

다중 인버터로 구성된 전력 저장 전지 시스템의

전류 제어를 위한 예측 제어기

* 박선순 * 조성진^o ** 김효용 ** 노대석

A Predictive Current Controller for Battery Energy Storage System Based on the Space Vector PWM of Transformer Coupled Inverters

* : 코오롱엔지니어링(주) 기술연구소
** : 한국전기연구소 배전연구실

Abstract

A predictive current controller for the Battery Energy Storage System (BESS) based on space vector PWM of transformer coupled inverters is presented. The control method has many advantages such as accurate control, reduced harmonics, good dynamics, improved stability, wide control range, etc.. The simulation results show that the predictive control method with space vector PWM is suitable for the transformer coupled inverters applied to the battery energy storage system..

1. 서론

최근 전력수요가 매년 증가하고 있는 가운데 특히 가정용, 업무용, 산업용등 각부분에서 주간대 전력수요가 큰 폭으로 증가해 가고 있다. 이러한 수요 전력의 불균형에 따라 주간 최대최소 부하비율(또는 심야율) 개선을 위한 전력계통운용상의 심야부하 활용문제가 주요과제로 등장하게 되었다.

이러한 문제점의 해결방안중의 하나로 적절한 전력장치를 이용하여 일 부하곡선상에 부하 평준화 효과를 도모하고 있다. 이와같이 전력수요 불균형이 해결될 경우, 년중 최대 부하 시기에 침투부하 삭제 및 예비전력 확보, 그리고 기저부하용 대용량전원인 원자력, 화력발전소의 일정 출력 유지등의 잇점을 얻게된다. 또한 정상시는 무효전력 보상기로서 운전하여 계통의 역률보상 및 안정화 측면에도 크게 기여한다. 이러한 전력변환기술의 하나인 전력 저장 전지시스템은 국내외에서 활발히 연구되고 있다.

전력저장 전지시스템의 구성은 전력저장을 위한 전지 부와 저장에너지를 계통에 연계시키기 위한 전력변환부로 크게 구분될 수 있다. 일반적으로 전력 변환부는 출력 전압의 크기와 계통 전압에 비교된 위상차를 제어하여 유효전력과 무효전력을 제어한다[1]-[5]. 이 출력전압의 크기와 위상을 제어하기 위한 전력변환부는 다중 인버터형식으로 구성된다.

참고문헌 [5] 는 다중인버터의 공간벡터 방식을 도입하였다. 이러한 다중인버터 공간벡터제어은 고조파 필터 없이도 출력전압과 전류의 고조파 함유율을 크게 개선하는 등 많은 장점을 갖는다.

이 논문은 다중인버터의 공간 벡터 PWM 에 적용키 위한 예측 전류제어기를 도입한다. 전력저장전지시스템에서의 예측 전류제어기는 기존의 전압제어에 의한 유효,

2. 시스템 구성

그림 1. 은 이 논문에서 제안하는 시스템의 계통도이다. 그림1. 과 같이 이시스템은 크게 전지부(Battery), 다중 인버터부, 인버터제어부, 감시제어부 및 계통 연계부로 구성된다.

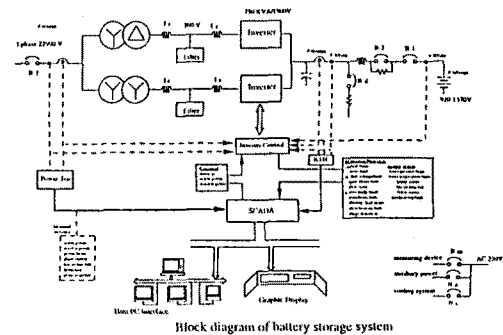


그림 1. 전력저장 시스템 블록도

2.1. 전압제어에 의한 전력제어 시스템

전압에 의해 전력 제어되는 전력 저장 전지 시스템의 인버터 제어부는 그림 2와 같이 3상/2상 변환 및 A/D 변환부, 동기화부, 유효전력 무효전력제어를위한 PI제어부, 공간벡터 PWM발생부로 구성된다. 전압제어에 의

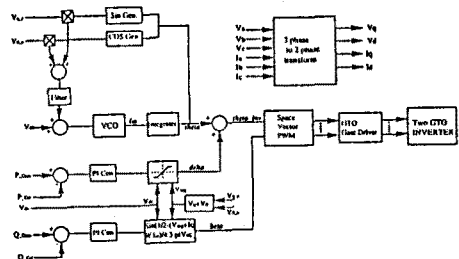


그림 2. 전압에 의해 전력이 제어되는 전력 저장 전지 시스템의 제어블럭도

한 전력 저장 전지 시스템이 계통전압과 동기되어 운전되는 경우 이시스템을 단순한 등가 전압원으로 생각할 수 있다. 그림 3(가)는 전지 시스템을 기본파 성분간의 등가 전압원으로 표시한 계통연계 1상 등가 회로이다. 그림 3(나)는 전력 제어원리를 나타내는 벡터도이다.

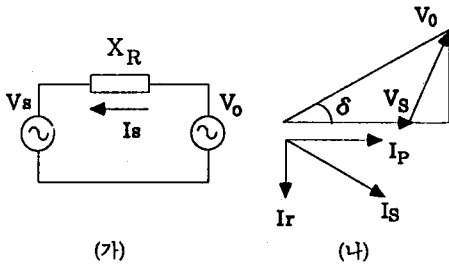


그림 3. 전압제어에 의한 전력제어를 하는 경우, 전력 저장 시스템의 (가) 1상 등가회로 (나) 벡터도

그림 3으로부터 유효전력과 무효전력을 각각 식(1)과 식(2)같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{3 V_0 \sin \delta}{X_L} V_s = K_p \delta \quad \text{----- (1)}$$

$$Q = \frac{3(V_0 \cos \delta - V_s)}{X_L} V_s = K_q (|V_0| - |V_s|) \quad \text{----- (2)}$$

식(1)과 (2)를 정리하면 유효전력과 무효전력을 위상차 δ 와 계통전압과 변환기 출력전압과의 차에 의해 제어 할 수 있음을 알 수 있다.

무효 전력을 제어하는 경우와 다르게 직접적인 전류제어에 의하여 유효, 무효 전력을 제어한다. 예측 전류제어에 의한 직접 전력 제어법은 전압에 의한 전력제어법보다 제어 범위 확장, 고조파 특성 개선, 제어의 속응성 및 정확성 그리고 시스템의 안정성면에서 우수한 성능을 보인다.

2.2 전류제어에 의한 전력제어 시스템

전류 제어에 의하여 전력 제어되는 전력 저장 전지 시스템의 제어블럭도를 그림 4와 같이 도시된다. 전력 저장 전지 시스템이 계통과 동기되어 출력전류를 제어하는 경우, 이 시스템은 등가적으로 단순한 등가 전류원으로 간주할 수 있다. 그림 5(가)는 전지 시스템을 기본파 성분간의 등가 전류원으로 표시한 계통연계 1상 등가 회로이다. 그림 5(나)는 전력제어원리를 나타내는 벡터도이다. 그림 5로부터 유효전력과 무효전력은 각각 식(3)과 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$P = 3V_s I_s \cos \psi = 3V_s I_p \quad \text{(3)}$$

