

Fick's second law 를 이용한 수냉식 발전기 고정자 권선의 건전성 예지

Health prognostics of stator Windings in Water-Cooled Generator using Fick's second law

윤병동† · 장범찬‡ · 김희수* · 배용채*

Byeng D. Youn †, Beom-Chan Jang ‡ and Hee-Soo Kim* and Yong-Chae Bae*

Key Words: Prognostics(예지), Power generator(발전기), Stator winding(고정자 권선), Water absorption(흡습), Directional Mahalanobis Distance

ABSTRACT

Power generator is one of the most important component of electricity generation system to convert mechanical energy to electrical energy. It designed robustly to maintain high system reliability during operation time. But unexpected failure of the power generator could happen and it cause huge amount of economic and social loss. To keep it from unexpected failure, health prognostics should be carried out

In this research, We developed a health prognostic method of stator windings in power generator with statistical data analysis and degradation modeling against water absorption. We divided whole 42 windings into two groups, absorption suspected group and normal group. We built a degradation model of absorption suspected winding using Fick's second law to predict upcoming absorption data. Through the analysis of data of normal group, we could figure out the distribution of data of normal windings. After that, we can properly predict absorption data of normal windings. With data prediction of two groups, we derived upcoming Directional Mahalanobis Distance (DMD) of absorption suspected winding and time vs DMD curve. Finally we drew the probability distribution of Remaining Useful Life of absorption suspected windings.

기 호 설 명

- C_{ms} : 권선의 mean shifted capacitance
- m : 권선 절연체에 흡습된 물의 농도
- D : 권선절연체의 확산계수
- h : 권선 절연체의 두께
- A, k, ti : 권선 흡습모델의 파라미터
- m_{∞} : 정상상태에서의 흡습된 물의 농도
- β : 비례상수
- Σ = 공분산 행렬

1. 서 론

발전기는 터빈의 운동에너지를 이용해 전기 에너지를 생산하는 기기로서 발전소 내 설비들 중에서도 그 중요도가 가장 높다고 할 수 있다. 발전소 내 핵심 설비인 발전기는 고장이 잘 발생하지 않도록 설계 되었지만 혹시나 발생할 수 있는 예상치 못한

† 교신저자; 서울대학교
E-mail : Bdyoun@snu.ac.kr
‡ 발표자; 서울대학교
E-mail : bob1333@snu.ac.kr
Tel : + 82-2-880-1664, Fax : + 82-2-880-1664
* 한국전력 전력연구원

고장은 엄청난 경제적, 사회적 손실과 혼란을 야기할 수 있다. 현재 발전기의 상태를 살펴보고 유지 및 보수로 운영 중에 발생할 수 있는 문제를 방지 하는데 이 때 살펴보는 항목들 중 하나가 고정자 권선의 흡습량이며 이는 권선 내부로 흐르는 냉각수가 노후 된 권선 내부의 균열을 통해 새어 나와 권선 절연체에 스며드는 정도를 의미한다. 절연체에 발생한 흡습현상은 발전기의 작동 중 에 큰 결함을 야기할 수 있다. 고정자 권선의 흡습량을 직접적으로 측정하기엔 어려움이 있으며 권선 절연체의 정전용량의 값을 측정해 흡습량을 간접적으로 확인한다. 측정된 권선의 정전용량 데이터를 이용해 미래의 흡습량을 예측하고 고장 시기를 예측 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 전전용량 예측

2.1 정상 권선 및 흡습의심 권선 분류

(1) Mean shifted capacitance의 필요성

권선의 흡습량을 간접적으로 나타내는 데이터는 권선 절연체의 정전용량 값으로 측정되어 있다. 흡습량의 증가에 따라 정전용량 측정치 또한 증가하기 때문에 정전용량 데이터의 분포는 시간에 따라 증가하거나 큰 이동이 없는 경우가 일반적이다. 하지만 측정년도에 따른 정전용량 데이터 분포의 이동 경향을 살펴본 결과 앞서 말한 분포 이동의 경향성과는 다소 무관한 결과를 보였다. 이러한 현상의 원인 중 하나를 측정 당시의 측정 환경에 의한 오차로 보았으며 외부 환경에 노출되는 측정 여건상 측정치가 주변의 향을 받는 환경오차가 발생할 수 있다고 판단했다. 시간의 경과에 따른 절연체의 흡습량이 증가하기 때문에 개개의 정전용량 데이터는 시간에 따라 증가하는 것이 정상의 경우이다. 하지만 시간에 따른 정전용량 데이터 분포의 shift는 random하게 일어나며 본 연구에서는 이러한 측정 오차에 의한 데이터 분포의 shift의 영향을 배제하기 위해 mean shifted capacitance data를 사용하기로 하였다.

