

전기자동차 구동을 위한 IPMSM의 전압각 제어

고태훈¹, 김상훈[†]

Voltage Angle Control of an IPMSM for Electric Vehicle Drives

Tae-Hoon Ko¹ and Sang-Hoon Kim[†]

Abstract

This paper studies the voltage angle control of interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs). For voltage angle control, the optimum voltage angle trajectory according to the operating speed is researched while the voltage and current limit conditions are considered. Through research, two different optimum voltage angle trajectories that depend on the design of IPMSMs were found. The IPMSM drive based on a voltage angle control that follows such trajectory is proposed. Unlike the conventional voltage angle control method, which is applied only in the flux-weakening region, the proposed voltage angle control can be implemented in all operation ranges from low to high speed. The proposed method is verified by experiments using a DSC controller for 800 W IPMSM.

Key words: IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor), Optimal voltage angle, Six-step operation, Voltage angle control

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 킬러턴스 토크를 활용한 높은 출력 토크 특성과 넓은 약자속 영역 운전 특성 등으로 인하여 전기 자동차(EV) 또는 하이브리드 전기 자동차(HEV)에 널리 사용되고 있다^{[1][2]}.

EV 구동용 IPMSM은 대부분 정격속도 이상에서 운전되도록 설계되기 때문에 고속 운전을 위한 약자속 제어가 필요하다^{[3][4]}. EV용 전동기의 약자속 제어 시에는 한정적인 배터리의 전압을 효과적으로 활용하여 최대 토크를 발생시키기 위해 운전영역 전반에 걸쳐 d와 q축 지령전류를 적절하게 선정해 주어야 한다^[5].

EV 또는 HEV용 전동기 구동을 위한 벡터제어에서는 Look-up table(LUT)에 저장된 전류 지령을 사용하여 출력 토크의 정확성을 높인 방법^[6]이 주로 사용되는데,

이 경우 많은 양의 실험 데이터가 필요로 하게 되고, 연산 시간이 길며, 인버터를 구형과 모드까지 운전할 수 없다. 또한 고속 운전을 위한 약자속 운전 시에는 높은 속도에서 상호 간섭성분에 의해 d축과 q축 전류제어기간의 충돌이 발생할 수 있다^{[7][8]}. 이러한 단점을 극복하고 인버터 전압의 활용률을 높이기 위한 방법으로 인가 전압의 크기는 고정되고 전압각만이 제어가능한 약자속 영역에서의 운전 특성을 이용한 전압각 제어기법이 연구되었다^{[7]-[10]}.

전압각 제어기법은 하나의 제어기만을 사용하여 전압 분배에 필요한 전압각을 생성한다. 전압각 제어에서는 고정자 전압은 인가 가능한 최대 고정자 전압으로 고정되고 제어기의 출력인 전압각에 의해 결정된 전압으로 d축과 q축 전류가 분배된다. 이러한 전압각 제어기법으로는 지령 전압각을 얻기 위해 d축 전류 오차를 이용하는 방법^{[7][8]}과 q축 전류 오차를 이용하는 방법^{[9][10]} 등이 있다. 그러나 전압각 제어에 기초가 되는 전압각 이동 궤적에 대해서는 연구되어 있지 않은 실정이다.

본 논문에서는 최근 전기 자동차나 철도 차량 구동 분야에서 사용이 증가하고 있는 매입형 영구자석 동기전동기의 전압각 제어에 대하여 연구하였다. 이러한 전압각 제어를 위해 전동기의 전압과 전류의 제한 조건을 고려하여 운전속도에 따른 최적의 전압각 궤적을 전압 평면에서 분석하였는데, 최대 토크를 발생시키는 최적

Paper number: TKPE-2017-22-5-4

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

[†] Corresponding author: kshoon@kangwon.ac.kr, Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University

Tel: +82-33-250-6293 Fax: +82-33-259-5674

¹ Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University

Manuscript received July 14, 2017; revised Aug. 9, 2017; accepted Aug. 28, 2017

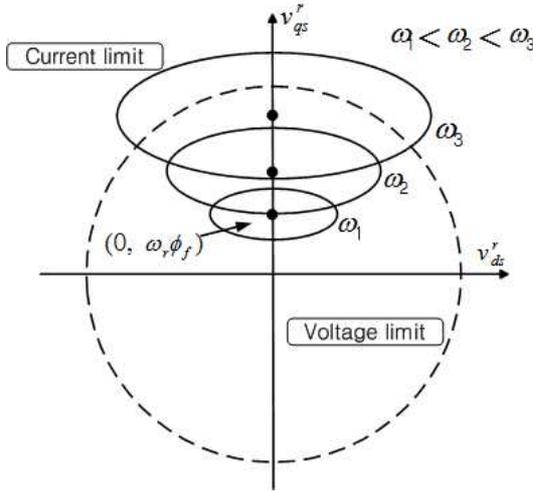


Fig. 1. Voltage and current limits of an IPMSM in voltage plane.

