

# PDFF 기법을 적용한 플라이휠 에너지 저장장치용 PWM 인버터 시스템 제어

朴鍾贊\*, 鄭柄煥\*\*, 崔圭夏†, 崔海龍\*\*\*

## PWM Inverter System Control for Flywheel Energy Storage System using PDFF(Pseudo-Derivative Control with Feedforward Gain) Algorithm

Jong-Chan Park, Byung-Hwan Jeong, Gyu-Ha Choe and Hee-Ryong Choi

### 요 약

본 논문은 현재 청정에너지의 개념으로 대두되고 있는 에너지원 가운데 기계적인 에너지로 저장하여 필요 시 꺼내어 사용할 수 있는 플라이휠 에너지 저장장치에 대한 에너지 입, 출력 모델링 및 PWM 인버터 시스템의 해석 및 제어에 관한 논문으로서, 플라이휠 저장장치 특성 및 시스템 모델링에 관해 논의한다.

재질에 따른 플라이휠의 특성과 플라이휠 에너지 저장장치의 속도 특성에 따른 전압과 전류의 변화량을 수식으로 간략화하여 분석하고, 시뮬레이션을 통하여 플라이휠의 에너지 저장상태를 분석하였다. 또한, 부하측 전원의 이상유무에 관계없이 에너지를 공급할 수 있는 Online UPS로 사용하기 위해 PDFF 제어기법을 이용하여 전압제어 및 전류제어의 이중루프 제어로 구성된 단상 PWM방식의 인버터 시스템 제작 하였으며, 실험을 통하여 실제로 0.1[p.u], 1[p.u]에서의 제어되는 전압, 전류제어파형 및 THD 특성에 관하여 평가한다.

### ABSTRACT

This paper presents about energy input and output modeling for a flywheel energy storage system that can store and supply mechanical energy, which is emerging as one of clean energy sources, and the analysis and control of a PWM inverter system.

Moreover, this paper describes flywheel's characteristics related to variations of mechanical and electrical parameters like as voltage and current versus speed characteristics formed as numerical formula and thus simulate behaviour-status of flywheel energy. Also for comparison and analysis between PI control and PDFF control, the modeling, design and analysis to the single-phase full bridge inverter with double loop feedback control is accomplished through numerical description and simulation. Finally, under load condition 0.1[pu], 1[pu], it is validated that harmonic characteristics for voltage and current wave is controlled within 5% below even dynamics condition.

**Key Words** : Flywheel Energy Storage System(FESS), PWM Inverter System, Online UPS, battery, maximum energy storage density

### 1. 서 론

†교신저자 : 정희원, 건국대 전기공학과 교수

E-mail : ghchoe@konkuk.ac.kr

\*정희원, 건국대 전기공학과 박사과정

\*\*정희원, 기초전력연구원 연구원

\*\*\*정희원, 현대기아자동차 연구개발본부 선임연구원

접수일자 : 2007. 5. 3                      1차 심사 : 2007. 5. 16

심사완료 : 2007. 5. 22

최근 전자제품의 사용증가로 인한 전력 사용이 급증하는 현상은 날로 증가하고 있는데, 이러한 원인으로 인하여 전원품질의 저하 및 정전에 의한 계통 전압과의 차단등의 문제가 발생하고 있다. 또한, 우리나라는

여름철 에어컨등과 같은 냉난방기기 사용량의 엄청난 증가로 인해 침투부하의 증가가 유발되고, 이에 따른 전력예비율 확보차원에서 발전용량을 지속적으로 늘리고 있다. 하지만, 막대한 건설 비용의 문제로 인해 한계를 드러내고 있다. 이러한 전력의 집중현상을 완화시키기 위한 노력으로, 보조 전원 장치를 이용한 에너지 저장장치를 사용하고 있는데, 그중에서도 EMB(Electro-mechanical battery) 방식은 최근 에너지의 효율적 이용기술에 대한 관심이 고조되면서 과거에 축전지 등의 화학적 저장방식 대신 플라이휠 관성을 이용, 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 기계적 에너지 저장방식으로 화학전지에 비해 초기 설치 비용은 많지만, 에너지 저장 효율 및 충전시간, 방전심도(DOD)등의 동특성에서 좋은 특성을 갖고 있다<sup>[1-4]</sup>.

본 논문은 플라이휠의 특성과 플라이휠 에너지 저장장치의 속도 특성에 따른 전압과 전류의 변화량을 수식으로 간략화하여 분석하고, 시뮬레이션을 통하여 플라이휠의 에너지 저장상태를 분석하였으며, 단상 PWM방식의 인버터를 모델링하였다.

현재 이러한 인버터 시스템을 제어하는 일반적인 방법인 PI제어기법은 제로점에 의한 정상상태 오차가 존재하기 때문에, 이에 대한 보상이 필요하다. 따라서, 이 논문에서는 PDFF 방식을 이용한 전압제어, 전류제어를 이중루프 제어회로를 구성하여 각각의 제어값을 계산하고, 출력특성을 시뮬레이션을 하여, 영점에 의한 과도상태 및 정상상태 특성을 개선, 또한 위상지연 특성도 동기 신호의 샘플값을 조절하는 방식으로 개선하여, PI 제어 시스템의 응답특성과 비교분석도 함께 수행하였다. Powersim 사의 Psim tool을 이용하여 시뮬레이션을 하여 부하특성을 확인하였다. 그리고, 실제로 DSP(TMS320C31)를 이용한 UPS 인버터 시스템을 제작하였고, 실험은 부하를 저항부하로 하였고, 실제로 0.1[p.u],1[p.u]에서의 제어되는 전압, 전류제어 파형과 최대부하로의 변동시에 발생하는 과도상태등을 측정하였고, 시뮬레이션 결과와 비교 분석을 하였다. 또한 부하에서의 전압, 전류에 대한 THD, 부하변동시에 발생하는 THD 변화율도 Power Analyzer를 통하여 측정하고 분석하였다.

## 2. 플라이휠 저장장치

### 2.1 플라이휠 에너지 저장장치

플라이휠 에너지 저장장치는 축전지 등의 화학적 저

장방식 대신 플라이휠의 관성을 이용, 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 기계적 에너지 저장방식의 에너지 저장장치로서 주로 남거나 소실되는 전기에너지를 기계적 회전 운동 에너지로 바꿔 저장한 뒤 필요할 때 원래의 전기 에너지로 재생해 꺼내 쓰는 장치이다<sup>[5]</sup>. 에너지 저장 시에는 전기적인 에너지로 플라이휠 내부에 존재하는 전동발전기를 전동기로 동작시켜 전기에너지를 플라이휠의 회전관성모멘트를 통한 기계에너지로 저장하고, 나중에 전원이나 파워품질의 이상이 발생하면 플라이휠에 저장되어 있던 기계적인 에너지를 다시 전동발전기를 발전기로 동작시켜서 전기에너지로 변환시키고 이것을 부하에 공급할 수 있게 하는 에너지 변환장치를 말한다<sup>[2-3]</sup>. 그림 1은 플라이휠 에너지 저장장치의 기본 개념도를 나타내고 있다.

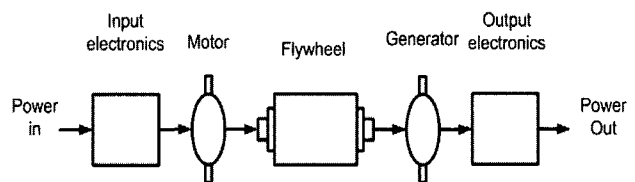


그림 1 플라이휠 에너지 저장장치의 구성도  
Fig. 1 The block diagram for flywheel energy storage system

플라이휠 에너지 저장장치는 회전관성 모멘트 성질을 이용하여 동작이 된다. 모든 질점에 대한 운동량으로 정의한다면 식 (1)과 같이 정의가 가능하고, 그때의 회전관성 모멘트를 나타낼 수 있다.

$$L = \sum_i L_i = \sum_i (m_i \cdot r_i^2) \omega = J \omega \tag{1}$$

$$J = \sum_i m_i \cdot r_i^2$$

질량분포가 일정한 경우에는 각 질점에 대한 질량성분이 같기 때문에, 회전 관성 모멘트는 식 (2)로 표현 가능하다.

$$J = \int_m r^2 dm = \int_v \rho \cdot r^2 dv \tag{2}$$

### 2.2 플라이휠 에너지 저장장치특성

플라이휠의 에너지 저장특성을 고려하는데 가장 중요한 두 가지 요인은 전력밀도[kW/kg]와 에너지밀도

[Wh/kg]이다. 전력밀도는 에너지를 출력하는 밀도로서 전동/발전기의 출력밀도를 말한다. 최대 기대할 수 있는 수치는 30[kW/kg] 정도이다. 에너지밀도는 플라이휠에 저장할 수 있는 에너지 저장밀도를 말하는 것이다. 에너지 저장밀도는 재료의 특성에 따라서 다르게 나타나는데, 그림 2와 그림 3을 통해서 그 특성을 나타내었다. 동일 재료상에서 최대 에너지 저장밀도는 재료의 밀도와 반비례로 증가하는 특성을 알 수 있고, 인장강도에 비례로 증가하는 특성을 볼 수 있다<sup>[1]</sup>.

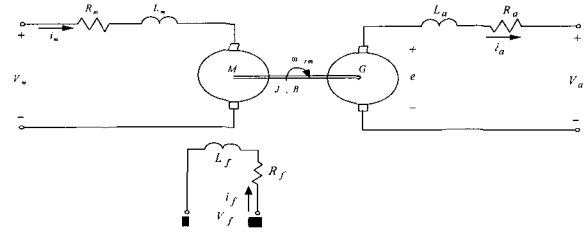


그림 4 정상상태의 플라이휠 동작회로도  
Fig. 4 Circuit diagram under the steady-state.