(2) Normal data vs Warning suspected data

Mean shifted capacitance data를 측정 시기에 따라 plot해보면 아래 그래프와 같은 특징을 갖는 두 개의 data그룹으로 나누어 진다.

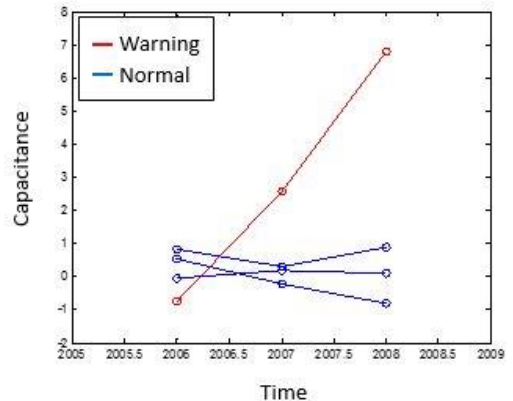


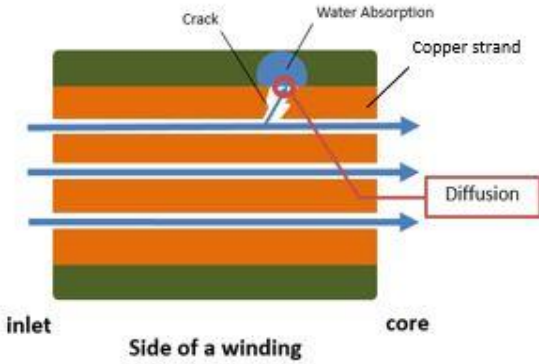
Figure 1 Warning group and Normal group

A 그룹의 데이터는 흡습량의 흡습 판정을 받은 이력이 있는 데이터이며 B그룹의 데이터는 흡습판정을 받지 않은 데이터들이다. A그룹의 데이터는 시간에 따른 증가의 경향이 명확하며 그 크기 또한 크지만 B그룹의 데이터는 변동이 불규칙 하며 변동 폭이 작음을 확인할 수 있다. 시간에 따른 흡습량의 증가 폭이나 높은 크기를 갖는 A그룹의 권선을 흡습의심권선 그룹으로 정의하고 B그룹의 데이터들은 정상권선 그룹으로 정의하였다. 권선을 두 그룹으로 나누는 기준은 흡습건전성 등급제를 사용하여 권선의 DMD 이력 중에 warning 영역에 속한 적이 있는 권선을 흡습의심 권선에 포함시키고 나머지 데이터들을 정상권선 그룹에 포함시켰다. 흡습이 진행 중인 권선은 시간의 흐름에 따라 스며드는 냉각수의 양이 증가하고 정전용량 값이 증가한다. 반면 정상권선들의 정전용량 값은 크게 변화하지 않으며 평균값에 가까운 분포를 가지고 있지 않아 흡습현상이 진행되지 않고 있음을 추측할 수 있다.

2.2 흡습 의심권선의 흡습량 예지

(1) Fick's second law를 이용한 흡습현상 모델링

아래 그림* 은 수냉식 발전기 고정자 권선의 모식도이다. 권선을 구성하는 copper strand 외벽에 crack이 생기면 crack을 따라 내부의 냉각수와 외부의 절연체가 접촉하게 되고 물이 절연체에 스며드는 흡습현상이 발생한다. 접촉면에서의 물이 스며드는 이 과정을 물질의 경계면에서의 확산현상으로 보았으며 시간에 따른 두 물질의 확산 농도의 변화는 아래의 Fick's second law를 통해 표현된다.



