

## 기생저항변화를 고려한 DC/DC 컨버터 열화진단

<sup>0</sup>김태진\*, 백주원\*, 이병국\*, 류명호\*, 김철우\*\*

\*한국전기연구원, \*\*부산대

### Diagnosis method of DC/DC converter aging based on parasitic resister

<sup>0</sup>T.J. Kim\*, J.W. Baek\*, B.K. Lee\*, M.H. Ryu\*, and C.U. Kim\*

\*KERI, \*\*Pusan Nat. Univ.

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a new diagnosis method of DC/DC converter aging. The method is based on parasitic resister change with aging process. we apply to on-line diagnosis of DC/DC converter because of observing not a device but a system. We present the mathematical analysis and experimental study.

#### 1. 전력변환장치 진단의 필요성

일반적으로 전력용 반도체 소자를 이용한 전력 변화 장치는 산업기기, 가전기기 및 통신기기 전원 장치 등 전원을 필요로 하는 모든 기기에 널리 이용되어 왔으며, 다양한 제어방법과 소자들의 발명으로 기술적으로 많은 진보가 이루어졌다. 대표적인 전력 변환 장치의 예로, 지하철 구동 장치, 압연기 구동 장치, 냉각 펌프 구동 장치, 대용량 FAN 구동 장치, 엘리베이터 구동 장치, 고속 전철 구동 장치, 통신용 정류기, 도금용 정류기, UPS, 일반 SMPS, 대용량 정류기, 가전기기 전원 장치, 서버용 정류기, 모터 제어용 인버터 등이 있으며, 현재까지 고효율화, 소프트 스위칭, 고역률화, 고밀도화, 소형화, 원가 절감, 신뢰성 향상 등과 같은 성능 및 기능 향상에 많은 연구를 진행하여 급속한 기술 발전을 이룩하였다.

전력 변환 장치는 산업 현장, 일반 가정, 정보/통신 분야 등에 아주 기본적인 전원을 공급하고 있으며, 전력 변환 장치의 사고 시에는 인명 손실, 조업 손실, 통신 장애, 사고 처리 비용 부담 등의 과급 효과가 크므로 사고를 예방하기 위한 장치가 필요하게 되었다.

주로 전력 변환 장치에는 과전압, 과전류, 온도 상승, 결상, 접지, 이상 제어 발생 등 긴급한 상황에서 직접적인 사고를 방지하기 위하여 보호 회로를 설치하여 장치의 이상 동작 시에 사전에 전원공급을 차단함으로써 큰

문제를 발생하지 않도록 하지만, 반도체 소자, 인덕터, 커패시터, 구동회로 및 제어회로의 열화에 의한 장치의 사고를 예방할 수 있는 진단 시스템에 관한 연구는 아직 미미하다. 열화 또는 노후화 진단은 전원 장치의 상태를 진단함으로써 전원 장치의 사고를 미리 방지할 수 있고, 교체 및 유지/보수 시기를 결정할 수 있으므로 전원의 안정적인 동작을 확보할 수 있다.

지금까지의 전력변환장치의 진단 기술방법의 특징은 부품별, off-line, 현장실측 데이터중심, 온도 소음등의 2차 징후 중심법이었다. 각 부품의 열화를 진단하는 방법으로는 가장 쉽게 개별 부품 각각에 대하여 전압 및 전류, 온도의 상태를 측정함으로써 부품의 열화를 진단할 수 있으나, 이는 각각의 부품마다 많은 센서를 필요로 하여 시스템을 복잡하게 하며 시스템의 가격을 상승시키는 요인이 된다. 개별 부품의 상태를 각각 진단하여 열화를 판단하는 것이 가장 바람직할 수 있으나, 전력 변환 장치는 많은 부품으로 구성되어 있고, 각각의 부품은 동작 조건에 따라 수명의 정도가 다르고, 측정 노이즈에 의한 시스템의 간섭으로 시스템의 오동작이 발생할 수 있으므로 적당한 방법이 될 수 없다. 또, on-line방법이 아닌 off-line 방법으로 진단기능의 비효율성을 가질 수 있다. 그리고 현장실측 데이터 중심으로 단순히 전압과 전류의 절대적인 크기만 기준으로 삼고 있으며 2차적인 징후인 전력변환장치의 소음이나 온도에 의한 진단 기준의 판단근거로 삼고 있다.

최근 연구개발동향은 부품별 진단이 아닌 시스템적인 측면의 진단, on-line 방식의 진단, 그리고 예측된 물리량의 단순 크기만이 아니라, 신호처리기법등을 이용한 변화의 추이와 과정을 고찰하는 방식의 진단방법 등이 연구되어 오고 있다.<sup>1,2,3)</sup>

본 연구는 전력 변환 장치의 열화를 대표할 수 있는 대표지수를 선정하고 이를 이용하여 전력변환장치를 진단하는 방법을 연구하고자 한다. 이 방법은 전체 시스템을 하나의 지수를 통하여 진단하는 방법으로 전체적인 시스템의 열화 상태를 판단할 수 있는 진단 방법이 새로

운 대안이 될 것 같다. 또 향후 on-line 방식으로 진단하기 위한 기술로 활용도 가능하다. 본 연구에서는 DC/DC 컨버터의 기생저항성분을 고려한 DC/DC 컨버터에서 열화에 대한 기생저항 성분의 변화분을 모델의 변화분으로 해석함으로써 DC/DC컨버터의 온라인 열화진단 기법으로 제안하고자 한다.

## 2. DC/DC 컨버터 진단 알고리즘 개발

### 2.1 DC/DC 컨버터의 열화진단 지수 선정

DC/DC 컨버터의 구성은 전력용 반도체 소자, 평활커패시터, 인덕터 등으로 구성된다. 이들 구성품들은 장기간 사용에 따라 제품의 열화를 가져오고, 열화에 따라 각 부품을 구성하는 직병렬 등가 저항들은 증가한다. 이 증가하는 저항요소를 열화진단 지수로 둔다. 그림 1은 전력변환장치중 Buck 컨버터에서 각 구성품의 기생저항 성분회로를 포함한 등가회로이다.

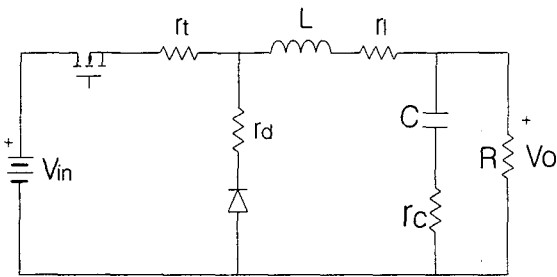


그림 1. 기생 저항을 고려한 Buck 컨버터

수식(1)과같이 그림1의 전달함수 및 열화진단지수를 정의할 수 있다.

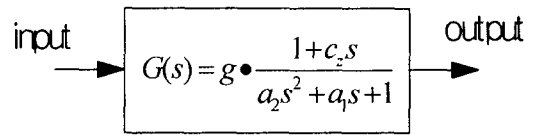
$$G(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = V_m \cdot \frac{(1+sC r_c)(1+\xi_2)}{\frac{LCs^2}{1+\xi_1} + \frac{s}{1+\xi_1} - \left(\frac{L}{R} + CR\xi_1\right) + 1}$$

$$\xi_1 = \frac{r_l + r_c + r_s \cdot D + r_d(1-D)}{R}, \quad \xi_2 = \xi_1 - (Dr_l - Dr_d)/R \quad (1)$$

여기에서, DC 출력 전압  $V_o = DV_{in}$  (인덕터 전류가 연속으로 흐른다고 가정 : CCM)이다.  $V_{in}$  : 입력 전압, D : 시비율,  $D_1 = 1 - D$ , L : 인덕터, C : 커패시터, R : 부하저항,  $r_l$  : 인덕터 내부 저항,  $r_c$  : 커패시터 내부 저항,  $r_s$  : 스위치 내부 저항,  $r_d$  : 다이오드 내부 저항이다. 위의 수식에서  $\xi_1, \xi_2$ 는 DC/DC 컨버터 내부 저항의 조합으로

구성됨을 알 수 있고, 열화에 의한 내부 저항의 변화는  $\xi_1, \xi_2$ 에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, 모든 내부 저항 값을 일일이 체크하여 측정하는 것은 현실적으로 불가능하며,  $\xi_1, \xi_2$  값을 측정하여 값을 변화로써, 열화를 판단하는 방법을 적용하는 것이 바람직하다.

위에서 수학적 등가 모델과 실험으로 측정된 등가 모델의 전달 함수는 간략하게 정리하면 아래 그림과 같이 나타남을 확인하였다.



Power Stage Transfer Function

그림 2. DC/DC 컨버터 등가 모델 전달 함수

여기에서  $g, a_2, a_1, c_z$ 는 수식 (1)에서 각각의 계수를 간단하게 나타낸 것으로써, 입력 전압  $V_{in}$ , 시비율 D, 부하 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C, 내부 저항의 조합인  $\xi_1, \xi_2$ 로 구성되어 있다.

따라서, 아래 그림과 같이 수학적인 모델링에 의해 구해진 수식과 실험에 의하여 측정된 실제 값을 항등식이 성립하게 되고, 수식을 전개하여 풀이하면 원하는 열화 대표지수인  $\xi_1, \xi_2$ 의 값을 구할 수 있다.

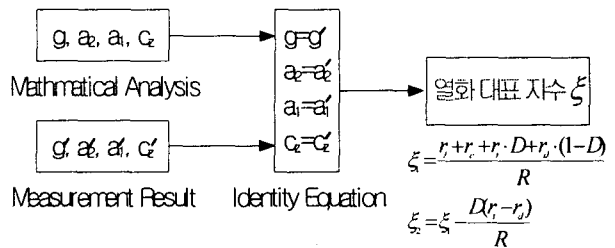


그림 3. 열화 대표 지수를 구하는 방법

이상과 같은 방법으로 Boost 및 Buck-Boost 컨버터를 구하면 다음과 같다. 그림 4은 내부 기생 저항을 고려한 Boost 컨버터의 회로도를 나타내었다.

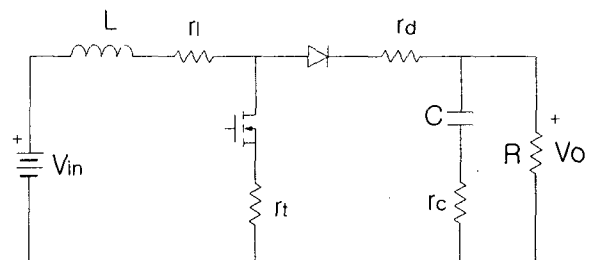


그림 4. 기생 저항을 고려한 Boost 컨버터

$$G(s) = \frac{v_o}{d} = \frac{V_m(D_1^2 - \xi_2)}{(D_1^2 + \xi_1)^2} \cdot \frac{1 - \frac{Ls}{R(D_1^2 - \xi_2)}}{\frac{LCs^2}{D_1^2 + \xi_1} + \frac{s}{D_1^2 + \xi_1} \left( \frac{L}{R} + CR\xi_1 \right) + 1}$$

$$\xi_1 = \frac{r_i + r_c \cdot D + (r_c + r_d)(1-D)}{R}, \quad \xi_2 = (r_i + r_c)/R \quad (2)$$

등가 모델을 구하기 위하여 여러 가지 방법 중에 State Space Average 방법을 적용하면 내부 기생 저항 성분을 갖는 Boost 컨버터의 수학적 모델은 다음과 같이 나타난다.

여기에서, DC 출력 전압  $V_o = \frac{V_i n}{1-D}$  (인덕터 전류가 연속으로 흐른다고 가정 : CCM)이다. 그림 5은 내부 기생 저항을 고려한 Buck-Boost 컨버터의 회로도를 나타내었다.

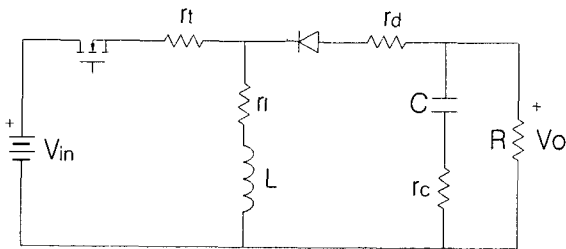


그림 5. 기생 저항을 고려한 Buck-Boost 컨버터

Boost 컨버터와 동일하게 등가 모델을 구하기 위하여 State Space Average 방법을 적용하면 내부 기생 저항 성분을 갖는 Buck-Boost 컨버터의 수학적 모델은 다음과 같이 나타난다.

$$G(s) = \frac{v_o}{d} = \frac{V_m(D_1^2 + \xi_2)}{(D_1^2 + \xi_1)^2} \cdot \frac{1 - \frac{LDs}{R(D_1^2 + \xi_2)}}{\frac{LCs^2}{D_1^2 + \xi_1} + \frac{s}{D_1^2 + \xi_1} \left( \frac{L}{R} + CR\xi_1 \right) + 1}$$

$$\xi_1 = \frac{r_i + r_c \cdot D + (r_c + r_d)(1-D)}{R}, \quad \xi_2 = \xi_1(1-2D) + \frac{(r_c + r_d - r_i)DD_1}{R} \quad (3)$$

여기에서, DC 출력 전압  $V_o = \frac{D}{1-D} V_{in}$  (인덕터 전류가 연속으로 흐른다고 가정 : CCM)이다.

## 2.2 대표 열화지수 추출방법

그림 6은 열화지수의 측정방법에 대한 개념도이다. 디지털 제어기의 입력 지령치에 white 노이즈성분을 제어

기의 입력으로 추가한다. 이 출력은 전력변환장치의 출력전압Vout와 비교하여 그 값을 PI 제어기의 입력으로 둔다. PI 제어된 출력결과는 전력변환장치의 게이트 폭을 결정하는 값이 되고 결국 최종 출력전압Vout에 노이즈 성분이 반영되어 그 결과를 관찰할 수 있다. 이 때 입력성분에 추가된 white 노이즈 성분과 white 노이즈 성분에 의해 응답한 출력응답 성분을 비교하여 이를 추출해 내는 방법이다.<sup>[3]</sup>

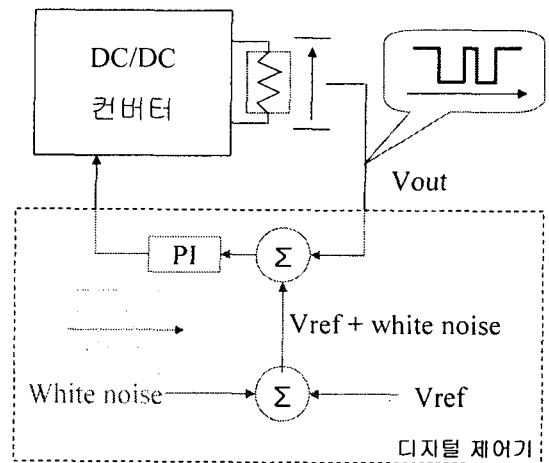


그림 6 열화지수의 측정방법

## 3. DC/DC 컨버터 진단 시스템의 시작품 제작 및 실험

DC/DC 컨버터는 다음과 같은 사양을 제작되었다.

표 1 회로정수

입력전압 $V_{in}$	24[V]
출력 전압 $V_o$	5[V]
부하 저항 $R_o$	10.6[Ω]
인덕터 직렬저항 $r_l(20kHz)$	1.20223[mΩ]
콘덴서 직렬저항 $r_c(20kHz)$	157.474[mΩ]
스위칭 소자 직렬저항 $r_t$	10.7[mΩ]
다이오드 직렬저항 $r_d$	6.1[mΩ]
콘덴서 C(삼합콘덴서, 105도)	470[μF]
인덕터 L	20[kHz]
스위칭소자	
다이오드	



DC/DC 컨버터 시작품

그림 7 제작된 컨버터의 주회로 및 시작품

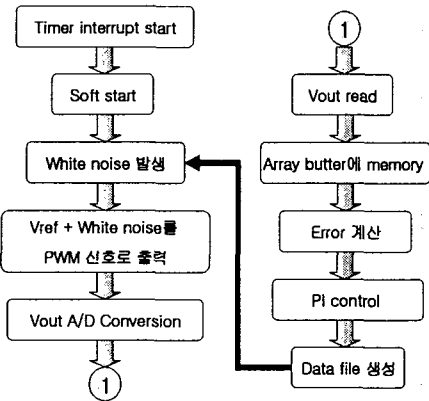


그림 8 진단 알고리즘 구현 플로우차트

그림 8는 진단 알고리즘 구현을 위한 플로우차트이다. 앞절에서 설명된 진단 알고리즘을 구현하기 위하여 DSP320C32 에뮬레이터를 이용하여 AD 샘플링된 데이터를 버퍼에 저장하고, 저장된 버퍼에서 data 파일로 변환한 뒤에 이를 matlab에 있는 라이브러리를 이용하여 시스템 ID를 구현하였다. 그림 10은 입력지령치에 추가된 white 노이즈 성분과 그 응답특성이고, 그림 11은 응답 특성으로 결정되어진 시스템 ID의 결과로 각 회로정수를 구한 뒤 다시 전달함수를 시뮬레이션한 결과로써 실험에 의해 해석된 결과와 시뮬레이션의 결과치가 거의 일치하여 진단 알고리즘을 증명하고 있다.

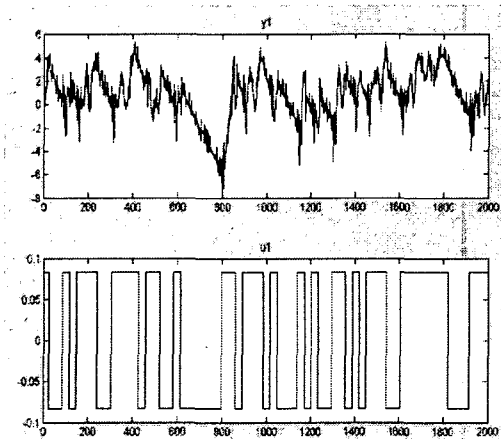


그림 9 입력지령치에 추가된 white 노이즈 성분과 그 응답특성

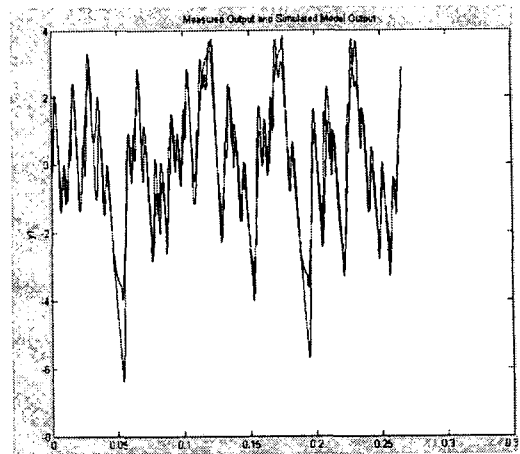


그림 10 실험에 의해 해석된 결과와 시뮬레이션의 결과 ( $\xi_1 = 0.12$ )

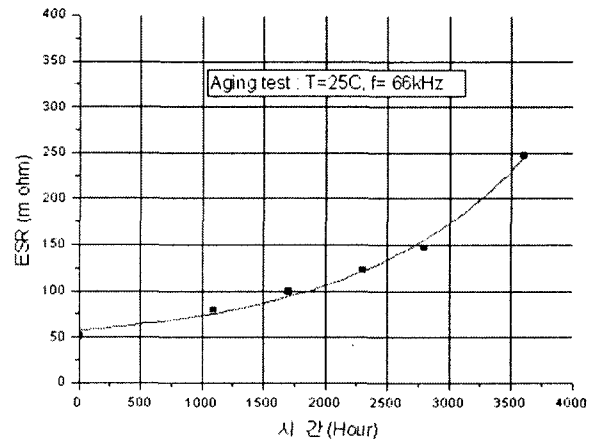


그림 11 열화가속에 의한 전해콘덴서 등가직렬저항 변화<sup>[4]</sup>

그림 11은 열화가속에 의한 전해콘덴서의 등가직렬저항성분이 변화를 나타낸 값이다.<sup>[4]</sup> 25도에서 스위칭 주파수 66kHz의 조건으로 운전하는 전해 콘덴서의 시간에 따른 ESR 변화량으로 최초시간 0에 비하여 4000시간사용후 약500%정도의 변화가 있음을 알 수 있다. 표2는 2가지 조건에 대한 실험 및 해석한 결과이다. 조건1은, 표 1에 나와 있는 회로정수값으로 그림1의 Buck 컨버터를 실험한 결과로써 2.2절에 설명한 방법으로 회로정수  $a, \tau, g, \xi, \xi_1$  를 각각 추출하였고, 그 때 이론치인 식(1)과 비교한 결과이다. 조건2는 조건1과 동일한 조건에서 출력콘덴서C에 직렬로 강제 저항208[m $\Omega$ ]를 삽입한 결과의 실험치과 이론치의 비교이다. 이때 오차는  $\xi_1$  에 대한 실험 오차이다. 5~8%이하의 비교적 아직 큰 오차이지만, 모델링 혹은 계측상의 오차를 고려해 본다면, 상당히 진단기술에 근접한 결과로 판단되며, 또 이를 보완하기 위해서는 절대적인 값의 비교과 함께 변화추이를 함께 고찰해볼 필요가 있음이 예상된다.

표 2 회로정수

	조건1		조건2 (208[mΩ]강제삽입)	
	실험치	이론치	실험치	이론치
부하[Ω]	10.6	10.6	10.6	10.6
fitting율	60.8%	-	69.6%	-
ESR[mΩ]	157.474	157.474	365.474	365.474
a2	9.44E-07	4.22E-07	8.72E-07	4.14E-07
a1	6.20E-04	6.54E-04	6.87E-04	7.28E-04
g	17.5428	20.90761	17.5571	20.40273
$\xi_1$	0.120133	0.128954	0.13756	0.149991
$\xi_2$	-0.26905	-0.12885	-0.26845	-0.14989
오차	6.84%	-	8.23%	-

그림 12, 그림 13, 그림 14는 부하변화에 대한  $\xi_1$ , a1, a2 의를 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하여 진단 알고리즘을 증명하였다.

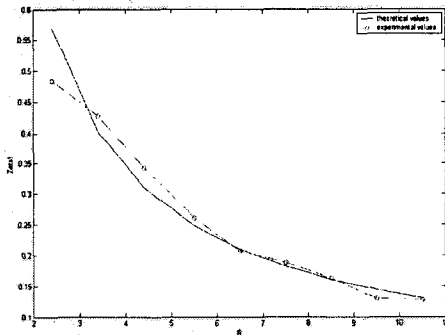


그림 12 부하변화에 대한  $\xi_1$ 의 변화비교  
(-○-실험치 & —이론치)

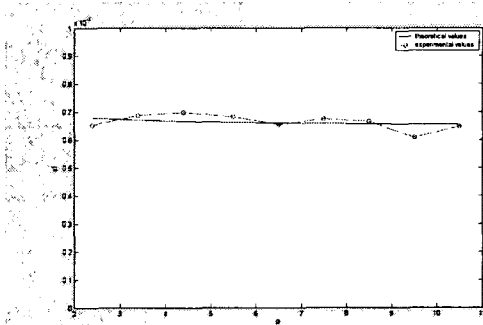


그림 13 부하변화에 대한 a1의 변화비교  
(-○-실험치 & —이론치)

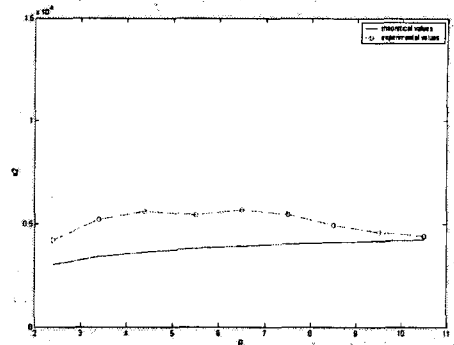


그림 13 부하변화에 대한 a2의 변화비교  
(-○-실험치 & —이론치)

#### 4. 결 론

이하와 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 전력변환장치중 DC/DC 컨버터의 진단을 위하여 새로운 알고리즘을 제시하였다.
- 2) 개별 소자진단 방식이 아닌 시스템진단을 위하여 열화진단 지수를 선정하였다.
- 3) 그 열화진단지수로써 각 부분품의 기생성분의 함수인  $\xi$ 를 선정하였다.
- 4)  $\xi$ 의 추출방법으로 전력변환장치의 시스템 ID를 이용하였다.
- 5) 이 방식은 On-line 진단기술에 접목이 가능하다.
- 6) DC/DC 컨버터의 시작품을 제작하여 실험을 통하여 해석한 결과와 시뮬레이션결과가 거의 일치하여 진단알고리즘을 증명하였다.

향후, 부하변화 및 입력전압/출력전압 변화분에 대한 모델링의 오차 허용정도를 판단할 수 있는 기준을 마련하는 연구를 계속할 계획이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A.J. Margues Cardoso, "Converter Fault Diagnosis in Variable Speed DC Drives, by Park's Vector", ISIE '97 pp. 497-500.
- [2] A. Landi, L. Sani, "Modulating function testing the performance of switch mode converter", IEEE. SDEMPED 01, pp. 195-200.
- [3] CLERC Guy, etc. "Cegely's Diagnostic tools for electrical drives", IEEE. SDEMPED 01, pp. 85-89.
- [4] Amini Lahyani, etc, "Failure Prediction of Electrolytic Capacitors during Operation of a Switch mode Power Supply", IEEE Transaction on PE., Vol. 13, No. 6, Nov. 1998.