

조력발전소 조위 제약사항을 고려한 발전기 효율시험에 관한 연구

A Study of a Generator Efficient Testing Method that Incorporates Tidal Limitations

김 현 한* 전 정 표** 김 광 호***
Kim, Hyun-Han Jun, Jung-Pou Kim, Kwang-Ho

Abstract

Tidal power generation is to produce electrical energy from fluctuations of the ebb and flow in a constructed embankment. More specifically, the sinusoidal variations of tidal flow, along with the periodicity and changes in the height of waves over time make the tidal power generation possible at a certain tidal level. This paper proposes a more practical efficiency test method for tidal power plant generator that utilizes the axis torque changing values rather than the retardation method which is commonly used. The proposed method was compared with the conventional method and the test result shows that proposed method provides a similar accuracy with the conventional retardation method and a better efficiency.

키워드 : 조력발전, 발전기, 효율시험
Keywords : tidal power plant, generator, efficiency test

1. 서론

조력발전은 방조제를 이용하여 밀물과 썰물시 낙차를 이용하여 발전하는 방식[1]인데 조위는 주기성을 가지고 있으면서 정현파 형식으로 변하기 때문에 조위 조건이 충분한 시간에만 발전이 가능한 특징이 있다[2]. 일반적으로 기기의 효율을 측정하는 방법은 어떤 주어진 조건에서 입력값과 출력값의 비율에 의하여 정해지는데 이들 값을 직접 측정하여 효율값을 계산하는 방법도 있지만 상업운전용으로 건설되는 조력발전소와 같이 발전기 규모가 큰 경우에는 기계적인 출력, 즉 발전기축으로의 입

력값을 직접 정확하게 측정할 수 없기 때문에 각 부분별로 손실을 측정하고 이를 합산하여 전체 효율을 계산하는데 사용한다[3]. 특히 현장에서 발전기를 조립하여 설치하는 경우에는 발전기 설치 완료 후 현장에서 효율시험을 실시하여야 하는데 이 경우에는 발전기 구동에 지장이 없도록 모든 유수 시험이 완료되어 있어야 한다. 그러나 일정한 낙차를 유지하면서 연속적으로 충분한 발전시간을 확보할 수 있는 댐의 수력발전소와는 다르게 조력발전은 조위 조건 즉, 밀물과 썰물의 크기 및 지속시간에 따라 발전기 운전시간이 한정되는[4] 제약사항이 있기 때문에 조력발전설비에 대한 효율시험 계획을 수립할 때는 이러한 제약사항을 충분히 고려하여 적절한 효율시험 방법을 강구하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 제약사항을 고려하여 조력발전소에 적용한 사례에 대한 고찰과 새로운 방법인 축 토크 측정법을 이용한 발전기 효율시험에 대하여 적용 가능성을 연구하였다.

* 강원대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정, 한국수자원공사

** 강원대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정

*** 강원대학교 전기전자공학부 교수, 공학박사, 교신저자

2. 본론

2.1 조력발전소의 발전운영과 조위 조건

시화호조력발전소와 같이 밀물 때 발전하는 창조식 조력발전소에서 조위 조건에 따른 기동/정지 기본 Cycle을 살펴보면 그림 1[1]과 같이 대기모드에서 해수위가 상승하여 발전개시 낙차가 되면 발전모드로 변경되어 발전이 되며 일정시간 후 조위 낙차가 줄어들어 정지 낙차가 되면 발전기를 정지하고 다시 대기모드를 유지하는 중 해측 수위가 호측 수위 보다 낮아지는 시점에서 호수의 물을 수문과 수차 쪽으로 배수하는 순서로 반복한다.

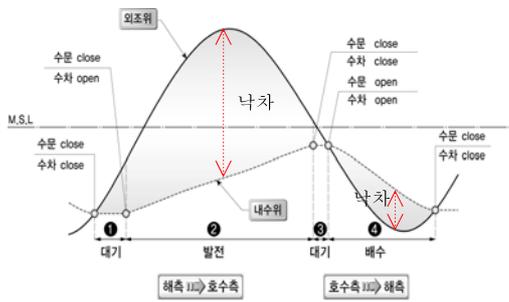


그림 1 조위에 따른 발전기 운전

대조위인 사리는 보름과 그믐에 발생되며 소조위인 조금은 상현과 하현 때 발생된다. 그리고 일조부등은 달 쪽의 인력과 지구의 자전으로 인한 달 반대편의 원심력에 의하여 하루중 첫 번째 조위와 두 번째 조위가 다른 것을 말한다. 이러한 운전 조건으로 인하여 그림 2와 같이 우리나라 서해의 경우 대조위로 충분한 낙차가 발생하는 사리의 경우 약 6.5시간 정도만 연속발전이 가능하며, 정격출력에 도달 할 수 있는 조위가 발생하는 기간도 1달에 약 7~8일 정도이다.

