

지중송전선로 실시간 송전용량 산정 시스템 개발(I) -실시간 도체온도 산정 시스템-

남석현*, 이충환, 이수길, 백주홍
LG전선(주) 전력연구소

The Dynamic Rating System(I) -Real Time Conductor Temperature Monitoring System

S.H. Nam*, C.H. Lee, S.K. Lee, J.H. Baek
Electric Power Research & Technology Center, LG Cable Ltd.

Abstract

The real-time dynamic rating system(DRS) can provide the maximum ampacity within required periods, so it can help the transmission-line operation more safely and efficiently. Because the conductor temperature is the main limit of increasing rating current, conductor temperature monitoring(CTM) technology is the basic to DRS.

In this paper, real-time CTM was developed for 345kV XLPE cable in tunnel and we have also compared the CTM result of this study with the result according to IEC 287 and JCS 168 thermal parameters.

1. 서 론

국내 전력 계통은 산업의 발달 및 국민 생활의 질적 향상에 따른 부하 증가에 대처하기 위한 전력 확충의 필요성이 증가하고 있다. 특히, 하절기 집중부하 시에는 에어컨 등 냉방 부하의 증가에 따라서 전력 예비력 확보가 어려울 뿐만 아니라 부하의 집중에 따른 혼잡선로(과부하선로)가 발생하는 문제점을 암고 있다. 하지만, 일반적으로 송전케이블의 송전 허용 용량은 케이블의 물리적인 최대 용량에 비해서 상당한 여유치를 가져왔다. 이러한 비경제적인 제약을 기술적으로 해결하기 위하여, 해외 전력회사들은 케이블의 포설 환경변수의 변화를 측정/감시하여 케이블 및 주변 매질의 열 저항과 열 용량의 변화를 모두 고려, 실시간으로 허용전류를 산정하는 기술을 개발하여왔고, 나아가 일정한 기간 동안의 최대 허용 전류를 실질적으로 예측하는 기술의 도입으로 송전선로의 송전효율을 극대화시키는 방법을 채택, 운용하는 추세이다[1][2].

본 논문에서는 과도 상태시의 송전용량 산정기술을 바탕으로 실시간 허용전류 산정시스템의 구현을 위한 도체온도 추정 알고리즘 및 345kV XLPE 2000mm² 케이블을 대상으로 실시한 전력구 환경에서의 모의 실증 시험 결과와 해외 규격인 IEC 287, JCS 168의 열정수를 통하여 시뮬레이션 한 결과를 비교하고자 한다.

2. 본 론

2.1 열모델링

실시간 도체 온도 산정 시스템을 위해서는 케이블 자체 뿐 아니라, 그 케이블이 포설되어 있는 환경을 모두 고려하여 열모델링을 하는 것이 중요하다.

본 연구에서 대상으로 한 케이블은 345kV XLPE 2000mm²로서, 도체의 재질은 구리이며, 분할압축 방식을 적용하여 제조되었고, 금속 시스는 알루미늄을 기계적 특성을 고려하여 굴곡진 형상으로 제조한 것이다. 금속 시스 절연을 위한 자켓의 재질은 PVC이다.

일반적으로, 케이블 내부의 열모델링은 제조사와 사용하는 재질 및 케이블 내부 구조에 따라서 많은 차이가 있고, 케이블 포설 환경은 케이블 거리에 따라 일정하지 않으며, 시간에 따라서 변하는 특징을 가지고 있다. 따라서, 케이블의 송전용량을 실시간으로 산정하기 위해서는, 케이블 도체온도의 산정에 있어서 케이블과 포설 환경의 열적 과도특성을 고려해야 한다[2].

본 연구에서는 전력구에서의 열적 단시간 과도특성을 가정하고 집중 열정수 방식을 사용하여 열모델을 수립하였고, 이러한 열모델을 그림 1에 나타냈다.

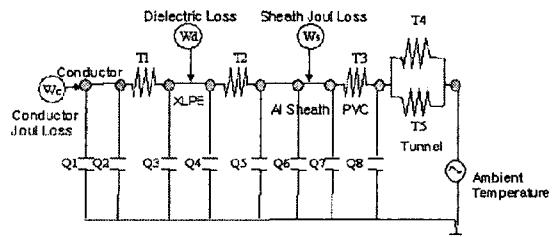


그림 1. 345kV XLPE 케이블 시스템의 열모델

케이블 도체에서, 통전에 의한 발열량은 IEC287과 IEC WG10, JCS168에서 각각의 특색을 가지고 규정하고 있지만 IEC287은 낮은 교류 저항값을, IEC WG10은 케이블의 형상에 따라서 큰 오차범위를, 그리고 JCS168은 높은 저항값을 가지는 것으로 알려져 있다[4][5].

