

정수장 마이크로 소수력 발전기 적용에 대한 연구

(A Study on the Application of Micro Hydro Power Generator
at the Water Treatment Plant)

김종겸* · 박영진 · 김일중

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · IL-Jung Kim)

Abstract

Inflow or outflow from the water treatment plant and the sewage water has potential energy. If this potential energy can be converted into electrical energy by water turbine generator, it can help to save energy because of the high capacity utilization. So recently, micro hydro power plant is reviewed in the water treatment facility. If generation capacity is low, induction generator is primarily used. If output capacity is low, generated power is supplied to the inside load. Induction generator can cause voltage drop by the inrush current at a start-up and requires reactive power for magnetization.

In this study, we analyzed the flow of power and voltage variation against inrush current that occurs when the induction generator starts under the terms that loads of linear and non-linear of the water purification plant are used. Analysis results are that the voltage drop is within an allowable range and the power factor is slightly reduced by the need of reactive power.

Key Words : Induction Generator, Linear Load, Non-Linear Load, Voltage Drop, Water Treatment

1. 서 론

정수장이나 하수종말처리장과 같은 곳에서 유입 또는 유출되는 물은 위치에너지를 갖고 있다[1]. 이 위치에너지는 전기에너지로의 변환이 가능하며, 적용 가능한 용량은 소수력급 이하가 대부분이다.

발전용량이 천에서 만kW까지는 소수력이라고 하며, 5~100kW 정도는 마이크로급이라고 한다[2]. 비록 출력 용량은 작지만, 정수장과 같이 가동률이 높을 경우 발전량이 많아 경제성이 높기 때문에 최근 소수력급에서 미니, 마이크로 그리고 피코급으로 점차 축소 개발되고 있다.

수처리 설비의 소수력에 적용 가능한 발전기로는 동기발전기와 유도발전기가 있다. 동기발전기는 신뢰도가 높은 편이지만 초기 투자비가 많이 소요되고, 유지보수비가 높아 발전설비용량이 큰 곳에 주로 적용하며, 유도발전기는 기동시 돌입전류에 의한 문제점이 있지만 설치 및 유지보수가 편리하여 주로 설비용량

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
* Main author : Dept of Electrical Engineering,
Gangneung-wonju National Univ, Korea
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8781
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2014년 6월 30일
1차심사 : 2014년 7월 3일, 2차심사 : 2014년 7월 21일
심사완료 : 2014년 7월 23일

이 작은 발전소에 많이 적용하고 있다[3-6].

소수력 설비에서 출력 용량이 천 kW 이하는 주로 농형 유도발전기가 많이 사용하고 있다[4,7-9]. 유도발전기는 기동시 높은 돌입전류에 의해 전압강하가 발생하기 때문에 기동시 전압강하가 허용 범위 내에 들어가는지에 대한 사전 검토가 필요하다[8,10]. 또한 유도발전기는 자화를 위해 무효전력을 필요로 하므로 계통으로부터 공급받을 경우 전력의 흐름에 대한 분석도 필요하다.

일반적으로 발전출력이 100kW를 넘을 경우 계통에 연계하지만, 이보다 낮은 경우에는 구내 전력으로 사용한다[10]. 계통연계가 아닌 부하에 전원으로 발전전력을 사용할 경우 기존 부하와의 상호관계 분석이 필요하다.

정수장 수처리용의 부하설비로 전동기를 많이 사용하고 있다. 정수처리 과정에서 일정한 속도로 운전하는 곳에서는 유도전동기를 사용하지만, 속도제어가 필요한 부하설비의 경우 비선형 부하인 가변속 드라이브를 적용하고 있다[11-12].

본 연구에서는 선형 및 비선형 부하가 함께 공존하는 정수장 설비에서 존재하고 있는 위치에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 농형 유도 발전기가 운전될 때 전류의 크기와 전압강하 및 전력의 흐름을 분석하였다.

2. 시스템 구성도

정수장의 수처리 구성은 그림 1과 같다. 우선 취수장에서 펌프를 통해 착수정에 물은 약품 투입, 혼화/응집 그리고 침전지를 통해 물을 여과시켜 소독한 다음 정수지에 보낸다.

