

고온 초전도 한류기가 설치된 전력 시스템의 안정도 해석

이승재, 이찬주, 이창열, 고태국
연세대학교 전기공학과

Stability Analysis of Power System Installed Superconducting Fault Currnt Limiter

Suengje Lee, Chanjoo Lee, Changyool Lee, Taekuk Ko
Dept. of E E Yonsei University

Abstract - The stability of Power system installed Hi-Tc Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) is analyzed as a process of developing SFCL. In interpretation, simple mimic system(only one motor) is assumed and then the circuit with SFCL in system is solved. In case the SFCL is installed in Power system, it protected synchronization more effectively both in symmetrical 3-phase fault and single phase line to ground fault.

1. 서 론

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 높은 전류를 막아준다는 개념만으로는, 한류기를 이용하면 전력 계통의 사고 용량이 커진다는 것만을 알고 있었다. 따라서 현재 개발된 한류기가 전력 계통에 적용되었을 경우 안정도 차원에서 어느 정도의 효과가 있는지 살펴보는 것이 필요하다. 여기서는 본연구실에서 개발된 동기기를 기초로 하여 발전기를 모델링하여, 한류기를 실제와 같은 발전계통에 설치하였을 경우, 안정도 측면에서 살펴보았다.

2. 본 론

실제 계통에서 안정도는 보통 삼상 발전기와 같은 Synchronous machine의 동기 상태가 부하의 변화에 따라 어떻게 되는가에 초점을 맞춘다. 고온 초전도 한류기가 실제 계통에 설치되었을 경우 사고 발생 시 동기발전기의 동기화를 어느 정도 보호하느냐가 한류기의 가장 큰 개발 목적이라고도 할 수 있다. 여기서는 Fig1과 같이 매우 단순화된 계통을 생각하였다. 즉 하나의 삼상 발전기의 각 상에 한류기를 직렬로 연결한 후 부하에 연결하였다.

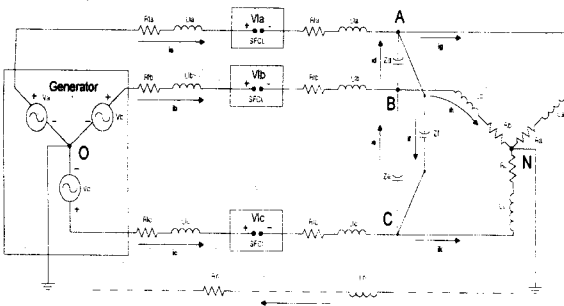


Fig 1 삼상 발전기와 한류기가 연결된 회로

2.1 System Modeling

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.

2.1.1 Generator Modeling

한류기를 설치할 모의 계통에는 용량이 3kw급이고 출력 전압이 약 220V(rms)인 삼상 동기발전기 1기를 사용하였다. 발전기를 모델링하기 위해서는 Steady state 형태로 표현된 일반적인 등가회로를 사용할 수 없다. 즉 기기의 물리적 특성에 따른 상태방정식을 이용하여 각각의 전압, 전류, 동기속도, Torque 그리고 Power Angle를 나타내었다. 특히 회로 방정식을 세우는데 사용된 발전기의 인덕턴스는 rotor의 pole을 salient 형태로 설정하였기 때문에 회전위치에 따라 flux(Λ)의 경로가 바뀌어 변한다. 식 2.1은 공극에서의 flux와 전류사이의 관계식 및 전압방정식이다.

$$V = R_i I + \frac{d\Lambda}{dt} + R_e I + L_{sfcl} \dot{I} \quad (2.1)$$

여기서 L_i 는 rotor와 stator의 self, mutual을 나타내고 R_i 는 내부 저항, L_{sfcl} 은 한류기에 의해 만들어지는 인덕턴스의 값이다. 또한 발전기의 기계적인 해석을 위해 운동방정식과 속도 제어를 위한 제어 방정식이 필요하다. 발전기의 운동 방정식은 식 2.2와 식 2.3이다.

