

표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압 위상 제어

이동우, 이광운, 유지윤
고려대학교

Voltage Phase Control of a Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

Dong-Woo Lee, Kwang-Woon Lee, Ji-Yoon Yoo
Korea University

ABSTRACT

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)의 새로운 전압 위상 제어 방법을 제안한다. 영구자석 동기전동기의 모델로부터 d 축 전류를 추정하고, d 축 전류가 영(零)이 되도록 전압 지령의 위상을 제어함으로써 영구자석 동기전동기의 역기전력과 전류의 위상을 맞춘다. 제안된 방식은 전류 제어 없이 단순히 전압 제어만을 수행하기 때문에 저가 구현이 중요시 되는 산업계 응용에 적합하다. 모의 실험을 통해 제안된 방식의 동작 특성을 평가한다.

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 넓은 운전 영역에 걸쳐서 높은 효율을 유지하는 특성으로 인하여 산업계에서 고효율이 요구되는 응용 분야에 최적의 전동기로 각광받고 있다. 특히, 집중권 고정자와 표면부착형 페라이트 영구자석 회전자로 구성된 영구자석 동기전동기는 비교적 저가로 양산이 가능하기 때문에 팬(Fan) 구동 등의 응용 분야에 널리 사용되어지고 있다.

표면 부착형 영구자석 동기전동기를 단위전류 당 최대 토크 운전하기 위해서는 d 축 전류를 0으로 제어해야 한다. 전류 제어를 위해서는 전류 검출 센서 및 고속 연산이 가능한 마이크로프로세서가 필수적으로 요구되며, 이는 전동기 구동시스템의 구현 비용을 상승시켜 영구자석 동기전동기의 산업계 확산에 장애 요소로 작용하고 있다. 전류 제어에 따른 비용 상승 문제를 해결하기 위해 산업계에서는 전류 제어 없이 전압 제어만을 수행하는 경우를 쉽게 찾아 볼 수 있다. 이러한 경우, 단위전류 당 최대 토크 운전을 위한 전압 위상을 Look-up 테이블 형태로 만들어서 표면부착형 영구자석 동기전동기에 인가되는 전압의 위상을 제어하는 것이 일반적이다. 그러나, 이 방식은 다양한 운전조건에 대한 전압 위상을 테이블로 만드는 것이 현실적으로 어렵다는 문제점을 지니고 있다. 또 다른 방법으로, 전동기 구동을 위한 인버터 회로에 사용되는 션트(shunt) 저항으로부터 전동기에 공급되는 상전류의 최대값 발생 시점을 검출하고, 이 시점과 영구자석 동기전동기의 홀센서 트리거(trigger) 시점이 일치되도록 전압 위상을 제어하는 방법도 있다. 그러나, 이 방식에서는 션트 저항으로부터 전류의 최대값 발생 시점을 검출하는데 있어서 인버터의 스위칭으로 인한 전기적 노이즈의 영향을 받기가 쉽기 때문에 노이즈 필터링(filtering)에 많은 노력이 필요하다.^[1,2]

본 논문에서는 전류 제어나 전류 검출 없이 단순히 전압 위상 제어만으로 표면부착형 영구자석 동기전동기의 단위전류 당 최대토크 운전이 가능한 새로운 제어 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 영구자석 동기전동기의 수학적 모델로부터 d 축 전류를 추정하고, 추정된 d 축 전류가 0이 되도록 적분 제어를 통해 전압 위상각을 조절해 간다. 또한 데드 타임(dead-time)에 의한 d 축 추정 전류 오차를 분석하고, 이를 보상할 수 있는 방법에 대해서도 모의 실험을 통해 입증하고자 한다.

2. 전압 위상각 제어

영구자석 동기전동기를 회전자 동기좌표계에서 표현한 d, q 축 전압방정식과 토크방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -w_e L_q \\ w_e L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_e \lambda_{PM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2)$$

정상상태에서 $pL_d i_d = 0$, $pL_q i_q = 0$ 으로 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$v_d = R_s i_d - w_e L_q i_q \quad (3)$$

$$v_q = R_s i_q + w_e L_d i_d + w_e \lambda_{PM} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 d 축 전류에 관하여 정리하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$i_{d,est} = \frac{w_e L_q v_q + R_s v_d - w_e^2 L_q \lambda_{PM}}{R_s^2 + w_e^2 L_d L_q} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 d 축 전류를 추정하게 된다.