전압각의 패턴은 전동기의 설계 특성에 따라 두 가지 유형으로 나타난다는 것을 알 수 있었다.

또한 최적 전압각을 추종하는 전압각 제어기법을 제안하였다. 제안된 전압각 제어기법은 약자속 영역에서 한정적으로 적용되었던 기존의 전압각 제어기법과 달리 기동 시부터 고속까지 모든 운전영역에서 제어기법의 전환없이 전압각 제어기법에 의해서만 제어되도록 구현하였다.

제안된 전압각 제어기법은 800W 매입형 영구자석 동기 전동기를 사용한 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

2. IPMSM의 전압각 분석

IPMSM 구동 시에 요구되는 전압과 전류의 제한 조건은 d와 q축 고정자 전압의 함수로서 고정자 저항에 의한 전압강하 성분을 무시한 경우 식(1)과 (2)와 같이 표현될 수 있다^[2].

$$v_{ds}^r{}^2 + v_{qs}^r{}^2 \leq V_{smax}^2 \tag{1}$$

$$\left(\frac{v_{ds}^r}{\omega_r L_{qs}}\right)^2 + \left(\frac{v_{qs}^r - \omega_r \phi_f}{\omega_r L_{ds}}\right)^2 \leq I_{smax}^2 \tag{2}$$

여기서, v_{ds}^r, v_{qs}^r 은 회전자 좌표계에서의 고정자 d와 q축 전압, L_{ds}, L_{qs} 는 고정자 d와 q축 인덕턴스, ω_r 은 회전자의 각속도, ϕ_f 는 영구자석의 자속 그리고 V_{smax}, I_{smax} 는 각각 전동기에 인가 가능한 최대 고정자 전압과 허용 가능한 최대 고정자 전류를 나타낸다.

그림 1은 전압평면에서 속도에 따른 이들 전압과 전류 제한 조건을 표현하고 있다. 인가 전압의 제한 조건은 이용 가능한 최대 고정자 전압 V_{smax} 를 반지름으로 하는 원으로 표현되며, 구동 전류의 제한 조건은 중심이

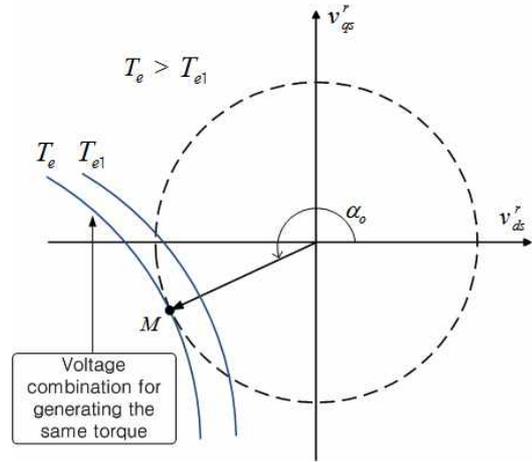


Fig. 2. Optimal voltage angle considering only the voltage limit.

(0, $\omega_r \phi_f$)인 타원으로 표현된다. 이 타원의 단축은 $\omega_r I_{smax} L_{ds}$ 이고 장축은 $\omega_r I_{smax} L_{qs}$ 이다. 전류 제한 타원의 단축, 장축과 중심은 모두 속도의 함수이므로 그림 1에 보이듯이 속도증가에 따라 그 크기가 커지며, 그 중심은 상승함을 알 수 있다.

IPMSM의 발생 토크는 식(3)과 같이 표현되는데, 식(4)의 관계로부터 고정자 전압의 크기 V_s 와 전압각 $\alpha (= \tan^{-1}(v_{qs}^r/v_{ds}^r))$ 의 함수로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r) \tag{3}$$

$$i_{ds}^r = \frac{v_{qs}^r - \omega_r \phi_f}{\omega_r L_{ds}}, \quad i_{qs}^r = -\frac{v_{ds}^r}{\omega_r L_{qs}} \tag{4}$$

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \left[-\frac{\phi_f V_s \cos \alpha}{\omega_r L_{qs}} - \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{\omega_r^2 L_{ds} L_{qs}} V_s \cos \alpha (V_s \sin \alpha - \omega_r \phi_f) \right] \tag{5}$$

식(5)로부터 동일한 크기의 토크를 발생시키는 고정자 전압의 조합은 그림 2와 같이 전압평면에서 쌍곡선의 형태로 나타난다. 이러한 전압 조합 곡선은 토크의 크기가 작을수록 원점에 가까이 위치하게 된다.

