

직류환경에서 인체에 흐르는 감전전류 분석

이진성¹, 김효성[†]

Analysis on Electric Shock Current in DC Electricity

Jin-Sung Lee¹ and Hyosung Kim[†]

Abstract

Recently, DC distribution systems have become a hot issue because of the increase in digital loads and DC generation systems according to the expansion of renewable energy technologies. To obtain the practical usage of DC electricity, safety should be guaranteed. The main concerns for safety are twofold: one side is human protection against electric shocks, and the other is facility protection from short faults. "Effects of current on human beings and livestock" (IEC 60479) defines a human body impedance model in electric shock conditions that consists of resistive components and capacitive components. Although the human body impedance model properly works in AC electricity, it does not well match with the electric shock behavior in DC electricity. In this study, the contradiction of the human body impedance model defined by IEC 60479 in case of DC electricity is shown through experiments for the human body. From the analysis of experimental results, a novel unified human body impedance model in electric shock conditions is proposed. This model consists of resistive components, capacitive components, and an inductance component. The proposed human impedance model matches well for AC and DC electricity environments in simulation and experiment.

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

1. 서 론

직류배전망의 안전성은 두 가지 측면에서 확보가 되어야한다^[1]. 첫째로 인체 안전성이고, 둘째로 전력설비 및 기기의 안전성이다. 두 경우는 모두 대지와 접지에 의하여 발생하는 누설전류에 대한 검출과 차단을 기본으로 하고 있다^{[2]-[4]}. 인축감전의 생리학적 현상 규정인 IEC 60479는 전기적 안전 요건을 수립하기 위해 인축의 접촉조건에 따라 생리학적 영향에 대한 전류의 한계치를 제공한다^[5]. IEC 60479에 의하면 인체는 직류 150mA의 감전전류에서 심장에 회복 불가능한 기능 장애 및 박동의 정지가 일어날 가능성이 있는 것으로 정의하고

있으며(불수의 전류), 교류와 직류환경에서 인체감전 임피던스 모델의 전기적 등가회로는 모두 저항 R과 커패시터 C만으로 구성되어 있다^[6]. 하지만 직류의 경우 교류와는 다른 인체 생리학적 특성을 가지고 있으므로 이를 위한 기초적 연구로서 인체 직류 감전특성에 대한 고찰이 필요하다.

본 논문은 교류와 직류환경에서 인체의 감전특성을 실험적 연구를 통하여 감전전류의 기울기와 패턴을 분석하고, 각각의 인체의 임피던스 모델을 제시한다. 또한 직류와 교류환경에서 두 인체의 감전 등가회로모델의 모순점을 제시하고, 직류와 교류 환경에서 통합적으로 적용 가능한 통합 인체 감전 임피던스 모델을 제시한다.

2. IEC표준 인축의 감전현상

2.1 IEC 60479 표준 인체 임피던스

IEC 60479에서는 다양한 환경조건 별로 인체임피던스를 제시하고 적용환경에 맞도록 선택하여 적용토록 하고 있다. 즉, 인체의 임피던스는 통전경로, 접촉전압, 전류의 지속시간, 주파수, 피부의 습기, 접촉면적, 접촉압

Paper number: TKPE-2016-21-3-9

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

[†] 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

¹ Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received Dec. 10, 2015; revised Jan. 6, 2016; accepted Mar. 2, 2016

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 우수추천논문임

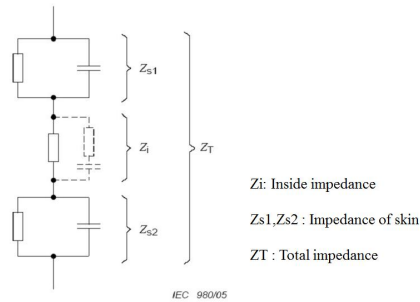


Fig. 1. Human body impedance model.

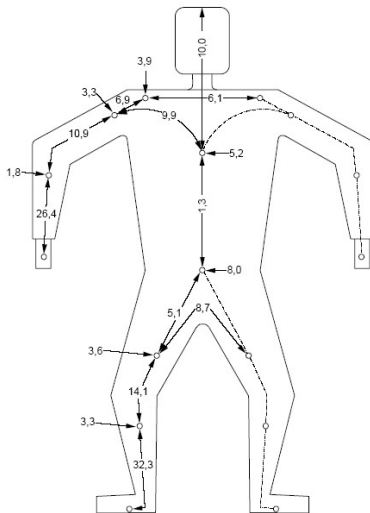


Fig. 2. Percentage distribution of human body equivalent internal impedance.

TABLE I
TOTAL IMPEDANCE ON DRY AND WET HAND TO HAND OF HUMAN BODY IN AC AND DC ENVIRONMENT

Touch voltage [V]	Value(maximum value) for the total impedances $Z_T([\Omega])$ that are not exceeded for percentages 95% of the population in	
	AC	DC
25	6,100	7,275
50	4,600	5,325
75	3,600	4,100
100	3,125	3,350
125	2,675	2,875
150	2,350	2,475
175	2,175	2,225
200	2,050	2,050
225	1,900	1,900
400	1,275	1,275
500	1,150	1,150
700	1,050	1,050
1,000	1,050	1,050

력 및 온도에 영향을 받으며 등가 회로는 저항 R과 커패시터 C로 구성되는 것으로 제시하고 있다. 그림 1은

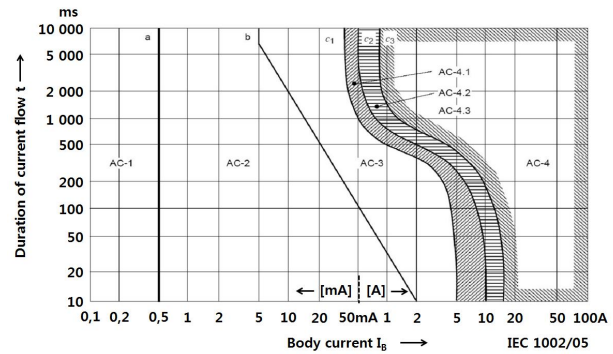


Fig. 3. Effect of AC shock-current to the human body.

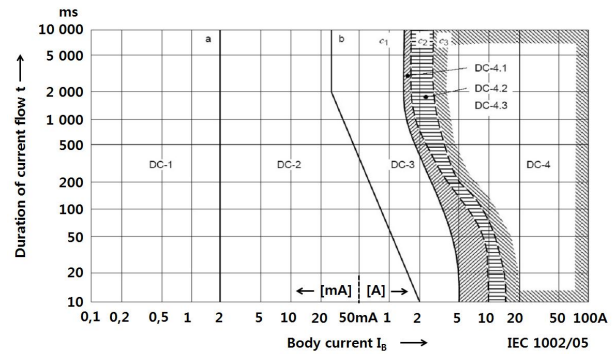


Fig. 4. Effect of DC shock-current to the human body.

IEC 60479에서 제시하는 인체 임피던스의 모델을 보인다. 인체 내부를 둘러싼 피부의 임피던스 Z_{s1}, Z_{s2} 가 있고, 내부에는 내부임피던스 Z_i 가 존재한다.

인체의 내부임피던스는 저항성분이며 크기는 통전 경로 및 접촉면의 조건에 영향을 받는다. 한쪽 손에서 한쪽 발로의 도전경로에 대한 내부임피던스를 100%로 했을 때의 인체 내부임피던스의 부위별 분포는 그림 2와 같다.

표 1은 직류 및 60Hz 교류의 경우 IEC 60479에서 제시하는 자료로서 건조하고 넓은 접촉면(10,000mm²)을 갖는 손과 손사이의 인체의 총 임피던스를 나타낸다. 인체 임피던스는 전압이 높아질수록 낮아지며, 주파수가 높아질수록 낮아진다. 인체의 총 임피던스는 인체 내부 임피던스와 피부임피던스의 합이며, 약 200V 이상에서 직류와 교류의 임피던스는 실용상 큰 차이가 없다. 표 1의 임피던스는 0.1초 동안의 통전전류에 해당하는 값이며 더 긴 통전 시간에 대한 임피던스는 10~20% 감소할 수 있으며, 피부조직이 파열된 후의 임피던스는 인체 내부 임피던스에 근접한다.

2.2 교류 및 직류 감전전류에 대한 인체의 반응

그림 3 및 그림 4는 IEC 60479에서 제시하는 전류-시간에 대한 인체 생리현상 그래프로 감전전류와 작용시간의 관계를 감전의 위험도에 따라 5개의 경계곡선 및 4개의 영역으로 나누고 있으며, 곡선의 상부 C1은 심장 마비, 호흡정지 및 화상 또는 타세포의 손상과 같은 병

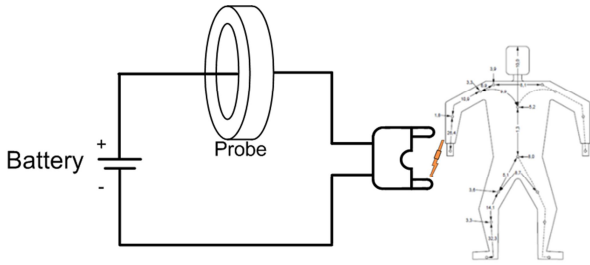


Fig. 5. Test circuit for monitoring shock-currents through human body in DC and AC environment.

TABLE II
EXPERIMENTAL ENVIRONMENT

Parameter		Value
Contact voltage	DC	100 [V _{DC}]
	AC	100 [V _{rms}]
Gender	Man	8
	Women	1
Number of human samples		9
Contact humidity		dry
Contact temperature		22°C

태생리학적 영향이 나타나는 구간이다.

그림 3은 교류 15~100Hz의 감전전류-시간에 대한 인체의 생리현상이다. 인체의 영향에 대한 전류-시간 구역의 불수의적 근육의 수축이 일어날 수 있는 한계전류의 하한선 b선(AC-3 구역의 한계)의 최저값이 5mA이며, 이 전류보다 큰 감전전류조건에서의 생리학적 안전한계 시간은 약 6.5초로 제시하고 있다.

그림 4는 직류의 감전전류-시간에 대한 인체의 생리현상이며 불수의적 근육의 수축이 일어날 수 있는 한계전류의 하한선인 b선(DC-3 구역의 한계)의 최저값이 교류와 달리 25mA로 높은 것을 볼 수 있다.

그림 3과 그림 4를 비교해 보면 직류에 의한 사고는 교류보다 움켜진 부분의 이탈이 용이하고 심장주기보다 더 장시간의 감전 기간에 대하여 심실세동 한계전류가 교류의 경우보다 상당히 높으므로 안전하다고 볼 수 있다.

3. 인체의 감전실험 및 모델링

3.1 감전 실험 조건 및 구성

IEC 60479 인체감전의 생리학적 현상에 제시되어 있는 직류에서의 인체감전 현상에 대한 실험구성은 그림 5와 같다. 실험자의 안전을 위하여 감전 전류는 심장을 관통하지 않도록 검지와 중지를 지나도록 하였고 감전 접촉시간은 100ms이하로 제한하였다.

도전체는 220V용 상용플러그를 사용하였으며, 이 때 접촉전압의 크기는 직류 100V_{DC}, 교류 100V_{rms}로 전류가 직류기준 2mA를 넘지 않도록 실험조건을 구성하였고, 실험환경은 표 2와 같다.

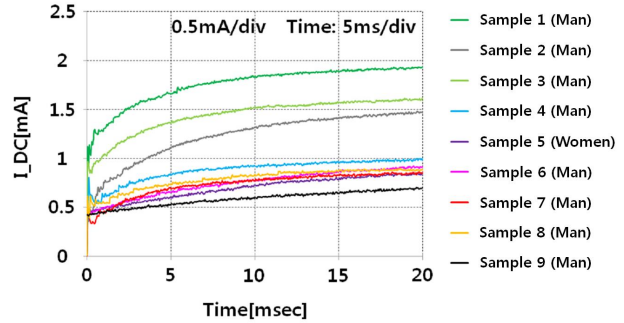


Fig. 6. Shock current waveforms through human bodies in DC electricity.

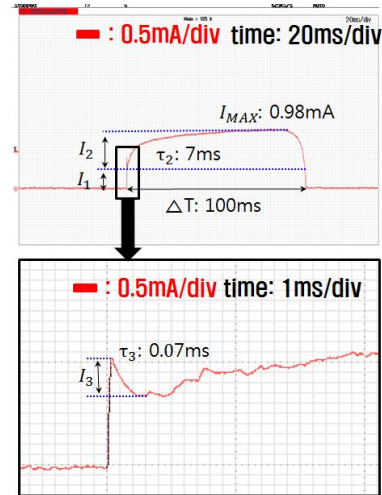


Fig. 7. Shock current waveforms through human body in DC electricity.

그림 6은 9명의 실험자에 대한 직류감전 실험결과이다. 그림 6의 실험 결과에서 보듯이 실험자에 따라 감전 전류의 차이를 보이게 되며, 타당성을 위해 감전 전류가 중간값을 가지는 7번 실험자를 대상으로 실험을 계속 진행 하였다.

3.2 직류감전 실험결과 및 분석

그림 7은 접촉전압으로 100V_{DC}를 가하였을 때 실험자에 대한 직류감전 전류파형을 보인다. 그림 7은 직류감전 시 전체 감전구간에서의 전류 파형과, 감전초기의 전류 파형을 확대한 것이다. 감전전류는 100ms 이후로도 완만하게 증가하는 양상을 보이고 있으나, 실험자의 안전을 고려하여 100ms에서 감전 상황을 해제시켰다. 본 연구에서는 100ms까지의 감전조건에서 측정된 실험파형을 토대로 인체 임피던스의 모델링을 시도하고자 한다.

그림 7에서 감전전류 패턴은 3가지로 구성 되어 있음을 볼 수 있다. 초기에 I₁의 값으로 즉시에 형성되는 저항성 전류, 다음으로 R-L지로에 의하여 I₂의 값으로 서서히 증가하는 유도성 전류가 있다. 또한 초기 짧은 시간동안 R-C지로에 의하여 I₃크기의 펄스형태의 파형을 보이는 용량성 충전전류가 보인다.

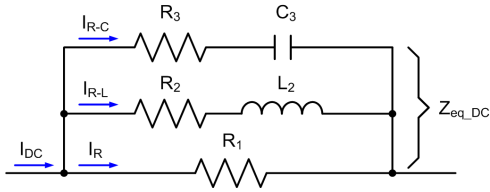


Fig. 8. Proposed equivalent circuit of human body in DC environment.

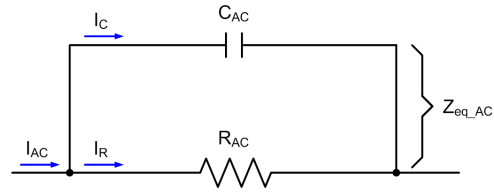


Fig. 10. Proposed equivalent circuit of human body in AC environment.

TABLE III
ESTIMATION OF HUMAN BODY IMPEDANCE IN DC ELECTRICITY

Parameter	Measure value	Parameter	Measure value
I ₁	0.33mA	R ₁	308kΩ
I ₂	0.66mA	R ₂	152kΩ
τ ₂	7ms	L ₂	1,061H
I ₃	0.19mA	R ₃	526kΩ
τ ₃	0.07ms	C ₃	133pF

TABLE IV
ESTIMATION OF HUMAN BODY IMPEDANCE IN AC ELECTRICITY

Parameter	Measure value	Parameter	Measure value
I _{AC}	0.41mA	R _{AC}	247kΩ
ΔT _{AC}	0.4ms	C _{AC}	1.63nF

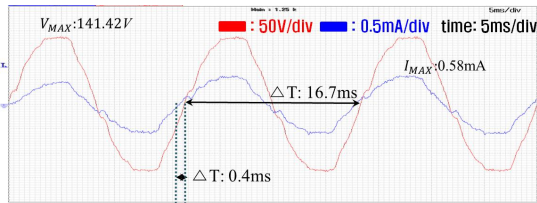


Fig. 9. Shock current waveforms through human body in AC electricity.

