

서지보호기의 상태 감시를 위한 MOV의 고장률 예측

Failure Rate Estimation of MOV for Condition Monitoring of Surge Protective Devices

김 동 진* · 김 영 선[†] · 박 재 준** · 이 기 식*
(Dong Jin Kim · Young Sun Kim · Jae Jun Park · Ki Sik Lee)

Abstract - MOV(Metal Oxide Varistor) is the most important part of SPD(Surge Protective Device) which can protect electric facilities from an impulse current such as a lightning. So far, the fault of MOVs have decided only by surge count without considering magnitude of surge current and an amount of input energy. This paper proposed the fault prediction algorithm for the MOV using look up table made by surge count and input current data which have non-linear characteristics for input current and are estimated by high voltage experimental results. Proposed algorithm was proved by experiment on verification at a high voltage laboratory.

Key Words : Surge protection device, MOV, failure rate, Non-linear characteristics, Lightning

1. 서 론

MOV(Metal Oxide Varistor)는 현재 사용되고 있는 SPD(Surge Protective Device)의 주요 부품으로 지속적인 낙뢰의 유입으로 인한 피로가 누적되어 손상한계에 도달하면 기기의 고장으로 이어진다. 일반적으로 낙뢰에 의하여 유입되는 유도되는 1초에 수회 연속적으로 유입되는 경우가 많다. 그러므로 실제로 SPD가 서지로부터 노출되는 빈도는 생각보다 크고 그 종류도 다양하다. 그에 따라 현재는 고장이 아닐지라도 실제 보호소자의 잔여수명이 얼마 남지 않은 경우 적절한 시기에 교체해주어야 하는 문제점이 있으나, 이를 판단할 근거가 현재는 없는 상황이다. 일부 누설전류나 서지횟수를 이용하여 고장률을 판단하는 방법이 있으나, 누설전류의 경우 측정이 용이하지 않고 서지횟수를 이용하는 경우는 서지 유입시마다 에너지양이 다르므로 횟수만을 이용하여 고장을 진단하는 것은 매우 불확실하다. 따라서 서지보호기의 고장 원인을 파악하고, 그에 따른 핵심소자인 MOV의 데이터 확보 및 분석을 통해 실시간으로 고장률 예측이 가능한 시스템이 필요하다[1]-[3]. 또한, 2008년 WTO 협약에 의해 건축물 뇌 보호 관련규정이 KS C IEC 62305로 개정되었다. 이에 따라 기존에 선택사항에 불과했던 내부 뇌 보호 설비인 SPD의 설치가 의무화 되었으나, 현재 디지털장비에 적합한 서지보호기가 없는 실정이다[4].

서지보호기의 고장은 MOV, 퓨즈, 반도체 소자, PCB부와 기타로 외함, 전선단락, 기계적 결함 등으로 분류할 수 있다.

그러나 제조사의 출고시점에서 PCB, 퓨즈, 소자 등은 충분한 실험적 품질관리를 통하여 신뢰성을 확보할 수 있다. 그러므로 제품의 사용 시 경년변화에 의하여 발생하는 문제점은 육안이나 계측장비를 통하여 식별할 수 있으나, MOV의 경우 육안 식별이나 계측기로 상태를 측정하는 것이 불가능하다. 그래서 SPD의 고장은 MOV의 고장이라 판단할 수 있으며, SPD의 주요고장 요인을 MOV의 손상으로 선정할 수 있다[5]-[8].

본 논문에서는 MOV에 유입되는 서지의 에너지양 및 유입 횟수와 손상 한계점과의 관계를 실험적으로 검증하여 비선형 참조표를 작성하였으며, 이를 이용하여 MOV의 고장률을 예측할 수 있는 알고리즘을 구축하고 실험을 통하여 검증하였다. 서지발생장치를 사용하여 8/20[us] 서지를 발생시켜 서지보호기 고장의 주된 원인이 되는 MOV의 수명 한계 시험을 반복적으로 수행하여 서지크기와 횟수의 비선형적인 관계를 확인하고 서지전류의 크기에 따른 유입된 에너지양을 정의하여 유입되는 서지전류에 대한 고장률을 도출하고 그 결과를 검증하였다.

