

유도발전기 역률 보상 콘덴서와 직렬 리액터의 동작 분석

Operating Analysis of Power Factor Compensation Condenser and Series Reactor in the Induction Generator

김 종 겸* · 박 영 진*
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

Abstract - Induction generator is always required reactive power in order to generate a rotating magnetic field as an inductive load. The reactive power must be continuously supplied to the induction generator as well as load of distribution system from the power supply side. So the power factor of the power supply side during the induction generation operation is low. Condenser is installed in order to raise the low power factor of the induction generator. Switching transients occurs when the power supply of the capacitor is turned on in order to ensure the low power factor. When using the reactor in series with the capacitor in order to reduce the influence of switching transient, it can affect the reactive power by the condenser voltage rises. In this study, we analyzed the operating characteristics for power and power factor of induction generator in accordance with the presence or absence of the application of the serial reactors for switching transients reduction of the condenser and the condenser for power factor correction.

Key Words : Condenser, Induction generator, Power factor, Reactive power, Reactor

1. 서 론

청정에너지에 대한 관심 증가는 수력에너지의 개발 보급과 밀접하게 관련이 있다. 수력에너지는 설치시 다른 에너지에 비해 다소 비용이 높지만, CO₂ 배출량이 매우 낮고, 설치 후 운전비용이 매우 낮으며, 사용연한이 상대적으로 매우 길어 경제적인 에너지 발생설비로 평가되고 있다[1].

수력발전설비의 발전용량이 클 경우 동기발전기를 사용하고 있지만, 용량이 천 kW 전후의 발전소에도 최근 유도발전기를 많이 적용하고 있다[2,3]. 유도발전기는 동기발전기와 달리 자화를 위해 지속적으로 전원측으로부터 무효전력을 공급받아야 한다. 그래서 유도발전기가 운전되는 동안 배전선로에 연결된 지상부하 외에 유도발전기의 자화를 위한 무효전력이 전원측에서 지속적으로 제공되어야 한다[2~6]. 그래서 유도발전기를 배전선로에 연결하여 운전하는 동안 전원측의 역률은 연결하기 전에 비해 낮다. 유도발전기는 유도성 부하이기 때문에 낮은 역률을 보상하기 위해 콘덴서가 필요하고, 기동시 및 계통 연계시 발생하는 높은 전류를 저감하기 위해 기동용 리액터를 설치하고 있다[2,5,6]. 또한 유도발전기의 역률 보상을 위해 커패시터를 적용하는 것이 일반적이지만, 리액터의 설치여부는 엔지니어에 따라 고려되지 않는 경우가 많은 편이다.

유도발전기가 운전되는 동안 회전자계에 필요한 무효전력을 추가로 보충하기 위해 설치하는 콘덴서의 투입시 발생하는 과도 전류를 저감하기 위해 콘덴서에 직렬로 리액터를 사용하는 경우가 있다[7,8,9]. 이때 콘덴서 투입 동작은 순간적이지만, 콘덴서에 연결된 리액터는 발전기 운전동안 지속적인 동작상태가 된다. 콘덴서에 리액터가 연결된 경우 전압 변동이 발생하게 되어 설치한 콘덴서의 무효전력도 변하게 된다[8,9]. 따라서 발전기측과 전원측에 약간의 역률 변화가 발생할 수 있다.

그래서 본 연구에서는 3상 농형유도발전기의 역률개선을 위해 설치한 콘덴서의 스위칭 동작시 발생하는 높은 전류를 저감하기 위해 설치한 리액터의 적용 유무에 따른 발전기와 전원측의 전력 및 역률의 변화를 분석하였다.

2. 시스템 구성

그림 1은 유도발전기의 T형 단상 등가회로도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 R_1 는 고정자 저항, L_s , L_r 는 각각 고정자와 회전자 누설 인덕턴스, L_m 는 자화인덕턴스, R_2 회전자 저항이다. s 는 슬립이며, 회전자가 동기속도보다 빠르게 회전함에 따라 발전기로 동작한다.

그림 1과 같은 유도발전기의 등가회로도는 저항 및 리액턴스 성분으로 지상회로이기 때문에 역률이 낮다. 특히 기동시는 정상 운전에 비해 무효전력이 유효전력보다 크기 때문에 역률이 매우 낮다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea.

