

저항형 초전도 한류기를 위한 배전계통의 모델링과 적용

최흥관* 윤재영* 김종을* 이병준**
한국전기연구원* 고려대학교**

Distribution System modeling and Application for HTS Resistor type FCL

Choi, Heung-Kwan* Yoon, Jae-Young* Kim, Jong-Yeul* Lee, Byong-Jun**
Korea Electrotechnology Research Institute* Korea University**

Abstract - Nowadays, one of the serious problems in KEPCO system is the more higher fault current than the SCC(Short Circuit Capacity) of circuit breaker. There are many alternatives to reduce the increased fault current. As the superconductivity technology has been develops, the HTS-FCL(High Temperature Superconductor-Fault Current Limiter) can be a one of the attractive alternatives to solve the fault current problem. Under the this background, this paper presents distribution system EMTDC modeling and the application of EMTDC model for resistance type HTS-FCL in the developed distribution system model.

1. 서 론

배전계통에서 고장으로 인한 사고 파급영향을 미연에 방지하고 전력계통의 안정적인 운영을 도모하기 위해서는 고장전류의 크기를 억제해야 한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 여러 가지가 있지만, 그 중에서 초전도 한류기 적용관점에서 접근하였다. 최근의 고온초전도 기술 발전에 따라 고온초전도 한류기(HTS-FCL : High Temperature Superconductor-Fault Current Limiter) 개발이 진행 중이며 계통 적용이 시도되고 있다. 이와 같은 초전도한류기의 실제적인 계통적용을 위해서 본 논문에서는 실 배전계통의 특성을 그대로 반영할 수 있도록 배전계통을 모델링하고, 자체 개발된 초전도한류기의 EMTDC 동특성 모델을 적용함으로써 그 효용성을 검증하였다. 이러한 연구는 우리나라의 배전계통에의 초전도한류기 도입을 결정하는데 중요한 자료로 활용될 것이다.

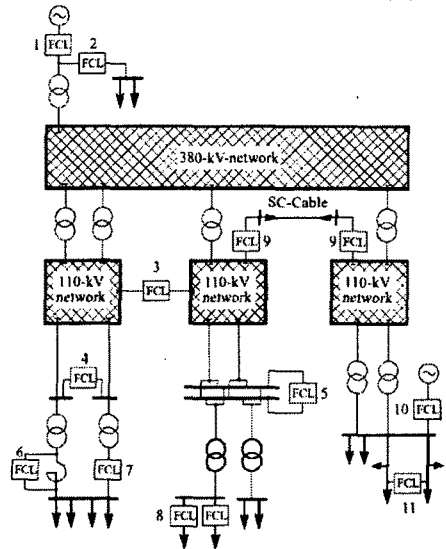
2. 본 론

2.1 배전계통 모델링

2.1.1 초전도 한류기의 적용 위치

국내외적으로 전력계통은 기본 특성상 전압계급이 서로 상이한 여러 단계로 구성되어 있다. 즉, 발전기의 10~25kV, Step-up Tr의 765kV, 345kV, 154kV 그리고 배전측의 66kV, 22.9kV, 6.6kV 등의 전압계급이 있다. 또한, 전력계통의 구성요소 및 전형적인 형태별로 발전단측, 모선측, 선로측, Feeder측, 변압기단 및 기타 다양한 Configuration으로 구성되어 있다. 이러한 다양한 전압계급과 구성형태에서 제작상의 문제를 배제할 경우 어느 전압계급, 어느 위치에 FCL을 적용하느냐는 세밀한 검토를 요하는 사항이라고 할 수 있으나, 일반적으로 배전계통에의 적용이 가장 효과가 큰 것으로 알려져 있다. 예를 들어 아래의 380kV/110kV 송전계통에서 11가지의 FCL 적용가능 위치를 고려할 수 있는

데, 본 논문에서는 7번과 8번 위치에 적용하는 것으로 한정한다. 변압기 아래 bus-tie 지점의 4번 위치에 적용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 알려져 있으나, 국내의 배전계통은 특별한 경우가 아닌 일반적인 경우에는 분리하여 운전하고 있기 때문에 이 경우는 배제하였다.



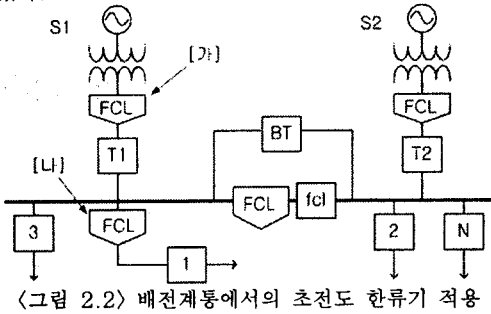
2.1.2 배전계통 모델링 개념

국내 배전 계통은 공동중성선 다중접지방식으로 기본 특성은 다음과 같다.