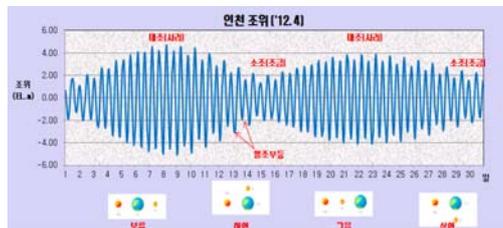


그림 2 인천앞바다 조위표 (1개월)

2.2 발전기 효율시험 방법

발전기 효율시험 방법에 대하여 IEEE Std 115-1995에 따르면 다음과 같이 a)Separate-drive

method. b)Electric-input method. c)Retardation method. d)Heat transfer method의 4가지 방법[2]을 제시하고 있다. 그러나 조력발전소와 같이 저낙차(정격낙차 : 5.82m)이면서 대유량(482m³/sec)을 사용하는 발전설비는 표 1과 같이 회전자의 무게가 약102ton정도로 크며 직경이 7.6m정도이기 때문에 별도의 구동장치를 이용하는 시험방법이나 외부전원을 이용하여 시험하는 방법은 적용이 어려우며, 특히 조력발전은 조위 조건에 따라 연속운전에 제약이 있기 때문에 베어링 온도 포화나 권선온도 포화를 위하여 충분한 운전시간이 필요한 Heat transfer method와 같은 시험은 조력발전소 발전기 효율시험에는 적용할 수 없다.

표 1 발전기 사양

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
Power(kVA)	26,760	
p.f	0.95	
주파수(Hz)	60	
Speed(rpm)	64.29	

따라서 위 2.1항의 조력발전소 운전 조건을 고려해 볼 때 감속법(Retardation method)이 현실적으로 적용 가능한 방법이므로 본 논문에서는 시화호 조력발전소를 대상으로 감속법을 적용한 발전기 효율시험에 대하여 사례를 중심으로 기술하였다. 이 방법에서 발전기 효율을 계산하기 위해서는 우선 발전기는 개방된 상태와 단락된 상태에서 각각 동작할 수 있어야 한다. 무부하 손실을 계산하기 위해서는 발전기 단자가 개방된 상태에서 운전하여 히스테리시스 손과 와전류손을 측정하였다. 여기에는 연결된 모든 기기장치들의 마찰손과 풍손이 포함된다. 특히 베어링의 마찰손은 점착성 때문에 시험기간 동안에는 온도를 충분히 상승시킨 상태를 유지하여야 하며, 풍손은 공기의 온도에 따라 변하기 때문에 손실을 측정하기 위해서는 반드시 시험당시 온도를 기록하여야 한다. 또한 발전기 단자가 단락된 상태에서는 정격전류를 흘리면서 전기자의 전류와 주파수에 상응하는 전기자의 동손 및 코일의 표류 부하손을 측정 할 수 있다. 그리고 이들 손실 측정에 있어서 만일 여자 전류가 입력 전류에 포함되어 있다면 전체 전류값에서 이를 제외하여야 한다.

2.2.1 Turbine 및 Shaft의 영향

발전기만의 마찰손 및 풍손을 측정하기 위해서는 다른 기계기구와 연결되지 않고 발전기만의 단독인 경우가 가장 좋은 조건이지만 현장시험을 위

해서는 발전기가 설치된 상태에서 발전기를 동작 시켜야 하기 때문에 발전기로부터 Turbine이나 Shaft를 분리할 수 없으며, 만일 분리하게 되면 발전설비 전체의 균형 및 무게중심이 맞지 않아 발전기를 기동시킬 수 없다. 그러므로 다른 기기와 연결된 상태에서 전체의 마찰손과 풍손을 측정할 수 밖에 없으며, 이러한 이유로 발전기만의 마찰손과 풍손을 정확하게 측정하기 어렵지만 효율은 이러한 전반적인 배경을 바탕으로 보증한다[3]. 특히 횡축 발전기의 경우에 Guide Bearing은 Turbine과 Shaft의 무게 때문에 더 많은 베어링 손실이 발생하게 되는데 이 추가적인 손실은 효율 계산시 고려하여야 한다.

