

초전도고장전류제한기의 고장전류억제효과와 동작파라메타 설정방법에 대한고찰

홍 원표*, 김정훈
대전산업 대학교*, 홍익대학교

On Fault Current Limiting and Design Method of the Specific Parameter of Superconducting Fault Current Limiter

Hong. Won - Pyo. Kim. Jung - Hoon
Taejon National University Of Tech, Hong Ik University

Abstract

Design & Operation of power system for meeting increase of electric power demand is becoming more difficult and complex. One of reasons is increase of fault current. As one of the most effective methods for suppressing the fault current, installation of SFCL is expected. This paper describes a method of fault analyses of power system with SFCLs, and also discusses determination of specification of SFCLs, effects of limiting the fault current due to SFCLs by use of the model system of two - bus electric power system with single transmission lines

1. 서론

전력계통의 안정도 확보는 고장단락전류를 차단기의 차단전류이하로 억제하는 것이 가장 기본적인 것이다. 전력계통의 대용량화로 인하여 현재 초고압 계통에서 차단기의 차단능력에 거의 한계에 도달하고 있어 앞으로 전력수요의 신장에 대응하기 위한 계통설계는 매우 어려워질 것으로 예상된다. 간단히 경제적인 고장전류 한기의 개발이 시급히 요청되고 있다. 초전도 응용기기로서 현재 여러 종류의 초전도전류제한기(Superconducting Fault Current Limiters : SFCL) 개발이 진행되고 있으며 그 예로 초전도의 S/N轉移를 이용한 기기로서 2,000A급의 SFCL을 제작하여 시험을 완료한바 있다^{1,3)}. SFCL은 전력계통에서 새로운 개념을 가진 기기로서 단락전류를 용이하게 억제하여 전력계통의 설계 및 운용에 크게 기여할 수 있을 뿐만아니라, 초전도 전력 응용기술의 진보로 초전도 발전기, 초전도케이블, 초전도변압기등이 대전력계통에 도입되면 이의 운전을 위하여 필수불가결 한 기기로 그 개발 효과는 지대하며 SFCL을 포함한 전력계통의 해석적 계산법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 SFCL의 도입시 3상단락과 계통에서 빈번히 발생하는 비대칭고장중 1선지락에 대하여 대칭 좌표법을 이용하여 고장계산방법을 제시하였으며 간단한 등가회로도도 도출하였다. 이를 토대로 SFCL을 포함한 1회선계통에서 본 논문에서 제시한 고장계산법을 이용한 SFCL의 적용효과의 검토 및 사양 결정방법, 설치장소등에 대하여 구체적인 연구를 수행한 결과를 보고한다.

2. SFCL을 포함한 고장전류 해석법

현재 각종 SFCL이 제안되고 있다^{1,2)}. SFCL의 대표적인 예는 [그림 1]에 표시하였다. 이 예에서 계통사고시 고장전류가 초전도체의 임계전류를 초과하면 초전도체가 상전도체(S/N전이)하며 이 초전도체와 병렬로 접속된 리액터스 또는 저항에 고장전류가 전류되어 고장전류를 억제한다. 고장회로에 고임피던스가 투입된 시간은 초전도체의 S/N전이 시간에 의하여 결정되며 매우 고속도(1ms 이내)로 전이된다. [그림 2]에 표시한 송전계통에서 F점에 고장이 발생한다고 가정하고 a, b, c 상의 SFCL의 삽입 동작개시전류레벨 이상의 고장 전류가 흐르며 SFCL동작시 Z_{FCL}의 임피던스가 선로에 직렬로 삽입된다. a 상의 SFCL 동작시에 그 양단간의 전압은 $3 U_a = Z_{FCL} \times ia_A$

로 된다. 여기서 ia_A는 A계통의 a상 전류이다. b상, c상 SFCL동작시 양단간의 전압은 다음식으로 표시된다.

$$3U_b = Z_{FCL} \times ib_A$$

$$3U_c = Z_{FCL} \times ic_A$$

또한 고장점의 영상, 정상, 역상전압은 다음식으로 표시된다.

$$V_0 = -Z_{0A} \cdot I_{0A} - (U_a + U_b + U_c) = Z_{0B} \cdot I_{0B}$$

$$V_1 = E_{1A} - Z_{1A} \cdot I_{1A} - (U_a + aU_b + a^2U_c)$$

$$= E_{1B} + Z_{1B} \cdot I_{1B}$$

$$V_2 = -Z_{2A}I_{2A} - (U_a + a^2U_b + aU_c)$$

..... (3)

