

농업용 보에 적용된 카프란 수차 발전기의 동작 분석

Characteristic Analysis of Kaplan Water Turbine Generator Applied to Agricultural Reservoirs

김 종 겹[†] · 류 연 수^{*}
(Jong-Gyeum Kim · Yeon-Su Ryoo)

Abstract - Recently, many advanced countries are devoted to the development of eco-friendly new-renewable energy to prepare for the depletion of resources. Korea belongs to the absolute lack of energy to import from abroad 97% of energy use. So, development and supply of eco-friendly energy such as small hydro power has been required even more. Our country has a large number of small-sized reservoirs and dams. So, hydro generator has been installed at the small reservoirs and dams with the economy. Since the discharge flow of agricultural reservoir is not constant, the guide vane of wicket gate is used for adjusting the output of the generator.

In this study, we have confirmed that the guide vane control of water turbine under the conditions of flow variation will improve the output and efficiency of induction generator.

Key Words : Agricultural Reservoirs, Induction generator, New Renewable Energy, Power Efficiency, Small Hydro Power

1. 서 론

우리나라는 홍수조절, 농업용 및 전력 발생을 위해 크고 작은 댐이 많은 편이다. 이들 대부분의 댐은 지방자치단체, 전력회사, 수자원공사 그리고 농어촌공사에 의해 유지·관리되고 있다[1].

농어촌공사는 전국에 걸쳐 3천개 이상의 농업용 저수지를 보유하고 있으며, 이들 저수지 중에서 발전 경제성이 있는 저수지의 경우 소수력 발전을 설치 운영하고 있다[2]. 농업용 보의 경우 여름철 농사에 필요한 물을 공급하는 것을 주목적으로 하지만, 저수지에 유입되는 유량의 변화에 따라 방류량이 달라질 수 있으므로 발전출력을 높이기 위해서 유량조절이 가능한 수차를 선택하는 경우가 있다. 방류 유량을 조정하여 출력을 조절하는 대표적인 수차로서는 카프란(kaplan) 수차가 있다. 수차에 의해 발생된 기계에너지를 전기에너지로 사용하기 위해서는 주로 동기발전기와 유도발전기가 사용 가능하다[3,4,5]. 유도발전기의 경우 동기발전기보다 유지관리가 편리하여 최근 천 kW 근처의 소수력 발전소에 많이 적용하고 있다[5,6].

저수지에서 하천에 방류하는 유량을 조절할 때 수차는 가이드 배인을 조절하면 되지만, 유도발전기의 경우 회전속도가 변하면 출력이 달라진다[7]. 대부분의 소수력 설계에서 수차의 경우 정격 유량과 낙차에 따라 용량을 선정하며, 발전기의 출력은 수차

의 출력보다 약간 낮은 용량이 선정하고 있다. 농업용 보에 설치되어 운영되고 있는 소수력 발전소에서 정격유량과 낙차를 가지고 운전하는 경우보다는 대부분 정격의 범위를 벗어나 운영하는 경우가 많고, 실제 설계 정격과 다르게 운전할 경우가 많아 정격 효율과 출력 보장이 어려운 편이다.

그래서 본 논문에서는 농업용 보에서 방류량이 변화할 경우에도 카프란 수차의 가이드 배인(guide vane)을 조절하여 유도발전기의 출력이 정격에 최대한 가깝게 발휘할 수 있는 조정범위에 대해 측정을 통해 분석하였다.

2. 농업용 보의 수차 발전 시스템

소수력 발전은 물이 가지고 있는 위치에너지를 수차에 의해 기계적인 에너지로 변환한 다음 에너지 변환효율이 매우 높은 발전기를 사용하여 전기적인 에너지를 얻을 수 있다.

그림 1은 농업용 보의 수차발전 시스템 구성을 나타낸 것이다.

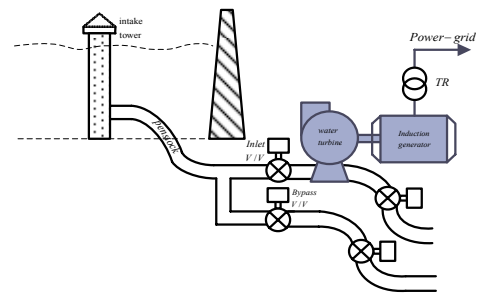


그림 1 농업용 수차 발전시스템 구성도

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

^{*} Rural Research Institute, Korea

Received : January 29, 2015; Accepted : April 15, 2015

Fig. 1 Configuration of agricultural hydro power plant

그림 1에서 농업용 보의 취수탑에서 하천에 물이 방류되기 까지 팬스톡(penstock)에 두 개의 밸브가 설치되어 있다. 인입밸브(inlet valve)는 발전을 위한 것이고, 바이패스 밸브(bypass valve)는 발전기 유지 보수시 용수공급을 우회시키기 위한 것이다. 인입밸브를 통해 유입된 물이 수차를 통해 기계에너지가 전기에너지로 변환될 경우 유도발전기를 통해 발생한 전력이 변압기를 거쳐 전압을 변환시킨 다음 계통에 전력을 공급하도록 되어 있다.

