

터빈 발전기용 비열화 고정자 권선 바의 절연 특성

김태희*, 강명국**, 이재권**

두산중공업(주) 기술연구원 터빈시스템개발팀*, 터빈발전기BG 발전기설계팀**

Insulation Properties of Unaged Stator Winding Bars for Turbine Generators

Tae Hee Kim*, Myung Guk Kang**, Jai Kwun Lee**

Turbine System Development Team*, Generator Design Team**, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract - Class-F and class-B insulating materials based on the resin rich type mica-epoxy composites for the stator windings in large turbine generators have been developed by DHIC. In recent, stator winding bars applied with prototype insulating tapes and commercially available resin rich groundwall tapes were produced through the same manufacturing processes as the real bars. Comparative tests to obtain the insulation properties of both bars were carried out such as IR/PI, dissipation factor and partial discharge at room temperature. In this paper, the manufacturing processes and the insulation properties of the bars which were not aged are presented.

1. 서론

대형 터빈 발전기의 고정자 권선 바에 사용되는 주절연 재료는 주요 핵심 소재로 레진 리치형 테이프가 미국 GE사 등에서 1970년대 상용화되어 전 세계 발전기 제조사에서는 이미 사용하고 있다¹⁾. 그러나 국내에서는 아직까지 상용화된 제품이 없으며 국내 발전기 제작사에서는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

두산중공업에서는 국내 전동기용 절연 테이프 제작업체와 함께 중소형과 대형 터빈 발전기용 F종 및 B종 레진 리치 주절연 테이프를 개발하고 있으며 최근에 시제품을 생산하였고, 지금까지 이에 대한 시험이 계속 진행되고 있다. 최근까지 개발된 절연 테이프의 특성을 기존 상용 주절연 테이프와 비교, 시험하고자 첫 단계로 테이프의 경화 상태에 대한 시험을 수행하였고 그 결과는 이미 발표^{2,3)}하였다. 다음 단계로서 절연 테이프를 구리 소선에 감아서 바(bar) 형상으로 제작한 후의 절연특성을 평가하고자 권선 시험용 시편을 제작하였고 전기적인 특성 시험을 수행하여 절연 특성을 파악하였다.

본 논문에서는 먼저 고정자 권선 바의 제작 과정을 절연 층별로 간략히 언급하였고, 개발된 절연 테이프와 현재 발전기 제작사에서 사용하고 있는 상용 레진 리치 주절연 테이프를 이용하여 제작된 바를 대상으로 수행된 절연특성 시험 결과를 제시하였다. 수행한 시험은 DC 5 kV를 인가하여 측정된 절연 저항과 Polarization index, 절연 등급에 따라서 F종은 최대 18 kV_{AC}와 B종은 22 kV_{AC}를 인가하여 Dissipation factor와 tip-up (%) 시험, negative와 positive 극성에 대한 부분방전 특성 시험을 수행하여 NQ 특성을 측정하였다.

2. 절연특성 시험 및 결과

2.1 발전기 고정자 권선용 바 제작 공정

고정자 권선의 절연 등급을 분류할 때 F종은 중소형 발전기에 적용되며 공기나 수소가 냉각 매체이고, B종은 대형 발전기용으로 탈이온화된 물을 냉매로 이용한 수냉

각 절연 시스템이 사용된다.

F종 고정자 권선의 제작 공정은 먼저 절연재가 코팅된 각각의 구리 소선을 미리 설계된 길이로 절단하고 말단 절단부의 절연을 일정한 길이만큼 벗겨둔다. 각 소선은 말단부에서 전압과 열 분포를 고르게 하기 위하여 꼬아서 (transposition) 다발로 조립(Röbel bar)한 후 소선 사이에는 절연재를 넣고 풀딩 처리한다. 권선의 조립이 용이하도록 라운드 처리하는 forming과 전기 접촉의 극대화를 위하여 각각 소선을 한 덩어리로 묶는 말단 절단부의 brazing 과정을 거친 다음 권선위에 주절연 테이프를 감고, 경화시 아스팔트 열매체로부터 절연재료의 오염을 방지하기 위하여 보호용 자재를 다시 감은 후에 컴파운드 탱크에 넣고 권선을 경화⁴⁾시킨다. 경화된 권선 바는 절연 내력을 보강하기 위하여 저저항, 고저항 페인트와 보호용 페인트를 주절연 테이프 위에 바른다.

