'88 추계학술대회
' 88 — A — 2

# 12 펄스 시리즈 브릿지 컨버터의 비대칭제어에의한 초전도 에너지 저장장치의 P , Q 동시제어

° 한 석 진 , 한 송 엽 , 이 승 원
서 울 대 전 기 공 학 과

# The Simultaneous Control Active and Reactive Power by SMES with Asymetrically Controlled 12 pulse Series Bridge Converter

S. J. HAN , S. Y. HAN , S. W. RHEE
Dept. of Seoul National University

Abstact

This paper shows a asymmetrically controlled method for the simultaneous control of real and reactive power generated by Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES).

Asymmetrically controled 12 pulse converter has been proposed in this paper for harmonic reduction of transformer primary current.

## 1. 서 론

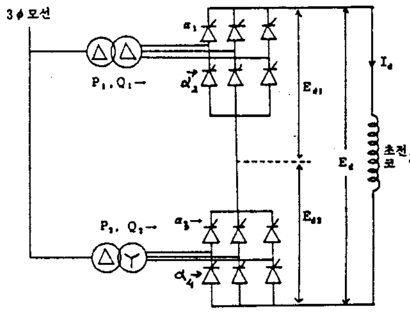
초전도 에너지 저장장치 ( SMES ) 는 초전도체의 무저항성 및 대전류성을 이용한 에너지 저장장치로 대용량의 전기에너지를 저장 할 수 있을뿐만 아니라 효율이 90% 이상으로 높고 에너지 충전 또는 방전이 빠르므로 전력계통 안정용으로 매우 유망한 장치로 평가 받고 있기 때문에 현재 광범위한 연구가 진행중에 있으며 특히 고온 초전도체의 발견으로 그 실용화가 조속히 이루어질 전망이다. 따라서 본 논문에서는 SMES 가 전력계통에 부착되어 전력계통 안정용으로 운전될때 계통의 유효전력, 무효전력 제어와 전원측 전류의 고조파 성분의 감소를 위한 SMES 의 제어방식을 제시하였다.

SMES의 에너지 흡 ,방출은 전력변환기의 점호각을 조절함 으로서 이루어 지는데 이 전력변환기의 제어방식에따라 여러가지가 있으나 유효전력과 무효전력을 동시에 제어하는 방식으로 널리 쓰이는 방식이 3 상 브릿지 컨버터를 직렬로 연결하여 사용하는 Series Bridge Converter 로 이 방식은 2 개의 변환기를 각각 대칭제어 함으로써 ($\alpha 1 = \alpha 2$ ,$\alpha 3 = \alpha 4$) 계통측의 고조파 성분이 13% 에서 100% 까지 발생하며 두개의 점호각차가 클 수록 고조파성분이 커진다. 따라서 이러한 경우에 고조파를 줄이기 위하여 변환기 1 대에 대해서도 정측과 부측을 각각 비대칭제어하면 점호각이 4 개 늘어나며 이들을 적절히 조합하여 고조파를 감소시킬 수 있다

## 2. 전력계통에서의 SMES 모델링

### 2.1 대칭제어 방식

6 펄스 Bridge Converter 두대를 직렬로 연결한 SMES의 기본적 구성은 그림 1 과 같다.




그 림 1 SMES 의 전력 변환기

△-△ 변환기와 △-Y변환기를 각각 대칭제어 할때는 정측 점호각과 부측 점호각은 같게되므로 $\alpha 1 = \alpha 2$ ,$\alpha 3 = \alpha 4$ 가된다 전력변환기의 점호각제어에 의해서 SMES 에 인가되는 전압은 Commutation Reactance 를 무시하였을때 다음과 같이 얻어진다.

$$Ed1 = Edo * COS\alpha_1$$
$$Ed2 = Edo * COS\alpha_3 \qquad \text{-------- 식 1}$$
$$Ed = Ed1 + Ed2$$
$$= Edo * ( COS\alpha_1 + COS\alpha_3 ) \qquad \text{-------- 식 2}$$

( 단 Edo : 3 상 전파정류기의 무제어 출력전압 )

SMES 에 저장 , 방출되는 유효전력과 무효전력의 식은 아래와 같다.

