

여자돌입전류 제한용 초전도한류기의 최적투입저항 결정

서훈철*, 이상봉**

기초전력연구원*, 성균관대학교**

A Decision Scheme for Optimal Insertion Resistance in Superconducting Fault Current Limiter for Reduction of the Transformer Inrush Current

*H. C. Seo, **S. B. Rhee

* KESRI, **Sungkyunkwan University

Abstract - This paper suggests a decision scheme for optimal insertion resistance in an Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) application to reduce the transformer inrush current. This scheme and the SFCL model are implemented using Electromagnetic Transient Program (EMTP). We determine the optimal SFCL resistance by EMTP simulation, and this value is applied to model the SFCL by EMTP. The simulation results show the validity and effectiveness of the suggested scheme and the ability of a SFCL to reduce the inrush current.

사용한다. 초전도한류기의 투입저항이 커질수록 여자돌입전류의 크기는 작아진다. 그렇지만, 투입저항이 커짐에 따라 초전도한류기 자체의 전압강하는 증가하게 된다. 따라서, 이 두 가지 요소에 대하여 균형을 이룰 수 있는 투입저항을 선택하여야 한다.

1. 서 론

변압기 가압 시 크기가 크고, 많은 고조파를 함유하고 있는 여자돌입전류가 발생하며 이 전류는 변압기의 수명 감소 및 손상, 보호계전기의 오동작 가능성 등 전력계통에 악영향을 미치게 된다. 따라서, 이 전류에 대하여 효과적인 저감대책이 필요하다[1-3].

전력계통에 연결된 초전도한류기의 목적은 고장전류를 제한하는 것이다. 정상상태에서, 초전도한류기의 저항은 0이다. 고장 발생 시, 초전도한류기의 저항은 렌칭 특성으로 인하여 증가한다. 고장이 제거되면, 저항은 회복특성으로 인하여 0으로 감소한다[4-7]. 따라서, 초전도한류기의 저항 값의 상태 변환 특성으로 전력계통 과전류를 제한하기 위하여 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 논문에서는 여자돌입전류를 제한하기 위하여 초전도한류기를 적용하였으며, 이 경우 최적의 투입저항 결정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 초전도한류기가 연결되지 않은 경우의 여자돌입전류 및 모션 전압의 페이지를 사용하여, 초전도한류기의 투입 이후 여자돌입전류와 초전도한류기에 의한 전압강하 사이의 관계를 이용하여 투입저항을 결정한다. 제안된 방법은 EMTP를 이용하여 검증되었다. 우선, 초전도한류기가 연결되지 않은 경우에 대한 여자돌입전류 시뮬레이션 결과를 사용하여 초전도한류기의 최적투입저항을 결정한다. 그런 다음, 결정된 저항값을 바탕으로 초전도한류기를 모델링하고 계통에 연결하여 여자돌입전류 발생 시 그 효율성을 검증하였다.

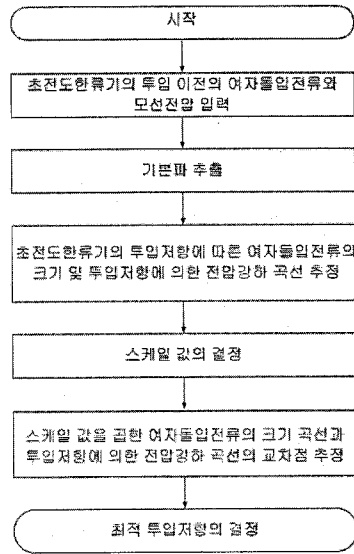


그림 1. 최적투입저항 결정 방법의 흐름도

2. 초전도 한류기의 최적투입저항 결정방법

2.1 최적투입저항 결정 방법의 개념

전력계통 성능을 향상시키기 위하여 초전도한류기의 적절한 투입저항을 선택하는 것은 중요한 사항이다. 이를 위하여 본 논문에서는 여자돌입전류 제한용 초전도한류기의 최적투입저항 결정 방법을 제안하였다. 다음 그림 1은 최적투입저항 결정 방법의 흐름도이다. 제안된 방법은 그림 1에서 나타난 것 같이 여자돌입전류 및 초전도한류기 자체에 의한 전압강하 이렇게 2가지 요소를

2.2 초전도 한류기의 최적투입저항 결정방법

2.2.1 초전도한류기의 투입저항에 따른 여자돌입전류의 크기 및 투입저항에 의한 전압강하 곡선 추정

초전도한류기의 투입저항에 따른 여자돌입전류의 크기 및 투입저항에 의한 전압강하 곡선을 추정하기 위하여, 다음 그림 2와 같이 초전도한류기가 연결되기 이전의 여자돌입전류 및 모션전압의 페이지를 이용한다.

