

듀얼 모드 로봇청소기용 전력변환장치 설계 및 제어

김민중, 주동명, 이병국†
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Design and Control of Power Conversion System for Dual Mode Robot Vacuum Cleaner

Min Jung Kim, Dong Myoung Joo, and Byoung Kuk Lee†
Department of Electrical and Computer Engineering Sungkyunkwan University

ABSTRACT

청소 능력을 향상시키기 위해 높은 출력을 갖는 흡입 모터를 탑재한 로봇 청소기의 경우 계통에 연결하여 동작하는 유선 모드와 계통과 분리되어 무선 모드로 동작이 가능하다. 고출력 모터를 구동하기 위하여 듀얼 모드 로봇 청소기는 고용량의 배터리가 필요하고, 그에 따라 배터리 충전기의 용량 또한 증가되어야 한다. 본 논문에서는 듀얼 모드 로봇청소기의 동작 모드를 분석하여 유/무선 동작 및 배터리 충전이 가능한 800W급 전력 변환 장치를 개발하였다.

1. 서 론

세계적으로 로봇청소기 시장은 스마트 가전제품의 대중화와 더불어 높은 성장률을 보인다. 로봇청소기의 배터리는 먼지 흡입 모터, 바퀴 회전 모터, 동작 센서 등에 전력을 공급한다^[1]. 종래의 로봇청소기의 경우 배터리 용량이 낮고, 흡입 모터의 출력이 낮아 일반 가정용 진공청소기에 비해 먼지 흡입력이 떨어지는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 상용화된 로봇청소기 제품들은 부족한 먼지 흡입력을 보완하기 위해서 브러시나 걸레를 추가로 사용하는 방법을 택하였지만, 미세 먼지를 제거하기에는 한계가 있다. 따라서 흡입 모터의 출력을 증가시키는 방향으로 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라 로봇청소기에 고용량 배터리가 필요하게 되고, 전원을 효율적으로 사용할 수 있는 전력 변환장치가 필요하다.

본 논문에서는 고출력 흡입모터를 이용한 로봇청소기의 전력 변환장치를 제안한다. 제안한 전력 변환장치는 고용량 배터리를 충전할 수 있는 모드와 고용량 흡입 모터를 직접적으로 구동할 수 있다. 유선동작과 무선동작이 가능한 제안하는 로봇청소기의 동작모드를 분석하고, 800W급 프로토타입을 제작하여서 제안한 토폴로지의 타당성을 검증한다.

2. 회로 구성 및 모드 분석

그림 1은 본 논문에서 제안하는 듀얼 모드 로봇청소기용 전력변환장치의 회로 구성 및 동작 모드에 따른 전력흐름도를 나타낸다. 제안하는 시스템은 Boost power factor correction (PFC), LLC 공진형 컨버터, 돌입 전류 방지 스위치 스위치 (2 MOSFETs), Boost 컨버터로 구성된다. Boost PFC는 역률 개선 및 dc링크 전압을 제어하며, LLC 공진형 컨버터는 동작 모드에 따라 2차측 전압을 제어하는 역할을 한다. 돌입 전류 방지 스위치는 배터리와 직렬로 연결되어 배터리 충전 시 발생하는 돌입 전류를 방지하는 역할을 하며, Boost 컨버터는 유선 모드 동작 시 인버터 입력 전압을 승압시켜주는 역할을 한다. 인버터의 최대 용량은 650W이며, 로봇청소기 구동에 필요한 전원의 용량은 150W로 선정하였다. 제안한 시스템의 동작모드는 총 3가지이며 각 모드는 아래와 같다.

1) 모드 I : 배터리 충전 모드로 Boost PFC는 계통 전원을 정류하여 정전압을 LLC 공진형 컨버터 입력 측에 전달한다. LLC 공진형 컨버터는 정전류 정전압 (constant current constant voltage, CC CV) 알고리즘을 통해 배터리 충전 상태에 따라 출력을 제어한다. LLC 공진형 컨버터의 설계 시 출력 전압범위가 배터리 전압범위를 만족할 수 있도록 공진네트워크와 스위칭 주파수 범위를 고려해야 한다^[2].

2) 모드 II : 무선 동작 모드로 Boost PFC와 LLC 공진형 컨버터는 동작하지 않으며, 흡입 모터는 배터리 전원을 공급받아 동작한다. Boost 컨버터의 MOSFET는 턴 오프되어 배터리가 인버터에 바로 연결되는 구조를 가진다. 돌입 전류 방지 스위치와 Boost 컨버터의 다이오드는 모드 II구간동안 항상 턴 온 되어 있기 때문에 온저항과 순방향 전압강하가 낮은 값을 갖는 소자 선정이 필요하다.

3) 모드 III : 유선 모드 동작으로 배터리가 돌입 전류 방지 스위치로 인해 시스템과 분리된다. Boost 컨버터의 입력전압은

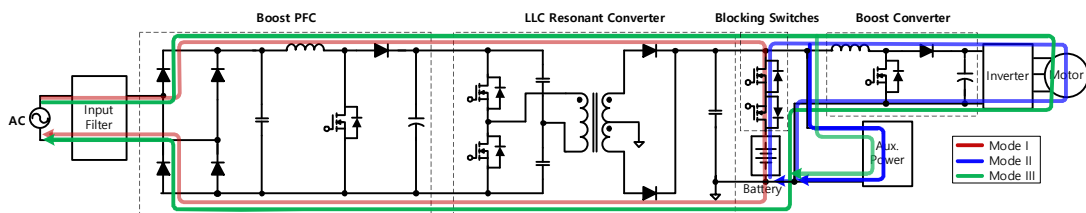


그림 1. 제안한 시스템의 회로 구성.
Fig. 1. Configuration of the proposed system.

LLC 공진형 컨버터와 Boost PFC에 의해 일정하게 유지된다. Boost 컨버터는 흡입모터의 역기전력의 크기에 따라 출력 전압을 가변한다. 배터리가 시스템과 다시 연결될 때에는, 돌입 전류 방지 스위치의 게이트 신호를 점차적으로 증가시켜 돌입 전류의 크기를 제한한다.

3. 시스템 설계 및 실험 결과

제한한 전체 시스템의 사양은 표 1과 같으며, TI사의 TMS320F28335 단일 디지털 제어기를 통해 제어된다. 시스템 부피를 저감하기 위해서 Boost PFC의 인덕터는 두 개의 코어를 적층하는 방법을 택하였다. 코어를 적층할 경우 직류 바이어스특성이 좋아지며, 자성체 부피를 저감할 수 있는 장점이 있다^[3]. 또한 LLC 공진형 컨버터의 변압기 크기를 저감하기 위해서 변압기의 누설 인덕턴스를 공진네트워크에 적용할 수 있는 설계를 하였다. 표 3은 설계한 시스템의 파라미터 값들을 나타낸 것이다. 그림 2는 계통 연결 상태 및 모터 구동 상황에 따른 각각의 동작 모드 선택 알고리즘이다. 그림 3은 제안한 시스템 동작 시 주요 실험 파형이다.

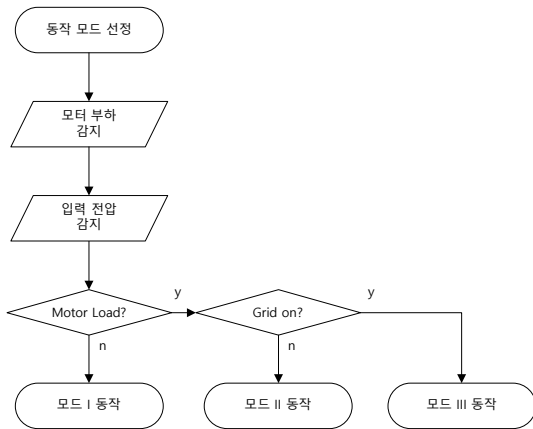


그림 2. 제안한 시스템의 동작 순서도.
Fig. 2. Operation flow chart of the proposed system.

표 2 제안한 시스템 사양
Table 2 Specification of the proposed system

Parameter	Value [Unit]	Parameter	Value [Unit]
최대 출력	800 [W]	배터리 전압	22.5 37.8 [V _{dc}]
입력 전압	220 [V _{ac}]	최대 충전 전류	16.5 [A]
DC링크 전압 (Boost PFC)	380 [V _{dc}]	DC링크 전압 (인버터)	67.2 [nF]

표 3 시스템 특성값
Table 2 Parameters of the proposed system

Parameter	Value [Unit]	Parameter	Value [Unit]
$f_{sw(Boost PFC)}$	50 [kHz]	$L_{(Boost PFC)}$	700 [μ H]
$f_{sw(LLC)}$	100 400 [kHz]	$L_{r(LLC)}$	19.5 [μ H]
$n_1:n_2(LLC)$	24 : 3	$L_{m(LLC)}$	94.9 [μ H]
$C_{r(LLC)}$	62 [nF]		
$f_{sw(Boost)}$	150 [kHz]	$L_{(Boost)}$	98.5 [μ H]

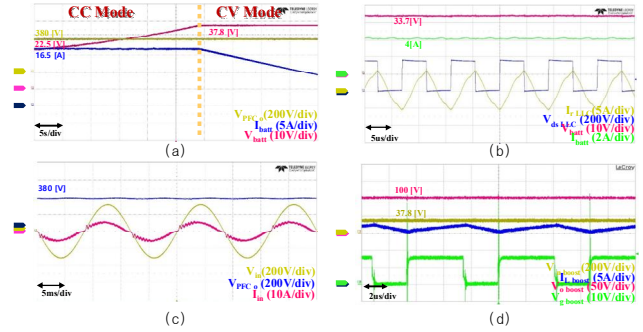


그림 3. 제안한 시스템의 실험 파형.
Fig. 3. Experimental waveform of the proposed system.

그림 3(a)는 전자 부하를 이용하여 CC CV 충전 실험을 모의한 결과 파형이다. 초기에 16.5A 정전류 충전을 진행하고 배터리 전압이 37.8V에 도달하면 정전압 충전을 진행한다. 그림 3(b)는 배터리를 4A로 충전할 때 LLC 공진형 컨버터의 주요 파형이다. 그림 3(c)는 800W 부하 시 Boost PFC 동작 파형으로 이때의 역률은 0.97이다. 그림 3(d)는 Boost 컨버터가 650W 동작 시 37.8V 입력을 100V로 승압할 때의 파형이다. 전체 시스템의 최대 효율은 600W 동작 시 92%이다.

4. 결론

본 논문에서는 고효율 흡입 모터를 탑재한 유/무선 듀얼 모드 로봇청소기의 전력 변환장치를 제안하였다. 제안한 시스템의 동작 모드를 분석하였으며, 800W급 프로토타입을 제작하여 동작 성능을 평가하였다. 시스템은 최대 92%의 효율을 달성하였으며, 향후 각 수동소자의 최적 설계를 통해 효율 성능 개선 및 시스템 소형화를 위한 연구를 진행할 계획이다.

참고 문헌

[1] Y. K. Ma, S. W. Kim, D. I. Oh, and Y. W. Cho, "A study on development of home mess cleanup robot McBot," Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2008.

[2] J. Deng, S. Li, S. Hu, C. C. Mi, and R. Ma, "Design methodology of LLC resonant converters for electric vehicle battery chargers," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 63, no. 4, pp. 1581–1592, May 2014.

[3] T. Tera, H. Taki, and T. Shimizu, "Loss reduction of laminated core inductor used in on board charger for EVs", Power Electronics Conference (IPEC Hiroshima 2014 ECCE ASIA), 2014 International. IEEE, 2014.