

크로스 커패시턴스를 이용한 발전기 고정자 권선 절연물 흡습 측정 센서

논 문
60-10-24

Water Absorption Sensor of Generator Stator Bar Insulation using Cross Capacitance

배 용 채[†] · 김 희 수^{**} · 이 두 영^{**} · 이 옥 룬^{**} · 이 래 덕^{***}
(Yong-Chae Bae · Hee-Soo Kim · Doo-Young Lee · Wook-Ryun Lee · Rae-Deok Lee)

Abstract - The mechanical integrity of generator stator windings is one of the critical point because the electric power is generated and conducted to power system through these windings. To cool down the heat emitted from generator winding during its operation, a majority of generators use de-mineralized water characterized by high cooling efficiency. Contrary to such the excellent cooling efficiency, however, the damaged bar insulations attributed to the absorption of cooling water in the generator stator winding lead to highly time- and cost consuming efforts as well as to service deterioration due to unexpected forced outage of generator. It is described that the new design of water absorption sensor using cross capacitance for generator in power plant in order to increase the reliability of water absorption diagnostics for generator stator bar insulation.

Key Words : Generator, Stator bar, Insulation, Cross capacitance, Dielectric constant, Water absorption

1. 서 론

발전기는 전기를 생산하는 핵심 설비로서 발전소의 안정적 전력 공급에 지대한 영향을 끼치는 핵심 설비이다. 발전기 운전중 고정자 권선에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 냉각 효율이 좋은 순수를 사용하고 있으나 발전기 운전중 발생하는 냉각수 누설 및 흡습은 절연물의 절연 내력을 급격히 저하시켜 운전중 발전소 불시 정지의 원인이 된다. GE사(General Electric Co.)의 보고서에 따르면, 600여기의 수냉각 발전기 고정자 권선에 대한 시험 결과 약 56%의 냉각수 누설 또는 흡습과 관련된 고정자 권선의 절연 파괴가 발생되었으며, 일반적으로 수행하는 진공 저하 시험과 압력강하 시험을 통과하더라도 권선의 건전성을 담보할 수 없다고 보고한 바 있다[1].

이는 최근 국내 발전소에서 발전기 권선의 권선 냉각수 흡습으로 인하여 발생한 발전기 손상사고를 보아도 알 수 있다(그림 1). 따라서 발전소에서는 정기적으로 수행되는 예방 정비 기간을 이용하여 발전기 내부 점검과 냉각수 누설 시험을 수행하여 고장을 예방하고 있다.

발전기 고정자 권선의 냉각수 흡습은 발전기 절연물의 파손을 유발시켜 발전소의 불시 정지를 가져오므로 특히 유의하여야 한다. 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 여부를 진

단하기 위해서 주로 절연물의 정전 용량을 측정한다. GE 및 WH(Westinghouse)에서는 자체 흡습 시험 장치를 개발하였으나 측정 데이터의 재현성이 떨어지고 비교적 오차가 커 국내 발전소에서의 활용도가 크게 떨어진다. 또한 도시바에서는 GE와 같이 정전용량을 측정하여 진단하지만 발전기 회전자가 인출되지 않은 상태에서 고정자 권선에 대한 흡습 시험을 할 수 있게 하였다. 이 기술은 센서를 원격 조정 장치에 부착하여 벨트를 통해 적외선 카메라를 이용하여 각 권선으로 이동하면서 권선 사이의 정전회전자를 인출하지 않고 권선 사이의 센서를 압입시켜 정전용량을 측정하나 권선 주위 조건 및 표면 상태를 고려하기 어려워 오차가 발생되어 국내의 활용 사례가 전무하다. 한편, Y.C. Bae 등은 발전기 고정자 권선 절연물의 커패시턴스를 측정하는 장치를 개발하고 국내 발전소의 정기 예방점검 기간중 발전기 권선의 흡습 상태를 진단하고 있다[2].

