

라인 저항이 포함된 시스템에서 저항형 한류기 허용 전기장 산출 연구

이우승*, 장재영*, 최석진*, 고태국*
연세대학교 전기전자공학과*

A Research About Applicable Electric Field Calculation for Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter in the System with Line Resistance

Woo Seung Lee*, Jae Young Jang*, Sukjin Choi*, Tae Kuk Ko*
Yonsei University*

Abstract - 초전도 저항형 한류기는 계통에서 발생하는 대규모의 사고 전류를 매우 빠른 시간 안에 효과적으로 제한할 수 있어 주목받고 있는 초전도 전력기기이다. 저항형 한류기를 제작할 때 사용되는 초전도 선재의 총 길이는 저항형 한류기의 전체 설계에 있어서 가장 핵심적인 변수 중 하나로 기존의 허용전기장을 이용한 방법으로 도출될 수 있다. 하지만 기존의 방법에서는 계통의 라인 저항을 고려하지 않는 가정을 도입했기 때문에 이를 이용하여 설계할 경우 실제로 시스템에서 요구하는 설계 변수와 큰 차이를 보일 수 있다. 본 논문에서는 라인저항의 영향을 고려한 허용 전기장을 도출하고, 새로 계산된 선재의 길이와 기존의 방법을 이용하여 계산된 선재의 길이를 비교해 봄으로써 보다 정확한 설계의 가능성을 제시한다.

1. 서 론

현대 사회에서 전력의 수요는 급격하게 늘어났으며 이렇게 증대된 수요를 충족하기 위하여 전력 계통 또한 증대되어 왔다. 하지만 이와 같이 계통의 규모가 커짐에 따라 계통에서 발생하는 단락 사고에서 발생하는 사고전류의 크기 또한 커지게 되었으며 기존의 차단기를 이용해서 통제할 수 있는 한계를 넘어서는 사고에 대한 우려가 높아지고 있다. 만약 이러한 사고가 발생할 경우 계통에 심각한 손상을 주고 상당한 경제적 손실을 야기할 수 있기 때문에 단락 사고 발생 시 사고전류를 통제할 수 있도록 하기 위하여 다양한 방법들이 제안되고 있다. 이러한 방법들 중 하나인 초전도 한류기는 가격과 성능 면에서 유리하여 활발히 연구되고 있다[1]. 이러한 초전도 한류기는 그 형태나 원리에 따라서 다양한 형태가 존재한다. 저항형 한류기는 초전도체를 통해 흐르는 전류가 임계 전류보다 작을 경우 초전도체에 저항이 나타나지 않는 특성에 의하여 상시에는 계통에 아무런 영향을 미치지 않다가 계통에서 사고가 발생하여 초전도체를 통해 흐르는 전류가 임계전류보다 높아지면 초전도체의 저항이 급격하게 커져 사고전류를 제한하는 기기이다. 저항형 한류기는 다른 장비의 도움 없이 초전도체 자체의 물성을 이용하기 때문에 그 반응속도가 매우 우수하고 또한 여타 다른 센서를 필요로 하지 않기 때문에 구성이 간단하다는 장점을 가지고 있어 주목받고 있다[2]. 본 논문에서는 저항형 한류기의 중요한 설계 변수인 초전도 선재의 길이를 선정함에 있어서 사용되는 허용 전기장이 시스템의 라인 저항에 따라 어떤 영향을 받는지를 논한다.

2. 저항형 한류기에 사용되는 초전도 선재 길이 산출

저항형 한류기는 초전도체의 물성 자체를 이용하는 것이기 때문에 설계대상의 물리적 특성이 매우 중요한 요소가 된다. 이런 물리적 특성에는 초전도체의 물질, 초전도 선재의 모재의 종류와 두께, 그리고 사용되는 초전도 선재의 전체 길이가 있다. 이중 초전도 선재의 길이는 허용 전기장에 의한 방법을 통해 산출할 수 있다. 허용 전기장이란 사고 상황에서 저항형 한류기에 사용된 초전도체의 온도가 냉각 상태에서 특정 온도까지 올라가도록 하는 초전도체 내부의 전기장의 크기를 의미한다.

