



상시 및 정전시에도 안정적인 운전이 가능한 유도발전기의 운전방법

김종겸^{1)*}

Operating Method of Induction Generator Capable of Stable Operation at All Times and Power Failure

Jong-Gyeum Kim^{1)*}

Received 13 January 2018 Revised 2 August 2018 Accepted 6 August 2018

ABSTRACT A squirrel cage induction generator has been applied mainly to small-to medium-sized hydro power plants because of its simple and rugged structure, low construction cost and easy maintenance. The induction machine can be used for both the motor and generator before and after the synchronous speed. The induction machine must receive reactive power continuously from the outside to produce a rotating magnetic field. The reactive power is supplied mostly from the power supply side, but because the power factor is lowered when its amount is large, a capacitor is also attached to the load side terminal. In addition, the amount of reactive power of the capacitor installed to compensate for the power factor in the case of power failure is insufficient to generate the rotating field of the induction machine. Therefore, additional reactive power must be supplied to supply power continuously to the load. This study proposes a method to provide stable power to the customer by compensating for the insufficient reactive power by installing a capacitor in addition to the capacitor installed to compensate for the power factor when a generator operates the induction machine in the case of power failure.

Key words Excitation(여자), Induction Generator(유도발전기), Power failure(정전), Reactive Power(무효전력), Slip(슬립), Synchronous speed(동기속도)

Nomenclature

P : Active power, W
Q : Reactive power, var
S : Apparent power, VA

1. 서론

에너지 수요의 지속적인 증가로 기존의 에너지원으로 공

급하는데 한계가 있다. 그래서 신·재생에너지를 이용하여 증가하는 에너지 수요에 대처하기 위한 연구개발이 지속적으로 진행되고 있다.^[1]

도심지역이나 공장 등 산업 및 상업시설 등이 밀집한 곳에서는 전력사용량도 많고, 사용시간대에 따라 순시전력의 변화도 높은 편이지만, 도서 벽지나 산간지역의 경우 전력 소비가 많지 않은데다 시간대에 따른 사용의 변화가 크지 않은 편이다. 특히 주간에는 전기를 사용하지만, 야간에는 필요한 최소한의 전기만 필요로 하므로 이와 같은 곳에 양수발전을 적용할 경우 원거리의 특고압의 선로를 설치하여 전기를 공급하는데 부담이 되는 초기 투자비와 운영비를

1) Gangneung-Wonju National University

*Corresponding author: jgkim@gwnu.ac.kr

Tel: +82-33-760-8785

Fax: +82-33-760-8781

고려할 경우 저압의 선로를 사용하면 전력손실의 저감, 초기 투자비와 유지관리비를 더 줄일 수 있다.

물이 가지고 있는 위치에너지를 유동에너지로 변환한 다음 수차에 의한 기계에너지를 발전기로 전기에너지로 변환하거나 역변환 하는데 동기와 유도기가 사용 가능하다.^[2~5] 유도발전기는 동기발전기에 비해 제작비용이 저렴하고, 튼튼하며, 유지 및 보수가 쉬워 출력이 높지 않는 발전소에 주로 많이 적용하고 있다.^[2~5]

심야에 남은 전력을 이용하여 상부 저수조에 물을 올린 다음 주간에 필요한 전력을 얻기 위해 유도발전기를 사용할 경우 여자를 위해 무효전력이 필수적이다. 유도기를 전동 또는 발전으로 운전할 경우 필요한 자화에 필요한 무효전력은 전원측에서 공급받으면 되지만, 정전 등으로 공급받지 못할 경우 외부로부터 공급되어야 한다. 따라서 커패시터와 같은 조상설비로 무효전력을 유도기에 공급하여 지속적인 자속의 발생으로 부하에 항상 전원을 공급할 수 있다. 그러나 정전이 발생한 경우 자화에 필요한 무효전력은 발전기 단자에 부착된 역률 보상용 커패시터 용량만으로는 부족하여 부하에 필요한 전력의 공급이 어렵다.