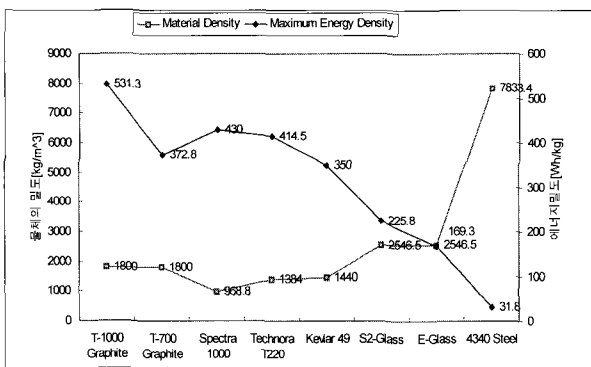


그림 2 플라이휠 재료에 따른 밀도와 최대 에너지 저장밀도의 관계

Fig. 2 The relation of material density and maximum energy storage density

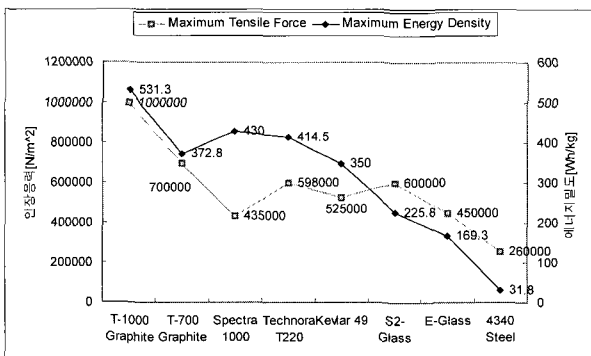


그림 3 인장강도와 최대 에너지 저장밀도의 관계

Fig. 3 The relation of hoop stress and maximum energy storage density

### 2.3 플라이휠 저장장치 시스템

플라이휠의 에너지 저장량과 속도관계를 수식으로 표현하려면, 정상상태 동작시와 정전동작시로 나누어서 확인할 수 있다.

#### ① 정상상태 에너지 저장량 고려시

$$E_n = \frac{1}{2} J \omega_o^2 \tag{3}$$

$$J = \frac{2 \cdot E_n}{\omega_o^2} \tag{4}$$

로 고려하여 초기상태를 계산하고, 출력에너지가 시간에 대해 일정한 정출력 부하 가정하고, 플라이휠 에너지 저장장치의 에너지 손실률을  $\alpha$  [%], 출력단 인버터 에너지 손실률을  $\beta$  [%]로 가정하면, 식 (5)로 유도할 수 있다.

$$B_m = \frac{100 \cdot P_o}{\beta \cdot \omega_o^2} \cdot \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \tag{5}$$

여기서,  $B_m$  : 플라이휠 마찰계수

$J$  : 회전관성모멘트 [ $kg \cdot m^2$ ]

$P_o$  : 순수 부하측 출력전력

정상상태시의 플라이휠은 전원에서 에너지를 공급받고, 플라이휠은 손실을 제외하면 에너지를 계속 저장하고 있는 상태가 된다. 그때 등가방정식은 식 (6)~(10)로 나타낼 수 있다.

$$T_m = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + T_L \tag{6}$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_o} = \frac{10000 \cdot P_o}{\alpha \cdot \beta \cdot \omega_o} \tag{7}$$

$$T_L = \frac{100 \cdot P_o}{\beta \cdot \omega_o} = K \cdot \Phi \cdot i_a = K_T \cdot i_a \tag{8}$$

$$i_a = \frac{P_o}{V_{out}}, \quad K_T = \frac{100 \cdot V_{out}}{\beta \cdot \omega_o} \quad (9)$$

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega_{rm} = K_E \cdot \omega_{rm}, \quad K_E = \frac{E_a}{\omega_{rm}} \quad (10)$$

② 전원이상시 에너지 저장량 고려시

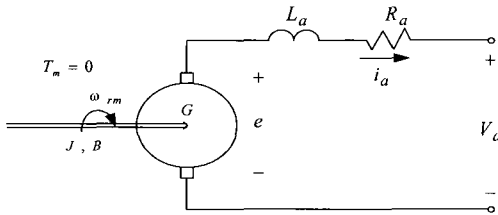


그림 5 전원이상시 플라이휠 동작회로도  
Fig. 5 Circuit diagram under the power source trouble

전원에 이상이 있을 경우에는 전원을 차단하고 전력을 플라이휠에 저장된 에너지를 부하에 공급하게 된다. 출력에너지가 시간에 대해 일정한 정출력 부하가 정하고 등가회로를 수식으로 전개하면 식 (11)으로 전개된다.

$$T_m = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + T_L, \quad T_m = 0 \quad (11)$$

식 (11)을 속도와 시간에 따른 에너지 저장량을 구하면, 식 (12)와 식 (13)으로 구할 수 있다.

$$\omega_{rm}(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot C}{J \cdot \beta} \cdot e^{-\frac{2B}{J}t} - \frac{100 \cdot P_o}{B \cdot \beta}} \quad (12)$$

$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega(t)^2 = \frac{C}{\beta} \cdot e^{-\frac{2B}{J}t} - \frac{50 \cdot J \cdot P_o}{B \cdot \beta} \quad (13)$$

여기서, 
$$C = \frac{J \cdot (B \cdot \beta \cdot \omega_o^2 + 100 \cdot P_o)}{2B}$$

3. PWM 인버터 시스템 제어기

본 논문에서는 서론에서 언급한 바와 같이 영점의 영향에 의한 과도상태에서의 전압응답의 오버슈트를 줄이고자 제어기의 폐루프 전달함수의 극의 위치를 일정하게 유지하며 영점의 위치를 가변 할 수 있는 PDFF 제어기를 이용하여 시스템을 구성하였으며, 이

를 비교 분석하기 위하여, PI 제어 시스템도 모델링을 같이 하였다. 따라서, 식(14)~(19)로 PI 제어방식으로 제어기를 모델링 하였고, 식 (20)~(25)로 PDFF 제어방식을 이용하여 모델링을 하고 그림 7~10 으로 블록선도를 나타내었다. 일반적인 단상 PWM 인버터의 제어기에는 전압제어기, 전류제어기가 존재하는데 대부분의 인버터의 경우에는 외부에는 전압제어루프가 존재하고, 전압제어루프 안에 전류제어루프가 존재하는 이중루프 제어방식을 사용한다<sup>[6-7]</sup>. 그림 6은 이중루프 제어방식을 갖는 인버터 제어시스템을 나타낸다.

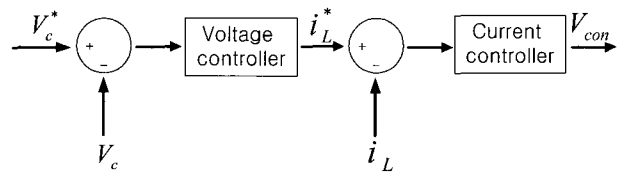


그림 6 이중제어루프를 갖는 인버터 시스템 제어 블록선도  
Fig. 6 Block diagram of the inverter system with double control loop

$$V_0 = (V_0^* - V_0) \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{Cs} \quad (14)$$

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{K_p}{C} \cdot \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s^2 + \frac{K_p}{C}s + \frac{K_i}{C}} \quad (15)$$

$$K_p = 2\zeta \cdot \omega_n \cdot C, \quad K_i = \omega_n^2 \cdot C \quad (16)$$

$$I_L = \left( (I_L^* - I_L) \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) + K_{mc} \cdot V_0 \right) \frac{V_{dc}}{V_{tri}} - V_0 \frac{1}{L_s} \quad (17)$$

$$\frac{I}{I^*} = \frac{K_p}{L} \cdot \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s^2 + \frac{K_p}{L}s + \frac{K_i}{L}} \quad (18)$$

$$K_p = 2\zeta \cdot \omega_n \cdot L, \quad K_i = \omega_n^2 \cdot L \quad (19)$$

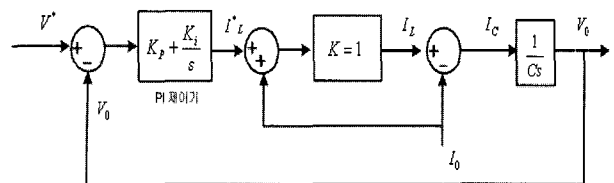


그림 7 PI 제어기를 이용한 전압제어 블록선도  
Fig. 7 Block diagram of voltage control with PI control

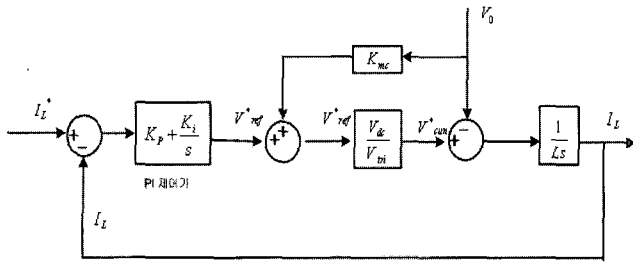


그림 8 PI 제어기를 이용한 전류제어 블록선도  
Fig. 8 Block diagram of current control with PI control

$$V_0 = \left[ (V_0^* - V_0)(\alpha \cdot K_p + \frac{K_i}{s}) - (1-\alpha)K_p \right] \frac{1}{C_s} \quad (20)$$

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{\alpha K_p}{C} \cdot \frac{\left( s + \frac{K_i}{\alpha \cdot K_p} \right)}{\left( s^2 + \frac{K_p}{C} s + \frac{K_i}{C} \right)} \quad (21)$$

$$K_p = \frac{2\zeta \cdot \omega_n \cdot C}{\alpha}, \quad K_i = \omega_n^2 \cdot C \quad (22)$$

$$I_L = \left( (I_L^* - I_L)(\alpha \cdot K_p + \frac{K_i}{s}) - (1-\alpha)K_p + K_{mc} \cdot V_0 \right) \frac{1}{Ls} \quad (23)$$

$$\frac{I}{I^*} = \frac{\alpha \cdot K_p \cdot V_{dc}}{V_{tri} \cdot L} \cdot \frac{\left( s + \frac{K_i}{\alpha \cdot K_p} \right)}{s^2 + \frac{\alpha \cdot K_p \cdot V_{dc}}{V_{tri} \cdot L} s + \frac{K_i \cdot V_{dc}}{V_{tri} \cdot L}} \quad (24)$$

$$K_p = \frac{2\zeta \cdot \omega_n \cdot V_{tri} \cdot L}{\alpha \cdot V_{dc}}, \quad K_i = \frac{\omega_n^2 \cdot V_{tri} \cdot L}{V_{dc}} \quad (25)$$

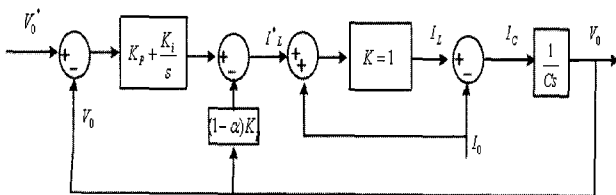


그림 9 PDFF 제어기를 이용한 전압제어 블록선도  
Fig. 9 Block diagram of voltage control with PDFF control

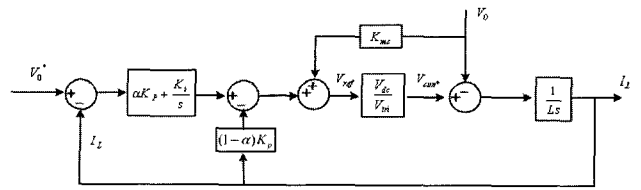


그림 10 PDFF 제어기를 이용한 전류제어 블록선도  
Fig. 10 Block diagram of current control with PDFF control

PDFF 제어기의 특성은  $\alpha$ 에 의해서 특성을 변화시킬 수가 있는데, 영점특성과 위상지연 특성에 영향을 미친다. 이러한 사항은 Matlab tool을 이용하여, 보드 선도를 작성 하였고, 그림 11에 전압제어기의 보드선도를 나타내었다.

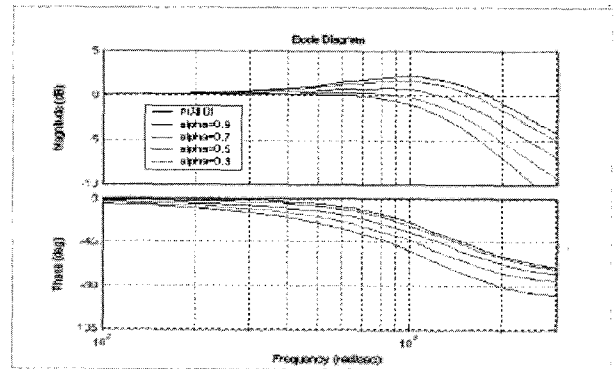


그림 11 PI, PDFF 전압제어의 보드선도  
Fig. 11 Bode plot of voltage control with PI, PDFF control

$\alpha$ 값은 크기가 0에서 1까지 바뀌는데, 여기서는 간단히 비교를 하기 위해  $\alpha$ 가 0.9, 0.7, 0.5, 0.3 일 때만을 나타내었다. 사용주파수 상에서의 PI제어기의 영점특성에 의한 게인 값이 0.687[dB]으로 가장 크게 나타나고, PDFF 제어기는  $\alpha$ 값이 0.3일때 0.0346[dB]으로 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 즉,  $\alpha$ 값이 작아질 수록 영점 효과는 사라지고 있음을 알 수 있다.

위상효과는 PI제어기의 위상 지연이  $-0.12[\text{deg}]$ 이고, PDFF 제어기는  $\alpha$ 값이 0.3일때  $-14.7[\text{deg}]$ 로 더 큰 위상지연이 생김을 볼 수 있다. 전류제어기는 전압제어기의 루프 안에 존재하는데, 이상적으로 동작하기 위해서는 전압제어기 보다 빠른 응답특성을 보여야 한다. 따라서, 위의 전류제어기는 전압제어기 보다 대역폭을 전압제어기 보다 5배 이상 크게 하였다. 그런 결과 상용주파수 대역에서의 전류제어기 보드선도는 PI 제어방식이나, PDFF 제어방식에 있어서, 영점효과나 위상지연 현상에서 별다른 차이를 보이지 않았다.

### 4. 시뮬레이션

플라이휠 에너지 저장장치를 이용하여 부하에 AC 전력을 공급하기 위한 단상 PWM 인버터의 정상상태 및 과도상태에 대한 시뮬레이션 및 실험을 하였다. 본 논문에서 구현한 시스템의 스위칭주파수는 10[KHz]이며, 시뮬레이션 또한 10[KHz]의 스위칭주파수로 구현하여 분석하였고, 본 시스템의 결과와 비교 분석하였다.

시뮬레이션은 단상 PWM 인버터를 모델링하여 Powersim 사의 시뮬레이션 툴인 Psim을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 표 1은 시뮬레이션에 관련한 파라미터를 나타내고 있다. 위의 파라미터를 이용하여 PDFF 제어기를 구현하고, 이를 시뮬레이션 하였다. 그림 12는 단상 PWM 인버터 시뮬레이션 회로도를 나타낸다.

시뮬레이션은 Unipolar 방식의 변조방법을 사용하여 단상 PWM 인버터를 시뮬레이션을 하였고, 부하조건은 3[kVA]를 1[p.u]로하고 0.1[p.u]에서 1[p.u]까지 부하를 변동하는 조건으로 저항부하를 사용하였다. 또한 시뮬레이션 분석중에서 온도조건 및 스위치 특성과 같은 세세한 특성은 여기서 배제하였다. 온도조건 및 스위치 특성은 출력특성에 미치는 영향이 극히 미미하기 때문에 이 시뮬레이션 분석에서는 생략한다.

그림 13은 부하가 순수 저항부하 0.1[p.u]라고 했을 때의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 위쪽 상단의 파형은 LC filter 입력단의 변조 전압을 나타내고 있다. 전압의 크기는 입력전압인 400[V]가 된다. 두 번째 그림은 출력전압을 나타내고 있다. 출력전압이 Reference를 잘 추종하고 있다는 것을 보여준다. 하지만, 저주파 영역에서의 영점효과에 의한 출력전압의 크기가 Reference 전압에 비해 약간 증가했다는 것을 볼 수 있는데, 이것은 Reference를 조절하여 실제로 원하는 출력전압을 얻을 수 있다. 세 번째 그림은 인덕턴스에 흐르는 전류, 커패시터 및 부하측에 흐르는 전류를 나타내고 있다. 전류의 피크치는 7[A]를 넘지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 14는 부하가 순수 저항부하이고 1[p.u]라고 했을 때의 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 그림 13과 마찬가지로 정상상태 응답을 얻을 수 있다. 세 번째 그림에서 20.8[A]정도의 전류가 인덕턴스에 흐르고, 부하측에는 19.6[A]정도의 전류가 발생하는 것을 볼 수 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 The parameters of simulation

항 목	설정값
최대정격용량	3[kVA]
출력전압	220[V]
스위칭 주파수	10[kHz]
인버터 입력 직류전압	400[V]
필터 인덕턴스	3[mH]
필터 커패시턴스	50[μF]
전압제어기 고유주파수	1885[rad/s]
전류제어기 고유주파수	7539[rad/s]
감쇄비	0.707

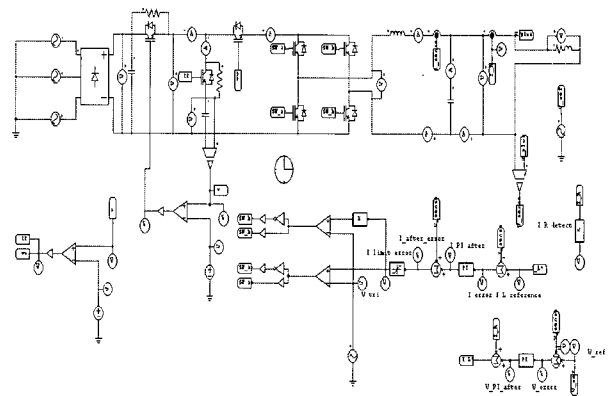


그림 12 단상 PWM인버터 시뮬레이션 회로도

Fig. 12 Simulation circuit of single-phase PWM inverter

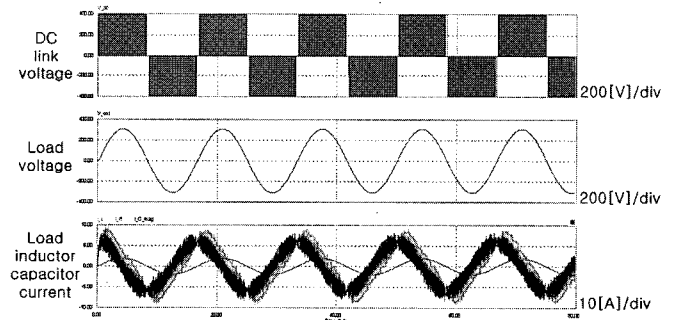


그림 13 0.1[p.u]의 저항부하시 출력특성

Fig. 13 Output characteristics of 0.1[p.u] resistive load

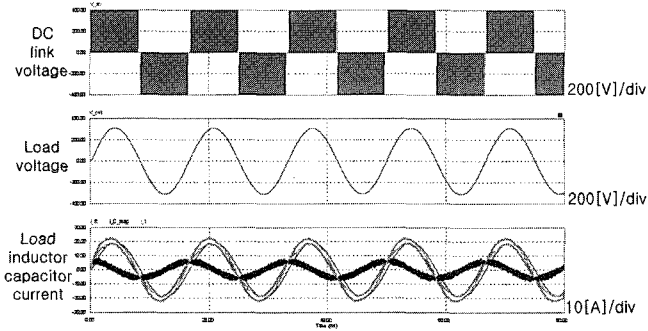


그림 14 1[p.u]의 저항부하시 출력특성  
Fig. 14 Output characteristics of 1[p.u] resistive load

### 5. 실험

실험에서 구현한 시스템의 스위칭주파수는 10[KHz]이며 실제로 DSP를 이용한 단상 PWM 인버터 시스템을 제작하여, 저항부하를 갖고 정격부하시 실험 파형과 및 THD 특성을 확인하였고, 시뮬레이션과 비슷한 결과가 나왔음을 확인하였다.

그림 15는 전압변조를 위한 sine table 함수와 제어기에서 만들어진 스위칭 변조파형이고, 그림 16~18은 부하가 0.1[p.u] 저항부하일때의 부하전압, 부하전류, 인덕터전류, 커패시터전류 및 파형을 나타내고 있고, 그림 19~21은 1[p.u]의 저항부하일때의 부하전압, 부하전류, 커패시터전류 및 인덕터전류 파형을 나타내고 있다. 그림 22는 FFT 분석에 의한 부하정격 및 과도상태시 THD[%]의 변동특성을 나타낸다. 실제적으로 전압, 전류 모두 저항부하에서 3[%]미만의 결과가 나왔다.

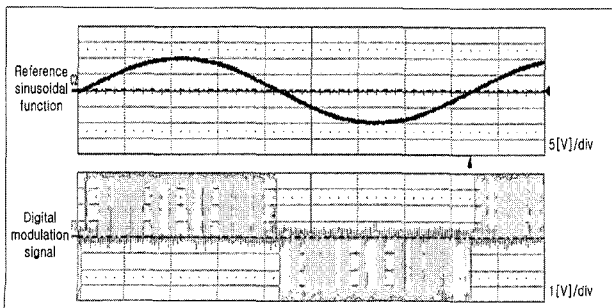


그림 15 레퍼런스 함수 및 디지털 변조신호  
Fig. 15 Reference function and digital modulation signal

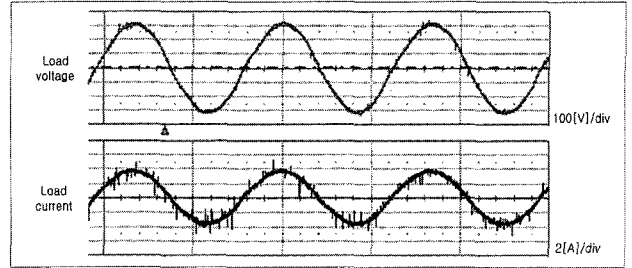


그림 16 0.1[p.u] 저항부하시 부하전압 및 부하측 출력전류  
Fig. 16 Load voltage and load current of 0.1[p.u] resistive load

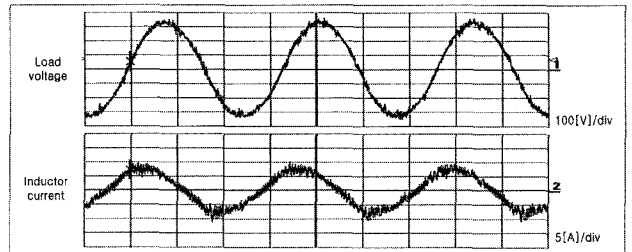


그림 17 0.1[p.u] 저항부하시 부하전압 및 인덕터 전류  
Fig. 17 Load voltage and inductor current of 0.1[p.u] resistive load

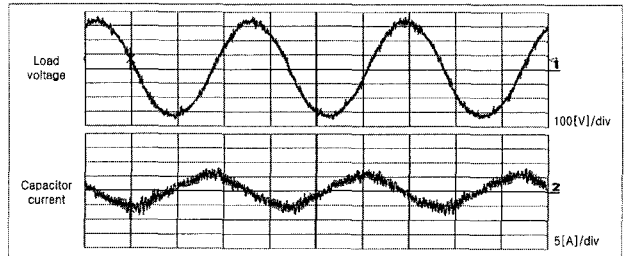


그림 18 0.1[p.u] 저항부하시 부하전압 및 커패시터전류  
Fig. 18 Load voltage and capacitor current of 0.1[p.u] resistive load

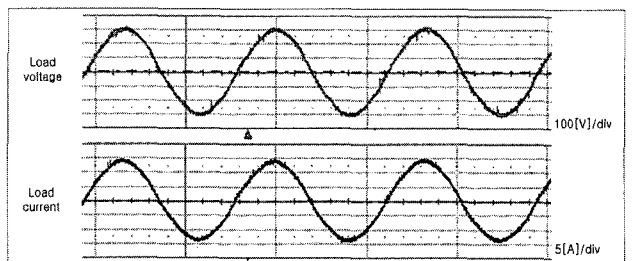


그림 19 1[p.u] 저항부하시 부하전압 및 부하전류  
Fig. 19 Load voltage and load current of 1[p.u] resistive load

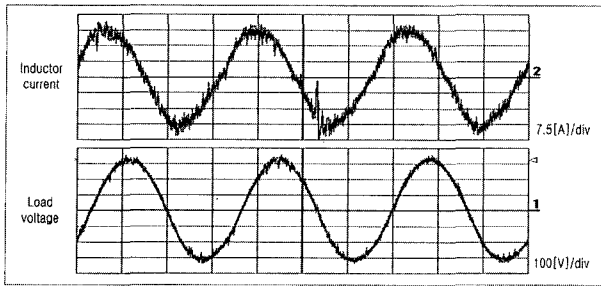


그림 20 1[p.u] 저항부하시 인덕터전류 및 부하전압  
Fig. 20 Inductor current and load voltage of 1[p.u] resistive load

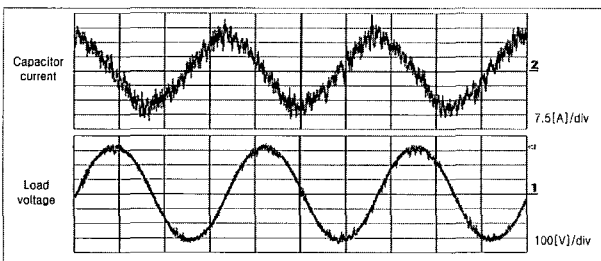


그림 21 1[p.u] 저항부하시 커패시터전류 및 부하전압  
Fig. 21 Capacitor current and load voltage of 1[p.u] resistive load

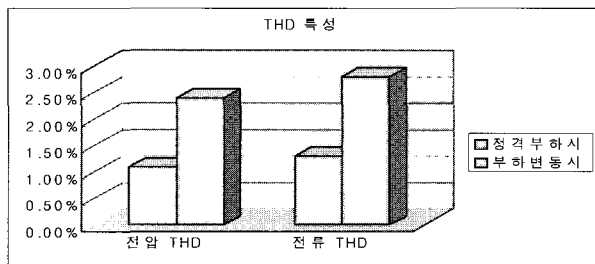


그림 22 정격부하 및 가변부하시의 THD 분석  
Fig. 22 Analysis of THD on nominal load and transient load

## 6. 결 론

본 논문은 재질에 따른 플라이휠의 특성과 플라이휠 에너지 저장장치의 속도 특성에 따른 전압과 전류의 변화량을 수식으로 간략화하여 분석하였고, 시뮬레이션을 통하여 플라이휠의 에너지 저장상태를 분석하였으며, 부하측에 전원의 이상유무에 관계없이 에너지를 공급할 수 있는 Online UPS로 사용하기위해 단

상 PWM 방식의 인버터를 모델링하고, Powersim 사의 Psim tool을 이용하여 시뮬레이션을 하여 부하특성을 확인하였다.

PI제어기법에서 발생하는 영점에 의한 정상상태 오차를 저감하기 위해 PDFF 제어를 이용하여 시뮬레이션 하고 PI제어방식과 비교함으로써, 영점 효과 저감 특성을 확인하였다. 그리고, 실제로 DSP를 이용한 단상 PWM 인버터 시스템을 제작하여, 저항부하를 갖고 정격부하 및 변동부하 특성을 확인하였고, 시뮬레이션도 비슷한 결과가 나왔음을 확인하였다.

향후 과제로는 얻어진 이론과 설계를 바탕으로 단상 UPS 인버터시스템에 플라이휠 에너지 저장장치와 연계 운전을 통하여 플라이휠 저장장치의 운전특성과 부하출력 특성, DC link voltage 변동특성, 부하변동시 속도특성, 고장에 의한 계통전원과의 분리시 전압변동에 따른 전류특성 등을 실험적 고찰을 통해 제시 및 분석하여야 할 것이다.

이 논문은 2004년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

## 참 고 문 헌

- [1] J.G.Bitterly, "Flywheel technology past, present, and 21st Century projections", Energy Conversion Engineering Conference, Aug. 1997, pp. 2312-2315.
- [2] R. S. Weissbach, G. G. Karady, R. G. Farmer, "A combined uninterruptible power supply and dynamic voltage compensator using a flywheel energy storage system", Power Delivery, IEEE Trans. Vol. 16, No. 2, 2001, pp. 265-270.
- [3] R. G. Lawrence, K. L. Craven, G. D. Nichols, "Flywheel UPS", Industry Applications Magazine, IEEE, Vol. 9, Issue. 3, May-June. 2003, pp.44-50.
- [4] 정환명, "UPS응용을 위한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 구동 및 제어". 충북대학교 공학박사 학위논문, 2001
- [5] Zhang Jiancheng, Huang Lipei, Chen Zhiye, "Research on flywheel energy storage system for power quality", PowerCon Proc., 2002, pp. 496-499.
- [6] O. Kukrer, H. Komurcugil, N. S. Bayindir, "Control strategy for single-phase UPS inverters", Electric Power Applications, IEEE Proc. Vol. 150, Issue. 6, Nov. 2003, pp. 743-746.
- [7] M. J. Ryan, W. E. Brumsickle, R. D. Lorenz, "Control



topology option for single-phase UPS inverters" IEEE  
Transaction on Industry Application, Vol. 33, Issue.  
2, March-April, 1997, pp.493-50.

## 저 자 소 개



### **박종찬(朴鍾贊)**

1979년 5월 20일생. 2003년 건국대 공대  
전기공학과 졸업. 2003~2005년 동 대학  
원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재  
동 대학원 전기공학과 박사과정.



### **정병환(鄭柄煥)**

1978년 11월 1일생. 2001년 경성대 공대  
전기공학과 졸업. 2003년 건국대 대학원  
전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학  
원 전기공학과 박사과정. 현재 기초전력  
연구원 연구원.



### **최규하(崔圭夏)**

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대  
공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대  
학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년  
동 대학원 전기공학과 졸업(공박).  
1987년 오레곤주립대 Post-Doc. 1997  
년 건국대 연구처장 및 2002년 교무처장 역임. 현재  
건국대 전기공학과 교수 및 에너지신기술연구센터장.  
현재 당 학회 회장.



### **최해웅(崔海龍)**

1973년 2월 8일생. 1996년 건국대 공대  
전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기  
공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전  
기공학과 졸업(공박). 현재 현대기아자동  
차 연구개발본부 선임연구원.