

동기전동기의 개방고장에 따른 고장특성에 관한 연구

(A Study on Fault Characteristic According Open Fault of Synchronous Motor)

김희천* · 정태욱**

(Hoe-Cheon Kim · Tae-Uk Jung)

Abstract

Recently, permanent magnet synchronous motor are applied to various applications. Because of the importance of high reliable operation in these areas, many research related to the fault detection and diagnosis of inverter system are conducted. So, a faults model for an inverter-driven permanent magnet synchronous motor is studied by using the fault current of motor according to switch open, which can be effectively used for performance evaluation of the diagnostic algorithm. And fault of the permanent magnet synchronous motor inverter drive system is divided into four types. The feasibility of the proposed method are improved by simulation and experiment.

Key Words : Permanent magnet synchronous motor(PMSM), Fault current

1. 서 론

최근 산업 발달로 자동화 설비와 복잡한 시스템의 출현 등으로 전동기 시스템의 신뢰성 및 공정의 안정성 측면이 대두되고 있다. 보편화되어 있는 영구자석 동기전동기(PMSM)에 고장이 발생할 경우 사용효율이 저하되거나, 자동화 설비라인이 멈춰 막대한 손실을 초래할 수 있다. 이러한 설비 및 공정의 손실을 최소화하기 위해

효과적인 시스템의 모니터링과 정확한 고장진단이 중요한 과제로 부각되고 있다[1-3]. 임의의 고장 발생 이후에 고장에 따른 특성을 분석하였으며, 또한 고장에 의해 발생하는 진동 및 소음의 특성에 관하여 진행된 연구가 많았다. 일반적으로 진동신호 분석은 매우 중요한 분석 기술로 이용되고 있다. 하지만 대부분 이상이나 고장이 발생했을 경우 원인 추정은 현장 관리자의 경험을 바탕으로 제공한 자료를 근거로 대응한다[4]. 그러나 경험요소를 근거로 하기 때문에 잘못된 판단과 규명되지 않은 오류 발생으로 사고와 경제적 손실을 초래하는 경우가 있기 때문에 이에 대한 정확한 고장분석에 관한 연구 방안이 요구되며, 최근에 많이 사용되고 있는 인버터 고장과 함께 동기전동기 시스템의 고장특성에 관한 통합적인 연구가 필요하다[5]. 본 논문에서는 동기전동기 시스템 결함 중 인버터 스위치의 개방 고장에 따른 고장전류 특성에 대하여 연구를 진행하였다. 이러한 인버터 스위

* 주저자 : 경남대학교 공대 전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 경남대학교 공대 전기공학과 조교수

* Main author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ.

** Corresponding author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ.

Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr

접수일자 : 2012년 9월 28일

1차심사 : 2012년 10월 6일

심사완료 : 2012년 10월 27일

치 고장에 따른 자기적 문제와 제어를 실현하기 위해 유한요소해석법을 활용하여 전체 시스템을 모델링하였으며, 모델링된 시스템으로 다양한 제어조건 및 고장모드를 설정하여 해석진행이 가능하게 하였다.

인버터 스위치 개방으로 인해 발생하는 고장모드를 중점으로 특성분석의 연구를 진행하였다. 특히 스위치 개방고장 발생에 따른 4가지의 유형을 설정하여 전류 및 토크 특성에 관한 분석을 하였다. 그리고 해석진행에 있어 유형마다 전류특성 파형이 상이하기 때문에 결함의 종류에 따라 독립적으로 해석을 진행하였다. 모델링한 시뮬레이션 결과의 타당성을 입증하기 위해서 실험 시스템을 구성하여 실험결과와 비교검증으로 신뢰성을 확보하였으며, 각 고장별 유형에 따른 고장특성의 데이터 확보가 가능해짐에 따라 다양한 고장유형의 고장진단을 신속하고 정확하게 대책이 가능한 연구가 가능해졌다.

2. 영구자석 동기전동기 시스템모델링

고장이 없는 정상조건에서의 영구자석 동기전동기의 동적 모델은 식 (1)과 같은 3상 변수를 이용하여 나타낼 수 있다[6,7].

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 L 은 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스, R_s 는 저항 v_{as}, v_{bs}, v_{cs} 는 각각의 상전압, i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 는 각각의 상전류, e_{as}, e_{bs}, e_{cs} 는 3상 역기전력, $\frac{d}{dt}$ 는 미분연산자를 나타낸다.

그림 1은 동기전동기 시스템을 나타낸다. 인버터 극전압 v_{ao}, v_{bo}, v_{co} 는 DC 링크 "0"에 대한 전동기의 터미널 전압으로 정의된다. a상의 극전압은 스위칭 소자의 동통상태에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ao} = V_{dc} \quad \text{for } T_{a+} \text{ or } D_{a+} : ON \quad (2)$$

$$v_{ao} = 0 \quad \text{for } T_{a-} \text{ or } D_{a-} : ON \quad (3)$$

해당 고장 모델의 경우 인버터의 극전압으로부터 쉽게 구해질 수 있는 선간전압 모델을 변경하여 나타낸다. 전동기의 선간전압과 인버터의 극전압의 관계식은 식 (4)~(6)에 나타낸다.

$$v_{ab} = v_{as} - v_{bs} = v_{an} - v_{bn} \quad (4)$$

$$v_{bc} = v_{bs} - v_{cs} = v_{bn} - v_{cn} \quad (5)$$

$$v_{ca} = v_{cs} - v_{as} = v_{cn} - v_{an} \quad (6)$$

3상 Y결선 부하에서 $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ 이 항상 성립함을 이용하여 3상 전류 중 두 상에 대한 선전압 관계식을 식 (4)~(6)을 이용하여 고장이 없는 정상 조건에서 식 (1)은 다음과 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$(L-M) \frac{d}{dt} i_{as} - (L-M) \frac{d}{dt} i_{bs} = v_{ab} - e_{as} + e_{bs} - R_s i_{as} + R_s i_{bs} = u_1 \quad (7)$$

$$(L-M) \frac{d}{dt} i_{as} + 2(L-M) \frac{d}{dt} i_{bs} = v_{bc} - e_{bs} + e_{cs} - R_s i_{bs} - R_s (i_{as} + i_{bs}) = u_2 \quad (8)$$

식 (4)~(6)과 식 (7)~(8)을 이용하여 개방 고장이 없는 정상 조건에서의 제어 특성을 구할 수 있다.

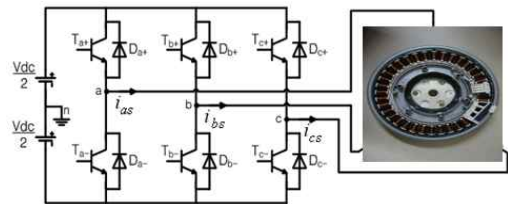


그림 1. 영구자석 동기전동기 시스템
Fig. 1. PM Synchronous motor system

3. 인버터 스위치 고장

인버터 시스템에서의 전력 반도체 스위치 고장은 크게 단락 회로 고장과 개방 회로 고장으로 나누어진다. 본 연구에서는 개방회로 고장시 발생하는 특성에 관하여 연구를 진행하였으며, 개방회로 고장은 한 레그의 스위치가 동작하지 않는 것을 말한다. IGBT와 같

은 전력용 반도체 스위치의 구동은 게이트 드라이브 회로에 의해 발생하는 전압을 게이트-이미터 양단에 인가되므로 게이트 드라이브의 고장 혹은 IGBT 게이트 부분의 파손에 의해 개방회로 고장이 발생할 수 있다[5,8].

본 연구에서는 다음과 같이 4가지의 인버터 스위치 개방에 따른 고장모드로 설정하였다.

■ 모드 A : Q5의 스위치 고장이 발생했을 경우

해당 고장은 하나의 파워스위치에서 스위치 개방 고장이 일어나는 경우 스위치가 도통할 수 없어 인버터는 기준전압 벡터와 같은 전압을 합성할 수 없다. Q5에 고장이 발생한 경우 인버터 극전압은 환류 다이오드 D2, D5에 의해 도통된다.

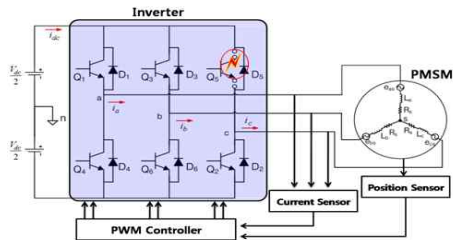


그림 2. 인버터 스위칭 고장(모드 A)
Fig. 2. Inverter Switching fault(mode A)

■ 모드 B : Q2, Q5의 스위치 고장이 발생했을 경우

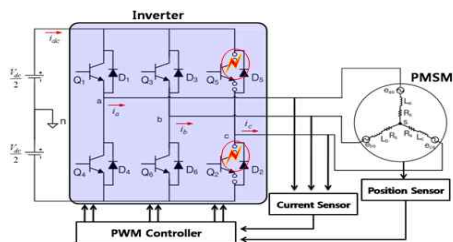


그림 3. 인버터 스위칭 고장(모드 B)
Fig. 3. Inverter Switching fault(mode B)

한 암(Arm) Q2, Q5의 파워스위치가 고장을 발생하여 개방 상태로 동작하는 경우이다. 해당 고장은 암의 두 파워스위치에 의한 고장이 발생한 경우로 고장상

은 인버터로부터 전력을 공급받을 수 없고 단지 환류 다이오드를 통해서만 전류가 순간적으로 흐를 수 있어 전동기의 해당상이 분리된 경우와 유사한 형태이다. 과전류로 인해 해당 암 스위치가 소손되거나 컨트롤러에서 ESD(Electrostatic Discharge : 정전기 방전 장치)의 장애로 인해 충격을 받는 경우가 이에 해당된다. 이러한 고장시 구동 시스템은 2상 여자방식과 유사한 형태로 나타난다.

■ 모드 C : Q1 - Q6의 스위치 고장이 발생했을 경우

모든 파워스위치가 고장이 발생하여 동작하지 않는 상태에서 환류다이오드를 통해서 동작한다. 직류전압보다 역기전력의 에너지준위가 높아 충전이 가능하며, UCG(Uncontrolled Generation)모드로 동작한다. UCG모드로 동작하면 인버터측의 IGBT소자의 게이트 신호가 발생되지 않기 때문에 정상적인 제어를 할 수 없게 된다. 즉 영구자석 동기전동기가 제어영역을 벗어난 발전기 형태가 된다.

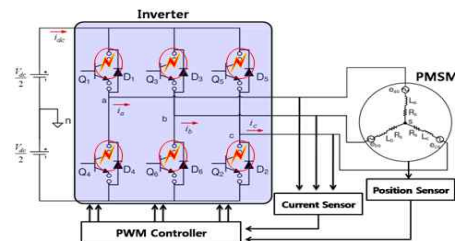


그림 4. 인버터 스위칭 고장(모드 C)
Fig. 4. Inverter Switching fault(mode C)

■ 모드 D : 인버터와 전동기 권선간 고장이 발생경우

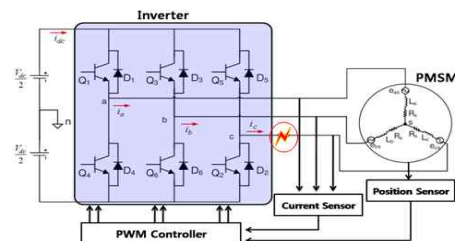


그림 5. 인버터 스위칭 고장(모드 D)
Fig. 5. Inverter Switching fault(mode D)

동기전동기의 개방고장에 따른 고장특성에 관한 연구

발생원인은 기계적으로 전동기와 인버터가 연결되지 않았거나 전동기안의 권선의 결함으로 인해 고장이 발생한다. 해당 고장이 발생한 경우 인버터 내부에서는 정상적으로 동작을 하지만 전동기에 인입되는 한 상이 완전하게 분리되었기 때문에 나머지 두 상으로만 동작한다. 때문에 실제 3상에 흐르는 전류는 모드 B와 비슷한 형태지만 권선간 단락 발생으로 인해 $i_c = 0$ 이고, $i_a = -i_b$ 의 상태로 C상의 권선에 전류가 흐르지 않는 상태이다.

4. 동기전동기 고장특성 분석을 위한 시뮬레이션 및 시스템 구성

4.1 시뮬레이션 모델링 구성

논문에서 수행된 시뮬레이션은 Ansoft의 유한요소기법을 이용한 전자기 해석 툴인 Maxwell과 외부회로 연계와 제어가 가능한 Simplorer를 활용하였다. Maxwell 2D를 사용하여 동기전동기 모델링과 Simplorer를 이용하여 인버터 고장 시스템을 모델링하여 스위칭 고장 발생되는 고장 특성 연구를 진행하였다. 그림 6은 유한요소법을 기반으로 본 연구에 사용된 48극 36슬롯 외전형 영구자석 동기전동기를 모델링한 것이다.

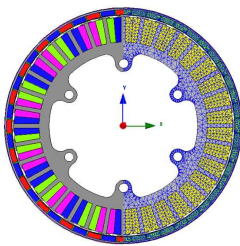


그림 6. 영구자석 동기전동기 Maxwell 2D 모델링
Fig. 6. Maxwell 2D modeling of PMSM

그림 7은 Simplorer를 이용하여 모델링한 인버터 제어 및 구동회로를 구성한 회로도도를 나타내고 있다. PWM 제어는 옵셋전압을 이용하여 기존의 PWM 기법과 삼각파비교법으로 전압변조방식을 구현하였다. 식 (9)는 SVPWM의 옵셋전압을 나타낸다. 이 식을 이

용해서 극전압을 구하고, 삼각파비교법으로 Sa, Sb, Sc 값을 구한다.

$$SVPWM : V_{sn} = -\frac{V_{ref_max} + V_{ref_min}}{2} \quad (9)$$

4.2 실험장치의 구성

그림 8은 고장 검출 실험에 사용된 PMSM의 구성을 나타낸다. 시뮬레이션 동특성을 실험하기 위하여 인버터 구동회로에 일정시간이 지난 후 인버터 Ta 스위치가 동작하지 않는 프로그램을 구현하여 모드 A의 실험하였으며, 동일한 방법으로 추가적으로 Ta를 동작하지 않게 프로그램을 구현하여 모드 B를 실험하였다. 모드 C의 실험을 위해 인버터 구동회로의 모든 스위치를 일정시간 이후 동작하지 않도록 하여 실험을 진행하였으며, 모드 D의 실험은 권선에 ON/OFF 스위치를 만들어 주어 단락권선에 대한 실험을 진행하였다. 스위칭 주파수는 15.6k[Hz]이며, 정현파 구동방식인 180° 통전방식으로 PWM 신호를 만들어 주어 전동기를 구동하였다.

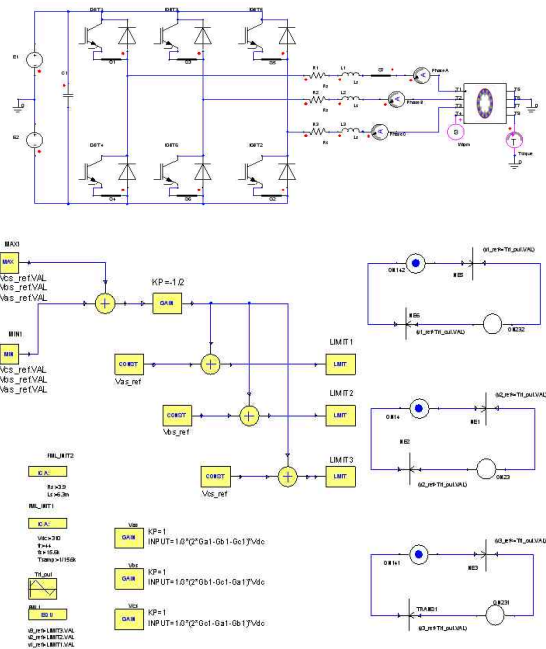


그림 7. 심플로어 제어회로 구성도
Fig. 7. Simplorer control circuit diagram

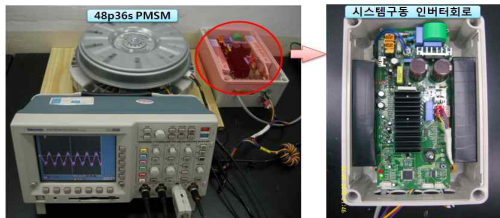


그림 8. 실험 시스템 사진
Fig. 8. Experimental System

5. 해석 및 실험 결과

유형별 동작조건에서 인버터 스위치의 개방 후 특성 해석과 실험 결과의 분석 및 특성비교를 진행하였다.

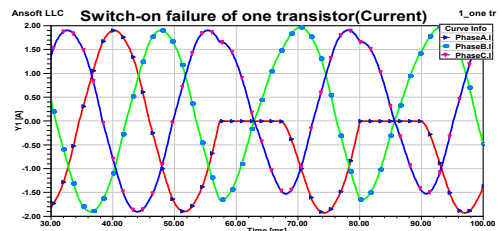
모드 A의 유형의 시뮬레이션 해석결과를 보면 A상의 상단스위치인 Q1에 개방고장이 일어나는 경우 인버터 극전압은 환류다이오드를 통해 D1과 D4의 도통에 의해 순간적으로 흐른다. A상의 상단스위치 Q1에 의해 3상전류는 평행상태를 유지하지 못하고 전류파형이 불평형을 이루며, 출력전류의 유입되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 실험결과 역시 동일한 고장상태의 전류특성이 측정되었다.

모드 B의 경우 다른 상의 전류가 작아지며, 고장난 상에서는 다이오드를 통한 환류(freewheeling) 전류만 흐르는 해석결과 및 실험결과에서 확인할 수 있다. 이는 전동기의 C상이 인버터와 분리된 경우와 유사하고 C상의 전류는 “0”에 가까운 전류가 흐르게 되며, 나머지 B상, C상에 의해 보상되는 결과를 확인할 수 있다.

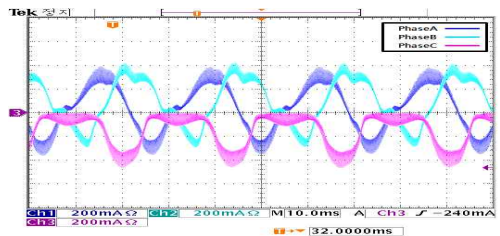
모드 C 경우 모든 스위치가 개방 되므로 환류다이오드를 통해서 에너지를 충전하는 UCG(Uncontrolled generation) 모드로 동작한다. 고장 발생시 모든 파워 스위치가 동작하지 않기 때문에 전류가 급격하게 줄게 되고 실제적으로 제어할 수 없는 발전기 형태의 파형이 출력되는 것을 확인할 수 있다. 또한 실험시 고장 발생순간 전동기의 역기전력이 입력전압보다 높기 때문에 짧은 순간동안 발전기로서 동작하다 멈춘다.

모드 D의 경우 인버터와 전동기 터미널이 분리되어 있으며 인버터 파워 스위치는 실제적으로 동작해 신호를 발생 시키지만 권선의 고장으로 인해 전류가 전동기로 유입되지 않는다. A상이 동작하지 않기 때문

에 나머지 두 상의 전류는 서로 역상이 되어 통전된다. 이는 환류다이오드를 통해서 미세전류가 흐르지만 해당 모드는 전류가 흐르지 않고, 나머지 두상에는 서로 반대 부호의 전류가 흐른다. 즉 $i_a = -i_b$ 이고 $i_c = 0$ 이다.

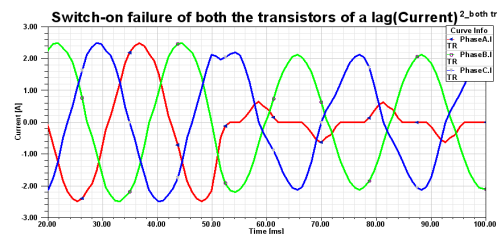


(a) 전류특성 해석결과

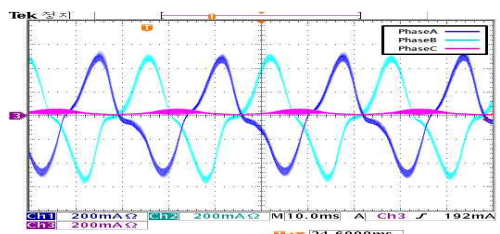


(b) 전류특성 실험결과

그림 9. 모드 A의 전류특성 결과
Fig. 9. Current waveform of mode A



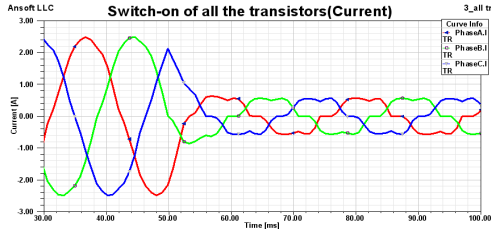
(a) 전류특성 해석결과



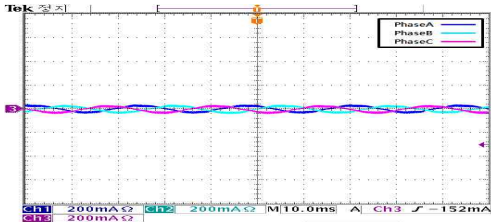
(b) 전류특성 실험결과

그림 10. 모드 B의 전류특성 결과
Fig. 10. Current waveform of mode B

동기전동기의 개방고장에 따른 고장특성에 관한 연구

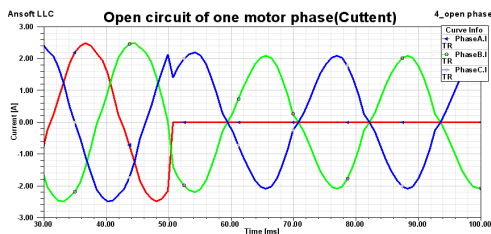


(a) 전류특성 해석결과

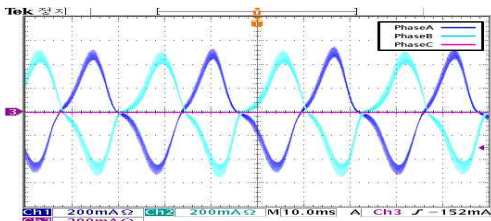


(b) 전류특성 실험결과

그림 11. 모드 C의 전류특성 결과
Fig. 11. Current waveform of mode C



(a) 전류특성 해석결과

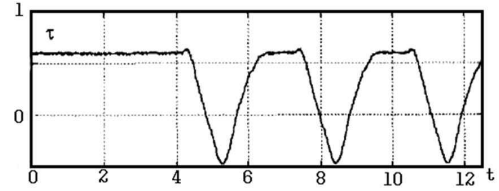


(b) 전류특성 실험결과

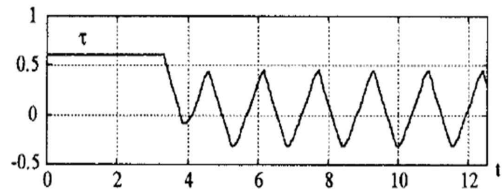
그림 12. 모드 D의 전류특성 결과
Fig. 12. Current waveform of mode D

그림 13은 토크특성을 각 고장유형별 결과를 나타냈다. 모드 A의 경우 한상의 토크발생이 “영”이 되므로 토크 리플의 증가가 되는 것을 확인할 수 있다. 모드 B의 경우는 정토크와 역토크가 교번하여 나타나는 현상을 볼 수 있으며, 모드 C에서는 발전기 동작으로 역

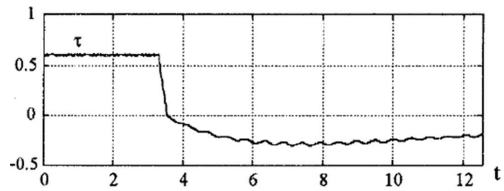
토크가 발생하는 결과를 확인할 수 있다. 마지막으로 모드 D의 경우는 전동기가 회전하지 않으며 탈주하는 현상으로 연속된 덜컹거림의 현상을 확인할 수 있다.



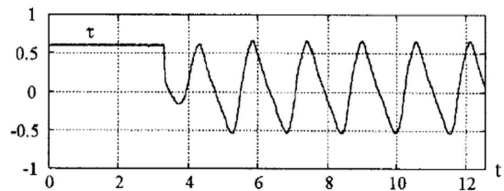
(a) 모드 A



(b) 모드 B



(c) 모드 C



(d) 모드 D

그림 13. 토크특성 결과
Fig. 13. Torque characteristics result

6. 결론

현재 영구자석 동기전동기의 고장진단은 경험적 요소 등으로 이루어져있으므로, 정확한 원인 진단 및 데이터 분석이 미미함에 따라 본 연구에서는 고장원인 분석을 시뮬레이션이 가능한 전체 시스템의 모델링을 구성하여 정확한 원인 진단과 다양한 고장에서 특

성 파악 및 대책에 접근할 수 있게 하였다. 또한 실험 시스템을 구성하여 모델링한 시스템의 타당성을 입증하였다. 본 연구에서는 다양한 고장원인 중 스위치 개방에 따른 고장전류 특성에 관하여 중점적으로 연구를 진행하였으며, 이에 대한 결과를 도출하였다. 이로써 본 연구로 다양한 고장별 유형을 설정하여 시뮬레이션으로 고장의 원인을 판별할 수 있게 되었으며, 고장원인의 정확한 진단에 따른 대책으로 고장발생시 전동기 시스템을 한층 더 신뢰성을 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

이 연구결과물은 2012학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원에 의한 것임.

References

- [1] M.A. Awadallah, M.M.Morocos, S. Gopalakrishnan, and T. W. Nehl, "Detction of stator short circuits in VSI-fed brushless DC motors using wavelet transform", IEEE Trans. Ener. Conv., Vol. 21, no.1, pp.1-8, 2006.
- [2] R.L.A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. Silva, and A. M. N. Lima, "Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems", IEEE Trans. Pow. Elec., vol. 18, no. 2, pp.587-593, 2003.
- [3] Jingwei Zhu, Nesimi Ertugrul and Wen Liang Soong, "Detection and Remediation of Switch Faults on a Fault Tolerant Permanent Magnet Motor Drive with Redundancy", 2007 Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications.
- [4] B. A. Welchko, T. M. jahns, and S. Hiti, "IPM synchronous machine drive response to a single-phase open circuit fault," IEEE Trans. Power Electron, vol. 17, pp.764-771, Sept. 2002.
- [5] Kyeong-Hwa Kim, Dong-Uk Choi, Bon-Gwan Gu, In-Soung Jung, "A Study on Fault Model end Performance Evaluation under Power Switch Open Fault in an Inverter-Driven Permanent Magnets Synchronous Motor", KIEE, Vol.23, No.6, Jun, pp.40-51, 2009.
- [6] P. C. krause, "Analysis of Electirc Machinery", New York : McGraw-Hill, 1986.
- [7] K. W. Lee, "Fault diagnosis of a electrolytic capacitor for inverter DC-Link voltage smoothing", Transaction of KIPE, vol. 12, no. 5, pp.382-377, 2007.
- [8] Hag-Wone Kim, "Simple Switch Open Fault Detection Method for Voltage Source Inverter", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, v.13 no.6, pp.430-438, 2008.

◇ 저자소개 ◇



김희천 (金會千)

1985년 4월 10일생. 2010년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (055)249-2628

E-mail : backas1000@naver.com



정태욱 (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년 ~현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (055)249-2628

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr