

고분자 절연 전력케이블 포설 후 최종검사 시험방법

구 자 윤*, 조 연 옥**

(*한양대학교 전기공학과 부교수

**한국전기연구소 고전압연구실장)

1. 개 요

지중 케이블 선로의 장기 신뢰도에 크게 영향을 미치는 요소는 다음과 같이 여러가지가 있다. 양질의 기초 원료, 좋은 디자인, 제조기술, 국내 혹은 국제규격에 명시된 type approval test를 거쳐 요구 사항을 만족하고, 포설된 케이블의 운전 여건, 그리고 접속 및 부속재들의 완벽한 설치등이다.

그중에서도 마지막 사항에 대해서는 특별히 주의를 기울여야 한다. 실제로, 포설후의 전기적 실험 또는 현장시험이 우수한 접속 여부를 알고자하는 목적에 효과적이며 또한 지중케이블 선로의 진단과 같은 다른 목적으로도 확장 적용 되어질 수 있다.

이 보고서는 현재 적용되고 있거나 연구중인 여러가지 시험방법을 소개하고 있지만, 현재까지는 이러한 여러 방법 중 어느 것도 모든 형태의 지중케이블 시스템의 결함을 밝혀 낼 수 있을 만큼 완벽하고 만족스러운 결과를 얻지 못하고 있다. 그러나, 여러 시험 방법들을 병행시키는 더 심도있는 연구가 행해진다면 몇가지 새로운 방법들이 향상, 보완되어 개발될 수 있다.

2. 서 론

일단 지중전력케이블이 포설되면 약 20년에서 30여년간 사고가 발생되지 않아야 된다는 것이 널리 알려진 사실이며, 이러한 일반적인 인식은 현장에

서 수행되는 최종검사이험을 통하여 예정된 수명기간을 단축시키는 결함을 올바르게 검출하는 신뢰성이 있어야 한다는 것을 요구하고 있다.

따라서 포설된 후 현장에서 수행되는 검사시험의 목적은 :

첫째, 운전중에, 특히 접속재에서, 사고를 유발시킬 수 있는 결함등 테스트를 통하여 운전중에 미리 제거시키며

둘째, 테스트 도중에 새로운 결함이나 차후 사고의 여지가 있을 수 있는 결함이 절연물 내부에 형성되지 않아야 한다.

현재 널리 사용되고 있는 현장에서 수행되는 D.C 검사시험의 문제점은 10여년전부터 제기되어 1980년부터 CIGRE SC-21을 중심으로 다수의 연구팀이 조직되어 조사가 시작되었다. 우선 지중전력케이블의 열화문제가 고려되면 연구방향 모색에 커다란 어려움을 발생시키므로, 열화되지 않은 케이블을 주로 사용하였으며, 새로 개발된 검사기술을 지중전력케이블시스템의 접속재에 존재하는 결함만을 찾을 수 있기를 기대하고 있다.

CIGRE SC-21에서는 여러 선진국에서 고분자 절연전력케이블을 생산하는 제조업체, 최종현장검사시험을 수행하는 전력회사 및 기업에서 제기되었던 현장경험과 D.C test의 케이블 시스템에 미치는 악영향등에 대해 질문서를 작성하여 조사를 하였다. 14개국에서 배전용케이블에 대한 경험 및 연구 결과를 제공하였고, 10여개국에서 50KV 이상의 고

