학술원논문집 (자연과학편) 제62집 1호 (2023) 245-273

산화아연 피뢰기의 저항성 누설전류 측정*

한송엽** · 이광호***

Measurement of Resistive Leakage Current for Metal Oxide Surge Arrester*

Hahn, Song-yop** · Lee, Kwang Ho***

ABSTRACT

Total leakage current of metal oxide surge arrester is consisted of capacitive leakage current and resistive leakage current. In this paper, a separating method of resistive leakage curent from total leakage current is proposed without voltage measurement.

In the case that resistive leakage current is comparatively small compared to capacitive leakage current, the waveform of the total leakage current is almost sinusoidal. As the resistive leakage current is increased, the waveform of the total leakage current becomes distorted waveform. To modelling the degree of distortion, a trapezoid is introduced. The trapezoid is inscribed in the waveform of the total leakage current and its area is maximized. Resistive leakage current can be computed from the coordinate data of two vertex of the trapezoid.

Empirical corelation equation between total leakage current and resistive

* 본 논문은 2022년도 대한민국학술원 전문학술활동 지원으로 이루어짐
** 大韓民國學術院 自然科學部 第3分科 會員
*** 주식회사 서지텍. Surgetec Co. Ltd.

leakage current is deduced using the coordinate data of the trapezoid obtained from a simulated lightning arrester. A measuring set for resistive leakage current is developed using the above empirical corelation equation. The set shows less than 10% measurement error for resistive leakage current between 80% and 200% of capacitive leakage current.

Key words: Metal oxide surge arrester, Resistive leakage current measurement, Total leakage current waveform, Trapezoid, Simulated lightning arrester

초 록

산화아연 피뢰기의 전체 누설전류는 용량성 누설전류와 저항성 누설전류를 포함하고 있는데 이 중에서 저항성 누설전류를 분리 측정하는 방법을 제시한다. 본 연구에서는 피뢰기의 전압 측정 없이 전체 누설전류의 파형만을 분석하는 방법을 제안하였다.

저항성 누설전류가 용량성 누설전류에 비하여 매우 적을 때는 전체 누설전류전류의 파형은 정현파에 가우나 저항성 누설전류가 점차 증가하면 전체 누설전류의 파형이 왜곡된다. 이 왜곡의 정도를 모델링하기 위하여 전체 누설전류의 반주기 파형에 내접하고 면적이 최대가 되는 사다리꼴을 제안 하였다. 이 사다리꼴의 두 꼭지점의 좌표를 측정하여 이 값으로부터 저항성 누설전류를 산정한다.

모의 피뢰기를 이용하여 여러 경우의 저항성 누설전류와 용량성 누설전류에 대하여 전체 누설전류를 측정하고 사다리꼴의 데이터를 구축하였고 이 데이터를 이용하여 저항성 누설전류와 전체 누설전류와의 상관관계를 도출 하였다.

이 상관관계를 이용하여 저항성누설전류 측정 장치를 구성하였으며 모의 피뢰기에 적용한 결과 저항성 누설전류가 용량성 누설전류의 80~200% 범위에서는 저항성 누설전류가 모두 10[%] 이내의 오차로 측정 되었다.

주제어: 산화아연 피뢰기, 저항성 누설전류 측정, 전체 누설전류 파형, 사다리꼴, 모의 피뢰기

목 차

I. 머리말
II. 피뢰기의 전압 전류 특성
III. 모의 피뢰기 설계 및 제작
IV. 사다리꼴 모델링
V. 전체 누설전류 파형 관찰
VI. 전체 누설전류 데이터 확립 및 분석
VII. 저항성 누설전류 측정장치
VIII. 저항성 누설전류 측정 및 오차
IX. 맺음말
참고문헌

I. 머리말

전력계통에는 낙뢰로부터 전력기기를 보호하기 위하여 전력선과 대지 사이에 피뢰기를 설치한다. 1980년대부터 산화아연(ZnO) 피뢰기를 사용하고 있는데 이것은 낙뢰시에 발생하는 과전압을 규정치 이하로 제한하여 접속된 전력기기의 절연파괴를 방지한다. 그런데 피뢰기를 오래 사용하면 낙뢰때 피뢰기로 흐르는 막대한 방전전류, 피뢰기 내부로 스며든 수분, 피뢰기 내부에서 발생하는 부분방전 등으로 피뢰기의 성능이 저하한다[Bartkowiak et al., 1999]. 이와 같이 피뢰기가 열화하면 평상시에도 피뢰기에 저항성 누설전류가 많이 흘러 피뢰기의 내부온도가 증가하고[Breder and Collin, 1984], [Shirakawa et al., 1988], 온도가 증가하면 저항성 누설전류가 더욱 증가하는 열폭주 현상이 발생한다[Kirby et al., 1988]. 열폭주 현상이 발생하여 피뢰기의 온도가 더욱 상승하면 피뢰기가 폭파하여 전력계통에 정전을 일으킨다. 이상과 같은 정전사고를 예방하려면 평상시 피뢰기에 흐르는 저항성 누설전류를 감시하여 이 값이 기준치 이상이 되면 피뢰기를 미리 교체하여야 한다.

평상시 산화아연(ZnO) 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류에는 용량성 누설전류와 저항성 누설전류가 포함되어 있다. 따라서 피뢰기에 흐르는 저항성 누설전류를 측정하려면 피뢰기에 걸린 전압과 전체 누설전류를 측정하여 전체 누설전류 중에 포함된 저항성 누설전류를 분리하여야 한다. 그런데 전력계통의 전압이 수백 KV이기 때문에 전압과 전류를 동시에 측정하기가 거의 불가능하다. 따라서 근래에 전체 누설전류만 측정하여 저항성 누설전류를 분리하는 기술들이 개발되고 있는데 오차가 크다[Das and Dalai, 2021]. 그중 가장 많이 알려진 기술이 MSC법

(Modified Shifted Current Method) 인데 이 방법도 저항성 누설전류 값이 용량성 누설전류 값보다 작으면 오차가 크다.

본 연구에서는 이와 같은 문제를 개선하기 위하여 '사다리꼴법'을 제안 한다. 이 방법은 전체 누설전류를 반주기 측정하고 여기에 내접하는 사다리꼴을 구한 다음 사다리꼴의 형상으로부터 용량성 누설전류와 저항성 누설전류를 유추한다.

실제 피뢰기는 전압이 수백 KV에서 작동한다. 따라서 실제 피뢰기에서 자료를 얻기 어렵기 때문에 본 연구에서는 모의 피뢰기를 설계 제작하여 필요한 자료를 얻는다.

II. 피뢰기의 전압 전류 특성

산화아연(ZnO) 피뢰기를 전기회로로 등가화 하면 그림 2.1과 같다. 즉 정전용량과 가변저항으로 표현된다. 피뢰기에 정현파 교류전압 U가 인가되면 전체 누설전류 It가 흐르고 이것은 용량성 누설전류 Ic와 저항성 누설전류 Ir의 합이다. 즉

$$It = Ic + Ir \quad \cdots\cdots (2.1)$$

이다. U = Um sin(wt) 라면

$$Ic = C\ dU/dt = wCUm\ \cos(wt) = a\ \cos(wt) \quad \cdots\cdots (2.2)$$

가 된다. 여기서 a = wCUm 이다. 즉 용량성 누설전류 Ic는 여현파(cosine) 함수이다.

한 편 저항성 누설전류 Ir는 피뢰기의 비선형성 때문에 $Ir = k\ (U)^{\alpha}$ 로 모델링 된다. 따라서

$$Ir = k\ [Um\ \sin(wt)]^{\alpha} = \sum_{n=1}^{9} b_n\ \sin(n\,\omega t), \quad n = 1,\ 3,\ 5,\ 7,\ 9 \quad \cdots (2.3)$$

가 된다. 즉 저항성 누설전류 Ir는 정현파(sine) 함수이며 고조파를 함유하고 있다. 그림 2.2는 피뢰기에 흐르는 전체누설전류 It, 용량성 누설전류 Ic 및 저항성 누설전류 Ir의 파형을 나타낸다. 저항성 누설전류 Ir에는 고조파가 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

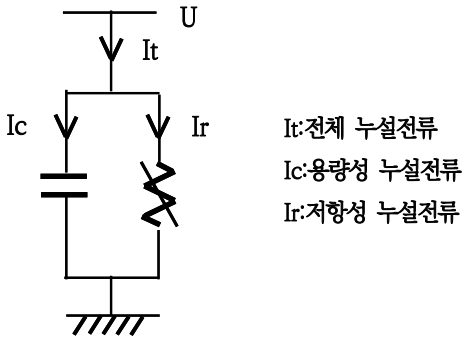


그림 2.1 피뢰기의 등가회로

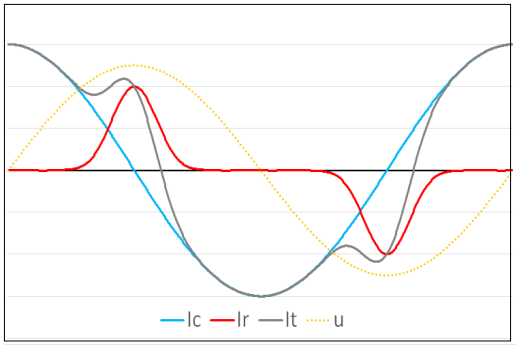


그림 2.2 피뢰기에 흐르는 누설전류 파형

III. 모의 피뢰기 설계 및 제작

모의 피뢰기는 그림 2.2와 같은 피뢰기의 용량성 누설전류와 저항성 누설전류를 얻기 위한 전자회로이다. 그림 3.1은 설계된 모의 피뢰기 회로를 나타낸다. 그리고 그림 3.2는 실제 제작된 모의 피뢰기의 사진이다.

용량성 누설전류 Ic를 얻기 위하여 콘덴서를 사용하였다. 즉

$$Ic = w * C * E \quad \cdots\cdots (3.1)$$

이고 여기서 w=377, E=220[V]이다. 콘덴서 3개 즉 C1=755μF, C2=154μF, C3=103μF와 스위치 S1, S2, S3를 이용하여 Ic를 200~1400μA까지 얻을 수

있게 하였다. 전류값은 외부에 전류계를 연결하여 측정 하도록 하였다.

저항성 누설전류 Ir은 그림 2.2에서 보는 바와 같이 전원전압의 순시치가 낮을 때는 거의 0에 가깝고 어느 값 이상이 되면 볼록하게 나타난다. 그래서 제너다이오드 Z1과 Z2를 이용하여 전원 전압의 순시치 E(θ)가 75V 이하에서는 전류가 흐르지 않게 하고 그 이상이 되면 볼록하게 나타나게 하였다. 즉

$$Ir(\theta) = 0, \text{ for } U(\theta) < 75[V] \quad \cdots\cdots (3.2)$$

$$Ir(\theta) = [U(\theta) - 75]/R1 \text{ for } U(\theta) > 75[V] \quad \cdots\cdots (3.3)$$

이다. 그리고 Ir(θ)의 peak치를 Irp라 하면

$$Irp = [220 \times 1.414 - 75] / R1 \quad \cdots\cdots (3.4)$$

이다.

저항 R1을 조정하여 Irp의 값을 2[mA]까지 조정하도록 하였다. Irp의 측정은 오실로스코프로 측정하도록 하였는데 저항 R2=10[KΩ]의 전압을 측정한다. 그림 3.3은 저항성 누설전류 파형의 한 사례를 나타낸다.

그림 3.4는 본 연구에서 설계 제작한 표준전압공급원으로서 모의 피뢰기에 0~220V 정현파 교류전압을 공급한다.

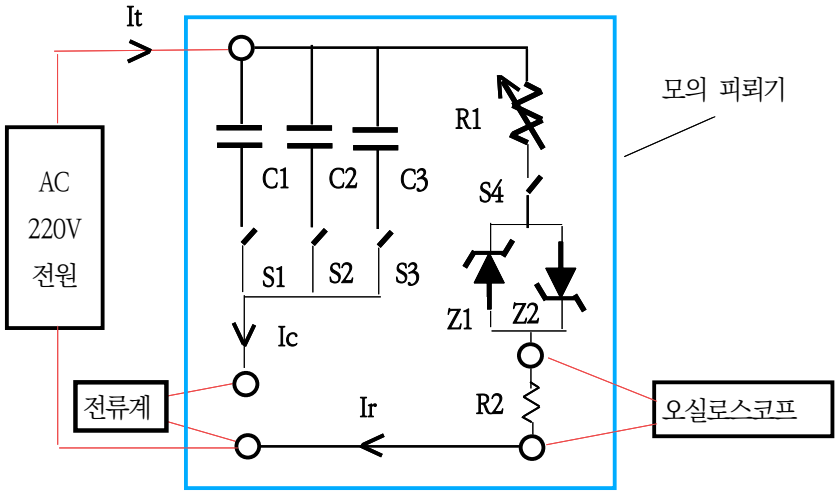


그림 3.1 모의 피뢰기 회로도

그림 3.2. 제작된 모의 피뢰기 사진

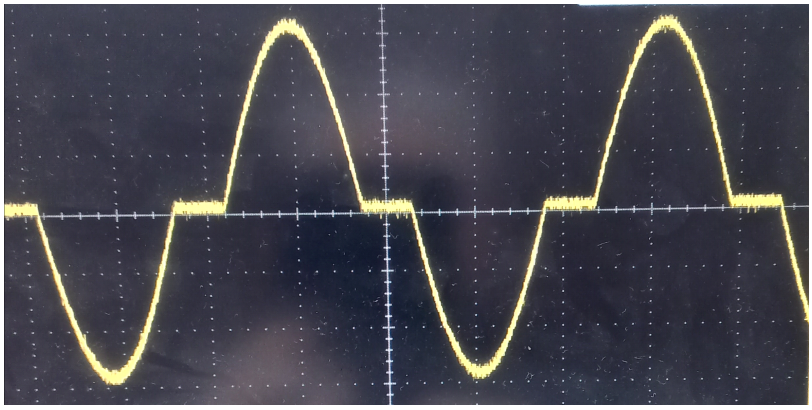


그림 3.3 저항성 누설전류 파형의 사례

그림 3.4 교류 정현파 가변전압 공급 장치

IV. 사다리꼴 모델링

위에서 제작한 모의 피뢰기를 이용하여 Ic=400[μA], Irp=200[μA,peak]인 경우 피뢰기의 전체 누설전류를 측정하여 반주기를 그려보면 그림 4.1의 초록색 곡선과 같이 된다. 이 곡선의 특징을 간단히 표현하기 위하여 그림 4.1과 같이 사다리꼴을 제안 하였다. 즉 전체 누설전류를 사다리꼴로 모델링 하였다.

사다리꼴 모델링은 우선 전체 누설전류의 파형을 0~180도 까지 그린다. 그리고 여기에 내접하고 면적이 최대가 되는 사다리꼴을 구한다. 꼭지점이 2개 생기는데 꼭지점 P1은 각도가 x1, 크기가 y1이고 꼭지점 P2는 각도가 x2, 크기가 y2이다.

앞으로 이들 x1, y1, x2, y2 값을 이용하여 전체 누설전류를 분석한다.

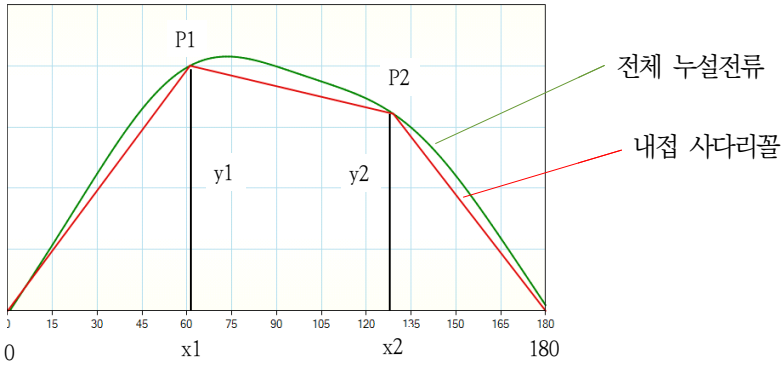


그림 4.1 전체 누설전류의 사다리꼴 모델링

V. 전체 누설전류 파형 관찰

전체 누설전류의 용량성 누설전류 Ic와 저항성 누설전류의 피크치 Irp를 변화시키면서 사다리꼴의 모양이 어떻게 변화 하는지를 관찰하여 보았다.

그림 5.1은 Ic=400[μA], Irp=80~800[μA]인 경우 전체 누설전류의 사다리꼴 모양을 나타낸다. 이 그림에서 q=Irp/Ic로 정의 하면 이 그림은 Ic=400[μA]이고

q=0.2~2.0인 경유 전체 누설전류의 사다리꼴 모양을 나타낸다.

우선 y1의 변화를 보면 q=0.2~2.0인 변화에 대하여 y1=394~415[μA]로서 Ic=400에 가깝다는 것을 알 수 있다. 오차가 4%이내 인 것을 알 수 있다.

x1의 변화를 보면 q=0.2~2.0인 변화에 대하여 x1=66~33도로서 x1값이 66도에서 33도까지 크게 감소함을 알 수 있다.

x2의 변화를 보면 q=0.2~2.0인 변화에 대하여 x2=127~129~114도로서 x2값이 127도에서 129도로 약간 증가했다가 114도까지 감소함을 알 수 있다. 즉 x2는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

y2의 변화를 보면 q=0.2~2.0인 변화에 대하여 y2=316~636[μA]로서 y2값이 316[μA,peak]에서 636[μA]까지 크게 증가함을 알 수 있다.

그림 5.2는 q=0.5로 하고 Ic=200~1200[μA]인 경우 전체 누설전류의 사다리꼴 모양을 나타낸다.

우선 y1의 변화를 보면 Ic=200~1200[μA]인 변화에 대하여 y1 값은 Ic 값에 매우 가깝다는 것을 알 수 있다. 즉 Ic=200[μA]인 경우를 보면 y1=194[μA]로서 오차가 3%이고 Ic=1200[μA]인 경우를 보면 y1=1186[μA]로서 오차가 약 1%인 것을 알 수 있다.

x1의 변화를 보면 Ic=200~1200[μA]인 변화에 대하여 x1=61~63도로서 q 값이 같으면 x1값은 거의 일정함을 알 수 있다.

x2의 변화를 Ic=200~1200[μA]인 변화에 대하여 x2=127~128도로서 q 값이 같으면 x2 값도 거의 일정함을 알 수 있다.

그림 5.3은 q=1.0으로 하고 Ic=200~1200[μA]인 경우 전체 누설전류의 사다리꼴 모양을 나타낸다.

우선 y1의 변화를 보면 Ic=200~1200[μA]인 변화에 대하여 y1 값은 Ic 값에 매우 가깝다는 것을 알 수 있다. 즉 Ic=200[μA]인 경우를 보면 y1=202[μA]로서 오차가 1%이고 Ic=1200[μA]인 경우를 보면 y1=1194[μA]로서 오차가 1% 이내인 것을 알 수 있다.

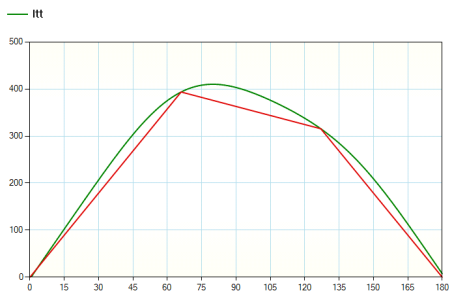
x1의 변화를 보면 Ic=200~1200[μA]인 변화에 대하여 x1=49~51도로서 q 값이 같으면 x1값은 거의 일정함을 알 수 있다.

x2의 변화를 보면 Ic=200~1200[μA]인 변화에 대하여 x2=119~121도로서 q 값이 같으면 x2 값은 거의 일정함을 알 수 있다.

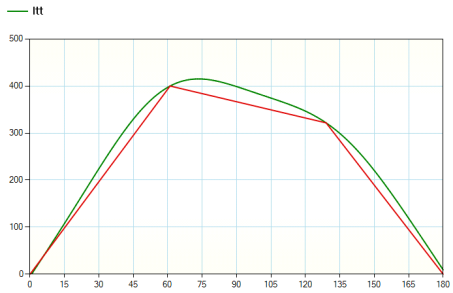
이상의 관찰을 통하여 다음과 같은 사실을 발견하였다.

(1) Ic 값에 관계없이 y1 값은 Ic 값과 거의 동일한 값을 갖는다.

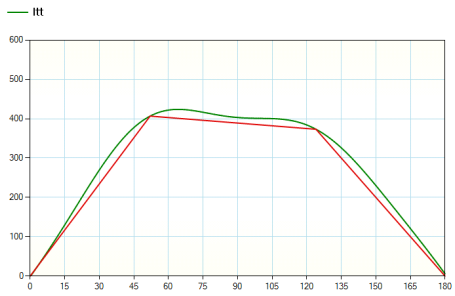
(2) Ic 값에 관계없이 q 값이 같으면 x1 값과 x2값은 각각 거의 동일한 값을 갖는다.



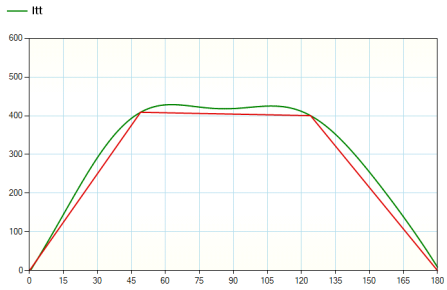
Ic=400, Irp=80(q=0.2),
x1=66, y1=394, x2=127, y2=316



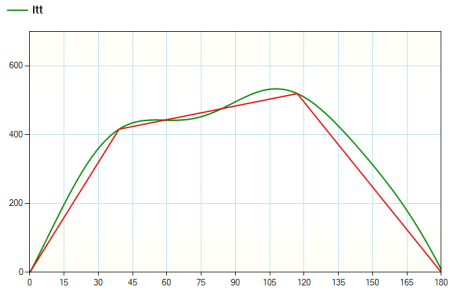
Ic=400, Irp=200(q=0.5)
x1=61, y1=400, x2=129, y2=322



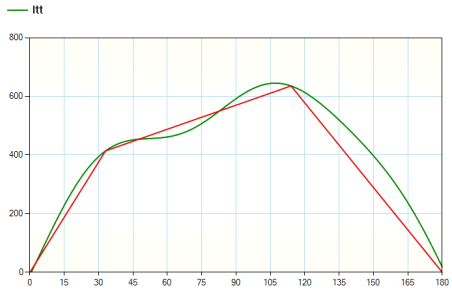
Ic=400, Irp=320(q=0.8)
x1=52, y1=407, x2=124, y2=373



Ic=400, Irp=400(q=1.0)
x1=49, y1=409, x2=124, y2=400

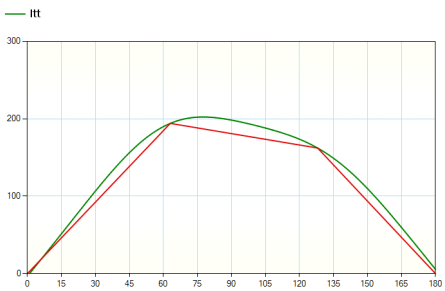


Ic=400, Irp=600(q=1.5)
x1=39, y1=415, x2=117, y2=519

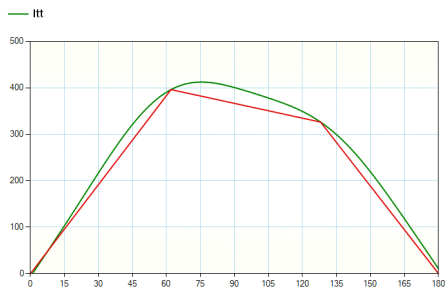


Ic=400, Irp=800(q=2.0)
x1=33, y1=414, x2=114, y2=636

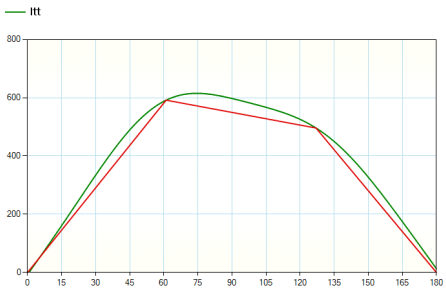
그림 5.1 Ic=400[μA], Irp=80~800[μA,peak]인 경우 전체 누설전류의 사다리꼴 모양



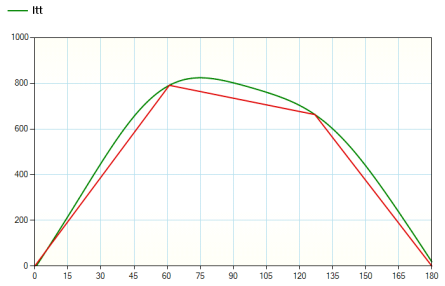
Ic=200,Irp=100(q=0.5),
y1=194, x1=63, x2=128



