

# IEC60479 인체 임피던스 모델에 근거한 직류누설전류의 특성 및 검출 알고리즘

김용중<sup>1</sup>, 이진성<sup>2</sup>, 김효성<sup>†</sup>

## Detection Algorithm and Characteristics on DC Residual Current based on Analysis of IEC60479 Impedance Model for Human Body

Yong-Jung Kim<sup>1</sup>, Jinsung Lee<sup>2</sup>, and Hyosung Kim<sup>†</sup>

### Abstract

DC distribution systems has recently taken the spotlight. Concerns over human safety and stability facility are raised in DC distribution systems. Std. IEC 60479 provides basic guidance on “the effects of shock current on human beings and livestock” for use in the establishment of electrical safety requirements and suggests an electrical impedance of the human body. This study analyzes impedance spectrums based on the electrical equivalent impedance circuit for the human body; human body impedances measured by experiments are analyzed below the fundamental frequency (60 Hz). The analysis shows that the equivalent impedance circuit for the human body should be modified at least in low-frequency range below the fundamental frequency (60 Hz). The DC residual current detection method that can classify electric shock accidents of humans and electric leakages of facilities is proposed by applying the analysis result. The detection method is verified by experiments on livestock.

**Key words:** DC distribution, Electric shock current, Human body impedance, IEC 60479, Residual current

### 1. 서 론

직류 배전망의 보호대책은 두 가지 측면에서 확보가 되어야 한다<sup>[1]</sup>. 첫 번째로 인체 감전에 대한 보호이고, 두 번째로는 전력설비 및 기기의 보호이다<sup>[2-4]</sup>. 두 가지 모두 대지와의 접지에 의해 발생하는 누설전류 검출과 차단을 기본으로 하고 있다<sup>[5-8]</sup>. 인축 감전의 생리학적 현상을 규정한 IEC 60479 표준에 의하면 인체는 확률 평균적으로 직류기준 150mA의 지속적인 감전전류에서 심장에 회복 불가능한 기능 장애 및 심박동의 정지가 일어날 가능성이 있는 것으로 정의하고 있으며, 인체의

전기적 등가회로는 저항 R과 커패시터 C로 구성되는 랜들 등가회로의 형태로 정의하고 있다<sup>[9]</sup>.

랜들 등가회로의 임피던스 주파수 스펙트럼은 주파수 제로에서 무한대까지 반원 형태의 궤적을 그리는 특징이 있다. 본 논문에서는 상용주파수 이하의 주파수대에서 실제 인체를 대상으로 하여 위험하지 않은 낮은 레벨의 감전실험을 수행하여 IEC 60479에서 제시하는 랜들 등가회로가 타당성을 갖는지 검토한다. 또한 실험결과를 토대로 직류 배전시스템의 TN 접지방식에서 인체 감전 및 설비 누전에 따른 구분동작이 가능한 직류전용 누설전류 검출 기법을 제안하고 가축을 대상으로 한 실험을 통하여 검증 한다.

### 2. 인버터의 직류링크 맥동 및 제어 시스템

IEC 60479 표준에서 인체 임피던스는 통전경로, 접촉 전압, 인체에 흐르는 전류의 지속시간, 주파수, 피부의 습기, 접촉면적, 접촉압력 및 온도가 영향을 주는 것으로 설명하고 있다. 그림 1에서 보듯이 인체 임피던스의 전기적 등가회로는 저항과 병렬커패시터, 그리고 직렬저항

Paper number: TKPE-2018-23-5-2

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University  
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

<sup>1</sup> Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

<sup>2</sup> Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Intech-FA  
Manuscript received Jun. 6, 2018; revised Jun. 18, 2018; accepted Jun. 28, 2018

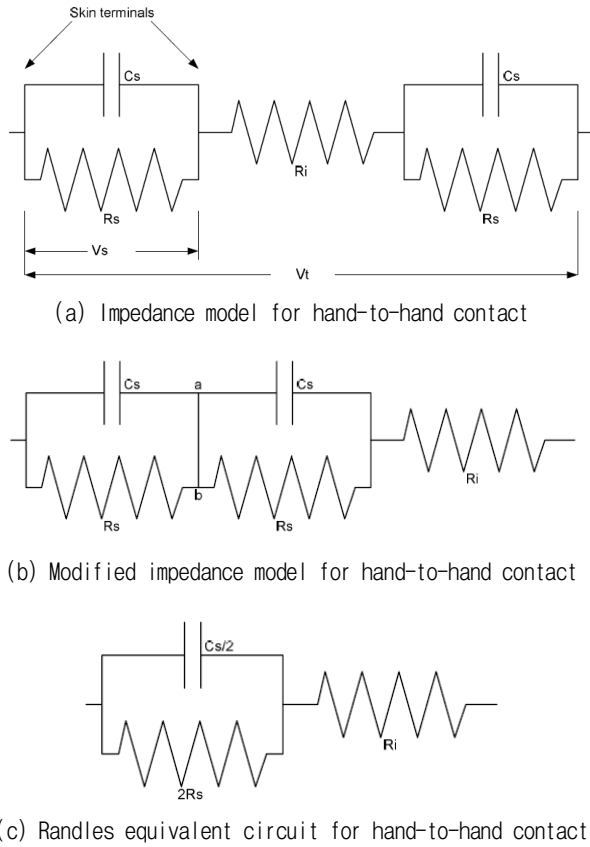


Fig. 1. Electrical impedance Model for hand-to-hand contact in IEC 60479.

