

직류환경에서 인체에 흐르는 감전전류 분석

이진성, 허용일, 김효성
공주대학교 전기전자제어공학부

Analysis on Current through Human Body in DC Environment

Jinsung Lee, Yong il Heo, Hyosung Kim
School of EE and Control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

본 논문은 직류와 교류 감전 조건에서 적용 가능한 통합 인체 임피던스 모델을 제시한다. 인체보호기술에 관련한 IEC 60479 인체 감전의 생리학적 현상에 제시되어 있는 직류에서의 인체감전 현상에 대하여 실험적으로 분석하고, 이를 기반으로 도출된 직류와 교류환경에서의 등가회로는 상반된 결과를 보였다. 따라서 직류 감전환경에 대해 좀 더 세밀한 모델링이 이루어져야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 직류와 교류에서 모두 적용 가능한 통합 인체 임피던스 모델을 제시하고 제시하는 모델의 전기적 등가회로에 대한 타당성 검증을 위해 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 서론

최근 들어 직류배전에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데, 직류배전망의 안정성에 관한 문제도 지속적으로 제기되고 있다. 직류배전망의 안전성은 두 가지 측면에서 확보가 되어야 한다.^[1] 첫째로 인체 안전성이고, 둘째로 전력설비 및 기기의 안전성이며 두 경우 모두 대지와 접지에 의하여 발생하는 누설전류에 대한 검출과 차단을 기본으로 하고 있다.^{[2][4]} 인체감전의 생리학적 현상 규정인 IEC 60479는 인체의 임피던스 모델을 제시하고 있으며 전기적 등가회로는 저항과 커패시터로 구성되어 있다.^[5] 하지만 직류의 경우 교류와는 다른 인체생리학적 특성을 가지고 있으므로 이를 위한 기초적 연구로서 인체 직류 감전특성에 대한 고찰이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 교류와 직류에서의 인체 감전특성을 실험적으로 분석하여 각각의 인체 등가회로를 수립하고, 이를 기초로 통합 임피던스 모델을 제시한다.

2. 인체의 감전실험 및 모델링

2.1 IEC 표준 인체 임피던스 모델

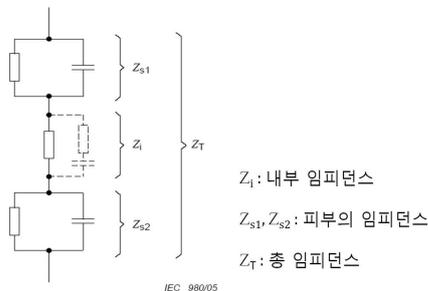


그림 1 IEC에서 제시하는 인체의 임피던스 모델

그림 1은 IEC 60479에 제시된 인체의 임피던스 모델을 나타낸다. 제시된 인체의 임피던스는 인체 내부를 둘러싼 피부의 임피던스 Z_{s1} , Z_{s2} 가 있고, 내부임피던스 Z_1 가 존재한다. 또한 이 임피던스는 통전경로, 접촉전압, 전류의 지속시간, 주파수, 피부의 습기, 접촉면적, 접촉압력 및 온도에 영향을 받으며 저항(R)과 커패시턴스(C)로 구성된 전기적 회로를 제시하고 있다.

2.2 실험 조건 및 구성

IEC 60479 인체감전의 생리학적 현상에 제시되어 있는 직류에서의 인체감전 현상에 대한 실험구성은 그림 2와 같다. 피실험자의 안전을 위하여 감전 전류는 심장을 관통하지 않도록 검지와 중지를 지나도록 하였고 감전 접촉시간은 100ms이하로 제한하였다. 도전체는 220V용 상용플러그를 사용하였으며, 이때 전압레벨은 직류 100V_{DC}, 교류 100V_{rms}로 전류가 직류기준 2mA를 넘지 않도록 실험조건을 구성하였다.

