

# Distribution Transformer Statistical Expected Life Evaluation and Removal Adequacy Review

## 배전 변압기의 통계적 기대 수명 평가 및 초기 고장제거 적정성 검토

Chong-Eun Cho, Sang-Bong Kim, On-You Lee, Kang-Sik Kim  
조종은, 김상봉, 이온유, 김강식

### Abstract

Recently, the amount of maintenance is increasing due to the aging of power facilities, but the budget is constrained. Therefore, the importance of asset management that selects replacement priorities based on the failure probability and enhances investment effects is increasing. Because the number of distribution transformers is very large, the proportion of investment cost is very high. Therefore, it is important to select the investment priority by evaluating the reliable remaining life based on the failure probability. This paper evaluates the statistical expected life using the failure data of distribution transformers for the last 11 years and the current operation data. The hazard rate of distribution transformer and MV cable was compared with each other and the adequacy of early failure removal was reviewed and the statistical expected life corresponding to the cumulative failure probability B3% was calculated.

*Keywords: Asset Management, AMS, Distribution Transformer, Expected Life, Life Expectancy, Cut-off Year, Hazard Rate, Weibull, Risk Matrix, PoF, CoF, AIP, Scale Parameter*

### I. INTRODUCTION

자산관리(Asset Management)는 설비의 리스크(Risk), 비용, 성능을 복합적으로 고려하여 교체의 우선순위를 선정하고 및 운영비용을 최적화하는 기술이다. 자산관리의 목적은 전력계통의 안정성을 확보하고 정해진 예산범위내에서 최적으로 자산을 교체 및 수리하기 위하여 우선순위를 선정하기 위함이다.

KEPCO에 적용할 자산관리 대상 기자재는 송변전 5종, 배전 5종으로 투자비중이 높은 설비 위주로 10종이 우선 선정되었다. 송전 3종은 XLPE/OF케이블, ACSR 전선, 변전 2종은 전력용 변압기, 개폐장치, 배전 5종은 주상/지상변압기, 가공/지상개폐기, 케이블이며 향후 대상기자재를 확대할 예정이다[1].

우리나라 전국에 전력을 공급하기 위하여 KEPCO에서 관리하는 배전용변압기는 2021년 1월 기준으로 주상변압기 약 237만대, 지상변압기는 약 6.5만대에 이른다. 배전용변압기는 투자비가 높은 비중을 차지하고 있어 고장확률 기반의 신뢰성 높은 잔여수명 산출로 투자 우선순위를 선정하는 것이 중요하다. 본 논문은 주상 및 지상변압기의 통계적 기대수명(이하 기대수명) 산출과정과 초기고장 제거년수(Cut-off Year)의 적정성에 대하여 살펴보았다.

본 논문은 배전 5종 중에서 배전용변압기의 수명평가와 관련하여 최근 11년간(2011~2021년)의 저압고장 데이터를 활용하여 기대수명을 산출하였다. 고장데이터는 주상변압기 75,324건 중에서

중복되는 고장을 제거하고 열화고장 27,980건을 추출하였으며, 지상변압기는 5,145건중에서 중복되는 고장을 제거하고 열화고장 1,408건을 추출하여 기대수명을 산출하였다[2].

또한 배전용케이블과 배전용변압기의 순간고장률의 추이를 상호 비교하고 초기고장 제거년수(Cut-off year)의 적정성을 검토하였다. 향후 배전용변압기의 기대수명 산출의 정확도를 높이고 자산관리시스템 고도화에 기여할 것으로 기대한다.

### II. Statistical Life Evaluation of Distribution Transformer

#### A. 자산관리시스템(AMS)의 구성 및 기능의 변화

자산관리시스템(AMS)은 자산성능평가(APM : Asset Performance Management)와 투자 최적화(AIP : Asset Investment Planning) 기술을 통합한 것을 말하며 구성도는 Fig. 1과 같다. 자산성능평가 기술은 자산을 교체 및 수리하기 위하여 리스크(Risk)를 기반으로 투자 우선순위를 선정하는 기술이다.

투자 최적화 기술은 전력회사의 자산관리 정책과 제한된 조건(예산, 호당정전시간 등)에서 투자 효과를 극대화하기 위해 전력설비 투자에 대한 가치를 평가하고, 투자계획 의사결정을 최적화하는 기술이다.

과거에 자산관리의 기능은 교체 비용과 리스크를 고려하지 않

### Article Information

Manuscript Received April 24, 2022, Accepted September 16, 2022, Published online December 30, 2022

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Jintae Cho (jintae.cho@kepcoco.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepcoco.kr>.

고 고장이 발생하지 않도록 성능 유지에 초점을 맞추다 보니, 리스크가 낮은 설비도 교체되므로 교체 비용이 과다하게 발생하는 문제점이 있었다.

앞으로 노후 설비가 지속 증가할 경우 전력회사가 부담해야 할 유지보수 비용은 경영상태를 위협할 만큼 증가한다. 따라서 향후 자산관리의 기능은 Fig. 2와 같이 리스크, 비용, 성능 3가지를 모두 고려하여 고장은 적정수준을 유지하고 투자비 효과를 극대화하는 투자최적화를 달성하는 것이 중요한 목표이다.

**B. 배전용 변압기 리스크 평가 기본모델**

자산성능평가(APM)는 설비의 리스크(Risk)를 평가하여 교체대상 우선순위를 선정하는 과정으로 배전용변압기의 리스크 평가 기본모델은 Fig. 3과 같다.

리스크 매트릭스(Risk Matrix)는 자산의 위험성을 정량화하는 기법으로 가로축은 고장확률(PoF)이며 통상 5단계로 구분하며 우측으로 갈수록 고장확률이 높아진다. 세로축은 고장영향(CoF)으로 통상 5단계로 구분하며 위로 갈수록 고장영향이 커진다. 고장확률은 자산의 고장, 상태 및 부하데이터를 이용하여 최종 잔여수명을 산출하며, 고장영향은 고장발생으로 인하여 파급되는 영향을 재무, 안전, 환경, 신뢰도 등의 측면에서 평가하게 된다. 개별 설비의 리스크는 최종 잔여수명을 고장확률로 변환한 값에 고장영향을 곱하여 산출하며, 리스크 매트릭스의 우측상단의 적색 부분은 위치한 설비는 리스크가 높다고 할 수 있다.