그림 2에서 보이듯이 전압 제한 조건만을 고려하였을 때 최대 토크를 발생하는 최적의 전압각은 M에서의 α_o 이 된다. 그러나 실질적인 전압각은 동작 전류의 제한 조건 또한 고려되어야 하므로 전압 제한 조건만을 고려한 전압각 α_o 와는 다르게 된다.

전압과 전류 제한 조건을 고려한 운전 속도 영역에 따른 최적의 전압각은 다음과 같이 구할 수 있다.

2.1 일정토크 영역

그림 3은 일정 토크 영역에서 속도에 따른 최적의 운전점과 전압각을 나타낸다. 출력 토크는 식(5)와 같이

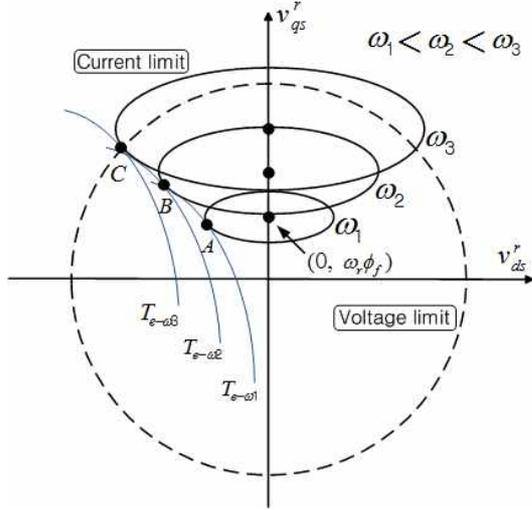


Fig. 3. Optimal operating point in constant torque range.

속도의 함수이므로 그림 3과 같이 동일한 토크를 발생시키는 전압 조합 곡선도 속도에 따라 변동된다.

일정 토크 영역에서는 전류 제한 영역이 대부분 전압 제한 영역에 포함되므로 전류 제한 조건만을 고려하여 최적 전압각을 구할 수 있다. 이 영역에서 최대 토크 발생을 위한 최적의 운전점은 속도가 증가함에 따라 토크 곡선과 전류 제한 타원이 만나는 A, B, C점으로 되고 최적 전압각은 이들 운전점과 원점을 이은 전압벡터의 각이 된다.

최적의 운전점에서 d와 q축 전압 지령은 식(6)과 같이 표현되고, 이를 통해 일정 토크 영역에서의 최적 전압각은 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$v_{ds}^r = \frac{\sqrt{(I_{smax}\omega_r L_{ds} L_{qs})^2 - (v_{qs}^r - \omega_r \phi_f)^2 L_{qs}^2}}{L_{ds}} \quad (6)$$

$$v_{qs}^r = \frac{-\phi_f + \sqrt{\phi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs})} L_{ds} \omega_r + \omega_r \phi_f$$

$$\alpha_{opt} = \sin^{-1} \left[\frac{\omega_r}{V_s} \left(\frac{-\phi_f + \sqrt{\phi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs})} L_{ds} + \phi_f \right) \right] \quad (7)$$

식(2)의 전류 제한 조건에서는 고정자 저항에 의한 전압강하 성분이 무시되었다. 실제 저속에서는 속도 기전력에 의한 성분이 고정자 저항의 전압강하 성분보다 충분히 크지 않기 때문에 앞서 구한 최적 전압각은 정확하지 않게 된다. 그림 4는 고정자 저항의 영향을 보여준다. 고정자 저항에 의해 전류 제한 타원은 점선과 같이 시계방향으로 회전하게 되는데 저속일수록 그 영향이 크게 나타난다. 따라서 실제 최적의 운전점은 C점이 아닌 D점이 되고 최적 전압각은 α_C 가 아닌 α_D 가 된다.

그림 5는 고정자 저항이 전압각에 미치는 영향을 보여준다. 이 경우 전동기의 제정수는 표 1의 800W

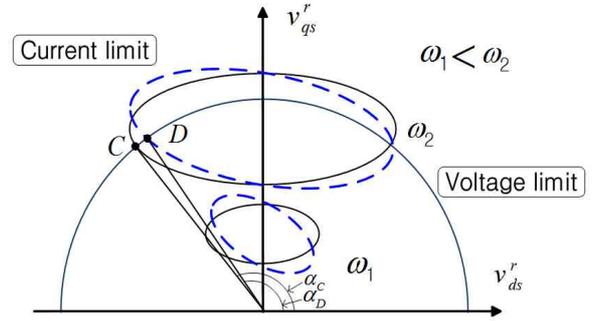


Fig. 4. Effect of the stator resistance on the current limit.

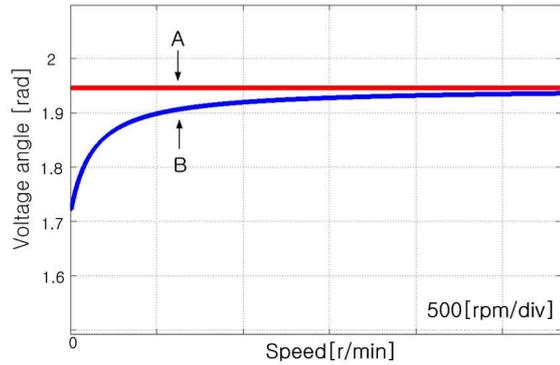


Fig. 5. Effect of stator resistance on the voltage angle.

IPMSM을 사용하였다. A는 고정자 저항을 생략한 경우이며, B는 고정자 저항을 고려한 경우의 전압각이다. 고정자 저항에 의한 영향은 저속에서 크게 나타나므로 일정 토크 영역에서 최적의 전압각 계산 시에 고려되어야 한다.

2.2.2 약자속 영역

속도 증가에 따라 일정 토크 영역의 최적 운전점이 전압 제한 원을 벗어나게 되는 경우에는 더 이상 그 운전점에서 동작할 수 없게 되므로 운전 가능한 다른 운전점을 구해야 한다. 즉, 약자속 영역에서는 전압과 전류 제한 조건을 동시에 고려해서 최대 토크를 내는 운전점과 전압각을 결정해야 한다. 이러한 최적 전압각은 전압 제한과 전류 제한 조건의 교점으로 주어진다.

식(1)과 (2)로부터 식(8)와 같이 v_{qs}^r 에 대한 2차식을 얻을 수 있고, 식(8)을 통하여 약자속 영역에서 최적 전압각은 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$A v_{qs}^{r2} - 2B v_{qs}^r + C = 0 \quad (8)$$

$$\alpha_{opt} = \sin^{-1} \left(\frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{V_{smax} A} \right) \quad (9)$$

$$A = (L_{qs}^2 - L_{ds}^2), \quad B = \omega_r \phi_f L_{qs}^2$$

$$C = (\omega_r \phi_f L_{qs})^2 + (L_{ds} V_{smax})^2 - (I_{smax} \omega_r L_{ds} L_{qs})^2$$

이러한 최적 전압각은 IPMSM의 설계에 따라 그 이

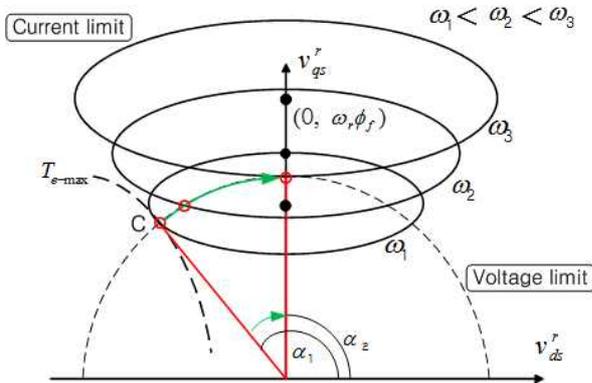


Fig. 6. Optimal voltage angle trajectory in a voltage plane : $\phi_f > I_{smax}L_{ds}$.

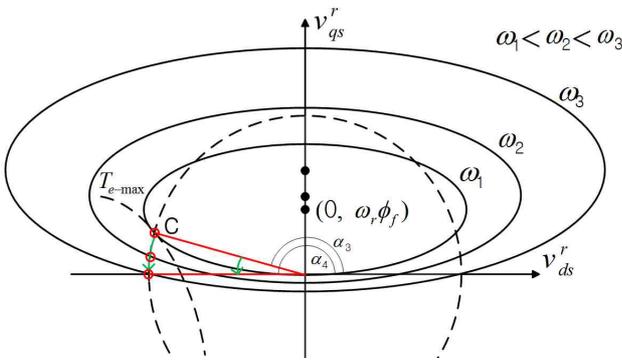


Fig. 7. Optimal voltage angle trajectory in a voltage plane : $\phi_f \leq I_{smax}L_{ds}$.

동 궤적이 두 가지 유형으로 다르게 나타난다. $\phi_f > I_{smax}L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우에 최적 전압각은 속도가 증가함에 따라 $\pi/2$ 로 감소하는데 반하여, $\phi_f \leq I_{smax}L_{ds}$ 인 경우에는 속도가 증가함에 따라 π 까지 증가하는 특성을 보인다.

(1) $\phi_f > I_{smax}L_{ds}$ 인 IPMSM

그림 6은 약자속 영역에서의 전압 제한 조건과 속도에 따른 전류 제한 조건을 보인다. $\phi_f > I_{smax}L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우에는 속도 증가에 따라 전류 제한 타원이 전압 제한 원을 벗어나게 된다. 이 경우 약자속 영역에서 속도 증가에 따른 최적 전압각은 일정 토크 영역에서의 최적 전압각 C점 α_1 에서 전압 제한 원을 따라 이동하여 최종적으로 $\pi/2$ 로 감소된다. 그러나 초기의 약자속 영역에서는 최적 전압각이 약간 증가하는 현상을 보이는데, 이러한 증가 영역의 정도는 ϕ_f 와 $I_{smax}L_{ds}$ 의 차이에 따라 달라진다. 전류 제한 타원이 전압 제한 원을 벗어나게 되면 전압과 전류 제한 조건의 교점이 존재하지 않으므로 이때의 속도 이상으로 운전은 불가능하다. 따라서 이러한 설계의 IPMSM에서 전압각 $\pi/2$ 는 최대 속도 운전점이 된다.

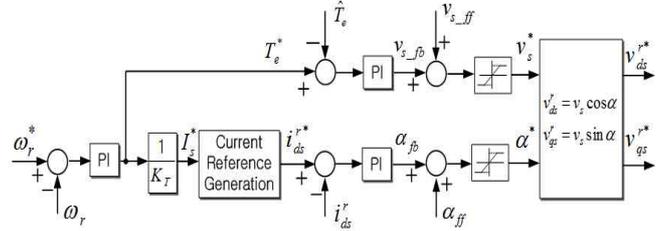


Fig. 8. Proposed voltage angle control block diagram.

(2) $\phi_f \leq I_{smax}L_{ds}$ 인 IPMSM

$\phi_f \leq I_{smax}L_{ds}$ 의 경우에는 속도 증가에 따라 그림 7과 같이 전류 제한 타원이 전압 제한 원을 포함하게 된다. 따라서 전압 제한 조건만이 최적의 전압각을 결정하게 된다. 이 경우 일정 토크 영역에서의 최적 전압각 C점의 α_3 로부터 약자속 영역에서는 속도 증가에 따라 전압 제한 원을 따라 점차 증가하며 최종적으로 π 에 이르게 된다. 무한대에 속도까지 전압각은 π 로 유지된다.

3. 제안된 전압각 제어 기법

IPMSM의 구동 시 전압각 제어기법은 약자속 영역에서만 한정적으로 적용되며, 일정 토크 영역에서는 통상적으로 벡터 제어가 적용된다. 본 논문에서는 전압각 제어에 의해 모든 운전 속도영역에서 구동되는 기법을 제안한다. 이 경우 기동 시부터 약자속 영역의 고속 운전 영역까지 제어기법의 전환없이 전압각 제어기법에 의해 서만 제어되도록 하였고, 각 영역에서 최대 토크 운전이 가능하도록 앞에서 구한 최적 전압각 궤적을 따라 전동기가 운전되도록 전압각을 제어하였다. 또한 제안된 기법은 인버터의 선형제어 영역과 구형파 운전 모드까지 적용이 가능하다.

그림 8은 제안된 전압각 제어기법을 나타낸 블록도이다. d축 전류오차를 통해 전압각 제어를 수행한다.

일정 토크 영역에서의 운전을 위해서는 전압각 제어뿐만 아니라 고정자 전압의 크기 제어도 필요하다. 이를 위해 제안된 제어기법에서는 토크 제어를 사용하여 토크 지령과 추정된 전동기 토크와의 오차를 통해 고정자 전압의 지령을 생성하도록 하였다. 구형파의 기본파 최대 상전압인 $2V_{dc}/\pi$ 를 전압 변조 지수(Modulation Index, MI) 1로 하고, $MI < 1$ 의 영역에서는 고정자 전압과 전압각을 동시에 제어하고, $MI = 1$ 이 되는 구형파 운전 시에는 고정자 전압 지령을 $2V_{dc}/\pi$ 로 고정하고 전압각 제어만 실행하게 된다.

3.1 일정토크 영역에서의 전압각 제어

제안된 전압각 제어기법에서는 일정 토크 영역에서 전동기의 속도에 따른 고정자 전압 지령을 생성하기 위해 토크 제어기가 사용된다. 이때 토크 제어기의 빠른

응답특성을 위해 다음 식(10)과 같은 고정자 전압 전향 보상 성분 V_{s-ff} 을 제어기의 출력에 추가하였다.

$$V_{s-ff} = \omega_r \sqrt{(L_{qs}i_{qs}^{r*})^2 + (L_{ds}i_{ds}^{r*} + \phi_f)^2} \quad (10)$$

