

DC 배전계통에서 사고전류 경사각의 수학적 정식화 모델에 관한 연구

한병길^{***}, 박재범^{**}, 김윤성^{**}, 권기진^{**}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교 전기공학과, ^{**}한국화학융합시험연구원
e-mail: bghan@koreatech.ac.kr

A Study on Mathematical Formalization Modeling of Fault Current Slope in DC Distribution System

Byeong-Gill Han^{*}, Jea-Bum Park^{**}, Youn-Sung Kim^{**}, Ki-Jin Kwon^{**} and Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

^{**}Korea Testing&Research Institute

요약

DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터의 급속한 탈락으로 인하여 정전구간이 확대될 가능성이 있으므로, 이러한 DC 배전계통을 안정적으로 운용하기 위한 사고전류의 경사각 특성을 이용한 보호협조 방안이 제시되고 있다. 하지만, 사고전류의 경사각은 DC 배전망의 구성과 운용특성에 따라 변동될 수 있기 때문에, 경사각에 미치는 요인을 고려한 산정방안이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통에서 사고전류의 경사각 특성으로 안정적인 보호협조를 운용하기 위하여, 사고전류 경사각에 영향을 미치는 요소로 선로정수와 수용가 부하, 구간컨버터의 임피던스를 수식화하여 경사각을 산정하는 알고리즘을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC전원부, 메인컨버터부, 구간컨버터부, 부하부로 구성된 400V급 LVDC 배전계통의 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 경사각의 특성을 분석한 결과, 단락사고가 발생하는 경우, 본 논문에서 제시한 수학적 정식화 모델에 의해 사고전류의 경사각이 정확하게 산정됨을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 전력요구 등으로, DC 배전에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터의 급속한 탈락으로 인하여 정전구간이 확대될 가능성이 있어, 이러한 DC 배전을 안정적으로 운용하기 위하여, 사고전류의 경사각 특성을 이용한 보호협조 방안이 제시되고 있다. 하지만, 사고전류의 경사각은 DC 배전을 구성하는 요소에 따라 변동될 수 있기 때문에, 경사각에 미치는 영향을 고려하여 정확하게 산정할 수 있는 방안이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고전류를 정확하게 산정할 수 있는, LVDC 배전계통에 있어서 사고전류의 경사각의 적정 산정방안 제시한다. 즉, 사고전류 경사각에 미치는 요소는 선로정수와 수용가 부하, 구간컨버터의 임피던스로 분류할 수 있다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC전원부, 메인컨버터부, 구간컨버터부, 부하부로 구성된 LVDC 모의 배전계통의 모델링을

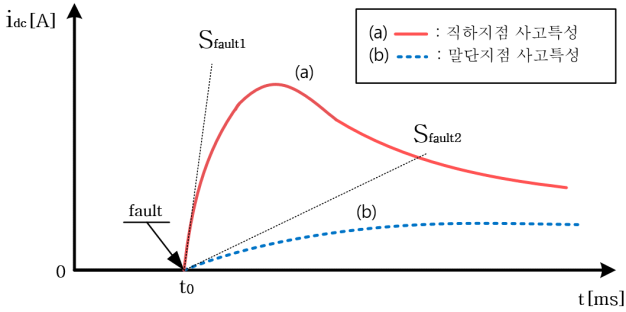
수행한다. 이를 바탕으로 경사각의 특성을 분석한 결과, 단락 사고가 발생하는 경우 계측한 전류의 경사각과 제안한 산정방안에 의한 사고전류 경사각이 거의 유사하여 본 논문에서 제시한 적정 산정방안의 유효성을 알 수 있었다.

2. DC 배전계통에서 사고전류 경사각의 수학적 정식화 모델

2.1 사고전류의 경사각 특성

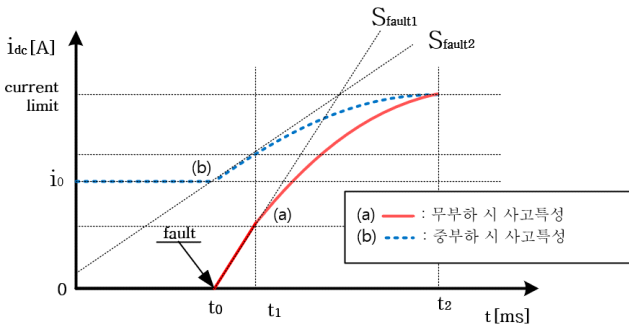
LVDC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 경사각은 사고 지점과 부하의 크기에 따라 서로 다른 선로정수를 가지게 된다. 그림 1은 사고지점에 따른 사고전류 특성을 나타낸 것이고, 그림 1에서 (a), (b)는 각각 LVDC 선로의 직하지점 구간과 말단지점 구간에서 사고가 발생한 경우를 나타낸 것이다. 그림 1의 (a)과 같이, 직하사고의 경우 사고지점까지의 낮은 임피던스로 인하여 사고 발생 시간대인 t_0 를 기준으로 매우 큰 사고전류가 발생하여 큰 변동량을 갖게 되고, 그림 1의 (b)와 같이, 말단사고의 경우에는 선로가 가지는 큰 임피던스 성분 때문에 그림 1의 (a)의 경우보다 상대적으로

작은 사고전류가 흐르고, 그 변동량은 적게 된다.