$$Q = 3V_s I_s \sin \psi = 3V_s I_r \quad \text{(4)}$$

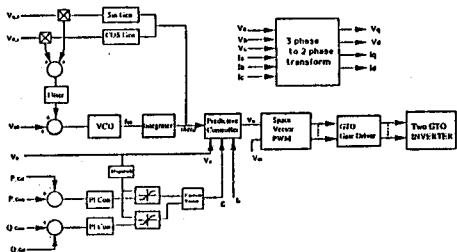


그림 4. 전류에 의해 전력이 제어되는 전력 저장 전지 시스템의 제어블럭도

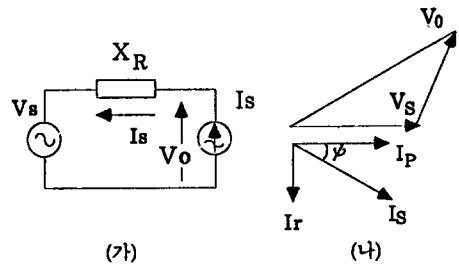


그림 5. 전류 제어에 의한 전력제어를 하는 경우, 전력 저장 시스템의 (가) 1상 등가회로 (나) 벡터도

식(3)과 (4)로부터 유효전력과 무효전력은 계통 전압과 등가전류와 교각 성분 전류에 의해 직접적으로 제어됨을 알 수 있다.

3. 다중 인버터의 예측 전류제어 원리

다중인버터를 이용한 전력저장전지 시스템에 적용하기 위한 예측 전류제어 기법은 그림 6의 단순화 등가회로와 벡터도에 의해 설명된다. 그림 6(나)에서 계통전압, 전력 저장 전지 시스템 출력 전압 및 상전류는 $V_s(k)$, $V_0(k)$, $I_s(k)$ 로 각각 표시하였다. 일정 주파수 f_s 로 샘플링된 계통 전압 및 상 전류는 복소수 개념의 벡터인식 (5)와 (6)으로 표현할 수 있다.

$$V_s(k) = 2/3 (V_{as}(k) + V_{bs}(k) e^{j2\pi/3} + V_{cs}(k) e^{j4\pi/3}) \quad (5)$$

$$I_s(k) = 2/3 (I_{as}(k) + I_{bs}(k) e^{j2\pi/3} + I_{cs}(k) e^{j4\pi/3}) \quad (6)$$

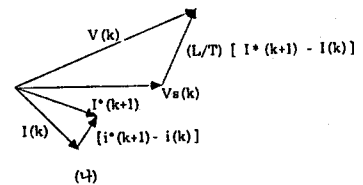
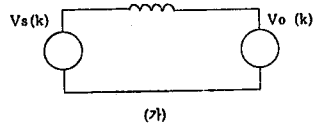


그림 6. 예측 전류 제어 기법을 설명하기 위한 단순화 등가 회로 및 벡터도

한 샘플링 구간후에 명령치에 근접하게 전류를 제어 하기 위한 적절한 전압 벡터는 식(7)로 표시된다.

$$V_0(k) = L_r / T_s (i_s^*(k+1) - i_s(k)) + V_s(k) \quad (7)$$

식(7)에 따라 실제 전력 변환 시스템의 출력을 얻기 위한 다중인버터의 공간 벡터 구성은 4절에서 설명한다.

4. 다중인버터의 공간벡터 구성 [5]

전력 변환기의 출력으로서 요구되는 전압을 나타내는 공간 벡터 $V_0(t)$ 는 식(8)과 같이 표시된다.

$$V_o(t) = 2/3(V_{oa} + V_{ob}e^{j2\pi/3} + V_{oc}e^{j4\pi/3}) \quad \text{--- (8)}$$

여기서 V_{oa} , V_{ob} , V_{oc} 는 각각 a, b, c상의 상전압을 나타낸다.