APPENDIX 1

TABLE 1

TEST SPECIFICATION REFERENCES AND TEST REQUIREMENTS

Ref. Country	Organization	Voltage U _o /U _i (kV/kV)	Specification in use	Test requirements for new cables	
				d.c. voltage	time (min.)
1 ITALY	Cable Maker	36/60	- IEC 502 extrapolation - CIGRE recommendations	4U _o	15
2	Cable Maker	63/110 to 86/150	CIGRE recommendations on customer agreement	4U _o ¹	15
3	Cable Maker	76/132	IEC 502 extrapolation on customer agreement	3U _o 4U _o	15 15
4 GERMANY	BEWAG	63/110	BEWAG specification 1984	3.1U _o	15
5 THE NETHERLANDS	KEMA	30/ 50 64/110 92/150	KEMA specification S 10 for 50, 110 and 150 kV cables KEMA S (10) 7e April 1984	3U _o	15
6 SWITZERLAND	Cable Maker	35/60 to 127/220	- IEC 502 - SWISS SEV 3437	4U _o	15
7 SWEDEN	Cable Maker	17.3/30 to 127/220	SWEDISH SS 424 1417 - 1979	4U _o ² 1.73U _o /50Hz or U _o /50Hz	15 5 24 hours
8 EIRE	ESB	63/110	ESB Specification 949T May 1979	4U _o	15
9 FRANCE	EDF	36/63 52/90 130/225	Under consideration " "	-	-
10 UK	ESI	38/66 to 76/132	ESI standard 09-16 Issue 1 August 1983	4U _o	15
11 AUSTRALIA	ETSA	38/66	SWEDISH SS 242 14 17 - 1979	4U _o	15
12	SECV	38/66	Australian Electricity Supply Utility Specifications	3.46U _o	15
13	ACTEA	76/132	ESI Standard 09-16 Issue 1 August 1983	4U _o	15
14	PCC	38/66	Australian Electricity Supply Utility Specifications	3.94U _o 3.33U _o	15 15
15 USA			NEMA		
16 JAPAN	JIEE	38/66 to 89/154	National Technical Standard for Electric Installations	4U _o 2.6U _o	10 10
17 INTERNATIONAL	IEC	up to 98/170	draft IEC Specification	3U _o	15

1- Sometimes limited to 3U_o if SF₆ insulation involved.

2- Used on special customer requirement for 132 kV XLPE cable.

APPENDIX 2

TABLE 2

RESULTS OF SITE TESTS

Ref	Country	Organ.	Initial Site Test		Accessories				Initial Site Test Results	Service failures
			(kV)	(Min)	(kV)	Description				
						Termin.	Joint	Type		
1	ITALY	Cable Maker	4Uo	15	36/60	Slip-on EPR	Slip-on Taped	EPR vulcanized	New installation - no breakdown	
2		Cable Maker	4Uo	15	63/110	Slip-on EPR	Taped Slip-on	EPR, vulcanized EPR	Three new installations (2 installations 63/110 kV) - no breakdown	One early breakdown (63/110 kv cable).
3		Cable Maker	3Uo	15	63/110	Slip-on EPR	Taped	XLPE vulcanized	New installation -1 joint failure (voids on cable insulation pencilling)	-3 joint failures within 3 days (Large voids on insulation pencilling)
			4Uo	15	76/132	Slip-on	Taped	XLPE vulcanized	New installation - 18 joint failures (11 joints had obvious defects; 7 joints were apparently sound but failed via the top of the pencilling). - 2 cable failures (cable damage)	- 9 joint failures within 4 days (voids pencilling or similar).
			Uo (a.c.)	24 hr	76/132	Slip-on EPR	Taped	XLPE vulcanized	New installation - 9 joint failures (defects in joints)	- 3 joint failures within 1 month (defects in joints).
4	GERMANY	BEWAG	3.1Uo	15	63/110	Slip-on Silicon Rubber	Taped	EPDM unvulcanized	No failures in d.c. testing	
5	The NETHERL.	PGEM	4Uo	15	30/50 64/110 92/150				No failures in d.c. testing	
6	SWITZERL.	Cable Maker	4Uo	15	35/60 to 127/220	Slip-on Silicon Rubber	Taped Silicon Rubber	EPR vulcanized	No failures in d.c. testing	
		Cable Maker	4Uo	15	86/150		d° (220 appr.)	d°		
7	SWEDEN	Cable	3.84Uo	15	17.3/30 to 127/220	Slip-on	Taped	EPDM unvulcanized	3000 km of 30-240kV Cable tested to SS 424 14 17 using a.c. or d.c. test.	
					4Uo	76/132	Slip-on (100)	Taped (600)	XLPE vulcanized	One 145 kV cable failure reported on initial site test at Uo (a.c.)/24 hr. Special order of 132 kV cable with lead sheath. 6-12 joint failed 4Uo/15 min test (no obvious reason for failure).

APPENDIX 2 (Continued)

TABLE 2

RESULTS OF SITE TESTS

Ref	Country	Organ.	Initial Site Test		Accessories				Initial Site Test Results	Service failures
			(kV)	(Min)	(kV)	Termin.	Joint	Type		
8	EIRE	ESB	4Uo	15	64/110	Slip-on	Taped	EPR vulcanized	All 4Uo/15 min d.c. test satisfactory	
9	FRANCE	EDF	3Uo	30	36/63	Slip-on	Taped	LDPE or HDPE	No site test done	
			before 1977 2Uo (a.c.)	15	52/90 130/225	Slip-on	Taped	Un-vulcanized	Under consideration "	
10	UK	Cable Marker	4Uo	15	38/66	Slip-on	Taped	Un-vulcanized	No failures in d.c. testing.	
					76/132	(93)	Taped (3)	Vulcanized	(Note 4Uo/15 min test also carried out as part of Type Approval Test on cable loop with joints).	
			3.5Uo	15	38/66	Slip-on	Taped	Un-vulcanized	No failures in d.c. testing.	
					76/132	(24)	Taped (24)	Vulcanized		
			4.5Uo	15	38/66	Slip-on (6)	Taped (4)	Un-vulcanized	No failures in d.c. testing	
		4Uo	15	38/66	Slip-on	Taped	Un-vulcanized	No failures in d.c. testing.		
				76/132	CSP					
11	AUSTRALIA	ESTA	3.67Uo	15	38/66	Slip-on	No joints		No failures in d.c. testing	
12		SECV	3.46Uo	15	38/66		No joints		No failures in d.c. testing	
14		PCC	3.94Uo	15	38/66				No failures in d.c. testing	
			3.3Uo	15	76/132					
15	JAPAN	JIEE	4Uo	10	38/66	EPR	Taped	EPR vulcanized	6 accessory failures in 3700 km circuit (moisture in interface between premoulded stress cone and cable in 2 accessories, pre-moulded stress cone positioned incorrectly in 1 accessory)	
			2.6Uo	10	89/154	EPR	Moulded	XLPE	No failures in 3 km circuit.	

전압케이블에 대해서 제공하였으나, 본 기술보고서에서는 전자의 경우만 다루고자 한다. Table 1은 참여한 국가에서 이러한 연구를 위하여 채택된 규정과 검사시험의 요구조건이며, Table 2는 그 결과이다.

본 보고서에서 언급되고 있는 여러가지 시험방법은 다음과 같다.

직류시험(DC test), 교류시험(AC test), 진동파 시험(Oscillating wave test), 초저주파 시험(very low frequency test), 충격파 시험(Surge Impulse application)

3. 최종검사이험

앞에서 언급된 시험들에 대해서 현재 제시되고 있는 해결책이나 문제점에 대해 보고하기로 한다.

3.1 직류시험

직류시험은 포설검사 후에 주로 많이 현재 사용되고 있다. 인가전압의 범위는 케이블 계통의 정격전압에 따라 다르며 2.6 U_0 에서 4 U_0 까지 인가하고 인가시간은 15분에서 30분 사이로 구성되어진다. 그러나 20여 년간의 많은 제조업체에서 사고케이블을 수거하여 조사한 결과에 의하면 D.C test 결과와 서로의 상관관계가 적다는 것을 알게 되었다. 이러한 이유로 인해 몇몇 나라에서는, 50 Hz test 방법을 개발하여 시험규정을 제시(1.7 U_0 에서 5분간, 또는 U_0 에서 24시간)하여 시험을 수행하고 있다. 그러나 케이블의 매설길이가 긴 경우에는 dielectric capacitance가 매우 크기 때문에 적용할 수가 없어서 문제점이 있더라도 D.C. test에 의존하여 케이블 매설후의 시험을 수행하고 있다.

장점 : 수행하기가 용이하며 “중이 절연” 케이블에 잘 적용된다.

문제점 : 고분자절연 케이블 선로 시스템의 경우

① 결함발견을 위하여 4 U_0 를 인가하는 직류시험은, 교류로 U_0 전압을 인가하는 시험보다 케이블 선로의 결함을 검출하는 방법으로는 효과적이지 못하며, 효과적인 결과를 얻을 수 있는 근거를 제공하지 못할 뿐 아니라 또한 매우 높은 직류전압에 의

해 예기치 못한 피해가 발생될 수 있다.

② 케이블의 수트리현상 연구에 의하면, 직류전압을 가한 직후 이로 인하여 시스템초기 결함이 발생되기 때문에, 직류 시험은 이러한 고분자 절연케이블에 대해서는 위험하다는 것이 확인되었다.

③ 직류를 인가하는 동안에 전계분포는 유전율과 관계없이 절연체의 전기저항에 의해서만 좌우가 된다. 또한 직류 인가로 인하여 공간전하 효과에 의해서 특히 국부적으로 전계가 강화되어 미리 주물제작된 부속재(premoulded joint)의 경우 초기에 절연·파괴를 일으킬 수 있다.

④ 현장에서 직류시험중, 접속종단부에 발생하는 외부 섬락에 의해 travelling wave가 발생되어 결국에는 절연체에 손상을 줄 수도 있다. 어떤 경우에 있어서는 여러가지 결함이 복합적으로 일어날 수 있다.

결론적으로, 직류시험은 일반적으로 비효과적이며 심지어 위험한 것으로 간주되고 있다. 따라서 다른 시험방법이 개발되어야 한다.

3.2 교류시험

상용 주파수를 지중 케이블 선로 시험에 사용하는 것은 케이블 선로의 운전조건에 가장 근접하기 때문에 매우 적절하다. 그러나 선로의 길이가 긴 케이블에 대한 절연시험을 위해서는 무겁고 값비싼 50Hz 발전기나 공진시험 장치(resonant test set)가 필요하다(0.002nF의 MV 케이블 capacitance를 시험하기 위해서는 1MVA 변압기가 필요). 또 다른 방법으로 상당한 기간 동안(예를 들면 1주) U_0 를 인가하는 방법도 있지만, 이 방법의 효용성은 결함의 성질과 크기에 좌우된다(예를 들면, 절연 두께 11mm 정도의 63kV 케이블에 3mm 깊이의 인위적인 결함을 만들어 시험을 시도하였으나 검출되지 않았다.)

다른 연구에 의하면, 고전압 전력 케이블은 1.732 U_0 (U_0 는 운전 전압)정도의 전압을 인가하고, 이 차축의 중성점이 접지되지 않은 전력 변압기를 사용하여 시험할 케이블을 정상작동중인 계통에 연결하였다. 케이블의 1상을 접지에 연결하면 다른 두 상은 접지에 대하여 1.732 U_0 에 노출된 상태가 되며, 이상태로 상당한 기간 지난후, 같은 방법으로 접지되는 상을 바꾸어나가면, 각각의 상은 주어진

기간 동안에 두번씩 전압이 인가된다. 이러한 방법으로 1988년 이후 9번의 시험이 시도되었으며(3번은 50kV 케이블, 6번은 150kV 케이블에 대해 수행), 9번중 5번의 시험지속시간은 30분이었고 나머지 4번은 1시간인 것으로 보고되었다. 이러한 시험 방법은 주목할만하지만, test system의 구조를 변형해야 하고 철공진(fenoresonance)이나 종단부 섬락과 같은 발생되어서는 안되는 현상을 방지하기 위하여 세심한 주의를 요구하고 있다. 따라서 이러한 문제를 개선한 새로운 시험법이 네델란드에서 개발중이다. 더구나, 시험도중 사고로 인한 short circuit power는, 동작중인 계통의 정상적인 short circuit power에 비하여 상당히 작기 때문에, 손상은 매우 작고 이것은 결합부분에 대한 차후의 시험을 가능하게 한다.

3.3 진동파 시험

이 시험방법은 특히 CIGRE WG 21-09에 의하여 구체적으로 조사되었다. 시험회로는(그림 1) 기본적으로 Capacitor C_1 과 검사 대상이 되는 케이블 시스템을 상징하는 C_2 를 충전시키는 직류전압 발생 장치로 구성되었다. 요구되는 시험전압에 도달한 후 축전기들은 작은 inductance(L)를 갖는 공기로 절연된 coil을 통해서 방전되면서, kHz 범위의 고주파 전압을 야기한다. C_1 과 L의 선택은 C_2 의 값에 의하여 결정되며 발생하는 전압의 주파수는 1kHz에서 10kHz사이가 되어야 한다.(그림 2) 직류전압 인가에 따른(공간전하나 전계 강화)에 의한 Pre-polarization현상이 발생하는 것을 피하기 위하여, 다른 시험 회로가 시도되고 있는 중이다.

이렇게 여러가지 시험방법을 개발하는 과정에서 체계적인 연구를 위하여, 전형적인 지중선로에서 발생할 수 있는 결함을 다음과 같이 인위적으로 발생시켰다.

① 종단부에 가까운 부분에서 케이블에 radial방향으로 칼로 절연층의 절연두께의 20% 정도 깊이로 칼로 흠집을 내고 그 흠집을 도전성 페인트로 채움.

② Stress cone을 잘못 끼워서, 외부 반도체층에 overlapping이 일어나게함.

③ 미리 주물제작된 접속재(premoulded joint)를 잘못끼워서 알루미늄 보호층을 노출시킴.

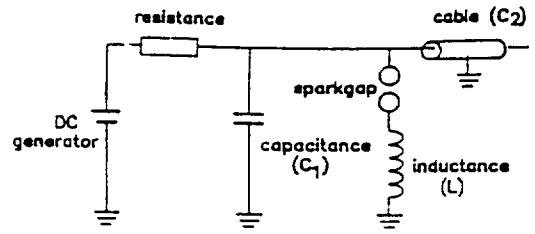


그림 1 Oscillating test circuit

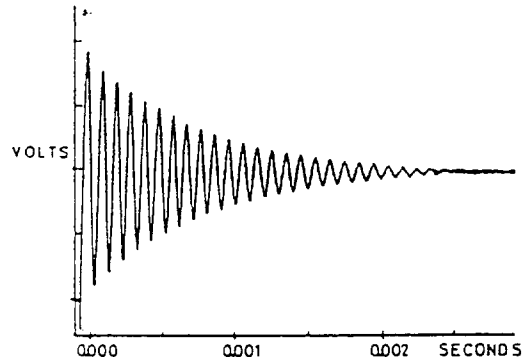


그림 2 Typical oscillating wave

④ Chamfer 위에서 taped joint를 제작중에 케이블에 radial방향으로 절연층 두께의 40% 정도 깊게 칼로 흠집을 내고 형성된 흠집을 도전성 페인트로 채움.

⑤ 케이블 제작과정중 내부 반도체층을 잘못되게 하여 chamfer위의 도전성 테이프와 50mm정도 겹치게 한다.

⑥ 접속부위의 케이블 절연층에 구멍을 낸다.

이러한 인위적인 결함에 대해서 서로 다른 방식(특히 교류와 직류)을 적용하여 그 결과가 비교된다.

이러한 일련의 연구결과에 의한 일반적인 결론은 OW가 DC보다 더 효율적인 것으로 지적되었다. 그러나, Knife-Cut에 대해서는 HV 케이블의 경우 Oscillating wave의 주파수와 상용주파수의 비가 1.2에서 1.9이므로 MV 케이블(0.9에서 1.5)보다 상당히 높은 것으로 나타났다. 접속부품을 잘못 끼우는 것에 대해서는 위에서 언급된 주파수비는 1.2에서 2.7사이이다. 다른 형태의 결함들의 경우에, 절연과파전압을 가할때 OW의 주파수비는 2.6에서 2.8이다.

그와는 반대로, 이러한 인위적인 결함이 2000PC 정도의 부분방전을 일으킬 수 있으며 그 정도는 결함의 성질에 따라 다르다.

그러므로, OW 방식의 민감도는 모든 가능한 형태의 결함을 밝혀내는데 불충분하지만, 현재 고전적으로 쓰이고 있는 직류시험을 대체하는데는 아무런 문제가 없다. 또, U_0 에서 부분방전을 검출하고 동시에 oscillating wave에 의한 시험을 병행하면 아마도 시험 기술의 감지기능과 효용성을 향상시킬 수 있으므로, 현장에서 이러한 결함을 검출하는데 요구되는 측정 가능한 PD측정기술의 개발이 뒤따라야한다.

3.4 초저주파 시험

주파수가 50Hz에서 0.1Hz로 감소될 때, 시험설비의 용량은 500배정도 줄일수 있으므로, 결과적으로 장거리 케이블을 시험할 수 있다. VLF 시험을 위한 여러가지 시스템이 적용되고 있으며, 특히 이 방법은 수트리로 열화된 MV 케이블 시험에 필수적으로 적용되어왔다. 50Hz에서의 절연파괴전압과, 0.1Hz에서의 절연파괴 전압값과, 수트리에 의한 케이블의 열화정도, 같은 3가지 요소들 사이에는 좋은 상관관계가 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 연구결과에 의하면 0.1Hz의 전압을 15분간 인가하는 방법이 바람직하며 아직 HV 케이블을 현장에서 시험한 것에 대해서는 보고된 것이 없다.

3.5 충격파 시험

스위칭 임펄스와 같은 과도시험 전압을 가하는 방법은 PD 측정과 병행되어 수행된다. 초보단계의 연구에 의하면, PD개시를 위한 AC 전압치와 SI 전압치가 서로 어떤 연관성이 있는 것을 보여주었으며, PD는 AC 최대전압의 두배정도의 SI 전압치에서 같은양의 PD가 발생된다. 그러나, 적합한 PD 측정 기술이 개발되어야 한다.

4. 결 론

- ① 현장 시험을 위하여 여러가지 방법이 제안되

어 적용되고 있지만 그 어느것도 뚜렷한 결과를 제시하지 못하고 있다.

② DC test는 이미 언급된 문제로 인하여 시험목록에서 제외되어야 한다.

③ 교류 시험은 현재 많이 적용되고 있지만, 경우에 따라서는 적용이 불가능하다. 그러나 전력원에 직접 케이블 선로를 연결하는 것이 가능한 경우에는, 1,732 U_0 전압에서의 시험은 타당하다고 할 수 있다(시험 시간이 명기되어야함).

④ 진동파 시험은 충분히 민감하지 않지만, U_0 하에서 PD 측정을 병행하면 타당한 방법이 될 수 있다.(현장 측정에 있어 PD의 문제는 해결되어야 할 사항임)

⑤ HV 케이블에 있어서 다른 방법(VLF와 SI)의 적용은 더 구체적으로 연구되어야 한다.



구자운(具滋允)

1951년 2월 7일생. 1975년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1980년 랑스 ENSEEIHT대학원 졸업(석사). 1984년 프랑스 ENSIEG 대학원 졸업(공박). 1980~83년 프랑스 CNRSLEMD 연구원. 1983~84년 프랑스 EDF연구원. 1985~88년 한국과학기술원 계측소자연구실 선임연구원. 현재 한양대 공대 전기공학과 부교수, CIGRE SC-15, SC-21 COMMITTEE MEMBER. JIC-ABCE COMMITTEE MEMBER.



조연옥(趙淵玉)

1952년 5월 8일생. 1976년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1982년 미국 일리노이 대학원 졸업. 1985년 미국 아이오아주립대 대학원 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 고전압연구실장.