그래서 본 논문에서는 부하변화가 크지 않은 도서지역이나 산간지역에 소용량의 유도발전기로 정전이 발생하더라도 수용가에 안정적으로 전력을 공급하기 위해 추가적으로 필요한 무효전력의 값을 제시하여 전력이 항시 공급될 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 계통 구성과 유도발전기

2.1 계통 구성

그림 1은 저압 수용가에 상시 전원공급이 가능하도록 구성한 회로로 전원과 부하측의 중간에 펌프-수차와 발전기가 연결되어 있다. 심야에 펌프-수차로 상부 저수조에 물을 퍼 올리기 위해 동기 대신에 유도기를 사용할 경우 회전자계를 지속적으로 유지하기 위해 전원측 또는 자체적으로 무효전력의 확보가 중요하다. 수용가에 전력을 공급하기 위해서는 항상 전원측에서 정전이 일어나지 않는 조건이 되어야 한다. 그러나 도서 지역이나 산간의 경우 종종 정전 등이 발생할 수 있다. 만일 정전 등이 발생하더라도 수용가

에 항상 전력을 공급할 수 있는 발전시스템의 구성이 매우 중요하다. 수용가의 부하는 정전시에도 안정적으로 전원공급이 될 수 있도록 하기 위해 유도기의 출력보다 약간 낮은 용량을 설정하였다.

그림 1에서 화살표는 전동기 또는 발전기로 운전할 경우 유효전력(P) 및 무효전력(Q)의 방향을 의미하고, 전력의 기호에서 첨자 s는 전원, L은 부하, g는 발전기, c는 커패시터를 의미한다.

유도기가 전동기와 발전기로 운전할 경우 유효전력 및 무효전력의 방향은 서로 반대가 되지만, 커패시터의 경우 항상 자화에 필요한 무효전력을 방향의 전환 없이 발생하고 있다.

그림 1에서 정전이 발생하지 않고 정상적으로 운전할 경우 전원, 부하 그리고 유도기의 자속 발생에 필요한 무효전력은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$Q_s = Q_L + Q_g - Q_c \tag{1}$$

여기서 Q_s 는 전원측 무효전력, Q_L 은 무하에 필요한 무효전력, Q_g 은 발전기의 자화에 필요한 무효전력, Q_c 역률 보상을 위한 커패시터의 무효전력값이다.

만일 전원측에서 정전등과 같은 경우가 발생한 경우 부하 및 유도기에 필요한 무효전력이 공급되도록 발전기 단자에 커패시터가 추가되어야 한다.

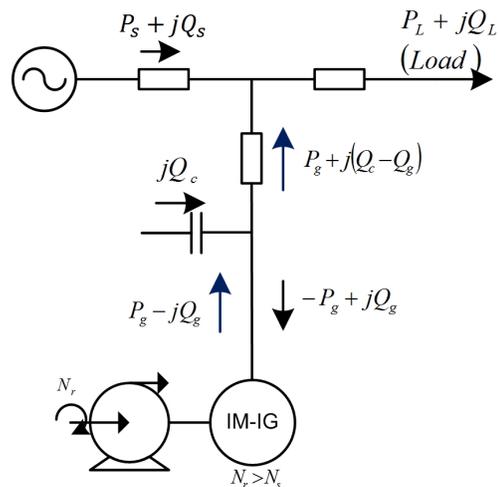


Fig. 1. Power flow diagram of power supply, load and generator

2.2 유도발전기

본 연구에 사용된 저압 3상 유도발전기의 정격사양은 표 1과 같다.

그림 2는 표 1에서 제시한 보통 농형 유도기의 속도-토크 특성 곡선을 나타낸 것이다.