E-mail: jgkim@gwnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

Received : October 24, 2016; Accepted : December 2, 2016

유도발전기는 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류에 해당되는 무효전력을 지속적으로 필요로 한다. 이 무효전력은 자가 발전이 아닐 경우 대부분 계통으로부터 공급받아야 한다. 이때 계통에서는 선로에 연결된 부하와 유도발전기에 필요한 무효전력을 공급해야 하므로 역률이 낮다. 따라서 유도발전기에서의 역률이 일정 이하가 될 경우 전력회사에서는 역률을 일정 이상 유지하도록 권고하고 있다[6]. 이때 연결하는 무효전력 보상장치인 콘덴서의 용량이 발전기의 자화에 필요한 용량 이상일 경우 자기 여자 현상이 발생할 수 있으므로 초과하지 않는 범위에서 콘덴서를 설치하여 발전기의 역률을 높일 필요가 있다[3,4,6].

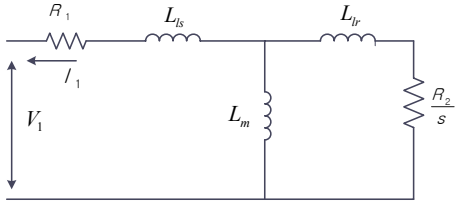


그림 1 유도발전기 T 형 등가회로도
Fig. 1 Induction generator T-type equivalent circuit diagram

수력발전에서 수차의 축동력에 의해 발생한 기계에너지가 유도발전기 고정자에서의 유효전력 및 무효전력은 그림 1의 단상 등가회로도에서 식 (1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = Re \left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1 \right) \quad (1)$$

$$Q = Im \left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1 \right) \quad (2)$$

유도발전기의 역률 개선을 위해 요구되는 무효전력은 다음과 같이 구한다.

$$Q_c = P \times \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}}{\cos \theta_1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \right) [\text{kvar}] \quad (3)$$

여기서 P 는 유도발전기의 출력에 해당되는 유효전력이고, $\cos \theta_1$ 과 $\cos \theta_2$ 는 각각 보상전과 보상후의 역률이다.

이 무효전력으로부터 콘덴서의 용량은 Δ 및 Y 결선에 따라 한상의 파라미터 값이 다르다. 콘덴서 값이 일정하다고 할 경우 전압이 달라지면 또한 무효전력도 변하게 된다. 유도발전기에 추가되어야 할 역률 보상을 위한 콘덴서의 용량은 유도발전기의 무효전력과 단자전압으로부터 다음과 같이 구하면 된다.

$$C = \frac{Q_c \times 10^9}{2\pi f \times V^2} [\mu F] \quad (4)$$

콘덴서 용량은 고압의 경우 300kVA 이상 그리고 저압 경우 50kVA 이상일 경우 콘덴서 자체만으로 고조파와 돌입전류를 제한하는데 어려움이 있어 콘덴서 회로의 보조 협조를 위해 콘덴서에 직렬로 리액터(SR)를 설치하며, 완벽한 방전성능 확보를 위해

방전코일(DC)도 설치하는 경우가 있다[7]. 직렬 리액터의 용량은 대부분의 경우 무효전력의 p%에 해당되는 값을 선정한다. 역률 보상을 위한 콘덴서의 임피던스 X_{c1} 은 무효전력과 단자전압으로부터 다음과 같이 구하면 된다.

$$X_{c1} = \frac{V^2}{Q_c} [\Omega] \quad (5)$$

콘덴서에 직렬로 연결하는 리액터의 임피던스는 정격전압과 역률 보상을 위한 무효전력의 용량에 p%에 해당되는 값을 고려하여 다음과 같이 결정하면 된다.

$$X_{L1} = \frac{(V \times p\%)^2}{Q_{c1} \times p\%} = \frac{V_L^2}{Q_L} [\Omega] \quad (6)$$

여기서 Q_L 과 V_L 은 각각 리액터의 무효전력과 상전압이고, p 는 유도성 리액턴스에 대한 용량성 리액턴스의 비율이다. p 의 값 선정시 고조파에 의한 공진을 피해야 한다.

콘덴서에 리액터를 연결한 경우 스위칭 동작시 발생하는 공진 주파수는 다음과 같이 구하면 된다. 이때 공진주파수는 고조파 발생차수와 일치하지 않도록 해야 한다.

$$f_{res} = 60 \times \sqrt{\frac{X_{c1}}{X_{L1}}} [\text{Hz}] \quad (7)$$

리액터를 콘덴서에 연결할 경우 콘덴서의 전압 V_c 은 다음과 같이 변한다.

$$V_c = \frac{V}{1 - \%p} [V] \quad (8)$$

여기서, X_{L1} 은 콘덴서와 결합되는 리액터의 임피던스이고, V 는 단자전압이다. 리액터와 결합되는 콘덴서의 전압은 실제 정격 전압과 약간 다를 수 있다.

배전계통에서 유도발전기에 공급해야 하는 무효전력을 줄이고 낮은 역률 보상을 위해 설치하는 콘덴서의 용량 선정에는 리액터의 추가에 의한 전압의 변화를 고려해야 한다.

3. 계산 및 결과 분석

유도발전기는 대부분 배전선로의 말단에 설치하는 경우가 많다. 그림 2는 본 연구에 적용한 변전소, 배전선로, 수용가 부하, 유도발전기가 연결된 계통 구성도이다. 변전소에서 발전소에 이르기까지는 수용가 부하가 연결되어 있고, 발전된 전력을 배전선로(D/L)에 공급하기 위해 변압기가 추가로 연결되어 있다. 배전선로에 연결된 수용가 부하(Load)의 용량은 10,000kVA이고, 역률은 0.8이며, 배전선로의 총 길이는 10km로 설정하였다. 유도발전기가 계통에 투입시 돌입전류에 의한 전압강하를 줄이기 위해 리액터 기동방법을 적용하였다.

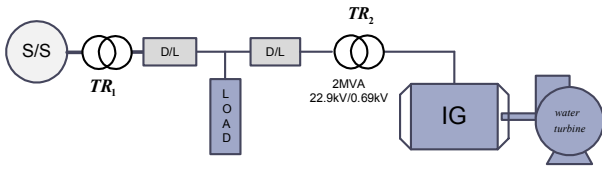


그림 2 유도발전기가 연결된 배전 시스템
 Fig. 2 Induction generator connected to the distribution system

본 연구에 사용된 3상 10극, 690V, 1500kW, 역률 84%, 효율 89.5%인 유도발전기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유도발전기 파라미터

Table 1 Induction generator parameters

parameters	Values
stator resistance, R_1	0.0047738441311 [Ω]
rotor resistance, R_2	0.0054248754493 [Ω]
stator leakage inductance, L_{ls}	5.59797544E-5 [H]
rotor leakage inductance, L_{lr}	5.59797544E-5 [H]
mutual inductance, L_m	0.0016950218713 [H]
inertia moment, J	594 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

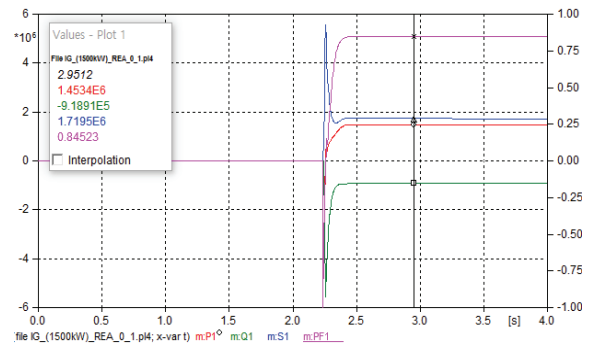
수차의 회전속도가 거의 동기속도가 되도록 가바나로 조정하면 다음 유도발전기가 동기속도 이상으로 운전할 경우 발생된 전력을 배전선로에 공급하였다. 본 시스템의 동작 분석에는 전자계과 도해석 프로그램(EMTP)을 적용하였다[10].

유도발전기가 기동하여 계통에 투입될 때 돌입전류를 제한하기 위해 일정기간 동안 리액터를 연결한 다음 동기속도 근처에서 리액터를 개방하고, 병렬로 연결한 바이패스 스위치를 투입하여 지속적으로 발전된 전력을 계통에 공급하도록 하고 있다[5,6].