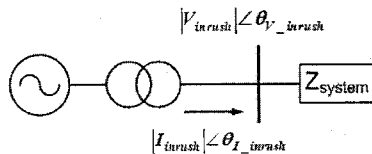


그림 2. 초전도한류기가 연결되기 이전의 전력계통 모델

그림 2에서 초전도한류기의 연결되기 이전의 계통의 등가 임피던스 및 복소전력은 다음과 같다.

$$Z_{inrush} = \frac{V_{inrush}}{I_{inrush}} = \frac{|V_{inrush}|}{|I_{inrush}|} \angle \theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}} \quad (1)$$

$$S = V_{inrush} I_{inrush}^* = |V_{inrush}| |I_{inrush}| \angle \theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}} \quad (2)$$

초전도한류기 연결 후 계통의 전체 등가 임피던스는 식 (1)에 초전도한류기의 투입저항을 더한 것과 같다. 또한, 초전도한류기 연결 후 계통의 복소전력은 변하지 않는다고 가정하면 초전도한류기 연결 후 여자돌입전류는 다음 식 (3)과 같다.

$$I_{SFCL} = \frac{S}{Z_{total}} = \frac{|V_{inrush}| |I_{inrush}| \angle \theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}}}{R_{SFCL} + \frac{|V_{inrush}|}{|I_{inrush}|} \angle \theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}}} \quad (3)$$

식 (3)에 대하여 페이지 형태로 표현하면 다음 식 (4) 및 (5)와 같다. 식 (4)를 통하여, 초전도한류기의 투입저항에 따른 여자돌입전류의 크기를 추정할 수 있다.

$$|I_{SFCL}| = \frac{|V_{inrush}| |I_{inrush}|}{\sqrt{\left(R_{SFCL} + \frac{|V_{inrush}|}{|I_{inrush}|} \cos(\theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}}) \right)^2 + \left(\frac{|V_{inrush}|}{|I_{inrush}|} \sin(\theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}}) \right)^2}} \quad (4)$$

$$\angle I_{SFCL} = \frac{\angle \theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}}}{\tan^{-1} \frac{\frac{|V_{inrush}|}{|I_{inrush}|} \sin(\theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}})}{R_{SFCL} + \frac{|V_{inrush}|}{|I_{inrush}|} \cos(\theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}})}} \quad (5)$$

초전도한류기의 투입저항에 의한 전압강하는 다음 식 (6)과 같다.

$$V_{SFCL_drop} = |I_{SFCL}| R_{SFCL} \quad (6)$$

2.2.2 스케일 값의 결정

초전도한류기의 투입저항에 따른 여자돌입전류, 즉 식 (4)와 초전도한류기의 투입저항에 의한 전압강하, 즉 식 (6)의 범위는 다르다. 식 (4) 및 (6)은 모두 초전도한류기의 투입저항(R_{SFCL})의 값에 따른 함수이므로, 이에 따른 가중치를 고려하여 스케일 값을 구할 필요가 있다. 따라서, R_{SFCL} 에 대한 가중치를 구하기 위하여 본 논문에서는 테일러 급수 전개를 수행하였다. 그 결과, R_{SFCL} 에 대한 계수를 비교하여 식 (4) 및 (6)의 가중치를 동일하게 하기 위한 값인 식 (7)과 같이 스케일 값을 결정하였다.

$$\frac{2|V_{inrush}|}{|I_{inrush}| \cos(\theta_{V_{inrush}} - \theta_{I_{inrush}})} \quad (7)$$

2.2.3 최적투입저항의 결정

최적투입저항은 다음 그림 3과 같이 식 (4)와 (7)의 곱 및 식 (6)의 교차점을 구하여 결정할 수 있다. 이 교차점은 초전도한류기 투입에 따른 장점인 여자돌입전류 저감의 크기(식 (4)와 (7)의 곱), 단점인 투입저항에 의한 전압강하(식 (6)) 이렇게 두 가지 조건이 조화를 이루는 점이다. 따라서, 그림 3의 교차점을 최적의 투입저항으로 결정할 수 있다.

