

감도계수를 고려한 초전도한류기의 계통적용점 선정 연구

최홍관* 윤재영* 김종율* 이승렬* 이병준**
한국전기연구원* 고려대학교**

Development of HTS-FCL Location Selection Program using Sensitivity Factor

Choi,HeungKwan* Yoon,JaeYoung* Kim,JongYeul* Lee,SeungRyul* Lee,ByongJun**
Korea Electrotechnology Research Institute* Korea University**

Abstract - Maximum short circuit current of modern power system is becoming so large that the current should transmission capability. Although there are various kinds of method to solve this, approached from super conductivity Fault Current Limiter application viewpoint among them. High Temperature Superconductor-Fault Current Limiter (HTS-FCL) development is progressing according to IITS technology development, and system application is tried. For actual system application of such super conductivity FCL, an more efficient method was developed to find suitable FCL application locations using sensitivity factor comparing previous paper.

1. 서 론

계통에서 고장으로 인한 사고 파급영향을 미연에 방지하고 전력계통의 안정적인 운영을 도모하기 위해서는 고장전류의 크기를 억제해야 한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 고온초전도 한류기(HTS-FCL : High Temperature Superconductor-Fault Current Limiter) 개발이 진행 중이며 계통 적용이 시도되고 있다. 이와 같은 초전도한류기의 계통적용을 위해서는 다양한 조건 하에서 고장전류 억제효과가 검증되어야 하며, 실제 계통 적용을 위해서는 수많은 사례분석을 통해 적용효과를 검토해야 한다. 이전 논문에서 이러한 수많은 사례연구를 모두 검토하여 최적의 적용점을 찾는 프로그램을 개발하였다. 그러나 이러한 방법은 컴퓨터의 연산능력에 의존하여 모든 사례를 검토하는 단순한 방법으로 시간적인 낭비를 초래하여 효율적인 적용이 어려웠다. 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하기 위해 초전도한류기의 임피던스의 변화분에 대한 고장전류의 변화분의 비율을 계산하여 최적위치를 선정하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 초전도 한류기의 적용위치 선정 프로그램

초전도 한류기의 계통적용을 위해 먼저 고려해야 할 사항은 전압계급과 적용위치인데, 본 논문에서 고려한 중요 적용 위치는 345/154kV 변압기 bank 2차측, 154kV 선로, 모선분리 지점들이다. 또한 초전도한류기의 개발시점과 비슷한 2010년의 한전 실계통을 대상으로 하고 전압계급은 154kV급을 선정하였다.

2.1.1 위치선정 프로그램의 특성

기 개발된 프로그램은 실효치 해석 프로그램인 PSS/E의 IPLAN 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 실효치해석을 하는 경우 최종 결과를 얻기 전의 중간 단계에서 다양하게 사용자 제어·조작을 허용하여 원하는 결과를 얻도록 도와주는 프로그램이다. 결국 PSS/E 내부 변수를 제어하기 위해 제작처에서 만든 간이 프로그램이

기 때문에 일반적인 프로그래밍언어가 제공하는 모든 기능이 구현되어 있지 않다. 그 중의 하나가 Recursion 기능이다. 이 기능은 함수 자기자신을 호출하여 같은 작업을 무한히 반복할 수 있는 기능이다. 이 기능은 하나의 대상 모선에 연결된 선로들에 대해 순위를 정하여 순차적으로 한류기를 적용하여 그 결과를 호출하는 데 결정적인 역할을 제공한다. 즉 i모선에 연결된 선로가 n개인 경우 1부터 n까지 순차적으로 반복문을 사용하여 2ⁿ개의 케이스를 고려하면 간단하게 구현할 수 있다.

그러나 이러한 기능의 부재로 최적의 한류기 적용점을 찾기 위한 수 많은 사례를 통제할 수 있는 방법이 요구되고 이를 위해 n개의 bit를 마련하여 0부터 2ⁿ-1의 숫자를 적용하여 Decoding 및 Encoding을 거쳐 bit에 0과 1을 표현하여 한류기를 적용하는 경우와 그렇지 않은 경우로 판별하는 방법을 사용하였다.

또한 모선 i(1단계)와 인접한 모선 j(2단계, 연결된 선로를 m개라 하면)를 고려하는 경우 계산해야 할 케이스는 2ⁿ×2^{m-1}가 된다. 여기서 -1은 모선 i와 j사이에 중복되는 선로를 의미한다. 이러한 단계를 3단계 이상 적용하는 경우 계산해야할 경우의 케이스는 기하급수적으로 증가한다. 실제 Pentium III 800MHz CPU를 이용하여 3단계까지 고려하는 경우 약 1주일의 소요되었다. 물론 이러한 결과는 실제 계산시간보다는 일정 용량이상인 경우 PSS/E 입출력과 화면표시 부분에서 심각한 병목현상이 주원인으로 판단된다.

이러한 계산상의 단점을 극복하기 위해 다음과 같은 감도계수를 이용하여 계산해야할 케이스의 수를 획기적으로 저감하였다.

2.1.2 초전도 한류기의 적용에 따른 단락용량 변화

고장전류가 발생하고 이에 따라 초전도 한류기가 동작하여 등가임피던스가 증가하게 되면 결과적으로 계통의 단락용량이 변화한다.

단락용량 S는 다음과 같다.

$$S = \sqrt{3} V_{fault} \quad (2.1)$$

일반적으로 3상단락전류가 1선지락전류보다 크게 되며 차단용량이 문제되는 모선에서는 차단용량이 3상단락용량으로 결정된다. 따라서 3상단락용량에 대해 전개한다.

$$S = \sqrt{3} V_{fault} = \sqrt{3} V^2 \frac{1}{Z_{bus}} \quad (2.2)$$

여기서 모선 i에서의 단락용량변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= \sqrt{3} V_i \times |I_i + \Delta I_p| - \sqrt{3} V_i I_i = \sqrt{3} V_i \Delta I_i \\ &= \sqrt{3} V_i \frac{I_i^* \Delta I_i + \Delta I_i^* I_i}{2 I_i} = \sqrt{3} V_i \frac{Re(I_i \Delta I_i^*)}{I_i} \quad (2.3) \end{aligned}$$

결국 3상고장전류와 변화분을 계산하면 차단용량변화량을 계산할 수 있다.

$$\Delta I_f = I_f - I_{f(0)} \quad (2.4)$$

따라서 IPLAN에서 식 2.4의 값을 소환하여 얻고 이 값을 식 2.3에 적용하여 차단용량변화분을 계산하여 감도계수를 구할 수 있다.

2.1.3 개발 프로그램 적용을 위한 기본 분석

대상 실계통의 고장전류 해석 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다. 여러 결과 중에서 154kV급 실계통에서 문제가 되는 고장전류의 크기는 보통 50kA를 기준으로 하여 이 기준을 상회하는 결과만을 정리하면 표 2.1과 같다.

<표 2.1> 고장전류 문제모선과 고장전류

모선번호	모선명	고장전류(kA)	비고
1610	[성동1 154]	53.43	
1611	[왕십리 154]	52.68	
1670	[마장 154]	52.37	
1710	[미금1 154]	50.76	
1711	[미금1S 154]	50.76	
1745	[휘정 154]	50.70	
41710	[D미금1 154]	50.76	

표 2.1에서처럼 고장전류가 문제되는 모선은 총 7개 모선이며 모두 한 Area내에 존재하였다. 상세한 계통단선도는 생략한다. 단 성동 154모선은 성동 345모선과 미금 154모선은 미금 345모선과 변압기로 Bank로 연결되어 있는 형태이다.

2.2 감도계수를 이용한 위치 선정 프로그램

2.2.1 위치 선정을 위한 기본조건

FCL 적용 위치(154kV급 모선에 우선 적용)는 345/154kV 변압기가 있는 경우 2차측에 FCL을 적용하며 인근 선로 및 345/154kV 수전 모선을 모선 분리하여 분리된 지점에 FCL을 적용한다. 모선 분리 방법은 선로의 회선분리는 하지 않으며 조합할 수 있는 경우의 수를 모두 고려하여 적용한다.

PSS/E에서 ASCC의 경우와 SCMU로 계산한 경우의 모선의 3상 고장전류값 차이가 발생하기 때문에 다음과 같이 적용하였다.

- SCMU는 복잡한 3상불평형 고장계산을 기본으로 하고 있으나 ASCC는 좀 더 간략화된 수식을 사용하기 때문에 고장해석결과에서 차이가 발생하게 된다. 자세한 수식은 생략한다.
- 미래 계통 데이터와 같이 Zero impedance가 없는 경우 좀 더 객관적이고 정확한 해석결과를 얻기 위해서 ASCC로 계산한 결과를 적용한다.
- IPLAN 프로그램명은 SCMU로 계산한 결과를 소환하는 CALL문 사용을 배제하고 ASCC계산 결과를 임시 파일 저장하여 읽어 들여 최적위치를 선정하는 process를 적용한다.

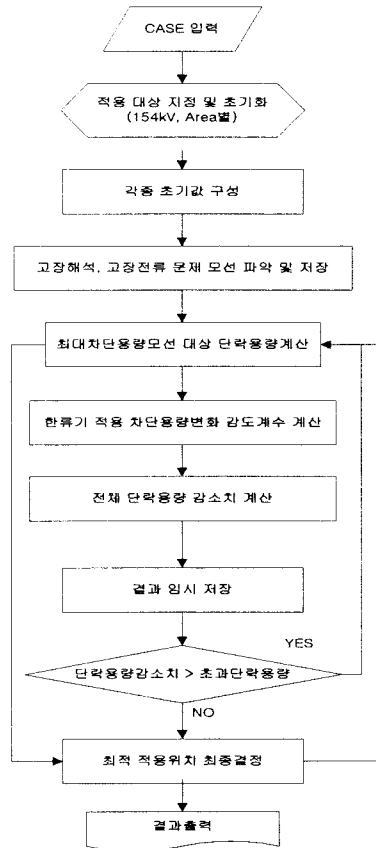
2.2.2 기존의 위치 선정 프로그램

기존에 개발한 위치 선정 프로그램의 알고리즘은 다음과 같다.

- CASE 입력
- 적용 대상 지정 및 초기화(154kV, Area 적용)
- 각종 초기값(대상모선 및 선로데이터 정보, 고장전류 판단기준값, 적용위치 등) 구성
- 고장해석 및 고장전류 문제 모선 파악 및 저장
- 한류기 적용 위치 CASE(모든 경우 고려) 지정 및 고장해석
- 고장전류 계산 및 결과 임시 저장
- 고장전류 저장 확인 및 저장
- 고장해석을 초기화하고 Base Case file을 재 로드하여 고장해석
- 한류기 적용 위치 지정에 따른 위 절차 Loop 반복하여 실행
- 적용 위치 및 고장전류 저장 결과 file 저장
- 지정된 조건으로 결과를 정리하여 file 저장

2.2.3 감도계수를 이용한 위치 선정 프로그램

앞서 설명한 감도계수를 이용한 위치 선정 프로그램의 알고리즘과 순서도는 다음과 같다.



<그림 2.1> 프로그램 Flowchart

- CASE 입력
- 적용 대상 지정 및 초기화(154kV, Area 적용)
- 각종 초기값(대상모선 및 선로데이터 정보, 고장전류 판단기준값, 적용위치 등) 구성
- 고장해석 및 고장전류 문제 모선 파악 및 저장

○ 최대차단용량모션 선정

- 차단용량초과모션이 없으면 현재까지 결과를 저장하고 출력하는 loop로 이동

○ 최대차단용량모션에 대해 단락용량계산

○ 한류기 투입에 따른 차단용량변화감도계수 계산

○ 감도가 큰 선로부터 한류기 적용 및 저장

○ 전체 단락용량 감소치 계산

○ 단락용량 감소치에 따른 위 절차 Loop 반복하여 실행

- 만약 계산된 단락용량감소치가 초과단락용량보다 큰 경우 최대단락용량모션을 선정하는 알고리즘으로 가서 이하 loop를 반복

- 계산된 단락용량감소치가 초과단락용량보다 작은 경우 감도가 큰 선로 순위로 한류기 적용하는 알고리즘을 반복

○ 적용 위치 및 고장전류 저장 결과 file 저장

○ 지정된 조건으로 결과를 정리하여 file 저장

이와 같이 기존 프로그램과 다른 점은 최대단락용량모션을 선정하여 단락용량을 계산하고 감도계수결과를 이용하여 우선 순위에 따라 한류기를 해당위치에 투입하여 전체 단락용량 감소치를 계산한다. 단락용량 감소치와 초과단락용량을 비교하여 해당 부분의 알고리즘을 반복하도록 구성되었다.

2.3 개발 프로그램의 결과 검토

2.3.1 위치선정 프로그램 결과

감도계수를 이용한 알고리즘 및 순서도를 바탕으로 개발한 프로그램의 결과는 다음과 같다. 여기서 표 2.2의 결과는 모션분리를 하지 않은 상황에서 고려할 수 있는 모든 위치에 대해 계산한 결과를 나타내고 있으며 표 2.4는 모션분리를 하고 분리된 위치에 초전도한류기를 적용할 때의 결과를 나타낸 것이다. 표2.2는 FCL의 적용개수가 최소(2개)인 경우의 1710과 1700사이의 적용위치에 대한 결과이다.

<표 2.2> 프로그램 결과(고장전류 [A])

문제	적용전	FCL	고장전류	감도계수
모션	고장전류	적용시	변화치	적용
1610	53431.3	47333.6	6097.7	47333.6
1611	52676.2	46738.4	5937.8	46738.4
1670	52367.2	46496.0	5871.2	46496.0
1710	50764.6	40201.6	10563.0	40201.6
1711	50764.6	40201.6	10563.0	40201.6
1745	50702.6	42434.3	8268.3	42434.3
41710	50764.6	40201.6	10563	40201.6

2.3.2 모션분리시의 검토 결과

아래 표 2.4는 모션 분리하고 초전도한류기를 분리한 모션 사이에 연결하여 적용한 결과를 나타낸다. 모션분리 한 후의 고장전류와 감도계수를 적용하여 우선 순위에 의해 투입한 경우의 고장전류 결과가 동일하며, 한 개의 초전도한류기로 모두 고장전류 허용범위내에서 모든 문제모션들을 만족하고 있음을 알 수 있다.

<표 2.3> 모션분리를 고려한 최종 결과(고장전류, [A])

문제	모션분리전	모션분리후	고장전류	감도계수
모션	고장전류	고장전류	변화치	적용
1610	53431.3	28588.1	24843.2	28588.1
1611	52676.2	28371.5	24304.7	28371.5
1670	52367.2	28283.1	24084.1	28283.1
1710	50764.6	45332.4	5432.2	45332.4
1711	50764.6	45332.4	5432.2	45332.4
1745	50702.6	44124.6	6578.0	44124.6
41710	50764.6	45332.4	5432.2	45332.4

모션분리시와 모션분리를 고려하지 않은 경우의 결과 모두 기존의 위치선정 프로그램과 동일한 결과를 얻었다. 또한 감도계수는 계통특성에 따라 특정한 선로와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 그리고 기존 프로그램에 비해 계산시간은 비약적으로 개선되어 수분만에 계산이 완료되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 초전도한류기를 실계통에 좀 더 효율적으로 적용하기 위해 감도계수를 이용한 위치선정 프로그램을 개발하였다. 결국 기존의 위치선정 프로그램의 문제점을 고찰하고 이를 해결할 수 있도록 위치선정 프로그램을 향상시켰다. 연구결과를 종합하여 기술하면 다음과 같다.

- 초전도 한류기를 실계통에 적용하기 위해 비약적으로 계산시간을 단축할 수 알고리즘을 마련하였다.
- 개발된 프로그램에 대하여 기존 프로그램의 고장전류 저감특성과 적용개수 등의 결과를 통하여 그 효율성을 검증하였다.
- 실계통에 초전도 한류기 적용을 위한 검토 프로그램으로서 활용될 수 있음을 보였다.

감사의 글

"본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다."
 "This research was supported by a grant from Center for Applied Superconductivity Technology of the 21st Century Frontier R&D Program funded by the Ministry of Science and Technology, Republic of Korea"

[참 고 문 헌]

- [1] 최홍관외3명, "초전도한류기의 계통적용점 선정 프로그램개발", 2003. 11, 대한전기학회 추계학술대회
- [2] Korea Electric Power Corporation power supply plan office, "A system characteristic improvement equipment setup propriety examination report", 1995. 11
- [3] Korea Electrotechnology Research Institute, "Extra-high voltage bulk DC transmission technical development", 1996. 12
- [4] Korea Electrotechnology Research Institute, "HTS-FCL Characteristic comparison and examination", 2002. 6
- [5] John Cerulli, "Requirements for a Superconducting Fault Current Limiter in the Utility Bus-Tie Location", 1999, IEEE
- [6] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999,