

소수력 유도발전기의 콘덴서 역할 및 동작 특성에 관한 고찰

임지연*, 이진권*, 채지석*, 황진열*, 옥연호**
K-water*, 파워21**

A study on the role and performance characteristic of the condenser of induction generator at hydro power

Ji-Yeon Im*, Jin-Kwon Lee*, Ji-Seog Chae*, Jin-Ye ol Hwang*, Yeon-Ho Ok**
K-water*, Power21**

Abstract - 유도발전기는 구조가 간단하고, 동기발전기처럼 여자장치를 필요로 하지 않기 때문에 소수력발전소에 주로 적용되고 있다. 배전계통에 연계되는 경우가 많은 소수력발전기 특성상 계통의 안정적인 운영을 위하여 한전에서는 분산형전원 배전계통 연계 기술기준에 의거하여 발전기와 병렬로 역할개선용 콘덴서를 설치하도록 하고 있다. 콘덴서 동작에 따른 역률의 이론값과 실제 측정값을 비교하고, 계통 측과 발전기 측의 콘덴서 동작에 따른 역률 개선 효과를 검토하였다.

1. 서 론

발전기는 용량 및 계통조건에 따라 동기발전기와 유도발전기로 구분된다. 일반적으로 대수력 혹은 전력계통이 미 확보된 지역에서 그 선로에 요구되는 전압, 주파수, 적정 역률의 전력을 운영에 적합하도록 공급할 수 있는 발전기는 동기발전기이며, 소수력 및 전력계통이 확보된 지역에서는 유도발전기를 사용하는데 유도발전기는 자체적으로 자계를 만들어내는 적정하고 일정한 여자전류를 생산할 수가 없으므로 유도발전기를 사용하기 위해서는 계통에서 여자전류를 공급받을 수 있는 능력이 있는지 확인이 필요하다.

소수력발전소에 주로 적용되는 유도발전기는 계통으로부터 여자전류를 공급받아 회전자계를 발생시키므로 계통의 무효전력을 소비하게 되고, 계통의 역률을 저하시킨다. 따라서 일반적으로 진상용 콘덴서를 유도발전기와 병렬로 접속하여 역률을 개선한다.

본 논문에서는 유도발전기의 기동 및 운영 특성을 파악하고, 콘덴서 동작에 의한 전압 및 전류, 역률 변화를 해석하여 계통 및 소규모 발전사업자 측에서 콘덴서 동작에 따른 영향을 분석해보고자 한다.

2.1 유도발전기 원리 및 기동 특성

유도발전기의 원리는 유도전동기를 전원에 접속하여 그 축을 동기속도 이상으로 외부로부터 구동시키면 발전기가 된다. 소수력발전소에 적용된 유도발전기는 원동기인 수차(혹은 터빈)에 의해 직접 구동된다. 발전기 고정자에 전원을 접속하여, 수차가 무부하로 회전하면 수차와 축으로 연결된 회전자는 고정자에 접속된 전원에서 여자전류를 공급받고, 이것에 의해 적용되는 자속이 축을 중심으로 회전하며 회전자계를 형성한다. 이 회전자계가 농형회전자의 권선을 넘어서는 형태로 회전하여 권선에 전류를 유도하고, 이 유도된 전류와 회전자계와의 작용으로 회전자를 가속시키는 토크가 발생하여 농형회전자가 회전한다. 외부에서 힘을 가하여 회전을 계속하면 유도발전기로 동작하게 된다. 이 경우에 유도발전기의 회전자계에 작용하는 여자전류는 전원에서 공급되기 때문에 유도발전기는 통상 다른 전원계통과 병렬로 접속하여 운전되며, 항상 유효전력 자체를 계통에 공급한다.

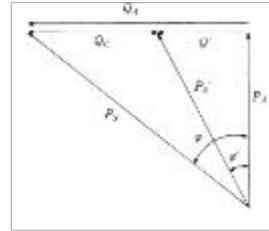
2.1.1 유도발전기 운전상 문제점

유도발전기를 계통에 병입할 경우, 원동기(수차)가 회전속도를 동기속도 부근까지 맞추어 병입하지만 발전기 자체는 무여자 상태이므로 병입순간에 정격전류의 5~6배의 돌입전류가 계통전압을 저하시키게 된다. 또한 발전기 출력이 커짐에 따라 계통에 접하는 비율이 증대하기 때문에 단독 운전을 할 수 없으므로 계통 운용상 큰 결점이 된다.

유도발전기는 계통에서 위상이 90°된 여자전류를 취하기 때문에 콘덴서를 병렬로 접속하여 역률을 개선하지만, 콘덴서와 유도발전기를 병렬 접속한 상태에서 유도발전기를 계통에서 분리하는 경우, 콘덴서의 진상전류가 유도발전기의 여자전류로 되어 자속 증가로 인한 단자전압 상승 현상이 발생한다.

2.1.2 유도발전기의 콘덴서 역할

유도발전기는 계통에서 위상이 90°된 여자전류를 취하기 때문에 콘덴서를 병렬로 접속하여 역률개선을 하는 것이 보통이다. 콘덴서를 접속



P_A : 유도발전기 유효전력(kW)
 Q_A : 유도발전기 무효전력(kvar)
 P_S : 유도발전기 피상전력(kVA)
 ϕ : 유도발전기 역률각
 Q_C : 역할개선용 콘덴서용량(kvar)
 P_S' : 역할개선후의 피상전력(kVA)
 ϕ' : 역할개선후의 역률각

<그림1> 콘덴서에 의한 역률개선

함으로서 그림1의 발전기 무효전력(Q_A)가 콘덴서용량(Q_C)에 의해 저감되어 역률이 개선된다.

2.2 소수력 유도발전기 운영 사례

이번 논문에서는 K-water에서 운영중인 대청소수력발전소를 대상으로 하였으며 대청소수력은 대청댐하류 조정지대에 위치하고 있으며 조정지를 통해 하류에 일정하게 방류되고 있는 용수를 이용하여 발전하고 있다. 400kW×2기의 소수력발전기로 배전선로는 부강 S/S로부터 약 16.7km 떨어져 있고 선로 연결부하는 약 5,000kW이다.

2.2.1 대청소수력 기동특성

대청소수력발전소의 유도발전기는 완전 자동으로 운전되며, 0초에서 기동명령을 내리면 수차 전단의 주 차단밸브(유입밸브)가 open되면서 수차와 발전기가 회전하기 시작한다. 회전속도가 정격속도(225rpm)의 95%에서 계통 병입 차단기가 투입되어 계통과 연결되게 된다. 계통 연계 직후 콘덴서반이 투입된다. 콘덴서반은 2Set이 병렬로 연결되어 있으며 고조파 및 돌입전류 억제를 위해 콘덴서 전단에 6% 직렬리액터가 설치되어 있다.

2.2.2 콘덴서 동작에 의한 역률 개선 효과

대청소수력의 콘덴서 투입 전 역률값은 77%이며, 설치된 콘덴서뱅크의 역률 개선 용량은 식(1)에 의해 197.4[kvar] 이다.

$$Q_C = Q_{SC} - Q_{SL} \quad (1)$$

Q_C : 역률 개선 콘덴서 용량, Q_{SC} : 콘덴서 운전용량[210[kvar],
 Q_{SL} : 리액터 운전용량[12.6kvar]

이론적으로 발전기 운전시 콘덴서반 투입에 따른 역률 개선 값은 약 99%이다. 역률 계산은 식(2)와 같다.

$$P_f = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + (P_i - Q_C)^2}} \quad (2)$$

$$= \frac{245}{\sqrt{245^2 + (229 - 197.4)^2}}$$

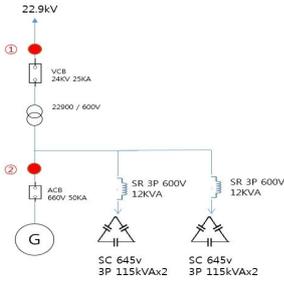
$$= 0.99$$

P_f : 개선 후 역률, P_a : 발전기 유효전력[245[kW],
 P_i : 발전기 무효전력[229[kVar], Q_C : 역률 개선 콘덴서 용량

2.3 유도발전기 및 콘덴서 동작 특성 분석

2.3.1 측정장소 선정

콘덴서 동작에 따른 송전단과 발전단의 역률변화를 비교하기 위하여 그림2의 변압기 1차측①(송전단)과 2차측②(발전단) 지점에 각각 전력분석기를 연결하여 측정하였다.



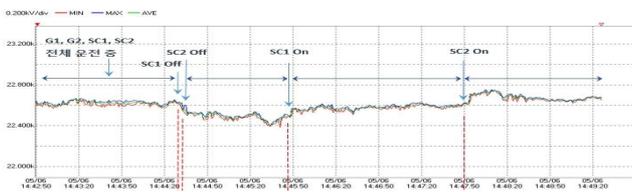
〈그림2〉 측정포인트



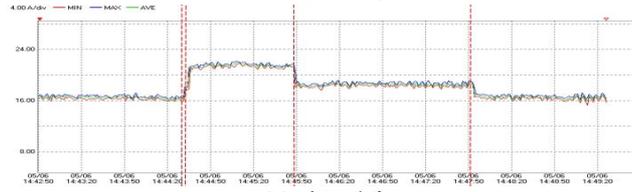
〈그림3〉 전력분석

2.3.2 콘덴서 투입에 따른 송전단 특성분석

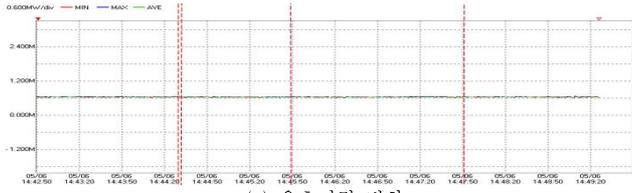
변압기 1차측①(송전단)에서의 발전기 운전시 콘덴서 투입 전후 계통측에서의 전압, 전류, 유효전력 등에 대해 실시간으로 측정된 그래프이다.



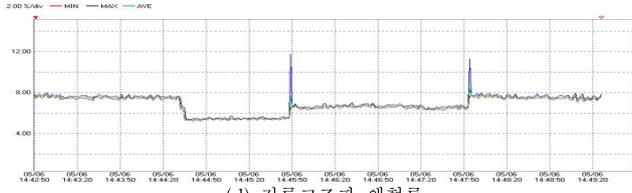
(a) 전압 변화



(b) 전류 변화



(c) 유효전력 변화



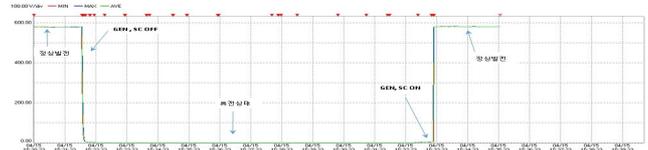
(d) 전류고조파 왜형률

〈그림 4〉 송전단 변화 측정

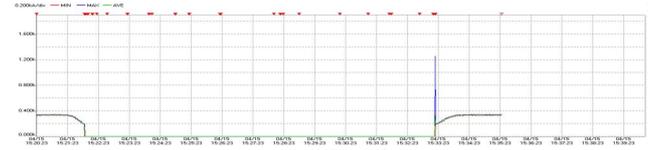
측정 결과, 발전기 운전중 콘덴서 투입 후 변압기 1차측 22.9kV(계통측) 역률은 98%로 변화하였다. 변압기 무효전력(지상분)에 의한 역률 감소분 3.5%를 감안하였을 때 측정된 계통측 역률은 이론값과 비슷하다. 이에 따라 계통측 전압값이 상승하는 반면, 전류값은 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 고조파의 경우 콘덴서 투입시 상승하였다가 곧바로 안정됨을 확인할 수 있어 그 영향은 미미하다고 할 수 있겠다. 유효전력 값은 그림에서 보는 것과 같이 거의 일정하게 유지되어 콘덴서 투입에 의한 발전량 상승은 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

2.3.3 콘덴서 투입에 따른 발전단 특성분석

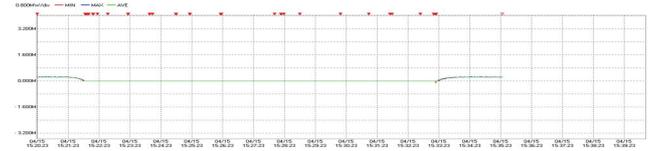
발전사업자 측면에서 유도발전기의 콘덴서 영향을 분석하기 위해 계통 병입 전후 발전기측에서의 전압, 전류, 전력 변화를 확인해보았다.



(a) 전압 변화



(b) 전류 변화



(c) 유효전력 변화



(d) 무효전력 변화

〈그림 5〉 발전단 변화 측정

2.3.4 콘덴서 투입에 따른 송전단, 발전단 비교

측정 결과, 발전기 운전중 콘덴서 투입 후 변압기 1차측 22.9kV(송전단) 역률은 98%로 변화하였다. 하지만 변압기 2차측 600V(발전단) 역률은 77%로 변화가 없었다. 발전기 운전중 콘덴서 동작에 따른 전압, 전류, 유효전력, 역률 변화 측정 결과는 표1과 같다.

〈표 1〉 콘덴서 동작에 따른 전압, 전류, 유효전력, 역률 변화

구분	콘덴서 OFF						#1 콘덴서 ON		#1,2 콘덴서 ON	
	계통측 (22.9kV)	발전기측 (600V)		계통측 (22.9kV)	발전기측 (600V)		계통측 (22.9kV)	발전기측 (600V)		
		#1	#2		#1	#2		#1	#2	
V_{ab}	22.3kV	575V	577V	22.4kV	583V	584V	22.4kV	588V	582V	
V_{bc}	22.3kV	575V	575V	22.4kV	582V	583V	22.4kV	587V	580V	
V_{ca}	22.4kV	575V	577V	22.5kV	584V	585V	22.6kV	590V	583V	
I_a	19.8A	354A	384A	16.4A	349A	388A	14.6A	369A	369A	
I_b	19.3A	354A	382A	16.3A	349A	385A	14.6A	368A	369A	
I_c	19.9A	354A	373A	16.6A	344A	377A	14.3A	359A	361A	
P_a	558W	285W	289W	561W	267W	298W	562W	282W	287W	
PF	0.75	0.77	0.77	0.88	0.76	0.77	0.98	0.77	0.77	

3. 결 론

소수력 유도발전기의 콘덴서 동작 특성 분석 결과, 유도발전기의 콘덴서 역률 개선 효과는 모터부하와 마찬가지로 송전단측(계통측)에 영향을 주는 방향으로 동작한다는 것을 확인하였다. 또한 콘덴서 투입시에도 계통측 유효전력은 큰 변화없이 일정하게 유지됨을 확인하였다. 이는 콘덴서 동작에 의해 계통선로의 안정성은 확보될 수 있으나 송전단 발전량의 증가는 발생하지 않으므로 소규모 발전사업자의 수익에는 큰 영향을 미치지 않는다고 말할 수 있겠다. 하지만 이번 연구는 소규모 유도발전기에 대한 검토에 한정되었으므로 향후 대용량 유도발전기와 콘덴서의 상관 관계 등은 보다 많은 검토가 필요할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국수자원공사, “소수력 발전소 접속 배전선로 전력조류분석을 통한 발전기형식 선정 검토”, 2013.10
- [2] 이원재·오용택, “해양 소수력발전용 유도발전기의 최적 무효전력 산정방식에 관한 연구”, 조명·전기설비학회논문지 제27권 제9호 2013.09
- [3] 삼화콘덴서, “진상용콘덴서적용실무”, “전력용콘덴서기술자료”