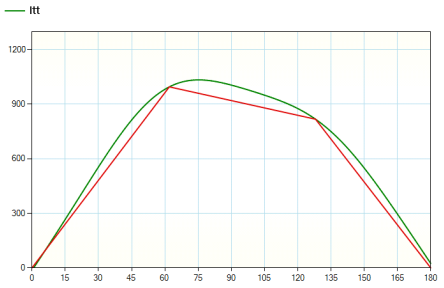
Ic=400,Irp=200(q=0.5),
y1=396, x1=62, x2=128



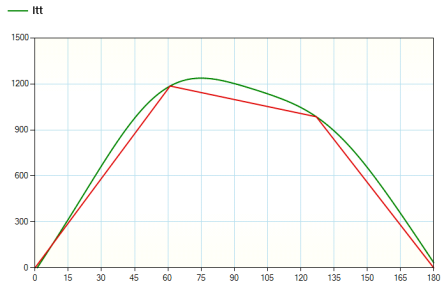
Ic=600,Irp=300(q=0.5),
y1=592 x1=61, x2=127



Ic=800,Irp=400(q=0.5),
y1=791, x1=61, x2=127

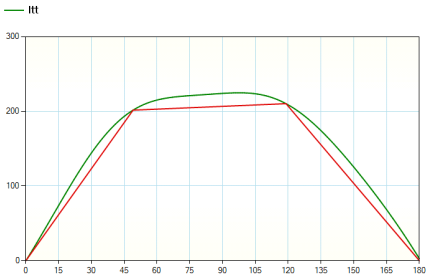


Ic=1000,Irp=500(q=0.5),
y1=996, x1=62, x2=128

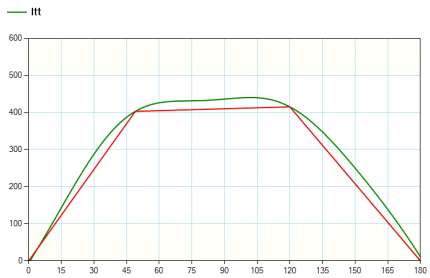


Ic=1200,Irp=600(q=0.5),
y1=1186, x1=61, x2=127

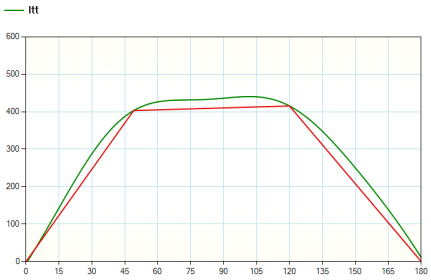
그림 5.2 Ic=200~1200[μA], q=0.5인 경우 전체 누설전류의 사다리꼴 모양



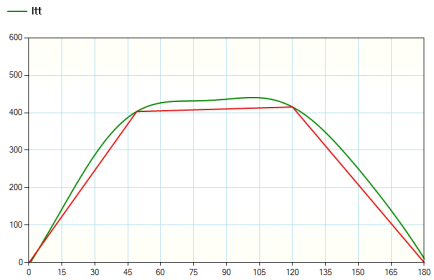
Ic=200,Irp=200(q=1.0),
y1=202, x1=49, x2=119



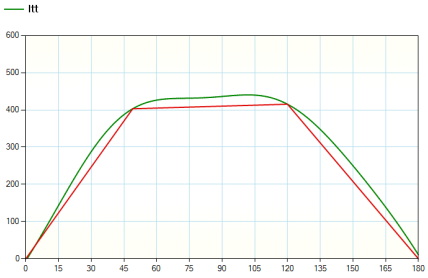
Ic=400,Irp=400(q=1.0),
y1=403, x1=49, x2=120



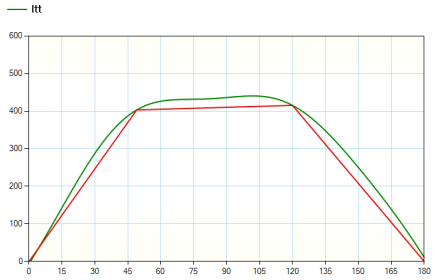
Ic=600,Irp=600(q=1.0),
y1=606, x1=49, x2=120



Ic=800,Irp=800(q=1.0),
y1=805, x1=51, x2=121



Ic=1000,Irp=1000(q=1.0),
y1=999, x1=49, x2=120



Ic=1200,Irp=1200(q=1.0),
y1=1194, x1=49, x2=119

그림 5.3 Ic=200~1200[μA], q=1.0인 경우 전체 누설전류의 사다리꼴 모양

VI. 전체 누설전류 데이터 확립 및 분석

앞 절에서 몇 가지 사례에 대하여 전체 누설전류 파형을 관찰한 결과 Ic에 관계 없이 y1은 Ic와 거의 동일한 값을 가지고 x1은 q에 반비례 하는 것을 알았다. 이 관계를 확실하게 하기 위하여 여러 가지 사례에 대하여 x1, y1, z, Dx, Ice 데이터를 확립하였다. 즉 표 6.1은 Ic=200~1200[μA], q=0.2~2.0에 대한 x1, y1, z, Dx, Ice 자료를 나타낸다.

이 표에서 x1과 y1은 사다리꼴의 P1 꼭지점의 각도와 전체 누설전류의 크기(순시치를 $\sqrt{2}$로 나눈 값)를 나타낸다.

이 표에서 z=[S2-S1]/[S1+S2]인데 S1은 전체 누설전류 It를 0에서 x1도까지 적분한 면적이고 S2는 전체 누설전류를 x1도에서 180도까지 적분한 면적이다. 측

$$S1=\int_{0}^{x1} It(x)dx$$

$$S2=\int_{x1}^{180} It(x)dx \quad \cdots\cdots (6.1)$$

[S1+S2]는 전체 누설전류의 면적으로서 x1에 관계없이 일정하다. q가 증가하면 x1은 감소하기 때문에 S1은 감소하고 S2는 증가한다. 따라서 q가 증가하면 z는 증가한다.

이 표에서

$$Dx=x2-x1 \quad \cdots\cdots (6.2)$$

이고 Ice는 y1과 Ic의 오차이다.

6.1 Ic 분석

앞 절에서 관찰한 바와 같이 y1은 Ic와 거의 동일한 값이다. 표 6.1에 q=0.2~2.0, Ic=200~1200[μA]에 대하여 y1과 Ic의 오차 Ice를 산정하여 기록하였다. 즉

$$Ice=[y1-Ic]/Ic*100[\%] \quad \cdots\cdots (6.3)$$

이다.

q=0.2의 경우 Ice 평균치는 -4.62[%]이고 이 때의 z 평균치는 0.374이다. 표 6.2는 q=0.2~2.0에 대한 Ice 평균치 및 z 평균치를 나타낸다. 그림 6.1은 Ice와 z의 관계를 그림으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Ice와 z의 관계를 직선으로 모델링 하였는데

$$Ice=10.6*z-7.48 \quad \cdots\cdots (6.4)$$

이다.

저항성 누설전류 Irp 측정장치에서는 우선 전체 누설전류 It를 측정하여 사다리꼴을 구한다음 z를 이용하여 식(6.4)로 Ice를 구하고 y1과 Ice로 Ic를 구한다. 즉 식(6.3)으로부터

$$Ic=y1*100/[100+Ice] \quad \cdots\cdots (6.5)$$

이다.

