

순간 정전시 펌프 구동용 유도전동기의 발전 동작에 관한 연구

(Study on the Generating Operations of the Induction Motor for Driving the Pump During Instantaneous Power Interruption)

김중겸*

(Jong-Gyeum Kim)

Abstract

Power interruption is a phenomenon that no voltage is displayed over a short time or long time. Most devices will not operate normally when the supply voltage is low or does not exist. However, the device can also be operated with a different power which is ensured by a separate power generation. Recently, power interruption has been reduced gradually by the improvement of electricity quality, its duration also has been very short.

Induction motors are widely used for the pumping in the water and sewage facilities and power plant applications. The pump is used as a machine for moving the fluid in the high place from a low location. So pump equipment always have a potential energy. If a momentary interruption occurs, the potential energy of the pump is reversed as that of water turbine and motor is operated as generator.

This study is an analysis for the voltage variation, current, torque and power flow by the generating operation of the induction motor before and after the change of momentary interruption.

Key Words : Induction Motor-Generator, Inrush Current, Momentary Interruption, Voltage Change, Water Pump

1. 서 론

농형 유도전동기는 다른 회전기에 비해 합리적인 가격에 유지비도 저렴하고, 안정적인 운전이 가능하여 산업현장에서 회전력을 얻는데 가장 널리 사용되고 있다[1]. 농형 유도전동기는 일반 팬 부하의 운전에도

사용되고 있지만, 상하수도 설비나 발전소에서 유체의 이송에도 많이 사용되고 있다.

전기품질의 여러 가지 현상 중에서 순간정전(momentary interruption)은 지속시간이 30cycles~3sec 동안 전압의 크기가 0.1pu 미만으로 감소 할 때를 말한다[2]. 순간정전이 발생한 경우 대부분의 기기는 정상적으로 동작하지 않는다. 그러나 낮은 곳에서 높은 곳으로 유체를 이송하는 펌프의 경우 일시적인 정전이 발생해도 관로 속의 위치에너지를 발전에 의해 유도기가 동기속도 이상으로 회전하여 발전기로

* 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
Received : 2015. 11. 21.
Accepted : 2015. 12. 16.

동작하기 때문에 정전이 복구되기 전까지 부하에 전력을 공급할 수 있다[3]. 발전기로 동작하고 있는 유도기가 전원이 회복하여 다시 전동기로 복귀하기 위해 계통에 투입될 때 큰 돌입전류가 발생하고, 이때 아주 큰 토크가 발생하게 되므로 축에 기계적인 스트레스로 작용할 수 있다.

유도성 부하인 유도전동기는 역률을 일정 이상으로 유지하기 위해 부하에 가까운 곳에 콘덴서를 설치하고 있는데 정전이 발생하여도 콘덴서에 충전된 전하가 전동기의 발전 동작에 무효전력을 제공할 수 있다 [3-4]. 정전시 유도기가 동기속도 이상으로 회전할 때 발생하는 전압은 회전속도에 비례하여 발생하기 때문에 정격전압보다 약간 높게 나타나므로 콘덴서에 전기적 스트레스로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 순간적인 정전에 의해 펌프용 구동용 농형 유도전동기가 발전기로 동작할 경우와 복구시의 전력의 흐름, 토크의 크기와 돌입전류에 의한 전압변화를 분석하였다.

2. 시스템 구성

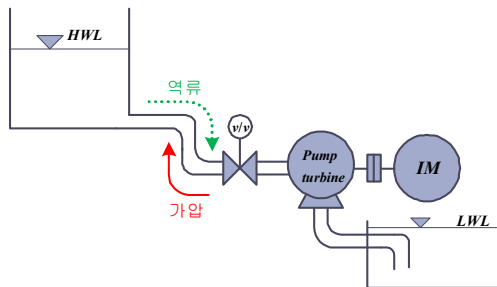


Fig. 1. Pump driving system

그림 1은 하부 저수조(LWL:Low water level)의 물을 상부 저수조(HWL:High water level)로 이송하기 위한 펌프 구동 시스템을 나타낸 것이다. 유체의 이송에는 관을 사용하는데 관 속에는 양정(H)에 해당하는 압력이 존재하고, 토출 물량의 조절과 물의 역류 방지를 위해 펌프의 앞단에 전동밸브(v/v)가 설치된다. 순간 정전이 발생한 경우 펌프 앞단에 설치한 전동밸브에 전원이 공급되지 않으므로 개방한 상태로 관속에 걸린 압력이 바로 역으로 작용하여 펌프는 수차 터빈

으로 동작하게 된다. 이때 펌프의 양정에 해당되는 부분이 낙차가 되며 유량과의 곱이 수차 터빈의 기계에너지가 유도기에 입력에 해당된다. 그림 1에서 실제 양정은 관의 손실낙차를 제외하면 된다.