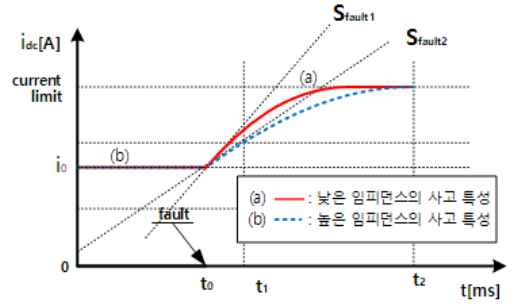
[그림 1] 사고 지점에 따른 사고전류 특성

또한, 그림 2에서 (a)와 (b)는 각각 무부하 시 와 과부하 시의 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)와 같이 무부하 상태일 경우, 사고전류는 큰 초기 변동량을 갖게 되며, 그림 2의 (b)와 같이 과부하 상태일 경우, 사고전류는 작은 초기 변동량을 갖게 된다. 즉, 부하가 아예 존재하지 않거나 그 부하의 크기가 작을수록, 사고전류의 큰 초기 변동량으로 사고전류의 경사각은 큰 값을 가지게 되며, 부하가 존재하고 그 부하의 크기가 클수록, 사고전류의 적은 초기 변동량으로 사고전류의 경사각은 작아지게 된다.



[그림 2] 부하 크기에 따른 사고전류 특성

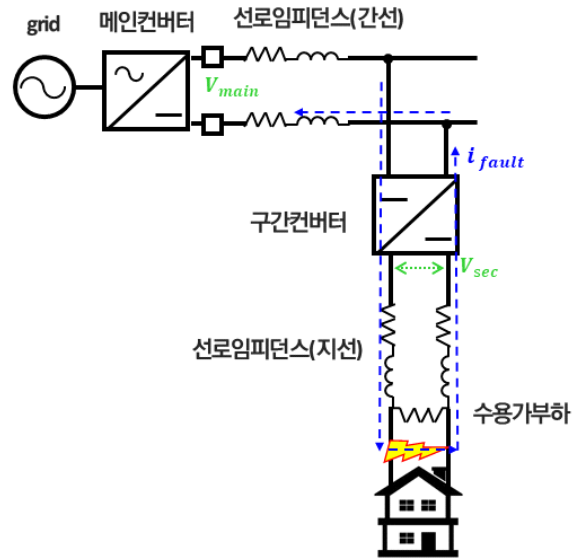
한편, 구간컨버터의 임피던스에 따른 경사각 특성은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3의 (a) 구간컨버터의 임피던스가 작은 경우이고, 그림 3의 (b)는 구간컨버터의 임피던스가 큰 경우이다. 즉, 그림 3의 (a)와 같이 구간컨버터의 임피던스가 작으면, 사고전류의 경사각이 매우 큰 사고전류가 발생하여 큰 변화분을 갖게 됨을 알 수 있다.



[그림 3] 구간컨버터의 임피던스에 따른 사고특성

2.2 사고전류 경사각의 수학적 정식화 모델

DC 배전계통에서 지선에 단락사고가 발생하는 경우 사고전류는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 메인컨버터로부터 간선의 선로임피던스, 구간컨버터, 지선의 선로임피던스 수용가 부하를 통하여 흐르게 된다. 즉, 사고전류는 상기에서 제시한 선로정수와 부하, 구간컨버터의 임피던스에 따라 변동된다.

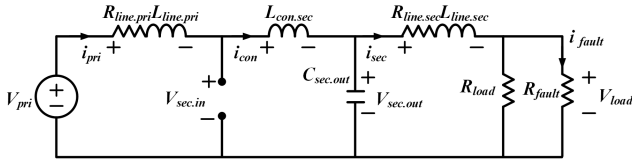


[그림 4] LVDC 사고발생 시 사고전류 흐름도

한편, 단락사고가 발생한 순간의 등가회로도를 나타내면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 1차측의 폐루프에 KVL을 취하게 되면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 구간컨버터의 입력전압($V_{line.pri}$)은 식 (2)와 같이 구간컨버터의 인덕터에 걸리는 전압과 지선의 선로임피던스, 수용가 부하에 걸리는 전압으로 나타낼 수 있다.

