

능동필터형 쌍방향 UPS의 새로운 제어기법

김 제홍*, 염상구**, 최재호**

* 영동전문대학 전기과, ** 충북대학교 전기전자공학부

A novel control strategy of active power filter type bidirectional UPS

Je-Hong Kim*, Sang-Ku Yeom**, Jae-Ho Choi**

* Yeongdong College, ** Chungbuk National University

Abstract - This paper proposes a new control strategy of bidirectional uninterruptible power supply(UPS) with the performance of active power filter which compensate the harmonics and reactive power. To improve the transient response for the effective compensation in active power filter mode, it is considered that a simple and precise calculation method of the compensation reference current for the harmonics and reactive power compensation. So a novel closed-loop control strategy is used to calculate the reference current. And the current regulated instantaneous voltage control scheme is used in back-up power mode. The system model and control algorithm are described and analyzed, and the system performance is verified by the simulation and experimental results.

치들은 AC 전원이 부하에 AC 전력을 공급하도록 ON상태가 된다. 그때, 쌍방향 UPS는 비선형 부하에 기인한 고조파 및 무효전력의 보상을 위하여 전력용 능동필터로서 동작한다. 그렇지 않으면, 사이리스터 스위치들은 쌍방향 UPS가 부하에 배터리 백-업 전력을 공급하도록 OFF 상태로 된다. 쌍방향 UPS의 AC 입력측 시스템 방정식은 식(1)과 식(2)로서 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{v_{com} - v_o}{L_a} \quad (1)$$

$$v_{com} = f(s) \cdot v_{dc} \quad (2)$$

단, v_{com} : 전력용 컨버터 입력단 전압, v_o : 필터 커패시터 전압, $f(s)$: 스위칭 함수

APF mode에서, 필터 커패시터 전압은 상용전원전압과 같다.

$$v_o(t) = v_i(t) \quad (3)$$

배터리 Back-up power mode에서, 필터 커패시터 전류와 전압은 다음의 식(4)와 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$i_c = i_a - i_o, \quad i_o = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_c}{C_a} \quad (5)$$

쌍방향 UPS의 DC 출력측 시스템 방정식은 다음의 식 (6), 식(7), 식(8)로 주어진다.

$$i_{dc} = f(s) \cdot i_a \quad (6)$$

$$i_{bat} = i_{bat} - i_{dc} \quad (7)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{bat}}{C_d} \quad (8)$$

그림 2는 LC 필터와 배터리를 가지는 쌍방향 컨버터의 DC 출력 모델을 보여준다. 배터리 전압은 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$v_{bat} = v_{oc} + v_{cb} - i_{bat} R_{th} \quad (9)$$

그리고 배터리 전류는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{(v_{bat} - v_{dc})}{L_d} \quad (10)$$

커패시터 C_a 전압, v_o 는 식 (11)로 주어진다.

1. 서 론

무정전 전원장치(Uninterruptible power supply:UPS)는 컴퓨터나 전자장비들 같은 중요부하에 양질의 전력을 공급하기 위하여 널리 사용되어지고 있다. 그들은 AC 출력전압을 제어하는 것 뿐만 아니라 전선측 고조파 전류에 의해 야기된 해로운 효과들을 억제하도록 디자인 된다. 그러나 종래의 UPS는 AC/DC 배터리 충전기로서 위상제어정류기를 사용하므로 AC 전원이 정류기로부터 발생된 고조파들로 오염된다. 게다가, 그것은 2개의 전력변환기(정류기와 인버터)를 사용하므로 효율, 가격, 부피등의 면에서 만족스럽지 못하다. 또한, 종래 UPS의 출력전압 파형은 비선형 부하에서 대체로 왜형이 일어난다.[1]

전력용 능동필터의 성능을 가지는 하나의 쌍방향 UPS가 이들 문제점들을 개선하기 위한 하나의 대안으로서 제안되고 있다.[2,3,4] 그것은 단지 하나의 전력변환기만 가지고 AC/DC 정류기/충전기 그리고 배터리의 충전 동작 및 백-업 전력을 위한 DC/AC 인버터로서 동작하고 있다. 더욱이, 그것은 전선측 고조파 전류와 무효전력을 보상하기 위하여 전력용 능동필터로서 동작하고 있다. 제안된 시스템의 동작은 전력용 능동필터 모드(Active power filter mode ; APF Mode)와 백-업 전력모드(Back-up power mode)인 2개의 모드로 나누어질 수 있다.

