

사이리스터 PWM 컨버터를 이용한 초전도자기에너지저장장치의 전력변환기

한병문, 백승택, 이경빈
 myongji.ac.kr 저기적부제(국학한브

Power Conditioning System for SMES Using Thyristor PWM Converter

Byung-Moon Han, Seung-Taek Beak, Kyung-Bin Lee
 Myongji University

Abstract - This paper proposes a new power conditioning system for the SMES composed of a thyristor PWM converter with a resonant commutation circuit. The operation of the proposed system and the dynamic interaction between SMES and the power system is analyzed by a theoretical approach with equivalent circuits and verified by computer simulations with EMTP, considering a typical 154kV power system. The proposed system can provide a solution for the power factor regulation and harmonic level reduction in the ac terminal with low-cost system configuration.

$$C_f = \frac{E}{E_{max}} = \left(\frac{I_d}{I_{max}} \right)^2 \quad (1)$$

$$L_f = \frac{I_d \cdot V_d}{P_{max}} \quad (2)$$

- 여기서, E : 저장에너지
 E_{max} : 최대저장에너지
 I_d : 코일전류
 I_{max} : 코일최대전류
 V_d : 코일전압
 P_{max} : 코일최대출력

1. 서 론

초전도자기에너지저장장치가 나오기까지 초기에는 위상제어 사이리스터 컨버터가 전력변환기로 제안되었으나 코일전류의 레벨이 낮을 경우 교류 측에서 무효전력을 소모하는 단점을 갖는다.[1] 80년대 후반에는 대용량 GTO가 개발되면서 이를 이용한 전류원 컨버터가 전력변환기로 제안되었는데, 이들 컨버터는 다중펄스 모드 또는 PWM 모드로 동작한다.[2] 그러나 이들 컨버터의 경우 하드스위칭에 따른 스위칭손실이 너무 커 대용량의 경우 경제성 문제가 대두되었다. 그 후 GTO를 이용한 대용량 전압원 컨버터가 개발되면서 여기에 2상한초과를 결합한 전력변환기가 제안되었는데 이 변환기의 경우 전력계통의 요구를 완벽하게 충족하는 장점을 가지나 2중 스위칭에 따른 손실이 크고 컨버터의 비용이 높은 단점을 갖는다.[3]

본 논문에서는 1MWh급 SMES용 전력변환기의 새로운 시스템 구성과 기본모듈로 사이리스터브리지 직류단에 커패시션 공진회로를 부착하여 PWM 모드로 동작하는 전류원인버터를 제안한다[4]. 제안하는 전류원인버터의 동작을 분석 및 검증할 목적으로 EMTP에 의한 시뮬레이션을 실시한다. 또한 1MWh급 SMES가 154kV 전력계통과 연계되어 동작할 때의 동적 특성을 분석하고 그 결과를 기술한다.

2. 본 론

2.1 SMES 요구도 분석

본 연구에서는 1MWh 저장용량을 갖고 10MW의 전력을 저장 또는 방출 가능한 SMES 시스템을 기준으로 코일의 전류용량 및 유기전압을 도출하고 전력변환기의 개념설계를 실시한다. 코일의 인덕턴스는 12H로 하고 최대전류는 25kA 이고 최소전류는 5kA로 설정하였다. 따라서 코일의 유기전압은 400V에서 2000V까지 변한다.

코일의 전기적 특성을 효과적으로 설명하기 위해 코일의 충전상태와 부하분담을 단위화하여 표현한 충전계수와 부하계수를 다음과 같이 정의한다.

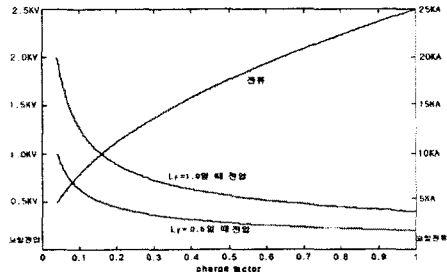


그림 1. 충전계수에 따른 초전도 코일의 전류와 전압

그림 1은 초전도코일의 전류와 전압이 충전계수에 따라 어떻게 변하는가를 부하계수 50%와 100%에 대해서도 시한 것이다.

