축-토크법을 이용한 새로운 발전기 효율시험 방법의 제안

Proposal of A Novel Generator Efficiency Test Using The Shaft-Torque Method

김 현 한* · 옥 연 호** · 김 광 호†
(Hyun-Han Kim · Yeon-Ho Ok · Kwang-Ho Kim)

Abstract - An efficiency test for generators is generally required in case of construction of a new power plant or replacement of an existing generator. Generally, the efficiency of generator is measured by the input-output ratio under any given condition. Therefore, the best way is to directly measure the value of input and output power of a generator and calculate the efficiency values. However, it is difficult to measure a generator's input values accurately, especially for large systems. So, we are usually measuring the losses of the generator. But for measuring these values, there are several constraints for test such as preparing additional power generator and releasing the protection relay for manual operation of auxiliary equipments. Therefore, this study suggests that a novel generator efficient test method using the shaft-torque method which can be carried out while the generator is normally operating. The reliability of the result value was verified by comparing with the efficiency test results of the conventional retardation method on IEEE Std 115-1995.

Key Words : Generator efficiency test, Retardation method, Shaft torque method

1. 서 론

발전기의 효율은 기기의 성능을 입증하는데 대단히 중요한 요소이다. 따라서 신규발전소 건설에 따라 준공시험을 하는 경우나 기존설비를 개·대체할 경우 발전기 효율시험을 반드시 실시하게 된다. 또한 대부분 계약조항에는 보증효율 미달에 대한 배상조건을 명시하고 있기 때문에 사업 시행시에는 보증효율 입증에 위한 시험방법에 대하여 적절한 계획을 수립하여야 한다. 기기의 효율은 입력값과 출력값의 비로 정의되므로 발전기에 대해서도 입력값과 출력값을 직접 측정하여 효율을 산출하는 것이 가장 정확하면서 일반적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 수력발전기의 경우 입력값은 낙차(H)와 유량(Q)에 의하여 구할 수 있지만 수차의 힘으로 구동되는 발전기 출력에는 이미 수차효율(η_T)과 발전기효율(η_G)이 동시에 포함되어 있기 때문에 이러한 방법으로는 발전기(Generator)만의 효율을 직접 구할 수 없다[1]. 따라서 일반적으로 발전기 효율은 발전기 손실을 측정하여 계산하여야 하는데[2], 이들 손실값을 측정하기 위해서는 먼저 발전기를 타 동력원을 이용하여 기동하여야 한다. 이 경우 발전기를 시험 조건에 적합하도록 운전하기 위하여 전압제어를 위한 여자설비(Excitation System)와 주파수 제어를 위한 조속기(Governor System)설비, 그리고 유압설비 및 공기압축기 등 보조기기 등은 모두 수동으로 조작할 수 있도록 조치하여야 한다[3]. 특히 시험시 운전 조건은 정상 운전 조

건과 다르기 때문에 시험을 위해서는 역전력 계전기, 주파수 계전기 등은 기능을 해제하여야 하기 때문에 발전기 효율측정을 위해서는 여러 가지 제약사항들이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 제약사항에 영향을 받지 않고 발전설비를 정상적으로 운영하면서 효율을 측정 할 수 있는 축-토크법 측정을 이용한 발전기 효율시험 방법을 제시하고자 한다. 수차의 힘이 발전기와 연결된 축에 전달되면 축의 비틀림이 생기게 되는데 이로 인하여 축이 원래의 길이에 비하여 변형이 발생된다. 이 변형률을 축에 부착된 Strain gauge로 측정(e)하여 축-토크를 계산하게 되면 수차의 효율과는 무관한 발전기 입력값을 계산할 수 있는데, 이 값과 발전기 단자에서 실측한 출력값을 비교하게 되면 발전기 효율을 계산할 수 있다. 이 제안된 방법으로 구해진 발전기의 효율값을 기존의 IEEE Std 115-1995의 감속법(Retardation method)을 이용한 발전기 효율측정 값과 비교한 결과 큰 차이가 없어 제안된 방법이 수력발전기 효율측정에 적용 가능함을 증명하였다.

2. 기존의 감속법(Retardation Method)을 이용한 발전기 효율시험

IEEE Std 115-1995에서는 발전기 효율시험 방법으로 다음과 같이 4가지 방법, 즉 ① Separate-drive method, ② Electric-input method, ③ Retardation method, ④ Heat transfer method 를 제시하고 있다[4]. 이들 방법은 대부분 별도의 구동장치가 필요하거나 충분한 연속운전 시간이 요구된다. 본 절에서는 위 4가지 방법중 발전기 효율시험에 적용한 감속법(Retardation method)을 시화호조력발전소에 적용한 사례를 중심으로 기술하였으며, 발전기 사양은 표 1과 같다. 감속법을 이용한 발전기 효율시험에서 발전기 손실 측정을 위해서는 시험대상 발전기는 동기전동기로 운전