전력 저장 전지 시스템을 구성하는 다중인버터의 전력 회로는 그림 7.와 같다. 이러한 구성에서 스위칭 합수가 가질 수 있는 값에 따라 출력전압의 상전압을 구하면 각 인버터에 대해 7개의 가능한 출력 전압의 양자화된 공간벡터가 형성된다. 따라서 출력가능한 상전압은 식 (9) ~ (11)로 표시할 수 있다.

$$V_{1-1}(2k-1) = 2/3 E e^{j(2k-1)\pi/6} \quad k = 1, 2 \dots 6 \quad \text{--- (9)}$$

$$V_{1-1}(0) = 0$$

$$V_{1-2}(2k) = 2/3 E e^{j(2k-1)\pi/6} \quad k = 1, 2 \dots 6 \quad \text{--- (10)}$$

$$V_{1-2}(0) = 0$$

$$V_o = V_{1-1} + V_{1-2} \quad \text{--- (11)}$$

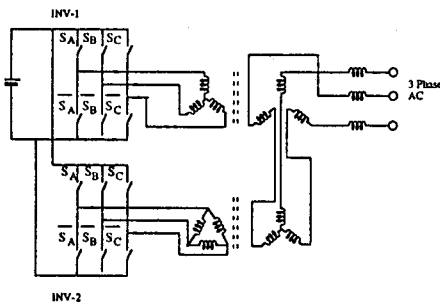


그림 7. 다중인버터의 전력회로도

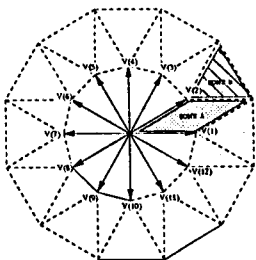


그림 8. 상태공간벡터도

Vector	Switching State
V(0)	(0, 0, 0)
V(1)	(1, 0, 0)
V(2)	(1, 1, 0)
V(3)	(1, 1, 1)
V(4)	(1, 0, 1)
V(5)	(1, 0, 0)
V(6)	(0, 1, 0)
V(7)	(0, 1, 1)
V(8)	(0, 0, 1)
V(9)	(0, 0, 0)
V(10)	(0, 1, 0)
V(11)	(0, 1, 1)
V(12)	(0, 0, 1)
V(13)	(0, 0, 0)

표 1. 각전압벡터에 대응하는 스위치 상태

여기서 크기가 영(zero)인 벡터는 각 인버터의 모든 상이 같은 논리 상태를 가질때 나타난다. 즉 각 인버터 출력 단자가 모두 단락일때 나타난다. 그림 8.은 (9)~(11)를 이용하여 얻은 전압원의 상태 공간 벡터도이다. 이 벡터도에서 홀수벡터($V(2k-1)$)는 인버터 A에서 얻을 수 있는 가능한 전압벡터이고 짝수벡터($V(2k)$)는 인버터 B에서 얻을 수 있는 전압벡터들이다. 여기서 홀수 벡터와 짝수 벡터와의 위상차 $\pi/6$ 은 변압기 결선에 의하여 얻어진다.

표 1.은 각전압 벡터에 대응하는 스위치 상태를 표시한 것이다. 이표에서 +1은 각상의 스위치가 + DC 축으로 절환된 상태이고 -1은 -DC 축으로 절환된 상태를 의미한다.

5. 다중인버터의 공간벡터 PWM [5]

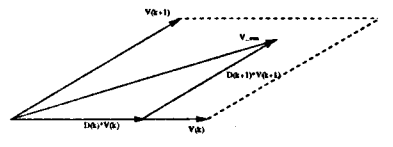
다중인버터의 공간벡터 PWM은 그림 9.에서와 같이 A대역과 B대역으로 구분하여 고려한다. A대역은 한 Sampling 구간(또는 스위칭 주기)동안에 $V(2k-1)$ 와

$V(2k)$ 의 조합에 의하여 원하는 전압벡터를 얻는 대역이고, B대역은 $V(2k-1)$ 를 고정하고 $V(2k-2)$ 와 $V(2k)$ 의 조합으로 전압벡터를 얻거나, $V(2k)$ 를 고정하고 $V(2k-1)$ 과 $V(2k+1)$ 의 조합으로 전압벡터를 얻는경우이다.