그림 1은 표면부착형 동기전동기(SPMSM)의 벡터도를 나타낸다. 전압 위상각 θ_r 에 따라서 d 축 전류도 변화하므로, 추정된 d 축 전류가 0이 되도록 적분제어 $\theta_r = \int I_{d,est} \cdot dt$ 를 통하여 전압 위상각 θ_r 을 결정한다. 결정된 전압 위상각 θ_r 을 통해 d 축 전류가 0이 되도록 할 수 있다.

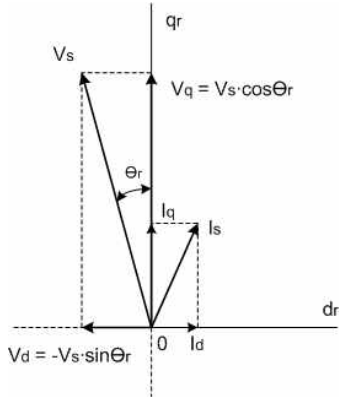


그림 1 SPMSM의 벡터도
Fig. 1 Vector Diagram of SPMSM

본 논문에서 제안하는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압 위상 제어시스템의 구성은 그림 2와 같다. 전류센서를 사용하지 않고 홀센서와 같은 저해상도의 위치 센서만을 사용하여 회전자 위치와 각속도를 추정하게 된다.^[3] 추정된 각속도와 식 (5)를 이용하여 d 축 전류를 추정하고 추정된 값을 적분하여 전압 위상각 θ_r 을 결정한다. d, q 축 전압 지령은 속도 제어기 출력 V_s 와 θ_r 로부터 식 (6), 식 (7)과 같이 결정되고 전압 지령에 따라 전동기의 인가전압을 변조한다.

$$V_d^* = -V_s \cdot \sin \theta_r \quad (6)$$

$$V_q^* = V_s \cdot \cos \theta_r \quad (7)$$

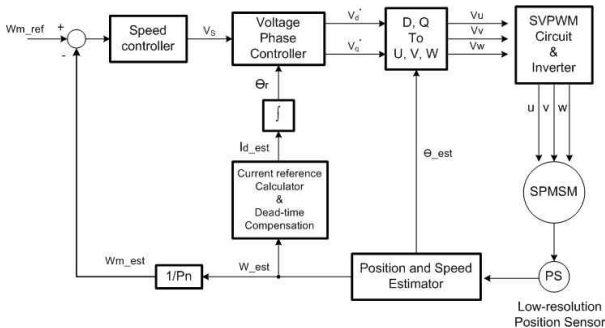


그림 2 전압 위상각 제어기를 포함한 SPMSM 구동시스템
Fig. 2 SPMSM drive system including voltage phase angle controller

3. 데드타임 영향을 고려한 전류 추정^[4]

식 (5)에 의해 d 축 전류를 추정하는 경우, 실제로는 데드타임으로 인해 지령 전압과 실제로 전동기에 인가되는 전압 간에 오차가 발생하기 때문에 정확한 전류 추정이 어렵다.

데드타임으로 인한 a 상에 인가되는 전압 왜곡 성분은 다음과 같다.

$$V_{a,dead} = V_{dead} \cdot \text{sgn}(i_{as}) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(i_{as}) = \begin{cases} 1 & : i_{as} > 0 \\ -1 & : i_{as} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{dead} = \frac{(T_{dead} + T_{on} - T_{off})}{T_s} \cdot V_{dc} \quad (10)$$

스위칭소자의 전압강하와 freewheeling diode 순방향 전압강하를 고려하면 식 (10)을 식 (11)로 표현할 수 있다.

$$V_{dead} = \frac{T_{dead} + T_{on} - T_{off}}{T_s} \cdot (V_{dc} - V_{sat} + V_d) + \frac{V_{sat} + V_d}{2} \quad (11)$$

마찬가지로 데드타임으로 인한 b, c 상의 출력전압 오차는 다음과 같다.

$$V_{b,dead} = V_{dead} \cdot \text{sgn}(i_{bs}) \quad (12)$$

$$V_{c,dead} = V_{dead} \cdot \text{sgn}(i_{cs}) \quad (13)$$

각 상의 출력전압 오차식을 회전자 동기좌표계로 변환하고 위상에 따른 왜곡 전압을 관찰하면 그림 3과 같다.

