

소형 전동 굴삭기용 하이브리드 에너지 저장 시스템을 위한 적응형 필터 기반 에너지 관리 전략

나병렬, 최성진

울산대학교 전기컴퓨터공학과

Adaptive Filter-Based Energy Management Strategy for Electrical Excavator Hybrid Energy Storage Systems

Byeong Ryeol Na, Sung-Jin Choi

Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Ulsan
Ulsan, 44610, South Korea

ABSTRACT

전동 굴삭기는 탄소·소음 규제를 동시에 만족할 수 있는 차세대 무배출 건설장비로 주목받지만, 굴삭-선화-덤프 작업에서 발생하는 수 십kW급 급격한 부하 피크 때문에 배터리 단독 에너지 저장장치만으로는 열·수명 성능을 확보하기 어렵다. 본 논문은 배터리와 슈퍼캐패시터를 결합한 소형 굴삭기용 하이브리드 에너지 저장 시스템(HESS)을 대상으로, 슈퍼캐패시터 SOC를 이용해 저주파 통과 필터 시정수를 실시간으로 조절하는 적응형 에너지 관리 전략을 제안한다. 제안 알고리즘은 SOC 편차를 쌍곡 탄젠트 기반 S-커브에 매핑하여 시정수를 자동 가변함으로써, 저주파 성분은 배터리가, 고주파 성분은 슈퍼캐패시터가 담당하도록 전력을 분담하며 배터리 수명 연장에 기여할 수 있는 솔루션을 제시한다. 제안하는 EMS는 배터리 RMS 전류를 36 % 감소시켜 열 상승과 사이클 열화를 효과적으로 완화하였음을 시뮬레이션 검증하였다.

1. 서 론

전동 굴삭기(e-Excavator)는 도심 공사장의 탄소 저감과 소음 규제를 동시에 충족할 수 있는 차세대 탄소 무배출 건설 장비로 각광받고 있다. 그러나 굴삭-선화-덤프 (Dig - Swing - Dump) 작업은 수백 밀리초 단위의 급가속·급제동이 반복되며, 회생 제동 에너지도 순간적으로 발생한다. 이러한 고출력·고주파 부하를 에너지 밀도가 높은 리튬-이온 배터리 단독으로 처리할 경우, 열 상승과 수명 열화가 가속된다. 배터리의 열·수명 부담을 완화하고 순간 피크 전력과 회생 에너지를 효과적으로 처리하기 위해, 출력 밀도가 높은 슈퍼캐패시터 (Super Capacitor, SC)를 병용한 하이브리드 에너지 저장 시스템(HESS)이 제안되어 왔다.

HESS(Hybrid Energy Storage System)의 효과를 극대화하려면 운전 조건에 따라 배터리와 슈퍼캐패시터의 전력 분담을 실시간으로 조정하는 에너지 관리전략이 필수적이다. 규칙 기반(Rule-Based) 방법 가운데 저주파 통과 필터(Low-Pass Filter, LPF)는 구조가 단순하고 계산 부담이 작아 실차 제어기에 용이하게 이식된다. 하지만 고정 시정수(τ)를 사용하면 굴삭 작업처럼 부하 크기와 주파수가 급변하는 상황에서 최적 전력 분배가 이루어지지 않는 한계가 있다. 모델 예측 제어(MPC)나 메타휴리스틱 최적화(PSO 등)는 높은 적응성을 제공하지만, 대

규모 실시간 연산과 복잡한 파라미터 식별이 요구돼 소형 굴삭기 제어기의 계산 자원으로는 현실 적용이 어렵다[1].

본 논문은 이러한 한계를 해결하고자, SOC 오차를 이용해 저주파 통과 필터 시정수를 실시간으로 가변시키는 적응형 EMS를 제안한다.

2. 시스템 구조

2.1 전체 구조도

본 연구에서 제안하는 HESS은 배터리와 슈퍼캐패시터를 함께 사용하며, 각 에너지원은 독립적인 양방향 DC/DC 컨버터를 통해 DC 버스에 병렬 접속하는 구조를 채택하였다. 그림 1은 이러한 에너지 저장 시스템 전체 구성을 도시한다. DC 버스는 시스템 내 에너지 흐름의 허브 역할을 수행하며, 버스를 통해 부하 측으로 전력을 공급하거나 회생 에너지를 회수한다. 실차 소형 굴삭기에는 통상 연구자식 동기모터-인버터 구동계를 사용하지만, 본 논문에서는 시뮬레이션 제어의 단순성, 배터리와 슈퍼캐패시터 간 전력 상호작용을 명확히 관찰하기 위해 하를 직류기(DC Machine)로 대체하였다.

