

인체감전 안전기준에 관한 최근 국제규격의 동향

(Recent Trend of International Standards on the Safety Criteria for Electric Shock Protection)

이종철* · 김한수 · 이주철 · 강성만

(Jong-Chul Lee* · Han-Soo Kim · Ju-Chul Lee · Sung-Man Kang)

대한전기협회 기술기준처

Abstract

The grounding of an electrical system is one of the essential elements for public safety. Domestic practice of grounding system design has been to get grounding resistance values which are classified by facilities or equipment in the regulations. But the concept of grounding system design of IEC is, as a main factor of safety index, to consider touch voltage and step voltage instead of the resistance value itself. Recently IEC actively develops or revises safety related standards which are essential for the grounding system performance. In this paper, we present the recent trend of the international standards on the safety criteria for Electric Shock Protection.

1. 서론

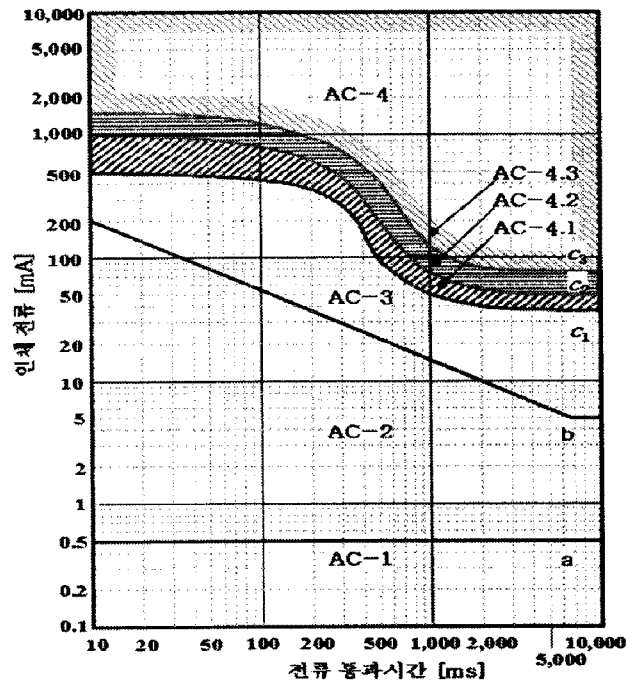
인체감전에 대한 보호를 위한 기본적인 사항은 인체의 임피던스와 인체를 통해 흐르는 전류에 대한 생리학적영향이다. 인체임피던스와 전류의 생리학적영향에 대한 연구결과의 축적에 따라 최근 IEC에서는 인체 임피던스와 전류에 의한 생리학적 영향에 대한 표준을 활발히 개정하고 있으며 기존의 인체통과전류에 의한 위험도를 제공하는 방법에서 접지시스템 설계시의 편의를 위해 접촉전압의 제한치를 제공하는 방향으로 개정되고 있다.

현재까지 우리나라에서는 접지시스템의 안전기준을 접지저항에 근거하여 판단하여 왔다. 그러나 국제표준에서의 접지설계 개념은 감전보호상의 안전지표를 접지저항을 주체로 고려하는 것이 아니라 접촉전압과 보폭전압을 주체로 하고 있다. 물론 대지 전위 상승을 산정할 수 있는 접지저항은 중요하지만 접지저항 그 자체를 접지설계의 안전성 판단기준으로는 채용하지 않고 있다. 최근 IEC규격의 KS화가 진행되고 있으며 전기설비기술기준의 판단기준에도 IEC규격의 일부가 도입됨에 따라 WTO/TBT 회원국들이 적용토록 되어 있는 IEC 규격의 동향에 대한 이해가 필요하므로 안전전압의 설정동향에 대해 연구하였다.

2. 감전보호지표

2.1 인체의 전류에 대한 영향

최근 개정된 IEC 60479-1(2005)에서는 그림 1의 AC-3 구역의 시간에 무관한 전류의 하한치를 종전의 10 mA에서 5 mA로 변경하고 최근까지의 조사연구를 반영한 인체에 대한 전류의 영향, 환경조건별로 개정된 인체임피던스 등의 자료를 제공하며, 감전보호의 기초규격으로 여러 관련규격에서 인용하고 있다.



