COLUMN REPORT

KEPCO Journal on Electric Power and Energy
p-ISSN 2465-8111, e-ISSN 2466-0124
Volume 7, Number 1, June 2021, pp. 69-72
DOI 10.18770/KEPCO.2021.07.01.069

Evaluation Technique for Control System of Barakah Nuclear Power Plant

UAE 원전 발전기 제어시스템 시험기술 현장적용

Kyeongyeol Kim
김경열

Abstract

한전에서 운영중인 요르단 알카트라나발전소에서 발전기 고정자권선 전계완화 절연물의 손상되었다. Overlap 부위의 정비를 수행한 결과를 분석하였고, 손상원인을 규명하여 불시정지로 인한 손실을 최소화하기 위한 단기대책과 장기적인 대책을 제시하였다.

Keywords: *발전기 고정자권선, 반도전층, 메커니즘*

I. 개요

알카트라나 발전소는 요르단정부에서 2008년 발주한 복합발전소 건설·운영사업을 한전이 수주하면서, 2009년 건설을 시작하여 2011년 준공을 한 한전이 운영하는 중동 최초의 발전소이다. 암만 남쪽 90km 지점에 위치한 알카트라나(Al Qatrana)에 373MW 복합 발전소로, 25년간 운영해 생산되는 전력을 요르단에 판매하고 전력요금으로 투자비를 회수하는 사업이다.

이곳의 발전기는 Fig. 1과 같은 SGen5-100A의 Siemens사 모델로 공급되었으며 국내 건설사에 의해 건설되었다. 발전기는 발전소 터빈의 기계적에너지를 전기적에너지로 변환하여 전력계통에 연결하는 전기기기로, 구성품 고장에 따라서 6개월 이상의 발전소 정지를 수반하는 경우도 있다. 발전기는 고정자권선에 대전류가 흐르기 때문에 이로 인하여 발생하는 열을 냉각하기 위해 공기, 수소, 물을 이용하여 냉각을 하는데, 보통 300MVA이하의 발전기는 고정자권선 냉각을 공기에 의해 냉각하도록 하고 있다.

알카트라나 발전기 특징 중 하나는 고정자권선 냉각은 공기냉각 방식을 채택하고 있는데, 공기냉각방식 발전기의 경우 대기중에 미세먼지 또는 얇은 도전성 물질 등이 발전기로 유입할 우려가 있으며, 수소냉각 발전기에 비해 부분방전도 발생하기 쉬워 절연물에 손상을 줄 가능성도 높다. 그리고 절연방식은 VPI함침을 채용하였는데, Resin Rich 방식에 비해 Vibration Sparking, 반도전층 손상 등의 문제가 많이 발생하고 있다. 이러한 기본 배경을 이해하고, 요르단 알카트라나 발전기의 문제점에 대한 원인을 규명하고, 대책을 제시하였다.

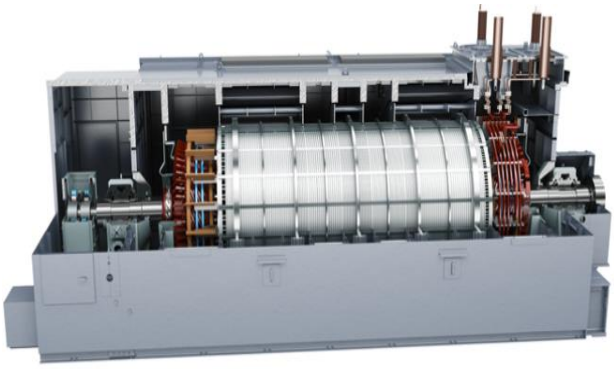

Fig. 1. Siemens SGen5-100A 모델 발전기

대용량 발전기 고정자권선은 **Fig. 2**처럼 철심에 가공된 하나의 슬롯(slot)에 두개의 Bar가 설치되며, 이러한 Bar의 철심내 배치는 발전기 전압 파형이 정현파, 각 상별 120도 위상차를 갖도록 철심에 기계적으로 배치되게 된다 [1]. 철심은 대부분 한곳이 대지와 접지되도록 설계되어 있다. 고정자권선은 전계로 인한 스트레스를 완화하기 위한 절연설계를 하는데, **Fig. 3**에서 보는 것처럼 Semi-conductive Coating과 Stress Grading Coating 기술을 사용하여 주절연물의 손상을 방지하기 위해 사용한다. 먼저 Semi-conductive tape는 사용되는 이유는, Bar가 철심 슬롯에 삽입하는 구조로 되어 있기 때문에, 철심 슬롯 공간보다 Bar가 약간은 작은 공간을 차지하도록 제작이 되어야 슬롯에 삽입이 되므로 불가피하게 철심과 Bar사이는 공극(air gap)이 발생하게 된다 [11].

저자 **김 경 열** | 한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 전문기술센터

김경열 책임연구원은 전문기술센터에서 국내외 발전기, 변압기, 전동기, 케이블 등 발전소 전기설비에 대한 고장원인 분석/대책 업무와 이와 관련된 연구과제를 수행하고 있으며, 특히 최근 신재생에너지 비중 증가에 따른 계통관성 대책 중 하나인 동기조상기를 연구하고 있습니다.

