

|                    |   |
|--------------------|---|
| 저자<br>(Authors)    | 우석원, 박수환, 차경수, 임명섭  |
| 출처<br>(Source)     | <a href="#">전력전자학회지 26(5)</a> , 2021.10, 44-52 (9 pages)<br><a href="#">KIPE MAGAZINE 26(5)</a> , 2021.10, 44-52 (9 pages)                      |
| 발행처<br>(Publisher) | <a href="#">전력전자학회</a><br>THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS   |
| URL                | <a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10616720">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10616720</a> |
| APA Style          | 우석원, 박수환, 차경수, 임명섭 (2021). Open-End Winding 및 권선 절환 토폴로지를 적용한 e-모빌리티 모터 기술. 전력전자학회지, 26(5), 44-52.  |
| 이용정보<br>(Accessed) | 한양대학교<br>166.***.168.119<br>2022/03/04 11:41 (KST)  |

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# Open-End Winding 및 권선 절환 토폴로지를 적용한 e-모빌리티 모터 기술

## 1. 서론

최근 기후 변화와 환경 오염 및 부품의 전장화 등으로 인해 전기 동력을 이용하여 구동하는 e-모빌리티에 대한 관심이 커지고 있다. 그래서 하이브리드 전기 자동차, 배터리 전기 자동차, 그리고 연료전지 전기 자동차와 같은 친환경 자동차가 주목받고 있다<sup>[1][2]</sup>. 이러한 e-모빌리티에 전기 동력을 전달하기 위해 구동 모터를 사용한다. e-모빌리티 모터의 대표적인 기술 동향으로는 e-모빌리티의 무게를 저감하기 위한 구동 모터의 경량화와 e-모빌리티의 전비 향상을 위한 구동 모터의 고효율화 등이 있다.

구동용 모터의 효율을 높이기 위해서 다양한 권선 기술과 설계 기법들이 제안되었다. 다양한 권선 기술들 중에서 분포 권 구동용 모터에 주로 사용되는 헤어핀 권선 기술은 슬롯의 점적률을 높여 전류 용량과 방열 특성을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>[3][5]</sup>. 그러나 헤어핀 권선 기술은 집중권 형태로 코일 감을 때에는 사용할 수 없기 때문에 코일을 주조하거나 가공하는 기술들이 제안되었다<sup>[6][9]</sup>. 구동용 모터의 설계 기술로서는 e-모빌리티의 전비를 향상시키기 위해 열 특성을 고려한 설계 기술들이 제안되었다<sup>[10][11]</sup>.

매입형 영구자석 동기 모터(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 높은 에너지 밀도를 가지는 희토류 영구자석(Permanent Magnet, PM)을 사용하여 효율이 높고, 운전 영역이 넓기 때문에 e-모빌리티 구동용 모터 주로 사용된다.

구동용 모터로 주로 사용되는 IPMSM은 주로 고속 영역에서 동작하기 때문에, 제한된 전압 내에서 약자속 제어가 필요

하다. 약자속 제어를 위해 음의  $d$ 축 전류가 인가되고, 이로 인해 전류가 증가하면 추가적인 전자기적 손실이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 배터리의 전압을 증가시키는 방법을 사용할 수 있다. 그러나 배터리의 용량을 증가시키는 것은 e-모빌리티의 가격 상승 요인이기 때문에 좋은 방법이라 하기 어렵다. 따라서 최근에는 open-end winding(OEW)을 IPMSM에 적용하여 제한된 배터리 전압 내에서 선간 전압을 증가시키는 방법이 제안되고 많은 연구들이 진행되고 있다<sup>[12][14]</sup>. OEW를 적용한 IPMSM은 전압 제한이 증가하기 때문에 고속 영역에서 더 적은 음의  $d$ 축 전류로 구동할 수 있고, 출력 밀도도 높일 수 있다.

한편 OEW 외에도 권선 절환 방법을 이용하여 약자속 제어를 위한 음의  $d$ 축 전류를 감소시킬 수 있다<sup>[15][16]</sup>. 이 방법을 이용하면, 각 운전 모드에 따라 모터의 상당 직렬 턴수를 변화시킬 수 있는데, 상당 직렬 턴수를 증가시키는 모드로 운전하면, 토크 밀도를 높일 수 있고, 상당 직렬 턴수를 감소시키는 모드로 운전하면 약자속 제어에 필요한 음의  $d$ 축 전류를 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 e-모빌리티 구동용 IPMSM의 토크 밀도 및 출력 밀도, 그리고 효율을 높이기 위하여 OEW를 적용한 토폴로지, 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지, 그리고 OEW와 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지를 제안하고, 제안된 토폴로지들의 전자기적 성능 향상을 검증하기 위해 전자계 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 이용하여 일반적인 3상 IPMSM과 비교하였다.

## 2. FEA 해석을 위한 Base 모델

본 논문에서 토폴로지별 모터의 전자기적 성능 해석에 사용될 3상 Base 모델을 그림 1에 나타냈고, Base 모델 사양은 표 1에 정리했다. Base 모델은 e-모빌리티 구동용 8극 48슬롯 Delta-type IPMSM으로서 최대 토크 및 최대 출력은 각각 300Nm, 135kW이고, 속도와 토크에 따른 효율맵을 그림 2에 나타냈다.

