

# Directional Mahalanobis Distance 기반 수냉식 발전기 고정자 권선의 흡습 건전성 진단 시스템 개발

박경민\* · 윤병동\* · 윤정택\* · 김희수\*\* · 장범찬\*†

\*서울대학교 기계항공공학부 시스템 건전성 및 리스크 관리 연구실, \*\*한전 전력연구원 수화력발전연구소

## Development of Statistical Health Assessment system for the Stator Windings in Water-cooled Generator based on Directional Mahalanobis Distance

Kyung Min Park\*, Byeng D. Youn\*†, Joung Taek Yoon\*, Hee soo Kim\*\*, and Beom Chan Jang\*†

\* Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 151-742, Seoul, Korea

\*\* KEPCO Research Institute, Power Generation Lab, 305-760, Da ejeon, Ko rea

### 1. 서론

전기 에너지 생산이 이루어지는 발전기는 발전소 내 발전 설비들 중에서도 가장 중요한 요소라고 할 수 있으며 발전기의 예상치 못한 작동중지는 상당한 경제적, 사회적 손실을 야기한다. 발전사는 정기적인 종합점검인 오버홀(Overhaul)을 통해 발전기의 상태를 점검, 유지, 보수 하여 발전기의 작동 중 발생 할 수 있는 문제들을 사전에 방지하는데 이 오버홀을 통해 살펴보는 발전기의 중요한 건전성 지표 중 하나가 발전기 내 고정자 권선의 흡습량이다. 발전기 내의 고정자 권선은 권선을 절연체에 의해서 감싸져 있으며 권선 내부엔 냉각수가 흐르게 되는데 이 냉각수가 절연체에 스며들게 되는 현상을 흡습(Absorption)이라고 정의한다. 절연체의 이러한 흡습현상은 발전기의 작동 중 큰 결함을 야기한다고 알려져 있다. 고정자 권선의 흡습량은 직접적으로 측정하기에는 어려움이 있고 절연체의 정전용량을 통해 간접적으로 측정하는데 일반적으로 Stator bar capacitance mapping test를 통해 그 값이 측정된다. 본 연구에서는 이러한 기존 방법들의 한계를 극복하기 위해 Directional Mahalanobis Distance(이하 DMD)라는 개념을 제안하였으며 각 권선의 정전용량들로부터 얻어진 DMD를 통해 흡습이 진행된 권선과 그렇지 않은 권선을 효과적으로 구분할 수 있었다[\*] 이를 기반으로 권선의 흡습 정도에 대한 평가를 진행하였으며 전문가의 조언을 얻어 DMD 기반의 흡습 건전성 등급제 또한 마련하였다.

### 2. Directional Mahalanobis Distance

마할라노비스 거리(Mahalanobis Distance)는 다변수로 측정된 자료를 하나의 지표로 나타내주는 방법 중 하나이며 기하학적으로는 다차원 공간 내에서 공간의 중심점으로부터 각 점까지의 거리를 의미한다. 비슷한 성질을 가진 데이터들은 서로 모여 그룹을 형성하고, 그룹의 중심으로부터 거리가 멀수록 일반적인 데이터와는 다른 성격을 가졌다고 해석할 수 있다. 본 연구에서 다루는 정전 용량 데이터의 경우 정전용량의 평균보다 작은 값들은 흡습과 상관 없는 데이터지만 높은 MD 값을 가질 수 있다. 즉 높은 정전용량 값을 가지는 데이터들에 대한 MD 값만을 선별해내는 과정이 필요했고 본 연구에서는 데이터의 방향성까지 고려한 Directional Mahalanobis Distance를 제안하였다. DMD는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

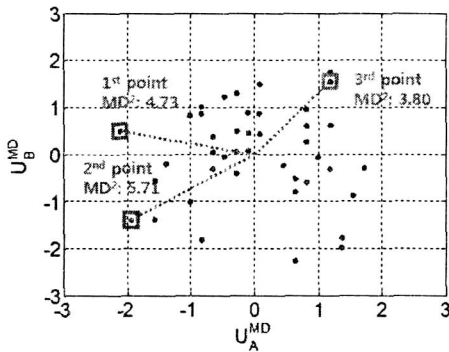
$$MD(\bar{X}_i) = \sqrt{(\bar{X}_i - \mu)^T \Sigma^{-1} (\bar{X}_i - \mu)}$$

$$\bar{X}_{n,i} = \begin{cases} X_{n,i}, & \text{if } X_{n,i} > \mu_n \\ \mu_n, & \text{otherwise} \end{cases}$$

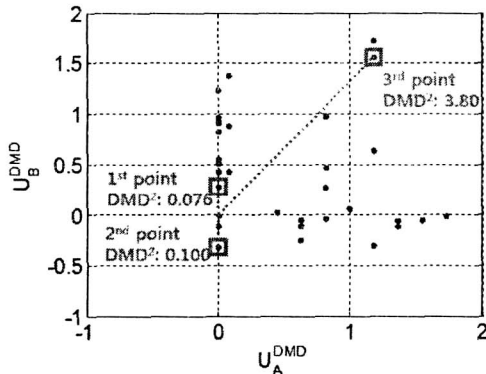
여기서  $\bar{X}_i = (X_{1,i}, \dots, X_{N,i})^T$ 는  $i$  번째 권선의  $N$ -차원 정전 용량 데이터 벡터이며,  $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_N)^T$ 는 확률변수 별 평균 값의 벡터이다.  $\Sigma$ 는 공분산 행렬이다. 본 연구에서는 원점으로부터 거리가 멀수록 가중치를 부여해 주기 위해 DMD의 제곱(DMD<sup>2</sup>)을 지표로써 사용했다.

† Presenting Author, bob1333@snu.ac.kr

‡ Corresponding author, bdyoun@snu.ac.kr



(a)



(b)

Fig. 1 Non-directional(a) to Directional Mahalanobis Distance(b)

### 3. 건전성 등급제 설정

Top그룹 내에서 고장으로 분류한 데이터의 최소 값이 28.413, 흡습으로 분류한 데이터의 최대 값이 21.963인 것을 토대로 하여 중간 값 25를 고장 판별 문턱값(Threshold value)으로 정했다.

$MD^2$ 은 카이 제곱 분포 (Chi-squared ( $\chi^2$ ) distribution)를 따르는 것으로 알려져 있다. 카이 제곱 분포는  $k$ 개의 서로 독립적인 표준 정규 확률변수를 각각 제곱한 다음 합해서 얻어지는 분포이며, 기대값은 자유도와 같은  $k$ 이다. 이와 같은 성질은  $MD$ 를 기반으로 한  $DMD$ 에도 마찬가지로 적용된다. 3개의 확률변수를 묶은 Top그룹과 2개의 확률변수를 묶은 Bottom그룹의 거리 제곱 평균은 각각 3과 2이다. 이 둘을 비교하기 위해서는 각자의 스케일을 고려한 변환이 필요하다. 즉, Top그룹에서 획득한 문턱 값은 Bottom그룹에서 2/3의 스케일을 가졌을 때 대비되는 값이며, 계산하였을 때 약 16.67이다.

		TOP group	BOTTOM group
Faulty	Range	$DMD^2 \geq 25$	$DMD^2 \geq 16.67$
	Meaning	Faulty (Water absorption)	
Warning	Range	$15 \leq DMD^2 < 25$	$13.33 \leq DMD^2 < 16.67$
	Meaning	Warning	
Healthy	Range	$DMD^2 < 15$	$DMD^2 < 10$
	Meaning	Healthy	

Fig. 2 Definition of health grades

### 4. 결론

본 연구에서는 Directional Mahalanobis Distance 개념을 도입해 수냉식 발전기의 고정자 권선의 흡습 정도를 평가하고 이를 기반으로 한 건전성 등급제 구축을 목적으로 하였다. 흡습 건전성은  $DMD$ 라는 지표로써 제시되었으며 이는 매우 정량적이었으며 직관적인 결과를 도출하였다. 추가적으로  $DMD$ 를 건전성 지수로 변환시키는 것과 동시에 흡습의 상태를 단계별로 보기 위해 건전성 등급제를 구축하였다.

### 5. 후기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지 기술 개발사업(2012101010001C)과 서울대학교 정밀 기계 연구소(SNU-IAMD)의 지원을 받아 수행하였습니다.

### 6. 참고문헌

- (1) Joseph A. Worden and Jorge M. Mundulas, 2001, "Understanding, Diagnosing, and Repairing Leaks in Water-Cooled Generator Stator Windings," *GE Power Systems*, GER-3751A.
- (2) 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.
- (3) -29.
- (4) Genechi Taguchi and Rajesh Jugulum, 2002, "The Mahalanobis-Taguchi strategy: a pattern technology system," *John Wiley & Sons*, ISBN: 0471023337.