펌프가 수차 터빈으로 동작할 경우 발전기 입력에 해당되는 터빈의 출력은 관속을 흐르는 유량(Q(m³/s))과 관속의 압력(kg/cm²)에 해당되는 낙차(H(m))의 곱으로 나타낼 수 있다. 이 기계적 출력은 식 (1)과 같이 발전기로 동작하는 입력에 해당된다.

$$P_{in} = 9.8QH[kW] \quad (1)$$

그림 2는 본 연구에 적용한 상하수도의 전력설비 구성을 간략화한 것으로서 변압기 2차측에 저압의 펌프 구동용 3상 유도전동기와 기타 3상 동력 부하 그리고 전동 및 전열의 단상부하가 연결되어 있다.

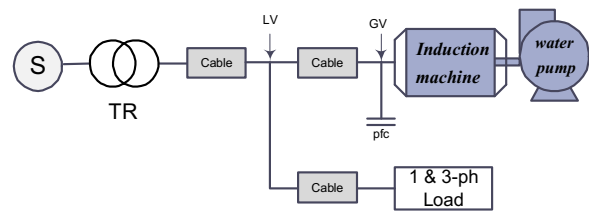


Fig. 2. System Configuration

펌프는 낮은 곳에 있는 물을 높은 위치로 이동시키기 위한 설비로서 주로 상하수도 및 발전소 등의 가압 설비에 많이 설치 운영되고 있다. 이와 같은 곳에서 순간적으로 정전이 발생할 경우 관로에 걸려 있는 관 내부의 압력에 해당되는 위치에너지가 역전되어 낮은 쪽으로 향하게 되므로 펌프는 수차로 동작이 바뀌게 되어 유도전동기를 역회전시킬 수 있다[3]. 유도전동기가 동기속도 이상으로 회전할 경우 유도발전기로 동작하게 되므로 전력의 흐름이 바뀌어 그림 2에서와 같이 변압기 2차측에 연결된 전원에 전력을 공급할 수 있다.

수차에 의해 발생한 기계에너지를 전기에너지로 바꾸기 위해서는 발전기가 사용된다. 수차에 의한 입력 에너지가 축으로 연결된 발전기에 전달될 경우 유도발전기의 고정자에 전달되는 에너지 흐름은 그림 3과

같다. 그림 3에서의 등가회로도와 전력 흐름도는 전동기로 운전할 경우와 정반대로 회전자에서 고정자로 전력의 이동이 일어난다.

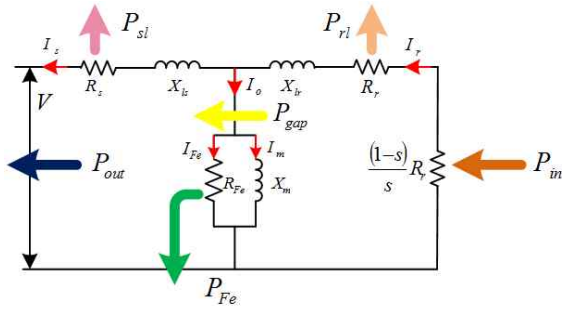


Fig. 3. Equivalent circuit and power flow of induction generator

그림 3에서 P_{in} 은 유도기의 회전자에 전달된 펌프에 의한 입력에너지이고, 회전자 손실(P_{rl}), 철손(P_{Fe}), 고정자 손실(P_{sl})을 제외한 부분이 고정자 단자에 전달되는 출력에너지(P_{out})가 바로 유도기의 유효전력(P)이다[5-6].

순간 정전에 의해 펌프 구동용 전동기가 발전기로 동작할 경우 운동방정식은 다음과 같다.

$$J \frac{dw_m}{dt} + Dw_m = T_m - T_e \quad (2)$$

여기서 J 는 회전자 관성 모멘트, w_m 은 회전자 각속도, D 는 마찰계수, T_m 와 T_e 는 각각 유도기에 작용하는 기계 토크와 전자계 토크이다. 식 (2)에서 전동기(T_{em})와 발전기(T_{eg})로 동작할 경우의 전자계 토크는 다음과 같이 유도기의 d, q축의 고정자 및 회전자 전류와 상호인덕턴스, 극수로부터 구할 수 있다[5-6].

