

초전도 한류기 투입저항 변화에 따른 여자돌입전류 저감을 분석

박세호\*, 서훈철\*\*, 이상봉\*, 김철환\*, 김재철\*\*\*, 현옥배\*\*\*\*  
 성균관대학교\*, 기초전력연구원\*\*, 송실대학교\*\*\*, 한전전력연구원\*\*\*\*

Analysis of Inrush Current Reduction Rate According to Insertion Resistance of the Superconducting Fault Current Limiter

Se-Ho Park\*, Hun-Chul Seo\*\*, Sang-Bong Rhee\*, Chul-Hwan Kim\*, Jae-Chul Kim, Ok-Bae Hyun  
 Sungkyunkwan University\*, KESRI\*\*, Soong-Sil University\*\*\*, KEPRI\*\*\*\*

**Abstract** - The inrush current of a transformer is a high-magnitude and harmonic-rich current generated when the transformer core is driven into saturation during energizing. The inrush current usually leads to undesirable effects, for example potential damage to the transformer, misoperation of a protective relay, and power quality deterioration in the distribution power system. Inrush current reduction is therefore important for power system operation. In this paper, to reduce the inrush current, the insertion resistance of the Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) that is connected in series with the transformer in the distribution system is used. This paper implements the SFCL by using the Electromagnetic Transient Program - Restructured Version (EMTP-RV) to model the SFCL in the distribution system. The simulation results show the beneficial effects of the SFCL for reduction of the inrush current.

1. 서 론

여자돌입전류는 변압기가 가압이 될 때 철심의 포화특성에 의해 발생하는 과도 전류로서 정격전류의 수십 배의 크기를 가지며, 변압기에 심각한 손상을 입히고 보호계전기의 오동작을 초래할 수 있다. 따라서 여자돌입전류의 저감을 위한 대책수립은 전력계통의 운영에 있어 매우 중요하다[1].

여자돌입전류 저감 대책으로 변압기 투입위상각 제어 방법, 제2고조파 억제 방법, 변압기의 분담전압을 내리는 방법 등의 연구가 활발히 수행되고 있다. 투입위상각 제어방법의 경우 3상 모두에 대한 투입순간을 제어할 경우 여자돌입전류 저감률이 크지만 철심의 종류에 따라 잔류자속의 양이 달라지기 때문에 제어 가능한 변압기에는 한계가 있다. 제2고조파 억제 방법의 경우, 변압기 내부고장과 여자돌입상태를 정확하게 구별하기 어렵기 때문에 현재 변압기의 분담전압을 내리는 방법이 가장 현실적이다. 그러나 변압기의 분담전압을 내리는 방법 중 저항 투입 방식의 경우, 여자돌입전류 저감효과와 설치 공간, 비용 면에서는 우수하나 사고대응 및 저항 투입과 저감 후 단락시켜야 한다는 단점이 존재한다[2]. 따라서 정상상태 일 때 계통에 안정적이며, 여자돌입 전류와 같은 과도 전류가 흐를 때 임피던스를 가지는 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter : SFCL)의 적용으로 인하여 안정적인 여자돌입 전류의 저감뿐만 아니라 계통의 안정도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 변압기 인가전압의 위상, 변압기 철심의 잔류자속 및 변압기 전류-자속 관계는 여자돌입전류의 발생 메커니즘과 크기를 결정하는 파라미터로서 여자돌입전류 모델링 시 고려해야 할 사항이다[3].

본 논문에서는 변압기의 여자돌입전류 및 초전도 한류기를 EMTP-RV(Electro Magnetic Transient Program - Restructured Version)를 이용해 모델링하였다. 또한 초전도 한류기 투입 시 초전도 한류기 투입저항에 따른 여자돌입전류 저감을 및 SFCL 동작시간과 동작시간동안의 전력손실과의 상관관계에 대한 분석을 실시하였다.

