

계통보호릴레이와의 협조를 고려한 SFCL의 동작파라메타 설정방법에 대한고찰

홍 원 표
대전산업대학교

On Setting Method of the operating Parameters of SFCL in Transmission Systems Considering Power Protection Relay

Hong, Won-Pyo
Taejon National University of Technology

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 parallel circuit model transmission line. Also, describes the definition of six specific parameters of SFCL for power system application & a proposal of design method of specific parameter of a resistance type SFCL in overhead transmission lines considering operation of protective relays.

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 용융기기로서 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 있다¹⁻³⁾. SFCL은 전력계통에서 새로운 개념을 가진 기기로 단락전류를 용이하게 억제하여 전력계통의 설계 및 운용에 크게 기여할 수 있을 뿐만아니라, 초전도 전력 용융기술의 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 고장계산 방법을 제시하였으며 간단한 등가회로도도 도출한 결과⁴⁾를 토대로 SFCL을 포함한 2회선 계통에서 본 논문에서 제시한 고장계산법을 이용한 SFCL의 적용효과의 검토 및 사양결정방법, 설치장소 등에 대하여 검토하였다. 또한 계통측 관점에서 중요하게 고려해야할 SFCL의 동작 파라메타를 정의하였으며, 단락전류가 문제가 되는 가동송전선에 SFCL이 적용되는 경우에 동작 파라메타를 설정하는 방법 및 계통보호릴레이에 미치는 영향도 검토하였다.

2. SFCL의 전류제한효과 검증용 모델 계통

2.1 모델계통

그림 1은 SFCL의 동작검증용과 사고 시 전류제한효과를 분석하기 위한 2회선 계통에 있어서 각 회선에 SFCL을 설치하는 경우에 있어서

해석한다. 그림에서 케이블에 ScC기호가 있는 것은 장래전력 계통에 있어서 초전도케이블을 상징하고 있다. 사고전의 운전상태는 강압 변압기의 고압측에서 정격전압, 정격전력, 역률 1로 한다. 사고는 송압 변압기의 고압측 가까운 지점(2의 f점)에 발생하는 것으로 한다.

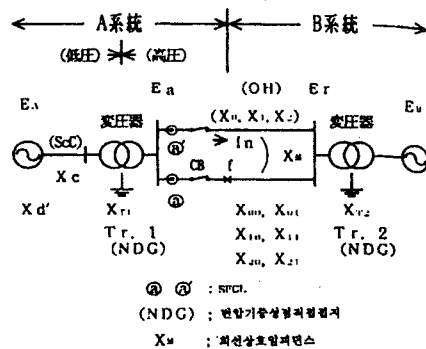


그림1 2회선 계통모델

2.2 SFCL에 의한 전류제한 효과⁵⁾

그림 1의 2회선계통 모델을 상징하여 SFCL을 고압측에 설치한 경우 최고 가혹한 고장조건인 송압변압기 고압측 모선 고장시의 계통각부의 고장전류를 구했다. 2회선 계통정수를 표 1로 하여 1선지락 및 3상 단락고장 (그림 1의 f 점) 시의 고장회선 전전회선 및 변압기 고압측의 전류(a 상)를 구한다. 또한 정상시 각 회선에는 I_{av}/2 (0.5pu)전류가 흐르는 것으로 한다.

(1) 3상단락

① SFCL 부동작시 고장회선 전류

$$3\phi ia_{A0} = \frac{E_a}{Z_p} \times 3\phi A_2 + \frac{I_N}{2}$$

② SFCL 부동작시 전전회선전류

$$3\phi ia_{A0}' = \frac{E_a}{Z_p} \times 3\phi A_2' + \frac{I_N}{2}$$

③ SFCL동작시 고장회선전류

$$3\phi ia_A = \frac{3\phi ia_{A0}}{Z_F \cdot 3\phi Y_2}$$

④ SFCL동작시 전전회선전류

$$3\phi ia_A' = 3\phi ia_{A0}' - Z_F \cdot 3\phi Y_2' \cdot 3\phi ia_A$$

여기서, $Z_p = Z_{p10} + Z_{p11}$ (고장점에서 본 정상 제1, 제2회로의 임피던스의 합)

$$3\phi Y_2 = \frac{1}{Z_F} + \frac{1}{2} (3\phi A_2^2 / (Z_{p10} + Z_{p11}) + \frac{1}{Z_{s10}})$$

