

대형발전기 고정자권선 절연재료의 열 사이클에 의한 열화에 관한 연구

論文

45~4~13

A Study on the Heat Cycle Aging of Insulation Materials in Large Generator Stator Windings

金熙坤* · 朴鏞寬**
(H. G. Kim · Y.G. park)

Abstract - Heat cycle aging of insulating materials in large generator stator winding has been investigated using both on-line and off-line test methods. On this study, principally, off-line test against actual generator in service was carried out to acquire information about polarization index(PI) and dissipation factor, dissipation factor tip-up, maximum partial discharge for the purpose of remnant breakdown voltage and life assessment. It was found from the tests that both dissipation factor and maximum partial discharge decreased with the increase of operating hours and starting numbers. It was found from off-line tests that the remnant breakdown voltage had a strong relationship with both dissipation factor and maximum partial discharge. The remnant breakdown voltage as a result of both operating hours and starting number and the nondestructive tests were proposed as parameters which can predict the remnant lifetime of insulating materials in large generator stator windings.

Key Words : High-voltage, insulation material, stator winding, deterioration, rotation machine, voltage endurance, heat cycle

1. 서 론

우리나라는 많은 전력설비가 20~30년의 사용기간을 경과하고 노후화되어 있어 설비의 효율적인 운용계획과 경제성을 고려한 교체를 위하여 사용설비의 수명을 합리적으로 판정하고 이러한 신뢰성있는 판정기준에 의해 수명을 예측하는 기술이 매우 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 카나다에서는 운전중 방식인 PDA-H 시스템을 개발하여 슬롯방전으로 인한 문제점을 사전에 발견하고 웨지이와의 보수 그리고 repainting 등의 방법을 통하여 고정자권선의 신뢰도 및 수명을 증대시켜왔다 [1]. 기존의 정지중 전단방식에 의한 부분방전 및 유전경접의 측정은 발전기 고정자권선의 이상유무를 판별하는 기법으로 계속하여 사용되어져 왔고 특히, 일본에서는 1980년대 초부터 발전기 고정자권선을 슬롯에서 제거한 뒤 행한 부분방전 및 유전경접의 측정치에 의한 시험결과를 토대로한 수명예측방법을 제시하여 사용하고 있다[2, 3]. 또한, 영국에서도 부분방전의 고정자권선을 통한 주파수 전파특성을 연구하여 고정자권선 열화위치탐지에 관한 기초이론을 확립하였다.

그러나 우리나라에서는 90년대 들어서야 대형발전기 고정자권선의 연구에 착수하였고[4] 일본의 경우와 같은 실험실적인 실험으로는 신뢰성이 없어 운전중 발전기 고정자권선의 열화를 평가하고 수명을 예측하기 위한 연구가 진행중에 있다[5]. 이러한 노력은 선진국의 기술종속을 피하기 위하여 계속적인 연구가 필연적이라 생각하며 그에 대한 연구의 하나로 본 논문에서

는 잔존수명과 관계가 있는 인자들을 현재 가동중인 발전기를 대상으로 계획예방정지공사 기간중에 구하였다. 또한, 각각의 인자와 운전년수와의 비교를 통하여 시간에 따른 권선재료의 열화상을 판정하고, 기동횟수와 대비하여 열사이클열화가 발전기의 수명에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하였다. 그리고 실험실적인 실험에 의하여 구하여진 실험식을 이용하여 잔존파괴전압을 구하고 이 값이 열사이클열화와 어떠한 상관관계를 가지고 있는지를 밝히는 것을 목적으로 하였다.

2. 평가 및 실험방법

표 1은 각 시험 발전기의 운전이력을 나타낸 것이며 이러한 운전이력과 시험에 의한 절연열화특성값을 이용하여 잔존파괴전압을 구하였다. 운전이력에 의한 잔존파괴전압값은 아래의 식(1)에 의하여 구하였다.

$$V_R = (1 - aY)(1 - bN_E) \times 100\% \quad (1)$$

여기서 a : 연차소모율, b : 기동정지소모율, Y : 운전년수, N_E : 동기기동정지횟수를 나타내며 연차소모율과 기동정지소모율은 실험적인 계수로써 $a = 7 \times 10^{-3}$: 운전시간 1년 (24시간 × 365일)당 0.7%, $b = 8 \times 10^{-5}$: 기동정지횟수 1000회당 8%를 적용하였다. 동기기동정지횟수는 $N_E = N(\text{기동정지횟수}) \times \text{온도변화율}$ 을 적용하였다. 또한 식(1)에 의한 계산결과는 신뢰성이 낮은 평균적인 절연강도로서 발전기의 신뢰성은 전체권선열화의 최소값에 의하여 결정됨으로 99.9%의 신뢰성을 갖는 값으로 변화시키기 위하여 30법을 이용하여 산출한 값을 이용하였다[6].

그러나, 이 값은 발전기권선의 평균적인 열화로써 운전중인

* 正會員 : 韓電 電力研究院 水火力 發電研究室 先任研究員

** 正會員 : 成均館大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1995年 11月 22日

最終完了 : 1996年 3月 18日

발전기의 환경이나 운전조건에 따라 실제적인 열화값과는 상이한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 발전기 고정자권선의 국부적인 열화를 판정하기 위해 각 권선의 시험을 통한 인자를 구하고 그 절연열화특성값을 기준으로 하여 식(5)로써 잔존파괴전압(V_R)을 구했고 권선재료의 국부적인 열화값과 잔존수명을 예측하였다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta_1 - \tan \delta_0 \quad (3)$$

$$\Delta = \Delta I + \Delta \tan \delta \quad (4)$$

$$V_R = 100 - 2(\Delta - 0.8) - k \log \frac{Q_{\max}}{1.5 \times 10^9} \quad (5)$$

윗 식중 $I(A)$: 정격전압 인가시 흐르는 전류, $I_0(A)$: 전류가 직선적으로 증가한다고 가정한 경우 정격전압에서의 전류, $\tan \delta_1(\%)$: 정격전압에서의 유전정접, $\tan \delta_0(\%)$: 1kV에서의 유전정접을 나타낸다. k 는 권선재료의 종류에 의한 실험상수로서 발전기의 절연시스템에 따라 다르며 아스프트컴파운드 절연의 경우는 67, 불포화 폴리에스테르 절연시스템에서는 37.5, 그리고 에폭시수지 절연 시스템에서는 27.4를 적용하고 있으며, $Q_{\max}(nC)$ 는 최대부분방전량을 나타낸다.

또한, 각 상별로 구하여진 값이 시험발전기에 따라 작지만 차이가 있는 것이 있어 똑같은 운전조건과 환경에서 운전되었다는 것에 착안하고 데이터의 신뢰성을 위해 삼성의 평균값을 취했다. 또한, 고정자권선 재료의 다양한 열화특성값 즉 절연저항시험, 직류전류시험등을 고전압시험을 행하기 전의 전제조건으로 행하였고 권선재료 표면의 흡습상태와 도전성 불순물의 생성 및 오손, 절연물의 결합동 절연체의 상태를 판정하기 위하여 표 2와 같이 측정하였다.

표 1 발전기 고정자권선의 운전이력 및 사양

Table 1 The operating records and specifications of generator stator windings

발전기	용량 (MV A)	정격 전압 (kV)	운전 시간 (hr)	기동 횟수	절연 등급	냉각방법	회전수 (rpm)
A	764	22	71273	51	B	수냉각	1800
B	700	22	88704	111	B	수냉각	1800
E	235	20	106722	366	B	수소냉각	3600
F	69	13.8	38953	254	B	수소냉각	3600
G	260	21	112049	173	B	수소냉각	3600
H	275	21	99663	321	B	수소냉각	3600
I	88	13.8	178174	463	B	수소냉각	3600
K	353	24	126754	339	B	수소냉각	3600

표 2 시험 발전기의 열화특성값

Table 2 The aging characteristic value of test generators

발전기	절연저항 ($M\Omega$)	직류전류 (A)	유전정접 (%)	최대 방전량 (nC)	교류 전류 (A)
A	2000이상	4.19	1.60	48.33	2.64
B	"	5.33	3.10	71.33	4.01
E	"	7.35	0.43	41.66	4.01
F	"	5.70	3.77	27.00	3.68
G	"	5.84	10.98	11.73	0.74
H	"	5.82	1.81	7.506	2.66
I	"	3.778	0.93	28.16	1.58
K	"	4.07	0.64	17.60	1.56

본 연구에서는 발전기 고장자권선을 각 상별로 분리하여 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험을 행하였으며 사용된 기기로서는 권선재료의 절연저항을 위한 Megger Tester (Yokokawa), 직류전류시험을 위한 Insulation Tester(Megger Series 1-5000, Megger사), 유전정접시험을 위한 Shering Bridge(Tettex사), 부분방전시험을 위한 Discharge Detector (Model5 Type700, Robinson instruments사) 등을 이용하였다.

3. 시험결과 및 고찰

그림 1은 최대방전전하량과 운전시간과의 관계를 나타내는 것으로, 100,000시간까지는 비교적 안정기에 있던 고정자권선의 재료가 기계적, 열적, 전기적인 열화가 축적됨에 따라 그 시간을 기점으로 최대방전전하량이 급격히 증가하고 있다. 또한, 같은 100,000시간대에서 최대방전전하량이 산재되어 분포되어 있는 것은 고정자권선의 재작당시 함침기술의 미비와 각 시험발전기의 운전조건 및 환경의 차이때문이라 사료된다. 그림 2의 유전정접 또한, 시간이 흐름에 따라 증가함을 볼 수 있다. 여기서 $\tan \delta$ 값은 유전체의 절연물에 교류전계를 가할 때 누설전류, 유전분극, 부분방전 등에 의해 발생하는 에너지 손실로써 흡습/건조, 오손, 미소공극유무 등의 절연상태 및 열화정도를 나타내는 인자이다. 이는 절연물의 고유값으로서 권선절연의 국부적인 상태를 나타내지 못하며 $\Delta \tan \delta$ 의 변화량도 보이드 내부의 부분방전과는 관계가 있지만 슬롯에서 발생하는 슬롯방전과의 상관성이 없어 시험발전기의 권선재료 표면에 일어나는 연면방전의 영향을 고려하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다. 또한, 발전기가 정지되어 장기간 개방, 방치됨에 따라 표면오손, 흡습등의 영향을 받아 측정값이 산재된 결과를 보인 것으로 생각된다. 그러나 전류불순물, 열화공극등의 결함부에서 발생한 부분방전에 의해 고유값과의 차이가 발생하고 시간이 지남에 따라 권선내의 보이드가 증가하여 부분방전량이 증가함을 알 수 있다[7].

아래의 그림은 각 발전기 고정자 권선에서 획득한 데이터의 평균값으로 2차 방정식의 형태로 컴퓨터프로그램에 의해 나타낸 것이다.

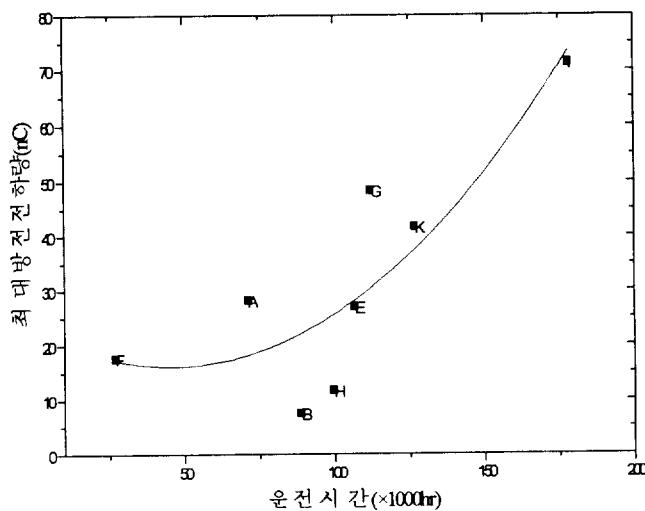


그림 1 운전시간과 최대방전전하량과의 관계

Fig. 1 The Typical Relationship of Operating hour and Maximum Partial Discharge Quantity

