

수냉식 발전기 고정자 권선의 흡습 건전성 예지

장범찬* · 윤병동*† · 김희수** · 배용채**

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 한국전력 전력연구원

Prognostics for Stator Windings of Water-Cooled Generator Against Water Absorption

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

* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

** Korea Electric Power Research Institute.

(Received November 21, 2014 ; Revised March 13, 2015 ; Accepted April 7, 2015)

Key Words: Prognostics(건전성 예지), Power Generator(발전기), Water Absorption(흡습)

초록: 본 연구에서는 수냉식 발전기 고정자 권선의 건전성 예지 방법에 대해 연구하였다. 권선의 데이터를 흡습 데이터와 정상 데이터로 분류 하였으며 각각의 데이터 군을 다른 방법으로 예측 하였다. 흡습 데이터를 예측하기 위해 픽의 제 2 법칙(Fick's second law)를 이용하여 건전성 감소 모델링을 하였고 픽의 제 2법칙의 해를 이용하여 흡습 모델식을 만들었다. 정상 데이터는 데이터의 분포가 정규분포를 따른다는 가설을 세운 후 카이제곱 검정을 통해 이를 입증하였다. 예측된 흡습 데이터와 정상 데이터를 이용하여 건전성 인자인 방향성 마할라노비스 거리(Directional mahalanobis distance; DMD)의 예측값을 산출하였고 흡습 권선의 고장 예상시점을 계산했다.

Abstract: In this study, we develop a prognostic method of assessing the stator windings of power generators against water absorption through statistical data analysis and degradation modeling. The 42 windings of the generator are divided into two groups: the absorption and normal groups. A degradation model of a winding is constructed using Fick's second law to predict the level of absorption. By analyzing data from the normal group, we can determine the distribution of the data of normal windings. The health index of a winding is estimated using the directional Mahalanobis distance (DMD) method. Finally, the probability distributions of the failure time of the windings are determined.

- 기호설명 -

- C : 정전용량
- C_{ms} : 평균 이동 정전용량(mean shifted capacitance)
- C₀ : 권선 절연체 자체의 정전용량
- m : 흡습 농도
- m_∞ : 절연체의 포화된 흡습농도
- D : 물질의 확산계수
- h : 절연체의 두께
- β : 비례상수
- t : 흡습이 진행된 시간

1. 서론

발전기는 터빈의 운동에너지를 전기 에너지로 변환하는 기기로서 발전소 내 설비들 중에서도 중요도와 요구되는 신뢰성이 아주 높다. 발전기는 고장 발생에 대비하여 보수적으로 설계 되었지만 국내의 많은 발전소 및 발전기기 등은 장기간의 운전으로 인한 장비의 노후화가 진행되고 있는 상황이다. 노후화로 인한 예상치 못한 발전기의 고장은 엄청난 사회적, 경제적 손실과 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 발전기의 상태를 정확히 진단하고 고장 징후를 사전에 예측함으로써 안전하고 지속적인 운용을 가능케 하는 건전성 예지 및 관리(Prognostics and Health Management; PHM) 기술

† Corresponding Author, bdyoun@snu.ac.kr

도입이 필수적이다.⁽¹⁾ 현재 발전기의 상태를 살펴 보고 유지 및 보수로 운영 중에 발생할 수 있는 문제를 방지하는데 이 때 살펴보는 항목들 중 하나가 고정자 권선의 흡습량이며 이는 권선 내부로 흐르는 냉각수가 노후 된 권선 내부의 균열을 통해 새어 나와 권선 절연체에 스며든 정도를 의미한다. 절연체에 발생한 흡습 현상은 발전기의 작동 중에 큰 결함을 야기할 수 있다.⁽²⁾ 고정자 권선의 흡습량을 직접적으로 측정하기엔 어려움이 있으며 권선 절연체의 정전용량의 값을 측정해 흡습량을 간접적으로 확인한다.⁽³⁾ 측정된 권선의 정전용량 데이터를 이용해 미래의 흡습량을 예측하고 고장 시점을 예측 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 정전용량 예측

