

가공송전선 단시간 과도정격의 산정 및 적용방안

장태인*, 박준우*, 박진우*, 오장만*, 손홍관**
 한국전력공사*, 한국전기연구원**

Estimation and Application Method of Short-time Transient Ratings in Overhead Transmission Lines

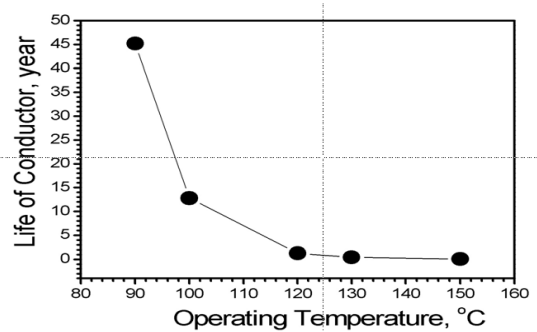
Tae-In Jang*, Jun-Woo Park*, Jin-Woo Park*, Jang-Man Oho*, Hong-Kwan Sohn**
 KEPCO*, KERI**

Abstract - 이 논문은 2회선 가공송전선의 1회선 고장시에 선로 운전의 안전성을 확보하기 위한 단시간 과도정격을 결정하기 위한 방법에 대하여 기술한다. 먼저 선로의 단시간 과도정격 산정에 영향을 미치는 주요 요소들인 도체의 수명, 접속개소의 안정성, 선로의 지상고 및 이격거리에 대하여 살펴본 후, 이를 바탕으로 국내 상황에 적합한 과도정격 운영방안을 제시한다.

성변화를 갖는 시료를 얻기 위해서는 인공챔버 내에서 실사용 온도보다 높은 온도에서 연속적 등온가열 후 재료의 특성을 시험하는 가속열화 시험법을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 전선의 수명에 절대적인 영향을 미치는 알루미늄 도체를 가속열화시켜 과부하 시간에 대한 전선의 특성을 모의하였다. AI도체의 경우, 각 온도에서의 사용시간은 자기확산 계수 이론에 의한 식 (2)로 표시될 수 있다. 여기서, R은 기체상수, Q는 AI의 자기확산에 필요한 활성화 에너지, T₁, T₂는 시험을 위한 온도, t₁, t₂는 사용시간이다.

$$t_2 = t_1 \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (2)$$

그림 1은 ACSR 410 mm² 전선 AI소선에 대한 가속열화 실험결과로 도체의 상시연속운전 온도와 수명과의 관계를 살펴 볼 수 있다. 실험결과는 상시연속운전 온도가 높아질수록 수명은 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다.



〈그림 1〉 도체 상시연속 운전 온도와 수명과의 관계

1. 서 론

가공 송전선의 단시간 과도정격은 2회선 중 1회선의 고장시에도 선로의 수명저하나, 손상 등 이상없이 안전하게 공급될 수 있는 전력으로 각 전력회사는 일정한 고장복구 시간을 정하고 이에 알맞은 선로보호 장치를 채택하여 선로의 과부하로 인한 설비손상 등 사고를 예방하고 있다.

송전선로의 단시간 정격은 송전선 도체의 열정격과 부가되는 인장력에 직접 관계되어 수명에 영향을 미치는 인자로 작용한다. 전선의 수명은 선로의 단시간 운전시의 전류크기 및 지속시간에 영향을 받는다. 한편, 전선 접속개소 역시 선로의 단시간 운전시 허용전류의 제약요소로 작용할 수 있으므로 접속개소의 시공상태에 따른 기계적, 열적 특성의 파악이 필요하다. 또한 선로의 비상시에 적용되는 단시간 운전은 일반적인 운전시에 허용되는 전류에 비하여 높은 수준의 전류를 도체에 흘리게 되므로 상시연속 운전시 적절한 지상고를 유지하도록 설계된 이도한계치를 초과할 가능성이 있다. 도체의 이도는 도체온도와 직접적으로 연관되고, 도체온도는 도체전류와 관계되므로 충분한 안전 지상고를 유지하기 위해서는 단시간 허용전류가 적절한 값 이내로 제한되든지, 아니면 필요 지상고를 확보하기 위해 선로의 높이가 조정되어야 한다.

본 논문에서는 국내에 가설된 송전선로의 단시간정격 기준을 정하기 위하여 먼저 선로의 단시간 과도정격 산정에 영향을 미치는 주요 요소들인 도체의 수명, 접속개소의 안정성, 선로의 지상고 및 이격거리에 대하여 조사 및 실험을 실시하며, 이를 바탕으로 국내 상황에 적합한 과도정격 운영방안을 제시한다.

2. 본 론

2.1 단시간 과도정격의 산정

가공선 도체에 전류 I[A]가 흐르는 경우, 도체온도에 대한 열평형방정식은 식(1)과 같이 주어지며, 식(1)을 이용하여 도체에 흐르는 단시간 전류를 계산한다.

$$mC_p \frac{dT_c}{dt} - I^2 R_{ac}(T_c) = Q_s - [Q_c(T_c) + Q_r(T_c)] \quad (1)$$

여기서, $R_{ac}(T_c)$ 는 도체온도 T_c 에서 도체의 교류저항, Q_s 는 도체가 태양으로부터 흡수하는 열, Q_c 는 대류에 의한 열방산, Q_r 는 방산에 의한 열방산, m 은 도체의 단위길이당 질량, C_p 는 도체의 비열이다.

한편, 가공송전 선로의 단시간 정격을 결정하기 위해서는 크게 아래의 3가지 요소를 고려하여야 한다.

- 도체의 수명
- 송전선로 접속개소의 안정성(기설선로만 해당)
- 송전선로의 지상고 및 이격거리

단시간 정격은 비상시에 운용하는 도체의 전류용량이므로 과부하율과 고장지속시간, 고장누적시간 그리고 도체의 잔여수명 사이의 관계를 고려하여 산정된다.

2.2 도체의 수명 및 과부하 허용시간

2.2.1 도체의 수명

단시간 허용온도에서 실제 가설되어 장시간 사용된 전선과 유사한 물

2.2.2 과부하 허용시간

국내 가공송전선로의 1997년부터 2001년까지 5년간 순간고장을 제외하고, 지장전력 유무에 관계없이 고장시간이 존재하는 모든 고장에 대한 전압별 고장건수 및 고장시간은 연평균 약 58건, 6,231분이 발생한 것으로 조사되었으며, 이들 고장중 30분 이하의 고장은 약 64%, 회선당 연평균 고장시간은 5.06분/회선이었다.

그림 1의 결과를 바탕으로 도체의 설계수명을 40년, 회선당 연간 최대 고장횟수를 5회로 가정할 때 도체의 수명에 영향을 주지 않는 각 온도에서의 허용시간은 표 1과 같이 추정할 수 있다.

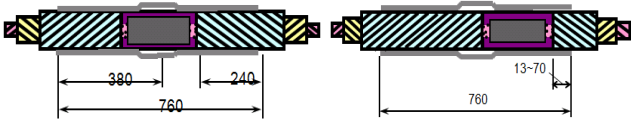
〈표 1〉 도체 수명실험 결과에 의한 과부하 허용시간

AI 소선온도 도체수명(년)	90℃	100℃	120℃	130℃	150℃
	도체수명	(년) 45.2 (시간) 395,952	12.8 112,128	1.2 10,512	0.4 3,710
여유수명	(년) 5.2 (시간) 45,552	1.472 12,894	0.138 1,208	0.046 427	0.026 230
년간허용시간(수명40년)	-	322	30	10	5.75
최대 과부하 허용시간 (회선당 연 최대 고장횟수 5회 가정)	-	64	6	2	1.15

즉, 도체의 수명측면에서 100℃에서는 사고당 64시간, 120℃에서는 사고당 6시간, 130℃에서는 사고당 2시간까지 과부하 운전이 가능함을 의미하고 있다.

2.3 전선 접속개소의 경년특성

전선 접속개소 중 가장 취약한 것으로 보고되고 있는 슬리브 접속개소에 대한 경년에 따른 변화특성을 살펴보기 위하여 몇 가지 시공모델을 만들어 가속열화를 실시한 다음 그 기계적 특성을 살펴보았다.



〈그림 2〉 슬리브 시공모델(정상 및 편중 상태)

실험결과를 정리한 표 2는 표준슬리브 접속의 경우 정상 시공된 경우 정상도체보다 파괴하중이 매우 높으며 인장하중에 전혀 문제가 없으나, 강심이 파단 또는 편중된 경우에는 정상적인 도체에 비해 약 50%정도의 하중에서도 파괴될 수 있음을 보여주고 있다. 보통의 경우 실제 선로는 최악조건에서도 장력이 5,000[kgf]를 넘지 않도록 설계되어 있으므로 선로 접속부에 이와 같은 슬리브가 존재한다고 해도 즉시 사고로 연결되지는 않을 것으로 예상되나 단시간 과부하의 경우에는 급격한 온도상승으로 사고를 가속화할 수 있으므로 주의가 필요하다.

〈표 2〉 슬리브 가속열화 모델별 파괴하중 실험결과

슬리브 상태 구분	정상 도체	표준	강심 파단	편중		
				70mm	40mm	13mm
파괴하중(kgf)	13,890	14,700	7,286	8,640	7,470 (8,240)	(9,200)
50년열화		13,000	7,050	-	N/A	-

[주] ()안의 수치는 슬리브가 발생된 이후의 강심에 대한 파괴하중임

가속열화에 따른 슬리브 접속부의 열적특성은 표 3과 같다. 현재 시간 및 설비의 제약으로 편중슬리브 40mm 삽입깊이에 대해서만 실험 실시하였으며, 슬리브 불량시공에 따른 인접한 도체부분의 온도변화를 측정된 결과 슬리브에서 발생된 열이 도체부분으로도 확산됨을 알 수 있다.

〈표 3〉 슬리브 가속열화에 의한 열적특성 실험결과

구분	부하	표준슬리브		강심파단슬리브		편중슬리브(40mm)	
		열화전	50년열화	열화전	50년열화	열화전	50년열화
슬리브	100%480V	626.3mm	667	61.0	63.0	87.5	103.6(2mm)
	110%480V	719.3mm	745	71.0	71.5	98.1	121.4(2mm)
	130%4110V	900.3mm	91.1	89.0	91.0	147	157.4(2mm)
도체	100%480V	787	99.0	83.0	-	95.3(0mm)	101.2(3mm)
	110%480V	985	109.1	98.0	107.1	106.3	123.0(3mm)
	130%4110V	1234	133.5	126.0	132.0	147.5(3mm)	163.0(3mm)
압축 클램프	100%480V	544	62.3	55.0	54.7	61.0	50.1
	110%480V	627	68.1	64.0	62.0	66.9	57.1
	130%4110V	760	85.2	79.4	77.9	82.5	72.2

[주] ()안의 내용은 최대온도 발생지점이며, 표시가 없는 경우 슬리브는 0mm 내무, 도체는 200mm 지점, 압축클램프는 50mm 내무 지점의 온도임

슬리브 접속부의 취약조건으로 편중슬리브(40mm)를 고려할 경우 위에서 살펴본 바와 같이 운전조건에 따라 다르나 급격한 온도상승으로 도체가 가진 100% 열정격 부하를 인가할 수 없는 경우도 있다. 향후 몇 % 부하까지 인가가 가능한지는 추가적인 실험을 통하여 규명되어질 예정이다.

2.4 지상고 및 이격거리

국내의 전기설비기술 기준 및 한전의 이도설계 기준을 고려한 여유이격거리 산정 및 이에 따른 도체 허용온도는 다음과 같다. 여기서 Group I, II, III은 한전 이도설계 기준의 변경시기에 따른 구분을 표시한다.

〈표 4〉 여유 이격거리별 도체 허용온도

항목	Group I (~1992.6)	Group II (1992.7~1997.10)	Group III (1997.11~)
	40℃	75℃	75℃
지상고설계온도			
154kV	① 0.50m (37.60m) (51℃)	① 0.50m (39.17m) (87℃)	① 0.80m(39.47m) (93℃) ② 1.02m(39.69m) (99℃) ③ 2.80m(41.47m) (141℃)
345kV	② 1.02m (43.72m) (63℃) ③ 1.72m (44.42m) (79℃)	② 1.02m (45.25m) (99℃) ③ 1.72m (45.95m) (116℃)	④ 1.02m(45.25m) (99℃) ⑤ 2.52m(46.75m) (135℃) ⑥ 3.02m(47.25m) (147℃) ⑦ 6.72m(50.95m) (242℃)
765kV	-	-	⑧ 4.48m(64.19m) (175℃)

표 4를 바탕으로 송전선로를 전압별로 구분하여 도체의 허용온도를 추정해 보면 표 5와 같다. 여기서, '연속'은 도체의 상시허용온도, '단시간'은 1회선 고장시 대략 5~30분의 짧은 시간에 허용되는 단시간허용온도

로, '장시간'은 우회선로 등으로 부담이 완화된 상시허용온도 운전전까지의 대략 8시간 정도의 운전이 허용되는 장시간허용온도를 의미한다.

〈표 5〉 선로 전압별 구분에 따른 도체허용온도

항목	Group I (연속/장시간/단시간)	Group II (연속/장시간/단시간)	Group III (연속/장시간/단시간)
	154kV	① (51℃/51℃/51℃)	① (87℃/ 87℃/ 87℃)
345kV	② (63℃/63℃/63℃) ③ (79℃/79℃/79℃)	② (90℃/ 99℃/ 99℃) ③ (90℃/100℃/116℃)	⑤ (90℃/100℃/135℃) ⑥ (90℃/100℃/147℃) ⑦ (90℃/100℃/242℃)
765kV	-	-	⑧ (90℃/100℃/175℃)

2.5 단시간 과도정격 운영방안

신설선로에 대해서는 과부하정격 기준(예: 장시간 100℃ 8시간, 단시간 120℃ 15분) 이내에서 운전이 가능하도록 지상고 등을 설계시 반영하여 단시간 과부하 운전시의 문제에 대응하고, 기설선로의 경우는 전압 및 슬리브 설치 여부에 따라 Group I, II, III을 A, B, C, D로 세분하고 수평요소를 고려하여 아래의 표 6을 거쳐 최종적으로 표 7과 같이 분류하면 상황에 따라 단시간 과도정격 운전을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

〈표 6〉 전압별 슬리브유무에 따른 정격분류[예시]

항목	슬리브 유무	Group I (연속/장시간/단시간)	Group II (연속/장시간/단시간)	Group III (연속/장시간/단시간)
		154 kV	A (51℃/51℃/51℃)	A (75℃/ 75℃/ 75℃) B (87℃/ 87℃/ 87℃)
345 kV	有	B (63℃/63℃/63℃) C (75℃/75℃/75℃)	A (75℃/ 75℃/ 75℃)	A (75℃/ 75℃/ 75℃)
	無	B (63℃/63℃/63℃) D (79℃/79℃/79℃)	C (90℃/ 99℃/ 99℃) D (90℃/100℃/116℃)	C (90℃/ 99℃/ 99℃) D (90℃/100℃/120℃)
765kV	-	-	-	D (90℃/100℃/120℃)

〈표 7〉 송전선로의 운전정격 분류기준 및 정격[예시]

분류	분류기준	정격 (연속/장시간/단시간)
		Group I
Group II	A • 1926~19710 사이에 건설된 슬리브가 설치되어 있는 송전선로 (75℃/75℃/75℃) B • 1926~19710 사이에 건설된 상기 이외의 154kV 송전선로 (87℃/87℃/87℃) C • 1926~19710 사이에 건설된 36kV 송전선로로서 154kV이하 가공선로와 교차구간이 존재하는 송전선로 (90℃/99℃/99℃) D • 1926~19710 사이에 건설된 상기 이외의 36kV 송전선로 (90℃/100℃/116℃)	
	A • 19710년 이후에 건설된 송전선로로서 슬리브가 설치되어 있는 송전선로 (75℃/75℃/75℃) B • 19710년 이후에 건설된 154kV 송전선로로서 154kV이하 가공선로와 교차구간이 존재하는 송전선로 (90℃/93℃/93℃) C • 19710년 이후에 건설된 154kV 송전선로로서 36kV 가공선로와 교차구간이 존재하는 송전선로 (90℃/99℃/99℃) D • 19710년 이후에 건설된 상기 이외의 송전선로 (90℃/100℃/120℃)	

3. 결 론

선로의 단시간 과도정격 산정에 영향을 미치는 주요 요소들인 도체의 수명, 접속개소의 안정성, 선로의 이격거리 여유에 대한 조사 및 실험을 바탕으로 국내 상황에 적합한 과도정격 운영방안을 제시하였다. 향후 슬리브 접속개소에 대한 시공모델을 세분화한 추가 실험을 실시하고, 실선로 현장의 슬리브 접속시료를 확보 및 실험을 통해 경년에 따른 과도정격 운영방안을 보강해 나갈 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, "국내 송전선로 설비특성을 고려한 단시간 과도정격 운영기준 정립"의 2차년도 진도보고서, 2008.1
- [2] 김성덕, 송훈관, 장태인, "2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가방법", 조명전기설비학회논문지, 2007.8
- [3] 산업자원부 "가공송전선 허용용량산정 시스템개발"의 최종보고서, 2005.9