B종 고정자 권선은 상기한 F종 권선의 제작 방법과 동일하며 차이점은 B종 시스템은 수냉각 방식이어서 권선 내부에 냉각수가 순환된다는 점이다. 따라서 냉각수가 고정자 권선으로 인입되는 부분인 바의 말단부 형상이 다르고 냉각수 박스를 말단부에 조립하는 공정이 추가된다. 또한 slot부에서 주절연 재료를 보호하기 위한 armoring tape가 추가된다는 점이 F종과 다르다.

그림 1에는 3차원 그래픽 도구로 작성한 고정자 권선의 형상을 나타내었다.



그림 1. 고정자 권선의 3차원 형상.

2.2 시편 제작

상기 2.1에서 언급한 과정을 통하여 실제 바와 동일하게 시험용 시편을 제작하였다. 시편 제작에 사용한 레진 리치 주절연 테이프는 개발 테이프 B종과 F종, 상용 테이프 B종과 F종으로 모두 4종이었다.

시편은 구리 소선위에 주절연 테이프를 12회 1/2 중첩하여 감은 후 아스팔트 컴파운드 탱크 속에서 경화시켰다. 경화가 끝난 바는 1.3 미터로 잘라서 이후의 모든 시험에 사용하였다. 그리고 주절연 테이프만의 절연특성을 시험하기 위하여 별도의 armoring이나 grading paint를 사용하지는 않았다. 또한 시편은 별도의 인위적인 열화가 발생하지 않도록 한 상태에서 시험을 수행하였다.

절연특성 시험을 수행하기 위하여 시편 표면에는 전극을 도포하였으며 본 시험에 사용된 전극의 형상은 IEC와 IEEE 관련 규격⁵⁾을 참고로 시편 표면에 은분(silver



그림 2. 제작된 B종 시편.

paint)으로 전극을 제작하였다. 그림 2에는 제작이 완료된 B종 절연 테이프 권선 시편의 형상 사진을 나타내었으며 전극이 도포되기 전의 모습이다.

시험시 18 kV_{AC} 이상의 고전압을 시편에 인가해야 하므로 시편 표면 주전극 끝단에서 발생할 것으로 예상되는 코로나를 억제하기 위하여 SiC 재질의 suppressor 테이프를 주전극 양 끝단에 일정한 길이로 감았다.

Dissipation factor 측정시 가드 전극을 주전극 양 옆에 제작하였는데 이 시험을 제외하고는 모든 시험에서 동일한 전극 구조 상태에서 시험하였다.

2.3 DC 절연저항 측정 및 Polarization index

시편의 제작 상태와 기본적인 절연특성을 평가하기 위하여 시편의 절연저항을 측정^[6]하였다. 실험에는 AVO사 Megger (모델S1-5010)를 사용하였으며 인가전압은 DC 5 kV로 설정하였다. 시험은 주전극과 가드 전극이 요구되는 '2.4 Dissipation factor' 측정 시험을 먼저 수행하고 그 다음 절연저항 측정 시험과 부분방전 측정 시험을 수행하였다. Dissipation factor 시험이 종료되면 가드 전극을 사용하지 않으므로 주전극과 가드 전극 사이를 3M사의 점착성이 있는 도전성 구리 테이프를 사용하여 두 전극을 연결(short)한 후 시험하였다.

DC 5 kV를 시편에 인가한 후 1분 단위로 저항값을 기록하였고 1분 경과시의 절연저항값과 10분 경과시 절연저항값을 식 (1)에 따라서 PI를 계산하였다. 아래의 식에서 첨자 t는 측정시 해당하는 시간을 의미한다.

$$PI = \frac{R_{10min.}}{R_{1min.}}, R_t = \frac{V}{I_t} \quad (1)$$

각각의 시편을 대상으로 시험한 결과에 대한 평균값을 표 1에 제시하였다. 절연저항의 단위는 GΩ이며 개발 시편이란 국산화가 진행중인 주절연 테이프로 제작된 권선 시편을 의미하며 상용 시편은 상용화된 주절연 테이프로

표 1. 절연 종별 시편의 1분 후 절연저항과 PI

	F종		B종	
	R _{1min.}	PI	R _{1min.}	PI
개발 시편	888	3.7	935	4.1
상용 시편	1,098	3.8	780	3.9

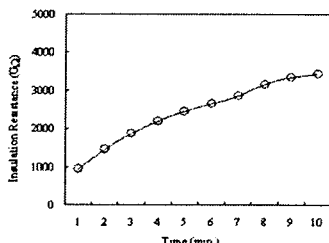


그림 3. 절연 저항의 시간별 변화

제작된 권선 시편을 의미한다. 표에서 모든 시편의 PI가 2 이상이며 R₁도 100 GΩ이상이므로 초기 절연저항 특성은 매우 양호^[11]함을 알 수 있다.

그림 3에는 시편의 절연저항에 대한 시간별 추이를 나타내었다. 이 그림에 나타난 저항 수치의 변화 추이는 종별 및 절연 테이프 제작사의 구분없이 시험한 대부분의 시편으로부터 이와 흡사한 변화 추이가 관찰되었으며, 일부 시편에서는 짧은 시간에 저항이 급격히 변하는 현상이 관찰되었으나 재시험 및 확인 결과 갑작스러운 저항 특성 변화는 시험상의 오류인 것을 확인되었다.

2.4 Dissipation factor 및 Tip-up

본 시험은 절연재료의 흡습이나 열적인 열화 정도를 측정하는 시험으로, 신규 절연 재료를 개발하는 과정에서 기존 절연 재료와 절연특성을 비교 시험하고 또한 향후 수행할 개발 절연재료의 권선 시편에 대한 가속열화 시험시 기준 데이터로서 활용하기 위하여 수행하였다.

가드 전극이 있는 경우에 대한 시험을 수행하였으며 주전극을 비롯한 가드 전극은 국제 규격^[5]에서 제시하는 크기로 참고로 하여, 주전극은 상기 2.2에서 언급한 바와 같이 제작하였으며 가드 전극은 주전극 양 옆에 4 cm 넓이로 은분으로 도포하여 제작하였다.

시편의 특성을 측정할 때 F종 시편에는 최대 18 kV_{AC}, B종 시편은 최대 22 kV_{AC}까지 전압을 인가하고 일정 전압 단계별로 Dissipation factor를 측정하였다. Tip-up(%)은 1E에서의 Dissipation factor와 0.2 E에서 Dissipation factor의 차로 정의되며 여기서 0.2 E와 1 E는 각각 F종인 경우 3.6 kV_{AC}와 18 kV_{AC}이고 B종인 경우에는 4.4 kV_{AC}와 22 kV_{AC}이다.

본 실험에서는 Soken사 C & tan δ 측정기기를 사용하여 시험결과를 확보하였다. 시험 데이터를 획득할 때 안

표 2. 시편의 Dissipation factor와 Tip-up

	F종				B종			
	0.2 E		Tip-up		0.2 E		Tip-up	
	최소	최대	최소	최대	최소	최대	최소	최대
개발 시편	0.37	0.39	0.99	1.27	0.56	0.63	0.73	1.01
상용 시편	0.42	0.46	0.65	1.28	0.42	0.43	0.80	0.87

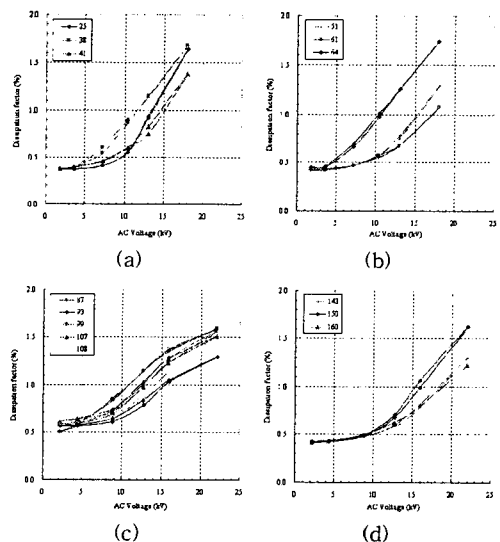


그림 4. 시편에 인가한 전압에 대한 Dissipation factor의 변화 곡선. (a) F종 개발 시편, (b) F종 상용 시편,

(c) B종 개발 시편, (d) B종 상용 시편.

정된 측정값을 얻기 위하여 시편에는 시험시 가해질 최대 전압을 미리 인가하여 일정 시간 유지하고 전원을 차단한 다음 다시 전압을 단계별로 올리면서 시험을 수행하였다. 시험 결과는 표 2와 그림 4 (a), (b), (c), (d)에 제시하였으며 범례에서 수치는 시편번호를 의미한다.

표2에서 제시된 데이터를 근거로 F종 시편인 경우 개발 시편이 인가전압 0.2 E에서 dissipation factor가 낮지만 Tip-up이 커지는 경향이 있으며 그림 4 (a)와 (b)에서 확인할 수 있다. 38번과 64번 시편의 경우와 같이 급격한 dissipation factor의 상승은 재료 불량으로 인하여 낮은 전압에서 부분방전이 발생하기보다는 전극 제작과정과 suppressor를 감으면서 발생한 오류로 추정된다.

B종 시편에서는 F종 시편과 반대로 오히려 상용화 시편이 0.2 E에서 dissipation factor가 낮지만 Tip-up이 커지는 경향이 있으나 최대값은 오히려 개발 시편에서 더 높게 나타났다. 그러나 그림 4의 (c)와 (d)를 비교해보면 87번 시편을 제외하고는 Dissipation factor의 급상승 지점이 약 12 kV 이상임을 추정할 수 있으며 시편 전체적으로는 유사한 특성을 보이는 것으로 판단된다.

2.5 부분방전 측정

권선 시편의 부분방전 특성을 시험하기 위하여 본 시험에서는 전압을 F종 시편에는 10.4 kV_{AC}, 13 kV_{AC}, 18 kV_{AC}를, B종 시편에는 12.7 kV_{AC}, 15.9 kV_{AC}, 22 kV_{AC}를 인가하여 각각의 전압에서 부분방전 펄스의 크기 (magnitude)와 펄스 수로 관찰하였다. 또한 주절연 테이프와 구리 소선간의 권선 특성을 평가하기 위하여 positive와 negative 극성으로 전압을 상기와 같이 각각 인가하고 부분방전 시험을 수행하였다. 시험에는 Soken사 부분방전 측정기(DAC-PD-3)를 이용하였으며 측정 전에는 반드시 falling time 20 ns이하의 1000 pC인 펄스 교정기를 이용하여 교정을 한 다음 측정을 시작하였다.

시험 결과는 그림 5 (a), (b), (c), (d)에 제시하였으며 P는 Positive 극성을, N은 Negative 극성, 수치는 인가 전압이다. 동일 전압을 인가할 때 negative 극성의 부분방전 곡선이 가장 먼저 나타나는데 그 주된 원인은 고전압이 인가되는 주전극 부근에서 부분방전의 발생이 가장 먼저 발생하기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 암실에서 0 V에서 2 E까지 전압을 서서히 증가시켜서 확인한 결과 예측대로 주전극의 말단 부위에서 공기와의 코로나

발생이 가장 먼저 시작되었다. 이 부위는 suppressor 테이프를 적용하여 많이 억제할 수 있었다.

전반적으로 부분방전 펄스의 최대 magnitude가 수만 pC 수준으로 측정되었다. 이 수치는 일반적인 문헌상에서 나타나는 데이터와 비교하면 상대적으로 큰 값이지만 고전자 권선용으로 레진 리치 주절연 테이프를 사용하여 실제 발전기에 적용한 데이터와 비교할 때 나쁜 수치가 아님을 경험을 통하여 판단할 수 있다. 참고로 현재까지 10.4 kV나 12.7 kV 이하의 전압을 레진 리치형 신규 고정자 권선 바에 인가하여 측정된 부분방전 펄스의 최대 크기가 10000 pC 이상으로 측정된다. 그리고 F종 절연 시편보다는 B종 절연 시편의 부분방전 특성이 상대적으로 나았으며 개발 시편과 상용 시편의 부분방전 특성 차이는 크게 나타나지 않았다.