2.2.2 Turbine측의 배수 및 발전기 구동방법

수력발전소에 있어서 Turbine과 연결된 발전기의 정확한 효율측정을 위해서는 제작사에서 제시된 절차에 따라 효율측정 대상 발전기의 Turbine 측을 완벽하게 배수하여야 한다. 프란시스나 프로펠러 수차의 경우에는 정지 상태에서 배수되지만 증동 수차의 경우 정격 회전수에서 Motoring상태로 배수된다. 만일 Spiral casing 진단에 Inlet valve가 없다면 Intake Gate를 닫고 Penstock 전체를 배수하여야 하며, Wicket gates만으로 차수하는 특수한 경우에는 누수가 발생되지 않도록 하여야 한다. 또한 Turbine의 Sealing수는 손실에 영향을 미치기 때문에 축봉수 장치의 냉각수도 완벽하게 차단하여야 하며, 그렇기 때문에 Sealing수 공급 없이도 문제가 없는 Seal type을 선정하여야 한다. 발전기 효율시험을 위해서는 발전기를 구동 시켜야 하는데 기계적 수단에 의한 구동이 어려운 경우 전기적 구동 방법이 필요하다. 이 경우 효율 측정을 위한 발전기 또는 모터가 전원의 정격 주파수 및 전압에서 구동이 가능한 기기라면 좋겠지만 대응량 기기의 경우 대부분 기동 전류에 의한 전압강하의 문제로 기동이 어렵기 때문에 전압과 주파수를 적당한 값으로 줄여줄 수 있는 전원공급장치나 중간 기계장치가 필요하다. 그러나 대부분의 발전소는 2대 이상의 발전기가 병렬로 설치되어 있기 때문에 인근 발전기의 전력을 이용하여 효율 시험 대상 발전기를 모터형식으로 구동시키는 방법을 사용한다.

2.3 감속법(Retardation Method) 적용사례

감속법에 의한 발전기 손실 측정은 발전기를 정격 속도 이상으로 회전속도를 높인 후 회전력의 손실에 의한 회전기기의 감속비를 측정하여 계산하는 방법으로서 공장시험, 현장시험 모두 가능하지만 현장의 경우 발전기가 정상적으로 설치되어 있어야 하며, 이 발전기에 대한 손실을 측정하기 위해서는 모터로 기동하여야 하기 때문에 별도의 전원공급이 가능하여야 한다. 따라서 최소한 2대의 발전기에 대한 모든 기능시험이 완료되어야 하며,

시험시 발전기에 다른 부속기들이 연결되어 있는 경우도 허용되고 있다. 감속에 의한 손실전력 계산식은 식 (1)[4]과 같다.

$$P_{loss} = \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot \frac{1}{1000} \cdot J \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

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

이를 위해서는 그림 3과 같이 1대는 전원 공급을 위하여 발전기로 기동하여야 하며, 나머지 1대는 효율시험을 위한 모터로 구동할 수 있도록 전기적으로 연결되어 있어야 한다.

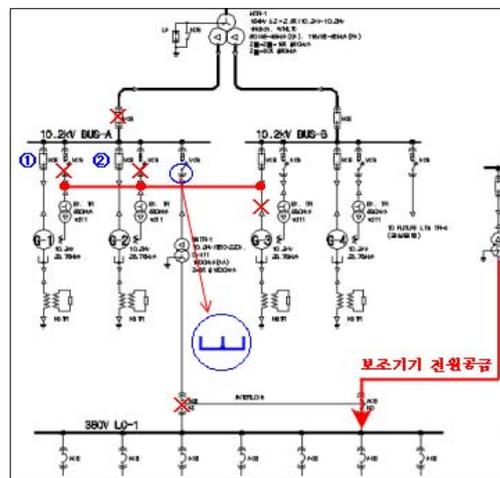


그림 3 회로구성도

또한 각 발전기의 여자시스템은 각각 독립적으로 구성하여야 한다. 그리고 효율 측정을 위한 발전기의 터빈은 완전히 배수되어야 하고 Turbine Blade는 완전히 close되어 풍손이 최소화 되도록 하여야 한다. 특히 보조기기 뿐만아니라 모든 시스템은 수동으로 조작하여야 하기 때문에 보조장치 및 운영 조건의 Parameters들은 모두 해제하여야 한다.