따라서, 정확한 케이블 및 포설 상태에 따른 열정수를 얻기 위해서는 케이블의 특성과 포설상태 등을 고려하여야 하고, 이를 실험값으로 검증하는 절차를 거친 후 가장 근사한 규격을 선택해야 한다. 절연체에 대한 등가회로는 송전급 케이블의 경우, 절연두께가 10mm 이상임을 감안할 때 2개 이상의 Π형 분포 등가 회로로 근사하여 과도상태의 열 분포를 정밀하게 계산해야 한다.

2.2 열정수의 보정

케이블 도체온도를 실시간으로 계산하기 위해서는 그림 4에 나타낸 케이블 내/외부 열 정수를 IEC287과 JCS168 등의 규격을 이용하여 구한 후, 실증시험을 통해서 각 열 정수에 대한 보정계수를 산출하여 최종적인 열 정수를 설정한다.

케이블 내부의 열정수를 산출함에 있어서, 해외 규격인 IEC 287과 JCS 168 사이에는 몇 가지 차이점이 있으며, 가장 큰 차이는 XLPE의 열저항률과 굴곡 형태의 금속 시스 안쪽의 공기층의 고려 여부이다. JCS 168의 경우, 금속 시스 내부의 공기층을 방산 열저항 형식으로 고려하고 있으나, IEC 287의 경우, 이에 대한 고려가 없는 상태이다. 최근의 일본 연구 결과에 따르면 시스 내부 공기층의 방산 열저항률이 시스 온도에 따라 0.016에서 0.081사이의 값을 가지고 있다고 보고되고

있다[3].

금속 시스 내부의 공기는 케이블 도체로부터의 열류를 차단하는 단열 특성을 가지고 있으므로, 도체 온도 상승에 큰 영향을 끼치지만, 시스 온도에 따라서 그 값의 변화가 크고, 실선로에서는 이의 열저항의 측정은 거의 불가능한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 금속 시스 내부의 공기층의 열저항을 보정계수로 설정하고, 당사에서 제조한 345kV XLPE 케이블에 알맞는 열저항을 측정과 시뮬레이션을 통하여 산출하였다.

전력구 환경 열정수는 실시간 측정을 통하여 케이블 길이에 따른 변화 및 시간에 따른 변화 모두를 고려할 수 있도록 하였다.

또한, 각 열정수의 당사 케이블에 맞는 정확한 보정을 위하여 열정수 보정 시험을 실시하였다. 시험용 케이블은 양 단말로부터 열전도의 영향이 없도록 길이를 25m로 정하였다. 케이블이 전력구 환경에 포설된 것을 모의하여 전력구와 유사 환경에서 크리트와 지지대를 이용하여 고정하였으며, 전류는 통전용 CT를 이용하여 최대 3000A까지 인가되었고, 시험 케이블 25m 중 세 부분을 선택하여 도체, 절연체, 금속 시스, 케이블 표면, 외부에 온도센서를 부착하였고, 온도 데이터는 30초마다 전송되었다. 열정수 보정시험 결과 및 이의 해외 규격과의 비교를 표 1에 나타냈다[3][4].

표 1. 열정수 보정 결과 및 해외 규격과의 비교

항목	IEC 287	JCS 168	보정결과
XLPE 열저항률 [K · m/W]	3.5	4.5	3.5
도체 직류 저항(20°C) [$\times 10^{-6} \Omega$]	9	9.148	9
표피효과계수	0.435	0.532	0.435
시스 내부 공기층 열저항률[K · m ² /W]	-	0.072	보정계수
전력구 열저항 [K · m/W]	0.1659	0.1914	실시간 측정

2.3 실시간 도체 온도 산출 시스템의 구현

열 등가회로를 실시간으로 계산하는 수치해석 알고리즘을 개발하고 계산에 필요한 열정수의 측정을 위한 시스템을 구현. 국내 최초 적용을 앞두고 있는 345kV XLPE 2,000mm² 케이블을 대상으로 실시간 도체 온도 산출 시스템을 구현하고, 실선로 적용을 위한 CTM 실증 시험을 실시하였다.

그림 1에서 나타낸 열모델은 연립 미분 방정식을 푸는 수치 해석법으로 알고리즘을 구현할 수 있는데, 계산 시간 및 정확도를 모두 고려했을 때 비교적 적합하다고 알려져 있는 Runge-Kutta-4th법을 사용하였다. 전 선로에 대해서 도체온도를 추정하기 위하여 연립 미분 방정식을 풀어내는 시간은 데이터 처리 시간을 고려하여 30초 이내로 제한하였다. 또한, 전력구 환경의 거리에 따른 차이 및 시간에 따른 변화를 검출하기 위하여 팽개이블 센서를 이용한 분포온도 측정 시스템을 이용, 선로의 길이에 따른 전력 케이블 표면의 분포온도를 측정하여 선로 중 온도가 가장 높은 부분(Hot spot)을 분포온도 측정 시스템에서 검출한다. 본 시스템은 이 지점에서의 도체온도를 DRS 본체의 CTM 모듈에서 실시간으로 산정하는 것을 특징으로 갖는다.

본 시스템에서 구현된 실시간 도체온도 산출 시스템의 구성도를 그림 2에 나타냈다.

전력구 근처의 열정수 측정 모듈은 전력구 주변 온도 및 부하전류를 측정하고 이 데이터를 Ethernet 광전송

장비를 이용하여 주국까지 전송하게 된다. DRS 본체의 DBMS는 전력케이블 재질 및 구조에 따른 비열 및 열저항률 등의 물리적 상수 및 자체 보정값을 CTM 모듈에 연결해주는 역할을 담당한다.

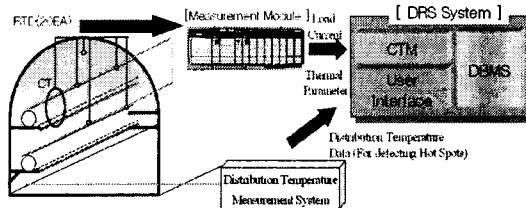


그림 2. 실시간 도체온도 산정 시스템 구조

2.4 실험결과

실선로에 실시간 도체온도 산정 시스템의 적용에 있어서 가장 중요한 점의 그 온도의 신뢰성이다. 본 시스템의 주요 알고리즘은 열모델링을 수치 해석적으로 접근하므로, 오차의 누적이나 초기값에 의한 오차의 확대 등의 문제를 가질 수도 있다. 이러한 점을 극복하기 위해서 열분포의 해석을 전력구 주변 온도에서부터 케이블 도체까지 해석하는 방법을 선택하여 케이블 표면에서의 오차를 실시간으로 감시할 수 있도록 하였다. 전력구 및 케이블의 모든 열정수의 정확한 보정을 위해서 전력구 모의 선로를 이용하여 통전된 상태에서 열정수를 보정하여 케이블 표면, 쉬스 표면, 절연체 및 도체 온도의 계산값과 측정값의 오차를 최소화하는 데 성공하였다. 이 보정된 열정수를 전압이 가해져 있는 DRS 실증 시험용 선로의 도체 온도 산정 시스템에 그대로 적용하여, 측정이 가능한 케이블 표면 온도의 계산값과 측정값의 오차를 최소화하는 것으로 도체 온도 역시 실시간으로 산정되는 값과 실제 온도는 차이가 없다는 신뢰성을 얻을 뿐 아니라, 이상 동작을 하게 될 경우, 그 이상의 겸증과 문제 해결이 쉬워지는 장점을 갖게 된다.

보정된 열정수의 효용성을 분석하기 위하여 그림 1의 열모델에 IEC 287과 JCS 168에서 제시하는 열정수를 사용하여 도체 온도를 추정하였으며, 그 결과를 각각 그림 3, 그림 4에 나타냈다. 또한, 본 연구에서 보정된 열정수를 사용한 도체온도 추정 결과를 그림 5에 나타냈다.

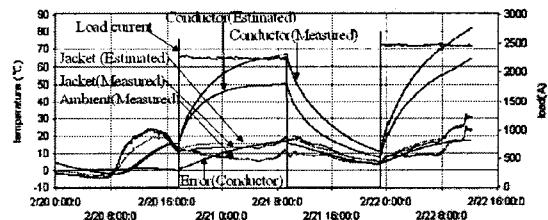


그림 3. IEC 287 열정수 이용 도체 온도 추정 결과

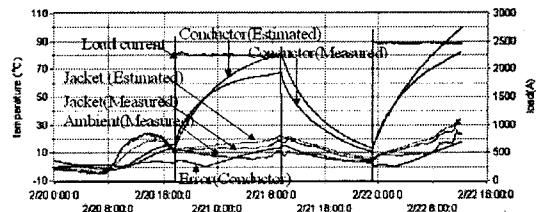


그림 4. JCS 168 열정수 이용 도체 온도 추정 결과

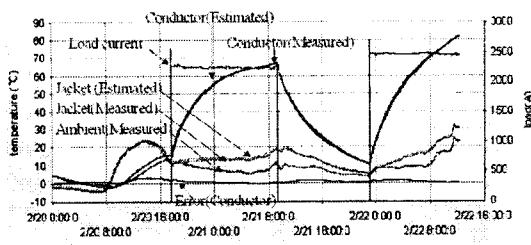


그림 5. 보정 열정수 이용 도체 온도 추정 결과

그림 3, 4, 5의 결과로부터 각각의 도체 온도 추정 오차는 다음과 같음을 알 수 있다. IEC 287 열정수를 이용한 경우의 도체 추정 온도는 추정 온도 80°C 부근에서 약 18°C 낮은 결과를 보이며, 이와 반대로 JCS 168 열정수를 이용한 도체 추정 온도는 추정온도 80°C 부근에서 약 17°C 높은 온도를 나타내고 있다. 본 연구에서 보정된 열정수를 이용한 경우, 추정 도체 온도와 추정 도체 온도 사이의 온도 오차는 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내이었다. 또한, 여기서 주목할 것은 도체 온도 뿐 아니라, 추정된 케이블 표면 온도의 측정된 온도와의 오차도 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내이었으며, 이는 실선으로 적용 시에 도체온도의 오차를 케이블 표면온도의 오차로 관리하여 시스템의 정확성을 실시간으로 평가하는데 기여할 수 있다는 점이다.

2.5 토의

도체온도 산출 모델 및 케이블의 송전용량 산정에 있어서 열모델 및 열정수는 가장 중요한 인자이지만, 몇몇 열정수의 경우, 국제 규격들 사이에 약간의 차이를 보이고 있다. 국내에서 사용되는 대표적인 규격인 JCS 168의 경우, 도체 추정 온도가 추정온도에 비하여 높은 값을 나타내고 있으며, IEC 287의 경우, 도체 추정 온도가 추정온도보다 낮은 값을 보이고 있다.

이러한 차이는 주로 XLPE의 열저항률의 차이와 금속시스 아래의 공기층의 열적 고려 여부에 따라서 나타났다. XLPE의 열저항률은 JCS 168에서는 4.5로 규정하고 있지만, 최근의 일본의 연구 결과 조차도 3.5로 규정하는 것이 타당하다고 보고되고 있는 실정이다[3].

하지만, IEC 287에서는 굴곡 형상 금속 시스 아래의 공기층을 열적으로 고려하지 않고, 절연체의 연장으로 파악하여 열모델하고 있다. 비록 공기층의 두께가 얕고 케이블의 일부분은 절연체와 금속 시스가 직접 닿아 있는 구조를 가지고 있지만, 공기층은 케이블 도체로부터의 열류를 막는 단열 역할을 하여 도체 온도 상승에 큰 영향을 미치고 있다.

JCS 168에 따르면 이러한 열저항은 코아 표면 열방산 계수로 고려되고 있다. 하지만, 최근의 일본 연구 결과에 따르면 공기층의 열방산 계수가 케이블 및 금속시스의 온도에 따라서 0.016~0.081의 값을 갖는다고 보고되고 있다[3].

본 연구에서는 추정 온도의 정확성을 증대시키고, 케이블 형식 및 온도에 따른 변화를 고려하기 위하여 공기층을 고려한 코아 열방산 계수를 보정계수로 삼아 추정온도의 오차를 최소화시키는데 성공하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 실시간 도체 온도 산정 시스템이 분포온도 측정 시스템과 연계되어 실시간 송전용량 산정시스템의 기본 모듈로서 개발되었다.

- 1) 실시간 도체 온도 산정 시스템은 도체온도 및 케이블 표면온도에 최대 오차 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내로 추정하는데 성공

하였다.

2) 실시간 도체 온도 산정에 있어서 정확성을 높이기 위하여 케이블 및 포설 환경에 대한 열정수는 측정을 통하여 보정되었다.

3) 케이블 길이 방향과 포설 환경에 대한 시간에 따른 변화를 고려하기 위하여 광파이버 센서를 이용한 분포온도 측정시스템을 연계하여 실시간 도체온도 산정 시스템을 개발하였다.

4) 본 시스템을 실선로에 적용할 경우, 추정 도체온도의 정확성 및 시스템 오류는 추정 표면온도와 추정 표면온도 사이의 오차를 관리함으로써 손쉽게 개선될 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.J. Nelson et al, "The Application of Real-time Monitoring and Rating to HPOF Pipe cable systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989
- [2] Dale A. Douglass et al, "Real-Time Monitoring and Dynamic Thermal Rating of Power Transmission Circuits", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
- [3] "地中送電線の送電用量設計", 日本電氣協同研究 53 卷 第3号, pp. 4-64, 1998.
- [4] IEC Standard 287, "Calculation of the continuous current rating of cables(100% load factor)", 1993
- [5] "地中ケーブルの許容電流" JCS 第 168号 E, 日本電線工業會, 1995.
- [6] IEC Standard 60853-2, "Cyclic rating of cables greater than 18/30(36) kV and emergency ratings for cables of all voltages", 1989