

능동전력필터에 의한 전류형 인버터 구동 유도모터의 입력전류 및 토크맥동 보상

鄭榮國, 曹在延, 任永徹

Input Current/Torque Ripple Compensation of Current Source Induction Motor Drives Using Active Power Filters

Young-Gook Jung, Jae-Yun Cho, Young-Cheol Lim

요 약

PWM 모드로 동작하는 전류형 인버터(CSI)는 구형파 제어형 CSI에 비해 구조가 복잡하여 가격이 비싸지고 공진 발생 가능성이 크며 스위칭 손실, EMI 등에 의해 동작 효율이 낮다. 그러나 구형파 제어모드의 CSI는 출력전류에 저차 고조파가 다량으로 함유되어 있기 때문에 모터의 토크 맥동이 발생된다. 따라서 본 연구에서는 CSI 구동 유도모터의 토크 맥동을 감소하기 위해, CSI와 유도모터 사이에 능동전력필터를 설치하여 유도모터의 입력전류에 함유되어 있는 고조파 성분을 보상하는 시스템을 제안하였다. 고조파를 보상하기 위한 알고리즘으로는 연산과정에 전압이 필요치 않는 노치 필터법을 사용하였으며 PSIM 시뮬레이션에 의해 제안된 시스템의 타당성을 입증할 수 있었다.

ABSTRACT

Current Source Inverter(CSI), operated in square wave mode, is more efficient than the PWM CSI because of increased cost, greater complexity of control algorithm and substantial switching losses, EMI. But, the square wave output current of CSI, rich in low order harmonics produce motor torque ripples. Therefore, in this paper, describes active power filters for compensating square wave input current of current source induction motor. Also, notch filtering as compensation algorithm is employed. To confirm the validity of proposed system, PSIM simulation results are presented and discussed.

Key Words : Active Power Filters, Current Source Induction Motor Drives, Torque Ripple

1. 서 론

전력전자기술의 눈부신 발달은 모터의 속도 및 위치 제어장치의 혁신적인 변화를 가져왔고 현재 이들 장치들은 산업전반에 걸쳐 다양하게 응용되고 있다. 산업현장에 설치된 이들 모터 구동장치의 대부분은 유도모터를 제어하기 위한 것이며 소형은 서보제어용으로 그리고 대형은 동력발생 및 전달용으로 사용되고 있다.

그런데, 이들 모터구동장치들은 모터를 제어하기 위해서 교류를 직류로 변환하거나 또는 직류를 교류로

변환하게 된다. 이 과정에서 유도모터 구동장치의 입력교류 전류는 왜형과 위상이 지연되며 이는 관련 계통에 여러 가지의 악영향을 미치게 된다. 이 경우에 있어서 모터 구동장치의 입력 역률을 개선하기 위한 방법으로 모터 구동장치의 교류/직류 변환기에 입력교류 전류의 파형을 개선하는 역률 보상 기능을 추가하는 방법이 연구되고 있다.^[1,2] 또한 모터 구동장치와는 별도로 외부에 능동전력필터를 부착하는 방법도 있다.

이 방법은 모터 구동장치가 전압형이든 전류형이든 관계없이 사용 가능하고 또한 수동필터와의 병행으로

능동전력필터의 설치방식에 따라 고조파 및 무효전력을 다양하게 제어할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 모터 구동장치는 부착되는 모터의 제어특성 그리고 전력변환의 특성에 따라 전압형(VSI)과 전류형(CSI)으로 분류된다. VSI는 제작이 용이하고 범용모터에 적용 가능하기 때문에 산업현장에 많이 보급되어 있다. 한편 CSI는 환류 다이오드가 없고 전원 및 부하단락에 대해 강건하며, 양방향으로 전력을 전달할 수 있으며, 고응답이 요구되는 경우에 사용되고 있다.

이와 같은 CSI를 PWM모드로 동작하게 되는 경우, 제어 알고리즘이 우선 복잡해지고 출력 캐패시터와 부하 인덕턴스와의 공진이 발생 가능하며, EMI와 스위칭 손실등으로 인해 구형파 제어형 CSI에 비해 동작효율이 감소된다. 구형파 제어모드의 CSI는 출력전류에 저차 고조파가 다량으로 함유되어 있고 이와 같이 구형파 전류가 모터에 인가되는 경우, 심각한 토크 맥동이 발생된다.^[3, 4]

따라서 본 연구에서는 CSI구동 유도모터의 토크 맥동을 감소하기 위해 CSI와 유도모터 사이에 능동전력필터를 설치하여 모터 입력전류의 고조파 성분을 보상하는 시스템을 제안하였다. 고조파 보상 알고리즘으로는 전압검출이 필요치 않는 노치필터법^[5]이 사용되었으며 전력전자 전용 시뮬레이터인 PSIM에 의하여 제안된 시스템의 타당성을 입증할 수 있었다.

2. 제안된 시스템

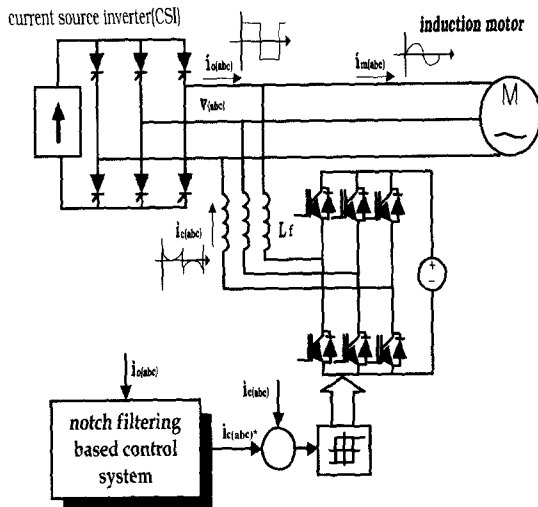


그림 1 제안된 시스템
Fig. 1 Proposed system

그림 1과 그림 2는 본 연구에서 제안된 시스템과 각 부분의 전류 파형을 나타내고 있다.

구형파 동작모드를 갖는 CSI의 출력전류 $i_{o(abc)}$ 와 모터의 입력전류 $i_{m(abc)}$ 는 구형파가 되며 따라서 모터에는 심각한 토크 맥동이 발생된다. 모터의 토크 맥동을 저감시키기 위해서는 모터로 인가되는 구형파 전류 $i_{m(abc)}$ 을 정현파로 제어하면 된다. CSI 구형파 출력전류 $i_{o(abc)}$ 에 포함되어 있는 고조파를 보상기준전류 $i_{c(abc)}^*$ 로 하여 CSI와 모터사이에서 설치된 능동전력필터가 CSI측으로 보상전류 $i_{c(abc)}$ 을 주입하게 되면, 모터 입력전류 $i_{m(abc)}$ 는 그림 2에서 보는 바와 같이 정현파로 된다.

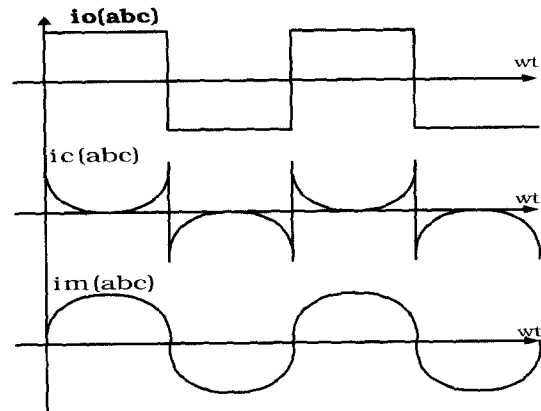


그림 2 제안된 시스템의 전류파형
Fig. 2 Current waveforms of proposed system

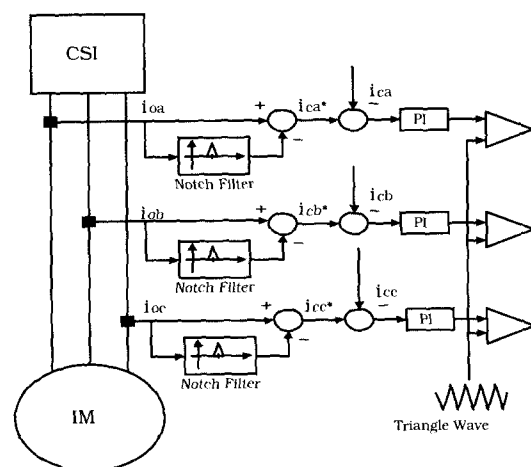


그림 3 노치 필터링에 의한 보상기준 전류 검출
Fig. 3 Detection of compensating reference current by notch filtering

고조파 보상기준전류 $i_{c(abc)}^*$ 는 그림 3과 같이 CSI 출력전류 $i_{o(abc)}$ 로부터 기본과 전류성분을 노치 필터링 하면 간단하고 쉽게 구할 수 있다. 노치 필터링에 의한 방법은 순시전력이론(p-q이론)을 적용한 종전 방법에 비해 과도상태 응답특성이 다소 떨어지는 문제점은 있으나, 우선 평형된 3상 전압검출이 필요 없으며 정상상태 특성이 매우 양호하고 이해하기 쉽다는 장점이 있다.^[5] 전류 검출만으로 보상시스템을 구성하게 되면 종전의 방법에 비해 시스템이 간편해지고 신뢰성이 양호하게 된다.

3. 시뮬레이션 모델링

그림 4는 본 연구에서 제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해 전력전자전용 PSIM 시뮬레이터에 의해 제안된 시스템을 모델링한 것이다. CSI의 정전류원 모델링은, 3상 교류전원의 정류에 의하지 않고, PSIM의 정전류원을 직접 이용하였으며 CSI의 출력전류의 크기는 시뮬레이션 시작 전에 사용자가 설정을 하게 되어 있다. 시뮬레이션에서 사용된 모터와 부하장치는 PSIM에서 제공하고 있는 유도모터와 정출력 부하이다. 보상장치는 3상 전압원 전류제어형 병렬형 능동전력필터를 사용하였고, 전류제어에는 삼각파 비교방식 PWM 변조기를 이용하였다. 능동전력필터는 스위칭 손실과 인덕터 L_f 등에 손실이 없다고 가정하였으며 능동전력필터의 직류단 캐패시터는 직류 정전압원으로 하였다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터
Table 1 System parameters used in simulation

active power filter		
type	shunt type voltage source, current control	
control scheme	sinusoidal PWM control	
inductor L_f	2mH	
d.c voltage	700v	
induction motor		
	stator	rotor
R(Ω)	0.294	0.156
L(H)	0.00139	0.00074
M(H)	0.041	
inertia(J[kg.m ²])	0.2	
friction factor(F[N.m.s])	0	
pole	6	

따라서, 직류전압의 제어를 위한 PI 제어기 등은 고려하지 않았다. 표 1에는 본 연구의 시뮬레이션에 사용된 각종 파라미터들을 나타내고 있다.

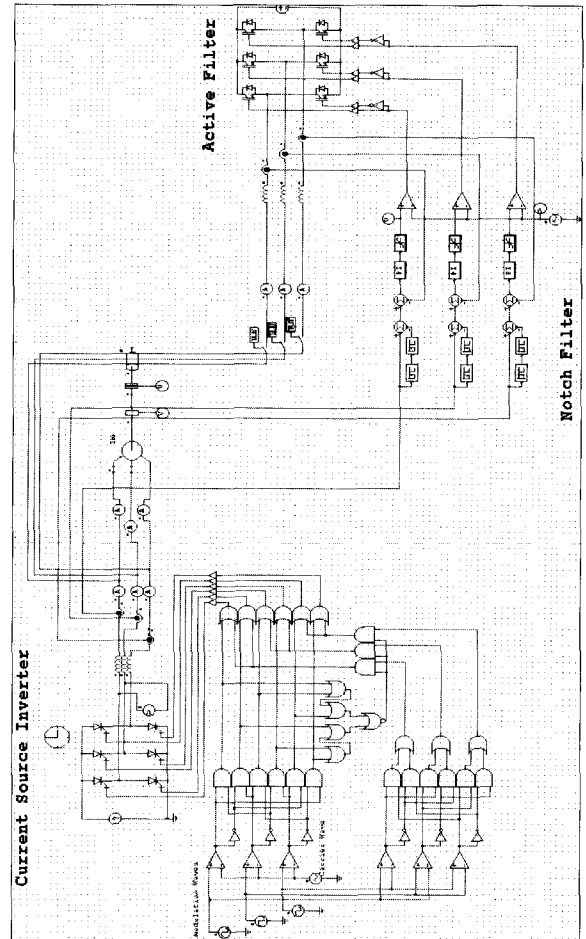


그림 4 제안된 시스템의 PSIM 시뮬레이션 모델
Fig. 4 PSIM simulation model of proposed system

4. 결과 및 고찰

그림 5와 그림 6은 CSI 구동 유도모터의 입력 구형파 전류 $i_{m(abc)}$ 가 100A이고 주파수가 60Hz일때의 $i_{m(abc)}$ 에 포함된 고조파 성분을, 제안된 시스템에 의해 보상한 결과이다. 0.2초부터 0.3초까지 CSI와 모터 사이에 병렬로 연결된 능동전력필터가 고조파 보상을 하게 되면, 구형파인 모터의 입력전류는 정현파로 되며, 이때 모터의 토크 맥동이 저감됨을 알 수 있다.

0.3초부터 능동전력필터가 고조파 보상을 중지하게 되면, 정현파인 모터의 입력전류는 CSI출력전류와 동

일하게 구형파가 되며, 모터의 토크 맥동이 발생하게 된다. 그림 6은 보상 전 후의 모터 입력전류와 모터 토크의 FFT 스펙트럼 분석 결과를 보여주고 있다.

특히 보상 후의 모터 토크 FFT 분석 결과를 살펴보면, 주파수가 0에 가까운 성분만이 남아있음을 알 수 있고, 이는 토크 맥동이 거의 제거되고 있음을 나타낸다.

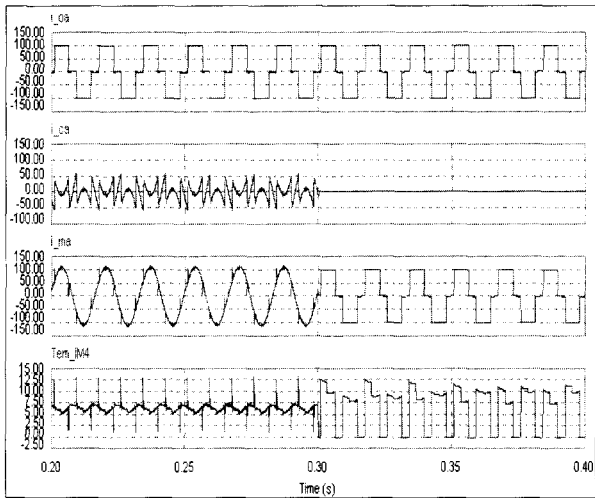
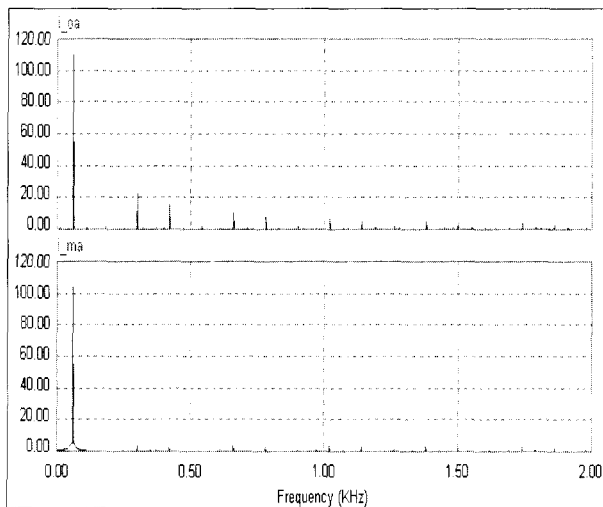
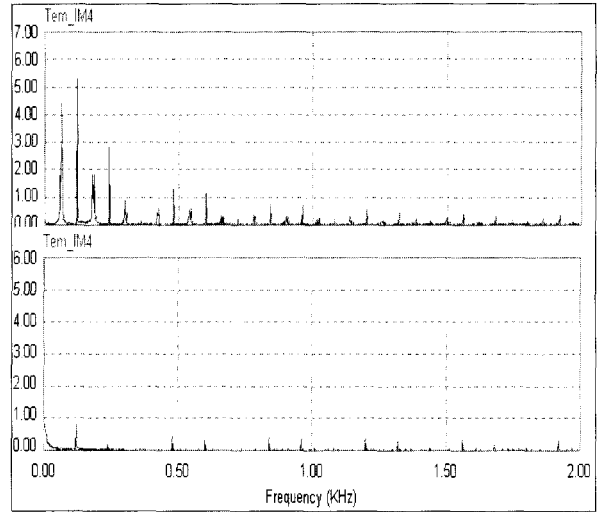


그림 5 모터 입력전류가 구형파인 경우, 제안된 시스템의 보상특성
 Fig. 5 Compensation characteristics of proposed system, in case while input motor current is square wave



(a) Current FFT spectrum



(b) Torque FFT spectrum

그림 6 모터 입력전류가 구형파인 경우, 보상 전후의 전류/토크의 FFT 분석결과
 Fig. 6 Current/torque FFT spectrum before/after compensation, in case while input motor current is square wave

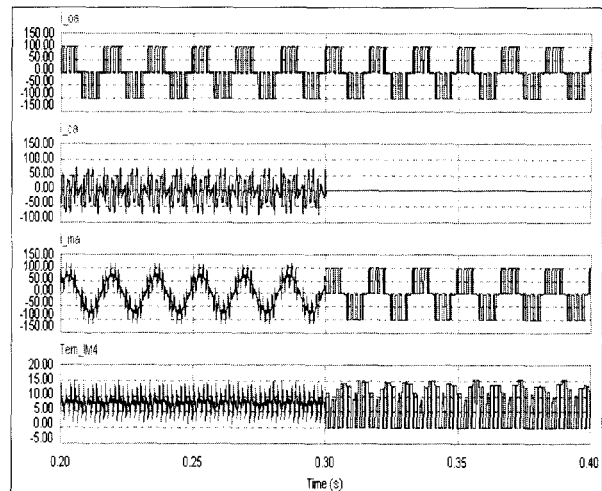
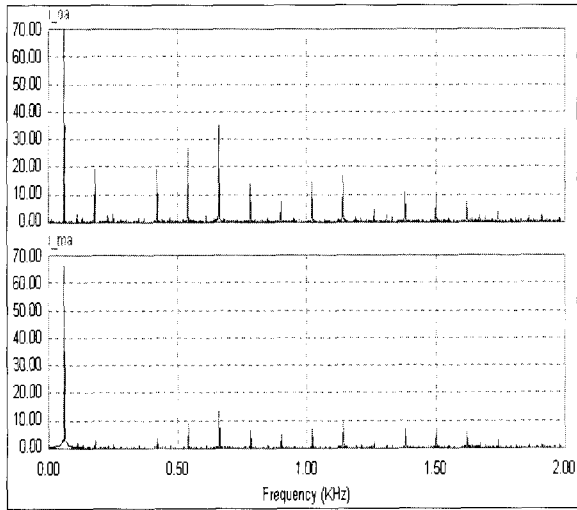
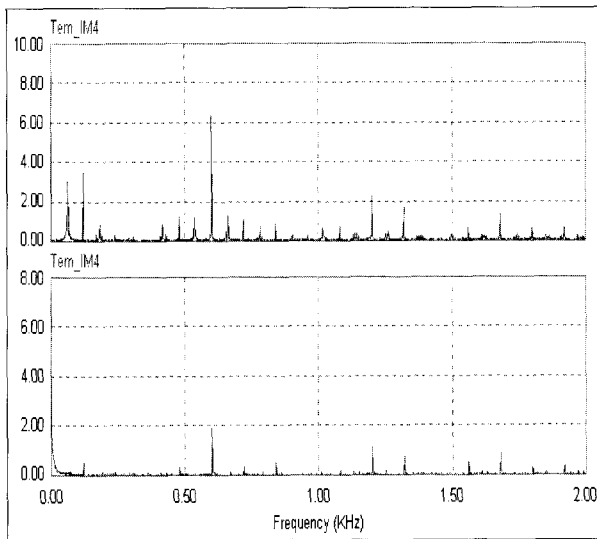


그림 7 모터 입력전류가 PWM파인 경우, 제안된 시스템의 보상 특성
 Fig. 7 Compensation characteristics of proposed system, in case while input motor current is PWM wave

그림 7과 그림 8은 그림 5와 동일한 조건하에서 모터 입력전류 반 주기당 5개의 PWM 펄스를 발생한 경우의 시뮬레이션 결과이다.



(a) Current FFT spectrum



(b) Torque FFT spectrum

그림 8 모터 입력전류가 PWM파인 경우, 보상 전후의 전류/토크의 FFT 분석결과

Fig. 8 Current/torque FFT spectrum before/after compensation, in case while input motor current is PWM wave

보상 후의 모터 입력전류와 모터의 토크에는 구형파인 경우에 비해 능동전력필터가 발생한 고차 고조파의 PWM이 많이 함유되어 있으며, 보상 전과 비교해 볼 때, 보상 후의 토크 맥동은 매우 저감됨을 알 수 있다. 그림 8은 보상 전 후의 모터 입력전류와 모터 토크의 FFT 스펙트럼 분석 결과를 나타내고 있다. 보상 전,

후의 입력전류와 모터 토크의 FFT 분석 결과를 살펴 보면, 전류의 고조파 성분은 보상 전에 비해 감소하고 있고, 모터토크는 구형파의 경우와 동일하게 주파수가 0에 가까운 성분만이 남아있다. 이는 토크의 맥동이 제안된 시스템에 의하여 효과적으로 제거되고 있다는 것을 의미한다.

그림 9는 CSI 구동 유도모터의 구형파 입력전류를 70A에서 150A로 증가할 때와 150A에서 70A로 다시 감소시킨 경우, 제안된 시스템의 과도상태 보상특성을 보여주고 있다. 노치 필터링에 의해 보상기준 전류를 계산하고 있기 때문에, 모터의 입력전류가 2배로 증가되기 시작하는 0.15초부터 3주기정도가 지나야 정확한 보상이 이루어진다. 또한 감소가 시작되는 0.3초 이후에도 역시 3주기 정도가 지나면 비로소 고조파가 안정적으로 보상된다. 모터의 토크는 전류에 비례하여 증가 또는 감소하게 되며, 그림 9에서 보는 바와 같이 과도상태에서도 양호하게 토크의 맥동이 보상되고 있음을 알 수 있다.

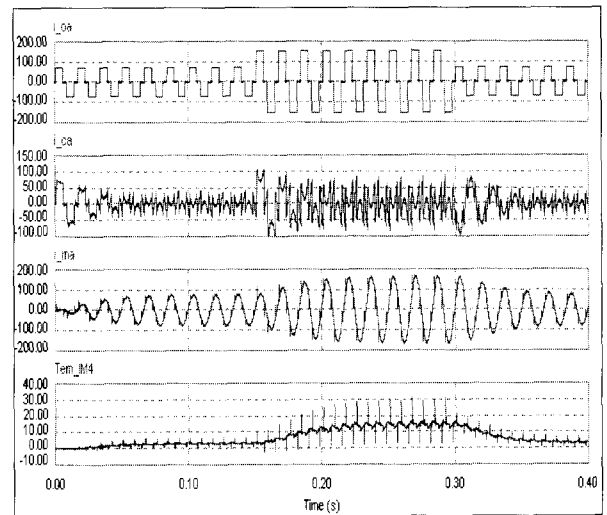


그림 9 모터 입력전류가 구형파인 경우, 제안된 시스템의 과도상태 특성

Fig. 9 Transient state characteristics of proposed system, in case while input motor current is square wave

그림 10은 모터의 입력전류가 그림 7과 같은 PWM으로 제어되는 경우, 그림 9와 동일한 조건하에서 제안된 시스템의 과도 보상특성을 나타낸 것이다. 모터의 토크는 전류에 비례하여 증가 또는 감소하며, 그림 10에서 보는 바와 같이 구형파인 경우와 동일하게 과도상태에서 토크 맥동의 보상이 양호함을 알 수 있다.

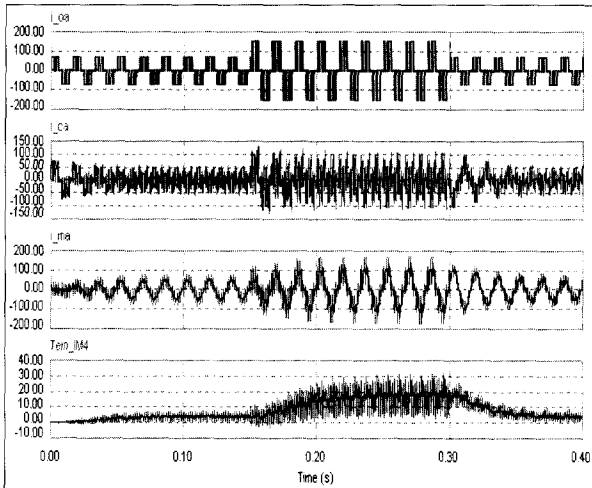


그림 10 모터 입력전류가 PWM파인 경우, 제안된 시스템의 과도상태 특성
 Fig. 10 Transient state characteristics of proposed system, in case while input motor current is PWM wave

5. 결 론

본 연구에서는 CSI 구동 유도모터의 토크 맥동을 감소하기 위해 CSI와 유도모터 사이에 능동전력필터를 설치하여 유도모터 입력전류의 고조파를 보상하는 시스템을 제안하였다. 또한 전류검출 만으로도 보상기준전류의 연산이 가능한 노치 필터법을 제안된 시스템에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CSI와 유도모터 사이에 설치된 능동전력필터에 의하여, 유도모터의 구형파 입력전류의 고조파 성분을 보상하였으며, 결과적으로 모터의 토크 맥동이 저감 되었다.
- 2) 유도모터의 입력전류가 저주파수의 PWM으로 제어되는 경우에도 제안된 시스템에 의해 모터 입력전류의 고조파 성분과 모터의 토크 맥동이 보상 가능하였다.
- 3) 보상기준전류 계산에 노치필터법이 적용을 하고 있기 때문에 모터 입력전류가 급증하는 과도상태에는 3주기 정도의 보상지연이 있고, 정상상태의 보상특성은 매우 양호하였다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과의 일부임.

참 고 문 헌

- [1] S. Bhattacharya, D.M.Divan, "Parallel Active Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems", IEEE IAS, pp. 1032~1039, 1996.
- [2] S. Bhattacharya, D.M.Divan, "Synchronous Fram Based Controller Implementation for Hybrid Series Active Power Filter System", IEEE IAS, pp. 2531~2540, 1995.
- [3] A.M.Trzynadlowski, F.Blaabjerg, "A Tandem Inverter for High-Performance AC Drives", IEEE PESC, pp. 500~505, 1998.
- [4] A.M.Trzynadlowski, F.Blaabjerg, "The Tandem Inverter : Combining the Advantages of Voltage Source and Current Source Inverter", IEEE APEC, pp. 145~320, 1998.
- [5] S.D.Round, D.E.Ingram, "An Evaluation of Techniques for Determining Active Power Filter Compensating Currents in Unbalanced Systems", EPE'97, pp. 4-767~4 772, 1997.

저 자 소 개



정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 전기공학과 전임강사. 한국과학재단 지정

전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템연구센터 연구원.



조재연(曹在延)

1974년 3월 30일생. 2000년 목포대 전기공학과 졸업. 현재 전남대학교 전기공학과 석사과정.



임영철(任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 오스트레일리아 모나시대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학과 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구

센터 소장. 당 학회 편집이사.