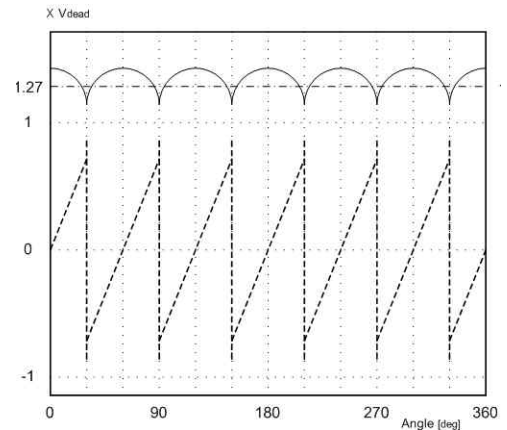


그림 3 회전자 좌표계에서 데드타임에 의한 왜곡 전압
Fig. 3 Disturbance Voltage in the rotor reference frame due to dead-time

그림 3을 살펴보면 데드타임으로 인한 전압 왜곡 성분 중 d 축 성분은 평균이 0이고 q 축 성분은 평균이 $1.27 \times V_{dead}$ 의 크기를 가짐을 알 수 있다. 따라서 데드타임으로 인한 전압 왜곡 성분들 중에서 q 축 성분만을 식 (14)와 같이 보상함으로써 정확한 d 축 전류를 추정할 수 있다.

$$i_d = \frac{w_c L_q (v_q - 1.27 V_{dead}) + R_s v_d - w_c^2 L_q \lambda_{PM}}{R_s^2 + w_c^2 L_q L_q} \quad (14)$$

4. 모의 실험 결과

모의 실험을 통해 본 논문에서 제안한 SPMSM의 전압 위상각 제어 알고리즘 특성을 평가한 결과는 아래와 같다.

표 1 모의 실험에 사용된 SPMSM의 파라미터
Table 1 the SPMSM parameters for simulation experiments

전기자 저항(R_s)	0.824 [Ω]
d 축, q 축 인덕턴스(L_d, L_q)	5 [mH]
역기전력 상수(λ_{PM})	0.0785(V/rad/sec)
극 수	4

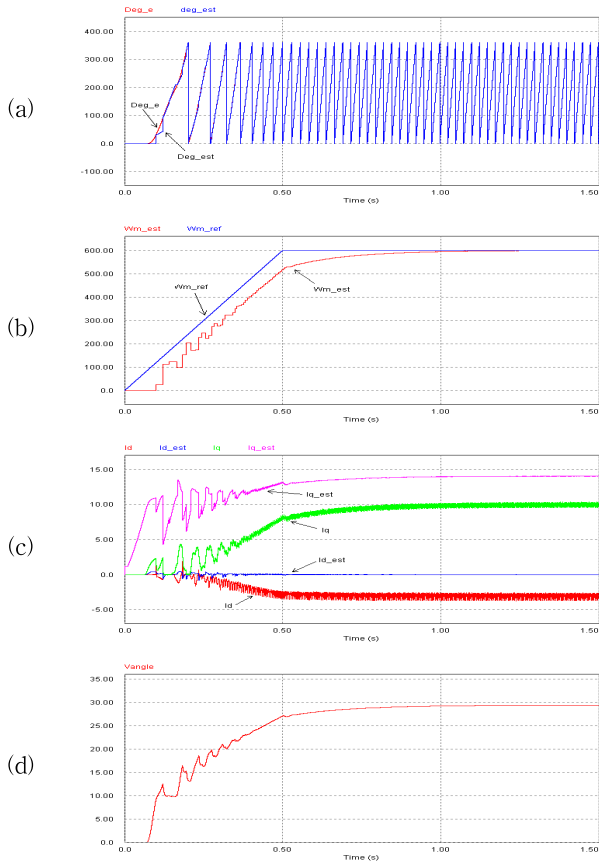


그림 4 데드타임 영향을 고려하기 전 모의 실험 결과
 (a)회전자의 회전각(deg), (b)전동기 속도(rpm),
 (c) d, q 축 전류(A), (d)전압 위상각(deg)
 Fig. 4 Simulation experiments prior to considering Dead-time effects
 (a)Rotor angle, (b)Motor speed,
 (c) $d-q$ axis current, (d)Voltage phase angle

그림 4에서 저해상도 위치 센서로 추정된 회전자의 회전각과 추정속도는 초기 기동구간에서 오차를 보이지만 속도가 일정한 정상상태 구간에서는 기준값으로 수렴한다. 데드타임 영향으로 인하여 추정 d 축 전류와 실제 d 축 전류에는 오차가 발생함을 알 수 있다.