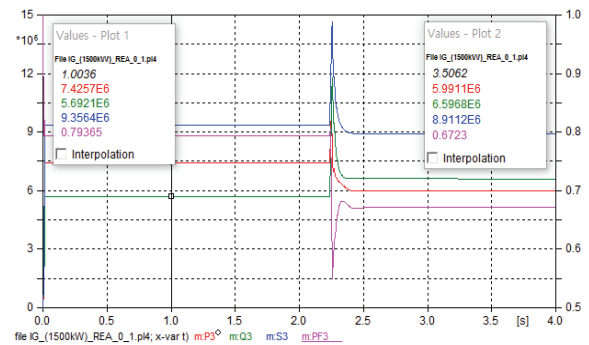
그림 3은 표 1에 제시된 유도발전기를 사용하여 배전선로 말단에 설치하고서 역률 보상 콘덴서를 설치하지 않은 상태에서 운전한 경우 발전기측과 전원측의 전력과 역률의 변화를 각각 나타낸 것이다. 수차에 의해 유도발전기를 동기속도에서 계통에 투입하는 시간은 기동 후 약 2.25초로서 전동기에서 발전기로 전환되는 초기에 일시적인 과도현상이 발생함을 볼 수 있다.

그림 3(a)에서 유도발전기에서 발생하는 유효전력(P1)은 1,453 kW이고, 자화를 위해 필요로 하는 무효전력(Q1)은 -918.9kVAr이며, 피상전력(S1)은 1,719kVA이다. 여기서 무효전력의 부호가 부(-)로 표시한 것은 전원측으로부터 공급받아야 함을 의미한다. 이때 유도발전기의 역률은 0.84 정도로 낮으므로 이를 0.95 정도로 보상하기 위해 식 (3)에서와 같이 구한 콘덴서 용량을 발전기 단자에 추가해야 한다.

그림 3(b)에서는 유도발전기를 계통에 연결하기 전과 연결한 이후 전원측에서의 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것이다. 유도발전기를 계통에 연결하기 전에 7,425kW이던 유효전력(P3)이 연



(a) 발전기측



(b) 전원측

그림 3 보상전의 발전기 및 전원측 전력과 역률

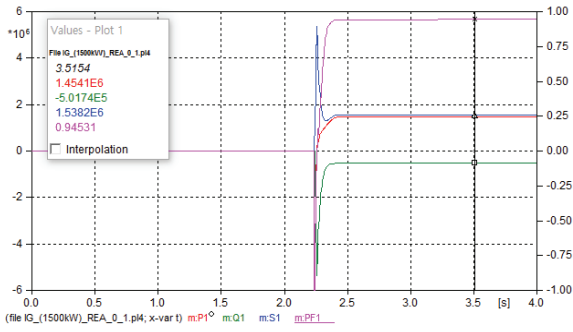
Fig. 3 Power and power factor of generator and power supply side before compensation

결한 이후 5,991kW로 감소한 것은 유도발전기에서 생산된 유효전력이 계통에 역으로 공급되었기 때문이고, 5,691kVAr인 무효전력(Q3)이 6,596kVAr로 증가한 것은 자화에 필요한 무효전력이 전원측에서 유도발전기로 공급되었기 때문이다. 또한 전원측에서 생산되어야 할 9,356kVA의 피상전력(S3)이 8,911kVA로 감소한 것은 유도발전기에 의해 생산된 전력이 계통에 공급되었기 때문이다. 그러나 유도발전기가 계통에 연결되지 않을 때 0.79인 전원측 역률이 연결한 이후에 0.67으로 낮아진 것은 자화에 필요한 무효전력이 전원측에서 발전기로 지속적으로 공급되기 때문이다.