수차의 유량을 조절하기 위한 수차의 가이드 배인 조절은 그림 2와 같이 열림과 닫힘에서 그 범위를 조절할 경우 출력 조절이 가능하게 된다.

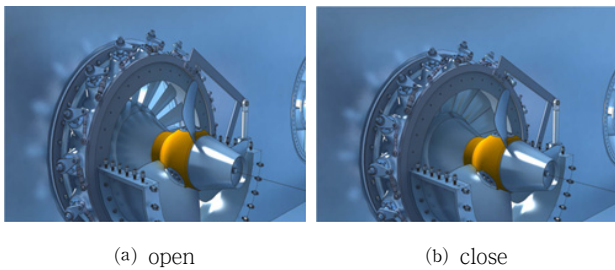


그림 2 가이드 배인의 열림 및 닫힘

Fig. 2 Open/close operation of guide vane

이때 수차발전 시스템에서의 발전설비 용량(P_g)은 낙차, 유량 그리고 수차 및 발전기의 효율을 이용하여 식 (1)과 같이 결정한다.

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

여기서, P_g : 발전설비 용량(kW) Q : 사용수량(m^3/s)
 H : 유효낙차(m) η_t : 수차효율(%)
 η_g : 발전기효율(%)

식 (1)에서와 같이 발전출력을 높이기 위해서는 수차와 발전기의 효율을 높이는 것은 설계 제작에 의해 이루어지지만, 유량이나 낙차를 높일 경우에도 가능하나, 대개 현장에서는 정격의 범위를 벗어나 운전하는 경우가 많은 편이다.

3. 수차 및 유도 발전기

3.1 수차 발전기

현장에 설치된 유도발전기가 설계 제작된 사양과 같이 출력이 나오는 경우가 가장 이상적이지만, 실제로 당초보다는 낮은 출력과 효율을 나타내는 경우가 있다. 이는 현장에서의 유량과 낙차가 정격과 다르게 운전되기 때문이다.

표 1은 본 연구에 적용된 수차 발전기의 정격을 나타낸 것으로서 정격 낙차와 정격 유량에 대해 유도발전기가 발생해야 할

발생전력을 나타내고 있다. 표 1에서 발전기의 출력은 유효전력에 해당되는 것으로서 식 (2)와 같다. 이 값은 전력계를 사용하여 측정하였다.

$$P = \sqrt{3} VI \cos \theta \quad (2)$$

표 1 수차 발전기 제원

Table 1 Specification of water turbine generator

| | | |
|-----|-------------|---------------|
| 발전기 | 출력 | 490kW |
| | 극수 | 10극 |
| | 정격 전압/전류 | 3,300V/109.4A |
| | 효율 | 94.1% |
| | 역률 | 83.3% |
| | 절연등급 | F종 |
| 수차 | 결선방식 | Y |
| | 타입 | 수직축 카플란 |
| | 출력 | 520kW |
| | 양정 | 13.1m |
| | 유량 | 4.5cms |
| | 효율 | 90.1% |
| | 회전속도/무구속 속도 | 725/1,800 rpm |

3.2 발전기 등가회로 및 파라미터

그림 2는 농형 유도발전기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 유도발전기의 전력 흐름은 유도전동기와 반대가 된다. 회전자 수차에 의해 동기속도 이상으로 회전할 경우 유도기는 발전기로 동작하여 전력을 계통에 공급할 수 있다.