$$V_{pri} + V_{line.pri} + V_{line.sec} = 0 \quad (1)$$

$$V_{pri} + V_{line.pri} + V_{con.sec} + V_{line.sec} + V_{load} = 0 \quad (2)$$



[그림 5] 단락사고 등가회로도

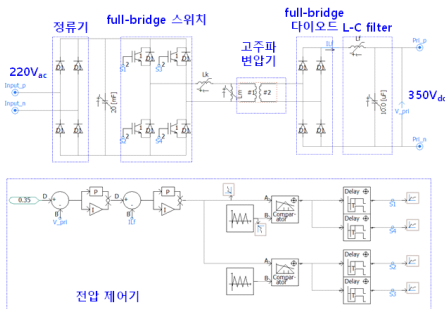
한편, 사고전류의 경사각은 선로정수와 구간컨버터의 임피던스는 인덕턴스성분을 고려하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 선로정수와 구간컨버터의 인덕턴스성분과 구간컨버터 직하의 커패시턴스, 부하의 크기에 따라 경사각이 변동된다.

$$\frac{d}{dt} i_{fault}(t) = \frac{1}{R_{Load}} \begin{bmatrix} (L_{line.pri} + L_{con.sec}) C_{sec.out} \frac{d^3}{dt^3} v_{sec.out}(t) \\ + R_{line.pri} C_{sec.out} \frac{d^2}{dt^2} v_{sec.out}(t) \\ + (L_{line.pri} + L_{line.sec} + L_{con.sec}) \frac{d^2}{dt^2} i_{sec}(t) \\ + (R_{line.pri} + R_{line.sec} + R_{Load}) \frac{d}{dt} i_{sec}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 LVDC 배전계통 모델링

3.1 메인컨버터 모델링

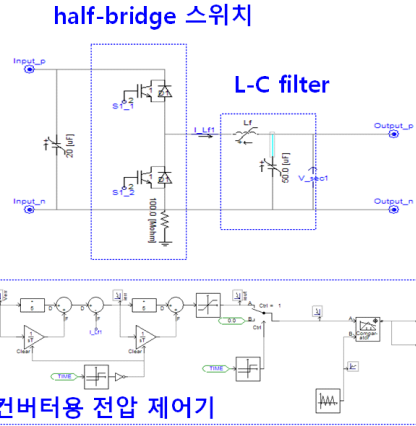
메인컨버터는 그림 6과 같이 정류기, full-bridge 스위치, 고주파 변압기, full-bridge 다이오드, L-C 필터, 전압제어기로 구성된다. 여기서, 전압제어기는 단상 220[V]의 교류 전원을 400[Vdc]의 전압으로 변환하기 위하여, PI제어기를 이용하여 구성한다. 또한, full-bridge 스위치는 symmetrical 방식을 채용하여 동작한다.



[그림 6] 메인 컨버터 모델링

3.2 구간컨버터 모델링

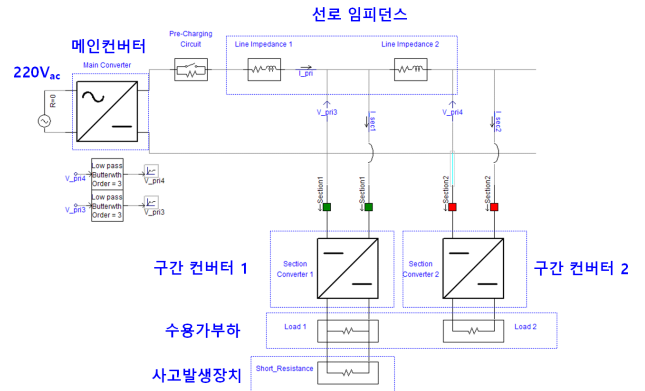
구간컨버터는 그림 7과 같이 half-bridge 스위치, L-C 필터, 전압제어기로 구성된다. 전압제어기는 간선 400[Vdc]의 전압을 200[Vdc]로 변환시키기 위하여, PI 제어기를 이용하여 구성한다.



[그림 7] 구간 컨버터 모델링

3.3 전체시스템 모델링

전체시스템은 그림 8과 같이 AC전원, 메인컨버터, 구간컨버터, 선로 임피던스, 부하로 구성된다. 여기서, 메인컨버터는 단상 220[Vac]를 입력받아 간선의 전압 제어 수행하고, 구간컨버터는 간선의 전압을 입력받아 수용가 부하의 전압을 제어하며, 선로 임피던스는 R과 L성분만 고려하고, 부하는 R부하만 고려한다.



