

## Power Control of a Hoist System Using Supercapacitor

金相敏<sup>†</sup> · 兪炫在<sup>\*</sup> · 薛承基<sup>\*\*</sup>  
 (Sang-Min Kim · Hyun-Jae Yoo · Seung-Ki Sul)

**Abstract** - This paper proposes a method that distributes the load power and stores the regenerated energy for a hoist-load system using the supercapacitor, an energy storage device. The crane, which is a representative hoist-load system, operates in two modes. The first is the hoist-up mode in which the load container is lifted up; the maximum power is required at the end of acceleration. The second is the hoist-down mode in which the load container is lifted down; the regenerated energy is wasted by the resistor. In this paper, the supercapacitor stores the regenerated energy in the hoist-down operation and supplies the peak power demand in the hoist-up operation. The same structure as the commercially available three-phase inverter is proposed as a bidirectional dc-dc converter to charge and discharge the supercapacitor. A power control algorithm is proposed to optimize the load sharing between the generator and the supercapacitor. Using the proposed method, it is expected that the generator size can be cut down to one third of the original one; it leads to the reduction of the fuel consumption, noise and air pollution. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

**Key Words** : Supercapacitor, 디젤엔진 발전기, 권상부하, 회생발전, DC-DC Converter

### 1. 서 론

수퍼커패시터는 현재 하이브리드 자동차의 피크전력 보조 및 회생제동, 엘리베이터 시스템의 전력 평활화(power smoothing), Unified Power Quality Controller(UPQC)의 voltage sag의 보상 등의 전력 시스템에 활발히 적용되고 있다[1]-[4]. 수퍼커패시터는 다음과 같은 2가지 주목할 만한 특징이 있다. 첫째, 에너지 밀도가 기존의 전해 캐패시터에 최대 200배 이상 크다. 둘째, 전력 밀도가 배터리 보다 20배 이상 크다. 즉, 수퍼커패시터는 동일한 부피의 전해 캐패시터에 비해 더 많은 에너지를 저장할 수 있고 배터리에 비해 순시적으로 더 많은 전력을 공급할 수 있다[5]-[6]. 이러한 특징으로 인해 수퍼커패시터는 RTGC(Rubber Tyred Gantry Crane)와 같은 권상 부하 시스템에 적용되어 에너지 버퍼로서의 역할을 수행할 수 있다[7].

RTGC는 버스, 트럭과 같이 고무바퀴를 장착한 크레인으로서 항만 야적장 위를 운행한다. RTGC는 동력원으로 디젤 엔진을 사용하고 전동기로 구동된다. 엔진의 용량은 Hoist-Up 동작에서 필요한 최대 전력을 기준으로 선정된다. 그러나 일반적으로 Hoist-Up 운전은 전체 운전시간의 20%

미만에 불과하다. 또한 Hoist-Down 운전에서 회생되는 에너지는 제동저항에 의하여 열에너지로 소모된다.

본 논문은 수퍼커패시터를 이용한 에너지 저장 장치를 이러한 권상부하 시스템에 적용하는 방법을 제시한다. 실험에 사용한 수퍼커패시터는 수백개의 작은 수퍼커패시터 셀들이 직병렬로 연결된 구조를 가진다. 본 논문에서 수퍼커패시터의 주요한 기능은 피크 전력이 필요할 때 에너지를 공급하고 회생발전시에 에너지를 흡수하는 것이다. 따라서 디젤엔진 발전기는 평균전력만을 공급하도록 선정할 수 있어 기존 시스템에 비하여 대략 1/3 크기의 용량으로 줄어 들 수 있다. 엔진 발전기와 수퍼커패시터 사이의 전력분배를 최적화하기 위해서는 발전량에 대한 정보가 필요하다. 본 논문에서는 발전기의 추정된 주파수 정보를 이용하는 간접제어방법을 제안한다. 주파수는 전역통과필터(All-Pass Filter, APF)를 사용한 단상 PLL방법을 이용하여 추정된다[8]. 또한 APF의 자연 주파수(Natural Frequency)를 추정 주파수에 따라 가변시키는 개선된 방법을 제안한다. 제안한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 다양한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

### 2. 권상부하 시스템의 모델링

그림 1에 보인 대표적인 권상부하 시스템인 RTGC의 Hoist 전동기에 대한 전력 및 토오크 식은 다음과 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$T_e^* = (J_{load}g/\gamma + J_{total}\alpha)\eta_{mech} \quad (1)$$

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 서울대 工大 電氣컴퓨터工學部 後博士課程  
 E-mail : gpkim74@eepeel.snu.ac.kr

<sup>\*</sup> 學生會員 : 서울대 工大 電氣컴퓨터工學部 博士課程

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 서울대 工大 電氣컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 8月 23日

最終完了 : 2005年 10月 4日

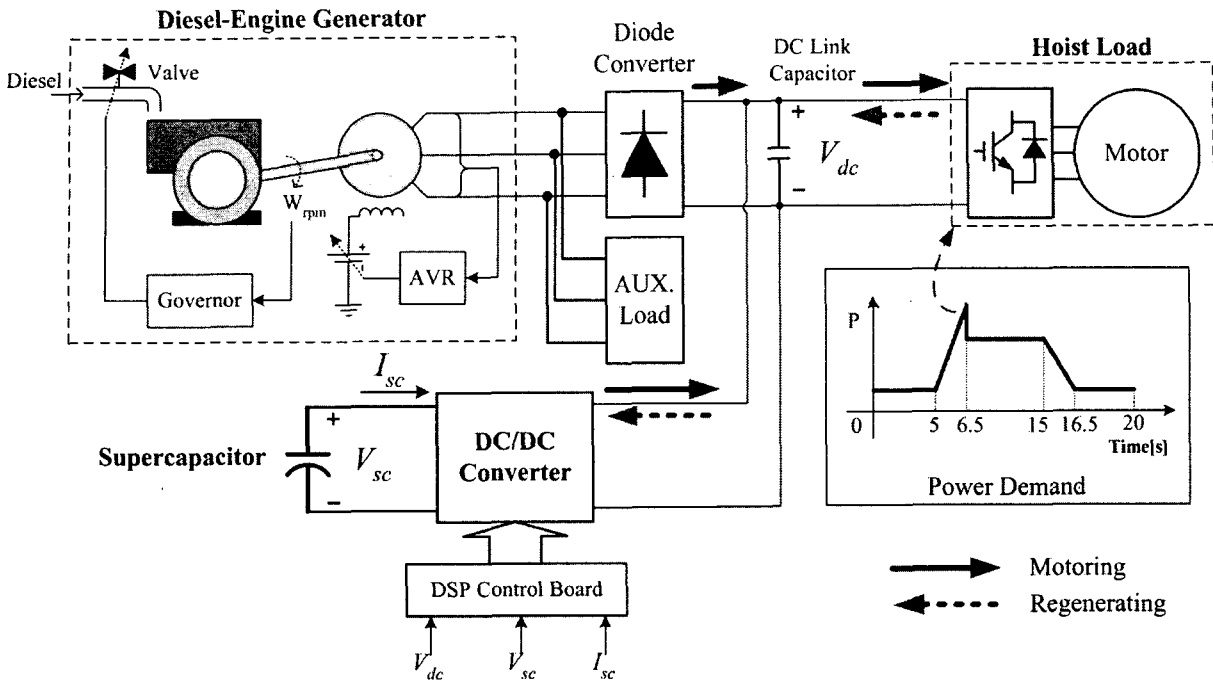


그림 1 하이브리드 RTGC 전력 시스템 개념도.  
Fig. 1 Block diagram of the hybrid RTGC power system.

$$P = (T_e^* \omega_{rm}) \eta_{motor} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{d\omega_{rm}}{dt} \quad (3)$$

여기서  $J_{load}$  : 전동기에서 본 부하의 등가 관성,  $J_{total} = J_{load} + J_{motor}$ ,  $J_{motor}$  : 전동기의 관성,  $\gamma$  : 전동기의 반지름 [m],  $g$  : 중력 가속도 [ $m/s^2$ ],  $\alpha$  : 전동기의 각가속도 [ $rad/s^2$ ],  $\omega_{rm}$  : 전동기의 각속도 [ $rad/s$ ],  $\eta_{mech}$  : 기계계의 효율,  $\eta_{motor}$  : 전동기의 효율.

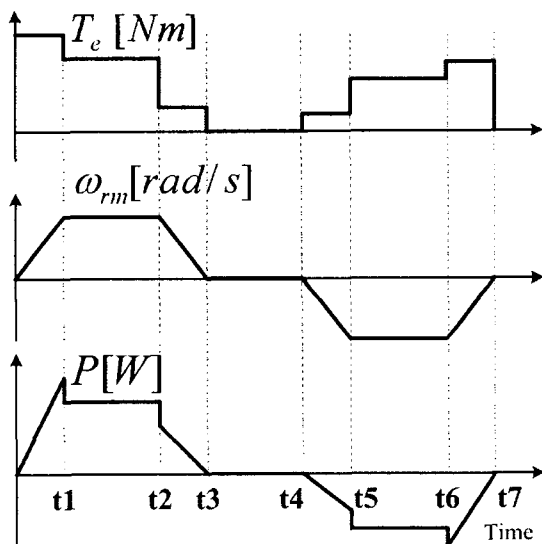


그림 2 Hoist 전동기의 토크, 속도 및 전력 파형.  
Fig. 2 Torque, speed and power waveforms of the hoist machine.

Hoist 운전에 대한 가속도 명령은 미리 주어지며, 이로부터 유도된 전동기의 토크, 속도 및 전력에 대한 파형은 그림 2와 같다 (t1-t3: Hoist-Up 운전, t4-t7: Hoist-Down 운전).

