

자동차 전자식 조향장치용 PMSM 구동 시스템의 신속한 동적해석을 위한 비선형 인버터 모델 개발

최진철, 이우택, 홍정표

국립창원대학교 대학원, 국립창원대학교 제어계측공학과, 한양대학교 자동차공학과

Development of Nonlinear Inverter Model for Fast Dynamic Analysis of Electric Power Steering with PMSM Drive System

Chinchul Choi, Wootiak Lee

Graduate School of Changwon National University, Dept. of Control and Instrumentation, Changwon National University, Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - A circuit-domain model of PWM inverter provides accurate simulation results in consideration of detail switching characteristics. Although, a huge amount of computation time is demanded for the simulation results of several ten seconds, which is the required time to analyze system behaviors or control performances of Electric Power Steering(EPS) on real drive condition. This paper describes the nonlinear inverter model for fast dynamic simulation of EPS without the PWM concept through analyzing the effect of nonlinear switching characteristics like dead time, forward voltage drop and conduction resistance. Some inverter models including proposed model are compared from two standpoints which are computation time and accuracy. The comparison results show the usefulness of the developed model in order to develop the control algorithm through the fast prediction of system behaviors.

1. 서 론

전자식 조향장치(Electric Power Steering : EPS)는 전동기의 동력으로 운전자의 조향을 조력하는 장치로서 기존의 유압식 조향장치에 비해 공간적, 친환경적 그리고 에너지 효율 측면에서 많은 이점을 가지기 때문에 활발한 연구가 진행 중이며, 이미 실차에 많이 적용되고 있다[1]. 또한 PMSM 구동 시스템은 높은 에너지 밀도, 유지보수의 용이성, 넓은 운전범위 등 많은 장점으로 인해 EPS를 비롯한 많은 여러 자동차 제어 시스템에 적용되고 있다[2]. 하지만 이러한 전자 장치의 도입은 자동차 제어 시스템의 더욱 복잡하게 하는 원인이 되어, 시스템 해석의 어려움을 증가시키고 있다.

PSIM 등 여러 시뮬레이션 툴을 이용한 전기회로 기반의 정밀한 인버터 모델은 시스템 특성에 있어 인버터가 미치는 영향의 정밀분석 가능하지만, EPS 등 자동차 응용분야에 있어 실제 운전 조건을 고려하여 시스템의 특성을 파악하기 위해서는 수십 초 또는 그 이상의 시뮬레이션 결과가 필요하고, PWM 신호를 시뮬레이션하기 위해서는 PWM주기 보다 적어도 100배 이상의 빠른 샘플링 시간이 필요하기 때문에 결과를 얻기까지 상당한 시간을 요구한다.

이에 본 논문에서는 인버터의 비선형 스위칭 특성을 분석하고, 빠른 시간 내에 전체 시스템의 동적 해석이 가능하도록 MATLAB/Simulink를 이용한 인버터 모델을 개발하고 그 결과를 다른 모델 및 실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 인버터의 스위칭 특성 분석

스위칭의 특성에 따른 PWM 출력 펄스의 시간 축과 전압 축에 미치는 영향을 분석하였다.

2.1.1 시간 축 분석

인버터의 한 브릿지의 상위 스위치와 하위 스위치가 동시에 도통하여 단락되는 현상을 방지하기 위하여 <그림 1>의 (a)와 같이 dead time이라 불리는 시간 지연을 삽입하게 된다. 이 dead time 구간에서는 부하에 흐르는 전류의 방향에 따라 그 출력 전압이 증가 또는 감소하게 된다. 따라서 평균적으로 식(1)과 같이 전압 변화를 가지게 되며, 그 부호는 전류와 반대이며, 위상은 전류와 동일한 <그림1>의 (b)와 같다.

$$\Delta V = \frac{MT_d}{T} V_d \quad (1)$$

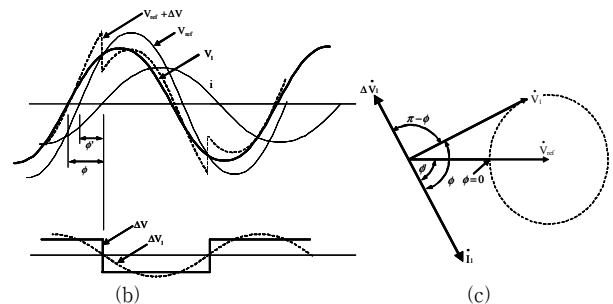
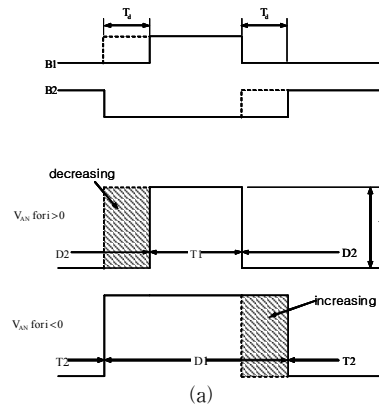
여기서, V_d : DC 링크 전압, T_d : Dead time

M : 출력 전압 한주기의 스위칭 횟수

T : 출력 전압의 한주기

<그림 1>의 (b)와 (c)는 dead time에 의한 전압 변화가 인버터 출력

전압의 기본과 성분에 미치는 영향을 보여준다[3].

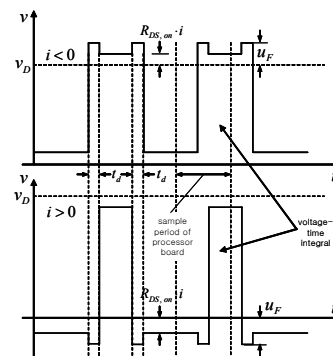


<그림 1> Dead time에 따른 인버터 출력 전압의 기본과 성분 변화

2.1.2 전압 축 분석

<그림 2>는 스위칭 소자의 도통 시 저항, R_{on} 과 dead time 구간에서 다이오드 도통 시의 순방향 전압 강하, V_{drop} 이 인버터 출력 전압에 미치는 영향을 나타내고 있다. V_{drop} 에 의해 dead time 구간에서 전류의 방향에 따른 증가 또는 감소한 면적이 증가 되고, R_{on} 흐르는 전류 i_{phase} 에 의한 전압강하를 고려하여 식(1)을 다시 정리하면 식(2)과 같다.

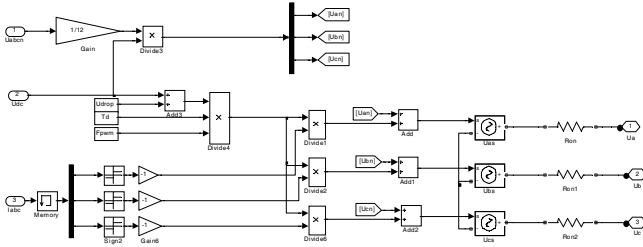
$$\Delta V = \frac{MT_d}{T} (V_d + V_{drop}) + (i_{phase} \times R_{on}) \quad (2)$$



<그림 2> R_{on} , V_{drop} 의 영향

2.2 인버터 모델 구현

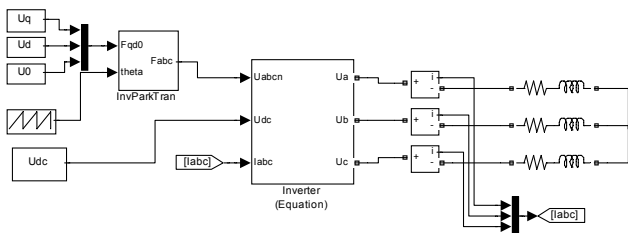
<그림 1> 과 식(2)을 바탕으로 비선형 인버터 모델을 구현하였다. 제어 공학 및 시스템 공학에서 많이 사용되는 그래픽 기반의 시뮬레이션 툴인 MATLAB/Simulation을 이용하여 구현함으로써 모델의 재사용성 및 호환성을 가지도록 하였다.



<그림 3> 제안된 비선형 인버터 모델

2.3 시뮬레이션 및 실험결과

개발된 인버터 모델의 검증은 위해 RL 부하 시 출력 전압을 시뮬레이션 할 수 있도록 <그림 4>와 같이 구성하였고, <표 1>의 시뮬레이션에 필요한 파라미터 목록과 그 값이다.

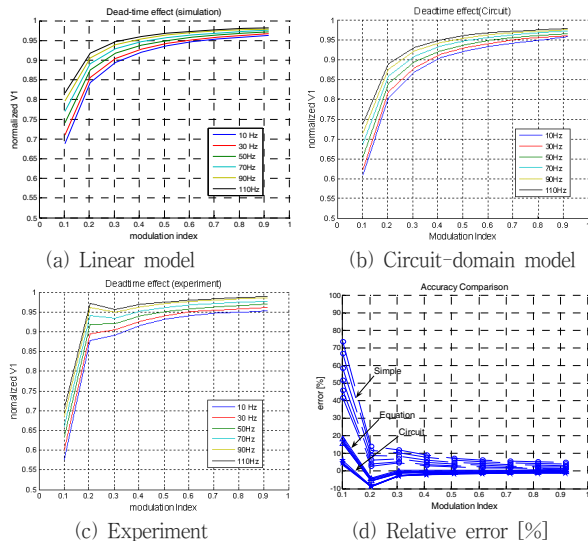


<그림 4> 시뮬레이션 및 실험 결과

<표 1> 파라미터 목록

Symbol	Description	Value	Unit
R_a	Load Resistance	0.95	Ω
L_a	Load Inductance	2.64	mH
T_{dead}	Dead time	1	μs
T_{pwm}	PWM Period	62.5	μs
R_{on}	Conducting Resistance	2.4	$m\Omega$
V_{drop}	Diode Forward Voltage drop	0.84	V

전기회로 기반의 인버터 모델, 선형 인버터 모델 그리고 본 논문에서 개발된 인버터 모델의 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과와의 비교를 <그림 5> 나타내었다. 본 논문에서 제안한 인버터 모델은 PWM의 변조지수 (Modulation Index : MI)가 0.3 이하의 낮은 영역을 제외하고는 실제 실험과 매우 유사한 출력 전압의 기본과 성분을 가진을 알 수 있다.



<그림 5> 인버터 기본과 출력 전압 비교 (시뮬레이션 및 실험 결과)

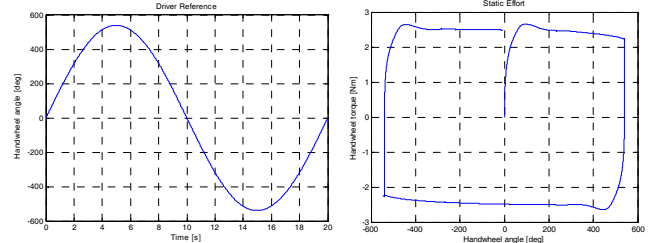
<표 2>는 여러 전기회로 기반의 인버터 모델, 선형 인버터 모델 및 제안된 인버터 모델을 이용하여 1초를 시뮬레이션 할 때 소요되는 계산 시간과 출력전압의 기본과 성분을 비교한 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 CPU는 Intel(R) Core(TM)2 CPU 6400 @2.13GHz 이다.

<표 2> 시뮬레이션 시간 및 출력전압의 기본과 성분 정확도 비교

Sort	Modeling Tool	Time (Sampling Time)	Error [%]	
			Avg.	Max.
Linear	Simulink only	1.282 Sec (6.25 μs)	10.6 %	73.6%
Circuit	Simulink & PSIM	2740.828 Sec (6.25 μs)	1.1%	6.0%
	Simulink & SimPowerSystems	1056.110 Sec (0.0625 μs)		
Proposed	Simulink only	2.203 Sec (0.0625 μs)	1.4%	19.4%

개발된 인버터 모델을 PMSM 구동 시스템을 가지는 칼럼 조력형 조향장치 (Column-assist EPS)의 시스템 모델[5]에 삽입하여 여러 가지 시스템의 특성을 분석하고, 제어 알고리즘의 검증이 가능하다.

<그림 6>은 그 예로써, 운전자의 조향입력에 따른 PMSM이 조력하는 토크의 크기의 변화를 나타낸 그래프이다.



(a) Drive Input

(b) Assist motor torque

<그림 6> EPS 시스템 시뮬레이션 결과

3. 결 론

인버터의 비선형 스위칭 특성을 분석하고 이를 토대로 인버터 모델링을 수행하였다. MATLAB/Simulink를 이용하여 구현된 모델은 기존의 다른 모델과의 호환성 및 재사용성이 높다.

여러 전기회로 기반의 인버터 모델, 선형 인버터 모델 등과 함께 시뮬레이션에 필요한 계산 시간을 비교하였고, 실제 실험결과와 출력전압의 기본과 성분을 비교하여 그 정확성을 판단하였다.

그 결과 고조파에 의한 영향 및 다른 상세한 스위칭 특성을 해석할 수는 없지만 빠른 시간 내에 기본과 성분에 의한 전체 시스템의 특성을 비교적 정확히 파악할 수 있어 제어알고리즘 개발 및 시스템 개발의 용이함을 보였다.

추후 변조지수(MI)가 낮은 영역에서의 오차원인을 분석 후 모델의 정밀도를 보완할 것이다.

이 논문은 2006년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. Gene Liao, H. Isaac Du, "Modeling and analysis of electric power steering system and its effects on vehicle dynamic behavior", Int. J. of Vehicle Automotive Systems(IJVAS), Vol. 1, NO. 2. pp. 153-166, 2003.
- [2] Dave Wilson, "Electric power steering: one good turn deserves another", "Bush: NO quick energy fix" Associated Press article, The Arizona Republic, pp1, A9, Thursday, April 28, 2005.
- [3] Seung-Gi Jeong, Min-Ho Park, "The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters", IEEE Transaction on Ind. Elec., Vol. 38, No.2 pp. 108~114, 1991.
- [4] 최진철, 박성호, 이우택, "표면 부착 영구자석형 전동시스템의 성능 해석을 위한 Simulink 모델개발", 대한전기학회 제37회 하계학술대회 논문집, B권, 625~626, 2006.
- [5] Chinchul Choi, Wootaik Lee, Jung-Pyo Hong, SeongJoo Kim, JaeGoo Kim, JunGyu Song, JunNam Oh, "Multi-domain modeling of Electric Power Steering with PMSM Drive System", IEEE IEMDC2007, , SS2-3, 2007.