영역	생리학적 영향
AC-1	감지는 가능하나 놀라는 반응은 없음
AC-2	감지 및 불수의적 근육수축이 있을 수 있으나 통상 유해한 생리학적 영향은 없음
AC-3	<ul style="list-style-type: none"> 강한 불수의 근육수축, 호흡곤란 가역성 심장기능의 장애, 국부마비 가능 전류의 증가에 따라 영향은 증가하며 통상 인체 기관의 손상은 없음
AC-4	<ul style="list-style-type: none"> 곡선 C₁ 상부 심장마비, 호흡정지 및 화상 또는 타 세포의 손상과 같은 병태생리학적 영향이 있을 수 있음. 전류 및 시간 증가에 따라 심실세동 확률이 증가 AC-4.1 영역 : 심실세동 확률 약 5% 까지 증가 AC-4.2 영역 : 심실세동 확률 약 50% 까지 증가 AC-4.3 영역 : 심실세동 확률이 약 50% 까지

그림 1. 인체통과전류와 전류지속시간에 의한 인체 생리반응

이 규격의 내용상의 대표적인 것으로서 그림 1과 같이 교류 15 Hz ~ 100 Hz 범위에서 시간/전류에 대한 인체의 생리적 영향(왼손→양발의 경로)을 제시하고 있다.

2.2 인체임피던스의 변화

인체의 임피던스에 영향을 미치는 인자로서는 통전경로, 접촉전압, 전류의 지속시간, 주파수, 피부의 습기, 접촉면적, 접촉압력 및 온도 등 매우 다양한 변수가 있다. 인체임피던스가 접촉전압의 크기에 따라서 변화하는 특성을 가지기 때문에 접촉전압에 대한 인체전류는 비선형특성을 나타내게 된다.

따라서 IEC-60479는 IEC의 기술위원회 64(TC 64)에서 임상관찰과 동물실험에 의한 자료를 기초로 1974년 IEC-60479 초판 발행 이후 분야를 세분화하여 현재 제5부 초안을 포함 5개의 부로 구성되어 있으며, 인체를 감전으로부터 보호하기 위한 기초자료를 제공하기 위해서 전류에 의한 인체 및 동물의 생리현상에 대한 최근의 연구결과를 반영, 감전의 주요 물리적요소 특히, 인체통전전류의 크기와 지속시간의 영향에 대한 더 나은 평가가 가능토록하고 있다. 표 1은 IEC 60479-1 규격에서 4차례의 개정을 통해 제시된 접촉전압에 대한 인체임피던스의 변화를 조사한 것이다.

표 1. 접촉전압에 대한 인체임피던스 값

발행 연도	접촉전압 [V]	인체 총 임피던스 Z _T [Ω]의 값 (최대값)		
		5% 백분위	50% 백분위	95% 백분위
Ed.1 (1974)	25	2,500		
	50	2,000		
	250	1,000		
	접근값	650		
Ed.2 (1984)	25	1,750	3,250	6,100
	50	1,450	2,625	4,375
	75	1,250	2,200	3,500
	100	1,200	1,875	3,200
	125	1,125	1,625	2,875
	220	1,000	1,350	2,125
	700	750	1,100	1,550
	1,000	700	1,050	1,500
접근값	650	750	850	
Ed.3 (1994)	Ed.2와 동일			
Ed.4 (2005)	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	
접근값	575	775	1,050	

표 1에서 통전경로의 조건은 손-손, 건조상태, 넓은 접촉면적(100 cm²)의 경우에 대한 것이며 인체임피던스는 감소하는 추이를 보여주고 있다.

일반적으로 접촉전압이 높아질수록 인체임피던스는 낮아지며, 1,000 V 이상에서는 스파크에 의해 피부에 구멍이 발생하여 피부임피던스는 단락되어 내부 임피던스만으로 작용하여 낮아지게 된다. 또한 접촉전압의 주파수가 높아질수록 인체임피던스는 낮아지게 된다.