여기서, $a^2 = \epsilon^{-j2\pi/3}$, $a = \epsilon^{-j4\pi/3}$

Z_{0A}, Z_{1A}, Z_{2A} 및 I_{0A}, I_{1A}, I_{2A}는 각각 고장점에서 본 좌측(A계통)임피던스 및 전류의 영상, 정상 및 역상성분, E_{1A}는 A 계통의 내부유기전압이다. 또한 Z_{0B}, Z_{1B}, Z_{2B} 및 I_{0B}, I_{1B}, I_{2B}는 우측계통(B계통)임피던스 및 전류의 영상, 정상, 역상성분을 표시하고 있으며, E_{1B}는 B계통내의 내부유기전압이다.

(3)식은 또한 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_0 = -Z_{p0} \Delta I_0 - Z_{s0}/Z_{s0} (U_a + U_b + U_c)$$

$$V_1 = E_a - Z_{p1} \Delta I_1 - Z_{1B}/Z_{s1} (U_a + aU_b + a^2U_c)$$

$$V_2 = -Z_{p2} \Delta I_2 - Z_{2B}/Z_{s2} (U_a + a^2U_b + aU_c)$$

..... (4)

여기서, $\Delta I_0 = I_{0A} - I_{0B}$
 $\Delta I_1 = I_{1A} - I_{1B}$
 $\Delta I_2 = I_{2A} - I_{2B}$

..... 고장점에서의 유출전류

또한 f점의 점차 p는 A,B계통의 병렬, s는 직렬임피던스를 의미한다.

즉, $Z_{p0} = Z_{0A} Z_{0B} / (Z_{0A} + Z_{0B})$

$$Z_{p1} = Z_{1A} Z_{1B} / (Z_{1A} + Z_{1B})$$

$$Z_{p2} = Z_{2A} Z_{2B} / (Z_{2A} + Z_{2B})$$

..... f점에서 바라본 계통등가 임피던스

$$Z_{s0} = Z_{0A} + Z_{0B}$$

$$Z_{s1} = Z_{1A} + Z_{1B}$$

$$Z_{s2} = Z_{2A} + Z_{2B}$$

A, B 계통의 직렬 임피던스

$$E_a = E_{1A}Z_{1B} + E_{1B}Z_{1A}/Z_{s1}$$

고장점의 고장전 a상전압(테브넌등가전압)

2.1. 1선지락 고장

f 점에서의 1선지락 고장(1 LG)시의 조건에서 식(4)에 의해 I_f는 다음식으로 구한다.

$$I_f = E_a/Z_p - 1/Z_p (AU_a + BU_b + CU_c)$$

$$= I_{f0} - (if_A - if_B + if_C) \dots \dots \dots (5)$$

여기서, $Z_p = Z_{p0} + Z_{p1} + Z_{p2}$

$$A = Z_{0B}/Z_{s0} + aZ_{1B}/Z_{s1} + Z_{2B}/Z_{s2}$$

$$B = Z_{0B}/Z_{s0} + a^2Z_{1B}/Z_{s1} + aZ_{2B}/Z_{s2}$$

$$C = Z_{0B}/Z_{s0} + aZ_{1B}/Z_{s1} + a^2Z_{2B}/Z_{s2}$$

식 (7)에서 우변의 제 1항은 SFCL이 없을 경우 1선지락 고장시의 고장전류(I_{f0})이고, 제 2항은 사고시 SFCL의 설치점 a상, b상, c상전류가 SFCL의 임피던스 Z_{FCL}이 삽입된 경우의 고장점 전류의 억제분(if_A, if_B, if_C)를 표시한다.

여기서,

$$Z_{s0} = Z_{sA} + Z_{sB}$$

$$Z_{s1} = Z_{1A} + Z_{1B}$$

$$Z_{s2} = Z_{2A} + Z_{2B}$$

식 (5)에서 우변의 제1항은 SFCL이 없는 경우 1선지락 고장시의 고장전류이고 제 2항은 고장시 SFCL의 설치점 a상,b상, c상 전류가 SFCL의 Z_{FCL} 이 삽입된 경우의 고장점 전류의 억제분을 표시한다.

[그림 3]은 SFCL이 포함된 1선지락 고장시 등가회로를 나타낸 것이다. 고장을 발생한 SFCL의 고장전류치가 동작레벨에 도달하면 동작하여 선로에 직렬 임피던스가 삽입되어 전류등가회로로 표시될 수 있다. a상에 고장이 발생하면 고장전류 I_{FO} 가 흐른다(이때는 SFCL이 부동작하여 SWa, SWb, SWc)SFCL 동작이전에 SFCL의 설치점에 흐르는 각상의 전류(i_{1A} , i_{1B} , i_{1C})를 구한다. a상에 흐르는 전류가 ($i_{1A} = i_{10A} + i_{1A} + i_{12A}$) SFCL의 동작레벨에 달하면 a 상 SFCL이 동작 (그림3)의 SWa는 폐, SWb, SWc는 개상태가 된다. a 상 SFCL이 동작시 a 상 SFCL에 흐르는 전류 i_{aA} 는 다음과 같이 된다.

$$i_{aA} = (i_{10A} + i_{1A} + i_{12A}) - (i_{aA} + i_{1A} + i_{2A}) \\ = (E_{1A} - E_{1B}) / Z_{s1} + AI_{FO} - AI_{FA} - Y_s U_a$$

여기서 $I_{FO} = E_a / Z_p$, $i_{FA} = U_a A / Z_p$

$$Y_s = (1 / Z_{s0} + 1 / Z_{s1} + 1 / Z_{s2}) \text{ 이다.}$$

결과적으로 1선 지락시 고장점에 유출하는 지락전류 i_{IG} 는

$$i_{IG} = 3I_F = \frac{3(E_a - AU_a)}{Z_p} \\ = 3(I_{FO} - \frac{A}{Z_p \cdot 10YU} F_{1A})$$

여기서, $10YU = (\frac{3}{Z_{FCL}} + Y_s + A^2 / Z_p)$

2. 2. 3상 단락사고

같은 방법으로 3상 단락사고시 1선지락에서 구한 방법을 그대로 적용하면(SFCL동작시)

$$I_{3\phi} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{FCL}}{Z_{1A}}} \left(\frac{E_a}{Z_{p1}} \cdot \frac{Z_{1B}}{Z_{s1}} + I_N \right) \text{ 으로 된다}$$

3. SFCL의 설치장소와 고장전류

3. 1. 3상단락 고장

3상 단락조건을 대입하여 2. 1에서 전개한 방식에 따라 구하면

1) SFCL의 부동작시 ㉠와 변압기 저압측에 흐르는 a 상 각각의 고장전류

$$3\phi i_{a0} = \frac{E_a}{Z_{p1}} \cdot \frac{Z_{1B}}{Z_{s1}} + I_N \text{ 가 되고}$$

2) SFCL 동작시 ㉡와 변압기 저압측에 흐르는 a 상 각각의 고장전류는

$$3\phi i_a = \frac{E_a}{Z_{1A} + Z_{FCL}} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{FCL}}{Z_{1A}}} \cdot 3\phi i_{a0}$$

여기서 E_a : 고장점에서 본 고장전 계통 전압

I_N : 고장전 선로 전류(정상전류 ; 1.0 Pu)

Z_{s1} : 고장점에서 본 정상 등가임피던스

Z_{1A} : A계통 정상 등가임피던스

Z_{s1} : 전계통 정상 등가임피던스

3. 2. 1선지락 고장(a상)

1) SFCL 부동작시 a 점에 흐르는 a 상 고장전류

$$1GI_a = \frac{E_a}{Z_p} 1GA1 + I_N$$

㉢ SFCL 부동작시 변압기 저압측에 a 상 고장전류

$$1GI_a = \frac{E_a}{Z_p} 1GA1' + I_N$$

2) a 상 SFCL 동작시 ㉣점에 흐르는 a 상 전류

$$1GI_{aA} = \frac{3}{1 + 1G\Delta a} 1GI_a$$

㉤ a 상 SFCL동작시 변압기 저압측에 a 상 고장전류 $1GI_{aA}$

$$1GI_{aA} = 1GI_a - 1G\Delta A \times 1GI_a$$

여기서, $Z_p = Z_{p0} + Z_{p1} + Z_{p2}$: 고장점에서본영상, 정상, 역상임피던스

$$1GI_{a1} = \frac{Z_{1B}}{Z_{s0}} + \frac{Z_{1B}}{Z_{s1}} + \frac{Z_{2B}}{Z_{s2}}$$

$$1GA1' = \frac{Z_{1B}}{Z_{s1}} + \frac{Z_{2B}}{Z_{s2}}$$

$$1G\Delta a = \frac{Z_{FCL}}{3} \left(\frac{1GA1^2}{Z_p} + \frac{1}{Z_{s0}} + \frac{1}{Z_{s1}} + \frac{1}{Z_{s2}} \right)$$

$$1G\Delta A = \frac{Z_{FCL}}{3} \left(\frac{1GA1 \cdot 1GA1'}{Z_p} + \frac{1}{Z_{s1}} + \frac{1}{Z_{s2}} \right)$$

이상의 식에 의하여 [그림1]의 계통에서 정상운전시 전압 전류레벨 및 표1에 표시한 선로정수를 사용하여 우선 3상단락만 고장전류를 SFCL 임피던스를 파라메타로 하여 구하였다.

결과를 각각 [그림 4,5]에 표시하였다. 그림에서 (L) 은 회로고장시에 리액턴스를 발생하는 L형 SFCL을 (R)은 회로고장시 저항을 발생하는 R형 SFCL을 사용할 때의 SFCL 임피던스에 대한 고장전류치(pu치)를 표시하였다.

또한 그림 6은 1선지락고장시 L형 SFCL을 변압기 고압측에 설치한 경우의 고장전류 억제효과를 나타낸 것이다.

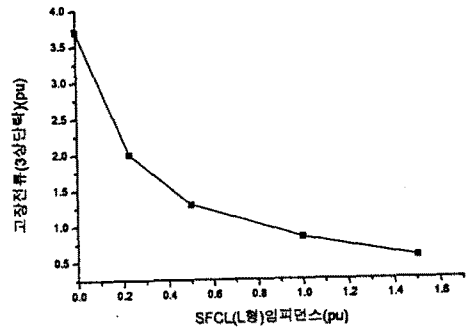


그림 4. SFCL(L형) 임피던스에 대한 고장전류특성

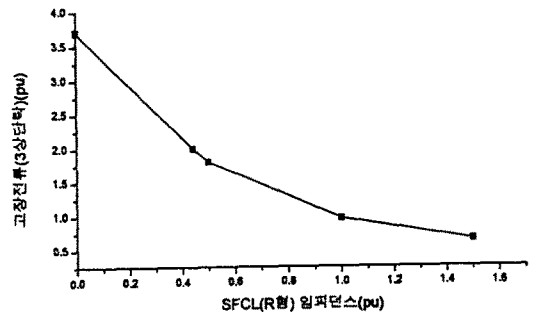


그림 5. SFCL(R형) 임피던스에 대한 고장전류특성

4. SFCL 사양 (동작개시전류와 임피던스)

1회선계통에서의 SFCL 적용에 있어서는 SFCL 설치 위치는 ㉔점에서 SFCL 형식은 L형으로 하는 것이 유효하다. SFCL에 의하여 [그림2]의 차단기에 흐르는 고장전류 최대치를 정상전류의 2배(2.0 pu)로 제한하기 위하여 최고가속한 1선지락시 고장전류를 소정의 전류치로 억제하기 위한 임피던스가 필요하며 그림 2에 의하면 Z_{FCL} 은 약 0.23pu는 되어야 한다. 또한 계통고장시에는 SFCL의 동작개시전류는 건전상에 흐르는 최대전류보다도 크게 해야 한다. 비대칭고장에 대한 고장계산에 따라 종합적인 검토가 필요하다.

5. 결론

- 1) 대칭과포법을 이용하여 SFCL의 동작관정, SFCL 동작시 고장계산을 효율적으로 할수 있는 고장계산을 등가회로를 제시하였다.
- 2) 그림2의 계통에서 SFCL의 설치 장소를 고압변압기 고압측에서 고장전류를 2.0(pu)로 억제하기 위해서는 L형은 0.23(pu), R형은 0.45(pu) 필요하고 이 시스템에서 발전기 케이블, 변압기등이 초전도기기인 경우 이 기기에 허용된 전류 최대치는 SFCL 설치점에 흐르는 고장전류가 SFCL의 전류제한리벨 2.0(pu)로 되지 않고 SFCL위 동작개시 전류리벨 2.02(pu)[마진 0.1(pu)]가 되도록 고려할 필요가 있다.
- 3) 3상SFCL을 도입하는 경우 고장시에 고장회선의 외 고장상 SFCL을 선택적으로 동작시킬 수 있도록 해야하며 SFCL의 동작개시전류리벨은 1회선 계통에 있어서는 건전상 최대전류 이상으로 설정해야한다.
- 4) 고장전류를 저감하고 차단기동작과무를 경감하기 위해서는 L형 SFCL을 변압기 고압측에 설치하는 것이 효과적이다.
앞으로 SFCL의 동작시간을 고려한 고장전류계산방법이 필요하며 릴레이(전류차동, 거리형)와 설정가능범위 등을 다각적으로 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. 홍원표, "초전도전력시스템에서의 초전도고장전류제한기의 운전방안", 대한전기학회 1996년도 하계학술대회는논문집, pp.764-765.
2. T. Verhaege, et al., "Progress on Superconducting Current Limitation Project for The French Electrical Grid", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 30, No. 4, July 1994.
3. T. Hara, et al., "Development of A New 6.6kV/ 1500A Class Superconducting Fault Limiter for Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, NO. 1, Jan. 1993
4. S. Sekine, et al., "On Fault Current Limiting & Specification of Superconducting Fault Current Limiters", IEEJ Trans., Vol.114-B, No. 9, pp.907-914,1994.
5. Technoba, "超電導電力應用技術開發Total System等の研究", 1994년 New Sunshine計劃 報告書, 1995.
6. Y.J. Tang, et al., "Quenching Current Level Coordination in Superconducting Power Transmission System", IEEJ Trans., Vol. 113-B, No. 9, pp. 981-986, 1993.
7. 原 築志, "超電導의クエンチを使った超電導限流器-開發前夜" 電學誌 114卷, 4號, pp. 229-232,1994.

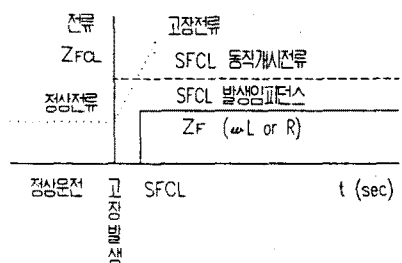


그림1. SFCL의 임피던스 발생현상

표 1. 구성기기의 리액턴스(pu)

A 계통	송전선로	B 계통
$X_d'' = j 0.14$	$X_0 = j 0.3675$	$X_d'' = j 0.144$
$X_c = j 0.05$	$X_1 = j 0.105$	
$X_{T1} = j 0.08$	$X_2 = j 0.105$	$X_{T2} = j 0.072$
계통 등가 임피던스		
A 계통	B 계통	전계통
$Z_{0A} = j 0.08$	$Z_{0B} = j 0.4395$	$Z_{50} = j 0.5195$
$Z_{1A} = j 0.27$	$Z_{1B} = j 0.321$	$Z_1 = j 0.591$
$Z_{2A} = j 0.27$	$Z_{2B} = j 0.321$	$Z_2 = j 0.591$

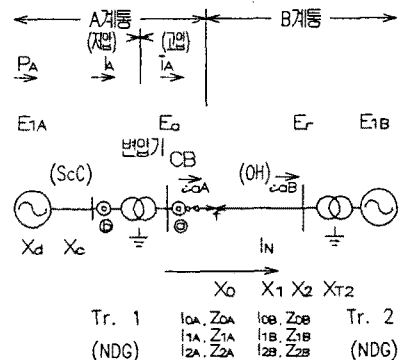


그림 2. 1회선 계통모델

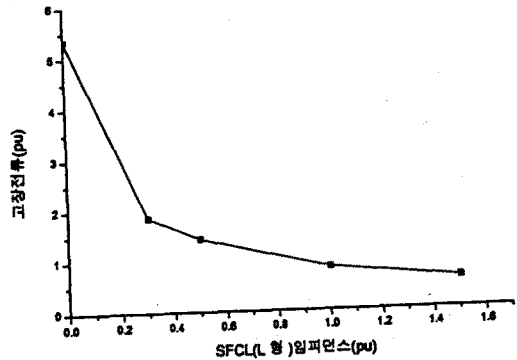


그림 6. 1LG고장시 SFCL (L형) 대한 고장전류특성