* Electric Power Business Dept., K-water, Korea

** Electric Power Business Dept., K-water, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr

Received : December 30, 2013; Accepted : March 20, 2014

할 수 있도록 회로를 구성하여야 하며, 전원공급용 동기발전기는 수동 운전을 통하여 시험에 적합하도록 전압과 주파수 제어가 가능하도록 하여야 한다[3]. 감속법을 이용한 발전기 효율시험 방법은 공장시험, 현장시험 모두 가능하지만 현장시험의 경우, 발전설비가 설치되고 모든 기능시험이 완료된 발전기를 그림 1과 같이 외부로부터 전원공급이 되지 않도록 Main TR과는 연결하지 않고 2대의 발전기만 상호 전기적으로 연결한다. 이 경우 효율측정을 위한 발전기 G1은 동기전동기로 운전하고 발전기 G2는 전원공급용으로 운전이 가능하도록 회로를 구성한다.

그림 1 발전기 단선 결선도

Fig. 1 Single line diagram

표 1 발전기 사양

Table 1 Specification of Generator

구 분	Stator	Rotor
Voltage(V)	10,200	205
Current(A)	1,514.7	952
중량(ton)	119	102
직경(m)	8.2m	7.6m
피상전력(kVA)	26,760	
역률(p.f)	0.95	
주파수(Hz)	60	
Speed(rpm)	64.29	

그리고 전동기(G1) 및 발전기(G2)에 대한 여자전원은 별도로 확보하여 시험에 지장이 없도록 조치하여야 하며, 특히 시험을 위하여 운전되는 전원공급용 발전기(G2)는 주파수, 회전속도 및 전압 등이 정상적인 운전 조건과 다르기 때문에 역전력계전기, 주파수계전기, 저전압 계전기 등 보호계전기에 대해서는 설정값을 해제하여야 한다. 따라서 이러한 시험조건 때문에 시험중 사고가 발생할 경우 시스템적으로 적절한 보호대응을 할 수 없으므로 이에 대한 위험성을 충분히 고려하여야 한다. 더불어 효율시험 대상 발전기는 수차측 물을 완전히 배수하고 Runner는 100% 닫아서 풍손이 최소화 되도록 하여야 한다. 배수할 경우, 만일 Spiral

casing 전단에 Inlet valve가 없다면 Intake gate를 닫고 도수관 전체를 배수하여야 하며, Wicket gates만으로 차수하는 경우에는 누수가 발생되지 않도록 하여야 한다. 또한 터빈 축봉수 장치의 Seal이 고정체에 닿지 않도록 간격을 조정하여 마찰에 의하여 회전자의 회전속도에 영향을 미치지 않도록 하여야 한다. 이론적으로 발전기만의 손실을 측정하기 위해서는 발전기에 연결된 샤프트, 터빈 등 다른 기계기구와 연결되지 않는 상태에서 손실을 측정하는 것이 이상적이지만 실제 현장에서는 발전기가 설치된 상태에서 시험하기 때문에 발전기로부터 이들을 분리하게 되면 발전설비 전체의 균형 및 무게중심이 맞지 않아 발전기를 기동시킬 수 없어 어쩔 수 없이 이들 기기와 연결된 상태에서 전체의 기계손실을 측정한다[5]. 그리고 베어링 마찰손과 터빈의 풍손에 대해서는 설계당시 제작사가 제시한 값을 사용하는데, 전체 기계손실에서 이를 제외시키는 방법으로 발전기만의 손실을 찾게 된다.

2.1 무부하 손실 측정

발전기 효율을 측정하기 위해서는 앞 절에서 설명한 것처럼 그림 1과 같이 2대의 발전기를 전기적으로 연결하고, 효율을 측정하기 위한 발전기는 전동기로 운전할 수 있도록 준비하여야 한다. 본 시험에서는 G1 발전기를 대상으로 효율시험을 하기 때문에 이를 전동기로 운전하고, G2는 발전기로 운전하여 시험에 적합한 전력을 공급함으로써 효율측정에 필요한 손실을 측정하였다. 이 시험에서 무부하 손실이란 전동기가 무부하 상태로 정격전압, 정격속도로 회전 할 때 전동기로 입력되는 전력을 모두 무부하 손실로 본다[6]. 그리고 이 손실 값에서 마찰손과 풍손을 제외하면 전동기 자체만의 무부하 손실을 구할 수 있다. IEEE Std 115-1995에서 제시한 감속법(Retardation Method)을 이용하여 수차발전기 손실을 측정하는 방법은 다음과 같다. 그림 1과 같이 연결된 2대의 발전기에 대하여 ①번 차단기(CB)와 ②번 차단기(CB)를 Close하여 두 대의 발전기를 정지한 상태에서 전기적으로 연결한다. 그리고 여자설비 전원은 별도로 공급받도록 하되 초기에는 여자전압을 “0”인 상태로 하여 무여자 상태를 유지하도록 한다. 이 상태에서 G2발전기의 Wicket Gate를 서서히 개방하면 발전기의 회전수는 점점 증가하게 되며, 이와 동시에 발전기 여자전압을 인가하게 되면 발전기 전압 및 주파수가 서서히 증가하게 된다. 그리고 G2발전기의 주파수 증가에 따라 이것과 전기적으로 연결되어 동기전동기로 운전되고 있는 G1발전기의 회전수도 서서히 증가하게 된다. 이 때 주의할 사항은 모든 기기를 수동으로 조작하고, 일부 보호계전기들은 해제된 상태이기 때문에 발전기 전압, 여자전압 및 주파수 등 기기 상태를 주의 깊게 관찰하여 상호 비대칭 회전수로 인하여 동기탈조 등의 사고가 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 동기전동기(G1)의 회전수가 점점 증가하여 정격회전수(64.29rpm)에 도달하면 역률이 1이 되도록 여자전압을 조정하고, G2발전기의 단자전압을 정격전압의 약 110% 정도에 도달하도록 여자전압을 조정한다. 동기전동기(G1)의 무부하 손실을 측정하기 위해서는 동기전동기(G1)의 회전수가 정격회전속도(64.29 rpm)가 유지되고 동시에 단자전압이 정격전압이 되도록 G2