2. 고장률 예측 알고리즘

2.1 MOV의 특성 및 고장 유형

그림 1과 같이 MOV는 양쪽에 전극이 존재하고 그 안에 ZnO 입자들이 존재한다. 이 때 전극사이에 평균적인 ZnO 입자들의 개수가 MOV의 전압을 결정짓는 중요한 요소가 된다. MOV는 보호하고자하는 부품이나 회로에 병렬로 연결하여 과도전압이 증가하면 낮은 저항성 회로를 형성하여 과도전압이 더 이상 상승하는 것을 막아준다. 또한 MOV의 두께를 두 배로 올리면 두 배 만큼의 미세 MOV가 직렬로 연결되어 보호 레벨이 두 배 올라가게 되고, 제품의 면적을 두 배로 하면 서로 병렬로 연결되어 있기 때문에 전류 경로가 두 배로 증가하게 되어 서지전류내량이 두 배로 올라간다.

기존의 서지보호기는 주요소자인 MOV가 서지에 노출되는 경우, 절연특성이 매우 느리게 변화하며, 소자의 한계 시

* Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University, Korea

** Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea

E-mail : yskim@joongbu.ac.kr

Received : February 12, 2013; Accepted : July 27, 2013

점이 되는 어느 순간에 급격히 나빠지는 비선형 특성으로 인해 서지보호기의 손상 및 고장 등의 판단이 불가능하다.

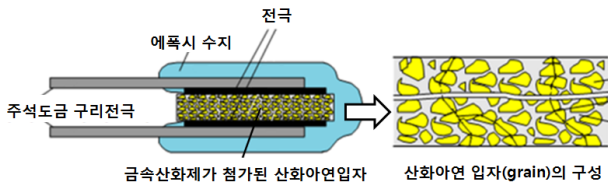


그림 1 산화아연 바리스터의 내부 구조 및 구성
Fig. 1 Interior structure of metal oxide varistor

산화아연 90%와 첨가물 10%로 혼합된 MOV의 특징은 임계전압 이하에서 매우 높은 저항을 가지므로 절연성을 갖고, 임계전압 이상에서는 저항이 급격히 저하하여 도통 상태가 된다. 또한 클램핑 특성이 우수하여 서지를 억제하는데 가장 안정적인 소자로 대부분의 서지보호기에 사용되고 있다. MOV의 손상은 외형으로 보아 그림 2에 보이는 것과 같이 열폭주, 천공, 크랙 및 에폭시 탈락 등으로 분류된다.



(a) 열폭주 (b) 천공 (c) 크랙발생 (d) 에폭시 탈락

그림 2 산화아연 바리스터의 손상모드 분류
Fig. 2 Damage mode for metal oxide varistor. (a) Thermal runaway, (b) puncture, (c) cracking and (d) epoxy break away

2.2 뇌격 전류 및 유입에너지 계산

MOV에 유입되는 에너지의 양에 따라 손상 한계횟수 측정 실험을 반복적으로 수행하여 신뢰성 있는 손상한계 횟수와 에너지양을 얻었다. MOV의 손상 직전의 에너지 양과 횟수를 측정하여 고장률 100%로 설정하였다. 또한, 실험결과로부터 에너지양에 따라 단위 횟수에 대한 고장률을 정의하였으며, 이때 실험을 통하여 얻은 비선형 서지 참조표가 사용되었다. 그러므로 제안한 방법이 제품에 적용될 때에는 서지보호기에 임의의 크기의 서지가 임의의 횟수로 유입되어도 고장률을 예측할 수 있고, 잔여 수명을 예측할 수 있다. 이는 사용자에게 교체시기를 알려줌으로써 서지보호기의 오작동 및 신뢰도를 높일 수 있다. 향후, 소자의 온도 및 누설전류 등을 반영하여 서지가 연속적으로 유입되었을 경우나 임의의 서지파형에 대하여도 고장률을 정의할 수 있는 연구가 이루어져야 한다. KS C IEC 61643에서 뇌격 전류는 그림 3과 같은 표준파형으로 나타내며, 식 (1)과 같이 정의된다. 또한 이 전류가 MOV에 유입되었을 경우 에너지 유입량은 식 (2)와 같다. 8/20파형은 임펄스 상승곡선 10%에서 최대 전류치의 90%까지 올라가는데 8μs의 시간이 걸리고,

하강할 때 최고치의 50%까지 도달하는데 50μs의 시간이 소요되는 전류 파형을 의미하며, 10/350 파형도 같은 의미를 가지고 있다.

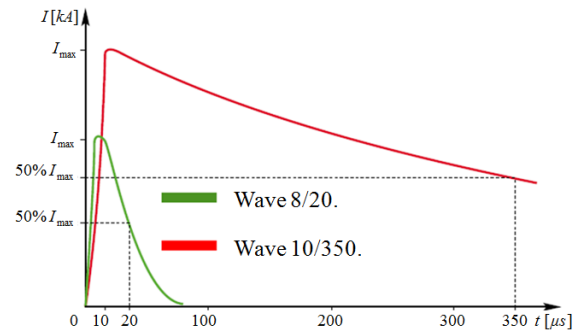


그림 3 뇌격 전류 표준 파형(8/20 과 10/350 파형)
Fig. 3 Standard lightning currents(8/20 and 10/350 waves)

$$i = \frac{I_{peak}}{K} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

여기서,

i_{peak} : 피크 전류

K : 피크전류 교정계수

$$(I_{peak} \geq 100 = 0.93, I_{peak} < 100 = 0.993)$$

t : 시간

τ_1 : 파두 시간

τ_2 : 파미 시간

$$W = \int v(t)i(t)dt = V_{clamp} \int i(t)dt \quad (2)$$

여기서, V_{clamp} : MOV의 클램핑 전압

2.3 한계 시험을 통한 알고리즘 구현

서지보호기의 손상 및 고장 등에 대한 성능은 MOV에 의해 좌우됨에 따라 한계시험을 통하여 유입 서지전류에 대한 고장시점을 확인한다. 서지보호기에 사용되는 MOV의 성능 지표 중 최대 에너지를 기준으로, 최대전류에서 MOV 소자가 손상 또는 고장 직전의 유입에너지를 100%로 하여 그 이하의 전류가 유입될 경우 소자가 손상되는 시점을 측정하고 그 비율에 따라 유입에너지를 계산하여 해당 소자의 잔여수명, 즉 고장률을 진단할 수 있다.

MOV가 손상되는 시점의 확인을 위하여 임펄스 전류 발생장치(Impulse current generator)와 충격전류 시험 장치를 통해 8/20us의 서지 전류를 발생시키고 MOV의 상태를 확인하였다.

예를 들어, 25D561K 규격의 MOV로 한계시험을 한 결과로 성능지표에 따라 최대 에너지는 440J로서 20kA로 2회 인가시 MOV가 손상되므로 1회 인가한 시점이 유입에너지가 440J, 고장률 100%가 되는 상태로 정의된다. 또한 최대 전류의 75%인 15kA로 4회 인가시 MOV가 손상되므로 서지전류를 3회 인가한 시점이 유입에너지가 440J, 고장률

100%인 상태로 정의할 수 있으므로 15kA가 1회 인가되었을 때의 유입에너지는 146.67J이 되며 손상 시점의 횡수의 비율에 따라 33.33%라 정의된다. MOV의 한계시험을 통하여 인자서지의 크기와 횡수의 비선형적인 참조표를 표 1과 그림 4에 나타내었다.

표 1 MOV 한계시험에 의한 고장률
Table 1 Failure rate by MOV limit test

서지 전류 (kA)	손상 횡수		최소 손상 횡수	유입에너지 (J/cnt.)	고장률 (%)
	최소	최대			
20	2	3	1	440.00	100
15	4	9	3	146.67	33.3
10	39	42	38	11.58	2.63
5	97	129	96	4.58	1.04

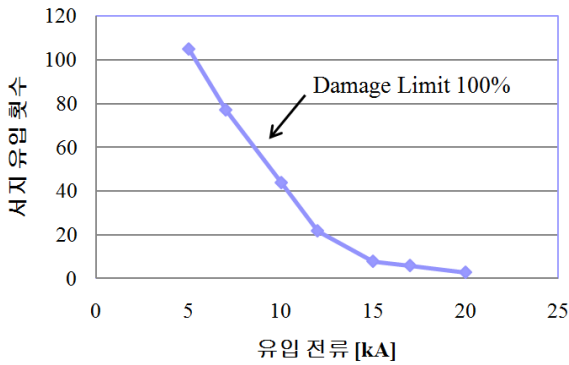


그림 4 인가 서지의 크기와 횡수의 비선형 특성
Fig. 4 Characteristics of magnitude and count of an applied surge

그림 5에서 고장에 대하여 사용자에게 미리 알려주는 경보의 개념이 강하므로 두 가지 요소에 의하여 구해진 값에 최대값을 적용하여 사용자에게 최대값을 알려줌으로써 사전에 고장이 일어날 수 있는 가능성을 최대한 알려줄 수 있도록 알고리즘을 구성하였다.

3. 가혹 실험을 통한 고장률 예측 및 검증

3.1 바리스터 기준시료 설정을 위한 시험 방법

MOV의 특성이 일정하지 않기 때문에 동일한 서지전류에 대한 손상 시점의 오차가 발생함에 따라 일정 기준의 자체 성능시험을 통해 동일한 특성을 지니는 기준 시료를 설정하였다. 그림 6과 같이 회로를 구성하고 1[mA]가 흐르는 순간의 전압을 측정하였을 때, 바리스터의 전압(Varistor voltage)이 동일한 시료만 추출하여 실험을 수행하였다.

3.2 실험 방법 및 결과

MOV의 한계시험과 검증시험에 사용된 실험 장치로 임펄스 발생장치, 충격전류 발생기, 콘덴서 및 모니터링 시스템이 사용되었다. 임펄스 발생장치로부터 발생된 전압을 콘덴서에 충전하여 순간 방전하는 방법으로 임펄스의 크기는 방전 구의 이격 거리로 조절할 수 있는 실험 장치이다. 실험

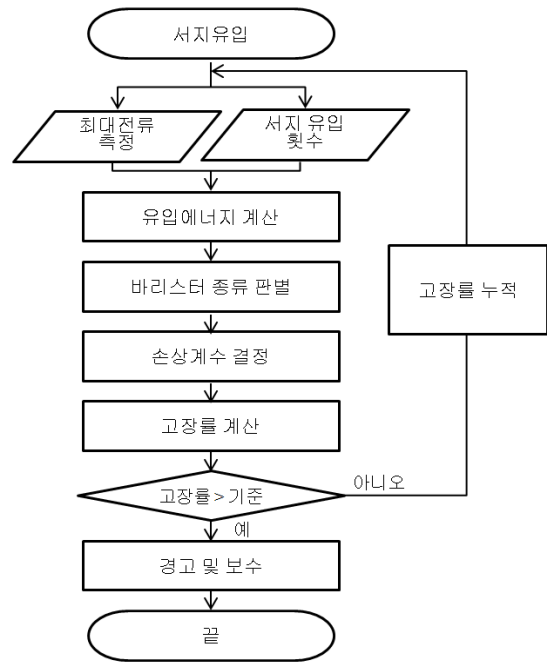


그림 5 고장률 예측 알고리즘
Fig. 5 Failure rate estimation algorithm

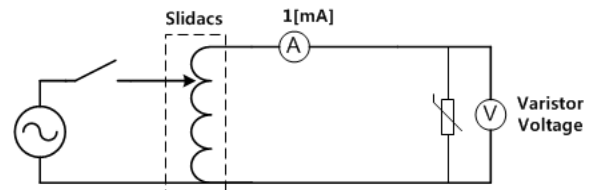
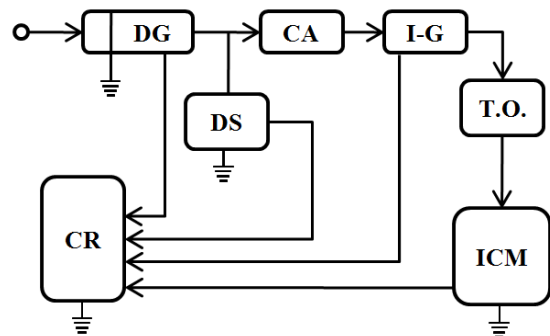


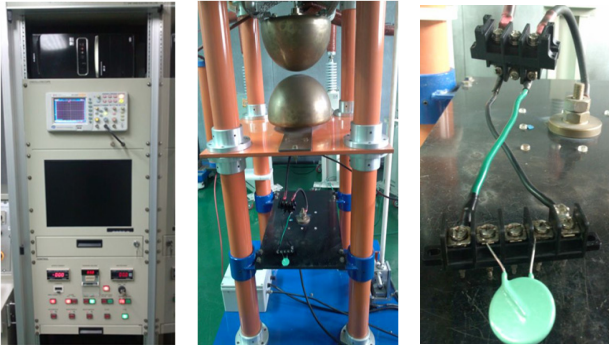
그림 6 시험시료 채택을 위한 회로
Fig. 6 Circuit for choosing test varistor

을 위한 장치 설계도와 이에 사용된 장비를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.



- I-G Impulse Current Generator
- CR Control Rack
- ICM Impulse Current Monitor
- T.O. Test Object
- DG DC Charging unit
- CA Capacitor unit 1,2
- DS DC Discharging unit

그림 7 실험 설계도
Fig. 7 Diagram of experimental devices



(a) Impulse current generator
 (b) Impulse current device
 (c) Element combining site

그림 8 서지인가 실험장치. (a) 임펄스 전류 발생장치, (b) 충격전류 시험장치 및 (c) 소자결합부

Fig. 8 Experimental setup for surge application

3.3 누설전류 측정 시험

MOV의 고장을 판단하기 위하여 육안판단, 직류저항 및 누설전류를 측정하여 종합적으로 판단하여 소손여부를 결정하였다. 구체적인 데이터, 수식과 상관관계는 해당 기술의 정보 보호를 위하여 구체적으로 언급하지 않았으며, 일부 실험 데이터를 통하여 원리를 설명하고자 한다. 그림 9는 인가전압을 증가시면서 시료의 누설전류를 측정한 결과이며 일정정도의 전압에서 급격하게 누설전류가 증가한다. 검증된 시료를 가지고 데이터의 신뢰성을 높이기 위하여 97개의 MOV에 대하여 일전전압을 인가하고 누설전류 I_l 를 측정하여 표 2에 나타내었다. 또한, 직류 저항을 측정하여 누설전류와의 상관관계를 그림 10에 나타내었다.

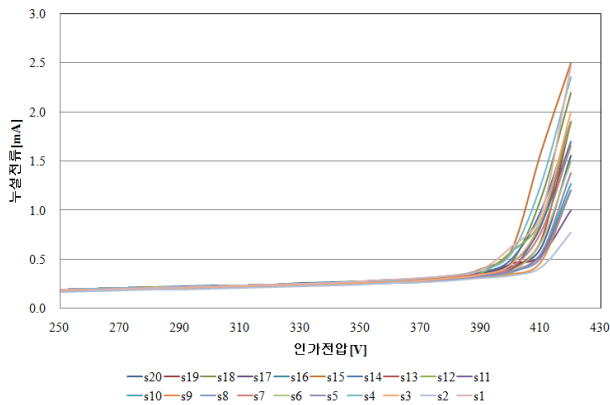


그림 9 20개의 MOV에 대한 인가전압에 따른 누설전류
 Fig. 9 Leakage current with respect to applied voltage(No. of MOVs : 20)

3.4 검증실험

고장률 예측 알고리즘을 검증하기 위하여 MOV에 사전 서지전류를 크기와 횟수를 다르게 하여 인가한 다음, 고장률을 예측하고, 최종 손상 시점까지의 추가 서지횟수를 실험결과와 비교하여 검증하였다. 표 3은 실험에 사용된 MOV의

표 2 97개의 MOV에 대한 누설전류(인가전압 : 380 [V])
 Table 2 Leakage current for 97 MOVs(Voltage : 380 [V])

No.	I_l (mA)	No.	I_l (mA)	No.	I_l (mA)	No.	I_l (mA)	No.	I_l (mA)
1	0.296	21	0.315	41	0.323	61	0.318	81	0.317
2	0.335	22	0.298	42	0.302	62	0.345	82	0.330
3	0.315	23	0.288	43	0.319	63	0.308	83	0.298
4	0.298	24	0.295	44	0.299	64	0.319	84	0.320
5	0.317	25	0.295	45	0.31	65	0.342	85	0.297
6	0.333	26	0.321	46	0.308	66	0.327	86	0.309
7	0.311	27	0.328	47	0.333	67	0.288	87	0.315
8	0.330	28	0.322	48	0.311	68	0.311	88	0.300
9	0.287	29	0.374	49	0.312	69	0.37	89	0.296
10	0.295	30	0.302	50	0.304	70	0.457	90	0.305
11	0.314	31	0.318	51	0.35	71	0.295	91	0.300
12	0.319	32	0.307	52	0.323	72	0.322	92	0.318
13	0.303	33	0.336	53	0.338	73	0.307	93	0.303
14	0.292	34	0.286	54	0.32	74	0.377	94	0.320
15	0.328	35	0.356	55	0.346	75	0.337	95	0.308
16	0.313	36	0.376	56	0.33	76	0.329	96	0.287
17	0.305	37	0.307	57	0.295	77	0.293	97	0.315
18	0.313	38	0.300	58	0.3	78	0.322	98	-
19	0.292	39	0.333	59	0.308	79	0.333	99	-
20	0.310	40	0.318	60	0.326	80	0.332	100	-

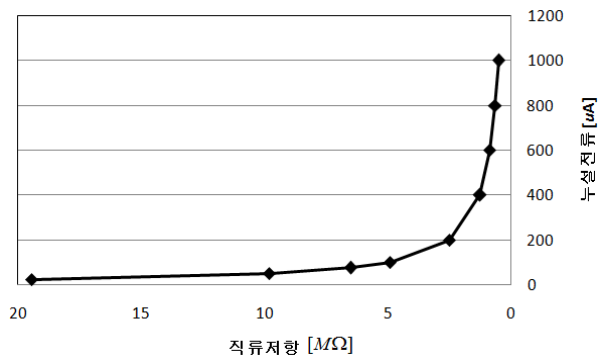


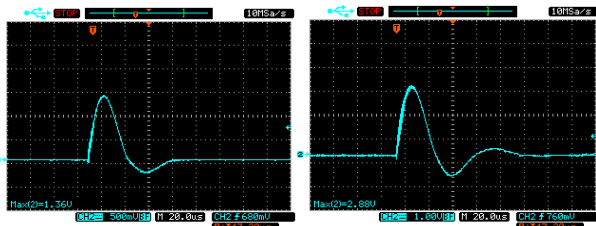
그림 10 누설전류와 직류저항과의 관계
 Fig. 10 Relations between leakage current and DC resistance

표 3 한계시험에 사용된 MOV 성능표
 Table 3 Specification of MOV used limit test

모델번호	바리스터 전압(V)		클램핑 전압 (V)	최대 전류 (kA)	최대 에너지 내량 (J)
	최소	최대			
25D561K	504	61	925	18	440

규격 및 성능표를 나타낸 것이며, 임펄스 전류 발생기로부터 발생된 인가 서지의 파형을 그림 9에 나타내었다.

5[kA]~20[kA]까지 MOV가 손상되기 전까지 서지를 인가한 후 계산된 고장률에 따라 손상되는 시점을 예측하였으며, 대부분 검증 실험 결과가 예상 시점과 일치하거나 초과하여 손상되는 결과가 나왔으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다. 또한, 손상 대비 실제 추가 서지 횟수와 관계를 그림 12에 나타내었다. MOV의 제품 특성상 동일한 제품일지라도 일정한 성능으로 제작되지 않기 때문에 예상 시점보다 초과되는 경우가 나타나지만 고장이 발생하기 최소한의 시점에 고장률을 표시하기 때문에 시스템의 안전성에는 문제가 발생하지 않는다.



(a) 10 [kA] (b) 20 [kA]

그림 11 인가 서지 파형

Fig. 11 Applied surge current waveform

표 4 선행 서지에 따른 손상 실험결과

Table 4 Verification experiment results for various preceded applied surge

선행 서지전류		추가 서지전류 (kA)	결과		비고	
크기 (kA)	인가 횟수		계산치	실험치		
20	1	20	1	1	일치	
		15	1	1	일치	
		10	10	10	초과	
15	3	20	1	2	초과	
		15	1	8	초과	
		10	1	12	초과	
	2	20	1	1	일치	
		15	2	4	초과	
		10	13	13	일치	
	1	5	99	99	일치	
		20	1	2	초과	
		15	5	7	초과	
		10	39	40	초과	
10	38	20	1	1	일치	
		15	1	1	일치	
		10	10	13	초과	
	30	20	1	1	일치	
		15	3	5	초과	
		10	27	27	일치	
	20	5	32	37	초과	
		20	1	2	초과	
		15	6	9	초과	
		10	29	34	초과	
		5	46	46	일치	
		20	1	2	초과	
10	15	5	6	초과		
	10	44	51	초과		
	5	71	77	초과		
5	96	20	1	1	일치	
		15	1	6	초과	
		10	10	14	초과	
	70	20	1	1	일치	
		15	3	9	초과	
		10	11	16	초과	
	40	5	27	27	일치	
		20	1	2	초과	
		15	5	9	초과	
	10	10	35	35	일치	
		20	1	2	초과	
		15	3	4	초과	
			10	35	37	초과

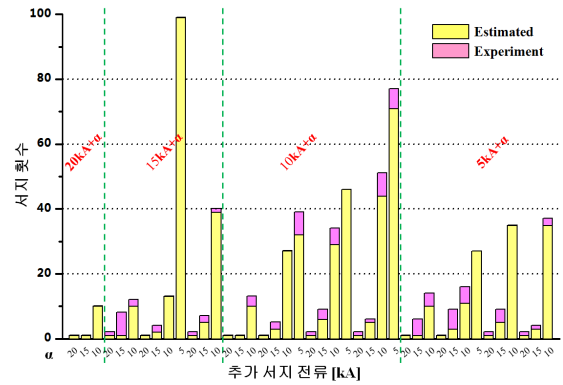


그림 12 손상 예측 횟수 대비 실제 인가 횟수

Fig. 12 Comparison of prediction count by proposed algorithm and experimental results

4. 결 론

본 논문에서는 MOV의 성능지표 중 최대 에너지를 기준으로, 최대전류에서 MOV 소자가 손상 또는 고장 직전의 유입 에너지를 100[%]로 하여 그 이하의 전류가 유입될 경우 소자가 손상되는 시점을 측정하고 그 비율에 따라 유입에너지를 계산하여 해당 소자의 잔여수명, 즉 고장률을 예측하였다. 이러한 결과를 통해 서지보호기 또는 내부 MOV의 교환 시점을 나타내는 기능으로서 하나의 방법이 될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 MOV의 제품 특성상 동일한 제품일지라도 일정한 성능으로 제작되지 않고, 제작사에서도 최소 내량만 보장하기 때문에 예상 시점보다 초과되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 서지보호기의 고장률을 예측하고 교환 시점을 표시한다고 할 때, 현재로서는 다소 소비적인 방법이 될 수 있지만 가장 간단하고 예측이 용이한 방법이 될 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A1040410).

References

- [1] Young Min Ko, Ki-Sik Lee and Young Sun Kim, "Characteristic Study of Surge Protective Varistor by Amplitude of AC Leakage Current", Proceedings of the KIEE Summer Conference, pp. 2130-2131, 2010.
- [2] Dong Jin Kim, In Sik Yeo, and Ki Sik Lee, "A study on varistor ability according to surge quantity and count into the distribution system", Proceedings of the Autumn Conference for the Society of Electrical Facilities at KIEE, pp. 95-97, 2008.
- [3] In Sik Yeo, Young Min Ko and Ki Sik Lee, "A Study on Performance Evaluation of SPD Varistor

by Temperature Measurement”, KIEE Trans., Vol. 58P, No. 4, pp. 490-494, 2009.

- [4] B. H. Lee, and B. Lee, "Effects of the Injected Number and Amplitude of 8/20 [μ s] Impulse Current on the Life of ZnO Varistors", Journal of the KIEE, Vol. 21, No. 1, pp. 118-124, 2007.
- [5] H. G. Lee, J. J. Kim, S. W. Jang, and G. D. Gwak, "Accelerated Life Test for ZnO Varistor", Abstract Book of the KSME Autumn Conference, 2006.
- [6] Aleksander Recnik, Slavko Bernik, and Nina Daneu, "Microstructural engineering of ZnO-based varistor ceramics", J Mater Sci, Vol. 47, pp. 1655-1668, 2012.
- [7] T. K. Gupta, and W. G. Carlson, "A Grain-boundary Defect Model for Instability/stability of a ZnO Varistor", J Mater Sci, Vol. 20, pp. 3487-3500, 1985.
- [8] J. R. Yoon, C. B. Lee, K. M. Lee, H. Y. Lee, and S. W. Lee, "Voltage Enhancement of ZnO Oxide Varistors for Various Y2O3 Doping Compositions", TEEM, Vol. 10, No. 5, 2009.



박재준 (朴材俊)

1985년 광운대학교 전기공학과 졸업.
1987년 광운대학교 전기공학과 석사.
1993년 광운대학교 전기공학과 박사.
1997년~현재 중부대학교 전기전자공학과 교수.

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr



이기식 (李基植)

1973년 서울대학교 전기공학과 졸업,
1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사),
1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사),
1978년~현재 단국대학교 전자전기공학부 교수

E-mail : kisiklee@dankook.ac.kr

저 자 소 개



김동진 (金東辰)

2007년 단국대학교 전기공학과 석사.
2010년 단국대학교 전기공학과 박사수료.
2003년~현재 선광 LTI(주) 대표이사, 건축전기설비기술사. 관심분야: 건축물의 뇌 서지 보호, 전력계통의 서지보호 및 주파수 관리.

E-mail : isk0910@daum.net



김영선 (金榮善)

1997년 단국대학교 전기공학과 석사.
2006년 동 대학원 전기공학과 박사. 2010년~2011년 MIT Post Doctoral Fellow.
2012~현재 중부대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야 : 에너지변환공학, 전기기기, 다중물리 융합 해석.

E-mail : yskim@joongbu.ac.kr