한편 전력변환기는 코일전류 25kA와 유기전압 2000V 상태에서 동작하여야 한다. 코일의 유기전압은 사이리스터 단일소자의 내압으로 충분하나 코일의 최대전류는 단일소자의 정격을 10배 가량 초과한다. 따라서 본 논문에서는 그림 2에 보인 바와 같이 1MW 용량 인버터모듈 10기를 병렬로 연결하여 구성한다. 각 인버터모듈은 공진형 사이리스터 PWM 컨버터로 구성하는 것을 제안한다.

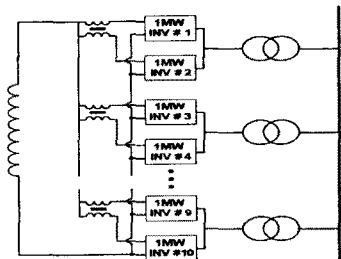


그림 2. 10MW 용량 SMES 구성도

인버터모듈이 PWM으로 동작하면 변조계수와 점도각을

독립적으로 제어하여 역률보상이 가능하다.

그러나 본 연구에서는 저 변조계수 시 발생하는 교류 전류의 고조파 증가를 방지하기 위해 2개의 인버터모듈이 1쌍을 이루어 상, 하단모듈의 변조계수는 고정하고 상이한 점호각으로 동작시켜 역률을 보상한다. 이때 각 모듈은 코일전류의 균등분담을 위해 직류단에 자기결합 리액터를 통해 연결한다.

2.2 싸이리스터 PWM 인버터

그림 3은 편의상 인버터모듈 하나의 기본구성을 나타낸 것인데 싸이리스터 브리지의 직류단에 커패시션을 위한 공진회로가 병렬로 부착된 구조를 갖고 있다. 싸이리스터 브리지는 위상제어 정류기와 동일한 구조이고 커패시션회로는 LC공진회로와 이에 병렬로 연결된 싸이리스터 T_7 과 직렬로 연결된 T_8 으로 구성되어 있다.

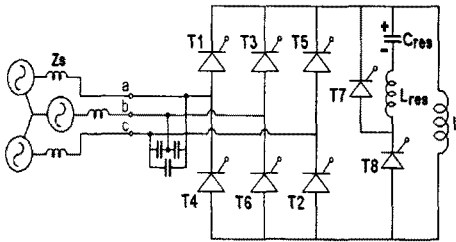
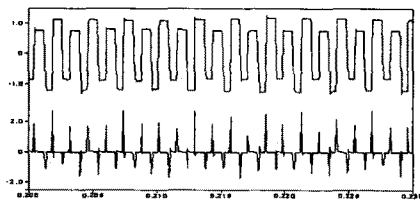
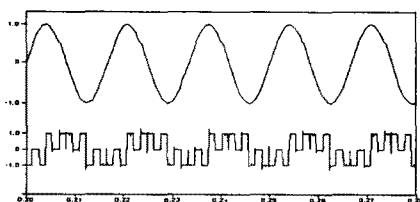


그림 3. 싸이리스터 PWM 인버터

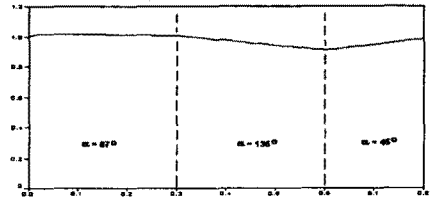
제안하는 인버터모듈의 동작을 검증할 목적으로 EMTP를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 1MW 인버터모듈 한기를 가정하고 코일전류도 하나의 모듈이 분담하는 2.5kA로 가정하였다. 그림 4(a)는 공진캐패시터에 걸리는 전압과 흐르는 전류를 나타낸 것이다. 그림 4(b)는 초전도코일을 일정시간 충전하다가 갑자기 방전할 때의 교류전압과 전류의 A상 파형을 나타낸 것이다. 전압에 대한 전류의 위상이 진상 또는 지상으로 적절히 천이 함을 알 수 있다. 그림 4(c)는 충전방전 시 초전도코일의 전류변화를 나타낸 것이다. 예측한 대로 코일전류는 방전시 계통으로부터 에너지를 방출하여 하강하고 충전시 계통으로부터 에너지를 흡수하여 상승함을 알 수 있다.



