

지중케이블 잔존수명 평가방법 분석 및 개선방안

김용환*, 장승진*, 김호준*, 정문강*, 한예진*, 이형민*, 서덕기**, 손천명**, 신용준*
연세대학교 전기전자공학과*, 한전 KDN**

Estimation Method of Underground Cable Remaining Life Analysis and Improvement Method

Yong Hwan Kim*, Seung Jin Chang*, Ho Jun Kim*, Moon-Kang Jung*, Yee Jin Han*, Hyeong Min Lee*,
Duck-Ki Seo**, Chun-Myung Son**, Yong-June Shin*
School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University*, KEPCO KDN**

Abstract - 국내에서 XLPE 지중케이블이 처음 포설된 지 30년이 경과하였으며, XLPE 케이블의 수명은 일반적으로 30~40년 정도이기 때문에 케이블의 교체시기에 대한 문제가 대두되고 있다. 본 연구에서는 국내의 지중케이블 잔존수명평가 알고리즘의 장단점을 분석하고 국외의 잔존수명평가 알고리즘에서 국내 잔존수명평가 알고리즘의 단점을 보완할 점을 분석하였다. 또한 잔존수명 평가 알고리즘을 개선하는 것 외에 알고리즘에 사용되는 데이터의 통합 관리방안을 제시하였다.

건들에 의한 함수에 대입해 최종 잔존수명을 계산한다. 또한 계산된 잔존수명을 고장이 미치는 영향, 케이블 교체소요시간과 소요비용 등을 모두 고려해 계통 운영자가 최적의 케이블 유지보수 및 교체시기를 판단할 수 있도록 결과값을 제공한다. 입력 데이터가 부족하다면 관련된 다른 입력 데이터들을 통해 부족한 입력 데이터를 추론하거나 비슷한 조건의 다른 케이블의 데이터를 사용하여 통계적 추론을 수행해 최종 결과를 산출해낼 수 있다. 이런 경우는 모든 데이터가 입력되어 산출된 결과보다 신뢰도가 하락하게 된다.

1. 서 론

1971년 154kV 첫 OF 지중케이블이 당인리 발전소와 용산변전소 사이에 포설된 지 40여년이 경과하였다[1]. 154kV급 XLPE (Cross Linking -Polyethylene) 지중케이블도 포설된 지 30년이 경과했다. 또한 최근 도시 미관의 중요성이 강조됨에 따라 가공선로로 포설되던 특고압 송전선로가 대도시 지역의 변전소까지 지중케이블로 포설되는 경우가 많아졌다. 2013년 12월 말 기준 지중케이블로 포설된 송전선로의 길이는 2012년 12월 말 포설된 길이에 비해 154kV 지중선로는 5.8%, 345kV 지중선로는 2% 증가한 66kV 1.4km, 154kV 1700km, 345kV 96km 이다[2, 3]. 이러한 통계에서 확인할 수 있듯이 지중 송전선로의 길이는 점차 증가하는 추세이다. 송전케이블의 지중화율이 증가하고 포설된 지 시간이 많이 경과함에 따라 지중케이블의 상태를 진단하는 기술과 알고리즘의 필요성이 커지고 있다. 진단기술에는 부분방전 측정법, 유전손실 측정법 등의 진단기술이 개발되어 사용되고 있으나 지중케이블 특성상 고장이 발생하기 전 수시 점검을 통해 고장을 예방하는 것이 어렵다.

이러한 지중케이블의 단점을 극복하기 위해 외국에서는 지중 케이블 선로의 다양한 데이터를 이용해 지중케이블의 잔존수명을 예측하는 알고리즘을 개발하고 있다. 본 논문에서는 국외의 잔존수명 평가 알고리즘을 분석하고 알고리즘의 부족한 점을 보완할 방법을 제시하였다.