표준화력 발전기 고정자(그림 2)의 경우, 측정 센서의 면적에 의해 차이는 있지만, 권선 각각의 측정 위치에서의 정전 용량은 약 10~20 pF 전후의 값을 갖는다. pF 단위는 -12 order를 가지고 있어 계측기의 정밀도와 절연물의 상태에 따라 흡습 진단의 신뢰도에 큰 영향을 미치게 된다. 발전기 고정자 권선 절연물에 대한 신뢰성 있는 흡습 여부의 진단은 발전기 운전 신뢰성 증진 및 정비 비용 절감 측면에서 매우 중요하나 발전기 고정자 권선의 제작, 조립 및 표면 상태에 따라 측정값이 민감하게 변한다. 또한, 절연물의 깊이에 따른 흡습 상태를 평가할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존에 개발되어 사용되고 있는 발전기 고정자 권선 절연물의 냉각수 흡습 측정 및 진단 시 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 절연물의 두께 차이에 의한 측정 오차를 없애고 진단의 신뢰성을 높이기 위하여 크로스 커패시턴스를 이용한 발전기 흡습 센서를 개발하였다.

* 정 회 원 : 한전 전력연구원 책임연구원
** 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원
*** 정 회 원 : 표준과학연구원 (전) 책임연구원
† 교신저자, 정회원 : 한전 전력연구원 책임연구원
E-mail : ycbae@kepri.re.kr
접수일자 : 2011년 8월 18일
최종완료 : 2011년 9월 23일

본 연구의 결과는 발전기 정지 중 수행되는 고정자 권선 절연물에 대한 흡습 시험과 진단의 신뢰성 증진에 기여하리라 기대된다.



그림 1 발전기 고정자 권선 손상
Fig. 1 generator stator winding damage

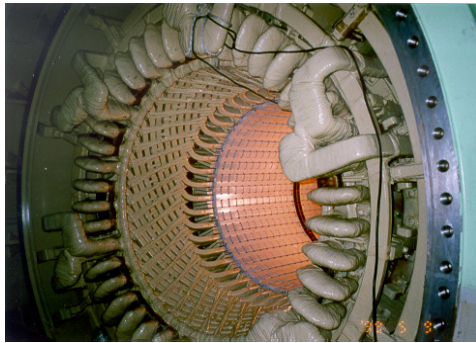


그림 2 표준화력 발전기 고정자
Fig. 2 500MW generator stator

2. 크로스 커패시턴스

2.1 크로스 커패시턴스 이론

크로스 커패시턴스 원리는 Thompson과 Lampard에 의하여 제안된 원리에 기초하고 있다[3], 즉, 그림 3과 같이 수직 단면을 갖는 원통을 4개의 좁은 절연 gap으로 나눌 때 C_2 의 전극을 접지 시켰을 때 단위 길이당 정전용량 C_1 과, C_1 의 전극을 접지 시켰을 때 단위 길이당 정전용량 C_2 의 관계를 나타내면, 원통의 단면적의 모양에 관계없이 전극간의 공간이 진공일 때

$$e^{-4\pi^2 C_1} + e^{-4\pi^2 C_2} = 1 \quad (1)$$

과 같다, 일반적으로 $C_1 \neq C_2$ 이므로

$$\Delta C = C_1 - C_2$$

크로스 커패시턴스를 이용한 발전기 고정자 권선 절연물 흡습 측정 센서

$$C_m = (C_1 + C_2)/2 \quad (2)$$

이라 정의 하면,

$$\exp[-4\pi^2(C_m + \frac{\Delta C}{2})] + \exp[-4\pi^2(C_m - \frac{\Delta C}{2})] = 1 \quad (3)$$

이 된다. 만일 전극 구조가 대칭인 경우에는

$$C = \ln 2 / 4\pi^2 \quad (4)$$

가 되므로 이를 정리하면

$$\ln 2 - 4\pi^2 C_m + \frac{1}{2} \left(\frac{\ln 2}{2} \frac{\Delta C}{C} \right)^2 - \frac{1}{12} \left(\frac{\ln 2}{2} \frac{\Delta C}{C} \right)^4 + \dots = 0 \quad (5)$$

$$C_m = C \left[1 + \frac{\ln 2}{8} \left(\frac{\Delta C}{C} \right)^2 - \frac{(\ln 2)^3}{192} \left(\frac{\Delta C}{C} \right)^4 + \dots \right]$$

이 된다. 여기서 $\Delta C/C$ 가 충분히 작을 때 2항 이상은 무시할 수 있으므로 크로스 커패시턴스는

$$C_m = C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l \quad (6)$$

이 된다. 여기서 진공 유전율 $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$ 이며 μ_0 는 진공 상태의 투자율, 그리고 l 은 원통의 길이이다. 식(6)에서 보는 바와 같이 크로스 커패시턴스는 전극의 사양에는 무관하고 다만 길이(l)에만 종속됨을 알 수 있다.

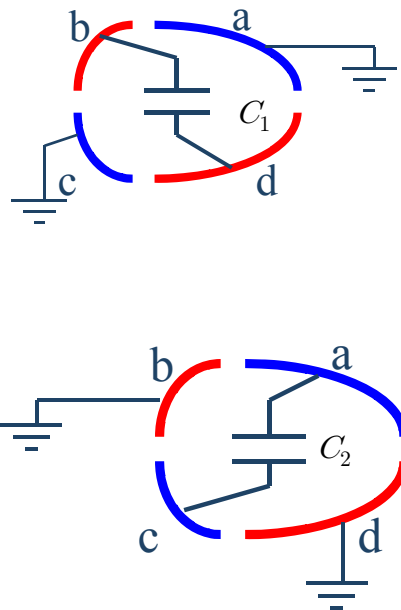


그림 3 크로스 커패시턴스 원리

Fig. 3 Principle of cross capacitance

2.2 흡습 측정 장치 적용

발전기 고정자 권선의 절연물에 대한 냉각수 흡습 여부를 진단하기 위하여 일반적으로 활용되는 권선 절연물의 정전용량 측정 방법은 해결해야만 하는 몇 가지 기술적인 문제가 있다. 고정자 권선과 절연물간의 정전용량은

$$C = k \frac{\epsilon}{d} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 k는 상수이며, d는 권선 절연물의 거리, 그리고 ϵ 은 유전상수이다. 정전용량은 권선 절연물의 두께가 일정할 때 절연물의 유전상수에 의존하게 된다. 즉 권선의 절연물에 냉각수가 흡습되게 되면 냉각수의 유전상수에 따라 정전용량이 변화하게 된다. 이러한 원리는 고정자 권선 절연물의 두께가 일정하고 표면의 상태가 매우 좋다는 가정하에 성립될 수 있다. 그러나 발전기 고정자 권선은 제작과 조립 중에 권선 두께의 차이가 발생되며 특히 절연 페인팅 작업에 따라 권선 표면의 상태가 달라져서 측정 오차가 발생되어 신뢰성 있는 흡습 진단을 저해한다. 기존의 방법으로 인한 흡습 시험 시 발생할 수밖에 없는 이러한 오차 문제를 해소하기 위하여 크로스 커패시턴스 기법을 제안하게 되었다. 크로스 커패시턴스는 전극의 사양과는 무관하므로 센서 설계를 적절하게 하면 발전기 고정자 권선 절연물의 두께에 따른 흡습 상태를 진단 할 수 있다. 또한 크로스 커패시턴스의 원리를 이용하면 일부 전극 표면에 존재하는 소량의 유전체는 측정에 큰 영향을 주지 않는다는 장점이 있다.

3. 흡습 판정 가능성 분석

3.1 시뮬레이션

절연체를 마이크로 형성한 임의의 모델에서의 흡습 효과가 정전용량 측정에 미치는 결과를 확인하기 위하여 전기장 시뮬레이션을 이용하여 전기장을 검토하였다.

그림 4에서 알 수 있는바와 같이 절연물(mica sheet) 내부에 임의의 수분 층이 존재하면 전기장의 균일 분포에 영향을 주어 정전용량이 변화됨을 알 수 있다.

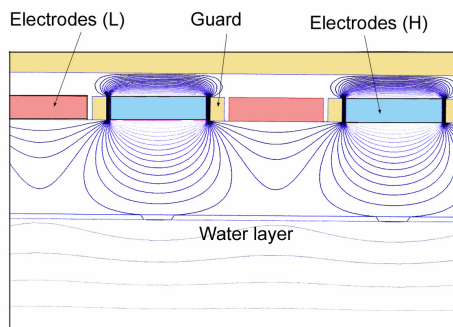


그림 4 수분 층에 의한 전기장 분포
Fig. 4 Electric field distribution for water layer

그림 5에서 (1-1)과 (2-1)은 수분 층이 유전체로 존재할 경우 수분 층의 위치에 따른 전기 용량의 변화이고, (1-2)와 (2-2)는 수분층이 접지 전위를 가지고 있을 때의 정전용량을 나타낸다. 그림에서 각 그래프의 기울기는 비슷하나 가드 전극이 없을 때 명목상 전기용량이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 이웃하고 있는 전극 소자 측면에서의 용량이 큰 offset이 포함되기 때문이며 이는 대상물에 대한 측정감도가 떨어지는 문제를 유발 시킨다. 따라서 가드 전극을 추가하여 이러한 문제를 해결할 수 있음을 알 수 있다.

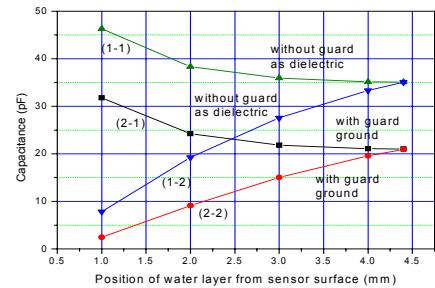


그림 5 흡습 측정에 따른 guard 전극 효과
Fig. 5 Effect of guard electrodes on the simulated capacitance.

3.2 흡습 실험

500MW 발전기에 실제 사용된 권선 절연물 시편(그림 6)을 더운 물속에서 일정 기간 유지하고 표면을 건조시킨 후 정밀 저울에 의해 질량을 측정된 결과 약 10~30 mg이 증가됨을 확인하였다. 즉 단단하게 고착된 절연물에 수분이 흡습됨을 알 수 있다. 이러한 시편을 대상으로 임의로 제작된 간이 정전용량 센서를 이용하여 정전용량 및 $\tan\delta$ 를 주파수 별로 측정된 결과 그림 7의 예(시편 3-5)에서 보는 바와 같이 물속에 유지한 시간에 따라 정전용량은 서서히 증가되고 있음을 확인하였다. 특히 측정 주파수 100 Hz에서 각 상태에 대해 차이가 크게 나타남을 볼 때 정전용량 측정은 100 Hz에서 측정하는 브리지(bridge)를 개발해야 함을 알 수 있다. 마찬가지로 측정 주파수에 따른 $\tan\delta$ 측정 결과는 그림 8과 같고 실험 시편을 시편 두께와 발전기 용량으로 표기하여 나타내었다. 그림에서 시편의 상태에 따라 흡습 시편의 건조 시편에 비해 $\tan\delta$ 값이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있으며 건조 상태와 흡습상태를 가장 크게 확대하여 구분되는 주파수가 100 Hz로 나타나고 있다. 그러나 브리지 회로에서 감도를 높이기 위해서는 주파수가 높을수록 유리하게 되고 실제 ratio transformer bridge를 구성할 때 가장 안정도가 우수하며 전자회로 구성에서도 편리하도록 1 kHz를 선택하였다.



그림 6 발전기 권선 절연물 시편
Fig. 6 Specimens for winding insulation

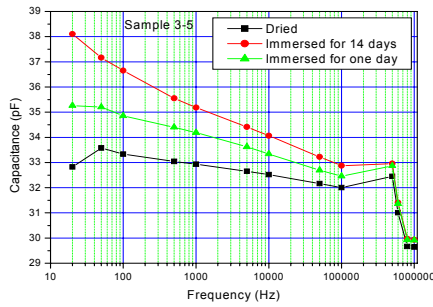


그림 7 주파수에 따른 시편의 정전용량
 Fig. 7 Capacitance for specimen with water absorption by frequency

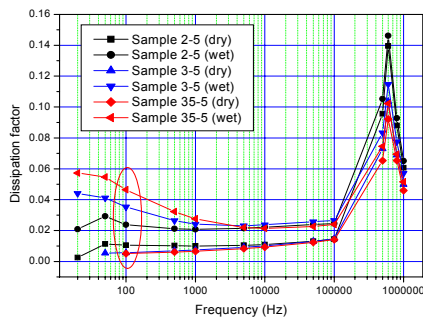


그림 8 주파수에 따른 시편의 tanδ
 Fig. 8 tanδ for specimen with water absorption by frequency

4. 흡습 센서 설계

화력 발전소의 발전기 고정자 권선 절연물 내에 냉각수가 흡습 되어 있는지 여부를 측정하기 위하여 설계된 크로스 커패시턴스 센서를 설계하였다. 발전기 제작사에 따라 권선의 크기가 다르나 센서의 범용성을 위해 500MW급 화력 발전기중 권선의 크기가 작은 'A' 발전소의 권선을 대상으로 그림 9와 같이 권선 외부의 크기를 측정하고 준-크로스 커패시터 전극을 그림 10과 같이 설계하였다. 또한 센서는 그림 11과 같이 유연 평판 형식으로 전극 구조는 'high' 전극과 'low' 전극 사이에 'ground'를 위치시키는 형태를 채택함으로써 준-크로스 커패시턴스의 전극 형상을 가질 수 있게 하였다. 평판 형식의 전극은 전극 구조가 간단하고 권선으로의 접착과 차폐 방법이 쉽다는 장점이 있다. 기존의 방법인 대향 전극 배치에서는 절연물의 두께가 측정값에 직접적인 오차로 작용할 수 있으나 평판 형식의 경우 적절한 센서 설계를 통하여 절연물의 일정 두께 내에서의 흡습 상태를 측정할 수 있게 된다. 이를 위해서 전기력선이 측정 대상물의 두께를 투과하지 않는 전극 크기를 결정하여야 하며 이는 전기장 해석을 통하여 결정이 된다. 발전기 고정자 권선의 표면의 굴곡 상태를 따라가기 위하여 센서는 유연성이 있는 필름으로 결정하였다. 센서는 단일 크로스 커패시턴스의 출력이 너무 작아 정전용량 출력을 증가시키기 위해 'H-G-L-G-H-G-.....-L-G'와 같이 'H-G-L-G'의 형태를 반복 배치하였다.

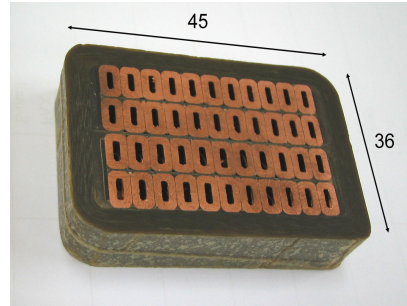


그림 9 500MW 발전기 고정자 권선 단면
 Fig. 9 Cross section of 500MW generator stator bar

그림에서 20개 전극을 각각 H-L 전극으로 사용할 경우를 "single" 전극, HH-LL 전극으로 사용한 경우를 "double" 전극, HHHH-LLLL 전극인 경우를 "quadruple" 전극이다. 이것은 기존의 커패시턴스를 이용한 발전기 고정자 권선의 흡습 측정시 권선 절연물의 전체 두께에 따라 필연적으로 발생하는 측정 오차 문제를 해결하기 위한 것으로서 절연물의 분할된 두께에 따라 흡습 상태를 측정하기 위한 것이다. 즉, 두께 4.5 mm인 권선 절연물에 흡습된 수분이 절연물의 상단영역, 중간영역, 하단영역 중에서 어느 위치에 존재하는지를 측정하게 하는 센서로서 개발하기 위한 것이다. 특히 각 전극소자 사이에 0.1 mm 폭의 가드 전극을 삽입하여 준-크로스 커패시턴스를 형성하였고 동시에 이웃 전극 사이에서 발생하는 stray 커패시턴스를 제거하는 효과를 얻도록 하였다. 그림 12는 시뮬레이션 결과로써 single 전극에서는 수분층(water layer)이 하단으로부터 약 3.5 mm까지 상승했을 때 정전용량이 증가되기 시작하고, double 전극에서는 약 2.5 mm까지 상승했을 때 정전용량이 변화되기 시작하고, quadruple 전극의 경우는 약 1 ~ 1.5 mm에서 감지되는 것을 알 수 있다.

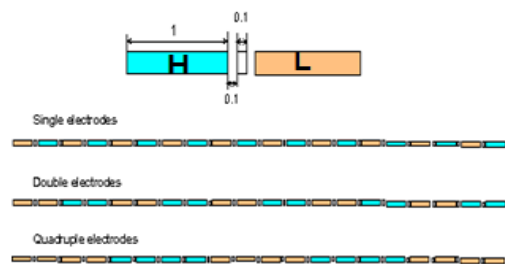


그림 10 센서 전극 설계
 Fig. 10 Design of sensor electrode

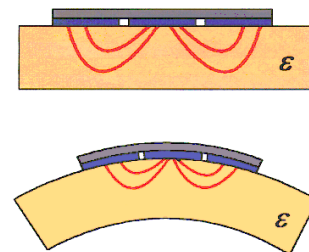


그림 11 유연 평판형 센서
 Fig. 11 Flexible planar type sensor

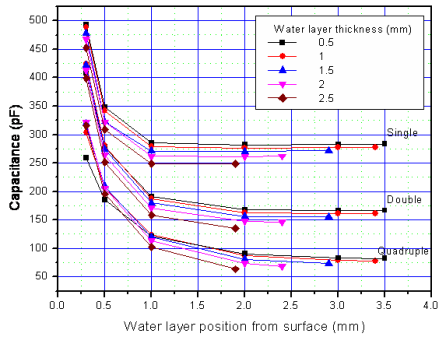


그림 12 수분 층의 위치에 따른 정전용량 변화
 Fig. 12 Capacitance variation by water layer position

그림 13은 센서의 최적 치수 조건을 확인한 후 유연PCB 제작공정을 이용하여 제작한 센서이며 측정 장치는 전극소자 20개로 구성된 센서에서 릴레이(relay)를 이용하여 자동적으로 single, double, quadruple 전극으로 선택될 수 있도록 하였다.

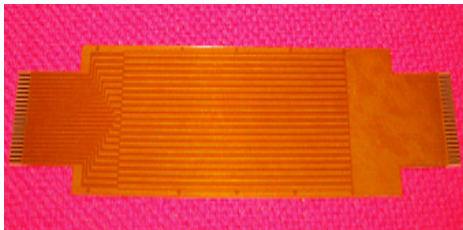


그림 13 크로스 커패시턴스 센서
 Fig. 13 Cross capacitance sensor

5. 발전소 시험

설계 제작된 발전기 권선 흡습 측정용 센서 및 측정기를 이용하여 발전소 정기 예방점검 기간 중 실제 발전기를 대상으로 시험을 하였다. 그림 14는 500MW급 표준화력 'B' 발전소에서 정상 운전되는 발전기의 고정자 권선 42개에 대하여 본 연구를 통하여 제작된 센서를 이용하여 커패시턴스를 측정된 데이터이다. 그림에서 보는 바와 같이 권선 절연물의 두께에 따라 'single' 'double' 'quadruple'로 양호하게 측정됨을 알 수 있으며 각 권선별로 비교할 때 같은 양상의 양호한 값을 가짐을 알 수 있다.

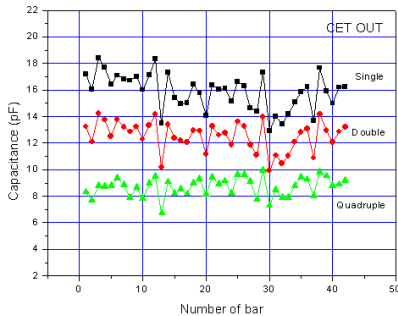


그림 14 발전기 권선 흡습 측정 결과
 Fig. 14 Result of water absorption measurement for generator stator windings

6. 결 론

최근 발전기 불시 정지 사고의 주요 원인으로 알려지고 있는 고정자 권선의 흡습 진단에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 크로스 커패시턴스를 이용한 흡습 측정 센서를 개발하였다. 본 센서는 기존의 발전기 권선 절연물의 정전용량 측정 방법으로는 권선 제작 및 조립에 따라 필연적으로 발생하는 측정 오차를 줄이기 위하여 전극의 사양에는 무관한 크로스 커패시턴스를 이용하여 흡습 센서를 설계하고 권선 절연물의 두께에 따라 흡습 정도를 측정할 수 있게 하였다. 또한 개발된 센서를 이용하여 실제 발전소에서 측정된 결과 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구(결과물)는 지식경제부의 “에너지기술 개발 사업”의 지원으로 수행한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] D. J. Stamon, "Diagnosing and Repairing Water Leaks in Stator Windings", G.E. company Review, Schenectady, New York, 1992
- [2] Y. C. Bae, et al, "Development of Water Absorption Measurement Equipment for Generator Stator Windings in Power Plant", Proc. of KSME Annual Conference, 2005
- [3] A. M. Thompson and D.G. lampard, "A New Theorem in Electrostatics and its Application to Calculable Standards of Capacitance", Nature, vol.177, 1956.
- [4] A. M. Thompson, "The Cylindrical Cross Capacitor as a calculable Standard", IEE, no. 2887, 1959.
- [5] Y. C. Bae, et al, "Evaluation of Mechanical Integrity for water Cooled Generator Stator Windings in Power Plants", Proc. of 2nd Asia-Pacific Conference on System Integrity and maintenance, China, 2000
- [6] Y. C. Bae, et al, " An Experimental Study on Water Absorption Characteristics of Generator Stator Bar Insulation by Cooling Water Temperature in 500MW Capacity Power Plant", Trans. KIEE. Vol. 57, NO. 8, Aug, 2008.

저 자 소 개



배 용 채 (裵 容 彩)

1995년 전남대 대학원 졸업(박사).
 1996년~1997년 EPRI Loan Emp.
 1986년~현재 한전 전력연구원 책임연구원



김희수 (金希洙)

1995년 전남대 대학원 졸업(석사).
1995년~현재 한전전력연구원 선임연구원



이두영 (李斗寧)

1997년 건국대 대학원 졸업(석사).
1999년~현재 한전전력연구원 선임연구원



이욱륜 (李旭倫)

2005년 충남대 대학원 졸업(석사).
1998년~현재 한전전력연구원 선임연구원