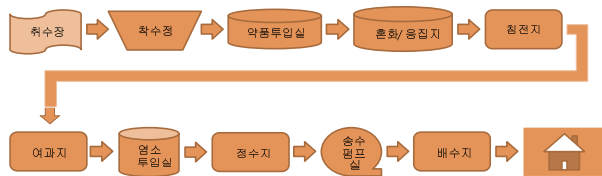


그림 1. 정수장의 수처리 흐름도
Fig. 1. Water flow diagram of water treatment plant

그림 1에서 착수정에서 정수지까지의 설비는 대개 정수장 구내에 있지만, 송수 펌프실은 정수장 구내에 있거나 바깥에 위치하는 경우도 있다. 취수장이나 배수지 또는 송수 펌프실은 대개 정수장 바깥에 시설하는 경우가 많다.

그림 1에서와 같이 정수장에서 위치에너지를 가질 수 있는 곳은 주로 착수정이나 배수지 등이 해당된다. 배수지의 경우 정수장 구외에 존재하기 때문에 에너지 생산을 가능하지만, 여기서는 착수정에서 존재하는 위치에너지를 전기에너지로 변환시키는 것으로 해석하고자 한다.

정수장에는 물의 처리과정에서 혼합 등의 공정에 전동기부하가 많이 사용되고 있다. 이들 부하 중에는 일정한 동작을 반복적으로 지속하는 경우도 있고, 간헐적으로 사용하는 경우도 있으며, 속도변화가 필요한 부하도 사용되고 있다. 특히 속도변화를 필요로 하는 부하의 경우 인버터와 같은 가변속 구동장치(ASD)를 사용하기 때문에 고조파가 발생한다.

본 연구에서는 그림 2와 같이 22.9kV에서 바로 저압으로 변환되는 설비로 시스템을 구성하였다.

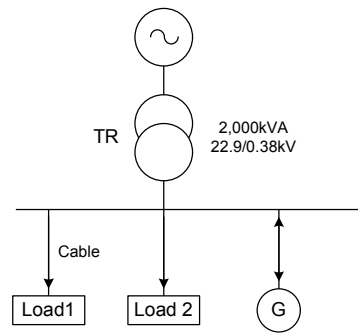


그림 2. 시스템 구성도
Fig. 2. System configuration

그림 2에서 부하 1은 유도전동기 등의 선형부하(linear load)이고, 부하 2는 정수장에 전력변환장치를 이용하여 유도전동기의 속도제어 등에 사용되는 비선형 부하(nonlinear load)이다.

정수장에서 수처리 과정에서 발생하는 낙차와 유량을 이용하여 청정에너지를 생산하는 발전설비의 용량이 100kW를 기준으로 이보다 높은 경우에는 계통에 연

결하지만, 낮은 경우에는 대개 구내 에너지로 사용한다. 여기서는 100kW 이하에 해당되는 마이크로 수력 시스템을 저압 선로에 연결하기 때문에 농형 유도발전기를 적용하였다.

3. 부하 및 발전기

3.1 부하종류 및 용량산정

수용가에 사용되고 있는 부하는 선형부하와 비선형 부하가 있다. 선형부하는 본래 정상적인 동작에서 인가전압의 주기내내 전력원에 일정한 부하 임피던스를 나타내는 전기적인 부하장치를 말하는 것이며, 비선형 부하는 불연속적으로 전류를 끌어들이는 전기적인 부하 또는 부하의 임피던스가 정현적인 전압원의 주기 동안 내내 변화하는 것을 말한다[11-12].

선형부하에 사용되는 저항 및 인덕턴스 파라미터는 단상 유효전력과 무효전력으로부터 구하면 된다[13].

$$R = \frac{E^2}{P} \tag{1}$$

$$L = \left(\frac{E^2}{Q} \right) / 2\pi f \tag{2}$$

또한 전압과 전류의 크기로 부터로부터 식 (3)과 같이 임피던스를 구한 다음 역률의 사용하여 선형부하의 저항과 인덕턴스가 구해진다.

$$Z_n = \sqrt{3} \frac{E}{I} \tag{3}$$

$$R = Z_n \cos\theta \tag{4}$$

$$L = \frac{Z_n \sin\theta}{2\pi f} \tag{5}$$

비선형 부하로는 컨버터를 사용하는 것이 대부분이다. 비선형 부하는 컨버터에 연결되는 부하용량을 사용하여 선형부하의 저항을 구하는 식 (1)을 사용하면 된다.

3.2 수차 발전기 용량 산정

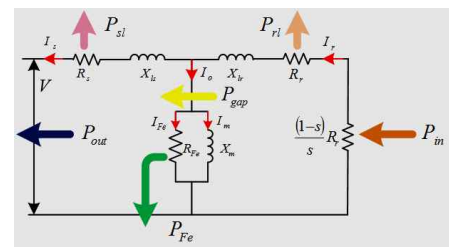
정수장 착수정에 유입되는 유량(Q)과 낙차(H) 그리고 수차의 효율(η)에 의해 결정되는 수차의 출력은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$P = 9.8QH\eta \tag{6}$$

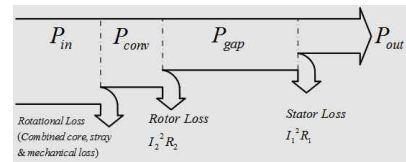
본 연구에서 적용한 정수장의 위치에너지에 대한 제한은 표 1과 같다. 이들 파라미터를 식 (6)으로 계산할 경우 수차 출력은 약 80kW이므로 이 수차에 연결되어 사용할 유도발전기의 출력은 수차 출력보다 약간 낮은 75kW로 선정하였다.

표 1. 수차 발전기 정격
Table 1. Water turbine generator rating

구분		값
수차	유량	2cms
	낙차	5m
	효율	0.82
발전기	상수	3
	극수	4
	전압	380V
	용량	75kW



(a) 등가회로도



(b) 전력흐름도

그림 3. 유도발전기의 등가회로도 및 전력흐름도
Fig. 3. Equivalent circuit and power flow of induction generator

수차에 의해 발생된 기계에너지를 전기에너지로 바꾸기 위해서는 발전기를 사용한다. 수차에 의한 입력 에너지가 축으로 연결된 발전기에 전달될 경우 발전기의 고정자에 전달되는 에너지 흐름은 그림 3과 같다. 그림 3에서 P_{in} 은 발전기 회전자에 전달된 입력 에너지이고, 회전자 손실(P_{rl}), 철손(P_{Fe}), 고정자 손실(P_{st})을 제외한 부분이 고정자 단자에 전달되는 출력 에너지(P_{out})이다[7-8].

본 해석에 적용된 3상 4극 380V 75kW 유도발전기의 파라미터는 다음과 같다.

표 2. 유도 발전기 파라미터
Table 2. Induction generator parameter

parameter	values
stator resistance	0.095Ω
rotor resistance	0.075Ω
stator leakage inductance	0.0005h
rotor leakage inductance	0.0004h
mutual inductance	0.016h
inertia moment	5.0kg · m ²
friction coefficient	0.075Nm · rad/s

4. 전력 시스템 분석

부하 1은 3상 380V의 유도전동기 부하로서 역률 80%로 10kW 단위용량의 부하가 40대로 총 400kW라고 가정하고서 저항 및 인덕턴스를 계산할 경우 각각 0.361Ω, 0.7182mH가 된다. 부하 2는 부하의 속도제어에 적용되고 있는 가변속 제어장치로서 역시 3상 380V 200kW의 전력변환장치의 부하라고 할 경우 저항은 0.722Ω이다. 이와 같은 부하가 운전되고 있는 상황에서 수처리 과정에서 남은 위치에너지를 발전기로 사용 가능한 출력은 표 2에서와 같이 75kW 정도이다. 이는 마이크로급에 해당되는 크기로 발생하는 전기는 구내에 사용한다.

본 연구에서 발전기의 투입에 따른 과도현상해석에는 EMTP의 ATPDRAW를 적용하였다[14]

유도발전기를 적용할 때 가장 고려해야 할 부분은

기동시 돌입전류에 의한 전압강하이다.

그림 4는 유도발전기를 기동하여 1초 후에 저압측 라인에 투입한 경우 전류의 변화를 나타낸 것이다. 유도발전기 투입시 발생하는 돌입전류는 운전전류의 거의 4.68배가 되었다.

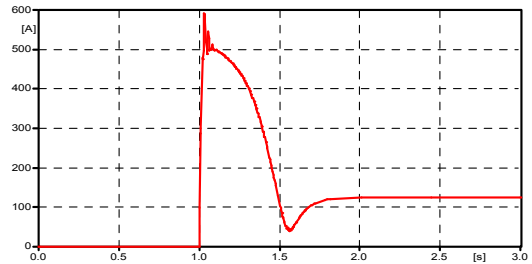


그림 4. 유도발전기의 돌입전류
Fig. 4. Inrush current of induction generator

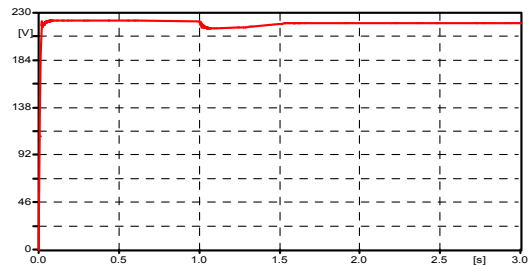


그림 5. 변압기 2차측 전압
Fig. 5. Terminal voltage of transformer secondary side

그림 5는 유도발전기를 변압기 2차측에 연결한 상태에서 기동할 때 변압기 2차측(T2RMS)의 전압 크기를 나타낸 것이다. 발전기 투입 전에 변압기 2차측 222.32V의 상전압이 발전기 투입시에는 214.64V로 약 7.68V의 전압강하가 발생하였다. 이때의 전압강하율은 3.45%가 되었다.