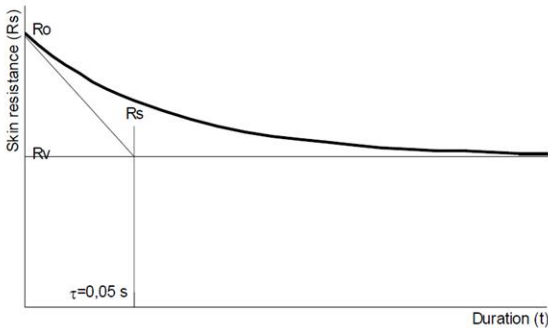


Fig. 2. Estimation of the variation of skin resistance as a function of electric shock duration in IEC 60479.

으로 구성되는 3개의 요소를 갖는다고 제시한다. 인체의 내부직렬저항은  $R_i$ 로 나타내고, 인체 내부를 둘러싼 피부는 병렬 저항  $R_s$  및 병렬 커패시터  $C_s$ 의 병렬회로로 나타낸다. 피부는 인체 내부를 감싸고 있으므로 두 개의 임피던스 구성을 갖지만 전기적으로는 그림 1(c)와 같이 랜들 등가회로로 변환시킬 수 있다<sup>[10],[11]</sup>.

왜냐하면 그림 1(a)에서 감전 시 피부의 접촉 면적이 동일하다고 할 때, 피부의 임피던스를 나타내는 양 측면 저항과 커패시터 병렬회로의 임피던스 또한 동일하다고 볼 수 있기 때문이다. 따라서 그림 1(b)의 a와 b사이의 분기회로에 흐르는 전류가 없어 제거될 수 있으므로 최

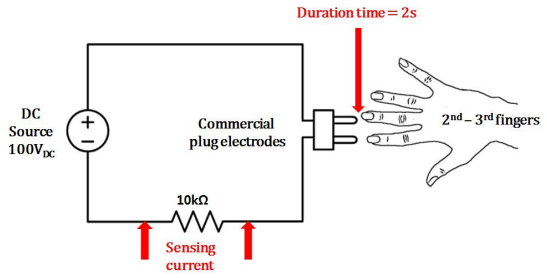


Fig. 3. Experiment configuration of human electric shock in condition of Low DC current.

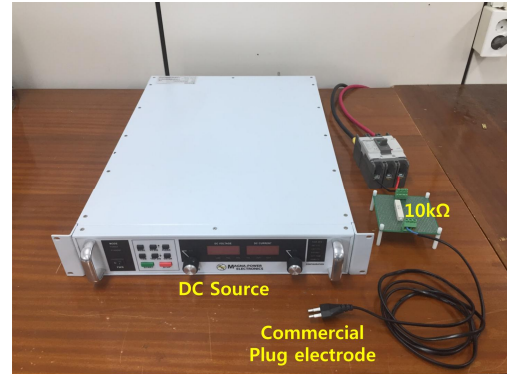


Fig. 4. Experiment environment of human electric shock in condition of Low DC current.

종적으로는 그림 1(c)와 같이 랜들 등가회로로 변환 가능하다고 설명하고 있다.

또한 랜들 등가회로로 변환된 그림 1(c)의 인체임피던스 등가회로에서 병렬저항  $R_s$ 는 그림 2와 같이 서서히 감소한다고 하며, 수식적으로 식 (1)과 같이 정량화 되어 있다. 그림 2에서  $R_0$ 는 접촉전압이 인가되지 않았을 때의 피부의 초기 저항값이며, 접촉전압이 인가된 후에 최종적으로 피부의 저항값은  $R_v$ 로 서서히 수렴한다고 설명한다.

$$R_s(t) = R_v + (R_0 - R_v)e^{-\frac{t}{0.05}} \quad (1)$$

### 3. 저 전류 인체 감전 실험

#### 3.1 DC 인체감전 실험

IEC 60479 인체감전의 생리학적 현상에 제시되어 있는 직류에서의 인체감전 현상을 검증하기 위한 실험구성은 그림 3과 같으며 DC 인체감전을 위한 실험환경은 그림 4와 같다.

실험자의 안전을 고려하여 감전 전류의 경로는 심장을 관통하지 않도록 한쪽 손의 검지와 중지만을 지나도록 하였고, 션트저항을 사용하여 인체에 흐르는 전류를 전압으로 측정하도록 하였다. 저 전류 인체감전을 위한 접촉전극은 220V용 상용플러그를 사용하였고, 접촉전극의

TABLE I  
EXPERIMENT ENVIRONMENT FOR HUMAN  
ELECTRICAL SHOCK

Parameter	Value
Contact voltage	100[V <sub>DC</sub> ]
	100[V <sub>AC</sub> ]
Gender	Man
Contact humidity	dry
Contact skin temperature	29[°C]

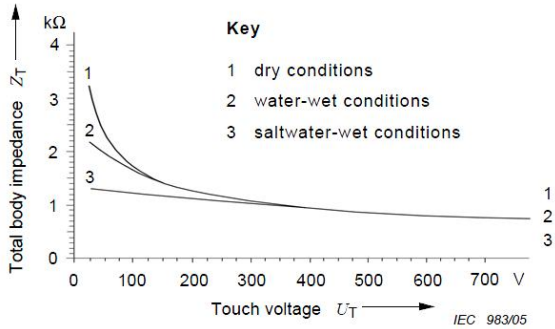
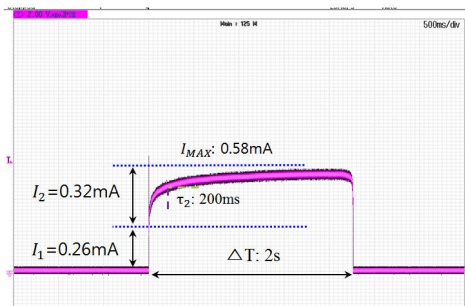
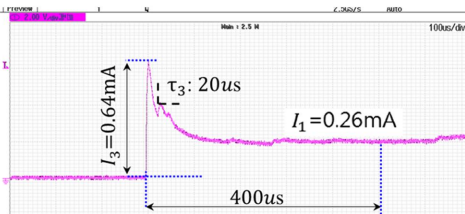


Fig. 5. Total body impedances  $Z_T$  for a current path hand to hand, for large surface areas of contact in dry, water-wet and saltwater-wet conditions.



(a) Full waveform



(b) Waveform in an initial phase of electrical shock

Fig. 6. Waveform of touch current  $I_T$  in DC.

면적은 약  $0.25\text{mm}^2$  이다. 이 때, 접촉전압의 크기는 100VDC로 인체에 흐르는 전류가 2mA가 넘지 않도록 실험 조건을 구성 하였다. IEC 60479 표준에서는 그림 5에 보이듯이 인체 감전시 접촉전압의 크기와 습한 정도에 따라 인체의 임피던스가 달라진다고 설명하고 있다. IEC 60479 표준에서는 2mA 이하의 감전전류가 10ms

TABLE II  
COMPARISON OF EXPERIMENT RESULT

Parameter	IEC 60479	Measuerd impedance
$V_{DC}$	200V	100V
$R_T$	1681	384.62k
$R_i$	664	156.25k
$C_s$	0.15uF	129pF
Duration of current flow	20ms	2000ms

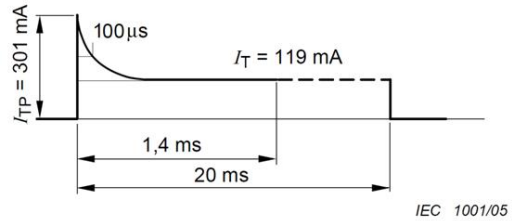


Fig. 7. Oscillogram of touch current  $I_T$  for DC, current path hand to hand and large surface areas of contact in dry conditions.

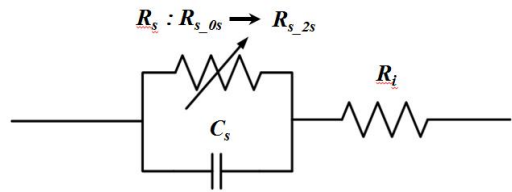


Fig. 8. Randles equivalent circuit for hand-to-hand contact.

이상 유지될 경우 감전부위에 통각이 감지되긴 하지만, 인체생리학적인 피해는 발생하지 않음을 제시하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험자의 안전을 고려하여 감전 전류가 인체에 무해한 1mA 이하로 흐를 수 있도록 건조한 상태에서 실험을 진행 하였다. 감전 접촉시간은 피부저항  $R_s$ 의 저항값이 안정상태에 이를 수 있도록 2초 동안 진행 하였고 programmable 전원장치의 기능을 사용하여 감전 접촉시간을 제한하였다.

그림 6은 DC 인체감전 실험 결과를 보여준다. 2초 이후에도 전류가 지속적으로 완만하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 그림 6(b)의 실험파형에서 나타나는 용량성 전류  $i_3$ 는 그림 8의 병렬 커패시터에 의해 발생하며,  $i_3$ 의 피크치는 인체의 내부저항  $R_i$ 에 의해 제한된다. 병렬 저항  $R_s$ 과 병렬 커패시턴스  $C_s$ 는 식 (2)와 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$R_i = \frac{V}{i_3} = \frac{100\text{V}}{0.64\text{mA}} = 156250\Omega \quad (2)$$

$$C_s = \frac{\tau_c}{R_i} = 128\text{pF} \quad (3)$$

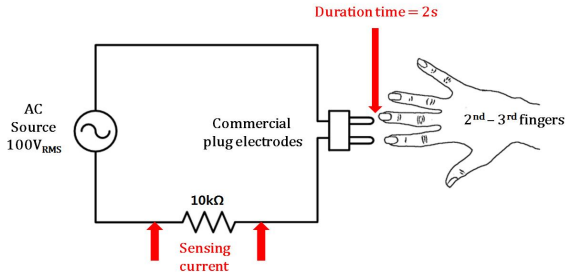


Fig. 9. Experiment configuration of human electric shock in condition of Low AC current.