2.1 평균 이동 정전용량의 도입

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 측정 년도에 따른 정전용량 데이터 분포의 이동 경향을 살펴본 결과 오히려 흡습 정도가 감소하는 등의 앞서 말한 분포 이동의 경향성과는 무관한 결과를 보였다. 이러한 현상의 원인 중 하나를 측정 당시의 측정 환경에 의한 오차로 보았으며 외부 환경에 노출되는 측정 여건 상 측정치가 주변의 영향을 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 이동은 무작위 하게 일어나며 본 연구에서는 이러한 측정오차에 의한 데이터 분포의 이동의 영향을 배제하기 위해 평균 이동 정전용량 데이터를 사용하기로 하였다.

2.2 정상 권선 vs 흡습 권선

평균 이동 정전용량 데이터를 측정 시기에 따라 그래프로 나타내면 Fig. 1처럼 두 개의 데이터 그룹으로 나누어 진다.

A그룹의 데이터는 흡습량의 흡습 판정을 받은 이력이 있는 데이터이며 B그룹의 데이터는 흡습 판정을 받지 않은 데이터들이다. A그룹의 데이터는 시간에 따른 증가의 경향이 명확하며 그 크기 또한 크지만 B그룹의 데이터는 변동이 불규칙하

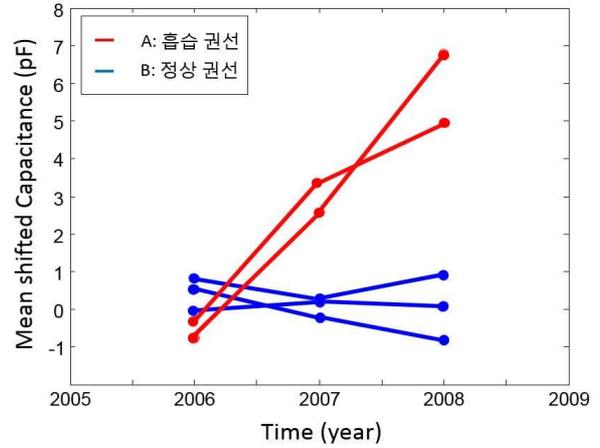


Fig. 1 Normal and warning groups

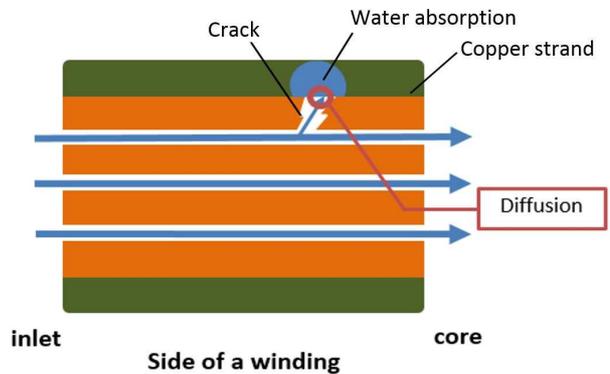


Fig. 2 Cross sectional view of winding

며 변동폭이 작음을 확인할 수 있다. 시간에 따른 흡습량의 증가 폭이 큰 A그룹을 흡습 권선 그룹으로 정의하고 B그룹의 데이터들은 정상 권선 그룹으로 정의하였다. 권선을 두 그룹으로 나누는 기준은 흡습 건전성 등급제를 사용하여 권선의 방향성 마할라노비스 거리(Directional mahalanobis distance; DMD) 이력 중에 위험 영역에 속한 이력이 있는지의 여부이다. 포함된 이력이 있는 권선을 흡습 권선에 포함시키고 나머지 데이터들을 정상권선 그룹에 포함시켰다. 흡습이 진행중인 권선은 시간의 흐름에 따라 스며드는 냉각수의 양이 증가하고 평균 이동 정전용량 값이 증가하는 경향을 보인다. 반면 정상권선들의 평균이동 정전용량 값은 크게 변화하지 않으며 평균값에 가까운 분포를 가지고 있지 않아 흡습 현상이 진행되지 않고 있음을 추측할 수 있다.

