

25KJ 초전도 에너지 저장장치의 전력 제어와 발생하는 전류고조파 분석

이 승 원
(서울 대학교)

임 주 일, 권 태 원, 홍 원 표
(한 전 기술 연구원)

Power control by 25KJ Superconducting Magnetic Energy Storage and Current Harmonic Analysis of AC Source

Lee Sung Won
(Seoul National Univ.)

Lim Ju Il , Kwon Tae Won , Hong Won Pyo
(KEPCO Research Center)

1. 서 론

매년 높아가는 전력수요의 심야 및 계절의 변동은 전력계통의 부하율을 저하시키고 운용의 경제성으로 볼 때 바람직하지 못하다. 그래서 이 부하율 저감을 경감하기 위해서는 전력의 저장기능이 필요하게 되고 현재는 양수발전소가 기능을 담당하고 있다. 한편, 근년에 초전도 기술의 진보로 저손실 대전류를 흘려서 전력을 저장할수 있는 초전도 마그네트 실험이 검토되고 있다. 이것은 전기에너지를 자기 에너지로 저장하는 초전도 에너지 저장장치다. 이 장치를 교류계통에 설치 교직 변환기 사이리스타 변환 장치를 이용하면 양수발전에 비교하여 변환효율이 높을뿐만 아니라 유효, 무효전력까지도 조정이 가능하기 때문에 응용성이 우수한 전력저장으로 평가되고 있어 계통 안정도 향상용도 검토되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 변환기 2 대를 직렬로 접속하여 구성한 SMES 시스템의 유효, 무효전력 동시 제어 할수 있는 제어기를 제작하여, 전력의 총방전 실험을 행하고 특히 동시제어 영역이 불가능한 경우 유효전력을 우선 제어하여 SMES의 제어 유용성을 높였다. 이 실험을 통하여 장치의 기본적인 에너지의 흡수 방출 특성을 확인하였고 또 실험계통 적용시 중요한 문제가 될 교류측에 발생하는 전류고조파 분석과 약간의 실험을 실시하였다.

2. SMES 제어 이론 및 관련방정식 고찰

3상 브리지 전력변환기 2 대를 직렬로 연결한 SMES의 기본 구성도를 그림 1에 표시한다. 이 장치에 교류 계통에서 유입하는 유효전력과 무효전력은 다음식으로 표시된다.

$$P = I_d \cdot E_{do} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad \dots \dots (1)$$

$$Q = I_d \cdot E_{do} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad \dots \dots (2)$$

$$\cos \theta_i = \cos \alpha_i - \frac{3X_c \cdot I_d}{\pi E_{do}} \quad \dots \dots (3)$$

$$5^\circ \leq \alpha_i \leq 15^\circ \quad (i = 1, 2) \quad \dots \dots (4)$$

여기서 I_d : 직류축전류, E_{do} : 점호각 '0'일때 무부하시 직류전압 (변환기 1대), X_c : 전류리액턴스 α_i : 사이리스타의 점호각이다. ($i = 1, 2$)

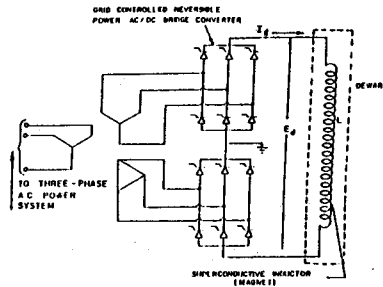


그림 1. SMES의 기본 구성도

초전도 코일에 전류 I_d 가 흐르고 있을때 전력변환기 시스템에 흡방출 가능한 P와 Q의 범위는 그림 2의 3개의 반원으로 나타낼수 있으며 (1) - (2) 식과 제어방법을 가지고 식을 유도할수 있다. 그림 2의 빗금친 부분은 유효 무효전력 동시제어 가능 영역으로 특히 영역 C는 SMES I_d 에서 I_{d0} 로 줄어드는 경우 동시영역은 SMES 전류에 의하여 크게 영향을 받음을 알수 있다.

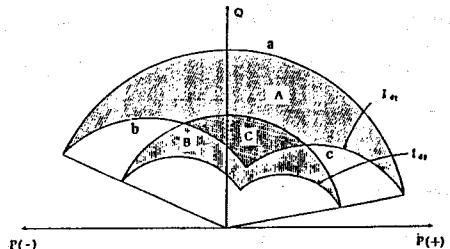


그림 2. P-Q 동시제어 가능 영역

유효, 무효전력을 동시제어 하기 위해서는 기본적으로 (1) - (2)식을 풀어서 변환기의 점호각 α_1, α_2 를 결정한다. α_1, α_2 가 항상 존재하면 (1)과 (2)

식은 다음과 같은 최적화 문제로 쓸 수 있다.

$$|P_s - I_d E_{do} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)|$$

에 대하여 최소화 (1)'

$$|Q_s - I_d E_{do} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)|$$

에 대하여 최소화 (2)'

제약조건 (3)식과 (4)식

여기서 P_B : 유효전력의 설정치, Q_B : 무효전력의 설정치이다. (1)', (2)' 양식이 동시에 최대가 값개 α_1, α_2 가 결정될 수 있을 때 P-Q 동시제어가 가능하다고 할 수 있다.

3. 전력제어기의 설계

3.1 P 우선 제어

전압의 고잡을 기초로 하여 그림 3과 같은 제어계를 구성한다. 여기서 G_2 는 점조각 α_1, α_2 를 결정하는 제어연산 블록이다. P-Q 동시제어가 가능하지 않는 경우를 고려하여 SMES 유효이용뿐만 아니라 전력계통 무효전력 제어에도 바람직 하기 때문에 P를 설정치에 추종하도록 하고 Q는 중속적으로 결정 되어진 값을 취한다. 즉,

$$|Q_r - I_d E_{do} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)|$$

α_1, α_2 에 대하여 최소화

제약조건 : $P_r = I_d \cdot E_{do} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$

(3)과 (4)식으로 P를 우선적으로 설정치에 추종하게 하는 것이다.

G_2 가 행하는 실제의 계산은 G_2 에 주어진 P_r 및 Q_r 이 그 점의 I_d 에 의존하는 P-Q 동시제어 가능 영역에 있는가 여부를 판정하여 (1) - (2)식을 변형하여 얻은 다음식에 의하여 점조각 α_1, α_2 를 결정한다.

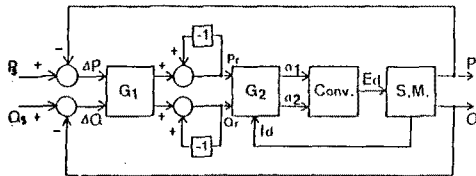


그림 3. 제어계의 구성

유효전력 제어 모드에서 P_d, Q_d 가 정해지고 E_d 가 I_d 가 피드백 되어 주어졌을 때 점조각 α_1, α_2 는 식 (5) 와 (6) 으로 구해진다.

$$\cos \alpha_1 = \left\{ \frac{P_d}{I_d} + \frac{6}{\pi} X_c \cdot I_d + \frac{Q_d}{I_d} \cdot \left[\frac{(Z E_{do} \cdot I_d)^2}{P_d^2 + Q_d^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} / (Z \cdot E_{do}) \quad - (5)$$

$$\cos \alpha_2 = \left\{ \frac{P_d}{I_d} + \frac{6}{\pi} X_c \cdot I_d - \frac{Q_d}{I_d} \cdot \left[\frac{(Z E_{do} \cdot I_d)^2}{P_d^2 + Q_d^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} / (Z \cdot E_{do}) \quad - (6)$$

그림 4는 "P 제어 우선 모드 수행" 부분의 흐름도

이다.