그림 8은 실험 결과의 추정값을 바탕으로 구성된 직류 인체감전 등가회로이다.

표 3은 그림 7의 감전전류파형을 분석하여 3개 지로의 직류 인체 등가임피던스를 추정한 값이다.

3.3 교류감전 실험결과 및 분석

그림 9는 접촉전압으로 교류 100V_{rms}를 가하였을 때 대표실험자에 대한 교류감전 전류파형을 보이며, 감전전류는 접촉전압보다 위상이 앞서므로 인체 등가임피던스는 병렬커패시턴스 성분이 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 저항성 지로와 용량성 지로의 병렬회로가 된다.

그림 10은 교류 인체 등가임피던스 추정값을 바탕으로 구성된 교류 인체감전 등가회로이다.

표 4는 그림 9의 감전전류 파형을 분석하여 교류 인체 등가임피던스를 추정한 값이다.

표 3과 표 4를 토대로 교류 해석을 적용한 인체의 직류 및 교류 감전조건에서의 인체 감전 등가회로의 임피던스는 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$Z_{eq_DC} = 217652.1356 \angle 27.5^\circ \Omega \quad (1)$$

$$Z_{eq_AC} = \frac{100 \angle 0^\circ V}{0.41 \angle 8.62^\circ mA} = 243902 \angle -8.62^\circ \Omega \quad (2)$$

이 때, 식 (1)의 결과를 토대로 그림 7의 직류 인체감전 등가회로에 교류전압을 가한다면 실험결과와는 다르게 감전전류는 접촉전압보다 위상이 뒤쳐지게 된다. 따라서 그림 8과 그림 10의 두 인체감전 등가회로의 임피던스 모델은 서로 모순되는 것을 알 수 있다.

3.4 통합 인체감전 등가회로 모델

직류와 교류에서의 인체감전 실험결과, 인체감전의 전기적 등가회로 임피던스는 서로 상반된 모습을 보였다. 인체의 등가임피던스가 교류감전과 직류감전 조건에 같아야 한다고 볼 때, 이와 같은 모순은 그림 11에 제시하는 통합 인체감전 임피던스 등가회로 모델로 설명 가능하다.

그림 11의 통합 인체감전 임피던스 등가회로 모델은 그림 8의 직류감전 등가회로에 병렬 커패시터 C_p를 추가하여 구성한다. C_p의 크기는 60Hz의 교류감전 조건에서도 통합 인체임피던스 모델의 총 임피던스에 모순이 없도록 선정한다. 즉, 식 (3)이 식 (2)와 같아지도록 C_p의 크기를 설정한다. 그림 11의 제안된 등가회로 모델에서 직류감전 시 병렬 커패시터 C_p는 상대적으로 매우 짧은 시간에 접촉전압 레벨로 충전되어 이와 병렬 연결된 다른 회로요소에 대하여 영향을 주지 않는다.

따라서 직류감전 시 통합 인체감전 임피던스 등가회로 모델의 감전전류 특성은 그림 8의 직류감전 등가회로에 대한 감전전류 특성과 같게 나타난다.

그러나, 그림 11의 제안된 등가회로에서 교류감전(V_{ac}) 시에는 식 (4)의 수식 전개 결과와 같이 병렬 커패시터 C_p와 교류전원 각주파수의 곱에 의한 서셉턴스가 등가회로의 동작에 상당한 영향을 주는 인자가 되어서 감전전류가 접촉전압보다 앞서게 되며, 그림 10과 같이 커패시터성분이 교류 감전전류(I_{ac})에 주요한 영향을 주는 것을 볼 수 있다.

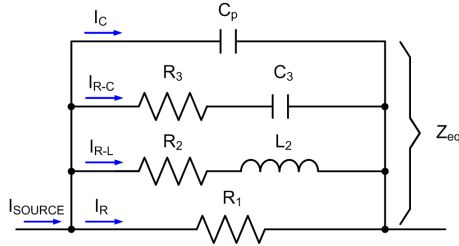


Fig. 11. Proposed unified equivalent circuit of human body in DC and AC electricity.

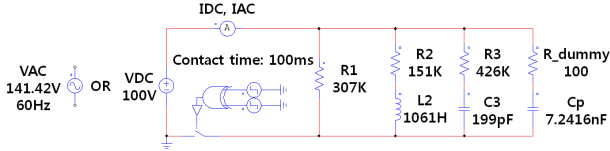


Fig. 12. Simulation scheme of an proposed unified equivalent circuit of human body in DC and AC electricity.

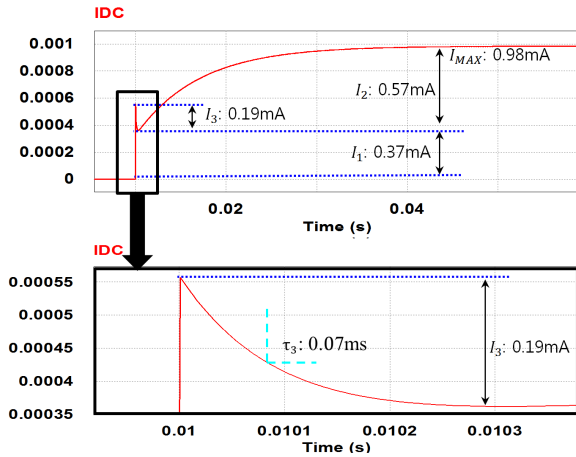


Fig. 13. Simulation shock-current waveform by an proposed unified equivalent circuit of human body in DC electricity.

$$Z_{eq} = \frac{Z_{eq_DC} \times C_p}{Z_{eq_DC} + C_p} = \frac{Z_{eq_DC} \times (-j7.24 \times 10^{-9})}{Z_{eq_DC} - j7.24 \times 10^{-9}} \quad (3)$$

$$= 242294.12 \angle -8.62^\circ$$

$$I_{ac} = \frac{V_{ac}}{Z_{eq}} = \frac{100 \angle 0^\circ V}{242294.12 \angle -8.62^\circ \Omega} = 0.41 \angle 8.62^\circ mA \quad (4)$$

4. 시뮬레이션

그림 12는 본 논문에서 제시한 통합 인체감전 등가회로 모델을 적용한 시뮬레이션 회로를 나타내며 병렬 커패시터 C_p 에 커패시터에 기생하는 직렬내부저항을 고려하여 100Ω 의 직렬저항을 추가하여 시뮬레이션을 진행 하였다.

시뮬레이션 결과 파형은 그림 13 및 그림 14에 보듯이 실험과 유사한 형태와 크기를 갖는 파형이 도출되는 것을 볼 수 있다.

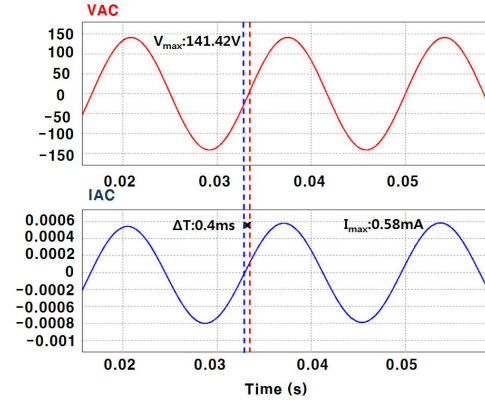


Fig. 14. Simulation current waveform by an proposed unified equivalent circuit of human body in AC electricity.

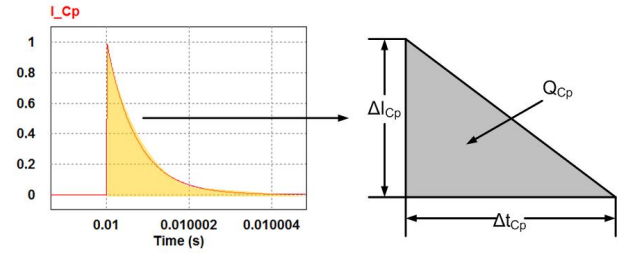


Fig. 15. Simulation capacitive inrush current (I_{Cp}) waveform by an proposed unified equivalent circuit of human body in DC electricity.

접촉전압이 직류인 경우 그림 7의 실험 파형과 같은 파형이 도출 되었고, 접촉전압이 교류인 경우 그림 9의 실험 파형과 같은 파형이 도출 되었다. 그림 15는 그림 12에서 병렬 커패시터 C_p 로 흐르는 초기 돌입전류를 확대한 파형이다. 이 때 C_p 로 흐르는 초기 돌입전류의 과도상태의 에너지는 식 (6) 및 식 (7)과 같이 전체 감전전류 파형에 비해 매우 작은 에너지이므로 무시할 수 있다.

$$\Delta I_{Cp} = \frac{100V}{100\Omega} = 1A \quad (5)$$

$$Q_{Cp} = 7.24 \times 10^{-9} F \times 100V = 0.724 \mu C \quad (6)$$

$$\Delta t_{Cp} = \frac{Q_{Cp}}{\Delta I_{Cp}} = 0.724 \mu s \quad (7)$$

따라서 제시하는 통합 인체감전 임피던스 등가회로 모델은 직류에서 인체감전 시 발생하는 유도성 전류 특성과 교류에서의 인체감전 시 발생하는 용량성 전류 특성을 모두 구현 가능한 등가회로임이 검증된다.

5. 결론

본 논문에서는 직류배전계통에서의 인체보호기술에

관련한 IEC 60479 인체감전의 생리학적인 현상에 제시되어 있는 직류에서의 인체감전 현상에 대하여 실험적으로 분석하였다. 분석 결과, 인체 임피던스는 교류 감전 조건에서 용량성 임피던스 특성을 보이지만, 직류 감전 조건에서는 유도성 임피던스 특성을 보인다.

따라서 IEC 60479에서 제시하는 임피던스 모델은 교류 감전 상황에서 적용가능 하지만 직류감전 상황에서는 유도성 임피던스 특성을 가지므로, 두 가지 특성을 모두 구현 가능한 새로운 임피던스 모델링이 이루어져야 할 근거를 제시 하였다. 또한 통합적인 모델링을 위하여 실험자의 직류와 교류 감전전류 파형에 대한 추정값을 토대로 각각의 전기적 등가회로를 분석하였고, 이를 기반으로 제시된 통합 인체감전 임피던스 등가회로 모델은 교류와 직류 조건에서 모두 적용 가능한 등가회로임을 검증하였다.

제시하는 통합 인체임피던스 모델은 DC 배전시스템의 TN 접지방식에서 인체 감전 및 설비 누전에 따른 화재 사고에 대하여 구분동작 가능한 직류용 누설전류 검출기(DC Residual Current Detector)시스템의 구축 및 구분동작 알고리즘에 기여 할 수 있다^[7].

본 논문은 산업통상자원부 기술표준원 국가표준 기술력향상사업으로 지원된 연구결과입니다 (과제 번호: 10049436).

References

- [1] IEC TR 60755 "General requirements for residual current operated protective devices," 2008.
- [2] W. K. Lee, B. H. Han, H. M. Jung, and H. S. kim, "Development of residual current detector for DC distribution system," *Korean Power Electronics Annual Conference*, pp. 53-54, July 2013.
- [3] 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, June 2013.
- [4] 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," *Korean Power Electronics Annual Conference*, pp. 76-77, Nov. 2010.
- [5] IEC 60479, "Residual current protective device dependent or independent of line voltage," 2008.
- [6] International Electrotechnical commission, "Effects of current on human beings and livestock, Part 1: General aspects," 60479-1, IEC 2005.
- [7] 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," *Korean Power Electronics Annual Conference*, pp. 64-65, Nov. 2014.



이진성(李珍成)

1990년 12월 13일생. 2015년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.



김효성(金孝城)

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