농업용 보의 수차 발전기 효율 분석

Efficiency Analysis for Water Turbine Generator of Agricultural Reservoir

김 중 겐*
 (Jong-Gyeum Kim)

Abstract - If the factory test efficiency and field operation efficiency of water turbine are different from each other, issues for efficiency warranty can be raised. So, This paper shows the result for comparative analysis of field operating efficiency vs plant testing efficiency of the water turbine generator installed in agricultural reservoir. The efficiency of the induction generator is analyzed by the change of rotational speed with the parameter obtained by test, the efficiency of water turbine is calculated by the change of head with the design flow. Efficiency deviation of induction generator is lower but the variation of developed power is pretty high near the rated speed and the efficiency variation of water turbine is high by the fluctuation of head for constant flow. It was found that factory test efficiency and total efficiency of water turbine generator calculated according to the rotational speed are very close.

Key Words : Active power, Efficiency, Induction generator, Renewable energy, Reservoir, Water turbine

1. 서 론

우리나라의 연평균 강우량은 1,277mm로서 주로 여름철이 다른 계절보다 많은 편이므로 효율적인 수자원관리를 위해 댐이나 저수지 등이 필요하다. 그래서 댐이나 저수지를 건설하여 생·공 용수, 관개용수, 하천유지용수, 수력발전 등으로 이용하고 있다. 이들 중에서 일반 하천의 양정, 농업용 저수지의 양정, 상하수도의 관압 등 여러 곳에 산재한 미활용 소규모 청정 수력에너지 개발 자원이 많지만 현재까지 6% 정도만 개발되었다[1,2].

소수력 발전소는 저수지, 수압관로, 수차 발전기, 제어설비, 계통연계장치 등으로 구성되는데 이들 중에서 가장 중요한 것으로는 수차와 발전기를 들 수 있다. 수차의 기계에너지를 전기에너지로 변환시키는 중소형 발전소는 대부분 유도발전기를 많이 적용하고 있다[3~8].

소수력 설비에서 수차 발전기의 경우 설치 제작비와 유지보수비용이 많이 소요되므로 운전을 통해 높은 효율의 많은 전기를 얻는 것은 매우 중요하다. 이때 중요시 하는 것이 수차와 발전기의 출력과 효율이다.

외국의 경우 수차와 발전기의 효율은 용량 및 형식별로 규격화되어 있지만, 우리나라의 경우 주로 주문 설계 제작이 이루어지므로 출력 및 효율이 규격화되어 있지 않다. 또한 공장시험을 통해서만 수차와 발전기의 개별 효율을 알 수 있으나 현장에서는 운전을 통해 종합 효율만 확인 가능함으로 가끔 개별 출력 및 효율에 대해 문제를 제기하는 경우가 있다.

그래서 본 연구에서는 농업용 보에 설치한 수차발전기의 현장 운전조건을 감안하여 설계 제작된 수차발전기에 대해

특성 시험을 통해 얻은 파라미터를 사용하여 계산한 결과와 실제 운전중인 수차 발전기의 효율 및 출력에 대해 비교 분석하였다. 따라서 본 논문은 수차발전기의 제작 효율과 현장 운전 효율의 비교 분석에 도움이 될 것이다.

2. 수차발전 시스템

그림 1은 수차 발전 시스템의 구성도를 나타낸 것이다 [3,5,9] 그림 1과 같이 수차의 회전속도(N_r)를 동기속도(N_s) 이상으로 회전시킬 경우 유도발전기에 의해 발생된 전기는 차단기의 투입으로 계통에 전력을 공급할 수 있다.

그림 1 수차 발전시스템 구성도

Fig. 1 Diagram of water turbine generator system

수력발전소의 출력용량을 결정하기 위해서는 우선 양정, 사용유량, 효율 등의 입력 자료를 필요로 한다. 특히 수차 발전기는 종합 효율로 나타내므로 수차와 발전기에 대한 각각의 효율이 정확하지 않을 경우 종합효율 검증이 어렵다. 그래서 현장에 가장 적합한 유량과 양정으로 보증된 출력을 낼 수 있는 수차 발전기의 설계 및 제작이 요구된다.

소수력 시스템에서 발전설비 출력용량 P_g 은 식 (1)에 의해

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
 Gangneung-wonju National University, Korea
 E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

Received : July 2, 2013; Accepted : August 21, 2013

결정된다.

$$P_g = 9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g \quad (1)$$

여기서, P_g : 발전설비 용량(kW) Q : 사용수량(m^3/s)
 H : 유효양정(m) η_t : 수차효율(%)
 η_g : 발전기 효율(%) η : 합성효율($\eta_t \times \eta_g$)

식 (1)에서와 같이 수차발전기의 출력용량을 높이기 위해서는 유량, 양정, 수차와 발전기의 효율을 높이면 된다. 그런데 유량과 양정은 보의 저수량과 방류량 등에 따라 달라질 수 있기 때문에 수차발전기의 출력을 높이기 위해서는 수차와 발전기의 효율을 높게 설계 및 운전할 수 있는 파라미터를 찾는 것이 중요하다.

