

청소차에서 쓰이는 IPMSM의 제어기 보드의 개발과 제어기법 연구

정승환*, 최익*, 김권호**
광운대학교 제어계측공학과*, (주)수성**

Design of Controller Board and Control of IPMSM in Scrubber

Seunghwan Jung*, Ick Choy*, Kwonho Kim**
Kwangwoon University*, Soosung Co.**

ABSTRACT

본 논문은 청소차에 쓰이는 IPMSM을 위한 적절한 제어기법을 연구하고, 이를 위한 제어기 보드를 개발하였다. 청소차에 쓰이는 전동기는 주행용, 브러쉬용, 흡입용이 있으며, 용도에 따라 최대 토크 제어 기법과 최적 효율 제어기법을 적용함으로써 목적에 맞는 효과를 기대할 수 있다. 또한 이러한 제어 기법을 적용할 수 있는 제어기 보드를 제작하였다.

유리하며, 용도에 따라 해당하는 제어기법을 적용할 수 있어야 한다. 주행용 전동기는 가속을 하는 구간에 있어서 최대 토크를 낼 수 있어야 하며, 브러쉬용과 흡입용 전동기는 필요한 순간에 운전속도 범위를 넓게 확장할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 청소차에 쓰이는 IPMSM이 모델링된 수식을 통하여 전동기에 적용할 제어 기법을 시뮬레이션 하여 운전 모드에 따른 제어 기법을 적용할 수 있는 제어기 보드의 설계를 하였다.

1. 서 론

현재 국내 전동 청소장비 시장은 약 500억 원 정도(진공청소기를 제외)이며 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이와 같이 시장이 크고, 향후 성장력이 크게 예상되는 전동 건·습식 청소차는 그간 국내 몇몇 업체에서 개발을 시도 하였으나 시제품 생산에 그치고 말았다.

전동 습식청소차에는 주행(Drive)용 전동기, 브러시(Brush)용 전동기, 흡입(Vacuum)용 전동기가 기본적으로 필요하다. 기존의 청소차에서 사용되는 전동기는 모두 영구자석형 DC전동기가 사용되고 있으며, DC전동기는 카본 브러시를 내장하고 있어 정기적(약 1,000시간)으로 이를 교체하여야 하는 사용상에 번거로움이 있다. 특히 세제탱크와 폐수탱크를 같이 싣고 있는 습식 청소차의 경우 공간은 상대적으로 좁을 수밖에 없으며 이로 인해 주행용, 브러시용, 흡입용 등 여러 가지 전동기의 보수 유지가 용이하지 못하다. 이에 의해 기존의 DC전동기에서 PMAC(Permanent Magnetic AC)전동기로의 교체가 대두되고 있다.

PMAC 전동기 중에서도 IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어서 영구자석을 직접 관통하는 d축 자기저항과 그렇지 않은 q축 자기저항이 차이가 나므로 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스 보다 크게 되는 역 돌극성을 가진다. 이러한 돌극성을 가지는 전동기의 특징은 d축과 q축 사이의 자기저항 차이에 따라 발생하는 토크턴스 토크가 존재하고, 적절한 제어기법을 통해서 토크턴스 토크를 이용할 수 있으므로 보다 큰 토크를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 고정자 전류를 이용하여 공극자속의 조절을 통해 약계자 제어가 가능하여 운전속도 범위를 확장시킬 수 있다.[1-4]

청소차의 전력은 배터리로부터 공급되기 때문에 각 전동기는 최적 효율 제어를 통하여 전력 소모를 줄일 수 있는 것이



그림 1 청소차의 예
Fig. 1 A example of scrubber

2. 제어기 보드의 개발

2.1 제어기 보드의 설계

2.1.1 CPU

제어기 보드의 CPU는 IPMSM의 벡터제어를 위하여 빠른 연산 능력과 PWM 패턴 발생 기능이 있어야 하며, 전류와 전압 그리고 전동기의 로터(rotor)의 절대 위치를 피드백 할 수 있어야 한다. 또한, 청소차의 통합제어기와의 CAN 통신을 통하여 운전모드의 지시와 필요한 정보를 송수신할 수 있어야 하며, UART 통신으로 로컬 컴퓨터를 사용해 모니터링을 할 수 있도록 하였다.

TI사의 DSP2000계열의 CPU중 TMS320F2802는 적합한 기능과 성능을 보유하여 선택하게 되었다.