$$P = Ed * Id$$
$$= Edo * Id ( COS\alpha_1 + COS\alpha_3 ) \qquad \text{------- 식 3}$$
$$Q = Edo * Id ( SIN\alpha_1 + SIN\alpha_3 )$$

식 3 을 Edo*Id 로 나누어 P , Q 이라고 표기하면 식 4 같이 쓸 수 있다.

$$Pn = P/Edo*Id = ( COS\alpha_1 + COS\alpha_3)$$
$$Qn = Q/Edo*Id = ( SIN\alpha_1 + SIN\alpha_3) \qquad \text{------- 식 4}$$

전력변환기의 싸이리스터를 자연전류방식을 택했을 때 제어점호각의 범위는 Turn-off Time 및 전류리액턴스등을 고려 하지 않았을때 $0 < \alpha_1, \alpha_3 < 180$ 이고 이 제어 범위에서는

$$-2 < Pn < 2$$
$$0 < Qn < 2 \qquad \text{------- 식 5}$$

가 된다.

즉 유효전력은 양과 음이 될 수 있으므로 흡 , 방출이 가능하고 무효전력은 항상 양의 값만을 가질 수 있는데 이것은 자연 전류방식을 택했기 때문이다.

식 4 에서 알 수 있듯이 2 개의 점호각 $\alpha 1$ , $\alpha_3$ 를 각각 제어함으로써 유효전력과 무효전력을 제어 할 수 있고 미지수가 2 개 , 방정식이 2 개이므로 점호각을 쉽게 구할 수가 있다.

식 4 에서

$$Pn= 2*COS((\alpha 1 +\alpha_3 )/2)*COS((\alpha 1 -\alpha_3 )/2)$$
$$Qn= 2*SIN((\alpha 1 +\alpha_3 )/2)*COS((\alpha 1 -\alpha_3 )/2)$$
$$TAN((\alpha 1 +\alpha_3 )/2) = Qn/Pn$$
$$\alpha 1 + \alpha_3 = 2*TAN ( Qn/Pn) \qquad \text{-------- 식 6}$$

또

$$Pn+ Qn =2+2*(COS\alpha 1*COS\alpha_3 + SIN\alpha 1*SIN\alpha_3 )$$
$$=2+2*COS(\alpha 1 - \alpha_3 )$$
$$\alpha 1 -\alpha_3 = COS (( Pn+ Qn- 2 )/2 ) \qquad \text{-- 식 7}$$

식 6 과 식 7 을 연립하면

$$\alpha 1=TAN (Qn/Pn)+0.5*COS ((Pn+Qn-2)/2)$$
$$\alpha_3=TAN (Qn/Pn)-0.5*COS ((Pn+Qn-2)/2) \qquad \text{----------- 식 8}$$

2.2 비대칭제어 방식

그림 1 에서 △ -△ 변환기의 점호는 $\alpha 1$ ,$\alpha 2$ 로 △-Y 변환기의 점호는 $\alpha 3$ ,$\alpha 4$ 로 각각 비대칭제어를 행하여 얻을 수 있는 전압 Ed 는 전류리액턴스를 무시하였을때 다음과 같이 얻어진다.

$$Ed1 =(Edo/2) * ( COS\alpha_1 + COS\alpha_2)$$
$$Ed2 =(Edo/2) * ( COS\alpha_3 + COS\alpha_4 )$$
$$Ed = Ed1 +Ed2$$
$$=(Edo/2)*( COS\alpha_1+COS\alpha_2+COS\alpha_3+COS\alpha_4) \qquad \text{------- 식 9}$$

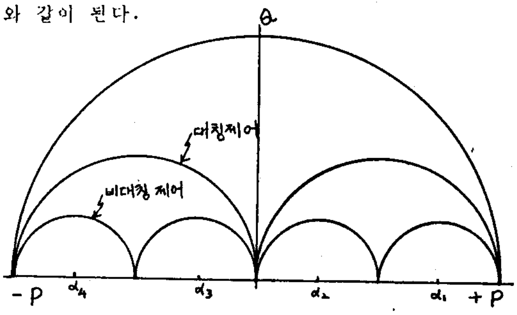
따라서 유효, 무효전력식은

$$P = Ed * Id$$
$$=(Edo*Id/2)*( COS\alpha_1+COS\alpha_2+COS\alpha_3+COS\alpha_4) \qquad \text{------- 식 10}$$
$$Q = (Edo*Id/2)*( SIN\alpha_1+SIN\alpha_2+SIN\alpha_3+SIN\alpha_4)$$