그림 2에서 실제 전동기와 발전기로 운전하는 영역은 각 속도가 1[pu]에 가까운 범위의 직선 영역이다. 그림에서 1[pu]의 각속도를 기준으로 우측 속도부분은 발전기 운전 영역이고, 좌측 속도 부분은 전동기로 운전되는 영역이다. 즉, 최대토크(breakdown torque)와 푸시오버 토크(Pushover torque)영역사이이다. 회전자의 속도가 동기속도를 약간 초과할 경우 Pushover 토크는 전동기의 최대 토크의 거의 3배의 크기에 이르는 특성을 갖게 된다. 이 영역에서 운전할 경우 발전기의 속도가 증가하여 출력은 상대적으로 감소하게 된다.^[2]

회전자의 속도가 동기속도 이상일 경우 유도기는 전동기영역에서 발전기 영역으로 변환되어 유효전력의 방향을

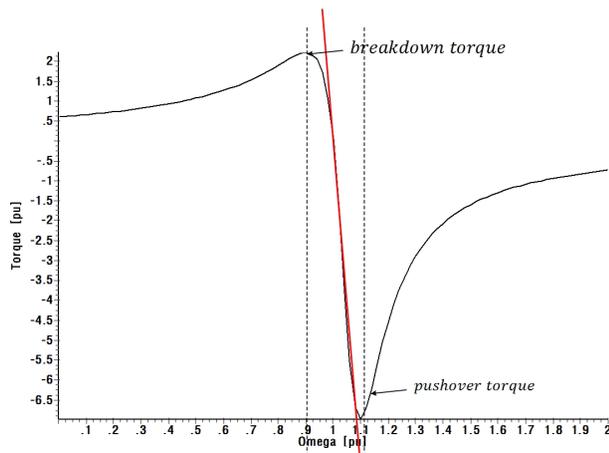


Fig. 2. Torque-speed characteristic with motoring-generating operation area

Table 1 Induction generator specification

Quantity	Value
Voltage	380V
Rated output	75kW (100HP)
Pole	4
Power factor	0.85
Efficiency	90%

바꾸게 된다. 회전자의 속도가 동기속도 이하일 경우에는 전동기로 동작하지만, 터빈의 회전속도가 동기속도 이상 ($N_r > N_s$)일 경우 슬립은 마이너스가 되어 축에 가해진 기계적인 에너지가 식 (2)와 이 전동기와는 반대방향으로 발전기로 동작하여 전력을 발생하게 된다.^[2,6]

$$P = -m \frac{r_r}{s} I_r^2 \tag{2}$$

여기서 m 은 상수이고, r_r 은 회전자 저항, I_r 은 회전자에 흐르는 전류이다.

2.3 여자 조건

그림 3은 농형 유도발전기의 T형 등가회로도를 나타낸 것이다.^[4,5,7] 그림 3에서 r_s , r_r 은 각각 고정자 및 회전자 저항, L_{ls} , L_{lr} 은 각각 고정자 및 회전자 누설인덕턴스, L_m 은 자화인덕턴스, C 는 커패시터 커패시턴스, I_s , I_r , I_m , I_c , I_L 은 각각 고정자 전류, 회전자 전류, 자화전류, 커패시터 전류 및 부하의 무효전류이다.

그림 3에서 전압 전류 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} U_m = -jX_m I_m \\ U_c = -jX_c I_c \end{cases} \tag{3}$$

그림 4는 자여자 유도발전기의 자화특성 곡선으로 직선 부분은 커패시터에 의한 전류와 전압의 변화를 나타낸 것이고, 비선형 곡선은 자화전류에 의한 전압의 변화를 나타낸 것이다. 유도발전기 단자전압의 크기는 자화전류곡선과 커패시터 곡선의 교차점에 의해 결정된다. 그래서 부하에 전력을 공급하기 위한 전압의 크기에 맞는 포인트를 찾는