❖ Fick's second law

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 m}{\partial x^2}$$

- m = concentration of water in insulation
- D = diffusion coefficient
- X = position in sample

Fick's second law로부터 얻어진 시간에 따른 흡수농도의 변화는 다음과 같다.⁽²⁾

i) Analytical solution

$$m = (1 - \exp[-7.3(\frac{Dt}{h^2})^{0.75}])m_{\infty}$$

즉, Fick's second law의 해에 따르면 시간의 흐름에 따라 절연체의 흡수농도 m 은 0에서 m_{∞} 까지 단조 증가함을 확인할 수 있다. 위의 식 1을 다음과 같이 변형한다.

ii) 파라미터 간소화

$$m = (1 - \exp[-kt^{0.75}])m_{\infty} \quad (k = 7.3\frac{D}{h^2})$$

확산계수 D , 절연체의 두께 h 등의 상수들을 하나의 parameter로 정리했다.

iii) 흡수 발생시점 고려

$$m = (1 - \exp[-k(t-t_i)^{0.75}])m_{\infty}$$

확산현상에 따른 흡수 모델에 의하면 권선 내부의 균열에 의해 냉각수와 절연체의 접촉이 일어나 흡수가 발생한다. 균열로 인해 절연체와 냉각수 사이의 접촉이 형성된 시점을 t_i 라고 두어 t_i 부터 경

과한 시간만큼 확산이 진행되었음을 고려하였다.

iii) 정전용량으로의 변환

Fick's second law를 통해서 얻어진 확산 모델식은 확산된 물의 농도에 대한 식이다. 하지만 측정된 데이터는 정전용량 값이므로 정전용량 값으로의 변환을 하였다. 절연체의 정전용량 C 는 흡수량 m 의 증가에 따라 증가하고 본 연구에서는 C 와 m 사이의 선형관계를 가정 하였다.

$$C \text{와 } m \text{ 사이의 선형관계: } C = C_0 + \beta * m$$

$$\therefore C - C_0 = C_{ms} = A(1 - \exp[-k(t-t_i)^{0.75}])$$

($A = \beta * m_{\infty}$)

즉 권선의 mean shifted capacitance를 A , k , t_i 등 3개의 미지의 파라미터를 갖도록 모델링 하였다.

(3)회귀분석을 이용한 파라미터 결정

앞서 권선의 흡수 정도를 간접적으로 나타내는 권선의 mean shifted capacitance값을 예측하는 모델식을 Fick's second law의 analytical solution 과 그 식의 변형을 통해서 얻을 수 있었다. 모델식에 포함된 A , k , t_i 의 파라미터는 권선 별로 다른 값을 가지며 최적의 파라미터를 결정하여 정전용량의 변화 예측할 수 있으며 파라미터를 결정하는 방법으로 회귀분석법을 이용하였다.

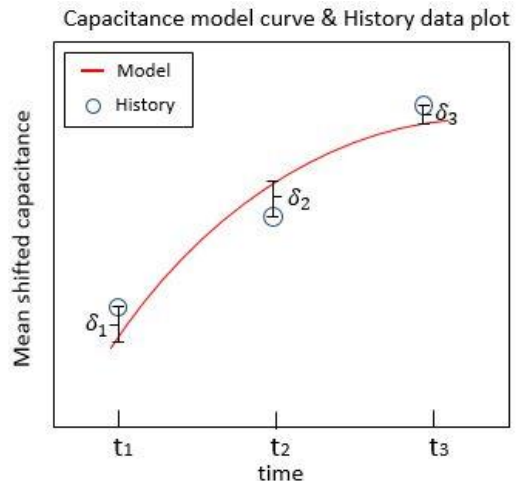


Figure 2 Model parameter decision

그림 2는 t_1 , t_2 , t_3 의 3회에 걸쳐 측정된 흡수의 심권선의 정전용량 History와 파라미터가 결정되지

많은 model curve를 함께 나타낸 그래프이다. 이때 각각의 History와 model curve는 δ_i 만큼의 편차를 갖는데 모델과 실제데이터의 편차가 최소가 되어야 하므로 δ_i 들의 rms가 최소가 되는 A, k, ti를 최적의 parameter로 정의하였다. 최적의 A, k, ti를 결정하기 위해 충분한양의 서로 다른 A, k, ti 순서쌍에 대해 δ_i 의 rms를 계산하였으며 그 값이 최소가 되는 A, k, ti의 순서쌍을 구했다.

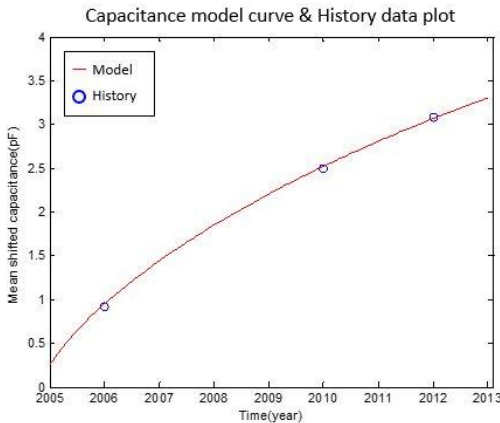


Figure 3 Result : Model parameter decision

그림 3은 파라미터가 결정된 실제 흡습의심권선의 정전용량 모델식과 history 데이터를 함께 plot한 그래프이다. 이와 같이 각각의 흡습의심권선에 대해 파라미터를 결정해주어 정전용량의 변화를 예측할 수 있다.

2.3 Normal data 분포의 추정

(1) 정규분포 추정 및 카이제곱 분포 검정

앞서 우리는 권선의 mean shifted capacitance data를 흡습의심권선 그룹과 정상권선 그룹으로 나누었으며 흡습의심권선의 정전용량은 Fick's second law를 이용한 모델식과 파라미터 결정을 통해 예지가 가능함을 논하였다. 정상권선의 data들은 변화가 불규칙적이며 크기 또한 상대적으로 작게 나타났는데, 측정의 오차를 고려 했을 때 각각의 정상권선의 정확한 정전용량 값은 알 수 없으며 정상 데이터들의 분포를 대표할만한 분포를 산정해 예측하였다. 본 연구에서는 정상권선의 mean shifted capacitance data가 시간에 따라 충분히 random한 거동을 보인다면 data의 분포는 정규분포에 가까울 것으로 판단하였으며 카이제곱 분포 검정을 통해 이를 확인하였다.

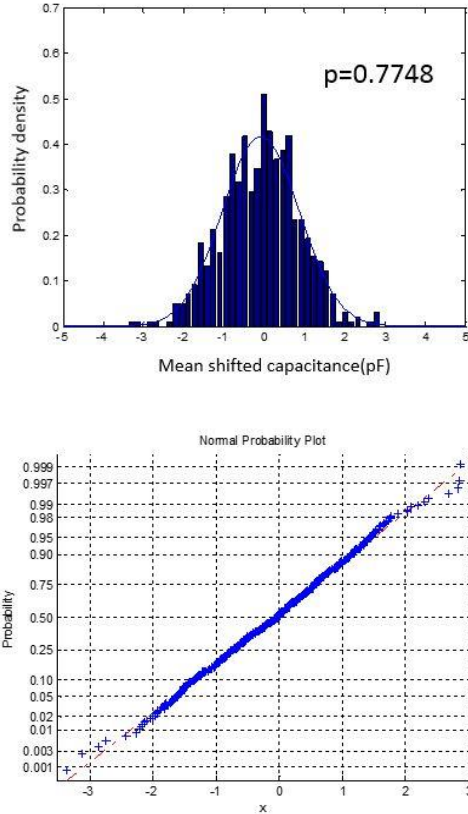


Figure 4 Chi-squared test and probability plot

3. 예측 DMD 및 RUL의 확률밀도함수

3.1 예측 DMD 계산

$$DMD(\tilde{X}_i) = \sqrt{(C_{ms,i})^T \Sigma^{-1} (C_{ms,i})}$$

권선의 흡습량을 평가하는 DMD는 위의 식을 통해 얻을 수 있다⁽¹⁾. 미래의 예측 DMD를 계산하기 위해선 흡습의심권선의 Cms 예상 값과 권선 전체의 공분산 행렬 Σ 가 필요하다. 2.2에서 Cms 예측 값을 계산하였으며 2.3에서 얻은 정상데이터 분포로부터 sampling한 정상권선의 Cms 예측 값들을 이용해 공분산 행렬을 계산할 수 있다. 즉, 흡습의심권선의 모델식으로부터 계산한 Cms 예측 값과 정규분포 가정에 따라 임의로 추출된 정상권선의 Cms 예측 값을 종합하여 예측 DMD를 계산한다. 일정 시간 간격으로 예측 DMD를 계산하면 Time vs DMD curve를 그릴 수 있다.

3.2 정상권선 데이터 추출의 반복과 RUL 계산

본 연구의 목적은 흡습의심권선의 Time vs DMD curve를 완성한 후 curve와 흡습 건진성 등급제의 Faulty 영역의 threshold가 만나는 지점을 고장 발생시기로 보고 권선의 고장 발생 예상시기나 잔여 수명을 예측하는 것이다.