**C. 고장확률(PoF) 모델**

고장확률(PoF)의 산출과정은 먼저 고장데이터와 운영데이터를 활용하여 통계잔여수명을 산출한다. 그 후 진단, 점검 등 상태데이터를 활용하여 상태가 좋은 설비는 통계 잔여수명에서 더하고 상태가 나쁜 설비는 통계 잔여수명에서 빼서 상태 잔여수명을 산출한다. 부식, 누유 및 광학진단은 주상 및 지상변압기에 공통으로, 연간낙뢰일수(IKL)는 주상변압기에만, 퓨단 및 용존가스분석(DGA)은 지상변압기에만 적용되는 상태데이터이다.

운전 잔여수명은 배전용변압기의 전산이용률 또는 K-AMI 15분 단위 부하율을 적용하여 열화로 인한 수명감소를 산출한다. 최종 잔여수명은 상태 잔여수명과 운전 잔여수명중에서 최소값을 선정하는 폴딩편선(Folding Function)을 적용한다.

**D. 고장영향(CoF) 모델**

고장영향(CoF)은 고장발생시 파급영향을 재무, 안전, 환경, 신뢰도 측면에서 현금화하여 종합 산출한다. 재무비용은 긴급교체비용, 물적피해 보상비용, 수익손실비용으로 구성된다. 긴급교체비용은 변압기를 교체하는데 필요한 자재비와 도급비를 합한 금액으로 고장발생으로 변압기를 교체하는 시간대가 주말, 공휴일 및 야간일 경우에는 할증을 50% 및 25%를 적용하여 산출한다.

물적피해 보상비용은 변압기의 소손으로 결상이 발생하거나, 서지(Surge)의 유입 등으로 고객설비가 손상된 경우에 실제 집행한 위험보전충당금을 ERP시스템에서 추출하여 산출한다. 수익손실 비용은 정전으로 인하여 전기를 판매하지 못하여 발생한 비용으로 정전발생확률, 정전지속시간, 년 평균 판매비용(원/kWh)을 곱하여 산출한다.

고객정전비용은 변압기의 정전발생확률에 고객별 계약전력과

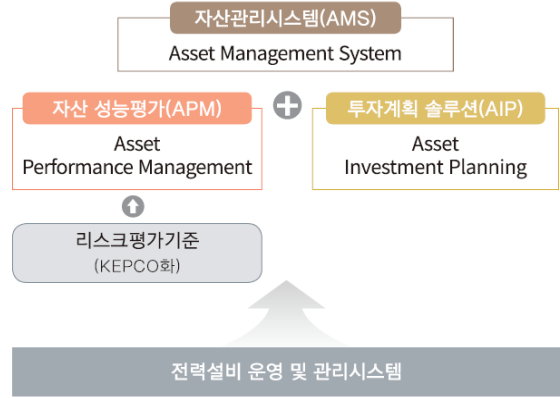


Fig 1. AMS의 구성(APM+AIP)



Fig. 2 자산관리 기능의 변화

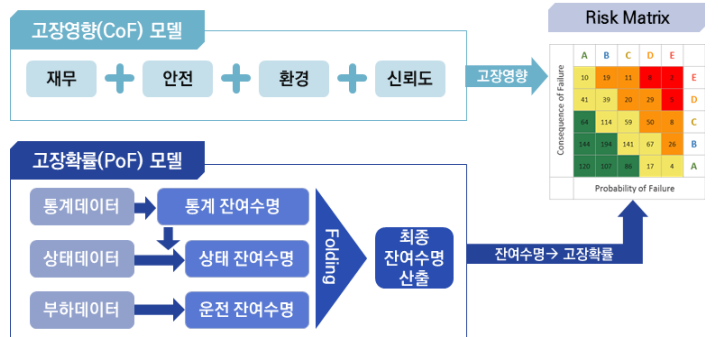


Fig. 3 배전용변압기 리스크(Risk) 평가 기본모델

업종별 공급지장비용을 곱하여 산출한다. 안전비용은 안전사고 보상비용과 법률 미준수 벌금의 합으로 산출한다. 환경비용은 절연유 유출에 따른 처리비용으로 고장시 절연유 유출 확률에 변압기 용량별 유량과 절연유 처리비용을 곱하여 산출한다.

**III. Overseas Transformer Life Evaluation Technology and Examples**

**A. 수명관련 용어와 목조곡선(Bathtub Curve)**

설비의 수명과 관련된 용어를 몇가지 살펴보면 다음과 같다. 설계수명(Design life)은 제작사에서 제품을 설계할 때 예상하는 수명을 의미한다.

기대수명(Expected life)은 CIGRE TB-597, 436 문헌에서는 사용자가 설비를 구매한 후 정상적인 운전상태에서 예상하는 수명을 의

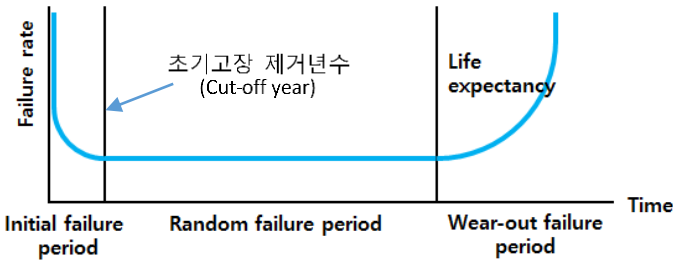


Fig. 4 OMRON이 정의한 옥조곡선의 기대수명(Life Expectancy)

TABLE 1  
해외 문헌의 변압기 수명 조사

문헌 및 기관명	Countries	Year	Life time[년]	도출방법	Key Word
IEEE	Japan	2002	30	설문조사	Lifetime expectancy
TB 230	23Countries	2003	19	설문조사	Expected life
TB 227	23Countries	2003	40	설문조사	Expected service lives
TB 300	23Countries	2006	30~50	설문조사	Life expectancy
TB 332	23Countries	2007	30~50	설문조사	Expected service life
TB 394	23Countries	2009	25~40	설문조사	Expected service life
Transpower	New Zealand	2010	30~45	설문조사	Expected life
TB 422	23Countries	2010	50~60	설문조사	Expected life
Transpower	New Zealand	2010	20~35	설문조사	End of life, Estimate the life
IEEE	Netherlands	2012	25~40	설문조사	Expected life
CROSBİ	Croatia	2014	35	설문조사	Lifespan
IEEE	Italy	2014	25~40	설문조사	Life

미한다[3],[4].

OMRON은 일반적으로 Solid-state Relay의 기대수명에 관하여 Fig. 4의 옥조곡선(Bathtub Curve)과 같이 ‘순간고장률이 상승하기 시작하고 마모고장 기간으로 들어가는 옥조곡선의 지점’으로 정의하였다. 배전용변압기의 경우 기대수명은 정상운전 조건에서 정상적으로 작동할 것으로 예상하는 시간이다. 기대수명은 환경, 제작의 특성 등 여러가지 요인에 따라 달라지며, 옥조곡선에서 순간고장률이 상승하기 시작하고 마모고장으로 들어가는 시점을 말한다[5].

종료수명(End of life)은 실제 또는 잠재적으로 고장을 뜻하며 일반적으로 기술적, 경제적, 전략적 측면에서 요구조건을 충족하지 못하는 시기로 정의된다.

B. 해외 문헌의 변압기 수명조사

해외 문헌에서 조사한 변압기의 수명 통계자료를 요약한 자료는 Table 1과 같고, 조사된 거의 모든 문헌의 변압기의 수명은 전력용변압기의 수명을 의미한다. Table 1에서 보는 바와 같이 변압기의 수명은 약 30~40년이며, 모두 기술분야 전문가 의견이나 설문조사를 바탕으로 추정된 수명 값으로서 전 세계적으로 통계분석에 적용될 수 있을 만큼 많은 양의 고장데이터가 형성되지 않았으므로 현재까지 기술적, 통계적 근거를 가진 수명은 산출된 바는 없다. 또한,

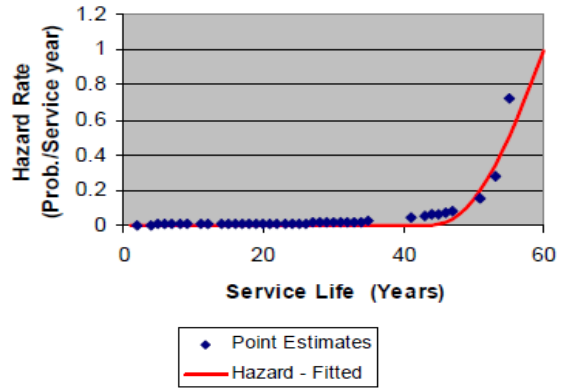


Fig. 5. CIGRE TB-422 배전용변압기 집단의 순간고장률 함수(해외사례)

30~40년이 지났을 경우 변압기의 기대수명(Expected Life) 및 기술적 종료수명시기(Technical End of Life Time)에 도달한 것인지, 30~40년 지났을 때 경제적 또는 전략적으로 변압기를 교체해야 하는지도 분명하지 않다[6].

C. CIGRE의 배전용변압기 Fleet 단위 순간고장률 분석사례

CIGRE TB-422은 전력용변압기와 배전용변압기 모두를 아우르는 자산관리 및 고장분석 문헌이다. TB-422은 와이불(Weibull) 분포 분석을 통한 배전용변압기의 순간고장률(Hazard rate) 분석을 수행하였다. Fig. 5는 TB-422에서 분석한 23,000대 이상의 배전용변압기 순간고장률 곡선이다. 이때 순간고장률의 식 (1)과 같으며, 해당 식은 Weibull 2 parameter 분석을 비롯한 신뢰성 평가에서 널리 사용된다[7].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \times \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

이때, f(t)는 고장밀도함수(Failure density function), R(t)은 신뢰도 함수 (Reliability function), β는 형상모수(Shape parameter), η는 척도모수(Scale parameter)이다.

Fig. 5에 적용된 배전용변압기는 크기가 비슷하며, 공통된 환경에서 운전되고, 거의 같은 부하가 인가되어 특성이 매우 균일한 변압기이다.

IV. Bathtub Curve and Hazard Rate of MV Cables

A. 배전용케이블의 순간고장률

실제 배전용케이블 나이별 평균 운영공장 개수(운영공장을 구간평균 80m로 나눈 개수) 대비 순간고장률을 나타내면 Fig. 6과 같이 초기고장, 랜덤고장, 마모기고장(16~22년)의 특성이 뚜렷하며 전형적인 옥조곡선(Bathtub curve)을 띤다.

배전용케이블의 순간고장률은 초기 3년 이내에 매우 높고, 랜덤고장에서 마모기고장으로 변하는 변곡점은 16년으로 보이며, 17년~22년에 열화에 의한 고장이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

고장데이터는 영배정보시스템의 최근 13년간(2008.1~2020.12) 데이터 중에서 배전용케이블 고압고장에서 추출했으며, 케이블 고장 1,483건 중에서 제작년도와 정전년도가 입력된 873건을 활용하여 순간고장률을 산출하였다.