- 배전선로는 넓은 지역 내에서 각각의 장소에 분산된 다수의 수용가에게 전력을 직접 배분 공급하는 관계상 전선로는 짧고 저전압 소전력이면서 회선수가 많고 각 선로 전류도 불평형을 이루는 경우가 많으며 불평형에 의한 영상전류가 접지된 중성선 및 대지를 통해서 흐름
- 배전선로는 고압선(직류 750V 초과, 교류 600V 초과, 7kV 이하)과 저압선(직류 750V 이하, 교류 600V 이하), 특고압선(6.6kV/22.9kV)으로 구분
- 부하중대에 따른 전압 개선 및 전력손실 경감, 공급 능력 증강을 위하여 고압선은 22.9kV-Y3상4선식, 공동 중성선 다중 접지방식, 저압선은 220/380V 3상4선 식으로 승압하여 사용

이러한 특성을 지닌 국내 배전계통의 표준적인 구조는 변전소의 몇 대의 주변압기 이하 각각에 몇 개의 배전선로로 구성되어 있으며, 그림 2.2에 해당한다. 초전도 한류기 적용을 위한 표준적인 배전계통 모델링은 해석 프로그램(PSCAD/EMTDC)의 적용을 위해 등가계통으로 표현되어야 하며, 어떻게 등가 표현하느냐의 문제로 대두된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 주변압기 이하 D/L에서의 사고를 상정하므로 인근의 여타 주변압기 이하의 영향을 배제하고 모델링하기 위해 해당 주변압기 2차측에서 계통을 바라보는 관점에서 구성하였다.

결국 모델링 대상은 표준적인 22.9kV 등가 한전 배전 계통으로, 모델링은 일반 변전소의 M.TR 2차측에서 계통을 바라보는 관점에서 계통의 특성을 반영하여 모델링 하였다.



2.1.3 배전 계통 모델링

일반적으로 송배전계통의 고장계산에서는 기준전력을 100MVA로 택하고 있다. 그러므로 100MVA, 22.9kV를 기준으로 하여 22.9kV-y 계통 관련 정수들은 다음과 같다.

- 변전소 154kV 단의 모선 등가 임피던스 및 고장용량
positive: $3.2392 \angle 84.71$
zero : $7.7261 \angle 78.29$
3상 단락 : $7418.6 \text{ MVA}, -84.7^\circ$
- 주변압기 154/23kV, 45/60MVA, Δ-Y결선, 변압기 임피던스 : 15.2%, 3.435%(NGR)
0.152 pu (45MVA)
- 변압기 2차측까지의 임피던스
positive : $0.00126 + j0.0136 + j0.3378 \text{ pu}$
zero : $0.00661 + j0.0319 + j0.3378 \text{ pu}$
- 변압기 2차측에서의 계통 등가 임피던스
positive : $1.8428 \angle 89.79^\circ$
zero : $1.9390 \angle 88.97^\circ$
zero : $2.9718 \angle 89.9^\circ$ (Δ-Y결선인 경우)
- 선로 임피던스
- 케이블 선로
#1 D/L : 3EH CNCV 325, 2.65km
#2 D/L : 3EH FR-CNCO/W 600, 3EH CNCV/W 600, 4.3km
- 가공 선로
ACSR 160, 95□
정상 임피던스 : $0.0386 + j0.0698 \text{ pu} / [1\text{km}]$
영상 임피던스 : $0.1005 + j0.2305 \text{ pu} / [1\text{km}]$
- 수용가 부하(계약전력 적용)

2.2 초전도 한류기

초전도 한류기에 대하여 기본적인 특성을 알아보면 다음과 같다.

2.2.1 초전도 한류기의 효과

HTS-FCL은 변압기의 단락임피던스를 감소시킴으로써 한편으로는 송전능력을 증가시키고 다른 측면으로는 변압기 2차측에서의 전압안정도를 증진시키는 효과가 있다. 또한 HTS-FCL을 적용하면 고장전류가 대폭 감소하며 최대 고장전류가 통상 부하전류의 4~5배 수준으로 저감된다. 그러나 고압계통으로 갈수록 차단기 Dimension에만 영향을 미치므로 이러한 설비투자비 절감 가능성은 줄어든다. FCL은 고압계통보다 저압계통(배전급)에 적용할 때 경제성 측면에서 더 큰 효과가 있다.

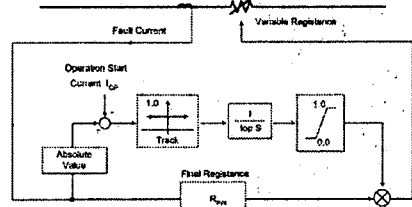
2.2.2 초전도 한류기 기본 특성

초전도한류기는 정상운전 상태에서는 임피던스가 거의 영이지만, 임계전류 이상의 고장전류가 흐르면 임피던스가 증가하여 고장전류를 일정수준 이하로 억제하는 특성을 가지고 있다.

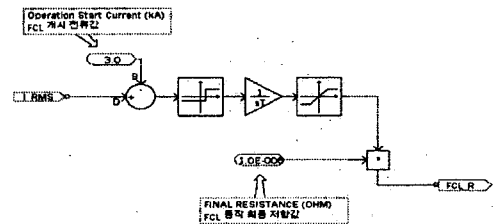
고장전류가 흐를 때 증가하는 임피던스가 저항성분 혹은 리액턴스 성분 중 어느 것인가에 따라서 저항형과 유도형으로 분류할 수 있다. 저항형 초전도 한류기는 유도형에 비하여 구조와 원리가 간단하고 전류 제한과 회복특성이 우수하지만, 대용량화가 어렵고 열 손실이 크다는 단점을 지니고 있다. 따라서, 초기에는 소용량의 구조가 단순한 저항형 초전도한류기를 실험적으로 적용하는 것이 보다 용이할 것이다.

2.2.2 초전도 한류기 EMTDC 모델의 적용

저항형 초전도 한류기에 동작개시전류 이상의 고장전류가 흐르면 초전도상태가 붕괴되는 Quenching 상태에 돌입하여 저항이 증가하게 된다. 이러한 상태에서 일정한 시정수가 경과하면 상전도 상태의 최종적인 저항 값에 도달하게 되며 결과적으로 고장전류는 대폭 감소하게 된다. 현재 전 세계에서 개발하고 있는 보편적인 초전도 저항형한류기의 대표적인 모델을 표현하면 그림 2.2와 같다. 그림 2.2는 초전도한류기에 흐르는 선로전류가 한류기 동작개시전류를 초과하면 일정한 적분 시정수와 제한치를 가지고 초전도한류기 저항이 증가함을 나타내고 있다. 이는 고장전류 크기에 비례하여 초전도한류기의 저항값이 선형적으로 증가함을 의미한다.



(그림 2.2) 저항형초전도한류기 대표모델



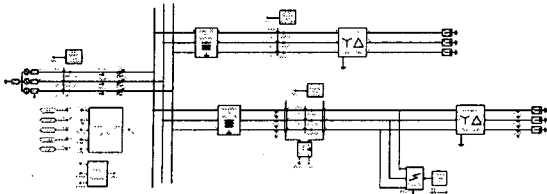
(그림 2.3) 저항형 HTS-FCL 모의 모델

2.3 배전계통의 초전도한류기 적용 결과

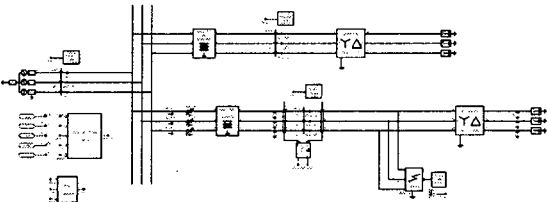
2.3.1 EMTDC 모델링 및 시뮬레이션 결과

그림 2.2 해석대상 계통의 (가)와 (나)의 위치에 대하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구성하면 그림 2.4와 같다. 이러한 구성을 바탕으로 앞에서 구한 기본 해석데이터를 적용하여 저항형초전도한류기의 유무에 따라 해석한 결과를 나타내면 표 2.1과 같다. 표 2.1을 분석하면 한류기가 있는 경우, 초전도 한류기 적용위치에 흐르는 전류는 7.68kA에서 1.88kA와 1.68kA로 대폭 저감되었다. 이는 한류기를 적용한 송전단 전원의 고장전류 기여분은 대폭 감소한 반면 수전단에서 가공선로와 케이블 선로를 통한 고장전류 기여분은 크게 변하지 않았음을 의미한다. 그림 2.5는 한류기 유무에 따른 해석 결과를 도시한 것이다. 그림 2.5에서 $t=0.5\text{sec}$ 에서 고장이 발생하면 초전도한류기가 동작하고 그 결과로서 전체 고장전류와 한류기 전류가 저감됨을 알 수 있다. 또한 한류기의 위치에 따라 값의 차이가 발생하는데, 한류기가 (나)의 위치에 있는 경우 그림 2.2의 3번 배전선로부터 유입되는 전류로 인한 결과임을 알 수 있다.

