

The Stability Analysis of Power System Installed Superconducting Fault Current Limiter

李 丞 濟* · 李 燦 周* · 高 太 國**

(Seung-je Lee · Chanjoo Lee · Tae Kuk Ko)

Abstract - The stability of Power system installed Hi-Tc Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) is analyzed as a process of developing SFCL. For investigation, a simple mimic system(only one generator) is assumed and then the circuit with SFCL in that system is solved for transient performance. In case the SFCL is installed in the power system, it protected synchronization more effectively both in symmetrical 3-phase fault and single phase line to ground fault in that the machine remains in synchronism for the more time than that of without superconducting fault current limiter. It shows that the superconducting fault current limiter not only limits fault current but also protect synchronism. So for design of this SFCL, its synchronism protection property must be considered.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Power system, Power angle

1. 서 론

1986년에 MRI나 고자장 마그넷에 쓰이는 기존의 저온초전도체보다 10배정도 임계온도가 높은 새로운 계열의 고온 초전도체의 발견은 기존의 전력계통이나 전력기기의 개념을 새롭게 조명하고 있다. 좀 더 효율이 좋고 크기가 작은 모터, 발전기, 전력 송전케이블, 변압기 그리고 고품질의 전력을 공급하기 위한 초전도 에너지 저장장치(SMES)는 고온초전도체의 발견으로 부각되는 분야이다. 특히, 고온초전도한류기는 송전단이나 배전단에서 모두 적용되어 사고전류를 감소시킴으로써 한류기 이하에 설치되어 있는 전력기기의 보호 및 차단기의 용량증가 없이 계통의 용량을 배가시킴으로써 전력계통의 용량증가로 인한 기존의 차단기의 업그레이드 시 발생하는 추가비용을 피할 수 있고 고가의 전력 기기를 효과적으로 보호할 수 있으므로 고온초전도 전력 기기 중 가장 상용화가 빠를 것으로 예상된다. ABB(Area Brown Boveri), Martin Marietta, ASC(American Superconductor Co.), Siemens 그리고 Hydro-Quebec등 세계 각국의 중전기 업체가 한류기의 상용화를 위해 박차를 가하고 있고 특히 1996년 11월 ABB사에서 고온초전도한류기를 기존의 5.5 MVA급 수력발전기와 차단기 사이에 설치하여 테스트하고 있다. 본 연구실에서는 현재

자기 차폐형 모델에서 국내최초로 400V급 고온 초전도 한류기를 제작하는 기술을 확보하고 있다. 현재 세계 각국에서 개발하고 있는 고온 초전도 한류기를 전력 계통에 적용할 경우 전력계통의 안정도가 높아질 것으로 예상된다. 하지만 여기에 대한 확실한 조사가 되지 않았고 막연히 막대한 대전류를 제한한다는 개념만으로 한류기 이용이 전력 계통의 사고 전류를 경감시킨다는 것만을 알고 있었다. 따라서 현재 개발된 한류기가 전력 계통에 적용되었을 경우, 안정도 차원에서 어느 정도의 효과가 있는지 정량적으로 살펴보는 것이 필요하다. 여기서는 본 연구실에서 개발된 한류기와 동기기를 기초로 모델링하여, 한류기를 실제와 같은 발전계통에 설치하였을 경우, 전력시스템의 안정도 측면에 어떠한 효과가 있는지 살펴보았다.

2. 전력 계통에서 안정도와 한류기 위치

계통에서 고온초전도한류기의 위치에 따라 고온초전도한류기의 전력용용의 목적은 달라진다. 한류기가 송전 라인에 설치 될 경우 Bus 전체의 사고 전류를 낮추는 효과를 가져오므로 별도로 차단기의 업그레이드 없이 사용할 수 있다. 소형 고온초전도한류기는 Bus에 연결되어 있는 하나의 부하만 따로 보호할 수 있다. 이런 경우 작고 값이 싼 고온초전도한류기를 사용할 수 있으며, 오래되거나 과도한 스트레스를 받는 기기들의 보호에 주로 쓰이게 된다. 위치에 따라 전력계통을 보호한다는 것은 계통의 안정도(stability)를 향상시키는 것이다. 실제 계통에서 안정도(stability) 혹은 단락 용량은 보통 3상 발전기와 같은 동기기(Synchronous machine)의 동기 상태가 부하의 변화에 따라 어떻게 변하는가에 초점을 맞춘다. 고온 초전도

*正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 博士課程

**正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 教授

接受日字 : 1998年 10月 30日

最終完了 : 1999年 3月 31日

한류기가 실제 계통에 설치되었을 경우 사고 발생 시 동기발전기의 동기화를 어느 정도 보호하느냐가 한류기의 가장 큰 개발 목적이라고도 할 수 있다. 한류기가 설치 되어있을 경우 발전기(Generator)의 안정도를 높일 수 있다는 것을 직관적으로 알 수 있다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 매우 단순화된 계통을 생각하였다. 즉 하나의 3상 발전기의 각 상에 한류기를 직렬로 연결한 후 부하에 연결하였다. 이것을 통해서 한류기가 전력 기기에 미치는 직접적인 영향을 살펴볼 수 있다.[1]

3. 시스템 모델링

전력계통의 안정도 해석은 정상상태 해석과 과도 상태 해석 두 가지로 나뉜다. 한류기가 설치된 전력계통의 해석은 사고 발생에서 차단기가 작동할 때까지다. 따라서 여기서 원하는 해석은 과도 상태 해석이다. 이러한 과도 상태를 해석하기 위해서는 발전기와 고온 초전도 한류기 그리고 이러한 기기 들이 투입될 계통을 알맞게 모델링할 필요가 있다.

3.1 발전기 모델링

한류기를 설치할 모의 계통에는 용량이 3kw급이고 출력 전압이 약 220V(rms)인 3상 동기발전기 1기를 설치하였다. 발전기를 모델링하기 위해서는 정상 상태 형태로 표현된 일반적인 등가회로를 사용할 수 없다. 즉 기기의 물리적 특성에 따른 상태방정식을 이용하여 각각의 전압, 전류, 동기속도, 토크 그리고 부하각을 나타내어야 한다. 식3.1은 공극에서의 자속과 전류사이의 관계식 및 전압방정식이다. [2]

$$V = R_i I + L_i \frac{dI}{dt} + R_e I + L_{sfc} \frac{dI}{dt} \quad (3.1)$$

$$\dot{\omega}_m = (\tau_m - \tau_e) / J \quad (3.2)$$

$$\dot{\theta} = \omega_m \quad (3.3)$$

$$\dot{\tau}_m = -K_p(\omega_m - \omega_0) - K_d \dot{\omega}_m \quad (3.4)$$

여기서 L_i 는 회전자(rotor)와 고정자(stator)의 자기 및 상호 인덕턴스를 나타내고 R_i 는 내부 저항, L_{sfc} 은 한류기에 의해 만들어지는 인덕턴스의 값이다. 또한 발전기의 기계적인 해석을 위해 운동방정식과 속도 제어를 위한 제어 방정식이 필요하다. 발전기의 운동 방정식은 식3.2와 식3.3이다. 그리고 식3.4는 발전기의 동기속도를 제어하는 조속기 상태방정식이며 PD 제어기(controller) 형태를 사용하였다. [3][4]

3.2 고온 초전도 한류기 모델링

고온 초전도 한류기는 본 연구실에서 제작하고 있는 220V 급 자기 차폐형 모델이다. 자기 차폐형 고온초전도한류기는 초전도튜브(Tube)를 변압기의 2차 코일로 모두 사용하는 것이다. 따라서 변압기와 작동 원리가 완전히 같다고 할 수 있다. 자기 차폐형 고온초전도한류기는 각상의 1차측은 동선으로 구성하고 2차측은 단락된 고온초전도 회로로 구성된다. 이를 그림 2와 같은 형태의 강자성체 코아에서 자기적으로 결합시킨다. 각각의 1차측은 회로에 직렬로 연결 회로소자를 보호한다. 정상 상태 시에 초전도 링의 저항은 없으므로 1차측 코일에서 생성된 자속은 2차측의 차폐전류에 의해 거의 상쇄된다.