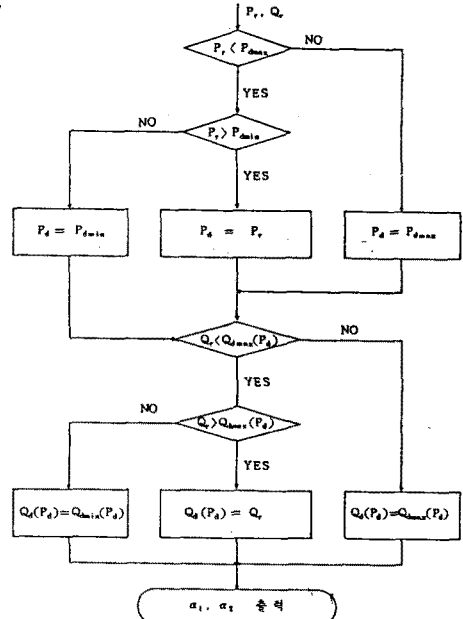


그림 4. "P control mode 수행" 흐름도

3.2 폐 제어 루프계의 설계 및 시뮬레이션

그림 3에 표시한 G_1 은 G_2 와 SMES 를 통합하여 하나의 제어대상으로 생략한다. 이 제어계의 P 와 Q 루프에 있어서 G 의 이득은 완전히 독립적 조정이 가능하며 이 루프들은 (7)식과 같은 제어요소가 포함 되어 있다.

$$\frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{e^{-s\tau}}{1 + T_1 s} \quad \dots \dots \dots - (7)$$

여기서, T : 샘플 타임, T_1 : 전력트랜스 듀사의 시정수, τ : dead time 이다. (7)식의 전달함수는 비교적 단순하고 이 파라메타도 크게 변동하는 것이 아니기 때문에 G_1 의 구체적 형태로는 적분 동작을 주제로 하는 다음과 같은 속도형 PI 보상의 식을 이용했다.

$$\Delta P(s) = K_p (P(s) - 1) + K_I (P(s) - 1) \quad - (8)$$

$$\Delta Q(s) = K_p (Q(s) - 1) + K_I (Q(s) - 1) \quad - (9)$$

여기서 K_p 와 K_I 를 이득으로 (7)식과 (8)식을 스텝 함수를 인가하여 시뮬레이션을 행할때 출력의 과도 응답의 시스템 안정화 관점에서 응답속도가 빠른 값을 선택하였다. 25KJ SMES 를 대상으로 설계한 제어계의 응답특성의 모의에 이용한 식은 (1) - (4)식, (7)식 아래 (10)식이다.

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} = E_d, I_d(0) = I_{do} \neq 0 \quad \dots \dots - (10)$$

여기서, R : 직류측 선로의 등가저항, L : 마그네트 인덕턴스, I_{do} : 마그네트 초기전류이다.

4. 교류속 전류 고조파 분석

사이티스탁 브리지를 고직변환기로 이용하는 초전도 에너지저장 장치는 전력을 제어량으로하여 제어를 행하는 경우 주류송전동과 다른 계 직류전압 Ed, 전류 Id 을 변화시켜 제어해야 하기 때문에 제어각 α 를 변화시켜야하고 따라서 교류속 전류파형 및 크기가 변화된다. 12펄스 다블 브리지에서 α_1 과 α_2 을 적당히 변화시켜 무효전력제어를 행하는 경우 교류속 전류파형은 한층 복잡하게 변화되게 된다. 심계통 적용시는 이와 같은 고조파 전류 대책으로 고조파 필자를 고려해야 하기 때문에 본 절에서는 변압기 결선을 $\Delta-\Delta$ 시스템과 $\Delta-Y$ 시스템 그리고 P-Q 동시 제어용 시스템에서 발생하는 고조파를 분석했다.

고조파 성분 계산은 (14)식과 같은 Fourier Series 의 정현파 형태에 대하여 FFT 를 사용하여 해석하였다.

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \dots (11)$$

단,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta$$

4.1 $\Delta-\Delta$ 결선 시스템

$\Delta-\Delta$ 변압기 결선을 가진 SMES 와 전원 축 전류의 Fourier-Series 를 구하면 (12)식과 같다.

$$I_{ac} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d (\cos\theta - \frac{1}{5} \cos 5\theta + \frac{1}{7} \cos 7\theta - \frac{1}{11} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \cos 13\theta - \dots) \dots (12)$$

이때 고조파 성분은 점오각에 무관하여 표1은 각 성분의 기본파에 대한 백분율을 타나내며 고조파수는 $n=6m \pm 1$ (m 은 정수)만 존재하는 것을 알수 있다.

고 조 파	1	5	7	11	13
성 분	100	20.0	14.29	9.09	7.69
고 조 파	17	19	23	25	
성 분	5.88	5.26	4.35	4.35	

표1 $\Delta-\Delta$ 결선 시스템의 고조파 성분

4.1 $\Delta-Y$ 결선 시스템

$\Delta-Y$ 변압기 결선을 가진 SMES 와 전원축 선 전류를 Fourier - Series 로 구하면 $\Delta-\Delta$ 결선과 고조파 절대치는 같고, 고조파 차수 $n=6m \pm 1$ (m 은 정수)에서 부호가 반대이며 $n=6k \pm 1$ (K 는 정수) 고조파 차수에서 부호가 같다.

4.3 P-Q 동시제어 시스템

본 연구에서 사용한 P-Q 동시제어 시스템은 $\Delta-\Delta$ 변압기 결선을 가진 컨버터와 $\Delta-Y$ 변압기 결선을 가진 컨버터가 직렬로 연결되어 있다. 변압기 권선비는 각 컨버터의 무부하 제어시의 전압

(Edo)이 같도록 하기 위해 $\Delta-\Delta$ 결선은 1:1, $\Delta-Y$ 결선은 $\sqrt{3}:1$ 이 되며 전원축 전류는 점오각이 같은 경우 ($\alpha_1 = \alpha_2$) 파형의 Fourier-Series를 구하면 표2와 같다.

표2에서 보는 바와 같이 고조파 수는 $n=12k \pm 1$ (K 는 정수)만 존재하므로 위의 두 경우보다 고조파가 적게됨을 알수 있다.

고 조 파	1	11	13	23	25
성 분	100	9.09	7.69	4.35	4.0

표2. P-Q 동시제어용 시스템의 고조파 성분 ($\alpha_1 = \alpha_2$)

점오각이 다른 경우는 $\alpha_1 = \alpha_2$ 제어시와 달리 $n=6m \pm 1$ (m 은 홀수)의 고조파가 존재하며 고조파의 크기도 점오각에 따라 짐을 알수 있다. (표3.)

고 조 파	1	5	7	11	13	17
점오각차						
30°	100	20	14.29	9.09	7.69	5.88
60°	100	11.55	8.25	9.09	7.69	3.20
90°	100	20	14.29	9.09	7.69	5.88
120°	100	34.64	24.74	9.09	7.69	10.18
150°	100	20	14.29	9.09	7.69	5.88

표3. 점오각 차이에 따른 고조파 성분

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험 장치의 개요

실험장치의 구성도는 그림5이다.

축정부 초전도 코일의 전류 및 3상 전압 전류 순시치를 모든상에서 측정하고 Z-80 으로 전력계산을 한다.

제어부는 Z-80 으로 부터 받은 유효, 무효전력

을 받아 요구하는 SMES의 유효, 무효전력을 발생시키도록 하는 점오각을 계산한다.

8080을 주 Processor로 사용하였다.

점오각은 계산된 제어각을 전압의 형태로 받아 점오각 결정회로에 입력되어 사이리스터 Gate에 보낸다.

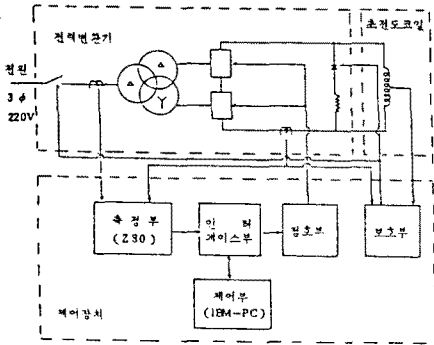


그림5 실험 장치의 구성도

SMES 파라메타	
인덕턴스 (L)	1.25(H)
최대 저장에너지 (Wmax)	25 (KJ)
고입 최대 전류 (Imax)	200 (A)
초전도 선재	NbTi - Cu
형 태	Solenoid
냉각 방식	액화 헬륨 침전

표 4. SMES 외 제원

4.2 실험 결과

4.2.1 구형파 전력제어의 특성시험

그림 6은 $P_s = 1500(-500)$, $Q_s = 7000$ (VAR)

이고 $K_p=0.3$, $K_i=0.11$, $I_{do}=50$ (A) 방전시간은 전류 50(A)로 뿔때 충전하도록 얻어진 SMES P,Q 추종곡선을 나타내고 있다.

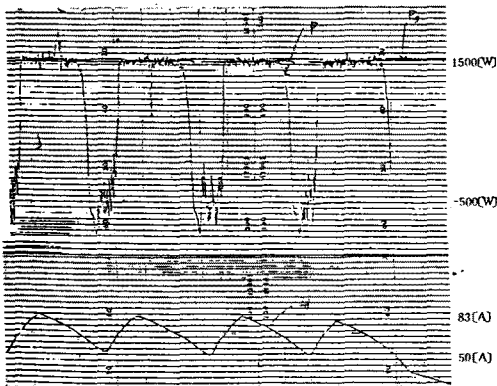


그림 6. $P_s=1500(-500)$ (W), $Q_s=7000$ (VAR)인 경우 구형파형 전력제어

4.2.2 주파수 변동 보상 제어특성 시험

보상시의 제어 특성을 보기 위하여 외부에서 주파수 편차 신호를 수동으로 줄때 주파수 변동전 유효전력 정정치의 변화관계 및 그에 따른 유효전력 추종관계를 시험하였다.

4.2.3 고주파 특성시험

그림 7은 P-Q 동시제어시 ($\alpha_1 = \alpha_2 = 60^\circ$)인 경우 전원측 선전류이며 모의된 값과 잘 일치한다.

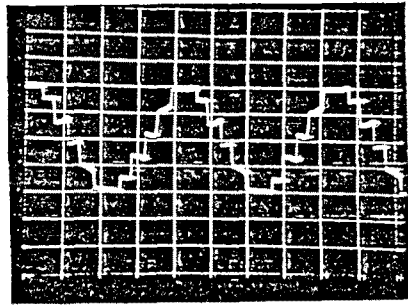


그림 7. $\alpha_1 = \alpha_2 = 60^\circ$ 인 경우 전원측 선전류

6. 결론

2대의 6펄스 전력변환 장치와 25kV SMES로 구성된 시스템에서 전력제어의 모의와 실험 및 전원측 고주파 전류 분석을 행하였으며 이로부터 얻은 결과들 요약하면 아래와 같다.

- (1) 유효, 무효전력 동시제어가 불가능한 경우의 대책으로 유효전력을 우선적으로 설정치에 추종하도록 하는 유효전력 우선 모드방식을 제안, 모의와 실험을 통하여 확인하였다.
- (2) 전원측 고주파 전류 분석을 통하여 앞으로 실험계통 적용시 문제되는 고주파 방지 대책의 유용한 자료들 도출 했다.

참고 문헌

- (1) R.W Boom, et.al ; "Wisconsin Superconductive Energy Storage Project", 1974
- (2) 한전 기술연구원, 서울대학교 ; "초전도 전력 에너지 저장장치에 관한 연구보고서 (KRC 84S-105) 8, 1986.
- (3) T. Okada ; "Control and Characteristics of SMES Connected to Power System", US-Japan Workshop, PP64, 1981
- (4) 伊瀬, 村土, et al., "0.5MJ 超電導工機貯蔵装置による有効無効電力同時制御", 電学論 B104, NO.9, pp.9-15, 1984