$$Pn = P / Edo*Id$$
$$= (1/2)*( COS\alpha_1+COS\alpha_2+COS\alpha_3+COS\alpha_4) \qquad \text{------- 식 11}$$
$$Qn = Q / Edo*Id$$
$$= (1/2)*( SIN\alpha_1+SIN\alpha_2+SIN\alpha_3+SIN\alpha_4)$$

식 11은 4 개의 미지수를 가진 방정식이 2 개이므로 점호각을 구하기 위해서는 변수 2 개를 임의값을 취하거나 목적함수를 찾아내어 해를 구할 수 있다. 이의 자세한 내용은 다음절에서 언급한다.

식 4 와 식 11 은 각각 대칭제어와 비대칭제어시의 Pn, Qn 식을 나타내며 두식으로부터 SMES 의 유효, 무효전력의 동시제어 가능영역을 도시하면 그림 2 와 같이 된다.




그 림 2 P , Q 동시제어 가능 영역

그림 3 은 대칭제어와 비대칭제어의 P , Q 에 따른 벡터도이다. 이 벡터도를 보면 임의의 P, Q 에의해 각 $\theta$ 가 정해지고 점호각들 사이의 관계는 각 $\theta$ 가 관계 되지 않으므로 $\sqrt{P^2+Q^2}$ 의 값이 같은 P , Q 값에서는 점호각이 같음을 알수 있다

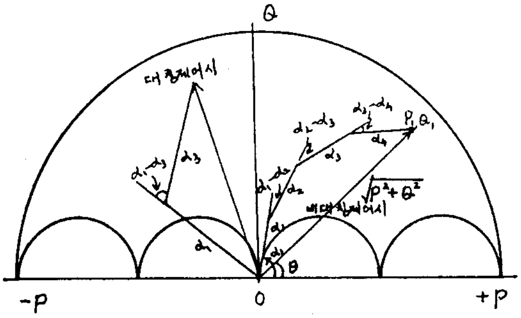
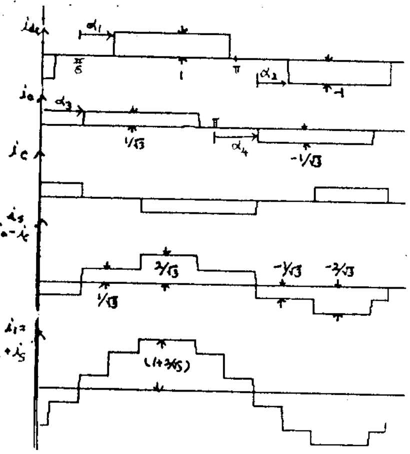



그림 3 P , Q 에 따른 벡터도

### 3. 고조파 해석

12 펄스 Series Bridge Converter의 비대칭제어시 변환기 각각의 1 차측 전류파형을 도시하면 그림 4 과 같다.



( $\alpha 1 = \alpha 2 = \alpha 3 = \alpha 4 = 45$ 일때 )

그 림 4

변환기의 전원측 선전류 파형을 점호각에 따라 Fourier Series 로 전개하면

$$i(t) = io/2 + \sum_{n=1}^{\infty} ( An*COS(nt) + Bn*SIN(nt) )$$

$$an = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(t) * COS(nt)\, dt \qquad \text{------- 식 12}$$

$$bn = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(t) * SIN(nt)\, dt$$

$$io = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(t)\, dt$$

식 12 에 의하여 $\Delta - \Delta$ 에 의한 전원측 선전류는

$$an = \frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha_1}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha_1} COS(nt)\, dt - \frac{1}{\pi}\int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha_2}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha_2} COS(nt)\, dt$$

$$= \frac{2}{n\pi} \cdot SIN(\frac{n\pi}{3}) \cdot COS(n\alpha 1+\frac{n\pi}{2}) - COS(n\alpha 2+\frac{3n\pi}{2})$$

$$bn = \frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha_1}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha_1} SIN(nt)\, dt - \frac{1}{\pi}\int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha_2}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha_2} SIN(nt)\, dt$$

$$= \frac{2}{n\pi} \cdot SIN(\frac{n\pi}{3}) \cdot SIN(n\alpha 1+\frac{n\pi}{2}) - SIN(n\alpha 2+\frac{3n\pi}{2})$$

- 에 의한 전원측 선전류는

$$an = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha_3}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha_3} \frac{1}{\sqrt{3}} COS(nt)\, dt - \frac{1}{\pi}\int_{\pi+\alpha_4}^{\frac{5\pi}{3}+\alpha_4} \frac{1}{\sqrt{3}} COS(nt)\, dt$$

$$- \frac{1}{\pi}\int_{\alpha_3+\frac{4}{3}\pi}^{\alpha_3+2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} COS(nt)\, dt + \frac{1}{\pi}\int_{\frac{7\pi}{3}+\alpha_4}^{3\pi+\alpha_4} \frac{1}{\sqrt{3}} COS(nt)\, dt$$

$$= \frac{2}{n\pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} SIN(\frac{2n\pi}{3})\, SIN(\frac{n\pi}{3}) [SIN(n\alpha 3+n\pi) - Sin(n\alpha_4 + 2n\pi)]$$

$$bn = \frac{1}{\pi}\int^{\frac{2}{3}\pi+\alpha_3} \frac{1}{\sqrt{3}} SIN(nt)\, dt - \frac{1}{\pi}\int_{\pi+\alpha_4}^{\frac{5}{3}\pi+\alpha_4} \frac{1}{\sqrt{3}} SIN(nt)\, dt$$

$$- \frac{1}{\pi}\int_{\alpha_3+\frac{4}{3}\pi}^{\alpha_3+2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} SIN(nt)\, dt + \frac{1}{\pi}\int_{\frac{7}{3}\pi+\alpha_4} \frac{1}{\sqrt{3}} SIN(nt)\, dt$$

$$= \frac{2}{n\pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} SIN(\frac{2n\pi}{3})\, SIN(\frac{n\pi}{3}) [-COS(n\alpha 3+n\pi) + COS(n\alpha 4+2n\pi)]$$

변압기 1 차측의 최종 전류식은 위위 두식을 더하여 구한다.

$$an = \frac{2}{n\pi} \cdot SIN\frac{n\pi}{3} [\, COS(n\alpha 1+\frac{n\pi}{2}) - COS(n\alpha 2+\frac{3n\pi}{2})]$$
$$+ \frac{2}{\sqrt{3}} SIN\frac{2n\pi}{3} [SIN(n\alpha 3+n\pi) - SIN(n\alpha 4+2n\pi)] \qquad \text{---- 식13}$$

$$bn = \frac{2}{n\pi} \cdot SIN\frac{n\pi}{3} [\, SIN(n\alpha 1+\frac{n\pi}{2}) - SIN(n\alpha 2+\frac{3n\pi}{2})]$$
$$+ \frac{2}{\sqrt{3}} SIN\frac{2n\pi}{3} [-COS(n\alpha 3+n\pi) + COS(n\alpha 4+2n\pi)]$$

식 13 으로부터 점호각에 따른 변압기 1차측 고조파 성분을 계산할 수가 있다.

$$An = \sqrt{an^2 + bn^2}$$

$$HF30 = \sqrt{\sum_{n=2}^{30} In^2} \; / \; I_1$$

가 된다.

### 4. 비대칭제어시 점호각 결정

#### 4.1 등차각 제어 방식

4 개의 점호각의 차이를 갈게하는 방식이다

식 11 은 다음과같이 된다.

$$Pn = 0.5*((COS\alpha 1) + COS(\alpha 1-\delta) + COS(\alpha 1-2\delta) + COS(\alpha 1-3\delta))$$

$$= 2*COS(\delta)*COS(\delta/2)*COS(\frac{2\alpha_1-3\delta}{2}) \qquad \text{--- 식 14}$$