3. 접촉전압의 허용한계

인체를 감전으로부터 보호하기 위한 근원적 방법은 인체를 통해 흐르는 전류의 크기가 유해하지 않은 수준에서 차단하는 것이나 절연과피나 지락고장시 접촉전압의 크기가 유해하지 않은 수준으로 제한되도록 하는 것이 설계단계에서 위험요소를 제거하는 방법이라 할 수 있다. IEC에서 제시되어 왔던 접촉전압의 제한에 대한 규정의 변화를 조사하였다.

3.1 IEC 61201

1992년 제정된 IEC 61201의 규격명은 “초저전압의 제한치”로 IEC 60479-1의 제2판인 1984년 판과 IEC 60364-4-41의 1992년판에 기초하여 작성된 것으로 그림 2와 같이 환경조건 별로 단일고장시의 제한전압/전류의 관계를 제하하였다. 그림 2에서의 환경조건 2는 젖은 상태이며 환경조건 3은 건조한 상태에 대한 것이다. 그러나 신규 제정되는 타 IEC규격들과의 조화되지 않는 내용 등의 관계로 최근(2007. 8)에는 규격명을 “규약 제한접촉전압의 사용 - 적용지침”으로 변경하는 한편 2007. 6월 초안이 승인된 IEC 60479-5에 기초하여 그림 3에서 보는 바와 같이 통전경로 별 접촉면적과 생리반응에 대한 접촉전압의 제한치를 규정하는 것으로 변경되었으며 이는 후술하는 IEC 60479-5의 제정과 관련이 있는 것이다. 단일고장 시의 건조상태에서의 시간에 무관한 접촉전압은 55V(교류)로 제시되었다. 곡선 a, b, c₁은 그림 1의 것과 동일한 생리반응에 대한 것이다.

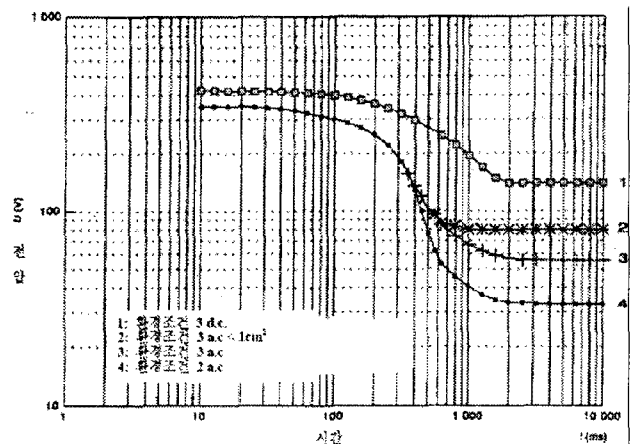


그림 2. 단일고장시 환경조건별 제한전압/전류의 관계

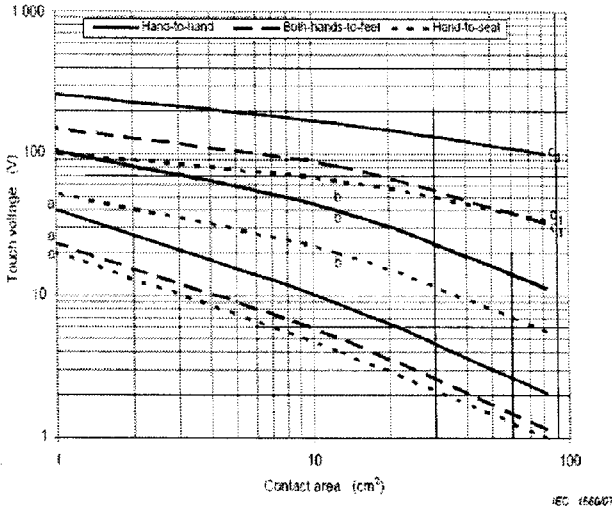


그림 3. 통전경로별 접촉면적과 생리반응에 대한 접촉전압

3.2 IEC 61200-413

1996년 발행된 IEC 61200-413에서는 접촉전압/시간의 관계를 확립하기 위하여 1994년 제정된 IEC 60479-1에 기초하여 인체통과 전류/시간의 영향 곡선군 위에 당시 IEC의 전기설비 및 감전보호 기술위원회(TC64)에서 승인된 그림 4의 L_c 곡선을 이 전류에 임피던스를 곱하여 그림 5의 L 선을 허용접촉전압의 한계를 제시하였다. 이때의 통전경로는 왼손-양발로의 경로를 기준한 것으로 환경이 젖은 경우에 대해서는 L_p 선을 제시하였으며 건조상태에서 시간에 무관한 안전전압으로 50V(교류)가 제시되었다. 그러나 L 선의 작성에 사용된 임피던스는 5% 백분위의 인체 임피던스($Z_{T5\%}$)에 신발 및 바닥저항을 고려한 1,000 ohm의 저항을 합한 것으로 특히 IEEE 80에서 감전 전류 고려 시 인체임피던스 외 다른 임피던스를 고려치 않으며 인체임피던스를 1,000 옴으로 적용하는 것과는 대조적인 것이었다.

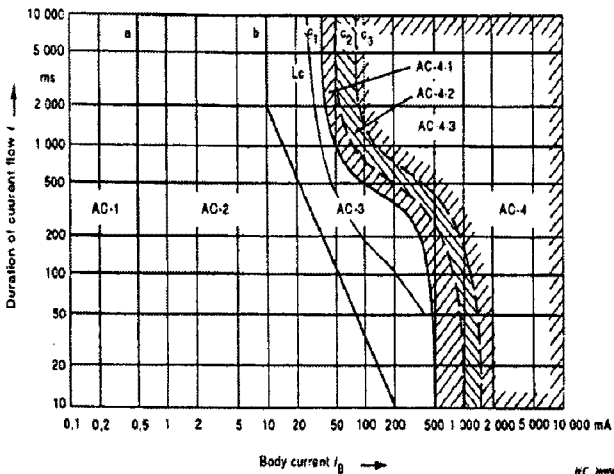


그림 4 인체통과전류/전류지속시간(L_c 곡선)

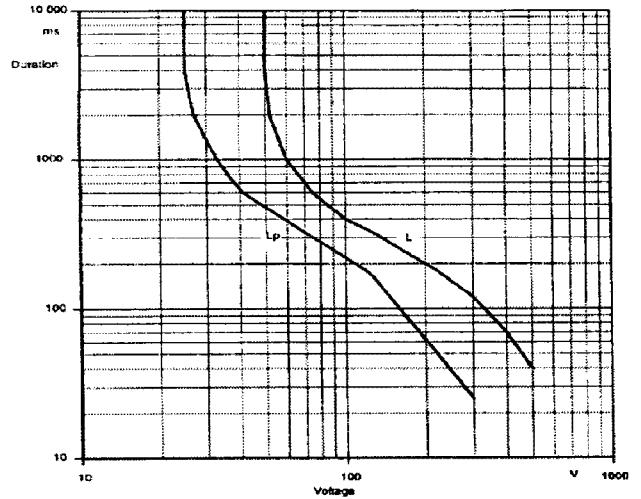


그림 5 일반상태에서 추정접촉전압(U)과 지속시간 곡선

3.3 CENELEC HD 637 S1

1999년 CENELEC이 승인한 HD 637 S1은 유럽연합내의 강제규격으로 교류 1 kV 초과 전력설비에 대한 규격으로 여기서는 허용접촉전압/시간의 제한치를 그림 6과 같은 곡선으로 제한하고 고장전압은 이 곡선 전압의 2배 이하가 되도록 설계하는 경우 안전이 충족되는 것으로 제시하고 있다. 이 곡선의 작성 근거는 명확하지 않으나 IEC 60479-1의 1994년 판에 기초한 것으로 판단되며 이는 후술하는 IEC 61936-1(2002)의 Z2곡선과 유사하고 시간과 무관한 규약접촉전압의 한계치를 75V로 제시하고 있다. 또한 이 규격내에서 이러한 수준의 접촉전압/시간의 제한이 경험에 비추어 안전상 문제가 없는 것으로 기술하고 있다.