3. 결론

개발중인 레진 리치형 주절연 테이프와 기존 사용품과의 비교 평가 시험을 수행하였기 위하여 실제 고정자 권선 제조공정과 동일한 공정을 거쳐서 개발품과 상용품 절연등급 F종과 B종 테이프를 이용하여 권선용 시편을 제작하였으며 절연특성 시험을 수행하였다.

고전자 권선 바의 제조 공정에 관하여 간단히 설명하였고 절연저항 및 Polarization index 시험, 가드 전극이 있는 경우에 대한 Dissipation factor 및 Tip-up 시험, 부분방전 시험 등을 수행한 결과를 제시하였다.

비열화 상태에서 두 시편에 대한 대부분의 시험 결과에서 유사한 결과를 얻었다. 그러나 시편을 제작하고 전극을 도포하는 과정에서 발생한 작은 오류는 현재 개선하면서 보충시험이 일부 진행중에 있다.

부분방전 시험과 관련하여 Dissipation factor 데이터와 부분방전 시험 결과로 부분방전 개시전압의 대략적인 추정은 가능하지만 정확한 데이터의 확보에는 실패하였으며 주된 원인으로는 부분방전 시험시 인가 전압을 좀더 상세히 구분하지 못한 것이 그 원인으로 추정된다.

이후의 개발 과정에서는 가속열화 시험을 통한 절연 테이프의 신뢰성 시험을 수행할 계획이며 일부는 이미 진행하고 있다. 지금까지 얻은 데이터와 신뢰성 시험을 통하여 향후 얻어질 시험 결과를 바탕으로 테이프의 품질 개선 및 정상상태에서의 일반적인 수명 평가는 가능할 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

- [1] Greg Stone, et al, *Electrical insulation for rotating machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Chapter 4, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [2] 김태희 외 3인, "고전자 권선용 F종 주절연 테이프의 기계적 특성", 대한전기학회 2004 하계학술대회 논문집, pp. 12-15, 2003. 4.
- [3] T. H. Kim, et al, "Electrical and mechanical characteristics of the insulating materials for the groundwall of stator windings", ICEMS2004, Jeju-island, 2004.
- [4] 김태희 외 6인, "대형 발전기 고정자 권선 주절연용 절연 테이프의 시험 방법", 대한전기학회 2003년 고전압 및 방전 응용기술연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 12-15, 2003. 4.
- [5] IEC Standard 60894 (1987), "Guide for the test procedure for the measurement of loss tangent on coils and bars for machine windings.," IEEE286-2000, "Recommended practice for measurement of power factor tip-up of electric machinery stator coil insulation."
- [6] IEEE 43-2000, "IEEE recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery."

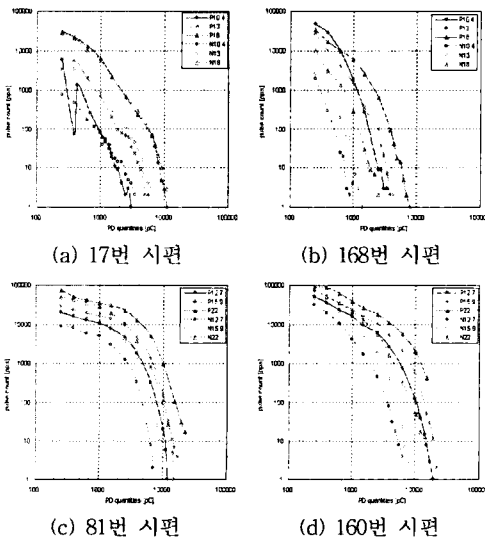


그림 5. 인가 전압 및 인가 극성별 부분방전 NQ 곡선. (a) F종 개발 시편, (b) F종 상용 시편, (c) B종 개발 시편, (d) B종 상용 시편.

본 연구는 산업자원부 전력산업기술개발사업으로 수행되었습니다.