표 1 발전기의 파라메타

| Parameter | Symbol |
|----------------------|------------|
| rotor Angle | θ |
| rotor Angle velocity | ω_m |
| electrical torque | τ_e |
| mechanical torque | τ_m |

따라서 한류기의 임피던스는 매우 낮아지며 이는 1차 코일의 누설자속에 의해 결정된다. 사고 시는 사고가 난 상의 1차측 전류는 급격히 증가한다. 이 증가한 전류는 초전도 회로에서 많은 전류를 발생시킨다. 따라서 이렇게 유기된 전류가 빠른 시간에 초전도체의 임계 전류 값을 초과하여 높은 상전도 저항이 발생한다. 따라서 2차측 초전도 링에서 발생한 상전도 저항으로 인하여 거의 완전히 차폐되었던 자속이 전류에 따라 증가하고 임피던스가 발생하여 사고전류를 제한한다. 초전도 벌크에 켄치가 발생하였을 경우 저항 발생 곡선은 간략화 하여 그림 2와 같다는 것을 실험을 통해 확인했다.[5] 사고 발생 시 사고전류를 70%정도로 줄이기 위해서 인덕턴스가 약 200mH 정도로 발생하는 것으로 설정하였다. [6]

3.3 전력 시스템 모델링

계산의 단순화와 한류기의 직접적인 영향을 알아보기 위해서 그림 2와 같은 1기의 동기기가 설치되어있는 단순화된 시스템을 설계하였다. 시뮬레이션을 위한 전력계통에 포함되는 라인 인덕턴스를 2mH, 라인 저항을 3Ω, 정격 부하를 72Ω 정도로 가정하였고, 단순한 계통으로 가정하였기 때문에 계통을 집중 정수회로로 해석하였다. 송전 선로에서 발생하는 고장은 1선 지락사고가 주로 발생한다. 따라서 1선 지락사고와 가장 위험한 완전 단락 사고를 시뮬레이션 하였다. 사고는 부하 저항을 순간적으로 "0" 상태로 변화 발생 시켰다. 전력 시스템의 고장 상태 해석에서 발전기가 받아들이는 기계적 토크, 전기력에 의한 토크, 각속도, 부하각, 고장전류 등을 관찰하였다.[7]

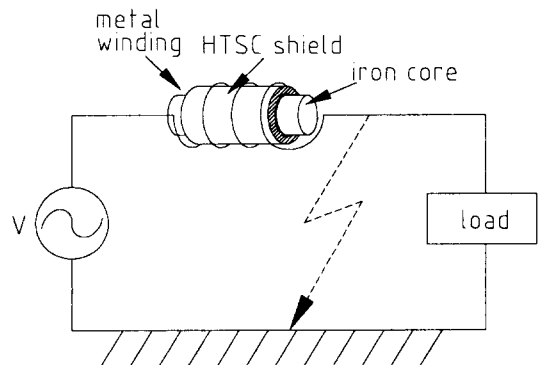


그림 1 자기 차폐형 고온초전도한류기
Fig. 1 Shielding type superconducting FCL

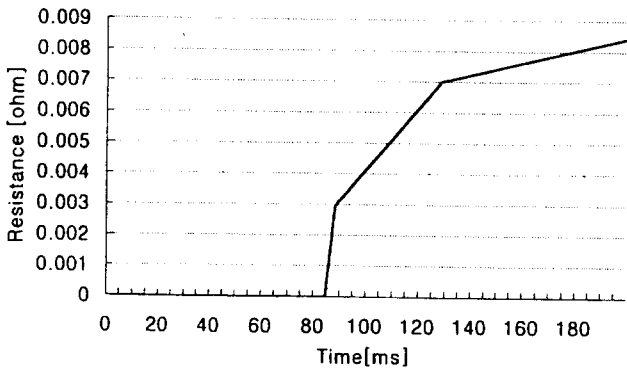


그림 2 초전도체 저항 발생곡선
Fig. 2 The Resistance curve of Superconductor

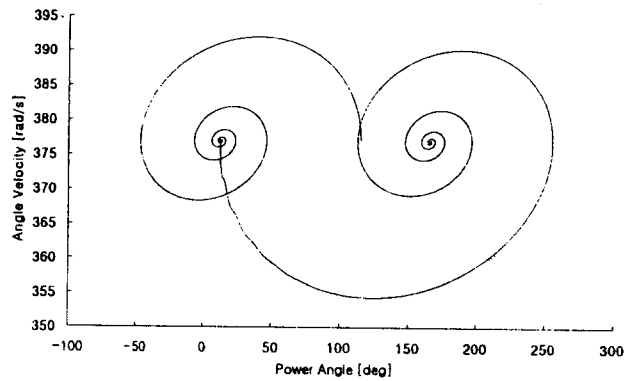


그림 4 한류기가 없는 시스템의 3상 단락사고 시부하각에 따른 각속도
Fig. 4 Angle Velocity vs Power Angle graph in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