$$\dot{\omega}_m = (\tau_m - \tau_e) / J \quad (2.2)$$

$$\dot{\theta} = \omega_m \quad (2.3)$$

$$\dot{\tau}_m = -K_p(\omega_m - \omega_0) - K_d \dot{\omega}_m \quad (2.4)$$

θ : rotor Angle ω_m : rotor Angle velocity

τ_e : electrical torque τ_m : mechanical torque

여기서 식 2.4는 발전기의 동기속도를 제어하는 조속기 상태방정식이며 PD controller 형태를 사용하였다. 위 식들을 Backward Euler Method를 사용해서 Simulation 하였다.

2.1.2 고온 초전도 한류기 Modeling

고온 초전도 한류기는 본 연구실에서 제작하고 있는 220V급 유도형 모델이다. 초전도 Bulk에 Quench가 발생하였을 경우, 최대 인덕턴스가 약 200mH 정도로 발생하는 것으로 설정하였다.

2.2 계통 해석

Simulation을 위한 전력계통에 포함되는 Line inductance를 2mH, Line resistance를 3 Ω , 정격 부하를 72 Ω 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 Simulation 하였다. 각각의 사고는 부하 저항을 순간적으로 Zero 상태로 변화시켜 발생 시켰다. 전

력 시스템의 고장 상태 해석에서 발전기가 받아들이는 Mechanical Torque, 전기력에 의한 Torque, Angle Velocity, Power Angle, 고장전류 등을 관찰하였다.

2.3 Simulation 결과

한류기가 설치되지 않은 계통의 완전지락사고와 한류기가 설치된 계통의 완전지락사고 그리고 한류기가 설치된 계통의 단선지락사고와 power angle를 살펴 보았다.

2.3.1 한류기가 설치되지 않은 계통의 완전지락사고
운전을 시작한 후 약 15° Power angle 동기 각 속도 120π 에서 안정된 후 사고 발생 후 이탈각도인 80° 을 넘어선 점에서 동기가 이탈한다.

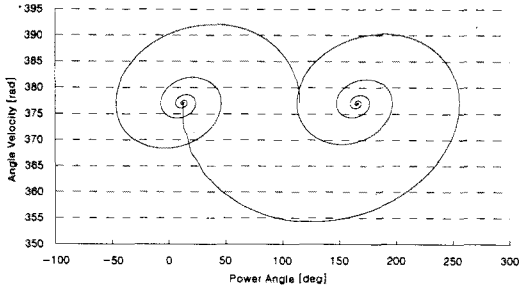


Fig 2 Angle Velocity vs Power Angle graph
in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

동기속도는 사고 발생 후 (350rad/s) 까지 떨어진다.

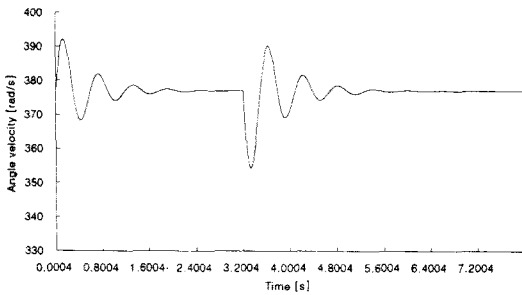


Fig 3 Angle Velocity graph
in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

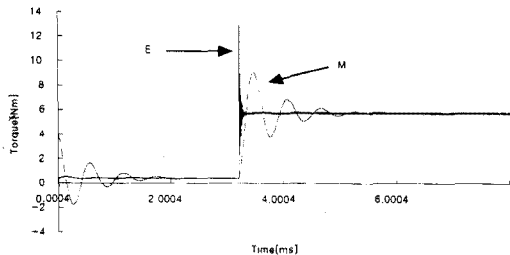


Fig 4 Electric and Mechanical Torque

Fig 4의 전기력 torque는 사고 발생 후 순간적으로 13Nm까지 높아진 후 6Nm에서 안정된다.

