

고속 운전 시 WRSM의 성능 향상 및 IPMSM과 비교

High Speed Performance Improvement of the WRSM and its Comparison with the IPMSM

채 응 찬* · 김 미 정** · 이 기 덕** · 이 재 준** · 한 정 호** · 정 태 철** · 이 주†
 (Woong-Chan Chae · Mi-Jung Kim · Ki-Doek Lee · Jae-Jun Lee · Jung-Ho Han · Tae-Chul Jung · Ju Lee)

Abstract - This paper shows an improvement of the WRSM (Wound Rotor Synchronous Motor) by satisfying the voltage limit condition at high speed. After that, it compares the performance of the improved WRSM to that of the IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor). The comparison has been made under the condition where the dimension of the motor is identical to that of the IPMSM, having the rotor switched to a wounded rotor form. Moreover, this paper compares the Basic Model of the two motor, and estimates the parameters of the WRSM, thereby proposing the method to improve high speed performance. Furthermore, this paper presents the feasibility of switching the conventional motor into rare-earth-free motors for traction purpose.

Key Words : WRSM, WFSM, IPMSM, Traction motor, EV, HEV, Salient pole

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염 및 에너지 고갈문제가 대두됨에 따라 친환경 차량으로 EV와 HEV의 시장이 확대되어 가고 있다. 현재 이러한 견인용 전동기로 출력밀도가 높은 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)가 대부분 사용되어 왔지만, 영구자석의 고온과 전기자 반작용에 의한 불가역 감자영향, 무엇보다도 폭등하는 가격 등의 이유로 비희토류계 전동기의 개발에 관심이 집중되고 있다. 이러한 비희토류계 전동기들 중에서 발전기로 주로 사용되다가 최근 Traction용 전동기로 주목 받고 있는 회전자 권선형 동기전동기(WRSM)에 대해서 분석하도록 한다.

WRSM의 다른 특징으로는 제어 변수가 i_d , i_q , i_f 로 IPMSM의 i_d , i_q 보다 많아 다양한 제어방식이 존재한다[1]. 제어변수가 많다는 것은 다양한 방법의 제어가 가능하다는 것이지만 한편으로는 제어가 더 복잡해질 수 있다[2]. 따라서 이러한 복잡한 제어에 대해 각 속도별 요구토크를 만족하는 적절한 변수를 선택하여야 할 것이다.

본 논문에서는 비희토류계 전동기 중 하나인 회전자 권선형 동기전동기와 Traction용으로 설계된 매입형 영구자석 동기전동기를 동일한 고정자 외경, 극수와 적층길이의 제약 조건에서 특성 차이를 비교하고 WRSM의 특성 향상 방안 에 대해 논한다.

2. 본 론

2.1 기본모델 해석 비교

2.1.1 기본모델

회전자 권선형 동기전동기의 기본모델은 HEV용으로 기존에 설계된 IPMSM에서 회전자 구조만 바꾸는 설계를 진행하였다. 설계된 IPMSM의 모델은 그림 1(a)와 같이 8극 36슬롯의 형태로 영구자석은 Bar Type의 형태이며 Bridge를 갖는 구조이다. IPMSM의 세부사항은 표 1과 같다[3].

표 1 IPMSM의 세부사항

Table 1 Specifications of IPMSM

항 목	수 치
고정자 외경 [mm]	260
회전자 외경 [mm]	147.8
적층길이 [mm]	203
영구자석 종류	NdFeB
DC-Link 전압 [V]	600
상전류 제한치 [A_{peak}]	500

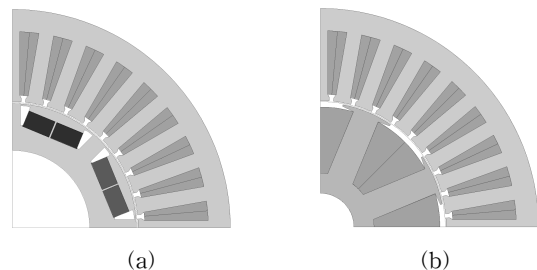


그림 1 (a) IPMSM의 모델 (b) WRSM의 기본모델
 Fig. 1 (a) Model of IPMSM (b) Basic Model of WRSM