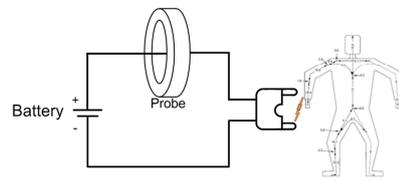
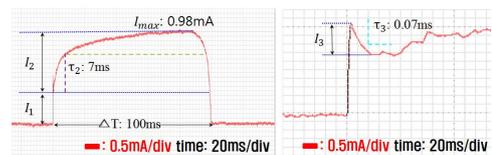


그림 2 인체감전 실험 구성

2.3 감전 실험 결과 및 분석

그림 3a)는 직류접촉전압 100V_{DC}의 경우 피 실험자에 대한 직류감전 전류파형을 나타내며 그림 3b)는 직류감전 초기과도현을 확대한 파형이다. 그림 3에서 직류 감전전류 패턴은 총 3가지로 구성되어 있음을 볼 수 있다. 초기 I_1 의 크기로 형성되는 저항성 전류, R L지도에 의해 서서히 증가하는 유도성 전류 I_2 , 초기 R C 지도에 의한 펄스형태인 I_3 크기의 용량성 충전전류로 구성되어 IEC 60479에서 제시된 인체의 임피던스 모델과는 차이를 보인다.

그림 4는 교류접촉전압 100V_{rms}의 경우 피 실험자에 대한 교류 감전 전류파형을 나타내며 감전전류는 접촉전압보다 위상이 앞서 IEC 60479에서 제시된 인체의 임피던스 모델인 병렬 커패시턴스 성분이 존재하는 것을 알 수 있다.



a) 전체 전류 파형 b) 초기 과도상태 확대파형
그림 3 피 실험자의 직류감전 실험파형 (접촉전압: 100V_{DC})

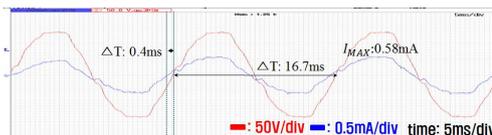
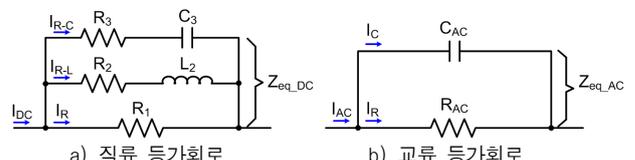


그림 4 피 실험자의 교류감전 전류파형 (접촉전압: 100V_{rms})



a) 직류 등가회로 b) 교류 등가회로
그림 5 인체 감전의 전기적 등가회로

표 1 피 실험자의 감전전류에 대한 인체 임피던스 추정

항목	측정값	항목	추정값	항목	측정값	항목	추정값
I_1	0.33mA	R_1	308k Ω	I_{AC}	0.41mA	R_{AC}	241k Ω
I_2	0.66mA	R_2	152k Ω	ΔT_{AC}	0.4ms	C_{AC}	73nF
τ_2	7ms	L_2	1061H				
I_3	0.19mA	R_3	526k Ω				
τ_3	0.07ms	C_3	133pF				

표 1은 주어진 감전전류 파형을 토대로 피 실험자의 인체 임피던스를 추정한 값을 나타내며 그림 5는 추정값을 기반으로 도출한 인체감전의 전기적 등가회로 이다. 이 때 표 1을 토대로 한 인체의 직류 및 교류 감전조건에서 전기적 등가회로의 임피던스는 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$Z_{eq_DC} = \frac{Z_{eq_12} \times Z_3}{Z_{eq_12} + Z_3} = 217652.1356 \angle 27.5^\circ \Omega \quad (1)$$

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

이 때, 그림 5a)의 직류 인체감전의 전기적 등가회로에 교류전압을 가하면 실험결과와는 다르게 감전전류는 접촉전압보다 위상이 뒤지게 된다. 따라서 그림 5의 두 인체 전기적 등가회로의 임피던스는 서로 모순되는 것을 알 수 있다.

3. 직류 및 교류 인체 등가회로 모델

3.1 통합 인체 등가회로 모델

직류와 교류에서의 인체감전 실험결과 인체감전의 전기적 등가회로 임피던스는 서로 상반된 모습을 보였다. 인체의 등가임피던스가 교류감전과 직류감전 조건에 같아야 한다고 보면 이와 같은 모순은 그림 6에 제시하는 통합 인체 임피던스 모델로 설명 가능하다. 이는 그림 5a)의 직류감전 등가회로에 병렬 커패시터(C_p)를 추가하여 60Hz의 교류감전 조건에서도 통합 인체 임피던스 모델의 총합 임피던스 식 (3)과 식 (2)가 같아지도록 함으로써 수렴된다. 직류감전 시 C_p 는 무시 가능한 수준으로 그림 5a)의 직류감전 등가회로와 같으며, 교류감전 시 식 (4)와 같이 감전전류가 접촉전압보다 앞서게 되어 그림 5b)와 같은 커패시터성분이 주를 이루는 회로가 성립된다.

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

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

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

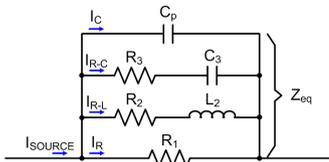


그림 6 인체감전 통합 임피던스 등가회로 모델

3.1 직류 및 교류 감전 시뮬레이션

그림 7은 본 논문에서 제시한 인체감전 통합 임피던스 등가회로 모델을 적용한 시뮬레이션 회로를 나타낸다. 그림 8 및 그림 9는 직류와 교류 조건에서 동일한 등가회로를 적용하였고, 시뮬레이션 결과 파형은 실험과 유사한 형태와 크기를 갖는 파형이 도출되는 것을 볼 수 있다. 따라서 제시한 인체감전 통합 임피던스 모델은 직류에서의 유도성 전류와 교류에서의 용량성 전류 모두 적용 가능한 등가회로임이 검증된다.

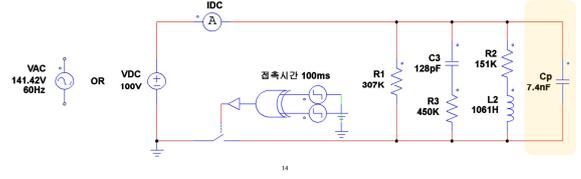


그림 7 통합 인체감전 등가회로 모델 시뮬레이션 회로

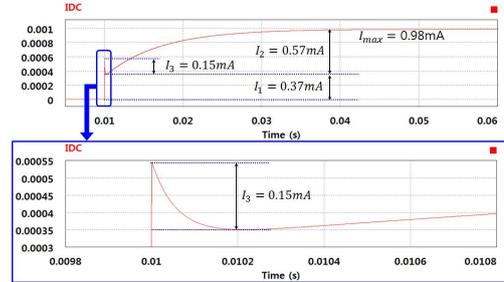


그림 8 통합 인체감전 등가회로 모델의 직류 시뮬레이션 파형

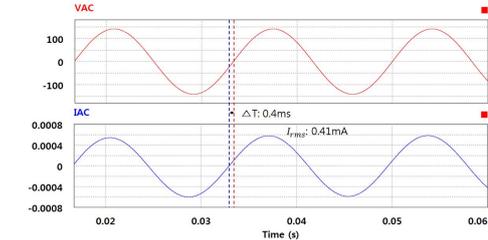


그림 9 통합 인체감전 등가회로 모델의 교류 시뮬레이션 파형

4. 결론

본 논문에서는 직류배전계통에서의 인체보호기술에 관련한 IEC 60479 인체감전의 생리학적인 현상에 제시되어 있는 직류에서의 인체감전 현상에 대하여 실험적으로 분석하였다. 분석 결과, 인체 임피던스는 교류 감전조건에서 용량성 임피던스 특성을 보이지만, 직류 감전조건에서는 유도성 임피던스 특성을 보인다. 따라서 IEC 60479에서 제시하고 임피던스 모델은 교류 감전 환경에서 적용가능 하지만 직류감전에서는 유도성 임피던스 특성을 가지므로 규정에서 제시된 임피던스 모델은 보다 세밀한 모델링이 이루어져야 할 근거를 제시 하였다. 또한 통합적인 모델링을 위하여 피 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.

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2012R1A1A2039747)

참고 문헌

- [1] IEC TR 60755 "General Requirements for Residual Current Operated Protective Devices", 2008.
- [2] 이원기, 한병훈, 정해민, 김효성, "직류용 누설전류 검출기 개발", 전력전자학회, pp. 53 54, 2013, 07.
- [3] 김동우, 임용배, 이상익, 김재현, 강대철, "누설전류로 인한 전기 화재 및 감전사고 예방기법", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2013.
- [4] 김혜진, 백종복, 서갑수, 최규식, 배현수, 조보형, "그린 스마트 홈의 직류배전용 누전 차단기에 관한 연구", 전력전자학회, 추계학술대회 논문집, pp. 76 77, 2010, 11.
- [5] IEC 60479 "Residual Current Protective Device Dependent or Independent of Line Voltage", 2008.