파랑특성을 고려한 조력발전소 여자시스템 적용에 관한 연구

김현한*,김광호**,정종찬**,박성호*,옥연호*,최형철*
한국수자원공사*,강원대학교 전기공학과**

Tidal Power Station Excitation System for a Considering Wave Characteristic

Kim, Hyun-Han. Kim, kwang-Ho. Jeong, Jong-Chan. Park, Sung-Ho. Ok, Yeon-Ho. Choi, Hyung-Chol.
Korea Water Resource Corporation, Kangwon National University Engineering

Abstract - Si-Hwa tidal power station is using difference of t he ebb and flow. The active power is dependent on up and dow n sea water level but if it is drastically changed because of a ty phoon or waves the generator terminal voltage and active power is changed that is a chief cause of power station unstability. Th erefore this paper arrange a present state of power or frequency fluctuation and generator terminal phase difference in case of occ urrence a drastic change of sea water level.

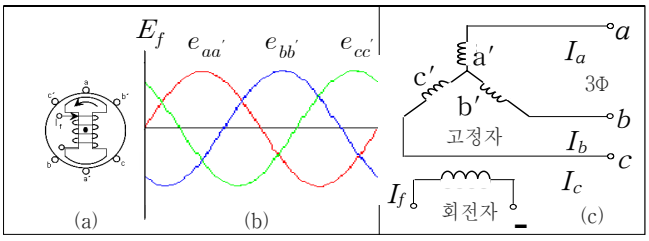
1. 서 론

국내 최초로 건설되는 시화호조력발전소는 시설용량이 25,400㎾×10대의 동기발전기식 벌브형 수차발전기이다. 조력발전은 해수의 조수간만의 차를 이용하는 발전설비로써 낙차의 변화가 완만한 하천 댐의 수력발전설비와는 달리 창조시 또는 낙조시 정현파 형식으로 변하는 해수면의 낙차를 이용하여 발전한다. 그러나 파랑 또는 태풍 발생시 발전기 유입측 해수면의 급격한 변동으로 전력동요(Power Swing) 현상이 발생하기 쉬우며 이 경우 안전운전 범위를 벗어나 발전기를 정지하여야 하는 경우가 발생 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 해수면의 파랑에 의한 급격한 낙차 변화로 인한 발전기 출력의 과도현상과 이에 따른 여자시스템의 동작 특성을 분석함으로써 향후 조력발전설비의 안정적인 운영 향상에 기여하고자 한다.

2. 본 론

2.1 동기발전기의 여자 시스템

동기 발전기 여자시스템의 기본기능은 발전기 계자 권선에 직류전류를 공급하여 발전기 출력 단자 전압이 일정하게 유지되도록 조정하여 부하단에 대한 유효전력/ 무효전력 공급과 더불어 역률조정 기능도 수행한다. 따라서 여자시스템은 발전전압 제어부분과 제어기로부터 신호를 받아서 필요한 계자 전류를 공급하는 위상제어 부분으로 구분할 수 있으며 전압 제어부분은 단자전압 설정기, 발전기 전압 검출부 및 비례/적분 조절부가 기본을 이루고 있다. 그림 1(a)와 같이 계자전류 I_f가 회전자 계자 권선에 흐르면 공극에서 자속과 자계가 만들어지는데 여자전류에 의해 만들어지기 때문에 이를 여자(Excitation)자계라 한다. 이로부터 만들어진 자속은 전기자 권선 aa′, bb′, cc′와 자속쇄교(Flux Linkage)를 변화시키면서 고정자 권선에 전압을 유기시킨다. 이것으로 인하여 그림 1(b)와 같이 크기는 같지만 위상차가 전기각으로 120°인 여자전압 E_f (Excitation Voltage)가 발생한다.

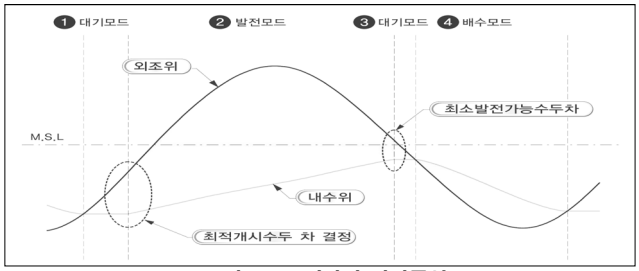


〈그림 1〉 동기발전기 여자전압

여기서 $E_f \propto n\Phi_f$ 이며 여자전압은 기기속도(n)와 여자자속(Φ_f)에 비례하고 여자자속은 여자전류 I_f에 따라 결정된다. 그림 1(c)와 같이 동기발전기의 고정자 단자에 3상 부하가 연결되면 고정자 전류 I_a가 흐르게 되는데 I_a의 주파수는 여자전압 E_f와 같아진다. 또한 3상 권선에 흐르는 고정자 전류는 공극에 회전자계를 형성하게 되는데 이 때 공극 전체자속은 회전자 전류 I_f와 고정자 전류 I_a의 합성자속이다. 여기에서 회전자 계자 권선을 적당히 여자시키면 고정자에는 무효전류가 흐르지 않게 되어 역률이 1로 동작하게 된다. 그러나 회전자의 여자전류가 감소하게 되면 자화를 돕기 위해 무효전류가 교류 전원으로부터 흘러 들어오게 되어 지상역률로 동작하게 되며, 계자 전류를 증가 시키면 자화를 감소시키기 위해 진상 무효전류가 흐르게 된다. 즉 이러한 합성자속인 이중여자(Doubly Excited)의 특징 때문에 동기발전기는 무효전력을 계통에 공급할 수 있다.