2.1.2 Inverter Stack

인버터 스택 보드는 CPU의 PWM신호를 받아 게이트 동작을 하는 것이 주요한 목적으로 청소차에 장착될 전동기 규격에 맞게 설계하였으며, 규격은 다음과 같다. 전동기의 스위칭 주파수는 20Khz, 정격 전압과 전류는 36Vdc/20Arms, 최대 허용 전압과 전류는 100Vdc/50A로 하였다.

또한 백터제어를 위한 2상의 전류 센싱 회로를 설계하고, 전동기의 과부하를 막기 위하여 DC 링크의 전압/전류를 감시할 수 있게 하였다.

다음 그림 2는 전체 전원부를 블록도로 나타낸 그림이다. 인버터 스택의 전원(통칭 B)은 청소차에 사용되는 36Vdc 배터리 전원을 정류하여 B15V, B5V를 사용하며, CPU보드의 전원(통칭 C)을 위하여 C5V, C3.3V, C1.8V를 제공한다. 또한 CAN의 전원은 청소차 통합제어기에서 입력 받을 수 있게 하였다.

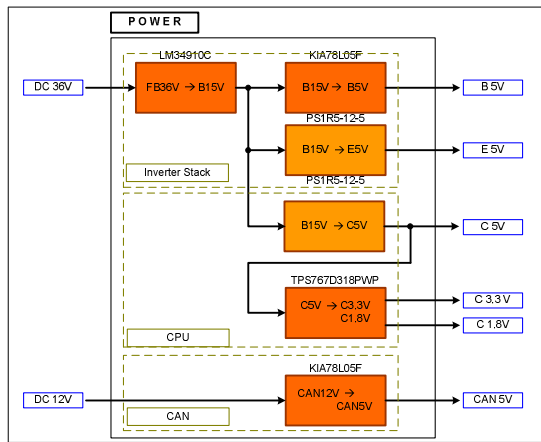


그림 2 전원부의 블록다이어그램
Fig. 2 Blockdiagram of power supply

1.2 제어기 보드의 사진

다음 그림 3의 왼쪽은 설계·제작된 제어기 보드의 사진이며, 오른쪽은 제어기 보드에 1hp급-IIIPMSM을 결선하여 실험중인 사진이다.

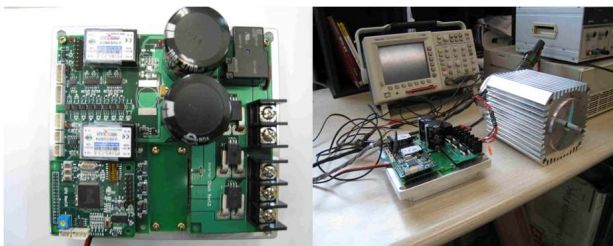


그림 3 개발된 제어기 보드의 사진
Fig. 3 A pictures of designed controller board

3. 제어기법

백터제어는 Id, Iq를 각각 독립적으로 제어를 할 수 있는 이점이 있으며, 전류제어 기반의 PWM제어를 하게 된다. 또한 d-q축 사이를 분리(decoupling)하여 좀 더 나은 전류 제어의 효과를 기대할 수 있다. 백터제어와 더불어 IPMSM에 적용될 제어기법은 계차 제어를 통하여 여러 가지 동작 효과를 얻을

수 있다. 그 중에서도 최대 토크 제어와 최적 효율 제어를 중점으로 하여 해석하였다. 최대 토크 제어는 주행용 전동기에서 주로 사용할 수 있으며, 최적 효율 제어는 배터리를 사용하는 청소차의 모든 전동기에 적합하다고 할 수 있다.

다음 표 1은 시뮬레이션에 사용된 IPMSM의 파라미터들이다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 IPMSM의 파라미터
Table 1 Used IPMSM parameters in simulation

| Items | Value | Unit |
|----------------------------------|-------|--------------------|
| Rated Power | 1 | HP |
| Rated Torque | 5.94 | Nm |
| Rated Speed | 1200 | Rpm(125.67rad.sec) |
| Rated Current | 20 | Arms |
| Resistance per phase | 0.048 | Ω |
| D-axis Inductance | 0.42 | mH |
| Q-axis Inductance | 1.2 | mH |
| Counter-emf constant per phase | 10.4 | Vrms@1000rpm |
| Flux Linkage of magnet per phase | 0.07 | Wb |
| Number of poles | 4 | pole |
| Number of slots | 6 | slot |

3.1 IPMSM의 모델링

다음 그림 4는 철손을 포함한 IPMSM의 (어떤 조건에서의)DQ 등가 회로를 나타내었다. Ids와 Iqs는 dq축의 권선전류, Id와 Is는 토크전류, 그리고 Idi와 Iqi는 철손전류이다. 그림 3을 이용하여 전압 방정식을 유도하면, 수식 (1)과 같다.[1-3]

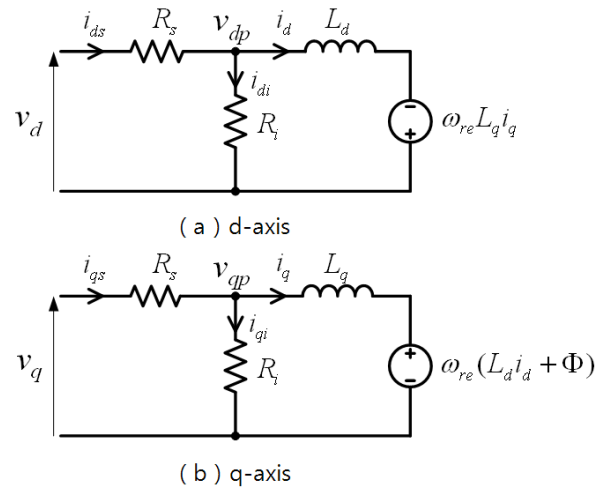


그림 4 IPMSM의 d-q 축 등가회로
Fig. 4 d-q axes equivalent circuit of IPMSM

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = v_d + \omega_{re} L_q i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = v_q - \omega_{re} (L_d i_d + \Phi) \end{cases} \quad (1)$$

그리고 다음 수식 (2)는 토크 방정식이다.

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} = T_e - T_L \quad \omega_{re} = \frac{P}{2} \omega_{rm} \quad (2)$$

다음 수식 (3), (4), (5)는 수식 (1)에서 Id와 Iq의 미분 값이 0이 되게 하여 정상 상태에서 풀어낸 것이며, 이것으로 정상 상태에서의 시뮬레이션 해석을 할 수 있다.

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d - (1 + \frac{R_s}{R_i}) \omega_{re} L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + (1 + \frac{R_s}{R_i}) \omega_{re} (L_d I_d + \Phi) \end{cases} \quad (3)$$

$$I_{di} = -\frac{\omega_{re} L_q I_q}{R_i}, \quad I_{qi} = \frac{\omega_{re} (L_d I_d + \Phi)}{R_i} \quad (4)$$

$$I_{ds} = I_d + I_{di}, \quad I_{qs} = I_q + I_{qi} \quad (5)$$

3.2 IPMSM의 정상상태 시뮬레이션

3.1 최대 토크 제어

최대 토크는 수식 (2)의 토크 방정식으로부터 전류 대 토크 값이 가장 최대를 가지게 하는 Id와 Iq 쌍을 계산하여 제어 할 수 있다. 전제조건으로 철손은 무시하며, 상전류 Is의 값이 주어지 이로부터 수식 (6)을 유도할 수 있다.[3]

$$I_d = -\frac{k + \sqrt{k^2 + 8I_s^2}}{4}, \quad \text{where } k = \frac{\Phi}{L_d - L_q}$$

$$I_q = \sqrt{\frac{4I_s^2 - k(k + \sqrt{k^2 + 8I_s^2})}{8}} = \sqrt{\frac{I_s^2 + kI_d}{2}} \quad (6)$$

다음 그림 5의 왼쪽은 상전류 Is의 변화에 따른 Id, Iq 값을 나타낸 것이며, 오른쪽은 상전류 Is의 변화에 따른 토크를 나타낸 것이다. Te는 최대 토크 제어를 적용함으로써 얻은 토크이며, TeVec은 Id=0으로 하는 제어를 적용함으로써 얻은 토크이다. 출력 토크값은 10A까지는 서로 비슷하였고, 10A 이상에서부터 출력 토크값이 이득을 보았음을 알 수 있다. 청소차에서의 최대 토크 제어모드가 큰 토크를 필요로 할 때 적용됨을 생각한다면, 실제 적용됨으로 인해 좋은 효과를 볼 수 있다고 볼 수 있다.

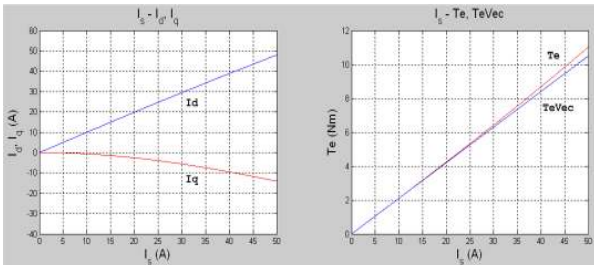


그림 5 상전류 Is에 따른 최대 토크 제어 시뮬레이션
Fig. 5 Maximum torque simulation with stator current, Is

3.2 최적 효율 제어

최적 효율은 전력 손실을 가장 최소화하는 Id, Iq 쌍을 계산하여 제어할 수 있다. 수식(7)과 (8)은 철손과 동손을 나타낸 수식이다. 여기서 기계적 손실은 제어가 가능하지 않기 때문에 논외로 하였다.[2]

$$P_i = \frac{3}{2} R_i (I_{di}^2 + I_{qi}^2) = \frac{3}{2} \frac{\omega_{re}^2}{R_i} ((L_q I_q)^2 + (L_d I_d + \Phi)^2) \quad (7)$$

$$P_c = \frac{3}{2} R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) = \frac{3}{2} R_s \left(\left(I_d - \frac{\omega_{re} L_q I_q}{R_i} \right)^2 + \left(I_q + \frac{\omega_{re} (L_d I_d + \Phi)}{R_i} \right)^2 \right) \quad (8)$$

수식을 풀어내게 되면, 수식(9)와 같이 비선형방정식으로 나

오게 되며, 수식을 Newton-Raphson 방법으로 풀어 시뮬레이션하였다.

$$\left\{ R_s R_i^2 I_d + \omega_{re}^2 L_d (R_s + R_i) (L_d I_d + \Phi) \right\} \left\{ \Phi + (L_d - L_q) I_d \right\}^3 = \frac{16 T_e^2}{9 P^2} \left\{ R_s R_i^2 + (R_s + R_i) (\omega_{re} L_q)^2 \right\} (L_d - L_q) \quad (9)$$

다음 그림 6은 최대 토크 상황에서 속도를 150%까지 변화시켜 시뮬레이션한 것이다. 철손과 동손을 줄임으로서 Id=0으로 하는 제어보다 효율이 3%가량 높은 것을 알 수 있다.

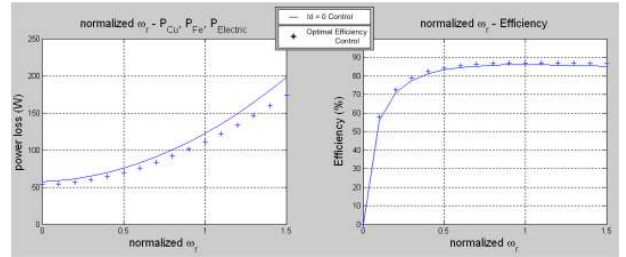


그림 6 전동기의 정규화 속도에 따른 최적 효율 제어 시뮬레이션

Fig. 6 Optimal efficiency simulation with normalized speed of motor

4. 결론

본 논문은 청소차에 쓰이는 IPMSM에 알맞은 제어기법을 적용하기 위하여, 시뮬레이션을 통하여 최대 토크 제어와 최적 효율 제어를 적용함으로써 좋은 효과를 볼 수 있음을 입증하였고, 각 제어기법들의 알고리즘을 수행하기 위한 제어기 보드의 하드웨어 설계를 제안하였다.

추후 제작된 제어기 보드에 최적 효율 제어와 최대 토크 제어 알고리즘의 실험을 통하여 제어기 성능을 검증하고, 다른 제어기법의 적용의 연구도 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Urasaki, N., "An accurate modeling for permanent magnet synchronous motor drives", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE, Volume 1, vol.1, pp. 387 - 392 Feb. 2000
- [2] Morimoto, S., "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives", Volume 41, Issue 5, pp. 511 - 517, Oct. 1994
- [3] Zhang, B., "Maximum torque control and vector control of permanent magnet synchronous motor", Power Electronics and Drive Systems, 1997. Proceedings., 1997 International Conference on, Volume 2, vol.2 .pp. 548 - 552 , May 1997
- [4] Monajemy, R., "Control and dynamics of constant power loss based operation of permanent magnet synchronous motor drive system", Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, Volume 3, vol.3, pp. 452 - 1457, Dec. 1999