

# 매립형 영구자석 동기 전동기 이중 구동 통합형 DC 급속 충전기

이명석\*, 이준희\*\*, 정재정\*  
 \*경북대학교, \*\*울산과학기술원

## Integrated Fast DC Battery Charger for EV Using Dual Motor Drive

Myeong Seok Lee\*, Joon-Hee Lee\*\*, Jae-Jung Jung\*

\*Kyungpook National University, \*\*Ulsan National Institute of Science and Technology

### ABSTRACT

Electric Vehicle (EV)는 시스템 구성상 에너지 저장시스템으로 리튬 이온 배터리를 사용한다. 따라서 배터리를 충전 또는 배터리의 에너지를 추진력으로 변환시킬 수 있는 전력변환장치가 필수적이다. 이를 위해 충전용 전력 변환 회로(On Board Charger; OBC), 추진용 전력 변환 회로인 인버터를 나누어 구성하는 것이 일반적이지만 시스템 경량화를 위해 두 기능을 동시에 수행할 수 있는 회로 구성이 요구되고 있다. 이러한 통합형 구성은 추진 모터의 중선단을 이용하여 정지 상태에서 승압형 컨버터로 회로를 동작 시킴으로 구성할 수 있다. 이 때 3상 추진용 전력 변환장치의 회로를 그대로 이용하므로 전력변환장치의 인터리빙 운전이 가능하다. 본 논문에서는 EV의 전륜, 후륜 추진 모터를 별도로 제어하는 구성에서 충전 및 추진 시스템을 통합하여 시스템을 구성할 때 상보 운전을 이용한 시스템 제어 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

### 1. 서론

국제적으로 탄소 배출에 대한 규제가 이루어 지고 있으며, 탄소 배출을 저감하기 위해 여러 방안이 마련되고 있다. 그 중 이동수단의 가장 큰 변화는 전기 자동차(Electric Vehicle; EV) 사용량의 증가이다. EV는 내연기관에 비해 소음, 탄소배출, 에너지 효율 등 여러 이점이 있다. 그러나 EV에 이용되는 에너지 저장 장치인 리튬이온 배터리의 용량 문제로 인한 장거리 운전의 어려움이 단점으로 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 EV 충전 인프라가 확장되는 추세이며 EV 자체적으로도 시스템 경량화 등의 방법을 통해 고효율 추진 체계를 구성하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

EV의 구성상 배터리를 충전하기 위한 별도의 전력변환 장치(On Board Charger; OBC)가 요구되며 배터리의 에너지를 추진 에너지로 변환하기 위한 전력변환 장치인 인버터가 필요하다. 일반적으로 EV의 전력변환 구성은 OBC와 추진용 인버터가 별도로 구성되어 있지만, 시스템의 경량화를 위해 두 회로를 통합하는 Integrated Battery Charger(IBC) 구성이 대두되고 있다. IBC는 인버터와 모터를 구동 뿐만 아니라 배터리 충전까지 가능하게 하는 통합형 충전구성이다. 모터의 권선을 승압형 컨버터의 인덕턴스로 사용하여 OBC에 필요한 별도의 수동소자를 사용하지 않아 비용 절감, 공간 확보 효과를 기대할 수 있다.

본 논문에서는 전륜 및 후륜 추진 모터로 Interior Permanent Magnet Motor (IPMSM)의 중성점을 연결하

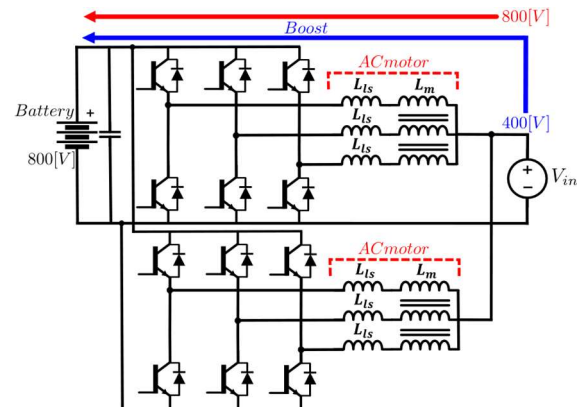


그림 1. 통합형 DC 급속 충전기

여 DC 전력을 공급하는 형태의 IBC를 다룬다. 추진용 인버터는 충전 상황에서 모터의 권선과 함께 승압형 컨버터로 사용한다. 이 때 전륜 및 후륜 추진 모터에 연결된 인버터의 상보 스위칭 동작을 통해 스위칭 리플을 저감하는 방법을 설명한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션으로 검증된다.

### 2. 통합형 DC 급속 충전기

그림 1은 IBC의 전체 구성이다. 최근 고속으로 EV를 구동하기 위해 모터를 전륜과 후륜 이중으로 사용하는 구성이 채택되고 있다<sup>[1]</sup>. 따라서 이중 구동 모터를 바탕으로 IBC 구성이다. 충전 시 두 모터의 권선과 중성점을 충전용 DC 전력원과 연결하여 배터리의 충전 경로를 구현할 수 있다. 해당 구성에서 두개의 모터 인덕턴스를 동시에 사용하고 각 인버터는 인터리빙 운전을 통해 유효 스위칭 주파수를 높여 전류 리플을 감소시킬 수 있다. 또한 상·하단 인버터를 상보 스위칭 하여 최대 유효 스위칭 주파수를 각 하프브리지의 스위칭 주파수의 6배까지 증가시킬 수 있다. 이러한 구성을 적용할 경우 입·출력측 커패시터와 같은 수동소자의 크기를 현저히 줄일 수 있다. 그러나 통합형 충전기는 모터의 권선을 이용하므로 여자에 의한 회전자 진동이 충분히 고려되어야 한다. 또한 승압형 컨버터의 제어 이득값 선정을 위한 플랜트 추정치가 필요하다. 따라서 유효 스위칭 주파수가 증가하는 방식, 회전자 진동 분석 및 플랜트 추정 방법에 대한 내용을 후술한다.

#### 2.1 IBC 구성 시 모터 진동 저감

IBC는 모터의 고정자 권선을 이용하는 구조를 사용하므로 모터의 고정자 권선 여자에 의한 회전자 진동에 대한 문제가 고려되어야 한다. 회전자의 관성이 충분히 클

경우 소신호에 의해 발생하는 진동에 강건하다. 따라서 일반적으로 IBC를 적용하는 연구에서는 이러한 진동 현상을 방지하기 위해 회전자 위치를 충분히 키우거나, 회전자를 구속시켜 관성이 증가적으로 큰 값을 가지는 경우를 상정한다.

본 논문에서 제안하는 방법은 평균적으로 DC 전력을 공급하며, 고정자 권선을 도통하는 평균 전류에 주파수 변동이 없으므로 회전자계가 발생하지 않는다. 그러나 인터리빙 운전을 적용할 경우 개별 하프브리지를 도통하는 전류의 스위칭 리플이 위상차를 갖게 되며 이로 인해 진동하는 회전 자계가 발생할 수 있다. 인덕턴스와 스위칭 주파수가 충분히 클 경우 전류 리플 크기가 감소하게 되어 이러한 문제 해결이 가능하다. 본 논문에서 제안하는 IBC의 경우 모터 인덕턴스를 이중으로 사용하여 인덕턴스 증가 효과와 상·하단 인버터의 상보 운전을 통한 유효 스위칭 주파수 증가 효과를 기대할 수 있다. 따라서 기존의 IBC 구성에서 발생할 수 있는 진동 문제를 경감시킬 수 있다.

## 2.2 영상분 인덕턴스

제안하는 방법은 모터의 고정자 3상 권선을 통해 평균적으로 동일한 전류가 도통하게 된다. 따라서 모터의 구조상 공통으로 나타나는 인덕턴스에 대한 분석이 필요하다. 그림 2(a)는 동기 전동기 각 상의 인덕턴스가 회전자 위치에 따라 변동하는 것을 나타낸다. 식 1은 각 상의 전류에 따른 쇄교자속을 나타낸다. 식 2는 자기 인덕턴스, 식 3은 상호 인덕턴스를 나타낸다.

$$\lambda_{abc} = \begin{bmatrix} L_{a,a} & L_{a,b} & L_{a,c} \\ L_{b,a} & L_{b,b} & L_{b,c} \\ L_{c,a} & L_{c,b} & L_{c,c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L_{a,a} = L_s + L_A + L_B \cos 2\theta_r, \quad (2)$$

$$L_{b,b} = L_s + L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right),$$

$$L_{c,c} = L_s + L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$L_{a,b} = L_{b,a} = -\frac{1}{2}L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right),$$

$$L_{a,c} = L_{c,a} = -\frac{1}{2}L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right), \quad (3)$$

$$L_{b,c} = L_{c,b} = -\frac{1}{2}L_A + L_B \cos 2\theta_r$$

각 상에 다른 크기의 전류가 도통할 때 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 영향을 받지만, 같은 크기의 전류가 도통할 때는 권선의 누설 인덕턴스만이 영향을 미친다. 이는 곧 영상분 인덕턴스를 나타내며, 수식 (1)–(3)을 통하여 영상분 인덕턴스로는 누설 인덕턴스만이 고려된다는 것을 알 수 있다. 따라서 공통 성분 전류를 제어할 때 영상분 인덕턴스의 크기를 추정하여 제어 이득에 반영할 수 있어야 한다. 영상분 인덕턴스 크기는 구형과 전압을 모터에 인가하여 인가 전압과 전류의 증가량을 이용하여 추정한다. 수식 (4)는 모터 권선에 인가된 전압으로 영상분 인덕턴스 추정에 해당 수식을 사용할 수 있다. 수식 (5)는 각 상의 영상분 인덕턴스로 누설 인덕턴스로 표현됨을 알 수 있다.

$$V_L = L_o \frac{di_o}{dt} = L_{xo} \frac{di_{xo}}{dt} \quad (x=a,b,c) \quad (4)$$

$$L_{xo} = L_s + \frac{L_o}{3} \quad (x=a,b,c) \quad (5)$$

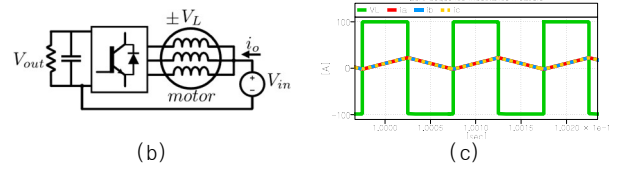
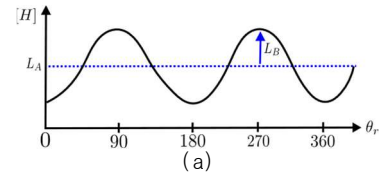


그림 2. 인덕턴스 분석 : (a)회전자 위치에 따른 자기인덕턴스 변동, (b) 영상분 인덕턴스 측정, (c) 영상분 전류 리플

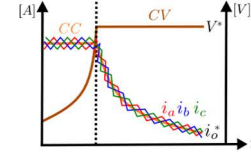


그림 3. CCCV 제어시 발생하는 전류 리플

추정 방법의 구현은 그림 2(b)와 같이 회로를 구성하고 각 상의 하프브리지가 같은 구형과 전압을 출력하여 전류의 기울기를 측정한다. 그림 2(c)와 같이 인가한 구형과 전압과 영상분 전류의 기울기를 바탕으로 영상분 인덕턴스를 추정한다.

## 2.3 Constant Current Constant Voltage

그림 3은 Constant Current Constant Voltage(CCCV) 제어에 따른 평균 전류, 전압과 전류 리플에 대한 개념도이다<sup>[2]</sup>. Constant Current(CC) 제어는 Battery Manage System(BMS)를 통해 계산된 필요 전류만큼 일정한 크기의 전류를 공급하여 배터리를 충전한다. 배터리 정격 전압 도달 시 Constant Voltage(CV) 제어로 전환하여 배터리의 전압을 일정하게 유지한다.

$$i_o = \frac{i_a + i_b + i_c}{3} \quad (6)$$

$$i'_x = i_x - i_{o(x=a,b,c)} \quad (7)$$

수식 (6), (7)은 공통 성분 전류와 차동 성분 전류를 나타낸다.  $i'_a, i'_q$ 는 차동 성분 전류  $i'_{x(x=a,b,c)}$ 를 동기 좌표계로 변환한 수식을 의미한다. 공통 성분 전류  $i_o$ 는 누설 인덕턴스 식 **오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.**의 영상분 인덕턴스에, 차동 성분 전류  $i'_a, i'_q$ 는  $L_d, L_q$ 에 영향을 받는다. 차동 성분 전류는 회전자 토크 발생에 관여하는 전류이므로 이를 감소시켜 이로 인한 진동 발생을 방지하여야 한다. IBC의 경우 모터 중선점을 통해 전류가 도통하므로 공통 성분 전류가 지배적이고 영상분 인덕턴스를 제어 이득 값 선정에 고려해서 적용한다.

## 3. 이중 구동 통합형 DC 급속 충전기

그림 4는 제안하는 IBC에 적용되는 제어 블록도이다. 입력 전압을 승압하여 배터리 정격 전압을 충전하는 방식이고 입력 전력을 최대치 50[kW]로 상정하여 모터 각상의 전류를 제한한다. CC 제어는 입력 전류 지령을 6상 전류 지령으로 나눠서 각각 하프브리지에 할당하여 제어한다. CV 제어에서는 전압 제어 루프가 추가되어 출력단 전압을 일정하게 유지하도록 제어한다.

$$D = \frac{V_{in}}{V_{Battery}} \quad (8)$$

식 8은 입·출력단 전압 비율을 나타낸다. 입력 전류와 출력 전류 사이 비율이  $D$ 와 같으므로 출력전류 지령을  $D$ 로 나누어

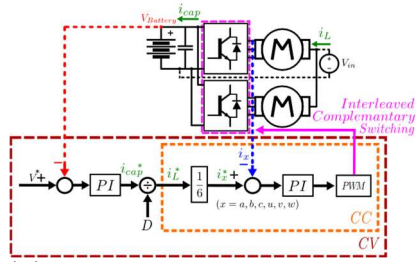


그림 4. 제어 블록도

$V_{in}$	400[V]	$R_s$	87[m $\Omega$ ]
$V_{Battery}$	800[V]	$L_{ts}$	0.2[mH]
$f_{sw}$	10[kHz]	$L_d$	1.02[mH]
$C$	5[mF]	$L_q$	1.93[mH]
$P_{max}$	50[kW]	$\lambda_f$	131[mWb·t]

표 1. IBC 파라미터

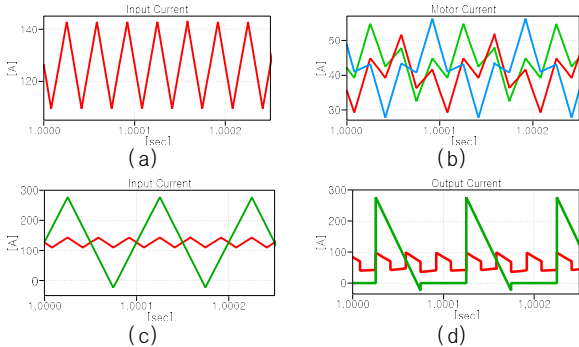


그림 5. 인터리빙 운전 : (a) 입력 전류, (b) 상전류, (c) 입력 전류 리플 크기 비교, (d) 출력 전류 리플 크기 비교

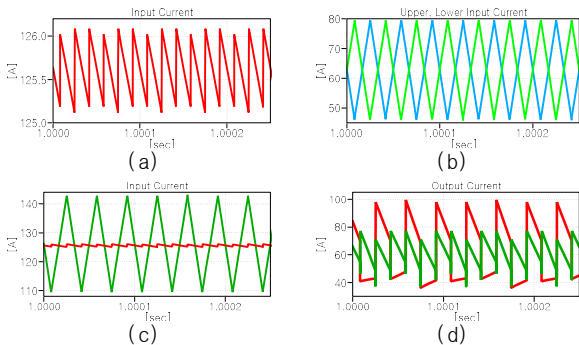


그림 6. 상보 운전 : (a) 합성 입력 전류, (b) 상·하단 입력 전류, (c) 입력 전류 리플 크기 비교, (d) 출력 전류 리플 크기 비교

입력전류 지령을 구한다. 입력 전류와 출력 전류 사이 비율이  $D$ 와 같으므로 출력전류 지령을  $D$ 로 나누어 입력전류 지령을 구한다.

### 3.1 인터리빙 운전

인터리빙 운전 방식은 3상 Carrier의 위상을  $120^\circ$ 만큼 지연시킴으로써, 전체 유효 스위칭 주파수를 3배로 증가시키는 방식이다. 승압형 컨버터의 전압 합성 시 형성되는 전류 파형은 반도체 스위칭 소자의 도통 시점에 따라 전류 파고점이 결정된다. 이러한 성질을 이용하여 3상 Carrier 파형의 위상을  $120^\circ$ 만큼 지연을 두어 구성한다면 각 상 전류의 파고점이  $120^\circ$ 만큼 차이가 생겨 서로 상쇄된다. 결국 서로 상쇄되어 합성되는 전류 리플은 30[kHz] 성분이 되고 전류 리플이 저감된다.

인터리빙 운전으로 인한 현상을 분석하기 위해 모터 하나를 통한 충전 상황을 시뮬레이션했다. 그림 5(a)는

충전기 입력 전류이고 그림 5(b)는 각 상에 흐르는 전류이다. 충전기 입력 전류는 인터리빙 운전을 통해 각 상 10[kHz] 성분이 30[kHz] 성분으로 합성된다.

그림 5(c),(d)는 인터리빙 운전을 유무에 따른 입력 전류, 출력 전류 파형을 나타낸다. 적용 전 입력 전류 리플은 10[kHz] 성분으로 리플 크기가 크지만 적용 후 리플 크기는 30[kHz] 성분으로 크게 저감된다. 출력전류는 인터리빙 운전을 적용하지 않을 경우, 각 상 전류의 Clamping 시점이 같아 합성되어 전류 리플이 크지만 적용 시 각 상 전류의 Clamping 시점이 달라 합성된 전류의 리플 크기가 저감한다.

### 3.2 상보 운전

모터를 이중으로 사용한다면 차동 성분에 대한 인덕턴스가 증가하여 리플을 저감할 수 있고 전력을 나눠서 충전이 가능하므로 손실을 줄일 수 있게 된다. 심지어 상·하단 인버터를 통해 상보 운전까지 적용한다면 인터리빙 운전으로 얻은 유효 스위칭 주파수의 2배만큼 효과를 본다. 결과적으로 입력측 전류는 6배 유효 스위칭 주파수의 증가 효과를 얻는다. 인터리빙이 적용된 상단 Carrier 파형에 대해 하단 Carrier의 캐리어는 각 상별로  $180^\circ$ 만큼 위상을 지연시켰다.

그림 6(a),(b)는 상보 운전을 적용시 합성된 입력 전류와 상·하단 입력 전류를 나타낸다. 인터리빙 운전이 적용된 상·하단 입력 전류의 리플은 30[kHz] 성분을 나타내고 합성된 입력 전류는 60[kHz]의 리플을 가진다. 합성된 입력 전류의 리플 크기가 크게 저감되는 것을 알 수 있다.

그림 6(c),(d)는 인터리빙 운전만 적용한 경우와 상보 운전까지 추가한 경우 입·출력 전류를 보여준다. 상보운전을 적용한 경우 입·출력 측 전류 리플이 인터리빙만을 적용했을 때에 비해 약 98%, 52% 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 EV 경량화, 대중화를 위해 IBC 구성을 제안했다. 이중 모터 구성을 구동과 충전에 동시 적용하여 차량 내부 전력변환장치, 수동소자 사용을 축소하였다. 인터리빙, 상보 운전을 통해 입·출력 전류 리플 저감을 이루어냈다. 전류 리플 저감으로 인해 충전기의 전력손실 문제와 회전자들의 진동 문제를 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 제안하는 IBC의 인터리빙 방식은 시뮬레이션(PLECS)을 통해 검증하였다.

이 논문은 경북대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] D. -G. Woo, D. -M. Joo and B. -K. Lee, "On the Feasibility of Integrated Battery Charger Utilizing Traction Motor and Inverter in Plug-In Hybrid Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 12, pp. 7270-7281, Dec. 2015.
- [2] H. -N. Vu and W. Choi, "A Novel Dual Full-Bridge LLC Resonant Converter for CC and CV Charges of Batteries for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 3, pp. 2212-2225, March 2018.