

모터 구동 시스템을 이용한 통합 DC 충전기의 2상 충전 방법

양준혁, 임규철, 황철민, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Two-Phase DC Charging Method in Integrated Charger

Junhyuk Yang, Gyu Cheol Lim, Cheolmin Hwang, Jung-Ik Ha
Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

최근 전기자동차용 배터리 전압이 800 V 급으로 상승하였다. 그러나, 기존의 DC 충전기는 400 V 급 배터리 충전에 적합하게 설계되어 있어 이를 이용해 800 V 급 배터리를 충전하기 위해서는 별도의 전력 변환이 요구된다. 다양한 전력 변환 방법 중에서, 본 논문에서는 구동 시스템을 이용한 통합 충전기의 새로운 충전 방법을 제안한다. 기존에는 통합 충전기의 세 상을 모두 충전에 이용하는 방법이 연구되고 상용화 되었으나, 본 연구에서는 두 상만을 이용하는 충전 방식을 제안한다. 전동기에 큰 영상분 전압을 인가하는 기존 방법과 달리, 제안하는 방법은 차동 모드 인덕턴스를 이용해 전류 리플을 저감한다. 특히, 제안하는 충전 방법은 2 근처의 승압비를 가질 때 전류 리플을 크게 저감해 충전 효율을 개선할 수 있다. 더 나아가, 본 논문에서는 두 상만을 이용하더라도 충전 중 토크가 발생하지 않는 조건에 대해 분석하였다. 마지막으로, 실험 결과를 통해 이론을 검증하였다.

1. 서론

최근 전기차 배터리 전압은 주행 거리 증대, 케이블 크기 감소, 그리고 더 빠른 충전을 위해 800 V 급으로 2배 증가했다. 하지만, 상승된 배터리 전압은 410 V의 최대 전압을 갖는 135 kW Tesla Supercharger와 같은 고속 충전기의 전압 한계를 초과한다^[1]. 고속 충전기의 최대 전압이 배터리 전압보다 낮은 경우, 배터리에 충전기를 직접 연결하는 방식을 사용할 수 없게 된다. 따라서, 기존의 저전압 고속 충전기로 고전압 배터리를 충전하기 위해서는 DC-DC 승압 전력변환이 필요하며, 산업에서는 약 2배의 승압비가 요구된다.

한편, 기존의 저전압 고속 충전기를 활용하기 위해 차량에 부스트 컨버터를 추가하는 방식이 널리 사용되었다. 그러나 이는 전기차의 무게와 부피를 증가시키며, 결과적으로 원가 상승 및 주행 거리 감소로 이어진다. 컨버터를 추가하는 방법 대신, 구동 시스템을 활용해 승압 전력변환을 수행하는 통합 충전 방법이 연구되고 전기차 등에 상용화 되었다. 그림 1에서 나타난 것처럼, 전동기의 중성점에 충전기를 연결하면 고정자 권선이 인덕터의 역할을 하는 3상 부스트 컨버터로서 동작할 수 있다.

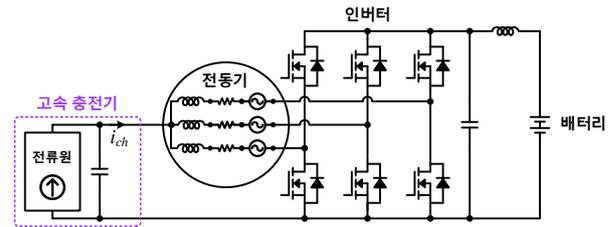


그림1 전동기 중성점을 이용하는 통합 충전기 구조.

2. 제안하는 2상 충전 방법

2.1 전류 리플 분석 및 2상 충전 방법의 제안

고정된 위치에 놓인 전동기에서 고정자 저항에 의한 전압 강하를 상대적으로 무시할 때, d , q , 그리고 n 축 방향으로 인가된 전압 v_{dqn} 은 전류 i_{dqn} 의 변화를 야기하며 다음과 같은 관계식을 갖는다^[2].

$$\begin{cases} v_d = L_d \frac{di_d}{dt} \\ v_q = L_q \frac{di_q}{dt} \\ v_n = (L_{ls} + L_n) \frac{di_n}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 L_d , L_q , L_n 은 각각 d , q , n 축 인덕턴스, 그리고 L_{ls} 는 누설 인덕턴스를 의미한다. 제시된 것처럼, 전압의 성분에 따라 유효한 인덕턴스가 달라진다. d 축 및 q 축과 평행한 전압에 대한 차동 모드 인덕턴스는 각각 L_d 와 L_q 이며, 영상분 인덕턴스는 $L_{ls} + L_n$ 이다. 일반적인 전동기에서는 영상분 인덕턴스의 크기가 차동 모드 인덕턴스보다 매우 작기 때문에, 전류 리플의 크기는 영상분 전압 v_n 에 지배적인 영향을 받는다. 그리고 모터 손실은 맥동 전류에 크게 영향을 받으므로, v_n 을 저감하여 AC 손실을 줄이는 원리를 이용해 충전 효율을 높일 수 있다.

각 상에 동일한 스위칭 신호를 인가하면, 순시적으로 영상분 전압만이 인가되어 전류 리플의 크기가 최대가 된다. 이 때 전류 리플의 크기를 줄여 효율을 높이기 위해 스위칭 신호 간에 위상차를 주는 방식이 널리 적용되어왔다. 특히, 기존의 3상 충전에서는 120°의 위상차를 갖는 인터리브드 스위칭 신호를

표1 실험 제정수

전동기 제정수	기호	값
정격 출력	P_{rated}	3 kW
d -축 고정자 인덕턴스	L_d	4.54 mH
q -축 고정자 인덕턴스	L_q	7.66 mH
고정자 누설 인덕턴스	L_{ls}	0.135 mH
고정자 저항	R_s	0.358 Ω
영구자석 쇄교 자속	ψ_f	0.079 V · s/rad
시스템 제정수	기호	값
DC 링크 (배터리) 전압	V_{bat}	400 V
고속 충전기 출력 전압	V_{ch}	200 V
스위칭 주파수	f_{sw}	10 kHz

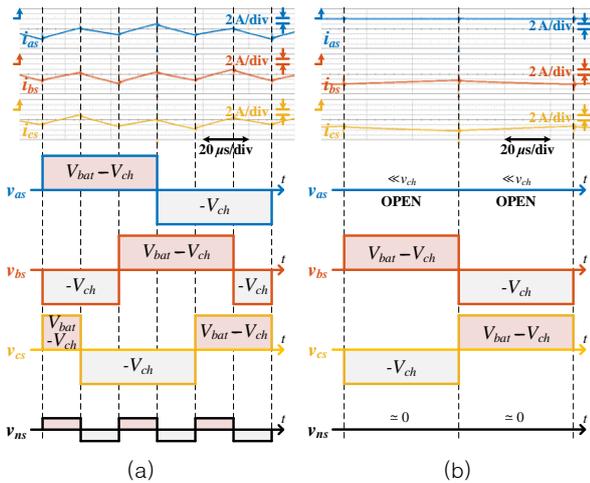


그림 2 한 스위칭 주기 동안의 상전류 파형 및 순시적으로 인가한 상전압과 영상분 전압. (a) 기존의 3상 충전 방법 (b) 제안하는 2상 충전 방법

인가해 전류 리플의 크기를 줄이는 방식이 널리 사용되고 있다. 그림 2(a)는 기존 3상 충전 방식에 인터리브드 스위칭을 적용한 전류 파형을 순시적으로 인가된 전압과 함께 나타낸 것이며, 실험 제정수는 표 1과 같다. 승압비가 2일 때, 스위칭의 3배 주파수의 영상분 전압이 나타나며 영상분 전압이 전류 리플에 지배적인 영향을 미친다는 것을 상전류 파형을 통해 확인할 수 있다.

본 논문에서는 기존 3상 충전 방법과 달리 두 상만을 충전에 이용하는 방법을 제안한다. 2상 충전 시에는 180°의 위상차를 갖는 인터리브드 스위칭을 적용하여 영상분 전압을 저감하며, 2상 충전 방법을 적용한 전류 파형은 그림 2(b)와 같다. 승압비가 2인 조건에서는 영상분 전압이 순시적으로 저감되어 차동 모드 전압 성분만이 인가되는데, 일반적으로 전동기의 차동 모드 인덕턴스는 영상분 인덕턴스 대비 크게 설계되므로 제안하는 충전 방법을 적용했을 때 전류 리플의 크기가 저감된다. 그림 2에서는 상전류 파형을 통해 기존 3상 충전 대비 전류 리플이 크게 감소한 모습이 확인된다.

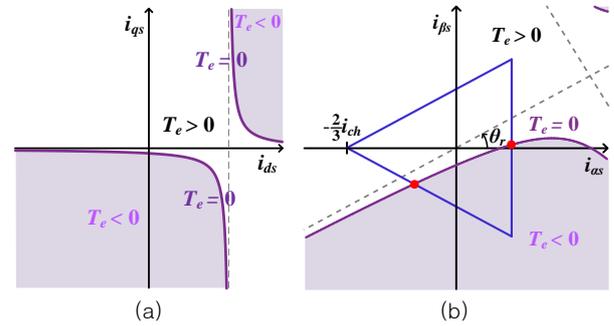


그림 3 $\partial\psi/\partial\theta_r < 0$ 일 때 차동 모드 전류 평면 상의 토크. (a) 토크 부호 (b) 2상 충전 시 토크가 0이 되는 지점

1.2 제안하는 2상 충전 시 토크 억제 방법

통합 충전기는 전동기에 전류를 흘리기 때문에 충전 전류에 의해 토크가 발생할 수 있다. 그러나 충전 중 토크가 0이 아닌 값을 갖는 경우, 의도치 않은 회전으로 이어져 안전 문제를 초래할 수 있다. 따라서, 두 상에만 전류를 흘려도 토크를 발생시키지 않는 전류 조합을 찾아야 한다. 우선, 영상분 전류에 의한 토크를 고려한 토크 식은 다음과 같다^[2].

$$T_e = 1.5pp\{\psi_f + (L_d - L_q)i_{as}\}i_{qs} + 3pp\frac{\partial\psi_n}{\partial\theta_r}i_{ns}. \quad (2)$$

여기서 pp 는 전동기의 극 쌍 수, θ_r 은 회전자 위치, 그리고 ψ_n 은 영상분 쇄교 자속을 의미한다. 그리고 그림 1에서, 3상 전류의 합은 고속 충전기 전류의 음의 값과 같으므로, i_n 은 다음 식을 만족한다.

$$i_{ns} = \frac{i_{as} + i_{bs} + i_{cs}}{3} = -\frac{i_{ch}}{3} \quad (3)$$

따라서, 초기 각도와 충전 전력이 정해지면 영상분 토크가 결정되므로, 총 토크를 0으로 만족하는 차동 모드 전류 조합은 그림 3(a)와 같이 쌍곡선 형태로 분포한다.

다음으로는 어떤 2상 전류 조합이 해당 쌍곡선 위의 점을 합성할 수 있는지 결정해야 한다. 일반성을 잃지 않고, a 와 b 상 전류로 2상 충전을 수행할 때, 다음을 만족한다.

$$\begin{cases} i_{as} + i_{bs} = -i_{ch} \\ i_{cs} = 0 \end{cases} \quad (i_{as}, i_{bs} \leq 0) \quad (4)$$

(4)를 $i_{a\beta}$ 로 표현하면 식 (5)과 같으며,

$$\begin{aligned} i_{\beta s} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\left(i_{as} + \frac{2}{3}i_{ch}\right) \\ \left(i_{as} \in \left[-\frac{2i_{ch}}{3}, \frac{i_{ch}}{3}\right], i_{\beta s} \in \left[-\frac{i_{ch}}{\sqrt{3}}, 0\right]\right) \end{aligned} \quad (5)$$

이는 차동 모드 전류 평면 상에서 정삼각형의 한 선분으로 대응된다. 마찬가지로 b 와 c 상, a 와 c 상으로 2상 충전을 수행하는 경우의 전류 조합을 표현하면 그림 3(b)에서 나타낸 것과 같이 정삼각형으로 대응된다. 그림 3(b)에서는 0-토크 쌍곡선과 2상 충전을 만족하는 정삼각형의 교점을 빨간색으로 표시하였는데, 이는 해당 교점으로 전류 제어를 수행하면 두 상에만 전류를 흘리더라도 토크를 발생시키지 않음을 의미한다.

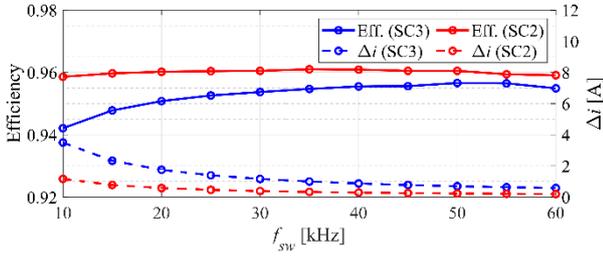


그림 4 $P_{ch} = P_{rated}, \theta_r = 0$ 조건에서, 스위칭 주파수에 따른 기존 3상 충전 방법(SC3)과 제안하는 2상 충전 방법(SC2)의 효율 및 평균 상전류 리플 Δi 측정 결과.

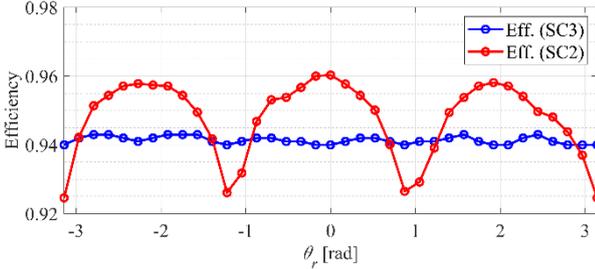


그림 5 회전자 위치 θ_r 에 따른 기존 3상 충전 방법(SC3)과 제안하는 2상 충전 방법(SC2)의 효율 측정 결과.

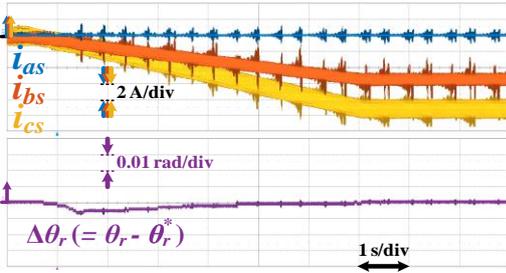


그림 6 $\theta_{r,init} = 0$ 조건에서 2상 충전을 수행하는 경우, I_{ch} 를 0부터 $I_{rated} = 15$ A 까지 증가시킬 때의 $\Delta\theta_r$ 측정 결과.

정리하면, 2상 충전 시 0-토크 쌍곡선과 2상 도통 삼각형의 교점으로 전류를 제어해야 2상 충전 중에도 회전을 방지할 수 있다.

1.3 실험 결과

이 장에서는 제안한 2상 충전 방법을 실험을 통해 검증하였다. 실험은 축소된 환경에서 진행되었으며, 주요 제정수는 표1과 같다. 그림4는 정격 전력 조건에서 스위칭 주파수를 10 kHz 부터 60 kHz까지 변화시켰을 때 기존의 3상 충전 방식과 제안하는 2상 충전 방식의 효율 및 평균 상전류 리플 Δi 를 비교한 것이다. 실험 결과, 제안하는 2상 충전을 적용했을 때 Δi 가 감소했으며 효율이 상승하였다. 이는 2상 충전 방법 적용 시 저감되는 AC 손실이 두 상 전류 도통으로 인해 증가하는 도통 손실보다 크기 때문에, 결론적으로 2상 충전 방법을 적용할 때 효율이 개선된 것을 의미한다.

제안하는 방법의 주요 장점 중 하나는, 낮은 스위칭 주파수 범위에서도 높은 효율을 달성할 수 있다는 점이다. 2상 충전 방법은 10 kHz에서도 95.9%의 효율을 달성했는데, 이는 3상

충전 방법 적용 시 50 kHz 스위칭을 통해서 얻을 수 있는 최대 효율인 95.7% 보다 높은 값이다. 이 결과는 제안하는 방법을 통해 인버터가 와이드 밴드 갭 소자로 구성되지 않는 경우에도 높은 효율을 달성할 수 있음을 의미한다.

그림5는 회전자 위치에 따른 3상 충전 방법과 2상 충전 방법의 효율을 측정한 결과이다. $\theta_r = -120^\circ, 0^\circ, 120^\circ$ 근처에서 2상 충전 방법의 효율이 가장 높으며, $\theta_r = -60^\circ, 60^\circ, 180^\circ$ 부근에서는 3상 충전 방법의 효율이 더 높은 결과를 얻었다. 이는 2상 충전 방법을 적용할 때 $\theta_r = -120^\circ, 0^\circ, 120^\circ$ 근처에서의 상전류 간의 오차가 $\theta_r = -60^\circ, 60^\circ, 180^\circ$ 부근보다 작아 도통 손실이 더 작은 구간에서 더 높은 효율이 나오기 때문이다. 각도에 따른 충전 효율 결과로부터, 주차 시 2상 충전 효율이 높은 각도에 정렬하도록 하는 알고리즘을 탑재하면 충전 시간을 단축시킬 수 있다.

그림6은 2상 충전 방법 적용 시, 충전 전류 I_{ch} 를 0 A 부터 15 A 까지 증가시킬 때의 θ_r 변화를 나타낸 것이다. 이 실험을 통해 2상 충전 시에도 토크를 0으로 제어하여, θ_r 를 초기 각도 $\theta_{r,init}$ 으로 유지할 수 있는지 검증하고자 하였다. 그림에서 볼 수 있듯, 제안하는 방법은 충전 전류가 변하는 과도 상태에도 $|\Delta\theta_r| < 0.008$ rad를 유지하여 효과적으로 회전을 억제했고, 정상상태에서는 초기 각도를 유지하도록 하는 제어가 수행됨을 확인했다.

3. 결론

최근 전기차의 배터리 전압이 800 V 급으로 약 두 배 증가했다. 이에 따라 기존의 400 V 급 배터리 충전에 적합하게 설계된 고속 DC 충전기를 통한 직접 충전이 불가능 해졌다. 이 문제를 해결하기 위해 다양한 통합 충전기 연구가 진행되었는데, 전동기의 세 상을 모두 사용하는 기존의 제어 방법은 상당한 모터 손실을 조래한다. 본 논문에서는 이러한 손실을 줄이기 위한 2상 충전 방법을 제안했다. 제안하는 방법은 전류 리플을 감소시켜 전동기 손실을 줄였으며, 전류 리플이 전체 손실에 미치는 영향을 손실 측정 결과를 통해 확인했다. 또한, 두 상만을 사용하여 충전할 때에도 회전을 방지하기 위해 0-토크 조건을 분석했다. 제안하는 충전 방법을 통해 효율이 눈에 띄게 증가하였으며, 동시에 충전 중 토크 발생이 억제되었다.

이 논문은 서울대학교 전력연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] H. Tu, H. Feng, S. Srdic, and S. Lukic, "Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview," IEEE Trans. on Transp. Electrification, vol. 5, no. 4, pp. 861-878, Feb. 2019
- [2] J. Yang, G. C. Lim, C. Hwang and J. -I. Ha, "Two-Phase DC Charging Method for Improved Efficiency and Zero Torque in Motor-Integrated Charger," in IEEE Trans. on Ind. Electron., Oct. 2024