

히스테리시스 전류제한기와 삼각파 PWM 전류제한기의 제어특성 비교

전성연, 김효성

국립공주대학교 전기전자제어공학부

Comparison of control characteristics for triangular PWM current limiter and hysteresis current limiter

Seongyeon Jeon, Hyosung Kim

School of EE and Control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

직류배전에서 사고전류 제한은 과전류 및 단락 등의 사고 상황에서 전력변환기, 배터리에너지 저장장치 등의 전원부를 보호하는 중요한 요소 중 하나이다. 사고전류를 제한하는 방식 중 히스테리시스 전류제한 방식은 간단하고 제어오차가 작으면서도 빠른 동특성을 가지기 때문에 많은 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 히스테리시스 전류제한 방식은 사고 임피던스의 크기에 따라서 스위칭 주파수가 달라지게 되므로 스위칭 주파수를 유지하기 위해서는 히스테리시스 밴드폭을 제어해주어야 하는 문제가 있다.

이에 비하여 삼각파 비교방식 전류제한기의 경우 사고전류가 증가해도 전류 제한 시 스위칭 주파수가 변하지 않는다. 그러나 삼각파 비교방식은 제어게인의 크기에 따라서 시스템이 불안정해질 수 있다.

본 논문에서는 히스테리시스 제어방식의 전류제한기를 설계할 때의 문제점을 분석하고 이에 대응하기 위하여 삼각파 PWM 비교 방식을 이용한 전류제한기를 제안한다. 삼각파 PWM 비교 방식 전류제한기의 제어시스템을 설계하고 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 제어특성을 분석하여, 일정한 스위칭 주파수를 유지하면서도 히스테리시스 제어기와 같은 빠른 동특성과 작은 오차를 갖는 제어회로를 제시한다.

1. 서론

직류는 교류와 달리 전류가 스스로 영이 되는 점이 없이 일정하게 흐르므로, 기존의 기계식 회로차단기에 의한 사고전류의 제거가 용이하지 않다. 따라서 직류배전에서 전류제한기는 과전류 및 단락 등의 사고 상황에서 회로차단기의 보호동작이 실패하는 경우 전원설비를 원천적으로 보호하는 중요한 보호책이 될 수 있다.^[1]

사고전류 제한기의 목적은 빠른시간에 오버슈트 없이 사고전류를 목표값으로 정확하게 제한하는 것이다. 히스테리시스 전류 제한방식은 과도 응답 특성이 좋고 사고전류를 목표값으로 정확하게 제한할 수 있다는 장점이 있지만 사고전류의 변화에 따라 스위칭 주파수도 변하는 단점이 있다. 이에 비하여 삼각파 비교방식 전류제한기의 경우 사고전류가 증가해도 전류 제한 시 스위칭 주파수가 변하지 않는다.

이에 비하여 삼각파 비교방식 전류제한기의 경우 사고전류가 증가해도 전류 제한 시 스위칭 주파수가 변하지 않는다. 그러나 삼각파 비교방식 전류제한기의 경우 사고전류를 피드백하여 제어하는 과정에서 통상적으로 로우패스필터를 사용하여 오차신호를 평활시키게 되며, 이는 시스템의 안정도를 낮추고 제

어게인에 제한을 주게 되어 오차가 증가하고 과도특성이 나빠질 수 있다.

본 논문에서는 PSIM을 활용한 시뮬레이션을 통하여 히스테리시스 방식 전류제한기와 삼각파 방식 전류제한기의 장점과 단점을 비교 분석하고 개선된 삼각파 PWM 비교방식의 전류제한기를 제안한다.

2. 히스테리시스 방식 전류제한기

그림 1은 히스테리시스 방식 전류제한기의 구현 회로이다.

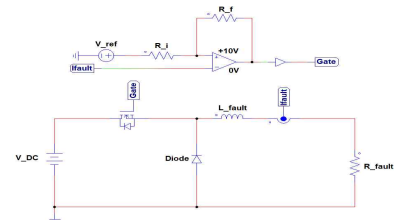


그림 1 히스테리시스 전류제한기

시뮬레이션은 사고전류(I_{fault}) 40 A, 60 A, 100 A 조건으로 진행했다. 식 (1)은 스위치 ON시 히스테리시스 밴드폭 ΔI 에 대한 유도식이며 식 (2)는 스위치 OFF시 히스테리시스 밴드폭 ΔI 에 대한 유도식이다.

$$\Delta I_{on} = \frac{2(1 - e^{-\frac{1}{\tau_{fault}} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{I_{limit}}{I_{fault}}})}{1 + e^{-\frac{1}{\tau_{fault}} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{I_{limit}}{I_{limit}} \cdot (I_{fault} - I_{limit})}} \quad (1)$$

$$\Delta I_{off} = \frac{2(1 - e^{-\frac{1}{\tau_{fault}} \cdot \frac{1}{f} \cdot (1 - \frac{I_{limit}}{I_{fault}})})}{1 + e^{-\frac{1}{\tau_{fault}} \cdot \frac{1}{f} \cdot (1 - \frac{I_{limit}}{I_{fault}})}} \quad (2)$$

식(3)과 식(4)에서 레퍼런스 전압 V_{ref} 와 피드백 저항 R_f 를 계산하여 구할 수 있으며 제한전류 I_{limit} 는 10 A이다. ΔI 는 시뮬레이션 조건에서 가장 큰 사고전류 100A를 기준으로 설정했다. 이때, 사고전류 시정수 τ_{fault} 는 사고전류 발생 시 최악의 상황을 고려하여 2 ms로 하였다.

$$R_f = \frac{(V_{Gate} - \Delta I) \cdot R_i}{\Delta I} \quad (3)$$

$$V_{ref} = \frac{R_i + R_f}{R_f} \cdot I_{Limit} \quad (4)$$

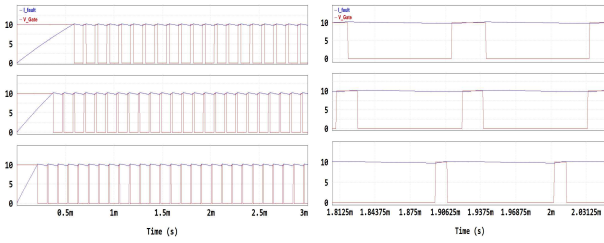


그림 2 히스테리시스 비교 전류제한기 시뮬레이션 결과 파형

그림 2는 사고전류가 40 A, 60 A, 100 A인 경우의 시뮬레이션 결과 파형을 순서대로 보이며 히스테리시스 전류 제한방식은 모든 사고전류에 대해서 정확하게 제한할 수 있지만 정해진 히스테리시스 밴드폭 범위 내에서 사고전류가 제한되어야 하므로 사고전류가 변함에 따라 스위칭 주파수도 변하는 것을 알 수 있다.

3. 삼각파 PWM 비교 전류제한기

그림 3은 제안하는 삼각파 PWM 비교방식 전류제한기의 구현 회로이다. 시뮬레이션 조건은 히스테리시스 비교방식 전류제한기 시뮬레이션과 동일하게 진행했으며 제어회로의 차동증폭기로 비례게인을 구현하고 R-C회로에 의하여 로우패스필터를 설계하였다. 이때, 삼각파 비교회로와 R-C회로의 간섭을 피하기 위하여 Emitter follower OP-Amp 회로를 사용하였다.

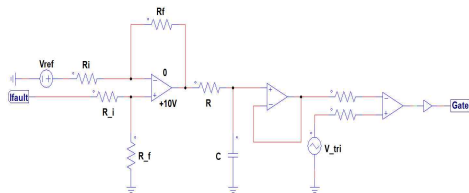


그림 3 삼각파 PWM 비교 전류제한기

검출된 사고전류는 기준전류와 비교하고 차동증폭기에서 제어게인의 크기만큼 증폭한다. 증폭된 제어신호는 스위칭 주파수의 리플성분이 크므로 이를 평활화하여 삼각파와 비교하기 위하여 로우패스필터를 통과 시킨다. 로우패스필터를 통해 필터링 된 차동증폭기의 출력 신호는 PWM 비교기의 (+) 단자에 입력되는 스위칭 주파수의 비교 삼각파 V_{tri} 와 비교한다. 이때, 비교 삼각파의 모양은 그림 4와 같이 세 가지의 형태로 설정하였다. 즉, D_{tri} 가 0이면 직각삼각파, 0.25면 톱니파, 0.5면 이등변 삼각파의 형태가 된다.

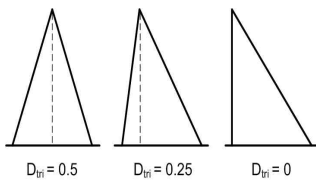


그림 4 D_{tri} 값에 따른 비교 삼각파의 모양

그림 5는 D_{tri} 의 값이 각각 0.5, 0.25, 0일 때 삼각파 PWM 비교방식 전류제한기의 시뮬레이션 파형을 보인다. 제어게인은 사고전류가 100A일 때 제어시스템이 안정한 한계의 최대 제어게인 값 85로 설정하였다.

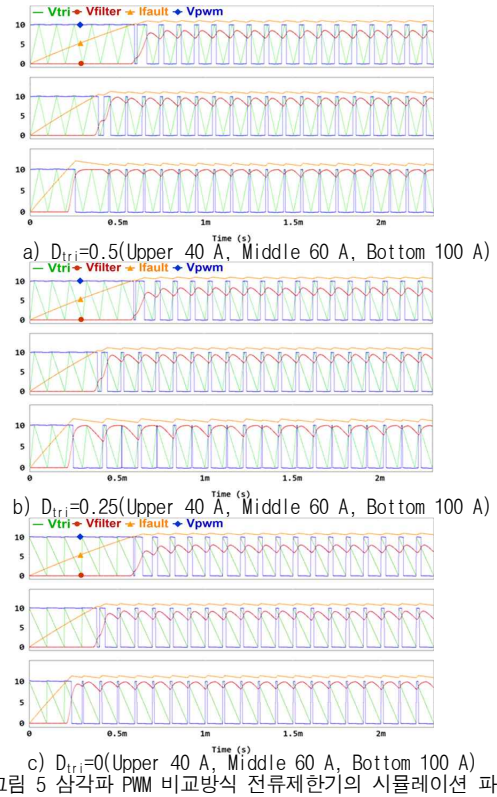


그림 5 삼각파 PWM 비교방식 전류제한기의 시뮬레이션 파형

D_{tri} 가 0.5인 경우, 사고전류 40 A, 60 A 조건에서 전류를 정확하게 제한하였지만 사고전류 100 A일 때 사고전류 발생 후 0.5 ms를 지나기 전에 오버슈트 발생하였다.

D_{tri} 가 0.25인 경우, 사고전류 40 A, 60 A 조건에서는 전류를 정확하게 제한하였지만 사고전류 100 A일 때 스위칭이 불안정해지는 현상이 발생하였다.

그러나 D_{tri} 의 값이 0인 경우는, 모든 사고전류 조건에서 오버슈트 없이 전류를 정확하게 제한하였다.

4. 결론

본 논문에서는 사고전류를 제한하는 방식 중 히스테리시스 전류제한기를 개선한 방법으로 삼각파 PWM 비교방식 전류제한기를 제안하였다. 시뮬레이션 결과 사고전류 100 A에서 D_{tri} 의 값이 0.5일 때 오버슈트가 발생하였으며, D_{tri} 의 값이 0.25일 때 스위칭 주파수가 불안정해졌다. 이는 삼각파 비교방식의 단점으로서 높은 제어게인 값을 가질 때 시스템이 불안정해지는 것에 기인함을 알 수 있다. 그러나 D_{tri} 의 값이 0인 경우에는 같은 제어게인 임에도 모든 사고전류 조건에서 오버슈트 없이 전류를 정확하게 제한하는 것을 확인하였다. 따라서 삼각파 PWM 비교 전류제한기를 설계할 때 직각 삼각파형의 비교파형을 사용하는 것이 우수한 제어특성을 갖는 것을 확인하였다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한 국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2016R1 D1A3B01008279).

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00144404, 친환경선박 핵심기술 국제표준화).

참 고 문 헌

- [1] Sungmin Lee, Hyosung Kim, "Fault current limiting technology to protect DC distribution system", Journal of the conference of the power electronics society, 2012