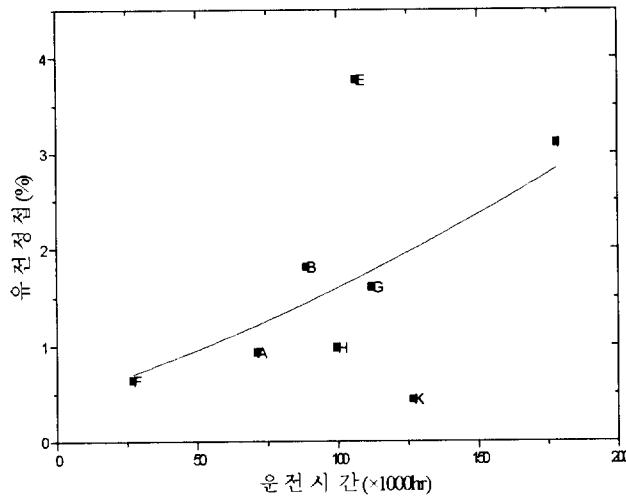


그림 2 운전시간과 유전정점과의 관계

Fig. 2 The Typical Relationship of Operating hour and dissipation factor tip-up

그림 3은 기동횟수와 최대부분방전량과의 관계를 나타낸 것이다. 250회의 기동횟수까지 비교적 안정하지만 이후에는 증가하고 있어 기동횟수 250부터 고정자권선의 실질적인 열화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 유전정점과의 관계를 나타낸 것이다. 고정자권선재료의 상이성과 냉각방식, 수소의 압력, 운전조건 등의 차이때문에 데이터가 산재되어 분포된 것으로 사료된다. 평균적으로 기동횟수가 많아짐에 따라 $\Delta \tan \delta$ 가 증가함은 알수 있었지만 기동횟수에 대한 두 인자와의 상관성은 파악하기 어려웠다.

그림 5와 그림 6은 운전시간과 비파괴특성값으로부터 구한 잔존파괴전압 및 운전이력에 의한 잔존파괴전압과의 관계를 나타낸 것으로 운전시간이 경과됨에 따라 전압, 열, 기계력에 의한 복합열화에 의해 잔존파괴전압이 감소함을 알 수 있다. 또한, 운전이력에 의한 잔존파괴전압보다 비파괴특성치에 의한 잔존파괴전압이 평균적으로 25% 낮은값으로 나타났으며 이것

은 고정자권선의 평균적인 열화값인 운전이력에 의한 잔존파괴전압값 보다 실제 더 가혹한 운전조건과 환경에서 운전되고 있음을 알 수 있다.

그림 7 및 그림 8은 기동횟수와 잔존파괴전압과의 관계를 나타내는 것으로서 운전시간에 의한 결과보다는 뚜렷한 것은 아니지만 기동횟수가 증가할수록 잔존파괴전압이 점점 감소하고 있음을 알 수 있으며 기동횟수와의 관계에서도 평균적으로 25%의 차이가 있어 그림 5와 그림 6의 결과를 확인할 수 있다. 또한, 운전이력에 의한 잔존파괴전압은 비교적 발전기 고정자권선의 운전조건과 냉각방식, 환경 등을 고려하지 않은 평균적인 데이터만을 가지고 분석하였기 때문에 일관성이 있지만 부분방전을 비롯한 비파괴특성값을 이용하여 분석한 데이터는 이러한 상이한 운전조건으로 고정자권선에 미치는 영향이 다르고 열화된 상태가 각 시험발전기마다 다르기 때문에 편차가 있는 것으로 판단된다.

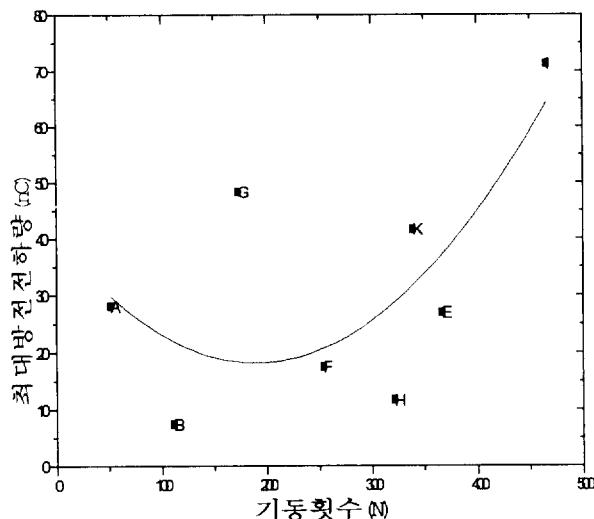


그림 3 기동횟수와 최대방전전하량과의 관계

Fig. 3 The Typical Relationship of Starting Number and Maximum Partial Discharge Quantity

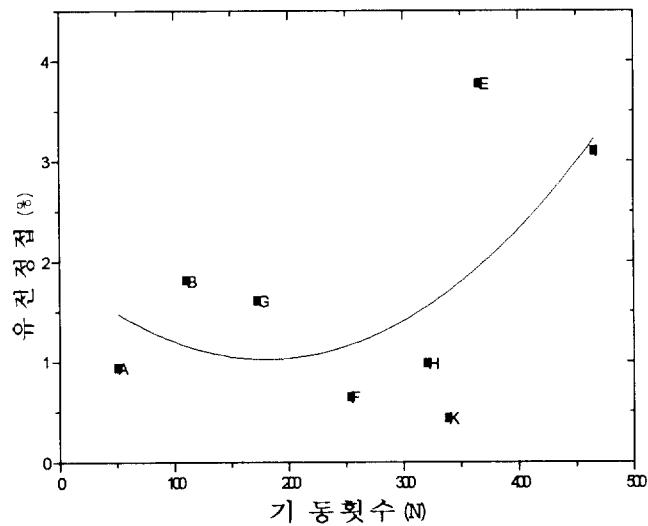


그림 4 기동횟수와 유전정점과의 관계

Fig. 4 The Typical Relationship of Starting Number and dissipation factor tip-up

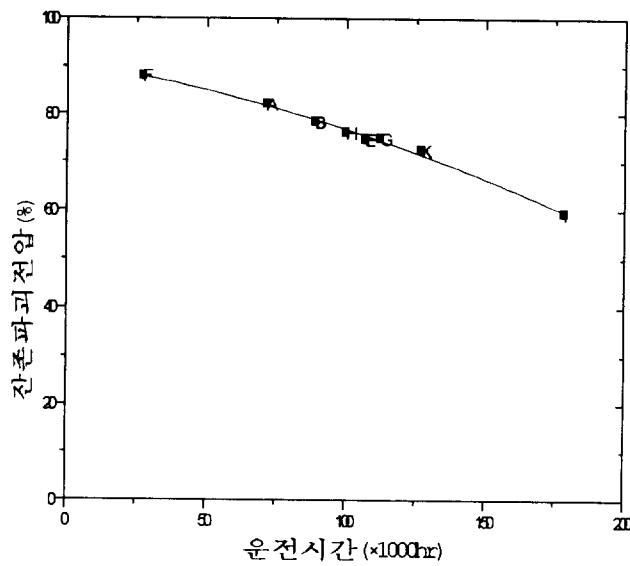


그림 5 운전시간과 잔존파괴전압과의 관계 - 운전이력에 의한 잔존파괴전압

Fig. 5 The typical Relationship of Operating hour and Remaining Destructive Voltage

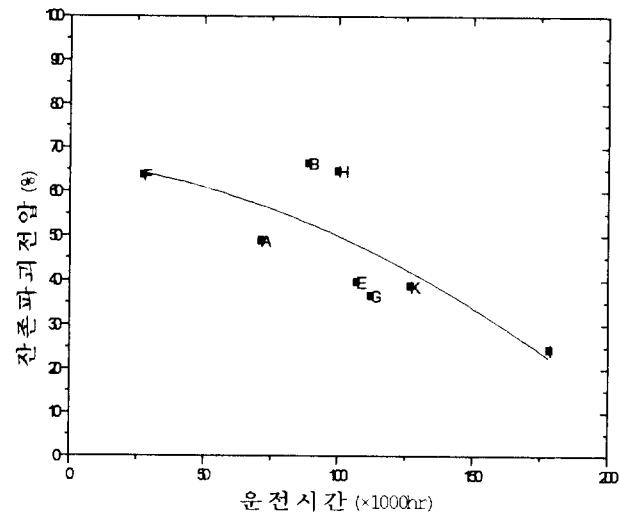


그림 6 운전시간과 잔존파괴전압과의 관계 - 비파괴특성값에 의한 잔존파괴전압

Fig. 6 The typical Relationship of Operating hour and Remaining Destructive Voltage