고정자 전압을 d축 전압과 q축 전압으로 분배해 주기 위한 전압각은 일정 토크 영역에서의 최적 전압각 식(7)이 적용된다. 그러나 부정확한 제정수의 영향과 저속에서의 고정자 저항에 의한 영향 등에 의해 최적 전압각 계산이 부정확해 질 수 있다. 이에 따라 제안된 전압각 제어기법에서는 식(7)의 최적 전압각이 전향 보상 성분 α_{ff} 의 값으로 사용되고, d축 전류오차에 의한 전압각 제어를 통한 출력 α_{fb} 값이 부정확한 제정수와 고정자 저항 성분에 의한 전압각의 오차분을 보정해 준다. 따라서 전압각 지령은 d축 전류오차에 의한 제어기 출력과 최적 전압각의 전향 보상 성분의 합으로 결정된다. 이때 d축 전류 지령과 q축 전류 지령은 단위 전류당 최대 토크(MTPA)를 발생시키는 전류로 주어지게 되고, 토크 지령은 속도제어기의 출력을 통해 주어지게 된다.

3.2 구형과 운전 시의 전압각 제어

구형과 운전 시에 인가되는 고정자 전압 지령은 최대 고정자 전압 $V_{smax}(=2V_{dc}/\pi)$ 로 주어지고, 고정자 전압을 d축 전압과 q축 전압으로 분배해 주기 위한 전압각은 약 저속 영역에서의 최적 전압각 식(9)가 적용된다. 이 최적 전압각 역시 전동기의 제정수에 매우 민감하다. 따라서 일정 토크 영역에서와 같이 이 식은 전향 보상성분으로 하고 d축 전류오차에 의한 제어를 통해 전압각의 오차분을 보정해주어 전압각 지령을 발생한다. 이때 d축 전류 지령과 q축 전류 지령은 전압과 전류 제한을 고려하여 최대 토크를 발생시키는 전류로 주어지게 된다.

4. 실험

제안된 전압각 제어기법의 유효성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에는 $\phi_f > I_{smax}L_{ds}$ 인 IPMSM이 사용되었으며, 그 제정수는 표 1에 나타난다.

그림 9는 본 실험에 이용된 IPMSM, 디지털 제어기와 IGBT 인버터를 나타낸다. 제어부는 Texas Instrument사의 32bit DSC(Digital Signal Controller)인 TMS320F28335를 이용하여 디지털 제어를 구현하였다.

그림 10은 제안된 전압각 제어기법을 적용한 전체적인 IPMSM 구동시스템의 블록도를 나타낸다. PWM 기법으로는 SVPWM 기법이 사용되었으며, 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz이며, 100us의 샘플링 주기마다 전류 제어를 수행한다. 직류단 입력 전압은 회생 전압을 고려하여 정격 전압보다 낮은 168V로 하였다.

TABLE I
PARAMETERS OF AN IPMSM

Rated Power	800W
Rated Torque	2.7Nm
Number of Poles	8
Rated Current	4A
Rated Voltage	280V
Stator Resistance	1.8Ω
d-axis Inductance	7.8mH
q-axis Inductance	12.5mH
λ_{pm}	0.13Wb



Fig. 9. IPMSM drive system.

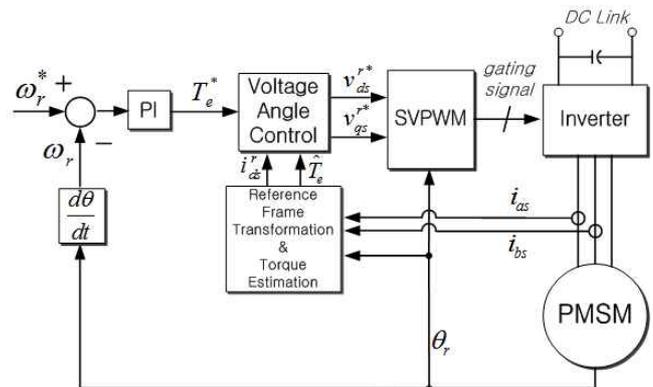


Fig. 10. Block diagram of the proposed voltage angle control system.

그림 11과 그림 12는 1400r/min으로 일정 토크 영역의 속도 지령을 스텝(Step)으로 인가한 경우의 특성을 보인다.

그림 11은 전동기의 실제 속도와 토크(추정값) 그리고 그 지령을 보이는데, 일정 토크 영역에서 고정자 전압 크기 제어와 전압각 제어를 통해 속도와 토크 모두 그 지령치를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 이때의 d와 q축 전류 및 전압각을 나타낸다. d축 전류가 그 지령치를 잘 추종하고, 전압각은 그림 5에서 보인 것처럼 속도에 따라 그 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 13에서 그림16은 제안된 전압각 제어방법을

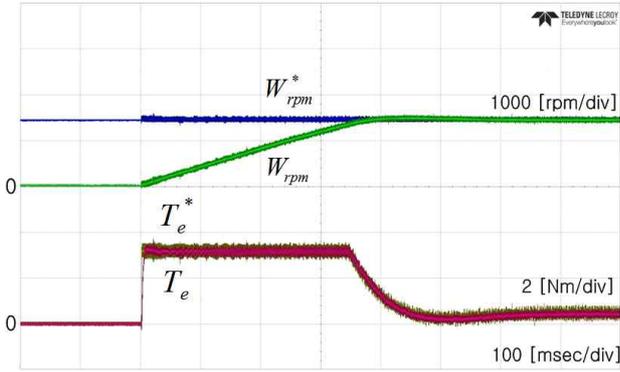


Fig. 11. Speed, torque response in constant torque region.

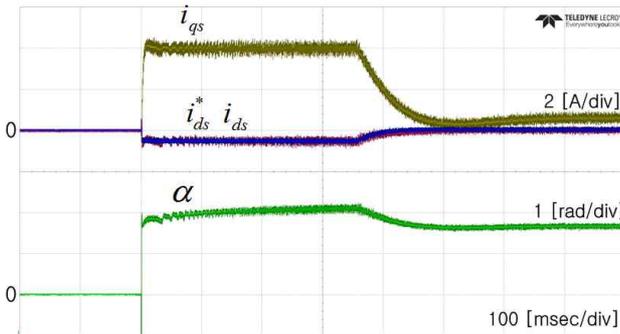


Fig. 12. Current and voltage angle in constant torque region.

적용하여 기동부터 구형과 모드 운전영역까지의 가속한 결과를 보인다. 입력 전압 168V에서의 최대 속도 2592r/min까지 증가시켜 전압각을 확인하였다. 인가되는 고정자 전압이 최대(MI=1)가 되면 고정자 전압을 최대로 고정하고 전압각 제어만 하게 된다.

그림 13은 속도와 추정 토크를 보인다. 속도 증가에 따라 기저속도 이상에서는 약자속 운전에 의해 토크가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 d와 q축 전류 및 전압각이 보인다. d와 q축 전류가 감소하는 시점이 구형과 모드 운전의 시작 지점이며 구형과 운전 시에는 속도가 증가함에 따라 전압과 전류 제한 조건에 따라 전압각이 변동하게 된다. 이때 제한된 방법에서는 약자속 영역 운전 시 전압활용률을 크게 하기 위해 구형과 운전을 하므로 선형변조영역으로 출력전압을 제한하여 약자속 운전하는 경우보다 전류 맥동이 커지게 된다.

앞에서 분석한 $\phi_f > I_{smax} L_{ds}$ 인 IPMSM의 최적 전압각 궤적과 같이 전압각은 약자속 영역의 초기 속도에서는 약간 증가하다가 다시 감소하는 특성을 보이며, 최대 속도에서 $\pi/2$ 부근의 값으로 일정하게 유지하는 것을 확인할 수 있다. 최대 속도에서의 전압각은 이론적으로 $\pi/2 (=1.57 \text{ rad})$ 이지만 이 운전점에서 토크는 영이 되므로 실제로는 요구되는 부하 토크만큼 $\pi/2$ 보다는 커지게 된다.

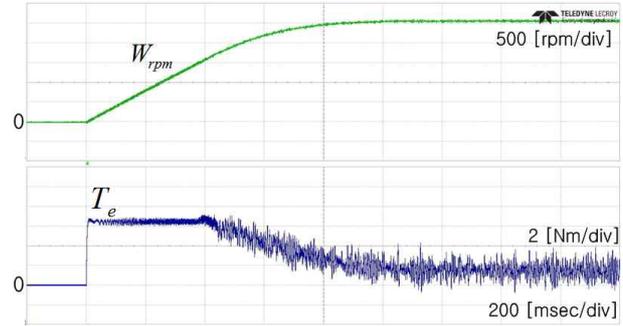


Fig. 13. Speed and torque for the maximum speed operation.

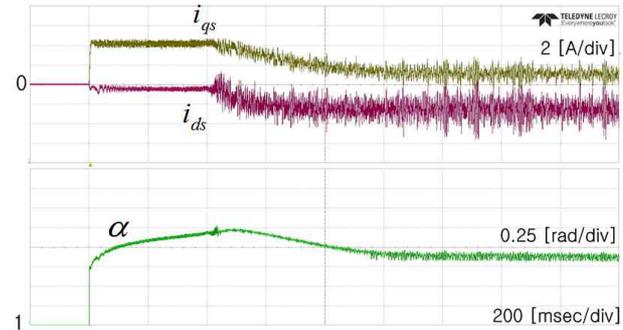


Fig. 14. Current and voltage angle for the maximum speed operation.

