

하이브리드 굴삭기의 전력 변환 장치의 제어

권태석, 이학준, 이준환, 설승기, 이선우*, 박철규**, 김낙인**
 서울대학교 전력전자연구실, LS산전중앙연구소*, 두산인프라코어기술원**

Control of Power Converter for Hybrid Excavator

Taesuk Kwon, Hakjoon Lee, Joonhwan Lee, Seungki Sul, Seonwoo Lee*, Cheolgyu Park**, Nakin Kim**
 Power Electronics Laboratory Seoul National University, Central Research Institute LS Industrial System*, Institute of Technology Doosan Infracore**

Abstract - 본 논문에서는 복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 변환 장치의 구조 및 제어 방법을 제안한다. 제안된 전력 변환 장치는 엔진 다이내모 장치를 이용하여 그 타당성을 입증하였으며, 제한된 실험 환경 내에서도 기존의 유압식 굴삭기와 비교하였을 때, 약 8% 정도의 연비향상의 효과를 얻을 수 있었다. 현재 실제 굴삭기에 장착하여 성능과 연비 측정을 위한 실험이 진행 중이다.

1. 서론

최근 급속히 상승하는 유가와 지구 온난화 등으로 대표되는 환경오염에 관한 염려 등으로, 기존에 기계식 엔진만을 동력원으로 사용하던 시스템들을 하이브리드화하고자 하는 노력이 지속되고 있다. 이와 같은 노력들은 승용차를 위시한 자동차 분야를 필두로 그 대상의 범위가 점점 넓어지고 있으며, 최근 건설 기계의 대표적인 굴삭기에 하이브리드 기술을 적용한 연구가 발표된 바 있다[1]. 참고 문헌 [1]에서는 슈퍼 커패시터를 이용한 하이브리드 굴삭기에 관한 연구를 다루었으며, 엔진으로부터의 기계 동력과 슈퍼 커패시터로부터의 전기 동력의 결합 방법에 따라 직렬형, 병렬형, 복합형으로 하이브리드 굴삭기를 분류하고, 그 장점과 단점을 분석하였다. 참고 문헌 [1]의 결과에 의하면, 복합형 하이브리드 굴삭기가 다른 구조에 비하여 가장 짧은 투자비 회수 기간과, 가장 높은 신뢰성을 갖는 것으로 예상되며, 이때의 연료비 절감 효과는 기존의 유압식 굴삭기에 비하여 약 24%에 달하는 것으로 발표되었다.

본 논문에서는 복합형 하이브리드 굴삭기에 사용되는 전력 변환장치의 구성과 제어 방법을 제안하고, 실험 결과에 관하여 다루기로 한다. 엔진 다이내모 장치가 제안된 제어기의 성능과 타당성의 검증을 위하여 사용되었으며, 제한된 실험 환경에도 불구하고 약 8%의 연료비 절감 효과를 얻을 수 있었으며, 현재 실제 굴삭기에 장착하여 성능과 연비 측정을 위한 실험이 진행 중이다.

2. 본론

2.1 복합형 하이브리드 굴삭기의 구조

그림 1의 (b)는 하이브리드 굴삭기의 블록 도이며, 비교를 위하여, 기존의 유압식 굴삭기의 블록 도를 그림 1의 (a)에 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 복합형 하이브리드 굴삭기에서는, 슈퍼 커패시터의 전기 동력은 발전기(generator)에 의하여 기계 동력으로 변환되어 엔진의 기계 동력과 함께 유압 펌프를 구동하게 된다. 한편, 선회(swing) 동작을 담당하는 작동기(actuator)는 유압식 작동기에서 전동기(electrical motor)로 대체되어 선회 감속 운동시에 발생하는 회생 전력이 슈퍼 커패

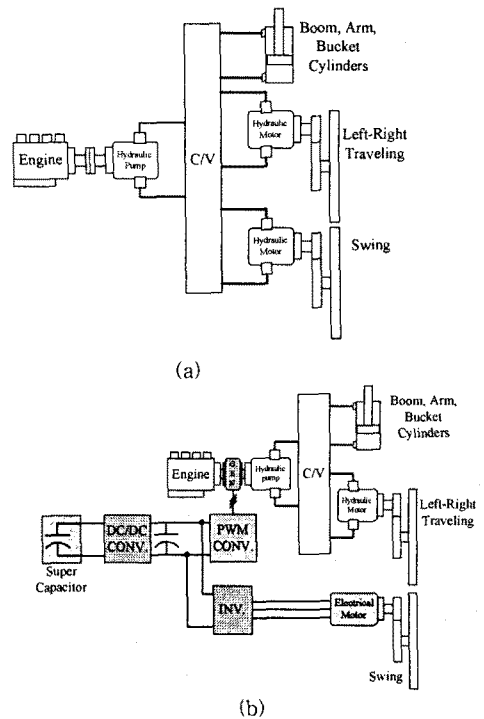


그림 1. 유압식 굴삭기(a)와 하이브리드 굴삭기(b)의 구조

시터에 저장되거나, 엔진과 함께 유압 펌프를 구동할 수 있도록 되어 있다.

슈퍼 커패시터는 유압 펌프의 요구 동력이 큰 경우, 방전하여 엔진을 도와주는 역할을 하거나, 펌프의 요구 동력이 작은 경우, 엔진에 의하여 충전된다. 이와 같은 동력의 분배를 통하여, 복합형 하이브리드 굴삭기에서는 엔진을 기존의 유압식 굴삭기에서 보다 좀 더 효율이 높은 영역에서 동작시킬 수 있게 된다.

또한, 선회 작동기를 유압 회로에서 분리함으로써, 유압식 제어 밸브에서 생기는 손실을 다소 줄일 수 있게 된다.

2.2 복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 변환 장치

그림 1에 나타낸 바와 같이 복합형 하이브리드 굴삭기에는 발전기를 제어하기 위한 PWM 컨버터와 선회 전동기를 구동하기 위한 인버터, 그리고 슈퍼 커패시터의

전력을 제어하기 위한 DC/DC 컨버터 등의 전력 변환 장치가 필요하게 된다. 선회 전동기는 굴삭기 작업자의 지령에 따라 원하는 속도로 회전하게 되며, 따라서 선회 전동기용 전력 변환 장치로는 일반적인 속도 제어 기능을 갖고 있는 인버터가 사용되었다.

2.2.1 DC/DC 컨버터

슈퍼 커패시터의 순시 전력 제어를 위하여 양방향 DC/DC 컨버터가 사용되었으며 그림 2와 같이 각 상의 스위칭을 120°씩 이동하여 전압을 합성하는 인터리빙(interleaving) 기법을 적용하였다. 이와 같이 함으로써, 같은 스위칭 주파수에서 인덕터의 크기와 슈퍼 커패시터에 흐르는 전류의 맥동을 줄일 수 있게 된다.

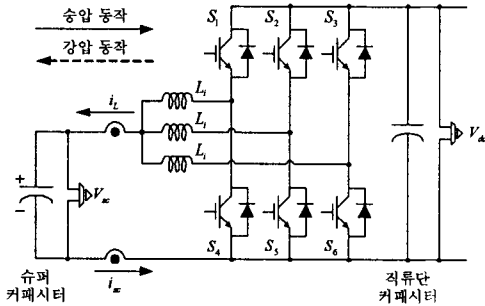


그림 2. 슈퍼 커패시터용 DC/DC 컨버터

2.2.2 PWM 컨버터

발전기의 전력 제어를 위하여 PWM 컨버터가 사용되었다. 그림 1의 (b)에 나타낸 바와 같이 복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 평형(power balance)을 위해서는 직류단의 전압이 일정 값으로 유지되어야 한다. 이와 같은 직류단 전압의 제어는 슈퍼 커패시터나 발전기의 전력 제어를 통하여 수행할 수 있는데, 본 논문에서는 발전기가 직류단 전압 제어를 담당하는 것으로 하였다. 이것은 엔진을 주 에너지 원으로, 슈퍼 커패시터를 보조 에너지 원으로 생각한 결과이며 상대적으로 열에 취약한 슈퍼 커패시터에 직류단 전압 제어를 위한 전력의 출입을 제한하는 역할도 하게 된다.

그림 3에 직류단 전압 제어기의 블록 도를 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 직류단 전압 제어기는 전력과 에너지의 차원에서 비례 적분(PI; Proportional Integral) 제어기로 구성되어 있다. 제어기의 비례 이득을 K_P , 적분 이득을 K_I 라고 하면 직류단 전압의 전달 함수는 다음 식(1)과 같이 구해진다.

$$\frac{V_{dc}^2}{V_{dc}^{*2}} = \frac{\hat{C}_{dc} K_P s + \hat{C}_{dc} K_I}{C_{dc} s^2 + \hat{C}_{dc} K_P s + \hat{C}_{dc} K_I} \quad (1)$$

따라서 직류단 커패시턴스를 정확하게 알고 있다면, 식(1)은 식(2)와 같이 간단히 되어, 감쇄율 ξ 와 자연 주파수 ω_0 를 이용하여 설계할 수 있다.

$$\frac{V_{dc}^2}{V_{dc}^{*2}} = \frac{K_P s + K_I}{s^2 + K_P s + K_I} = \frac{2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2)$$

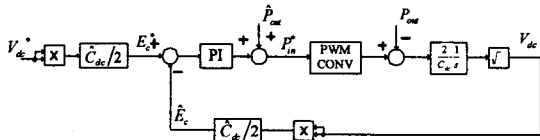


그림 3. 직류단 전압 제어기의 블록도

2.2.3 전력 분배 알고리즘

앞서 언급한 바와 같이 슈퍼 커패시터를 이용하여 엔진을 좀 더 효율이 높은 영역에서 동작시키려면, 슈퍼 커패시터의 전력량을 적절히 결정하여야 한다. 일반적인 유압식 굴삭기의 경우, 엔진은 최대 출력을 낼 수 있는 속도에서 정속으로 운전된다. 하지만, 이 속도 영역에서의 효율은 좋지 않으며, 특히 경부하의 경우에 효율은 더욱 나빠진다. 복합형 하이브리드 굴삭기에서는 엔진의 운전 속도를, 최대 출력을 낼 수 있는 속도가 아니라, 최고 효율을 가질 수 있는 속도로 결정하며, 최대 효율을 갖는 운전점에서의 엔진 출력 이상의 부하 요구 동력은 슈퍼 커패시터가 담당하게 한다. 또한 부하 요구 동력이 작은 경우, 가능한 한 최대 효율을 갖는 엔진 운전점에서 엔진을 동작시켜 슈퍼 커패시터를 충전 시킨다.

그림 4는 상기한 내용을 블록 도로 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)는 슈퍼 커패시터의 전력 지령치를 구하는 블록이고, (b)는 발전기의 전력 지령치를 구하는 블록이다. 선회 운동을 위한 전력은 슈퍼 커패시터 전압의 크기에 의하여 결정되는 'Flag' 값에 따라, 슈퍼 커패시터나 발전기에서 공급 또는 흡수된다. 또한 슈퍼 커패시터의 전압이 일정 값 이상이 되거나 이하가 되면, 슈퍼 커패시터의 충/방전을 더 이상 할 수 없는 상태가 되므로, 슈퍼 커패시터 전압의 크기에 따라 각각의 전력 지령치에 제한을 두게 된다. 그림 5에 슈퍼 커패시터와 선회 전력의 크기에 따라 'Flag' 값과 각각의 전력의 상/하한 값을 정하는 방법을 상태 흐름 도(state flow diagram)를 통하여 나타내었다.

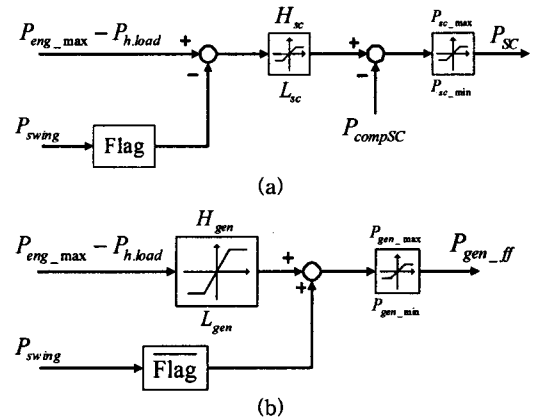


그림 4. 슈퍼 커패시터 전력 지령(a)과 발전기 전력 지령(b)의 결정

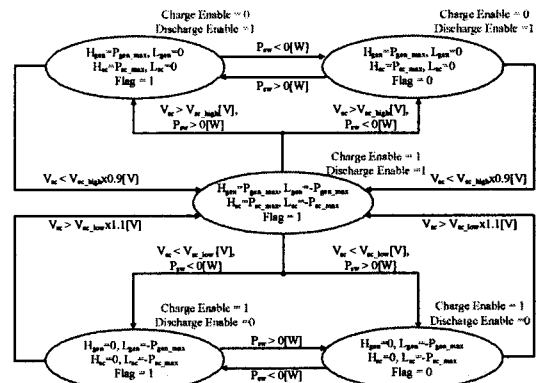


그림 5. 전력 분배 전략의 상태 흐름 도

예를 들어, 슈퍼 커패시터의 전압이 일정 값 이상이 되면, 부하의 요구 동력이 작더라도 엔진은 더 이상 슈퍼 커패시터를 충전할 수는 없고 방전만 가능하게 된다. 따라서 이 경우, 슈퍼 커패시터의 전력 지령치 하한 값(Lsc)과 발전기 전력 지령치의 하한 값(Lgen)을 0으로 설정하여 슈퍼 커패시터의 충전을 막는다.

3. 실험 결과

제안된 전력 분배 알고리즘과 각각의 전력 변환기의 제어 성능을 검증하고자 엔진 다이내모 장치에서 실험을 수행하였으며 그림 6의 (a)에 실험 장치를 나타내었다. 선회 전력은 그리드 파워를 그림 6의 (b)에서처럼 제어하여 모의하였으며, 다이내모 장치의 부하 패턴을 그림 6의 (c)에 나타내었다. 그림 6의 (c)에 나타낸 것처럼 다이내모 장치의 부하량은 엔진의 정격 출력의 약 20%~60% 정도의 값으로 앞서 언급한 전력 분배 알고리즘을 검증하기에 충분하지 않은 크기이다. 이는 다이내모 장치의 물리적 한계 때문이며, 따라서 전력 분배 알고리즘에서 엔진의 출력이 40% 정도를 최대 효율 운전점으로 가정하여 실험을 진행하였다.

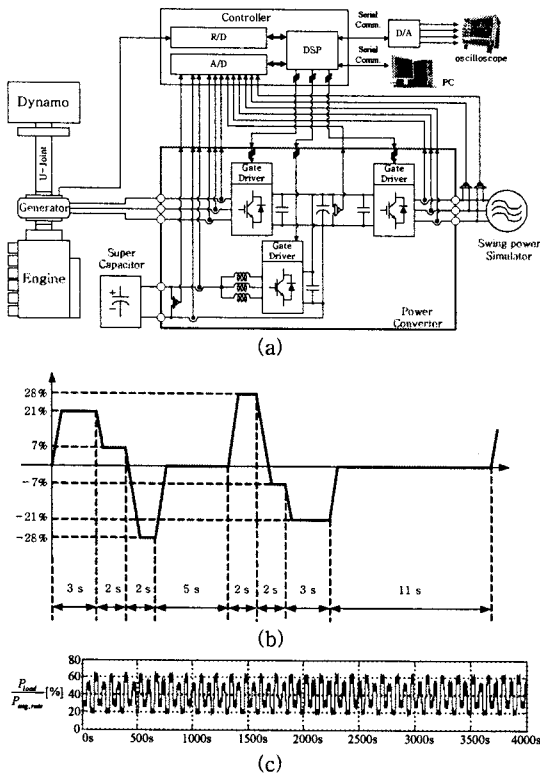


그림 6. (a)엔진 다이내모 장치의 블록도 (b)선회 전력을 모의 하기 위한 전력 패턴 (c)다이내모 장치의 부하 패턴

그림 7은 그림 6의 부하 패턴과 모의 선회 전력 지령을 이용하여 얻은 실험 결과의 일부이다. 그림에 나타낸 바와 같이 직류단 전압은 약 10[V] 이내로 잘 제어되고 있으며 슈퍼 커패시터의 전압 또한 한 작업 주기 이내에 일정한 값으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 이로 부터, 제안된 전력 분배 전략이 순시적 전력 균형과 작업 주기당 에너지 균형을 유지하고 있음을 알 수 있다.

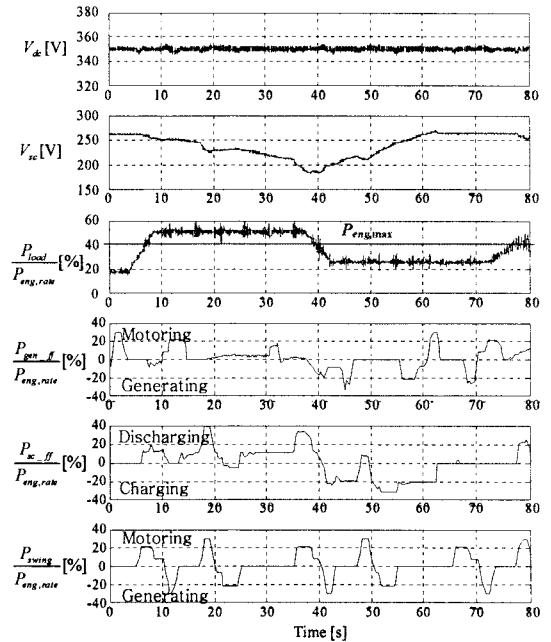


그림 7. 실험 결과

한편, 연료 소모량의 변화를 살펴보기 위하여, 선회 전력의 모의 없이, 그림 6의 (c)에 나타낸 부하 패턴을 이용하여 엔진 단독 운전의 경우와 슈퍼 커패시터와의 전력 분배를 적용한 경우를 비교하였다. 그 결과 하이브리드를 적용한 경우, 약 8%의 연료 소모량의 감소가 나타났다. 이는 기대치보다 작은 값이다. 하지만, 이 경우, 선회 운동에 따른 회생 전력이 없다는 점과, 엔진의 아이들 상태가 전혀 없다는 점, 그리고 다이내모에 의한 부하의 크기가 엔진의 정격에 비해 너무 작다는 점 등을 감안하면 이해할 수 있는 결과이며, 실제 굴삭기에 적용하였을 때 더 많은 연료비 절약 효과를 기대할 수 있게 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 복합형 하이브리드 굴삭기의 전력 변환 장치의 구조 및 제어 방법을 제안하였다. 제안된 전력 변환 장치와 제어 방법은 엔진 다이내모 장치를 이용하여 그 타당성과 성능을 입증하였으며, 제한된 실험 환경 내에서도 기존의 유압식 굴삭기와 비교하였을 때, 약 8% 정도의 연비 향상의 효과를 얻을 수 있었다. 현재 실제 굴삭기에 장착하여 성능과 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.