2.3.1 발전기 회전자의 기계적 손실 측정

발전기 효율을 측정하기 위해서는 우선 효율 측정용 발전기를 모터로 기동시켜야 하며 이때의 손실은 수차발전기 전체의 손실이기 때문에 발전기의 무부하 손실을 측정하기 위해서는 수차발전기 전체 손실에서 Turbine의 베어링 손과 Runner의 풍손을 제외하여야만 발전기 자체의 무부하 손실을 구할 수 있다. 감속법(Retardation Method)을 이용하여 수차발전기 손실을 측정하기 위해서는 그림 3에서와 같이 ①번 차단기와 ②번 차단기 모

두를 Close하여 두 개의 발전기를 전기적으로 연결하고 여자된 상태에서 G2발전기의 Wicket Gate를 조금씩 개방하게 되면 회전수 증가와 더불어 전압 및 주파수도 서서히 증가하게 된다. 그러면 이와 연결된 G1발전기는 동기모터로 구동되면서 주파수 증가에 따라 회전수가 서서히 증가하게 된다. 이 때 주의할 사항은 모든 기기 조작을 수동으로 하고 또한 모든 Protection이 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. G2발전기의 단자전압이 정격전압의 약 110% 정도에 도달할 때 까지 회전수를 충분히 상승시킨다. 그리고 이 때 부터 모터로 구동되고 있는 G1발전기는 역률이 100%가 되도록 여자전압을 조정하여야 하며, 입력값인 G2발전기의 전압과 유효전력 및 여자전류를 연속적으로 측정하여야 한다. 이 때 모터로 구동되고 있는 G1발전기가 정격전압에서 정격회전수(정격 주파수)를 유지하고 있는 상태이면 G2발전기로부터 입력되는 전력값이 기계손을 포함한 발전기 전체의 무부하손(P_{NLL})으로 볼 수 있다. 그리고 정격회전수를 유지하고 있는 상태에서 계속해서 단자전압을 낮추어 가면 그림 4와 같은 유효전력이 감소되는 곡선과 표 2와 같은 손실값을 얻을 수 있는데, 이 때 주의할 사항은 전압을 너무 낮추게 되면 구동 Torque가 부족하여 G1과 G2의 동기 탈조현상으로 설비에 심각한 손상을 초래함으로써 일반적으로 정격전압 대비 약 30%까지만 낮추고 발전기를 정지시킨다.

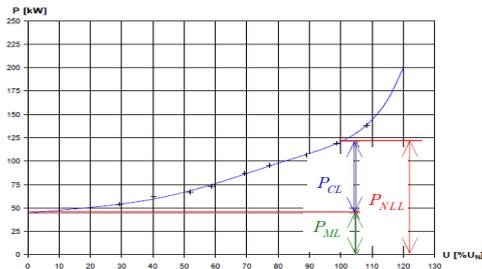


그림 4 손실전력 감소추이곡선

이 곡선에서 보외범으로 인가 전압이 Zero가 될 때까지 추이곡선을 연장하게 되면 식 (2)와 같이 발전기 전체의 무부하손(P_{NLL})에서 철손(P_{CL})이 제외된 기계손(P_{ML})만 남게 되며, 이 기계손에서 Turbine Bearing의 마찰손(P_{B-turb})과 Runner의 풍손(P_{W-run})을 제외시키면 식 (3)과 같이 발전기만의 기계손실(P_{GML})이 남게 되며 그 결과 값은 표 3과 같이 표시된다.

$$P_{ML} = P_{NLL} - P_{CL} \quad (2)$$

$$P_{GML} = P_{ML} - P_{B-turb} - P_{W-run} \quad (3)$$

표 2 입력전압 변동에 따른 발전기 손실값

V_a/V_n (%)	V_a	I_f	P_{NLL} (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

표 3 발전기의 각 손실값[kW]

P_{NLL}	P_{CL}	P_{ML}	P_{GML}	P_{B-turb}	P_{W-run}
120.84	76.5	44.34	28.34	5	11

2.3.2 Open circuit retardation test

개방회로에서 감속법(retardation test)은 회전기기의 관성모멘트를 구하는 방법으로서 구동 방법은 2.2.1절과 같은 방법으로 G2발전기를 이용하여 모터로 운전되고 있는 G1발전기의 회전수를 정격의 약130%정도까지 상승시킨 다음 ①번 차단기를 Open하고 무여자 상태로 유지하게 되면 G1발전기는 시간이 갈수록 기계적 마찰손실에 의하여 회전수가 점점 줄어들게 되는데 이 때의 속도 변동률(dn/dt)은 그림 5와 같다.

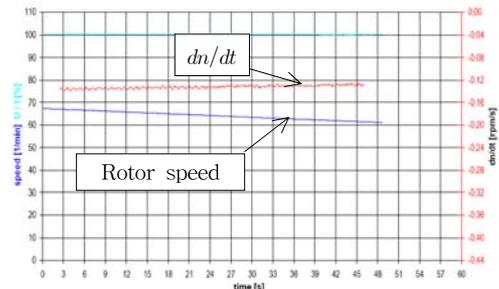


그림 5 개방회로에서 속도변동률

그리고 정격회전수 및 발전기 전체의 무부하손(P_{NLL})으로부터 식 (4)를 이용하여 관성 모멘트를 구할 수 있다[5].

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

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

표 4 계측값

dn/dt (at 64.3rpm)	-0.1320
n	64.3
P_{LL}	120.84kW

2.3.3 Short circuit retardation test

단락회로에서 감속법(retardation test)은 개방회로의 감속법(retardation test)에서 구한 관성모멘트를 이용하여 발전기 손실(P_{Loss})을 구하는 방법이며 식 (5)[5]를 이용하여 손실을 구할 수 있다.

$$P_{Loss} = \frac{n \cdot dn/dt \cdot J}{(30/\pi)^2} [kW] \quad (5)$$

$$= 286kw$$

표 5 계측값

dn/dt (at 64.3rpm)	-0.3124
Moment of inertia(J)	1,298,280kgm ²
Total mech loss(P_{ML})	44.34
stator current(A)	1543.1
n	64.3rpm
$P_{ext} I^2 R$ (kW)	7.77

발전기 구동 방법은 2.2.1절과 같이하여 회전수를 정격의 약130%까지 상승시킨 다음 마찬가지로 ①번 차단기를 Open하게 되면 G1발전기는 관성에 의하여 회전하지만 시간이 갈수록 기계적 마찰손실에 의하여 회전수가 점점 줄어들게 되는데 이때의 속도 변동률(dn/dt)은 그림 6과 같다.

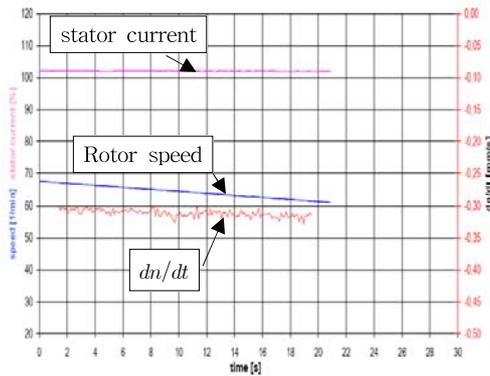


그림 6 단락회로에서 속도변동률

그리고 정격회전수 및 식 (4)의 관성모멘트로부터 발전기의 기계손이 포함된 손실(P_{Loss})을 구할 수 있다. 시험기간 동안 발전기는 단락된 상태에서

정격전류를 유지할 수 있도록 여자전압을 계속 조정하여야 한다. 이 값에서 발전기의 기계적 손실(P_{ML})과 인출 케이블 손실($P_{ext} I^2 R$)을 제외하면 식 (6)와 같이 발전기만의 부하손을 구할 수 있다.

$$P_{LL} = P_{Loss} - P_{ML} - P_{ext} I^2 R \quad (6)$$

$$\therefore P_{LL} = 233.89kW$$

따라서 발전기 전체의 손실은 표 6과 같이 구할 수 있으며, 여자시스템은 발전전력을 이용하기 때문에 이를 손실로 보고 처리한다. 발전기 출력(P_{out})은 발전기 출력측 CT, PT에서 직접 측정하고 전체 손실값을 계산하여 식 (7)과 같이 발전기 효율을 구할 수 있다.

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

표 6 발전기손실[kW]

I/I_N	P_{GL}	P_{LL}	P_{CL}	P_{GML}
100(%)	338.73	233.89	76.5	28.34

2.3.4 발전기 효율 측정 결과

감속법에 의한 발전기 효율시험 결과는 표 7과 같으며, 역률이 1인 상태에서 정격부하에서 측정된 값을 기준으로 부하별로 계산하였으며, 기계손과 철손은 부하에 관계없이 일정하게 적용하였으며, 부하손은 부하별로 나누어 계산하였다. 그리고 전체 손실을 구한 다음 식 (7)을 이용하여 각 부하별로 효율을 계산하였다.