발전기의 회전수와 전압을 조정하여야 하는데 이 때의 G2발전기의 출력값이 동기전동기(G1)의 무부하 손실에 해당된다. 이 값에서 G1의 고정자 코일 저항손을 제외하면 식 1과 같이 철손(P_{CL})과 기계손(P_{ML})을 포함한 G1발전기의 전체 무부하 손실($P_{NL-Loss}$)이 된다.

$$P_{NL-Loss} = P_{CL} + P_{ML} \quad (1)$$

그리고 식 1에서 찾아낸 무부하 손실($P_{NL-Loss}$)에서 철손(P_{CL})과 기계손(P_{ML})을 구분하기 위해서는 동기전동기(G1)가 정격회전속도를 유지하도록 하면서 전압을 서서히 낮추게 되면 그림 2와 같이 전압 감소에 따라 철손(P_{CL})이 감소하는 모양을 확인 할 수 있는데 본 시험에서는 표 2와 같이 정격전압의 약 108%에서부터 약30%까지 전압을 낮추면서 9개 Points에 대해서 측정값을 기록하였다. 이 철손(P_{CL})에 해당하는 것이 히스테리시스손과 와전류손이다. 이 때 주의할 사항은 G2 발전기의 출력전압을 너무 낮추게 되면 동기전동기(G1)의 Torque부족으로 인하여 동기 탈조에 따른 설비손상을 초래할 수 있으므로 일반적으로 정격전압 대비 약 30%까지만 낮추고 발전기를 정지시킨다.

그림 2 단자전압-입력곡선

Fig. 2 Terminal voltage and input curve

표 2 입력전압 변동에 따른 발전기 손실값

Table 2 No-load loss with input voltage variation

V_a/V_n (%)	V_a	I_f	$P_{NL-Loss}$ (kW)
108.18	11034.2	614.56	138.44
98.76	10073.0	547.62	119.23
89.20	9097.9	487.78	106.45
77.12	7866.3	419.42	95.83
69.35	7073.8	371.65	87.27
58.76	5993.9	315.32	73.10
51.85	5288.5	276.56	66.69
40.25	4105.8	213.14	62.18
29.33	2991.9	154.70	54.15

그리고 이 후 부터는 감소 추이 곡선을 보외법(Extrapolation)으로 연장하여 전압이 0이 되는 y축과 만나는 점을 찾게 되면 그 점의 값이 발전기의 기계손(P_{ML})에 해당된다. 그리고 이 값에는 식 (2)와 같이 회전자 기계손(P_{R-ml})및 제작사측에서 제시한 Bearing마찰손(P_{B-turb})과 Runner등의

풍손(P_{W-run})이 포함되어 있다. 따라서 발전기의 각 손실값은 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ML} = P_{R-ml} + P_{B-turb} + P_{W-run} \quad (2)$$

표 3 발전기의 각 손실값[kW]

Table 3 Generator loss

$P_{NL-Loss}$	P_{CL}	$P_{ML} : 44.34$		
119.23	74.89	P_{R-ml}	P_{B-turb}	P_{W-run}
		28.34	5	11

2.2 부하손실 측정

감속법(Retardation Method)을 이용하여 발전기 부하손실을 측정하기 위해서는 개방회로시험(Open circuit retardation test)을 통한 관성모멘트(J) 측정과 단락회로시험(Short circuit retardation test)으로 발전기 정격전류가 흐르는 조건에서 속도변동률(dn/dt)을 측정하여야 한다[7]. 이 두 시험을 통하여 측정한 관성모멘트(J)와 속도변동률(dn/dt)값을 활용하게 되면 식 (3)과 같이 발전기 부하손실을 계산할 수 있다. 그리고 이 결과값에서 발전기의 기계손(P_{ML})과 인출 케이블 손실(P_{cable} , I^2R)을 제외하면 발전기 부하손실(P_{L-Loss})을 구할 수 있는데, 이것이 발전기의 동손과 표류부하손에 해당된다.

Loss in kilowatts

$$= \left(\frac{\pi}{30} \right) \cdot \frac{1}{1000} \cdot J \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

- $(\pi/30)$: 회전수를 각속도로 변환
- n : 회전수(rpm)
- dn/dt : 회전수의 속도-시간 감속비(rpm/s)
- J : 회전기기의 관성모멘트($kg \cdot m^2$)

2.2.1 개방회로 감속시험 (Open circuit retardation test)

발전기의 관성모멘트를 구하기 위해서는 2.1절의 정격 회전수(n)에서 무부하 손실값과 더불어 무부하 상태의 속도변동률(dn/dt)을 알아야 한다. 무부하 상태에서의 속도변동률을 측정하기 위해서는 2.1절에서의 무부하 손실 측정 방법처럼 G2발전기를 이용하여 동기전동기로 운전되고 있는 G1발전기의 회전수를 정격의 약130%정도까지 상승시켜야 한다. 속도가 충분히 상승되면 그림 1의 ①번 차단기를 Open하여 G2발전기로부터 전원공급을 차단함으로써 G1발전기는 관성에 의해서만 회전하도록 한다. 그리고 이렇게 무부하 상태에서 관성에 의해서만 회전하는 G1발전기에 대해서는 V/f (Hz)가 일정한 상태를 유지할 수 있도록 여자전압을 제어하여야 한다[8]. 무부하 상태에서 동기전동기로 운전되는 G1발전기는 관성에 의해서만 회전하기 때문에 시간이 갈수록 마찰력에 의하여 그림 3과 같이 회전수가 점점 감소하는데 이러한 방법으로 일정기간동안 속도변동률(dn/dt)을 측정한 값이 표 4와 같다.

그림 3 개방회로에서 속도변동률

Fig. 3 The rate of speed change in open circuit

표 4 개방회로에서의 속도변동률 측정값

Table 4 Measured rate of speed change in open circuit

dn/dt	-0.1320
$n(\text{rpm})$	64.3

이 측정값과 2.1절에서 찾아낸 무부하 손실값($P_{NL-Loss}$)을 이용하여 식 (4)와 같이 관성 모멘트를 계산하는데 이를 개방회로감속시험(Open circuit retardation test)이라 한다.

$$J = \frac{P_{NL-Loss}}{(\pi/30)^2 \cdot n \cdot (dn/dt)} [kgm^2] \quad (4)$$

$$\therefore J = 1,298,280 kgm^2$$

2.2.2 단락회로 감속시험 (Short circuit retardation test)

발전기의 부하손실을 구하기 위해서는 동기전동기로 운전되고 있는 G1발전기에 대하여 단락회로를 통하여 정격회전수에서 정격전류가 흐르는 상태를 만들어야 한다. 그리고 식 (5)을 이용하여 단락회로에서의 손실(P_{S-Loss})을 계산하여야 하는데, 여기서 관성모멘트(J)는 2.2.1절의 개방회로 감속시험에서 구한 값을 그대로 사용하고 부하상태에서의 속도변동률(dn/dt)은 2.1.1절의 무부하 손실 측정방법과 같은 방법으로 동기전동기로 운전되고 있는 G1발전기의 회전수를 정격의 약130%정도까지 상승시키고 속도가 충분히 상승되면 ②번 차단기를 Open하여 G2발전기로 부터 공급되는 전력을 차단하여 G1발전기는 관성에 의해서만 회전하도록 함과 동시에 동기전동기(G1)의 여자전압을 “0”으로 하여 무여자 상태로 한다. 이에 앞서 ③번 차단기는 2차측 BUS를 주 변압기와 전기적으로 연결시키지 않고 단자 상간을 상호 연결하여 차단기가 Close되면 자동으로 단락되도록 회로를 임시적으로 구성 한다[8]. 이렇게 하면 ③번 차단기가 Close될 때 단락회로가 구성된다. 이러한 방법으로 ③번 차단기를 Close하여 발전기를 단락시킨 다음 여자전압을 서서히 상승시켜 시험을 위한 G1발전기 출력이 정격전류에 도달할 때까지 조정한다.