[그림 8] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 LVDC 배전계통에서의 사고전류 경사각을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표 1과 같이 AC전원의 정격 전압은 220V로 상정한다. AC/DC컨버터부의 정격 용량과 정격 전압은 15[kW], 400[V]이고 정격 전류는 37.5[A]이다. 또한, 구간컨버터의 정격 용량과 정격 전압은 각각 200[V], 25[A]로 상정한다. 한편, 선로 임피던스부의 선중은 AC 배전선로와 동일한 HIV 2.5[mm²]로 산정하고 공장은 1[km]로 산정한다.

[표 1] 상정사고별 시뮬레이션 조건

항 목	내 용	
메인 컨버터	정격 용량	15[kW]
	정격 전압	400[V]
	과부하 여유율	150%
		37.5[A]
구간 컨버터	정격 용량	5[kW]
	정격 전압	200[V]
	과부하 여유율	150%
		25[A]
선로 임피던스	선종	HIV 2.5[mm ²] (R:7.41[Ω/km], L:3.608[μH/km])
	공장	1[km]

5. 결 론

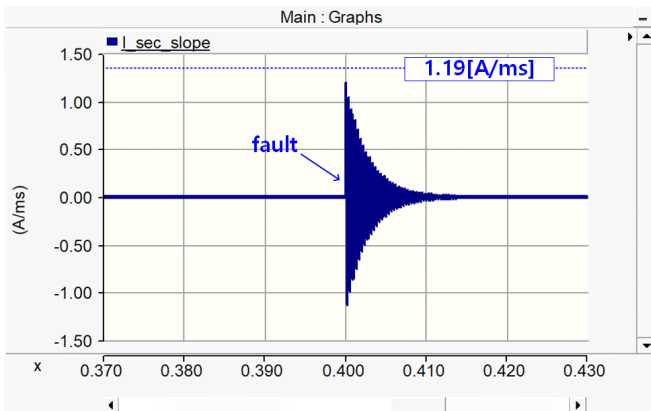
본 논문에서는 DC 배전계통에서 사고전류를 정확하게 산정할 수 있는, DC 배전계통에 있어서 사고전류의 경사각 산정방안 제시한다. 즉, 사고전류 경사각에 미치는 요소는 선로 정수와 수용가 부하, 구간컨버터의 임피던스로 분류할 수 있다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC전원부, 메인컨버터부, 구간컨버터부, 부하부로 구성된 LVDC 모의 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 경사각의 특성을 분석한 결과, 단락사고가 발생하는 경우 계측한 전류의 경사각과 제안한 산정방안에 의한 사고전류 경사각이 거의 유사하여 본 논문에서 제시한 적정 산정방안의 유효성을 알 수 있었다.

참고문헌

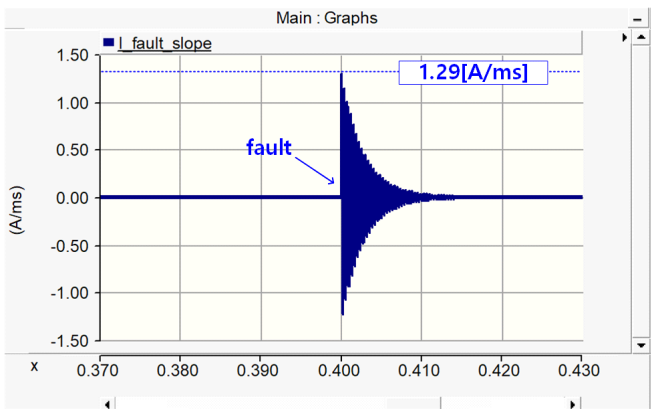
- [1] 이후동, 태동현, 노대석, 김주용, “20kV급 방사형 MVDC 배전계통의 보호협조 운용알고리즘에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.69, no.6, pp.869-880, 2020.
- [2] 한병길, 이후동, 태동현, 노대석, “방사형 MVDC 배전계통에서 사고구간 분리를 위한 클램핑 장치의 구성 및 동작 특성에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.70, no.8, pp.1146-1155, 2021.

4.2 400V DC 배전계통에서의 사고전류 경사각 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 사고전류의 경사각 특성을 나타내면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 9(a)는 사고지점에서 계측한 전류의 기울기를 나타낸 것이고, 그림 9(b)는 제안한 산정방안에 의한 사고전류 경사각을 나타낸 것이다. 즉, 사고지점에서 계측한 전류의 경사각은 1.19[A/ms]로 산정되고, 제안한 산정방안에 의한 사고전류의 경사각은 1.29[A/ms]로 산정되어 약 7.8%의 오차가 발생함을 알 수 있다.



(a) 적정 산정방안에 의한 사고전류의 경사각



(b) 사고전류의 경사각
[그림 9] 사고전류의 경사각 특성