$$T_{em} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{p}{2} L_m (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (3)$$

$$T_{eg} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{p}{2} L_m (i_{ds} i'_{qr} - i_{qs} i'_{dr}) \quad (4)$$

식 (2)의 양쪽에 각속도를 곱할 경우 식 (5)와 같이 유도기의 전력 흐름을 알 수 있다.

$$Jw_m \frac{dw_m}{dt} + Dw_m^2 = P_m - P_g \quad (5)$$

식 (5)에서 오른쪽 항은 전력의 흐름이고, 왼쪽 항은 각운동량을 나타내고 있다. 여기서 유도기의 회전자에 전달되는 기계적 에너지는 P_m 이고, 유도기의 전력 P_g 는 유효전력과 무효전력의 성분으로 구성된다.

순간 정전이 발생할 경우 펌프에 의해 발생한 기계 에너지가 유도기의 회전자에 의해 공극을 거쳐 고정자에 나타나는 유효전력(P)과 회전자계를 발생시키는데 필요한 무효전력(Q)은 각각 다음과 같다.

$$P = Re \left(\frac{3}{2} \times V \times \bar{I}_s \right) \quad (6)$$

$$Q = Im \left(\frac{3}{2} \times V \times \bar{I}_s \right) \quad (7)$$

유도기가 전동기로 운전할 때와 발전기로 운전할 때 유효전력의 방향은 서로 바뀌지만, 자속을 만들기 위해 필요한 무효전력은 회전자의 방향과 관계없이 항상 같은 방향으로 흐르게 된다. 순간정전이 발생한 경우 무효전력은 공급되지 않지만, 역률 보상을 위해 설치한 콘덴서에 의해 전원측을 대신하여 유도기의 자화에 필요한 무효전력을 공급하게 된다.

순간정전에 의한 펌프 구동 유도기의 역회전에 의해 전원측으로 흐르는 경우와 전원이 다시 회복되어 펌프를 구동하기 위해 전원에 투입될 때의 전류는 그림 3의 등가회로에서 고정자에 흐르는 전류 I_s 로부터 구할 수 있다.

$$I = \frac{2}{\sqrt{3}} Re(I_s) \quad (8)$$

3. 계산 및 결과 분석

그림 2에서와 같이 펌프를 구동하는데 사용된 3상 4극 75kW 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

그림 2와 같은 조건의 회로에서 유도전동기가 기동한 후 운전하다가 순간 정전이 발생한 경우 발전기로 운전하다가 다시 전원이 복구하여 전동기로 재운전할

때의 전력, 토크 및 돌입전류와 전압변화를 분석하였다. 과도 상태의 분석에는 전자계과도해석 프로그램을 적용하였다[7]. 본 프로그램에서 유도기의 포화특성을 고려하기 위해 전동기 결선은 Δ 로 선택하였다.

Table 1. Induction motor parameters

Parameters	Values
stator resistance, R_s	0.285 Ω
rotor resistance, R_r	0.225 Ω
stator leakage inductance, L_{ls}	0.0015H
rotor leakage inductance, L_{lr}	0.0012H
magnetizing inductance, L_m	0.048H
connection method	delta

그림 4는 유도기가 전동기로 운전하다 순간 정전이 발생하여 발전기로 운전하다 다시 전원이 복구하여 전동기로 운전할 때의 부하토크(○)와 유도기의 토크(□) 변화를 나타낸 것이다.

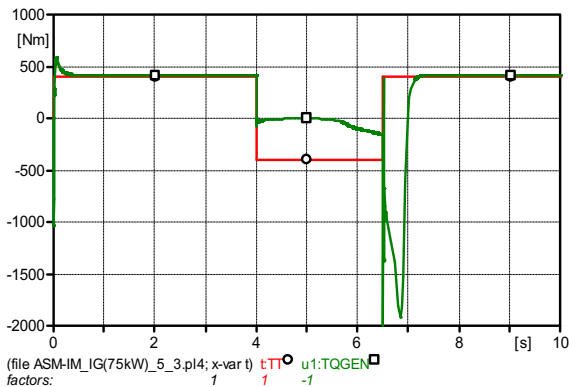


Fig. 4. Electromagnetic torque of the induction motor and the load torque

그림 4에서 동기속도에 가깝게 운전하고 있는 전동기는 약 4초에서 6.5초에 이르기 까지 약 2.5초 동안 일시적인 정전으로 있다가 다시 전원이 복구되어 펌프를 재운전하게 된다. 전동기로 운전할 때의 부하 토크는 400Nm로 전동기의 토크도 같은 크기로 동작하지만, 순간 정전이 발생할 때 부하 토크는 위치에너지의 반전에 의해 발전기로 동작하는 토크가 발생하는

데, 이때 유도기의 토크는 정전초기에는 부하토크의 크기에 대해 거의 제로에 가깝지만, 일정 시간이 지날 경우 발전기로서 동작하는 토크가 나타난다. 약 6.5초에서 전원이 회복할 때 부하토크에 대해 유도기의 토크는 전동기의 기동 시간에 비해 약 0.5초로 매우 짧게 순간적으로 발전기로 동작하다 부하 토크에 대응할 수 있도록 토크로 반전됨을 알 수 있다. 이때 발생하는 유도기의 토크는 정격에 비해 거의 4배 이상으로 유도기의 축에 기계적인 스트레스로 작용할 수 있다. 그림 5는 정상운전, 순간정전, 전원 회복 후의 유도기에서의 전압(○)과 회전수(□) 변화를 나타낸 것이다.

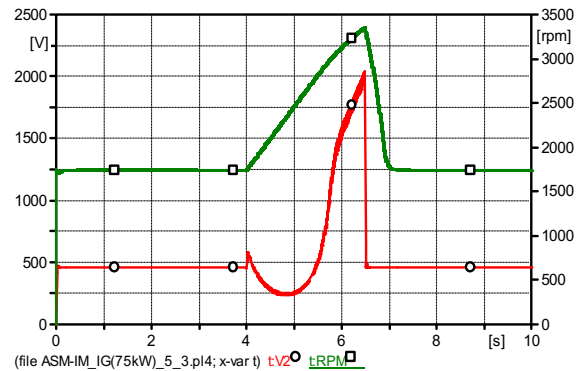


Fig. 5. Voltage and rotation speed

그림 5에서 전동기로 운전하는 4초까지는 회전속도와 전압은 거의 일정하지만, 순간정전이 발생하는 순간부터 펌프의 위치에너지 반전으로 회전수가 동기속도 이상으로 상승함에 따라 전원이 공급되지 않은 상황에서 일시적으로 전압이 약간 감소하다가 회전자가 속도가 높아짐에 따라 전압은 점차 더욱 상승한다.

콘덴서는 자화전류의 일부를 제공하는데 사용될 수 있다. 일시적인 정전이 발생할 경우 역률 보상용 콘덴서는 자화전류를 제공하여 자기여자 또는 발전기로 동작하게 된다. 유도기에서 발생하는 전압의 크기는 커패시터 전류와 회전자의 속도에 따라 달라진다[4].

전원이 다시 회복하는 6.5초부터 펌프의 회전수는 점차 감소하고, 계통에 연결되는 순간부터 전압은 정격전압으로 바로 복구된다. 순간 정전시 발전기에 전

압이 나타나는 이유는 유도기의 잔류자속에 의한 것으로 발생전압의 크기는 회전수에 비례하기 때문이다. 순간 정전시 발생한 전압의 정격전압의 거의 4.4배에 해당하는 것으로서 콘덴서와 연결된 설비에 전압스트레스로 작용할 수 있다.

그림 6은 유도기가 정상적으로 운전하다 순간정전이 발생하고서 다시 전원이 복구한 경우에서의 유효전력(○), 무효전력(□) 그리고 피상전력(△)의 변화를 나타낸 것이다.

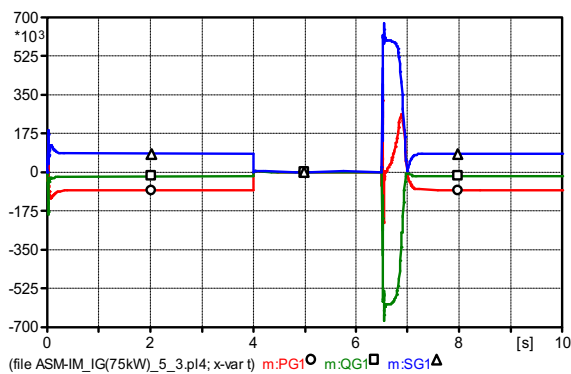


Fig. 6. Power change

그림 6에서 유도기가 전동기로 정상적인 운전시 전력의 변화가 없지만, 순간 정전하에서 동작하는 유도기는 아주 낮은 전력만 존재하고, 다시 전원의 회복에 의해 펌프부하를 운전하는 순간 즉, 발전에서 전동으로 순간에는 돌입전류에 의한 성분 때문에 큰 전력의 변화가 발생한다. 이는 그림 4에서와 같이 순간정전이 후 전원이 복구할 때 발전기에서 전동기로 순간적으로 아주 짧게 발생하는 큰 토크는 축에 기계적인 스트레스로 작용할 수 있다.

그림 7은 순간정전동안 발생하는 유효전력(○), 무효전력(□) 및 피상전력(△)의 크기를 나타낸 것이다.

그림 7에서 알 수 있듯이 순간정전하에서 전력의 발생은 큰 부하에의 전원으로서는 부족하나 전동설비와 같은 설비에는 충분한 전력공급원이 될 수 있다.

그림 8은 순간정전 전후의 유도기의 자화전류와 전압의 변화를 나타낸 것이다.

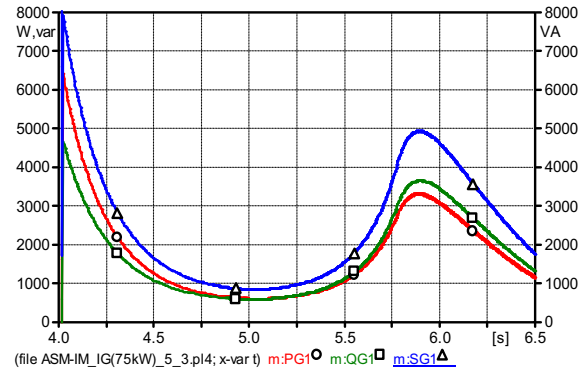


Fig. 7. Power in the momentary power failure

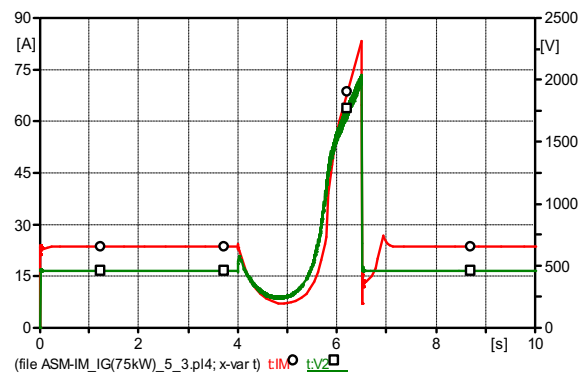


Fig. 8. Magnetization current and voltage

그림 8에서와 같이 순간정전이 발생한 다음 초기에는 자화전류가 약간 감소하는 이유는 단자전압에서의 감소 때문이고, 회전자가 동기속도 이상으로 증가함에 따라 자화전류는 점차 증가하다, 전원이 회복되어 복구되는 순간에는 아주 높은 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 전원이 회복하는 순간에서의 전류는 정격의 10배에 해당하는 초기과도 전류와 6.7배에 해당되는 과도전류가 흐르는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 상하수도 시설에 설치된 펌프 구동용 유도 전동기가 순간정전에 의해 발전기로 동작할 때 전압, 전류, 전력 및 토크의 변화를 분석하였다.

순간 정전이 발생할 경우 유도기에 연결된 펌프는 위치에너지가 반전되어 동기속도 이상으로 회전하게

된다. 유도기가 동기속도 이상에서 자기여자에 해당 되는 성질에 의해 전압이 상승할 때 회전속도의 상승에 의해 정격보다 매우 높은 전압이 발생하므로 연결 시스템에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있다. 순간 정전이 끝나고서 펌프를 구동하기 위해 전원이 다시 복구될 때 축에 전동기 기동과 다르게 아주 짧은 시간 동안 큰 토크가 발생하므로 기계적인 스트레스로 작용함도 알았다. 순간 정전 동안에 발생된 전력은 커지 않지만, 전등과 같은 낮은 용량의 설비에 전원으로 사용할 수 있는 전력이 발생함도 알 수 있었다. 순간 정전에 의해 유도기의 자화전류는 전압강하로 낮아지다가 다시 회전속도의 상승에 의해 정격전압의 수배에 해당할 만큼 커짐도 확인할 수 있었다.

References

- [1] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002.
- [2] Roger C. Dugan et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 2002.
- [3] Jong-Gyeum Kim et al., "A study on the generating operation of induction motor for the pump drive at the power outage", KIEE Annual Spring Conference, pp.33. 2015.
- [4] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005.
- [5] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems", CRC Press, 2004.
- [6] Ion Boldea, "Variable Speed Generators", Taylor & Francis, 2006.
- [7] 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 근무. 1988~1996년 한국수자원공사(K-water) 근무. 2013~2014년 미국 Wisconsin-Madison Univ 방문교수. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 한국조명전기설비학회 사업이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr