

시스템 식별론을 이용한 모터 드라이브 시스템에서의 전해 콘덴서 결함 진단

김준석, 송홍석, 남광희

포항공과대학교 제어 및 모터 드라이브 연구실

Deterioration Diagnosis of Electrolytic Capacitor in Motor Drive System using the System ID Method

Jun-seok Kim, Hong-seok Song, and Kwang-hee Nam

Department of Electronics and Electrical Engineering, POSTECH

Abstract

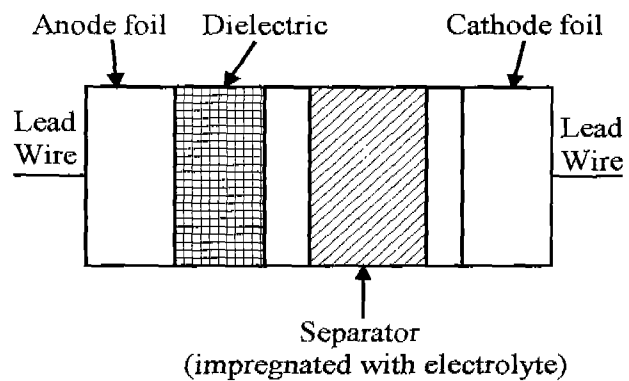
An electrolytic capacitor is widely used in a motor drive system. Therefore, the deterioration diagnosis of an electrolytic capacitor is needed for preventive maintenance of the system. In this paper, we propose a new diagnosis method for the electrolytic capacitor by using the system identification method, which presents the information about the capacitor's internal parameters in on-line operation and use fuzzy algorithm for the deterioration decision. We demonstrated the effectiveness of the proposed control scheme by using computer simulation.

I. 서론

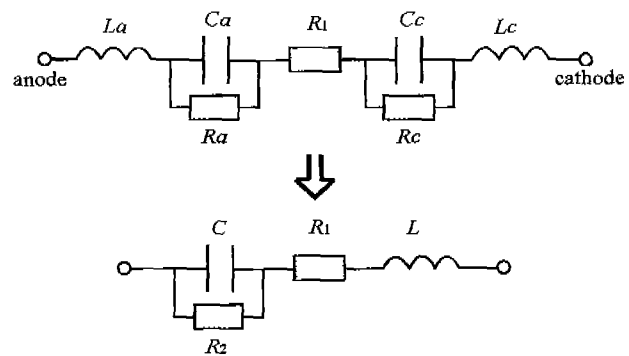
대부분의 전력전자 시스템에서 사용되고 있는 전해 콘덴서는 시스템 전체의 안정성과 밀접한 관련이 있으며, 실제 전력전자 시스템이나 모터 드라이브 시스템에서 발생하는 사고의 많은 부분이 전해 콘덴서의 결함으로 인해 발생하고 있다[1][2][3]. 따라서, 콘덴서의 교체 시기를 잘 파악하는 것이 중요한데, 콘덴서의 수명이 온도나 리플 고조파, 샘플링 주파수에 매우 민감해서 일반적인 수명과 차이가 많기 때문에 그 시기를 알기가 상당히 어렵다. 대부분의 산업 현장에서조차 작업자의 경험에 의해 교체가 이루어지고 있는 실정이다.

본 논문에서는 least square 방법을 이용해 운전 중인 콘덴서의 내부 파라미터 값들을 식별하고 여기에 퍼지 알고리즘을 적용해 콘덴서의 결함 정도를 알려주는 방안을 제안한다.

II. 콘덴서의 소진 메커니즘



(a)



(b)

그림 1. (a)콘덴서의 내부 구조와 (b)등가 회로

그림 1은 단순화된 콘덴서의 내부 구조와 그것의 전기적 등가 회로를 보여준다. 그림 1(a)는 콘덴서가 음극박과 양극박, 유전물질, 전해액, 그리고 전해지로 크게 구성되어 있음을 보여준다. 그림 1(b)에서 C_c

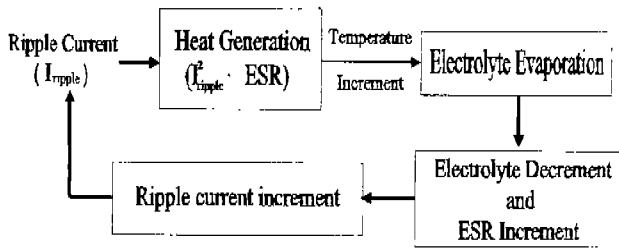


그림 2. 콘덴서의 소진 알고리즘

와 C_a , L_a 와 L_c , 그리고 R_a 와 R_c 는 각각 음극박과 양극박의 정전 용량과 리드 인덕턴스, 유전 손실 저항(dielectric loss resistance)을 나타내고, R_1 은 리드 선, 단자, 유전체, 전해지, 양극박, 음극박 각각의 저항 성분의 전체 합을 나타내며 등가 직렬 저항(ESR)이라 한다.

그림 2는 콘덴서의 소진 메커니즘을 보여준다. 내부 저항을 통해 흐르는 고주파의 리플 전류는 콘덴서 내부 온도를 상승시키게 되고, 상승된 온도로 인해 유전 물질이 증발하게 되어 감소하게 된다. 유전 물질의 감소는 상대적으로 등가 직렬 저항(ESR)을 상승시키게 되고 리플 전류를 더 크게 만드는 결과를 낳는다. 그림 1.(b)에서 입력 전류에 대한 콘덴서 양단(anode, cathode)의 출력 전압을 전달 함수로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\frac{V(s)}{I(s)} = R_1 + sL + (R_2 \parallel \frac{1}{sC}) \quad R_1 + sL + \frac{1}{s - \frac{1}{R_2 C}} \quad (8)$$

이 때, 식(1)에서 $R_2 \parallel \frac{1}{sC} \equiv R_a \parallel \frac{1}{sC_a} - R_d \parallel \frac{1}{sC_c}$ 이고, $L = L_a + L_c$ 이다. 이 식을 다시 Z-변환하고 그것을 다시 시간 영역(discrete time domain)으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} v(k) &= e^{-h/CR_1} v(k-1) \\ &+ (R_1 + L) i(k) \\ &+ (R_2 - L - (R_1 + R_2 + L) e^{-h/CR_2}) i(k-1) \\ &+ L e^{-h/CR_2} i(k-2) \end{aligned} \quad (2)$$

(h는 샘플링 주기)

III. 결함 진단 알고리즘

본 장에서는 콘덴서의 내부 파라미터 추정 및 상태 진단 알고리즘을 제안한다. 파라미터 추정 알고리즘은 일반적인 least-squares (LS) 방법을 이용하여 유도하였다. 상태진단 알고리즘은 추정된 파라미터에 퍼지방법을 적용하여, 콘덴서의 상태를 "normal", "warning", "caution", 및 "critical"과 같은 4가지 단계로 나타내어 준다.

A. 파라미터 식별

식(2)를 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$v(k) = \varphi(k)^T \theta \quad (3)$$

$$\varphi(k) = [v(k-1) \quad i(k) \quad i(k-1) \quad i(k-2)]^T$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T$$

$$= [e^{-h/CR_1} \quad (R_1 + L) \quad (R_2 - L - (R_1 + R_2 + L)e^{-h/CR_2}) \quad Le^{-h/CR_2}]^T$$

$$R_1 = \theta_2 - \theta_4 / \theta_1 \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{\theta_3 + \theta_2 \theta_1 + \theta_4 / \theta_1}{1 - \theta_1} \quad (5)$$

$$C = \frac{-h(1 - \theta_1)}{(\theta_3 + \theta_2 \theta_1 + \theta_4 / \theta_1) \ln \theta_1} \quad (6)$$

$$L = \theta_4 / \theta_1 \quad (7)$$

LS 알고리즘을 위한 기준 함수(cost function)는 식(8)과 같이 선택하였다

$$J_k(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^k \lambda^{k-s} (v(s) - \varphi(s)^T \theta)^2 \quad (8)$$

이 때, $\lambda \in (0, 1]$ 는 forgetting factor 이다. 즉, 기준 함수를 최소로 만드는 $\hat{\theta}$ 은 다음과 같다.[4][5]

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)(v(k) - \varphi(k)^T \hat{\theta}(k-1)) \quad (9)$$

$$K(k) = P(k)\varphi(k)$$

$$P(k) = \lambda^{-1} P(k-1) - \frac{\lambda^{-1} P(k-1) \varphi(k) \varphi(k)^T P(k-1)}{\lambda + \varphi(k)^T P(k-1) \varphi(k)}$$

$$\hat{\theta}(0) = [0.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad P(0) = \pi_0 I, \quad \pi_0 > 0$$

식(9)와 (4)~(7)로부터, 콘덴서 내부 파라미터 값을 추정할 수 있는데 $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1 \quad \hat{\theta}_2 \quad \hat{\theta}_3 \quad \hat{\theta}_4]$ 와 콘덴서 내부 파라미터의 추정치 $[\hat{R}_1 \quad \hat{R}_2 \quad \hat{C} \quad \hat{L}]$ 는 식(10)~(13)과 같은 관계를 갖는다. 그림 3은 그 개념도를 보여준다.

$$\hat{R}_1 = \hat{\theta}_2 - \hat{\theta}_4 / \hat{\theta}_1 \quad (10)$$

$$\hat{R}_2 = \frac{\hat{\theta}_3 + \hat{\theta}_2 \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_4 / \hat{\theta}_1}{1 - \hat{\theta}_1} \quad (11)$$

$$\hat{C} = \frac{-h(1 - \hat{\theta}_1)}{(\hat{\theta}_3 + \hat{\theta}_2 \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_4 / \hat{\theta}_1) \ln \hat{\theta}_1} \quad (12)$$

$$\hat{L} = \hat{\theta}_4 / \hat{\theta}_1 \quad (13)$$

이상을 바탕으로 전류와 전압을 측정하여 식(9)로부터 내부 파라미터를 구할 수 있다. 하지만, 컨버터/인버터 시스템에서 공간상, 구조상의 문제로 센서를 설치해서 실제로 DC 링크 콘덴서로 들어가는 전류를 측정하기는 매우 어렵다. 그러나, 컨버터/인버터 시스템에서 제어하는 동안 컨버터와 인버터의 스위치 상태를 알고 있으므로 컨버터에서 나가는 전류와 인버

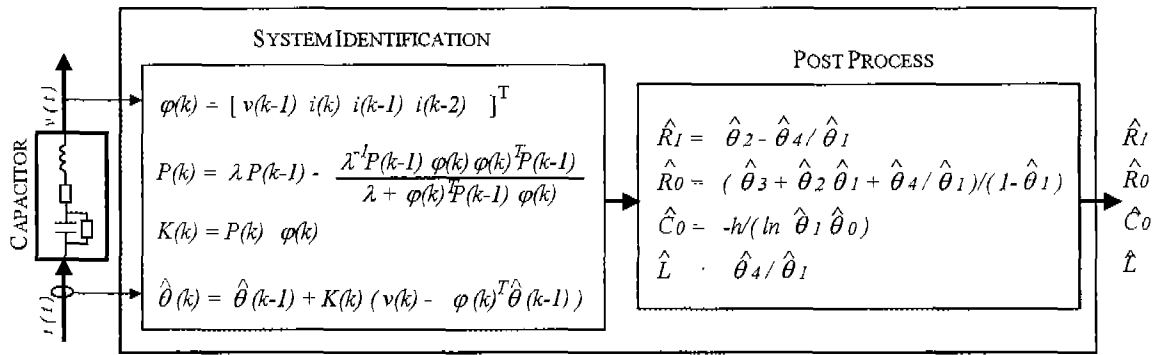


그림 3. 파라미터 추정 알고리즘 블록도

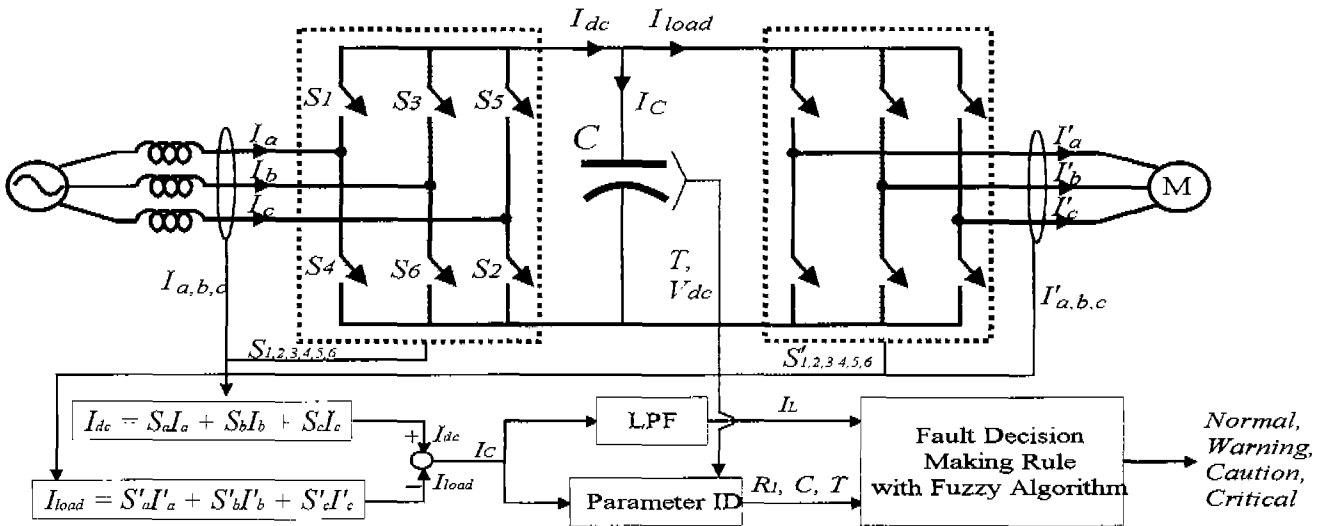


그림 4. 콘덴서 전류 및 누설 전류 측정 블록도

터로 들어가는 전류를 추정할 수가 있다. 따라서, 이들의 차이로부터 콘덴서로 들어가는 전류를 알 수가 있다. 그림 4는 이를 나타내주고 있다. 이 때 콘덴서의 누설 전류(I_L)는 입력 전류의 DC 성분이므로 저역 통과 필터(LPF)를 취하면 구할 수 있다.

B. 퍼지를 이용한 결함 진단

이상에서 추정된 콘덴서 파라미터들을 가지고 퍼지 알고리즘을 적용하여 결함을 진단해 보겠다. 우리는 다음과 같은 5개의 기준 함수(criterion function)로 선택하였다.

$$\mu_1 = \frac{\hat{C}}{C} \quad (14)$$

$$\mu_2 = \rho_1 \frac{\hat{R}_1}{\hat{C}} \quad (15)$$

$$\mu_3 = \frac{|I_L|}{I_{Lmax}} \quad (16)$$

$$\mu_4 = \frac{l_t}{l_x} \quad (17)$$

$$\mu_5 = \rho_2 \hat{R}_1 T \quad (18)$$

식(14)~(15)는 각각 정상 정전용량(C)과 추정 정전용량(\hat{C})의 비, 추정 정전용량(\hat{C})과 추정 ESR(\hat{R}_1)의 비와 최대 누설 전류(I_{Lmax})와 누설 전류($|I_L|$)의 비, 예상 수명(l_x)과 사용 시간(l_t)의 비, 마지막으로 온도(T)와 추정 ESR(\hat{R}_1)이 반비례 관계를 나타내고 있다. 여기서 ρ_1, ρ_2 는 표준화 상수이고, $\mu_1 \sim \mu_5$ 와 함께 모두 양의 값을 가진다. 예상 수명(l_x)은 온도(T)에 대한 함수로 다음과 같다.

$$l_x = l_0 \times A \frac{T_0 - T}{10} \quad (19)$$

T_0 는 콘덴서가 견딜 수 있는 최대 온도, l_0 는 최대 온도에서의 수명, A 는 온도 가속 계수로 약 2정도의 값을 가진다.[6] (14)~(18)식을 바탕으로 결함 진단 알고리즘을 만들면 그림 5와 같다.

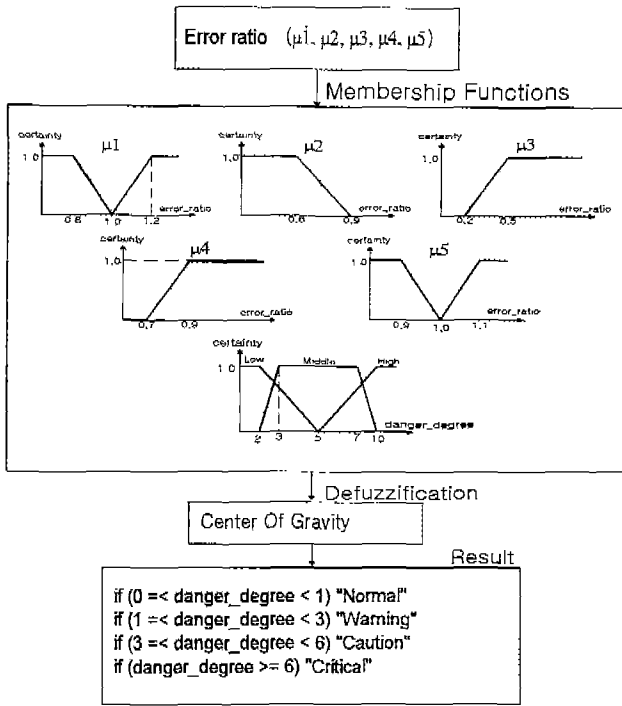


그림 5. 퍼지 진단 블록도

```

check = 0

if ( $\mu_1 > 1.2 \parallel \mu_1 < 0.8$ ) check = check + 1
if ( $\mu_1 > 1.2 + 0.1 \parallel \mu_1 < 0.8 - 0.1$ ) check = check + 1
if ( $\mu_2 < 0.8$ ) check = check + 1
if ( $\mu_2 < 0.8 - 0.1$ ) check = check + 1
if ( $\mu_3 > 0.5$ ) check = check + 1
if ( $\mu_3 > 0.5 + 0.1$ ) check = check + 1
if ( $\mu_4 > 0.9$ ) check = check + 1
if ( $\mu_4 > 0.9 + 0.1$ ) check = check + 1
if ( $\mu_5 > 1.1 \parallel \mu_5 < 0.9$ ) check = check + 1
if ( $\mu_5 > 1.1 + 0.1 \parallel \mu_5 < 0.9 - 0.1$ ) check = check + 1

```

```

min = Find minimum certainty()
av = Find average certainty()
max = Find Maximum certainty()

```

```

if (check == 0) {max*COG_warning(av)}
if (check == 1) {COG_warning(av), COG_caution(min)}
if (check == 2) {COG_warning(av), COG_caution(av)}
if (check == 3) {COG_warning(av), COG_caution(av), COG_critical(min)}
if (check == 4) {COG_warning(av), COG_caution(av), COG_critical(av)}
if (check == 5) {COG_warning(max), COG_caution(av), COG_critical(av)}
if (check == 6) {COG_warning(max), COG_caution(max), COG_critical(av)}
if (check > 7) {COG_warning(max), COG_caution(max), COG_critical(max)}

```

그림 6. 결정 규칙(decision making rule) 블록도

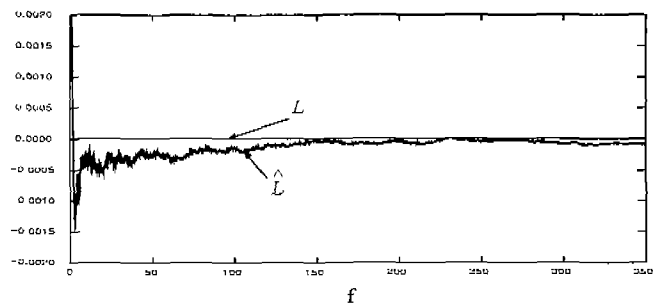
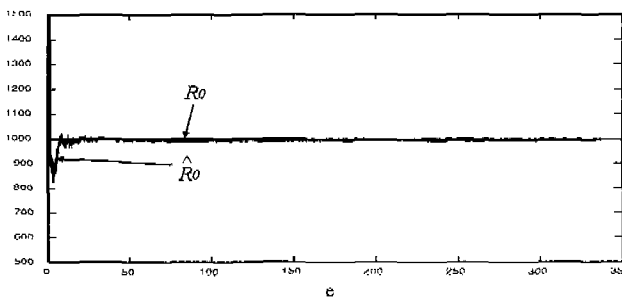
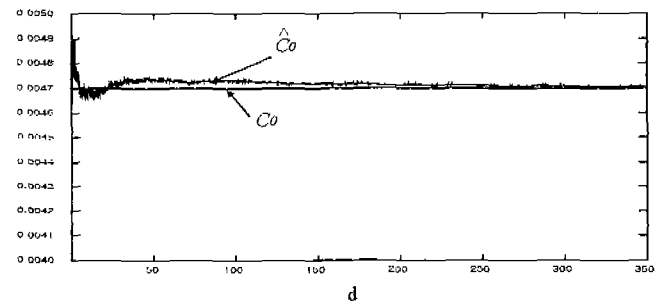
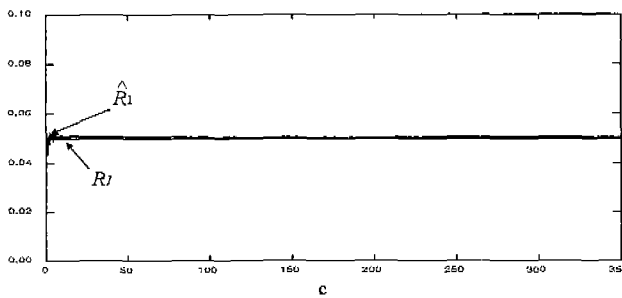
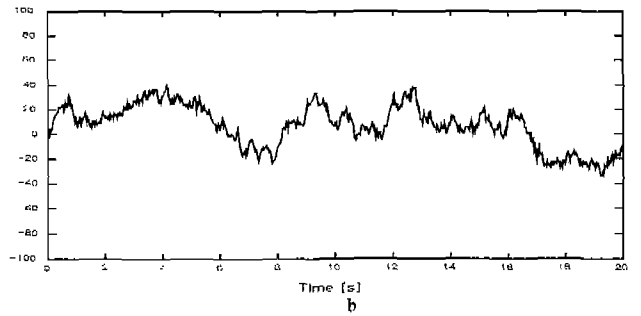
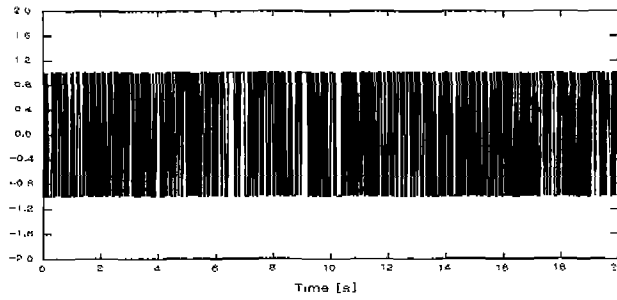


그림 7. 파라미터 추정에 대한 시뮬레이션

IV. 시뮬레이션 결과

A. 파라미터 식별

입력 전류와 명목 파라미터 값들은 식(20)과 표 1에 나와 있다.

$$I(t) = 0.5\sin(720\pi t) + 0.5Q(t) \quad (20)$$

R_1	C	R_2	L	h	I_{Lmax}	i_0	A_0	T_0
0.05 Ω	4700 μF	1 k Ω	100 μH	1/2000 s	3 mA	1000 hr.	2	105°C

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터 값

그림 7의 (a), (b)는 컨버터/인버터 시스템에서의 콘덴서 전압 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 7의 (c)~(f)는 그림 7의 (a), (b)와 같은 전류, 전압 파형에 대해서 콘덴서 내부의 파라미터들이 정상값을 따라가는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션 결과 실제값을 잘 추정하고 있음을 보여준다.

B. 퍼지를 이용한 결함 진단

앞서 설명한 퍼지 진단 알고리즘을 이용하여 여러 가지 $\mu_1 \sim \mu_5$ 에 대한 위험도의 정도를 시뮬레이션 했다. 각각의 경우에 대해 표 2에서 나타내었고, 그 때의 위험도를 그림 9에 나타내었다.

그리고, 시뮬레이션에서 사용한 ρ_1, ρ_2 는 다음과 같다.

$$\{\rho_1, \rho_2\} = \{\bar{C}/\bar{R}_1, 1/(\bar{R}_1 \times 23)\} \quad (21)$$

case	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
1	1.10	0.87	0.51	0.78	0.91
2	1.02	0.94	0.21	0.24	0.98
3	1.42	0.78	0.71	0.40	0.89
4	0.94	0.74	0.41	0.60	0.80
5	0.82	0.71	0.51	0.68	0.83
6	1.19	0.79	0.40	0.81	0.93
7	0.99	0.87	0.54	0.78	0.91
8	0.94	0.89	0.34	0.36	1.08

표 2. $\mu_1 \sim \mu_5$ 의 여러 가지 경우

V. 결 론

지금까지 컨버터/인버터 시스템에서 전해 콘덴서의 결함을 진단하는 알고리즘에 대해 제안했다. 제안된 알고리즘은 LS(Least-Square)방법을 이용하여 콘덴서 내부 파라미터를 식별하고 여기에 퍼지 알고리즘

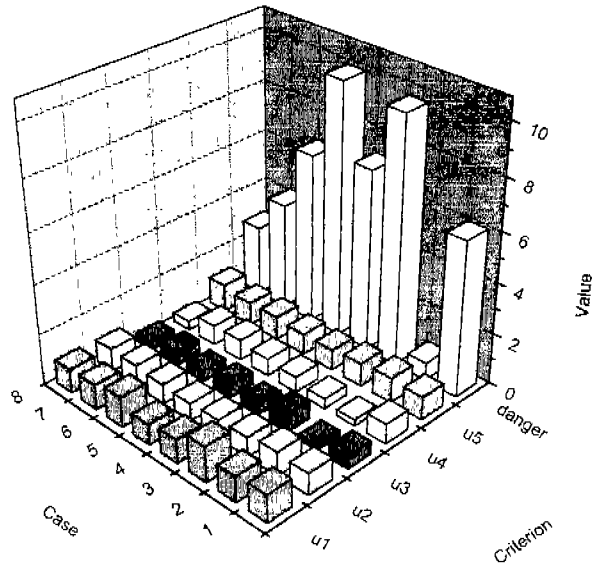


그림 8. 퍼지를 이용한 위험도 진단

을 직용해 콘덴서의 위험도 정도를 진단하는 것이다. 이는 시스템에서 콘덴서를 따로 떼어내어 진단하지 않고 운전중 바로 콘덴서의 결함 유무를 알 수 있어 사고를 미연에 방지할 수 있다는 장점이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이를 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Amine Lahyani, Pascal Venet, Guy Grellet, and Pierre-Jean Vierge, "Failure Prediction of Electrolytic Capacitors During Operation of a Switch mode Power Supply", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.13, No. 6, NOV., 1998.
- [2] Michael L. Gasperi, "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors", IEEE-IAS Annual Meeting, 1997.
- [3] Koosuke Harada, Akihiko Katsuki, and Masayuki Fujiwara, "Use of ESR for Deterioration Diagnosis of Electrolytic Capacitor", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 8,
- [4] Torsten Soderstrom, and Petre Stoica, "System Identification", Prentice Hall, 1989
- [5] Torsten Soderstrom, H. Fan, Bengt Carlsson, and Stefano Bigi, "Least Squares Parameter Estimation of Continuous-Time ARX Models from Discrete-Time Data", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 42, NO. 5, MAY, 1997
- [6] United Chemi-con co., "Technical Notebook of Aluminum Electrolytic Capacitor", 1994