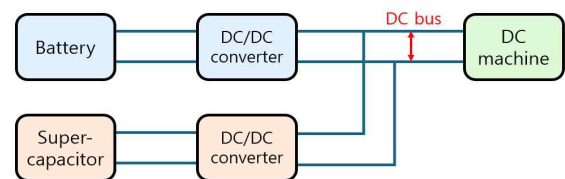


그림 1 HESS(Hybrid Energy Storage System) 구조

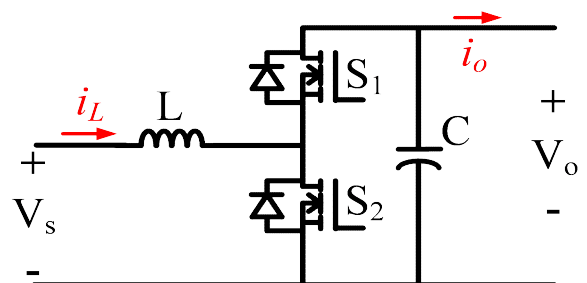


그림 2 양방향 벡-부스트 컨버터

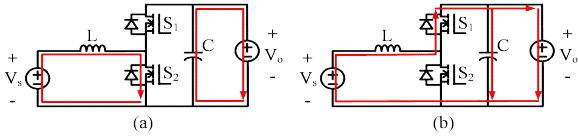


그림 3 양방향 벡-부스트 컨버터 부스트 모드 동작 (a) S2 ON (b) S1 Diode ON

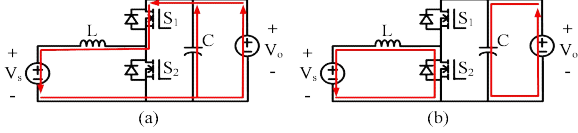


그림 4 양방향 벡-부스트 컨버터 벡 모드 동작 (a) S1 ON (b) S2 Diode ON

2.2 양방향 벡-부스트 컨버터

본 연구에서는 에너지 저장 장치와 DC 버스 간의 전력 흐름을 제어하기 위해 양방향 벡-부스트 컨버터를 사용한다. 그림 2는 본 시스템에서 사용된 기본적인 양방향 벡-부스트 컨버터의 회로 구조를 나타낸다.

이 컨버터는 양방향 전력 흐름이 가능하도록 구성되어 있으며, 주로 다음 두 가지 동작 모드로 구분된다.

1) 부스트 모드(Boost mode): 그림 3의 (a)와 같이 S2가 ON인 경우, 입력 전압 V_s 이 인덕터를 충전한다. S2가 OFF인 경우, 그림 3의 (b)와 같이 S1의 다이오드를 통해 인덕터에 저장된 에너지를 출력측으로 전달한다.

2) 벡 모드(Buck mode): 그림 4의 (a)와 같이 S1이 ON인 경우, 입력 전압 V_o 이 인덕터를 충전한다. S1이 OFF인 경우, 그림 4의 (b)와 같이 S2의 다이오드를 통해 인덕터에 저장된 에너지를 부하측으로 전달한다.

2.3 직류기 모델(부하 모델)

직류기는 기계적 토크 요구에 따라 전기적 전력을 연속적으로 변화시킬 수 있어 전력 분배 제어 성능을 평가하기에 적합하다. 본 논문에서는 시뮬레이션의 제어 복잡성을 줄이기 위해 계자 전류를 일정하게 유지하였으며, 이에 따라 계자 자속은 상수로 가정된다. 전기자 전류는 토크에 비례하므로 요구 토크에 따라 전력 소비 또는 회생이 자연스럽게 반영된다. 이를 통해 EMS 알고리즘의 전력 흐름 제어 기능을 효율적으로 분석할 수 있다.

2.4 제어기

DC 부하의 안정적인 동작을 보장하기 위해서는 DC 버스 전압을 일정하게 유지하는 것이 필수적이다. 이를 위해 제어 시스템은 이중 루프(Two-loop) 구조로 구성되며, 외부 루프(Outer loop)에서는 DC 버스 전압을 제어하고, 내부 루프(Inner loop)에서는 부하 변화에 따른 동적 특성에 신속하게 대응하기 위해 전류를 제어한다. 이러한 구조는 전압 안정성과 제어 응답성을 동시에 확보할 수 있는 효과적인 방법이다.

3. 제안하는 EMS 알고리즘

3.1 저주파 통과 필터 기반 전력 분배

본 논문에서는 전동 굴삭기 HESS의 에너지 관리 전략으로 저주파 통과 필터 기반 전력 분배 방식을 채택하였다. 저주파 통과 필터는 굴삭기가 요구하는 전력을 주파수 특성에 따라 저주파 성분과 고주파 성분으로 분리하여 각각 배터리와 슈퍼캐패시터에 할당한다. 일반적으로 전력의 저주파 성분은 장기적인 에너지 공급을 담당하는 배터리로, 고주파 성분은 빠른 응답이 가능한 슈퍼캐패시터로 분배된다. 이를 통해 배터리의 전류 리플을 감소시키고 열화 속도를 완화하며, 슈퍼캐패시터의 순간 출력 특성을 효과적으로 활용할 수 있다.

P_{req} 는 부하의 전체 순시 전력 요구량이며, P_{bat} 는 배터리가 담당하는 순시 전력, P_{sc} 는 슈퍼캐패시터가 담당하는 순시 전력이다. 그리고 τ 는 저주파 통과 필터의 시정수이다. 식 (1)은 전체 전력 요구량에 대해 배터리가 담당할 전력을 필터링하여 저주파 성분을 추출하는 1차 저주파 통과 필터의 시간영역 표현이다. 1차 저주파 통과 필터는 식 (1)과 같은 선형 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$P_{req}(t) = P_{bat}(t) + \tau \frac{dP_{bat}(t)}{dt} \quad (1)$$

세 전력의 관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{sc}(t) = P_{req}(t) - P_{bat}(t) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 라플라스 영역으로 표현하면 식 (3)과 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{req}(s) = (1 + \tau s) P_{bat}(s) \quad (3)$$

$$P_{sc}(s) = P_{req}(s) - P_{bat}(s) \quad (4)$$

식 (4)를 식(3)에 대입하면 배터리와 슈퍼캐패시터가 부담하는 전력을 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{bat}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} P_{req}(s) \quad (5)$$

$$P_{sc}(s) = \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1}\right) P_{req}(s) \quad (6)$$

$$= \frac{\tau s}{\tau s + 1} P_{req}(s)$$

3.2 제안하는 적응형 저주파 통과 필터 기반 전력 분배

소형 굴삭기의 굴삭 - 선회 - 덤프 사이클에서는 수 십kW 규모의 급격한 부하 피크가 비정기적으로 발생한다. 슈퍼캐패시터가 이러한 전력을 즉시 공급하려면 상시 일정 수준의 에너지를 저장하고 있어야 하므로, 본 연구에서는 슈퍼캐패시터의 SOC 기준값을 0.8로 설정하였다. 실제 슈퍼캐패시터 SOC가 이 기준값에서 벗어난 정도를 SOC 오차라 정의하고, 이를 식 (7)과 같이 에너지 관리 전략(EMS)의 핵심 입력 변수로 사용한다.

$$e_{SOC}(t) = SOC_{ref} - SOC_{SC}(t), \quad SOC_{ref} = 0.8 \quad (7)$$

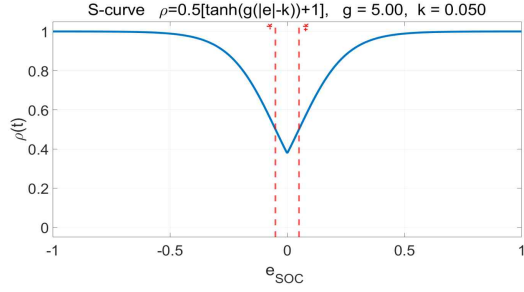


그림 5 쌍곡 탄젠트 기반 S-커브

사용자의 요구 전력을 배터리와 슈퍼캐패시터에 적절히 분배하려면, 식 (1) - (4)에서 보인 저주파 통과 필터의 시정수가 슈퍼캐패시터의 SOC 상태에 따라 실시간으로 변해야 한다. 본 연구는 그 매핑 함수로 쌍곡 탄젠트 기반 S-커브를 채택하였다. S-커브는 그림 5와 같이 입력이 작을 때는 완만하고 임계점 이후에는 급격히 증가하며 최댓값에 포화되는 특성이 있어, SOC 오차에 따른 필터 반응을 연속적으로 제어할 수 있다.

$$\rho(t) = \frac{1}{2} [\tanh(g[|e_{SOC}(t)| - k]) + 1] \quad (8)$$

식 (8)에서 g 는 기울기 이득을 나타내고 k 는 S-커브의 중심을 결정하는 파라미터이다. 즉 슈퍼캐패시터와 배터리가 동일 전력을 분담하도록 만드는 SOC 오차의 임계값을 의미한다. 시정수는 식 (9)와 같이 계산하여 구할 수 있다.