이 논문에서, 하나의 새로운 폐-루프 제어기법이 제안된다. 그것은 전력용 능동필터 모드에서 기준전류계산을 이하여 단지 하나의 승산기로만 구성된다. 그리고 제안된 기준전류계산법의 특징은 간단하고 정밀하여 보상정밀도를 개선할 수 있다는 것이다. 비록 저역통과 필터와 적분기와 같은 지연요소들이 제어회로에 사용되었지만 과도상태응답은 아주 우수하다.

또한, 제안된 시스템 모델과 제어 알고리즘이 기술되고 해석된다. 그리고 제안된 시스템의 성능이 5[kVA] 시제품의 시뮬레이션과 실험결과들에 의해 증명된다.

2. 시스템 설명

그림 1은 제안된 UPS 시스템의 형태를 보여준다. 그것은 쌍방향 컨버터와 배터리를 구성되어 있으며 LC 저역통과필터를 통해 계통에 연결된다. 전원이 정상일 경우, 사이리스터 스위

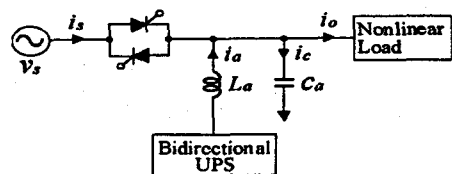


Figure 1: Configuration of the proposed UPS system

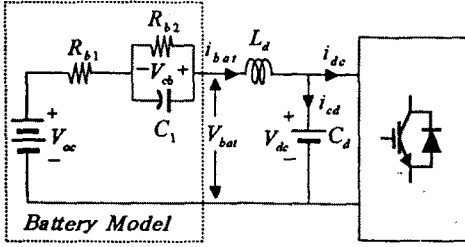


Figure 2: DC output model of bilateral converter

$$\frac{dv_{cb}}{dt} = \frac{i_{bat} - v_{cb}/R_{b2}}{C_1} \quad (11)$$

단, \$v_{oc}\$: Open circuit voltage, \$C_1\$: Overvoltage capacitance, \$R_{b1}\$: Internal resistance, \$R_{b2}\$: Overvoltage resistance

전력용 컨버터의 DC 입력전류는 전력용 스위치들의 스위칭패턴에 의존하며 DC 성분과 많은 고조파전류들을 포함한다. 만약 고조파전류가 배터리로 직접 흐른다면, 그것은 열 손실을 일으킨다. 따라서, 배터리가 전력용 컨버터에 연결될 때, LC 필터는 고조파성분들을 억제하기 위하여 사용된다.

3. 전력용 능동필터 모드

3.1 동작원리

전원이 정상일 경우, 상용전압은 식 (12)의 정현파 전압원으로서 가정할 수 있다.

$$v_s(t) = V_m \sin \omega t \quad (12)$$

만약 비선형부하가 인가된다면, 식 (13)과 같이 부하전류는 기본파성분과 고조파성분들로 나타낼 수 있다.

$$i_o(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (13)$$

그때, 순시부하전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p_L(t) &= v_s(t) \cdot i_o(t) \\ &= V_m I_1 \sin^2 \omega t \cos \theta_1 \\ &\quad + V_m I_1 \sin \omega t \cos \omega t \sin \theta_1 \\ &\quad + \sum_{n=2}^{\infty} V_m \sin \omega t I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \\ &= p_L(t) + q_L(t) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{where, } p_L(t) = V_m I_1 \sin^2 \omega t \cos \theta_1 \quad (15)$$

$$q_L(t) = V_m I_1 \sin \omega t \cos \omega t \sin \theta_1 + \sum_{n=2}^{\infty} V_m \sin \omega t I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (16)$$

\$p_L(t)\$와 \$q_L(t)\$는 순시치이다. 식 (15)는 항상 양(+)인 유효전력을 나타내며 식 (16)은 평균치가 항상 '0'인 무효전력을 나타낸다. 그러므로, 만약 전력용 컨버터가 무효전력 \$q_L\$를 공급한다면, 그때 유효전력 \$p_L\$는 상용전원에 의해 공급된다. 이것은 다음의 식 (17)과 같이 전원전류가 정현파이며 전원전압과 동상임을 의미한다.

$$i_s(t) = \frac{p_L(t)}{v_s(t)} = I_1 \cos \theta_1 \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (17)$$

$$\text{단, } I_m = I_1 \cos \theta_1$$

부하전류는 상용전원에 의해 공급되는 유효전류성분과 전원전류파형과 역울에 영향을 주는 무효전류성분으로 나누어질 수 있다.