이렇게 하면 동기전동기(G1)는 정격전류 상태에서 관성에 의해서만 회전하게 된다. 관성에 의해서만 회전하는 회전자는 마찰과 자속의 영향으로 그림 4와 같이 회전속도(rotor

그림 4 단락회로에서 속도변동률

Fig. 4 The rate of speed change in short circuit

표 5 단락회로에서의 속도변동률 측정값

Table 5 Measured rate of speed change in short circuit

dn/dt	-0.3124
stator current	1514.7 [A]
n	64.3 [rpm]
$P_{cable} I^2 R$	7.77 [kW]

이 측정값과 위 2.2.1절에서 구한 관성모멘트(J)를 이용하여 식(5)와 같이 단락회로에서의 손실(P_{S-Loss})을 구할 수 있고 이를 단락회로감속시험(Short circuit retardation test)이라 하는데, 단락회로 감속시험은 정격부하 조건의 시험으로 볼 수 있다. 단락회로 감속시험에서 속도 변동률을 살펴보면 개방회로 감속시험에서의 속도변동률 보다 크다는 것을 확인할 수 있는데 이는 Bearing 마찰손과 Turbine 등의 풍손 영향 뿐만아니라 정격전류에 의한 자속의 영향 때문으로 볼 수 있다. 이 값에서 발전기 기계손실(P_{ML})과 인출 케이블 손실($P_{cable} I^2 R$)을 제외하면 식(6)과 같이 발전기 부하손실(P_{L-Loss})을 구할 수 있는데 이것이 고정자 동손과 표류 부하손에 해당된다. 이러한 방법으로 발전기 전체 손실(P_{T-Loss})을 구할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (7)과 같이 출력(P_{out})값과 비교하여 발전기 효율을 구할 수 있다.

$$P_{S-Loss} = \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 \cdot \frac{1}{1000} \cdot J \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} [kW] \quad (5)$$

$$= 286 kW$$

$$P_{L-Loss} = P_{S-Loss} - P_{ML} - P_{cable} I^2 R \quad (6)$$

$$= 233.89 kW$$

$$\eta_G = 100 - \left(\frac{P_{T-Loss}}{P_{out} + P_{T-Loss}} \right) \times 100 (\%) \quad (7)$$

2.3 발전기 효율 측정 결과

위 절에서 측정한 무부하손실 및 부하손실과 별도로 측정

한 여자손실 및 냉각팬 손실의 합이 전체 손실(P_{T-Loss})이며, 이를 이용한 발전기 효율시험 전체의 결과는 표 6과 같다.

표 6 발전기 효율 측정 결과

Table 6 Measurement results for generator efficiency

구 분	단 위	역률 (1.0)			
Load	%	100	80	60	40
Apparent Power	kVA	26,760	21,408	16,056	10,704
Stator current	A	1,514.7	1,211.8	908.8	605.9
Mechanical Loss(P_{ML})	kW	44.34	44.34	44.34	44.34
Core Loss(P_{CL})	kW	74.89	74.89	74.89	74.89
No Load Loss($P_{NL-Loss}$)	kW	119.23	119.23	119.23	119.23
Load Loss(P_{L-Loss}) (stator copper + stray load)	kW	233.89	149.69	84.2	37.42
Excitation Loss	kW	119.4	98.09	81.9	70.49
Cooling Fans Loss	kW	12.22	12.22	12.22	12.22
Total Loss(P_{T-Loss})	kW	484.74	379.23	297.55	239.36
P_out	kW	26,760	21,408	16,056	10,704
P_in	kW	27,245	21,787	16,354	10,943
η_G	%	98.22	98.26	98.18	97.81

구 분	단 위	역률 (0.95)			
Load	%	100	80	60	40
Apparent Power	kVA	26,760	21,408	16,056	10,704
Stator current	A	1,514.7	1,211.8	908.8	605.9
Mechanical Loss(P_{ML})	kW	44.34	44.34	44.34	44.34
Core Loss(P_{CL})	kW	74.89	74.89	74.89	74.89
No Load Loss($P_{NL-Loss}$)	kW	119.23	119.23	119.23	119.23
Load Loss(P_{L-Loss}) (stator copper + stray load)	kW	233.89	149.69	84.2	37.42
Excitation Loss	kW	169.5	133.4	106.4	86.1
Cooling Fans Loss	kW	12.22	12.22	12.22	12.22
Total Loss(P_{T-Loss})	kW	534.84	414.54	322.05	254.97
P_out	kW	25,422	20,338	15,253	10,169
P_in	kW	25,957	20,752	15,575	10,424
η_G	%	97.94	98.00	97.93	97.55

이들 값 중 부하손과 무부하손은 역률1.0과 정격출력(Load 100%)조건에서 실제 측정한 값이며, Apparent Power(피상 전력) 및 Stator current는 Load % 에 따라 적용하였고, 부

하손(P_{L-Loss})은 부하전류의 제곱(I^2R)에 비례함으로 부하변동의 Load %의 제곱값을 산술적으로 계산하여 적용하였다.

3. 제안된 축-토크를 이용한 발전기 효율시험

어떤 힘이 축에 전달되면 인장 또는 압축을 받아 축의 비틀림 또는 변형이 생기며, 이로 인하여 축은 원래의 길이에 비하여 늘어나거나 줄어드는 현상이 발생하게 되는데 이 변형 정도를 그림 5과 같이 Strain gauge를 이용하여 측정한다. 센서인 Strain gauge를 대상 구조체에 부착하고 구조체가 변형을 일으키면 부착된 센서의 전기적 저항값이 변하게 되며, 이 변화 정도를 측정(ε)하게 되면 식 (8)을 이용하여 축-토크값을 구할 수 있다[9].

$$T = \frac{G}{8} \cdot \varepsilon \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D_{out}^4 - D_{in}^4}{D_{out}} \right) \cdot \pi / 9.8 \quad (8)$$

- T : Torque(kgf · m)
- G : 축의 전단계수(Shear Modulus) N/mm²
- ε : Strain gauge측정값
- D : 축의 직경

이러한 방법으로 제안된 축-토크를 이용한 발전기 효율시험 방법은 다음과 같다. 수차가 회전하게 되면 발전기와 연결된 축도 같이 회전하게 되는데 이 때 축에 비틀림 힘이 가해진다. 이 힘은 발전기 출력에 따라 다르기 때문에 발전기 출력 변화와 함께 비틀림 힘의 크기도 각각 다르게 나타난다. 이러한 비틀림 값에 대하여 축의 전단계수(G)와 축에 부착된 Strain gauge측정값(ε)을 이용하게 되면 발전기 출력에 따라 축-토크를 계산할 수 있다. 그리고 이 값은 수차로부터 전달되기 때문에 발전기 입력값으로 볼 수 있으며, 이를 발전기 출력값과 비교하게 되면 발전기 효율을 구할 수 있다.

그림 5 Strain gauge 설치 방법

Fig. 5 Installation of strain gauge

이러한 축-토크를 이용한 발전기 효율시험은 발전기를 정상적으로 운영하면서 시험을 할 수 있기 때문에 감속법(Retardation Method)을 이용한 발전기 효율시험에 비하여 시험시 발생할 수 있는 사고의 위험성이 낮을 뿐만 아니라

시험에 소요되는 비용이 적고, 시험기간이 단기간이라는 장점이 있다. 이렇게 새롭게 제안된 축-토크법을 이용한 효율 시험 방법을 시화호조력발전소 발전기 효율시험에 적용하였는데 Strain gauge가 부착된 발전기 축의 외경은 949mm이고 내경은 160mm인 중공(中空) 축으로서 재질은 ASTM A668 Class D (20Mn5)로 전단계수는 81,000N/mm²[10] 이다. 여기서 축의 전단계수(G)는 축 재료의 물성에 따라서 결정되며 이것에 의하여 Strain gauge에서 측정하는 비틀림(ε) 정도에 따라 토크값이 정해진다. 본 시험에서는 시화호조력발전소의 발전기 축 제작도면의 Data를 적용하였고 축은 중심이 비어있는 중공(中空)으로 되어 있어 축의 직경에 대해서는 외경(D_{out})과 내경(D_{in})을 구분하여 계산하였다.

3.1 제안된 효율시험의 특징

축-토크를 이용한 발전기 효율시험에 사용된 시험장비는 표 7과 같으며 설치 계통도는 그림 6과 같다.

표 7 시험장비

Table 7 Test equipments

제품명	제조사	Model	사진
Strain gauge	HBM	K-XY41-3/350
DQA	HBM	QuantumX (MX410)
	Dewetron	DEWE-2600
Telemetry System	Datate 1	dt1001T-ST dt1001R6-S

그림 6 토크 측정 방법

Fig. 6 Torque measurement method

토크에 의한 축의 변형량을 보다 정확하게 측정하기 위하여 축의 표면에 Strain gauge를 180°간격으로 2조를 부착하였으며, 데이터의 정확성을 높이기 위해서는 표면 부착이 중요하기 때문에 축 표면을 충분히 매끄럽게 가공하였다. 데이터 취득을 위하여 Strain gauge와의 연결단자에 Transmitter를 설치하였으며, 축은 회전체이므로 데이터 취득용 안테나를 고정부에 설치하였다. 취득된 데이터는 Quantum X를 통하여 분석시스템으로 전송되며 여기서 Strain gauge 측정값

(ε)을 이용하여 토크값을 계산하고 이 값을 식 (9)를 이용하여 전력단위로 변환하여 입력값으로 계산하였다.