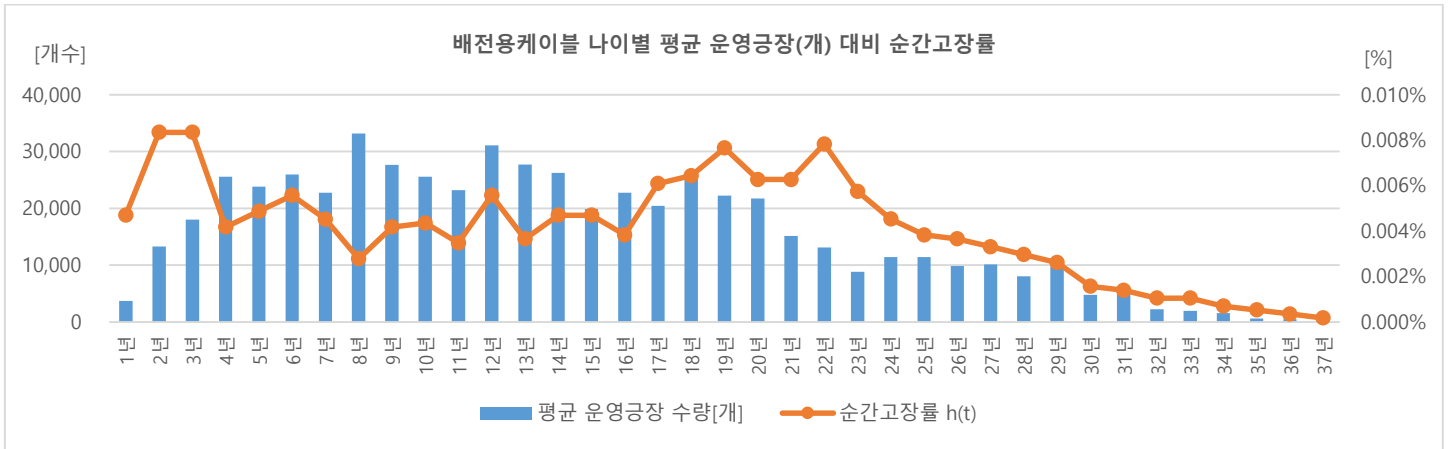


Fig. 6. 배전용케이블 나이별 평균 운영금장(개) 대비 순간고장률

TABLE 2  
배전용케이블 열화고장 원인별 나이 분포

고장원인	점유율 (%)	고장 (건)	평균 (년)	최대값 (년)	최소값 (년)	비고
자연열화	84.3	404	19.6	41	1	1년 원인 착오
보수불량	7.3	35	19.6	37	7	
제작불량	8.4	40	4.3	22	1	
소 계	100.0	479	-	-	-	

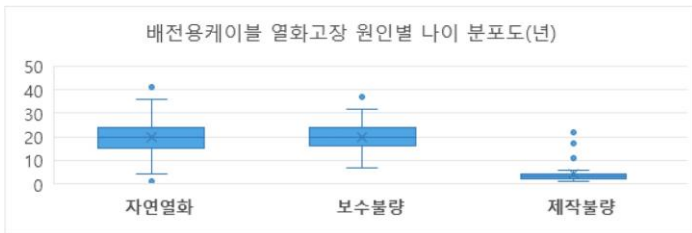


Fig. 7 배전용케이블 열화고장 원인별 나이 분포도

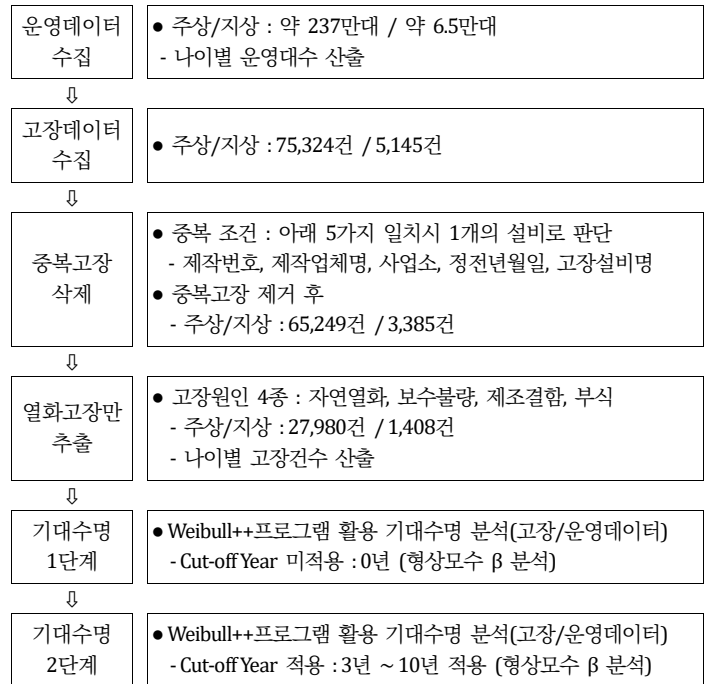
운영데이터는 2021년 1월에 추출한 것으로 배전용케이블 운전 구간(관로, 전력구, 해저케이블)의 금장을 추출한 후에 케이블 구간의 평균금장인 80m로 나눈 개수를 세로축에 표현하였다. 운전 나이가 38~50년인 경우는 데이터가 극소량으로 그래프에 표현하지 않았다.

B. 배전용케이블 열화고장 나이분포와 초기고장 제거

배전용케이블에서 열화고장으로 분류할 수 있는 고장원인은 자연열화, 보수불량, 제작불량이 있다. 케이블에서 초기고장을 포함한 고장의 평균 나이분포는 Table 2와 같으며, 이를 Box Plot로 나타내면 Fig. 7과 같다.

자연열화 고장의 비율이 84.3%로 제일 높으며, 제작불량은 8.4%, 보수불량 7.3%를 차지하고 있다. 배전용케이블에서 고장발생시 전체가 아닌 일부 고장만 원인분석을 하므로 보수불량, 제작불량이라 할지라도 초기고장 제거년수를 적용하면 열화고장으로 볼 수 있다.

TABLE 3  
배전용변압기 기대수명 평가과정



향후에는 관로, 전력구, 해저케이블 구간 등 케이블이 운전되는 구간의 환경적인 특성을 반영한 계층화 분석이 필요하다.

배전용케이블에서 마모기에 해당하는 열화고장만을 추출하여 와이블(Weibull) 통계적 기대수명을 산출하려면 하자기간 5년이 포함된 10년 이내의 초기고장을 제거할 필요성이 있다.

V. Weibull Life Evaluation and Hazard Rate of Distribution Transformer

A. 배전용변압기 기대수명 산출

배전용변압기의 기대수명 산출과정은 Table 3과 같다. 먼저 운영데이터를 수집하여 나이별 운영대수를 산출한다. 그 다음 고장데이터를 수집하여 중복고장을 삭제하고 열화고장만 추출한 후 나이별 대수를 산출한다.



이후 Weibull++ 통계 프로그램을 활용하여 초기고장 제거년수의 적정성을 검토하고, 누적고장확률 분포  $B_x(X\%)$ 에 해당하는 기대수명을 산출한다.

주상 및 지상변압기의 운영데이터(2022년1월 기준)는 영배정보시스템 GIS DB에서 추출하였으며, 고장데이터(2011.8~2021.12)는 영배정보시스템의 저압정전에서 추출하였다. 고장데이터의 나이 계산은 정전년도에서 제작년도를 뺀 후 1을 더하고, 운영데이터는 2021년에서 제작년도를 뺀 후 1을 더해서 계산하였다. 1을 더한 이유는 동일년도(예시 2010년)에 제작한 변압기가 동일년도(예시 2010년)에 고장이 날 경우 0년이 아니고 1년으로 표시하기 위한

것이며 해석 시 1년 미만(0~1년)으로 간주한다.

B. 변압기 기대수명 평가를 위한  $B_x$  선정

$B_x$  수명은 설비의 X%가 고장나는 시점으로 어원은 독일어 Bruchzeitpunkt(Initial fracture, 초기골절) 또는 Bearing(베어링)의 첫 자에서 유래되었다고 한다.  $B_{10}$ 은 설비의 10%가 고장이 나는데 소요되는 기간으로 전력설비에서는 통상 년을 단위로 사용한다. 대전세종본부의 주상변압기 고장데이터(2008~2019년)를 분석한 결과 Fig. 8과 같이 4개년(2016~2019년) 동안 고장건수는 연간 약 300건으로, 누적 고장확률  $B_3(3\%)$  적용시 2020년 예상 고장대수가 306건으로 2019년 고장건수 308건과 매우 유사하여  $B_3(3\%)$ 를 변압기의 기대수명의 기준으로 적용하였다.

C. 주상변압기 순간고장률

Fig. 9는 주상변압기 나이별 운영수량 대비 순간고장률을 나타내었으며, 배전용케이블과 달리 초기고장이 특성이 나타나지 않는다. 순간고장률은 나이 1~4년까지는 0.03% 이하이며, 5~7년에는 0.05%~0.08%로 급격히 증가, 8년~14년 0.08%를 유지하다가 16년 경과시 순간고장률이 급격히 감소한다.

과거 13년 이상의 변압기는 노후변압기로 간주되어 운영 나이 13년 경과시 일괄 교체되었다. 2009년 11월 이후 변압기 건전도(HI) 평가가 도입되면서 노후변압기의 교체주기가 약 13년에서 약 20년

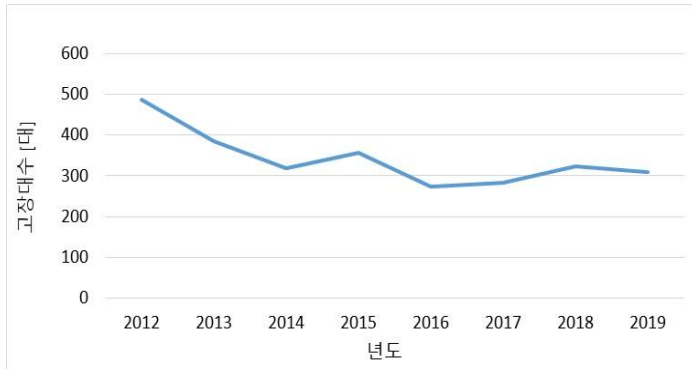


Fig. 8 대전충남본부 주상변압기 년도별 열화고장 건수

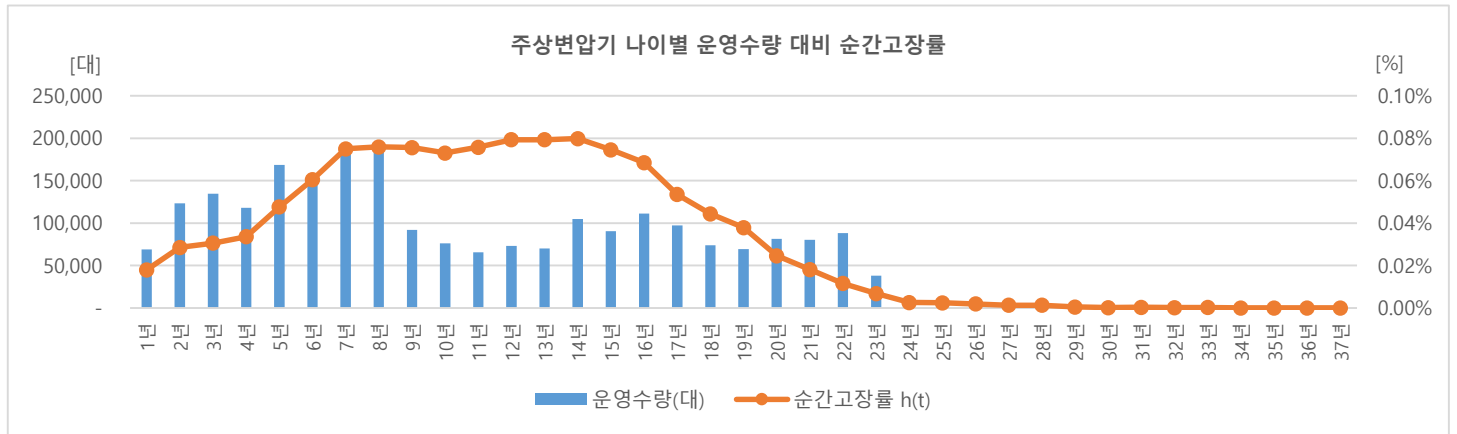


Fig. 9. 주상변압기 나이별 운영수량 대비 순간고장률

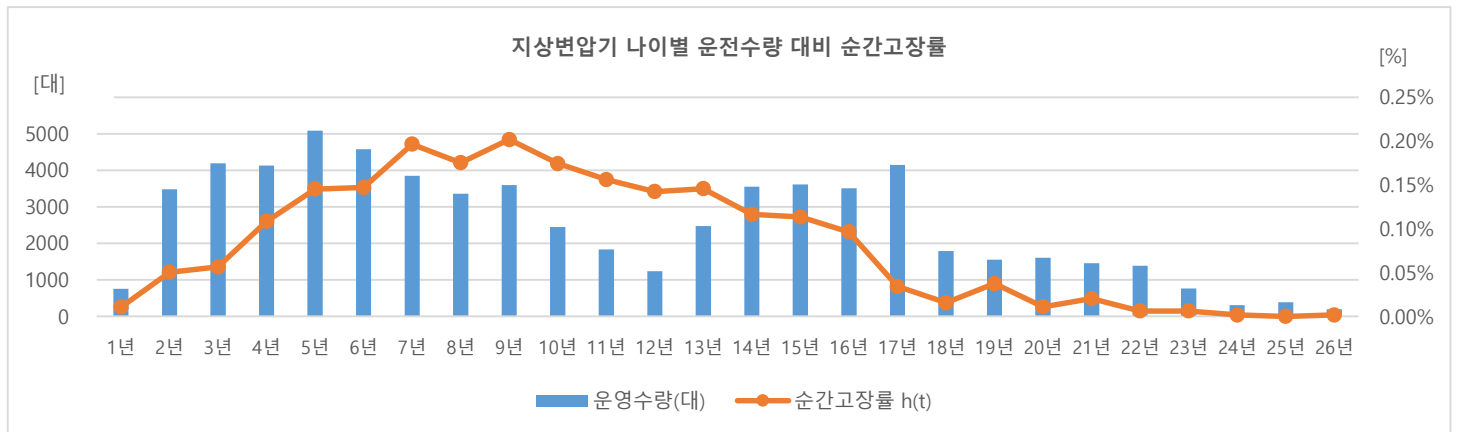


Fig. 10. 지상변압기 나이별 운영수량 대비 순간고장률

TABLE 4  
주상변압기 열화고장 나이 분포

고장원인	점유율 (%)	고장 (건)	평균 (년)	최대값 (년)	최소값 (년)	비고
자연열화	35.0	9,804	11.7	36	1	1년 원인 착오
보수불량	53.6	15,001	11.6	37	1	1년 원인 착오
제작불량	5.0	1,401	8.1	35	1	35년 원인 착오
부식	6.3	1,774	11.9	31	1	1년 원인 착오
소계	100.0	27,980	-	-	-	

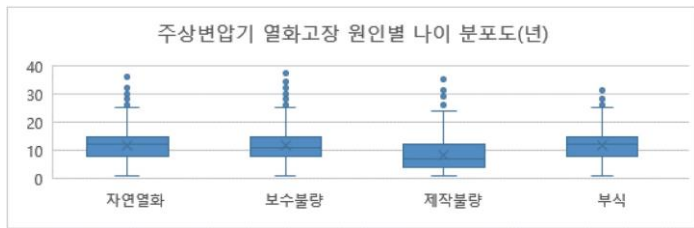


Fig. 11 주상변압기 열화고장 원인별 나이 분포도

으로 변경되었다. 13년 경과 노후변압기 교체와 견전도 평가가 중첩되어 있어서 16년 경과시 순간고장률이 급격히 감소하는 것으로 보인다. 그래프 상에서 순간고장률이 갑자기 증가하는 변곡점은 4년 부근으로 보이며 4년 이후를 열화고장으로 간주한다면 초기고장 제거년수는 4년이 적정해 보인다.

D. 지상변압기 순간고장률

지상변압기 나이별 운영수량 대비 순간고장률을 나타낸 것은 Fig. 10과 같다. 주상변압기와 마찬가지로 초기고장이 특성이 나타나지 않는다. 순간고장률은 나이 1~3년까지는 0.06% 이하이며, 4~7년에는 0.11%~0.2%로 급격히 증가, 7년~9년 0.2%를 유지하다가 16년 경과시 순간고장률이 급격히 감소한다. 가공변압기와 유사하게 13년 경과 노후변압기 교체와 견전도 평가가 중첩되어 있어서 16년 경과시 순간고장률이 급격히 감소하는 것으로 보인다. 기울기의 측면에서 나이 3~7년의 순간고장률이 0.06~0.2%로 다소 가파르게 증가한다. 그래프 상에서 순간고장률이 갑자기 증가하는 변곡점은 3년 부근으로 보이며 3년 이후를 열화고장으로 간주한다면 초기고장 제거년수는 3년이 적정해 보인다.

E. 주상변압기 열화고장 나이 분포

주상변압기에서 열화고장으로 분류되는 고장원인은 자연열화, 보수불량, 제작불량, 부식 4종류가 있다. 초기고장을 제거하지 않았을 때의 나이분포는 Table 4와 Fig. 11과 같다. 자연열화, 보수불량, 부식 3종에서 고장나이 최소값 1년, 제작불량에서 최대값 35년은 고장원인을 착오로 입력한 것으로 추정된다. 따라서 초기고장만 제거하고, 4종은 전부 자연열화 고장으로 간주하여 기대수명 산출에 활용하는 것이 바람직하다.