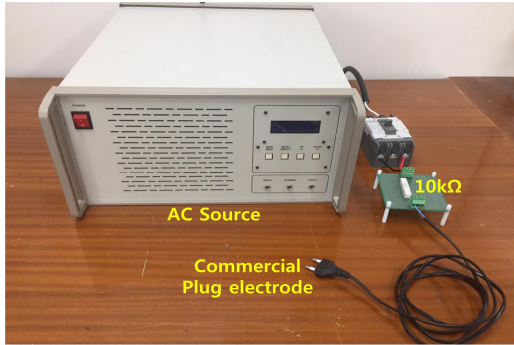


Fig. 10. Experiment environment of human electric shock in condition of Low AC current.

그림 6(a)에서와 같이 짧은 시간동안 병렬 커패시터의 충전이 완료되면 커패시터로 흐르는 전류는 제로가 되고, 피부저항  $R_s$ 와 내부저항  $R_i$ 에 의하여 감전전류의 크기가 결정된다. 피부저항  $R_s$ 는 초기저항  $R_{s\_0s}$ 에서  $R_{s\_2s}$ 까지 가변되며, 그에 따른 저항값은 식 (4) 및 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

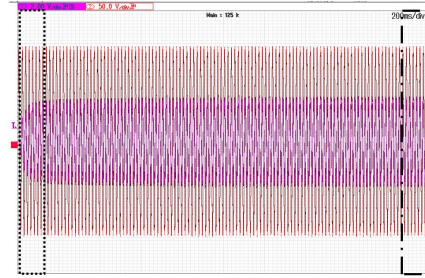
$$R_{s\_0s} = \frac{V_{DC}}{i_1} - R_i = \frac{100V}{0.26mA} - 156250\Omega = 0\Omega \quad (4)$$

$$R_{s\_2s} = \frac{V_{DC}}{i_1 + i_2} - R_i = \frac{100V}{0.58mA} - 156250\Omega = 16163\Omega \quad (5)$$

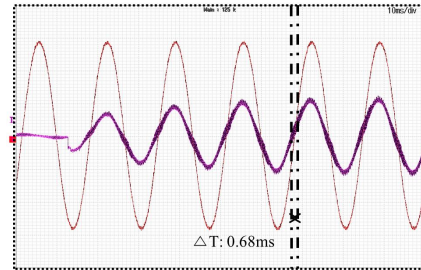
3.2 AC 인체감전 실험

그림 9는 AC 인체감전 실험구성을 나타내며, 그림 10은 AC 인체감전 실험환경을 나타낸다. 실험 환경은 DC 인체감전 실험과 동일하며, 전원의 주파수는 60Hz~30Hz까지 5Hz 단위로 총 7가지의 실험을 진행 하였다. 그림 11은 접촉전압 100Vac에서의 실험 파형을 나타내며, 이때의 주파수는 60Hz이다. 실험파형에서 보듯이 AC 감전 시에도 인체의 피부저항  $R_s$ 가 서서히 감소됨을 확인 할 수 있으며, 병렬 커패시터 성분에 의해 진상 성분의 전류가 흐름을 알 수 있다.

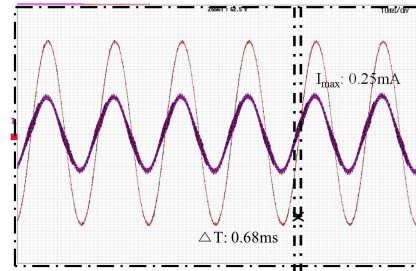
AC 실험은 DC 실험과 다르게 초기에 과도성 피크전류가 나타나지 않음으로 인체의 내부저항  $R_i$ 를 도출 할



(a) Full waveform



(b) Waveform in an initial phase of electrical shock



(c) Waveform after 2 seconds of electrical shock

Fig. 11. Waveform of touch current  $I_T$  in AC.

수 없다. 따라서 인체의 내부저항  $R_i$ 는 DC 감전 시의 저항값과 동일하다고 가정하고 등가회로 해석을 진행 하였다. AC 감전 시 2초 후의 최종 저항값  $R_{s\_2s}$ 는 식 (9)를 식 (7)에 대입함으로써 식 (10)과 같이 도출할 수 있다. 병렬 커패시터  $C_s$ 는 식 (12)와 같이 전개 된다.

$$Z_{R_{s\_2s} // C_s} = Z_T - R_i = 413749 - j149409\Omega \quad (6)$$

$$Re_{(R_{s\_2s} // C_s)} = \frac{R_{s\_2s}}{(R_{s\_2s} \cdot \omega C_s)^2 + 1} \quad (7)$$

$$Im_{(R_{s\_2s} // C_s)} = \frac{R_{s\_2s} \cdot \omega C_s}{(R_{s\_2s} \cdot \omega C_s)^2 + 1} \quad (8)$$

$$R_{s\_2s} \cdot \omega C_s = \frac{Im_{(R_{s\_2s} // C_s)}}{Re_{(R_{s\_2s} // C_s)}} \quad (9)$$

$$R_{s\_2s} = \left| Re_{(R_{s\_2s} // C_s)} \cdot \left\{ \left( \frac{Im_{(R_{s\_2s} // C_s)}}{Re_{(R_{s\_2s} // C_s)}} \right)^2 + 1 \right\} \right| = 467702\Omega \quad (10)$$

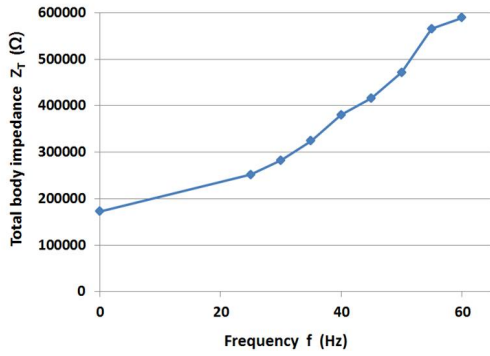


Fig. 12. Total body impedance  $Z_T$  from 0Hz(DC) to 60Hz.

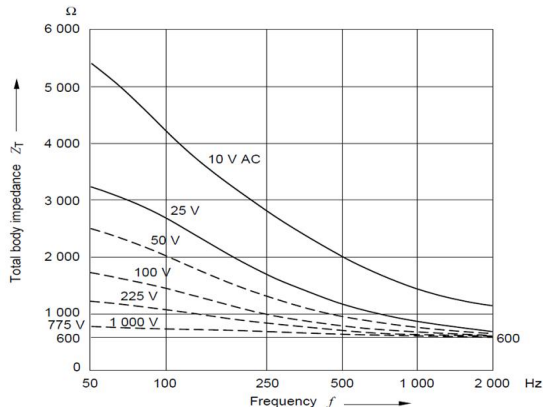


Fig. 13. Frequency dependence of the total body impedance  $Z_T$  for touch voltages from 10 V to 1000 V and a frequency range from 50 Hz to 2 kHz for a current path hand to hand or hand to foot, large surface areas of contact in dry conditions.

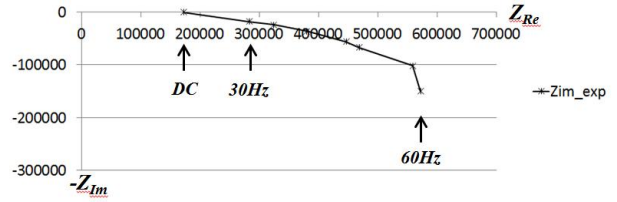
$$\tan \varnothing = \frac{Im_{(R_s, 2s//C_s)}}{Re_{(R_s, 2s//C_s)}} = \frac{\omega C_s \cdot R_{s, 2s}^2}{R_{s, 2s}} \quad (11)$$

$$C_s = \left| \frac{\tan \varnothing}{\omega R_{s, 2s}} \right| = \left| \frac{Im_{(R_s, 2s//C_s)}}{Re_{(R_s, 2s//C_s)}} \cdot \frac{1}{\omega R_{s, 2s}} \right|$$

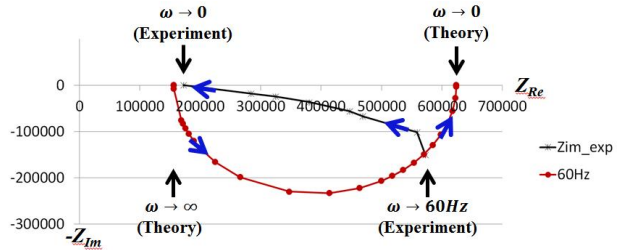
$$= \frac{Im_{(R_s, 2s//C_s)}}{\omega R_{s, 2s} \cdot Re_{(R_s, 2s//C_s)}} = 2.05nF \quad (12)$$

그림 12는 인체감전 실험 시 주파수에 따른 인체임피던스의 경향을 나타내며, 주파수가 증가할수록 인체임피던스는 상승하는 패턴을 보인다. 그러나 그림 13의 IEC 60479에서 제시하는 주파수에 따른 인체임피던스 특성 곡선은 주파수가 증가할수록 임피던스가 하강하는 패턴을 보인다. 이는 IEC 60479의 실험자료가 50Hz 이상의 교류에 대하여만 확보되어 있어서, 그보다 낮은 주파수 및 직류에서의 인체임피던스를 도출하기 위한 실험이 추가적으로 필요함을 의미한다.

그림 14는 인체감전 실험결과 주파수에 따른 인체임피던스의 스펙트럼 분석내용을 설명한다. 그림 14(a)는 인체감전 실험주파수에 따른 인체임피던스의 스펙트럼 분포이고, 그림 14(b)의 반원은 IEC 60479에서 제시하는 인체



(a) Measured body impedance from 0Hz(DC) to 60Hz.



(b) Impedance spectrum of electrical impedance model and measured body impedance from 0Hz(DC) to 60Hz.

Fig. 14. Impedance spectrum of human electric shock in frequency conditions from 0Hz(DC) to 60Hz.

임피던스의 랜들 증가회로에 대한 스펙트럼 분포이다. 그림 14(b)에서 도트마크로 표시된 반원형 궤적은 60Hz에서 측정된 인체임피던스를 포함하는 랜들증가회로 모델의 전원주파수에 따른 임피던스 스펙트럼 궤적이다. IEC 60479 표준에서 제시하는 인체임피던스에 대한 랜들 증가회로의 스펙트럼 궤적은 주파수가 무한대에서 60Hz를 지나 직류로 달라짐에 따라 실수축의 값이 증가하며 반원의 궤적을 그려야만 한다. 따라서 60Hz 이하의 전원주파수에 대한 인체임피던스의 스펙트럼도 반원의 궤적을 따라 가야만 한다. 하지만 인체감전 실험결과에 의하여 X마크로 표시된 인체임피던스의 스펙트럼 궤적은 반원의 형태를 그리지 못하고 주파수가 60Hz에서 제로로 바뀔 때 실수축의 값이 오히려 감소하는 것을 확인하였다.

#### 4. 직류와 교류에서 인체감전전류 검출의 차이

직류는 설비의 지락사고와 인체의 감전사고를 구별하여 검출이 가능하다. 그 이유는 설비의 지락사고는 전류가 급격한 기울기를 가지고 상승하며, 인체의 감전사고는 인체의 임피던스 특성에 의하여 완만한 기울기를 가지며 상승하기 때문이다. 그러나 교류에서는 기본적으로 시간평균에 근거한 RMS계산에 의하여 전류를 검출하므로, 설비의 지락사고에 의하여 급격히 상승하는 누설전류나 인체 감전에 의하여 완만히 상승하는 누설전류가 모두 완만한 기울기를 가지며 상승하므로 구분할 수 있는 방법이 없다.

직류와 교류에서 설비지락 사고와 인체감전 사고에 의한 누설전류 검출이 차이가 있다는 것을 검증하기 위해

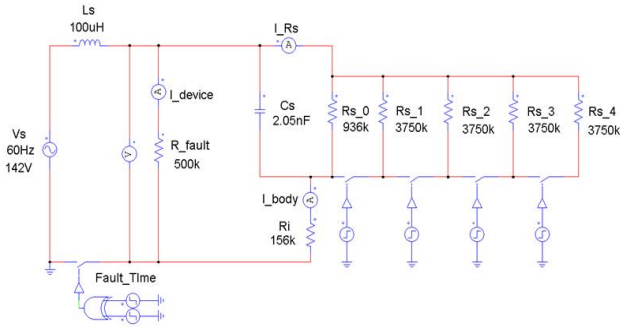


Fig. 15. Simulation circuit diagram for electric shock accidents of humans and electric leakages of facilities in AC.

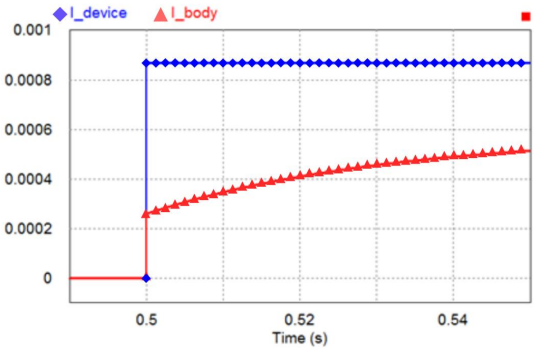


Fig. 18. Simulated waveform of device current  $I_{device}$  and body current  $I_{body}$  in DC.

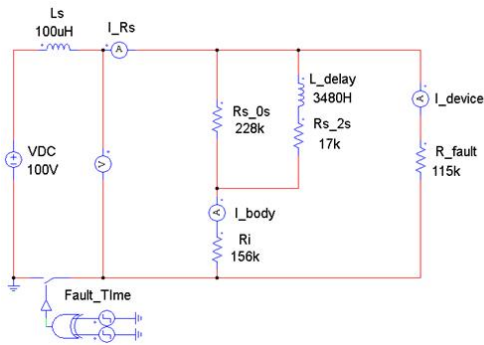


Fig. 16. Simulation circuit diagram for electric shock accidents of humans and electric leakages of facilities in DC.

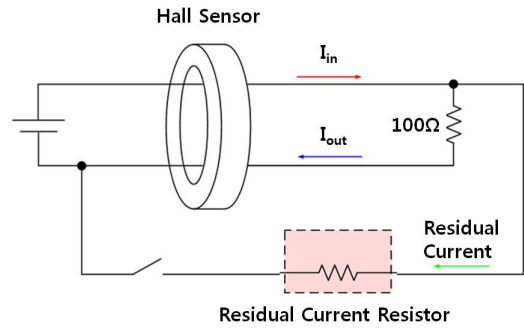


Fig. 19. Experimental configuration of DC residual current detection.

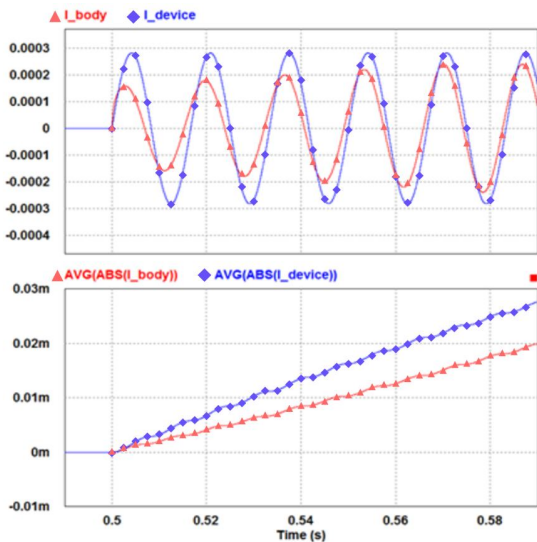


Fig. 17. Simulated waveform of device current  $I_{device}$  and body current  $I_{body}$  in AC.

시뮬레이션을 진행 하였다. 그림 15와 그림 16은 AC와 DC에서의 인체 감전 및 설비지락 사고 시뮬레이션 회로를 나타낸다. 시뮬레이션에서 인체 임피던스의 시변 저항이 시간에 따라 감소하는 것을 모사하기 위하여 AC의 경우는 매 반주기 마다 인체 저항값이 단계적으로 감소하도록 하였고, DC의 경우는 인덕터를 사용하여 시간 지연요소를 두어서 연속적으로 인체 임피던스가 감소

하도록 하였다. AC에서의 시뮬레이션 결과는 그림 17과 같다. 그림 17에서 보이듯이 인체감전 전류  $I_{body}$ 는 시간에 따라 서서히 크기가 증가하고 있으며, 설비지락 사고 전류  $I_{device}$ 의 경우 저항성부하 특성으로 전류가 급격하게 사고전류 레벨로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 RMS값을 계산하기 위한 시간평균값을 보면, 인체감전 전류  $Avg(|I_{body}|)$ 와 설비지락 사고전류  $Avg(|I_{device}|)$ 가 모두 완만한 기울기를 갖고 증가하므로 특징적인 차이가 없다.

그림 18은 DC에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 인체감전에 의하여 흐르는 전류는 완만한 기울기를 가지며 증가하지만, 설비지락 사고의 경우 급격하게 전류가 사고레벨로 증가됨을 확인할 수 있다. 따라서 직류에서는 인체감전 사고와 설비지락 사고를 누설전류의 기울기를 판단하여 구별할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 설비 및 인체사고에 따른 직류누설전류 시험

그림 19는 DC 누설전류 검출 구분 실험 구성을 나타내며, 그림 20 및 표 3은 DC 누설전류 검출 구분 실험 환경과 실험 조건을 나타낸다. 안전상 인체 피부조직 그리고 전류패턴이 유사한 돼지의 피부에 대하여 누설전류 검출 구분 실험을 진행 하였다. 누설전류가 급격히 증가하는 설비사고의 경우는 누설전류가 100mA를 넘는 경우

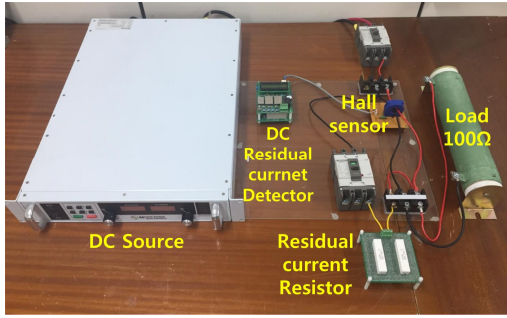


Fig. 20. Experimental environment of DC residual current detection.

TABLE III  
EXPERIMENTAL CONDITION OF DC RESIDUAL CURRENT DETECTION

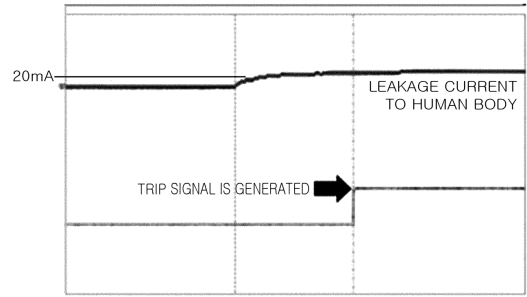
	Livestock Body	Residual Resistor ①	Residual Resistor ②
$V_{in}$	100Vdc	100Vdc	100Vdc
Load	Pork	Resistor	Resistor
Residual Current	50mA	50mA	150mA
Trip Level	100mA	100mA	100mA
Human Body protection Level	30mA	30mA	30mA

회로를 차단하도록 알고리즘을 적용 하였으며, 누설전류의 패턴이 완만하게 증가하는 양상을 보이면 30mA에서 회로를 차단하도록 하였다.