표 7 (a) 부하 100%, 80%의 시험결과값

구분	단위	역률 (1.0)	
		100	80
Load	%	100	80
Apparent Power	kVA	26,760	21,408
Stator current	A	1514.7	1,211.8
Mechanical Loss	kW	28.34	28.34
Core Loss	kW	76.5	76.5
Load Loss	kW	233.89	149.69
Excitation Loss	kW	119.4	98.09
Total Loss	kW	458.13	352.8
Pout	kW	26,760	21,408
Pin	kW	27,218.13	21,760.8
η_G	%	98.35	98.38

표 7 (b) 부하 60%, 40%의 시험결과값

구 분	단위	역률 (1.0)	
Load	%	60	40
Apparent Power	kVA	16,056	10,704
Stator current	A	908.8	605.9
Mechanical Loss	kW	28.34	28.34
Core Loss	kW	76.5	76.5
Load Loss	kW	84.2	37.42
Excitation Loss	kW	81.9	70.49
Total Loss	kW	270.94	212.75
Pout	kW	16,056	10,704
Pin	kW	16,326.94	10,916.75
η_G	%	98.34	98.05

2.4 감속법(Retardation method) 적용의 문제점

감속법을 이용한 발전기 효율시험은 국제적으로 공인된 시험 방법으로 조력발전소에 적합한 시험 방법이지만 조력발전소 특성상 표 6과 같이 우리나라 조력발전소 후보지에 설치 예정인 발전설비를 보면 수십대의 발전기가 설치될 예정이다. 발전기 1대 효율시험 기간이 준비기간을 포함하여 약 5~7일 정도 소요되는 점을 고려해 볼 때 발전기 효율시험에만 수십일이 소요되어 시험기간의 장기화에 따른 발전손실이 발생되며, 특히 시험시 모든 보호 장치가 해제된 상태에서 시험하기 때문에 대형사고의 위험성이 상존한다. 따라서 이러한 단점을 해소하고자 발전기를 운전하면서 축에서 발생하는 토크를 이용하여 발전기 효율을 측정하는 방법을 적용하여 시험하였다.

표 8 우리나라 조력발전소 건설 후보지

구분	강화	인천만	아산만	가로림만
발전 방식	낙조식	낙조식	낙조식	낙조식
시설 용량	420MW (30MW ×14대)	1,320MW (30MW ×44대)	254MW (25.4MW ×10대)	520MW (26MW ×20대)
발전 회사	중부발전	한국수력 원자력	동서발전	서부발전

2.5 축 토크를 이용한 효율시험

축 토크를 이용한 발전기 효율시험은 발전기를 정상적으로 운영하면서 시험할 수 있는 방법이다. 측정 방법은 수차축에 변형 측정기(Strain Gauge)를 설치하고 발전기를 회전하게 되면 발전기 출력 변화에 따라 축의 비틀림 값인 축 변화량 값을 취득할 수 있는데 이를 이용하여 축 토크값과 발전기 입력값을 계산할 수 있어 발전기 효율을 알아낼 수 있는데 시험에 사용된 장비는 표 9와 같다.

표 9 시험장비 Model

제품명	제조사	Model	사진
Strain gage	HBM	K-XY41-3/350	
DQA	HBM	QuantomX (MX410)	
	Dewetron	DEWE-2600	
Telemetry System	Datatel	dt1001T-ST dt1001R6-S	

이 방법으로 발전기 효율시험을 하기 위해서는 우선 발전기 정격출력(25.4MW) 운전이 가능한 조위 시간대를 선택하여야 하며, 가중평균효율이 필요한 경우에는 부하별로 출력을 변경하면서 시험을 하여야 하며, 그림 7과 같이 설치한다.

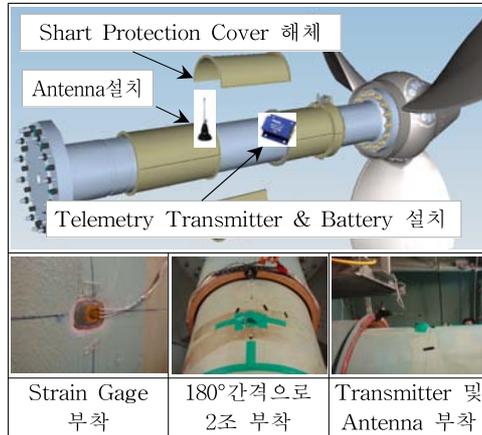


그림 7 Strain gage 및 Antenna설치 사진

토크에 의한 축의 변형량 측정을 위하여 축의 표면에 Strain gage를 180°간격으로 2조를 부착하였다. 이 때 표면 부착을 좋게 하기 위해서는 축 표면의 도장을 충분히 제거하여야 한다. 그리고 표면을 따라 케이블을 고정하고 Strain gage와의 연결단에 건전지와 함께 Transmitter 연결하였다.

