

## 위상동기회로(PLL)를 이용한 하이브리드 방식의 계통적용 한류기에 관한 연구

성병철\*, 박정욱\*  
연세대학교\*

### A study of Hybrid Fault Current Limiter Connected to Power Grid by Using Phase Locked Loop

Byung Chul Sung\*, Jung-Wook Park\*\*  
Yonsei University\*

**Abstract** - 초전도 소자만을 이용한 한류기는 여러 가지 해결해야 할 비용적, 기술적 문제를 안고 있다. 이런 문제들에 대한 해결과 동시에 초전도 한류기의 실용화를 위해 하이브리드 방식의 한류기가 고안되었으며 이는 초전도 소자만을 이용한 한류기가 갖고 있는 많은 문제점들을 해결할 수 있다고 판단되는 한류 방식이다.

본 논문은 기존의 하이브리드 방식의 한류기를 바탕으로 하여 Phase Locked Loop(PLL, 위상동기회로)를 이용한 하이브리드 방식의 초전도 한류기를 제시하였다. 일정한 선로 임피던스를 갖는 계통에서 사고가 발생할 경우 고장전류와 정상 상태의 전류 사이에 위상차가 발생하게 되는데, 이 위상차를 PLL의 위상 검출 능력을 통해 검출함으로써 한류기로서 동작할 수 있도록 하였다. 제시된 하이브리드 한류기의 성능은 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 통해 일기무한모션 시스템에 대한 적용을 통해 평가하였다.

### 1. 서 론

전력 수요와 분산 전원 투입의 꾸준한 증가로 인해 사고 시 발생하는 고장 전류의 크기는 계속해서 증가되고 있다. 이러한 고장 전류는 계통 전체에 악영향을 미치기 때문에 이에 대한 효과적인 대비책이 필요하였고, 이런 필요에 의해 많은 방법들이 고안 되었다. 현재 퓨즈를 이용하거나 변압기의 임피던스를 높이거나 모션 분리 등이 널리 이용되고 있다. 하지만 이미 사용되고 있는 방법들은 손실을 일으키거나 안정도를 해치는 등의 문제점을 갖고 있기 때문에 이를 극복할 수 있는 새로운 방법에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그 중에서도 고온 초전도체를 이용한 한류기가 많은 기대를 받고 있다.

지난 10년 동안 초전도 한류기에 대한 많은 연구와 개발이 이루어져 왔다. 그 중에서도 주로 초전도 소재의 특성을 직접 이용하는 형태로 연구가 이루어져 왔다. 즉 초전도 소재가 정상 상태일 때에는 저항이 0으로 손실 없이 전력을 공급하다가 사고가 발생할 경우 퀘칭에 의해 저항을 갖게 되는데, 이 저항을 이용하여 고장 전류의 크기를 줄이는 방식이었다. 하지만 비용적, 기술적 한계로 인해 실제 계통 적용을 위한 한류기의 제품 개발은 이루어지지 못하고 있으며, 초전도 소자 자체의 물리적 특성으로 인해 초전도 소자만으로 이루어진 한류기의 전력 계통 적용 시 기존의 보호 장비와의 협조 문제 등을 해결해야만 한다 [1], [2].

이에 비용적, 기술적 문제의 해결은 물론 계통 적용의 용이성을 통해 실용화의 가능성을 높일 수 있도록 선로 변경식 하이브리드 방식의 초전도 한류기가 제시되었다. 이는 초전도 소자를 최소한으로 제한하여 비용을 줄이면서도, 고속 스위치 모듈을 이용해 사고 발생 시 즉각적으로 고장 전류를 줄일 수 있도록 고안되었다. 즉, 정상 시에는 저항이 없는 초전도 소자를 통해 전력을 공급하다가 사고가 발생하면 고장전류가 구동코일로 흘러들어가 연동되어 있는 고속 스위치를 작동시켜 과전류를 일정한 부하로 흘려 과전류의 크기를 제한하게 된다.

또한 선로 변경식 하이브리드 방식의 한류기는 초전도 소자만으로 구성된 한류기보다 보호 협조가 용이하고, 초전도 소자의 사용을 줄이고 기존의 전력기기, 전력전자 소자들과의 조합을 통해 초전도 자체의 비용 및 초전도 상태의 유지를 위한 냉각 비용 역시 감소시켜 준다. 게다가 안정성 및 신뢰성에 있어서도 우수하다고 할 수 있다 [1].

이러한 하이브리드 방식을 바탕으로 하여, 일정한 선로 임피던스를 갖는 계통에서 사고가 발생할 경우 고장전류와 정상 상태의 전류 사이에 위상차가 발생한다는 점을 고려하여 Phase Locked Loop(PLL, 위상동기회로)를 이용하는 방안을 모색하여 보았으며, PSCAD/EMTDC를 통해 일기무한모션에서의 성능을 검토하였다.

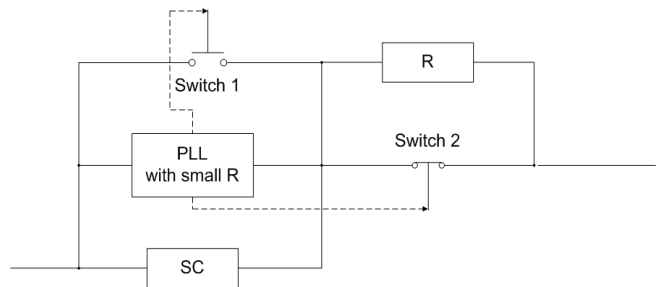
### 2. 본 론

#### 2.1 PLL을 이용한 하이브리드 한류기

그림 1은 PLL을 이용한 하이브리드 한류기의 간단한 형태를 보여주

고 있다. 기존의 하이브리드 한류기의 경우 초전도 소자가 퀘칭될 경우 그림 1의 PLL의 위치에 존재하고 있는 구동코일로 전류가 흐르게 되고 전류를 감지한 구동코일에 의해 고속스위치를 작동시키게 되는 것이다. 이로 인해 스위치 1은 닫히고, 스위치 2는 열리게 되어 고장전류는 직접 전류를 제한하기 위해 설치된 부하로 흘러들어가게 된다 [3], [4].

PLL을 이용한 하이브리드 한류기의 경우 기본적인 동작 흐름은 기존의 하이브리드 한류기와 유사하다고 할 수 있다. 하지만 스위치의 작동을 유발하는 요소로서 PLL을 통해 감지한 위상과 정상상태의 위상차를 이용하고 있는 것이다. 사고 발생 이후 정상 전류와 사고 전류 간에 위상차가 존재하게 되는데, 이는 사고 저항에 의해 선로 임피던스가 변하게 됨으로써 발생하는 것으로 PLL을 통해 이 위상차를 감지함으로써 한류기로서 작동할 수 있도록 고안되었다. 즉, 정상 시에는 저항이 0인 초전도 소자를 통해 전류가 흐르다가 사고로 인해 과전류가 발생하게 되면 초전도 소자의 퀘칭에 의해 PLL이 설치된 선로로 전류가 흐르게 된다. PLL을 통해 관찰한 위상이 정상 상태의 위상과 차이를 보이면 스위치1을 닫고, 스위치 2를 열어서 전류가 한류 저항 R로 흐르게 하여 전류를 제한하게 하는 것이다.



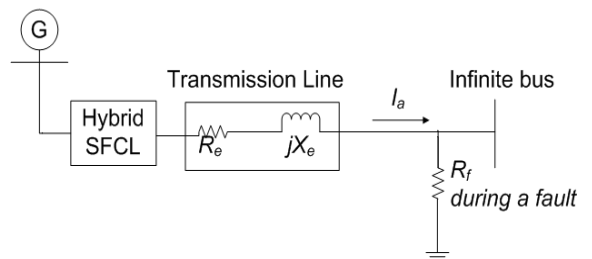
<그림 1> PLL을 이용한 하이브리드 한류기

#### 2.2 성능평가 및 고찰

##### 2.2.1 시스템 구성

그림 2는 앞에서 제시된 하이브리드 한류기의 성능을 평가하기 위해 주어진 시스템을 보여주고 있다. 이 시스템에 대하여 3상 지락 사고가 1초에 발생하여 0.1초 동안 지속된다고 가정하였고 지락 사고 발생 시 선로와 접지 사이에 미세한 사고 저항  $R_f$ 가 발생한다고 보았다.

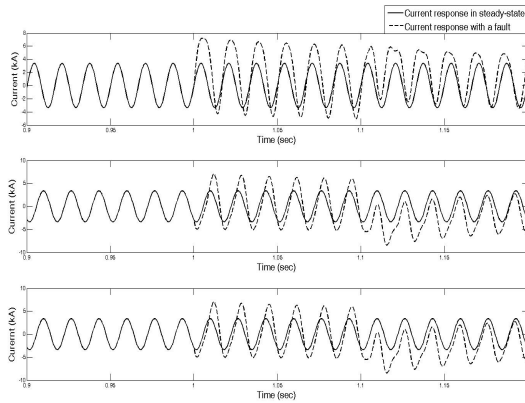
Synchronous machine



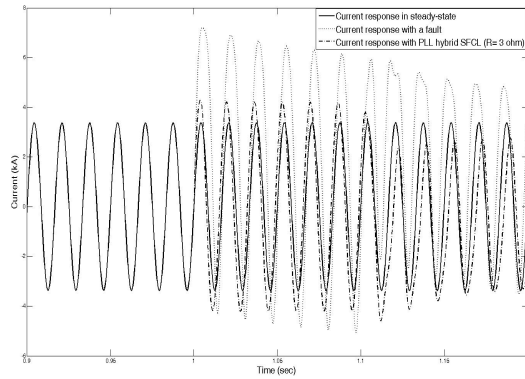
<그림 2> 일기무한모션 시스템

그림 3은 제시된 하이브리드 한류기가 시스템에 적용되지 않았을 경우 일기무한모션 시스템의 각 상에 대한 전류 응답을 보여주고 있다. 그림 3에서 볼 때, a, b, c 상 모두 사고가 발생한 직후부터 정상 전류와 사고 전류 간에 위상차가 존재하게 된다. 따라서 이 위상차를 감지하기

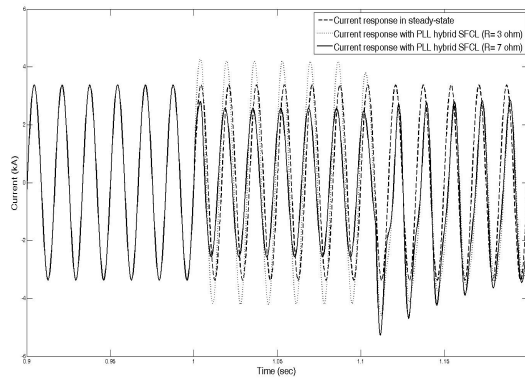
위한 PLL을 적용이 가능하다고 보았고 선로 변경식 하이브리드 한류기에 PLL을 이용함으로써 효율적으로 전류를 제한할 수 있을 것으로 판단하였다.



〈그림 3〉 한류기가 적용되지 않았을 시 각 상의 전류응답



〈그림 4〉 한류기 적용 시 a-상 전류응답 비교(한류 저항 R=3Ω)



〈그림 5〉 한류기 적용 시 a-상 전류응답 비교(한류 저항 R=3Ω, 7Ω)

### 2.2.2 성능 평가를 위한 시뮬레이션

성능 평가를 위해 그림 2의 시스템을 PSCAD/EMTDC로 구성하여 PLL을 이용한 하이브리드 한류기를 투입하였다. 이 경우 PLL은 초전도 소자가 켜치되어 전류가 PLL로 흐르게 되는 경우에만 작동하고, 초전도 소자가 저항이 0인 상태로 돌아갈 경우 모든 전류가 초전도 소자로 흐르게 되기 때문에 PLL이 작동을 하지 않는다고 설정하였다. PLL을 통해 정상 상태의 위상과 비교하여 차이가 감지될 시 바로 두 스위치를 작동하도록 하였고, 이후 PLL 상에 아무것도 감지되지 않을 때에는 스위치가 원래의 상태로 돌아가도록 하였다. 또한 PLL을 적용한 선로에 대해서는 0.001Ω의 매우 작은 저항을 연결하여 정상 상태일 경우에 모든 전류가 저항이 0인 초전도 소자를 통해 흐르도록 하였다. 마지막으로 한류 저항 R은 3Ω으로 설정하였고, 사고는 앞의 경우와 마찬가지로 3상 지락 사고가 1초에 발생하여 0.1초 동안 지속된 경우를 상정하였다.

또한 한류 저항 R에 대하여 그 크기가 고장 전류를 줄이고 전류의 상태에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 3Ω과 7Ω으로 각각 설정하여 평가를 진행하였다.

그림 4는 한류 저항을 3Ω으로 설정하여 PLL을 이용한 하이브리드 한류기를 적용하였을 경우의 a-상 전류 응답을 보여주고 있다. PLL을 이용한 하이브리드 한류기를 적용하였을 경우, 그렇지 않은 경우와 비교하여 볼 때 고장전류의 크기가 크게 줄어들었다. 사고 발생 시 제시된 하이브리드 한류기가 적용되지 않은 경우의 고장 전류는 첫 번째 피크에서는 7.3kA인 것에 비해 한류기가 적용되었을 경우 첫 번째 피크의 고장전류는 4.28kA로 58.6% 수준으로 줄어들었다. 또한 전류의 안정도 측면에서도 하이브리드 한류기가 적용되지 않은 경우에 비해 한류기를 적용한 경우가 훨씬 빠르게 정상 전류로 안정화되어 가는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 이전의 시뮬레이션과는 달리 한류 저항 값을 7Ω으로 설정하고 이 외의 조건은 모두 동일하게 설정하였다. 이 경우 고장 전류의 크기가 지나치게 감소하였고 이로 인해 다른 보호 장비가 고장을 인식하지 못할 경우가 발생할 수 있으므로 보호 협조 측면에서 문제를 갖게 된다. 또한 전류가 정상 전류로 수렴하는 것 역시 3Ω으로 설정했을 경우 보다 늦어지는 것을 확인할 수 있었다.

결국 전류의 감소율은 전류를 제한하기 위해 투입하는 한류 저항의 크기에 의해 결정되며, 저항을 크게 할수록 고장 전류의 값은 줄어들게 된다. 하지만 어느 수준을 넘어서면 고장 전류를 크게 줄일 수는 있지만 오히려 전류의 변화가 심해져 안정도를 해칠 수 있고 다른 보호 장비와의 협조에 문제가 발생할 수 있기 때문에 적절한 값을 설정하여 투입할 필요가 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 선로 변경식 하이브리드 한류기에 PLL을 적용하여 정상 전류와 사고 전류 사이의 위상차를 감지하여 작동하는 방식을 제안하였다.

제안된 하이브리드 한류기는 기존의 하이브리드 한류기와 마찬가지로 매우 신속한 동작이 가능하였으며 매우 효율적으로 고장 전류를 줄여주는 것을 PSCAD/EMTDC를 통한 평가로 확인하였다.

실제로 고장 전류를 제한하는 성능은 한류기에 투입되어 있는 한류 저항에 달려 있다고 볼 수 있으며 이 한류 저항의 크기에 따라 성능이 달라진다는 것도 확인하였다. 하지만 한류 저항의 크기를 결정하는데 있어서 이 값에 따른 계통의 안정도나 설치 비용, 그리고 다른 보호 장비와의 보호 협조를 고려하여 정해야 하는 것 역시 중요하다고 할 수 있다. 앞서도 말했듯이 설정 값이 지나치게 크게 되면 보호 협조는 물론 안정도에도 문제가 생길 수 있기 때문이다.

향후 하이브리드 한류기 내의 PLL을 위상 검출 뿐만 아니라 전류의 위상차를 보상하기 위해서 이용하는 것 역시 기대하고 있다.

### [감사의 글]

본 연구는 지식경제부 대학전력연구센터의 에너지자원 고급 인력양성 사업을 통한 연세대학교 계통적용 신전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이방욱, 박권배, 심정욱, 오일성, 임성우, 김해림, 현옥배, “하이브리드 방식은 적용한 배전급 초전도 한류기 개발”, 대한전기학회 하계학술대회, p.102-103, 2007
- [2] Mathias Noe, Michael Strurer, “High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status”, Supercond. Sci. Technol., 20R15-29, 2007
- [3] 박권배, 이방욱, “일체형 고속 스위치 모듈을 구비한 반파 비한류형 초전도한류기”, 대한민국특허청 10-0802312, 2008
- [4] Guan-Shyun Hsieh, James C. Hung, “Phase-Locked Loop Techniques-A Survey”, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.43, No.6, 1996