그림 5에서와 같이 유도발전기 투입 후 변압기 2차측 전압이 투입 전에 보다 낮게 나타나는 것은 무효전력의 부족 때문이다[9].

그림 6은 발전기를 투입 전후(0.5초, 2.0초)의 유효전력 변화를 나타낸 것이다. 그림 6에서 P3, P2, P1은 각각 발전기(○), 변압기 2차측(□) 및 1차측(△)의 유효전력을 나타낸 것이다. 발전기를 투입하는 시점(1초지

점)에서 유효전력이 안정화되기까지 순간적으로 높게 나타나는 것은 유도발전기의 기동전류 때문이다.

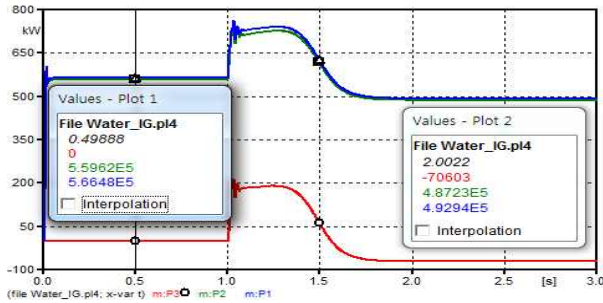


그림 6. 발전기 투입 전후 유효전력 변화
Fig. 6. Change of active power when generator turn on

그림 6은 발전기를 투입하기 전인 0.5초에서의 전력을 나타낸 것으로서 선형 및 비선형 부하에만 해당되는 전력을 발전기를 공급하지 못하고(P3=0W), 전원측에서만 공급(P2=559.62kW)하고 있지만, 발전기를 투입하여 전력을 부하측에 공급할 경우 P3은 약 70kW의 전력이 전원측에 전원과 반대방향으로 공급하므로 변압기 2차측에서는 약 487.23kW(P2)의 유효전력이 부하측에 공급함을 알 수 있다. 따라서 발전기의 운전으로 인해 전원측에서 공급되는 유효전력은 그만큼 감소하게 된다.

그림 7은 유도발전기 투입 전후(0.5초, 2.0초) 무효전력의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7에서 Q3, Q2, Q1은 각각 발전기(○), 변압기 2차측(□) 및 1차측(△)의 무효전력의 크기를 나타낸 것이다.

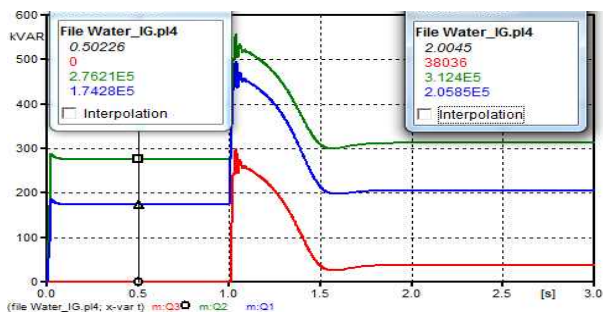


그림 7. 발전기 투입 전후 무효전력 변화
Fig. 7. Change of reactive power when generator turn on

발전기 투입전(0.5초) 변압기 2차측 무효전력이 276.21kVAR이지만, 발전기가 구동되고 난 이후(2.0초)의 변압기 2차측 무효전력은 312.40kVAR로 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같이 무효전력이 증가한 이유는 유도발전기의 자화를 위해 필요한 성분을 무효전력을 전원측으로부터 확보해야 하기 때문이다. 따라서 무효전력의 변화에 따라 역률이 달라진다.

그림 8은 발전기 사용 전후 발전기, 변압기 2차측 및 1차측의 역률의 변화를 해석한 결과이다. 그림 8에서 PF3, PF2, PF1은 각각 발전기, 변압기 2차측 및 변압기 1차측에서의 역률이다.

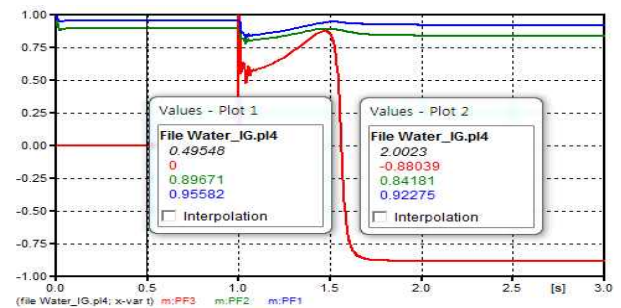


그림 8. 발전기 투입 전후 역률의 변화
Fig. 8. Change of power factor when generator turn on

그림 8에서와 같이 발전기를 운전하지 않을 때에 역률은 역률 보상장치의 사용으로 변압기 1차측에서 0.95가 확보되지만, 발전기를 운전할 경우에는 0.92로 약간 떨어진 것을 알 수 있다.

정수장에 존재하는 위치에너지를 활용하기 위해 유도발전기를 적용하여 청정에너지를 생산한 다음 부하측에 전원을 공급할 경우 기동전류에 의한 전압강하는 5%미만으로 안정적임을 확인할 수 있었다.

유도발전기의 운전으로 전원측으로부터 공급되는 유효전력은 줄어들게 되지만, 자화에 필요한 무효전력의 필요로 인해 전원측으로부터 공급받아야 하므로 전원측 역률은 약간 감소함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 정수장에 유입되거나 유출되는 청정

에너지인 물의 위치에너지를 유도발전기를 이용하여 전기에너지로 변환할 경우 예상되는 기동전류와 전압 강하 및 전원측에 유입, 유출되는 전력의 변화를 계산하였다. 발전된 출력이 100kW이하이기 때문에 계통연계를 통해 전원측으로 보내는 대신 부하에 공급되므로 사용되는 부하를 고려한 분석을 실시하였다.

해석결과 유도발전기 기동시 돌입전류에 의한 전압 강하는 3.45%로 허용범위 안에 들어감을 확인할 수 있었다. 또한 유도발전기의 운전으로 전원측에서 공급되는 유효전력은 감소하지만, 자화에 필요한 무효전력의 필요로 인해 전원측으로부터 공급받아야 하는 무효전력이 약간 증가하므로 역률은 약간 감소함을 알 수 있었다.

정수장에 설치된 발전기의 경우 가동률이 80% 이상이 되므로 용량이 작더라도 발전량이 높기 때문에 향후 검토할 설비에 본 연구내용이 도움이 될 것으로 판단된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2014년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Jong-Gyeum Kim et al., "Activation Strategy of Hydropower Development as New & Renewable energy", KIEE Summer Conference, pp. 1231-1232, 2010.7.
- [2] 2013 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO.
- [3] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004.
- [4] 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, Dec.
- [5] D. S. Henderson, "Synchronous or induction Generators?-The choice for small scale generation", IEE Conf, Pub, pp.146-149, 1996.
- [6] 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.
- [7] Jong-Gyeum Kim, "Output Characterization Analysis of Induction Generator using Test Data", KIEE, Vol.62, pp.1027-1032, No.7, 2013.
- [8] Young-Kuk Kim, Jong-Gyeum Kim, "A Study on the

Operation Characteristic of Induction Generator in the small Hydropower Plant", KIEE, Vol.62, pp.632-638, No.5, 2013.

- [9] Jong-Gyeum Kim, Young-Kuk Kim, "A comparison of the operating characteristics of the synchronous generator and induction generator applied to the small hydroelectric power plant", KIEE, Vol.63P, pp.55-60, No.2, 2014.
- [10] KEPCO, "Power distribution system interconnection technical standards for distributed power". 2010. 7.
- [11] Jong-Gyeum Kim et al. "Variance of Harmonics Element due to Linear & Non-linear Load Quantity", KIEE, Vol.51B, pp.441-448, No.8, 2002.
- [12] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems".
- [13] Shehab Abdulwadood Ali, "A Norton Model of a Distribution Network for Harmonic Evaluation", Energy Science and Technology, Vol.2, No.1, pp.11-17, 2011.
- [14] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program, Reference Manual(EMTP Theory Book)", BPA, 1986.

◇ 저자소개 ◇



김종겸(金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사(KT) 근무. 1988~1996년 한국수자원공사(K-Water) 근무. 2013~2014년 미국 Wisconsin-Madison Univ. 방문교수. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 한국조명·전기설비학회 학술이사.
Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



박영진(朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.
Tel : (033)760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr



김일중(金一中)

1980년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 기계공학과 교수.

Tel : (041)540-5805

E-mail : ijkim@hoseo.edu