전기자동차 완속 충전기의 커패시터리스 제어 기법

김태원, 박태준, 한무호, 박천윤, 권봉환
포항산업과학연구원(RIST), 포항공대(POSTECH)

Capacitorless Control Thechnique for EV Onboard Charger

Tae Won Kim, Tae Joon Park, Mu Ho Han, Cheon Youn Park, Bong Han Kwon
Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST), POSTECH

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 완속충전기의 DC 링크단에 전해콘덴서를 제거하고 이를 필름콘덴서로 대체하고 그 용량도 최소화 하는 방법을 제안한다. 추가적인 하드웨어의 변경없이 제어알고리즘의 개선을 통해서 이를 실현하는 방법을 제안한다. 3kW급 차량용 충전기를 제작하고 시험을 통해 논문의 우수성을 증명한다.

1. 서론

전기자동차용 완속 충전기는 소형경량화 장내구성을 요구한다. 이러한 요구에 부합하기 위해서는 기존의 전해콘덴서를 사용을 최소화 하거나 제거할 수 있는 방법을 찾아야 한다. 전해콘덴서가 제품수명에 많은 영향을 미치고, 사용전압 및 주변온도 조건에 따라서 수명이 크게 좌우된다. 전해콘덴서를 필름콘덴서로 단순히 대체하는 것은 같은 용량의 커패시턴스를 얻기 위해서는 필름콘덴서의 사이즈가 너무 커지는 문제점이 있다. 따라서 필름콘덴서 사용량을 최소화 하면서 동작시킬 수 있는 방법이 요구된다. DC링크 콘덴서의 용량이 부족하면 계통전원 주파수의 2배 주파수의 맥류가 발생하여 전단 PFC 역률제어와 후단 DC/DC변환기의 전압제어가 힘들어진다. 본 논문에서는 DC링크의 맥류가 존재하는 상태에서도 역률제어와 DC/DC전압제어를 원활히 할 수 있는 기법을 소개하고 PSIM 시뮬레이션을 통해서 타당성을 검증하였다.

2. 제안된 제어기법

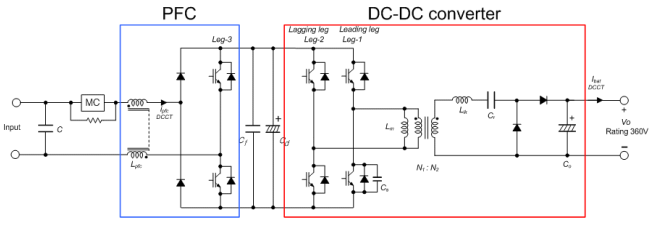

그림 1 전기차용 온보드 충전기 회로구성도

그림1의 온보드 충전기는 Half bridge형태의 PFC 변환기와 2차측 직렬공진 위상천이 DC/DC변환기로 구성되어 있다.[1]

DC/DC변환기의 동작원리는 참조논문[1]에 상세히 설명되어 있다. Leading leg 스위치는 거의 전영역에서 소프트스위칭이 보장되고, lagging leg 스위치는 다음 조건에 ZVS turn on이 보장 된다.

$$Q < \frac{2}{\pi F} \qquad \text{식(1)}$$

여기서 Q는 Quality factor로써 $Q = 4\omega_r L_{lk}/R_o$ 이며, F는 공진주파수 대 스위칭 주파수 비로써 $F = f_r/f_s$이다. 출력전압은 위상 천이각 ϕ에 비례하며 DC/DC변환기 전압제어기를 다음과 같이 구성할 수 있다. 위상 천이각 ϕ가 50%일 때 출력전압이 0이 되고 100%일 때 최대전압이 출력된다.

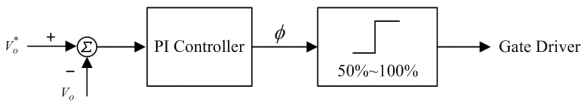

그림 2 DC/DC 변환기 전압제어기 구성도

PFC 제어기는 직접 적응제어 전류기법을 사용해서 구현하였다. 전원 입력전류i 와 모델전류i_m의 error신호 e의 미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$\begin{aligned}\dot{e} &= -ae + \frac{1}{L}(-\hat{k}_1 e - \hat{k}_2 i_m - \hat{k}_3 \dot{i}_m) - \frac{1}{L}(-k_1 e - k_2 i_m - k_3 \dot{i}_m) \\ &= -ae - \frac{1}{L}(\tilde{k}_1 e + \tilde{k}_2 i_m + \tilde{k}_3 \dot{i}_m)\end{aligned} \qquad \text{식(2)}$$

여기서 Lyapunov 함수 $V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{\tilde{k}_1^2}{2\gamma_1} + \frac{\tilde{k}_2^2}{2\gamma_2} + \frac{\tilde{k}_3^2}{2\gamma_3}$를 정의하고 시간에 대해 미분을 하면 다음식과 같다.

$$\dot{V} = e\dot{e} + \frac{\tilde{k}_1\dot{\tilde{k}}_1}{\gamma_1} + \frac{\tilde{k}_2\dot{\tilde{k}}_2}{\gamma_2} + \frac{\tilde{k}_3\dot{\tilde{k}}_3}{\gamma_3} \qquad \text{식(3)}$$

식(3)에 식(2)을 대입하면 다음식과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = -ae^2 + \frac{\tilde{k}_1}{\gamma_1}(\dot{\tilde{k}}_1 - \gamma_1 e^2) + \frac{\tilde{k}_2}{\gamma_2}(\dot{\tilde{k}}_2 - \gamma_2 e i_m) + \frac{\tilde{k}_3}{\gamma_3}(\dot{\tilde{k}}_3 - \gamma_1 e \dot{i}_m) \qquad \text{식(4)}$$

따라서 Control update law를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{k}}_1 &= \dot{\tilde{k}}_1 = \gamma_1 e^2 \\ \dot{\hat{k}}_2 &= \dot{\tilde{k}}_2 = \gamma_2 e i_m \\ \dot{\hat{k}}_2 &= \dot{\tilde{k}}_3 = \gamma_1 e \dot{i}_m\end{aligned} \qquad \text{식(5)}$$

식(5)을 식(4)에 대입하면 $\dot{V} = -ae^2 \leq 0$ 이 되고, 따라서 error e는 시간 t가 증가함에 따라 0으로 수렴한다. 상기 제어 알고리즘을 블록다이어그램으로 표현하면 그림3과 같이 된다. 여기서 k_1값에 e의 제곱항이 있어 발산의 우려가 있다. 본 논문에서는 k_1의 크기가 일정값 이상으로 올라가면 Resetting을 통해 $k_1 - \Delta$로 크기를 제한시키는 방법을 제안한다. Resetting 후에도 인버터 출력전류에 왜란이 발생하지 않음을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있었다.

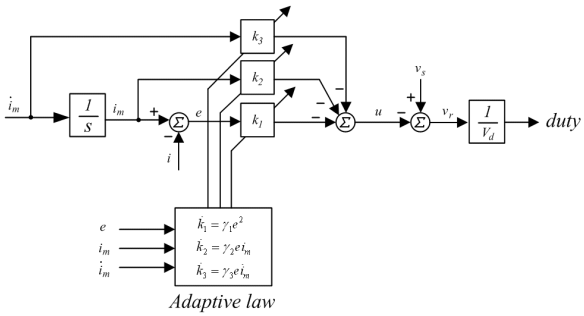

그림 3 제안된 직접적응제어 알고리즘 블럭다이어그램

3. 시뮬레이션 결과

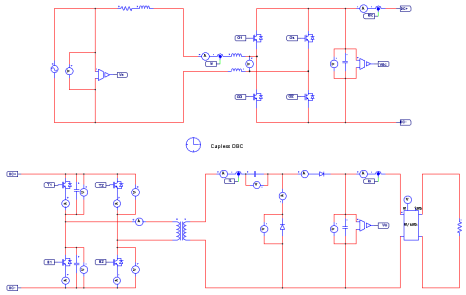

그림 4 제안된 온보드 충전기의 PSIM 모델

본 논문에서 제안된 커패시터리스 제어기법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM tool을 이용해서 시뮬레이션을 수행하였다. DC link 콘덴서는 100uF을 사용하였고 기존의 전해콘덴서 용량에 비하여 대폭 감소시켰다.

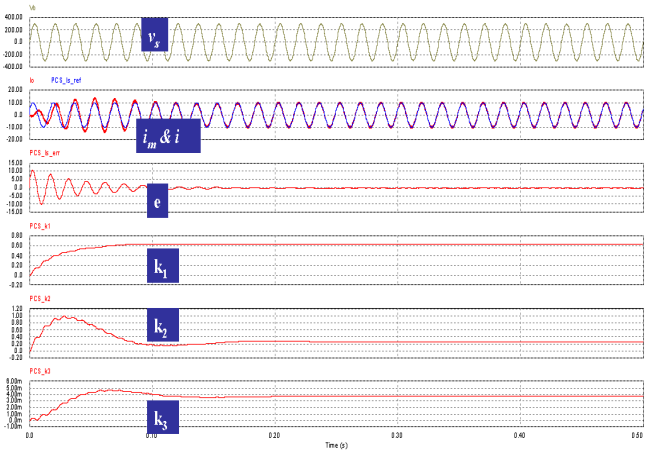

그림 5 제안된 적응제어기의 과도상태 시뮬레이션 파형

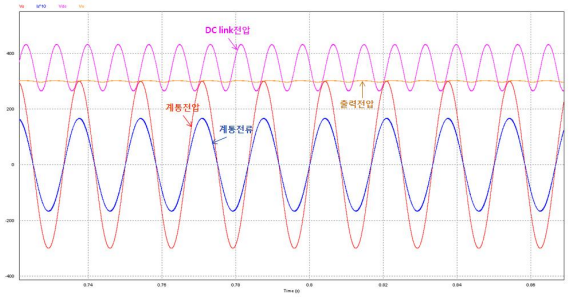

그림 6 제안된 제어기 동작 시 입출력 및 DC link 전압 파형

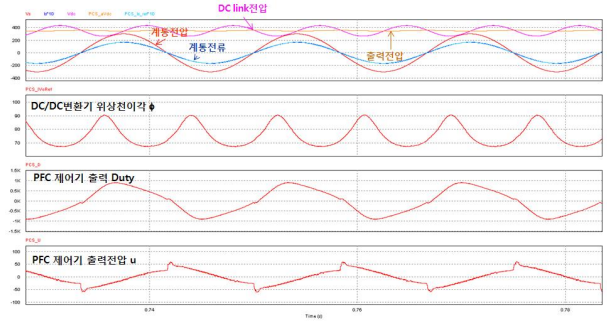

그림 7 DC/DC 위상천이각과 PFC 제어기 출력 파형

그림5는 제안하는 PFC 전류제어기의 과도상태 응답특성을 나타낸 것이다. Lypunov stability에 의해 모델전류와 계통전류의 error값인 e는 시간이 지남에 따라 0으로 수렴하고 제어 파라미터인 k_1, k_2, k_3는 일정한 값으로 bounded 되어서 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그림6은 입출력 및 DC link전압 파형을 나타낸 것이다. DC link전압은 콘덴서 용량이 부족하여 260V~430V 사이의 맥류가 나타남을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 입력전류는 정현파전류가 제어됨을 볼 수 있고 출력전압도 300V로 안정되게 유지됨을 볼 수 있다. 그림7은 제어기 동작 중에 DC/DC 위상천이각과 PFC제어기의 출력파형이 어떻게 변화는지를 살펴본 것이다.

4. 결론

본 논문은 전기자동차용 완속충전기의 DC 링크단에 전해콘덴서를 제거하고 이를 필름콘덴서로 대체하고 그 용량도 최소화한 상태에서 제어 알고리즘의 개선을 통하여 DC link의 맥류가 존재함에도 불구하고 PFC 전류제어와 DC/DC 전압제어를 원활히 할 수 있는 방법을 제안하였다. PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 전기자동차용 충전기의 장기내구성을 보장하는 특성구현에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Eung Ho Kim, Bong Hwan, "Zero Voltage and Zero Current Switching Full Bridge Converter With Secondary Resonance", IEEE IE, VOL. 57, NO. 3.

[2] 김태원, 박태준, 한무호, "계통연계형 인버터의 강인한 직접 적응제어 전류기법에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문