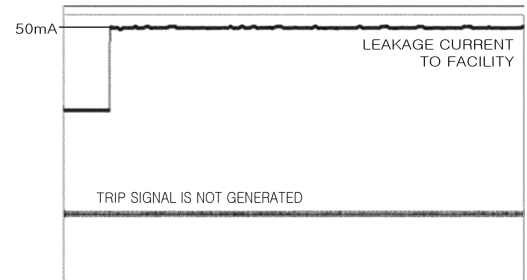
실험 결과는 그림 21에 보인다. 그림 21(a)와 같이 인체 감전사고가 발생할 경우 감전 전류가 완만하게 증가하는 패턴을 보이며 적용된 알고리즘으로 30mA일 때 회로를 차단하는 것을 볼 수 있다. 그림 21(b)는 누설전류가 50mA인 경우의 실험 결과이다. 실험결과에서 보듯이 인체 보호레벨 30mA보다 높은 누설전류가 흐르고 있지만 인체의 전류 패턴과 다르게 급격히 증가하기 때문에 회로를 차단하지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 21(c)는 누설전류가 150mA인 경우의 실험 결과이다. 실험 결과에서 보듯이 차단 누설전류 100mA를 초과한 상황이기 때문에 회로를 차단하는 것을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

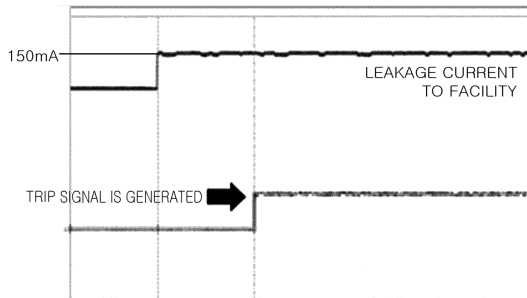
본 논문에서는 직류 배전계통에서의 인체 보호기술에 관련한 IEC 60479 표준 “인체감전의 생리학적인 현상”에 제시되어 있는 인체감전 현상에 대하여 교류환경과 직류환경에서 인체임피던스의 특성에 대한 실험을 통하여 분석하였다. 분석 결과, IEC 60479에서 제시하는 임피던스 모델인 랜들 등가회로는 실제 실험결과와 모순되는 점이 발견 되었으며, 수정이 필요함을 확인할 수 있었다. 또한 실험결과를 토대로 직류 배전시스템의 TN 접지



(a) Electric shock accident: Livestock body



(b) Electric leakage accident: Residual Resistor ①



(c) Electric leakage accident: Residual Resistor ②

Fig. 21. Experimental results of DC residual current detection.

방식에서 인체 감전 및 설비 누전에 따른 구분동작이 가능한 직류전용 누설전류 검출 기법을 제안하였고 가축을 대상으로 한 실험을 통하여 검증하였다. 개발된 누설전류 검출기는 노이즈성 전류에 대해서 둔감하게 동작하여 주요설비에 대한 전력 공급의 안정성을 도모함과 동시에, 인체의 감전사고에 대해서는 민감하게 동작하여 생명을 보호하는 두 가지 목적을 달성할 수 있음을 증명 하였다. 제안된 기술은 고도의 신뢰성이 보장되어야 하는 배전망에 적용할 수 있으며, 직류 배전시스템의 TN 접지방식에서 인체에 대한 감전 및 설비 누전에 대한 사고에 대하여 통합적으로 보호가 가능하다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (2016R1D1A3B01008279)  
본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구에 의해 지원되었음. (과제번호 : R17XA05-46)

## References

- [1] IEC TR 60755, "General requirements for residual current operated protective devices," 2008.
- [2] International Electrotechnical Commission, "Low-voltage electrical installations, Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions," 603634-1, IEC, 2005.
- [3] D. Salomonsson, L. Sogder, and A. Sannino, "Protection of low-voltage DC microgrids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 3, pp. 1045-1053, 2009.
- [4] M. Noritake, T. Iino, A. Fukui, K. Hirose, and M. Yamasaki, "A study of the safety of the DC 400 V distribution system," *IEEE INTELEC 31st International*, pp. 1-6, Oct. 2009.
- [5] W. K. Lee, B. H. Han, H. M. Jung, and H. S. Kim, "Development of residual current detector for DC distribution system," in *Korean Power Electronics Annual Conference*, pp. 53-54, Jul. 2013.
- [6] D. W. Kim, Y. B. Lim, S. I. Lee, J. H. Kim, and D. C. Kang, "Prevention techniques of electrical fire and electrical shock caused by leakage current," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, pp. 82-87, Jun. 2013.
- [7] H. J. Kim, J. B. Baek, G. S. Seo, K. S. Choi, H. S. Bae, and B. H. Cho, "Research on earth leakage circuit breaker for DC-based green home," in *Korean Power Electronics Annual Conference*, pp. 76-77, Nov. 2010.
- [8] W. K. Lee, and H. S. Kim, "Development of residual current detector for protecting human and equipment of TN grounding systems in DC power distribution systems," in *Korean Power Electronics Annual Conference*, pp. 64-65, Nov. 2014.
- [9] S. M. M. Alavi, A. Mahdi, S. J. Payne, and D. A. Howey, "Identifiability of generalized randles circuit models," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 25, No. 6, pp. 2112-2120, Nov. 2017.
- [10] International Electrotechnical Commission, "Effects of current on human beings and livestock, Part 1: General Aspects," 60479-1, IEC, 2005.
- [11] IEC 60479, "Residual current protective device dependent or independent of line voltage," 2008.

**김용중(金龍中)**

1988년 11월 10일생. 2013년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 박사과정.

**이진성(李珍成)**

1990년 12월 13일생. 2015년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2017년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2017년~현재 Intech-FA 전력변환실 연구소.

**김효성(金孝城)**

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부 교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.