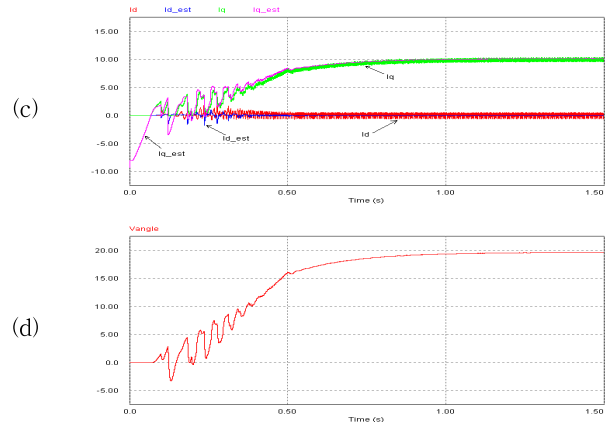
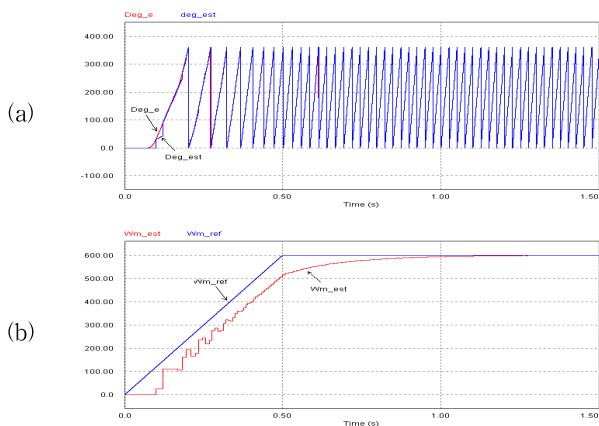


그림 5 데드타임 영향을 고려한 모의 실험 결과
 (a)회전자의 회전각(deg), (b)전동기 속도(rpm),
 (c) $d-q$ 축 전류(A), (d)전압위상각(deg)
 Fig. 5 Simulation experiments considering Dead-time effects
 (a)Rotor angle, (b)Motor speed,
 (c) $d-q$ axis current, (d)Voltage phase angle

그림 5는 데드타임 영향을 보상하기 위해 식 (14)를 사용한 경우 추정된 d 축 전류가 실제 d 축 전류를 정확하게 추정함으로써 단위 전류당 최대 토크 운전이 달성됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전압 제어만으로 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 단위 전류당 최대 토크 제어를 수행 할 수 있는 새로운 전압 위상 제어 방식을 제안하였고, 모의 실험을 통해서 그 타당성을 입증하였다. 제안된 방식에서는 전류 검출 및 전류 제어를 수행하지 않으므로 제어시스템의 저가 구현이 중요시 되는 응용분야에 적합하다.

본 연구는 2007년도 산업자원부 전력IT사업중 분산발전 및 산업용 인버터 응용을 위한 전력반도체 기술개발의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control," Oxford Univ. Press. 1998.
- [2] Parasiliti, F., Petrella, R. and Tursini, M., "Low cost phase current sensing in DSP based AC drives", in Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics(ISIE'99), Bled, Slovenia, vol 3, pp. 1284-1289, 12-16, July, 1999.
- [3] Ohishi, K. and Nakamura, Y., "High performance current sensorless speed servo system of PM motor based on current estimation", IEEE Ind. Applications Conference, vol. 2, pp. 1240-1246, 30 Sept.-4 Oct. 2001.
- [4] Hyun-Soo Kim, Hyung-Tae Moon, and Myung-Joong Youn, "On-Line Dead-Time Compensation Method Using Disturbance Observer," IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, pp. 1336-1345, No. 6, Nov. 2003.