

# 인휠 구동용 IPMSM의 속도 기반 전류맵 작성을 위한 Auto-MTPT 알고리즘

박귀열<sup>1</sup>, 박정우<sup>1,2</sup>, 황요한<sup>1,2</sup>, 신덕웅<sup>1</sup>, 문채주<sup>†</sup>

## A Study on the Auto-MTPT Algorithm to Make the Speed-based Current-map of IPMSM for Traction of Inwheel

Gui-Yeol Park<sup>1</sup>, Jung-Woo Park<sup>1,2</sup>, Yo-Han Hwang<sup>1,2</sup>, Duck-Woong Shin<sup>1</sup>, and Chae-Joo Moon<sup>†</sup>

### Abstract

Theoretical IPMSM control technique is complicated, and reliability is low because of the changing parameters. Further, in case of general look-up table designing method which obtains torque characteristics (according to current and speed) or torque characteristics (according to magnetic flux through the entire control region), obtaining a precise result can be difficult and has the disadvantage taking too much time to establish a current look-up table. In this paper, the new auto maximum torque point tracking (MTPT) algorithm that automatically finds the optimum stator d - q axis electric current reference through the entire speed region is devised; consequently, it could establish a 3D look-up table with torque characteristics according to current and speed. In case of using the devised auto MTPT algorithm, the result value detailed was obtained in comparison with the generalized look-up design technique, and checked to reduce the current look-up table establishment time.

**Key words:** Auto MTPT, IPMSM, Interior permanent magnet synchronous motor, Look-up table, EV, Electric vehicle, In-wheel motor.

### 1. 서 론

IPMSM(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 릴럭턴스(Reluctance) 토크를 이용할 수 있어 출력이 높고, 약자속 제어(Field Weakening control)를 통해 넓은 속도 영역에서 운전이 가능하여 EV 구동용 전동기에 주로 사용된다.

IPMSM 구동은 정토크 영역에서 단위 전류당 최대 토크가 발생하도록 운전하는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere Control) 제어와 일정 출력 영역에서 최대 토크를 발생 시킬 수 있는 약자속 제어가 사용된다.

이러한 제어기법을 이용하여 정밀한 토크제어를

위해서는 전류와 속도에 따라 변화하는 인덕턴스 및 자속, 손실을 해석하여 토크 특성에 반영하여야 한다.

이러한 이론적인 제어기법은 매우 복잡하며 변화하는 파라미터로 인해 신뢰성이 낮다.

일반적으로 이러한 단점을 보완하기 위해, 특정 속도에서의 dq축 전류 또는 자속과 토크에 대한 Look up 작성법이 주로 사용된다.

Look up 작성법을 이용할 경우 손실 및 인덕턴스, 자속의 포화 특성이 반영되어 제정수 변화에 강인한 장점이 있으며, 단위 전류당 최대 토크로 운전할 수 있으므로 효율이 높다<sup>[1],[2]</sup>.

하지만 Look up 작성법의 경우 전류 및 속도에 대한 토크 특성 또는 자속에 대한 토크 특성을 전 운전구간에서 시험을 통해 얻어야 한다. 따라서 시험 조건에 따라 정밀한 결과값을 얻기 힘들고, 전류맵 작성에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

본 논문에서는 일반적인 속도 기반 Look up 작성법의 단점을 보완하기 위해 모든 운전 영역에서 최적의 고정자 dq축 전류 지령을 자동으로 찾아 운전하는 'Auto MTPT(Auto Maximum Torque Point Tracking)

Paper number: TKPE-2016-21-5-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: cjmoon@mokpo.ac.kr

Dept. of Electrical Eng., Mokpo National University  
Tel: +82-611-450-6424 Fax: +82-61-453-6424

<sup>1</sup> Hyundai Wia Co. Motor Development Team

<sup>2</sup> Hanyang University, Dept. of Electrical Eng.

Manuscript received Jun. 16, 2016; revised Jul. 19, 2016;

accepted Aug. 24, 2016

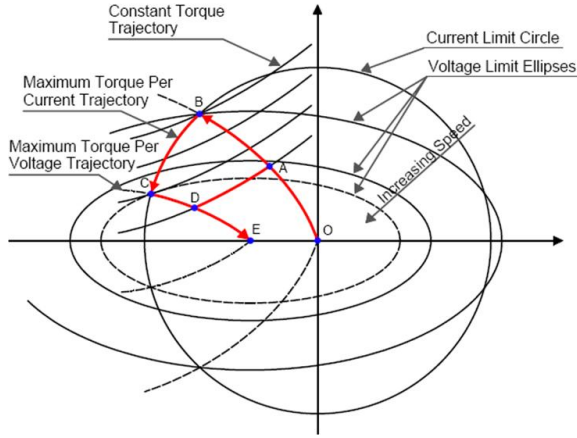


Fig. 1. Current and voltage limit eclipse in d-q frame.

알고리즘을 고안하였다. 고안된 알고리즘은 최대 토크가 발생하는  $\beta$ 각을 자동으로 추종할 수 있고, 일반화된 Look up 에 비해 전류맵 작성 시간을 줄일 수 있음을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 IPMSM의 방정식<sup>[4]</sup>

IPMSM의 가변속 구동은 인가되는 주파수와 전압의 가변을 통해 이루어지며, 이를 통해 얻을 수 있는 속도 범위는 두 영역으로 나뉜다.

일정 토크 영역(Constant Torque Region)은 기준 속도(Base Speed) 이하의 영역에 해당하며, 그림 1의 OB궤적에 해당한다. 이 영역에서는 지령 토크 발생을 위해 필요한 고정자 전류가 최소가 되는  $i_{ds}^r$ 와  $i_{qs}^r$ 의 조합을 구해 운전해야 한다.

이를 단위 전류당 최대 토크 제어 MTPA (Maximum Torque Per Ampere Control)기법 이라 한다<sup>[2]</sup>.

$$i_{ds}^r = I_s \cos \beta \quad (1)$$

$$i_{qs}^r = I_s \sin \beta \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{-\Phi_f + \sqrt{\Phi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs}) I_s} \right) \quad (3)$$

이다.

일정 출력 영역은 기준 속도 이상의 영역으로 약자속 제어 영역이라 하며, 그림 1의 ADE와 BCDE궤적에 해당한다. 이 영역에서는 전압 및 전류 제한 조건을 고려하여 출력 토크가 최대가 되도록 운전해야 한다<sup>[3],[4]</sup>.

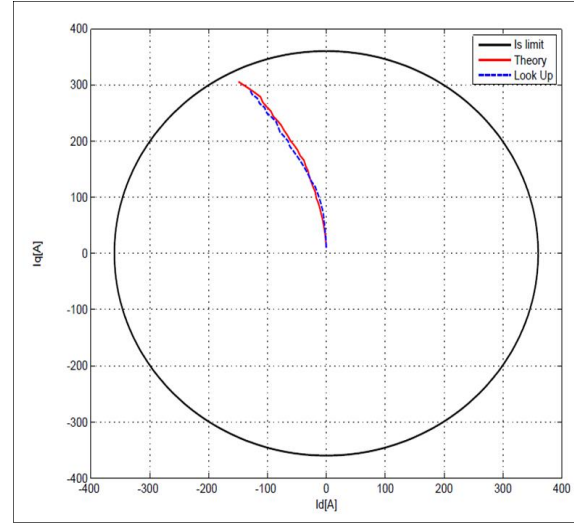
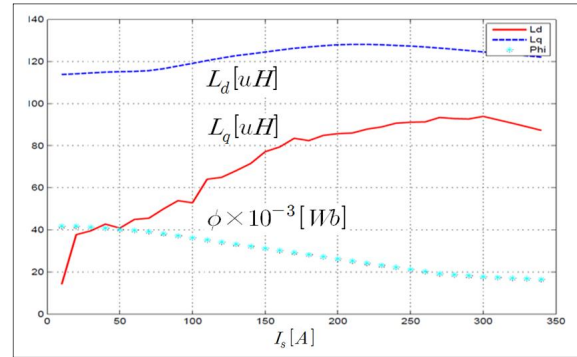


Fig. 2. Current vector trajectory of IPMSM.

Fig. 3. Parameters( $L_d$ ,  $L_q$ ,  $\phi_f$ ) of IPMSM.

$$-i_{ds}^r = \frac{-\Phi_f L_{ds} + \sqrt{\Phi_f^2 L_d^2 - (L_d^2 - L_q^2) \left( \Phi_f^2 - \left( \frac{V_{\max} - R_s I_s}{\omega_e} \right)^2 + L_q^2 I_{\max}^2 \right)}}{L_d^2 - L_q^2} \quad (4)$$

$$i_{qs}^r = \sqrt{I_s^2 - i_{ds}^r{}^2}$$

일정 토크 영역과 일정 출력 영역에서의 토크식은 식 5와 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \left[ \phi_f I_s \sin \beta + \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{2} I_s^2 \sin 2\beta \right] \quad (5)$$

위 이론을 통해 MTPA 영역을 계산한 결과와 실제 Look up 시험을 통해 얻은 결과를 그림 2와 같이 나타내었다.

그림 2의 이론 그래프(Theory)와 같은 결과를 얻기 위해서는 전류와 속도에 따라 변화하는 인덕턴스와 자속을 수식에 반영하여야 한다. 반영된 인덕턴스와 자속은 그림 3과 같다.