반전기 고정자권선의 절연열화시험값과 운전이력특성을 이용하여 잔존파괴전압을 예측하고 이러한 예측된 결과값과 운전시간, 기동횟수 등에 의해 열사이클열화가 고정자권선의 절연열화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 연구하였으나 고정자권선의 절연열화가 어느 한가지의 열화에 의하지 않고 복합적으로 작용하기 때문에 전기적열화, 기계적열화, 환경적열화등 복합적인 실험이 이루어질 경우 더욱 명확한 결과가 도출 될 것이라 생각된다[8].

또한, 두가지 인자 $\Delta \tan\delta$ 와 최대부분방전량은 발전기 고정자권선의 잔존수명추정시 유용한 인자임을 예측할 수 있었고

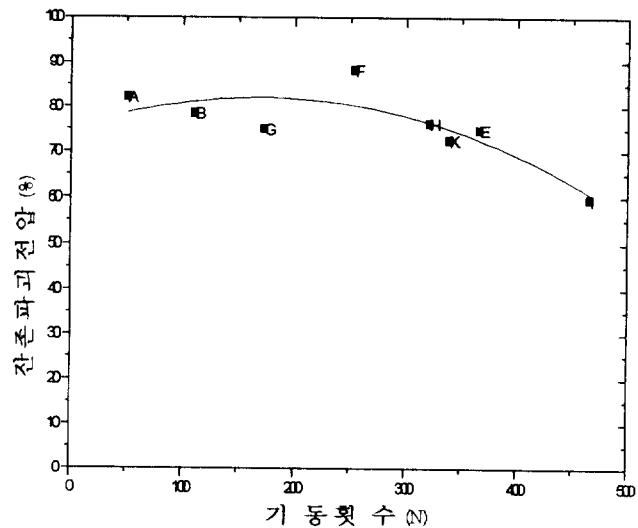


그림 7 기동횟수와 잔존파괴전압과의 관계 - 운전이력에 의한 잔존파괴전압

Fig. 7 The typical Relationship of Starting Number and Remaining Destructive Voltage

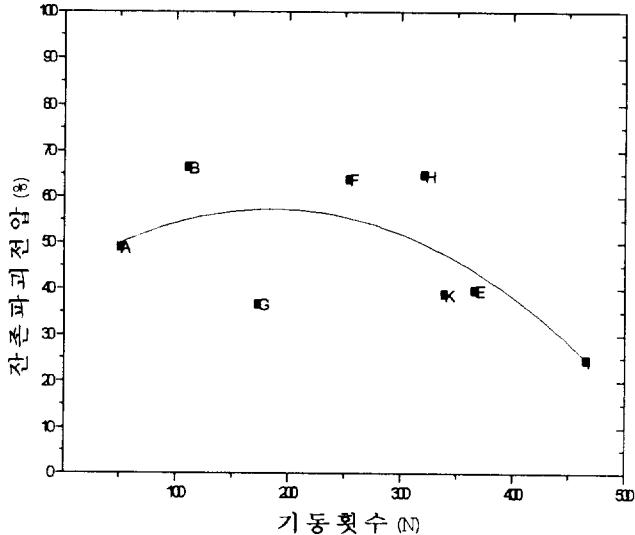


그림 8 기동횟수와 잔존파괴전압과의 관계 - 비파괴특성값에 의한 잔존파괴전압

Fig. 8 The typical Relationship of Starting Number and Remaining Destructive Voltage

운전시간이 길어질수록 전압열화와 열열화에 의하여 잔존파괴전압이 감소함을 알 수 있었으나 기동횟수에 의한 기계적인 열화는 데이터에 신뢰성을 확신할 수 없으나 열사이클열화와 기계적인 열화에 의한 잔존파괴전압과의 관계곡선으로 미루어 보아 기동횟수에 의한 열사이클열화가 권선재료에 미치는 영향을 알 수 있었다.

표 2에서의 직류고전압시험은 권선표면의 흡습상태나 불순물의 부착상태등은 감지할 수 있으나 잔존수명을 나타내는 인자로서는 미흡하다는 판단을 내렸으며 실제 운전중인 발전기 권선 절연재료는 각 발전기에 따라 다양하고 운전시의 환경, 운전의 형식, 냉각방식등의 영향 때문에 테이터의 편차가 크게 나타난다고 생각되고 이러한 편차를 줄이고 수명예측의 또 다른

른 인자를 찾아 더욱 신뢰성을 확보하는 것이 앞으로의 과제라 생각한다.

4. 결 론

가동중인 발전기의 정지증진단법에 의한 잔존수명과 관계있는 인자들을 고려하여 잔존파괴전압을 구하고 각각의 인자와 운전년수 및 기동횟수와 비교하여 열사이클열화가 발전기의 수명에 어떠한 영향을 미치는 가를 확인하고 각 인자에 의해서 구해진 잔존파괴전압과 열사이클열화의 관계를 알아보기 위한 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 운전년수가 증가할수록 유전정접값 및 최대부분방전량은 감소하고 이에 따라 잔존파괴전압도 감소하는 것에 의해 발전기 고정자권선의 신뢰성 있는 잔존수명예측이 가능하다.

(2) 열사이클 열화를 대표하는 기동정지 횟수에 의해 수명을 예측할 수 있는 모든 인자의 값들이 비교적 산재한 값을 갖지만 유전정접과 최대부분방전량의 감소를 확인할 수 있었다.

(3) 운전이력에 의한 잔존파괴전압과 비파괴특성치에 의한 잔존파괴전압이 25%정도의 차이를 보임으로써 실제 운전중인 발전기가 가혹한 운전조건과 환경에서 운전되고 있음을 알 수 있다.

(4) 정지증 진단법에서의 최대방전하량과 유전정접값이 수명을 예측할 수 있는 잔존파괴전압과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

(5) 육안에 의한 검사와 비파괴검사를 통하여 신뢰성을 확보하여야 하나 정지증 진단법으로써 운전년수와 기동횟수를 가지고 잔존파괴전압을 구함으로써 잔존수명의 예측이 가능함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. F. Lyles, "Experience with PDA Diagnostic Testing on Hydraulic Generators", IEEE, 88 Winter Meeting 023 -4, 1988.
- [2] 發電機捲線絕緣劣化 判定基準委員會, “發電機捲線 絶緣劣化判定基準”, 日本 電力中央研究所技術研究報告, NO.67001, 1967.
- [3] 전력설비의 절연잔존수명추정법조사 전문위원회, “전력설비의 절연잔존수명 추정법”, 일본전기학회기술보고, 제502호 pp 34-42, 1994.
- [4] 김길용, “발전기 고정자 수명예측 및 절연진단에 관한 연구” (최종보고서), 한국전력공사, KRC-89G-J03, pp 157, 1992.
- [5] 김택수, “발전기 수명평가 및 진단시스템 개발” (중간보고서), 한국전력공사, KRC-95G-J01, pp 115-125, 1995.
- [6] Y. Takikawa, “Technology for Preventive Maintenance of Turbine Generators”, Hitachi Review, Vol. 72, No.8, pp.35-42, 1990.
- [7] 절연재료 코로나 열화전문위원회 “절연재료의 코로나방전에 의한 열화 I”(절연재료의 부분방전에 대한 예비적 검토) 일본 전기학회기술보고Ⅲ, 제106호, pp 3-15, 1973.
- [8] 加子泰彦, “축차스트레스인가법에 의한 마이카-에폭시 절연시스템의 복합스트레스열화의 해석” 일본전기학회 논문지 60-A6, pp 37-44, 1985.

저 자 소 개



김희곤 (金熙坤)

1964년 11월 4일 생, 1987년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1992년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 성균관대 대학원 전기공학과 박사과정 수료, 현재 한전 전력연구원 수화력발전연구실 선임연구원



박용관 (朴鏞寬)

1935년 9월 16일 생, 1958년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1977년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 성균관대학교 전기공학과 교수