

인체 통전전류 위상 분석을 통한 저항성 누설전류 감시의 유효성 분석

(The Effectiveness Analysis of the Resistive Leakage Current Monitoring by Analyzing the Phase of the Body Current)

김재현* · 임용배 · 이상익 · 김동우

(Jae-Hyun Kim · Young-Bea Lim · Sang-Ick Lee · Dong-Woo Kim)

Abstract

To analyze the effectiveness of the resistive leakage current monitoring as a technology preventing electrical accidents, in this paper, we have estimated the phase of the body impedance by using the body impedance model and the body impedance data from IEC. We also have analyzed the phase of the electric body current in the case of 60Hz/220V. From these results, we concluded that deliberate researches about the phase of the electrical body current and related regulations must be carried out before the resistive leakage current monitoring unit is used to protect electric shock. And we concluded that the resistive leakage current monitoring unit can be utilized to prevent electrical fires caused by electric leakage current without unwanted circuit break due to capacitive leakage current flowing from line filter capacitors to the earth.

Key Words : Electrical Leakage, Electric Shock, Electrical Fire, Body Impedance, Phase analysis, Resistive Leakage Current, Electric Shock Protection

1. 서 론

누설전류는 전기기기 및 전선로 등에서의 절연고장 뿐만 아니라, 노이즈 필터의 커패시터와 부유 정전용량 등에 의해서도 발생할 수 있다. 이런 누설전류는

경우에 따라, 감전사고와 전기화재 등의 사고 원인이 될 수 있기 때문에 누전차단기를 설치하여 제한하고 있다.

라인필터 등에는 전원노이즈 제거를 위하여 전원과 접지 사이에 바이패스 커패시터를 설치한다. 이런 커패시터를 통하여 전원에서 접지로 용량성 전류가 흐르고 누전차단기는 이 전류를 누전으로 오인한다. 디지털 부하의 증가에 따라 전원 노이즈 제거용 커패시터의 적용이 급증하고 있어, 절연고장이 없는 상태에서도 용량성 누설전류가 크게 발생하여 원하지 않는 누전차단기 트립이 발생하기도 한다. 이런 문제점을

* 주(교신)저자 : 전기안전연구원 주임연구원
* Main(Corresponding) author : Electrical Safety
Research Institute, Junior Researcher
Tel : 031-580-3077, Fax : 031-580-3111
E-mail : azalea@kesco.or.kr
접수일자 : 2013년 6월 28일
1차심사 : 2013년 7월 18일
심사완료 : 2013년 8월 8일

해결하기 위하여 저항성 누설전류와 용량성 누설전류를 구분하여 측정 및 감시하는 방법에 대한 연구개발이 지속되고 있다[1].

이와 관련하여 본 논문에서는 인체 감전사고 방지 분야에서 저항성 누설전류 감시 기술의 활용 가능성을 확인하기 위하여, 60 Hz 380/220 V의 상용 전원에 인체가 감전되는 경우의 인체 통전전류 위상 특성과 경향을 분석한다. 분석 방법으로는 IEC 60479-5의 인체 임피던스 모델과 인체 임피던스 데이터 표로부터 피부 임피던스와 인체 임피던스 위상을 추정 계산하고, 이렇게 계산한 인체 임피던스 위상을 이용하여 인체 통전전류 위상을 계산함으로써 저항성 누설전류 감시 기술의 인체 보호에 대한 유효성을 분석한다.

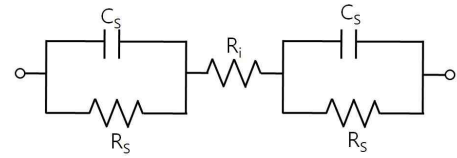
또한 누전에 의한 전기화재를 방지하기 위한 방법으로 저항성 누설전류를 분석하여 전원을 차단하는 기술의 유효성을 확인한다.

2. 인체 통전전류 위상 분석

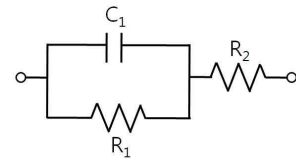
2.1 상용전원에서의 인체 임피던스

인체가 양 손을 통하여 전위차가 있는 물체에 접촉하여 통전되는 경우 인체 임피던스는 그림 1 (a)와 같이 인체 내부는 순수 저항(R_i) 성분으로, 입·출력 접촉 부위는 피부 저항(R_s)과 피부 커패시터(C_s) 병렬 구성으로 모델링할 수 있다. 인체내부에도 커패시턴스 성분이 존재하지만 작은 값이므로 일반적으로 생략하여 해석한다. 또한 피부저항과 피부커패시터의 병렬 RC회로와 인체 내부 저항 사이에는 피하조직의 저항 성분이 존재하지만 일반적으로 별도로 분리하여 고려하지 않고 인체 내부 저항에 포함하여 해석한다. 그림 1 (a)의 인체 임피던스모델이 그림 1 (b)의 모델보다는 실제 인체와 좀 더 유사한 모델이다. 그러나 계산상의 복잡성 때문에 그림 1 (b)의 모델로 단순화하여 표현하기도 한다[2-3].

그림 1 (b)의 C_1 및 R_1 값은 손-손 접촉모델(식1), 양손-양발 접촉모델(식2), 손-엉덩이 접촉모델(식2) 등과 같이 접촉모델에 의존하며, R_2 값은 인체 내부저항 값으로 접촉모델과 상관없이 항상 동일하다[2-3].



R_s : 손의 피부 저항
 C_s : 손의 피부 커패시터
 R_i : 인체 내부 저항
 (a) 5가지 성분 모델



R_1 : 입·출력 부위 저항
 C_1 : 입·출력 부위 커패시터
 R_2 : 내부 저항
 (b) 3가지 성분 모델

그림 1. 인체 임피던스 모델(IEC 60479-5)
 Fig. 1. Model of body impedance(IEC 60479-5)

$$R_i=2R_s, C_1=C_s/2, R_2=R_i \quad (식1)$$

$$R_i=R_s, C_1=C_s, R_2=R_i \quad (식1)$$

피부 커패시턴스 값 C_s 는 접촉면적에 따라 차이가 있다. 1cm^2 면적당 피부 커패시턴스의 실험적인 값은 $0.01\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 에서 $0.05\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 로 단위 접촉면적당 커패시턴스를 이용하여 계산하면, 접촉 면적이 각각 대(82cm^2), 중(12.5cm^2), 소(1cm^2)일 때, 피부 커패시턴스 C_s 값의 범위는 (식3)~(식5)와 같다[2-3].

$$\text{접촉면적 대} : 0.82\mu\text{F} \leq C_s \leq 4.1\mu\text{F} \quad (식3)$$

$$\text{접촉면적 중} : 0.125\mu\text{F} \leq C_s \leq 0.625\mu\text{F} \quad (식4)$$

$$\text{접촉면적 소} : 0.01\mu\text{F} \leq C_s \leq 0.05\mu\text{F} \quad (식5)$$

인체 임피던스의 전체 값은 접촉전압, 전원주파수, 접촉면적, 온도, 습기, 인체 통전 경로에 따라 다르다. 표 1은 IEC 60497-5의 데이터를 정리한 것으로 AC 60Hz 전원과 DC 전원 조건에서 접촉전압에 따른 인체 임피던스 값이다. 표 1의 감전조건은 손-손 감전경로, 건조상태, 그리고 접촉면적이 대($10,000\text{cm}^2$)일 경우이다[3].

표 1. 전체 인체 임피던스(손-손 접촉모델, 접촉면적 10,000cm², 건조)

Table 1. Total body impedance for a current path hand to hand, for large surface areas (10,000cm²) of contact in dry conditions

접촉 전압 V	인체 임피던스 Ω					
	5백분위		50백분위		95백분위	
	DC	60Hz	DC	60Hz	DC	60Hz
25	2100	1750	3875	3250	7275	6100
50	1600	1375	2900	2500	5325	4600
75	1275	1125	2275	2000	4100	3600
100	1100	990	1900	1725	3350	3125
125	975	900	1675	1550	2875	2675
150	875	850	1475	1400	2475	2350
175	825		1350	1325	2225	2175
200	800		1275		2050	
225	775		1225		1900	
400	700		950		1275	
500	625		850		1150	
700	575		775		1050	
1000	575		775		1050	
인체 내부저항	575		775		1050	

접촉전압이 높으면 피부조직이 파괴되어 인체 내부 저항성분만 나타나며, 접촉전압이 낮을수록 피부 임피던스가 크게 된다. 표 1로부터 접촉전압이 200V 이상인 경우 AC 60Hz 전원과 DC 전원에 대한 인체 임피던스는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 피부 커패시턴스 영향이 매우 작아지게 된다. 따라서 상용전원(220V, 60Hz)과 대지 사이에 인체가 직접 접촉되는 경우에는 인체는 거의 저항 성분으로 해석할 수 있다.

접촉전압 및 기타 조건별로 인체 임피던스 크기와 위상 데이터를 정확히 구하면 다양한 인체 통전전류에 대한 시뮬레이션이 가능하게 된다.

2.2 인체 통전전류 위상 및 피부 임피던스

인체 통전전류(I_{Body})는 접촉전압 크기 및 주파수, 전원 용량, 접촉면적, 통전전류경로, 습기, 온도 등에 따

라 다를 수 있다. 하지만 통전전류에 영향을 미치는 조건이 고정된 상태에서 접촉전압(V_{Touch})만 변하는 경우를 가정하면, 인체 통전전류는 (식6)과 같이 접촉전압을 인체 임피던스(Z_{Body})로 나누는 방식으로 계산할 수 있다.

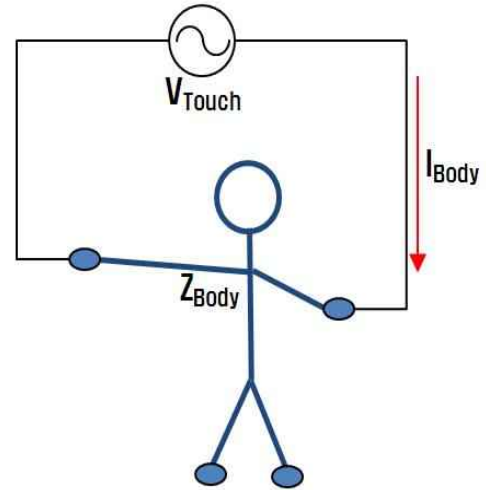


그림 2. 양손 접촉 감전
Fig. 2. Electric shock through both hands

$$I_{Body} = V_{Touch} \div Z_{Body} \tag{식6}$$

$$Z_{Body} = |Z_{Body}| \angle -\theta_{Body} \tag{식7}$$

$$I_{Body} = |I_{Body}| \angle -\theta_{Body} \tag{식8}$$

접촉전압의 위상을 기준 위상(0°)으로 정하면 (식7)과 (식8)과 같이 인체 통전전류의 위상은 인체 임피던스 위상과 크기는 같고 부호는 반대이다. 그러므로 상용전원에 직접 접촉하여 인체가 감전되는 경우의 인체 통전전류의 위상은 그 조건에서의 인체 임피던스의 위상을 구하면 알 수 있다. 저항, 인덕터, 커패시터 등의 누설 경로를 경유하여 인체가 감전되는 경우는 경유한 경로의 임피던스와 인체 임피던스를 함께 고려해야 한다. 외부 누설경로를 통하여 인체가 감전되면 경유한 인체 외부 누설경로에서 전압 강하가 발생하여 인체에 인가되는 전압은 감소한다. 따라서 인체에 작용하는 접촉전압이 낮아져서 피부 임피던스와 인체 임피던스가 증가하게 된다.

$$Z_{Body} = R_1 / (1/j\omega C_1) + R_2 \quad (식9)$$

$$R_1 / (1/j\omega C_1) = R_1 / (1 + j\omega R_1 C_1) \quad (식10)$$

그림 1 (b)에서 인체 임피던스는 (식9)와 같고, 피부 임피던스는 (식10)과 같다. (식10)에서 “/” 기호는 두 개의 임피던스 성분이 병렬로 구성될 때 전체 합성 임피던스 계산 기호로 두 개의 임피던스 값을 각각 A와 B라고 하면 병렬 구성의 전체 임피던스는 $A/B = (A \times B) / (A + B)$ 이다. 그림 3은 그림 1 (b)에 대한 인체 임피던스의 벡터도이다. 그림 3을 보면 R_2 가 양의 값을 갖기 때문에 인체 임피던스 위상의 절대값은 피부 임피던스 위상의 절대값보다 작다. 인체 내부 저항이 피부 임피던스보다 현저히 클 경우에는 인체 임피던스의 위상은 0에 가깝고, 반대로 피부 임피던스가 인체 내부 저항보다 현저히 클 경우 인체 임피던스의 위상은 피부 임피던스 위상에 근접하게 된다.

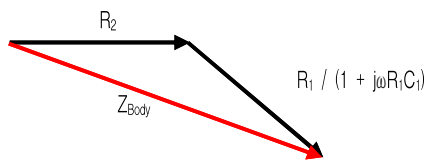


그림 3. 인체 임피던스 벡터도
Fig. 3. Vector Diagram of body impedance

(식10)의 피부 임피던스를 살펴보면 피부 임피던스의 위상이 $j\omega R_1 C_1$ 항에 의존함을 알 수 있다. 접촉 면적이 증가하면 피부 커패시턴스가 비례하여 증가하고, 피부 저항은 반비례하여 감소하기 때문에 주파수가 일정할 경우, 피부저항과 피부커패시턴스의 곱은 접촉 면적에 대하여 상수라고 볼 수 있으므로, 기타 조건이 같다면 접촉면적과 피부 임피던스의 위상은 독립적이다. 다만, 피부 임피던스 위상은 개인 특성 및 기타 감전 조건에 의존한다.

피부 임피던스 영향이 크게 나타나는 낮은 전압 레벨에서 Plutchik의 주파수별 측정 결과에 따르면 피부 임피던스는 주파수가 1에서 1,000Hz로 변함에 따라 크기가 약 130kΩ에서 30kΩ으로 감소하고, 위상은 -2°에

서 -58°로 변하게 된다[5].