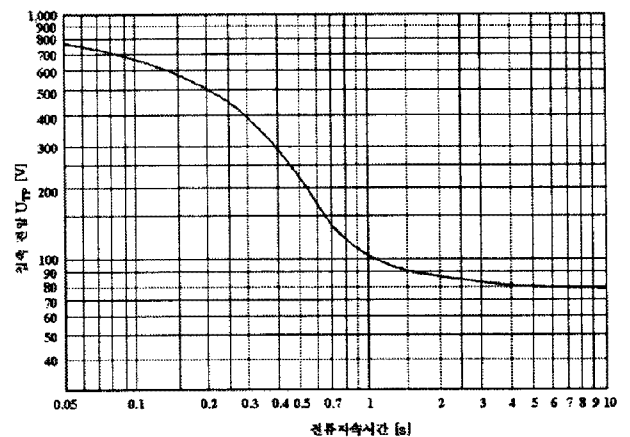


그림 6. 허용접촉전압 U_{TP} 곡선

3.4 IEC 60364-4-44

2001년 초판이 발행된 IEC 60364-4-44에서는 고압측에서 지락고장시 저압측 전기설비에 있어서의 고장 및 접촉전압에 대하여 그림 7과 같이 고장전압(F곡선) 및 접촉전압(T곡선)을 초과하지 않도록 규정하고 있으며 T곡선은 IEC 61200-413의 L곡선을 적용한 것이다. F곡선은 IEC 60479-1의 C_1 곡선에 근거하여 정해진 것이다. 또한 이 제한치는 고압계통과 저압계통 접지망의 접속가능 조건으로도 규정되어 있다.

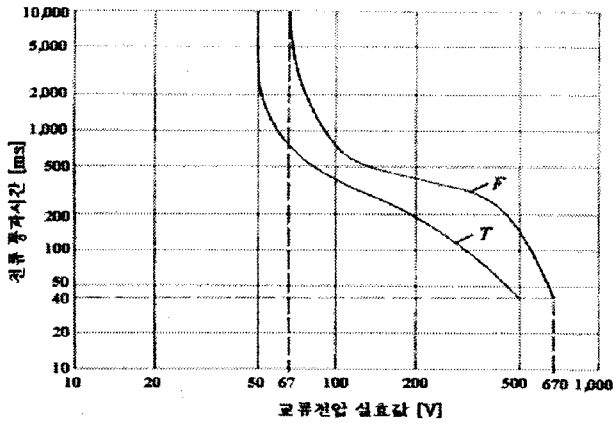


그림 7. 고압계통 지락시의 고장전압(F)와 접촉전압(T)의 최대지속시간

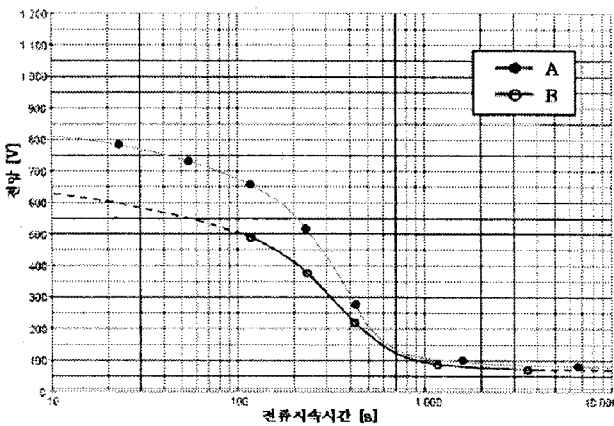


그림 8 허용전압곡선

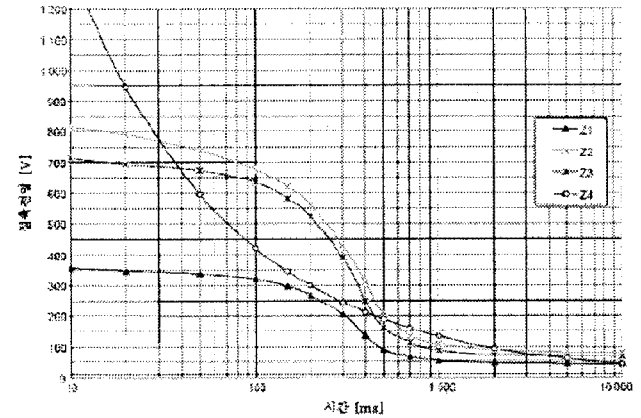
그러나 2007. 8월의 개정판에서는 기존의 F 및 T 곡선이 폐지되고 그림 8의 A곡선과 같은 허용고장전압/시간 곡선만을 도입 하였는데 이는 후술하는 IEC 61936-1에서 IEC 60479-1의 C₂에 기초한 허용접촉전압의 하나로 제시된 Z2 곡선과 동일하다. 그러나 인체안전을 위한 허용접촉전압이 고압과 저압이 서로 다를 수가 없으므로 그림 8은 허용접촉전압/시간으로 보아야 할 것이며 향후 명칭이 개정될 것으로 판단된다.

한편 그림 8의 A곡선은 IEC 60479-1 1994판의 인체임피던스에 기초한 것이므로 개정되어야 할 것이며 그림 8의 B곡선은 IEC 60479-1 2005년판의 인체임피던스를 적용하여 작성한 것이며 점선으로 표시된 부분은 추정치이다.

3.5 IEC 61936-1

2002년 발행된 교류 1 kV를 초과하는 전력설비에 대한 규격인 IEC 61936-1 그림 9에서와 같이 Z1, Z2 및 Z3와 같은 세계의 접촉전압 한계곡선을 제시하고 IEEE 80에 의한 접촉전압의 한계곡선을 Z4로 보여주고 있으며 안전기준으로서 IEC 60479-1의 C₁곡선에 기초할 것을 권장하고 있다. 이는 그림 9에서의 Z1 곡선을 의미하나 규정의 적용국가가 어떤 값의 인체

임피던스(Z_0, Z_{50} 등)를 적용하느냐에 따라 허용전압 곡선이 달라질 수도 있다는 의미이다. Z2 곡선은 전술한 바와 같이 HD 637 S1의 허용접촉전압 곡선과 유사하나 전압의 크기가 다소 높다.



곡선	설명
Z1	인체임피던스 Z_0 (인구의 95% 초과) 및 C ₁ 곡선에 대응하는 허용전류를 상정한 것.(IEC 60479-1 참조)
Z2	인체임피던스 Z_{50} (인구 50% 초과) 및 C ₂ 곡선(심실세동확률 5%이하)에 대응하는 허용전류를 상정한 것.(IEC 60479-1 참조)
Z3	Z ₁ 과 동일. 맨발로부터 접지경로간의 저항 700 Ω을 상정한 것
Z4	인체임피던스 1000 Ω 및 IEEE std. 80(체중 50kg과 100 Ωm의 토양 전기저항률)을 기본으로 한 허용전류를 상정한 것.

그림 9. 접촉전압의 안전한계곡선

3.6 IEC 60479-5

2007. 6월 IEC 위원회 투표에서 통과되어 조만간 발간 예정인 IEC 60479-5는 규격명이 “생리학적 영향에 대한 접촉전압의 한계치”로 생리적 현상을 놀람 반응(a), 불수의적 근육수축(b) 및 심실세동(c₁)의 발생가능 한계로 3분하여 인체통전전류의 경로별 전류/시간의 관계선을 기초로 접촉전압/시간의 관계를 제공함으로써 접지설계시 인체가 동시에 접촉가능한 지점간에 나타날 수 있는 전압만을 평가하여 설계할 수 있는 편의를 얻을 수 있는 것으로 보인다. 그림 10은 교류, 젖은 상태의 좁은 접촉면(1 cm²)일 경우의 예를 보여준다.

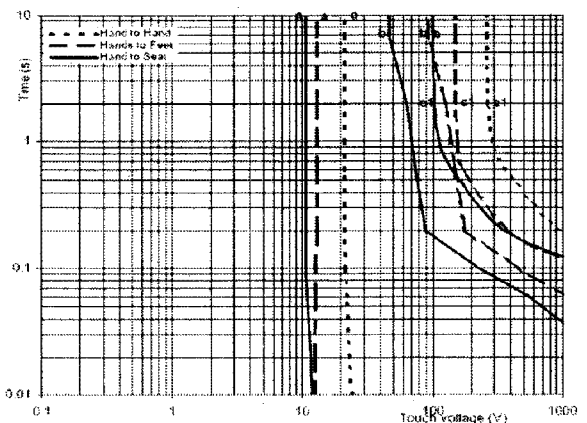


그림 10. IEC 60479-5 DTS

3.7 허용 접촉전압/시간 한계곡선의 비교

그림 11은 규격별로 서로 다르게 제시되고 있는 허용 접촉전압/시간의 한계곡선을 종합한 것이며, 그림 10에서 IEC 60364의 곡선은 IEC 60364-4-44의 개정판(2007. 8)에서는 허용고장전압/시간 곡선만 제시되었으므로 개정판 이전의 것을 나타낸 것으로 IEC 61200-413의 L곡선과 동일한 것이다. HD 637 S1의 곡선에서 최단시간의 한계가 0.05초까지만 정한 것은 고압계통 차단기의 동작시간을 고려한 것으로 보인다.

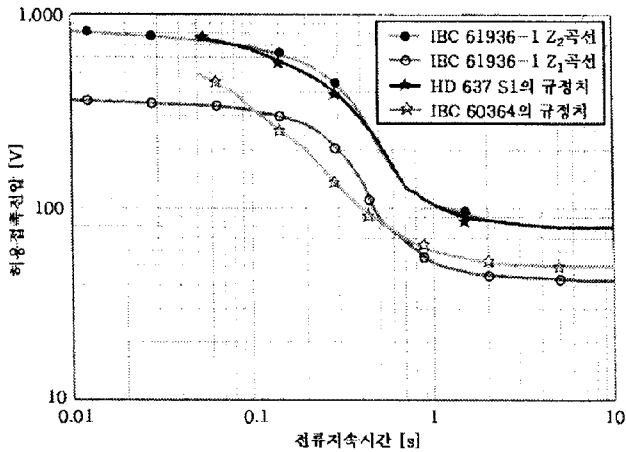


그림 11. 각종 허용접촉전압곡선의 비교

4. 결론

1. 인체에 대한 연구결과의 축적에 따라 감전전류의 크기에 결정적인 영향을 미치는 인체임피던스 값과 감전전류에 대한 생리학적 영향이 정립단계에 왔다.
2. 따라서 인체의 감전보호가 인체를 통과하는 전류/시간의 관계에서 전압/시간의 관계에 의한 방식으로 전환되는 추세이며 이는 접지에 설계의 편의를 제공해 준다.
3. 저압 전기설비 규격인 IEC 60364-4-44(2007. 8) 규격에서 접촉전압/시간과 고장전압/시간의 규정 중 접촉전압/시간이 없어지고 허용고장전압/시간의 규정만 도입되어 저압 전기설비에서 기존의 허용 접촉전압/시간인 T곡선, 즉 IEC 61200-413의 L곡선을 적용하여야 하는지에 대한 혼선이 예상되며 IEC 61200-413 규격은 개정되거나 폐지될 것으로 보인다.
4. IEC 60364-4-4(2007. 8) 규격의 전체적인 내용과 1 kV 초과 전력설비에 대한 IEC 61936-1 및 HD 637 S1의 내용으로 보아 향후 접촉전압/시간 관계로의 인체감전보호는 IEC 60479-1의 개정판(2005)의 인체임피던스를 반영하여 작성된 IEC 61936-1의 Z2 곡선(본고에서 그림 8의 B곡선)이 접지설계 및 지락 고장시의 차단시간 설정 기준이 될 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] IEC 60364-4-44, "Low voltage electrical installation-protection for safety", 2001, 2006, 2007
- [2] IEC 60479-1, "Effects of current passing through the human body", IEC Report, 1974, 1984, 1994, 2005.
- [3] IEC 60479-5, "Touch voltage threshold values for physiological effects", Draft TS 2007.
- [4] IEC 61200-413, "Protection against indirect contact -Automatic disconnection of supply", 1996
- [5] IEC 61201, "Guide for the use of conventional touch voltage limits", 1992
- [6] IEC61936-1, "Power installations exceeding 1kV a.c. - Part 1: Common rules" 2002.
- [7] IEEE 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding", 2000
- [8] CENELEC HD637 S1, Power installations exceeding 1kV a.c.", 2002.
- [9] Electrical Installations Handbook, 3rd Ed. SIEMENS, 2000
- [10] Electrical Installation Guide, Merlin Gerin, 2007.