

과변조 기법에 따른 IPMSM의 NVH 특성 비교 분석

김민철¹⁾, 임재상²⁾, 강진욱²⁾, 조영훈¹⁾
 건국대학교 전력전자연구실¹⁾, 현대자동차²⁾

NVH Characteristic Comparison in IPMSM by Overmodulation Techniques

Minchul Kim¹⁾, Jaesang Lim²⁾, Jinwook Kang²⁾, Younghoon Cho¹⁾
 Power Electronics Lab, Konkuk Univ.¹⁾, Hyundai Motor Company²⁾

ABSTRACT

본 논문은 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 NVH(소음, 진동, 불쾌감) 특성에 미치는 과변조 기법의 영향을 분석한다. NVH 특성 중 진동 성분과 밀접한 관련 있는 토크 리플 분석을 모의 실험을 통해 검증하였다. 여러 과변조 기법들 중 최소거리 과변조, 스위칭 상태 유지 과변조, 그리고 Bolognani's 과변조 기법을 선정하여 모의 실험을 진행하였다. 토크 리플의 분석을 통해 IPMSM의 NVH 관리 전략에서 과변조 기법 선택의 중요성을 강조한다.

1. 서론

최근 차세대 자동차에서 널리 사용되는 IPMSM의 고속 운전을 위해서는 과변조 제어 기법의 적용이 필수적이다. 그러나 과변조 영역에서는 전압 지령에 비해 낮은 출력 전압이 발생하여 이로 인한 출력 전압의 선형성 상실, 저차 고조파 성분의 증가, 그리고 토크 리플의 증가 등 다수의 문제가 발생한다. 특히 토크 리플의 증가는 전동기의 NVH성능에 부정적인 영향을 미친다는 점에서 주목할 필요가 있다^[1].

과변조 기법의 종류는 크게 과도 상태 시에 일시적으로 발생하는 과변조 영역의 전압 지령을 처리하는 동적 과변조 기법과 정상 상태에서 과변조 영역의 전압 지령을 지속적으로 변조하는 정적 과변조 기법이 있다. 이러한 과변조 기법들은 고조파 및 NVH 등의 특성에 중대한 영향을 미치므로, 이 분야에서 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 동적 과변조 기법인 최소거리 과변조 기법, 스위칭 유지 과변조 기법, 그리고 정적 과변조 기법인 Bolognani의 과변조 기법의 토크 리플을 비교 분석한다. 이를 위해 각 기법을 모의실험에 C코드로 구현하여 검증하였다.

2. 본론

공간벡터 변조 기법을 적용하는 경우 전압 변조 지수 MI 는 식 (1)으로 정의될 수 있다.

$$MI = \frac{|V^*|}{V_{dc} / \sqrt{3}} \quad (1)$$

과변조 영역으로의 진입은 MI 가 1을 초과하는 시점부터

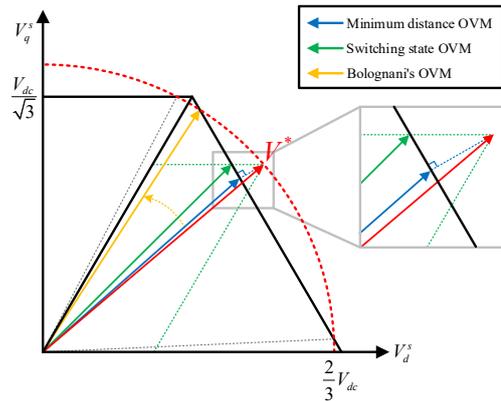


그림1 과변조 기법 별 출력 전압 지령
 Fig.1 Output voltage commands by modulation techniques

시작된다. 그림1은 전압 지령 V^* 에 대한 과변조 기법 중 최소거리 과변조, 스위칭 상태 유지 과변조, 그리고 bolognani's 과변조 기법을 적용 시 출력 전압 지령을 나타낸다.

2.1 과변조 기법의 구현 [2],[3]

2.1.1 최소거리 과변조 기법

최소거리 과변조 기법은 지령 전압 벡터와의 크기 오차를 최소화하도록 새로운 지령 전압 벡터를 설정하는 기법이다. 지령 전압 벡터가 육각형 변과 수직으로 교차하는 지점을 새로운 지령 전압으로 사용하며, 극전압을 $V_{dc} / 2, -V_{dc} / 2$ 사이의 값으로 제한하는 방식을 통해 간단히 구현할 수 있다.

2.1.2 스위칭 상태 유지 과변조 기법

극전압의 차이는 곧 스위칭 상태의 유지구간을 의미하므로, 스위칭 상태를 최대로 유지한다는 것은 곧 3상 지령 극전압의 차이 중 큰 쪽을 최대한 유지시켜준다는 것 과 동일하다. 스위칭 상태 유지 과변조는 상전압의 중간치와 최대치, 중간치와 최소치의 차이를 각각 비교하여 각각의 경우에 극전압을 $V_{dc} / 2, -V_{dc} / 2$ 로 위치시켜 구현할 수 있다.

2.1.3 Bolognani's 과변조 기법

Bolognani's 과변조는 지령 전압 벡터의 크기가 육각형 범위를 벗어나는 경우 지령전압 벡터와 크기가 같고, 위상 오차는 가장 작은 전압 벡터를 설정한다. 그림 2는 Bolognani's 과변조 기법을 나타낸다. 전압 지령 원과 육각형이 만날 경우, 각 교점

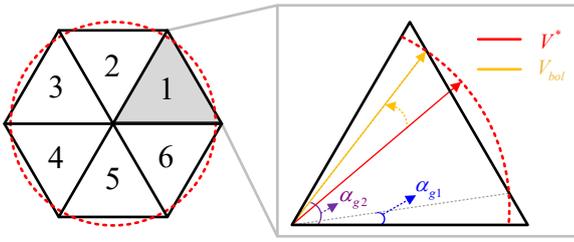


그림2 Bolognani's 과변조 기법
Fig.2 Bolognani's overmodulation method

과 이루는 각을 α_{g1} , α_{g2} 라고 정의한다. 이 때 전압 지령을 더 가까운 교점이 있는 곳으로 설정함으로써 과변조 기법을 구현할 수 있다. 이 기법은 6-스텝까지의 전환이 선형적으로 이루어져, 순시 토크 제어를 위한 벡터 제어의 수행이 용이해진다.

3. 모의실험 결과 및 분석

NVH 특성 중 진동 성분과 밀접한 관련이 있는 토크 리플을 분석하기 위해 PSIM 프로그램을 사용하여 모의실험을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용한 시스템 제정수는 표 1과 같으며, 캐리어 기반 PWM 설정을 적용하였다. 그림 3(a)-3(c)는 MI 가 1.05일 때 과변조 기법에 따른 극전압 파형을 나타낸다. 최소거리 과변조 기법의 경우 일반적인 SVPWM의 과변조 영역에서의 극전압 파형과 동일하게 나타나게 되고, 스위칭 유지 과변조 기법은 극전압을 $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ 에 위치하게 함으로써 스위칭 상태를 최대한 유지시키는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 Bolognani's 과변조 기법에서는 지령전압벡터의 원계적과 6각형의 교차점이 존재하게 되어 그림 3(c)와 같은 극전압 파형이 나타나게 된다.

토크 리플의 분석 결과는 그림 4에 나타난다. 최소 거리 과변조 기법, 스위칭 상태 유지 과변조 기법, Bolognani's 과변조 기법을 적용하였을 때 토크 리플은 각각 0.801Nm, 0.749Nm, 1.717Nm으로 측정되었다. Bolognani's 과변조를 적용하였을 때 토크 리플이 최대이고, 스위칭 상태 유지 과변조를 적용하였을 때 토크 리플이 최소임을 확인하였다.

과변조 기법을 적용할 경우 지령 전압 벡터의 크기와 위상에 변화가 발생한다. Bolognani's 과변조 기법은 지령 전압 벡터의 크기는 유지하지만, 모든 벡터를 육각형의 꼭짓점 부근으로 이동시켜 위상이 크게 달라지게 되어 과변조 기법들 중 토크 리플이 가장 크게 나타났다. 반면, 최소 거리 및 스위칭 유지 과변조 기법은 전압 지령 벡터의 크기와 위상이 모두 변하게 된다. MI 가 1.05일 때, 스위칭 유지 과변조는 최소 거리 과변조에 비해 전압 벡터의 크기와 위상의 변화가 더 적어 토크 리플이 가장 작게 나타났다. 과변조 기법에 따른 토크 리플 크기를 비교함으로써 실제 전동기에서 발생하는 NVH 특성 중 하나인 진동 성분의 크기를 유추할 수 있다.

표 1 모의 실험 제정수

Table 1 Simulation parameters

MI	1.05	V_{dc}	200V
T_e	40 N·m	C_{dc}	580 μ F
ω_{rpm}	2000 rpm	F_{sw}	12 kHz
$Pole$	8	T_s	83.3 μ sec

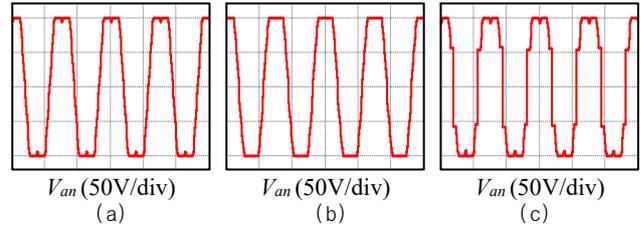


그림 3 과변조 기법에 따른 극전압 파형 (a) 최소거리 과변조, (b) 스위칭 유지 과변조, (c) Bolognani's 과변조

Fig. 3 Pole voltage waveform with (a) Minimum distance OVM, (b) Switching state OVM, and (c) Bolognani's OVM

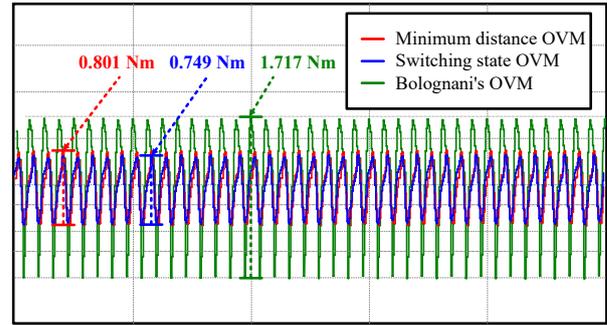


그림 4 모의 실험을 통한 과변조 기법 별 출력 토크 파형

Fig.4 Simulation results of output torque waveform by overmodulation methods

4. 결론

본 논문은 여러 과변조 기법들 중 최소거리 과변조, 스위칭 상태 유지 과변조, 그리고 bolognani's 과변조 기법의 NVH 특성을 비교 분석하였다. NVH 특성 중 진동 성분과 가장 밀접한 관련이 있는 토크 리플 분석을 위해 PSIM 프로그램에서 모의 실험을 진행하였다. 모의 실험 결과, 스위칭 상태 유지 과변조 기법이 0.749Nm의 가장 낮은 토크 리플을 보였다. 향후 이 결과를 실제 전동기 실험을 통한 NVH 측정 데이터와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증할 예정이다.

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 20210501010020)과 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(C230027, 부품국산화개발 지원사업)

참고 문헌

- [1] N. Nakao and K. Akatsu, "Suppressing Pulsating Torques: Torque Ripple Control for Synchronous Motors," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 20, no. 6, pp. 33-44, Nov.-Dec. 2014, doi: 10.1109/MIAS.2013.2288383.
- [2] 정대웅. "옴셋 전압에 의한 3상 전압형 인버터 PWM 방법의 일반적 해석." 국내 박사 학위논문 서울대학교 大學院, 2000.
- [3] S. Bolognani and M. Zigliotto, "Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 2, pp. 525-530, March-April 1997, doi: 10.1109/28.568019.