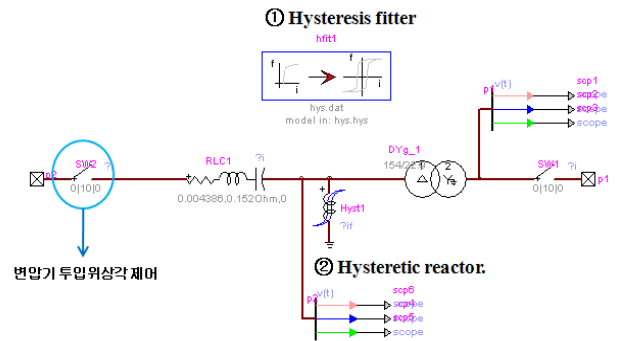
2. 여자돌입전류

2.1 여자돌입전류 특성

변압기 초기 가압 및 재가압 시 정격의 약 7~10배의 크기에 해당하는 여자돌입전류가 계통에 흐른다. 여자돌입전류의 발생에 영향을 주는 인자는 변압기 철심의 자속밀도와 비대칭적인 자화 및 포화특성이며, 크기는 변압기 가압 시점, 잔류자속 및 변압기 철심의 전류-자속 특성에 의존 한다. 일반적으로 변압기가 0°에서 가압될 때 최대 여자돌입전류가 흐르고, 90°에서 가압될 때 최소 여자돌입전류가 흐른다. 또한 잔류자속이 많이 남아 있을수록 여자돌입전류는 커지고, 고조파 분석 시 제 2고조파가 DC 성분 및 다른 고조파 성분에 비해 많이 포함되어 있다.

2.2 여자돌입전류 모델링

여자돌입전류를 모델링하기 위해서는 변압기 철심의 히스테리시스 특성이 고려되어야한다. 또한 잔류자속영향 및 철심의 전류자속 관계도 고려되어야한다. 그림 1은 여자돌입전류를 발생시키기 위해 EMTP-RV를 사용하여 변압기를 모델링한 것이다 변압기의 가압 시점을 결정하기 위해 스위치를 변압기 1, 2차측에 설치하였다.



<그림 1> EMTP-RV를 이용한 변압기 모델링

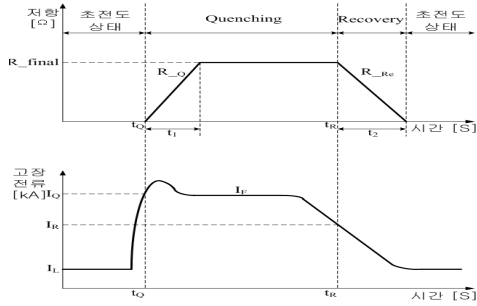
히스테리시스 특성은 EMTP-RV에서 제공하는 hysteresis fitter 와 hysteretic reactor 컴포넌트를 사용하여 모델링 하였다. 그림 1은 두 가지 컴포넌트의 전체적인 구성과 파라미터의 입력방법을 나타낸다. 히스테리시스 피더는 least-square method를 이용하여 변압기의 히스테리시스 곡선을 추정하며, hysteresis fitter 컴포넌트에 전류-자속 데이터를 입력하여 포화방정식과 히스테리시스방정식의 계수를 계산할 수 있다. 또한 잔류자속에 따른 포화방정식과 히스테리시스방정식의 계수도 계산된다. Hysteretic reactor는 hysteresis fitter에서 계산된 계수를 불러오므로서, 변압기 철심의 히스테리시스 특성이 모델링된다. 히스테리시스 특성을 이용하여 변압기 가압 및 잔류자속 따른 여자돌입전류를 모델링할 수 있다.

3. 초전도 한류기

초전도 한류기는 전류의 크기에 따라 임피던스 값이 변하는 초전도체의 특성을 이용한다. 초전도 한류기에 과전류가 흐르면 퀘칭 현상에 의해 정적임피던스가 발생되고, 계통의 고장 시 발생하는 큰 과전류를 제한한다. 또한 impulse 전압을 감소시키고, 발전단 및 변압기의 보호와 계통의 안정도를 강화한다. 이러한 특성과 관련하여 초전도 한류기 투입 시 여자돌입전류가 저감될 것이라 판단된다.

3.1 초전도 한류기 동작특성

초전도 한류기의 동작특성은 그림 2와 같다. 계통의 고장으로 인한 고장전류가 퀘칭(quenching) 개시전류(I<sub>Q</sub>)를 넘게 되면 초전도상태가 파괴되어 퀘칭 상태가 되며, 초전도 한류기의 저항이 R<sub>Q</sub>에 따라서 증가하다가 시정수 t<sub>1</sub>이 지난 후에 최종 임피던스값인 R<sub>final</sub>을 갖게 된다. 또한 계통의 고장이 제거된 후 고장전류가 감소하여 회복(recovery) 개시전류(I<sub>R</sub>) 이하가 되면 초전도 한류기는 회복 상태가 되어 일정 시정수 t<sub>2</sub> 후에는 다시 초전도 상태로 복귀하게 된다.



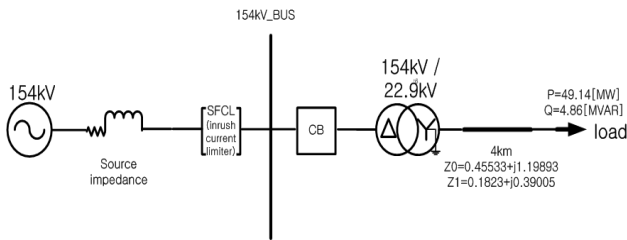
〈그림 2〉 초전도 한류기 동작특성

본 논문에서는 초전도 한류기 동작 임계전류를 90[A]로 설정하였고, quenching 시간은 1[ms], recovery 시간은 50[ms]로 설정하여 모델링 하였다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

##### 4.1 모델 계통

본 논문에서는 154[kV]등가 전원과 154/22.9[kV] 변압기, 부하단으로 구성된 일반적인 배전계통을 모델링 하였다. 선로길이는 4[km] 이고, 부하는  $P=49.14[MW]$ ,  $Q=4.86[MVAR]$ 이다. 변압기 1차측에 여자돌입전류 저감용 초전도 한류기와 CB를 직렬로 연결하였다. CB 제어를 통해서 변압기 가압시점에 따른 여자돌입전류를 발생시켰고, 초전도 한류기의 투입저항에 따른 저감률을 알아보기 위해 다양한 크기를 가진 투입저항을 선정하였다.



〈그림 3〉 한류기를 적용한 모델 계통

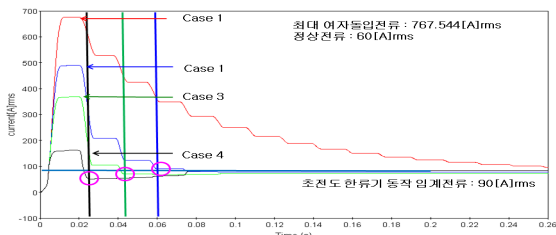
##### 4.2 초전도 한류기의 투입저항에 따른 계통영향 평가

투입저항이 큰 초전도 한류기를 계통에 적용할 경우 여자돌입전류 저감률은 커지고, 초전도 한류기의 계통적용 시간이 짧아져서 계통영향이 최소화되지만 계통의 전류가 정상전류보다 낮아지거나 순간적인 계통의 전압 상승을 초래 할 수 있다. 따라서 여자돌입전류의 저감률과 계통영향을 고려하기위해 표 1과 같은 초전도 한류기의 투입저항 선정하였다.

〈표 1〉 시뮬레이션 조건

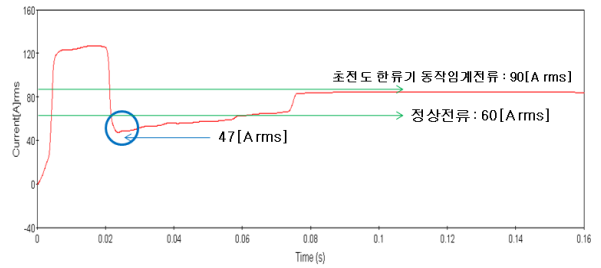
Case	SFCL 투입저항[Ω]
1	10
2	50
3	100
4	500
5	1000

(변압기 투입 위상각 : 0°, 잔류자속 : 25[%])



〈그림 4〉 한류저항 투입에 따른 여자돌입전류

그림 4는 초전도 한류기의 투입저항 변화에 따른 여자돌입전류 파형이다. 투입저항이 큰 초전도 한류기를 계통에 적용 할수록 여자돌입전류의 저감률이 더 커지는 것을 확인하였고, 초전도 한류기의 회복상태로의 전이 가 더 빨라지는 것을 확인 할 수 있다.



〈그림 5〉 한류저항 투입에 따른 여자돌입전류(Case 5)

그림 5는 초전도 한류기 투입저항을 1000[Ω]으로 선정하였을 때 여자돌입전류파형이다. Case 5의 경우 초전도 한류기 적용시 여자돌입전류 저감률은 최대가 되지만, 계통의 정상전류보다 낮아진다.

〈표 2〉 SFCL 동작시간 및 여자돌입전류 저감률

SFCL 저항[Ω]	동작시간[S]	여자돌입전류 저감률[%]
10	0.2844	10.69
20	0.1522	19.04
30	0.1031	25.81
40	0.0711	31.55
50	0.0550	36.25
60	0.0579	40.29
70	0.0385	43.81
80	0.0374	46.94
90	0.0368	49.67
100	0.0363	52.15
200	0.01999	66.49
300	0.01905	73.01

표 2는 SFCL 투입저항에 따른 SFCL 동작시간 및 여자돌입전류 저감률을 정리한 것이다. SFCL 투입저항이 커질수록 여자돌입전류 저감률은 더 커지게 되고 초전도 한류기 동작시간은 짧아지는 것을 확인 할 수 있다. 초전도 한류기의 투입시간이 길어지면 전력 손실이 발생할 수 있다. 따라서 여자돌입전류 저감률 및 전력손실 계통의 정상전류 등을 고려하여 SFCL의 최적 저항을 선정할 필요성이 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 초전도 한류기 투입 시 여자돌입전류 저감에 대한 분석을 하기위해 EMTP-RV를 이용하여 여자돌입전류 및 초전도 한류기를 모델링 하였다. 변압기 1차측과 직렬로 연결된 CB의 제어를 통해 변압기 가압시점을 결정하고, 최대여자돌입전류가 발생시키기 위해 잔류자속은 25[%]로 선정하였다. 여자돌입전류를 발생시키고 초전도 한류기 투입저항에 따른 여자돌입전류 저감률 및 계통영향을 분석 하였다. 본 논문에서 얻은 분석 결과는 다음과 같다. 초전도 한류기의 투입임피던스 증가 시 여자돌입전류의 저감률은 커진다. 그러나 최대저항을 투입하였을 때 정상전류보다 낮은 전류가 계통에 흐르는 문제점이 발생하였다. 따라서 계통에 안정적이고 여자돌입전류를 최대로 저감할 수 있는 최적 투입저항 선정 연구와 최적저항 선정 시 고려인자인 전력손실 및 SFCL 동작시간에 대한 자세한 분석이 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] A. K. Al-Khalifah, E. F. El-Saadany, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer," *Power Engineering, 2006 Large Engineering Systems Conference on*, July 2006, Page.165 - 171
- [2] H. Shimizu, K. Mutsuura, Y. Yokomizu, T. Matsumura, "Inrush-current-limiting with high T/sub c/ Superconductor," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on Volume 15, Issue 2, Part 2, June 2005, Page.2071 - 2073*
- [3] S. Nishimiya, T. Ishigohka, A. Ninomiya, K. Arai "Quench Characteristic of Superconducting Transformer by Inrush Current," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on Volume 17, Issue 2, Part 2, June 2007, Page.1931 - 1934*