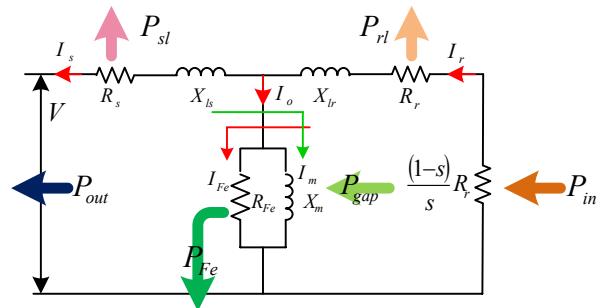


그림 3 유도발전기의 전력 흐름도

Fig. 3 Power flow diagram of induction generator

그림 3에서 R_s , R_r 은 고정자와 회전자의 저항이고, X_s 와 X_r 은 각각 고정자와 회전자의 누설리액턴스이며, R_{Fe} 와 X_m 은 철손저항과 자화 리액턴스이다. 발전기의 회전속도에 따른 특성 변화를 계산하기 위해 슬립 s 를 사용하였다. 그림 3에서 수차에 의해 유도발전기 회전자에 전달된 입력 P_{in} 에서 회전자와

고정자 손실 및 철손 등을 제외한 출력 P_{out} 이 계통에 공급 가능한 전력으로 유효전력으로서 식 (2)가 해당된다.

회전속도의 변화에 따른 발생전력을 분석하기 위해 표 1에 제시한 유도발전기의 정격을 공장 시험을 통해 구한 결과 표 2와 같다.

표 2 유도발전기 파라미터

Table 2 Induction generator parameters

| 파라미터 | Values |
|-------------------|----------|
| 고정자 저항 R_s | 0.306Ω |
| 회전자 저항 R_r | 0.266Ω |
| 고정자 리액턴스 X_{ls} | 1.415Ω |
| 회전자 리액턴스 X_{lr} | 1.415Ω |
| 철손 저항 R_{Fe} | 567.188Ω |
| 자화 리액턴스 X_M | 45.849Ω |

그림 4는 표 2의 파라미터를 사용하여 회전속도에 따른 효율을 나타낸 것이다. 계산결과 유도발전기가 725.04[rpm]의 속도로 회전할 경우 회전자 손실을 고려하지 않은 상태에서 98.59%의 효율이 나타난다. 이 계산결과는 실제 풍손, 마찰손 및 표유 부하손이 출력의 약 3% 내외라고 할 경우 표 1에서 제시된 정격과 거의 비슷한 값이다[5].

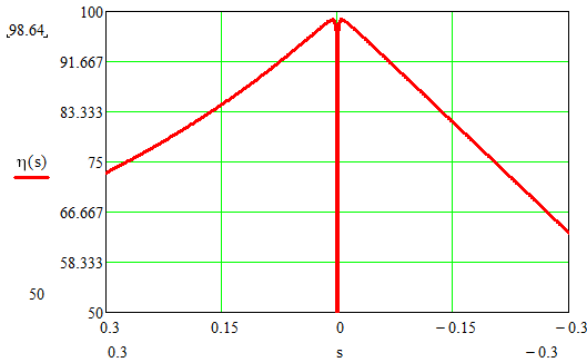


그림 4 회전속도에 따른 효율 곡선
Fig. 4 Efficiency curve according to the rotation speed

4. 측정 및 결과 분석

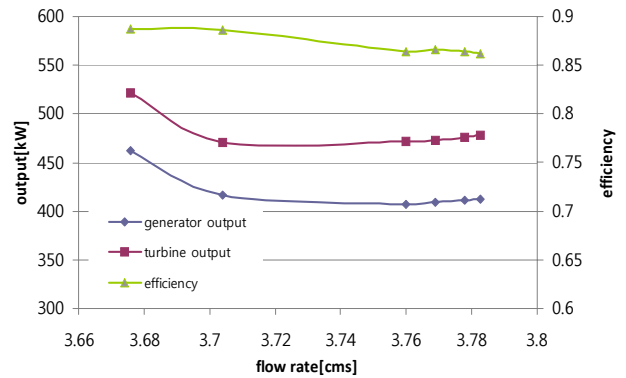
수차의 효율이 보장되도록 하기 위해서는 정격유량과 정격낙차로 운전해야 하지만, 실제 현장에서는 정격과 다른 조건이 많이 나타날 수 있다.