$$\frac{1}{Z_{s11}})$$

$$3\phi Y_2' = \frac{1}{2} \left(\frac{3\phi A_2 \cdot 3\phi A_2'}{Z_{\rho10} + Z_{\rho11}} + \frac{1}{Z_{s10}} + \frac{1}{Z_{s11}} \right)$$

$$3\phi A_2 = \frac{Z_{10B}}{Z_{s10}} + \frac{Z_{11B}}{Z_{s11}}$$

$$3\phi A_2' = \frac{Z_{10B}}{Z_{s10}} - \frac{Z_{11B}}{Z_{s11}}$$

(2) 1선지락

①SFCL부동락시 고장회선 a상 전류

$$1G_{iaA0} = \frac{E_a}{Z_p} \times 1G A_2 + \frac{I_N}{2}$$

② SFCL부동락시 건전회선 a상 전류

$$1G_{iaA0}' = \frac{E_a}{Z_p} \times 1G A_2' + \frac{I_N}{2}$$

여기서 $Z_p = Z_{\rho00} + Z_{\rho01} + Z_{\rho10} + Z_{\rho11} + Z_{\rho20} + Z_{\rho21}$

$$1G A_2 = \frac{Z_{00B}}{Z_{s00}} + \frac{Z_{01B}}{Z_{s01}} + \frac{Z_{10B}}{Z_{s10}} +$$

$$\frac{Z_{11B}}{Z_{s11}} + \frac{Z_{20B}}{Z_{s20}} + \frac{Z_{21B}}{Z_{s21}}$$

$$1G A_2' = \frac{Z_{00B}}{Z_{s00}} - \frac{Z_{01B}}{Z_{s01}} + \frac{Z_{10B}}{Z_{s10}} -$$

$$\frac{Z_{11B}}{Z_{s11}} + \frac{Z_{20B}}{Z_{s20}} - \frac{Z_{21B}}{Z_{s21}}$$

③SFCL동작시 고장회선 a상전류

$$1G_{iaA} = \frac{1}{Z_F \cdot 3\phi Y_2} \times 1G_{iaA0}$$

④SFCL동작시 건전회선 a상 전류

$$1G_{iaA}' = 1G_{iaA0}' - Z_F \cdot 1G Y_2 \times 1G_{iaA}$$

$$\text{여기서, } 1G Y_2 = \frac{1}{Z_F} + \frac{1}{6} \left(\frac{1G A_2}{Z_p} + Y_s \right),$$

$$1G Y_2' = \frac{1}{6} \left(\frac{1G A_2' \cdot 1G A_2'}{Z_p} + Y_s' \right)$$

$$Y_s = \frac{1}{Z_{s00}} + \frac{1}{Z_{s01}} + \frac{1}{Z_{s10}} + \frac{1}{Z_{s11}} + \frac{1}{Z_{s20}} + \frac{1}{Z_{s21}}$$

$$Y_s' = \frac{1}{Z_{s00}} - \frac{1}{Z_{s01}} + \frac{1}{Z_{s10}} - \frac{1}{Z_{s11}} + \frac{1}{Z_{s20}} - \frac{1}{Z_{s21}}$$

2회선계통에 있어서 모선 가까이 3상단락 및 1선지락고장시 SFCL 임피던스대 고장전류의 정상전류에 비유한 그림 2에 나타내었다. 또한 건전상전류도 표시하였다.

3 SFCL의 동작 파라메타

3.1 종류와 정의

본 절에서는 SFCL를 전력계통에 도입한 경우 그 적용상태에 따라 적절한 기기파라메타를 지정할 필요가 있다. 여기서는 계통에 도입한 경우 사양이 되는 기기파라메타로서 표 1과 같이 정의된다. 그 중에서 SFCL의 기기 파라메타로서 결정되는 기본동작 파라메타와 계통과의 관련(계통의 구성과 조류조건, 고장조건등과 상기 기본 동작 파라메타로부터 결정되는 파라메타의 2종류가 있다.

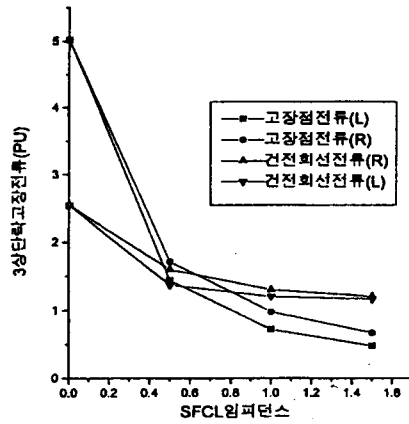


그림2. SFCL의 임피던스와 고장전류 특성

표 1. 동작 파라메타와 정의

	동작개시전류 (I_{Ls})	전류제한동작을 개시하는 전류
기본 동작 파라메타	최종제한 임피던스(Z_L)	전류제한동작 완료후 최종적으로 나타나는 임피던스로 저항형SFCL의 경우에는 최종전류제한 저항으로 칭하고 R_L 로 표시한다.
	동작시간 (t_{op})	전류제한동작을 개시한 시기부터 최종전류제한 임피던스에 이르기까지의 시간
	복귀시간(t_{re})	전류제한동작에 의하여 적정레벨의 고장전류를 억제하고 그후 정류동작이 가능하기까지의 시간 (다음의 최대제한전류와 최종고장전류에도 의존한다.)
계통과 연관되어 결정된다	최대제한전류 (I_{Lm})	전류제한동작중에 SFCL에 흐르는 최대전류
	최종고장전류 (I_L)	SFCL의 최종전류 제한임피던스에 의하여 억제되는 고장전류의 크기

3.1 저항형SFCL동작에 의한 거리릴레이 용동에 미치는 영향

(1) SFCL이 없는 경우에 릴레이에 나타나는 임피던스

여기서는 직접 접지계의 후비 보호로서 광범위하게 사용되는 거리릴레이 방식에 대하여 저항형 SFCL의 동작에 따른 영향을 검토한다.

어떤 변전소에 설치되어 있는 사고 회선측의 단락릴레이가 변전소로부터 어느 지점에 3LG가 발생할 때에 나타나는 임피던스 Z_L 를 고려한다. 여기서 배후 임피던스를 Z_B , 모선전압 V_a , V_b 선로전류 I_a , I_b 라 하면,

$$I_a = \frac{E}{Z_B + Z_L}$$

$$I_b = \frac{a^2 E}{Z_B + Z_L}$$

$$V_a = E - Z_B I_a = \frac{Z_L E}{Z_L + Z_B}$$

$$V_b = E - Z_B I_a = \frac{Z_L a^2 E}{Z_B + Z_L}$$

AB상의 단락 윌레이에 나타나는 임피던스 Z_{Rab} 는

$$Z_{Rab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = Z_L$$

(2) 저항형 SFCL 동작시에 윌레이에 나타나는 임피던스

SFCL동작시 최종 R_{L1} Ω의 저항(최종전류제한저항)이 발생하면 윌레이에 나타나는 임피던스는 $Z_{Rab} = Z_L + R_{L1}$ 가 되고 R 축방향이 변화한다. 거리 계산방식의 방향요소가 있는 mho 윌레이는 SFCL의 전류제한 동작에 의한 영향을 받을 가능성이 있다. 모델계통에 있어서 송전선의 리액턴스를 X_L 로 하면 제2단 요소가 $1.3 \sim 1.5X_L$ 로 되기 때문에 mho요소의 정정치는 2단의 300% 정도로 $3.9 \sim 4.5X_L$ 정도가 된다. 최종전류제한저항을 100Ω으로 하면 이것은 모델계통에서의 보호구간 송전선의 약 700%로 되기 때문에 구간내 사고 발생시에도 SFCL의 동작에 의하여 방향요소인 mho요소를 부동작시킬 우려가 있다.

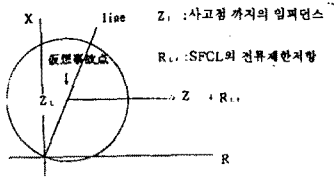


그림 3. SFCL동작에 의한 윌레이 임피던스의 변화

(3) 최종전류제한저항의 적절한 범위

현재의 보호방식에 SFCL을 적용하는 경우 최종전류제한저항을 사고전류의 억제에 위하여 크게 선택하면 저항형 SFCL의 동작하에서는 후비보호에 사용되고 있는 방향관정요소인 mho 특성이 부동작으로 될 수 있기 때문에 주의할 필요가 있다. 따라서 SFCL의 최종전류제한저항의 설정범위는 그림에 나타난 바와 같이 사고에서 SFCL이 동작할 때 윌레이에 나타나는 임피던스가 mho요소의 보호범위에 확실히 포함되는 값으로 되지 않으면 안된다. 또한 이 최종전류제한저항으로 사고전류를 충분히 억제시킬 수 있는 값이 필요하다. 하한값은 최대 전류제한전류를 고려할 필요가 있다. 즉, 최대전류제한 전류가 CB의 차단용량을 초과하지 않도록 설정하여야 한다.

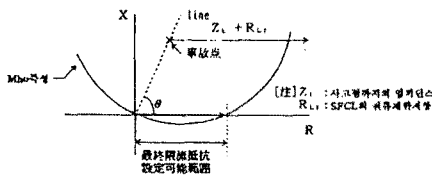


그림 4. 최종전류제한저항의 설정가능한 범위

최종전류제한저항의 설정 가능한 최대치를 구하면 다음과 같다. mho 특성의 정정치를 Z_M 최대감도각을 ϕ 라하면 mho 특성은

$$\left(R - \frac{Z_M}{2} \cos \phi\right)^2 + \left(X - \frac{Z_M}{2} \sin \phi\right)^2 = \left(\frac{Z_M}{2}\right)^2$$

로 표시 될 수 있기 때문에 최종전류제한저항의 설정 가능한 최대치는 R_{max} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{max} = Z_M \cos \phi$$

그림 1의 모델 계통에 대해서 그 값을 계산하면 선로리액턴스를 X_L 로 할 때

$$Z_M = 55[\Omega] \text{ (제2단저항의 300\%로 하였다.)}$$

$$\phi = 75^\circ$$

$$X_L = 14.2[\Omega]$$

그림 1과 같은 모델계통에 있어서 송전선이 주보호기로서 전류 차단 방식, 후비 보호방식으로 거리 계산기 방식을 이용하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

- 1) 위에서 구한 R_{max} 는 전류 차단윌레이의 최소감도를 만족한다. 즉, 내부사고에 대해서도 충분한 정상동작을 기대할 수 있다.
- 2) 이 값으로 하면 전류차동 및 거리계전기 동작면에서도 문제가 야기 되지 않는다.
- 3) 이상으로부터 최대전류제한의 설정 가능한 최대치는 보호대상송전선과 同程度까지로 한다.

주보호기로서 전류 차단방식, 후비보호로서 거리윌레이를 사용하는 계통에서는 최종전류제한저항은 거리의 mho특성상의 동작범위를 고려하여 결정할 필요가 있다. 실제 계통에 적용하는 데 있어서 특히 중조송전선에는 브라인다 요소에 의하여 상시조류에서 mho특성이 동작하지 않도록 하기 위해서는 설정 가능한 최종전류제한저항의 최대치 R_{max} 는 그림 5와 같이 된다. 이때의 R_{max} 아래와 같이 된다. 여기서 브라인다의 정정치를 Z_X , 최고감도각을 θ 로 하면

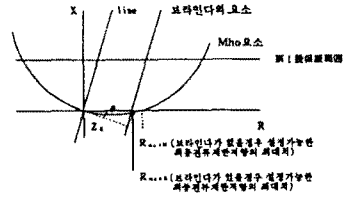


그림 5 최종전류제한저항의 설정가능범위(브라인다가 있는 경우)

$$R_{max} \geq \frac{Z_X}{\cos \theta}$$

따라서 그림 1의 모델계통 송전선의 중조류에서 브라인다가 의한 대책을 행하는 경우에는 우선 구한 R_{max} 와 여기서 구한 R_{max} 를 비교하여 작은 값을 최종전류제한저항의 설정 가능한 범위가 되기 때문에 브라인다 대책을 행하고 있는 계통에서는 설정가능 범위는 협소해질 가능성이 있다.

(4) 유도형 초전도 SFCL 동작시의 후비보호에 미치는 영향

유도형 초전도전류제한기의 경우에는 거리 윌레이 방식중에 리액턴스 특성이 영향을 받는다. 이 영향에 관해서는 그림 6에 나타났다.

SFCL이 유도형으로 동작하는 경우에는 후비보호로서 대표적인 거리관정요소로 있는 리액턴스 특성에 영향을 고려해야 하며 특히 제 1단 요소에서는 영향이 크다.

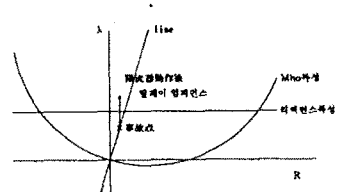


그림 6. 유도형SFCL동작에 의한 리액턴스 특성이 미치는 영향
복귀시간 여기서는 가공송전선에서의 적용을 가정했기 때문에 고속 제 제로 운용과의 협조를 도모할 필요가 있다. 특히 345kV 계통에 적용하는 경우에는 사고 제거후 1초 이내에 복귀할 필요가 있다. 따라서 냉각능력과 냉각 방법을 검토하는 경우에는 그 시간 및 SFCL의 소비에너지를 검토할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SFCL을 사고시에 차단용량의 한계를 초과하는 사고전류를 상정한 가공송전선에 적용하는 모델 계통에 대하여 정의된 동작파라메타의 설정방법에 대하여 검토하였으며 그 결과를 표2에 요약하여 나타냈다. 본 연구에서 검토한 저항형 SFCL은 고온초전도체를 적용한 SFCL에서는 저항의 발생 메카니즘이 명확하지 않아 이 모델링의 명확한 정립과 병행하여 연구가 되어야 한다. 앞으로 대규모 연계계통 및 타 초전도기기 등의 보호로서 적용할 경우 SFCL의 모델링 확립과 동작 파라메타의 설정방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 후원표, "초전도전력시스템에서의 초전도고장전류제한기의 운전방안", 대한전기학회 1996년도 하계학술대회논문집, pp.764-766.
2. T. Vertaeghe, 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", 1994年 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 繁志, "超電導のクエンチを使った超電導限流器- 開發前夜" 電學誌 114巻, 4 號, pp. 229-232,1994.
8. 후원표, "SFCL의 고장전류억제효과와 동작파라메타 설정방법에 대한 고찰", 대한전기학회 창립 50주년 하계학술대회 논문집(PSP17), pp 972-974, 1997.

부록 :

표2. 주요 파라메타 검토결과

파라메타	설정시 고려해야할 사항	설정방법 - 범위 등
동작개시전류	SFCL의 동작체류 - 부동작 체류	해당회선의 사고시에 건전회선에 흐르는 최대전류보다 크고 CB의 차단용량이하에서 설정 가능. 단, 최대전류를 포함하는 전류분포를 구하는 데 대칭과포법을 이용할 때 건전회선에 흐르는 최대전류(실치치)에 대해서 과도전류분을 고려하여 그 2배치 이상으로 하여 간단히 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 방법에 의하여 설정하여 각 종사고에 대하여 적용성을 검토하여 양호한 결과를 얻을.
최종전류제한 저항	SFCL이 동작한 경우에 기간 계통의 보호시스템(주보호: 전류차동, 후보호: 거리)의 유동에 영향을 미치지 않도록 고려.	이 저항이 과도하게 크면 전류차동 릴레이에서는 오동작되는 경우가 있다. 거리릴레이의 mho특성을 부동작으로 설정하지 않기 위해서는 보호대상 송전선리액턴스가 상한이 된다. 하한에 있어서는 최대제한전류를 고려할 필요가 있다. 이 양자를 만족하는 범위가 설정가능 범위로 된다.
동작시간	여러 동작 파라메타에 영향을 미치지만 적절한 최종전류 제한저항 이하에서는 그다지 문제가 되지 않음.	확실한 보호용동을 기대하려면 적절한 최종전류제한저항을 가지고 고속의 것이요망된다. 또한 소비 에너지면에서도 유리하다.
복귀시간	가공송전계통에서는 고속도 제때로 운용과의 협조가 요구됨.	무전압시간 이내에서의 복귀가 필요하다.
최대제한전류	SFCL의 도체 설계와 직렬기기의 전류내량에 영향을 주는 중요한 파라메타이다. 단, 적용계통결정시 시뮬레이션결과를 통하여 확인할 필요가 있다.	최대제한전류가 차단기용량이하가 되도록 설정한다. 이것은 릴레이로부터 trip출력이 조기출출된 경우에도 확실하게 차단시키도록 하기 위함.
최종사고전류	기본파라메타와 이외의 계통의 조건등과 연관이 되기 때문에 적용계통이 결정되었을 때 시뮬레이션등에 의하여 확인될 필요가 있다.	최종전류제한저항의 크기에 의존한다. 발열면에서는 최종전류제한 저항을 크게하는 것이 바람직하나, 보호용동면에서의 제약이 있다.