* 준 회원 : 한양대 공대 전기공학과 석사과정
 ** 정 회원 : 한양대 공대 전기공학과 박사과정
 † 교신저자, 시니어회원 : 한양대 전기공학과 교수
 E-mail : julee@hanyang.ac.kr
 접수일자 : 2012년 8월 10일
 최종완료 : 2012년 10월 10일

기본모델의 경우 그림 1(b)처럼 IPMSM과 동일한 8극 36 슬롯의 형태를 가지며 고정자 외경과 적층길이는 동일한 구조이다. 회전자 형상은 IPMSM에 비해 축(Shaft)의 공간을 더 활용하였고 돌극형 코어 구조에 코일을 감은 형태이다. 기본모델의 세부사항은 표 2와 같다.

표 2 WRSM(기본모델)의 세부사항

Table 2 Specifications of WRSM(Basic Model)

항 목	수 치
고정자 외경 [mm]	260
회전자 외경 [mm]	147.8
적층길이 [mm]	203
회전자 턴수 [turns]	102
회전자 전류 [A _{pc}]	13

2.1.2 기본모델의 정격운전 특성 비교

2.1.1에서 설계된 내용을 기반으로 IPMSM과 WRSM의 기본모델의 유한요소해석(Finite Element Analysis) 결과 비교를 표 3에서 보여주고 있다.

표 3 IPMSM과 WRSM(기본모델) 비교 @4500rpm

Table 3 Comparison of IPMSM and WRSM(Basic Model) @4500rpm

	IPMSM	WRSM (기본모델)
토크 [Nm]	417.5	310.5
전류 위상각 [degE]	44	-8
상 전류 [A _{peak}]	500	500

IPMSM의 경우 전류 위상각 44°에서 417.5 [Nm]의 최대 토크가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

WRSM은 상전류 500 [A]와 전류 위상각 -8°에서 최대 토크 값이 310.5 [Nm]로 이는 IPMSM의 74.4%에 해당한다.

2.1.3 기본모델의 고속운전 특성 비교

고속운전 특성을 확인하기 위해서는 전류 제한 조건과 전압 제한타원을 만족하는 영역을 확인해야 하고 i_d, i_q 전류맵에서 전압 제한타원 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$(L_d i_d + \psi_a)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 V_{om} 은 유기전압 V_o 의 제한값이고 ω 는 회전 속도이다. 위 식을 다시 정리하면,

$$\frac{(i_d + \psi_a/L_d)^2}{(V_{om}/L_d\omega)^2} + \frac{(i_q)^2}{(V_{om}/L_q\omega)^2} = 1 \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 전압 제한타원은 $(-\psi_a/L_d)$ 를 중심으로 d 축의 길이가 $(V_{om}/L_d\omega)$, q 축의 길이가 $(V_{om}/L_q\omega)$ 인 타원의 형태이다. 여기서 ψ_a 는 IPMSM의 경우 영구자석에 의한 쇄교자속 값이고, WRSM의 경우 계자자속에 의한 쇄교자속 값($L_m i_f$)이므로 계자전류를 줄이게 되면 전압 제한타원 중심점이 d 축 상에서 원점에 가까운 쪽으로 이동하게 된다.

IPMSM과 WRSM에 대해서 10000 [rpm] 고속 시의 제어 방법을 확인하기 위해 i_d, i_q 전류맵을 그림 2에서 보여주고 있다.

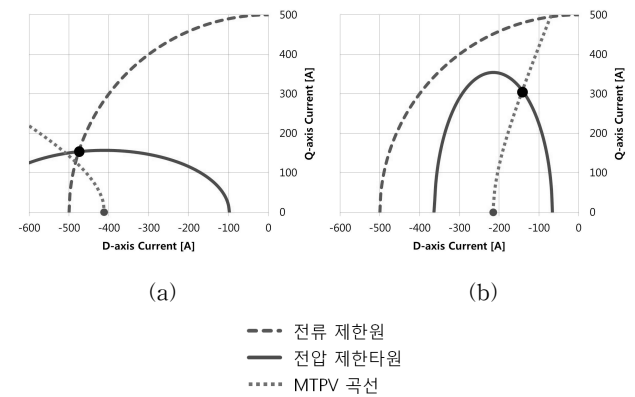


그림 2 (a) IPMSM의 전류맵 (b) WRSM(기본모델)의 전류맵
Fig. 2 (a) Current Map of IPMSM (b) Current Map of WRSM(Basic Model)

IPMSM과 WRSM에 대해 각각 10000 [rpm] 시의 전류 제한원과 전압 제한타원, MTPV 곡선을 보여주고 있다. 여기서 MTPV 제어는 동일 쇄교자속에 대하여 최대 토크를 발생시키는 조건이다.

그림 2(a)에서 알 수 있듯이 IPMSM의 경우 10000 [rpm]에서 MTPV 곡선과 만나지 않으며 전류 위상각제어만으로 전압 제한을 만족하며 토크는 203.8 [Nm]가 발생하는 것을 표 4에서 확인할 수 있다.

반면에 WRSM의 경우 최대 상전류로 10000 [rpm] 시의 전압제한을 만족하지 못하였고 MTPV 제어를 통해 고속 운전이 가능함을 확인할 수 있다.

이 경우에 계자전류를 줄인다면 전압 제한타원의 중심점 ($L_m i_f/L_d$)은 원점 쪽으로 이동하며, 또한 회전자의 포화가 풀리면서 L_d, L_q 값이 커지게 되고 이에 따라 전압 제한타원의 장축과 단축의 길이가 작아져 운전 가능영역이 더 좁아지는 것을 식 (2)에서 확인할 수 있다[4].

표 4 IPMSM과 WRSM(기본모델) 비교 @10000rpm

Table 4 Comparison of IPMSM and WRSM(Basic Model) @10000rpm

	IPMSM	WRSM (기본모델)
토크 [Nm]	203.8	123.7
전류 위상각 [degE]	76.5	37
상 전류 [A _{peak}]	500	330

따라서 최대 계자전류로 유지한 채 위 내용을 기반으로 WRSM의 기본모델을 해석한 결과 상 전류 330 [A]와 전류 위상각 37°에서 전압 제한을 만족하는 MTPV 제어이고 토크는 123.7 [Nm]로, 이는 IPMSM과 비교해 60.7%에 해당하는 값이다.

2.1.3 기본모델의 특성 분석

2.1.3의 고속운전 특성 비교에서 확인하였듯이 WRSM의 경우 전압 제한타원의 중심점이 IPMSM에 비해 원점쪽으로 옮겨지면서 계자자속을 줄이는 것이 아닌 상 전류를 줄이며 약자속 제어를 하고 있다.

여기서 IPMSM과 WRSM의 전압 제한타원 및 MTPV 곡선의 형태가 다른 것은 역돌극성 ($L_d < L_q$)과 돌극성 ($L_d > L_q$)에 의한 것으로 각각의 파라미터 값들은 표 5에 나타내고 있다.

표 5 IPMSM과 WRSM(기본모델)의 파라미터
Table 5 Parameters of IPMSM and WRSM(Basic Model)

	IPMSM	WRSM (기본모델)
계자에 의한 쇄교자속 ψ_a [Wb]	0.107	0.118
d축 인덕턴스 L_d [mH]	0.26	0.55
q축 인덕턴스 L_q [mH]	0.52	0.23
전압 제한타원 중심점 $-\psi_a/L_d$ [A]	-411.5	-214.5

표 5에서 영구자석에 의한 쇄교자속 값(0.107 [Wb])과 계자전류에 의한 쇄교자속 값(0.118 [Wb])은 거의 비슷하였지만 d축 인덕턴스 값이 두 배 정도 차이가 나면서 전압 제한타원의 중심점이 원점쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있다. WRSM은 IPMSM과 비교해 d축 자기저항이 작은 돌극 구조로써 다른 값들이 동일하다면 d축 인덕턴스가 큰 값을 나타내게 된다.

전압 제한타원의 중심점이 안쪽으로 옮겨짐에 따라 고속에서 MTPV 제어를 하며 상 전류를 크게 줄이게 되었다. 하지만 견인용 전동기에서 요구하는 고속에서의 높은 토크를 만족시키기 위해 상 전류를 줄이지 않고도 고속 운전이 가능할 수 있도록 전압 제한타원의 중심점을 전류 제한원 근처로 옮기는 설계가 필요하였다. 동일한 고정자 외경에 동일한 인버터를 사용한다면 상 전류의 최대값은 500 [A]로 고정하므로 L_d 를 줄여 전압 제한타원의 중심점을 바깥쪽으로 이동하게 하였다.

$$L_d = \frac{N^2}{R_d} \quad (3)$$

d축 인덕턴스는 d축 자기저항에 반비례하고 고정자 턴수의 제곱에 비례하는 것을 식 (3)에서 보이고 있다. 따라서 제곱으로 영향을 받는 고정자 턴 수를 줄여 L_d 를 줄이는 설계를 진행하였다.

고정자 턴 수가 감소됨에 따라 고정자의 전류밀도 제약조건에 요구되는 슬롯 면적이 줄어들게 되면서 고정자 사이즈는 줄어들게 되고 상대적으로 회전자의 공간이 여유로워질 것이다.

2.2 개선모델 해석비교

2.2.1 개선모델

2.1.4의 내용을 바탕으로 고정자의 전류밀도를 고정한 채 턴 수를 줄이게 되었다. 턴 수가 줄어들며 여유로워진 고정자 면적에 회전자 외경을 증가시킨 개선모델은 그림 3과 같다.

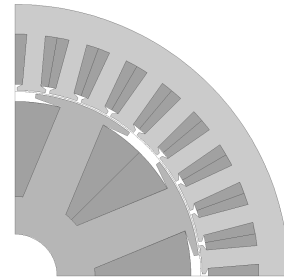


그림 3 개선된 WRSM의 모델
Fig. 3 Improved Model of WRSM

표 6에서 알 수 있듯이 고정자 외경과 적층길이는 동일한 조건에 상당 직렬턴수가 15 [turns]로 줄어들었고 회전자 외경은 약 20% 증가하였다. 또한 동일한 회전자 전류밀도 조건에서 회전자 공간이 여유로워짐에 따라 동일 회전자 전류 조건에 회전자 턴수가 123 [turns]으로 증가하였다.

표 6 기본모델과 개선모델의 세부사항
Table 6 Specifications of Basic Model and Improved Model

항 목	기본모델	개선모델
고정자 외경 [mm]	260	260
회전자 외경 [mm]	147.8	176.5
적층길이 [mm]	203	203
상당 직렬턴수 [turns]	21	15
회전자 턴수 [turns]	102	123
회전자 전류 [A _{DC}]	13	13

2.2.2 개선모델의 정격운전 특성 분석

위 내용을 기반으로 정격속도에서 IPMSM, WRSM의 기본모델과 개선모델의 해석결과 비교는 표 7과 같다. Core Loss는 각 전동기의 회전자와 고정자에서 발생한 철손을 합한 값이고 Magnet Loss는 영구자석에서 발생하는 와전류 손실이다. WRSM의 Copper Loss는 고정자 동손과 회전자 동손으로 분리하여 표시하였다. 또한 효율은 각 포인트에서 계산한 값으로 기계손을 고려하지 않고 전동기의 전기적인 손실만을 고려한 값이다. 하지만 여자기 혹은 브러시 등의 구조로 인하여 IPMSM에 비해 WRSM의 추가적인 손실이 더 발생할 것으로 예상된다.

