

수퍼캐패시터를 이용한 권상부하 시스템의 전력 제어

김상민*, 설승기*, 유현재*
 서울대 전기컴퓨터 공학부*

Power Control of a Hoist System Using Supercapacitor

Sang-Min Kim*, Seung-Ki Sul*, Hyun-Jae Yoo*
 Seoul National University*

Abstract - 본 논문에서는 수퍼캐패시터(Supercapacitor 이하 수퍼캡)를 이용하여 엔진 발전기를 전원으로 하는 권상부하 시스템의 부하전력 분배와 회생에너지의 저장 기법을 제안한다. 대표적인 권상부하 시스템인 크레인인 경우, 크게 두가지 운전모드로 동작한다. 첫번째 운전모드는 부하를 들어올리는 동작(Hoist-Up)으로서 가속 종료시점에 최대전력을 소모한다. 두번째 운전모드는 부하를 내리는 동작(Hoist-Down)으로서 이때 회생되는 전력은 일반적으로 저항을 통하여 소모된다. 본 논문에서는 에너지 저장장치의 하나인 수퍼캡을 이용하여 Hoist-Down 운전에서 회생되는 에너지를 저장하고 Hoist-Up 운전에서 필요한 전력을 보조하도록 하였다. 수퍼캡의 충방전을 위하여 상용 3상 인버터와 동일한 구조를 가지는 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 또한 발전기와 수퍼캐패시터의 Load Sharing을 최적화하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법을 이용하면 디젤엔진 발전기의 크기를 대폭 줄일 수 있고 따라서 연비의 개선, 소음 및 공해의 감소를 기대할 수 있다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

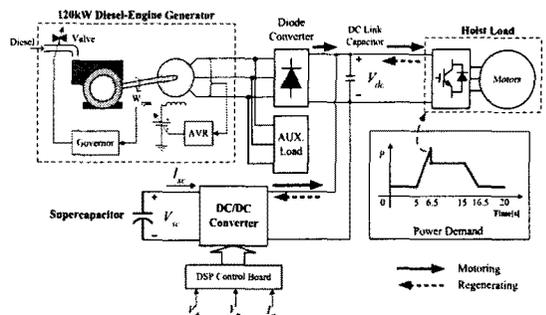


그림 1 하이브리드 RTGC 전력 시스템 개념도.

2. 권상부하 시스템의 모델링

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

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

$$P = (T_e^* w_{rm})\eta_{motor}, \quad \alpha = \frac{dw_{rm}}{dt}$$

여기서 J_{load} : 전동기에서 본 부하의 등가 관성, $J_{total} = J_{load} + J_{motor}$, J_{motor} : 전동기의 관성, r : 전동기의 반지름 [m], g : 중력 가속도 [m/s²], α : 전동기의 각가속도 [rad/s²], w_{rm} : 전동기의 각속도 [rad/s], η_{mech} : 기계계의 효율, η_{motor} : 전동기의 효율.

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).

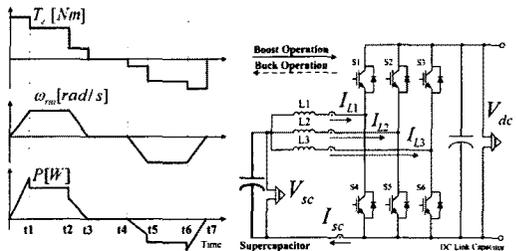


그림 2 Hoist 전동기의 토크, 속도 및 전력 파형. 그림 3 수퍼캡을 이용한 에너지 저장 시스템.

3. 수퍼캡을 이용한 에너지 저장 시스템

수퍼캡을 이용한 에너지 저장 시스템을 그림 3과 같이 설계, 제작하였다. 직류 링크와 수퍼캡 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

1. 서 론

수퍼캡은 현재 하이브리드 자동차의 피크전력 보조 및 회생 제동, 엘리베이터 시스템의 전력 평활화(power smoothing), Unified Power Quality Controller(UPQC)의 voltage sag의 보상 등의 전력 시스템에 활발히 적용되고 있다[1]-[4]. 수퍼캡은 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, 수퍼캡은 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 수퍼캡은 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 디젤엔진을 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 수퍼캡을 이용한 에너지 저장 장치를 이러한 권상부하 시스템에 적용하는 방법을 제시한다. 실험에 사용한 수퍼캡은 수백개의 작은 수퍼캡 셀들이 직병렬로 연결된 구조를 가진다. 본 논문에서 수퍼캡의 주요한 기능은 피크전력이 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 수퍼캡 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.

가지도록 설계되었다. 이 방법은 크게 3가지의 장점이 있다. 첫째, 현재 상용화된 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.

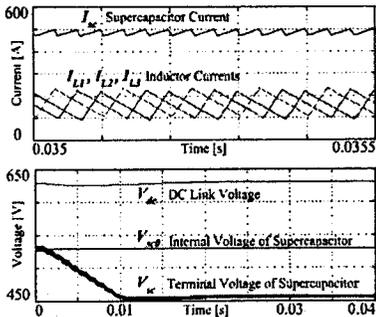


그림 4 DC-DC 컨버터의 시뮬레이션 결과 (수퍼캡 방전 모드).

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

4. Load Sharing Control: 전력 분배 제어

엔진 발전기와 수퍼캡 사이의 전력 분배를 최적화 하기 위해서는 발전기의 출력전력에 대한 정보가 필요하다. RTGC 시스템은 보조부하가 3상 다이오드의 입력단에 연결되기 때문에 전력 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 위해 설계된 것이다. 따라서 발전기 주파수는 발전 전력과 직접적인 관계가 있다. 만약 주파수 정보를 알수 있다면 발전 전력을 간접적으로 제어할 수 있다.

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

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

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

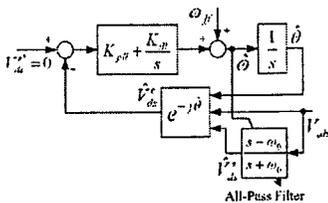


그림 5 주파수 갱신 알고리즘을 적용한 단상 PLL.

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 위상지연되고 그 결과 다음 식과 같이 고정좌표계의

d축 전압 \hat{V}_{ds}^s 를 얻게 된다.

$$\hat{V}_{ds}^s = \frac{s - u_0}{s + u_0} V_{qs}^s = \frac{s - u_0}{s + u_0} V_{ab}$$

여기서 $u_0 = 2\pi f_0$: 고유 주파수, f_0 : 60 또는 50 Hz.

이러한 두 전압을 동기좌표계 dq축으로 좌표변환하여 동기 좌표계 d축 전압 \hat{V}_{ds}^e 를 얻을 수 있다. 그리고 발전기 주파수는 다음 식과 같이 PI 제어기와 전향보상항을 이용하여 추정된다.

$$\hat{u} = (K_{pll} + \frac{K_{ul}}{s})(-\hat{V}_{ds}^e) + u_{ff}, \quad \hat{f} = \hat{u}/2\pi$$

여기서 u_{ff} 는 전향보상항이다.

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

$$u_0 = \hat{u}$$

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.

$$f_{droop} = f_{gen0} - f_{gen}$$

여기서 f_{gen0} 는 무부하일 때의 발전기 주파수이다.

직류 링크 캐패시터의 동특성을 이용하여 그림 7과 같이 PI 전압 제어기를 설계하였다.

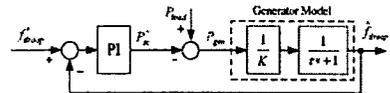


그림 6 주파수 제어기의 블록도 (P_{sc}^* : 수퍼캡의 출력전압, P_{load} : 부하전 동기의 요구전력, 혹은 회생전력, P_{gen} : 발전기 출력전력).

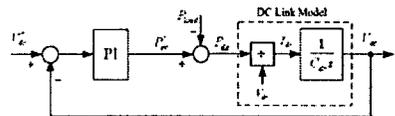


그림 7 전압 제어기의 블록도 (P_{dc} : 직류링크 캐패시터의 입력전력).

4.4 절환 기법

그림 8에 주파수 및 전압 제어기 사이의 절환 방법에 대한 개략적인 흐름도를 보였다. 전압 제어 모드에서는 수퍼캡이 단독으로 Hoist-Up 동작에 필요한 에너지를 공급하거나 Hoist-Down 동작에서 회생되는 에너지를 저장한다. 주파수 제어 모드에서는 발전기가 정격전력을 공급하도록 제어된다. 이 경우에 수퍼캡은 Hoist-Up 동작에 필요한 피크전력의 일부분을 공급하거나 발전기 전력을 이용하여 충전된다.

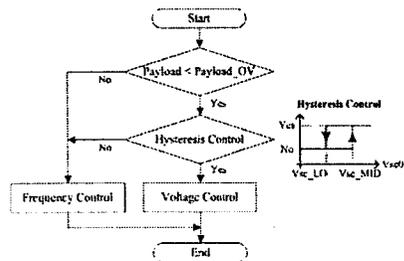


그림 8 주파수 및 전압 제어기 사이의 절환 방법에 대한 개략적인 흐름도; Payload 부하의 무게.

5. 실험

제안한 방법의 성능을 평가하기 위하여 그림 9와 같이 수퍼캡을 이용한 전력 시스템을 구성하였다. 추진력원으로는 75kVA의 엔진 발전기를 사용하였다. 보조전력원으로서 에너지 저장장치인 4.2MJ의 수퍼캡을 사용하였다. 수퍼캡은 양방향 DC-DC 컨버터에 연결되어 Hoist-Up 동작에서 필요한 피크 전력의 일정부분을 직류 링크를 통해 공급하고 Hoist-Down 동작에서 회생되는 에너

지를 직류링크를 통하여 공급받아 저장한다. 실제 시스템의 보조 부하를 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.

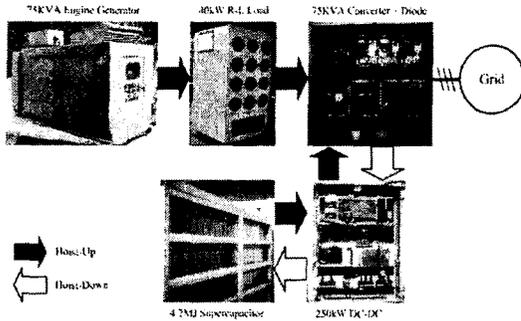


그림 9 실험 세트 구성도.

그림 10과 11은 3상 PWM 컨버터를 이용하여 RTGC의 Hoist-Up 및 Hoist-Down 동작을 모의한 실험결과이다. 그림 10은 동기좌표계 q축 전류지령을 20초 동안 130A로 인가한 후, 12초 동안 100A로 인가하였을 때의 전압 및 전류 파형을 보여준다. 수퍼캐는 초기에 530V까지 충전된 상태에서 전압 제어 모드로 동작한다. 음의 q축 전류가 흐르면 (영역 I: motoring), 즉 PWM 컨버터가 직류전력을 3상 교류 전력으로 변환하여 계통으로 보내면, 이 때 전압제어기가 동작하여 수퍼캐의 에너지가 직류링크단으로 공급된다. 따라서 수퍼캐는 방전되고 직류링크단의 전압은 680V로 유지된다. 그러나 수퍼캐 전압이 400V 이하가 되면 주파수 제어로 전환되어 발전기도 전력을 공급하게 된다. 이 구간에서는 주파수 제어기가 발전기 주파수를 56Hz로 유지시킨다. 영역 I과 영역 II 사이의 구간, 즉 q축 전류지령이 0인 구간에서는 주파수 제어가 동작하여 발전기 전력으로 수퍼캐를 충전한다. 양의 q축 전류가 흐르면 (영역 II: generating), PWM 컨버터가 계통의 3상 교류 전력을 직류전력으로 변환하여 직류링크단에 보낸다. 영역 II의 전반기에는 발전기가 수퍼캐에 전력을 공급하고 있는 상태에서 계통으로부터 전력이 직류링크단으로 유입되어 수퍼캐는 양쪽에서 전력을 공급받아 충전된다. 그러나 수퍼캐 전압이 480V를 넘으면 전압제어 모드로 전환된다. 전압제어기가 동작하여 직류링크단을 680V로 유지하므로 발전기의 전력은 차단 되고 오직 계통으로부터 유입되는 전력만 수퍼캐에 공급된다.

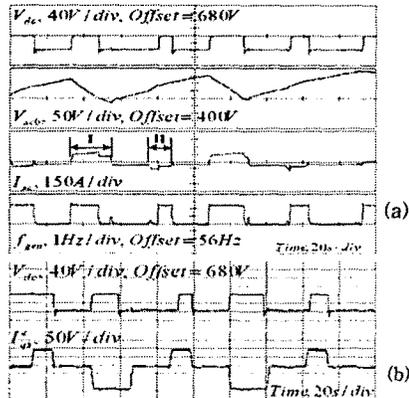


그림 10 동기좌표계 q축 전류명령을 20초 동안 130A로 인가한 후 12초 동안 100A로 인가한 경우의 실험 파형: (a) 입력전원 측의 변수들 (V_{dc} : 직류링크단 전압, V_{sc} : 수퍼캐 내부 전압, I_{sc} : 수퍼캐 출력 전류, f_{gen} : 발전기 주파수); (b) 3상 PWM 컨버터 측의 전압 및 전류 (V_{dc} : 직류링크단 전압, I_{dq}^* : 동기좌표계 q축 전류).

그림 11은 동기좌표계 q축 전류지령을 12초 동안 130A로 인가한 후, 20초 동안 100A로 인가하였을 때의 전압 및 전류 파형을 보여준다. 수퍼캐는 초기에 575V까지 충전된 상태에서 전압 제어모드로 동작한다. 음의 q축 전류가 흐르면 (영역 I:

motoring) 전압 제어가 동작하여 수퍼캐의 에너지가 직류링크단으로 공급된다. 영역 I이후의 구간에서는 수퍼캐의 전압이 충분하므로 제어를 멈춘다. 양의 q축 전류가 흐르면 (영역 II와 영역 III: generating), 계통으로부터 직류링크단으로 전력이 유입된다. 이때 전압제어기가 직류링크단을 680V로 유지하므로서 유입된 전력은 수퍼캐를 충전시킨다. 수퍼캐의 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).

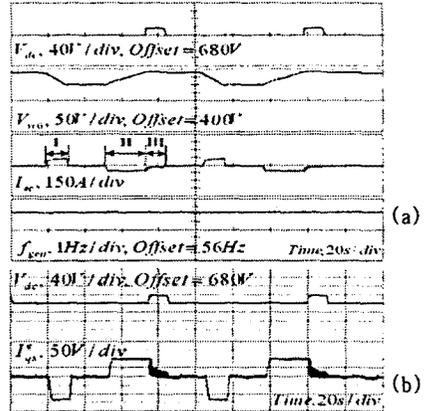


그림 11 동기좌표계 q축 전류명령을 12초 동안 130A로 인가한 후 20초 동안 100A로 인가한 경우의 실험 파형: (a) 입력전원 측의 변수들 (V_{dc} : 직류링크단 전압, V_{sc} : 수퍼캐 내부 전압, I_{sc} : 수퍼캐 출력 전류, f_{gen} : 발전기 주파수); (b) 3상 PWM 컨버터 측의 전압 및 전류 (V_{dc} : 직류링크단 전압, I_{dq}^* : 동기좌표계 q축 전류).

6. 결 론

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

[참고 문헌]

- [1] John M. Miller, Michael Everett, "An Assessment of Ultra capacitors as the power cache in Toyota THS II, GM Allison 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.90-95, 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: Shipyards 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 CECE, 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.