2.3 흡습 현상 모델링

Fig. 2는 수냉식 발전기 고정자 권선의 모식도이다. 권선을 구성하는 구리 도선 내부에 균열이 생기면 균열을 따라 내부의 냉각수와 권선을 감싸고

있는 절연체가 접촉하게 되고 냉각수가 절연체에 스며드는 흡습 현상이 발생한다. 접촉면에서의 냉각수가 스며드는 이 과정을 물질의 확산현상으로 보았으며 물질의 경계면에서의 시간에 따른 두 물질의 확산 농도의 변화는 픽의 제2법칙(Fick's second law)를 통해 표현된다.⁽⁴⁾

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

픽의 제 2법칙으로부터 얻어진 흡습 상태의 해는 식 (1)과 같으며⁽⁵⁾ 해에 따르면 시간의 흐름에 따라 절연체의 흡습 농도는 0에서 m_{∞} 까지 단조 증가한다.

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

식 (2)와 같이 확산계수, 절연체의 두께 등의 시간에 독립적인 파라미터들의 값을 k 로 정리했다. 확산현상에 따른 흡습 모델에 의하면 권선 내부의 균열에 의해 냉각수와 절연체의 접촉이 일어나는 시점부터 흡습이 발생한다. 흡습 상태를 알고자 하는 시점을 t_f , 흡습이 시작된 시점을 t_i 라고 두어 t_i 부터 t_f 까지 경과한 시간만큼 흡습이 진행되었음을 고려하였다.

2.4 흡습 농도 및 정전용량 선형성 가정

픽의 제 2법칙을 통해서 얻어진 확산 모델식은 확산된 물의 농도에 대한 식이다. 하지만 측정된 데이터는 정전용량 값이므로 정전용량 값으로의 변환이 필요했다. 본 연구에서는 흡습량의 증가에 따른 절연체 정전용량의 증가 경향을 선형관계로 가정 하였다. C 와 m 사이의 선형관계에서 식 (3)과 같은 관계가 유도된다.

$$C - C_0 = C_{ms} = A(1 - \exp[-k(t - t_i)^{0.75}]) \quad (3)$$

$$(C = C_0 + \beta m, A = \beta m_{\infty})$$

권선의 평균 이동 정전용량을 예측하는 모델식이 A, k, t_i 등의 3개의 미지의 파라미터를 갖도록 모델링 하였다.

2.5 회귀분석을 이용한 파라미터 결정

앞서 권선의 흡습정도를 간접적으로 나타내는 권선의 평균 이동 정전용량 값을 예측하는 모델식을 픽의 제 2법칙의 해석해 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 회귀분석법

을 이용하였다. Fig. 3은 t_1, t_2, t_3 의 3회에 걸쳐 측정된 흡습 권선의 정전용량 측정 데이터와 파라미터가 결정되지 않은 모델식의 그래프를 함께 나타낸 그래프이다. 이 때 각각의 정전용량 측정 데이터와 모델식의 그래프는 δ_i 만큼의 편차를 갖는데 모델과 실제데이터의 편차가 최소가 되어야 하므로 δ_i 들의 제곱평균(rms)을 최소로 갖는 A, k, t_i 를 최적의 파라미터로 정의하였다. 최적의 파라미터를 결정하기 위해 충분한 양의 서로 다른 A, k, t_i 순서쌍에 대해 δ_i 의 제곱평균을 계산하였으며 그 값이 최소가 되는 파라미터 순서쌍을 찾았다.