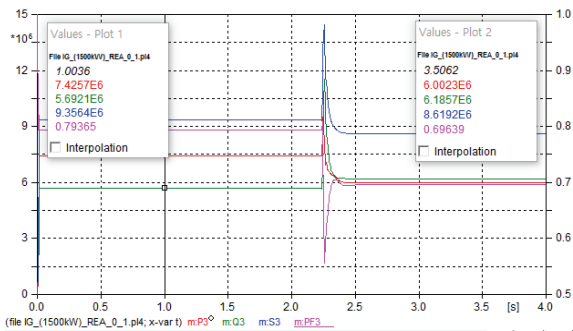
그림 3(a)에서와 같이 유도발전기의 낮은 역률을 0.95 정도로 되도록 설치할 무효전력을 식 (3)으로 구하면 494kVAr가 된다. 이 값은 콘덴서에서 돌입전류를 저감하기 위한 용량 50kVA를 초과한다. 그래서 식 (4)에 대입하여 콘덴서의 파라미터를 구한 다음 유도발전기 단자에 연결하여 해석하였다.

그림 4는 유도발전기의 역률을 보상하기 위해 콘덴서를 연결하고서 해석한 경우 발전기측과 전원측의 전력 및 역률의 변화를 각각 나타낸 것이다.

그림 4는 역률 보상을 콘덴서를 유도발전기 단자에 설치한 이후 전력 및 역률 변화를 나타낸 것으로서 유도발전기에서 발생하는 유효전력(P1)은 역률 보상장치를 설치하지 않은 그림 3(a)



(a) 발전기측



(b) 전원측

그림 4 보상후의 발전기 및 전원측 전력과 역률

Fig. 4 Power and power factor of generator and power supply side after compensation

와 같이 전혀 변화가 없으나, -918.9kVAr 이던 무효전력(Q1)이 -501kVAr 로 감소하였고, $1,719\text{kVA}$ 이던 피상전력(S1)이 $1,538\text{kVA}$ 로 감소함에 따라 역률은 0.845에서 0.945로 향상된 것을 알 수 있다. 그림 4(b)에서 유도발전기 투입전의 전원측 전력과 역률은 그림 3(b)와 비교해서 거의 차이가 없지만, 역률 보상용 콘덴서를 추가한 이후 전원측에서 공급하는 무효전력(Q3)이 약간 감소($6,596 \rightarrow 6,185\text{kVAr}$)하기 때문에 역률(PF3)은 0.672에서 0.696로 약간 증가한 것을 알 수 있다. 발전기측에 역률 보상 콘덴서를 설치한 것에도 불구하고 전원측에서의 역률에 차이가 별로 나지 않는 이유는 계통에 연결된 부하용량에 비해 유도발전기의 무효전력이 상대적으로 높기 때문이다. 전원측의 역률을 높이기 위해 콘덴서 용량을 높일 경우 자기여자 현상을 일으킬 수 있기 때문에 주의가 요구된다.

다음은 발전기의 역률 보상을 위해 설치한 콘덴서의 투입시 스위칭에 의한 과도전류와 유도발전기를 계통에 투입할 때 발생하는 돌입전류에 대한 크기와 지속시간을 분석하였다. 그림 5와 6은 유도발전기를 계통에 연결할 때 역률 보상을 위한 콘덴서의 스위칭 동작시 전류와 발전기의 돌입전류의 크기를 나타낸 것이다.

그림 5에서 콘덴서 투입시 발생하는 스위칭에 의한 과도 전류의 크기는 정격전류의 약 8배가 나타나지만 지속시간은 1사이클 정도에서 정격전류와 같은 크기로 감쇄함을 알 수 있다. 그림 6에서는 유도발전기를 동기속도 근처에서 계통에 투입할 때 발생

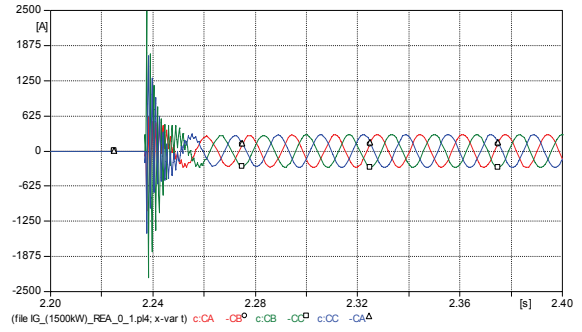


그림 5 역률 보상 콘덴서 투입시의 전류

Fig. 5 Transient current during switching of power factor compensation capacitor

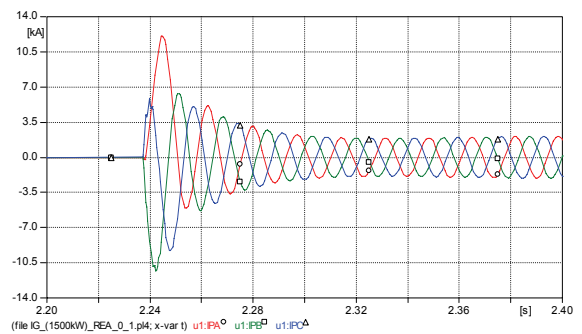


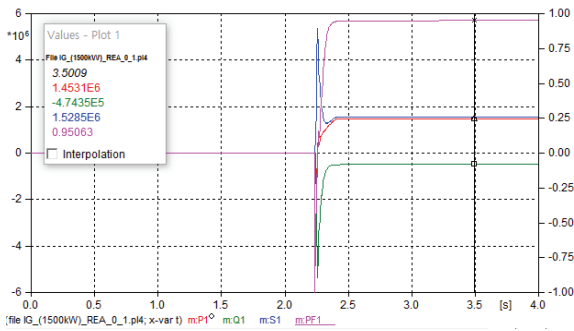
그림 6 계통 연계시의 돌입전류

Fig. 6 Inrush current at the time of grid-connection

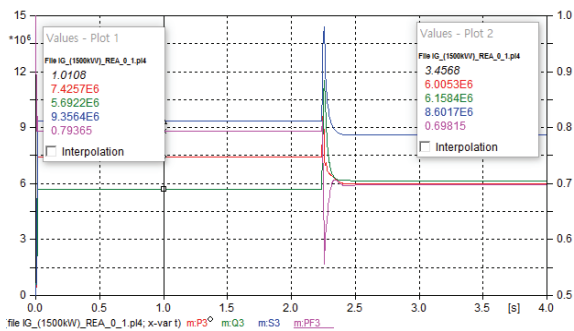
되는 돌입전류는 정격전류의 거의 6배가 되고, 지속시간도 4사이클 정도로 콘덴서 스위칭시보다 더 오래 지속됨을 알 수 있었다. 즉, 콘덴서 투입시의 스위칭에 의한 전류의 크기는 발전기의 돌입전류에 비해 지속되는 시간은 짧으나 정격전류에 비해 배수가 높다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 스위칭시 발생하는 높은 과도전류를 줄이기 위해 콘덴서에 리액터를 설치하는 경우가 있다 [7,8,9]. 콘덴서에 직렬로 리액터를 설치할 경우 공진을 피하도록 용량을 산정하고 있다. 이때 콘덴서가 델타 결선일 경우 리액터는 콘덴서에 직렬로 연결하기 때문에 상전압에 해당되는 것으로 리액터 용량 계산이 되어야 한다.

그림 7은 역률 보상 콘덴서에 리액터를 직렬로 연결한 경우에 발전기측과 전원측의 전력과 역률의 변화를 분석한 결과이다.

그림 7(a)에서와 같이 콘덴서에 리액터를 연결한 경우 전원측으로부터 공급되는 무효전력(Q1)이 ($-501\text{kVAr} \rightarrow -474\text{kVAr}$)로 약간 감소하였기 때문에 콘덴서만 설치한 그림 4(a)의 경우보다 역률(PF1)이 0.945에서 0.95로 약간 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같이 유도발전기의 무효전력이 약간 감소한 이유는 식 (9)와 같이 콘덴서에 리액터를 추가할 경우 전압 때문이다. 그림 7(b)에서는 그림 4(b)와 같은 조건에서 콘덴서에 리액터만 추가한 경우 유도발전기를 계통에 투입하기 전과 투입한 이후 전원측의 전력과 역률의 변화를 나타낸 것이다. 계통 투입 전에 무효전력이 그



(a) 발전기측



(b) 전원측

그림 7 콘덴서와 리액터의 직렬 연결시 발전기 및 전원측의 전력과 역률

Fig. 7 Power and power factor of generator & power supply side at the time of the series connection of the capacitor and the reactor