3. 수차 및 유도발전기

정격용량의 수차발전설비를 현장에 설치하여 정격 양정과 유량에 따라 설계된 대로 출력이 나오는지를 검정할 필요가 있다.

소수력 발전 출력은 식 (1)에서와 같이 유량과 양정에 수차와 발전기의 효율을 곱한 값으로 결정된다. 이때 출력을 높이기 위해서는 적용되는 유량과 양정 그리고 종합 효율 등이 높아야 한다. 이들 중에서 발전기와 수차의 경우 약간의 부하 변동에 따라 효율도 함께 변화한다. 그래서 최적 효율 운전을 위해서는 당초 설계한 유량과 양정으로 운전하는 것이 필요하지만, 실제 현장에서는 유량과 양정은 변동의 여지가 많고 설계조건 즉 정격양정과 정격유량에 맞췄을 때 운전할 수 있는 기간은 많지 않다. 그래서 저양정의 발전소에서는 유량의 변화에 쉽게 대응하기 위해 카프란 수차를 많이 적용하고 있다.

본 연구에 사용한 수차 발전기 제원은 표 1과 같다.

표 1 소수력 수차 발전기 제원

Table 1 Specifications of small hydro water turbine generator

발전기	출력	490kW
	극수	10극
	정격 전압/전류	3,300V/109.4A
	효율/역률	94.1%/83.3%
	절연등급	F종
카프란 수차	주위온도	40℃
	정격 양정	13.1
	방류량	4.5cms
	출력	520kW
	속도/무구속 속도	725/1,800 rpm

표 1에서와 같이 유량과 양정이 주어질 경우 수차발전기의 출력은 종합 효율을 감안하여 결정된다. 이 수차의 기계적 에너지가 발전기를 통해 계통에 전달되는 전력은 정격 운전시 490kW가 되어야 한다. 여기서 소수력 설비에서 수차와 발전기의 개별 효율에 대한 것보다는 수차발전기라는 항목으로 종합 효율을 강조하고 있다.

3.1 수차 특성 분석

농업용 보의 경우 일반 하천과는 달리 담수 수위에 따라 양정의 변화가 많은 편이다. 그래서 일정 유량에 대해 양정의 변화에 따른 수차의 출력과 효율을 저문자가 표 1과 같이 제시하였다.

표 2는 설계시 일정 방류량에 대해 실양정 변화에 따른 수차의 출력, 효율에 대한 성능제시 사양을 나타낸 것이다. 표 2에서 일정 방류량에 대해 양정에 변화가 존재할 경우 수차의 출력과 효율이 달라진다.

표 2 양정별 수차의 출력과 요구 효율

Table 2 Output and demand efficiency of water turbine according to the head

실양정 (m)	방류량 (m^3/s)	수차 출력 (kW)	요구 효율 (%)	시험 효율 (%)
17.0	4.5	684	91.3	
13.1	4.5	520	90.1	84.5
9.9	4.5	372	85.3	

정격 양정과 다르게 운전할 경우 수차의 효율 변화를 알 필요가 있다. 그래서 표 2에서와 같이 양정에 따른 수차의 효율 변화를 보간법으로 분석한 것이 그림 2와 같다.

그림 2 양정에 따른 수차 효율

Fig. 2 Turbine efficiency according to the head

그림 2에서와 같이 정격 양정보다 약간 높은 경우에 효율은 조금 높아지지만, 일정 양정 이상에서는 효율이 더 이상 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 실제 공장 성능시험에서 제시한 값은 1 포인트로서 양정의 변화에 따라 보다 넓은 범위의 특성곡선을 제시하지 않고 있다. 따라서 효율적인 운전에 대한 파라미터 보정을 위해서는 그림 2와 같이 정격 운전 포인트 근처에서의 양정별 유량 변화에 따른 수차의 효율 특성 곡선 제시가 필요하다.

3.2 유도발전기 특성 분석

유도발전기는 일정한 유량과 낙차 변화가 적은 소수력 발전소에서 유지보수 및 경제적인 점을 고려하여 많이 적용하고 있다[4,6].

그림 3은 그림 1에서 사용된 유도발전기 운전 영역에서의 전력 흐름도이다. 먼저 수차의 회전운동으로 발생된 입력에너지 P_{in} 에서 회전손실을 제외한 전력이 변환된 전력성분 P_{conv} 이 된다. 이 성분에서 회전자 손실 P_{loss-r} 을 제외한 전력성분이 고정자에 전달된다. 고정자에 전달된 성분 중에서 고정자 자체 손실 P_{loss-s} 을 제외한 성분이 전력으로 변환되는 출력성분 P_{out} 가 된다. 실제 발전기의 전력발생은 출력성분에서 각종 손실을 제외한 유효전력성분이다[3,4,10].

그림 3 유도 발전기 운전시 전력 흐름도

Fig. 3 Power flow diagram at the induction generator operation

유도기를 동기속도 이상으로 운전하는 경우 유도발전기의 피상전력은 다음과 같다.

$$S = 3VI^* \quad (2)$$

식 (2)에서의 유효전력 P 와 무효전력 Q 은 각각 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} P &= \operatorname{Re}(S) \\ Q &= \operatorname{Im}(S) \end{aligned} \quad (3)$$

유도기를 발전기로 운전할 경우 동작결과를 설명하기 위한 전류, 전력 그리고 토크는 전동기와 같은 수식을 전개하면 된다. 그러나 슬립이 마이너스가 되므로 회전자를 통해 고정자에 전달되는 기계적인 출력은 식 (4)와 같이 회전자 손실이 추가된다.

$$P_{out} = -(1-s)P_{gap} - P_{rot-loss} \quad (4)$$

유도발전기의 효율을 파악하기 위해서는 기계적인 입력과 손실의 정확한 파악이 매우 중요하다. 유도발전기의 효율은 식 (5)와 같이 전개하면 된다.

$$\eta_g = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100[\%] \quad (5)$$

여기서 P_{out} 는 유효전력에 해당된다.

발전기의 입력은 수차의 축 토크에 해당되는 것으로 기계 에너지가 전기에너지로 변환할 때 회전자와 고정자 손실을 제외한 성분이 출력에너지로 변환된다. 발전기의 출력은 전압, 전류 및 효율로 확인할 수 있다.

유도 발전기의 동작특성 분석을 위해 공장 시험 성적서에 제시된 값을 사용하여 표 3과 같이 파라미터를 산출하였다[3].

표 3 490kW 유도발전기 파라미터

Table 3 Parameters of 490kW induction generator

파라미터	Values
고정자 저항 R_s	0.217Ω
회전자 저항 R_r	0.355Ω
고정자 리액턴스 X_{ls}	1.132Ω
회전자 리액턴스 X_{lr}	1.698Ω
철손 저항 r_{fe}	567.188Ω
자화 리액턴스 x_m	45.849Ω

그림 4는 표 3에서 제시된 값을 가지고서 회전속도의 변화에 따라 유효전력, 무효전력, 피상전력의 크기를 분석한 것이다. 슬립의 반전에 따라 전동기와 발전기의 운전에 의해 전력의 흐름은 서로 반대가 되지만, 무효전력은 슬립의 반전에도 부호 변화는 없다.

그림 4 490kW 유도 발전기의 유효, 무효 및 피상전력

Fig. 4 Active power, reactive power & apparent power of 490kW induction generator

그림 5 490kW 유도발전기 효율 곡선

Fig. 5 Efficiency curve of 490kW induction generator

그림 5는 표 3에서 제시된 파라미터를 가지고서 회전속도에 따른 유도발전기의 효율을 분석한 것이다. 여기서는 풍손과 표유부하손에 대한 부분은 고려하지 않았다. 그림 5에

서 알 수 있듯이 같은 손실 조건하에서 정격속도 근처에서 발전기로 운전할 경우의 효율은 전동기로 운전하는 경우 보다 약간 낮은 편이다.

그림 5에서 알 수 있듯이 유도기를 동기속도에 가까운 75.398[rpm]의 각속도 전후에서 운전할 경우 효율을 찾아낼 수 있다. 유도발전기가 725.182[rpm]로 회전할 때 회전체 손실을 고려하지 않을 경우 효율은 96.8[%]로서 요구한 성능 보증값인 94.1[%]보다는 약간 높게 계산되었다. 이는 실제 풍손 및 표유부하손이 출력의 약 3%내외라고 가정할 경우 거의 유사한 효율이라고 볼 수 있다[3].

표 1의 유도발전기 제원을 가지고 산출한 표 3의 파라미터 결과를 이용하여 정격속도 전후에서 운전할 경우 전력 및 효율을 분석하면 표 4와 같다.

표 4 회전 속도에 따른 전력 및 효율 비교

Table 4 Comparison of power and efficiency of induction generator due to rotation speed

구분	시험결과 [rpm]	계산 결과[rpm]				
	725	724	725	726	725.182	
유효전력[kW]	490	386	474	558	490	
무효전력[kVAR]	325	304	342	388	350.2	
피상전력[kVA]	588	491	585	680	602.3	
효율[%]	94.1	96.9	96.8	96.6	96.8	

표 4의 공장시험결과에서 제시한 무효전력 및 피상전력은 유효전력과 역률을 가지고서 계산한 것이고, 계산결과는 발전기 시험성적서로 구한 파라미터를 가지고서 회전속도 변화에 따라 전력 및 효율을 구한 것이다. 발전기의 회전속도가 정격속도 근처(725.182rpm)에서 운전할 경우 정격과 같은 출력을 얻을 수 있으나 효율은 약 2% 조금 높게 나타났다. 이는 본 해석에서 풍손 및 표유부하손을 고려하지 않은 수치라고 판단된다. 또한 미소의 속도 변화가 발생할 경우 유효전력의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

4. 수차 발전기 운전 효율 분석

소수력 발전설비의 효율 운전을 위해서는 유량과 양정의 입력 데이터가 반드시 필요하다. 대수력에서는 유량 관리가 중요하고, 또한 모델 테스트를 하는 경우가 많으므로 지수 차압법을 이용한 유량 환산식을 만들고 이 값을 이용하여 실시간 유량을 확인할 수 있지만 대부분의 소수력 발전소에서는 양정을 파악할 수 있는 압력계가 있으므로 유량계는 별도로 설치하지 않고 출력값을 이용해서 이때의 양정에 대해 효율을 감안하여 역으로 유량을 환산함으로써 실시간 유입유량 자료로 활용하고 있다.

본 연구대상의 소수력 발전소와 같은 경우 수차 출력은 유량과 양정의 변동에 따라 운전하는 것이 아니라 출력을 일정한 값으로 조절하고 이때 양정의 변화에 따라 가이드

배인 개도를 조절함으로써 유량을 변화시켜 일정한 출력이 유지되도록 운전되는 시스템으로 구성되어 있다. 본 연구에 적용된 소수력 발전소의 경우 유량계가 설치되어 있지 않아서 실시간 유량변동을 파악하여 최적 효율 운전을 실행하기에는 다소 어려움이 있다.

그림 6은 양정별로 최적 방류량에 의해 출력이 조정되도록 세팅된 출력제어 시스템을 나타낸 것이다. 출력제어는 인입밸브에 유입되는 양정과 유량을 읽어서 PLC에 전달하면 입력된 명령 값에 의하여 가이드 배인 개도를 조절하여 수차에 유입하게 하고 다시 러너 베인을 통해 날개 각도를 조절함으로써 출력이 조절된다.

그림 6 출력 제어 운전

Fig. 6 Output control operation

본 연구에서 제시된 시스템의 수차 발전기에 대해서 수차의 경우 공장 시험을 통해 제시된 효율은 당초 제안된 효율보다 약간 낮은 84.5%이고, 유도발전기의 효율은 94.1%이므로 종합효율은 79.51%가 된다. 이 값을 가지고서 정격에 가까운 운전 조건에서의 효율 특성을 분석하였다.

표 5는 그림 6과 같은 출력 제어 시스템에서 설계 정격에 거의 일치하는 유량과 양정 조건의 운전 자료이다. 설정출력으로 세팅하여 운전할 경우 운전출력은 실제 계통에 연결되는 유효전력이고, 양정과 회전수는 실시간으로 확인이 가능하지만, 방류량은 유량계가 없으므로 출력과 양정으로 알 수 있다. 여기서 출력용량은 정격(490kW)에 맞추고 양정은 정격에 가까운 조건에서 24시간 운전한 결과 발전출력은 설정보다 약간 낮은 평균 471.25kW를 발생하였다.

표 5에서 운전출력은 계통에 전달되는 유효전력이고, 계산출력은 설계 방류량과 양정 그리고 수차발전기의 종합효율을 고려하여 구한 것이다. 종합효율 (a)는 운전 양정과 설계방류량에 대해 운전출력으로 구한 것이고, 종합효율 (b)는 유도발전기의 회전수와 수차의 양정의 변화에 따른 계산 결과이며, 종합효율 (c)는 수차와 발전기의 공장시험시 구한 효율값이다.

유량값을 정확하게 알 수 없어 설계 유량과 운전 양정으로 구한 종합 효율 (a)는 공장에서 구한 수차 발전기의 종합효율 (c)와 같은 경우도 있지만 약 1% 정도 낮은 오차가 나타났다. 또한 발전기의 회전에 따른 효율과 양정의 변화에 의한 효율로 계산한 평균 종합 효율 (b)의 경우 평균 종합효율 (c)에 거의 일치하는 효율을 나타내었다.

표 5 운전 효율 비교

Table 5 Comparison of operating efficiency

시간	운전출력 (kW)	회전수 (RPM)	양정 (m)	계산출력 (kW)	종합효율(%)		
					(a)	(b)	(c)
1시	472	731	13.60	477	78.7	79.10	79.51
2시	470	731	13.42	471	79.4	78.97	79.51
3시	471	721	13.57	476	78.7	77.46	79.51
4시	472	721	13.47	472	79.5	79.10	79.51
5시	472	721	13.58	476	78.8	77.47	79.51
6시	472	731	13.66	479	78.4	79.12	79.51
7시	473	727	13.66	479	78.5	80.13	79.51
8시	472	727	13.71	481	78.1	80.16	79.51
9시	473	727	13.75	482	78.0	80.19	79.51
10시	474	730	13.67	479	78.6	79.37	79.51
11시	473	728	13.84	485	77.5	79.97	79.51
12시	471	723	13.83	485	77.2	80.48	79.51
13시	465	726	13.27	465	79.5	80.06	79.51
14시	473	723	13.75	482	78.0	80.44	79.51
15시	472	731	13.59	477	78.8	79.08	79.51
16시	473	731	13.72	481	78.2	79.15	79.51
17시	471	723	13.28	466	80.4	80.15	79.51
18시	471	731	13.67	479	78.1	79.11	79.51
19시	473	731	13.73	481	78.1	79.15	79.51
20시	469	722	13.29	466	80.0	79.65	79.51
21시	470	723	13.68	480	77.9	80.40	79.51
22시	471	731	13.55	475	78.8	79.06	79.51
23시	469	721	13.63	478	78.0	77.49	79.51
24시	468	723	13.47	472	78.8	80.35	79.51
평균	471.25	726.42	13.60	476.8	78.6	79.40	79.51

5. 결 론

소수력 발전소에서 양정과 유량은 정격대로 운전하는 경우도 있지만, 실제 유량과 양정이 정격보다 높거나 낮게 운전되는 경우가 많다. 이럴 경우 제작사에서 제시한 효율과 현장에서 운전할 경우 효율이 서로 달라 효율보증에 문제가 될 수 있다. 그래서 본 연구에서는 농업용 보에 설치 운전 중인 수차 발전기의 공장 시험을 통해 구한 종합 효율과 실제 현장에서 운전을 통해 얻은 효율을 비교하였다.

수차 발전기의 종합 효율을 검증하기 위해 수차는 공장 시험을 통해 제안된 값을 사용하였고, 발전기는 제시된 시험 성적서를 가지고서 발전기 파라미터로 변환하여 전력 및 효율을 계산하였다. 계산 결과를 검증하기 위해 정격에 매우 가까운 양정 및 유량에서 운전한 경우 종합효율은 거의 일치한다는 것을 확인할 수 있었다.

References

- [1] Gyeong-Bae Lee et al, "Activation Strategy of Hydropower Development as New & Renewable Energy", pp.1231-1232, KIEE Summer Annual

conference, 2010.7

- [2] Ministry of Knowledge Economy and Korea Energy Management Corporation, "2012 New and Renewable Energy", 2013. 01
- [3] Jong-Gyeum Kim, "Output characterization analysis of Induction generator using test data", KIEE, Vol.62, No.7, pp.1027-1032, 2013. 7
- [4] Young-Kuk, Kim, Jong-Gyeum Kim, "A Study on the Operation Characteristic of Induction Generator in the Small Hydropower Plant", KIEE, Vol.62, No.5, pp.632-638, 2013. 5
- [5] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, "Application Guidelines for Induction Generators," in Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives, Milwaukee, Wisconsin, May 18-21, 1997, Paper WC1/5.1 - WC1/5.3.
- [6] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004
- [7] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics Analysis of 3-phase Induction Generator at the Unbalanced Load Operation", KIEE, Vol.56, No.3, pp.123-128, 2007.9
- [8] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, Il-Jung Kim, Young-Kuk Kim, "Characteristics Analysis of Induction Generator with a Change in Rotor Speed", KIEE, Vol.60, No.12, pp.2225-2229, 2011. 12
- [9] Jack J. Fritz, "Small and Mini Hydropower Systems", McGraw-Hill Book Company, USA, 1984.
- [10] IEEE Std 112-2004, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators"

저 자 소 개

김 종 겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원

Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr