

시스템 식별 기법을 이용한 DC-DC 컨버터 파라미터 추정

The Parameter Estimation of DC-DC Converter by System Identification Method

전진홍*, 김태진**, 김광수***, 김광화****

(Jin-Hong JEON and Tae-Jin KIM and Kwang-Su KIM and Kwang-Hwa KIM)

* 한국전기연구원 산업전기연구단(전화:(055)280-1355, 팩스:(033)280-1436, E-mail : jhjeon@keri.re.kr)

** 한국전기연구원 산업전기연구단(전화:(055)280-1412, 팩스:(033)280-1436, E-mail : tjkim@keri.re.kr)

*** 한국전기연구원 산업전기연구단(전화:(055)280-1453, 팩스:(033)280-1436, E-mail : kskim@keri.re.kr)

**** 한국전기연구원 산업전기연구단(전화:(055)280-1570, 팩스:(033)280-1436, E-mail : khkim124@keri.re.kr)

Abstract : In this paper, we present the results of parameter estimation for dc-dc converter model by system identification. The parameter estimation for dc-dc converter aims at the diagnosis of its operating status. we applied the system identification method for parameter estimation. For verification of estimated parameter, we compare bode plot of estimated system transfer function and measurement results of HP4194 instrument.

Keywords : System ID, ARX model, parameter estimation, DC-DC converter, diagnosis

1. 서론

dc-dc 컨버터는 산업 현장, 일반 가정, 정보/통신 분야 등 직류 전원을 사용하는 기기에 사용되고 있으며 적용 분야에 따라 노트북 컴퓨터나 embedded system 과 같이 작은 용량에서부터 통신용 중계기 전원장치와 같이 큰 용량까지 다양한 분야에서 사용되고 있다. dc-dc 컨버터와 같은 전력 변환 장치의 사고 시에는 전원 차단으로 인한 기기 오동작 등으로 인해 인명 및 재산에 막대한 손실이 발생할 수 있으므로 사고를 예방하는 것이 필요하다. 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 방법으로써 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, 신호처리기법 등을 이용한 변화의 추이와 과정을 고찰하는 방식의 진단방법 등이 연구되어 오고 있다^{[1][2][3]}.

본 논문에서는 전력 변환 장치의 열화를 대표할 수 있는 대표지수를 선정하고 이를 이용하여 전력변환장치를 진단하는 방법을 연구의 일환으로 전력 변환 장치의 주요 파라미터를 시스템 식별 기법을 통해 추정하고 추정된 결과가 유용한지를 검증하고자 한다. 여러 가지 전력 변환 장치 중 통신 기기나 제어기기 등에 많이 사용되고 있는 dc-dc 컨버터를 대상으로 하여 ARX 모델 기법을 이용하여 시스템의 전달함수를 추정하였다. 추정된 파라미터의 정확성을 검증하기 위하여 계측기를 통해 측정된 주파수 응답 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

II. 시스템 식별(System Identification) 기법

시스템 식별은 미지의 시스템에서 관측된 입출력 자료를 가지고 그와 동일한 동작을 할 수 있는 수학적인 모델을 결정하는 것이다. 개념적인 관점에서 볼 때 식별 방법은 관찰된 입출력 자료의 공간에서 모델 공간

으로의 사상(mapping)이다. 측정된 입력-출력 데이터로부터 동적 모델의 모델을 결정하기 위한 과정은 다음 3가지 기본 항목을 포함하고 있다.

1. 입력-출력 데이터
2. 모델 집합(모델 구조)
3. 이 집합에서 데이터를 정보를 기반으로 특정한 모델을 선택하는 법(식별 방법)

식별 과정은 반복적으로 모델 구조를 선택하고 가장 좋은 모델을 계산하며, 이 구조가 만족스럽다면, 이 모델의 속성을 조사한다. 이런 과정은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 식별하기 위해서 공정으로부터 입력-출력 데이터를 실험하고 수집한다.
2. 데이터의 유용한 부분을 선택하고 주요한 주파수 범위를 강조하기 위해 필터링을 적용한다.
3. 모델 구조를 선택하고 정의한다.
4. 입력-출력 데이터와 주어진 적합률 기준에 따라 모델 구조에서 가장 좋은 모델을 계산한다.
5. 얻어진 모델의 속성을 검사한다.
6. 모델이 충분히 만족스러우면, 정지한다. 그렇지 않으면, 또 다른 모델 집합을 갖고 스텝 3번부터 다시 반복한다. 가능한 다른 추정 방법(스텝 4)을 시도하거나 입력-출력 데이터에서 다시 작업한다.(스텝 1과 2)

III. 연구 내용

1. dc-dc converter 전달 함수

dc-dc 컨버터의 구성은 전력용 반도체 소자, 평활커패시터, 인덕터 등으로 구성된다. 이들 구성품들은 장기간 사용에 따라 제품의 열화를 가져오고, 열화에 따라 각 부품을 구성하는 적병렬 등가 저항들은 증가한다. 이 증가하는 저항요소를 열화진단지수로 둔다. 그림 1은 전력변환장치 중 buck 컨버터에서 각 구성품의 기생저항 성분회로를 포함한 등가회로이다.

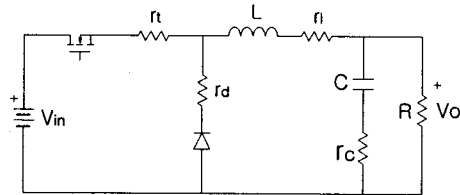


그림 1. 기생 저항을 고려한 buck 컨버터

수식 1과 같이 그림 1의 전달함수 및 열화진단지수를 정의할 수 있다.

$$\frac{\delta V_c(s)}{d(s)} = V_{in} \frac{(1 + srcC)(1 + \zeta_2)}{\frac{LCs^2}{1 + \zeta_1} + \frac{s}{1 + \zeta_1} \left(\frac{L}{R} + CR\zeta_{a1} \right) + 1} \quad (1)$$

여기서,

$$\zeta_1 = \frac{r_1 + r_1 D + (r_c + r_d)(1 - D)}{R}, \quad \zeta_2 = \zeta_1 - (D r_1 - D r_d) / R$$

DC 출력 전압 $V_o = DV_{in}$ (인덕터 전류가 연속으로 흐른다고 가정 : CCM) V_{in} : 입력 전압, D : 시비율, $D_1 = 1 - D$, L : 인덕터, C : 커패시터, R : 부하 저항, r_l : 인덕터 내부 저항, r_c : 커패시터 내부 저항, r_s : 스위치 내부 저항, r_d : 다이오드 내부 저항

위의 수식에서 ξ_1, ξ_2 는 dc-dc 컨버터 내부 저항의 조합으로 구성됨을 알 수 있고, 열화에 의한 내부 저항의 변화는 ξ_1, ξ_2 에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, 모든 내부 저항 값을 일일이 체크하여 측정하는 것은 현실적으로 불가능하며, ξ_1, ξ_2 값을 측정하여 값을 변화로써, 열화를 판단하는 방법을 적용하는 것이 바람직하다. 위에서 수학적 등가 모델과 실험으로 측정된 등가 모델의 전달 함수는 간략하게 정리하면 아래 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

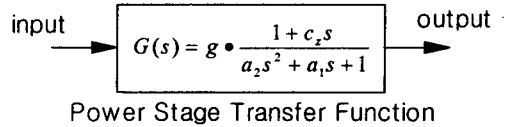


그림 2. dc-dc 컨버터 등가 모델 전달 함수

여기에서 g, a_2, a_1, c_2 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 ξ_1, ξ_2 로 구성되어 있다.

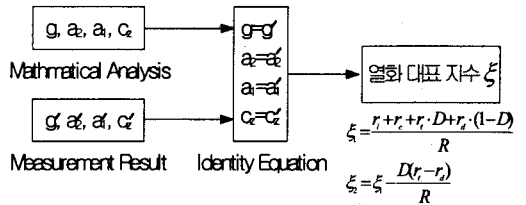


그림 3. 열화 대표 지수를 구하는 방법

따라서, 아래 그림과 같이 수학적인 모델링에 의해 구해진 수식과 실험에 의하여 측정된 실제 값을 항등식이 성립하게 되고, 수식을 전개하여 풀이하면 원하는 열화 대표지수인 ξ_1, ξ_2 의 값을 구할 수 있다. 위에서 설명한 내용을 정리하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용된 buck 컨버터의 주요 파라미터는 표 1과 같으며 이 때 전달함수의 계수는 표 2와 같다.

표 1. buck 컨버터
주요 파라미터

계수	값
D	0.24±0.04
Vin	24 [V]
C	470 [μF]
L	1.017 [mH]
R	10.5 [Ω]
rt	10.7[mΩ]
rd	6.1[mΩ]
rl	1.20223[Ω]
rc(ESR)	157.474[mΩ]

표 2. buck 컨버터
전달함수 계수

계수	값
g	20.878162
Cz	7.4013e-005
a2	4.216844e-007
a1	6.538932e-004
ξ1	0.130182
ξ2	-0.130077

2. ARX 모델을 이용한 전달함수 추정

시스템 입출력 데이터로부터 이산형 전달함수 계수를 추정해내는 과정이다. 이 과정에서 사용하는 대상 시스템 모델은 다음과 같은 ARX 모델이다.

$$\begin{aligned} A(q)y(t) &= B(q)u(t) + e(t) \\ A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} \\ B(q) &= b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $u(t)$, $y(t)$ 는 각각 시스템 입력과 출력이고, $e(t)$ 는 영평균 정규 백색잡음으로서 측정잡음을 나타낸 것이다. 이와 같은 ARX 모델에서 대상 시스템의 이산형 전달함수는 다음과 같다.

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1z + b_2}{z^2 + a_1z + a_2} \quad (3)$$

여기서, 시스템 식별 과정은 시스템의 입출력 데이터 $\{u(t), y(t)\}_1^N$ 로부터 전달함수의 미정계수 $\theta = \{a_1, a_2, b_1, b_2\}$ 를 산출하는 것이다. 미정계수에 대한 추정치 $\hat{\theta}$ 은 대상모델이 ARX이기 때문에 다음과 같은 LSE(Least Squares Estimation) 알고리즘을 적용하여 처리하였다^[6].

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= R(N)^{-1}f(N) \\ R(N) &= \Phi^T\Phi, \quad f(N) = \Phi^TY \\ \Phi &= \begin{bmatrix} -y(0) & -y(-1) & u(0) & u(-1) \\ -y(1) & -y(0) & u(1) & u(0) \\ -y(2) & -y(1) & u(2) & u(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(N-1) & -y(N-2) & u(N-1) & u(N-2) \end{bmatrix} \\ Y &= [y(1) y(2) y(3) \dots y(N)]^T \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 행렬 Φ 는 과거의 입출력 데이터로 구성되는 회귀행렬(Regression matrix)로서 시스템 식별에 중요한 역할을 한다. 이 행렬에 들어가는 입출력 데이터 성분 중에 초기치에 해당하는 $y(-1)$, $y(0)$, $u(-1)$, $u(0)$ 를

은 값이 주어지지 않는 경우에는 0으로 처리하였다. 프로그램에 의하여 구해진 추정 계수들은 모두 이산형 전달함수에 대한 결과이므로, 이산형 전달함수를 연속형으로 변환하여 주어야 한다. 이산형 전달함수를 연속형으로 변환하는 방법으로는 오일러 공식(Euler rule), 사다리꼴 공식(Trapezoidal rule), 양선형 공식(Bilinear rule), SI 공식(Step Invariant rule) 등 여러 가지가 있다. 그런데 대상시스템에서는 입출력 데이터를 샘플링하는 과정에서 ADC를 사용하였으므로, 이산형 전달함수를 연속형으로 변환하는 과정은 이에 적합한 SI 공식을 사용해야 한다. 이 변환공식은 다음과 같이 정의된다^[7].

$$G(s) = s\mathcal{L}\left\{Z^{-1}\left[\frac{z}{z-1}G(z)\right]\right\} \quad (5)$$

여기서 \mathcal{L} 는 라플라스 변환을, Z^{-1} 는 z 역변환을 나타낸다. 이 변환과정을 거쳐서 구해지는 연속형 전달함수의 형태는 다음과 같다 :

$$G(s) = \frac{b_0s^2 + b_1s + b_2}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (6)$$

여기서 구해진 연속형 전달함수의 추정계수인 $\hat{\theta}_c = \{a_1, a_2, b_0, b_1, b_2\}$ 이 추정하고자 하는 buck converter의 전달함수 계수가 된다.

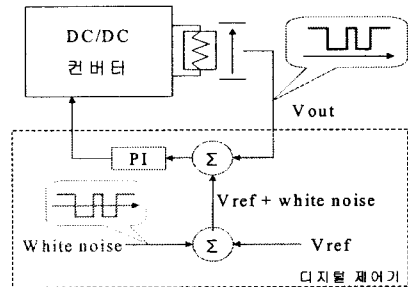


그림 4. 데이터 추출을 위한 실험 구성

그림 4는 시스템 식별을 위한 데이터를 추출하기 위한 실험 구성도이다. 시스템 식별을 위한 데이터 추출을 위해 디지털 제어기의 입력 지령치에 white 노이즈 성분을 제어기의 입력으로 추가한다. 이 출력은 전력 변환장치의 출력전압Vout과 비교하여 그 값을 PI 제어기의 입력으로 둔다. PI 제어된 출력결과는 전력변환장치의 게이트 폭을 결정하는 값이 되고 결국 최종 출력 전압 Vout에 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. 이렇게 얻어진 입력과 출력 데이터를 Matlab으로 작성된 시스템

식별 프로그램에 적용시켜 주요 파라미터를 추정하였다. 추정된 결과와 이론치를 비교한 결과는 표 3과 같다.

표 3. 전달함수 계수의 이론치와 추정치

계수	이론치	추정치
g	20.878162	20.6754
Cz	7.4013e-005	7.4937e-005
a2	4.216844e-007	4.2192e-007
a1	6.538932e-004	6.4438e-004

표 3의 결과를 보아 알 수 있듯이 ARX 모델을 이용한 시스템 식별 방법의 결과는 이론적으로 계산한 값과 유사함을 알 수 있었다.

3. 추정된 파라미터의 검증

ARX 모델을 이용한 시스템 식별 결과를 검증하기 위해 그림 5와 같이 시스템을 구성하고 HP4194 control system 계측기를 이용하여 실험에 사용된 buck 컨버터의 주파수 응답을 측정하여 보았다.

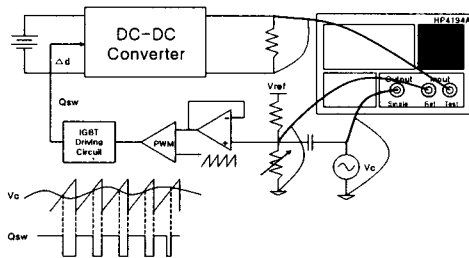


그림 5. 주파수 응답 측정을 위한 시스템 구성

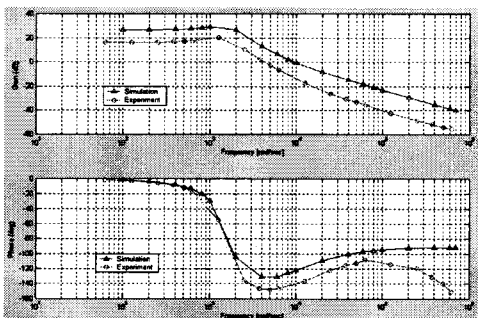


그림 6. 계측된 주파수 응답 특성과 추정된 주파수 응답 특성

시스템의 주파수 응답을 측정하는 HP4194 계측기는 계측기의 출력을 buck 컨버터의 기준 제어 입력에 연결하고 buck 컨버터의 출력을 계측기의 입력에 연결하는 구성을 하였다. 이러한 구성을 통해 계측기는 시스템에 특정 주파수의 입력을 가한 후 컨버터의 출력을 통해 나오는 특정 주파수의 크기와 위상각을 측정하여

컨버터의 주파수 응답을 실험적으로 구하는 것이 가능하다.

계측기를 통해 측정된 buck 컨버터의 주파수 응답 특성과 시스템 식별을 통해 구해진 파라미터를 이용해 얻어낸 주파수 응답 특성을 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 결과에 나타난 바와 같이 추정된 주파수 응답 특성과 측정된 주파수 응답 특성을 비교해 보면 루프 이득과 위상 특성이 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서, ARX 모델을 이용한 시스템 식별에 의한 파라미터 추정이 유효함을 알 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 대표적인 전력 변환 장치인 buck 컨버터의 주요 파라미터를 ARX 모델을 이용한 시스템 식별에 의해 추정하였으며 추정된 결과를 계측기로 측정된 주파수 응답 특성을 비교하여 그 결과의 타당성을 검증하였다. 이러한 결과를 통해, 시스템 식별을 통한 특정 파라미터의 추정 방법이 전력 변환 장치의 진단에 사용될 수 있음을 보였다. 또한 시스템 식별을 통한 방법은 입출력 데이터의 관찰만으로 이루어지기 때문에 on-line 진단 기술에도 접목이 가능할 것으로 생각되어진다. 향후 ARX 모델에 의한 방법 외의 적용 가능한 모델에 대한 연구가 이루어질 계획이며 on-line화를 위한 연구 또한 진행되고 있다.

참고문헌

- [1] A.J. Margues Cardoso, "Converter Fault Diagnosis in Variable Speed DC Drives, by Park's Vector", ISIE'97 Pp497-500.
- [2] A. Landi, L. Sani, "Modulating function testing the performance of switch mode converter", IEEE. SDEMPED 01, Pp195-200.
- [3] CLERC Guy, etc. "Cegely's Diagnostic tools for electrical drives", IEEE. SDEMPED 01, Pp85-89.
- [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.
- [5] 김태진 외 "기생저항변화를 고려한 DC/DC 컨버터 열화 진단", 전력전자학술대회 논문집, 2003. 7, pp97-101
- [6] L. Ljung, System Identification : Theory for the Users(2nd Ed.), Prentice-Hall Inc., 1999.
- [7] R. H. Middleton and G. C. Goodwin, Unified Approach to Digital Control and Estimation, Prentice-Hall Inc., 1991.
- [8] R. Johansson, System Modelling and Identification, Prentice-Hall Inc., 1993.