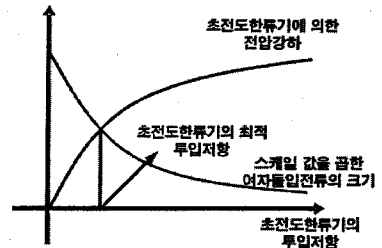


그림 3. 최적투입저항 결정 방법

3. 사례연구

3.1 계통모델

본 논문에서 제안한 방법을 검증하기 위한 계통모델은 다음 그림 4와 같다. A 화력발전소의 주 변압기에서 여자돌입전류가 발생한 것으로 모의하였다. 초전도한류기 역시 A 화력발전소에 연결되는 것으로 모델링하였다. 모든 시뮬레이션은 EMTP를 이용하여 수행하였다[1-2].

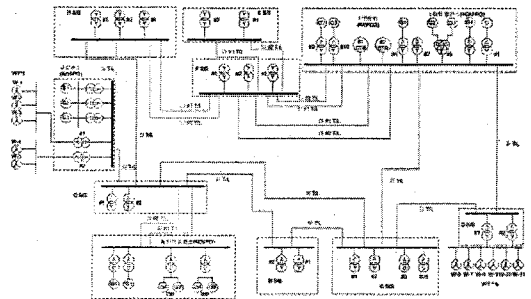


그림 4. 전력계통 모델

3.2 최적투입저항에 대한 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 방법을 검증하기 위하여, 제안한 방법을 EMTP로 구현한 후 우선 그림 4의 전력계통 모델에서 초전도한류기를 연결하지 않은 경우에 여자돌입전류를 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 다음 그림 5와 같이 최적의 투입저항은 67.94Ω으로 결정되었다.

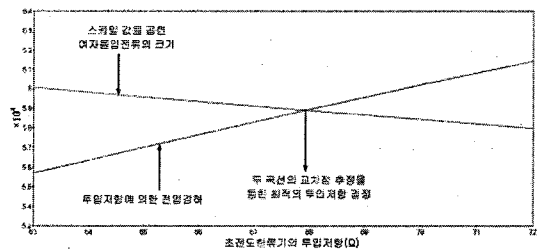


그림 5. 최적투입저항 결정 결과

3.3 초전도한류기가 연결된 경우의 여자돌입전류 시뮬레이션 결과

그림 5의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 초전도한류기를 모델링한 후, 그림 4의 계통 모델에서 A 화력발전소에 초전도한류기를 연결하여 여자돌입전류의 저감을 시뮬레이션 하였다. 본 논문에서 제안한 방법에 의하여 결정된 결과의 효율성을 검증하기 위하여 다음의 4가지 사례를 시뮬레이션 하였다.

- ① 사례 1 : 초전도한류기가 연결되지 않은 경우
- ② 사례 2 : 최적투입저항의 경우(67.94Ω)
- ③ 사례 3 : 최적투입저항보다 작은 저항이 적용된 경

우(40Ω)

- ④ 사례 4 : 최적투입저항보다 큰 저항이 적용된 경우 (100Ω)

모델링 된 초전도한류기는 다음 식 (8) 및 그림 6에 의하여 모델링하였다[4-7]. 사례 2의 최적투입저항의 경우에 R_n 을 67.94Ω으로, 사례 3과 사례 4의 경우는 각각 40Ω과 100Ω의 값을 넣었다. 회복 특성의 경우는 0.3초로 모델링하였다. 또한, threshold value는 1,200A로 설정하였다.

$$R(f) = \begin{cases} 0 & t_0 > t \\ R_n [1 - \exp(-\frac{t-t_0}{T_F})]^2 & t_0 \leq t < t_1 \\ R_n & t_1 \leq t < t_2 \\ a(t-t_1) + b & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t_3 \leq t \end{cases} \quad (8)$$

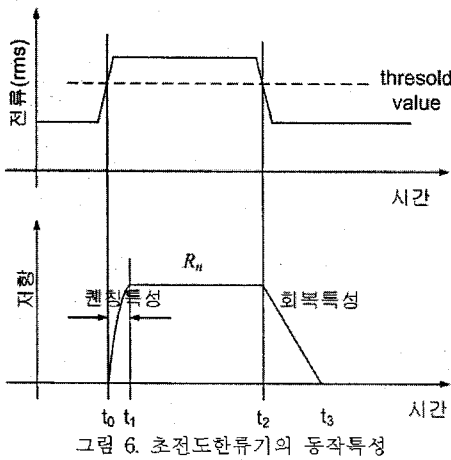


그림 6. 초전도한류기의 동작특성

각 사례에 대한 여자돌입전류의 파형은 다음 그림 7과 같다. 또한, 각 사례에 대하여 여자돌입전류의 크기 및 저감률을 표로 나타내면 다음 표 1과 같다.

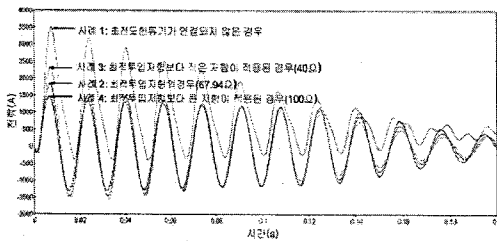


그림 7. 각 사례에 대한 여자돌입전류 시뮬레이션 결과

표 1. 각 사례에 대한 여자돌입전류의 크기 및 저감률

사례	여자돌입전류의 최대 실효치 크기(A)	저감률(%)
사례 1	1947	0
사례 2	1197	38.5
사례 3	1414	27.4
사례 4	990	49.2

그림 7 및 표 1에서 알 수 있듯이, 사례1과 같이 초전도한류기가 연결되지 않은 경우가 여자돌입전류의 크기가

가장 큰 것을 확인할 수 있다. 반면에, 사례 4의 최적투입저항보다 큰 저항이 적용된 경우에 여자돌입전류의 크기가 가장 작아짐을 알 수 있다. 그렇지만 이 경우는 초전도한류기 자체의 전압강하가 증가하기 때문에, 그림 4와 같은 송전계통에서는 복소전력을 유지하기 위하여 모선에서의 전압이 1pu 이상으로 상승할 수 있다. 이렇게 되면 전력품질 측면에서 악영향이 나타날 수 있다. 사례 3의 경우와 같이 최적투입저항보다 저항이 작은 경우 여자돌입전류의 크기의 저감률이 보다 작아지게 된다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방법에 의하여 결정된 저항이 적용된 경우인 사례 2의 경우가 최적의 초전도한류기 투입저항임을 알 수 있다.

3. 결 론

초전도한류기는 본래 고장전류를 제한하기 위하여 사용된다. 그렇지만, 본 논문에서는 여자돌입전류를 제한하기 위하여 초전도한류기를 계통에 연결하였으며, 가장 최적의 투입저항을 결정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 초전도한류기의 연결이전 여자돌입전류 및 모선 전압을 페이저를 이용하여, 초전도한류기의 연결 이후 투입저항에 따른 여자돌입전류의 크기 및 초전도한류기 자체에 의한 전압강하를 구하여 이 두 가지 요소가 균형을 이루는 요소를 찾아 최적의 투입저항을 결정하는 방법이다.

제안된 방법은 EMTP 시뮬레이션에 의하여 검증되었다. 우선, 초전도한류기가 연결되지 않은 경우에 대하여 여자돌입전류를 시뮬레이션하여 본 논문에서 제안한 방법에 따라 최적투입저항을 결정하였다. 이 값을 기반으로 초전도한류기를 모델링하여 계통에 연결한 후, 여자돌입전류의 저감률을 분석하였다. 그 결과 제안한 방법을 통하여 여자돌입전류 제한용 초전도한류기의 투입저항을 효과적으로 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. C. Seo, C. H. Kim, "The Analysis of Power Quality Effects from the Transformer Inrush Current: A Case Study of the Jeju Power System, Korea", IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 20-24, 2008.
- [2] 서훈철, 여상민, 김철환, 유영식, 조범섭, "변압기 여자돌입에 의한 전력품질 분석", Trans. KIEE, Vol. 57, No.6, pp. 932-937, JUN, 2008.
- [3] Mukesh Nagpal, Terrence G. Marinich, Ali Moshref, Kip Morison, and P. Kundur, "Assessing and Limiting Impact of Transformer Inrush Current on Power Quality", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, pp. 890-896, April 2006.
- [4] H. R. Kim, S. W. Yim, S. Y. Oh, O. B. Hyun, "Analysis on recovery in Au/YBCO thin film meander lines", Progress in Superconductivity, Vol. 9, No. 1, pp. 119-125, 2007.
- [5] Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, Hyo-Sang Choi, Sang-Do Cha, and Je-Myung Oh, "Resistance Development in Superconducting Fault Current Limiters Prior to Quench Completion", IEEE Trans. Applied Supercond. Vol. 13, pp. 2032-2035, 2003.
- [6] Se-Ho Park, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim, Hun-Chul Seo, Jae-Chul Kim, Ok-Bae Hyun, "Inrush Current Reduction using Superconducting Fault Current Limiter in Distribution System", International Conference on Electrical Engineering, 2008.
- [7] Seung-Hyun Bang, Sang-Bong Rhee, Sang-Min Yeo, Chul-Hwan Kim, "Transient Recovery Voltage Reduction using a Superconducting Fault Current Limiter in Distribution Systems", International Conference on Electrical Engineering, 2008.