)과 같이 설계할 수 있으며, 센서 오차, $\Delta V_{s(SE),pu}$ 는 식 (5)에서 허용 전류 및 전압 편차 조건을 기반으로 구한 값을 대입한다.

$$V_{s,pu}^* = 1_{pu} + \Delta V_s - \Delta V_{s(SE),pu} - R_{d,pu} \cdot I_{s,pu} \quad (6)$$



< 그림 5 > 설계 조건을 통해 유도한 센서 오차 조건 그래프

3. 시뮬레이션 검증

PLECS를 통해 세 개의 30kW급 DAB 컨버터 모듈을 모델링하여 제안한 droop 저항 및 최대 전압 센서 오차의 타당성을 검증할 수 있다. 직렬 입력 / 병렬 출력 구조의 경우 출력단 전류 균형 제어를 수행하는 droop 제어 구조만을 추가 할 경우, 제어 시 입력단 전압 불평형은 해소할 수 없다. 본 논문에서는 droop 제어의 출력 전류 균형 제어 성능을 다루고 있으므로, 입력단을 병렬로 연결하여 센서 오차 및 droop 저항에 따른 출력 전압 및 모듈 간 출력 전류 편차를 비교한다. 모듈 간의 불평형을 모사하기 위해 각 DAB 컨버터의 직렬 인덕턴스를 서로 다르게 모델링 하였으며, 시뮬레이션에 사용된 30kW급 DAB 컨버터 모듈의 파라미터는 <표 1>과 같다.

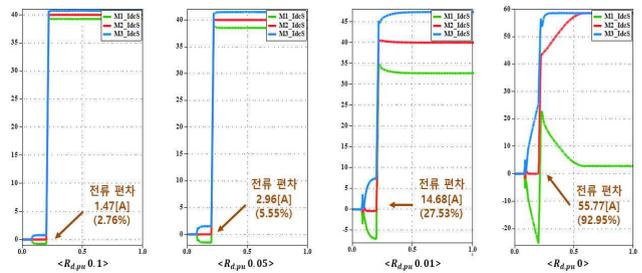
< 표 1 > DAB 모듈 파라미터.

파라미터	값	파라미터	값
모듈의 수	3	정격 출력 전압	750[V _{DC}]
직렬 인덕턴스 L _s	80[μH]	정격 출력 전류	40[A]
스위칭 주파수	20kHz	변압기 턴 비	1 : 1

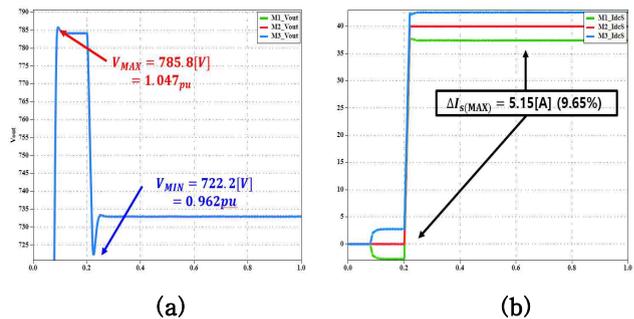
<그림 6>은 전류 편차 식의 타당성을 검증하기 위해 전압 센서 오차를 1%로 모델링 한 뒤, droop 저항을 변경하며 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 식 (4)를 통해 계산한 모듈 간 전류 편차는 droop 저항이 0.1pu, 0.05pu, 0.01pu, 0pu일 때 각각, 2.81%, 5.63%, 28.13%, ∞이며 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 계산한 값이 타당함을 알 수 있다. 이 중 droop 저항이 0인 경우, 이론적으로 전류 편차는 무한대가 되지만, 실제로는 모듈 간의 전류 편차가 최대 1pu 이상 증가할 수 없으며, 양의 전압 센서 오차를 갖는 모듈이 전체 출력 전류를 부담하고 음의 전압 센서 오차를 지니는 모듈은 부하를 부담하지 않는다. 현재 설계한 DAB 컨버터 모델의 최대 출력 전류는 60A이기 때문에, 양의 전압 센서 오차를 지니도록 모델링한 모듈1, 모듈2에서 전체 부하 전류 120A를 부담하는 모습을 볼 수 있다.

제안하는 방법을 통해 ±5% (0.05pu)의 DC 버스 출력 전압 변동과 정격 출력 전류 1pu 기준 10% (0.01pu)의 모듈 간 출력 전류 편차를 만족하는 droop 저항을 설계할 수 있다. 식(6)을 통해 도출한 droop 저항은 0.091pu이며, 최대 전압 센서 오차는 0.0045pu, 즉 0.45%의 오차를 갖는 전압 센서를 사용해야 한다. <그림 7>은 제안하는 제어 방법을 적용한 컨버터 모듈의 시뮬레이션 파형이다. 0.2초에 정격 부하를 ramp 형으로 인가하며,

무부하와 정격 부하에서 모두 전압 변동 범위 조건(±5%)과 모듈 출력 전류 편차 조건(10%)을 만족한다. 이를 통해 제안하는 방법으로 설계한 droop 제어기가 별도의 통신 없이도 출력 균형 제어를 효과적으로 수행할 수 있음을 검증하였다.



< 그림 6 > droop 저항 가변에 따른 모듈별 출력 전류 파형



< 그림 7 > R_d = 0.05pu, ΔV_{s(SE)} = 0.0045pu일 때, 모듈 출력 파형 (a) 모듈별 출력 전압 (b) 모듈별 출력 전류

4. 결론

본 논문에서는 전압 센서 오차가 droop 제어 성능에 미치는 부정적인 영향을 분석하고, 이를 고려하여 모듈형 DC/DC 컨버터의 droop 저항을 설계하는 방법을 제안하였다. 모듈형 컨버터 스테이션에서 droop 제어를 활용할 경우, 전압 센서의 오차로 인해 모듈 간의 출력 전류에 차이가 발생할 수 있다. 이에 대응하여, 본 논문은 전압 변동 범위를 최대한 활용하여 droop 저항을 설계하였으며, 설계 과정에서 센서 오차를 고려하여 모듈 간 출력 전류 편차를 최소화할 수 있는 전압 센서의 최소 성능 기준을 제시하였다. 또한, 제안된 droop 제어 알고리즘이 통신을 요구하지 않으면서도 출력 전류의 균형을 효과적으로 제어할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 논문은 한국에너지기술연구원(KETEP)의 연구비를 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No.20194030202370)

참고 문헌

[1] P. Chen, W. Jiang, X. Ruan, P. Zhao, and H. Li "Active Damping Control and Parameter Design Method for ISOP-based Load Converter in DC Distribution System ", Proceedings of the IEEE Journal, Vol. 11, 2023, April.

[2] B.T. Irving, and M.M. Jovanovic, "Analysis, Design, and Performance Evaluation of Droop Current-Sharing Method", Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Cat. No. 00CH37058, APEC, 2000