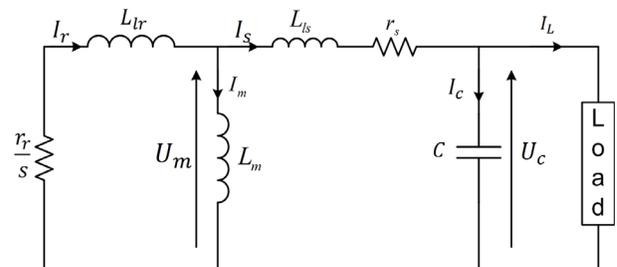


Fig. 3. Simplified equivalent circuit diagram of Induction generator

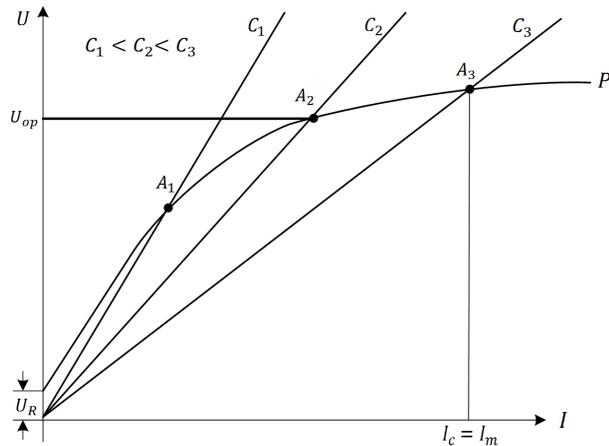


Fig. 4. Determination of the operating point of induction generator using magnetization and capacitor characteristics

것이 매우 중요하다. 그림 4에서 A_1 포인트는 정격전압의 조건을 충족하지 않지만, A_2 는 커패시터 전류와 자화전류의 크기가 충족하는 포인트로 정격전압의 최소 포인트가 된다. A_3 포인트는 자화곡선이 포화된 것으로서 전압이 약간 상승하는 지점이다. 같은 자화곡선에서 기존 커패시터에 추가할 경우 단자전압은 약간 상승하게 된다.

그림 4에서 I_m, I_c, I_L 은 각각 자화전류, 커패시터 전류 및 부하의 무효전류이고, U_R 은 잔류전압으로 전압상승의 초기값이다.

발전기의 전압이 확보되어 부하에 전력을 공급하기 위한 조건에서 자화전류와 커패시터 전류가 같으므로 다음과 같이 전압과 리액턴스로 표현 가능하다.

$$\left(\frac{U}{X_c}\right) = \left(\frac{U}{X_s + X_m}\right) \quad (4)$$

그래서 유도기의 여자를 위해 설치해야 하는 커패시터의 리액턴스는 발전기의 전체 리액턴스와 같아야 한다.

$$\frac{1}{wC} = w(L_s + L_m) \quad (5)$$

유도발전기의 여자에 필요한 최소 커패시터의 용량은 위 식으로부터 구하면 다음과 같다.

$$C_{\min} = \frac{1}{w^2(L_s + L_m)} \quad (6)$$

커패시터의 최대값은 유도발전기의 최대 부하상태와 부하전류의 무효전류 성분에 의해 결정된다. 이때 커패시터 전류에 부하전류의 무효 성분을 더하면 된다. 유도기의 결정된 역률에 대해 1.2배의 공칭전류까지 발전기 과부하 운전이 가능하므로 특성 전류 방식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_c = I_m + I_{load} \cos\phi \quad (7)$$

따라서 최대 가능한 커패시터 용량은 다음과 같다.

$$C_{\max} = \frac{I_m + I_{load} \cos\phi}{wU} \quad (8)$$

결과적으로 유도발전기에 부착할 수 있는 커패시터의 용량은 다음과 같은 범위에서 선택할 수 있다.

$$\frac{1}{w^2(L_s + L_m)} < C < \frac{I_m + I_{load} \cos\phi}{wU} \quad (9)$$

3. 계산 및 결과 분석

본 연구에서는 농형 유도 유도발전기를 적용하여 상시 및 정전시에도 부하에 전력을 공급할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 전력의 흐름, 전압 및 전류의 동작 특성에 대해 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 사용하였다.^[8]

표 2는 표 1에 제시된 용량의 농형 유도발전기에 대한 파라미터를 나타낸 것이다.

수용가 부하는 3상 75kVA로 역률은 0.8이 연결된 것으로 설정하였다. 유도기에는 무효전력을 보상할 수 있는 동시에 자화에 필요한 크기를 유도기의 단자에 병렬로 연결하였다.