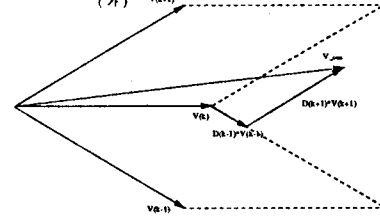
그림 9(가)와 같이 A대역에서전압벡터의 조합과 공간벡터 지속시간으로 표시된 출력전압은 다음과 같다.

$$V_o(t) = D(2k-1)V(2k-1) + D(2k)V(2k) \quad \text{--- (12)}$$

$$V_o(t) = 2E/3(D(2k-1)U(2k-1) + D(2k)U(2k)) \quad \text{--- (13)}$$



(가)



(나)

그림 9. PWM 파형발생 원리

(가) 전압벡터가 A대역에 있는 경우

(나) 전압벡터가 B대역에 있는 경우

여기서 $D(2k-1)$ 를 주기 T_s 내에서 상태공간 벡터 $V(2k-1)$ 상태를 유지하는 시간비(Duty)를 나타내며 $D(2k)$ 는 상태공간 벡터 $V(2k)$ 상태를 유지하는 시간을 나타내며 또한 $U(2k-1)$ 과 $U(2k)$ 는 각각 $V(2k-1)$ 과 $V(2k)$ 방향의 단위 벡터이다. E 는 DC축 전압의 크기이다. 식 (12)과 (13)의 $U(2k-1)$ 축성분과 $U(2k)$ 축성분의 대응부분을 같게놓고 정리하면

$$D(2k-1) = (3|V_o(t)|/E) \sin(\pi/6 - \theta) \quad \text{--- (14)}$$

$$D(2k) = (3|V_o(t)|/E) \sin(\theta) \quad \text{--- (15)}$$

한편 최대출력전압을 $D(2k-1) = D(2k) = 1$ 인경우에 얻어지며 그값은 식 (16)로 표현된다.

$$\max. |V_o(t)| = 2/3 \sqrt{2 + \sqrt{3}} E \quad \text{--- (16)}$$

다음으로는 그림 9(나)와 같이 B대역에 $V_o(t)$ 를 상태 공간 벡터 $V(2k-2)$, $V(2k-1)$, $V(2k)$ 와 그 공간 벡터의 지속 시간비 $D(2k-2)$, $D(2k-1)$, $D(2k)$ 와의 관계식을 쓰면 식 (17)~(18)과 같다.

$$V_o(t) = D(2k-2)V_o(2k-2) + D(2k-1)V_o(2k-1) + D(2k)V_o(2k) \quad \text{--- (17)}$$

$$V_o(t) = 2\pi/3(D(2k-2)U(2k-2) + U(2k-1) + D(2k)U(2k)) \quad \text{--- (18)}$$

식 (17)~(18)로부터 각 벡터 상태를 유지시켜야 하는 시간은 식 (19)~(21)로 표시할 수 있다.

$$D(2k-2) = \frac{3}{2} \frac{Vo(t)}{E} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \theta r\right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{---(19)}$$

$$D(2k-1) = 1 \quad \text{-----(20)}$$

$$D(2k) = \frac{3}{2} \frac{Vo(t)}{E} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta r\right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{-----(21)}$$

위의 결과를 정리하면 원하는 전압벡터가 A대역에서 위치하는 경우에는 식 (14)와 (15)에 따라서 상대공간벡터를 유지시켜주고 B대역에 위치하는 경우는 식 (19)~(21)에 따라서 전압벡터를 유지시킴으로서 출력전압을 효과적으로 얻을 수 있다. 이와같이 얻은 D(2k-2), D(2k-1), D(2k)는 그림 10과 같은 방법으로 PWM 제어파형을 발생시킨다.

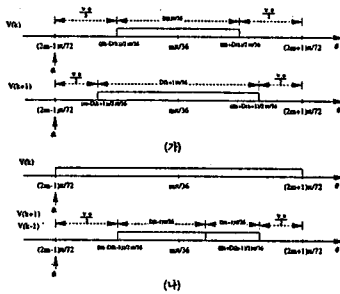


그림 10. PWM발생 형태

- (가) 전압벡터가 A대역에 있는 경우
- (나) 전압벡터가 B대역에 있는 경우

6. 시뮬레이션 결과

컴퓨터 시뮬레이션은 다음 파라메터값에 대해 수행하였다.

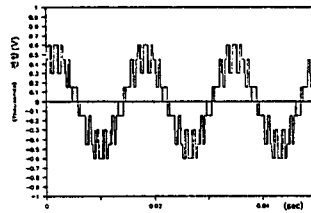
- 샘플링주기 : $T_s = 694 \mu s$
- 샘플링 주파수 : $f_c = 1.44 \text{ KHz}$
- DC Link전압 : $V_{dc} = 300V$
- 연계리액턴스 : $L_R = 2.5mH$

그림 11. 은 예측 전류 제어 기법으로 전력 저장 전지 시스템을 운전하는 경우의 (가)전압파형, (나)전류파형을 보이고 있으며 그림 12는 기준전류 시스템을 연결시킨 경우의 (가)전압 파형, (나)전류 파형을 나타내고 있다.

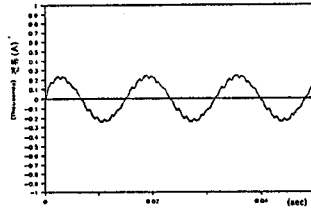
7. 결론

이논문은 다중 인버터 방식으로 구성된 전력 저장 전지 시스템을 소개하였다. 또한 본 논문은 변압기 결합된 다중 인버터의 공간 벡터 변조 방식을 논의 하였다. 이 방식을 적용한 시스템은 고조파 필터를 제거하였음에도 불구하고 최소 스위칭 수를 유지하면서 출력 전압의 고조파 성분을 격감시킬 수 있었다.

특히 본 논문은 다중 인버터의 공간 벡터 PWM을 근간으로 하는 예측 전류 제어 기법을 적용한 전력 저장 전지 시스템을 시스템에 제안 하였다. 예측 전류 제어에 의한 직접 전력 제어법은 전압 제어에 의한 전력 제어법보다 제어 범위 확장, 고조파 특성 개선, 제어의 수용성 및 정확성 그리고 시스템의 안정성면에서 우수한 성능을 보였다.



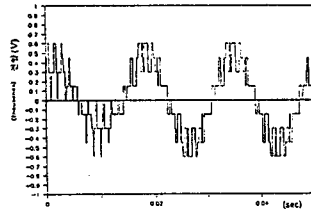
(가)



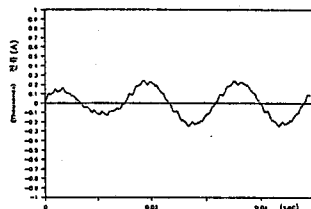
(나)

그림 11. 선간전압과 상전류의 시뮬레이션 파형

- (가) 선간전압
- (나) 상전류



(가)



(나)

그림 12. 전류 시스템 변경시의 시뮬레이션 파형

- (가) 선간전압
- (나) 상전류

참고문헌

- (1) 김호용의 "전력저장 전지시스템 기술개발" 한국 전기 연구소 보고서 1991.6
- (2) 김 호용의 "전력저장 시스템 구축 및 시뮬레이터 개발" 한국전기연구소연구보고서 1990.11
- (3) IEEE Standard Coordinating Committie on DSG, "IEEE guide for interfacing dispersed stroage and generation with utility systems," Draft 1, Apr. 1983
- (4) P. Wood, "DC-AC Inversion for Utility Systems", International Semiconductor Power Converter Conference Record, IEEE IAS, PP 453-460 1977
- (5) 박 선순의 "다중 인버터의 공간 벡터 기법을 이용한 전력 저장 전지 시스템" 전기 학회 전력 전자 연구회 춘계 학술 발표회 1993. 5.