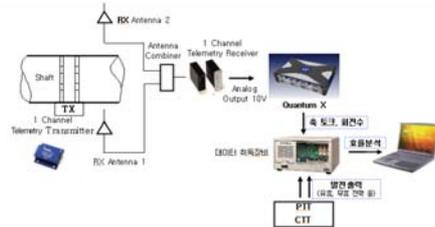


그림 8 Torque측정을 위한 계통도

Data 취득을 위하여 안테나, Receiver, Quantum X, 노트북 연결이 필요하며, 전체 계통도는 그림 8과 같다.

2.5.1 Torque를 이용한 발전기 효율 측정방법

어느 물체가 인장 또는 압축될 때 원래의 길이에 대하여 늘어나거나 줄어들게 되는데 발전기가 기동하게 되면 수차와 연결된 발전기 축이 비틀림에 의하여 변형이 생긴다. 이 때 축에 부착된 Strain gage의 전기적 저항값을 통하여 축의 변형도 또는 변형률을 측정하게 되는데 이 측정된 변화량 Data를 식 (8)[6]에 대입하여 Torque값을 구하였다. 수차축(중공)의 외경은 949mm이고 내경은 160mm이며 재질은 ASTM A668 Class D (20Mn5)로 전단계수는 81,000N/mm²[7] 이다.

$$T = \frac{G}{8} \cdot \epsilon \cdot 10^{-6} \cdot (D_{out}^3 - D_{in}^3) \cdot \pi / 9.8 \quad (8)$$

T : Torque(kgf · m)

G : 축의 전단계수

ε : Strain gage 측정값

그림 9는 발전기 축으로부터 얻어지는 Torque값이며, 발전기 출력을 정격부하(100%)에서부터 80%, 60%, 40%순으로 단계적으로 낮추어 가면서 측정된 값이다.

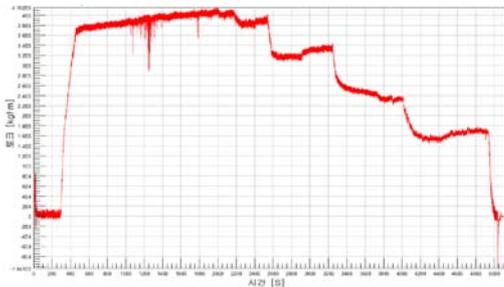


그림 9 Torque 측정값

축의 전단계수(G)는 축의 재료 물성에 의하여 정해지는데 제작도면의 Data를 적용하였으며, 재료의 구성 성분에 따라 Strain gage에서 측정하는 비틀림 힘에 의해서 변형되는 정도를 나타낸다. 그리고 축은 중심이 비어있는 공중으로 되어 있기 때문에 D_{out}과 D_{in}을 구분하여 계산한다. 여기서 구한 Torque값으로 식 (9)을 이용하여 전력량을 구하며 이 값은 발전기의 입력값으로 볼 수 있다.

$$P_{in} = \frac{2\pi}{60} \cdot T \cdot N \cdot 9.8 [kW] \quad (9)$$

P_{in} : Input Power(kW)

T : Torque(kgf · m)

N : 정격회전수(rpm)

출력전력(P_{out})은 발전기 차단기반 CT, PT에서 직접 측정한다. 따라서 발전기 효율은 식 (10)과 같이 구한다.

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

2.5.2 Torque법에 의한 효율측정 결과

Torque법에 의한 발전기 효율시험 결과는 표 9와 같은데 감속법에서는 부하시험과 무부하 시험에 의한 손실계산을 통하여 효율을 측정하는데 비하여 축 Torque 측정법은 부하별로 축 Torque에 의하여 측정된 입력과 발전기출력을 측정하여 효율을 계산하였다.

표 10 시험결과값

구분	단위	역률 (1.0)		
Load		%	100	80
입력	축토크	kgf · m	403,087	332,339.1
	회전수	rpm	64.3	64.26
출력	피상전력	kW	26,016.4	21,588.1
	P _{in}	kW	26,597.7	21,917.2
결과	P _{out}	kW	26,016.4	21,588.1
	η _G	%	97.81	98.5
Load		%	60	40
입력	축토크	kgf · m	249,926.6	172,173.7
	회전수	rpm	64.26	64.27
출력	피상전력	kW	16,226.5	11,120.2
	P _{in}	kW	16,482.4	11,356.6
결과	P _{out}	kW	16,226.5	11,120.2
	η _G	%	98.44	97.92

감속법에 의한 발전기 효율시험 결과 값과 축 Torque 측정법에 의한 발전기 효율 측정값은 상호 비교해 보면 표 10과 같으며, 감속법을 기준으로 약 99.88%~100.55%까지 유사한 결과를 도출하였다.

표 11 발전기 효율값 비교표

구분	단위	역률 (1.0)			
Load	%	100	80	60	40
η _{G(R)}	%	98.35	98.38	98.34	98.05
η _{G(T)}	%	97.81	98.50	98.44	97.92

η_{G(R)} : Retardation Method

η_{G(T)} : Shaft-Torque Method

3. 결론

발전소를 건설하게 되면 수차발전설비에 대한 효율 시험을 현장에서 시행할 경우 건설공정의 마무리 단계에서 시행하게 된다. 조력발전소는 일반 수력발전소와는 다르게 해양의 조위 조건에 맞추어 시험을 진행하여야 하기 때문에 발전기 효율시험에 많은 제약사항이 생기게 된다. IEEE Std 115-1995에 제시된 감속법(Retardation method)이 조력발전소 발전기 효율시험에 적용 가능한 시험 방법으로서 본 논문에서 이 방법에 대하여 실제 적용한 사례를 기술하였다. 그러나 이 방법에서 효율을 측정하기 위한 전원 공급이 인접호기의 전력을 사용함에 따라 시험기간 동안 2대의 발전기를 상호 연결하여 각각 동기 발전기와 동기모터로 각각 사용하면서 모든 기기 조작을 수동으로 하여야 하기 때문에 시험 기간중 대형사고의 위험이 상존하는 단점이 있을 뿐만아니라 발전기 댓수가 많을 경우에는 시험기간에만 수개월이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 발전기를 정상적으로 운전하면서 축 Torque 값을 이용하여 발전기 효율을 측정하는 축 토크 측정법(Shaft torque method) 적용하였는데 두 시험 방법을 비교한 결과 발전기 효율 측정값이 $\pm 0.5\%$ 정도의 범위 내로 유사한 것을 확인하였다. 그리고 이 방법은 시험에 필요한 준비 시간이 짧고 발전기를 정상적으로 운전하면서 가중 평균이 필요한 경우 요구되는 출력을 변경하면서 시험하기 때문에 감속법에 비하여 안전사고의 위험이 없을 뿐만 아니라 별도로 시험기간을 확보할 필요가 없어 시운전 기간 단축에 따른 조기 상업발전이 가능한 효과가 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 최초로 건설한 시화호조력발전소의 발전설비에 대하여 IEEE Std 115-1995에 따른 감속법(Retardation method)을 활용한 발전기 효율 시험 결과와 축 Torque 측정법을 적용한 결과를 비교하여 유사한 결과가 도출됨을 확인함으로써 이 방법을 사용할 경우 전체적으로 사업기간을 단축 할 수 있을 뿐만 아니라 시험에 소요되는 비용도 약 1/10 정도로 줄일 수 있어 향후 발전기효율 시험에 좋은 효과가 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국수자원공사, “시화호조력발전소 기본설계 보고서”, 한국수자원공사 보고서.
- [2] IEC Guide : Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.1.2 Methods of loss measurement, pp.23.
- [3] IEC Guide : Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995

- (R2002) 4.1.5 Coupled machines, pp.24.
- [4] IEC Guide : Test Procedures for Synchronous Machines IEEE Std 115-1995 (R2002) 4.4 Retardation method for losses and saturation curves, pp.37.
- [5] Andritz Hydro, “Retardation method for the determination of losses, efficiency and inertia”, Andritz Hydro Report.
- [6] 박재춘, 정재천, 송지복, 남궁재관, 신기계설계학, 청문각, pp.233-246.
- [7] 한국수자원공사, 조력발전소 Turbine Shaft 도면 MB9-161. 1201.