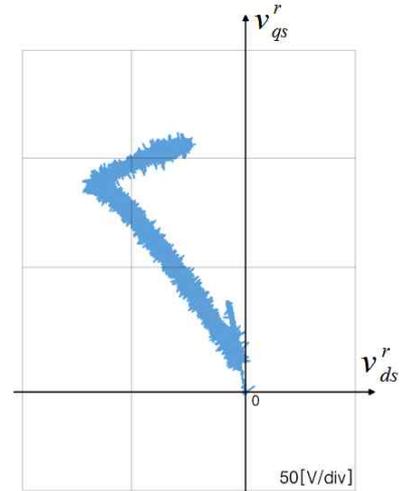


Fig. 15. Trajectory of stator voltage vector in voltage plane.

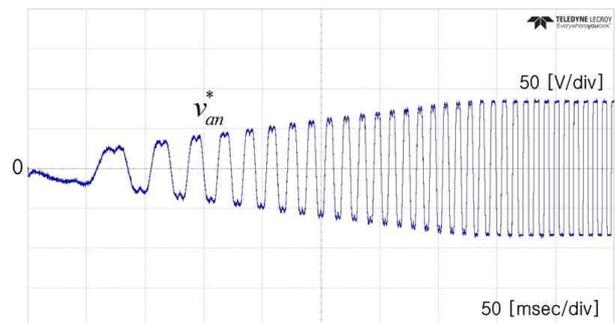


Fig. 16. Pole voltage.

이 실험에서는 1.87 rad가 최대 속도에서의 전압각이다.

그림 15는 d-q축 전압평면에서 속도에 따른 고정자 전압의 궤적이 보인다. 이 궤적을 통해 제어 전압각이 앞서 설명한 궤적을 따라 이동하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 16은 극전압을 보이는데, 제안된 전압각 제어기법으로 일정 토크 영역에서 부터 구형과 운전 모드 까지 적절히 구동되고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전기 자동차나 철도 차량 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 전압각 제어에 대해 연구하였다. 일정 토크 영역부터 약자속 영역에 까지 전 운전 영역에서 최대 토크 발생을 위한 최적의 전압각 궤적을 분석하였으며, 이를 바탕으로 기동부터 고속 운전 영역 까지 적용 가능한 전압각 제어기법을 제안하였다. 제안된 전압각 제어기법은 800W 매입형 영구자석 동기전동기를 사용한 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

References

- [1] R. H. Staunton, C. W. Ayers, J. N. Chiasson, B. A. Burress, and L. D. Marlino, "Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system," U.S. Department of Energy, 2006.
- [2] Sang-Hoon Kim, "Motor Control, DC, AC, BLDC," Chapter 5, Bokdo, 2016.
- [3] Nae-Chun Park, and Sang-Hoon Kim, "Maximum Torque control for IPMSM Drive Systems based on Direct Torque Control," Korean Conference of Power Electronics, pp. 86-87, July, 2013.
- [4] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications," *IEEE Trans. Transportation Electrification*, Vol. 1, No. 3, pp. 245-254, Oct. 2015.
- [5] Hee-Kwang Lee, and Kwang-Hee Nam, "An Overview: Current Control Technique for Propulsion Motor for EV," Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 21, No. 5, Oct. 2016.
- [6] B. Cheng, and T. R. Tesch, "Torque feedforward control technique for permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 57, No. 3, pp. 969-974, Mar. 2010.
- [7] L. Zhu, S. Xue, X. Wen, Y. Li, and L. Kong, "A new deep field-weakening strategy of IPM machines based on single current regulator and voltage angle control," Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, IEEE, pp. 1144-1149, Sep. 2010.
- [8] Z. Lei, W. Xuhui, Z. Feng, K. Liang, and Z. Baocang, "Deep field-weakening control of PMSMs for both

motion and generation operation," *Electrical Machines and Systems, IEEE, International Conference on*, pp. 1-5, Aug. 2011.

- [9] S. Kitamura, and K. Kondo, "An enhanced torque control method of permanent magnet synchronous motor in the field weakening region," *Electrical Machines and Systems, IEEE, International Conference on*, pp. 781-786, Oct. 2010.
- [10] D. Stojan, D. Drevensek, Z. Plantic, B. Grcar, and G. Stumberger, "Novel field-weakening control scheme for permanent-magnet synchronous machines based on voltage angle control," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 48, No. 6, pp. 2390-2401, Nov/Dec. 2012.



고태훈(高態焘)

1991년 1월 26일생. 2015년 강원대 전기전자공학과 졸업. 2017년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사).



김상훈(金相勳)

1964년 9월 11일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~1996년 대우중공업 철도차량 연구소 선임연구원. 1997년~현재 강원대 전기전자공학부 교수.