

전력용변압기의 자산관리를 위한 고장률 추정기법의 수학적 모델링에 관한 연구

A Study on the Mathematical Modeling of Failure Rates Estimation for Asset Management of the Power Transformer

모 수 용* · 장 경 욱[†] · 백 승 명* · 손 진 근*

(MOU SHUAILONG · Kyung-Wook Jang · Seung-Myung Baek · Jin-Geun Shon)

Abstract - This paper describes the modeling of the failure rate estimation technique for applying the asset management technique to electric power facilities. There are many modeling techniques to estimate the failure rate. In this paper, the characteristics of the normal distribution, exponential distribution, weibull distribution, and piecewise linear functions are discussed. When evaluating reliability, the evaluation may be less meaningful if the sample data is insufficient. Therefore, Weibull distribution and piecewise linear function are adopted as the most suitable functions for estimating the failure rate of power facilities and the resulting failure rate function is derived.

Key Words : Asset management, Failure rates, Reliability, Weibull distribution

1. 서 론

오늘날 전력송전 사업자들은 비용절감과 이윤의 극대화를 하는 동시에 높은 수준의 신뢰성과 서비스를 제공해야하는 어려운 상황에 직면해있다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 전력송전 사업자들은 최근에 전력설비의 자산관리(Asset management)기법을 도입하려는 계획을 세우거나 시도하려는 움직임이 있다. 전력설비를 포함한 자산관리는 가용할 수 있는 예산 내에서 최적의 가치를 도출하는 목표를 가진 의사결정 단계로 이루어져 있다[1, 2].

전력송전산업이 활성화 된 나라의 대부분은 고압 교류 송전이 주류를 이루고 있으며 고압 교류 송전에서 핵심적인 요소는 전력용 변압기라 할 수 있다. 전력용 변압기의 자산관리가 전력설비 자산관리의 핵심이기 때문에 변압기의 설계, 운전 및 유지보수에 대한 접근방법에 대하여 최근 세계적으로 큰 변화가 일어나고 있다. 특히 변압기의 시험과 수명 결정, 유지보수 비용의 산출 등 변압기의 개별 및 집단의 성능을 평가하기 위하여 다양한 방법의 연구가 시도되고 있다.

최근 한국의 전력설비에 대한 사용연수별 비율 현황은 개발도상국에서 선진국으로 진행되고 있는 상황으로 예측되고 있으며 사용연수가 오래된 많은 양의 전력설비들이 증가하고 있는 추세에 있다. IEC White Paper[3]에 의하면 선진국의 경우 지속적인 신생 전력설비의 보충 활동에도 불구하고

자산의 대부분이 오래 유지되어 사용연수가 큰 설비들이 다다수를 차지하고 있다고 보고되고 있다[3, 4].

이는 사용연수가 큰 전력용 변압기가 많다는 것을 반증하는 것이며, 이를 기반으로 선진국의 전력설비 분포현황을 해석하면 한계수명에 가까워진 변압기의 교체 수가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 전력 계통산업에 대한 지속적인 수요 감소 및 관리비용에 대한 압력이 강화되는 가운데 이 한계수명에 도달하는 변압기들이 아무런 기준 없이 교체작업을 한다면 심각한 재정 문제를 야기할 수 있다는 것이다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해서 자산의 수리 및 교체를 선택하기 위한 합리적인 기준이 필요하지만 자산관리에 대한 국제 표준이나 지침이 결여되어 있는 상태이다. ISO 55,000 시리즈가 제시되긴 했으나 최적 자산관리 절차에 대한 큰 가이드라인만을 제공할 뿐 운영에 필요한 실제적인 지침을 제공하지 않고 있는 실정이다[5, 6].

전력설비의 자산관리를 위한 최적의 설비수리 및 교체를 선택하기 위해서는 설비의 한계수명을 정확하게 예측할 필요가 있다. 이는 전력설비의 고장 데이터를 기반으로 고장이 증가하는 시점과 그 추세를 파악하기 위함이다. 일반적으로 전력설비 고장 데이터는 그 양적인 면에서도 부족하지만 고장 데이터를 분석 할 경우 무작위성도 포함하기 때문에 전문가의 경험적인 판단으로 고장 증가 시점을 판단하기에는 그 정확도가 떨어진다고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서의 고장률 추정기법은 전체 설비집단의 상태파악을 그 목적으로 하며 이를 근거로 시험 수리 및 교체 등의 근거를 마련하는 것이다. 이의 정확도는 자산관리의 효율성에 있어 중요한 측면이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 전력용 변압기의 전력설비 고장률을 예측할 수 있는 수학적 모델링 방식을 제시하여 변압기의 고장률 추세를 표현할 수 있는 수학적인 방식인 와이블 함수 및 구분선형 함수[7-10] 두 가지를 제시하고 그 신뢰성에 대한 사례를

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical. Engineering, Graduate School of Gachon University, Korea
E-mail : jkw7397@naver.com

* School of Electrical Engineering, Gachon University, Korea

접수일자 : 2017년 2월 6일

최종완료 : 2017년 2월 27일

고찰하고자 한다. 이를 기반으로 고장이 증가하는 시점을 판별하여 고장률에 근거한 자산관리의 수학적 모델링기법에 기반한 전력설비의 경제적 가치를 최대한으로 이끌 수 있는 기초 토대를 마련하고자 하였다.

2. 설비의 고장률 발생의 형태

전력설비 등의 전력기기 고장률은 관찰 가능한 요인으로 써 사용연수에 직접적으로 의존하며 충격 및 온도와 같은 환경적 요인과 갑작스러운 부하로 인한 열화 및 결함 등의 활용적 요인을 말한다. 이는 전력용 변압기 뿐 아니라 일반적 장비에도 해당되는 개념으로 전반적인 고장양상은 그림 2와 같은 욱조형태의 욱조곡선(Bath-tub curve)으로 표현된다[3, 4]. 이는 사용 초기에는 고장률이 급격하게 감소하며 초기고장 기간(DFR; decreasing failure rate)이라고 칭하며 이 기간은 표준 이하의 작업자 조작 및 불충분한 품질관리 등에 의한 고장이 대다수를 차지한다.

또한 거의 대부분을 차지하는 중간 구간은 고장률이 일정하며 우발고장기간(CFR; constant failure rate)이라고 칭한다. 이 기간의 고장률은 시간과 무관하며 일반적으로 관찰 불가능한 상태에 의한 것으로 고장률을 예측할 수 없다. 끝으로 고장률이 증가하는 기간은 마모고장 기간(IFR; increasing failure rate)이라고 하며 한계수명에 가까워짐에 따른 마모 및 열화, 부식 등으로 인한 고장률이 증가되는 구간이다. 전력용 변압기의 고장률을 이러한 욱조곡선 형태로 표현하기 위해서는 데이터 무작위성을 고려해야 하며, 또한 고장률 증가구간을 쉽게 파악하기 위해서는 선형적인 곡선의 추정 기법이 필요하게 된다.

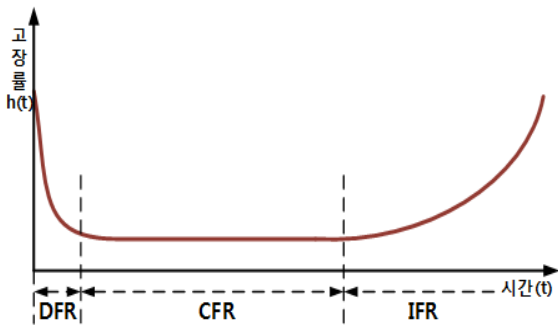


그림 1 설비의 고장률을 나타내는 욱조곡선
Fig. 1 Bathtub curve showing the failure rate of equipment

3. 고장률 추정기법의 모델링

3.1 신뢰도의 정의

전력설비의 신뢰도는 설비의 기능과 성능에 영향을 줄 수 있는 모든 고장률의 영향 요인 중에서 목표기간(변압기의 경우 약 30년 보증을 목표로 함)의 설비가 그 성능을 유지할 수 있는 가능성을 의미한다. 이와 같은 신뢰도 함수는 확률로 정의되며 설비가 특정시간(t) 동안 고장 없이 정상 작동할 확률이다. 수학적으로 표현하면 확률변수 T 가 주어

진 실수 t 보다 클 확률로써 식 (1)과 같이 정의된다[2].

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (1)$$

여기서, $f(x)$ 은 고장밀도 함수로써 변압기의 수명분포를 의미한다. 예를 들면, $R(t=10) = 0.9$ 는 전체 변압기군 중에서 90[%]는 10시간 동안 고장 없이 작동한다는 의미이다.

3.2 불 신뢰도의 정의

불 신뢰도의 정의는 통계학에서 누적분포함수(cumulative density function)로 표현되며 특정시간(t) 이전에 설비가 고장 날 확률이다. 수학적으로 표현하면 확률변수 T 가 주어진 t 보다 작거나 같을 확률로써 식 (2)과 같이 정의된다[2].

$$F(t) = P(T < t) = \int_0^t f(x)dx \quad (2)$$

여기서, $f(x)$ 은 고장밀도함수로써 변압기의 수명분포를 의미한다. 이때의 신뢰도와 누적분포함수는 식 (3)과 같은 관계에 있다[2].

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (3)$$

3.3 고장률 함수(Hazard Function)의 정의

고장률 함수는 특정시간 (t)까지 고장 없이 정상 작동 중인 설비들 중에서 시간 t 에서 순간적으로 고장 날 비율을 의미한다. 고장률 함수는 신뢰도 함수와 일대일 대응관계가 성립하게 되며 이를 식 (4)와 같이 정의할 수 있다[4, 7]. 여기서 $f(t)$ 은 고장밀도함수이고 $R(t)$ 은 신뢰도의 함수이다.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

3.4 고장률 분포함수의 종류

설비의 고장시간은 고장원인 별로 불확실성을 가지므로 원인에 대한 시험 결과를 수명분포에 가정하여 적합한 분포를 추정하게 된다.

이렇게 설비의 고장분포를 추정하는데 사용되는 함수에는 대표적으로 지수분포, 정규분포 및 와이블분포, 구분 선형분포 등이 있으며, 이를 표현할 수 있는 이들 함수의 주요 지표들은 표 1, 표 2, 표 3과 같이 각각 표현할 수 있다[2].

표 1 지수분포함수의 주요 지표

Table 1 Indicators of the exponential distribution function

확률밀도함수	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
누적밀도함수	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
신뢰도함수	$R(t) = e^{-\lambda t}$
고장률함수	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \exp(-\lambda t)}{\exp(-\lambda t)} = \lambda$

표 2 정규분포함수의 주요 지표

Table 2 Indicators of Normal Distribution Functions

확률밀도함수	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
누적밀도함수	$F(T) = \int_0^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt$
신뢰도함수	$R(t) = \frac{\Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{1-\Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}$
고장률함수	$h(t) = \frac{(2\pi)^{-1/2}(1/\sigma)\exp(-(t-\mu)^2/2\sigma^2)}{\int_t^\infty (2\pi)^{-1/2}(1/\sigma)\exp(-(t-\mu)^2/2\sigma^2) dt}$

표 3 와이블 분포함수의 주요 지표

Table 3 indicators of the Weibull distribution function

확률밀도함수	$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right)$
누적밀도함수	$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right)$
신뢰도함수	$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right)$
고장률함수	$h(t) = (\alpha/\beta)(t/\beta)^{\alpha-1}$

4. 고장률 함수의 도출

4.1 구분선형 함수를 통한 고장률 함수 도출

구분선형 고장률 함수는 식 (5)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 우발고장률 h_{ss} 는 전문가 판단에 의한 마모고장 시작점 T 이전의 고장률 값들의 평균으로 나타내었다. 기울기 m 은 마모고장이 일어난 이후의 고장률 추세를 나타내며 사용연수 t 는 변압기의 연수를 나타낸다.

$$h(t) = h_{ss} + m(t - T) \tag{5}$$

여기서 $h(t)$ = 고장률, h_{ss} = 우발고장률, m = 기울기, t = Service Age(사용연수), T = 마모고장 시작점이다.

이러한 고장 데이터를 기반으로 구분 선형함수를 표현할 때 중요한 것은 T 값의 설정이다. 신뢰성을 높이기 위해 T 의 범위를 $25 < T < 30$ 로 지정하고 각 T 값에 해당하는 고장률 $h(t)$ 를 구하는 것이다. 고장률 $h(t)$ 를 구하기 위해서는 각 고장 데이터 값 마다 계산되는 기울기 m 값들을 선형화시키기 위하여 최소자승법을 이용하게 된다.

설정된 T 값들에 따른 고장률 $h(t)$ 중에서 정확도가 높은 추정 값을 선택하기 위하여 신뢰성 검증 과정이 이루어진다. 신뢰성 검증 과정으로는 예측된 고장률 제품 오차의 합계를 최소로 함으로써 매개 변수의 최적 값을 추정한다. 예측된 고장률의 제품된 오차의 총합 $J(T)$ 의 계산식은 식 (6)과 같이 표현된다.

여기서 $e(t)$ 는 도출된 함수에서 사용연수 t 일 때의 고장률 $h_{est}(t)$ 에서 실제 고장률 $h_{obs}(t)$ 를 뺀 오차이고 식 (7)과

같다. T 값의 변동에 따른 계산 값과 오차의 총합 $J(t)$ 를 표 4에 나타냈다.

$$J(T) = \sum_t e(t)^2 \tag{6}$$

$$e(t) = h_{est}(t) - h_{obs}(t) \tag{7}$$

표 4 T값에 따른 매개변수 값들 및 오차의 합계 $J(T)$

Table 4 Sum of parameter values and errors according to T values[2].

T	h_{ss}	m	J(T)
25	0.05274	0.00138	0.02084
26	0.05475	0.00134	0.02086
27	0.0512	0.00169	0.02104
28	0.0501	0.00185	0.02148
29	0.0501	0.00192	0.02188
30	0.0501	0.00197	0.02237

표 4에 따르면 오차의 합계 J 가 최소값이 되는 시기는 $T=25$ 임을 확인할 수 있으며, 이때 실제 고장 데이터와 오차가 가장 작다는 것을 의미한다. 또한 마모고장이 일어나는 시기가 사용연수 25년부터 증가하고 있음을 의미한다.

4.2 웨이블 함수를 통한 고장률 함수 도출

웨이블 고장률 함수는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 α , β 은 각각 형상모수(shape parameter), 척도모수(scale parameter)이다. α 값에 따라 육조곡선의 모든 측면을 표현할 수 있는 수학적 표현법이다.

$$h(t) = (\alpha/\beta)(t/\beta)^{\alpha-1} \tag{8}$$

예를 들면 $0 < \alpha < 1$ 이면 고장률 함수는 감소형의 고장률 추세를 표현한다. $\alpha=1$ 이면 고장률이 시간에 관계없이 일정한 고장률이 되고, $\alpha > 1$ 이면 고장률 함수는 증가형의 고장률 추세를 표현한다. 이를 조금 더 완만한 선형적인 형태로 바꾸기 위하여 양변에 자연로그를 취해 수식 (9)과 같은 변형된 식을 얻어낼 수 있다.

$$\ln h(t) = (\alpha - 1) \ln t + \ln \alpha - \alpha \ln \beta \tag{9}$$

전력용변압기의 고장 데이터를 식 (9)에 대입하여 기울기 $\alpha-1$ 과 상수 $\ln \alpha - \alpha \ln \beta$ 의 값을 구분 선형방식에서 사용했던 최소자승법을 통하여 선형화시킨 값을 도출시킨다. 이의 결과는 $\alpha-1=0.2189$, $\ln \alpha - \alpha \ln \beta = -3.6220$ 이며, 이에 따라 $\alpha=1.2189$, $\beta=22.95$ 로 얻을 수 있다. 최종 웨이블 고장률 함수는 식 (10)과 같다.

$$h(t) = 0.053 \left(\frac{t}{22.95}\right)^{0.2189} \tag{10}$$

4.3 선형화시킨 고장률 함수 모델의 비교

위의 두 가지의 방법의 수학적 해석으로 고장 데이터를 분석하였다. 그림 2는 구분선형 고장률 함수 모델의 결과를 나타낸 것으로 육조곡선의 초기고장구간을 표현할 수 없다는 단점을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 고장이 나기 시작하는 지점 T의 검증과정을 통하여 마모고장 구간의 시작점 예측에 높은 신뢰성을 보일 것으로 예상된다. 그림 2의 구분선형 분포에 따르면 약 30년 전후로 변압기의 고장률이 급증하는 것을 알 수 있다.

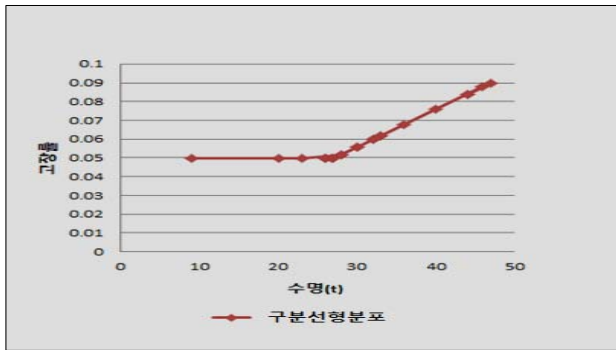


그림 2 구분 선형분포를 따르는 고장률 h(t)
Fig. 2 Hazard rate h(t) following linear distribution

그림 3은 와이블 함수의 고장률 분포를 나타낸 것으로, 이는 형상모수 α 값에 따라 고장률 추세의 정도를 쉽게 파악할 수 있는 장점을 가진다.

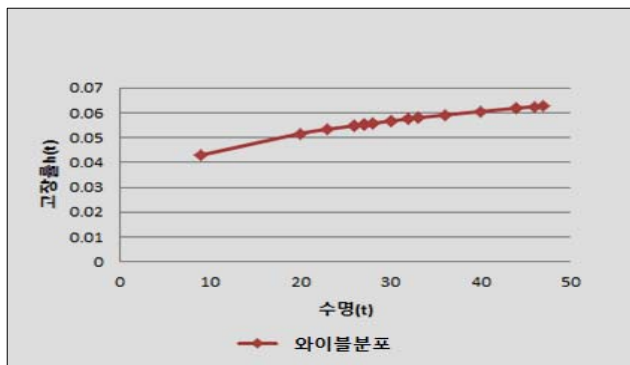


그림 3 와이블분포를 따르는 고장률 h(t)
Fig. 3 Hazard Rate h(t) following weibull distribution

본 논문에서 도출한 결과 값은 $\alpha=1.2189$ 로 도출 되었으며 이는 고장률이 느리게 증가하는 것의 지표이며 변압기 집단의 감시가 필요하다는 것을 의미한다. 다만 데이터 표본의 부족으로 인하여 선형화 시킨 고장률 곡선과 실제 데이터 간의 오차가 증가하여 관리가 필요한 시점을 정확하게 파악하는데 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

만일 $\alpha > 2$ 인 경우에는 고장률이 급격하게 증가하는 지표이며 개량보수(corrective maintenance)가 필요한 시점이라고 판단될 수 있다. 이는 변압기를 개량 및 교체해야 함을 의미한다. $\alpha=1$ 인 경우는 시간에 상관없는 일정한 고장률을

나타낸다. 이는 육조곡선에서 우발고장구간을 표현할 수 있으며 변압기의 예방보수(preventative maintenance)가 필요한 시점인 것이다.

그림 4는 본 논문에서 도출한 전력용 변압기의 고장 데이터를 기반으로 한 구분선형 고장률 함수 및 와이블 고장률 함수의 최종 형태를 도시한 것이다. 마모고장 구간이 장비 수명의 후반기에 발생되며 시간이 지남에 따라 고장률이 증가하는 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이는 선형적인 형태를 갖추면서 수집된 전력용 변압기의 고장 데이터 고장률 추세를 부드럽게 표현하여 신뢰성을 확보하면서 고장률 증가 추세를 쉽게 파악할 수 있음을 알 수 있다. 다만 앞에서 언급한 것과 같이 고장률 예측의 신뢰성은 데이터의 표본수와 비례하므로 무엇보다 신뢰성 있는 데이터 수집이 최우선이 되어야 할 것이다.

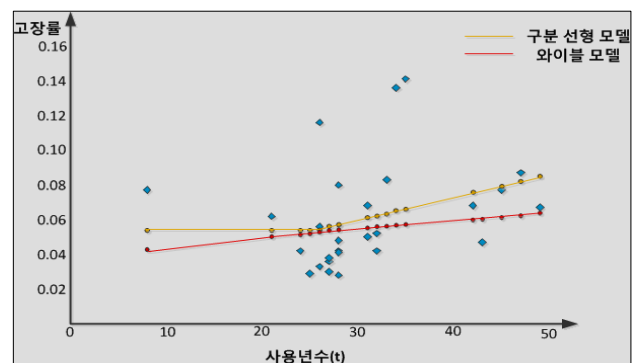


그림 4 구분선형 및 와이블 분포함수의 비교
Fig. 4 Comparison of linear and weibull distribution

5. 결 론

본 논문에서는 전력설비의 효과적인 자산관리에 필요한 고장률 추정기법의 종류와 전력용 변압기를 토대로 한 고장 데이터 기반의 고장함수를 도출하였다. 이는 선형성 및 신뢰성을 가지는 변압기 집단의 고장률 추세를 표현하는 두 가지 수학적 접근법을 제안하였다. 고장함수를 구분선형 함수와 웨이블 함수를 제시하였으며 이를 이용하여 선형적인 고장률 함수를 도출하였다. 도출된 고장함수는 육조곡선의 형태로 표현되었으며, 구분 선형 함수는 초기 고장구간을 표현하지 못하는 단점이 있었지만 고장 시작점 T를 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있었다. 반면 와이블 함수는 형상모수 α 에 따라 모든 고장 구간을 표현할 수 있었다.

위의 결과에 대한 한계점으로는 이러한 모수법을 이용한 고장률 함수를 적용하기 위해서는 수집된 데이터에 대해 적합성을 검증해야한다는 단점이 있었다. 또한 와이블 고장률 함수 모델의 경우 육조곡선의 모든 구간을 표현할 수 있지만 항상 단조로운 함수 특성만을 가지는데 이는 변압기의 분해검사 등을 통해 노화 변압기의 사용연수가 대폭 감소했을 경우를 표현할 수 없다는 단점을 가지고 있었다.

본 논문에서 사용된 고장 데이터는 EPRI[2]에서 제공된 것으로 그 표본수가 극히 적으며 신뢰성이 떨어질 수 있지만 실제 전력 전송사업자의 대규모 데이터 사용 및 신뢰성 검증 과정을 더 보장한다면 전력용 변압기 집단의 정확한

고장률 추세를 파악하고 그에 따른 변압기 유지보수 정책의 의사결정에 도움을 줄 수 있으리라 예상하여 분다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R15XA03-38)

References

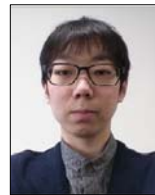
- [1] M. Chang, B. Choi, "Reliability Analysis of Mechanical Component with Multiple Failure Modes", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A 37(9), 2013.9, 1169-1174.
- [2] EPRI, 'Substation Transformer Asset Management and Testing Methodology', Palo Alto, CA: 2006. 1012505.
- [3] IEC, 'Strategic asset management of power networks', White Paper, IEC, Geneva, Switzerland 2015.
- [4] CIGRE Report 176, "Ageing of the System- Impact on Planning", WG37-27, Dec. 2000.
- [5] CIGRE WG A3.06, Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment - Part 2: Reliability of High Voltage SF6 Circuit Breakers, Technical Brochure 510, October 2012.
- [6] CIGRE WG A2.34, Guide for Transformer Maintenance, Technical Brochure 445, February 2011.
- [7] B. Kim, "The Future Direction for Asset Management of Substation Facilities", The Korean Institute of Electrical Engineers Spring Conference, pp. 45-48, 2015.
- [8] IEEE 1366, IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, May 2012.
- [9] SHUAILONG MOU, "Modeling of Failure Rate Estimation Method for Power Transformer", The Korean Institute of Electrical Engineers Spring Conference, 2016.
- [10] JALBERT, J., GILBERT, R., DENOS, Y. and GERVAIS, P., Methanol: A Novel Approach to Power Transformer Asset Management. Published in Power Delivery, IEEE Transactions on, 2012, vol. 27, pp. 514-520.

저 자 소 개



모 수 용 (MOU SHUAILONG)

중국, 제남대학교 졸업. 2016년 8월 가천대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 현재 (주)영일교육시스템 해외영업부 재직중
E-mail : symo@yes01.co.kr



장 경 옥 (張 景 旭)

가천대학교 전기공학과 졸업.
동 대학원 전기공학과 석사 졸업.
E-mail : jkw7397@naver.com



백 승 명

승실대학교 대학원 전기공학과 졸업. 현재. (주)영일교육시스템 부장/NCS기업현장 교수. 가천대학교 대학원 전기공학과 박사과정.
E-mail : bieksm@hanmail.net



손 진 근 (孫 珍 勛)

1990년 승실대학교 전기공학과 졸업. 1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사/박사). 1997~현재, 가천대학교 전기공학과 교수
E-mail : shon@gachon.ac.kr