복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 변환 장치 구성 및 제어

이학준*, 설승기*, 곽상엽**, 김상일**
서울대학교 전력전자연구실*, 두산 인프라코어 기술원**

Control and Configuration of Power Converter for Compound Type Hybrid Excavator

Hak-Jun Lee*, Seung-Ki Sul*, Sang-Yeop Kwak**, Sang-Il Kim**
Power Electronics Lab. Seoul National University*, Institute of Technology Doosan Infracore**

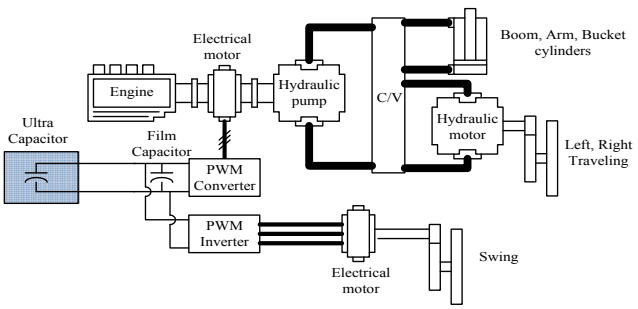
Abstract - 본 논문에서는 복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 변환 장치의 구조와 그 전력 제어 방법을 제안한다. 전체 시스템의 효율을 증가시키기위해 DC/DC 컨버터를 사용하지 않고 울트라 캐패시터와 직류단 캐패시터를 직결하는 구조를 분석하였다. 또한 제안된 구조의 효율적인 운전을 위하여 상태 천이 도표와 울트라 캐패시터 내부 전압 추정기를 사용하는 전력 제어 방법을 제안하였다.제안된 구조와 전력 제어 방법은 실제 상용 굴삭기에 적용시켜 그 타당성을 검증하였고, 현재 연비 측정을 위한 실험이 진행 중이다.

1. 서 론

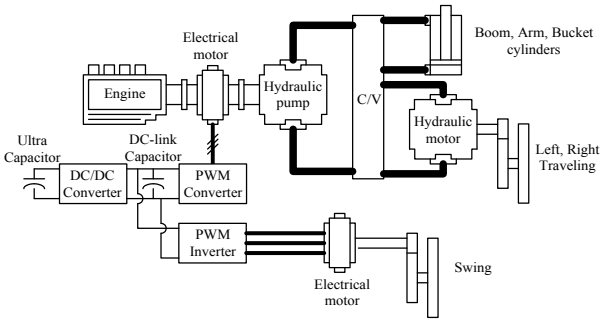
최근 환경 오염과 지구 온난화 문제로 인해 하이브리드화를 통해 내연 기관으로 인해 생기는 오염 물질을 줄이고자 하는 노력이 진행 중에 있다. 이러한 하이브리드 시스템은 차량, 항만용 크레인 등에 적용되어 왔으며, 건설 기계의 하이브리드화에 대한 연구 또한 진행되고 있다[1]. [1]의 연구에서 울트라 캐패시터를 사용하는 하이브리드 굴삭기를 직렬형, 병렬형, 복합형 3가지 종류로 분류하였다. 3가지 종류의 하이브리드 굴삭기 중 복합형 하이브리드 굴삭기가 가장 짧은 투자비 회수 기간과 높은 신뢰성을 갖으면서 24% 정도의 연비 개선 효과를 얻을 수 있다고 예상하였다. 본 논문에서는 DC/DC 컨버터가 없는 복합형 하이브리드 굴삭기를 제안하고, 제안된 구조를 효율적으로 운전하기 위해 울트라 캐패시터와 내부 전압을 이용한 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 구조 및 전력 제어 알고리즘을 검증하기 위해 실제 상용 굴삭기에 적용시켜 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 복합형 하이브리드 굴삭기의 구성



<그림 1> 제안된 복합형 하이브리드 굴삭기의 구조



<그림 2> 기존의 복합형 하이브리드 굴삭기의 구조

<그림 1>과 같이 설계할 경우, 여러 가지 장 단점이 존재한다. 가장 큰 장점으로는 전체 전력 변환 장치의 효율을 증가시킬 수 있다는 것이다. 복합형 하이브리드 굴삭기에서 선회 회생 에너지 수급 효율 문제는 곧 전체 시스템의 효율 문제를 의미한다. 이런 측면에서 설계된 전력 변환 장치 시스템은 DC/DC 컨버터를 통해 선회 구동 에너지를 공급하거나 회생 에너지를 수급하는 것이 아닌, 울트라 캐패시터를 통해 직접 에너지를 공급 또는 수급하므로 에너지 활용의 효율을 극대화시킬 수 있으므로 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 또 다른 장점으로는 신뢰성의 향상을 들 수 있다. 울트라 캐패시터의 제어를 위한 DC/DC 컨버터의 경우, 전류 제어를 위한 DC 인덕터가 필요하게 된다. 이러한 인덕터는 인덕터 자체 손실로 인한 발열의 문제 뿐 아니라, 주변 소자에 대한 방열을 나쁘게 하여 신뢰성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 따라서 DC/DC 컨버터를 사용하지 않는 경우, 그 만큼의 신뢰성 향상을 얻을 수 있다.

반면, 이러한 장점에도 불구하고 본 시스템에는 많은 단점이 존재한다. 첫 번째로 직류단과 DC/DC 컨버터 없이 직접 연결하게 되므로 직류단 전압은 곧 울트라 캐패시터의 전압을 의미한다. 따라서 울트라 캐패시터는 해당 직류단 전압을 모두 견딜 수 있도록 기존의 시스템보다 많은 수의 셀(cell)이 직렬 연결되어야 하므로 그 크기가 상대적으로 커지게 된다. 두 번째로 직류단 캐패시터를 울트라 캐패시터로 사용하므로 울트라 캐패시터에는 스위칭으로 인한 맥동 전류가 모두 흐르게 된다. 이를 방지하기 위해서는 이러한 맥동 전류를 견딜 수 있는 별도의 필름 캐패시터가 울트라 캐패시터에 병렬로 부착되어야 한다. 세 번째로 초기 충전 문제를 들 수 있다. 초기 충전 시 에너지 원은 엔진이므로 이를 통해 울트라 캐패시터를 충전하게 되면, 큰 돌입 전류로 인해 순간적으로 엔진 구동 전동기에 큰 부하가 걸리게 되므로 엔진 시동이 매우 어려워진다. 따라서 이를 방지하기 위해 별도의 초기 충전 회로가 필요하게 된다. 하지만 이 초기 충전 회로는 울트라 캐패시터 전압이 엔진 발전기의 정류된 전압보다 낮을 경우에만 사용되므로 자주 사용되지는 않는다. 따라서 이 초기 충전 회로의 용량은 초기 충전 사용 율을 고려하여 매우 작게 설계하는 것은 가능하다. 마지막으로 울트라 캐패시터의 전압은 선회 구동이나 작업을 고려할 때, 일정한 전압을 유지하지 않고 변동을 하게 된다. 해당 전력 변환 장치에서는 울트라 캐패시터를 직류단 캐패시터로 사용하므로, 이는 전동기 입장에서는 구동 전압이 일정하지 않다는 것을 뜻한다. 따라서 전동기 제어 시 전압 합성에 있어서 이러한 직류단 전압의 변화를 고려해야 한다. 또한, 전동기 설계 시, 울트라 캐패시터의 최소 전압과 최대 전압을 고려해야 한다. 전동기가 어느 전압 상황에서도 같은 전력을 공급한다고 가정하면, 전동기는 최소 전압에서 그 전류 정격이 설계되어야 한다. 또 직류단에 연결되는 모든 전력 변환 회로는 최대 전압에 견딜 수 있도록 설계 되어야 한다.

2.2 전력 제어 알고리즘의 구성

2.2.1 전력 제어 기준

전력 제어 알고리즘은 다음과 같은 기준을 만족해야 한다.

1) 엔진은 모든 펌프 출력을 공급할 수 있어야 한다.
2) 울트라 캐패시터는 선회 전동기를 구동할 수 있는 전력을 공급해야 한다.
3) 선회 구동으로 인해 발생하는 손실 전력은 굴삭 작업에 영향을 미치지 않기 위해, 선회 구동 중에 엔진 발전기에 의해 공급되어야 한다.
4) 울트라 캐패시터는 전동기의 안정적인 구동을 위해 선회 구동 시작점에서 항상 최대 허용 전압을 유지해야 한다.

2.2.2 상태 천이 도표

전력 제어 알고리즘을 구성하기 위해 상태 천이 도표를 구성하였다. 다음 상태는 현재 상태와 조건에 영향을 받으며 출력은 현재 상태에 영향을 받는다.

<표 1> 전력 제어를 위한 상태 천이 도표

현재 상태	조건			다음 상태
xxx	$V_{sc} > V_{sc_top}$	Power > 0	$fabs(\omega_{rpm}^*) > \omega_{rpm_low}$	010
			$fabs(\omega_{rpm}^*) < \omega_{rpm_low}$	000
	$V_{sc_top} \le V_{sc} < V_{sc_high}$	xxx		010
	$V_{sc_low} < V_{sc} < V_{sc_high}$	Power > 0	$fabs(\omega_{rpm}^*) > \omega_{rpm_high}$	001
			$fabs(\omega_{rpm}^*) < \omega_{rpm_high}$	010
		Power ≤ 0	$fabs(\omega_{rpm}^*) > \omega_{rpm_low}$	010
			$fabs(\omega_{rpm}^*) < \omega_{rpm_low}$	001
	$V_{sc} < V_{sc_bottom}$	xxx		001

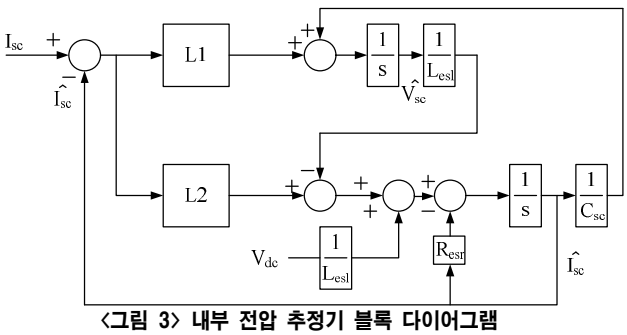
V_{sc} : 울트라 캐패시터 전압, fabs(x) : x의 절대값, ω_{rpm}^* : 선회 전동기 속도 지령, xxx : don't care 상태

<표 2> 전력 제어를 위한 출력 도표

현재 상태	출력
000	울트라 캐패시터 방전 ($P^* = P_{max}$)
001	울트라 캐패시터 충전 ($P^* = -P_{max}$)
010	충 방전 하지 않음 ($P^* = 0$)

<표 2> 는 해당 상태에서의 전력 지령 값을 나타낸 것이다. 울트라 캐패시터 전압이 V_{sc_top} 이상이 되면 울트라 캐패시터의 보호를 위해서 V_{sc_top} 이하가 되도록 엔진 발전기를 통해 에너지를 소모해야한다. 또한 울트라 캐패시터 전압이 허용 범위 (V_{sc_low} ~ V_{sc_high}) 내에 존재한다면 회생 에너지를 최대한 받도록, 즉 시스템의 효율을 향상시킬 수 있도록 전력 지령이 생성된다. 또한 V_{sc_bottom} 이하가 된다면 울트라 캐패시터 정격 전류 이상의 전류가 흐를 가능성이 존재하므로 엔진 발전기를 통해 강제적으로 충전시키게 된다. 시스템의 최대 효율을 이끌어내기 위해서는 엔진 발전기는 선회 동작 중에 선회 동작으로 인한 손실분만을 충전해야 한다. 충전의 기준이 되는 ω_{rpm_high} 는 이러한 손실분을 고려하여 설정되어야 한다.

2.2.3 울트라 캐패시터 내부 전압 추정기

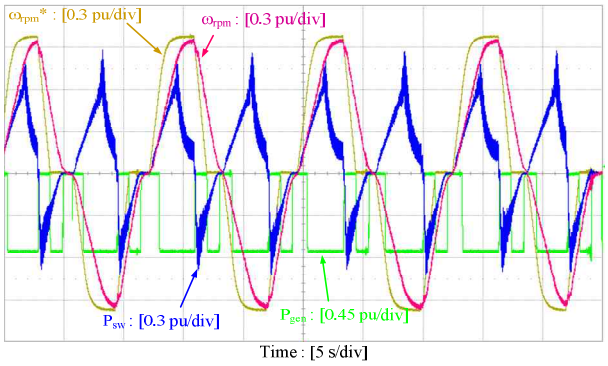


<그림 3> 내부 전압 추정기 블록 다이어그램

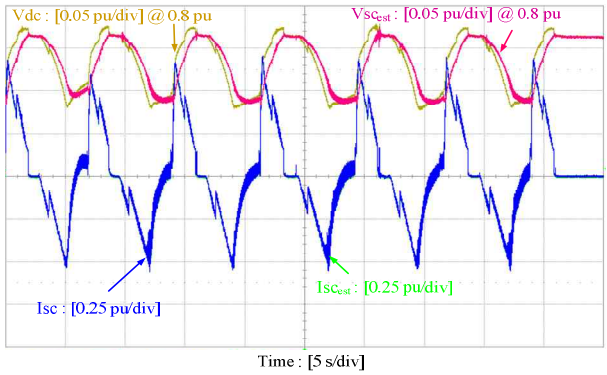
울트라 캐패시터를 충전한다는 것은 그만큼 엔진에게 부하를 준다는 것을 의미한다. 설계된 시스템의 경우, 요구되는 펌프 출력을 모두 엔진이 감당하므로 굴삭 작업 중에서의 충전은 곧 엔진에게 과부하가 될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 울트라 캐패시터는 선회 동작 중에 가능한 빨리 충전되어야 한다. 이에 따라 엔진 발전기의 전류 지령은 거의 계단 지령 형식이 되어야 한다. 하지만 울트라 캐패시터는 셀의 직렬 연결이 많으면 많을수록 직렬 등가 저항(ESR : Equivalent Series Resistance)은 연결 수에 비례하여 증가한다. 이러한 큰 ESR 로 인해 만약 울트라 캐패시터에 계단 형태의 전류가 인가될 경우, 직류단 측정 전압에는 ESR 로 인한 전압 하강이 포함되므로 울트라 캐패시터를 일정한 전압으로 유지하기 힘들고, ESR 이 가지는 전압만큼 고착 현상을 보이게 된다. 이로 인해 울트라 캐패시터 전압 및 전류에 큰 맥동이 보이게 되고, 이러한 큰 맥동은 울트라 캐패시터 수명에 악영향을 주게 된다. 따라서 계단 전력 지령을 인가하면서 이러한 현상을 피하기 위해서는 울트라 캐패시터 전압 추정이 필요하다.

<그림 3>은 실제 울트라 캐패시터를 간단히 캐패시턴스(C_{sc}), 직렬 등가 저항(R_{esr}), 직렬 등가 인덕턴스 (L_{esl})로 모델링하여, 폐루프 추정기를 구성한 후 이를 블록 다이어그램으로 표현한 그림이다. 직류단 전압(V_{dc})은 곧 울트라 캐패시터의 단자 전압을 뜻하므로 내부 추정기는 이 직류단 전압과 울트라 캐패시터 전류를 통해 울트라 캐패시터 내부 전압을 추정하게 된다.

3. 실험 결과



(a)



(b)

<그림 4> 제안된 전력 제어 알고리즘을 이용한 실험 결과

<그림 4>는 ω_{rpm_high}를 0.625 p.u 로 설정했을 때의 실험 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 울트라 캐패시터 내부 전류 및 전압을 잘 추정하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 선회 속도 지령 값이 0.625 p.u 인 시점에서 미리 충전을 하며, 선회 동작이 끝나는 것과 동시에 울트라 캐패시터 충전이 종료하는 것을 확인할 수 있다. 이로써 제안한 전력 제어 알고리즘이 잘 수행되는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 굴삭기의 신뢰성을 향상시키면서 최대한의 효율을 이끌어 낼 수 있도록, DC/DC 컨버터를 사용하지 않는 복합형 하이브리드 굴삭기의 구조를 제안하였다. 또한 이러한 굴삭기의 전력 변환 장치를 제어하기 위해 상태 천이 도표를 이용한 제어 방법을 제안하였다. 전압 고착 현상을 피하면서 최대한 빨리 울트라 캐패시터를 최대 허용 전압까지 충전시키기 위해 상태 천이 도표를 적용함에 있어 울트라 캐패시터 내부 전압 추정기에 의한 울트라 캐패시터 내부 전압을 사용하였다. 상용 굴삭기에 실제 장착하여 실험 결과를 통해 제안된 구조 및 전력 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 현재 제안된 복합형 하이브리드 굴삭기의 연비 측정을 위한 실험이 진행 중이다.

[참 고 문 헌]

[1] 이선우 권태석 설승기 김창현 안상준, "슈퍼 커패시터를 이용한 복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 제어", 2008 춘계 전력 전자 학술 대회 논문집, 2008.