

전압 변조 방식에 따른 3상 PMSM 모터의 출력 특성 비교 분석

김민철, 장현우, 정승수, 조영훈

건국대학교 전력전자연구실

Comparative Analysis of Output Characteristics of Three-Phase PMSM by Voltage Modulation Method

Min-chul Kim, Hyeon-woo Jang, Seung-Su Jung, Young-hoon Cho

Power Electronics Lab, Konkuk Univ.

ABSTRACT

모터 구동 시 인가되는 전압을 제어하기 위한 방법으로 전압 변조 방식이 일반적으로 사용된다. 본 논문에서는 SPWM, SVPWM, DPWM 기법을 적용하여 3상 PMSM 모터를 제어하고, 이때 전압 변조 방식에 따른 모터의 출력 토크 리플, 효율, 손실 등을 비교한다. 또한, 비교 결과를 통해 각 제어 기법들의 특징에 대하여 설명한다. 출력 특성 중 토크 리플과 효율의 비교는 MATLAB 시뮬레이션을 통해, 스위칭 손실은 'PLECS' 프로그램을 통해 확인한다.

1. 서론

영구자석 동기전동기(PMSM)은 고효율, 고역률 및 고출력 밀도, 고응답성, 그리고 회전자 구조가 매우 간단하다는 장점으로 인해 자동차, 항공, 철도 산업 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. 3상 PMSM을 제어하기 위해 일반적으로 3상 인버터가 사용된다. 인버터의 전압 합성 성능 및 효율은 전압 변조 기법에 따라 달라진다. 전압 변조 기법은 구현하는 방식과 변조된 전압의 형태에 따라 구분할 수 있다.

첫째로, 전압 변조 기법은 구현하는 방식에 따라 삼각파 비교 변조 방식(SPWM), 공간 벡터 변조 방식(SVPWM)으로 분류된다. SPWM은 정현파의 지령 전압과 삼각 반송파 간의 비교를 통하여 인버터 각 상 스위치의 상태를 결정한다. 반면, SVPWM은 3상 전압 지령을 복소수 공간에서 하나의 공간 벡터로 표현하여 변조하는 방식이다. SVPWM을 사용하면 SPWM 기법보다 15.5% 더 큰 기본파 전압을 선형적으로 생성할 수 있지만, 더 많은 계산량을 요구한다. 따라서 윗셋 전압을 이용한 SPWM이 SVPWM에 비하여 구현이 간단하다는 장점이 있다.^[1]

둘째로, 변조된 전압의 형태에 따라 연속 변조 방식(CPWM)과 불연속 변조 방식(DPWM)으로 구분된다. CPWM의 경우 변조 주기 내에서 3상의 모든 소자가 스위칭을 하는 반면, DPWM에서는 영 전압 벡터를 두 개로 분리하지 않고 한 번에 인가하여 스위칭 횟수를 1/3만큼 줄일 수 있다.^[2]

본 논문에서는 3상 PMSM을 제어하기 위해 3상 인버터와 제어기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 전압 변조 방식에 따른 출력 특성 중 토크 리플, 입출력 효율 그리고 스위칭 손실을 비교한다.

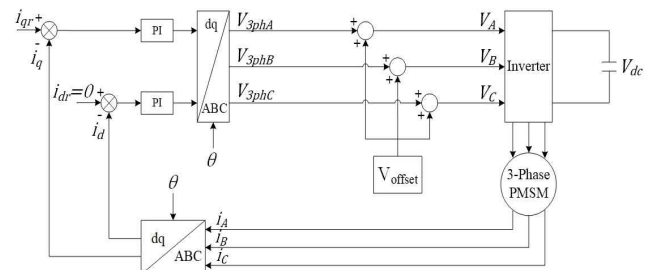


그림 1 3상 PMSM 제어 토폴로지

Fig. 1 The Topology of 3-phase PMSM Control

2. 제어기 설계

2.1 토폴로지 선정 및 이득 설정

본 논문에서 선정한 토폴로지는 그림 1과 같이 3상 PMSM 제어를 위해 3상 인버터를 사용하고, 윗셋 전압 인가를 이용한 전압 변조 방식을 채택한다. PMSM의 출력 전류를 d, q축 변환하여 PI 제어기를 통해 제어하게 된다.

PI 제어기의 이득은 d, q축 변환한 전류에 따라 다르게 설정한다. 출력 전압 제어기의 대역폭을 스위칭 주파수와 설계 요구 사양 등을 고려하여 10kHz로 설정한 후, PI 제어기의 이득을 Pole-Zero Cancellation을 이용하여 아래와 같이 선정한다.

$$K_{pd} = L_d \times \omega_{cc} \quad (1)$$

$$K_{pq} = L_q \times \omega_{cc} \quad (2)$$

$$K_{id} = K_{iq} = R_s \times \omega_{cc} \quad (3)$$

이때, L_d 는 고정자 d축 인덕턴스, L_q 는 고정자 q축 인덕턴스, R_s 는 고정자 저항을 나타낸다.

2.2 윗셋 전압을 이용한 전압 변조 방식

윗셋 전압을 적절히 선정하면 전압 변조 방식과 관련된 인버터 스위칭 손실, 과변조와 같은 문제점들을 해결할 수 있다. SPWM, SVPWM, DPWM (60°)의 경우에 인가하는 윗셋 전압 V_{sn} 은 식 (4), (5), (6)와 같이 표현된다.

$$V_{sn} = 0 \quad (4)$$

$$V_{sn} = -\frac{1}{2}(V_{\max}^* + V_{\min}^*) \quad (5)$$

$$\text{if} \begin{cases} V_{\max}^* + V_{\min}^* \geq 0 \Rightarrow V_{sn} = \frac{V_{dc}}{2} - V_{\max}^* \\ V_{\max}^* + V_{\min}^* < 0 \Rightarrow V_{sn} = -\frac{V_{dc}}{2} - V_{\min}^* \end{cases} \quad (6)$$

이때, $V_{\max}^*$, $V_{\min}^*$ 은 각각 상전압 지령(v_{as}^* , v_{bs}^* , v_{cs}^*)의 최댓값, 최솟값을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 및 비교 분석

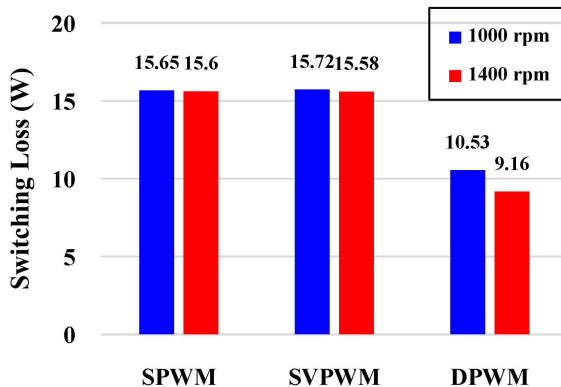
그림 2(a)의 스위칭 손실을 측정하기 위해 시뮬레이션 툴인 'PLECS'를 이용하여 모의실험을 진행하였다. 표 1은 시뮬레이션에서 사용된 토폴로지의 주요 상수를 보여준다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯 속도에 따른 SPWM, SVPWM, DPWM의 스위칭 손실을 측정하였다. PWM과 SVPWM의 스위칭 손실은 0.07W 차이로 비슷하게 측정되었지만, DPWM의 경우 총 스위칭 손실이 10.534W로 다른 두 변조 기법 대비 41.16% 감소하였다.

그림 2(b)의 입출력 효율을 측정하기 위해 MATLAB Simulink를 이용하여 모의실험을 진행하였다. 그림 1의 토폴로지와 제어기를 구현하여, 입출력 전력을 통해 효율을 계산하였다. 속도 지령 2200rpm에서 SPWM은 92.8%, SVPWM은 93.4%의 효율이 측정되었지만, DPWM의 경우 82.5%의 효율로 다른 전압변조 기법들 대비 11% 감소하였다. DPWM의 경우 전압 변조 지수가 0.4일 때 변조 주기의 대칭성 상실 효과로 인해 전류의 고조파가 증가하고 이는 결과적으로 효율 감소의 원인이 된다.

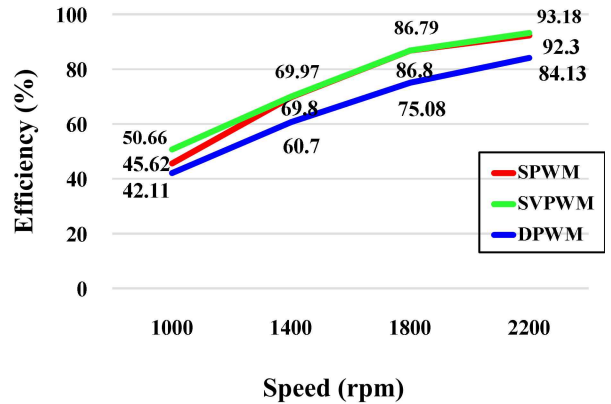
그림 2(c)는 모의실험을 통해 전압 변조 기법 별 출력 토크를 측정하였다. 토크 리플의 경우 SPWM은 0.07 Nm, SVPWM은 0.05 Nm로 안정적으로 제어되고 있는 것을 확인할 수 있다. DPWM의 토크 리플은 2.04 Nm로 다른 변조 기법들 대비 29배 증가하였다.

표 1 모의실험 파라미터
Table 1 The Simulation Parameter

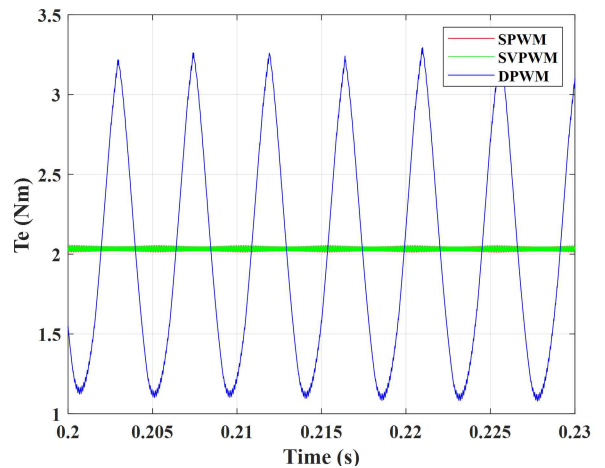
V_{dc} [V]	24	R_s [Ω]	0.095
f_{sw} [kHz]	10	J [$kg.m^2$]	0.000097
L_d [μH]	201.6	K_t [$N.m/A_{peak}$]	0.04384
L_q [μH]	337.9	ω_{cc} [Hz]	500



(a) 서로 다른 전압 변조 방식에 따른 스위칭 손실 차이



(b) 서로 다른 전압 변조 방식에 따른 효율 차이



(c) 서로 다른 전압 변조 방식에 따른 토크 리플 차이

그림 2 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Simulation Results

4. 결론

본 논문에서는 3상 PMSM을 제어하기 위한 토폴로지를 소개하고, 3가지 전압 변조 기법에 따른 모터의 출력 특성을 비교 분석하였다. 모터 사용 환경에 따라 적절한 전압 변조 기법을 사용하면 보다 효율적으로 3상 PMSM을 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 대학혁신지원사업에
서 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] Y. Yu, F. Chai and S. Cheng, "Analysis of modulation pattern and losses in inverter for PMSM drives," 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677618.
- [2] S. -M. Kim, E. -J. Lee, J. -S. Lee and K. -B. Lee, "An Improved Phase-Shifted DPWM Method for Reducing Switching Loss and Thermal Balancing in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter," in IEEE Access, vol. 8, pp.187072-187083, 2020, doi:10.1109/ACCESS.2020.3030261.