전동기로 동작하는 것을 발전기로 동작할 때의 변화를

Table 2. Parameters of Induction Machine

Items	Values
r_s [Ω]	0.116578
l_s [H]	0.0002364
l_m [H]	0.006935
r_r [Ω]	0.020795
l_r [H]	0.0002364

확인하기 위해 6초까지는 전원측에서 전원을 공급받고, 0.5초가 지난다음 6.5초 이후에는 수차에 의한 기계에너지가 축에 전동기와는 크기는 같지만, 반대 방향의 토크를 인가하였다. 이런 조건에서 부하에 전력을 공급할 때의 유도기의 회전속도, 전압 및 전류 그리고 전력과 역률의 변화를 모의하였다. 수용가의 부하가 안정적으로 동작하기 위해서는 주파수와 전압의 안정이 매우 중요하다. 그래서 유도기가 발전하여 부하에 전원을 공급할 때 발전기의 속도를 우선 해석하였다.

그림 5는 유도전동기가 정상적으로 운전하다가 6초에 정전 후 0.5초 이후 6.5초 이후 발전기로 동작할 때의 회전속도 변화를 나타낸 것이다. 정전이 일어나기 전까지는 동기속도(1,800[rpm])보다 약간 낮은 속도로 회전하지만, 정전 이후 발전기로 운전할 때 순간적으로 회전속도가 높아진 다음 동기속도로 복귀하지 않고 높은 상태를 유지함을 알 수 있다. 이럴 경우 부하기에 나쁜 결과를 초래할 수 있으므로 발전기의 회전속도를 동기속도보다 약간 높은 값에서 운전하도록 방법을 찾아야 한다.

그림 6은 그림 5와 같은 운전조건에서 전동기 및 발전기로 운전할 때의 상전압(V₃:○) 및 전류(IA:□)의 크기를 나

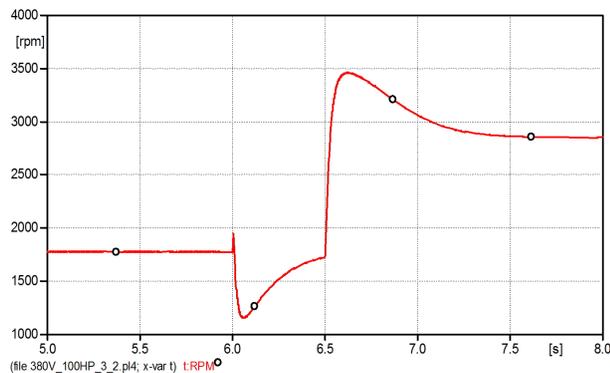


Fig. 5. Rotation speed

타낸 것이다. 발전기로 운전을 시작한 이후(6.5초 이후) 전압은 차이가 나지 않고, 전류도 감소함을 알 수 있다. 발전기로 운전할 때 발전기의 단자전압이 부하의 단자전압보다 높지 않아 부하에 정상적으로 전력을 공급하기가 어렵다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 그림 5 및 6과 같은 조건(6초에서 정전, 6.5초에서 발전 운전)에서 유도발전기의 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것이다. 유효전력은 전동기(P=-76kW)와 발전기(P=13kW)의 운전에 따라 서로 반대가 되고, 무효전력은 외부로부터 발전기에 공급되어야하므로 같은 부호로 표시되지만, 전원측에서 공급될 경우(Q=-54kvar)에 비해 정전으로 발전기 단자에서만 사용될 경우(Q=-11kvar)가 되었다. 유효전력은 전동기와 발전기로 운전될 때 서로 반대이므로 역률 부호도 전동기로 운전할 때(pf=-0.81)와 발전기로 운전할 때(pf=0.74) 서로 반대가 된다. 그림 7에서 발전기에서 발생하는 유효전력은 13[kW]로 부하에 전력을 공급하기에는 매우 부족함을 알 수 있다.