### 3. 슈퍼커패를 이용한 에너지 저장 시스템

슈퍼커패를 이용한 에너지 저장 시스템을 그림 3과 같이 설계, 제작하였다. 직류 링크와 슈퍼커패 사이의 전력변환을 담당하는 양방향 dc-dc 컨버터는 상용 3상 인버터와 동일한 구조로 설계하였다. 이것은 단상 컨버터 3개가 병렬연결된 구조로서 각각의 컨버터들을 위한 스위칭 신호는 서로 120도의 위상차를 가지도록 설계되었다. 이 방법은 크게 3가지

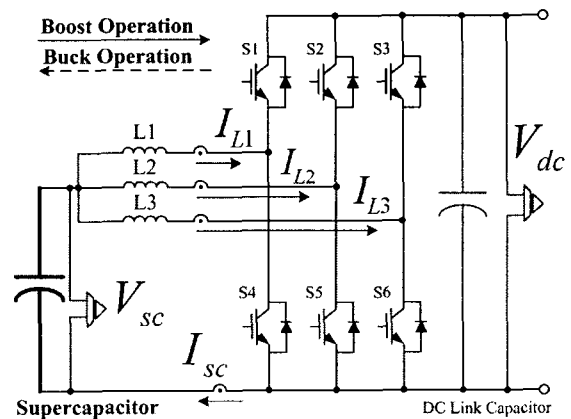


그림 3 슈퍼커패를 이용한 에너지 저장 시스템.  
Fig. 3 Energy storage system using supercapacitor.

의 장점이 있다. 첫째, 현재 상용화 된 제품을 그대로 쓸 수 있다. 둘째, 스위칭 리플을 크게 저감하여 전류 파형을 개선할 수 있다. 셋째, 3개의 모듈이 병렬연결된 구조이므로 한 모듈이 고장나더라도 다른 2개의 모듈로 동작이 가능하다는 것이다.

제안된 시스템의 충방전 특성을 시험하기 위하여 Matlab/Simulink의 PLECS 패키지를 이용한 회로수준 시뮬레이션을 수행하였다[9]. 그림 4는 슈퍼커패시터 직류 링크단에 220kW의 전력을 공급할 때 직류 링크 전압을 630V로 유지하도록 제어되는 dc-dc 컨버터의 전압, 전류의 시뮬레이션 결과파형이다. 전압제어 주기로 1[ms], 전류 제어 주기로 0.1[ms]를 사용하였다.

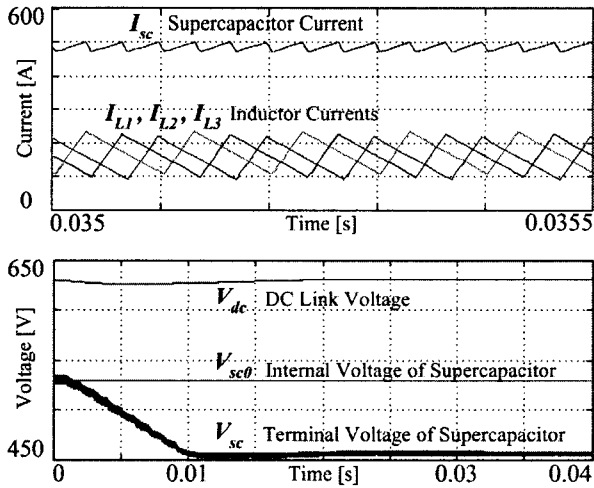


그림 4 dc-dc 컨버터의 시뮬레이션 결과 (슈퍼커패 방전 모드).  
Fig. 4 Simulation results of the dc-dc converter (discharge mode of supercapacitor).

#### 4. 전력 분배 제어

엔진 발전기와 슈퍼커패 사이의 전력 분배를 최적화 하기 위해서는 발전기의 출력전력에 대한 정보가 필요하다. RTGC 시스템은 보조부하가 3상 다이오드의 입력단에 연결되기 때문에 발전기의 출력전력에 대한 정보를 얻으려면 2개의 선간전압과 2개의 상전류를 측정해야 한다. 본 논문에서는 발전기의 Speed Droop 특성을 이용한 간접 제어 방법을 이용하여 발전기의 출력전력을 제어하고자 한다.

##### 4.1 발전기의 Speed Droop 특성

기본적으로 엔진 발전기는 2개의 제어 루프를 가진다. 즉, GCU(Governor Control Unit)는 연료 분사량을 조절하여 엔진 회전속도를 제어하고 AVR(Automatic Voltage Regulator)은 계자 전류를 조절하여 발전전압을 제어한다. 본 논문에서 사용된 발전기의 전압/주파수 기준값은 480Vrms/60Hz이다. 일반적으로 GCU는 발전전력의 증가에 따라 기준속도를 감소시키는 Speed Droop 특성이 있다[10]. 이러한 특성은 두개의 발전기가 하나의 시스템에 연결되어 전력을 공급할 때 두 발전기 사이의 안정된 전력 분배를 위

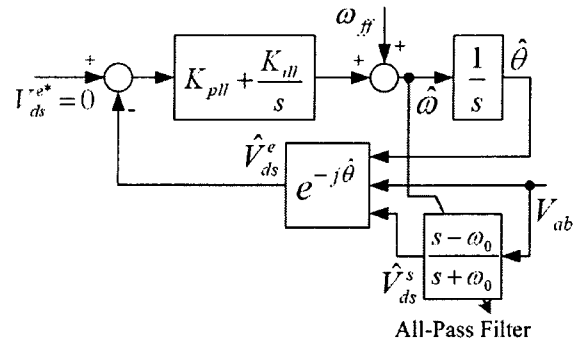


그림 5 주파수 갱신 알고리즘을 적용한 단상 PLL.  
Fig. 5 Single-phase PLL with the frequency-adjustment algorithm.

해 설계된 것이다. 따라서 발전기 주파수는 발전 전력과 직접적인 관계가 있다. 만약 주파수 정보를 알 수 있다면 발전 전력을 간접적으로 제어할 수 있다.

실험을 통하여 얻어진 Speed Droop 특성은 다음 식과 같이 표시될 수 있다.

$$f_{droop} = \frac{1}{K(\tau s + 1)} P_{gen} \quad (4)$$

여기서  $f_{droop}$  : Droop Frequency,  $P_{gen}$  : 발전기 출력전력.

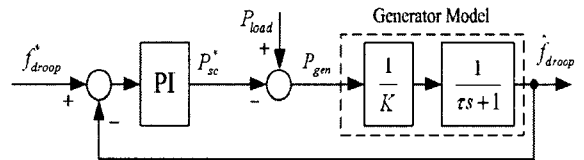


그림 6 주파수 제어기의 블록도( $P_{sc}^*$  : 슈퍼커패의 출력전압,  $P_{load}$  : 부하전동기의 요구전력, 혹은 회생전력,  $P_{gen}$  : 발전기 출력전력).

Fig. 6 Block diagram of the frequency controller ( $P_{sc}^*$  : terminal voltage of supercapacitor,  $P_{load}$  : required or regenerated power from the load machine,  $P_{gen}$  : output power of the generator).

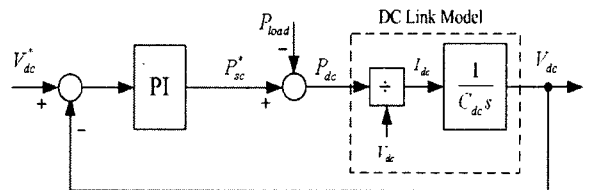


그림 7 전압 제어기의 블록도( $P_{dc}^*$  : 직류링크 캐패시터의 입력전력).

Fig. 7 Block diagram of the voltage controller ( $P_{dc}^*$  : input power of the dc-link capacitor).

### 4.2 제안하는 단상 PLL 방법

본 논문에서는 그림 5와 같이 1개의 선간전압을 이용한 단상 PLL(Phase-Locked Loop) 방법을 이용하여 발전기 주파수를 추정한다. 측정된 선간전압  $V_{ab}$ 는 전역통과필터를 통과하여 90도 위상 지연되고 그 결과 다음 식과 같이 고정좌표계의 d축 전압  $V_{ds}^s$ 를 얻게 된다.

$$V_{ds}^s = \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} V_{as}^s = \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} V_{ab} \quad (5)$$

여기서  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ; 전역통과필터의 자연 주파수,  $f_0=60\text{Hz}$ . 이러한 두 전압을 동기좌표계 dq축으로 좌표변환하여 동기좌표계 d축 전압  $V_{ds}^e$ 를 얻을 수 있다. 그리고 발전기 주파수는 다음 식과 같이 PI 제어기와 전향보상항을 이용하여 추정된다.

$$\hat{\omega} = (K_{pi} + \frac{K_{int}}{s})(-V_{ds}^e) + \omega_{ff} \quad (6)$$

$$f = \hat{\omega} / 2\pi \quad (7)$$

여기서  $\omega_{ff}$ 는 전향보상항이다.

본 논문에서는 발전기 주파수의 변화에 따라 다음 식과 같이 전역통과필터의 자연 주파수를 갱신하는 알고리즘을 제안한다.

$$\omega_0 = \hat{\omega} \quad (8)$$

### 4.3 제어기 설계

실험을 통하여 유도된 발전기 모델을 이용하여 PI 주파수 제어기를 그림 6과 같이 설계하였다. 추정된 주파수를 이용하여 다음식과 같이 Droop Frequency를 계산한다.

$$f_{droop} = f_{gen0} - f_{gen} \quad (9)$$

여기서  $f_{gen0}$ 는 무부하일 때의 발전기 주파수이다. 또한 직류 링크 캐패시터의 동특성을 이용하여 그림 7과

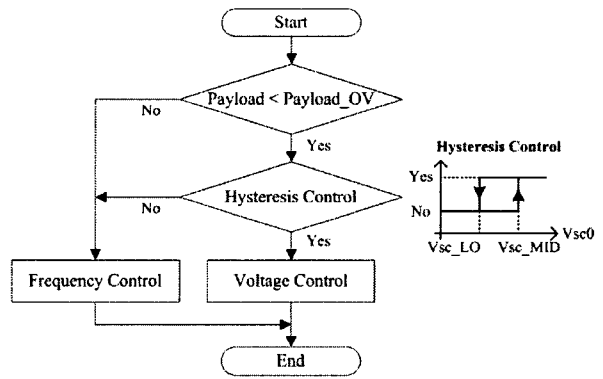


그림 8 주파수 및 전압 제어기 사이의 절환 방법에 대한 개략적인 흐름도 ; Payload=부하의 무게 [ton].

Fig. 8 Flowchart of changeover method between frequency and voltage controller ; Payload = weight of the load [ton].