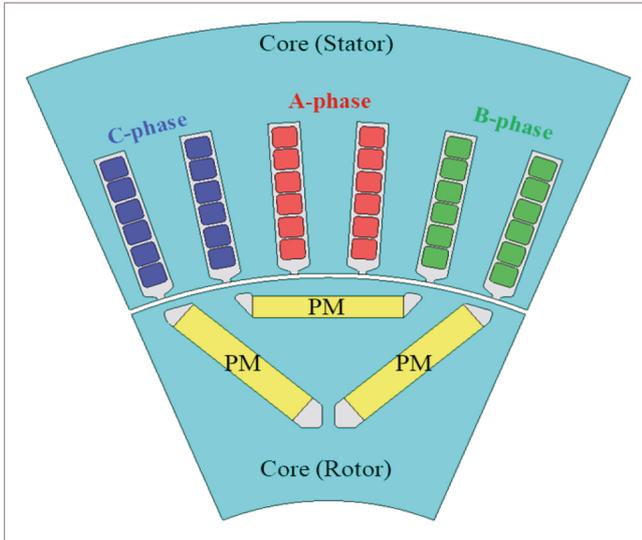


그림 1 FEA 해석을 위한 3상 Base 모델

표 1 Base 모델 사양

| Items                  | Unit      | Value  |
|------------------------|-----------|--------|
| Pole/slot              | -         | 8/48   |
| Series turns per phase | -         | 24     |
| Parallel circuits      | -         | 2      |
| DC link voltage        | V         | 350    |
| Peak torque            | Nm        | 300    |
| Maximum power          | kW        | 135    |
| Maximum speed          | rpm       | 12,000 |
| Peak current           | $A_{rms}$ | 380    |

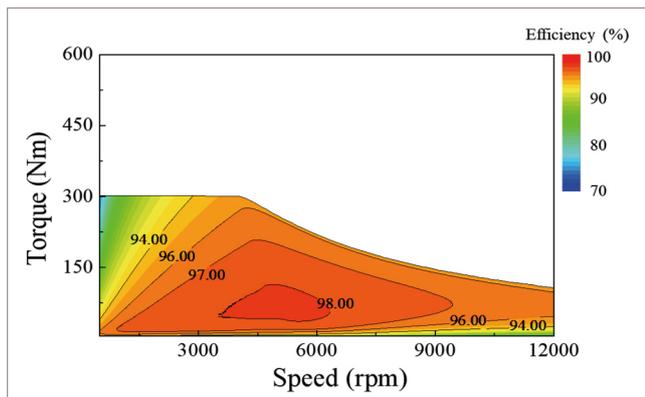


그림 2 Base 모델의 효율맵

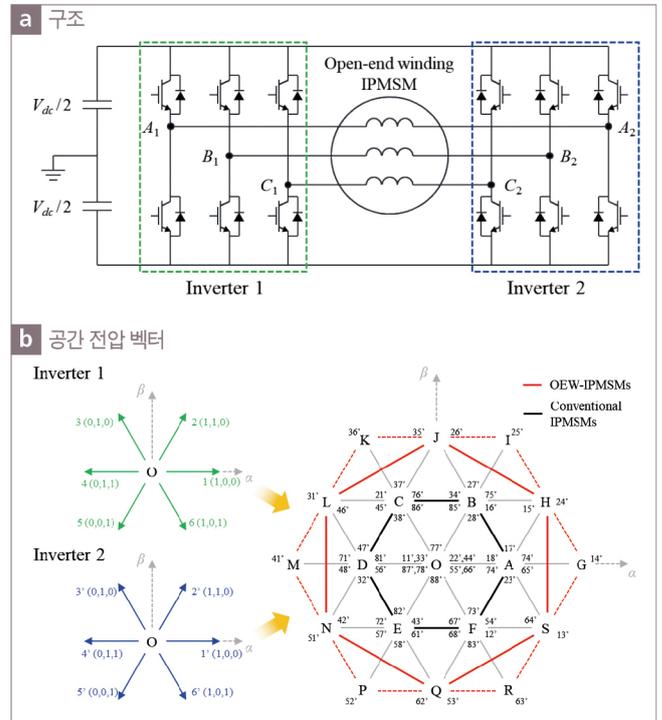


그림 3 OEW-IPMSM

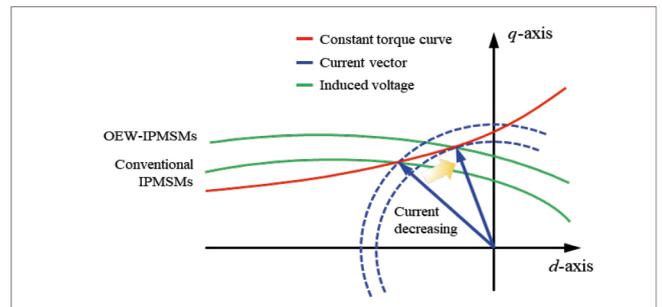


그림 4 약자속 제어 시  $d, q$ 축 벡터도

## 3. Open-end winding 토폴로지

3장에서는 OEW의 구조와 특징에 대해 설명하고, 전자계 FEA를 이용하여 OEW 토폴로지를 적용한 IPMSM(OEW-IPMSM)의 전자기적 성능을 Base 모델과 비교하였다.

그림 3(a)와 그림 3(b)에 각각 OEW-IPMSM의 구조와 OEW를 적용했을 때 생성되는 공간 전압 벡터도를 나타냈다. OEW-IPMSM은 그림 3(a)와 같이 IPMSM의 3상 전기 권선들이 결선되어 있지 않고, 각 상의 터미널이 2개의 인버터와 연결되어 있다. 이러한 OEW-IPMSM을 사용하면 그림 3(b)와 같은 공간 전압 벡터들이 생성된다. OEW-IPMSM의 3상 전압은 2개의 인버터의 극전압의 차이로서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} v_A = v_{A1} - v_{A2} \\ v_B = v_{B1} - v_{B2} \\ v_C = v_{C1} - v_{C2} \end{cases} \quad (1)$$

이때,  $V_{ABC}$ 는 3상 전압,  $V_1$ 과  $V_2$ 는 각 인버터에 의해서 모터에 공급되는 전압을 나타낸다. 결과적으로, OEW-IPMSM의 최대 전압 변조 지수(Modulation Index, MI)는 일반적인 3상 IPMSM에 비해서  $\sqrt{3}$ 배 증가한다. 이러한 특징으로 인해, OEW를 e-모빌리티 구동용 IPMSM에 적용하면 제한된 배터리 전압으로부터 높은 선간 전압을 IPMSM에 공급할 수 있다.

그림 4는 일반적인 IPMSM과 OEW-IPMSM의  $d, q$  축 벡터를 나타낸다. 제한된 전압 내에서 높은 출력을 발생시키면서 IPMSM을 구동시키기 위해서 음의  $d$ 축 전류를 인가하는 약자속 제어가 필요하다. 일반적인 3상 IPMSM의 경우, 고속 영역에서 약자속 제어를 위해 전자기 전류가 상승하면 전자기 기자력이 높아짐에 따라 전자기적 손실이 증가할 수 있다. 반면에 OEW를 적용하면, 최대 MI가 증가함에 따라 작은 음의  $d$ 축 전류로도 동일한 출력을 낼 수 있다. 따라서, OEW-IPMSM은 일반적인 3상 IPMSM에 비해 출력 밀도가 높고, 고속 영역에서 작은  $d$ 축 전류로 구동이 가능하기 때문에 고효율 운전이 가능하다.

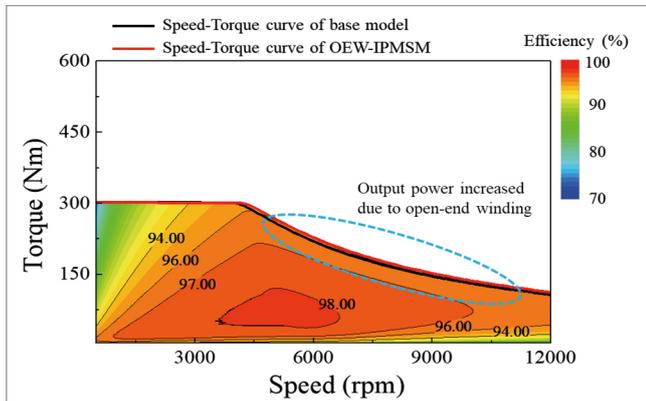


그림 5 OEW-IPMSM의 효율맵

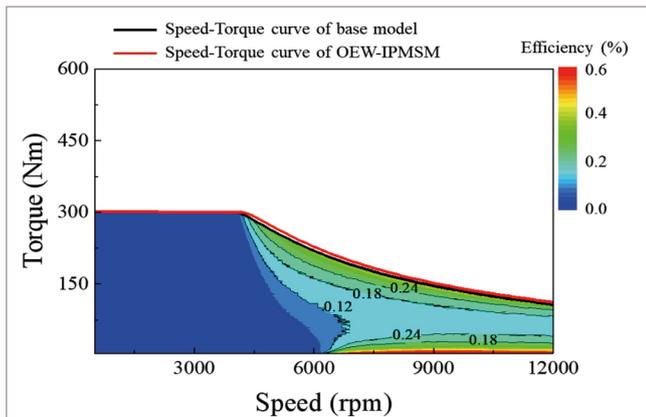


그림 6 Base 모델과 OEW-IPMSM의 효율 차이

전자계 FEA를 이용하여 OEW-IPMSM의 전자기적 성능을 Base 모델과 비교하였다. 그림 5에는 OEW-IPMSM의 효율맵을 나타냈고, 그림 6에 Base 모델과 OEW-IPMSM의 효율 차이를 나타냈다. 그림 5에 나타나 있듯이, 증가된 최대 MI로 인해 OEW-IPMSM의 최대 출력 밀도가 Base 모델에 비해 상승한 것을 알 수 있다. 그리고 그림 6에 나타나 있듯이, 고속 영역에서 약자속 제어에 필요한  $d$ 축 전류 감소에 따라 OEW-IPMSM의 효율이 Base 모델보다 향상된 것을 알 수 있다.

## 4. 직렬-병렬 권선 절환 토폴로지

4장에서는 직렬-병렬 권선 절환 토폴로지의 구조와 특징에 대해 설명하고, 전자계 FEA를 이용하여 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 IPMSM의 전자기적 성능을 Base 모델과 비교하였다.

IPMSM의 전자기적 성능은 상당 직렬 턴수에 큰 영향을 받는다. 슬롯의 집적률과 전류 밀도가 일정하다고 할 때, 상당 직렬 턴수가 증가하면 권선 직경이 감소하기 때문에 최대 전류가 감소한다. 또한 저항과 인덕턴스, 그리고 계자에 의한 쇄교 자속이 증가하기 때문에 출력 증가에 따른 전압 상승 폭이 커져 출력 밀도가 감소한다. 반대로, 같은 조건에서 상당 직렬 턴수가 감소하면 IPMSM의 최대 전류와 출력 밀도가 증가한다. 직렬-병렬 권선 절환 방법은 모터의 고정자 권선을 직렬 또는 병렬로 절환하여 상당 직렬 턴수를 변화시키는 방법이다<sup>[15][16]</sup>. 그림 7(a)에 직렬-병렬 권선 절환 회로를 나타냈다. 모터의 코일을 절환을 위해 두 부분으로 나누고, 각 상마다 직렬과 병렬 모드 구현을 위한 스위치가 설치되어 있다. 회로를 직렬 모드로 구현할 때는 중앙에 있는 스위치를 닫고, 분리된 2개의 코일 옆에 있는 스위치는 열어서, 2개의 코일을 직렬로 연결되게 한다. 회로를 병렬 모드로 구현할 때는 중앙에 있는 스위치를 열고, 분리된 2개의 코일 옆에 있는 스위치는 닫아서, 2개의

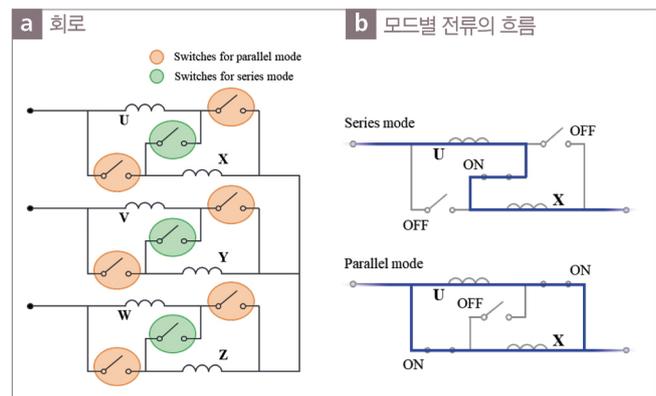


그림 7 직렬-병렬 권선 절환

코일을 병렬로 연결되게 한다. 결과적으로 직렬 모드 또는 병렬 모드에 따라 그림 7(b)에 나타난 것처럼 전류가 흐르고, 직렬 모드일 때의 상당 직렬 턴수는 병렬 모드일 때의 비례 2배 더 크다.

전기자 상저항,  $d$ ,  $q$ 축 인덕턴스, 그리고 계자에 의한 쇄교 자속과 같은 모터 파라미터들은 상당 직렬 턴수에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$R_a = \rho_c \frac{2(L_{stk} + L_{end})N_{ph}}{\pi r_c^2} \quad (2)$$

$$L_d = \frac{N_{ph}^2}{R_{m,d}}, L_q = \frac{N_{ph}^2}{R_{m,q}} \quad (3)$$

$$\lambda_a = \frac{F_m N_{ph}}{R_{m,d}} \quad (4)$$

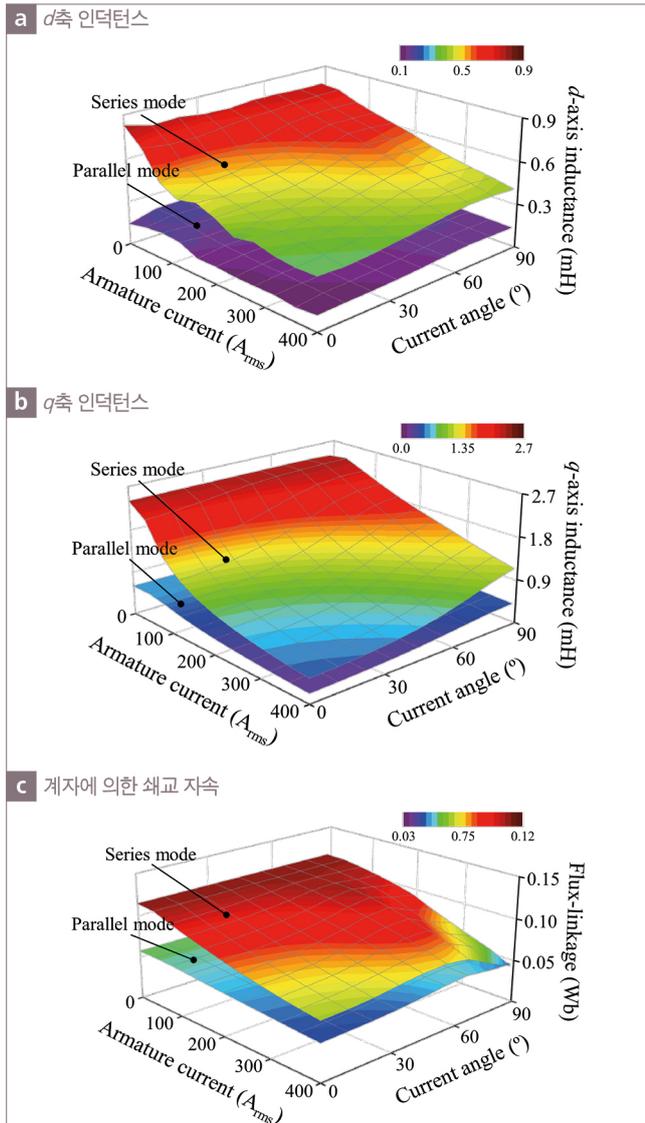


그림 8 직렬 모드와 병렬 모드에 따른 모터 파라미터

이때,  $R_a, \rho_c, L_{stk}, L_{end}, N_{ph}, r_c$ 는 각각 전기자 상저항, 비저항, 적층 길이, 엔드턴의 길이, 상당 직렬 턴수, 그리고 도체 반경을 나타낸다.  $L_d, L_q, R_{m,d}, R_{m,q}$ 는 각각,  $d$ 축 인덕턴스,  $q$ 축 인덕턴스,  $d$ 축 자기 저항,  $q$ 축 자기 저항을 나타낸다. 그리고  $\lambda_a, F_m$ 은 각각 계자에 의한 쇄교 자속, 그리고 계자 기자력을 나타낸다.

상당 직렬 턴수가 IPMSM의 상저항, 인덕턴스, 계자에 의한 쇄교 자속에 직접적으로 영향을 주기 때문에, IPMSM의 전자기적 성능은 직렬 또는 병렬 모드에 따라 달라진다. 그림 8(a), (b), (c)는 각각 직렬 또는 병렬 모드에 따른  $d$ 축 인덕턴스,  $q$ 축 인덕턴스, 그리고 계자에 의한 쇄교 자속을 나타낸다. 인덕턴스는 식 (3)에 나타난 것처럼 상당 직렬 턴수의 제곱에 비례하고, 계자에 의한 쇄교 자속은 식 (4)에 나타난 것처럼 상당 직렬 턴수에 비례한다. 그래서 병렬 모드일 때보다 직렬 모드일 때의 모터 파라미터가 더 큰 것을 알 수 있다. 그림 9(a), (b)는 각각 직렬 모드, 병렬 모드일 때 IPMSM의 전자기적 성능을 나타낸다. 인버터로부터 모터에 인가되는 최대 전류가 동일하다고 하면, 저속 영역에서 직렬 모드로 구동할 때는 증가된 계자에 의한 쇄교 자속으로 인해 최대 토크 밀도가 병렬 모드로 구동할 때보다 더 큰 것을 알 수 있다. 반면에 병렬 모드로 구동할 때는 전기자 상저항,  $d$ ,  $q$ 축 인덕턴스, 그리고 계자에 의한 쇄교 자속이 감소하기 때문에 고속 영역에서는 병렬 모드로 구동할 때의 출력 밀도가 직렬 모드에 비해 더 높다. 게다가 약자속 제어를 위한 음의  $d$ 축 전류가 직렬 모드로 구동할 때에 비해 감소하기 때문에 동손과 철손이 저감되고, 이로 인해 효율이 향상된다.

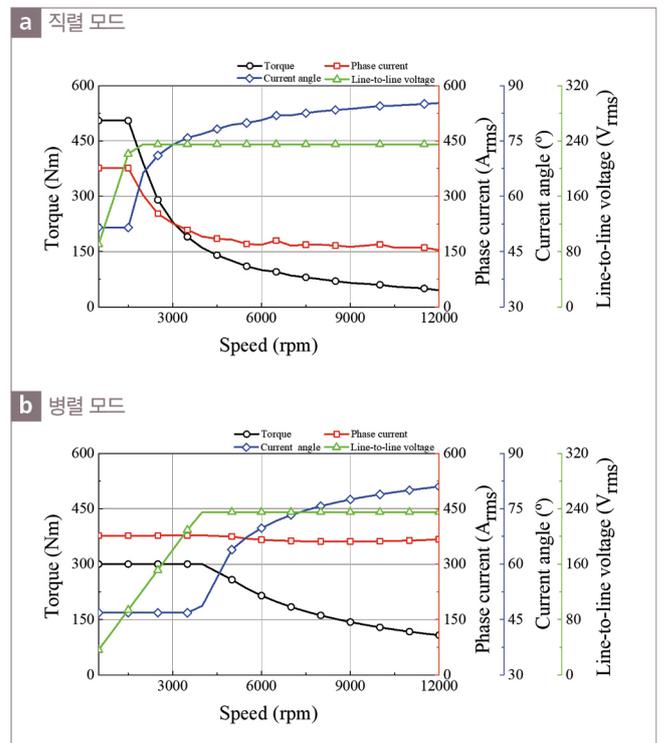


그림 9 IPMSM의 전자기적 성능

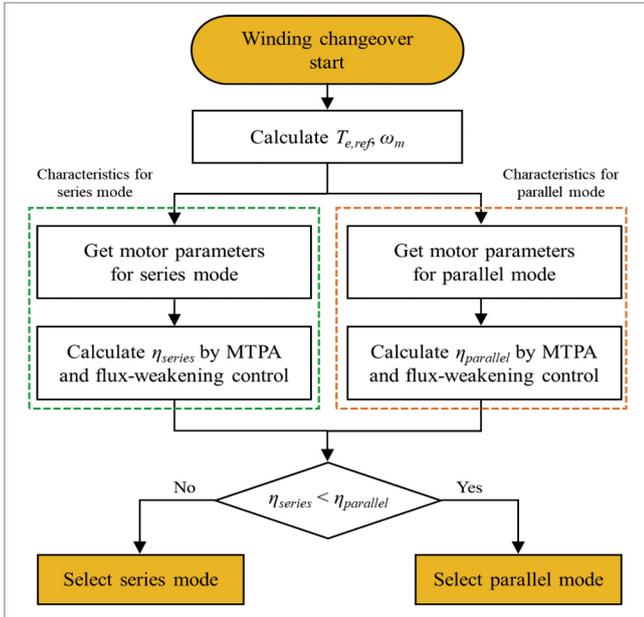


그림 10 직렬-병렬 모드 변화를 위한 알고리즘

직렬-병렬 권선 절환 방법은 저속 영역에서 직렬 모드로 구동할 때의 장점과 고속 영역에서 병렬 모드로 구동할 때의 장점을 결합하여 모든 운전 영역에서 IPMSM의 고효율 운전을 가능하게 할 수 있다. 운전 모드의 변화는 그림 10에 나타난 알고리즘을 통해 이루어진다. 각 운전점별로 약자속 제어와 최대 토크/전류(Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 제어를 적용하여 각 운전 모드에 따라 계산된 효율을 비교하여, 높은 효율을 발생시키는 운전 모드를 선택한다.

전자계 FEA를 이용하여 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 전자기적 성능을 Base 모델과 비교하였다. 여기서 IPMSM이 병렬 모드일 때는 Base 모델과 동일한 경우이다. 그래서 IPMSM이 직렬 모드일 때만 Base 모델과 차이가 있다. 그림 11에는 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율맵을 나타냈다. 그림 10에 나타난 운전점별로 운전 모드를 결정하는 알고리즘을 기반으로, 저속