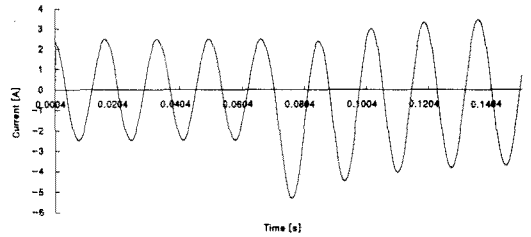


Fig 5 Current of A phase

in case 3-phase fault of power system of Non-SFCL

전류는 발전기의 출력 전력의 한계가 있기 때문에 큰 변화가 없지만 한류기를 작동 할 수 있다.

2.3.2 한류기가 설치된 계통의 완전지락사고
운전을 시작한 후 약 15° Power angle, 동기 각 속도 120π 에서 안정된 후 사고 발생 후 60° 정도에서 안정화되는 것을 볼 수 있다.

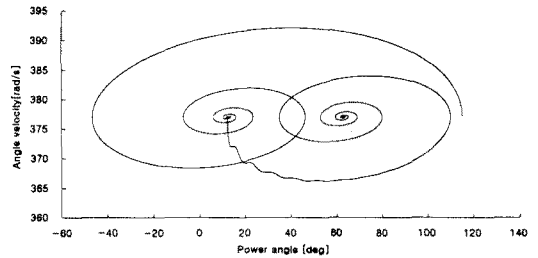


Fig 6 Angle Velocity vs Power Angle graph
in case 3-phase fault of power system of SFCL

동기속도는 사고 발생 후 366rad/s까지 떨어진다.

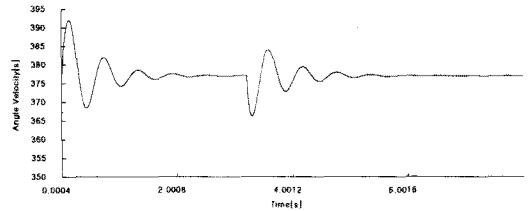


Fig 7 Angle Velocity graph

in case 3-phase fault of power system of SFCL

전기력 torque는 사고 발생 후 순간적으로 13Nm까지 높아진 후 6Nm에서 안정된다.

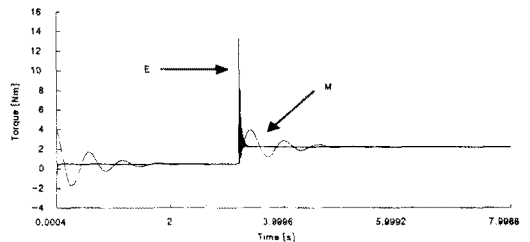


Fig 8 Electric and Mechanical Torque graph
in case 3-phase fault of power system of SFCL

전류는 한류기로 인해 4.5A 정도로 큰 변화가 없다.

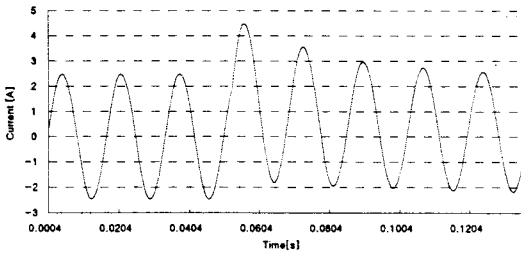


Fig 9 Current of A phase

in case 3-phase fault of power system of SFCL

한류기가 설치된 계통의 경우, 없는 경우에 비해 power angle이 절반정도 밖에 되지 않았다. 그리고 안정점 또한 사고이전에서 멀지 않았다.

2.3.3 한류기가 설치된 계통의 단선지락사고

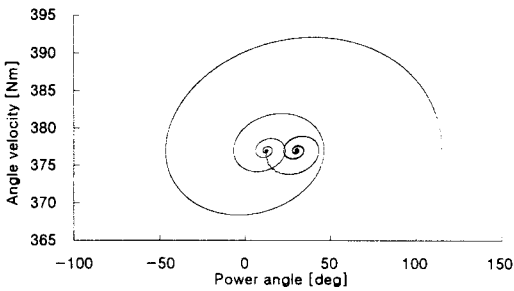


Fig 10 Angle Velocity vs Power Angle graph

in case line to ground fault of power system of SFCL

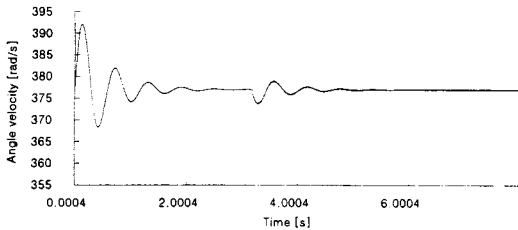


Fig 11 Angle Velocity graph

in case line to ground fault of power system of SFCL

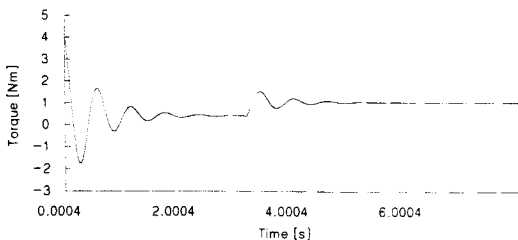


Fig 12 Mechanical Torque graph

in case line to ground fault of power system of SFCL

1선 지락사고의 경우 위의 balance되어진 상태와 전기력 Torque에서 다른 양상을 보인다. 하지만 power

angle의 변화가 별로 없다. 따라서 잘 설계된 계통의 경우 단상형 한류기를 이용하여 안정화시킬 수 있다.

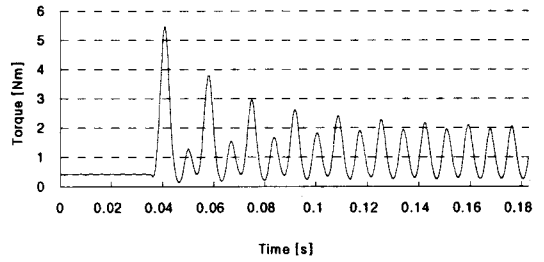


Fig 13 Electric Torque graph

in case line to ground fault of power system of SFCL

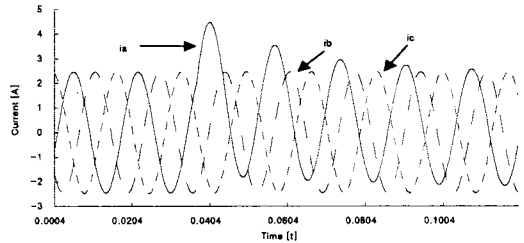


Fig 14 Current of all phase

in case line to ground fault of power system of SFCL

2.3.3 계통 부하각 비교

Fig 15는 실제 계통에서 가장 중요한 동기화의 정도를 알아보기 위해 각각의 power angle을 기준 전류와 함께 나타내었다.

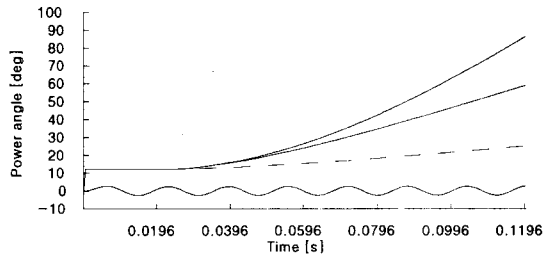


Fig 15 comparison of power angle of each case

3. 결 론

Simulation을 통해 고온 초전도 한류기가 전력 계통(특히 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 단선지락 모두에서 동기화를 효과적으로 보호하는 것을 수치적으로 찾아냈다. 여기서 관념적으로만 알고있는 한류기의 계통 보호의 또 다른 면을 발견할 수 있었다. 즉 한류기의 목적인 배전계통 보호는 전류 제한에만 있지 않다는 것이다. 이것을 염두에 둔 한류기 설계가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. E. Fitzgerald, "Electric Machinery", 1990