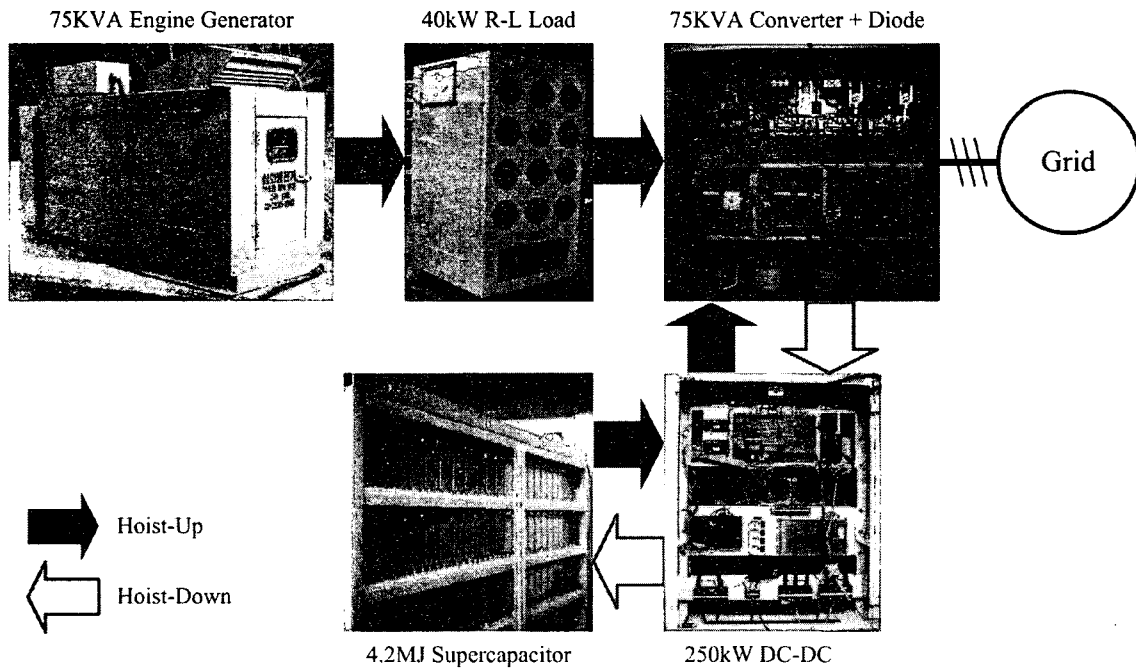


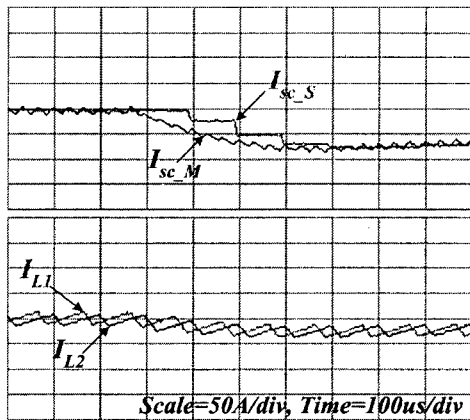
그림 9 실험 세트 구성도.

Fig. 9 Experimental setup.

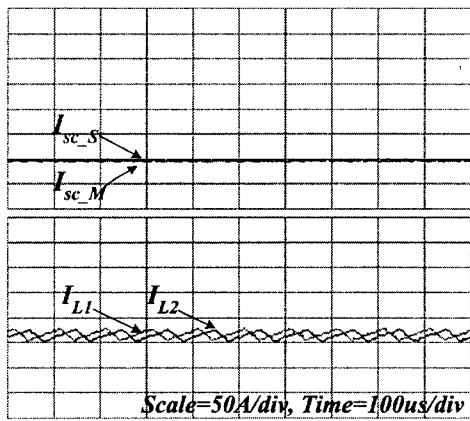
같이 PI 전압 제어를 설계하였다.

#### 4.4 절환 기법

그림 8에 주파수 및 전압 제어기 사이의 절환 방법에 대한 개략적인 흐름도를 보였다. 전압 제어 모드에서는 수퍼커패시터 단독으로 Hoist-Up 동작에 필요한 에너지를 공급하거나 Hoist-Down 동작에서 회생되는 에너지를 저장한다. 주파수 제어 모드에서는 발전기가 정격전력을 공급하도록 제어된다. 이 경우에 수퍼커패시터는 Hoist-Up 동작에 필요한 피크



(a)



(b)

그림 10 기준전류 -100A로 충전할 경우의 실험결과; (a) 과도상태 응답 (b) 정상상태 응답 ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  : 인덕터 전류, 서로 120도의 위상차,  $I_{sc,S}$  : 샘플링된 수퍼커패시터 전류,  $I_{sc,M}$  : 수퍼커패시터 전류의 측정값).

Fig. 10 Experimental current waveforms of dc-dc converter in case of charging with the reference current  $I_{sc\_ref} = -100$  A; (a) transient response and (b) steady-state response ( $I_{L1}$  : current of the inductor 1,  $I_{L2}$  : current of the inductor 2 which is phase-shifted by  $120^\circ$ ,  $I_{sc,S}$  : sampled current of the supercapacitor,  $I_{sc,M}$  : measured current of the supercapacitor).

전력의 일부분을 공급하거나 발전기 전력을 이용하여 충전된다.

### 5. 실험

제안한 방법의 성능을 평가하기 위하여 그림 9와 같이 수퍼커패시터를 이용한 전력 시스템을 구성하였다. 주전력원으로는 75kVA의 엔진 발전기를 사용하였다. 보조전력원으로서 에너지 저장장치인 4.2MJ의 수퍼커패시터를 사용하였다. 수퍼커패시터는 양방향 dc-dc 컨버터에 연결되어 Hoist-Up 동작에서 필요한 피크 전력의 일정부분을 직류 링크를 통해 공급하고 Hoist-Down 동작에서 회생되는 에너지를 직류링크를 통하여 공급받아 저장한다. 실제 시스템의 보조부하를 모의하기 위하여 40kW의 RL 부하를 발전기 3상 출력에 병렬 연결하였다. 발전기의 3상 출력은 다이오드와 75kVA의 3상 PWM 컨버터를 통하여 계통(grid)으로 연결된다. 제어 알고리즘은 TMS320vc33 DSP 보드상에 구현하였다. 전체 제어 알고리즘의 샘플링 주기는 1[ms]이고 전류 샘플링 주기는 0.1[ms]이다.

#### 5.1 양방향 dc-dc 컨버터의 위상 분배 제어

그림 10은 기준전류 -100A로 수퍼커패시터를 충전할 때 각각의 인덕터 전류 및 수퍼커패시터 유입 전류를 나타낸다. 그림 10(a)에 보인 것처럼, 과도상태의 경우, 수퍼커패시터 전류 리플은 개별 인덕터 전류리플 크기의 1/2 값 정도이다. 또한 정상상태에서는 그림 10(b)에 보인 것처럼 수퍼커패시터의 전류리플이 개별 인덕터의 전류리플 크기에 비해 1/5값 정도이다.

#### 5.2 발전기 주파수의 추정

제안한 PLL 방법의 성능을 평가하기 위하여 발전기 주파수 추정결과를 Zero-Crossing Detector를 이용한 추정값과 비교하였다. 추정값은 20us를 주기로 갱신된다. 즉, Zero-Crossing Detector의 해상도는  $0.430^\circ$ 이다. 그림 11은 제안한 단상 PLL 방법을 이용하여 발전기 주파수를 추정한 결과를 보인다. 정상상태에서 추정오차가 0.1Hz 보다 작은 것을 알 수 있다.

#### 5.3 하이브리드 에너지 시스템의 동작 시험

그림 12와 13은 3상 PWM 컨버터를 이용하여 RTGC의 Hoist-Up 및 Hoist-Down 동작을 모의한 실험결과이다. 그림 12는 동기좌표계 q축 전류지령을 20초 동안 -130A로 인가한 후, 12초동안 100A로 인가하였을 때의 전압 및 전류 파형을 보여준다. 수퍼커패시터는 초기에 530V까지 충전된 상태에서 전압 제어 모드로 동작한다. 음의 q축 전류가 흐르면 (영역 I: motoring), 즉 PWM 컨버터가 직류전력을 3상 교류전력으로 변환하여 계통으로 보내면, 이 때 전압제어기가 동작하여 수퍼커패시터의 에너지가 직류링크단으로 공급된다. 따라서 수퍼커패시터는 방전되고 직류링크단의 전압은 680V로 유지된다. 그러나 수퍼커패시터 전압이 400V이하가 되면 주파수 제어로 절환되어 발전기도 전력을 공급하게 된다. 이 구간에서는

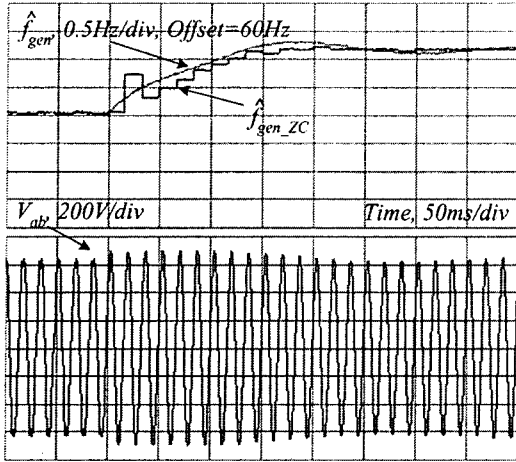


그림 11 제안한 단상 PLL 주파수 추정기의 실험결과 ( $f_{gen}$  : 제안한 방법을 이용하여 추정한 주파수,  $f_{gen\_ZC}$  : Zero-Crossing Detector를 이용하여 추정한 주파수,  $V_{ab}$  : 발전기의 출력 선간전압).

Fig. 11 Experimental results of frequency estimation using the proposed single PLL ( $f_{gen}$  : the estimated frequency of the proposed single PLL,  $f_{gen\_ZC}$  : the estimated frequency of zero-crossing detector,  $V_{ab}$  : the line voltage of the generator).

주파수 제어기가 발전기 주파수를 56Hz로 유지시킨다. 영역 I과 영역 II 사이의 구간, 즉 q축 전류지령이 0인 구간에서는 주파수 제어가 동작하여 발전기 전력으로 수퍼커패를 충전한다. 양의 q축 전류가 흐르면 (영역 II: generating), PWM 컨버터가 계통의 3상 교류 전력을 직류전력으로 변환하여 직류링크단에 보낸다. 영역 II의 전반부에는 발전기가 수퍼커패에 전력을 공급하고 있는 상태에서 계통으로부터 전력이 직류링크단으로 유입되어 수퍼커패는 양쪽에서 전력을 공급받아 충전된다. 그러나 수퍼커패 전압이 480V를 넘으면 전압제어 모드로 절환된다. 전압제어기가 동작하여 직류링크단을 680V로 유지하므로 발전기의 전력은 차단되고 오직 계통으로부터 유입되는 전력만 수퍼커패에 공급된다.

그림 13은 동기좌표계 q축 전류지령을 12초동안 -130A로 인가한 후, 20초 동안 100A로 인가하였을 때의 전압 및 전류 파형을 보여준다. 수퍼커패는 초기에 575V까지 충전된 상태에서 전압 제어모드로 동작한다. 음의 q축 전류가 흐르면 (영역 I: motoring) 전압 제어기가 동작하여 수퍼커패의 에너지가 직류링크단으로 공급된다. 영역 I이후의 구간에서는 수퍼커패의 전압이 충분하므로 제어를 멈춘다. 양의 q축 전류가 흐르면 (영역 II와 영역 III: generating), 계통으로부터 직류링크단으로 전력이 유입된다. 이때 전압제어기가 직류링크단을 680V로 유지함으로써 유입된 전력은 수퍼커패를 충전시킨다. 수퍼커패의 전압이 575V를 넘어서면 더 이상 충전되지 않고 제어기는 동작을 멈춘다. 이때 직류링크 전압은 상승하고 DB (Dynamic Braking) 저항이 유입되는 에너지를 열로 소비하게 된다 (영역 III).

## 6. 결 론

본 논문은 권상 부하 시스템의 에너지 효율을 개선하기 위하여 수퍼커패를 이용한 에너지 저장 시스템을 제안하였다. 수퍼커패와 직류 링크단 사이의 전력변환기로 상용 3상 인버터와 동일한 구조의 양방향 dc-dc 컨버터를 제안하였다. 또한 발전기와 수퍼커패 사이에 최적의 전력분배를 위하여 엔진 발전기의 추정주파수를 이용한 간접제어 방법을 제안하였다. 마지막으로 단상 PLL을 이용한 주파수 추정기의 성능을 향상시키기 위하여 APF의 주파수가 추정 주파수에 따라 갱신되는 알고리즘을 제안하였다. 권상부하의 전력 특성을 모의하기 위하여 75kVA급 PWM 컨버터를 이용하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성과 성능을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] John M. Miller, Michael Everett, "An Assessment of Ultra-capacitors as the power cache in Toyota THS-II, GM-Allision AHS-2 and Ford FHS hybrid Propulsion systems," 20th Annual IEEE APEC, pp.481-490, March 2005.
- [2] P. Thounthong, S. Rael and B. Davat, "Utilizing fuel cell and supercapacitors for automotive hybrid electrical system," 20th Annual IEEE APEC, pp.90-96, March 2005.
- [3] A. Rufer and P. Barrade, "A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface," IEEE Trans. Industry Applications, vol.38, pp.1151-1159, September/October, 2002.
- [4] J. L. Duran-Gomez, P. N. Enjeti, and A. Jouanne, "An approach to achieve ride-through of an adjustable-speed drive with flyback converter modules powered by supercapacitors," IEEE Trans Industry Applications, vol.38, pp.514-522, March/April 2002.
- [5] 김영호, 커패시터와 배터리의 가교 장치, 울트라커패시터, EP&C, pp.44-50, 2002.
- [6] A. Burkner, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology," J. Power Source, vol.91, pp.37-50, 2000.
- [7] D. Kim, R. B. Langley, and S. Kim, "High-precision crane guidance: Shipyard giants," GPS World mag., vol.13, pp.28-34, September, 2002.
- [8] Y. Jung, J. So, G. Yu, and J. Choi, "Modeling and analysis of active islanding detection methods for photovoltaic power conditioning systems," in Proc. 17th Annual CCECE, Canada, pp. 979-982, May 2004.
- [9] PLECS: Piece-wise linear electrical circuit simulation for Simulink, preliminary ed., Pleim GmbH, Switzerland, 2004.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: MacGraw-Hill Inc., 1994. chapter. 11.

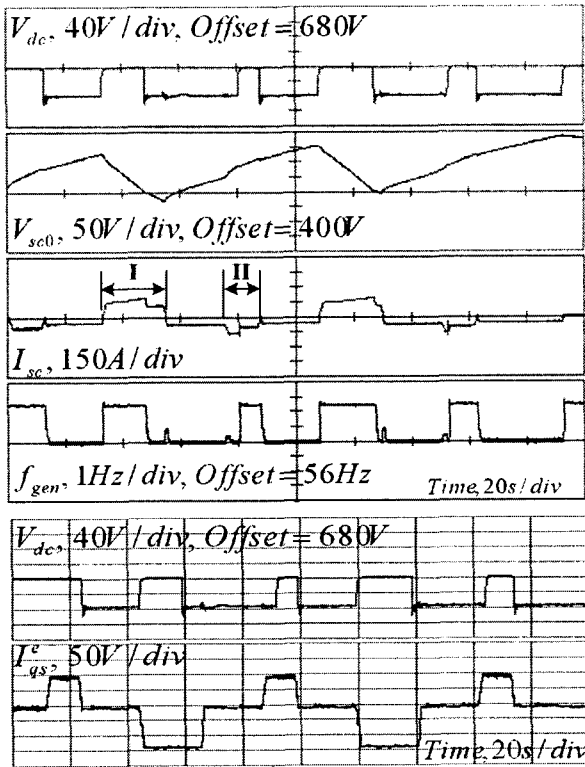


그림 12 동기좌표계 q축 전류명령을 20초동안 -130A로 인가한 후 12초동안 100A로 인가한 경우의 실험 파형; (a) 입력전원 측의 변수들 ( $V_{dc}$  : 직류링크단 전압,  $V_{sc0}$  : 슈퍼커패 내부 전압,  $I_{sc}$  : 슈퍼커패 출력 전류,  $f_{gen}$  : 발전기 주파수); (b) 3상 PWM 컨버터 측의 전압 및 전류 ( $I_{qs}^e$  : 동기좌표계 q축 전류).

Fig. 12 Experimental waveforms when the synchronous q-axis current command is firstly given -130A during 20 seconds and then given 100A during 12 seconds; (a) variables of the input power sources ( $V_{dc}$  : dc-link voltage,  $V_{sc0}$  : internal voltage of the supercapacitor,  $I_{sc}$  : output current of the supercapacitor,  $f_{gen}$  : generator frequency); (b) voltage and current of the three-phase PWM converter ( $I_{qs}^e$  : synchronous q-axis current).

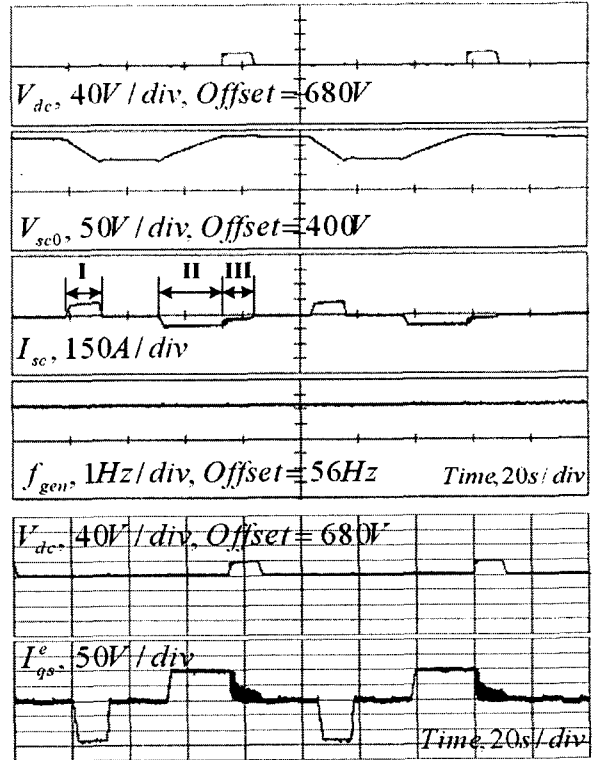


그림 13 동기좌표계 q축 전류명령을 12초동안 -130A로 인가한 후 20초동안 100A로 인가한 경우의 실험 파형; (a) 입력전원 측의 변수들 ( $V_{dc}$  : 직류링크단 전압,  $V_{sc0}$  : 슈퍼커패 내부 전압,  $I_{sc}$  : 슈퍼커패 출력 전류,  $f_{gen}$  : 발전기 주파수); (b) 3상 PWM 컨버터 측의 전압 및 전류 ( $I_{qs}^e$  : 동기좌표계 q축 전류).

Fig. 13 Experimental waveforms when the synchronous q-axis current command is firstly given -130A during 12 seconds and then given 100A during 20 seconds; (a) variables of the input power sources ( $V_{dc}$  : dc-link voltage,  $V_{sc0}$  : internal voltage of the supercapacitor,  $I_{sc}$  : output current of the supercapacitor,  $f_{gen}$  : generator frequency); (b) voltage and current of the three-phase PWM converter ( $I_{qs}^e$  : synchronous q-axis current).

저 자 소 개



**김 상 민 (金 相 敏)**

1974년 2월 1일생. 1996년 전북대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 서울대 전기컴퓨터공학부 후박사과정. 관심분야는 전력전자 및 전동기 제어, 지능제어.

Tel : 02-880-7991 (내선 105)  
Fax : 02-878-1452  
E-mail : gpkim74@eepel.snu.ac.kr



**실 승 기 (薛 承 基)**

1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986~1988년 Wisconsin-Madison 후박사과정. 1989~1990년 LG산전 책임연구원. 현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 전력전자를 이용한 고성능 전동기 제어.

Tel : 02-880-7243  
Fax : 02-878-1452  
E-mail : sulsk@plaza.snu.ac.kr



**유 현 재 (兪 炫 在)**

2003년 경북대 전자전기공학부 졸업. 2005년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 02-880-7251  
Fax : 02-878-1452  
E-mail : hjyoo@eepel.snu.ac.kr