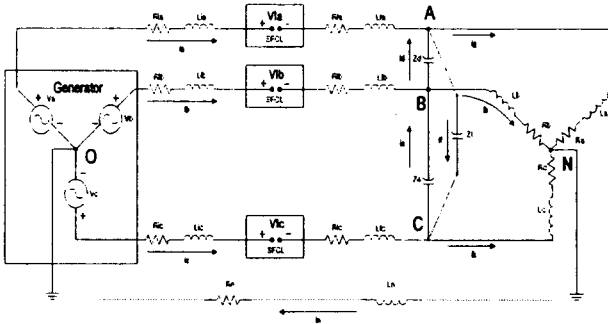


그림 3 3상 발전기와 한류기가 연결된 회로
Fig. 3 The circuit on SFCL with Synchronous generator

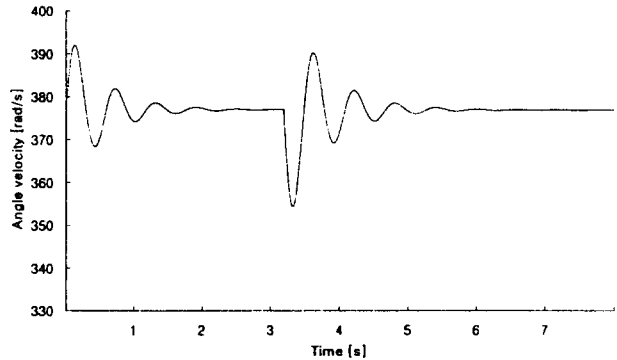


그림 5 한류기가 없는 시스템의 3상 단락사고 시각속도 그래프
Fig. 5 Angle Velocity graph in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

4. 결과 고찰

한류기가 설치되지 않은 계통의 3상 단락사고와 한류기가 설치된 계통의 3상 단락사고 그리고 가장 빈번하게 일어나는 한류기가 설치된 계통의 1선 지락사고를 살펴보았다.

4.1 한류기가 설치되지 않은 계통의 3상 단락사고

그림 4는 각 속도와 부하각 사이에 관계를 보여주고 있다. 초기에 운전을 시작한 후 약 15° 부하각 동기 각 속도 120π 에서 안정된다. 정상 운전 중 사고 발생 후 최대 이탈각도인 80° 을 넘어서는 점까지 동기가 이탈한다. 즉 동기가 완전히 이탈한 것을 알 수 있다. 이론상 조속 장치에 의해서 150° 를 넘어서는 점에서 안정된다. 일반적으로 이러한 상황에서는 Power 시스템을 가동할 수 없다. 그림 5가 보여 주는 동기 속도는 운전을 시작할 때 약간의 swing이 있는 후 동기 각 속도인 120π 에서 안정된다. 하지만 사고 발생 후 (350rad/s) 까지 떨어진 후 4cycle의 swing이 있는 후 안정된다. 7%이상의 동기 속도이탈을 보여주고 있다.

그림 6은 전기력 토크와 기계적 토크를 보여준다. 전기력 토크는 사고 발생 전 0.6 Nm 정도였고 이에 따라서 기계적 토크가 조속 장치에 의해서 주어졌다. 하지만 전기력 토크는 사고 발생 후 순간적으로 13Nm까지 높아진 후 6Nm에서 안정된다. 따라서 기계적 토크가 이에 따라 증가하지만 그 증가하는 정도가 조속 장치에 의해서 제한할 수 있는 속도를 넘기 때문에 초기 3초간은 제한 할 수 없다. 이것은 기계적인 차단기의 한계를 보여주고 있다. 최적의 조속 장치를 설계한다 하여도 전기적인 토크의 변화를 제어할 수는 없다. 그림 7은 a상의 전류를 보여주고 있다. 정상상태에서 2A정도의 전류가 흐르지만 사고가 발생한 후 약6A까지 증가한다. 여기서는 1기의 발전기만을 사용하였기 때문에 발전기의 용량 한계에 의해서 전류의 큰 변화는 발견할 수 없다. 전류는 발전기의 출력 전력의 한계가 있기 때문에 큰 변화가 없지만 사고 전에 비해 약 2배의 전류가 시스템에 흐르는 것을 알 수 있다. 회로 차단기에 의해서 안정되기 전에 이미 최대(6A) 전류가 흐르는 것을 알 수 있다.