$$\tau(t) = \tau_{\min} + (\tau_{\max} - \tau_{\min})\rho(t) \quad (9)$$

4. 시뮬레이션 및 성능 분석

표 1 시뮬레이션 파라미터

$V_{s,bat}(V)$	400	$L_{bat}(mH)$	5.4
$V_{s,sc}(V)$	250	$L_{sc}(mH)$	5.4
$V_o(V)$	600	$C_{out,bat}(\mu F)$	2400
$f_{sw}(kHz)$	20	$C_{out,sc}(\mu F)$	2400
$C_{sc}(F)$	48	$\tau_{max}(s)$	30
$\tau_{min}(s)$	10	k	0.05
q	5		

표 2 EMS에 따른 RMS 전류

	고정형	적응형
$I_{bat,RMS}(A)$	24.5	15.7
$I_{sc,RMS}(A)$	4.1	15.7

그림 6은 저주파 통과 필터 기반 전력 분배를 나타낸 그래프로서, 시정수에 따라 고주파는 슈퍼캐패시터가 저주파는 배터리가 담당하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 슈퍼캐패시터의 SOC 오차에 따라 변화하는 적응형 필터의 시정수를 나타낸 그래프이다. 슈퍼캐패시터의 SOC의 기준값과의 차이에 따라 시정수가 감소하고 증가하는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 고정형 필터와 적응형 필터의 각 전원에 흐르는 180초 구간동안 계산한 RMS 전류를 비교한 것으로 적응형 필터를 사용한

였을 때 RMS 전류가 줄어 배터리의 열·수명 부담을 줄일 수 있다는 것을 확인했다.

부하토크(Nm)

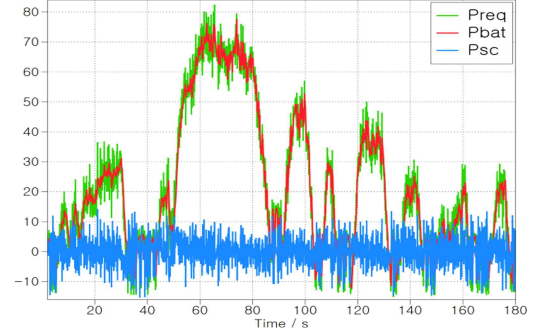


그림 6 저주파 통과 필터 기반 전력(토크) 분배 그래프

SOC

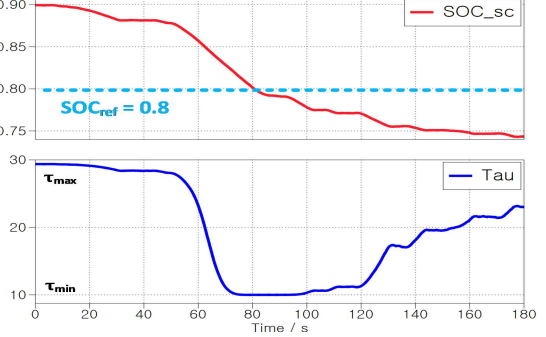


그림 7 슈퍼캐패시터 SOC 오차에 따른 시정수

5. 결 론

본 연구는 소형 굴삭기용 HESS을 위해 SOC-오차 기반 적응형 저주파 통과 필터 EMS를 제안하였다. 제안 기법은 슈퍼캐패시터의 SOC 편차를 쌍곡 탄젠트 S-커브에 매핑하여 시정수를 실시간으로 조정함으로써, 저주파 성분은 배터리가 고주파 성분은 슈퍼캐패시터가 담당하도록 전력을 분배한다. 그 결과, 배터리 RMS 전류가 감소하여 열 상승이 억제되고 사이클 수명이 연장되며, 슈퍼캐패시터가 고주파 전력을 즉시 공급·흡수해 굴삭 작업의 응답성이 향상된다. 향후 연구에서는 연료전지를 추가한 다중 소스 구조뿐만 아니라 인버터와 실전 동기 모델을 추가하여 더욱 다양한 운전시나리오에 대응할 계획이다.

본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 지역 혁신클러스터육성사업(P0025291)과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 개인기초연구사업(RS-2023-00240194)의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] Ramos, G.A.; Costa-Castelló, R. Energy Management Strategies for Hybrid Energy Storage Systems Based on Filter Control: Analysis and Comparison. Electronics 2022, 11, 1631.