F. 지상변압기 열화고장 나이 분포

지상변압기에서 열화고장으로 분류되는 고장원인은 자연열화,

TABLE 5  
지상변압기 열화고장 나이 분포

고장원인	점유율 (%)	고장 (건)	평균 (년)	최대값 (년)	최소값 (년)	비고
자연열화	34.5	486	10.0	24	1	1년 원인 착오
보수불량	52.8	743	10.0	23	1	1년 원인 착오
제작불량	5.5	78	7.1	16	2	
부식	7.2	101	9.8	26	2	2년 원인 착오
소계	100.0	1,408	-	-	-	

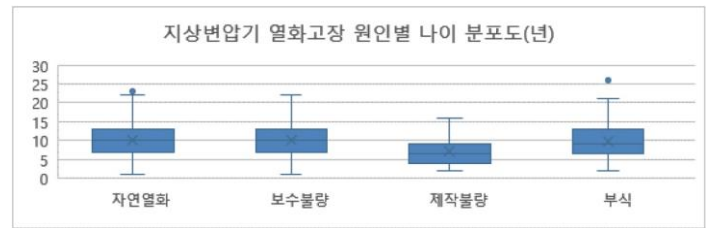


Fig. 12 지상변압기 열화고장 원인별 나이 분포도

보수불량, 제작불량, 부식 4종류가 있다. 초기고장을 제거하지 않았을 때의 나이분포는 Table 5와 Fig. 12와 같다. 자연열화, 보수불량, 부식 3종에서 고장나이 최소값 1~2년은 고장원인을 착오로 입력한 것으로 추정된다. 따라서 초기고장만 제거하고, 4종은 전부 자연열화 고장으로 간주하여 기대수명 산출에 활용하는 것이 바람직하다.

G. 주상변압기 Weibull 수명평가와 초기고장 제거

주상변압기 초기고장 제거년수(미제거~10년)에 따른 순간고장률은 Fig. 13과 같고, 누적고장확률  $B_3(3\%)$  적용시의 기대수명과 형상모수는 Table 6과 같다.

주상변압기의 경우 초기고장 제거는 최소 3년을 적용해야 형상모수 2이상의 마모기 고장특성이 나타나며, Fig. 13의 순간고장률을 보면 적어도 초기고장 8년 정도 제거해야 적정한 것으로 판단된다. 초기고장 10년을 제거하면 형상모수가 2.64로 증가하고 순간고장률 그래프도 마모기 고장의 특성을 잘 나타내고 있다.

H. 지상변압기 Weibull 수명평가와 초기고장 제거

지상변압기 초기고장 제거년수(미제거~10년)에 따른 순간고장률은 Fig. 14와 같고 누적고장확률  $B_3(3\%)$  적용시 기대수명과 형상모수는 Table 7과 같다.

지상변압기의 경우 초기고장 제거는 최소 4년을 적용해야 형상모수 2이상의 마모기 고장특성이 나타나며, Fig. 14의 순간고장률을 보면 적어도 초기고장 6년 정도 제거해야 적정한 것으로 판단된다. 초기고장 10년을 제거하면 형상모수가 2.75로 증가하고 순간고장률 그래프도 마모기 고장의 특성을 잘 나타내고 있다.

I. 초기고장 제거년수의 적정성 검토

Table 6과 7을 살펴보았을 때, 초기고장 제거년수(Cut-off Year)가 커질수록 척도모수가 2이상으로 증가하므로, 마모기 열화고장의 특성이 잘 드러나고  $B_3(3\%)$  기대수명이 늘어난다.

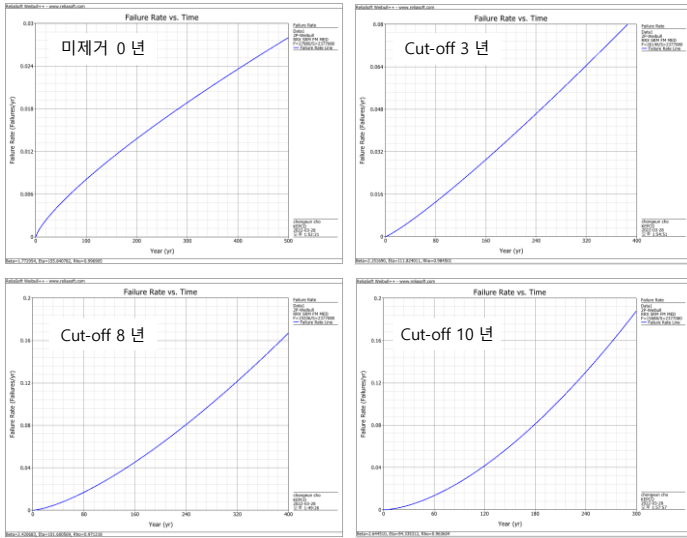


Fig. 13 주상변압기 초기고장 제거에 따른 순간고장률 그래프

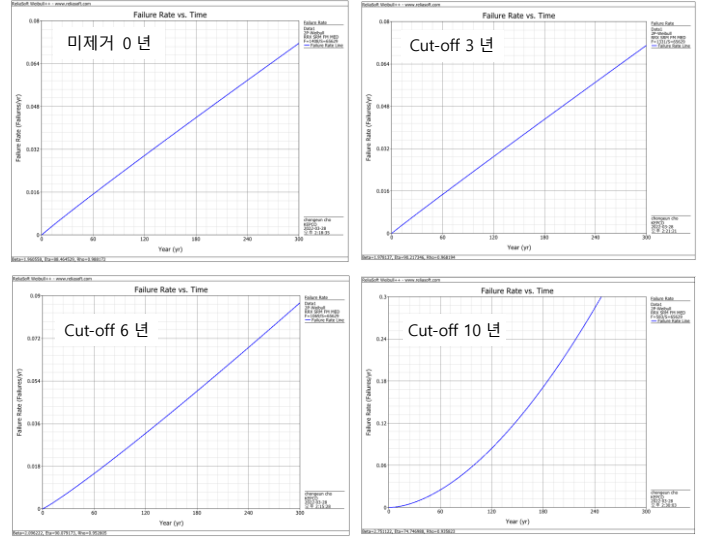


Fig. 14 지상변압기 초기고장 제거에 따른 순간고장률 그래프

TABLE 6  
주상변압기 초기고장 제거와  $B_3(3\%)$  수명

초기고장제거	척도모수 ( $\eta$ )	형상모수 ( $\beta$ )	$B_3(3\%)$ 기대수명[년]	검토의견
0년(미제거)	115.8	1.77	21.7	$\beta$ 값 2이하 적용 곤란
3년	111.8	2.15	22.1	$\beta$ 값 2이상으로 Cut-off Year 3~10년 적용 가능
6년	109.8	2.23	23.0	
8년	101.6	2.42	24.0	
10년	94.33	2.64	25.2	

TABLE 7  
주상변압기 초기고장 제거와  $B_3(3\%)$  수명

초기고장제거	척도모수 ( $\eta$ )	형상모수 ( $\beta$ )	$B_3(3\%)$ 기대수명[년]	검토의견
0년(미제거)	88.4	1.96	14.9	$\beta$ 값 2이하 적용 곤란
3년	90.2	1.97	15.4	0~3년 적용 곤란
6년	90.0	2.09	17.0	$\beta$ 값 2이상으로 Cut-off Year 3~10년 적용 가능
8년	86.1	2.29	18.8	
10년	74.7	2.75	21.0	

EPRI 보고서에서는 초기고장 제거년수로 10년을 권고하고 있다.[8] Fig. 9와 Fig. 10에서 순간고장률이 갑자기 증가하는 변곡점을 마모기 고장으로 판단하면 초기고장 제거년수는 주상변압기 4년, 지상변압기 3년이 적절한 것으로 보인다.

그러나 변곡점 또는 Weibull++ 프로그램을 활용하여 산출된 형상모수( $\beta$ )에 의존하여 초기고장 제거년수를 줄이는 것은 적절한 기대수명 산출을 위한 근본적인 방법이 될 수 없다. 초기고장 제거년수를 하자기간(3년) 부근으로 줄일 경우 기대수명이 단축되어 교체 물량이 증가하여 예산이 추가적으로 소요되어 자산관리의 효과가 떨어진다. 따라서 초기고장 제거년수를 10년으로 적용한 후, 하자기간 경과~초기고장 제거년수 사이(4~10년)의 변압기 고장은 소손원인을 분석하여 그에 따른 별도의 대책(제조 및 시공품질 향상, 낙뢰소손방지, 수분유입방지 등)을 수립하여야 한다. 따라서 고장이 발생한 변압기의 운전나이가 3년 이내일 경우에는 하자품에 해당하므로 하자관리를 통해 제조품질 향상을 유도하고, 운전나이가 4년~10년일 경우에는 소손원인 분석을 통해 변압기의 제조 및 시공품질 향상 등 대책을 수립하고, 10년 이상의 경우는 열화고장으로 판단하여 자산관리의 대상으로 간주하는 것이 바람직하다.

VI. Conclusion

지금까지 자산관리시스템(AMS)에 대한 개요와 최근 11년간(2011.8~2020.12)주상 및 지상변압기 고장에 대한 나이별 고장건수와 순간고장률을 살펴보았다.

그리고 최근 13년간(2008.1~2021.12) 배전용케이블 고장에 대한 나이별 순간고장률을 살펴보았다. 배전용케이블과 배전용변압기의 순간고장률을 비교 검토한결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 배전용케이블 나이별 평균 운영공장 대비 순간고장률은 Fig. 6과 같이 초기고장, 랜덤고장, 마모기고장(16~22년)의 특성이 뚜렷하며 전형적인 욕조곡선(Bathtub curve)을 띤다.

둘째, 주상 및 지상변압기의 나이별 운영수량 대비 순간고장률을 나타낸 것은 Fig. 9와 Fig. 10과 같으며, 배전용케이블과 달리 초기고장의 특성이 나타나지 않는다.

셋째, 순간고장률로 보면 초기고장 제거년수는 주상변압기는 4년, 지상변압기는 3년이 적절해 보이나, 교체 물량 및 한정된 예산을 고려했을 때 EPRI 보고서에서 권고하는 10년이 초기고장 제거년수로 가장 적절해 보인다.

넷째, 변곡점 또는 형상모수( $\beta$ )만 검토하여 초기고장 제거년수를 줄이는 것은 변압기의 기대수명이 단축되어 교체 물량이 증가하고 예산이 추가로 소요된다. 따라서 운전나이가 4년~10년 사이의 변압기 소손원인 분석을 통해 제조 및 시공품질 향상 등 별도의 대책을 수립하여야 한다.

References

[1] “전력설비 AMS 구축 추진계획”, 기술기획처 공문 P2, 2019.8월  
 [2] 한전 영업배전정보시스템 > 계통관리 > 정휴전관리 > 저압정전실적 (2011.8~2021년)

- [3] Working Group C1.25, "Transmission Asset Risk Management", CIGRE TB-597, 2014
- [4] Working Group A2.35, "Experiences in Service with New Insulating Liquids", CIGRE TB-436, 2010
- [5] OMRON, "Technical Explanation for Solid-state Relays" report P26
- [6] 이은유, "통계기법을 적용한 배전용 변압기 자산관리 수명평가기술", P34~35, 2021.8
- [7] Working Group C1.16, "Transmission Asset Risk Management", CIGRE TB-422, 2010
- [8] B.Desai, "Industry-wide Transformer Database", EPRI, P410, 2015.12