

# 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기 최적인전 알고리즘 연구

정현우\*, 김장식\*, 김장목\*,  
부산대학교\*

## Optimal Drive Algorithm Research for Three-Phase BLDC Motor with Double Rotor

Hyun-woo Jung\*, Jang-sik Kim\*, Jang-mok Kim\*  
Pusan National University\*

### Abstract

단일 회전자 전동기와 달리 동일한 크기에서 높은 출력 밀도와 높은 토크의 장점이 있는 이중 회전자 구조를 갖는 전동기는 공간적 제약을 받는 전기 자동차, 전기 이륜차 등의 분야에 활발히 연구되고 있다. 이중 회전자 구조를 갖는 전동기는 고 토크 운전을 위해 이중 인버터 운전 방식이 요구된다. 이때, 내부와 외부전동기의 역기전력이 다를 때 이를 고려하지 않고 운전한다면 발생하는 동손이 증가하여 운전효율 저하로 이어진다.

본 논문에서는 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기에서 내부와 외부전동기의 역기전력비( $\alpha$ )와 고정자 저항 비( $\beta$ )를 고려한 전류분배방식을 통해 동손을 최소화하는 최적인전 알고리즘을 제안하였다.

### 1. 서론

그림1은 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기이다. 이 전동기는 일반적인 단일 회전자 구조를 갖는 전동기와 동일한 크기에서 더 높은 출력 밀도와 높은 토크를 가지는 장점이 있다[1]. 이중 회전자를 갖는 3상 BLDC 전동기 시스템에서 전기적 손실을 감소시키기 위한 내부와 외부전동기의 토크 분배는 시스템 효율에 영향을 미치므로 최적 전류 분배방식이 필요하다[2].

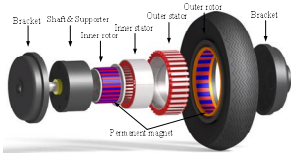
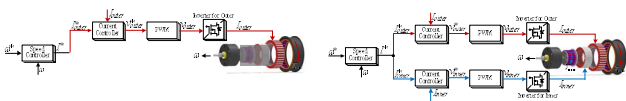


그림 1. 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기의 구조

### 2. 전기적 손실을 고려한 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기의 최적인전방식

#### 2.1 이중 인버터 방식에서 역기전력비를 고려한 최소 동손을 갖는 전류분배방식

그림2(a)와 (b)는 각각 단일 인버터 운전 방식과 이중 인버터 운전 방식의 시스템 제어 블록도를 나타낸다.



(a) 단일 인버터 운전방식 (b) 이중 인버터 운전방식  
그림 2. 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기 운전 방식

저 토크 운전시 단일 인버터 운전 방식을 이용하고 고 토크 운전시 이중 인버터 운전 방식을 이용하며, 토크

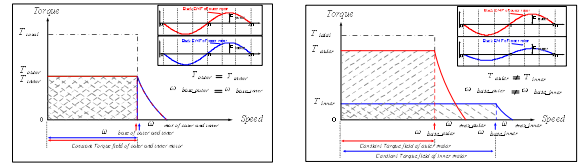
방정식은 각각 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$T_{mode\_S} = k_t I^* = k_t I_{outer}^* \quad (1)$$

$$T_{mode\_D} = T_{outer} + T_{inner} = k_t I_{outer}^* + k_t I_{inner}^* \quad (2)$$

여기서,  $k_t$ 는 토크상수이다.

내부와 외부전동기는 동일속도에서 속도-토크특성 및 역기전력을 그림3과 같이 나타낼 수 있다.

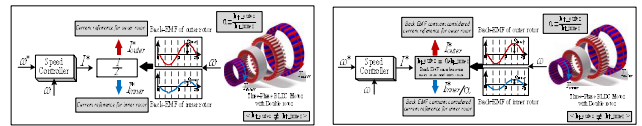


(a) 속도-토크특성 동일 (b) 속도-토크특성 동일하지 않음  
그림 3. 내부와 외부전동기 각각의 속도-토크 특성 및 역기전력

그림3(a)는 동일속도에서 내부와 외부전동기의 속도-토크 특성이 같고 역기전력이 동일하므로, 토크상수는 같다. 이 경우 동일한 전류 분배를 통하여 동손을 최소화할 수 있다. 하지만 그림3(b)는 동일속도에서 내부와 외부전동기의 속도-토크특성이 다르고 역기전력 차이가 있기 때문에 토크상수는 다르다. 내부와 외부전동기의 역기전력 차이에 대한 비는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{t\_outer} = \alpha \cdot k_{t\_inner} \quad (3)$$

여기서,  $k_{t\_outer}$ 는 외부전동기 토크 상수,  $k_{t\_inner}$ 는 내부전동기 토크 상수,  $\alpha$ 는 내부와 외부전동기 역기전력 비이다.



(a) 역기전력비를 고려하지 않을 때 (b) 역기전력비를 고려할 때  
그림4. 이중 인버터 운전방식에서의 전류분배방식

그림4(a)에서와 같이 식(4)는 동일토크에서 단일 인버터 운전방식의 동손보다 역기전력비를 고려하지 않은 경우 동일한 전류분배를 했을 때 동손이 더 큼을 나타낸다.

$$P_{loss\_con\_S} \ll P_{loss\_con\_D} \\ (I^*)^2 2R \ll \left( (I_{outer}^*)^2 + (I_{inner}^*)^2 \right) 2R \quad (4)$$

여기서,  $R$ 은 내부와 외부전동기의 고정자 저항이다.

그림4(b)는 이중 인버터 운전방식에서 역기전력비를 고려한 최적 전류 분배방식을 나타낸다. 식(3)으로부터 역기전력비는 식(5)와 같이 표현할 수 있고, 식(5)로부터 역기전력비를 고려한 이중 인버터 운전방식에서

전류분배는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = k_{l\_outer} / k_{l\_inner} \quad (5)$$

$$I^* = I_{outer}^* + I_{inner}^* / \alpha, \quad I_{outer}^* = (I^* - I_{inner}^* / \alpha) \quad (6)$$

$$P_{loss\_con\_D} = \left( (I^* - I_{inner}^* / \alpha)^2 2R \right) + \left( (I_{inner}^*)^2 2R \right) \quad (7)$$

식(6)으로부터 역기전력비를 고려한 동손은 식(7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 전개하면 식(8)과 같이 나타낸다.

$$y_\alpha = \left[ \left( \frac{\alpha^2 + 1}{\alpha^2} \right) \cdot \left( I_{inner}^* - \frac{\alpha I^*}{\alpha^2 + 1} \right)^2 + \left( \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 1} \right) (I^*)^2 \right] \cdot 2R \quad (8)$$

여기서,  $y_\alpha$ 는 역기전력비를 고려한 이중 인버터 운전방식에서 동손이다.

$$\therefore y_\alpha = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 + 1)} (I^*)^2 \cdot 2R \quad \left| \quad I_{inner}^* = \frac{\alpha I^*}{\alpha^2 + 1} \right. \quad (9)$$

식(8)에서 동손을 최소화 하기 위해 역기전력비를 고려한 내부 전동기 입력전류에 따른 동손은 식(9)와 같이 나타낸다. 이중 인버터 운전방식에서 내부와 외부전동기 역기전력비를 고려한 전류분배방식에서의 동손은 단일 인버터 운전방식의 동손보다 항상 작음을 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$(I^*)^2 2R \gg \left( (I^* - I_{inner}^* / \alpha)^2 + (I_{inner}^*)^2 \right) \cdot 2R \quad (10)$$

여기서,  $R = R_{outer} = R_{inner}$ 이다.

## 2.2 이중 인버터 방식에서 역기전력비와 고정자 저항비를 고려한 최소 동손을 갖는 전류분배방식

이중 회전자를 갖는 3상 BLDC 전동기에서 내부와 외부전동기의 고정자 저항비를 고려한 등가회로와 이에 따른 최소 동손의 변화는 그림5와 같이 표현된다.

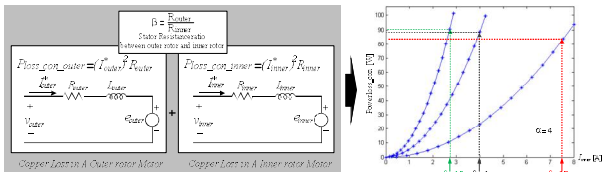


그림 5. 고정자 저항비에 따른 최소 동손의 변화

전동기 설계에 따라 내부와 외부전동기 고정자 저항 값이 서로 다를 수 있기 때문에 이중 인버터 운전방식에서 역기전력 비를 고려한 동손을 나타낸 식(7)은 내부와 외부전동기의 고정자 저항비를 고려한 동손으로 식(11)과 같이 변경될 수 있다.

$$P_{loss\_con\_D} = \beta (I^* - I_{inner}^* / \alpha)^2 \cdot R_{inner} + (I_{inner}^*)^2 \cdot R_{inner} \quad (11)$$

여기서  $\beta$ 는 내부와 외부전동기의 고정자 저항비이다.

식(11)을 전개하면, 내부와 외부전동기의 고정자 저항비가 동손에 영향을 미치는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{\alpha\beta} = \left[ \left( \frac{\alpha^2 + \beta}{\alpha^2} \right) \cdot \left( I_{inner}^* - \frac{\alpha\beta I^*}{\alpha^2 + \beta} \right)^2 + \left( \frac{\alpha^2\beta}{\alpha^2 + \beta} \right) (I^*)^2 \right] \cdot 2R_{inner} \quad (12)$$

여기서  $y_{\alpha\beta}$ 는 역기전력 비와 고정자 저항비를 고려한 이중 인버터 운전방식에서 동손이다.

$$\therefore y_{\alpha\beta} = \frac{\alpha^2\beta}{(\alpha^2 + \beta)} (I^*)^2 \cdot 2R \quad \left| \quad I_{inner}^* = \frac{\alpha\beta I^*}{\alpha^2 + \beta} \right. \quad (13)$$

식(12)에서 동손을 최소화 하기 위해 역기전력비와 고정자 저항비를 고려한 내부전동기 입력전류에 따른 동손은 식(13)와 같이 나타낸다. 역기전력비와 고정자 저항비를 고려한 전류 분배 방식에서의 동손은 단일 인버터 운전방식보다 항상 작다는 것을 식(14)과 같이 표현할 수 있다.

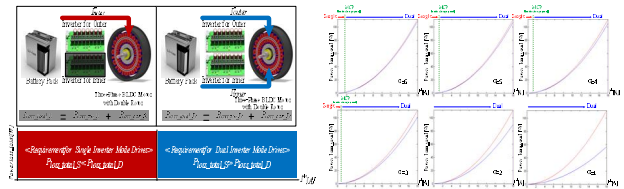
$$(I^*)^2 2R \gg \left( (I^* - I_{inner}^* / \alpha)^2 + (I_{inner}^*)^2 \right) \cdot 2R_{inner} \quad (14)$$

## 3. 시뮬레이션

그림6(a)는 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기의 최적인전을 위해 단일 인버터 운전방식과 이중인버터 운전방식에서 전기적 손실에 따른 운전방식을 나타내고 있으며, 그림6(b)는 전기적 손실에 따른 최적인전 시점을 보여준다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

$V_{DS}$	72V	$I^*$	18A
$R_{outer}/R_{inner}$	163mΩ/102mΩ	$f_{sw}$	10kHz
$K_{touter}/K_{tinner}$	0.0035/0.008	$t_{total}$	2.27μs



(a) 최적인전방식

(b) 최적인전시점

그림 6. 전기적 손실을 고려한 이중 회전자 구조의 최적인전

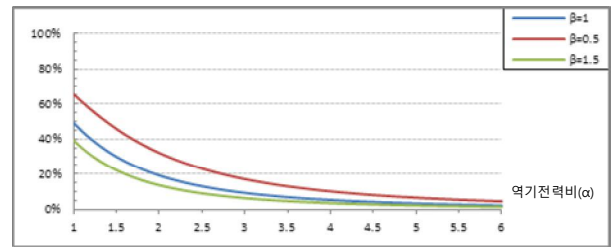


그림 7. 단일 인버터 운전방식에 대한  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 고려한 이중 인버터 운전방식의 전기적 손실 감소율

그림7은 역기전력비( $\alpha$ )와 고정자 저항비( $\beta$ )를 고려한 이중 인버터 운전방식에서 전기적 손실 감소율을 보여준다.

## 4. 결론

본 논문은 이중 회전자 구조를 갖는 3상 BLDC 전동기에서 내부와 외부전동기의 역기전력비( $\alpha$ )와 고정자 저항비( $\beta$ )를 고려한 전류분배방식을 통해 동손을 최소화하는 최적인전 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

This research was supported by the MKE(The Ministry of Knowledge Economy), Korea, under the Human Resources Development Program for robotics support program supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency) (NIPA-2011-C7000-1001-0009)

## Reference

- [1] Ronghai Qu; Lipo, T.A.; "Dual-Rotor, Radial-Flux, Toroidally Wound, Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans, Vol. 39, No. 6, pp. 1665-1673, 2003.
- [2] Kusko, Alexander; Galler, Donald; "Control means for minimization of Losses in AC and DC Motor Drives", IEEE Trans, Vol. IA-19, No. 4, pp. 561-570, 1983.