그림 7 토크 측정값

Fig. 7 Measuring values for torque

그림 7은 Strain gauge를 이용하여 발전기 축으로부터 얻어지는 토크를 측정한 데이터인데 발전기 출력을 정격부하의 40%, 60%, 80%, 100%순으로 단계적으로 증가시키면 토크값도 단계적으로 증가하게 된다. 이를 이용하여 발전기 효율을 측정하게 되면 발전기 출력별로 효율측정이 가능하며, 역률 변화에 따라라도 효율 시험이 가능하다.

$$P_{in} = \frac{2\pi}{60} \cdot T \cdot N \text{ [kW]} \quad (9)$$

· P_{in} : Input Power(kW)
· T : Torque(kgf · m)
· N : 정격회전수(rpm)

따라서 발전기 입력값은 축-토크법을 이용하여 측정하고 출력은(P_{out}) 발전기 출력단의 CT, PT에서 직접 측정하여 식 (10)과 같이 발전기 효율을 계산하였다.

$$\eta_G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100(\%) \quad (10)$$

3.2 효율측정 결과

시화호조력발전소 G1발전기에 대하여 축-토크값을 이용하여 각 출력별 및 역률별로 실시한 발전기 효율시험 결과는 표 8과 같다.

표 8 효율시험 결과

Table 8 Test result for generator efficiency

구분	단위	역률 (1.0)			
		100	80	60	40
입력	축-토크 (kgf · m)	3.97	3.27	2.44	1.66
	회전수 (rpm)	64.32	64.32	64.31	64.27
출력	피상전력 (kVA)	26,120	21,490	16,022	10,829
결과	P_{in} (kW)	26,727	22,014	16,424	11,167
	P_{out} (kW)	26,120	21,490	16,022	10,829
	η_G (%)	97.73	97.62	97.55	96.98

구 분	단위	역률 (0.95)			
Load	%	100	80	60	40
입력	축-토크 (kgf · m)	3.78	3.12	2.29	1.53
	회전수 (rpm)	64.23	64.34	64.24	64.33
출력	피상전력 (kVA)	26,137	21,584	15,795	10,502
결과	P_{in} (kW)	25,414	21,011	15,397	10,302
	P_{out} (kW)	24,830	20,505	15,005	9,977
	η_G (%)	97.71	97.59	97.45	96.85

4. 기존의 감속법과 제안된 축-토크법의 결과 분석

감속법에 의한 발전기 효율시험 방법은 정격출력(Load 100%)과 역률이 1(pf 1.0)인 상태에서만 효율을 측정하고 그 외의 부하 및 역률변동에 따른 효율값에 대해서는 산술적인 계산으로 효율값을 유추하지만, 축-토크 측정에 의한 발전기 효율시험 방법은 부하와 역률을 각각 변경하면서 실제 측정되는 축-토크값을 이용하기 때문에 모든 조건에서 효율값을 실제 측정된 것으로 볼 수 있다. 따라서 이 두가지 방법으로 측정한 효율값이 표 9와 같으며, 이들에 대한 변화 추이 곡선은 그림 8과 같이 변하는 것을 알 수 있다.

표 9 감속법과 제안된 축-토크법의 효율시험 결과 비교
Table 9 Comparison of test results for generator efficiency

구분 Load (%)	역률(pf 1.0)			역률(pf 0.95)		
	η_R	η_T	Diff	η_R	η_T	Diff
100	98.22	97.73	0.49	97.94	97.71	0.23
80	98.26	97.62	0.64	98.00	97.59	0.41
60	98.18	97.55	0.63	97.93	97.45	0.48
40	97.81	96.98	0.83	97.55	96.85	0.70

- η_R : 감속법(Retardation Method)
- η_T : 축-토크법(Shaft-Torque Method)

그림 8 감속법과 제안된 축-토크법의 효율시험 결과 비교
Fig. 8 Comparison of test results for generator efficiency

먼저 감속법(Retardation Method)에 의하여 측정한 발전기 효율값을 살펴보면 역률 1.0, 출력 40%인 상태에서 발전기 효율은 97.81%이며, 동일한 조건에서 출력이 60%로 증가되면 효율은 98.18%로 늘어나지만 이후부터는 출력이 증가하더라도 효율은 거의 일정하게 유지된다. 역률이 0.95인

경우를 살펴보면 역률이 1.0인 경우와 거의 유사한 형태로 변하지만 각 출력별로 약 0.25%~0.28%정도 효율값이 낮게 나타나는데 이는 역률에 따른 효율 감소로 판단된다. 축-토크법에 의한 효율 변화량을 살펴보면 역률 1.0, 출력 40%인 상태에서 발전기 효율은 96.98%이며, 출력이 60%로 증가하면 효율이 97.55%정도로 늘어나고 이후부터는 출력이 증가하더라도 효율은 거의 일정하게 유지된다. 역률변화에 따른 효율 변화의 특징을 살펴보면 감속법에서는 효율이 낮아지면서 그 형태는 유사하게 나타나지만, 축-토크 측정법에서의 효율은 역률 변화에 관계없이 거의 유사하게 나타난다. 이러한 차이점은 앞에서 설명한 바와 같이 감속법(Retardation Method)에서는 역률 변화에 대해서 산술적으로 효율값을 계산하지만 축-토크 측정법에서 부하와 역률을 변화시키면서 효율값을 직접 측정하였기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 이 두 가지 효율 측정값을 분석해 보면 역률이 1.0인 경우 감속법에서의 발전기 효율값은 97.81%~98.26%이며, 축-토크법에서의 발전기 효율값은 96.98%~97.73%정도로 감속법과 비교해 볼 때 약 0.53%~0.83% 정도의 차이를 보이고 있으며, 역률이 0.95일 경우에는 0.23%~0.7%정도의 차이가 나는 것을 확인하였다. 따라서 기존의 감속법을 대신하여 제안된 축-토크법을 사용하여 발전기 효율을 측정하여도 정확도와 신뢰도 측면에서 적용 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

발전소를 새로이 건설하거나 노후된 수차발전설비를 교체하게 되면 설치 완료후 발전기 성능시험(Wet test)과 연계해서 발전기 효율시험을 실시하고 그 결과에 따라 설비에 대한 성능 보증 여부를 판정한다. 그리고 현장에서 발전기 효율시험을 실시할 경우에는 시험에 따른 여러 가지 사전 준비사항과 전제조건이 있다. 본 논문에서는 IEEE Std 115-1995에 제시된 감속법(Retardation method)을 적용한 발전기 효율시험과 대형선박의 엔진 성능시험 또는 항공기 등 기기의 성능시험에 주로 사용되는 축-토크법을 새롭게 발전기에 적용한 효율시험에 대하여 각각의 시험방법 및 절차, 그리고 이에 따른 결과값을 상호 비교하였다. 감속법(Retardation method)을 적용한 발전기 효율시험은 국제적으로 공인된 시험방법으로서 일반적으로 적용되고 있는 시험방법이지만 시험기간이 길고 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 수동으로 기기를 조작하고 필요에 따라서는 일부 보호장치를 해제하고 운전하여야 하기 때문에 시험기간중 사고의 위험이 상존한다. 그러나 축-토크법을 이용한 발전기 효율시험 방법은 발전기를 정상적으로 운전하면서 축의 변형률에 따른 토크 측정을 이용하여 발전기 효율을 측정하기 때문에 시험중 사고의 위험이 낮을 뿐만 아니라 시험기간이 짧아 비용이 적게 소요되는 장점이 있다. 특히, 출력 및 역률 변화에 따라서 효율값을 직접 측정한다는 특징이 있다. 본 논문을 통하여 동일한 발전기를 대상으로 이들 두 가지 시험방법에 대하여 측정한 효율값을 상호 비교한 결과, 축-토크를 이용한 발전기 효율시험 값이 감속법(Retardation method)을 이용한 효율 측정값에 비하여 최대 약 0.83% 정도 낮게 측정되는 차이를 보이고 있지만 일반적으로 효율측

정값은 측정기기의 측정오차 및 불확도[11] 등의 사유로 대부분 $\pm 1.5\%$ 정도의 허용 값을 인정하고 있기 때문에 위 두 가지 발전기 효율시험 결과값은 허용 오차범위 내의 값으로 볼 수 있다. 따라서 축-토크법을 이용한 발전기 효율시험 결과 값은 신뢰할 만한 수준으로 판단되어 발전기 효율시험에 적용 가능성을 입증하였다.

References

- [1] Luis Rodriguez and Teodoro SanChez "Designing and Building Mini and Micro Hydropower Scheme" pp11~12
- [2] IEC Guide:Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.1.1 Efficiency Segregated losses pp 46
- [3] IEC Guide:Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.1.8 Electric starting pp 25
- [4] IEC Guide:Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.1.2 Methods of loss measurement pp 23
- [5] IEC Guide:Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.1.5 Coupled machines pp 24
- [6] Lee Seung-won, Lee Youn-jong, "Electric Machines (Korean Edition)", Bosung Company, 1992, pp 256~258
- [7] IEC Guide:Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.4 Retardation method for losses and saturation curves pp 37
- [8] Retardation method for the determination of losses, efficiency and inertia (Andritz Hydro Report)
- [9] James M. Gere, Mechanics of Materials-6th edition, Cengage, 2012. pp 186~214
- [10] Tidal Power Plant Turbine Shaft Drawing MB9-161.1201
- [11] IEC 60041 6.2 "Uncertainty in Measurement" 6.3 "Comparison with guarantees"

저 자 소 개

김 현 한 (金賢漢)

1965년 11월 5일생. 1992년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1992년~현재 한국수자원공사 재직, 2007년 강원대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사), 현재 강원대학교 전기전자공학과 대학원(박사과정)

Tel : 031-396-5732

E-mail : hyunan@kwater.or.kr

옥 연 호 (玉然浩)

1960년 2월 2일생. 1983년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1986년~현재 한국수자원공사 재직, 2006년 충남대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사), 현재 충북대학교 전기공학과 대학원(박사과정)

Tel : 042-629-2972

E-mail : yhok@kwater.or.kr

김 광 호 (金光鎬)

1966년 1월 17일생. 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~현재 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 교수

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr