

## 발전소 순환수 및 복수 계통 케이블 건전성 평가

하체웅, 한성흠  
한국수력원자력(주)

### Cables Condition Assessment for Circulating Water Pump & Condenser Extraction Pump

C. W. Ha, S. H. Han  
Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd

**Abstract** - There are roughly a hundred types of cables in power plants. The distribution of circuits in a nuclear plant is comprised of 20% instrument cables, 61% control cables, 13% AC power cables, 1% DC power cables, and 5% communication lines.

In the nuclear power plant, medium voltage cables are generally included in the scope of systems reviewed for safety and are included in a plant's maintenance program. Medium voltage cables provide power to many critical components in plants, including feed water pumps, circulating water pumps, and condensate pumps.

Among these cables, high temperature sections of cables feeding electrical power to the circulating water pump and the condenser extraction pump were found. The evaluation for these cables is performed to find the maximum allowable current and temperature.

The result shows that the load current flowed about 85% of the allowable current ampacity, and the temperature of conductor at full load current did not exceed the limited temperature.

Therefore, existing cables for circulating water pump and condenser extraction pump system are going to be used during design life.

## 1. 서 론

원자력 발전소는 중요하지 않은 설비뿐만 아니라 많은 중요한 설비에 전력을 공급하는 모든 종류의 크기, 전압경격, 길이의 무수한 전력케이블을 사용하고 있다.[1]

발전소에 포설되는 케이블은 EQ(Environmental Qualification)와 Non-EQ로 분류되고, EQ 케이블은 격납건물 내부에 위치하고 설계기준 사고나 이후에도 기능유지가 요구되는 케이블을 의미하고, Non-EQ 케이블은 격납건물 내부나 외부에 위치하지만 열악한 환경에 노출되지 않으며, 만일 노출이 되더라도 설계기준사고나 이후에도 기능 유지가 요구되지 않는 케이블을 의미한다.

본 논문에서는 Non-EQ 케이블 중의 하나인 순환수 및 복수펌프 계통 케이블에 대한 점검 중 국부적으로 온도가 높은 지점이 발견됨에 따라 현재 운영되고 있는 케이블의 건전성을 평가하기 위해서 케이블 및 주변 온도를 실측하고 온도 분포 해석을 실시하였다. 그리고 추가로 대상 케이블에 대해서 절연 진단 시험 즉 절연저항시험, 성극지수, 등온완화전류분석, 유전점접 그리고 부분방전 등을 수행하여 케이블의 건전성 여부를 판단하였다. 본 논문에서는 케이블 온도 측정 결과를 분석하여 케이블의 건전성 여부를 판단한 부분에 국한하여 기술하였다. 참고로 대상 케이블에 대해서 다양한 건전성 평가 결과 일부 지점에서 온도가 다소 높은 지점이 발생하였지만 케이블은 안전하게 운영이 되고 있음을 확인하였다.

## 2. 케이블의 허용전류

### 2.1 허용전류의 정의 및 종류

허용전류란 표 1과 같이 케이블 절연체의 절연성능을 감소시키지 않는 절연체의 최고허용온도를 초과하지 않고 도체에 흘릴 수 있는 연속 전류를 말한다. 허용전류는 시간변동에 대하여 케이블 내부에 저장되는 에너지 유무에 따라 정상상태 허용전류와 과도상태 허용전류로 구분할 수 있다. 즉 전력케이블내부에 저장되는 에너지가 시간 변동에 대하여 변화가 없을 때의 허용전류를 정상상태 허용전류라 하며, 시간의 변동에 대하여 변화가 있을 때의 허용전류를 과도상태 허용전류라 한다.[2]

열 회로 관점에서 보면 정상상태 허용전류는 케이블 내부에서 에너지의 저장을 담당하는 열용량이 없고 오직 열 저항만으로 구성되는 열 회로이고, 과도상태 허용전류는 케이블의 각 구성요소에 대하여 열용량과

열 저항 모두가 있는 열 회로를 의미한다. 정상상태 허용전류에는 상시 허용전류가 있고, 과도상태 허용전류에는 단시간 허용전류와 고장순시 허용전류가 있다.

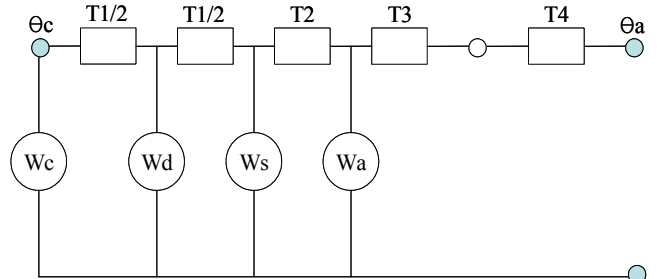
<표 1> 케이블에 따른 절연체의 최고 허용온도

케이블의 종류	상시 최고허용온도	단시간 최고허용온도	고장순시 최고허용온도
OF	85℃	95℃	150℃
XLPE	90℃	105℃	250℃

### 2.2 대기 중 설치된 케이블(전력구, 기중부설)

대기 중에 전력케이블이 설치되었을 때에는 그림 1과 같이 사다리꼴 열 회로를 그대로 사용할 수 있다. 이때 외부 열 저항  $T_4$ 는 복사와 대류에 의한 손실을 고려한 것이다.

태양의 복사에너지에 노출되는 케이블의 경우 케이블 방식층은 열을 흡수하기 때문에 이러한 온도상승분을 고려하여야 한다. 대기 중에 설치된 케이블에 대한 허용전류 계산식은 태양 복사에너지의 영향이 없는 경우 식 1과같이 표시할 수 있다.



<그림 1> 정상상태 허용전류의 케이블의 사다리꼴 열회로

$$I = F_g \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R \left[ T_1 + n(1 + \lambda_1) T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4) \right]}}$$

여기서,  $n$  : 한 케이블내 심선(도체) 수(단심케이블=1)

$\Delta\theta$  : 도체 온도상승분[℃]

$\theta_c$  : 상시 도체 최고허용온도 또는 운전온도[℃]

$\theta_a$  : 주변 온도[℃]

$R$  : 교류도체저항[Ω/m]

$\lambda_1$  : 시스 손실률

$\lambda_2$  : 아모아 손실률

$W_d$  : 유전체 손실[W/m]

$T_1$  : 절연체의 열저항[K·m/W]

$T_2$  : 시스와 아모아사이의 열저항[K·m/W]

$T_3$  : 방식층의 열저항[K·m/W]

$T_4$ : 케이블 표면에서 주변 대기온도까지의 열 저항  
[K·m/W]

$F_g$  : 다회선 부설에 의한 허용전류 저감 계수

### 3. 케이블의 종류 및 온도 실척

원자력 발전소 케이블의 정기 점검 중 순환수 전동기에 전원을 공급하는 케이블과 복수펌프 전동기에서 국부적인 고온 지점이 발생하여 케이블의 온도, 주위 온도 및 전기적 변수 등을 측정하여 케이블의 허용전류 산정 및 케이블 도체의 온도를 계산 하였다.

순환펌프 전동기(CEF MO)에 전원을 공급하는 케이블의 규격은 XLPE 1/C, 630mm<sup>2</sup>, AL 이고, 케이블 각 상의 운전 전류 및 케이블 자켓 온도는 표 2와 같다. 또한, 복수펌프 전동기(CEX MO)에 전원을 공급하는 케이블의 규격은 XLPE, 3/C, 240mm<sup>2</sup>, AL 이고, 케이블의 운전 전류 및 자켓 온도는 표 3과 같다. 표에서 보듯이 순환수펌프 전동기의 케이블 자켓 온도 중 58 ~ 59℃의 고온 지점이 발견되었고, 복수펌프 전동기의 케이블 자켓 온도 중 50.9℃의 고온 지점이 발견되었다.

표 2와 표 3에서 1~3차 측정은 측정 회수를 의미하는 것이 아니라 케이블 전체 선로를 3부분으로 구분하여 자켓 온도를 측정 한 지점별 측정을 의미한다.

<표 2> 순환수펌프 전동기(CRF MO)

측정 대상		1차 측정 (℃)	2차 측정 (℃)	3차 측정 (℃)	운전 전류 (A)
1CRF 001MO	A상	40.9	52.5	50	660
	B상	51.2	53.6	52.4	
	C상	53.5	52	50.5	
1CRF 002MO	A상	55.7	52.3	50.7	660
	B상	56.1	52.1	53.1	
	C상	50	51.4	51.2	
주위 온도		26.8	25.4	24.4	
2CRF 001MO	A상	49.1	58	50.2	680
	B상	50	59	49.7	
	C상	50.2	53	52	
2CRF 001MO	A상	46.3	53	52	680
	B상	48.2	54.2	51.4	
	C상	49.6	58.9	50	
주위 온도		22.8	25.4	24.4	

<표 3> 복수펌프 전동기(CEX MO)

측정 대상		1차 측정 (℃)	2차 측정 (℃)	3차 측정 (℃)	운전 전류 (A)
1CEX 002MO	N/A	44.8	42.3	50.9	300
1CEX 003MO	N/A	45.6	42.5	50.3	
주위 온도		30.9	29.4	31.9	
2CEX 002MO	N/A	44.2	43.2	47	300
2CEX 003MO	N/A	43	43	46.7	
주위 온도		29.3	29	30	

### 4. 케이블에 대한 허용전류 계산

3절에서 제시한 바와 같이 케이블의 실측 결과 및 케이블 자료를 근거로 케이블에 대한 허용전류 및 현재 부하전류에서의 도체(절연체) 온도를 계산하였다. 분석 대상 케이블인 순환수 펌프 및 복수 펌프 케이블의 온도 조건은 아래와 같이 설정되어있다.(표 1 참조)

- ① 주변 온도 : 40[℃]
- ② 상시 최고 허용온도 : 90[℃]
- ③ 단시간 최고 허용온도 : 105[℃]
- ④ 고장 순시 최고 허용온도 : 250[℃]

즉, 케이블에 허용전류 대비 100%의 부하전류가 흐를 때 절연체에 최대 90[℃]가 발생된다는 뜻이다.

<표 4> 케이블의 허용전류 계산 결과

대상 케이블	상시		단시간		고장순시 허용전류 [kA]	현재 부하전류 [A]
	허용전류 [A]	송전 용량 [MVA]	허용전류 [A]	송전 용량 [MVA]		
CRF MO	790.32	9.03	1136.24	12.99	46.26	680
CEX MO	467.37	5.34	911.73	10.42	18.37	300

표 4에 나타난 바와 같이 허용전류 계산 결과와 현재 부하전류를 비교한 결과 현재의 부하전류는 허용전류 한계를 초과하지 않으면서 안전하게 운전되고 있음을 알 수 있다. 그리고 현재의 부하전류가 흐르고 있을 때 케이블 절연체의 최대 온도를 계산하여 표 5에 나타내었다.

<표 5> 케이블 도체(절연체)의 최대 온도

대상 케이블	현재 부하전류[A]	절연체의 최대 온도[℃]
CRF MO	680	73.5
CEX MO	300	59.3

표 5에서 보듯이 현재의 부하전류에 대해서 절연체의 최대 온도는 90[℃]를 초과하지 않아 안전하게 운전되고 있음을 알 수 있다.

그리고, 현장 조사 결과 순환수 및 복수 펌프 실 건물은 별도의 독립된 공간이고 해수면과 가까운 곳에 위치하고 있으므로 정상 운전 중 공간온도를 측정 한 결과 22.8~31.9℃ 이내로 유지되어 설계기준인 40℃ 보다 낮게 유지되고 있었다.

### 5. 결 론

원자력 발전소 순환수펌프 및 복수펌프 전동기에 전원을 공급하는 케이블의 건전성 평가 및 현장 조사 결과, 현재의 부하전류는 케이블 허용 전류 및 절연체 허용 온도를 초과하지 않아 운영에 있어서 안전하다는 결론을 내었다.

또한 본 보고서에서는 다루지 않았지만 대상 케이블에 대해서 절연진단 시험(절연저항시험, 성극지수, 등온완화전류분석, 유전질점 그리고 부분방전 등)을 수행하여 케이블의 건전성 판단 결과 양호 하다는 결론에 도달하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] EPRI, "Workshop on Power Cable Condition Monitoring"
- [2] 한국전력공사, "지중송전 케이블시스템", 2002. 12
- [3] EPRI, "Program for D.C. Cook Nuclear Plant Units 1 and 2", 1996.
- [4] JCS 168E, "전력케이블의 허용전류", 일본전선공업회, 1995
- [5] "Calculation of Temperatures in Ventilated Cable Tunnels", Electra No. 143, Aug. 1992
- [6] KEPRI, "송전케이블의 허용전류산정프로그램 개발연구" 2001. 12.