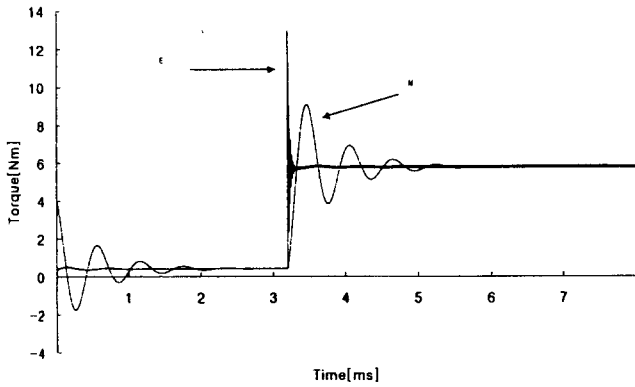


그림 6 한류기가 없는 시스템의 3상 단락사고 시 전기 및 기계적 토크
 Fig. 6 Electric and Mechanical Torque in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

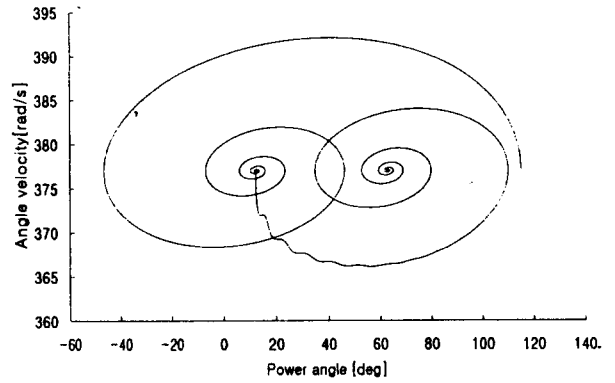


그림 8 한류기가 설치된 시스템의 3상 단락사고 시 부하각에 따른 각속도
 Fig. 8 Angle Velocity vs Power Angle graph in case 3-phase fault of power system of SFCL

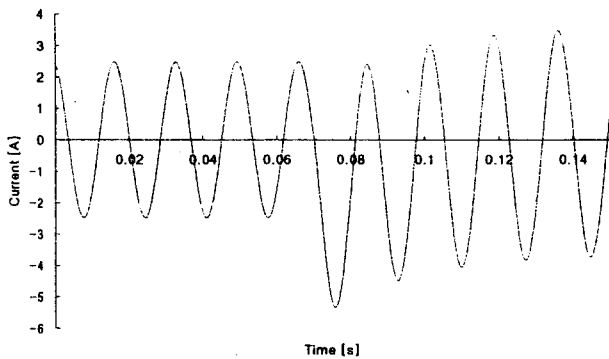


그림 7 한류기가 없는 시스템의 3상 단락사고 시 a상 사고 전류
 Fig. 7 Current of a-phase in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

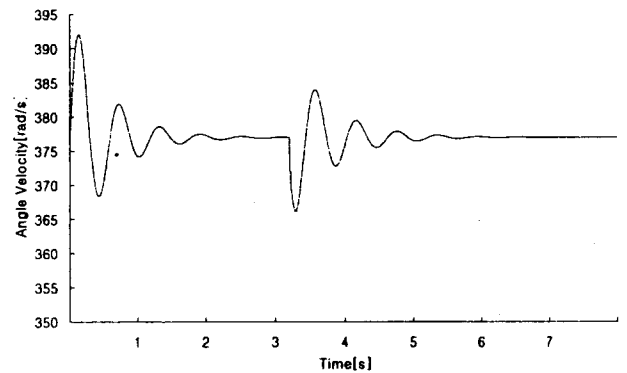


그림 9 한류기가 설치된 시스템의 3상 단락사고 시 각속도
 Fig. 9 Angle Velocity graph in case 3-phase fault of power system of SFCL

4.2 한류기가 설치된 계통의 3상 단락사고

그림 8은 각속도와 부하각 사이에 관계를 보여주고 있다. 초기에 운전을 시작한 후 약 15° 부하각 동기 각 속도 120π 에서 안정된다. 정상 운전 중 사고 발생 후 각 속도 120π , 부하각 60° 정도에서 안정화되는 것을 볼 수 있다. 한류기가 설치된 계통의 경우, 없는 경우에 비해 부하각이 절반정도 밖에 되지 않았다. 이론상 조속 장치에 의해서 발전기가 어느 정도 제어 되는 것을 예상할 수 있다.

그림 9가 보여 주는 동기속도는 운전을 시작할 때 약간의 swing이 있는 후 동기 각 속도인 120π 에서 안정된다. 하지만 사고 발생 후 (366rad/s) 까지 떨어진 후 4cycle의 swing이 있는 후 안정된다. 3%이내의 동기 속도가탈을 보여주고 있다. 그림 10의 전기력 토크와 기계적 토크를 보여준다. 전기력 토크는 사고 발생 전 0.6 Nm 정도였고 이에 따라서

기계적 토크가 조속 장치에 의해서 주어졌다. 하지만 전기력 토크는 사고 발생 후 순간적으로 13Nm까지 높아진 후 2.5Nm에서 안정된다. 한류기를 설치하지 않았을 때 6Nm에 비하면 50%이상 감소한 것을 볼 수 있다. 또한 기계적 토크가 순간적으로 2.5Nm까지 낮아지는 것을 확인했다. 그림 11은 a상의 전류를 보여주고 있다. 정상상태에서 2A 정도의 전류가 흐르지만 사고가 발생한 후 약 4.5A까지 증가한다. 전류 또한 Circuit Break에 의해서 안정되기 전에 이미 제한된다. 발전기의 부하각의 이탈을 50%정도 막아주기 때문에 한류기가 설치 되어있는 경우 사고 전류를 줄여 줌으로 발전기의 안정도를 약 2배정도 확정시키는 것을 알 수 있다. 그리고, 그것을 초과하는 사고가 발생하였을 지라도 한류기를 통해서 충분히 그 사고를 막을 수 있는 것을 보여준다. 이러한 과정을 통해서 한류기가 발전 시스템의 stability(안정도)를 향상시키는 것을 관찰할 수 있다.

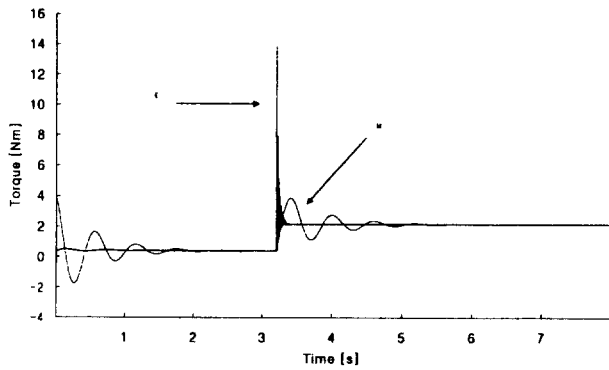


그림 10 한류기가 설치된 시스템의 3상 단락사고 시 전기 및 기계적 토크

Fig. 10 Electric and Mechanical Torque graph in case 3-phase fault of power system of SFCL

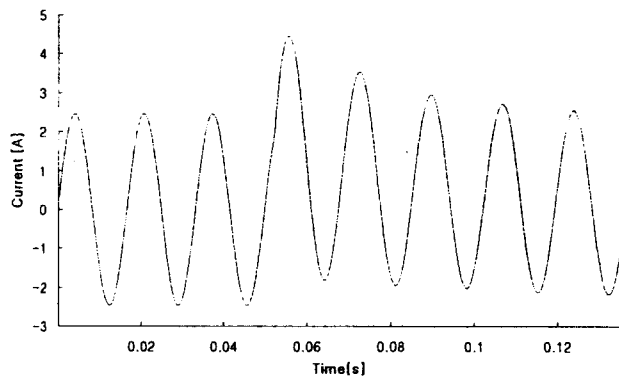


그림 11 한류기가 설치된 시스템의 3상 단락사고 시 a상 사고전류

Fig. 11 Current of A phase in case 3-phase fault of power system of SFCL

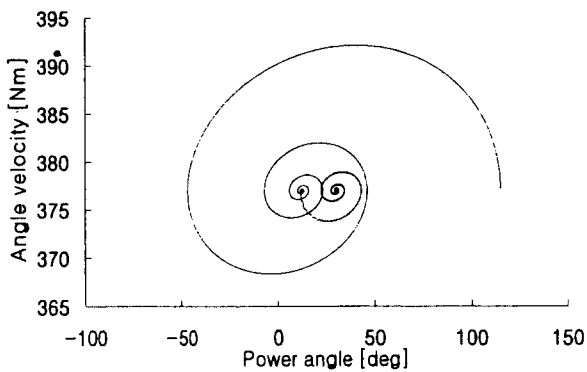


그림 12 한류기가 설치된 시스템의 1선 지락사고 시 부하 각에 따른 각속도

Fig. 12 Angle Velocity vs Power Angle graph in case line to ground fault of power system of SFCL

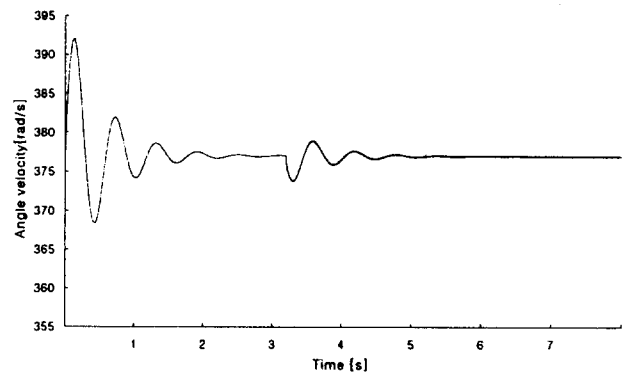


그림 13 한류기가 설치된 시스템의 1선 지락사고 시 각속도 그래프

Fig. 13 Angle Velocity graph in case line to ground fault of power system of SFCL

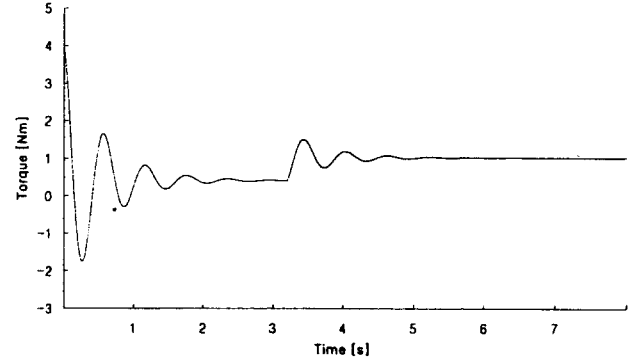


그림 14 한류기가 설치된 시스템의 1선 지락사고 시 기계적 토크

Fig. 14 Mechanical Torque graph in case line to ground fault of power system of SFCL

4.3 한류기가 설치된 계통의 1선 지락사고

그림 12-14는 1선 지락사고 각 요소의 파형을 보여준다. 1선 지락사고의 경우 위의 평형 되어진 상태와 전기력 토크에서 다른 양상을 보였다. 하지만 부하각의 변화가 별로 없다. 따라서 잘 설계된 계통의 경우 단상형 한류기를 이용하여 시스템에 큰 영향을 주지 않으면서 사고로부터 보호 할 수 있다.

4.4 계통 부하각 비교

그림 15는 실제 계통에서 가장 중요한 동기화의 정도를 알아보기 위해 각각의 부하각을 기준 전류와 함께 나타내었다. 위에서부터 한류기가 없는 계통의 3상 단락사고, 한류기가 설치된 계통의 3상 단락사고, 한류기가 설치된 계통의 1선 지락사고 그리고 기준 전류를 나타낸다. 그래프에 보이는 것처럼 한류기가 설치된 계통은 그것이 없는 것보다, 최소50%에서 최대 10%까지 동기기의 부하각 이탈을 막아주는 것을 관찰할 수 있다.

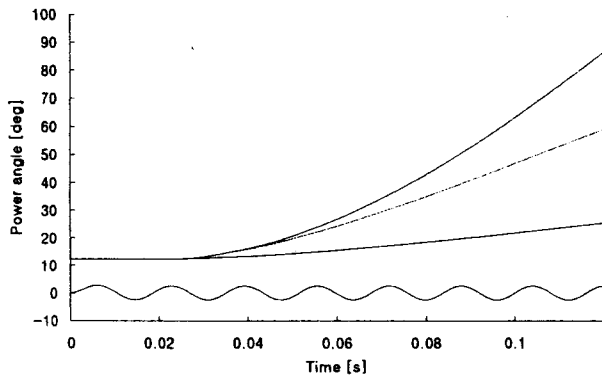


그림 15 각각의 경우에 따른 부하각 비교
Fig. 15 Comparison of power angle of each case

5. 결 론

이번 연구를 통해 고온 초전도 한류기가 전력 계통(특별히 동기 발전기)에 적용되었을 경우 사고 발생 시 큰 사고 전류를 제한하는 것과 동시에 발전기상의 동기화를 보호하는 것으로 나타났다. 한류기가 설치되어있는 계통의 경우 그것이 없는 것에 비해 완전지락과 단선자락 모두에서 동기화를 효과적으로 보호하는 것이 정량적으로 밝혀졌다. 따라서 현재까지 개념적으로만 알고있던 한류기의 전력 계통 보호 측면을 명확히 확인할 수 있었다. 즉 한류기의 목적은 사고 전류 제한을 통한 배전 계통의 보호에만 있지 않고, 발전설비 특히 동기 발전기의 stability를 높여 전체 계통의 원활한 운전을 돕는 다는 것이다. 따라서 이러한 것을 고려하여 한류기를 설계할 때, 사고가 발생하였을 때 한류기가 전류만을 제한하는 것이 아니라, 동기기의 동기 각 이탈을 최대한 막을 수 있는 최적의 조건의 설계 필요하다. 또한 발전기가 2기 이상 연결된 병렬운전 계통의 연구가 앞으로 필요하다.

※ 본 논문의 '98 하계 학술대회 우수 논문으로 추천되었음
※ 본 연구는 과학기술부의 지원으로 한국 전력공사와 공동으로 수행되었음 (97.12 - 현재)

참 고 문 헌

- [1] 고태국, "고온초전도한류기의 종류 및 전력이용", KCMAS conf. Vol.8, pp.35-40,1998
- [2] 고태국, "고온초전도 motor의 설계 및 제작에 관한 중간 보고서" 통산산업부, 1997년 4월
- [3] A. E. Fitzgerald, "Electric Machinery", pp.322-325, 1990
- [4] Benjamin C. Kuo, "Automatic control systems" 7th edition, 1995.
- [5] 이찬주, "고온초전도한류기에서의 초전도체에서의 저항변화" 연세대학교 전기공학과 석사학위논문 pp.1-2 1997년 8월
- [6] V. M. Vladimir, Vladimir L. Sokolovsky, M. slomin, Gennady E. Shter, and Gideon S. Grader, "Testing of an inductive current-limiting device based on High-Tc superconductors," IEEE

- Trans. Appl. Supercond. Vol. 3, pp.3033-3036 Sep. 1993.
- [8] Masato Murakami, "Novel Application of High Tc Bulk Superconductors", Applied Superconductivity Vol. 1, Nos 7-9, pp. 1157-1173, 1993

저 자 소 개



이 승 제 (李丞濟)

1974년 5월 30일생. 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기·컴퓨터 공학과 박사과정

Tel : (02) 361-2772
E-mail: sngje@hosanna.net

이 찬 주 (李燦周)

1972년 2월 20일생. 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기·컴퓨터 공학과 박사과정

Tel : (02) 361-2772
E-mail: superlab@bubble.yonsei.ac.kr

고 태 국 (高太國)

전기학회논문지 제48B권 4호 참조
Tel : (02) 361-2772
E-mail : tkko@bubble.yonsei.ac.kr