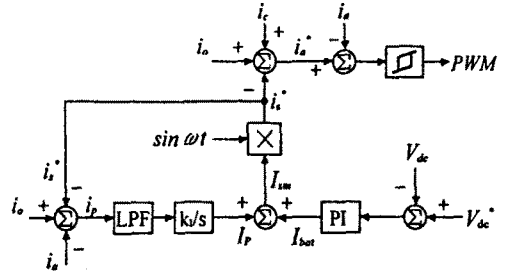


Figure 3: Control block diagram of the proposed APF mode

$$i_o(t) = i_p + i_r \quad (18)$$

단, \$i_p\$: 부하전류의 유효성분, \$i_r\$: 부하전류의 무효성분

그러므로, 그림 1로부터, 전력용 컨버터의 출력전류인 인덕터전류의 기준치는 \$i_r = i_p\$ 라는 가정하에서 식 (19)와 같이 주어질 수 있다.

$$\begin{aligned} i_s^* &= i_r - i_o - i_c \\ &= i_r - (i_p + i_r) - i_c \\ &= -i_r - i_c \\ &= -(i_o - i_p) - i_c \end{aligned} \quad (19)$$

만약 인덕터전류가 기준치를 추종하도록 잘 제어된다면, 그때 전원전류는 부하전류의 유효성분과 같으며 상용전압과 동상으로서 순수 정현파로 주어진다.

3.2 제어기법

그림 3은 제안된 알고리즘을 사용한 APF mode의 제어블럭도를 보여준다. 상용전원전류의 크기 \$I_m\$은 부하전류의 유효성분의 크기 \$I_p\$와 배터리 유효성분전류의 크기 \$I_{bat}\$를 합하여 결정한다. 그때, 상용전원전류의 기준치 \$i_r\$는 \$I_m\$과 \$\sin \omega t\$의 곱으로 결정된다. 마지막으로, 필터 인덕터전류의 기준치 \$i_c\$는 식 (19)로부터 결정되며 그때 필터 인덕터전류 \$i_s\$는 히스테리시스 PWM 제어기를 통하여 이 기준치를 추종하도록 제어된다. 그러므로, 만약 PWM 제어기가 잘 동작한다면, 그때 상용전원전류는 순수한 정현파이며 전원전압과 동상으로 될 것이다. 부하전류의 유효성분 \$i_p\$를 계산하기 위하여, 상용전원전류의 기준치 \$i_r\$는 피드백값으로 사용된다. 고조파전류와 무효전력을 보상하기 위한 제안된 기준전류계산기법은 부하전류의 유효성분이 페-루프 방법에 의해 정확히 발생되므로 종래의 개-루프 방법보다 더 정확하다.

4. 배터리 백-업 전력모드

그림 7은 배터리 백-업 전력모드의 제어블럭도를 보여준다. 인덕터전류는 부하전류와 커패시터전류의 합으로 나타낼 수 있다. 그러므로, 전력용 컨버터 출력전류의 기준치는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_s^* = i_o + i_c^* + i_{comp} \quad (20)$$

단, \$i_{comp}\$는 출력전압제어를 개선하기 위한 보상치이다. UPS 출력필터 모델은 식 (21)과 같이 수학적으로 나타낼 수 있다.

$$i_s(s) = \frac{1}{s^2 L_o C_o + 1} v_{con}(s) + \frac{1}{s^2 L_o C_o + 1} i_o(s) \quad (21)$$

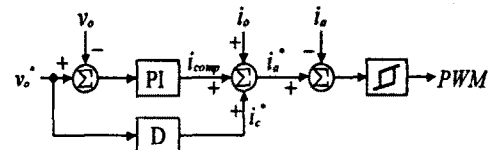


Figure 4: Control block diagram of the back-up mode

5. 시뮬레이션 및 실험

그림 5와 6은 제안된 시스템에 대한 시뮬레이션 결과들을 보여준다. 커패시터 입력형 다이오드 브리지가 비선형 부하로서 계통에 연결된다. 제안된 APF 모드와 배터리 백-업 전력 모드들이 잘 동작함을 알 수 있다. 그리고 또한, 상용전원이 정전이 되거나 부하가 변동할지라도, 제안된 시스템의 과도상 태특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 7과 8은 APF mode에서 실험결과들을 보여준다. 전원 전류는 거의 정현파이고 전원전압과 동상임을 알 수 있다. 그림 9는 배터리 백-업 전력모드에서 UPS 출력전압과 부하전류를 보여준다. 비선형 부하조건에서 출력전압이 거의 정현적임을 알 수 있다.

그림 10과 11은 각각 부하전류와 전원전류의 고조파 스펙트럼을 보여준다. 고조파 왜형율(THD)는 고조파 전류와 무효 전력 보상에 의해 92%로부터 7.2%로 감소됨을 알 수 있다.

6. 결 론

전력용 능동필터의 성능을 가지는 쌍방향 UPS의 제어기법이 제안되었다. 특히, 단지 하나의 승산기만 가지는 새로운 패-루프 제어기법이 APF모드에서 보상 기준전류를 계산하기 위하여 사용된다. 그리고 또한, 제안된 제어기법은 매우 간단하고 정밀하다.

제안된 시스템은 다음과 같은 장점들을 가진다.

- 1) 고조파와 무효전력 보상이 가능하다.
- 2) 부하전류의 유효성분이 패-루프 방법에 의해 정확히 계산되기 때문에 보상전류제안이 정밀하다.
- 3) 효율, 가격, 부피등이 충족된다.

참고문헌

1. J.H.Kim, et. al.: A bi-directional UPS with the performance of harmonic and reactive power compensation, *PEDS Conference '97*, 1997, pp.323 - 328
2. H.L.Jou, et. al.: A new parallel processing UPS with the performance of harmonic suppression and reactive power compensation, *IEEE-PESC Conference '94*, 1994, pp.1443-1450
3. C.Y.Hsu, et. al.: A new single phase active power filter with reduced energy storage capacitor, *IEEE-PESC Conference '95*, 1995, pp.202-208
4. S.Tepper, et. al.: A simple frequency independent method for calculation of the reactive and harmonic current in a nonlinear load, *IPEC Conference '95*, 1995, vol.1, pp.370-375

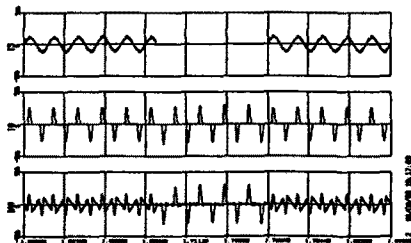


Figure 5: Simulation results with the diode rectifier load: (upper) utility line current (middle) load current (lower) converter output current

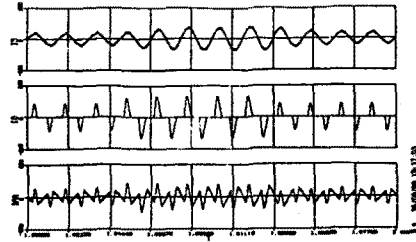


Figure 6: Simulation results with the diode rectifier load under the load change: (upper) utility line current (middle) load current (lower) converter output current

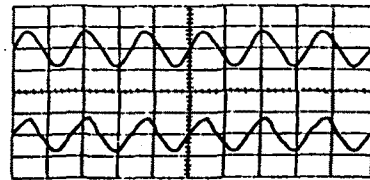


Figure 7: Experimental results of utility voltage and current in APF mode



Figure 8: Experimental results of compensation current and load current in APF mode

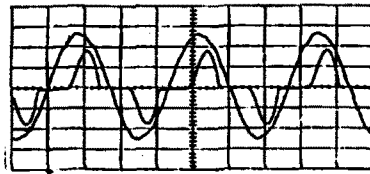


Figure 9: Experimental results of output voltage and load current in back-up power mode



Figure 10: Harmonic spectrum of load current



Figure 11: Harmonic spectrum of utility current