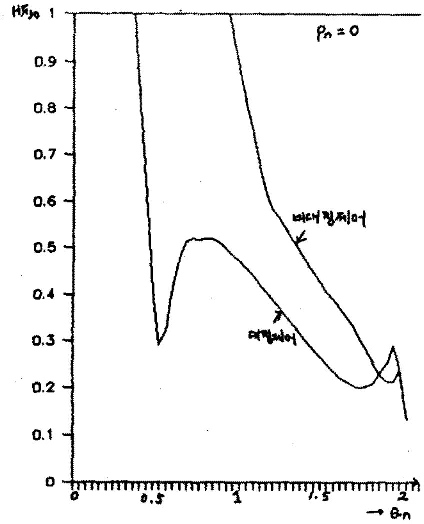
$$Qn = 2*COS(\delta)*COS(\delta/2)* \quad (\frac{2\alpha_1-3\delta}{2}) \qquad \text{--- 식 15}$$

식 14 와 식 15 로 비대칭 등차각제어시의 점호각을 구할수 있다.

그림 5 는 P = 0 으로하고 Q 를 변화시켜 가면서 30 고조파 까지의 Harmonic Factor HF30 을 도시한 것이다

#### 4.2 고조파 목적함수

3절에서 구한 점호각에 따른 고조파 성분식에서 우수고조파 성분을 최 소화하는 식과 기수고조파를 최소화하는 식을 사용하여 P , Q 식과 함께 4 개의 식을 만들어서 4 개의 점호각을 구할수 있다.




그 림 5 대칭제어와의 고조파 비교

따라서 비대칭 제어시의 점호각 결정 방정식은 식 11, 식 13 로 부터 아래와 같은 식이 만들어진다.

$$COS\alpha_1+COS\alpha_2+COS\alpha_3+COS\alpha_4= 2*Pn$$

$$SIN\alpha_1+SIN\alpha_2+SIN\alpha_3+SIN\alpha_4= 2*Qn \quad \text{--- 식 16}$$

$$\text{Min an } (\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4) = \text{Min } ( a2 + a3 + a4 + a5 + \ldots\ldots )$$

$$\text{Min bn } (\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4) = \text{Min } ( b2 + b3 + b4 + b5 + \ldots\ldots )$$

식 16 은 비선형방정식이므로 수치해석적인 방법을 사용하여 구할수가 있다. 그러나 이 방식은 계산시간이 많이 요구되기 때문에 SMES 를 실시간제어하기 위해서는 위에서 언급한 바와같이 $\sqrt{P^2+Q^2}$ 가 같은 값에서는 고조파성분이 같기때문에 P 를 0 으로 하고 Q 를 변화시키면서 식16을 풀어서 고조파성분이 최소가되는 점호각을 구하면 이 점호각으로 $\sqrt{P^2+Q^2}$ 값이 같은 다른 P ,Q 에서도 하모닉스는 최소가 된다.

5 결 론

본 논문에서 사용한 12 펄스 비대칭 제어방식을 사용하여 전력계통 안정용 SMBS 를 제어하면 계통에서 요구하는 유효, 무효전력을 만족 시킬 뿐만 아니라 하모닉스를 감소하기위한 다른 장치도없이 계통의 하모닉스를 줄일수 있기 때문에 경제적인 측면에서도 유용한 방식으로 생각한다.

그러나 비대칭제어의 단점은 점호 싸이리스터의 점호실패를 방지하기 위하여 점호각 여유가 대칭제어시보다 좀더 늘어난다. 본 논문에서는 이와같은 점호각 안정영역을 고려하지 않았으므로 앞으로 이 방향의 연구가 필요 하다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. EDWARD EILSON KIMBAK, "Direct Current Transmission", 1946

2. P.C. SEN, " Thyristor DC Drives", 1981

3. B.K. BOSE " Power Electronics and AC Drives" , 1986

4. E. ORAN BRIGHIM, " The Fest Fourier Transform " , 1974

5 WILLIAM MC MURRAY, " A Study of Asymmetrical Gating for Phase Controlled Converter", IEEE Vol. IA-8, No.3 1972

6. 차 귀 수 , " Expansion of Power Controlled Region in SMES by Asymmetrically Controlled Pulse Converter ", 1987

7. 이 형 수 , " SMES 를 이용한 P, Q 동시제어", , 1987