또한 Stephen의 측정 결과에서는 주파수가 1,000Hz 이상으로 계속 높아지면 피부 임피던스 크기는 계속 줄어들면서 그림 1의 인체 임피던스 모델에서 인체 내부 저항에 더해지는 방식으로 생략된 피하조직 저항 성분인 약 1kΩ 전후 값으로 수렴한다. 위상의 경우는 주파수가 증가함에 따라 약 -60°~-80°까지 줄어들다가 다시 커져 0°로 수렴한다. 그리고 피부 임피던스 위상이 -45°가 되는 주파수는 양 볼에 2cm² 크기의 전극을 부착하여 4명의 인원을 측정한 결과 각각 42Hz(남, 20세), 48Hz(남, 23세), 67Hz(남, 23세), 233Hz(여, 4세)였다[4].

2.3 상용주파수 조건에서 인체 임피던스 위상 추정

상용주파수에서 인체 임피던스의 정확한 위상은 정밀 측정과 통계적 분석을 통하여 구하여야 한다. 하지만 본 논문에서는 표 1과 그림 1 (b)의 인체 모델로부터 인체 임피던스 위상의 대표값을 추정하였다.

그림 1 (b)의 인체 임피던스 모델에 DC 전압이 인가되면 피부 커패시터는 개방 회로로 볼 수 있다. 따라서 표 1의 접촉전압별 DC 인체 임피던스 값에서 인체 내부 저항을 뺀 값을 피부 저항 값으로 볼 수 있다. 표 1의 접촉전압별 50백분위 DC 임피던스 값에서 50백분위 인체 내부저항을 차감하여 계산한 피부저항 추정 대표값은 표 2와 같다.

상용주파수에서의 피부 커패시턴스는 표1과 표2의 데이터와 (식9)를 만족하는 값을 구하여 추정할 수 있다. (식9)에서 Z_{Body} 의 크기($|Z_{Body}|$) 값으로 표 1의 각 접촉전압별 60Hz 전원에 대한 50백분위 인체 임피던스 값을 사용하고, R_1 과 R_2 에 각각 표 2의 접촉전압별 피부 저항과 표 1의 50백분위 인체 내부저항을 대입한 후 (식9)를 만족하는 피부 리액턴스 값 ($1/j\omega C_1$)을 반복법으로 계산하여 구하면 표 3과 같다. 표 1에서 200V 이상인 경우 피부 커패시턴스의 영향이 거의 없어지므로 175V 이하에서만 계산하였다.

표 2. 피부 저항 추정(손-손 접촉모델, 접촉면적 10,000cm², 건조)

Table 2. Skin resistance estimation for a current path hand to hand, for large surface areas(10,000cm²) of contact in dry conditions

접촉전압 V	피부 저항 추정치 Ω
25	3100
50	2125
75	1500
100	1125
125	900
150	700
175	575
200	500
225	450
400	175
500	75
700	0
1000	0

표 3. 피부 커패시턴스 추정(손-손 접촉모델, 접촉면적 10,000cm², 건조)

Table 3. Skin capacitance estimation for a current path hand to hand, for large surface areas(10,000cm²) of contact in dry conditions

접촉전압 V	피부 커패시턴스 추정치 [Ω]
25	-4636.60
50	-3436.63
75	-2550.68
100	-2176.76
125	-1902.77
150	-1757.59
175	-2389.61

표 2와 표 3의 값은 피부 저항과 피부 리액턴스의 50 백분위 값을 의미하는 것이 아니라, 피부 임피던스를 대략적으로 추정하여 인체 임피던스의 특성과 경향을 확인하기 위한 것이다.

표 4. 인체 임피던스 위상 추정(손-손 접촉모델, 접촉면적 10,000cm², 건조)

Table 4. Body impedance phase estimation for a current path hand to hand, for large surface areas(10,000cm²) of contact in dry conditions

접촉전압 V	인체 임피던스 위상 °
25	-27.79
50	-24.23
75	-21.20
100	-17.42
125	-14.87
150	-11.53
175	-6.67

표 2와 표 3의 값을 (식9)에 대입하여 인체 임피던스 위상을 계산하면 표 4와 같다. 표 4로부터 인체 임피던스 위상의 절대값은 접촉전압이 175V에서 25V로 낮아지면 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

표 5. 인체 임피던스 크기와 위상 추정값(손-손 접촉모델, 접촉면적 10,000cm², 건조)

Table 5. Body impedance magnitude and estimation of phase for a current path hand to hand, for large surface areas (10,000cm²) of contact in dry conditions

접촉전압 V	인체 임피던스	
	크기 Ω	위상 °
25	3250	-27.79
50	2500	-24.23
75	2000	-21.20
100	1725	-17.42
125	1550	-14.87
150	1400	-11.53
175	1325	-6.67

표 1의 인체 임피던스 50백분위 값과 표 4의 인체 임피던스 위상 추정치를 이용하여 인체 임피던스를 정리하면 표 5와 같다. 표 5의 값으로 95% 신뢰수준의 회귀분석을 실시하면 (식11)과 같은 인체 임피던스 위상과 접촉전압과의 관계식을 얻을 수 있다. 표 6에서

표 5의 인체 임피던스 위상 추정치와 (식11)에 의해 계산된 인체임피던스의 위상을 비교하였다.

$$\Theta_{Body} = 0.13586 \times V_{Touch} - 31.25898 \quad (\text{식11})$$

표 6. (식11)에 의해 계산된 인체 임피던스 위상
Table 6. Body impedance phase calculated using Equation 11

접촉전압 V	추정 인체 임피던스 위상 °	(식11)에 의한 계산값 °
25	-27.79	-27.86
50	-24.23	-24.47
75	-21.20	-21.07
100	-17.42	-17.67
125	-14.87	-14.28
150	-11.53	-10.88
175	-6.67	-7.48

(식11)을 구하는 회귀분석에서 결정계수가 0.99512 이므로 회귀식이 임피던스 위상 추정치와 접촉전압과의 관계를 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다. 또한 Y절편과 기울기계수의 P-값이 각각 1.535×10^{-8} 과 5.656×10^{-7} 으로 0.05 이하이므로 구해진 Y절편과 기울기계수는 유의한 값이다.

표 5에서 접촉전압과 인체 임피던스 크기 사이의 관계를 직관적으로 살펴보면 (식12)와 같은 관계를 유추해볼 수 있다.

$$|Z_{Body}| = a \times V_{Touch}^{-a} + b \quad (\text{식12})$$

(식12)에서 접촉전압의 승수인 a를 0.01에서 0.01 단위로 증가시키면서 V_{Touch}^{-a} 에 대한 인체 임피던스 크기를 회귀분석하여 결정계수가 가장 큰 a를 구하면 0.27이 된다. a가 0.27로 가정하면 (식13)과 같은 인체 임피던스 크기와 접촉전압과의 관계식을 구할 수 있다.

$$|Z_{Body}| = 11530.36841 \times V_{Touch}^{-0.27} - 1569.25484 \quad (\text{식13})$$

표 7. (식13)에 의해 계산된 인체 임피던스 크기
Table 7. Body impedance magnitude calculated using Equation 13

접촉전압 V	접촉전압 ^{-0.27}	인체 임피던스 크기 Ω	(식13)에 의한 계산값 Ω
25	0.41933	3250	3265.78
50	0.34776	2500	2440.53
75	0.31170	2000	2024.73
100	0.28840	1725	1756.14
125	0.27154	1550	1561.70
150	0.25850	1400	1411.31
175	0.24796	1325	1289.80

표 7은 (식13)에 의해 계산된 인체 임피던스 크기를 정리하였다. 이 회귀분석에서 결정계수가 0.99763이어서 (식13)의 회귀식이 임피던스 크기와 접촉전압과의 관계를 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다. 또한 Y절편과 기울기계수의 P-값이 각각 5.7192×10^{-6} 과 9.3054×10^{-8} 으로 0.05 이하이기 때문에 구해진 Y절편과 기울기계수는 유의한 값이다.

(식11)과 (식13)을 이용하면 접촉전압이 25V와 175V 사이일 때 인체 임피던스 크기와 위상 값을 추정하고 경향성을 확인할 수 있다. 이를 통하여 175V 이하에서 인체 통전전류의 크기와 위상을 추정할 수 있다. 정확한 관계식과 데이터는 정확한 측정과 분석을 통하여 획득하여야 한다.

2.4 상용전원 조건에서 인체 통전전류 위상 추정

IEC(1990)에서는 인체 반응전류(reaction current) 및 이탈전류(let-go current) 등을 테스트하기 위해 그림 1 (b)의 세 성분 값을 각각 $C_1=0.22\mu F$, $R_1=1500\Omega$, $R_2=500\Omega$ 으로 설정하고 있다[3]. 이 설정 값으로 상용 주파수 60Hz에서의 인체 임피던스를 계산하면 크기는 $1,986\Omega$ 이고 위상은 -5.31° 이다.

위의 조건에서는 220V 상용전원과 대지 사이에 인체가 직접 접촉할 경우 인체 통전전류는 $110.79mA$ 이고,

위상은 5.31°이다. 저항성 인체 통전전류는 110.32mA이고, 용량성 인체 통전전류는 10.25mA로 저항성 성분이 전체 통전전류의 대부분을 차지한다. 인체 통전 조건, 개인별 인체 특성 등에 따라 감전전류 크기와 위상은 차이가 날 수 있지만 인체가 상용전원과 대지 사이에 직접 접촉될 경우 인체 통전전류는 대부분 저항성 전류이다.

인체가 상용전원에 직접 접촉하여 감전될 수도 있지만, 전기기구나 기타 사물 등을 통하여 감전될 수도 있다. 이렇게 상용전원과 인체사이에 존재하는 누설 경로를 통하여 인체가 통전되면 전원 전체가 인체에 인가되지 않고 누설경로에서 전압강하가 발생하여 인체 접촉전압은 낮아지게 된다. 따라서 피부 임피던스와 전체 인체 임피던스도 함께 증가하여 인체 통전전류는 작아지게 된다.