2.1 기존의 허용 전기장에 의한 초전도 선재의 길이 산출 방법

기존의 방식으로 허용 전기장을 계산할 경우 몇 가지 이상적인 상황을 가정하여 설계를 진행하였다. 우선 사고의 시간은 충분히 짧으며 사고 순간에 발생하는 열에 의한 냉매의 순간적 증발로 인해 저항형 한류기는 사고 상황에서 단열 조건에 놓인다고 가정될 수 있다. 또한 일정 시간이 지나면 저항형 한류기의 저항은 라인의 다른 저항보다 월등히 큰 수준으로 증가하게 되므로 사고에서 발생하는 모든 전기적 에너지는 저항형 한류기에서 소모된다고 볼 수 있다. 따라서 사고에서 발생하는 에너지는 모두 저항형 한류기에 사용된 초전도 선재의 온도만을 올리는

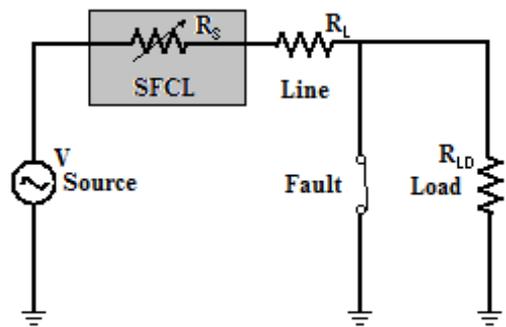
데 사용된다. 이와 같은 가정을 토대로 모델링을 할 때 저항형 한류기의 운전 온도를 T_1 , 사고 순간 최종 도달 온도를 T_2 , 초전도 선재의 온도에 따른 비저항률 $\rho(T)$, 초전도 선재의 온도에 따른 열용량을 $C(T)$, 총 사고 시간을 Δt 라고 하면 허용 전기장 E 는 식 (1)과 같이 주어진다 [3].

$$E = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{T_1}^{T_2} C(T) \cdot \rho(T) dT} \quad (1)$$

허용 전기장의 단위는 $[V/m]$ 로 위의 식에서 허용 전기장이 주어지면 시스템에서 사용하는 전원의 전압 값을 허용 전기장으로 나누면 저항형 한류기의 설계에 필요한 초전도 선재의 길이를 산출할 수 있다.

2.2 라인 저항이 포함될 경우 허용 전기장의 변화

앞에서 설명한 기존의 허용 전기장 산출 방법에서는 이상적인 상황을 고려하여 사고 상황에서 전원으로 부터 공급되는 모든 에너지가 저항형 한류기에서 소모된다고 가정하였다. 하지만 실제 시스템에서는 그림 2와 같이 저항형 한류기와 시스템을 연결하는 라인의 저항이 반드시 존재하게 되며 이 라인 저항에서 전원으로 부터의 에너지가 일부 소모될 수 있다. 사고가 발생하고 일정한 시간이 지나 저항형 한류기의 저항이 충분히 큰 수준에 도달하기 전에는 저항형 한류기의 저항이 시스템에 연결되어 있는 라인의 저항에 비하여 매우 작기 때문에 이 시점에서는 라인 저항을 무시할 수 없으며 이 라인 저항을 고려할 경우 에너지의 분배에 의해 허용 전기장의 크기가 달라질 수 있다.



<그림 2> 한류기와 라인 저항이 포함된 시스템의 회로도.

저항형 한류기의 초전도 선재에서 발생하는 온도에 따른 저항을 $R_s(T)$, 연결된 라인의 저항을 R_L , 허용 전기장의 세기를 E , 초전도 선재의 길이를 L , 단면적을 A 이라고 할 때 짧은 시간 dt 동안 저항형 한류기에서 소모되는 에너지와 열량은 다음과 같은 관계식을 따른다.

$$C(T) \cdot L \cdot A \cdot dT = \left(\frac{E \cdot L}{R_s(T) + R_L} \right)^2 \cdot R_s(T) \cdot dt \quad (2)$$

여기서 dT 는 dt 시간 동안 온도의 변화량이다. 식 (2)는 변수분리형 미분방정식이고 $R_s(T)$ 는 저항과 비저항의 관계에 의하여 $\rho(T)$, A , L 로 다시 표현될 수 있으므로 이를 이용하여 사고 시간 Δt 동안의 허용 전기장의 값을 도출하면 다음의 식 (3)을 얻는다.

$$E = \frac{1}{\sqrt{\Delta t}} \cdot \left(\int_{T_1}^{T_2} C(T) \cdot \rho(T) dT + 2R_L \cdot A \cdot L^{-1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} C(T) dT + R_L^2 \cdot A^2 \cdot L^{-2} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{C(T)}{\rho(T)} dT \right)^{0.5} \quad (3)$$

상기의 식 (3)을 이용하면 라인 저항이 R_L 인 시스템에서의 허용 전기장을 구할 수 있게 된다.

2.3 라인 저항을 고려한 상태에서 초전도 선재의 길이 산출

라인 저항의 값을 고려할 경우 식 (3)에 의하여 도출되는 허용 전기장의 값은 더 이상 선재의 사용 길이 L 에 독립적으로 변하지 않기 때문에 기존의 방법과 같이 단순히 전원의 RMS 전압 값 V 를 E 로 나누더라도 바로 사용되는 선재의 길이 L 을 도출할 수는 없다. 하지만 V 를 E 로 나눈 값이 L 과 같다는 관계를 이용하면 선재의 길이를 산출하는 것이 가능하다. 적분식 내에서 온도에 의한 의존관계를 생략하고 선재의 길이 L 에 대한 방정식의 해를 구하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$L = \left(\int_{T_1}^{T_2} C \rho dT \right)^{-1} \cdot \left[-R_L \cdot A \cdot \int_{T_1}^{T_2} C dT + \left(R_L^2 \cdot A^2 \cdot \left(\int_{T_1}^{T_2} C dT \right)^2 - \left(\int_{T_1}^{T_2} C \rho dT \right) \cdot \left(-V^2 \cdot \Delta t + R_L^2 \cdot A^2 \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{C}{\rho} dT \right) \right)^{0.5} \right] \quad (4)$$

식 (4)를 이용하면 시스템의 라인저항과 전압의 크기가 주어졌을 때 저항형 한류기를 설계하기 위한 선재의 길이를 도출할 수 있다.

2.4 시스템에 적용할 경우 기존의 계산 방법과 비교

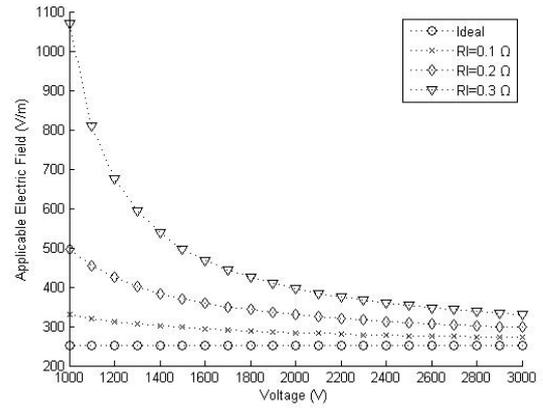
식 (4)에 의하여 도출되는 결론과 기존의 허용전기장 계산 방법의 차이를 정량적으로 파악하기 위해 라인저항이 고려되지 않은 기존의 허용 전기장에 의한 방법과 라인저항을 고려한 새로운 방법을 이용하여 가상적인 계통에 대한 설계를 진행하고, 그 결과를 비교했다. 설계 과정에서 이용한 선재는 4 [mm]의 폭에 0.05 [mm]의 hastelloy층, 0.004 [mm]의 은 층, 0.02 [mm]의 구리 층과 0.001 [mm]의 YBCO층으로 구성되었다.

사고 상황에서 실제 저항형 한류기의 초전도체는 사고가 나는 짧은 시간동안 양단의 전압 변화와 냉각 등의 이유에 의하여 초전도 상태에서 정상 상태로의 상전이를 반복하지만 설계 상황에서는 단일 조건에서 큰 전류가 흘러 초전도체가 초전도성을 잃은 것으로 가정하였다. 시스템의 라인 저항은 실제 시스템의 구성에 따라 크게 바뀔 수 있으나 통상적으로 측정되는 값에서 크게 벗어나지 않으면서 기존 설계 방법과의 차이를 잘 보여줄 수 있는 값들로 선택하였고 그 값들은 0.1 [Ω], 0.2 [Ω], 0.3 [Ω]이며 기존의 계산 방법과 같은 이상적인 상황을 포함하였다. 총 사고 시간은 6주기 사고인 0.1초로 가정하였다. 시스템의 입력 전압은 보다 다양한 설계상의 변화를 관찰하기 위하여 1 [kV]부터 3 [kV] 사이의 값들로 설정하였다.

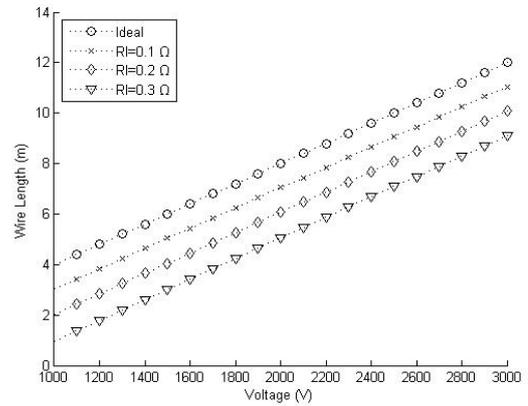
그림 3은 라인 저항의 값과 시스템 전원의 변화에 따른 허용 전기장의 변화를 나타내는 그래프이다. 가로축은 시스템의 전원 전압이고 세로축은 그에 따른 허용 전기장의 값이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 시스템의 라인 저항을 고려하지 않을 경우 허용 전기장은 시스템의 전원 전압에 따라 변화 없이 일정한 값을 가지지만 라인 저항이 증가함에 따라 비선형적 특성을 형성하며 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 라인 저항의 값이 작아짐에 따라 이러한 변화가 잘 나타나지 않는데 이것은 식 (4)에서 R_L 의 값이 0에 수렴할 경우 기존의 계산 방법인 식 (1)과 일치하게 되는 것으로 설명할 수 있다.

그림 4는 식 (4)에 의하여 최종적으로 계산된 시스템 전원 전압에 따른 저항형 한류기의 선재 길이이다. 가로축은 시스템의 전원 전압이며 세로축은 선재 길이가 된다. 시스템의 전원 전압이 증가하면 필요한 선재는 증가하며 라인 저항의 값이 증가함에 따라서 필요한 선재의 길이는 줄어드는 모습을 보인다.

두 결과 그래프를 종합하면 시스템의 전원 전압이 어떤 크기를 가지더라도 라인 저항의 증가에 따라 허용 전기장의 크기는 커지고 저항형 한류기의 설계에 필요한 선재 소모량은 작아진다는 결론을 내릴 수 있다.



〈그림 2〉 라인 저항과 시스템 전압의 변화에 따른 허용 전기장



〈그림 3〉 라인 저항과 시스템 전압의 변화에 따른 선재 소모량

3. 결 론

일련의 연구를 통하여 시스템의 라인 저항이 고려될 경우 저항형 한류기의 허용 전기장의 변화를 계산하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 통해 시스템에 존재하는 저항이 고려된 경우의 필요 선재량은 그렇지 않은 경우의 필요 선재소요량보다 작은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 라인저항을 고려하여 저항형 한류기를 설계할 경우 더욱 효율적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Noe and B. R. Oswald, "Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 1347-1350, June 1999.
- [2] J. B. Na, D. K. Park, S. E. Yang, Y. J. Kim, Ki S. C., H. Kang, T. K. Ko, "Experimental Analysis of Bifilar Pancake Type Fault Current Limiting Coil Using Stabilizer-Free Coated Conductor", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1797-1800, June 2009
- [3] S. E. Yang, D.K. Park, M. C. Ahn, Y. S. Kim, M. J. Kim, Y. S. Yoon, C. Lee, B.Y. Seok, T. K. Ko, "Manufacture and Test of the Bifilar Wound Coil Using Coated Conductor With Stainless Steel Stabilizer", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1867-1870, June 2007