

자동차용 전동시스템 해석을 위한 평균값 인버터 모델 개발

최진철¹⁾ · 배규태¹⁾ · 이우택^{*2)}

창원대학교 제어계측공학과 대학원¹⁾ · 창원대학교 제어계측공학과²⁾

Development of Average Inverter Model for Analysis of Automotive Electric Drive System

Chinchul Choi¹⁾ · Kyutae Bae¹⁾ · Wootaik Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School, Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea

²⁾Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea

(Received 11 September 2009 / Accepted 19 April 2010)

Abstract : A detailed circuit level model requires a small sampling time to represent high frequency switching behaviors with proper resolution. The small sampling time leads a large execution time to obtain the system analysis results. As the alternative of the detailed circuit model, an averaged PWM switch model was proposed for the rapid system level analysis. There exists a voltage distortion between the reference and output voltage because of non-ideal switching characteristics, such as the dead-time, diode forward voltage drop and conduction resistance. This paper analyzed causes and effects of the voltage distortion. The average inverter model, which reflecting this voltage distortion, is developed for the rapid and accurate analysis of automotive electric drive system in MATLAB/Simulink environment. The rapidity and accuracy of the proposed inverter model is proved through comparison between simulation and experiment.

Key words : Permanent magnet synchronous motor(영구자석 동기 전동기), Inverter(인버터), Model(모델), Simulation(시뮬레이션), PWM(펄스폭변조)

1. 서론

영구자석 동기전동기(PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor)는 그 효율성과 성능이 입증됨에 따라 많은 산업분야에 적용되고 있으며, 고성능의 운전 요구사항을 만족하기 위해서 전동기 자체만이 아닌 전동기 및 제어기, 전력변환 장치 등을 통합한 전동 시스템의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.¹⁾

회로 시뮬레이션 프로그램을 이용한 전기회로 기판의 정밀한 PWM 인버터 모델은 시스템 특성에 있어 인버터가 미치는 영향의 정밀한 분석이 가능하

지만 자동차 응용분야에 있어 실제 운전 상황을 고려하여 시스템의 특성을 파악하기 위해서는 수십 초 또는 그 이상의 시뮬레이션 결과가 필요하고 PWM 신호를 시뮬레이션 하기 위해서는 PWM 주파수를 고려한 빠른 샘플링 주파수가 필요하기 때문에 결과를 얻기 까지 상당한 시간을 요구한다.²⁾

보다 빠른 해석 결과를 얻기 위해 PWM 인버터의 평균값을 이용하여 기본파 성분만을 고려한 모델링 및 시뮬레이션 기법이 소개되었다.³⁾ 하지만 데드타임(dead-time)을 비롯한 비이상적 스위칭 특성들에 의해 전압 지령치와 실제 출력전압은 차이를 가지게 된다.⁴⁾ 특히 자동차용 전동 시스템은 저전압, 고

*Corresponding author, E-mail: wootaik@changwon.ac.kr

전류 시스템이기 때문에 작은 전압 변화에도 출력 변화가 매우 민감하다.

본 논문에서는 인버터의 스위칭 특성 분석을 통해 MATLAB/Simulink를 이용한 평균값 인버터 모델을 개발하고, 다른 모델 및 실험 결과와 비교하여 빠른 시간 내에 정확한 시스템 성능 분석이 가능함을 증명하였다.

2. 인버터 스위칭 특성 분석

2.1 Dead-Time 영향 분석

실제 스위칭 소자는 유한한 턴 온과 오프 시간을 가지게 된다. 인버터의 한 브릿지의 위와 아래의 스위치가 동시에 도통되는 것을 막기 위해 데드타임이라 불리는 시간 지연을 삽입하게 된다. 이 데드타임 구간에서는 부하에 흐르는 전류의 극성에 따라 그 출력 전압이 증가 또는 감소하게 된다. 평균적으로 식 (1)과 같은 전압 변화를 가지게 된다.

$$\Delta U_{dead} = \frac{T_d}{T_{pwm}} U_{dc} \quad (1)$$

where T_d : dead-time, T_{pwm} : pwm period,
 U_{dc} : nominal dc bus voltage

Fig. 1은 3상 인버터 중 한 상의 회로를 나타내었다. Fig. 2는 Fig. 1 회로에 데드타임이 적용된 스위칭 신호와 전류의 극성에 따른 데드타임의 영향을 나타내었다.

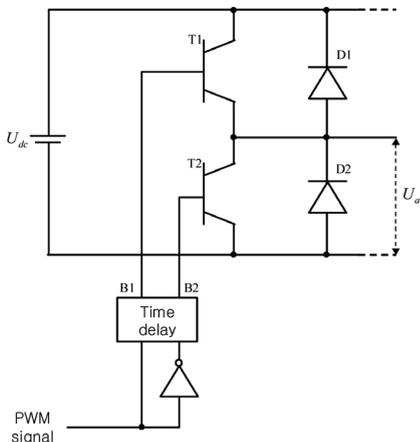


Fig. 1 The circuit of one inverter leg

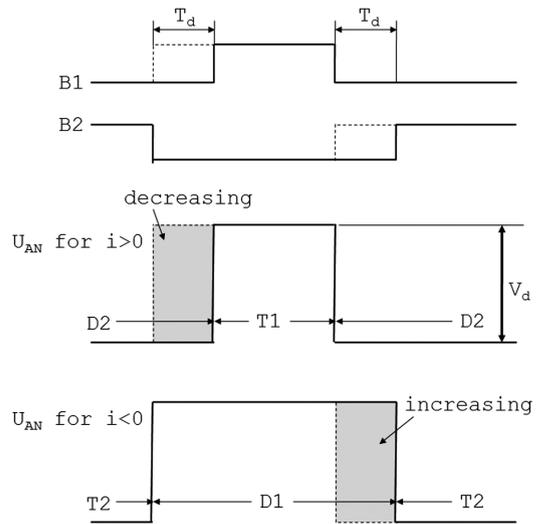


Fig. 2 The dead-time effect of one inverter leg

Fig. 3에서 U_{ref} 는 데드타임이 없을 때 이상적인 출력 전압을 나타내며, 전류 i 는 위상 ϕ 만큼 뒤쳐져 흐른다. ΔU_{dead} 는 데드타임에 의한 출력 전압의 변화량으로 전류의 극성과 반대 극성을 가지게 된다.

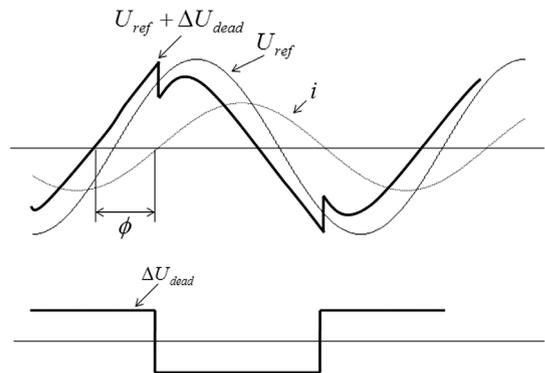


Fig. 3 The voltage deviation according to the dead-time

Fig. 4의 페이지 도에서 데드타임에 의한 출력 전압의 변화량 ΔU_{dead} 의 기본과 성분인 ΔU_1 은 전류 I_1 과 방향이 반대이고 그 크기는 데드타임의 크기에 의해 결정된다. 따라서 실제 인버터의 출력 전압 U_1 은 원하는 출력 전압 U_{ref} 와 ΔU_1 의 페이지 합에 의해 결정되게 되고, 전압 전류의 위상각 ϕ 에 따라 그 영향이 달라짐을 알 수 있다.

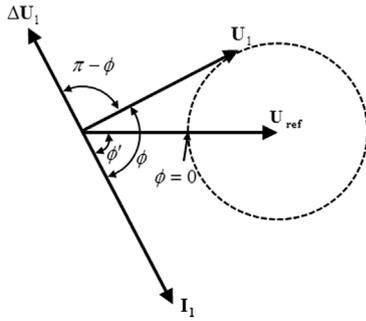


Fig. 4 The phasor diagram of fundamental voltage of inverter

2.2 FET 및 다이오드의 도통 특성 영향 분석

스위치의 도통이 MOSFET를 통해서인지 또는 다이오드인지에 따라 특성이 아래 두 가지 형태로 나타난다.

- 다이오드 순방향 전압강하(Diode forward voltage drop) U_{fw}
- MOSFET 도통 저항(MOSFET conduction resistance) R_{on}

일반적인 경우 MOSFET를 통해서 도통될 때는 전류량과 비례하여 도통 저항 R_{on} 을 통해서 전압 변화량 $\Delta U_{R_{on}}$ 이 발생하며, 데드타임 구간에서 다이오드를 통해 도통될 때는 다이오드의 순방향 전압강하 U_{fw} 만큼 전압변화 ΔU_{fw} 가 발생하게 되며 식(2), (3)으로 표현된다.

$$\Delta U_{fw} = \frac{T_d}{T_{pwm}} 2 \cdot U_{fw} \cdot \text{sgn}(i) \quad (2)$$

$$\Delta U_{R_{on}} = \left(1 - \frac{T_d}{T_{pwm}}\right) R_{on} \cdot i \quad (3)$$

Fig. 5는 ΔU_{fw} , $\Delta U_{R_{on}}$ 을 고려한 실질적인 인버터의 출력 파형을 나타내고 있다. 전류의 극성 및 스위칭 상태에 따라 6가지 모드로 나누어지는 출력전압의 형태가 결정된다. Fig. 6은 6가지 모드에서의 인버터 한 상에 대한 등가회로의 변화를 보여준다.

2.3 인버터 출력 전압 변화

데드타임, MOSFET의 도통 저항, 다이오드의 순방향 전압 강하를 고려한 인버터 출력 전압은 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

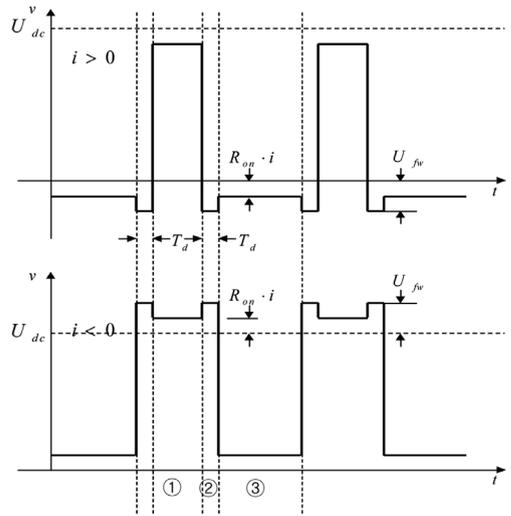


Fig. 5 The real signal of PWM switching

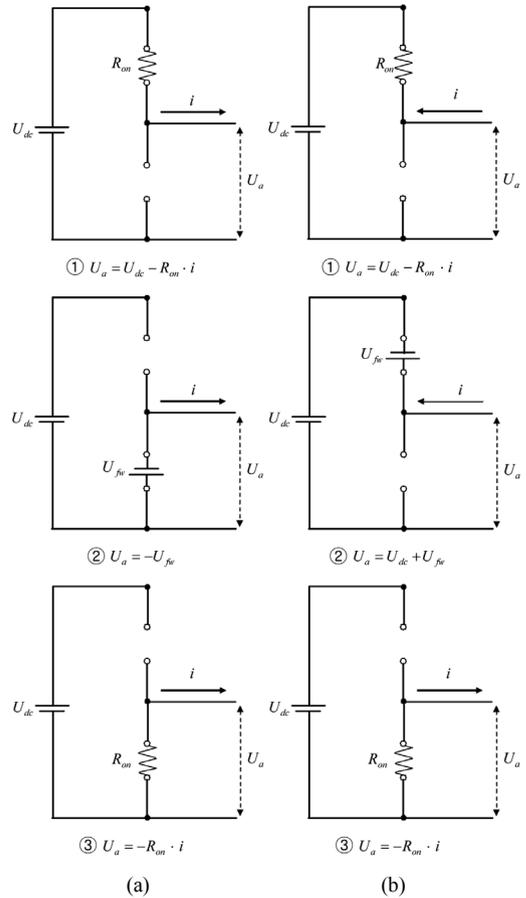


Fig. 6 The equivalent circuit of inverter according to switching mode when (a) positive current (b) negative current

$$U_{eff} = U_{ref} - \Delta U \quad (4)$$

where U_{eff} : 실제 인버터 출력 전압

$$\Delta U = \Delta U_{dead} + \Delta U_{fsw} + \Delta U_{R_{on}} \quad (5)$$

3가지 특성에 따른 전압변화 ΔU 를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있고, 여기서, $(1 - T_d / T_{pwm})$ 을 다이오드의 도통 저항을 감안하면 1로 근사화 하여 최종적으로 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Delta U = \left(\frac{T_d}{T_{pwm}} U_{dc} + \frac{T_d}{T_{pwm}} 2 \cdot U_{fsw} \right) \cdot sgn(i) + R_{on} \cdot i \quad (6)$$

3. 모델 구현

제어 공학 및 시스템 공학에서 널리 사용되는 시뮬레이션 툴인 MATLAB/Simulink을 이용하여 구현함으로써 모델의 재사용성 및 호환성을 가지도록 하였다.⁵⁾ 개발된 평균값 인버터 모델은 Fig. 7과 같다.

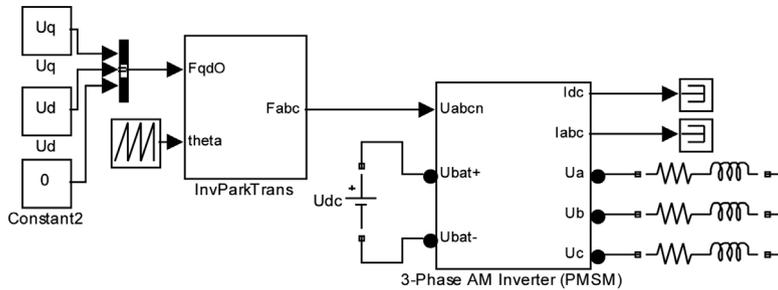


Fig. 7 The inverter model with passive R-L load

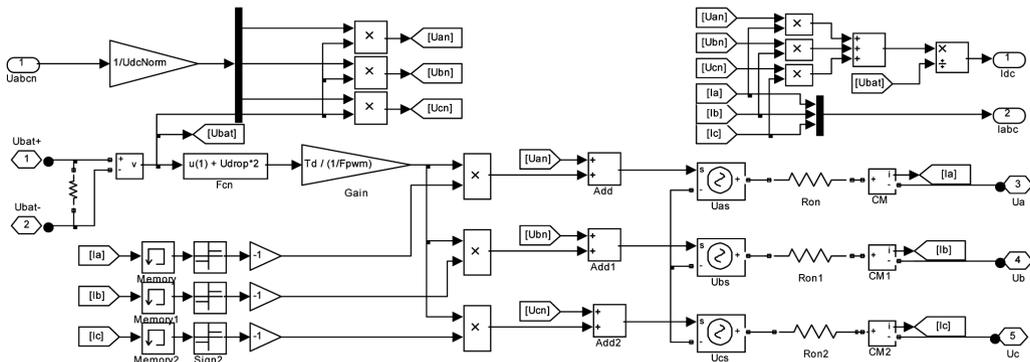


Fig. 8 Internal description of proposed inverter model

Fig. 8은 식 (4), (6)을 이용하여 Simulink 로 구현된 평균값 인버터 모델의 내부 구성이다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 인버터 모델 정밀도 분석

저항(0.11Ω)과 인덕터(4.35mH)로 이루어진 수동 소자를 부하로 사용하여 인버터 모델을 검증하였다. 인버터 모델에 사용된 파라미터는 Table 1과 같다.

기본과 인버터 모델, 회로기반의 PWM 인버터 모델 및 제안된 평균값 인버터 모델의 입출력 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과를 비교하여 모델들의

Table 1 The parameter of inverter model

Symbol	Value	Unit
U_{fsw}	0.84	V
R_{on}	2.4	mΩ
T_{pwm}	62.5	μSec
T_d	1	μSec
U_{dc}	12	V

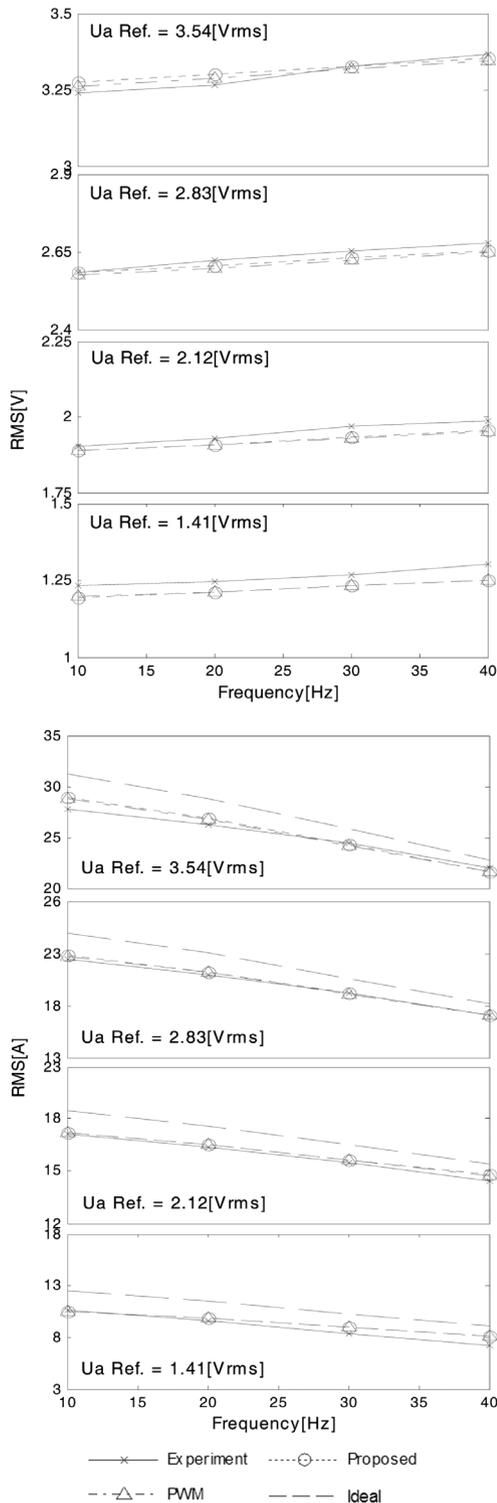


Fig. 9 Inverter output according to the reference frequency

Table 2 Comparison of model accuracy

Model	Execution time (Sampling time)	Error[%]	
		Avg.	Max.
Ideal	1.077 Sec (6.25 μ Sec)	10.93	26.22
Circuit (PWM)	521.294 Sec (0.0625 μ Sec)	2.0	11.57
Proposed (AM)	1.612 Sec (6.25 μ Sec)	2.1	11.72

※ CPU : 인텔 코어2쿼드 Q9300 @ 2.5GHz, RAM : 4GB

정밀성을 비교하였다. 또한, 1초간 시뮬레이션 하기 위해 걸린 시간을 모델에 따라 비교하였다.

Fig. 9의 결과를 보면 주파수 증가에 따라 실제 기본파 출력전압이 변화함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 설명한 것과 같이 R-L 부하에서 주파수 증가에 따른 위상각 ϕ 이 커지고 출력 전압이 커지게 되는 것을 확인할 수 있다.

Table 2는 3가지 인버터 모델의 실행 시간을 나타내었으며, 실제 실험 결과와 비교한 각 인버터 모델의 오차(Error)를 나타내었다.

비교 결과 본 논문에서 제안된 평균값 인버터 모델은 고주파에 의한 영향 및 다른 상세한 스위칭 특성을 해석 할 수는 없지만 빠른 시간 내에 기본파 성분에 의한 전체 시스템의 특성을 비교적 정확히 파악할 수 있다는 것을 증명하였다.

4.2 PMSM 구동 시스템 특성 해석 결과

PMSM 구동 시스템 실험과 시뮬레이션을 통해 PMSM의 전 구동 범위에서 제안된 평균값 인버터 모델의 정밀도를 검증하고 수 초 이상의 시뮬레이션 시간을 필요로 하는 PMSM 구동시스템을 포함한 자동차 응용 시스템의 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 성능을 확인하였다.

Table 3은 실험에 사용된 PMSM의 파라미터를 나타내었다. Photo. 1은 실제 PMSM 구동 실험 환경이다.

4.2.1 속도-토크 특성 곡선

PMSM 구동 시스템의 성능을 말해주는 기본 지표로 사용되는 속도-토크 특성 곡선을 실험 및 시뮬레이션으로 획득하여 개발된 평균값 인버터 모델을

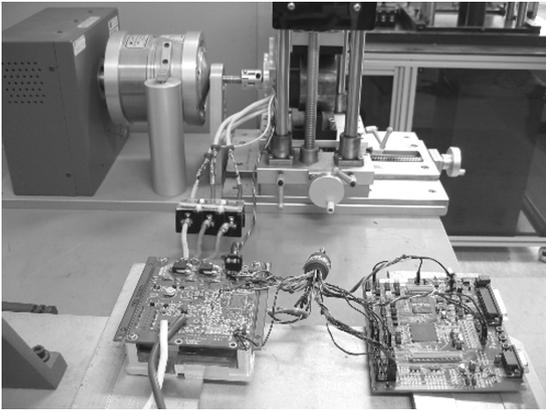


Photo. 1 Experimental environments

Table 3 List of Parameters for PMSM

Symbol	Description	Value	Unit
R_a	Phase resistance	8.4	$m\Omega$
R_l	Line resistance	1.9	$m\Omega$
L	Self inductance	32	μH
M	Mutual inductance	15.1	μH
Ψ_m	Back EMF constant	9.81	$V/(\text{rad/s})$
B_m	Friction coefficient	0.0005	$\text{Nm}/(\text{rad/s})$
J_m	Moment of inertia	0.0001	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

검증하였다. Fig. 10을 분석한 결과 회로기반의 PWM 인버터 모델과 제안된 평균값 인버터 모델 모두 실험치와 매우 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

하지만 효율을 분석한 (d) 그림에서 경부하시 제안된 평균값 인버터 모델의 정밀도가 떨어지는 것을 확인할 수 있는데 이는 경부하, 즉 매우 작은 양의 전류가 흐를 때, 데드타임 구간에서 인덕턴스에 의한 전류의 영속성을 확보할 수 없기 때문이다.

4.2.2 시스템 응답 특성 해석

응용 시스템은 선행 연구로 개발 되어진 컬럼 어시스트 전동조향장치(EPS : Electric Power Steering) 시스템 모델⁶⁾에서 회로기반의 PWM 인버터 모델 및 제안된 평균값 인버터 모델을 적용하여 비교 분석하였다.⁷⁻⁹⁾

조향부의 전 회전 범위를 100[deg/sec] 속도로 회전하는 과정을 시뮬레이션을 통하여 예측하고 실험을 통해 확인하였다.

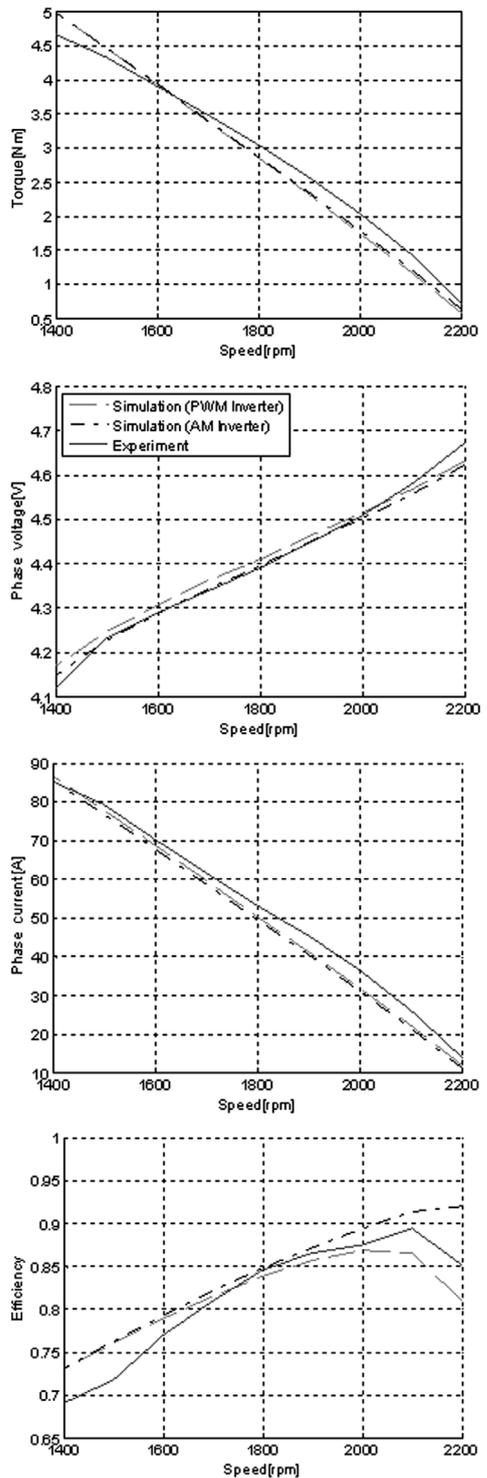


Fig. 10 The characteristic curve when (a) N-T, (b) N-V, (c) N-I, (d) N-η

Fig. 11의 (a), (b)는 실험 결과이고 (c), (d)는 시물레이션 결과이다. (a), (c)는 운전자가 조향토크를 나타내는 컬럼 축에 장착된 토션바의 상대 비틀림각 (relative angle)에 따라 어시스트하는 모터 출력 토크를 나타낸다. 상대 비틀림각이 일정 각 이상일 경우 모터 토크는 더 이상 증가하지 않음을 확인할 수 있다. (b), (d)는 같은 상황에서 모터 출력 전류의 RMS 값을 나타내었다. 모든 데이터는 규준화한 값이다.

Table 4는 4.1절에서 낮은 정밀도를 보인 기본과 인버터 모델을 제외한 회로기반의 PWM 인버터 모델과 제안된 평균값 인버터 모델의 시물레이션 시간을 나타내었다.

회로기반의 PWM인버터 모델과 제안된 평균값 인버터 모델의 시물레이션 시간을 비교한 결과를

Table 4 Comparison of EPS system model simulation time

Model	Simulation time (Sampling time)
Circuit (PWM)	4584.8 Sec (0.0625 μ Sec)
Proposed (AM)	15.82 Sec (6.25 μ Sec)

보면 시스템 레벨의 해석에서 회로기반의 PWM 인버터 모델에 비해 빠른 시간 내에 비교적 정확한 시물레이션 결과를 얻을 수 있었고 이를 통해 시스템 개발 과정의 효율을 높일 수 있음을 증명하였다.

5. 결론

데드타임, 다이오드 및 FET의 비이상적 스위칭

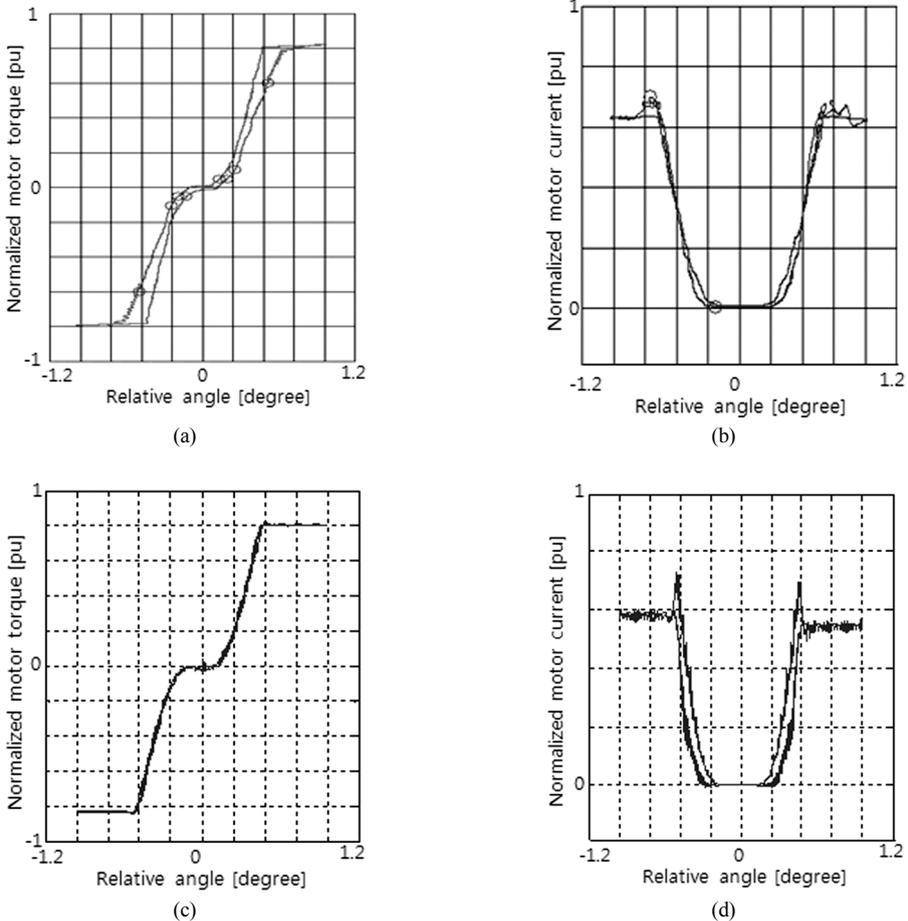


Fig. 11 EPS system simulation & experiment result

특성에 의한 출력전압의 변화량을 해석하고 이를 반영할 수 있는 평균값 인버터를 모델링하고 MATLAB/ Simulink를 환경에서 구현하였다.

전기회로 기반의 PWM 인버터 모델, 기본과 인버터 모델 등과 함께 시뮬레이션에 필요한 실행 시간을 비교하였고, 실제 실험결과와 출력 전압의 기본과 성분을 비교하여 그 정확성을 판단하였다.

개발된 인버터 모델을 이용하여 PMSM 구동 시스템 및 컬럼 어시스트 타입의 EPS 시스템의 성능을 분석해본 결과 빠른 시간 내에 전체 시스템의 특성을 비교적 정확히 파악할 수 있어 제어 알고리즘 개발 및 시스템 개발의 용이함을 확인하였다. 고조파에 의한 영향 및 다른 상세한 스위칭 특성을 해석하고자 할 때는 PWM 인버터 모델을 이용하여 해석할 수 있다.^{2,6)}

EPS 시스템과 같은 전동기를 이용한 전자장치의 증가 그리고 전기 자동차와 하이브리드 자동차 개발이 활발해 짐에 따라 인버터를 필요로 하는 시스템이 늘고 있어 개발된 인버터 모델을 적용하여 빠른 시간 내에 시스템의 특성을 파악하여 개발 과정의 효율을 높일 수 있다.

후 기

이 논문은 2009~2010년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) D. Wilson, "Electric Power Steering : One Good Turn Deserves Another," "Brush : No Quick Energy Fix," Associated Press Article, The Arizona Republic, A9, p.1, 2005.
- 2) N. Mohan, W. P. Robbins, T. M. Undeland, R. Nissen and O. Mo, "Simulation of Power Electronic and Motion Control Systems-An Overview," Proceedings of the IEEE, Vol.82, No.8, pp.1287-1302, 1994.
- 3) R. J. Kerkman, B. J. Seibel, D. M. Brood, T. M. Rowan and D. Leggate, "A Simplified Inverter Model for On-line Control and Simulation," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.27, No.3, pp.567-573, 1991.
- 4) S.-G. Jeong and M.-H. Park, "The Analysis and Compensation of Dead-time Effects in PWM Inverters," IEEE Trans. On Ind. Elec., Vol.38, No.2, pp.108-114, April 1991.
- 5) W. Hong, C. Choi, W. Lee, J. P. Hong and D. Kum, "Advanced Permanent Magnet Motor Drive Modeling for Automotive Application under Matlab/Simulink Environment," Int. J. Automotive Technology, Vol.10, No.4, pp.489-495, 2009.
- 6) C. Choi, W. Lee, J.-P. Hong, S. J. Kim, J. G. Kim, J. G. Song and J. N. Oh, "Multi-domain Modeling of Electric Power Steering with PMSM Drive System," 2007 IEMDC '07, IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Vol.2, pp.1355-1360, 2007.
- 7) K. Kim and C. Kim, "Analysis Process of a Steering System Using a Concept Model for Idle Vibration," Int. J. Automotive Technology, Vol.9, No.3, pp.337-346, 2005.
- 8) H. Kim, J. Ryu, H. Choi and H. Kim, "Effects of EPAS(Electric Power Assist Steering) Motor Torque Ripple on Steering Feel and Vehicle Turning Behavior," Spring Conference Proceedings, Vol.2, KSAE, pp.801-806, 2005.
- 9) J. Kim and J.-B. Song, "Control Logic Using Torque Map for a Column-Type Electric Power Steering System," Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.186-193, 2000.