2.6 정상권선 데이터 분포의 추정

앞서 우리는 권선의 평균 이동 정전용량 데이터를 흡습권선 그룹과 정상권선 그룹으로 나누었으며 흡습권선의 평균 이동 정전용량은 예측 모델식의 파라미터 결정을 통해 예지가 가능함을 논하였다. 정상권선의 데이터들은 변화가 불규칙적이며 크기 또한 상대적으로 작게 나타났는데, 데이터 오차를 고려 했을 때 각각의 정상 권선의 정전용량 값은 정확히 알 수 없으며 정상데이터들의 분포를 대표할만한 분포를 산정해 예측하였다. 정상권선의 평균 이동 정전용량 데이터가 시간에 따라 충분히 무작위한 거동을 보인다면 데이터의 분포는 정규 분포에 가까울 것으로 판단하였으며 카이제곱 분포 검정을 통해 이를 확인하였다. 정상권선의 평균 이동 정전용량 데이터 분포를 카이제곱 검정을 통해 얻은 p값은 0.7748으로 가설 채택의 일반적인 기준 값인 0.05를 크게 상회하는 값이었다.⁽⁶⁾ 정규 확률도(Normal probability plot)에서 데이터 분포가 정규분포를 잘 따름을 확인할 수 있었다.

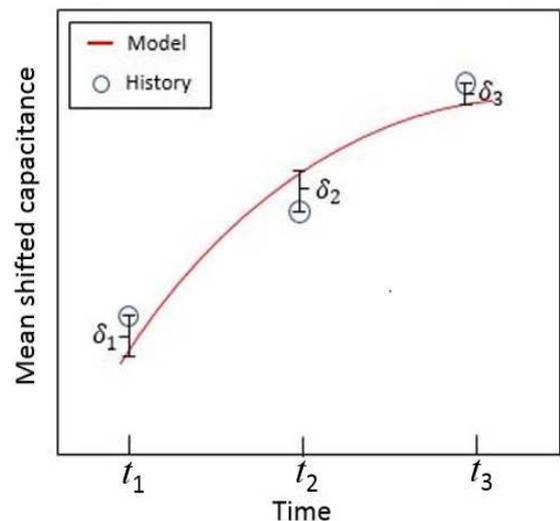


Fig. 3 Model parameter decision

3. 예측 DMD 및 고장 예상시점 산정

3.1 예측 DMD 계산

$$DMD(\bar{x}_i) = \sqrt{(C_{ms,i})^T \Sigma^{-1} (C_{ms,i})} \quad (4)$$

권선의 흡습량을 평가하는 DMD는 식 (4)를 통해 얻을 수 있다.⁽⁷⁾

미래의 예측 DMD를 계산하기 위해선 흡습권선의 평균 이동 정전용량 예측 값($C_{ms,i}$)과 권선 전체 데이터의 공분산 행렬(Σ)이 필요하다. 2장에서 평균 이동 정전용량 예측 값을 계산하였으며 섹션 2.6에서 얻은 정상 데이터 분포로부터 샘플링한 데이터들을 이용해 전체 데이터의 공분산 행렬을 추정할 수 있다. 즉, 흡습 권선의 모델식으로부터 계산한 평균 이동 정전용량 예측 값과 정규분포 가정에 따라 추출된 정상권선의 데이터를 종합하여 예측 DMD를 계산한다. 일정 시간 간격으로 계산한 예측 DMD를 이용하여 시간에 따른 DMD² 그래프를 그릴 수 있다.