표 6.2 q=0.2~2.0에 대한 Ice 평균치 및 z 평균치

q	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
Ice[%]	-4.62	-3.57	-2.50	-2.32	-1.89	-1.10	-0.98	-0.63	-0.48
z	0.374	0.387	0.405	0.434	0.467	0.532	0.596	0.714	0.792

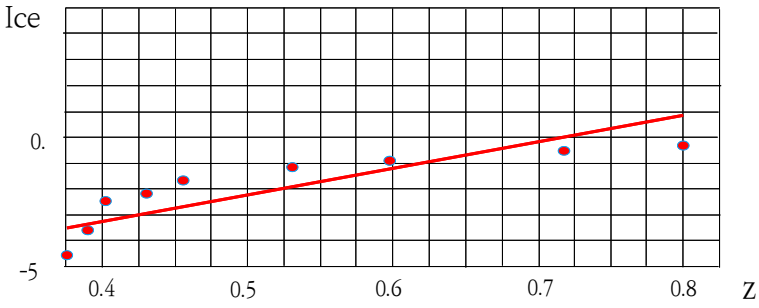


그림 6.1 Ice와 z의 관계

6.2 z를 이용한 Irp 분석

표 6.1을 보면 q=0.2에서 Ic=200~1200[μA]의 z 값이 비슷함을 알 수 있다. z의 평균치는 0.374이다. q=0.2~2.0에 대하여 z의 평균치를 보면 표 6.3과 같다. 그림 6.2는 표 6.3을 그림으로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 q와 z의 관계를 아래와 같은 수식으로 모델링 하였다.

$$\begin{aligned} q &= 6.45*z-2.21 && \text{for } 0.374 < z \le 0.405 \\ q &= 3.23*z-0.908 && \text{for } 0.405 < z \le 0.467 \\ q &= 3.1*z-0.848 && \text{for } 0.467 < z \le 0.596 \\ q &= 4.24*z-1.53 && \text{for } 0.596 < z \le 0.714 \\ q &= 6.41*z-3.08 && \text{for } 0.714 < z \end{aligned} \quad \cdots\cdots (6.6)$$

그런데 q=Irp/Ic 이므로

$$Irp = q*Ic \quad \cdots\cdots (6.7)$$

가 된다. 즉 전체 누설전류 It를 측정하여 사다리꼴을 구하고 여기서 y1과 z를 구하면 식(6.3)으로 Ic를 구하고 식(6.6)으로 q를 구하면 식(6.7)로 Irp를 구할 수 있다.

표 6.3 q에 대한 z의 평균치

q	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
z	0.374	0.387	0.405	0.434	0.467	0.532	0.596	0.714	0.792

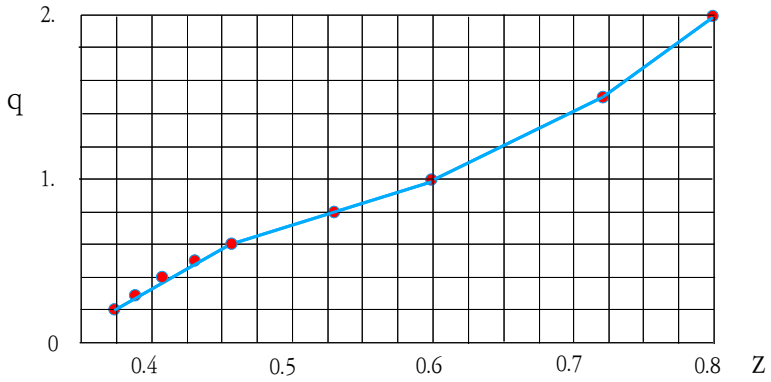


그림 6.2 q와 z 평균치의 관계

6.3 x1을 이용한 Irp 분석

표 6.1을 보면 q=0.2에서 Ic=200~1200[μA]의 x1 값이 비슷함을 알 수 있다. x1의 평균치는 67이다. q=0.2~2.0에 대하여 x1의 평균치를 보면 표 6.4와 같다. 그림 6.3은 표 6.4를 그림으로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 q와 x1의 관계를 아래와 같은 수식으로 모델링 하였다.

$$
\begin{aligned}
&q=-0.5*(x1-34)/6+2.0 && \text{for } x1 \le 40 \\
&q=-0.5*(x1-40)/10+1.5 && \text{for } 40 < x1 \le 50 \\
&q=-0.4*(x1-50)/9+1.0 && \text{for } 50 < x1 \le 59 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad -(6.8) \\
&q=-0.1*(x1-59)/3+0.6 && \text{for } 59 < x1 \le 62 \\
&q=-0.2*(x1-62)/3+0.5 && \text{for } 62 < x1 \le 65 \\
&q=-0.1*(x1-65)/2+0.3 && \text{for } 65 < x1 \le 67
\end{aligned}
$$

그런데 q=Irp/Ic 이므로

$$Irp=q*Ic \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6.9)$$

가 된다. 즉 전체 누설전류 It를 측정하여 사다리꼴을 구하고 여기서 y1과 x1을 구하면 식(6.5)으로 Ic를 구하고 식(6.8)로 q를 구하면 식(6.9)로 Irp를 구할 수 있다.

표 6.4 q에 대한 x1 평균치

q	2.0	1.5	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
x1	34	40	50	54	59	62	64	65	67

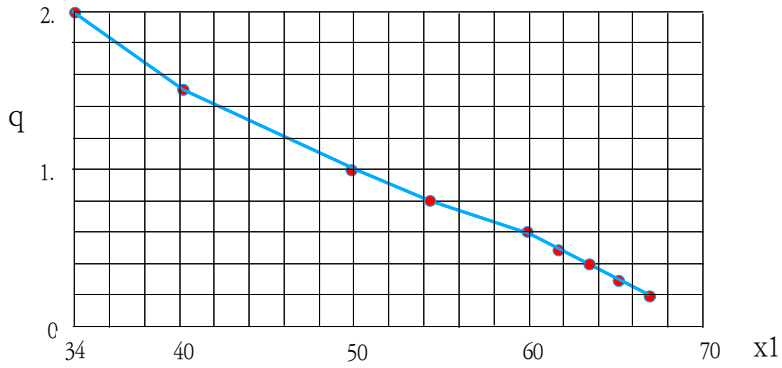


그림 6.3 q와 x1 평균치의 관계

6.4 Dx를 이용한 Irp 분석

표 6.1을 보면 q=0.2에서 Ic=200~1200[μA]의 Dx 값이 비슷함을 알 수 있다. Dx의 평균치은 58이다. q=0.2~2.0에 대하여 Dx의 평균치를 보면 표 6.5와 같다. 그림 6.4는 표 6.5를 그림으로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 q와 Dx의 관계를 아래와 같은 수식으로 모델링 하였다.

$$
\begin{aligned}
&q=0.2*(Dx-58)/6+0.2 && \text{for } 58<Dx\leq 64\\
&q=0.1*(Dx-64)/2+0.4 && \text{for } 64<Dx\leq 66\\
&q=0.5*(Dx-66)/8+0.5 && \text{for } 66<Dx\leq 74 \quad \cdots\cdots (6.10)\\
&q=0.5*(Dx-74)/4+1.0 && \text{for } 74<Dx\leq 78\\
&q=0.5*(Dx-78)/3+1.5 && \text{for } 78<Dx\leq 81
\end{aligned}
$$

그런데 q=Irp/Ic 이므로

$$Irp=q*Ic \quad \cdots\cdots \quad 6.11)$$

가 된다. 즉 전체 누설전류 It를 측정하여 사다리꼴을 구하고 여기서 y1과 Dx를 구하면 식(6.5)로 Ic를 구하고 식(6.10)로 q를 구하면 식(6.11)로 Irp를 구할 수 있다.

표 6.5 q에 대한 Dx 평균치

q	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
Dx	58	61	64	66	69	70	74	78	81

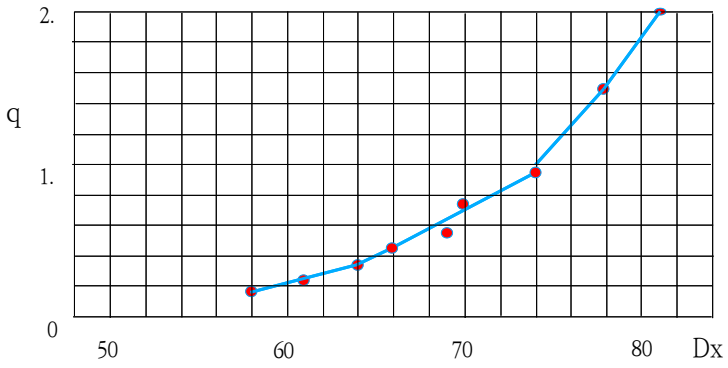


그림 6.4 q와 Dx 평균치의 관계

표 6.1 Ic=200~1200[μA], q=0.2~2.0에 대한 x1, y1, z, Dx, Ice 자료

q=0.2							q=0.3						
Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice	Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice
200	40	66	190	0.378	58	-5.00	200	60	65	191	0.390	55	-4.50
300	60	68	288	0.360	56	-4.00	300	90	65	288	0.391	60	-4.00
400	80	67	380	0.370	56	-5.00	400	120	65	383	0.385	62	-4.25
500	100	67	468	0.376	58	-6.40	500	150	65	480	0.390	60	-4.00
600	120	66	573	0.380	57	-4.50	600	180	65	581	0.389	62	-3.17
700	140	67	689	0.364	59	-1.57	700	210	66	701	0.373	60	0.14
800	160	65	748	0.400	58	-6.50	800	240	65	767	0.389	61	-4.13
900	180	67	862	0.367	58	-4.22	900	270	65	861	0.387	61	-4.33
1000	200	66	947	0.386	58	-5.30	1000	300	64	952	0.405	62	-4.80
1100	220	67	1054	0.365	58	-4.18	1100	330	66	1068	0.375	61	-2.91
1200	240	67	1148	0.369	57	-4.33	1200	360	65	1159	0.386	61	-3.42
평균		67		0.374	58	-4.64			65		0.387	61	-3.58

q=0.4							q=0.5						
Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice	Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice
200	80	62	192	0.427	64	-4.00	200	100	62	190	0.435	65	-5.00
300	120	63	291	0.416	63	-3.00	300	150	62	300	0.433	65	0.00
400	160	63	384	0.411	63	-4.00	400	200	61	387	0.441	66	-3.25
500	200	64	490	0.401	64	-2.00	500	250	61	488	0.446	66	-2.40
600	240	64	584	0.403	65	-2.67	600	300	60	587	0.452	66	-2.17
700	280	65	712	0.381	64	1.71	700	350	62	714	0.420	66	2.00
800	320	64	771	0.402	64	-3.62	800	400	61	774	0.437	66	-3.25
900	360	63	872	0.409	63	-3.11	900	450	61	880	0.439	65	-2.22
1000	400	64	972	0.402	63	-2.80	1000	500	64	952	0.405	66	-4.80
1100	440	64	1078	0.396	64	-2.00	1100	550	61	1065	0.438	66	-3.18
1200	480	64	1170	0.402	64	-2.50	1200	600	62	1181	0.425	66	-1.58
평균		64		.405	64	-2.54	평균		62		0.434	66	-2.35

q=0.6							q=0.8						
Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice	Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice
200	120	60	196	0.454	68	-2.00	200	160	54	197	0.532	71	-1.50
300	180	59	296	0.468	70	-1.33	300	240	54	296	0.532	70	-1.33
400	240	59	387	0.474	69	-3.25	400	320	54	395	0.534	70	-1.25
500	300	59	490	0.470	68	-2.00	500	400	53	489	0.548	71	-2.20
600	360	59	589	0.470	69	-1.83	600	480	54	595	0.536	70	-0.83
700	420	59	697	0.468	69	-0.43	700	560	55	706	0.525	71	0.86
800	480	59	780	0.467	69	-2.50	800	640	54	782	0.536	71	-2.25
900	540	58	873	0.476	69	-3.00	900	720	54	889	0.537	70	-1.22
1000	600	59	975	0.468	69	-2.50	1000	800	55	988	0.520	70	-1.20
1100	600	59	1085	0.465	69	-1.36	1100	880	55	1092	0.523	70	-0.73
1200	720	60	1193	0.453	69	-0.58	1200	960	55	1194	0.525	71	-0.50
평균		59		0.467	69	-1.89	평균		54		0.532	70	-1.10

q=1.0							q=1.5						
Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice	Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice
200	200	48	194	0.618	74	-3.00	200	300	39	197	0.725	79	-1.50
300	300	49	300	0.601	74	0.00	300	450	39	296	0.721	78	-1.33
400	400	49	394	0.605	75	-1.50	400	600	40	397	0.718	78	-0.75
500	500	49	494	0.602	74	-1.20	500	750	40	495	0.719	78	-1.00
600	600	50	595	0.595	75	-0.83	600	900	41	598	0.705	78	-0.33
700	700	50	693	0.590	74	-1.00	700	1050	40	693	0.718	78	-1.00
800	800	50	788	0.593	74	-1.50	800	1200	40	788	0.719	78	-1.50
900	900	49	882	0.599	74	-2.00	900	1350	40	882	0.717	77	-2.00
1000	1000	50	989	0.593	74	-1.10	1000	1500	40	998	0.715	77	-0.20
1100	1100	51	1105	0.577	74	0.45	1100	1650	40	1096	0.717		-0.36
1200	1200	51	1207	0.580	74	0.58	1200	1800	43	1236	0.683		3.00
평균		50		0.596	74	-1.01	평균		40		0.714	78	-0.63

q=2.0						
Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	Ice
200	400	33	197	0.797	81	-1.50
300	600	33	296	0.796	81	-1.33
400	800	34	399	0.790	81	-0.25
500	1000	33	500	0.793	81	0.00
600	1200	35	605	0.778	81	0.83
700	1400	34	699	0.788	81	-0.14
800	1600	34	794	0.791		-0.75
900	1800	33	892	0.800		-0.89
평균		34		0.792	81	-0.50

VII. 저항성 누설전류 측정장치

본 연구에서 사용한 저항성 누설전류 측정장치의 구성은 그림 7.1과 같다.

(1) 우선 전류센서로 전체 누설전류 It를 측정한다. 여기서 전류센서는 Clamp 형 CT(Current Transformer)를 사용하였다. 그림 7.2는 본 연구에서 사용한 CT를 나타낸다.

(2) CT로 측정한 It 신호는 미약하므로 전류증폭기로 증폭하였다. OP Amp 2 단으로 하여 증폭율을 약 6000배 하였다.

(3) 증폭된 analog 전류신호는 A/D변환기을 통하여 신호의 반주기만 digital 전류신호 It(x)로 변환 한다.

(4) 이 반주기 신호에 내접하고 면적이 최대인 사다리꼴을 구하고 두 꼭지점의 좌표 x1, y1, x2, y2를 산정한다. 그림 4.1 참고.

(5) It(x), x1로부터 z를 산정하고 x1, x2로부터 Dx를 산정한다. 식(6.1) 및 식(6.2) 참고.

(6) 식(6.3) 및 (6.4)로 Ic를 산정하고 q는 3가지 방법으로 산정하는데 z로 q를 산정(q1), x1으로 q를 산정(q2), Dx로 q를 산정(q3)한다.

(7) q1, q2. q3중 중간값을 선택하여 q4로 하고 Irpm=q4*Ic 로 Irp를 측정한다.

(3)~(7)에서는 마이크로 프로세서를 이용하여 디지털 신호처리를 한다. 그림 7.3은 본 연구에서 설계 제작한 PCB보드를 나타 낸다. 마이크로 프로세서는 ESP32를 사용하였다.

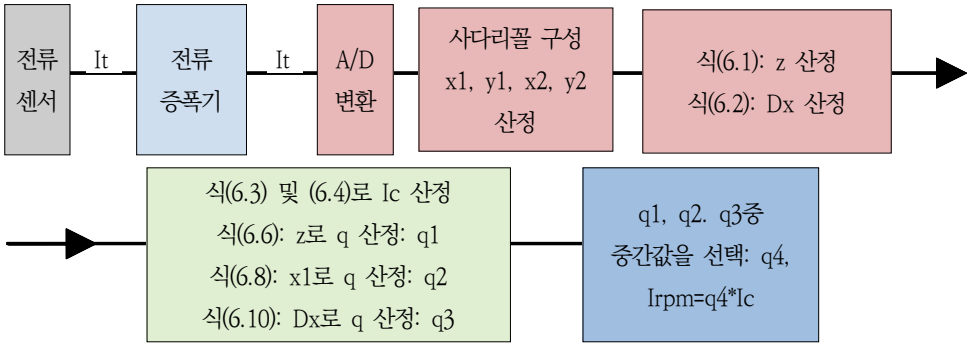


그림 7.1 저항성 누설전류 측정 장치의 구성

그림 7.2 Clamp형 CT

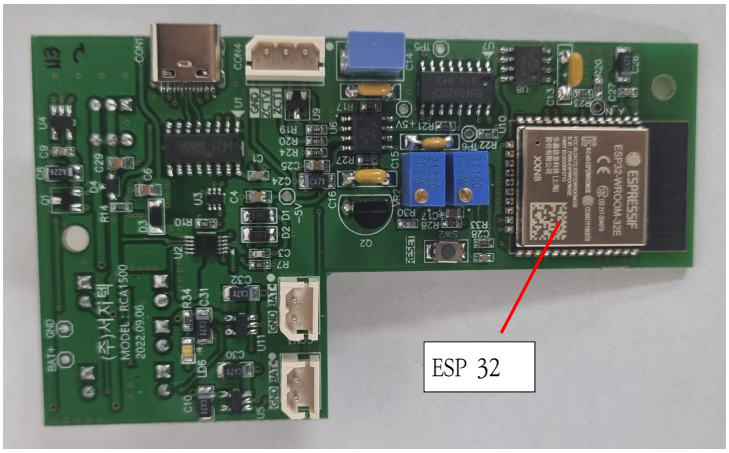


그림 7.3 전류 증폭기 및 마이크로 프로세서 PCB

VIII. 저항성 누설전류 측정 및 오차

q=Irp/Ic로 정의하였기 때문에 Irp=q*Ic로부터 구한다. 따라서 Irp의 측정은 그림 7.1에서 보는 바와 같이 우선 측정장치로 전체 누설전류를 측정하여 내접하는 사다리꼴을 구하고 여기서 x1, y1, z, Dx의 정보를 얻는다.

8.1 q 산정

본 측정장치에서는 q를 3가지 방법으로 산정한다.

(1) z를 이용한 q 산정:

식(6.6)을 이용하여 q를 산정한다. 이 값을 q1으로 한다.

(2) x1을 이용한 q 산정:

식(6.8)을 이용하여 q를 산정한다. 이 값을 q2로 한다.

(3) Dx를 이용한 q 산정:

식(6.10)을 이용하여 q를 산정한다. 이 값을 q3로 한다.

표 8.1~표8.9는 q=0.2~2.0인 경우 q1, q2, q3를 산정한 것인데 q값이 증가할수록 오차가 감소하는 것을 알 수 있다.

표 8.1은 Ic 200~1200[μA]에 대하여 q=0.2인 경우 q1, q2, q3를 산정한 것이다. q1의 경우 q값이 0.112~0.370으로 정확한 값 0.2에 대하여 오차가 -44~+85[%]를 나타내고 있다. q2의 경우 q값이 0.15~0.25로 정확한 값 0.2에 대하여 오차가 -25~+25[%]를 나타내고 있다. q3의 경우 q값이 0.133~0.233으로 정확한 값 0.2에 대하여 오차가 -34~+17[%]를 나타내고 있다.

표 8.9는 Ic 200~1200[μA]에 대하여 q=2.0인 경우 q1, q2, q3를 산정한 것이다. q1의 경우 q값이 1.907~2.048로 정확한 값 2.0에 대하여 오차가 -5~+2[%]를 나타내고 있다. q2의 경우 q값이 1.917~2.083로 정확한 값 2.0에 대하여 오차가 -4~+4[%]를 나타내고 있다. q3의 경우 q값이 모두 2.000으로 정확한 값 2.0에 대하여 오차가 0[%]를 나타내고 있다.

8.2 Ic 산정

본 측정 장치에서는 우선 식(6.4)로 Ic의 오차 Ice를 z값으로 산정한다. 다음에 식(6.5)로 y1을 오차 Ice로 보정하여 Ic를 산정한다.

표 6.1~표 6.9에 산정된 Ic를 기록하였다.

8.3 Irp 산정 및 오차

Irp는 q와 Ic를 곱하여 산정하는데 7절에서 설명한 바와 같이 q1, q2, q3 중 중간값 q4를 택하여 산정한다. 즉 Irp 산정값 Irpm은

$$Irpm=q4*Ic \quad \cdots\cdots (8.1)$$

로 산정한다.

표 8.1~표 8.9에 Ic=200~1200[μA], q=0.2~2.0에 대한 Irpm 값을 기록하였다. 그리고 정확한 Irp에 대한 오차[%]도 기록하였다.

표 8.10은 표 8.1~표 8.9에 기록된 Irp의 측정오차를 종합한 것이다. q=0.8~1.2 범위에서는 Irp의 측정오차가 10[%] 이내로 들어갈 확률이 100[%]이며 q=0.4~0.6 범위에서는 Irp의 측정오차가 10[%] 이내로 들어갈 확률이 82~91[%] 이다. q=0.2~0.3 범위에서는 Irp의 측정오차가 10[%] 이내로 들어갈 확률이 36~73[%] 대로 많이 감소함을 알 수 있다.

표 8.1 q=0.2의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	40	66	190	0.378	58	0.228	0.250	0.200	197	45	12
300	60	68	288	0.360	56	0.112	0.150	0.133	299	40	-34
400	80	67	380	0.370	56	0.176	0.200	0.133	394	69	-13
500	100	67	468	0.376	58	0.215	0.200	0.200	485	97	-3
600	120	66	573	0.380	57	0.241	0.250	0.167	593	143	19
700	140	67	689	0.364	59	0.138	0.200	0.233	715	143	2
800	160	65	748	0.400	58	0.370	0.300	0.200	773	232	45
900	180	67	862	0.367	58	0.157	0.200	0.200	894	179	-1
1000	200	66	947	0.386	58	0.280	0.250	0.200	980	245	23
1100	220	67	1054	0.365	58	0.144	0.200	0.200	1093	219	-1
1200	240	67	1148	0.369	57	0.170	0.200	0.167	1190	202	-16
평균		67		0.374	58						

표 8.2 q=0.3의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	60	65	191	0.390	55	0.306	0.300	0.100	198	59	-1
300	90	65	288	0.391	60	0.312	0.300	0.267	298	89	-1
400	120	65	383	0.385	62	0.273	0.300	0.333	396	119	-1
500	150	65	480	0.390	60	0.306	0.300	0.267	497	149	-1
600	180	65	581	0.389	62	0.299	0.300	0.333	601	180	0
700	210	66	701	0.373	60	0.196	0.250	0.267	727	182	-13
800	240	65	767	0.389	61	0.299	0.300	0.300	794	238	-1
900	270	65	861	0.387	61	0.286	0.300	0.300	891	267	-1
1000	300	64	952	0.405	62	0.402	0.367	0.333	983	361	20
1100	330	66	1068	0.375	61	0.209	0.250	0.300	1107	277	-16
1200	360	65	1159	0.386	61	0.280	0.300	0.300	1200	360	0
평균		65		0.387	61						

표 8.3 q=0.4의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	80	62	192	0.427	64	0.471	0.500	0.400	198	93	16
300	120	63	291	0.416	63	0.436	0.433	0.367	300	130	8
400	160	63	384	0.411	63	0.420	0.433	0.367	396	166	4
500	200	64	490	0.401	64	0.376	0.367	0.400	506	190	-5
600	240	64	584	0.403	65	0.389	0.367	0.433	603	235	-2
700	280	65	712	0.381	64	0.247	0.300	0.400	737	221	-21
800	320	64	771	0.402	64	0.383	0.367	0.400	797	305	-5
900	360	63	872	0.409	63	0.413	0.433	0.367	900	372	3
1000	400	64	972	0.402	63	0.383	0.367	0.367	1004	369	-8
1100	440	64	1078	0.396	64	0.344	0.367	0.400	1115	409	-7
1200	480	64	1170	0.402	64	0.383	0.367	0.400	1209	463	-4
평균		64		.405	64						

표 8.4 q=0.5의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	100	62	190	0.435	65	0.497	0.500	0.450	196	97	-3
300	150	62	300	0.433	65	0.491	0.500	0.450	309	152	1
400	200	61	387	0.441	66	0.516	0.600	0.500	398	205	3
500	250	61	488	0.446	66	0.533	0.600	0.500	502	267	7
600	300	60	587	0.452	66	0.552	0.700	0.500	603	333	11
700	350	62	714	0.420	66	0.449	0.500	0.500	736	368	5
800	400	61	774	0.437	66	0.504	0.600	0.500	797	402	0
900	450	61	880	0.439	65	0.510	0.600	0.450	906	462	3
1000	500	64	952	0.405	66	0.400	0.300	0.500	983	393	-21
1100	550	61	1065	0.438	66	0.507	0.600	0.500	1096	556	1
1200	600	62	1181	0.425	66	0.465	0.500	0.500	1217	609	1
평균		62		0.434	66						

표 8.5 q=0.6의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	120	60	196	0.454	68	0.558	0.567	0.600	201	114	-5
300	180	59	296	0.468	70	0.604	0.600	0.700	304	183	2
400	240	59	387	0.474	69	0.623	0.600	0.650	397	247	3
500	300	59	490	0.470	68	0.610	0.600	0.600	503	302	1
600	360	59	589	0.470	69	0.610	0.600	0.650	604	368	2
700	420	59	697	0.468	69	0.604	0.600	0.650	715	432	3
800	480	59	780	0.467	69	0.600	0.600	0.650	800	480	0
900	540	58	873	0.476	69	0.629	0.633	0.650	895	566	5
1000	600	59	975	0.468	69	0.604	0.600	0.650	1000	604	1
1100	600	59	1085	0.465	69	0.594	0.600	0.650	1113	668	11
1200	720	60	1193	0.453	69	0.555	0.567	0.650	1226	695	-3
평균		59		0.467	69						

표 8.6 q=0.8의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	160	54	197	0.532	71	0.801	0.822	0.813	201	163	2
300	240	54	296	0.532	70	0.801	0.822	0.750	302	242	1
400	320	54	395	0.534	70	0.807	0.822	0.750	402	325	1
500	400	53	489	0.548	71	0.851	0.867	0.813	497	423	6
600	480	54	595	0.536	70	0.814	0.822	0.750	606	493	3
700	560	55	706	0.525	71	0.780	0.778	0.813	720	561	0
800	640	54	782	0.536	71	0.814	0.822	0.813	796	648	1
900	720	54	889	0.537	70	0.817	0.822	0.750	905	740	3
1000	800	55	988	0.520	70	0.764	0.778	0.750	1008	770	-4
1100	880	55	1092	0.523	70	0.773	0.778	0.750	1114	861	-2
1200	960	55	1194	0.525	71	0.780	0.778	0.813	1217	950	-1
평균		54		0.532	70						

표 8.7 q=1.0의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	200	48	194	0.618	74	1.090	1.100	1.000	196	213	7
300	300	49	300	0.601	74	1.018	1.050	1.000	303	309	3
400	400	49	394	0.605	75	1.035	1.050	1.125	398	418	5
500	500	49	494	0.602	74	1.022	1.050	1.000	499	510	2
600	600	50	595	0.595	75	0.997	1.000	1.125	602	602	0
700	700	50	693	0.590	74	0.981	1.000	1.000	702	702	0
800	800	50	788	0.593	74	0.990	1.000	1.000	798	798	0
900	900	49	882	0.599	74	1.010	1.050	1.000	892	901	0
1000	1000	50	989	0.593	74	0.990	1.000	1.000	1001	1001	0
1100	1100	51	1105	0.577	74	0.941	0.956	1.000	1120	1071	-3
1200	1200	51	1207	0.580	74	0.950	0.956	1.000	1223	1169	-3
평균		50		0.596	74						

표 8.8 q=1.5의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	300	39	197	0.725	79	1.567	1.583	1.625	197	311	4
300	450	39	296	0.721	78	1.542	1.583	1.500	296	456	1
400	600	40	397	0.718	78	1.522	1.500	1.500	396	595	-1
500	750	40	495	0.719	78	1.529	1.500	1.500	494	741	-1
600	900	41	598	0.705	78	1.459	1.450	1.500	598	873	-3
700	1050	40	693	0.718	78	1.522	1.500	1.500	692	1038	-1
800	1200	40	788	0.719	78	1.529	1.500	1.500	787	1180	-2
900	1350	40	882	0.717	77	1.516	1.500	1.375	881	1321	-2
1000	1500	40	998	0.715	77	1.503	1.500	1.375	997	1496	0
1100	1650	40	1096	0.717		1.516	1.500				
1200	1800	43	1236	0.683		1.366	1.350				
평균		40		0.714	78						

표 8.9 q=2.0의 경우 전체 누설전류 측정치로부터 z, x1, Dx로 계산한 q 값 및 오차[%]

Ic	Irp	x1	y1	z	Dx	q1	q2	q3	Ic	Irpm	오차
200	400	33	197	0.797	81	2.029	2.083	2.000	195	396	-1
300	600	33	296	0.796	81	2.022	2.083	2.000	293	593	-1
400	800	34	399	0.790	81	1.984	2.000	2.000	395	791	-1
500	1000	33	500	0.793	81	2.003	2.083	2.000	495	992	-1
600	1200	35	605	0.778	81	1.907	1.917	2.000	600	1151	-4
700	1400	34	699	0.788	81	1.971	2.000	2.000	693	1386	-1
800	1600	34	794	0.791		1.990	2.000				
900	1800	33	892	0.800		2.048	2.083				
평균		34		0.792	81						

표 8.10 Irpm의 오차[%] 범위

q		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
오차	상한치[%]	45	20	16	11	11	6	7	4	-1
	하한치[%]	-34	-16	-21	-21	-5	-4	-3	-3	-4
오차<20[%] 확률		73	100	91	91	100	100	100	100	100
오차<10[%] 확률		36	73	82	82	91	100	100	100	100

IX. 맺음말

산화아연 피뢰기의 전체 누설전류는 용량성 누설전류와 저항성 누설전류를 포함하고 있는데 이 중에서 저항성 누설전류를 분리 측정하는 방법을 제시한다. 본 연구에서는 피뢰기의 전압 측정 없이 전체 누설전류의 파형만을 분석하는 방법을 제안 하였다.

저항성 누설전류가 용량성 누설전류에 비하여 매우 적을 때는 전체 누설전류전류의 파형은 정현파에 가까우나 저항성 누설전류가 점차 증가하면 전체 누설전류의 파형이 왜곡된다. 이 왜곡의 정도를 모델링하기 위하여 전체 누설전류의 반주기 파형에 내접하고 면적이 최대가 되는 사다리꼴을 제안 하였다. 이 사다리꼴의 두 꼭지점의 좌표를 측정하여 이 값으로부터 저항성 누설전류를 산정하였다.

모의 피뢰기를 이용하여 여러 경우의 저항성 누설전류와 용량성 누설전류에 대하여 전체 누설전류를 측정하여 사다리꼴의 데이터를 구축하였고 이 데이터를 이용하여 저항성 누설전류와 용량성 누설전류와의 상관관계를 도출 하였다.

이 상관관계를 이용하여 저항성누설전류 측정 장치를 구성하였으며 모의 피뢰기에 적용한 결과 저항성 누설전류가 용량성 누설전류의 80~200[%] 범위에서는 저항성 누설전류가 모두 10[%] 이내의 오차로 측정 되었다.

저항성 누설전류가 용량성 누설전류의 20~30[%]범위에서는 저항성 누설전류가 10[%] 이내의 오차로 측정될 확율이 36~73[%] 대로 떨어지는데 앞으로 이를 개선하는 연구가 계속되어야 하겠다. 위의 결과는 모의 피뢰기에서의 측정 결과인데 앞으로 실제 피뢰기에서의 저항성 누설전류의 측정과 정확도에 대한 연구가 따라야 하겠다.

본 연구에서 도입된 사다리꼴 개념은 세계 최초이며 저항성 누설전류 측정 오차도 기존의 저항성 누설전류 측정 장치에 비하여 우수하다. 따라서 본 연구 결과를 이용한 저항성 누설전류 장치의 개발과 산업화가 기대된다.

끝으로 본 연구 과정에서 모의 피뢰기로 전체 누설전류를 측정하는데 많은 도움을 주신 주식회사 서지텍의 김진수 연구원에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

M. Bartkowiak, M. G. Comber, and G. D. Mahan, “Failure modes and energy absorbtion capability of ZnO varistors,” IEEE Trans. Power Del.,vol. 14, no. 1, pp. 152-162, Jan. 1999.

H. Breder and T. Collin, “Supervision of gapless zinc-oxide surge arresters,” in Inst. Elect. Eng. Conf. Lightning Power Syst., Jun. 1984, pp.91-95.

S. Shirakawa et al., “Maintenance of surge arrester by portable leakagecurrent detector,” IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 3, pp. 998-1003,Jul. 1988.

P. Kirby, C. C. Erven, and O. Nigol, “Long term stability and energydischarge capacity of metal oxide valve elements,” IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 4, pp. 1656-1665, Oct. 1988.

A. K. Das and S. Dalai, “Recent Development in Condition Monitoring Methodologies of MOSA Employing Leakage Current Signal: A Review,” IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 13, pp. 14559-14568, July. 2021.