

전기자동차 온-보드 충전기를 위한 단상 CHFL 컨버터의 예측전류제어 기법

김승권, 김재근, 박성민
 홍익대학교 전자전기공학과

Predictive Current Control Method of Single Phase CHFL Converter for EV On-board Charger

Seung-Gwon Kim, Jae-Keun Kim Sung-Min Park
 Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 온-보드 충전기용 단상 cycloconverter-type high frequency link 컨버터의 전력 제어 성능과 동적 응답특성을 개선하기 위하여 예측전류제어 기법을 적용한다. 배터리를 충전 및 방전하기 위하여 전력계통에 연결되는 V2G 충전기는 전압 변동, 고조파 왜곡 등의 외란 발생에도 강인한 동적 응답 특성을 유지하여야 한다. 예측전류제어 기법이 적용된 제어기는 계통 외란이 존재하는 경우에도 전력 레퍼런스를 빠르게 추적하고 정확한 듀티를 생성할 수 있으므로 우수한 동적 및 과도 응답특성을 갖는다. 제안하는 제어기의 성능과 파라미터 변동에 대한 민감도는 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 평가되며, 여러 계통외란 상태에서 PI 제어기와 비교된다.

1. 서 론

전력망에 IT 기술을 결합하고 전력설비를 실시간 모니터링 및 제어하는 스마트 그리드에 대한 관심이 증가함에 따라, 발전 및 전력망 투자 수요를 줄이기 위하여 전기자동차의 배터리를 에너지저장장치로 사용하는 V2G(Vehicle to Grid)에 대한 개발 및 실증이 진행되고 있다. 또한, 시스템을 효과적으로 제어하기 위한 기능과 성능, 안정성을 가진 많은 제어 기법이 연구되고 있다.

온-보드 충전기는 공간이 제한되어있는 전기자동차 내부에 탑재되기 때문에 높은 전력 밀도가 요구된다. 기존 양방향 절연형 컨버터로는 그림 1(a)와 같이 두 개의 풀 브릿지 구조를 갖는 dual-active-bridge(DAB) 컨버터가 많이 사용되고 있다. DAB컨버터는 부피가 큰 dc 링크 커패시터가 두 개의 전력단에 위치하기 때문에, 고전력밀도 컨버터에 적합하지 않을 수 있다. 그림 1(b)에 보이는 Cycloconverter-type high frequency link(CHFL) 컨버터^[1]는 고전력밀도 양방향 절연형 컨버터를 위한 적합한 회로구조를 가지고 있다. 그림 2에 보이는 CHFL 컨버터는 ac-ac 회로구조로 인하여 전력 변환 단계가 줄일 수 있으며, 위상 천이 PWM 컨버터를 사이클로컨버터에 적용함으로써 ac단의 전류 리플이 스위칭 주파수의 2배가 될 수 있어 ac 출력 필터의 크기가 감소시킬 수 있다.

배터리 충전 및 V2G를 위하여 전력 계통에 연동되는 배터리 충전기는 계통의 어떠한 외란 발생에도 견고하게 동작하여야 한다. 따라서, 강인한 전이 성능과 응답 특성을 가지는 고정밀 전류 제어기법이 필요하다. 본 논문에서는 CHFL 컨버터의 유효전력 및 무효전력 제어를 위하여 예측전류제어 기법을 적용한다. 예측전류제어 알고리즘은 다양한 부하 조건에서 빠르게 레퍼런스를 추적할 수 있으며, 전류제어기의 대역폭을 증가시킬 수 있다.

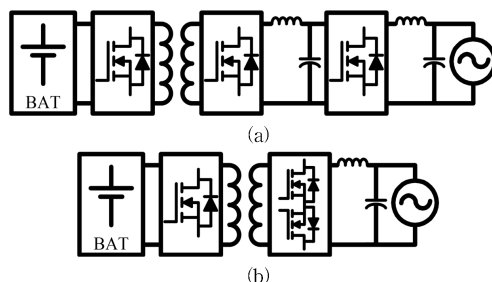


그림 1 온-보드 충전기 토폴로지: (a) Dual-active-bridge 컨버터, (b) Cycloconverter-type high frequency link 컨버터

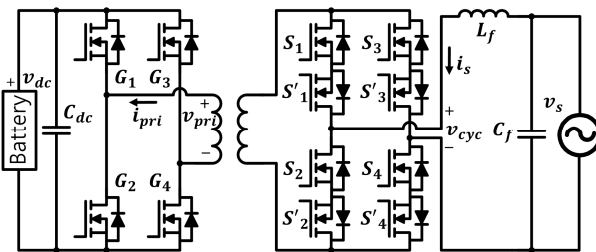


그림 2 Cycloconverter-type high frequency link 컨버터

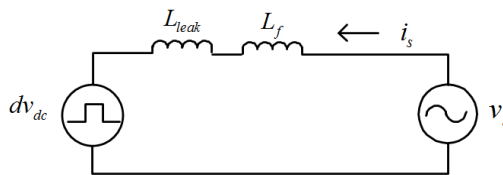


그림 3 Cycloconverter-type highfrequency link 컨버터의 등가모델

2. 예측전류제어 기법

예측제어기는 이전 스위칭 사이클에서 샘플링된 전압과 전류 값, 및 가지 파라미터들로 다음 스위칭 사이클에 대한 듀티를 계산한다. 예측전류제어 기법은 전류 샘플링 지점에 따라 밸리전류 제어, 피크전류제어, 평균전류제어의 세 가지 방법으로 분류할 수 있다. 샘플링 지점은 스위칭 신호가 어떻게 생성되는지에 따라 적절하게 선택되어야 한다.^[2] 예측전류제어를 위한 CHFL 컨버터의 수학적 모델은 그림 3과 같이 등가 모델로 간단하게 표현될 수 있다. L_{leak} 는 변압기의 누설 인덕턴스를 나타내며, L_f 는 ac단 LC필터의 인덕터를 나타낸다.

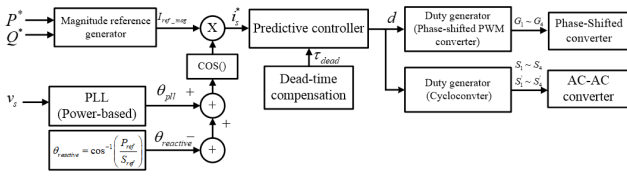


그림 4 제안하는 제어기의 블록 다이어그램

제안하는 제어 알고리즘의 블록 다이어그램은 그림 4와 같다. CHFL 컨버터의 등가모델을 기반으로, 예측 제어기에서 다음 스위칭 사이클은 아래와 같은 수식으로 계산된다.

$$v_s = (L_{leak} + L_f) \frac{di_s}{dt} + dv_{dc} \quad (1)$$

$$v_s(n) = (L_{leak} + L_f) \frac{i_s(n) - i_s(n-1)}{T_s} + d(n)v_{dc} \quad (2)$$

$$i_s(n) = i_s(n-1) + \frac{T_s(v_s(n) - d(n)v_{dc})}{L_{leak} + L_f} \quad (3)$$

$$i_s(n+1) = i_s(n) + \frac{T_s(v_s(n+1) - d(n+1)v_{dc})}{L_{leak} + L_f} \quad (4)$$

$$i_s(n+1) = i_s(n-1) + \frac{T_s(v_s(n+1) - d(n+1)v_{dc} + v_s(n) - d(n)v_{dc})}{L_{leak} + L_f} \quad (5)$$

수식 (5)에서, 전압 v_s 는 스위칭 사이클에 비해 매우 느리게 변화하기 때문에, 스위칭 주기 동안 일정한 값으로 간주될 수 있다. $i_s(n+1)$ 는 전류 레퍼런스 $i_s^*(n)$ 으로 표현하고, 다음 스위칭 듀티 $d(n+1)$ 에 대하여 정리하면 수식(6) 같다.

$$d(n+1) = \frac{2v_s(n)}{v_{dc}} - d(n) - \frac{L_{leak} + L_f}{v_{dc}T_s} (i_s^*(n) - i_s(n-1)) \quad (6)$$

스위칭 소자의 턴 온 딜레이로 인한 단락 회로 전류를 피하기 위해 데드 타임이 보장되어야 한다. 데드 타임 보상은 동작 모드에 따라 다르게 계산되며, 수정된 수식은 수식(7)과 같다.

$$d(n+1) = \frac{2v_s(n)}{v_{dc}T_{dead}} - d(n) - \frac{L_{leak} + L_f}{v_{dc}T_{dead}T_s} (i_s^*(n) - i_s(n-1)) \quad (7)$$

V2G 모드일 때, $\tau_{dead} = (T_s - 2T_{dead})/T_s$.

배터리 충전 모드일 때, $\tau_{dead} = (T_s + 2T_{dead})/T_s$.

$d(n+1)$ 는 CHFL 컨버터의 스위치를 제어하기 위한 PWM 듀티로 사용된다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Mark	Value	Unit
AC Voltage Source(rms)	v_s	220	V
AC Source Frequency	f	60	Hz
Battery Voltage	V_{dc}	400	V
Filter inductor	L_f	100	μH
Leakage inductance	L_{leak}	200	nH
Switching Frequency	f_{sw}	40	kHz

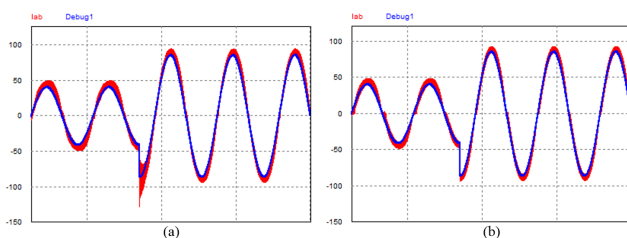


그림 5 피크전류에서 전류 레퍼런스 변동시 동적 응답 성능 비교 (-7kW → -14kW) (a)PI 제어기, (b)예측전류제어기

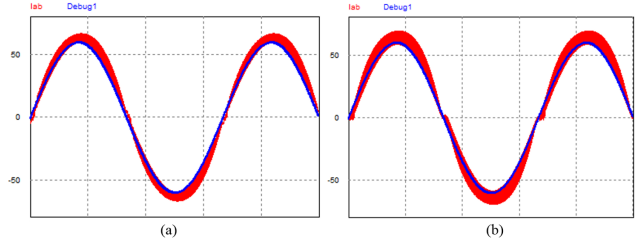


그림 6 파라미터 민감도 평가 (인덕턴스 오차 -20%) (a)PI 제어기, (b)예측전류제어기

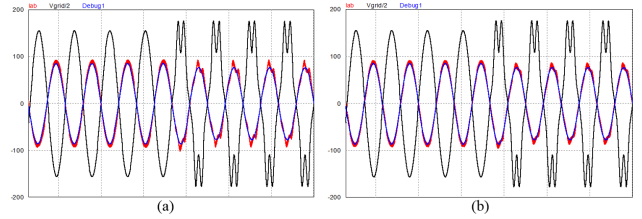


그림 7 고조파 왜곡 (P = -14kW, 5th 20%, 7th 10%) (a)PI 제어기, (b)예측전류제어기

3. 시뮬레이션 결과

제안된 제어 기법의 성능은 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 검증한다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 제안된 제어기는 기존 PI 전류 제어기와 비교된다. 그림 5는 피크 전류에서 전류 레퍼런스 변동시 동적 응답 성능을 비교한 결과이다. 영전류 지점에서는 두 제어기의 성능차이가 보이지 않지만, 전류 레퍼런스가 빠르게 변화하는 피크 전류 지점에서 유효전력 레퍼런스 변경 시, 예측전류제어기는 PI제어기보다 더 좋은 과도응답 특성을 갖는다. 예측제어기는 파라미터 정확도에 영향을 받기 때문에 파라미터 오차에 따른 제어 성능을 평가한다. 그림 6은 파라미터 민감도 평가를 위해 듀티 사이클 식의 인덕턴스 값에 오차를 준 결과이다. 부정확한 인덕턴스값을 사용함에도 불구하고 예측전류제어기는 심각한 전류 왜곡 없이 레퍼런스를 추종한다. 그림 7은 5차와 7차 고조파 왜곡에 대한 두 제어기의 성능을 비교한 결과이다. 두 제어기 모두 전류 레퍼런스를 추종하지만 예측전류제어기가 더 정현파에 가까운 전류 파형을 만들어낸다.

4. 결론

본 논문은 단상 CHFL 컨버터의 대한 예측전류제어 기법을 제안하였다. 제안하는 예측전류제어기는 파라미터 오차와 급격한 전력 레퍼런스 변동 및 계통외란 상황에서도 우수한 동적 응답 및 과도 응답 특성을 갖는다.

이 논문은 2017년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1C1B2008200)

참고 문헌

- [1] S. K. Mazumder, R. K. Burra, R. Huang, M. Tahir, K. Acharya, "A Universal Grid-Connected Fuel-Cell Inverter for Residential Application", IEEE Trans. Ind. Electron., pp. 3431-3447, Oct. 2010.
- [2] J. Chen, A. Prodic, R.W. Erickson, D. Maksimovic "Predictive digital current programmed control", IEEE Trans. Power Electron., pp. 411-419, Jan. 2003.