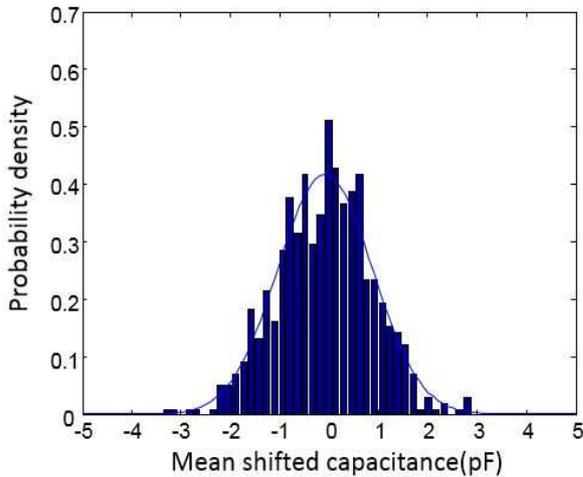


Fig. 4 Chi-squared goodness-of-fit test

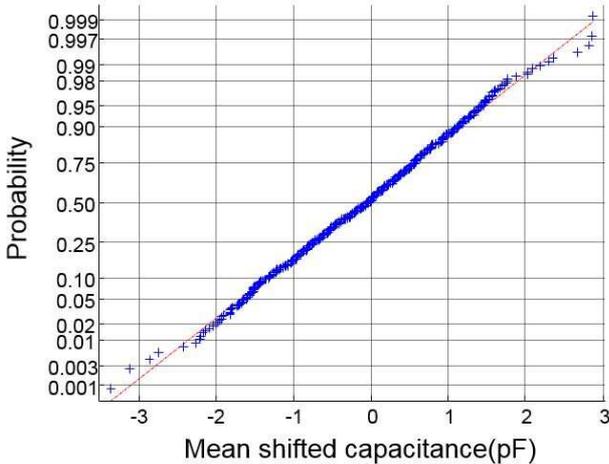


Fig. 5 Normal probability plot

3.2 고장예상시기의 확률분포

본 연구의 목적은 시간에 따른 DMD² 그래프를 완성한 후 그래프와 흡습 건전성 등급제⁽⁶⁾의 고장 영역의 문턱 값이 만나는 지점을 고장 발생시점으로 보고 권선의 고장 발생 예상시점을 예측하는 것이다. Fig. 6은 각각의 정상권선 데이터 샘플링에 따른 시간에 따른 DMD² 그래프의 변화를 나타낸 그래프이다. $t_1 \sim t_3$ 의 데이터는 기록된 데이터에 해당하며 t_4 이후의 점들은 예측 DMD계산을 통해 얻어진 점들이다. 정확한 예측을 할 수 없는 정상권선의 데이터는 분포로부터의 샘플링을 통해서 얻어지기 때문에 샘플링마다 각기 다른 경로가 만들어진다. 각각의 경로가 문턱 값과 만나는 지점이 고장 예상시점이며 경로 마다 고장 예상시점이 다르게 나타나기 때문에 많은 경로를 생성한 후 고장 예상시점을 수집해 확률밀도 함수로 나타냈다.