이러한 고장해석 사례에서 적용된 한류기의 저항변화는 그림 2.6에 도시 되었다.



(a) [가]위치에서의 한류기 적용

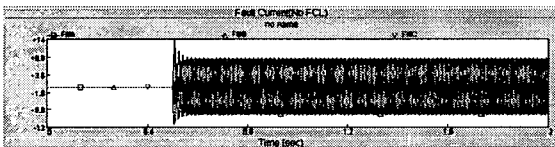


(b) [나]위치에서의 한류기 적용

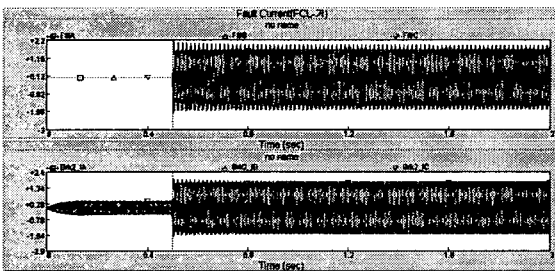
〈그림 2.4〉 EMTDC 해석 도식([가]와[나]의 위치)

〈표 2.1〉 기본 해석 Case 해석결과

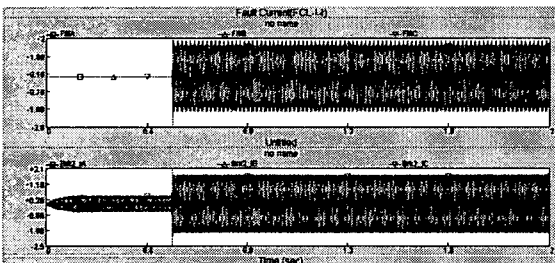
해석 CASE	고장전류(kA)	RFIN (Ω)
한류기 無	7.68	0.00
한류기 [가] 위치	1.88	10.0
한류기 [나] 위치	1.68	10.0



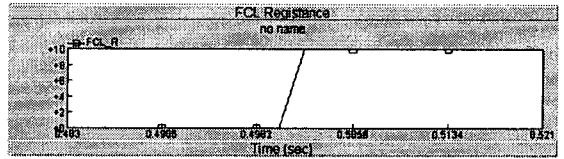
(a) 전체 고장전류(한류기 無)



(b) 전체 및 배전선로 고장전류(한류기 [가]위치)



(c) 전체 및 배전선로 고장전류(한류기 [나]위치)
〈그림 2.5〉 초전도한류기 유무에 따른 고장해석 결과 (T=0.5sec 고장발생)



〈그림 2.6〉 고장해석시의 한류기 저항 변화

3. 결 론

본 연구에서는 국내의 실 배전계통을 모델링하고 표준적인 저항형 초전도한류기에 대하여 자체 개발된 EMTDC 모델을 적용하여 해석결과를 분석하였는데, 연구결과와 전망을 종합하여 기술하면 다음과 같다.

○ 초전도한류기의 적용을 위하여 PSCAD/EMTDC로 표준적인 한전 22.9kV 등가계통을 모델링 하였다.

○ 개발된 등가계통에 대하여 자체 개발한 표준적인 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델을 적용함으로써 그 효용성을 검증하였다.

○ 초전도한류기 유무에 따른 기본 케이스 해석결과 초전도 한류기를 적용하면 배전선로의 고장전류가 대폭 저감됨을 알 수 있었으며, 이는 실제적인 초전도 한류기 적용을 위한 기본 자료로 활용될 수 있다.

○ 향후 좀 더 다양한 배전계통(모선연결, 발전단 등)에 대하여 초전도한류기를 적용한 연구를 수행할 필요성이 있으며, 또한 실 계통 적용을 위해서는 한류기 파라미터의 최적 설정에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다. 또한, 저항형 외에 유도형 초전도한류기에 대한 배전계통 적용, 분석과 상호 비교도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

"본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용용 기술개발 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] 한국전력공사 전원계획처, "계통특성 개선설비 설치 타당성 검토 보고서", 1995. 11
- [2] 한국전기연구원, "초고압 대응량 직류송전 기술개발", 1996. 12
- [3] 한국전기연구원, "HTS-FCL 특성비교 검토", 2002. 6
- [4] John Cerulli, "Requirements for a Superconducting Fault Current Limiter in the Utility Bus-Tie Location", 1999, IEEE
- [5] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999.
- [6] J. N. Nielsen, J. J. Ostergaard, "Applications of HTS fault current limiters in the danish utility network"
- [7] 한발대, "초전도한류기 파라미터 검토", 200. 6
- [8] H. Kameda, "Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999
- [9] Charles A. Gross, "Power System Analysis", 1986
- [10] EMTDC Manual, Custom Model