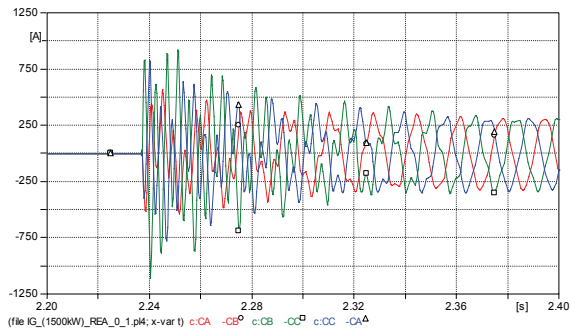


그림 8 리액터 추가시 역률 보상 콘덴서 투입시의 과도 전류
Fig. 8 Transient current at the time of the power factor correction capacitor closing after the reactor is added

림 4(b)와 차이가 없지만, 계통 투입한 이후에는 발전기 단자에서 (6,185 → 6,158kVA)로 감소하기 때문에 전원측에서 공급되어야 하는 피상전력(S3)이 줄어들게 되어 미세하게 역률이 증가하게 된다.

그림 8은 콘덴서에 리액터가 추가한 상태에서 유도발전기가 동기속도에 도달한 다음 계통 투입시 콘덴서에 발생하는 스위칭 전류의 변화를 나타낸 것이다.

그림 8에서 알 수 있듯이 투입 초기 과도전류는 콘덴서만 사용하여 투입한 그림 5에 비해 매우 저감된 것을 알 수 있다. 과도전류는 매우 저감되지만, 콘덴서만 사용한 경우에 비해 공진현상으로 인해 과도상태가 더 지속됨을 알 수 있다. 그러나 과도 초기나 정상상태에 이르는 동안에 전류는 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 농형 유도발전기에서 낮은 역률을 보상하기 위해 설치하는 콘덴서에서 발생하는 과도전류를 저감하기 위해 콘덴서에 직렬로 리액터의 추가에 따라 발전기와 전원측에서의 전력과 역률의 전후 변화를 분석하였다.

유도발전기의 역률 보상을 위해 콘덴서만 추가할 경우 발전기 자체 역률은 높아지지만, 유도발전기의 무효전력이 계통의 부하에 비해 상대적으로 높을 경우 유도발전기의 역률 보상에도 불구하고 전원측의 역률에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

역률 보상을 위한 콘덴서의 스위칭시 발생하는 과도전류를 줄이기 위해 콘덴서에 직렬로 리액터를 설치하는 경우에는 과도전류가 감소하는 효과를 얻을 수 있었으며 또한 단자전압의 변동에 의한 무효전력의 증가로 전원측의 역률이 약간 상승함도 알 수 있었다.

References

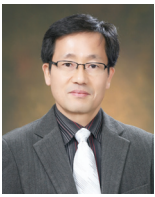
- [1] 2012 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO
- [2] Jong-Gyeum Kim, Young-Kuk Kim, "A Comparison of the Operating Characteristics of the Synchronous Generator and Induction Generator Applied to the Hydropower Power Plant", KIEE, Vol. 63P, No. 2, pp. 55-60, 2014. 06.
- [3] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004.
- [4] Theodore Wildi, Electrical Machines, Drives and Power Systems, Prentice Hall, 2002.
- [5] Jong-Gyeum Kim, "Analysis for the Inrush Current and Voltage Drop of Induction Generator by the Reactor Tap Change", KIEE, Vol. 64, No. 8, pp. 1202-1206, 2015.08.
- [6] Jong-Gyeum Kim, "A study on the Variation of Power Factor by Connection of the Induction Generator to the Distribution Line", KIEE, Vol. 64P, No. 3, pp. 159-163, 2015. 09.
- [7] Samhwa Condenser Technical Report, 2006.11.
- [8] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", Taylor

& Francis, 2005.

[9] IEEE Std 141-1993, "Power factor and related considerations".

[10] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개

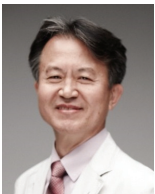


김 종 겸(Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987.1~1988.1 KT 근무. 1988.1~1996.3 K-water 근무. 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수.

Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



박 영 진 (Young-Jeen Park)

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