

20kHz 전력설비에서의 인체감전 보호를 위한 누설전류 기준 연구

한운기<전기안전연구원 책임연구원> · 정진수<전기안전연구원 선임연구원>

1. 서론

현재까지 국내·외 전력설비는 대부분이 50/60 Hz로 운영되어 왔다. 그러나 무선충전 전기자동차 시스템의 경우 20kHz로 운영되는 특징을 가지고 있다. 그러나 국내·외에서 20kHz 전력설비에 대한 전기안전과 관련된 연구가 진행되지 않아 실제 산업에 본 전력설비가 시공되어 운영될 경우 큰 혼란이 발생될 우려가 있다. 한 예로 인체감전의 경우 전원의 주파수가 증가함에 따라 인체의 임피던스는 감소를 하고 도체의 임피던스는 증가를 하는 특징을 가지고 있다. 그러나 접촉전압의 경우 주파수가 증가함에 따라 감소를 하며 일정 주파수 이상이 되면 다시 증가를 하는 현상을 나타내게 된다. 이와 같이 전기안전 측면에서 아직까지 해석이 이루어지지 않아 아무런 검증 없이 실제 현장에 60Hz에 대한 해석부분을 20kHz에 바로 적용하게 되면 설비사고 및 감전위험이 상존하게 된다.

국내 저압용 전기설비의 경우 각국의 기술기준을 국제규격에 부합시켜야 한다는 WTO/TBT협정(1995년)에 따라 국내의 저압용 전기설비(공칭전압 AC 1,000V, DC 1,500V이하)에 IEC 60364가 적용가능하다고 고시되었다(2005년 12월). 이에 따라 현

행 국내 전기설비 분야는 국내기준과 IEC(International Electrotechnical Commission : 국제전기표준회의) 기준의 선택적 적용이 가능하게 되었다.

이러한 국제적 추세와 분석결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 본 장에서는 인체감전과 관련된 IEC 규정을 검토하여 이를 기반으로 20kHz에서의 인체감전 특성과 보호기준을 제시하려 한다.

2. 본론

2.1 인체 임피던스 관련 용어

본 절에서는 인체감전과 관련하여 IEC 기준을 기반으로 인체임피던스와 관련된 용어 및 사고 발생 시 주위환경 등에 대한 전반적인 용어를 정의하였다.

2.1.1 인체 내부임피던스

인체 내부임피던스(internal impedance of the human body)는 Z_i 라 표기를 하여 피부임피던스를 제외한 인체의 두 부분에 접촉한 두 개의 전극 사이의 임피던스를 의미한다.

인체의 내부임피던스는 대부분 저항성으로 고려할 수 있다. 그 값은 주로 전류의 경로 및 접촉면적에 따

라 다르다(접촉면적에 의한 영향은 전류경로에 의한 영향보다는 작다).

2.1.2 피부임피던스

피부임피던스(impedance of the skin)는 Z_s 라 표현하며 피부에 접촉한 전극과 피부 하부의 도전성 섬유질 사이의 임피던스를 의미한다.

피부임피던스는 저항과 커패시터의 회로망으로 생각할 수 있다. 그것의 구조는 반 절연층과 세공의 작은 도전성 요소(구멍들)로 구성되어 있다. 피부임피던스는 전류가 증가하면 낮아진다. 전류가 흐른 표시가 때때로 관찰된다.

피부임피던스 값은 전압, 주파수, 통전시간, 접촉면적, 접촉압력, 피부 습기 정도, 온도 및 피부의 유형에 따라 다르다.

낮은 접촉전압에서의 피부임피던스 값은 심지어 한 사람에게서도 접촉면적과 상태(건조, 젖은 상태, 발한), 온도, 빠른 호흡 등에 따라 폭넓게 변한다. 높은 접촉전압에서의 피부임피던스는 상당히 감소하며, 피부조직이 과열될 때에는 무시할 정도로 된다.

주파수 영향에 관해서는 주파수가 증가할 때 피부 임피던스는 감소한다.