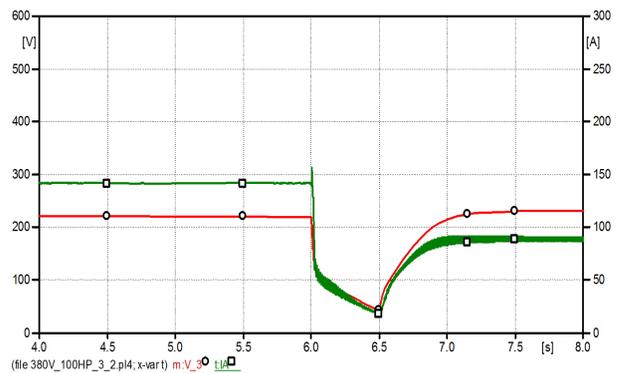


Fig. 6. Voltage and current

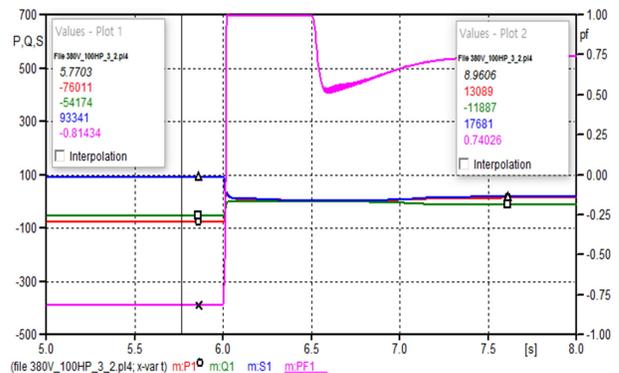


Fig. 7. Power and power factor

유도기가 발전기로 동작하면서 부하에 주파수와 허용범위 안에서 전압을 유지시킬 수 있도록 발전기의 주파수가 동기속도를 초과할 때 식 (9)에서 제시한 범위내의 값에 해당하는 커패시터를 발전기 단자에 추가로 투입하여 회전속도를 줄이면서 전압의 확보와 안정된 주파수로 전력을 공급하는 방법을 제안하였다.

그림 8~10은 발전기의 회전속도가 동기속도를 초과할

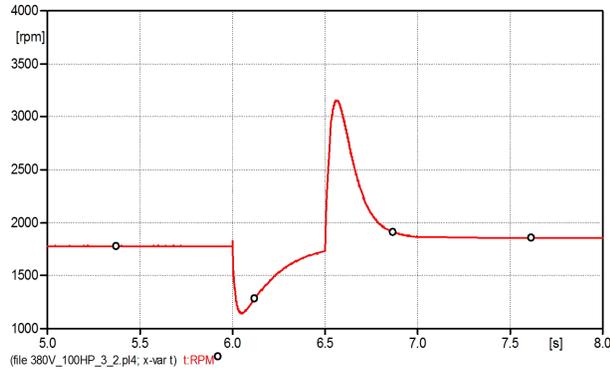


Fig. 8. Rotation speed

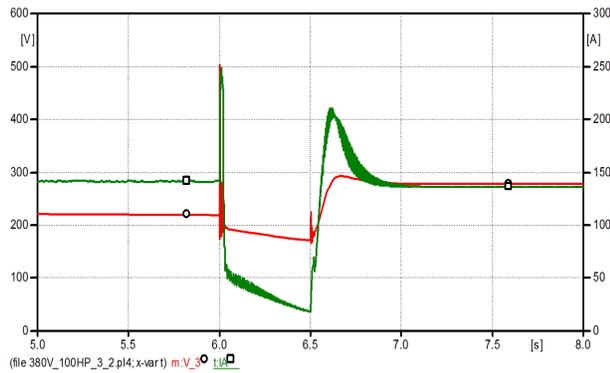


Fig. 9. Voltage and current

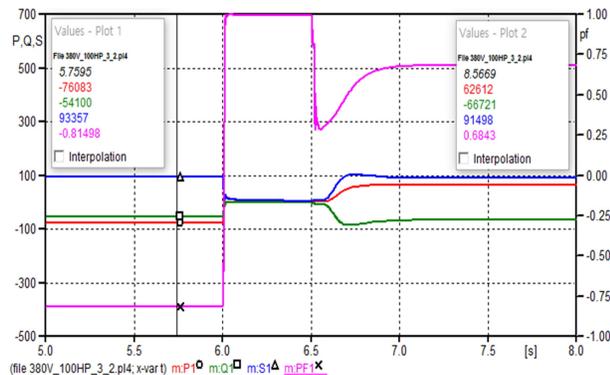


Fig. 10. Power and power factor

때 같은 무효전력을 추가로 연결하도록 한 경우 회전속도, 전압 및 전류 그리고 전력과 역률의 변화를 모의한 결과이다.

그림 8은 전동기로 동작하는 경우 회전자 속도는 1,778 [rpm]로 회전하지만, 토크의 반전에 의해 발전기로 운전되는 경우 순간적으로 회전속도가 높아지나 바로 1,820[rpm]으로 회전하게 된다. 즉 회전속도가 동기속도 이상으로 운전하기 때문에 슬립은 부(-)의 값이 되어 발전기로 동작하여 전력을 만들어낼 수 있음을 알 수 있다.

그림 9는 전동기나 발전기로 운전되는 경우 전류(IA:○)의 크기에는 큰 차이가 없으나 상전압(V_3:○)은 발전기로 운전하는 경우에 전동기로 운전하는 것에 비해 약간 높은 값을 유지하기 때문에 부하로 전력이 제공될 수 있다.

그림 10은 전동 및 발전 운전시의 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것이다. 전동기로 운전(P=-76kW)될 때와 발전기로 운전(P=62kW)될 때 유효전력(P1:○)의 진행방향은 서로 반대가 된다. 따라서 전동기로 동작하는 유도기가 정전시에도 부하의 유효전력보다 높기 때문에 부하에 전력을 공급할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 발전기로 운전할 경우가 전동기로 운전하는 경우에 비해 유효전력이 약간 낮으므로 효율은 떨어진 것을 알 수 있다. 정전이 발생하기 전의 무효전력(Q=-54kvar)에 비해 정전 이후 추가로 커패시터를 추가하여 운전할 때 오히려 증가(Q=-66kvar)한 것을 알 수 있다. 그래서 역률도 발전기로 운전시 함께 낮아지게 된다.

4. 결론

본 연구는 도심지로부터 약간 떨어진 곳에 저압으로 전력을 공급하는 수용가에 정전이 발생하더라도 수차에 연결한 유도기를 동기속도 이상으로 운전하여 부하에 전원을 공급할 수 있는 방법을 제시한 것이다.

전원측으로부터 유도발전기에 필요한 무효전력을 상시 공급받는 경우에는 수차를 동기속도 이상으로 회전하면 전력생산이 가능하지만, 정전이 발생하면 일시적으로 동기속도보다 매우 높은 속도로 회전하는데 발전기에 자화에 필요한 무효전력의 부족으로 부하의 운전이 필요한 전력공

급이 어렵다. 이를 해결하기 위해 발전기가 동기속도 이상으로 회전하는 경우 유도기의 단자에 추가로 커패시터를 연결하면 발전기의 슬립을 안정된 범위내에 유지하면서 부하에 전력을 공급할 수 있는 여자 조건을 찾아내었다.

본 연구결과는 전원사정이 어려운 해외 미니급 수력발전소나 도서지역 등에 유지보수가 쉬운 유도발전기로 수용가에 필요한 전력공급설비에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] New & Renewable Energy, 2016, MOKE & KEMCO.
- [2] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, 1997, "Application Guidelines for Induction Generators", in Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives, Milwaukee, Wisconsin, Paper WC1/5.1-WC1/5.3.
- [3] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, 2004, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press.
- [4] Jong-Gyeum Kim, 2015, "Analysis of Voltage Drop due to Change in Induction Generator Output during Grid Connection", New Renew. Energy, Vol.11, pp. 40-45.
- [5] Jong-Gyeum Kim, 2014, "Analysis for Voltage Fluctuation and Power Flow at the Grid-Connected Time of Squirrel-Cage Induction Generator", KIIEE, Vol.28, No.6, pp.45-51.
- [6] Charles I. Hubert, "Electric Machines : Theory, Operation, Application, Adjustment and Control", 2002, Prentice Hall.
- [7] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, 2016, "Soft Start-up Characteristics Analysis of Squirrel Cage Induction Generator", KIEE, Vol.65, No.1, pp.103-107.
- [8] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.