표 7 IPMSM과 WRSM의 비교 @4500rpm

Table 7 Comparison of IPMSM and WRSM @4500rpm

	IPMSM	WRSM (기본모델)	WRSM (개선모델)
Torque [Nm]	417.5	310.5	319.7
Phase Current [A]	500	500	500
Current Phase Angle [degE]	44	-8	0
Core Loss [W]	1570	1599.5	1178.7
Magnet Loss [W]	118.6	-	-
Stator Copper Loss [W]	3750	3750	2678.6
Rotor Copper Loss [W]	-	728.6	898.7
Efficiency [%]	97.3	96.0	96.9

표 7에서 개선모델의 토크(319.7 [Nm])가 기본모델 (310.5 [Nm])보다 약간 커졌음을 확인할 수 있다. IPMSM과 기본모델의 Core Loss는 비슷하였고, Core Loss의 대부분이 발생하는 고정자 크기가 줄어든 개선모델에서는 감소되었다. 또한 고정자 턴수가 줄어들면서 고정자 동손도 줄어들게 되었다. 회전자 전류는 동일하고 회전자 턴수가 증가함에 따라 기본모델과 비교해 회전자 동손은 증가하였다. 효율의 경우 회전자 동손은 증가하였지만 철손과 동손의 대부분을 차지하는 고정자 사이즈를 줄이면서 기본모델보다 0.9% 향상되었다. 하지만 IPMSM에 비해 0.4% 낮은 값을 나타내고 있다.

2.2.3 개선모델의 고속운전 특성 분석

개선모델 역시 고속운전 특성을 확인하기 위한 10000 [rpm]시의 전류맵을 그림 4에서 보여주고 있다.

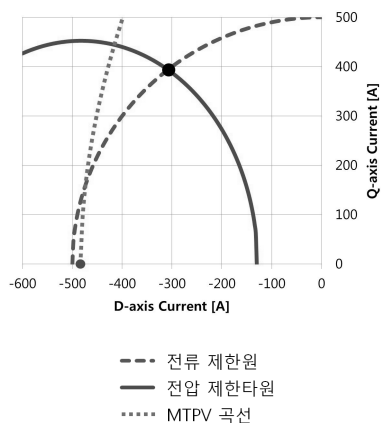


그림 4 WRSM(개선모델)의 전류맵
Fig. 4 Current Map of WRSM(Improved Model)

고정자 턴수가 줄어들면서 식 (3)에서 알 수 있듯이 인덕턴스가 작아지고, 그에 따라 기본모델보다 동일 회전 속도에서 전압 제한타원의 크기가 커진 것을 알 수 있다. 또한 d

축 인덕턴스가 작아지면서 식 (2)에서 처럼 전압 제한타원의 중심점이 전류 제한원과 가까워진 것을 확인할 수 있다. 전압 제한타원의 중심점이 바깥쪽으로 움직임에 따라 최대 상전류(500 [A])를 인가하여도 10000 [rpm]에서 전압 제한 조건과 전류 제한 조건을 모두 만족하는 구동이 가능해지는 것을 그림 4에서 확인할 수 있다. 개선모델과 기본모델의 전압 제한타원을 결정하는 주요 파라미터인 회전자 권선에 의한 쇄교자속과 d축, q축 인덕턴스, 그리고 전류맵에서 전압 제한타원의 중심점에 대한 비교를 표 8에서 보여주고 있다.

표 8 기본모델과 개선모델의 파라미터

Table 8 Parameters of Basic Model and Improved Model

	WRSM (기본모델)	WRSM (개선모델)
계자에 의한 쇄교자속 ψ_a [Wb]	0.118	0.111
d축 인덕턴스 L_d [mH]	0.55	0.23
q축 인덕턴스 L_q [mH]	0.23	0.18
전압 제한타원 중심점 $-\psi_a/L_d$ [A]	-214.5	-482.6

동일한 회전자 전류에 회전자 턴수가 123 [turns]으로 증가하면서 회전자 자속은 증가하였지만 고정자의 턴수가 감소하면서 이에 비례한 쇄교자속은 감소하였고 d축, q축 인덕턴스 역시 감소한 것을 확인할 수 있다.

위의 내용을 기반으로 IPMSM과 WRSM의 기본모델, 개선모델의 고속 운전특성을 표 9에서 보여주고 있다.

표 9 IPMSM과 WRSM의 비교 @10000rpm

Table 9 Comparison of IPMSM and WRSM @10000rpm

	IPMSM	WRSM (기본모델)	WRSM (개선모델)
Torque [Nm]	203.8	123.7	234.9
Phase Current [A]	500	330	500
Current Phase Angle [degE]	76.5	37	36
Core Loss [W]	4602.5	2155.9	2776.4
Magnet Loss [W]	239.5	-	-
Stator Copper Loss [W]	3750	1633.5	2678.6
Rotor Copper Loss [W]	-	728.6	898.7
Efficiency [%]	96.0	96.6	97.5

기본모델의 경우 상전류의 크기를 줄이면서 철손과 고정자 동손이 감소하여 96.6%의 효율을 나타내고 있다.

개선모델의 경우 상전류 500 [A]와 전류 위상각 36°에서 234.9 [Nm]의 토크가 발생하였고 고정자 사이즈가 줄어들면서 철손과 고정자 동손이 감소하면서 97.5%의 효율을 나타내고 있다. 10000 [rpm]의 고속 시에 토크는 15.3% 증가하였고 효율은 1.5% 향상되는 등 IPMSM보다 높은 값을 나타

내고 있다.

표 7과 표 9의 내용을 기반으로 전 속도영역에서 IPMSM과 WRSM (기본모델, 개선모델)의 속도-토크 곡선을 확인해보면 그림 5와 같다.

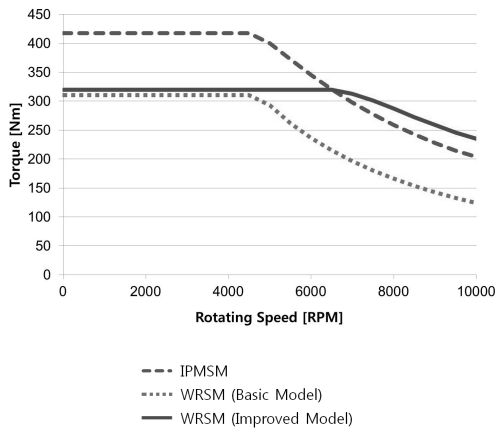


그림 5 속도-토크 곡선
Fig. 5 Speed-Torque Curve

그림 5의 속도-토크 곡선에서 전압제한 포인트를 확인해보면 고정자 턴수가 줄어들면서 더 넓은 영역에서의 최대토크 운전이 가능한 것을 확인할 수 있다. 또한 WRSM이 최대토크는 낮지만 정격 포인트 이후의 토크는 비슷하여 출력 밀도는 비슷하다고 할 수 있다. 이러한 경우 기어비 조절을 통하여 IPMSM과 같은 토크를 발생시킬 수 있으며 비슷한 속도-토크 곡선 추이를 나타내게 된다.

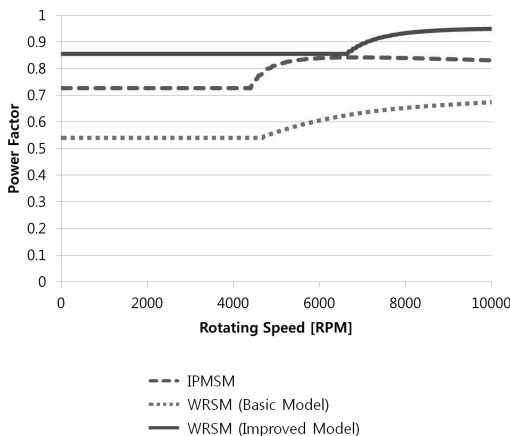


그림 6 속도-역률 곡선
Fig. 6 Speed-Power Factor Curve

전 속도영역에서 역률을 확인해보면 그림 6과 같다. 정토크 구간에서 WRSM의 역률(0.86)이 IPMSM의 역률(0.73)보다 높고 고속 시에 WRSM의 역률(0.95)은 1에 가까운 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

IPMSM에서 고정자를 고정시킨 채 회전자 형상을 회전자 권선형으로 변경하여 비교해보고 더 나은 운전을 위해 WRSM을 개선한 후에 비교해 보았다. 회전자만을 단순히 권선형으로 바꾼 기본모델의 경우 최대토크와 고속 시의 출력 모두 성능이 저하 되었지만 고정자 턴수를 줄이고 회전자의 크기를 키운 개선모델에서 최대토크 값은 IPMSM보다는 낮지만 더 높은 역률과 최대토크 운전영역이 더 넓고, 고속 시에는 출력, 효율 및 역률 모두 높아진 것을 확인할 수 있었다.

일반적으로 IPMSM의 회전자 형상을 주 자속축의 자기저항이 작은 권선형으로 바꾼 경우 d 축 인덕턴스가 커지게 된다. 그에 따라 전압 제한타원의 중심점 ($-L_m i_f / L_d$)이 i_d, i_q 전류맵에서 전류 제한원의 안쪽으로 옮겨지고 고속에서 출력이 낮았다.

고속에서 우수한 제어특성을 위하여 전압 제한타원의 중심점을 옮기는 설계가 필요하였고 본 논문에서는 고정자 턴수를 줄이며 d 축 인덕턴스를 작게하고 고정자 크기가 줄어들면서 회전자 크기가 커진 개선모델 설계를 제안하였다.

WRSM의 경우 IPMSM에 비해 기계적인 문제에 대해 더욱 많은 검토가 필요하지만 IPMSM에 비해 제어 변수가 많아 운전특성이 다양하다는 점과 영구자석의 감자현상에 대해 고려할 필요가 없다는 것, 그리고 가격적인 측면 등에서 장점이 많아 견인용 전동기의 대안이 될 것이다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 우주제조기술연구센터(ATC) 사업으로 지원된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다. (과제번호 : 10032866)

참고 문헌

- [1] G. Friedrich, "Experimental comparison between Wound Rotor and Permanent Magnet Synchronous machine for Integrated Starter Generator applications", Energy Conversion Congress and Exposition 2010 IEEE, pp.1731-1736, 2010
- [2] Claudio Rossi, "Wound Rotor Salient Pole Synchronous Machine Drive for Electric Traction", Industry Applications Conference 2006 IEEE, vol.3, pp.1235-1241, 2006
- [3] 김원호, "EV 견인용 IPM 동기전동기의 NE-MAP 기반 설계", 학위논문(박사), 한양대학교 대학원, 2011
- [4] 채용찬, "최대 계자전류에 따른 권선형 동기전동기의 제어법 분석", 대한전기학회 하계학술대회, 07-P-093, 2012

저 자 소 개



채 응 찬 (蔡 雄 燦)

2009년 한양대 전기제어공학부 졸업, 현재 동 대학원 석사과정.

E-mail : nikelultramaniaman@hanmail.net



김 미 정 (金 美 廷)

2006년 동아대 전기공학부 졸업, 2008년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 현재 한양대 대학원 박사과정.

E-mail : mjkim1546@gmail.com



이 기 덕 (李 起 德)

2009년 인천대 전기공학부 졸업, 2011년 한양대 전기공학과 석사 졸업, 현재 동 대학원 박사과정.

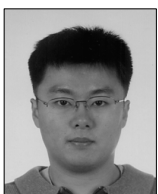
E-mail : leekidoek@dreamwiz.com



이 재 준 (李 在 俊)

2009년 한양대 전기공학부 졸업, 현재 동 대학원 석박사 통합과정.

E-mail : genius_call@hotmail.com



한 정 호 (韓 政 濤)

2006년 순천향대 정보물리학부 졸업, 현재 한양대 대학원 석박사 통합과정.

E-mail : hjhob@naver.com



정 태 철 (鄭 太 喆)

2008년 한밭대 전기공학부 졸업, 2010년 한양대 전기공학과 석사 졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

E-mail : kyungch1@nate.com



이 주 (李 柱)

1986년 한양대 전기공학부 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 1998~1993년 국방과학연구소 연구원, 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 박사졸업, 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원, 1997년~현재 한양대 전기공학부 교수