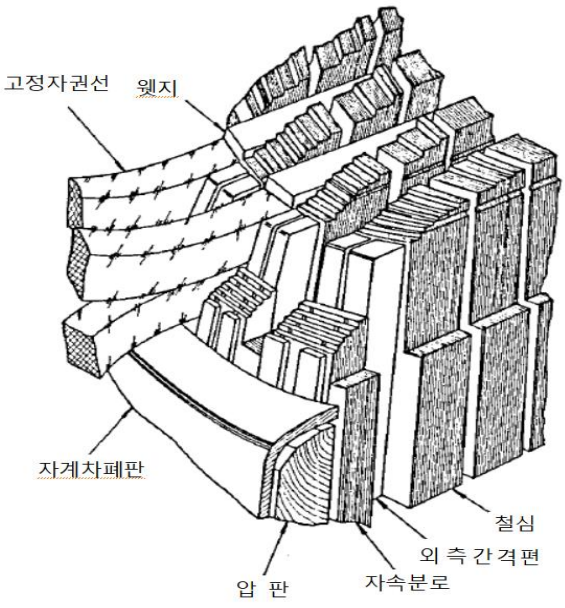

Fig. 2. 고정자 철심 단부 부위 구조도

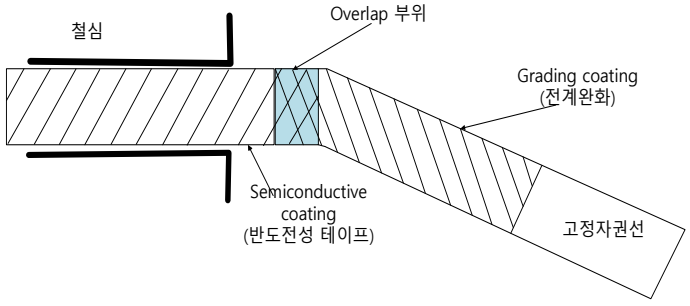

Fig. 3. 고정자 스트레스 완화 절연 설계 구조도

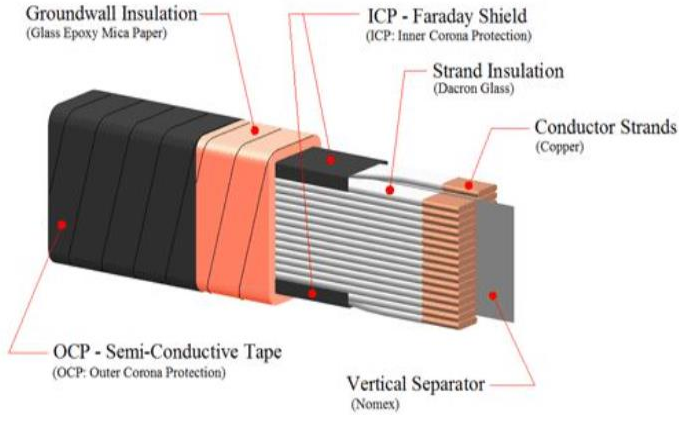

Fig. 4. 고정자 철심 단부 부위 구조도

이렇게 철심과 Bar 사이의 공극발생으로 인하여, 부분방전 발생 가능성이 있는데, 이를 감소시키기 위한 설계기술로서, 접지되어 있는 철심과 Bar사이의 전압차이를 최소화하는 방법은, **Fig. 3**과 같이 충분히 낮은 저항의 Semi-conductive tape(Semi-con Coating)를 Bar 주절연물에 감아서 접지되어 있는 철심과 접촉되도록 Bar의 외부전위를 대지와 같은 영전위를 만들게 한다 [2].

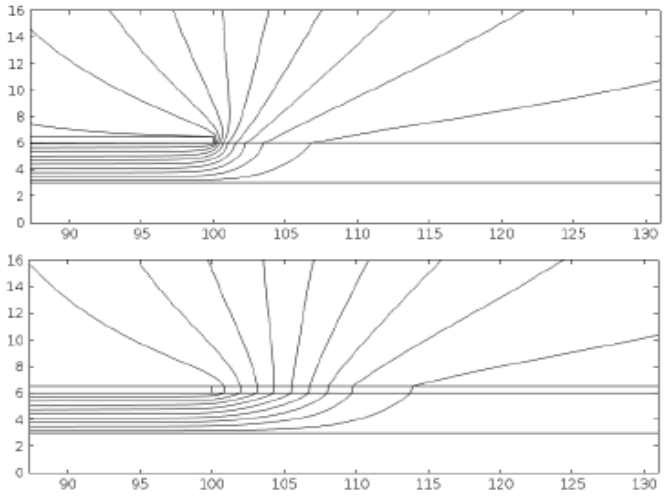

Fig. 5. Stress Grading Coating 없는경우(상)과 있는경우(하)

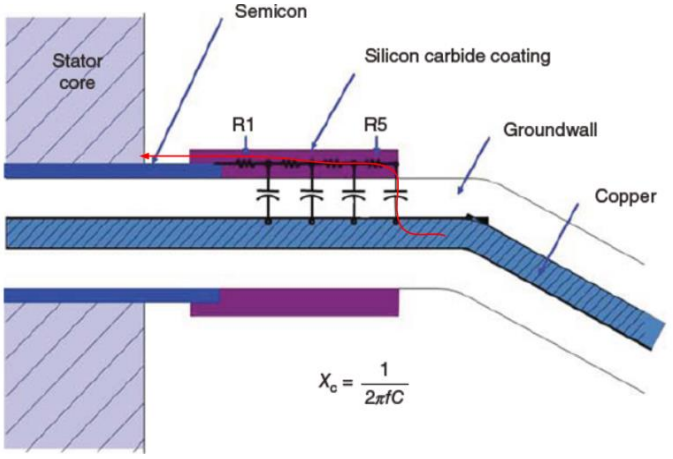

Fig. 6. Stress Grading Coating 없는경우(상)과 있는경우(하)

다음으로 Stress Grading Coating은 **Fig. 3**과 같이 철심에서 빠져나온 Bar의 Semiconductive Coating된 부위와 약 1cm 정도 전기적으로 연결된 중복구간을(Semi Conductive Coating된 부위처럼 영전위) 지나 10-20cm가량 설치되는 부분으로, 전계 스트레스가 약한 곳에서는 저항이 높고, 높은 전계구간에서는 저항은 낮은 비선형성을 띈다. Fig. 5처럼 Stress Grading Coating이 없는 경우는 전계 집중적으로 한 곳에 분포되어 절연물 한계를 넘어설 수 있으며, 이 방식을 채택하는 경우 전계가 균일하게 분포되는 것을 볼 수 있다 [8].

이러한 설계기술은 전동기, 케이블의 절연물 구조배치와 사뭇 유사한 방식으로, 절연물 외부의 전위를 낮게 만들도록 채택을 하고 있다.

II. Overlap 부위 손상원인

Fig. 6와 같이 용량성전류(Capacitive Current)는 Grading Coating과 Coating아래 도체와 주절연물 사이에서 시작되는데, 이 전류가 Overlap부위를 따라 흘려서 접지되어 있는 철심으로 흐르게 된다. 만약 제작결함등에 의해 Overp부위 저항이 높으면 많은 주울열이 발생하게 되는데, 이 열은 절연물 온도를 권선온도보다 높이게 되며, 이러한 과정에서 산화과정이 발생하고 저항은 더욱 높아지게 되는 과정이 반복된다. 이로인해 도전성이었던 부분이 비도전성이 되며, Semiconductive Coating 끝부분에 높은 전계가 형성되어 부분방전이 발생하기 시작한다.

Fig. 7. Overlap 부위 white Band

Fig. 8. Overlap 부위 Bottom Bar 손상 부위

부분방전이 발생하기 시작하면서 생성된 오존은(특히 공기냉각 방식 발전기) 주변의 Coating을 더욱 손상시켜, Overlap부위는 완전한 부도체가 되고 부분방전 세기는 더욱 거세 진다. 이렇게 Overlap부위의 저항이 높은 이유는, 제작결함에 의해 Semiconductive Coating의 흑연 밀자 입도가 낮거나, Grading Coating의 입자밀도 또는 입자크기 분포 문제가 있거나, 용량성 전류가 흐르는 중첩면적이 충분하지 않기 때문에 이러한 문제가 발생한다 [2]. 이렇게 손상된 Overlap 부위는 하얀밴드를 형성하게 되는데, 요르단 발전기도 그림7처럼 하얗게 밴드가 형성되는 것을 볼 수 있다.

이러한 밴드는 고압전계가 걸리는 부분에서 발생하며, 중성점으로 연결되는 부위에서는 발견되지 않는 특징이 있다. 또한 이런 원인에 의해 발생하는 부분방전 부위는 장시간에 걸쳐서 주절연물이 손상되는 과정을 거치며, 다른 원인에 의한 부분방전과 다르게 짧은 기간에 절연물이 파괴되는 사고는 발생하지 않는다. Top Bar는 접근성이 좋아서 점검 및 정비가 편리하나, Bottom Bar는 접근성이 떨어져 정비가 어려운 상황이다.

앞에서 설명한 바와 같이 블레이드 탈락으로 인해 터빈 설비의 전체적인 손상이 발생한 것을 확인하였다. 향후 동일한 사고가 발생하지 않도록 원인 규명을 수행하였다.

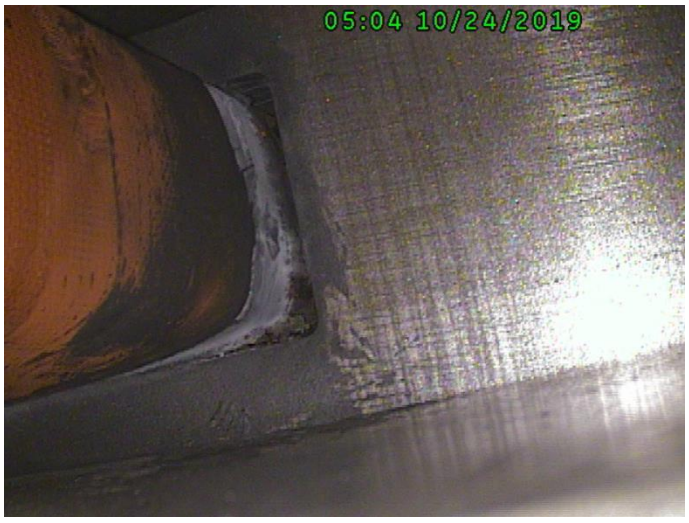

Fig. 9. Overlap 부위 정비 후 재 손상

III. 손상부위 정비

Overlap 부위 정비는 보통 Bar를 슬롯에서 빼낸 후에 기존 Coating들을 제거하고 새로운 Coating을 해야 하나, Bar를 제거하는 과정에서 권선에 손상을 줄 수 있어, 꽤 정비가 어려운 편이다.

요르단 발전기는 임시적으로 주절연물 손상을 최소화하기 위해 Semiconductive Coating을 정비하였다. 기존에 Tape방식은 Bar와 철심과 매우 좁은 공간으로 인해 감을 수 없는 상황으로, Semiconductive Coating Paint을 하도록 권고를 하였으며, 제작사 부품을 구입하여 Painting을 하였다. **Fig. 9**는 정비 후 1년후의 Overlap부위를 다시 확인한 사진인데, 다시 부분방전이 발생된 것을 확인할 수가 있으며, 또한 과도하게 Painting을 한 흔적도 발견되어 정비의 실효성이 염려되고 있다.

IV. 결론 및 대책제시

2018년 Overlap 손상부위에 반도전성 페인팅 도포 정비를 수행한 결과 일부 Overlap부위에서 손상이 다시 발생하지 않은 효과가 있는 것을 확인하였으나, 기존 정비 부위에서 다시 발생하거나 또는 새롭게 Overlap부위에서 절연물 손상이 지속적으로 발생되고 있음을 확인하였다. 따라서 이러한 정비방법이 임시적으로 절연물 손상이 확대되는 것을 막아줄 수 있으나 영구적으로 해결될 수 있는 방법은 아닌 것으로 판단된다.

단기적 대책으로는 육안 및 내시경을 이용해 추가 발생 및 확대 여부를 주기적으로 점검하거나, 발전기 정지 시, 절연물 Overlap부위를 주기적으로 반도전층 페인팅을 도포하고, 발전기 운전 중 overlap부위 손상정도가 악화되는 것을 확인하기 위해 부분방전 감시 장치 설치가 필요하다. 장기적으로는 고정 자권선 손상으로 인한 발전정지로 인한 손실을 최소화가기 위해 최소한의 예비자재를 확보하는 것이 필요하다.

Acknowledgment

이 보고서는 해외발전기술처 요청으로 '2017년. 6월. ~ '2019년. 10월까지 걸쳐 수행한 "요르단 알카드라나 발전기 절연물 손상원인 분

석 기술지원" 수행 결과를 바탕으로 작성되었음.

References

[1] P. Kundur, Power Systems Stability and Control, New York: McGrawHill, 1994.

[2] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, John Wiley & Sons, 2004, pp. 24-27.

[3] A. Roberts, "Stress grading for high voltage motor and generators coils," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 4, pp. 26–31, 1995.

[4] G. Klempner and I. Kerszenbaum, "Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance", 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2008

[5] S. J. Chapman, Electric Machine Fundamentals, 5th ed., McGraw-Hill, 2012.

[6] F. P. Espino-Cortes, E. A. Cherney, S. Jayaram, "Effectiveness of Stress Grading Coating on Form Wound Stator Coil Groundwall Insulation under Fast Rise Time Pulse Voltages", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, pp. 844- 851, 2005.

[7] CIGRE Technical Brochure 551, Electrical Insulation Systems in Electrical Rotating Machines, 2013.

[8] Mostafa Refaey and Ahmed Hossam Eldin, "Impact of Coatings Delamination on the Performance of Stress Grading in Form-Wound Stator Coil", IEEE 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Menoufia University, Egypt, 19-21 December 2017

[9] IEEE 286, "IEEE Recommended Practice for Measurement of Power factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation".

[10] EPRI TR-100185, Research Project 2577-1. Final Report v.1 Motor and Generator Insulation Life Estimation, Volume 1 G. Anders

[11] 한국전력공사, 발전기 점검 보수기술, 1982

[12] NEC, https://www.national-electric-coil.com/.