수식에 반영된  $L_d$ ,  $L_q$ 는 모터 설계 값이며,  $\phi_f$ 는 실제 Look up 시험과 동일한 결과를 얻기 위한 변수 값을

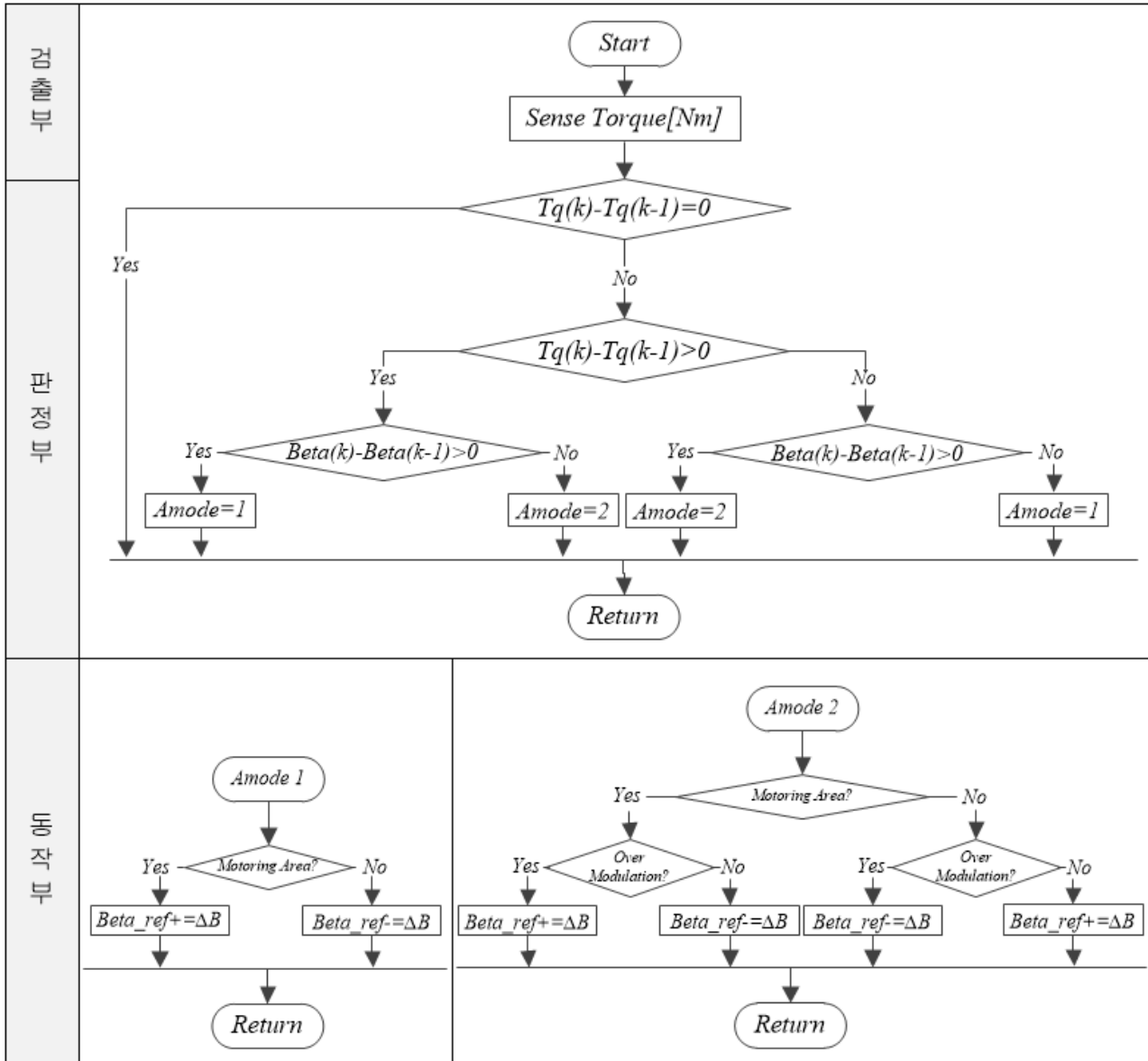


Fig. 4. The flow chart of the Auto MTPT algorithm for IPMSM.

입력하였다.

이와 같이 실제와 이론이 유사한 결과를 얻기 위해서는 변화하는 파라미터를 정확히 계산 또는 측정할 수 있어야 한다. 이러한 이론적인 제어기법은 매우 복잡하며 변화하는 파라미터로 인해 신뢰성이 낮다.

일반적으로 이러한 단점을 보완하기 위해 특정 속도에서의 dq축 전류 또는 자속과 토크에 대한 Look up 작성법이 주로 사용된다.

### 2.2 IPMSM의 Auto MTPT 알고리즘

고안된 Auto MTPT 기법은 모든 운전 영역에서 MTPA와 약자속(Field Weakening) 제어 운전점을 자동으로 찾아 일반화된 Look up 작성법의 단점을

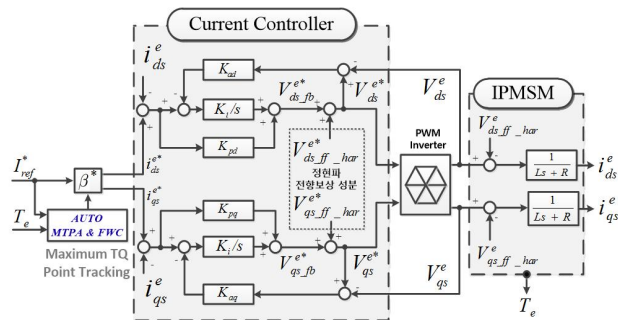


Fig. 5. The auto look up designing control system.

보완하였다.

Auto MTPT 알고리즘은 시험 장치에 장착된 토크

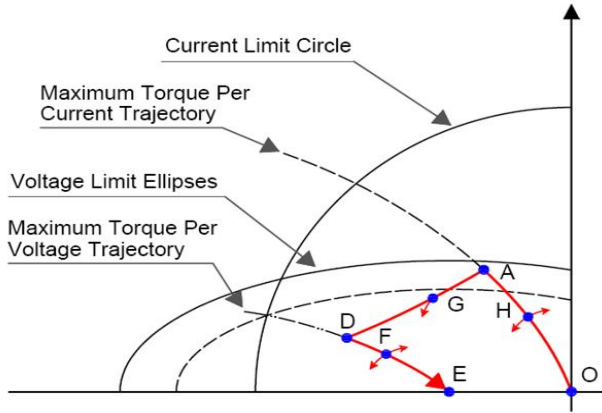


Fig. 6. The trajectory of  $\beta$  angle in the auto MTPT algorithm.

TABLE I  
MPTP ALGORITHM SYSTEM

Section	Contents
Detection	Torque measurement : Sense Torque[Nm]
Decision	Torque Comparison: $Tq(k) - Tq(k-1) > 0$ $\beta$ angle Comparison: $\beta(k) - \beta(k-1) > 0$ Voltage Limitation Detection: Over Modulation
Operation	Control Value Regulator: $\beta_{ref} \pm \Delta\beta$

센서로부터 토크 정보를 획득하여 고정된 전류지령에 대해 최대 토크가 발생하는  $\beta$ 각을 추종하는 알고리즘이다. Auto MTPT 알고리즘의 순서도 및 알고리즘은 토크 정보를 측정하는 검출부, 현재 정보를 판단하는 판정부, 최종 제어량을 적용하는 동작부로 구성된다. Auto MTPT 알고리즘을 그림 4 및 그림 5에 나타내었다.

판정부는 현재와 이전 샘플링의 토크 값을 비교하는 토크 비교기와  $\beta$ 각의 가감 정보를 알 수 있는  $\beta$ 각 비교기 및 전압제한 검출기로 구성된다.

동작부는 판정부의 검출기 및 비교기를 통해 획득한 정보를 이용하여 최종 제어량인  $\beta$ 각을 가감하여 최적인 전점에서 모터를 구동한다. 전동영역에서의  $\beta$ 각은 2, 3사분면에서만 운전된다. 따라서 제어에 사용된  $\beta$ 각은 제어의 편의성을 위해 90도를 뺀 값으로 적용하였다.

또한,  $dq$ 축 좌표계의 2사분면(전동영역)과 3사분면(발전영역)에서의  $\beta$ 각 변화는 서로 상반되므로 동작영역을 구분하여야 한다.

그림 6의 궤적 OA에 해당하는 MTPA 영역에서는 최대 토크가 발생하도록  $\beta$ 각을 조정하여 최대토크를 추종한다.

궤적 AD에 해당하는 약자속 영역에서는  $\beta$ 각을 조정하여 최대토크를 추종하되 현재 운전점이 전압제한타원 경계선에 근접할 경우  $\beta$ 각을 증가시켜야 한다. 전압 제한 검출은 과변조기법을 통해 이루어

TABLE II  
SPECIFICATION FOR INWHEEL SYSTEM OF 16.4KW

Specifications	Value
Rated output	5.8 [kW]
Maximum Output	16.4 [kW]
No. of poles	10
Rated Speed	2,050[rpm]
Rated Voltage	330 [Vdc]
Rated Current	68 [Arms]
Rated torque	28 [Nm]
Maximum torque	76 [Nm]
Ld	83.1 [uH]
Lq	126 [uH]
Phi	0.042[Wb]

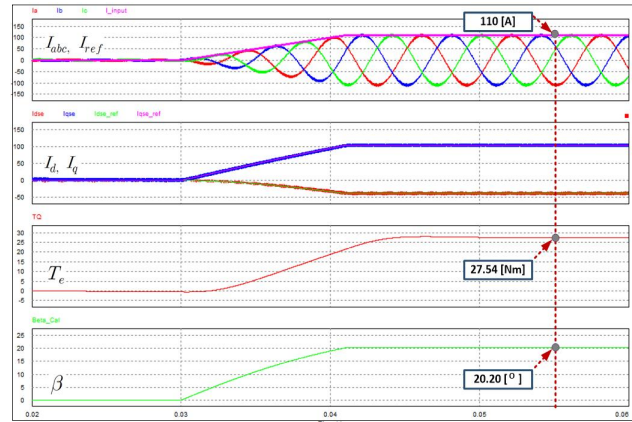


Fig. 7. MTPA Simulation( $I_{abc}$  및  $I_{ref}^*$ ,  $I_{dq}$ ,  $\beta$ ).

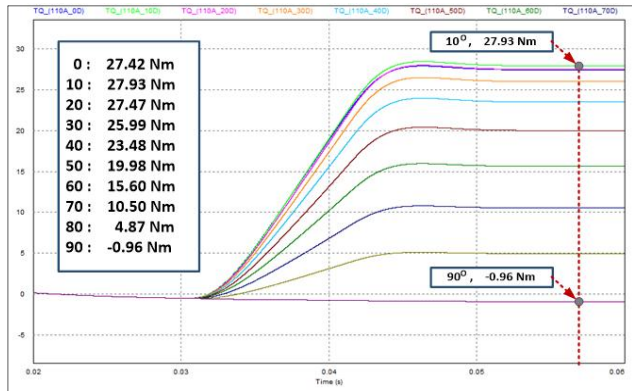


Fig. 8. The output torque by  $\beta$  angle step.

진다. 궤적 DE에 해당하는 약자속 영역에서도 궤적 AD와 동일한 방식으로  $\beta$ 각을 조정하게 된다.

여기서 발전영역의 경우 전동영역과 상반되게  $\beta$ 각이 조정됨을 유의하여야 한다.

### 2.3 IPMSM의 시뮬레이션

표 2는 시뮬레이션 및 시험에 사용된 시스템의

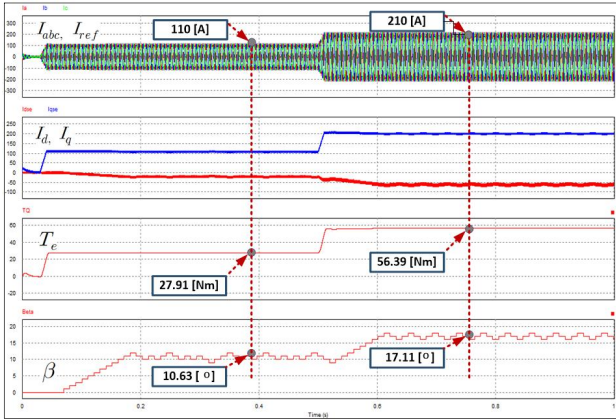


Fig. 9. The simulation result of Auto MTPT algorithm. ( $I_{abc}$ ,  $I_{dq}$ ,  $T_e$ ,  $\beta$ )

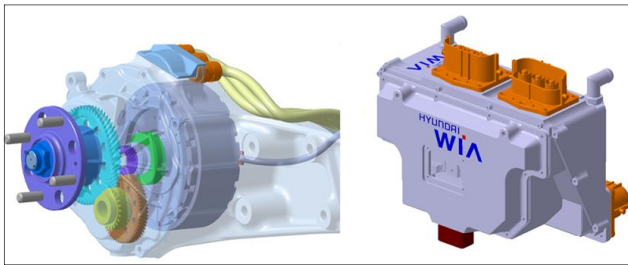


Fig. 10. Inwheel-motor and Inverter for the test.

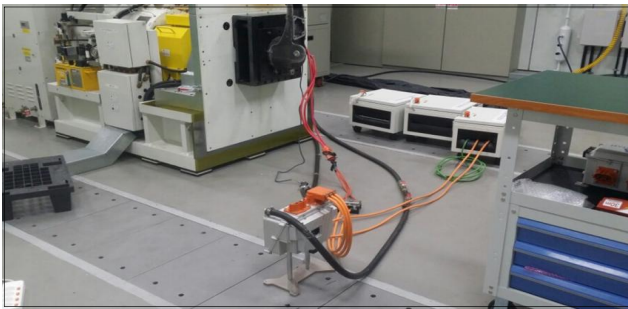


Fig. 11. 16.4kW Dynamo test of In-wheel system.

사양이다. 본 시스템은 EV 시스템의 16.4kW 인휠 구동용으로 설계되었다.

그림 7은 IPMSM의 MTPA 영역에 대한 PSIM 시뮬레이션 결과 파형이다. 정격 토크 부근(110A)에서  $\beta$ 각은 20.2°이며, 토크는 27.5 Nm 이다.

이는  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $\phi_f$  의 값을 고정된 값으로 설정하였을 경우의 결과이다.

그림 8은 시뮬레이션 조건 중 식 3의  $\beta$  산출 공식을 제거하고  $\beta$ 각을 0 ~ 90°로 조정하였을 경우의 토크 출력 그래프이다. 출력 그래프와 같이 실제 최대 토크가 발생하는  $\beta$ 각은 10°부근이며 약 27.9 Nm임을 알 수 있다. 이와 같이  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $\phi_f$ 의 변화를 고려하지 않을 경우 MTPA 제어에 오차가 발생한다. 또한 약자속

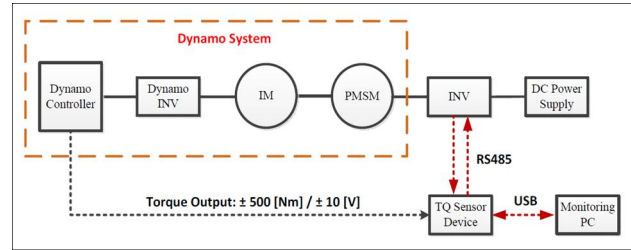


Fig. 12. The diagram of MTPT system.

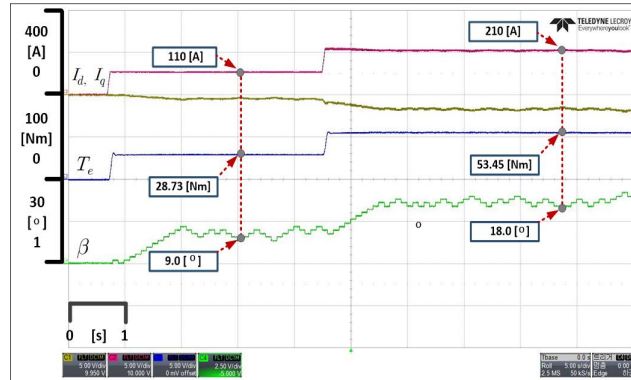


Fig. 13. The test result of Auto MTPT algorithm ( $I_{dq}$ ,  $T_e$ ,  $\beta$  @ 2000 rpm)

영역에서도 파라미터의 변화에 의해 정밀제어가 어렵다.

그림 9는 논문에서 제안하는 Auto MTPT 알고리즘의 시뮬레이션 파형이다. 그림 8의 결과와 같이 모터 정격토크에서의 최대토크 출력점은 10.6°, 27.9Nm임을 알 수 있다. 또한  $\beta$ 각은 10°부근에서 계단과 형태로 이동하며 최대 토크를 찾는 것을 볼 수 있다. 실제 실험에서는  $\beta$ 각에 따른 토크가 저장되며, 이중 최대 토크를 발생시키는  $\beta$ 각과 토크를 선별하여 RS485 통신을 통해 PC로 송신된다.

따라서, 제안하는 Auto MTPT 알고리즘은 최대 토크를 발생시키는  $\beta$ 각을 자동으로 추종할 수 있음을 확인하였다.

약자속(Field Weakening) 제어 영역에서의 전압 제한 검출은 과변조기법(Overmodulation Method)를 통해 이루어 진다. 이는 전압 제한 타원 인근에서 타원 안쪽으로 각을 감소시키는 단순한 제어이므로 실험을 통해서만 확인하였다.

## 2.4 실험 및 결과

그림 10은 현재 개발중인 EV시스템의 인휠 구동용 모터와 인버터의 모델링 형상이며, 그림 11은 다이내모 시험 사진이다.

그림 12는 Auto MTPT 알고리즘을 시험하기 위한 시험 구성이다. 알고리즘을 시험하기 위해 다이내모 메터에서 출력되는 토크값( $\pm 500$ Nm/ $\pm 10$ V)을 측정하고 인버터로 송신하는 통신 장비가 필요하다.

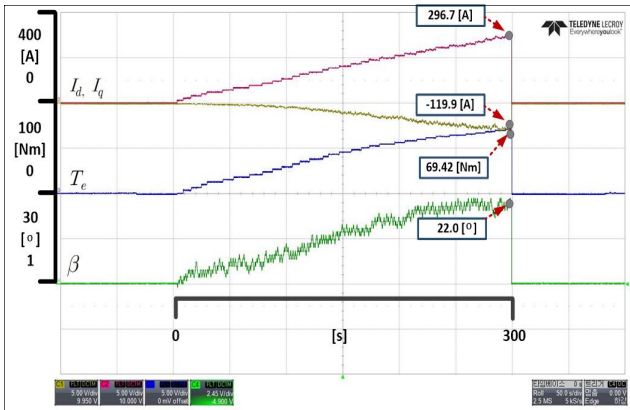


Fig. 14. The test result of 2000rpm with Auto MTPT ( $I_{dq}$ ,  $T_e$ ,  $\beta$ )

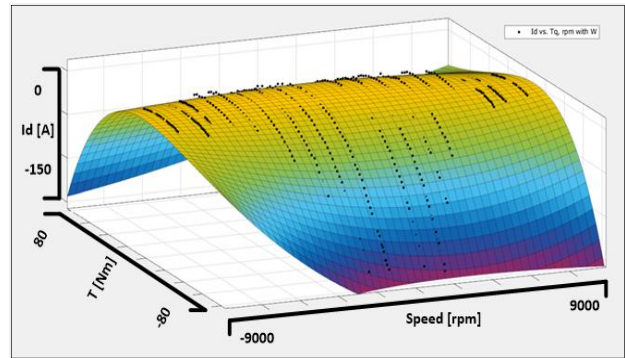


Fig. 17. The result of d-axis current with Auto MTPT algorithm.

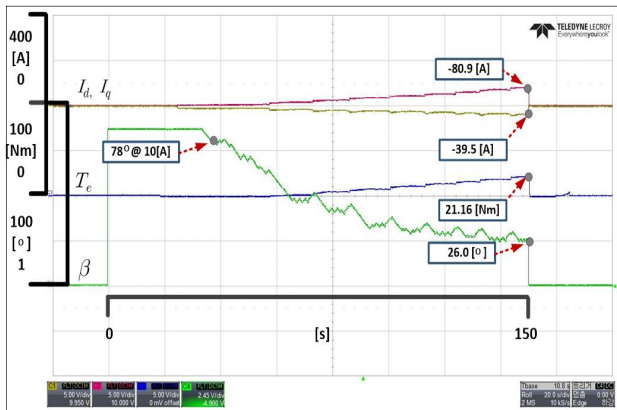


Fig. 15. The test result of 6000rpm with Auto MTPT ( $I_{dq}$ ,  $T_e$ ,  $\beta$ )

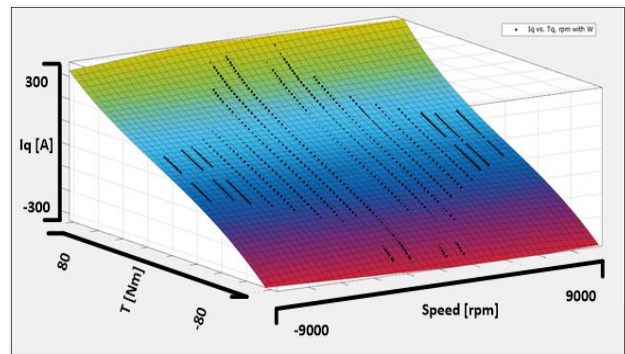


Fig. 18. The result of q-axis current with Auto MTPT designing algorithm.

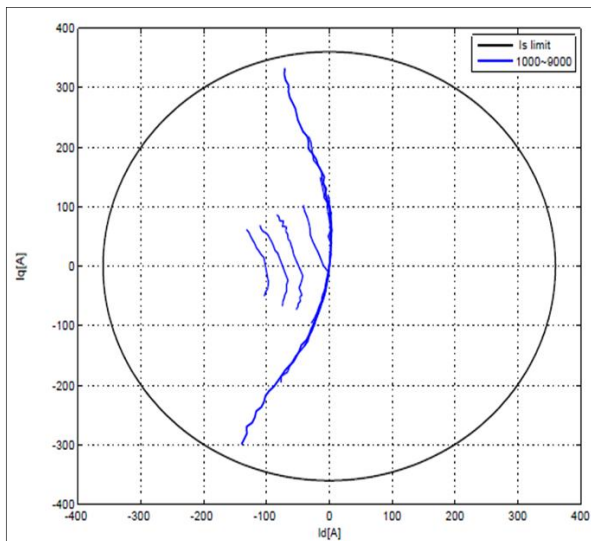


Fig. 16. The test result of current trajectory with auto MTPT algorithm (1000~9000rpm@220V)

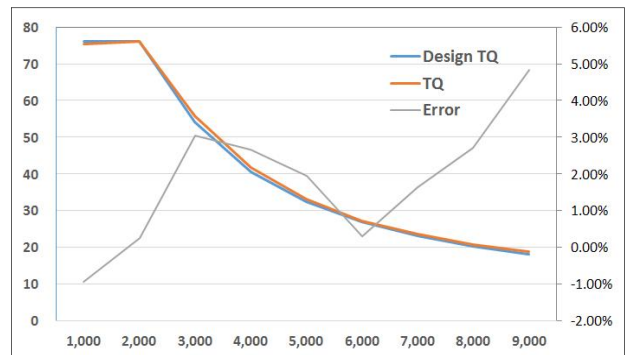


Fig. 19. The T-N test result with auto MTPT algorithm.

이 장치는 MTPT 알고리즘의 결과인 전류 및  $\beta$ 각과 토크를 실시간으로 PC로 송신하는 역할도 수행한다. 그림 13은 Auto MTPT 알고리즘의 실제 시험

파형이다. 전류 제어에 적용된  $L_d$ ,  $L_q$  및 상저항, 역기전력 등의 파라미터는 상수 값으로 설계치를 입력하였다. 그림 9의 시뮬레이션과 같이 최대토크를 발생하는  $\beta$ 각을 추종하는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 2000rpm 전 구간(발전 영역 제외)에 대한 Auto MTPT 알고리즘의 시험 파형이다. 최대 토크를 발생하는  $\beta$ 각을 자동으로 추종하였으며, 0 ~ Max [Nm]까지 시험 시간은 300 [sec]로 측정되었다.

그림 15는 약자속 영역에 대한 Auto MTPT 알고리즘의 시험 파형이다. 약자속 영역에서는 전압 제한에 의해  $\beta$ 각이 감소함을 알 수 있다.

위와 같이 Auto MTPT 알고리즘을 이용하여 전류 및 속도에 대한 토크를 Look up Table 로 작성하였다. 그림 16은 220[V]에서 Auto MTPT 알고리즘을 통해 획득한 Look up 결과를  $dq$ 축 좌표계에 나타낸 그래프이다.

제어 알고리즘에 사용되는 Look up Table은 토크 지령 및 속도에 대한  $d$ 축과  $q$ 축 전류 지령으로 3차원 구조를 갖으며, 이를 최소 제곱법을 적용하기 위해 Matlab을 이용하였다. Matlab을 통해 획득한 다항식 결과를 그림 17과 그림 18에 나타내었다.

다항식 결과는 고차 방정식으로 제어기에 적용하여 그림 19와 같이 TN 특성 시험의 결과를 얻었으며, 오차 5[%] 이하로 제어 되었다.

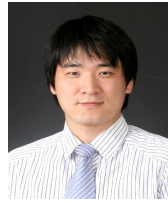
### 3. 결 론

제안된 Auto MTPT 알고리즘을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고안된 Auto MTPT 알고리즘이 고정된 전류 지령에 대해 최대 토크를 발생시키는 각을 자동으로 추종함을 확인하였다.
- (2) 일반화된 Look up 작성법의 경우 전류 및 속도에 대한 토크 값을 수동 지령을 통해 측정하므로 정밀한 결과값을 얻기 힘들고, 전류맵 작성에 많은 시간이 소요된다. 실제 제안된 알고리즘을 통해 Look up 설계 시간을 약 80% 이상 단축하였다.
- (3) 이 제어 기법은 측정된 토크 센서의 값이 제어기에 사용되므로, 일반적인 수동 Look up 작성법에 비해 정밀한 결과값을 얻을 수 있다.

### References

- [1] C. Y. Won, J. M. Lee, R. K. Park, S. G. Chang, K. S. Choi, J. W. Park, and H. S. Lim, "Torque control of IPM synchronous motor for diesel hybrid hybrid vehicles using two-dimension look-up table," KSAE, Annual Spring Conference 2007, pp. 2374-2380, 2007.
- [2] I. K. Won, D. Y. Kim, A. Y. Ko, J. H. Lee, and Y. R. Kim, "A design method of 2D look-up table of IPMSM for electric vehicle," in Annual Conference of the KIPE, pp. 104-105, Jul. 2011.
- [3] P. Pillay and R. Krishan, "Modeling, analysis and simulation of permanent magnet synchronous drives," *IEEE Trans. on IA*, Vol. 25, No. 2, pp. 265-273, 1989.
- [4] S. H. Kim, "DC, AC, BLDC Motor control, Bukdu Public, 2012.



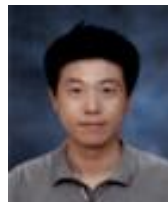
#### 박귀열(朴貴烈)

1981년 7월 9일생. 2007년 목포대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~2012년 (주)DMS 풍력팀 연구원. 2012년~현재 (주)현대위아 모터개발팀 연구원.



#### 박정우(朴正佑)

1984년 6월 4일생. 2011년 동국대 전자공학과 졸업. 2013년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 (주)현대위아 모터개발팀 연구원.



#### 황요한(黃曜翰)

1979년 7월 26일생. 2005년 한라대 전기공학과 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 박사과정. 2012년~현재 (주)현대위아 모터개발팀 책임연구원.



#### 신덕웅(申德雄)

1971년 9월 8일생. 1998년 동아대 전기공학과 졸업. 1998년~2000년 동양엘레베이터 연구원. 2000년~2010년 호성 근무. 2012년~현재 현대위아 모터개발팀 책임연구원.



#### 문채주(文彩柱)

1959년 12월 26일생. 1981년, 1983년 및 1994년 전남대 졸업. 동 대학원 전기공학과(석사, 공박). 1997년~현재 목포대 공과대학 전기공학과 교수. 1986년~1997년 한국전력기술책임연구원. 2003년~2008년 목포대 신재생에너지연구센터장. 2011년~2012년 전력전자학회 부회장. 2012년~2014년 목포대 풍력시험센터장. 현재 한국전기신문 칼럼니스트. 기초전력연구원 에너지밸리분원장.