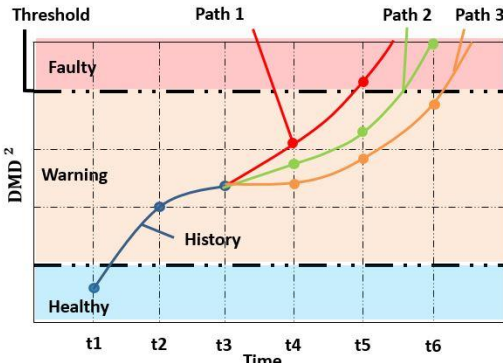


Figure 5 Time vs DMD curve

위 그래프는 각각의 정상권선 데이터 sampling에 따른 Time vs DMD curve의 변화를 나타낸 그래프이다. t1~t3의 데이터는 history에 해당하며 t4이후의 plot들은 예측 DMD계산을 통해 얻어진 plot들이다. 정확한 예측을 할 수 없는 정상권선의 데이터는 분포로부터의 sampling을 통해서 얻어지기 때문에 sampling마다 각기 다른 path가 만들어진다. 각각의 path가 threshold와 만나는 지점이 고장 예상시기이며 path마다 고장 예상시기가 다르게 나타나기 때문에 많은 path를 생성한 후 고장 예상시기를 수집해 확률밀도함수로 나타냈다.

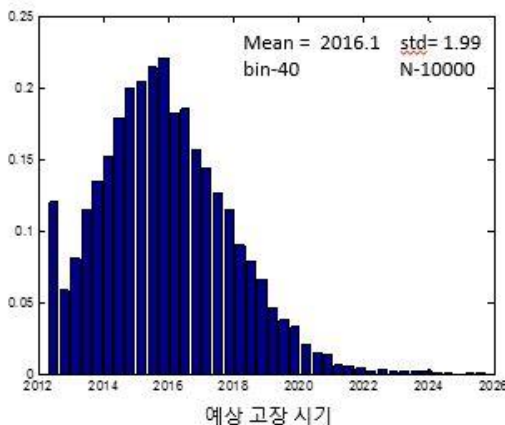


Figure 6 Probability distribution of Failure time

4. 결 론

본 연구는 수냉식 발전기 고정이 권선의 흡습 건진성을 예지하고 더 나아가 권선의 고장 예측시기를 예측하는 것을 목적으로 하였다.

우선 데이터 분석 결과 기존의 권선의 흡습 정도를 나타내던 capacitance data 대신 mean shifted capacitance data를 쓰는 것이 올바른 방법임을 판단하였다. 이후 권선을 흡습의심권선과 정상권선으로 분류하였으며 흡습의심권선과 정상권선은 각기 다른 방법으로 흡습량을 예지하였다. 흡습의심권선의 흡습량은 흡습과정을 물의 확산현상으로 보아 Fick's second law를 이용해 degradation model을 만들었다. 정상권선의 흡습량은 변화가 불규칙하고 크기 또한 흡습의심권에 비해 아주 작아서 개개 권선의 흡습량을 예지하는건 불가능 했다. 정상권선의 data 분포가 정규분포를 따름을 카이제곱 검정을 통해 확인하고 미래의 data도 그 분포를 따른다는 가정하에 분포로부터 sampling을 하는 방법을 사용했다.

권선의 예측 데이터들의 흡습정도를 평가하기 위해 Directional Mahalanobis Distance(DMD) 이를 이용한 흡습건진성 등급제를 이용하였으며 흡습의심권선의 Time vs DMD curve를 완성시켜 고장 예상시기를 결정했다. 또한 정상권선의 sampling 결과에 따라 다른 Time vs DMD curve가 결정되었으며 이 과정을 반복해 권선의 고장예상시기의 확률 분포를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 2012년도의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2012101010001C)

참 고 문 헌

(1) Kyung Min Park, Byeng D. Youn, Joung Taek Yoon, Hee soo Kim, 2013, Statistical Health Diagnostics and Prognostics for the Stator Windings in Water-cooled Generator based on Directional Mahalanobis Distance, KSME 2013 Fall conference, pp. 1054~1059

(2) T. Pham Hong, O. Lesaint, P. Gonon, 2009, Water Absorption in a Glass-Mica-Epoxy Composite I: Influence on Electrical Properties, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 1

(3) Hee Soo Kim, Yong Chae Bae and Chang Doo Kee, 2008, "Wet Bar Detection by Using Water Absorption Detector," Journal of Mechanical science and technology, Vol. 22, No. 6, pp. 1163-1173.

(4) Genechi Taguchi and Rajesh Jugulum, 2002, "The Mahalanobis-Taguchi strategy: a pattern technology system," John Wiley & Sons, ISBN: 0471023337.