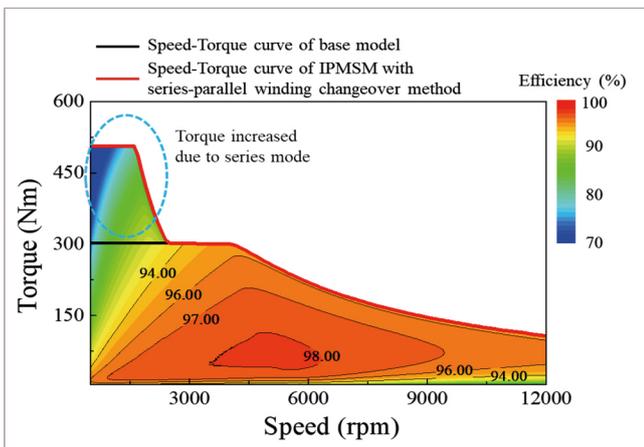


그림 11 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율맵

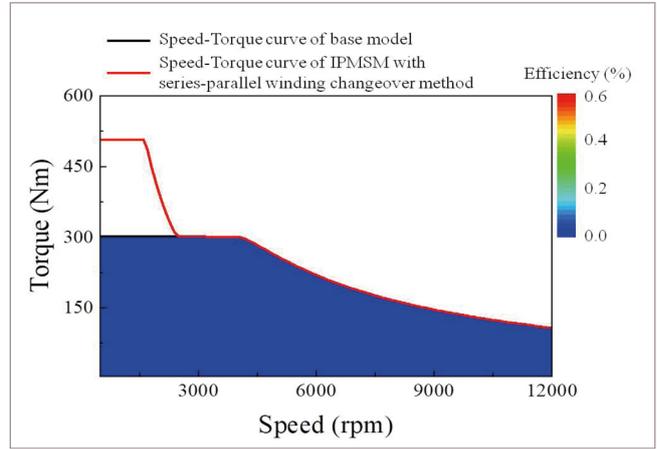


그림 12 Base 모델과 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율 차이

영역에서는 직렬 모드로 구동하고, 고속 영역에서는 병렬 모드로 구동한다. 그림 11에 나타나 있듯이, 인버터로부터 모터에 인가되는 최대 전류가 동일하다고 할 때, 저속 영역에서 직렬 모드로 구동함에 따라 계자에 의한 쇠교 자속이 증가하여 최대 토크 밀도가 상승한 것을 알 수 있다. 그림 12에는 Base 모델과 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율 차이를 나타냈다. IPMSM이 저속 영역에서 직렬 모드로 구동할 때, Base 모델에 비해 상당 직렬 턴수가 2배 증가하고, 병렬 회로 수가 1/2배 감소하기 때문에 전기자 상저항은 4배 증가한다. 그리고 동일 토크를 발생시키는데 필요한 기자력은 동일하기 때문에, 상당 직렬 턴수가 2배 증가함에 따라 인가되는 전류가 1/2배 감소한다. 그래서 동손이 거의 동일하고, 기자력이 같아 철손도 거의 동일하여 효율 차이가 거의 없다. 고속 영역에서는 병렬 모드로 구동하는데, 이는 Base 모델을 구동하는 것과 같은 상황이므로 효율이 동일하다. 그래서 그림 12에 나타나 있듯이, Base 모델과 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다.

## 5. Open-end winding과 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지

5장에서는 OEW와 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지의 구조와 특징에 대해 설명하고, 전자계 FEA를 이용하여 OEW와 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지를 적용한 IPMSM의 전자기적 성능을 Base 모델과 비교하였다.

이 토폴로지를 이용하면, OEW의 장점과 직렬-병렬 권선 절환 방법의 장점을 모두 취할 수 있고, 이에 따라 e-모빌리티

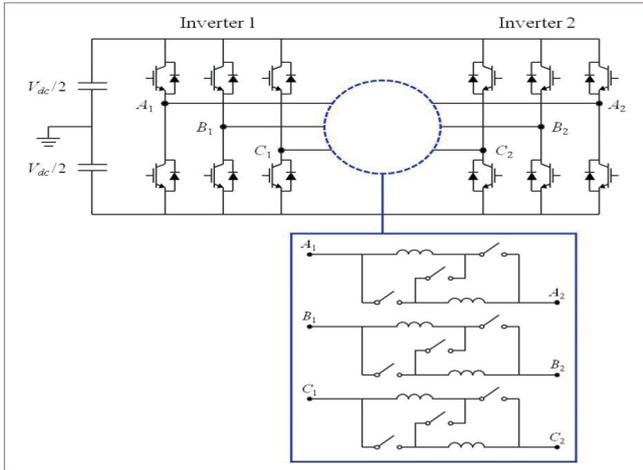


그림 13 OEW-IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 구조

구동용 IPMSM이 모든 운전 영역에서 높은 효율로 구동이 가능하다. OEW-IPMSM과 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지의 구조는 그림 13에 나타나 있다.

그림 14에 나타난 것처럼, 이 토폴로지를 기반으로, OEW와 직렬 및 병렬 모드를 결합한 2개의 운전 모드로 IPMSM을 구동시킬 수 있다. IPMSM에 OEW를 적용했을 때, 증가된 MI 만큼 출력 밀도를 향상시킬 수 있다. 하지만 e-모빌리티를 구동시키는데 필요한 출력의 크기가 일정하기 때문에, OEW를 이용하여 IPMSM의 출력 밀도를 향상시키는 것은 비효율적이다.

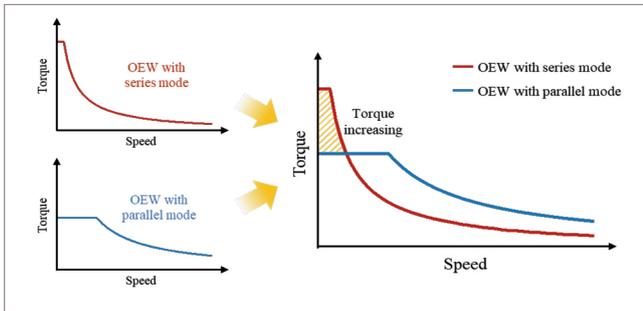


그림 14 OEW-IPMSM과 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지의 속도-토크 곡선

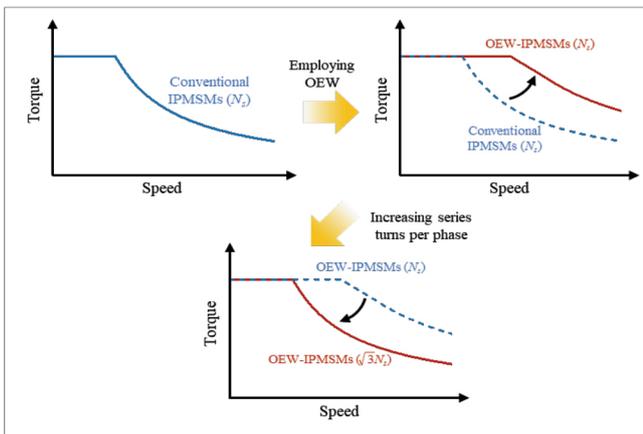


그림 15 일반적인 IPMSM과 OEW-IPMSM의 속도-토크 곡선

그러므로 그림 15에 나타난 것처럼, OEW-IPMSM의 출력 밀도를 유지하기 위해 증가된 MI의 비율만큼 OEW-병렬 모드에서의 상당 직렬 턴수를 증가시키는 것이 최대 상전류를 감소시키는 데 유리하다. 전류 밀도와 슬롯의 점적률이 일정하다면 상당 직렬 턴수가 증가함에 따라 OEW-IPMSM의 최대 전류가 Base 모델에 비해 감소하고, 인덕턴스와 계자에 의한 쇄고 자속과 같은 모터 파라미터는 증가한다.

결국 이 토폴로지는 OEW-IPMSM의 상당 직렬 턴수를 증가시키고, 여기에 직렬-병렬 권선 절환 토폴로지를 적용하여 수행된다. 이 토폴로지가 OEW-직렬 모드 및 OEW-병렬 모드의 2개 운전 모드로 구동하기 때문에, 운전점별로 적절한 운전 모드를 선택해야 한다. 본 논문에서는 IPMSM의 효율을 최대화하기 위하여 그림 10에 나타난 알고리즘을 사용했다. 그림 10에 나타난 운전점별로 운전 모드를 결정하는 알고리즘을 기반으로, 저속 영역에서는 OEW-직렬 모드로 구동하고, 고속 영역에서는 OEW-병렬 모드로 구동한다.

전자계 FEA를 이용하여 OEW-IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 전자기적 성능을 Base 모델과 비교하였다. 그림 16에는 OEW-IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환

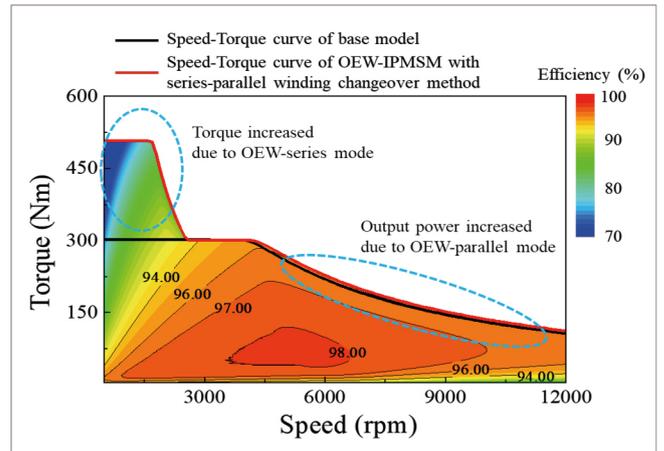


그림 16 OEW-IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율맵

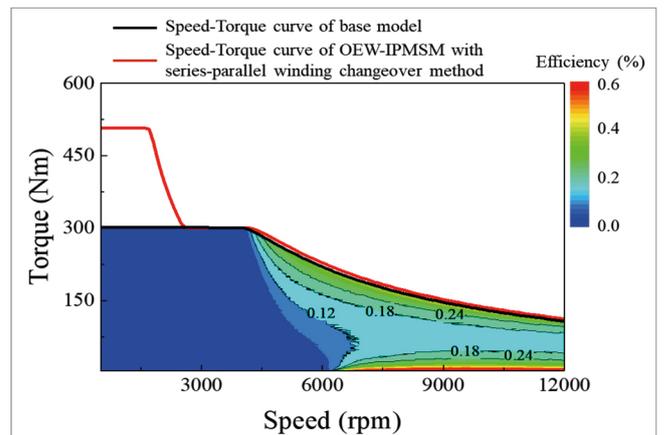


그림 17 Base 모델과 OEW-IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율 차이

방법을 적용한 토폴로지의 효율맵을 나타냈다. 그림 10에 나타난 운전점별로 운전 모드를 결정하는 알고리즘을 기반으로, 저속 영역에서는 OEW-직렬 모드로 구동하고, 고속 영역에서는 OEW-병렬 모드로 구동하는 것을 알 수 있다. Base 모델과 비교했을 때 OEW-직렬 모드로 구동하는 저속 영역에서는 계자에 의한 쇄교 자속이 증가하기 때문에, 최대 토크 밀도 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 17에는 Base 모델과 OEW-IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지의 효율 차이를 나타냈다. OEW를 사용하면 최대 MI가 증가하기 때문에, 약자속 제어를 수행하는데 필요한 음의  $d$ 축 전류가 Base 모델에 비해 감소하였다. 그러므로 더 적은 전기자 전류로 인해 동손 및 철손이 감소하고 모터의 효율이 향상된다.

## 6. 결론

e-모빌리티 모터의 대표적인 기술 동향으로는 e-모빌리티의 무게를 저감하기 위한 구동 모터의 경량화와 e-모빌리티의 전비 향상을 위한 구동 모터의 고효율화 등이 있다. 본 논문에서는 e-모빌리티 구동용 IPMSM의 토크 밀도 및 출력 밀도, 그리고 효율을 높이기 위하여 OEW를 적용한 토폴로지, 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용한 토폴로지, 그리고 OEW와 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지를 제안하고 유한요소해석을 통해 전자기적 성능 변화를 분석하였다. IPMSM에 OEW를 적용하면 최대 MI가 증가하기 때문에 고속 영역에서 약자속 제어를 위해 필요한 전기자 전류가 감소하고, 그에 따라 IPMSM의 효율을 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 또 IPMSM에 직렬-병렬 권선 절환 방법을 적용하면, 저속 영역에서 직렬 모드 구동에 따른 상당 직렬 턴수의 증가로 인해 높은 토크 밀도를 발생시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 OEW와 직렬-병렬 권선 절환 방법을 결합한 토폴로지를 적용하면 위 두 특성을 모두 나타내어 저속 영역에서는 높은 토크 밀도를, 고속 영역에서는 효율 향상을 기대할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. ■

- [1] J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 61, No. 2, pp. 475-484, Feb. 2012.
- [2] B. Sarlioglu, C. T. Morris, D. Han, and S. Li, "Driving toward accessibility," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, Vol. 23, No. 1, pp. 14-25, Jan. 2017.
- [3] M. Popescu, J. Goss, D. A. Staton, D. Hawkins, Y. C. Chong, and A. Boglietti, "Electrical vehicles—practical solutions for power traction motor systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 54, No. 3, pp. 2751-2762, May 2018.
- [4] G. Berardi and N. Bianchi, "Design guideline of an AC hairpin winding," in *Proc. 13th Int. Conf. Elect. Mach.*, pp. 2444-2450, Sep. 2018.
- [5] H. J. Park and M. S. Lim, "Design of high power density and high efficiency wound-field synchronous motor for electric vehicle traction," in *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 46677-46685, 2019.
- [6] J. W. Chin, K. S. Cha, M. R. Park, S. H. Park, E. C. Lee, and M. S. Lim, "High efficiency PMSM with high slot fill factor coil for heavy-duty EV traction considering AC resistance," in *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 36, No. 2, pp. 883-894, Jun. 2021.
- [7] K. S. Cha, J. W. Chin, S. H. Park, Y. H. Jung, E. C. Lee, and M. S. Lim, "Design method for reducing AC resistance of traction motor using high fill factor coil to improve fuel economy of eBus," in *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Early Access.
- [8] S. H. Park, E. C. Lee, J. C. Park, S. W. Hwang, and M. S. Lim, "Prediction of mechanical loss for high-power-density PMSM considering eddy current loss of PMs and conductors," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 57, No. 2, Feb. 2021.
- [9] N. Simpson, D. J. North, S. M. Collins, and P. H. Mellor, "Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in electrical machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 3, pp. 2510-2519, May 2020.
- [10] A. Fatemi, D. M. Ionel, M. Popescu, Y. C. Chong, and N. A. O. Demerdash, "Design optimization of a high torque density spoke-type PM motor for a formula E race drive cycle," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 5, pp. 4343-4354, Sep. 2018.
- [11] S. W. Hwang, J. Y. Ryu, J. W. Chin, S. H. Park, D. K. Kim, and M. S. Lim, "Coupled electromagnetic-thermal analysis for predicting traction motor characteristics according to electric vehicle driving cycle," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Early Access.
- [12] M. R. Baiju, K. K. Mohopatra, R. S. Kanchan, and K. Gopakumar, "A dual two-level inverter scheme with common mode voltage elimination for an induction motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 19, No. 3, pp. 794-805, May 2004.
- [13] W. Hu, H. Nian, and D. Sun, "Zero-sequence current suppression strategy with reduced switching frequency for open-end winding PMSM drives with common DC bus," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 66, No. 10, pp. 7613-7623, Oct. 2019.
- [14] X. Lin, W. Huang, and L. Wang, "SVPWM strategy based on the hysteresis controller of zero-sequence current for three-phase open-end winding PMSM," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 34, No. 4, pp. 3474-3486, Apr. 2019.
- [15] K. S. Cha, D. M. Kim, Y. H. Jung, and M. S. Lim, "Wound field synchronous motor with hybrid circuit for neighborhood electric vehicle traction improving fuel economy," *Appl. Energy*, Vol. 263, No. 1, Art. No. 114618.
- [16] M. S. Lim and J. P. Hong, "Design of high efficiency wound field synchronous machine with winding connection change method," *IEEE Trans. Energy Convers.* Vol. 33, No. 4, pp. 1978-1987, Dec. 2018.

**우석원** 한양대 미래자동차-SW 융합전공 석사과정

2020년 한양대 미래자동차공학과 졸업.  
2020년~현재 동 대학원 미래자동차-SW 융합전공 석사과정.



**박수환** 한양대 미래자동차공학과 석·박통합과정

2014년 한양대 기계공학과 졸업.  
2014년~현재 동 대학원 미래자동차공학과 석·박통합과정.  
2019~2020년 한국생산기술연구원 근무.



**차경수** 한양대 미래자동차공학과 석·박통합과정

2015년 충북대 전기공학과 졸업.  
2015년~현재 한양대 미래자동차공학과 석·박통합과정.



**임명섭** 한양대 미래자동차공학과 조교수

2012년 한양대 기계공학과 졸업. 2014년 동 대학원 미래자동차공학과 졸업(석사). 2017년 동 대학원 미래자동차공학과 졸업(공학박사).  
2017~2018년 현대모비스 근무. 2018~2019년 영남대 기계공학부 조교수.  
2019년~현재 한양대 미래자동차공학과 조교수.