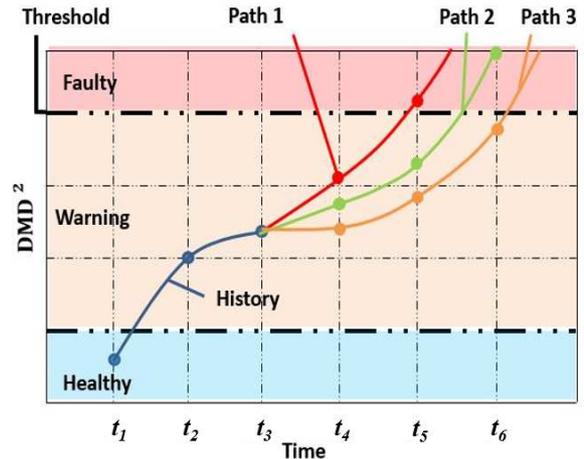


Fig. 6 Time vs DMD curve

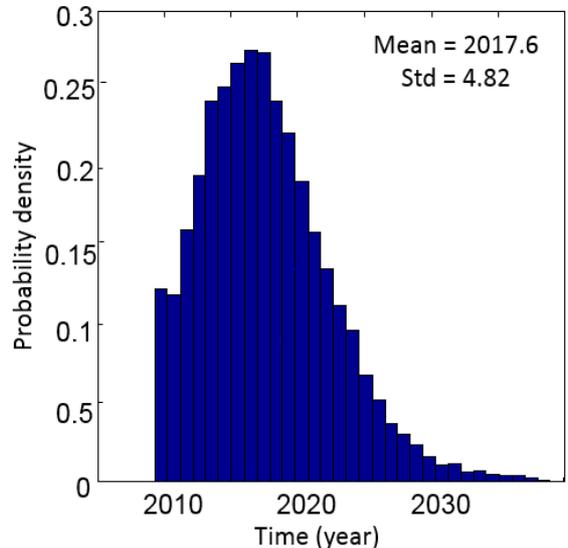


Fig. 7 Probability distribution of failure time

4. 결 론

본 연구는 수냉식 발전기 고정자 권선의 흡습 건전성을 예지하고 더 나아가 권선의 고장 예측시점을 예측하는 것을 목적으로 하였다. 우선 데이터 분석 결과 기존의 권선의 흡습 정도를 나타내던 정전용량 데이터 대신 평균 이동 정전용량을 쓰는 것이 더 나은 접근법임을 밝혔다. 이후 권선을 흡습 권선과 정상권선으로 분류하였으며, 흡습 권선과 정상 권선에 대하여 각기 다른 방법으로 흡습량을 예지하였다. 흡습 권선의 흡습량은 흡습 과정을 물의 확산현상으로 보아 픽의 제 2법칙을 이용해 건전성 저하 모델을 만들었다. 정상권선의 흡습량은 변화가 불규칙하고 크기 또한 흡습 권선에 비해 아주 작아서 개개 권선의 흡습량을 예지하는 건 불가능 했다. 정상권선의 분포가 정규분포를 따름을 카이제곱 검정을 통해 확인하고 미래의 데이터도 그 분포를 따른다는 가정하에 과거 데이터에서 생성한 분포로부터 샘플링을 하는 방법을 사용했다. 권선의 예측 데이터들의 흡습 정도를 평가하기 위해 DMD를 이용한 흡습 건전성 등급제⁽⁶⁾를 이용하였으며 흡습 권선의 시간에 따른 DMD^2 그래프를 완성시켜 고장 예상시점을 결정했다. 또한 정상권선의 샘플링 결과에 따라 다른 시간에 따른 DMD^2 그래프가 결정되었으며 이 과정을 반복해 권선의 고장예상시점의 확률분포를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2012101010001C).

참고문헌

(References)

- (1) Yoon, J. T., Youn, B. D., Park, K. M. and Lee, W. R., 2013, "Vibration-Based Robust Health Diagnostics for Mechanical Failure Modes of Power Transformers," in *Proceeding of the IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, pp. 1~5.
- (2) Kim, B. R., Kim, H. D., 2012, "Electrical Properties of Wet Bars in Water-cooled Generator Stator Windings," *Journal of the Korean Institute of Electronic Material Engineers*, Vol. 25, No. 10, pp. 817~823.
- (3) Kim, H. S., Bae, Y. C. and Kee, C. D., 2008, "Wet Bar Detection by Using Water Absorption Detector," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 1163~1173.
- (4) Mendeleev, B. S., Srolovitz, M. I. and Eds, D. J., 2005, *Thermodynamics and Kinetics in Materials Science: A Short Course*, Oxford University Press, Oxford, pp. 167~171.
- (5) Hong, T. P., Lesaint, O. and Gonon, P., 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, pp. 1~10.
- (6) Haldar, A. and Mahadevan, S., 1999, *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*, Wiley, New York, pp. 112~114.
- (7) Park, K. M., Youn, B. D., Yoon, J. T. and Kim, H. S., 2013, "Statistical Health Diagnostics and Prognostics for the Stator Windings in Water-cooled Generator based on Directional Mahalanobis Distance," in *Proceeding of the KSME 2013 Fall Conference*, pp. 1054~1059.