저항성 누설경로(R_{lp})에 의해 인체가 통전되면 전체 통전경로를 그림 4와 같이 누설경로 저항과 인체 임피던스의 직렬 구성으로 모델링할 수 있다. 이 경우 인체 임피던스 위상 절대값은 접촉전압이 낮아져서 직접 접촉시의 위상보다 증가한다. 전체 통전경로의 임피던스 위상 절대값은 누설경로가 저항 성분이기 때문에 증가한 인체 임피던스 위상 절대값보다는 작다.

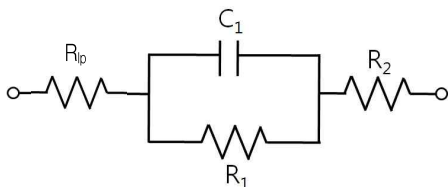


그림 4. 저항성 누설경로를 통한 통전 임피던스 모델
Fig. 4. The model of the total impedance passing through a resistive leakage path & a body

상용전원에 저항성 누설경로를 통하여 인체가 통전될 때 인체에 인가되는 접촉전압은 (식14)와 (식15)의 관계를 가진다.

$$V_{Touch} = 220 \times |Z_{Body}| \div |Z_{TotalPath}| \quad (식14)$$

$$Z_{TotalPath} = Z_{Body} + R_{lp} \quad (식15)$$

표 8. 저항성 누설경로를 통한 통전전류
Table 8. Body current passing through a resistive leakage path and a body

접촉 전압 V	인체 임피던스		저항성 누설경로 저항성분 Ω	인체 통전전류	
	크기 Ω	위상 °		크기 mA	위상 °
25	3265.78	-27.86	25811.10	7.66	3.04
50	2440.53	-24.47	8469.28	20.49	5.40
75	2024.73	-21.07	4005.08	37.04	7.04
100	1756.14	-17.67	2153.29	56.94	7.93
125	1561.70	-14.28	1208.01	80.04	8.05
150	1411.31	-10.88	666.77	106.28	7.39
175	1289.80	-7.48	333.92	135.68	5.95

각 접촉전압별 인체 임피던스를 (식11)과 (식13)으로부터 계산하고, 그림 4와 같은 조건에서 인체에 작용하는 접촉전압을 만족하는 누설경로의 저항 성분을 반복법으로 구한 후, 그 때의 인체 통전전류의 크기와 위상을 계산하면 표 8과 같다. 표 8에서 보는바와 같이 저항성 누설경로의 저항성분이 증가함에 따라 통전전류의 위상은 증가하다가 다시 감소함을 알 수 있다. 통전전류 위상 최대값을 추정하기 위하여 누설 경로의 저항을 변화시키면서 인체 통전전류의 위상을 반복 계산하면 최대값은 8.1°이다. 이 최대값은 인체 특성 및 감전 조건에 따라 변할 수 있다.

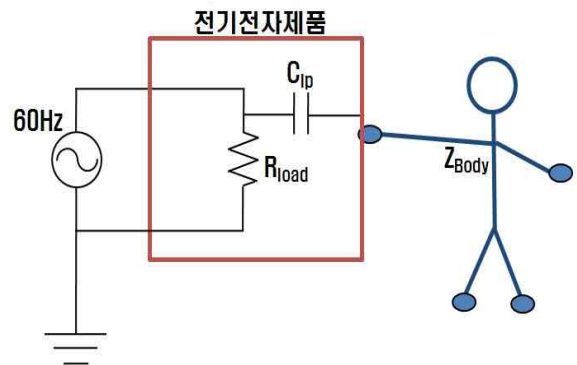


그림 5. 용량성 누설경로를 통한 감전
Fig. 5. Electrical shock through a capacitive leakage path

그림 5와 같이 용량성 누설경로(C_{lp})를 통하여 인체가 상용전원과 대지 사이에 통전되는 경우 용량성 누설경로의 리액턴스를 고려하여 통전전류를 계산하여야 한다. 이 경우의 통전경로의 전체 임피던스는 (식 16)과 같다.

$$Z_{TotalPath} = Z_{Body} + 1/j\omega C_{lp} \quad (식16)$$

표 9. 용량성 누설경로를 통한 통전전류
Table 9. Body current passing through a capacitive leakage path

접촉 전압 V	인체 임피던스		용량성 누설경로 리액턴스 Ω	통전전류	
	크기 Ω	위상 °		크기 mA	위상 °
25	3265.78	-27.86	-27067.18	7.66	84.23
50	2440.53	-24.47	-9495.31	20.49	78.06
75	2024.73	-21.07	-4902.79	37.04	71.45
100	1756.14	-17.67	-2949.23	56.94	64.34
125	1561.70	-14.28	-1909.27	80.04	56.59
150	1411.31	-10.88	-1270.85	106.29	47.96
175	1289.80	-7.48	-828.90	135.68	37.94

표 9는 표 8과 같은 방식으로 용량성 누설경로 리액턴스에 따른 인체 통전전류를 계산한 것이다. (식14)와 (식16)을 만족하는 용량성 누설경로의 리액턴스를 각 접촉전압별로 구하고 통전전류를 계산하였다. 표 9로부터 용량성 누설경로를 통하여 인체가 통전될 경우 누설경로의 리액턴스가 크면 통전전류의 위상도 크고, 작으면 통전전류의 위상도 작다. 즉 누설 경로 커패시터가 작으면 감전전류의 위상이 높고, 누설 경로 커패시터가 크면 감전전류의 위상은 작아진다. 만약 누설경로 커패시터 값이 매우 커지면 폐회로의 역할을 하기 때문에 상용전원에 직접 접촉한 결과에 수렴하게 된다. 이와 같이 용량성 누설경로를 통한 인체 통전전류 위상은 상용전원에 직접 접촉시의 통전전류 위상 값보다 크고, 누설경로 커패시터가 아주 작을 경우 거의 90°의 위상을 갖는다.

(식14), (식16)을 이용하여 용량성 누설경로를 통한 통전전류가 30mA가 되는 누설 커패시터 값을 반복법

으로 구하면 약 426nF이고, 감전전류 위상은 74.15°이다. 이 경우 저항성 통전전류는 8.19mA이고, 용량성 통전전류는 28.86mA이다. 1mm 간격의 두 금속판에 공기를 주입하여 커패시터를 만든다고 가정하면 426nF의 커패시터를 제작하기 위해서는 유효 면적이 약 48.11m²이어야 하므로, 부유 커패시터를 통한 통전전류의 크기가 심실 세동의 위험이 있는 30mA 이상이 되는 경우는 거의 없다고 볼 수 있다. 현실에서는 발생 가능성이 아주 낮지만 보통 10μF 이상인 저압 역을 보상 커패시터 등의 개별 소자를 통하여 인체가 통전되면 인체 접촉전압은 175V 이상이 될 수 있어서 매우 위험하다.

이와 같이 상용전원과 대지 사이에 인체가 직접 통전되는 경우와 저항성 누설경로를 통하여 통전되는 경우는 감전전류의 위상이 작지만, 용량성 누설경로를 통하여 통전되는 경우는 인체 통전전류의 위상이 90°에 가까운 값을 가질 수 있음을 확인하였다. 또한 현실적으로 발생 가능성은 낮지만 크기가 30mA 이상이고 용량성 성분이 우세한 인체 통전전류가 발생 가능성을 확인하였다. 따라서 저항성 누설전류를 분석하여 전원을 차단하는 방식의 인체 감전 보호 방식은 정확한 인체 임피던스 위상과 인체 통전전류 위상에 대한 연구와 커패시터 혹은 인덕터 경유에 의한 감전방지 규정에 대한 연구를 실시한 후 검토가 가능하다.

3. 저항성 누설전류 감지 기술을 활용한 전기화재 예방

누전에 의한 화재는 300mA이상의 누설전류가 발생하였을 경우 화재 발생 위험성이 높으므로 IEC 60364 및 BS 7671 기준에서는 누설전류에 의한 화재를 예방하기 위하여 정격감도 전류 300mA이하의 누전차단기 사용을 권고하고 있다[6-7]. 누전화재는 누전전류가 집중되는 개소에서 줄열로 의해 발화하고, 이런 발화점(출화점)에서는 흑연화되어 있는 경우가 많다[8]. 줄열은 커패시턴스 성분에 의해서는 발생하지 않으므로 저항성 누설전류만을 분석하여 차단하는 방식이 더 효율적일 수 있다. SMPS의 라인필터 등에 많이 설치되어 있는 바이패스 커패시터는 고주파 전원노이즈를

접지로 흐르게 하고, 이 전류는 누전차단기의 입장에 서는 누설전류로 감지한다. 디지털기기 사용의 증가로 필터용 커패시터에 의해 누전되는 용량성 누설전류가 증가하고 있다. 예를 들면 PC방의 경우 다수의 PC Power Supply에 내장되어 있는 전원노이즈 제거용 커패시터에 의해 접지측으로 용량성 노이즈 전류가 다량 발생하여 누전차단기가 차단되는 경우가 있다. 현장에서는 이런 문제를 해결하기 위하여 하나의 차단기에 연결되는 PC 수를 제한하여 해결하고 있다. 이런 용량성 누설전류는 줄열을 발생하지 않아 전기화재의 가능성이 적지만 원하지 않는 누전차단기 트립을 발생시키기도 한다. 이런 원하지 않는 전원 차단을 방지하는 방법으로 저항성 누설전류에 의한 차단 방식을 적용하면 효율적일 수 있다. 즉 줄열이 발생하는 저항성 누설전류만을 차단하는 방식이 기존 누전차단기의 용량성 누설전류에 의한 차단을 방지하면서 누전에 의한 전기화재를 예방할 수 있는 대안이 될 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 상용전원 조건에서 인체 임피던스 모델에 의한 인체 임피던스 위상과 인체 통전전류의 위상을 분석하였다. 또한 전원 노이즈 필터용 커패시터 등에 흐르는 의한 용량성 누설전류에 의한 불필요한 차단을 방지하면서 누전에 의한 전기화재를 방지하는 방법으로 저항성 누설전류를 분석하여 차단 방식이 효율적일 수 있음을 확인하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- (1) IEC 60479-5의 그림 1 (b)와 같은 인체 임피던스 모델과 표 1로부터 피부 임피던스와 인체 임피던스 대표값을 추정하였다.
- (2) 추정된 인체 임피던스 위상 절대값은 접촉전압이 낮을수록 크다.
- (3) 추정된 인체 임피던스로부터 접촉전압에 대한 인체 임피던스 위상과 크기를 추정할 수 있는 계산식을 구하였다.
- (4) 상용전원과 대지사이에 인체가 직접 접촉시 인체 통전전류는 저항성 누설전류가 대부분이다.

- (5) 접촉전압에 대한 임피던스 계산식을 이용하여 계산해보면, 저항성 누설경로를 경유하여 인체가 통전되는 경우 누설경로 저항 성분이 증가할 때 인체 통전전류의 위상은 증가하다가 다시 감소한다.
- (6) 또한 용량성 누설경로를 경유하여 인체가 상용전원에 통전되는 경우에는 인체 통전전류의 위상은 상용전원에 직접 접촉시의 통전전류 위상 값에서부터 90° 사이의 값을 가질 수 있다.
- (7) 전기설비의 부유커패시턴스는 일반적으로 426nF보다 매우 작기 때문에 심실 세동의 위험이 있는 30mA 이상의 인체 통전전류가 부유 커패시터를 경유하여 인체에 흐르는 것은 가능성이 매우 낮다.
- (8) 역울 보상 커패시터 등의 개별 소자를 경유하여 통전되는 경우는 인체에 위험한 용량성 통전전류가 흐를 수 있다.
- (9) 따라서 저항성 누설전류 분석에 의한 인체 감전 방지 기술을 현장에 적용하기 위해서는 정확한 인체 통전전류 위상과 커패시터(또는 인덕터)를 경유한 인체 통전 방지 규정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.
- (10) 용량성 누설전류는 줄열이 발생하지 않으므로 누전에 의한 전기화재 예방 방법으로서 저항성 누설전류를 분석하여 전원을 차단하는 방식이 용량성 누설전류에 의한 전원 차단을 방지할 수 있으므로 기존 누전차단기의 방식보다 효율적일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2011T100100119)

References

- [1] Nam-Kyu Joo and et al., "A Development of Resistive Leakage Current detecting circuit with Voltage Phase Comparison", Proceedings of KIEE Spring Annual

- Conference, pp172-173, 2009.
- [2] IEC/TR, "IEC 60479-5", pp30-52, 2007.
 - [3] Reilly, "Electrical stimulation and electropathology", Cambridge university press, pp27, pp447-pp456, 1992.
 - [4] Stephen Neil Sajiderson, "Automated system design for skin impedance", Texas Tech University, pp.52-53, 1976.
 - [5] Plutchik R, "Skin impedance and phase angle as a fuction of frequency and current", Science, 1963.Sep.6.
 - [6] BS, "BS 7671", pp59, pp68, 2008.
 - [7] The Korea Electric Association, "Electrical installation guide Acoording to IEC", pp193-195, pp216, pp237, 2008.
 - [8] C.S. Choi and et al., "Electrical Fire Engineering", Dong Hwa Technology, pp247~254, 2000.

◇ 저자소개 ◇



김재현(金宰賢)

1973년 2월 21일생. 1999년 2월 경북대 전자전기공학부 졸업. 2001년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년 ~2005년 LG.Philips LCD 주임연구원. 2006년~현재 한국전기안전공사 전기 안전연구원 주임연구원.

Tel : (031)580-3077
E-mail : azalea@kesco.or.kr



임용배(林庸培)

1967년 11월 16일생. 1994년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업. 1998년 8월 홍익대학교 전기제어공학과 졸업(석사). 2007년 2월 홍익대학교 전기정보제어공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.

Tel : (031)580-3056
E-mail : tree@kesco.or.kr



이상익(李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 건국대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : (031)580-3053
E-mail : sangickl@kesco.or.kr



김동우(金東佑)

1972년 3월 20일생. 1996년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : (031)580-3036
E-mail : superbwoo@gmail.com