농업용 보에 설치된 수차 발전시스템에서 방류 유량이 정격과 다른 경우 낙차, 회전수, 출력 그리고 효율이 어떻게 변화하는지와 회전수가 변화할 경우 출력과 효율이 어떻게 변화하는지를 측정된 결과가 그림 5에 나타내었다. 또한 수차의 정격 조건을 벗어난 경우에도 발전기가 정격출력에 가까우면서 최대 효율을 얻을 수 있는 수차 가이드 배인의 개도 범위를 찾기 위한 측정을

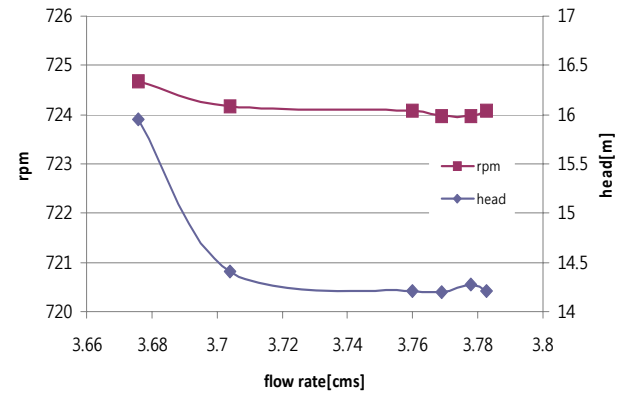
실시하였다. 이때 회전수의 조정에 따라 가장 높은 효율이 발생되는 포인트를 찾아내는 것이 매우 중요하다. 측정은 1분 간격으로 30분 동안 실시하였다.

유량은 Ultraflux사의 UF 801-P 초음파유량계를 사용하였으며, 전력은 YOKOGAWA사의 CW240 전력분석기로 그리고 발전기의 회전수는 테스토사의 TESTO 465를 사용하였다.

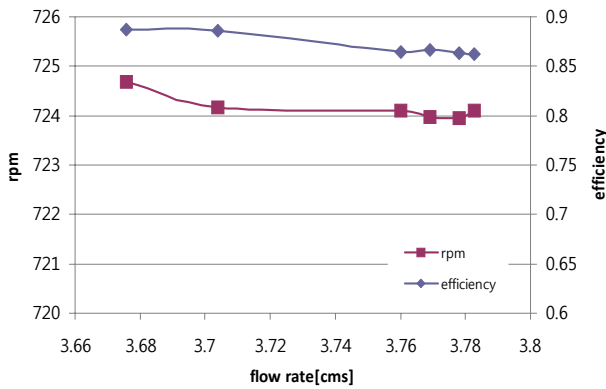
본 연구에서 현장 측정시의 낙차는 정격보다 약간 높았으며, 유량은 정격보다 낮은 상황이었다. 이와 같은 운전 조건에서 가이드 배인에 의한 유량의 조절과 회전수 변화에 따른 각각의 변화를 측정하였다.



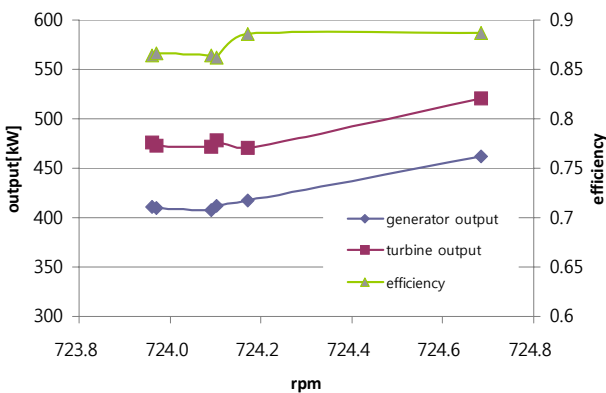
(a) 유량에 따른 출력과 효율



(b) 유량에 따른 회전수와 양정



(c) 유량에 따른 회전수와 효율



(d) 회전수에 따른 출력과 효율

그림 5 동작 특성의 비교

Fig. 5 Comparison of operating characteristics

그림 5(a)는 수차의 정격유량 4.5[cms] 보다 작은 3.7[cms] 범위 전후에서 수차, 발전기 그리고 종합효율을 나타낸 것이다. 미세하게 유량이 증가할 경우에 출력 및 효율이 약간 감소함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 유량의 변화에 따른 회전수와 양정의 변화를 나타낸 것이다. 유량이 미세하게 증가할수록 회전수는 감소하나 낙차의 변화는 아주 미미하게 진행되었다. 그림 5(c)는 유량의 변화에 따른 회전수와 효율의 변화를 나타낸 것이다. 미세한 유량의 증가에 대해 회전수와 효율이 함께 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5(d)는 미세한 회전수 변화에 대해 수차와 발전기의 출력과 효율을 나타낸 것으로서 제작사에서 제시한 회전수에 가까울수록 출력과 효율이 함께 미세하게 증가함을 알 수 있다. 측정결과 실제 정격회전속도 보다 약간 낮은 값에서 효율이 약간 높게 나타났다.

그림 5에서 미세한 유량의 변화에도 발전기의 출력과 효율이 변화함을 확인할 수 있다.

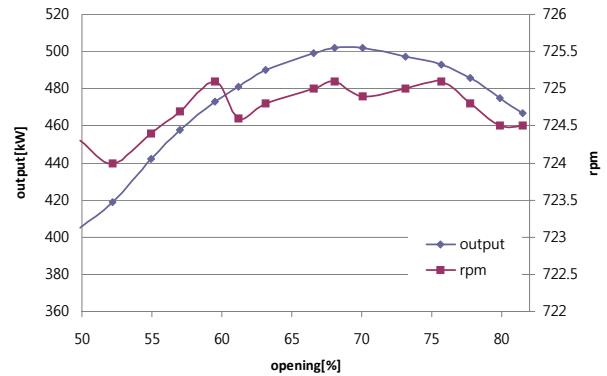


그림 6 가이드 배인 개방 각도에 따른 유도발전기의 출력 및 회전속도

Fig. 6 Output and rotational speed of induction generator corresponding to the opening angle of guide valve

농업용 보에서 방류되는 유량은 항상 일정하지 않다. 그래서 수차의 가이드 배인의 조정하여 출력이 최대가 되도록 조정하여 설치한 유도발전기의 회전속도에 맞추어 운전할 필요가 있다. 그림 6은 수차의 개도를 50%에서 시작하여 82%까지 2%씩 조정하여 측정된 발전기의 출력과 회전수 변화를 나타낸 것이다.

그림 6에서와 같이 가이드 배인의 개도가 50%를 넘을 경우 출력은 조금씩 증가하였다. 발전기의 최대 출력은 가이드 배인의 개도가 69와 70%일 때였다. 그러나 가이드 배인의 개도가 이 범위를 벗어날 경우 출력은 조금씩 줄어들었다. 또한 발전기의 회전속도도 같은 동작패턴을 나타내었다. 실제 발전기의 회전속도가 725rpm일 때 최대 출력을 나타내었으며, 이는 수차의 정격회전속도와 일치하였다. 측정결과 수차발전기의 출력은 가이드 배인 개도각의 조정에 따라 2차 함수의 형태가 되는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

농업용 보는 농사에 필요한 물을 공급할 수 있는 위치에너지를 가지고 있다. 이와 같은 농업용 보에 수차 발전기가 설치될 때 청정에너지를 얻을 수 있다. 그래서 본 연구에서는 농업용 보에 설치된 수차발전기가 정격과 다른 조건에서도 효율을 최대한 얻을 수 있도록 가이드 배인에 의한 개도 조정에 따라 출력과 효율의 변화를 측정 분석하였다.

본 연구에서는 유도발전기가 최대의 효율을 발휘할 수 있는 회전속도를 계산하였으며, 측정을 통해 계산 값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 수차의 가이드 배인 개도를 50~82%까지 변화시킨 경우 출력은 2차 함수의 형태로 나타났으며, 최대 출력은 일정 범위 내에 존재함을 알 수 있었다. 또한 정격 조건과 같이 많은 방류량에서도 가이드 배인의 각도 조절을 통해 전력생산을 효율적으로 실시할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구결과는 향후 유량변동이 많은 소수력 설비에서 전력의 생산제고를 위한 특성 분석에 도움이 될 것이다.

References

- [1] 2012 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO
- [2] Research Report of Korea Rural Community Corporation, A Study for Characteristics Analysis and High Efficiency Operation of Small Hydro Power Plants, 2012. 12
- [3] 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.
- [4] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, 2004
- [5] Jong-Gyeum Kim, "Output characterization analysis of Induction generator using test data", KIEE, Vol.62, No.7, pp.1027-1032, 2013. 7
- [6] 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
- [7] Jong-Gyeum Kim et al, "Characteristics Analysis of Induction Generator with a Change in Rotor Speed", KIEE, Vol.60, No.12, pp.2225-2229, 2011. 12

저 자 소 개



김 종 겹(Jong-Gyeum Kim)

1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수, 현재 당학회 평의원 및 B부분회 총무이사

Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



류 연 수(Yeon-Su Ryoo)

1985년 건국대학교 전기공학과 졸업

2007년 건국대학교 대학원 공학박사

1988년~2009년 한국농어촌공사

2010년~현재 농어촌연구원 수석연구원

Tel : 031) 400-1714

E-mail : rsoftwater@ekr.or.kr