2. 잔존수명 평가 모델 분석 및 개선방안

2.1 국내 잔존수명 평가 모델 분석

국내에서도 지중케이블의 수명평가의 중요성을 인식하고 자체적으로 수명평가 알고리즘을 개발하고 있다. 국내에서 개발한 수명평가 알고리즘은 주요 입력파라미터로 최대 부하별 운전년수, 관로와 전력구의 길이 및 비율, 휴전횟수 등을 사용한다. 이 입력파라미터들을 알고리즘의 수식에 대입하여 열적 스트레스, 전기적 스트레스, 물리적 스트레스 점수를 계산해 진단도 평가점수를 산출한다. 한편의 잔존수명 평가알고리즘은 100점 만점을 기준으로 한 구체적인 점수가 산출되는 것이 장점이다. 해당선로의 수명평가 결과가 구체적인 점수로 산출되기 때문에 점수대별로 계통운영자가 취해야 할 조치 단계를 수립할 수 있다.

하지만 알고리즘에 사용되는 입력 파라미터들 중 일부는 수명평가 알고리즘에 큰 영향을 주지 않고 있다. 예를 들어 나뒹 힌수의 경우, 대부분의 선로가 낙뢰를 경험하지 않는다. 또한 평가결과에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터인 최대 부하별 운영기간이 최근 10년간의 운전 데이터만을 사용하기 때문에 운영기간이 10년을 초과한 선로가 상대적으로 평가점수가 더 높게 나오는 경향이 있는 것 또한 단점이다.

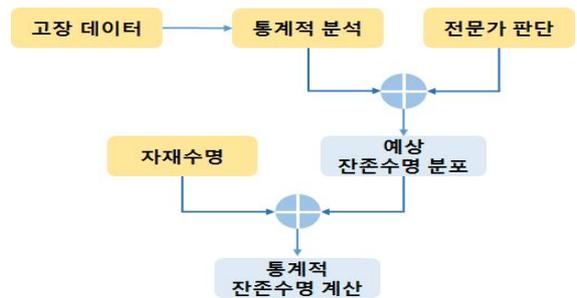
그러므로 입력 파라미터를 추가하고 각 파라미터별 가중치를 조정할 필요가 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 해외에서 개발 중인 잔존수명평가 모델을 분석하고 국내 상황에 맞는 해결책 및 보완책을 강구할 필요가 있다.

2.2 해외 잔존수명 평가 모델 분석

현재 해외에서 개발 중인 지중케이블 잔존수명평가 알고리즘은 지중케이블의 데이터들을 입력 파라미터로 사용하여 통계적 모델링을 통해 고장확률을 산출하고 산출된 고장확률을 선로운영데이터와 주변 환경조

2.2.1 통계적 평가함수

통계적 평가 함수는 지중케이블의 실제 고장 데이터를 이용해 통계적인 잔존수명의 분포를 산출하는 함수이다. 고장 데이터로는 단락전류, 단락시간, 단락횟수 등이 있지만 모든 고장 데이터 수집은 현실적으로 어렵기 때문에 현재까지의 잔존수명 평가 모델에 모든 고장 데이터를 사용하지 않는다. 고장 데이터가 부족하다면 비슷한 조건의 다른 선로의 고장데이터를 활용하여 고장확률을 계산하고 이것을 이용해 잔존수명의 분포를 산출한다. 그림 1은 통계적 잔존수명을 산출하는 다이어그램, 표 1은 통계적 평가함수의 주요 입력 파라미터이다.



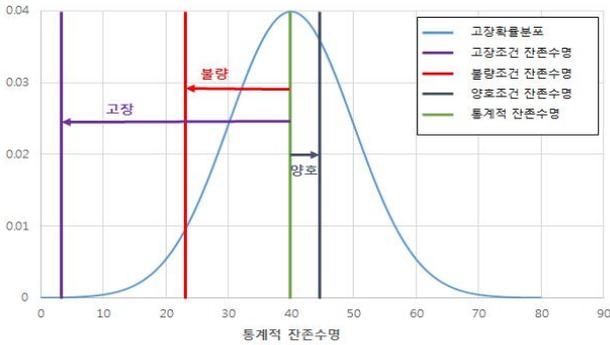
<그림 1> 통계적 잔존수명 평가 순서도

<표 1> 통계적 평가함수 주요 입력 파라미터 예시

파라미터	단위	정의
단락전류	[kA]	최대 단락 전류
단락시간	[ms]	단락이 지속된 시간
단락횟수	[#]	가장 최근의 유지, 보수 이후 단락횟수
부하변동 50% 초과횟수	[#]	부하변동이 정격전류의 50%를 초과한 횟수
단락횟수	[#]	가장 최근의 유지, 보수 이후 단락횟수

2.2.2 조건 평가함수

통계적 평가 함수에서 산출된 잔존수명의 분포는 선로의 고장만 고려했을 뿐 선로의 상태조건이 고려되지 않은 분포이다. 그렇기 때문에 선로의 상태조건을 고려하여 잔존수명의 분포가 이동하게 된다. 그림 2는 선로의 상태조건에 따른 통계적 잔존수명 분포가 이동한 결과의 한 예이다.



〈그림 2〉 조건 평가함수

잔존수명의 분포의 평균값이 조건 지표의 상태에 따라 감소 또는 증가하게 된다. 조건지표의 주요 파라미터는 표 2와 같다.

〈표 2〉 조건 평가함수 주요 입력 파라미터 예시

파라미터	단위	정의
시스 전압 테스트	[Level]	시스유기전압의 정도를 4단계로 표현
일반적 조건	[Level]	케이블의 전반적 상태를 4단계로 표현
부분방전	[Level]	부분방전의 결과를 3단계로 표현
방수 여부	[Y/N]	케이블의 방수처리 여부

2.2.3 운영 평가함수

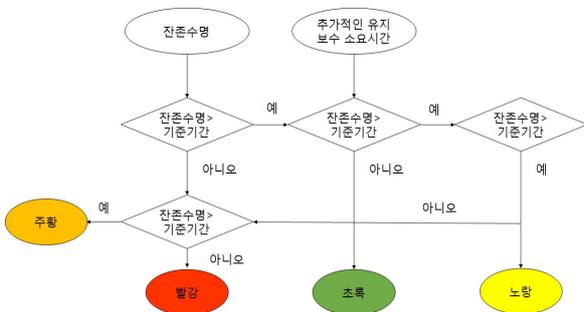
지중케이블 선로의 사용이력(부하이력, 기계적 조건, 계통전압 등)을 입력 파라미터로 선정 후 열화 모델을 통해 잔존수명에 미치는 영향을 결정한다. 운영 평가함수에 사용되는 주요 입력 파라미터는 다음과 같다.

〈표 3〉 운영 평가함수 주요 입력 파라미터 예시

파라미터	단위	정의
계통 전압	[kV]	선로의 계통 전압
기계적 조건	[#]	케이블이 포설된 도로의 공사로 인한 침하 횟수
최대부하이력	[%]	최소 4시간 이상 지속된 최대부하의 비율
연평균 부하증가율	[%]	매년 평균적인 부하 증가율
단락횟수	[#]	가장 최근의 유지, 보수 이후 단락횟수

2.2.4 통합 함수

통합 함수는 운영 평가함수에서 산출된 잔존수명 분포와 조건 평가함수에서 산출된 잔존수명분포 중 짧은 잔존수명 분포를 최종 잔존수명 분포로 결정한다. 최종 산출된 잔존수명과 임계 시간과 기준 시간 두 종류의 파라미터를 비교하여 해당 케이블의 상태를 4가지의 색으로 표현한다. 색을 결정하는 순서도는 다음과 같다.



〈그림 3〉 색 결정 순서도

〈표 4〉 통합함수 결과 색별 의미

색	설명
초록	기준 기간 내에는 양호
노랑	기준 기간 내에 추가적인 유지보수가 필요
주황	기준 기간 내에 고장이 발생할 확률이 급격히 증가 (10년 이내)
빨강	임계 시간 내에 고장이 발생할 확률이 급격히 증가 (5년 이내)

2.3 개선방안

해의 잔존수명 평가 알고리즘에서 사용하는 고장데이터는 열화로 인해 자연적으로 발생한 고장 데이터만 사용한다. 하지만 운영자의 실수로 인한 고장, 잘못된 시공으로 인한 손상 등도 케이블의 상태에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 조건 평가함수 입력 파라미터에 비기술적 고장 데이터(낙뢰, 시공자의 실수)도 포함한다면 신뢰도가 더 높은 잔존수명 평가 결과를 얻을 수 있을 것이다. 특히 낙뢰에 의한 서지전압은 그 크기가 수 kV~수십 kV에 달해 계통에 미치는 영향이 크다. 이러한 서지 전압이 지중선로에 침투한다면 순간적인 과전류로 인해 케이블의 열화를 가속시키기 때문에 지중케이블의 수명을 계산할 때 서지시의 의한 영향을 고려할 필요가 있다. 서지시에 케이블의 열화에 미치는 영향을 모델링을 통한 시뮬레이션 또는 실증실험을 통해 정량화하여 수명평가 알고리즘에 반영할 필요가 있다. 서지시에 의한 영향뿐 아니라 개폐서지로 인한 과전압 또한 지중케이블 열화에 미치는 영향을 정량적으로 모델링해 수명평가 알고리즘에 반영할 필요가 있다. 입력 파라미터 중 일부는 3~4 가지의 단계로 표현이 되는데 이러한 파라미터들을 입력할 시 단계가 아닌 정량적인 값 또는 비율을 입력한다면 결과값의 신뢰도가 향상될 것이다. 개선된 해외 알고리즘을 국내 잔존수명 평가 알고리즘과 융합하여 현재 국내의 잔존수명 평가 알고리즘의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

알고리즘 자체의 개선뿐 아니라 입력 데이터들의 종합적인 관리 솔루션이 필요하다. 현재 시스템에서는 입력 파라미터로 사용되는 지락전류, PD 측정결과, 부하이력 등을 여러 담당 부서에서 개별적으로 관리하고 있다. 하지만 지중케이블의 수명평가 알고리즘을 효율적으로 운영하기 위해서는 입력 파라미터들을 통합적으로 관리하는 것이 필요하며, 이는 수명평가 알고리즘에 즉각적으로 반영되어 정확한 현재의 상태를 확인할 수 있도록 할 것이다.

3. 결 론

현재 국내에 포설된 케이블의 운전년수를 고려한다면 빠른 시간 안에 지중케이블의 잔존수명을 평가하는 알고리즘을 개발, 최적의 유지보수 시점을 판단하는 것이 중요하다. 외국에서 개발 중인 수명평가 알고리즘을 국내 설정에 맞게 입력 파라미터들을 조정하고 수명에 영향을 미치는 다른 파라미터들을 추가한다면 국내 지중케이블의 잔존수명을 평가하여 최적의 운영전략을 수립할 수 있을 것이다. 또한 케이블의 수명평가 알고리즘을 확장해 다른 설비들의 수명을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 윤형희 외 16인, “지중 케이블 시스템 공학”, Cigre 한국위원회, pp. 5-6, 2014.
- [2] 한국전력공사, “한국전력통계”, 83호, pp. 94, 2014.
- [3] 한국전력공사, “한국전력통계”, 83호, pp. 94, 2013.
- [4] IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power cable systems, IEEE Std. 400-2001, Jan. 2002.
- [5] CIGRE Technical Brochure 358 “Remaining life management of existing AC underground lines”, Oct. 2008.

[감사의 글]

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구임(No. NRF-2012M2A8A4055236 & No. NRF-2014R1A2A1A01004780).

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.2013101501790).