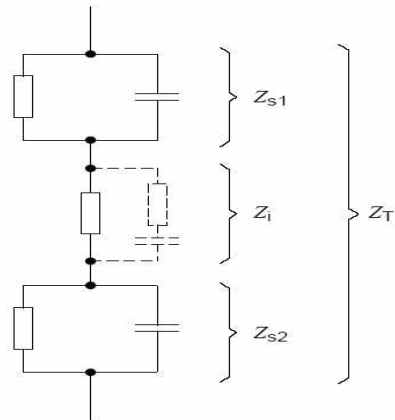
2.1.3 인체 총 임피던스

인체 총임피던스(total impedance of the human body)는 Z_T 라 표기하며 내부임피던스와 피부임피던스의 벡터 합으로 한다.

낮은 접촉전압에서의 피부임피던스(Z_s)의 변화는 상당히 크며 인체 총임피던스(Z_T)는 폭 넓게 변한다. 높은 접촉전압에서의 인체 총임피던스는 피부임피던스에 의한 영향이 매우 작고, 그 값은 내부임피던스 값에 근접한다.

주파수의 영향과 관련하여 피부임피던스의 주파수 영향을 고려하면 인체의 총임피던스는 직류에서는 높

아지고 주파수가 증가하면 감소한다.



Z_i	인체 내부임피던스
Z_{s1}, Z_{s2}	피부임피던스
Z_T	인체 총임피던스

그림 1. 인체의 임피던스

2.1.4 인체 초기저항

인체 초기저항(initial resistance of the human body)은 R_0 라 표현하며 접촉전압이 발생하는 순간의 침투 전류치를 제한하는 저항을 의미한다.

접촉전압이 발생한 순간 인체의 커패시턴스는 충전되어 있지 않으므로 피부임피던스 Z_{s1} 과 Z_{s2} 는 무시되고 초기저항 R_0 는 거의 인체 내부임피던스 Z_i 와 같다. 초기 저항 R_0 는 주로 전류경로에 따라 다르고 정도는 덜하나 접촉표면적에 따라 달라진다.

초기 저항 값 R_0 는 단시간 충격과(예를 들면 전기 울타리 제어장치로부터의 전기충격) 전류 침투치를 제한한다.

2.1.5 인체의 전기 임피던스

인체의 전기 임피던스(Electrical impedance of the human body) 값은 여러 요소 특히 전류의 경로, 접촉전압, 통전시간, 주파수, 피부의 습기의 정도, 접

촉면적, 가해진 압력 및 온도 등에 따라 달라진다.

2.2 인체 임피던스 환경 조건에 대한 용어

본 절에서는 인체감전과 관련하여 IEC 기준에서 분류하고 있는 환경조건에 대하여 정리를 하였다.

2.2.1 건조 상태

건조 상태(dry condition)는 보통의 실내 환경조건에서 휴식 중인 인체의 습기와 접촉된 부위의 피부 표면 상태를 의미한다.

2.2.2 물에 젖은 상태

물에 젖은 상태(water-wet condition)는 공공용수(평균저항 $\rho=3,500\Omega\text{cm}$, $\text{pH}=7\sim 9$)에 1분 동안 노출된 상태의 피부표면 상태를 의미한다.

2.2.3 염수에 젖은 상태

염수에 젖은 상태(saltwater-wet condition)는 3%의 염수(평균저항 $\rho=30\Omega\text{cm}$, $\text{pH}=7\sim 9$)에 1분 동안 노출된 상태의 피부표면 상태를 의미한다.

염수에 젖은 상태는 땀이 난 사람의 피부조건이나 바닷물에 잠긴 후의 사람을 모의한 것으로 가정하였으며, 추가적인 조사가 필요하다.

2.3 인체 임피던스 관련 용어[1-2]

2.3.1 접촉전류 전기 탄화 효과

모든 경우에 대해 전기 탄화를 방지할 접촉 전류 한계값을 수용하지 않는다. 접촉 주기와 인체 접촉 영역과 같은 그 밖의 파라미터가 해당된다. 전기탄화는 고주파 또는 직류에서 발생된다.

약 $300\sim 400\text{mA}(\text{rms}/\text{cm}^2)$ 의 전류 밀도에서 표피 탄화 발생이 시작된다.

표 1. 건조 상태 손-손 전류경로, 50/60Hz 교류 인체 총임피던스

접촉전압 V	인체 총임피던스 $Z_T(\Omega)$ 의 값(최대 값)		
	5%의 인구	50%의 인구	95%의 인구
25	1,750	3,250	6,100
50	1,375	2,500	4,600
75	1,125	2,000	3,600
100	990	1,725	3,125
125	900	1,550	2,675
150	850	1,400	2,350
175	825	1,325	2,175
200	800	1,275	2,050
225	775	1,225	1,900
400	700	950	1,275
500	625	850	1,150
700	575	775	1,050
1,000	575	775	1,050
점근값 (내부임피던스)	575	775	1,050

표 2. 물에 젖은 상태 손-손 전류경로, 50/60Hz 교류 인체 총임피던스

접촉전압 V	인체 총임피던스 $Z_T(\Omega)$ 의 값(최대 값)		
	5%의 인구	50%의 인구	95%의 인구
25	1,175	2,175	4,100
50	1,100	2,000	3,675
75	1,025	1,825	3,275
100	975	1,675	2,950
125	900	1,550	2,675
150	850	1,400	2,350
175	825	1,325	2,175
200	800	1,275	2,050
225	775	1,225	1,900
400	700	950	1,275
500	625	850	1,150
700	575	775	1,050
1,000	575	775	1,050
점근값 (내부임피던스)	575	775	1,050

2.3.2 누설 및 인체임피던스

누설 한계상 주파수 효과는 전기 탄화 또는 감지 또는 감응 효과와 다르다. 1kHz 초과 주파수에 대해 확실하게 다르다.

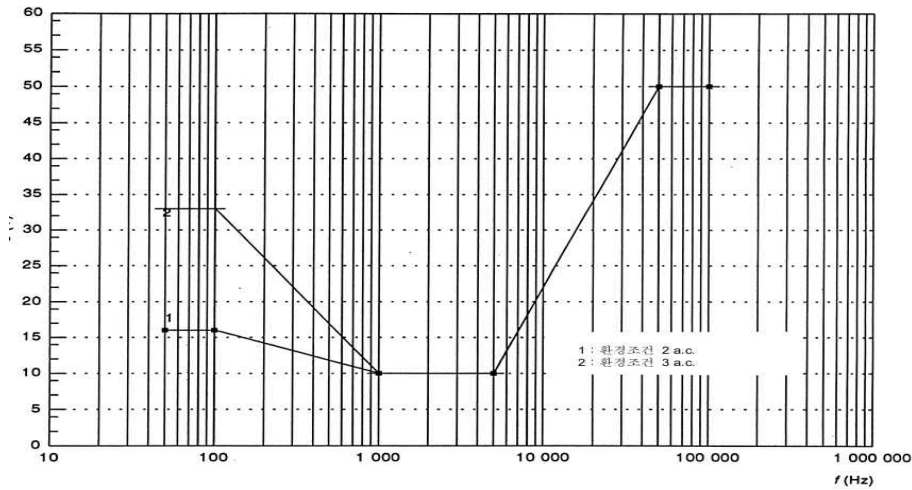


그림 2. 정상(비고장)조건시 주파수 함수로서의 전압한계

2.3.3 전압한계에 영향을 미치는 요소

전압한계에 영향을 주는 요소로는 인체임피던스에 따라 인체에 통전되는 전류가 한정되며 피부의 습도에 따라 초기 통전전류가 한정된다. 또한 접촉면적이 넓을수록 많은 전류가 인체로 흘러들어가게 된다. 이때 인체는 R과 L의 저항체로 L에 의해 주파수에 따라 인체의 임피던스가 변하게 된다.

2.3.4 100Hz 초과 주파수에 대한 한계(Limits for frequencies above 100Hz)

환경조건 2와 3의 정상(비고장)상태에서의 100 Hz를 초과하는 주파수의 교류전압에 대한 한계를 나타낸다. 1kHz 이상의 주파수에서 인체 임피던스는 동일하기 때문에 젖은 상태의 전압한계는 건조상태의 전압한계와 동일하다.

3. 분석 결과

인체의 감전위험은 접촉전압을 통해 제시를 하고 있다. 이는 추정 접촉전압과 인체임피던스를 이용하

여 계산을 한 후 전류한계값으로 표시하게 된다. 표 2는 60Hz에서의 추정 접촉전압에 대한 인체임피던스와 전류한계값을 나타낸 결과이다. 아래의 표에서와 같이 접촉전압이 증가할수록 인체임피던스는 감소하게 되며 이에 따른 전류한계값은 증가하게 된다.

표 3. 60Hz의 접촉전압, 인체임피던스 및 전류한계값

추정 접촉전압(V)	≤ 50	75	100	125	220	300	400	500
인체임피던스(Ω)	1,725	1,625	1,600	1,562	1,500	1,460	1,425	1,400
전류한계값(A)	29	46	62	80	147	205	280	350

그러나 본 글에서는 20kHz에서의 인체감전 특성에 대한 분석을 요구하며 IEC 61200, IEC 60479-1 및 IEC 60364-4-41에서는 주파수에 따른 접촉전류 계산결과 접촉전압의 한계 선정 시 인구의 95%가 그 값을 상회하는 최저 임피던스 값을 고려하여야 한다고 정의하고 있다.

다음 그림은 IEC에서 주파수에 따른 접촉전압 변화추이를 나타내고 있다.

아래 그림 3에서와 같이 0Hz~100Hz까지는 접촉전압이 주파수에 영향을 거의 받지 않는 것으로 나

타났다. 그러나 100Hz~1kHz까지 지속적으로 접촉전압이 감소를 하게 되며, 1kHz~5kHz까지 다시 접촉전압의 변화가 미미하게 나타난다. 여기서 본 연구에서 확인하고자 하는 20kHz대역이 포함된 5kHz~50kHz까지는 다시 접촉전압이 증가하게 되며, 20kHz에서 접촉전압은 대략 35V정도인 것을 확인하였다.

또한 인체는 저항과 커패시터로 구성된 저항체로 주파수가 증가함에 따라 감소하는 추이를 보이게 된다. 또한 주파수가 증가함에 아래의 식에서와 같이 커패시터의 크기가 감소함에 따라 인체임피던스 또한 감소하게 된다. 여기서 Z_h 는 인체 임피던스를 나타내었으며, X_c 는 인체의 임피던스를 의미한다.

$$Z_h = R + jX$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc}$$

60479-1 및 IEC 60364-4-41에 의하면 인체의 임피던스를 10kHz 이상으로 주파수가 증가하게 되

면 대부분 인체에는 저항성분만이 남게 되며 그 크기는 대략 575Ω으로 추정을 하고 있다.

위의 내용들을 종합하여 주파수에 따른 접촉전류를 계산하는 방법은 IEC 61200에 나와 있으며 아래의 식과 같다.

$$I_T = \frac{U_T}{Z_T}$$

위의 식을 이용하여 주파수, 접촉전압 및 인체임피던스에 따른 인체통전한계전류를 산정한 결과를 아래의 표에 나타내었다.

결과적으로 주파수가 증가함에 따라 인체임피던스는 감소하여 접근값 575Ω까지 감소하는 것으로 나타났다. 접촉전압의 경우 초기 1kHz까지는 감소하는 패턴을 보이다 5kHz부터 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이를 근거로 하여 20kHz에서의 인체 임피던스 575Ω과 20kHz에서의 접촉전압 35V를 기반으로 인체 통전전류를 계산한 결과 손-손 구간의 경우 61mA, 손-발 구간은 76mA로 나타났다. 이를 기반으로 20kHz 전력설비의 누설전류 제한값은 60mA

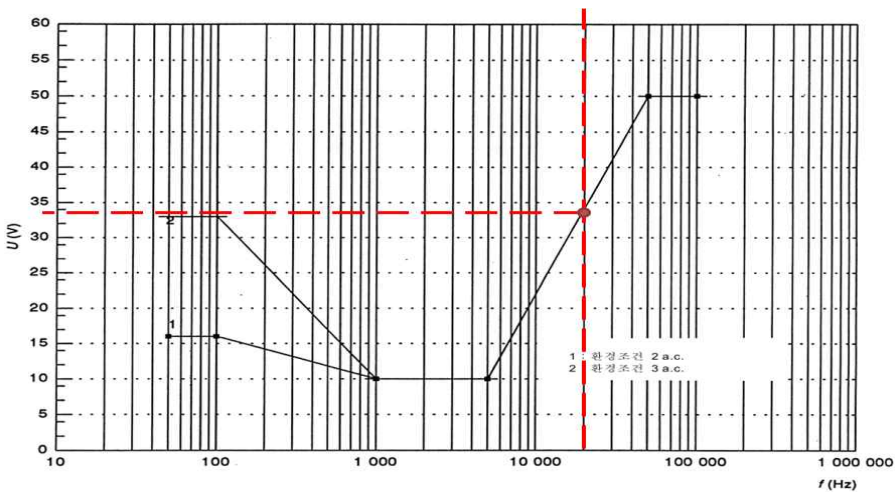


그림 3. 정상(비고장)조건시 20kHz 주파수에서의 전압한계

로 정의하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

표 3. 20kHz에서의 인체임피던스 변화 및 통전전류 분석 결과

주파수 (Hz)	접촉전압 (V)	인체임피던스(Ω)		전류(A)	
		손손	손발	손손	손발
60	35	1,750	1,400	20	25
1,000	10	800	640	13	16
5,000	10	600	480	17	21
10,000	22	575	460	38	48
20,000	35	575	460	61	76
100,000	50	575	460	87	109

4. 결 론

현재까지 인체감전과 관련하여 국내·외에서 50Hz, 60Hz 및 DC에 대한 연구는 활발하게 이루어져 왔다. 그러나 20kHz와 같은 고주파에 대한 전력설비는 아직까지 실제 현장에 보급이 되지 않아 이에 대한 연구가 미흡한 상태이다.

본 글에서는 이와 관련하여 20kHz에서의 감전위험성 분석을 실시하였다. 인체임피던스는 표피의 경우 대부분이 R성분이지만 체내의 경우 R과 L의 조합으로 이루어져 있어 주파수에 영향을 받는다. 이와 같은 이유로 인체는 주파수가 증가함에 따라 인체임피던스는 감소하는 추이를 보이며 10kHz에서 포화상태에 이르게 되어 R성분만을 띄게 된다. 또한 IEC 61201에서는 주파수에 따른 접촉전압의 변화추이를 나타내고 있으며, 1kHz까지는 접촉전압이 감소를 하다가 1kHz에서 10kHz까지는 변화가 없는 상태가 된다. 이후 10kHz에서 50kHz까지 다시 접촉전압이 증가를 하게 되며 본 연구를 통해 도출할 접촉전압은 이 중간에 놓이게 된다. 결과적으로 본 내용을 종합하여 20kHz에서의 인체임피던스는 575Ω이 되며 접촉전압은 35V가 된다. 위에서 도출된 결과를 이용하

여 인체 감전한계누설전류(인체통전전류 한계)는 손-손에서 61mA, 손-발에서 76mA가 되어 20kHz 전력설비에서 인체감전 보호전류의 제한값은 60mA로 규정짓는 것이 좋을 것으로 판단된다.

본 결과는 향후 20kHz 전력설비에서 지락 및 단락과 같은 사고가 발생할 경우 인체 보호를 위한 최소한의 누설전류 크기로 인체보호를 위한 누전차단기 설치시 고려되어야 할 것이다. 또한 현재 시중에 판매되고 있는 누전차단기는 대부분 상용주파에 대한 것으로 향후 20kHz에 대한 누전차단기가 개발되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] KS C IEC 60990, “접촉 전류와 보호 도체 전류의 측정법”, 기술표준원, 2003.12.30.
- [2] KS C IEC 61201, “특별저전압(ELV)—한계값”, 기술표준원, 2007.11.30.
- [3] 전기안전연구원, “산업현장의 감전사고 예방을 위한 최적의 보호도체 현장 적용화 연구”, 한국에너지기술평가원, 2009.10.
- [4] J.P. Rhode, A.W. Kelley, & M.E. Baran, “Complete characterization of utilization voltage power system impedance using wideband measurement”, IEEE Trans. Industry Applications, 33(6), pp 1472~1479, 1997.

◇ 저 자 소 개 ◇



한운기(韓雲基)
 1973년 6월 20일생. 1997년 목포대학교 전기공학과 졸업. 2001년 성균관대학교 전기공학과 졸업(석사). 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.



정진수(鄭鎭洙)
 1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.