(a) 공진캐패시터 전압과 전류



(b) 모선 전압과 전류의 파형



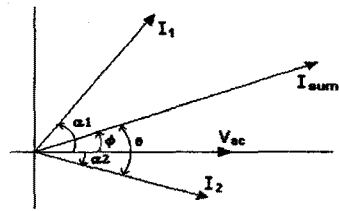
(c) 직류리액터의 전류변화

그림 4. 시뮬레이션 파형

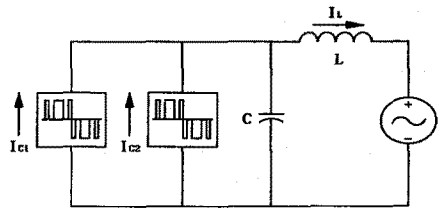
2.3 계통응동분석

한쌍의 전류원인버터로 무효전력을 제어하는 원리는 그림 5(a)의 페이스도에 의해 설명 가능하다. 이 그림에서 전류 I_1 과 I_2 는 한쌍의 인버터를 구성하는 각 모듈의 교류전류를 나타내며, 각 α_1 과 α_2 는 교류모션전압에 대한 각 전류의 상대적인 위상각을 나타낸다. I_{sum} 은 전류 I_1 과 I_2 의 벡터 합으로 한쌍의 인버터가 갖는 교류전류를 나타낸다. 코일 전류가 대단히 클 경우, I_{sum} 이 코일 전류보다 적도록 하면 변압기의 용량을 감소시킬 수 있음으로 점호각 증가가 가능하다. 따라서 과다한 코일 전류는 인버터 내에서 환류함으로써 변압기 용량의 감소가 가능하다. 변압기의 용량은 코일전류의 최대치로 결정되는 것이 아니고 필요한 출력 수준에 의해 정해진다.

제안하는 전력변환기와 교류계통과의 동적응동은 그림 5(b)의 단상 등가회로에 의해 해석 가능하다.



(a) 전류전압 페이스도



(b) 단상등가회로

그림 5. 응동해석 페이스도 및 등가회로

이 모델에서 전류 I_{c1} 과 I_{c2} 는 각 전류원 인버터가 생성하는 전류를 나타내며, 2개의 전류원은 출력의 크기는 동일하나 교류 전압에 대한 상대 위상이 다르다. 캐패시터 C 는 인버터 교류단에 연결된 필터 캐패시터이고, 인덕터 L 은 변압기의 누설 인덕턴스를 나타낸다.

2.4 계통응동 시뮬레이션

초전도 코일과 전력회로의 동적응동을 분석하기 위한 SMES를 포함한 전체 전력계통의 시뮬레이션 모델은 그림 6에 보인 것과 같다. 10MW 전력용량을 갖는 전력변환기가 25kA의 전류를 갖는 초전도 코일과

154kV의 교류모선에 연결된 것을 가상하였다. 전력변환기는 앞에서 설명한 10기의 1MW 인버터모듈 대신 편의상 5MW 컨버터모듈 2기로 가정하였다. 연계된 교류 전력계통은 단락비 (short circuit ratio)가 10인 테브난의 등가회로로 표시 하였으며, 부하는 역률이 0.8이고 용량은 가변으로 하였다.

시뮬레이션은 SMES가 부하에 전력을 공급 할 경우를 가상하여 전체계통이 과도 상태에서 적절히 동작하는가를 확인 하였다.

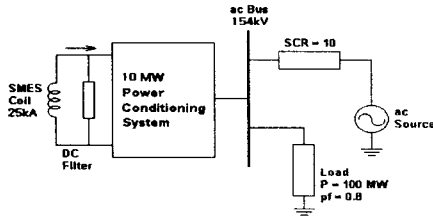
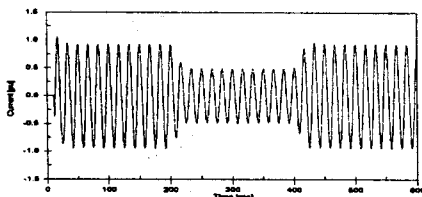
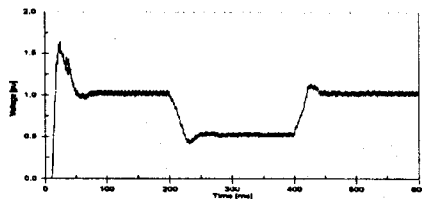


그림 6. 시뮬레이션 회로의 구성

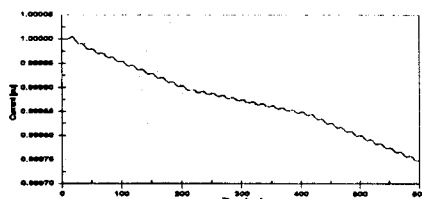
코일전류는 0-12ms 동안 인버터브리지의 상하단 싸이리스터를 통하여 free-wheeling 상태에 있다가 12ms 에서 커뮤테이션회로가 동작하면서 브리지가 PWM으로 동작하여 교류회로에 전력공급을 시작 한다. 부하는 초기 용량이 10MW이고 14ms 에서 회로에 연결되고, 200ms 에서 갑자기 5MW로 감소하여 400ms 에서 다시 10MW로 환원되는 것으로 하였다. 단 역률은 0.8의 일정한 값을 유지하는 것으로 가정하였다.



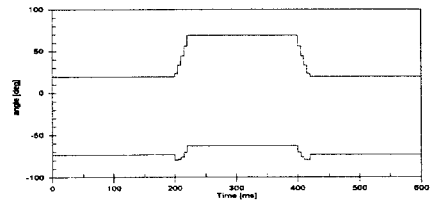
(a) A상 전류



(b) 코일전압



(c) 코일전류



(d) 상하단 모듈 점화각

그림 7. 부하변동에 대한 응답 분석

그림7(a)는 부하가 10MW에서 5MW로 변할 때 교류 측 A상 전류가 어떻게 변하는가를 나타내고 있다. 예측한 대로 부하변동 구간에서는 전압은 일정하고 전류가 1/2로 하강하는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 코일 전압의 변화를 나타낸 것인데, 초기 기동시 20% 이하의 낮은 과도 전압을 나타내며, 순간 부하변동에 대해서는 무시 할 수 있을 정도의 과도 전압만 발생한다. 따라서 이들 과도전압은 코일의 절연상태에 위험을 초래하지는 않는다. 그림 7(c)는 코일전류가 부하변동에 따라 어떻게 변하는가를 나타내고 있다. 출력이 감소함과 동시에 코일전류가 완만히 바뀜을 알 수 있다. 그림 7(d)는 상하단 인버터모듈의 점화각 변동을 나타낸 것이다. 상단모듈은 지상으로 동작하고 하단모듈은 진상으로 동작함을 알 수 있다. 그러나 합성전류의 방향은 부하변동 전에는 진상모드로 변동 후에는 지상모드로 동작함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력계통에 응용 가능한 1MWh급 SMES의 새로운 전력변환기를 제안하였다. 제안하는 전력변환기는 10기의 1MW 인버터모듈을 병렬로 결합되어 있음으로 1MW 기본모듈의 회로구성은 3상 싸이리스터 브리지에 커뮤테이션 회로를 부착한 구조로 PWM으로 동작한다. 제안하는 전력변환기의 동적응동을 체계적으로 분석하기 위해 EMTP에 의한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 제안하는 전력변환기가 전력계통용 SMES에 효과적으로 사용 가능함을 입증하였다.

제안하는 시스템은 하드스위칭 전력변환기에 비해 비용이 저렴하고 스위칭소자의 직렬운용이 용이하여 전력계통에 적합한 동작전압을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] H.Peterson, N.Mohan and R.Boom, "Superconductive Magnetic Energy Storage Inductor-Converter Units for Power Systems," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 4, July/August 1975, pp. 1337-1348.
- [2] T.Ise, J.Skiles, R.Kustom, and J.Wang, "Circuit Configuration of the GTO Converter for Superconducting Electric Energy Storage," Conf. Record, IEEE 19th Power Electronics Specialist Conference (PESC '88), Kyoto, Japan, April 11-14, 1988, pp. 108-115.
- [3] R.Lasseter and S.Jalali, "Power Conditioning System for Superconductive Magnetic Energy Storage," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, September, 1991, pp.381-387.
- [4] B.M.Han, S.I.Moon, J.K.Park, G.G.Karady, "Static Synchronous Compensator using Thyristor PWM Current Source Inverter", accepted for IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, October, 2000.