2.2 조력발전 개요

조수간만의 차는 하루에 두 번 발생하며 시화호조력발전설비는 창조시 단방향 발전방식이다. 조수 주기당 발전가능 시간은 약 평균 5.5시간이며 정격낙차는 5.82m 이다. 그림2과 같이 해수위와 내측수위 차가 2m 시점에서 발전을 개시하고 최소발전가능수두차인 1m 시점에서 발전을 정지하도록 되어 있다.



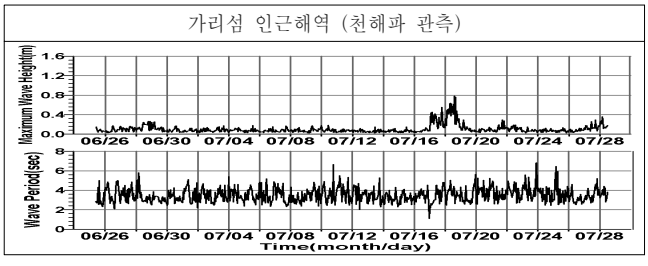
〈그림 2〉 조력발전 낙차특성

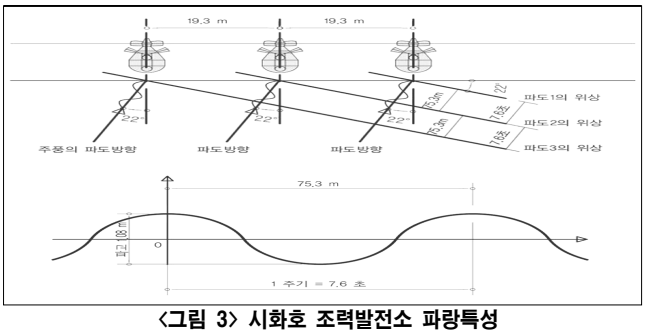
2.3 파랑 현상

파랑관측은 조력발전소 건설과 관련한 해양특성 기초자료조사의 일환으로 시화호 외측해역의 파랑특성을 파악하였으며 관측 방법으로는 외해로부터 입사되는 파랑이 주변 섬들이나 지형, 수심 등에 의해 변형되는 것을 최소화할 수 있는 덕적도 인근과 시화호 외측에서 파고/파향계(Model 730D, Directional Wave and Tide Recorder)를 설치하였으며, 큰 가리섬 남단 1km 지점인 내측 정점에는 파고만을 측정할 수 있는 파고계(Model Wave-12M)를 설치하여 파랑관측을 수행하였으며 결과는 <표 1>과 같다. 파랑이 잔잔하거나 발전소에 수직으로 올 경우에는 발전기별 위상차에 별 영향이 없는 것으로 분석되었다. 그러나 그림3과 같이 시화호 주풍의 파도 방향은 주로 수직과 22° 방향이며 파도의 위상차가 7.6초 정도이다.

〈표 1〉 파랑 관측결과

구 분	유의파고	최대파고	유의파 주기	최대파 주기
덕적도 인근	0.97m	1.53m	5.83sec	5.94sec
가리섬 전면	0.49m	0.78m	3.56sec	3.49sec





〈그림 3〉 시화호 조력발전소 파랑특성

2.4 파랑 현상과 발전기 영향

시화호조력발전소의 발전기 정격낙차는 5.82m 이며 평균 운전낙차는 4.1m이다. 그런데 파랑에 의한 파고 변화를 살펴보면 유의 파고는 0.49m 이고 최대파고는 0.78m로 평균 운전낙차의 약 12%~19%정도의 낙차 변동이 파랑에 의해서 발생하는데 이는 발전기의 계통 병입에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2.4.1 계통 병입 前

계통 병입전에는 발전기 전압은 식 2-1과 같다.

$$V = E \quad (E = BL\nu) \quad \text{---------- 2-1}$$

B : 자속
L : 철심길이
ν : 속도

낙차 변동에 따른 회전수 변동으로 발전기 전압의 변동이 예상되나 발전기 단자전압은 초기 설정치(90R)로 속응 제어가 가능하며, 파랑에 의한 속도 변화는 1차적으로 조속기에서 제어하는 것이 가장 효율적이다. 그러나 그렇지 못할 경우에는 파랑에 의한 회전수 변동과 이에 따른 동기투입 방법에 대하서 향후 많은 연구가 이루어져야 한다.

2.4.2 계통 병입 後

계통에 연결되어 있는 상태에서 수차의 회전속도는 계통주파수와 연동되어 있어 낙차변화에 따라 회전수가 변하지는 않는다. 따라서 운전중 파랑에 의하여 낙차가 변동하게 되면 수차의 회전속도(토오크)가 변하게 되고 이와 연동하여 변동된 부하각에 따라 역률이 변하게 되고 그에 따라 발전기 단자전압이 상승 또는 하강하게 되는데 이 경우 AVR에서는 발전기 단자 전압을 일정하게 유지하기 위해 계자전류를 증감시킨다.(식2-2 참조)

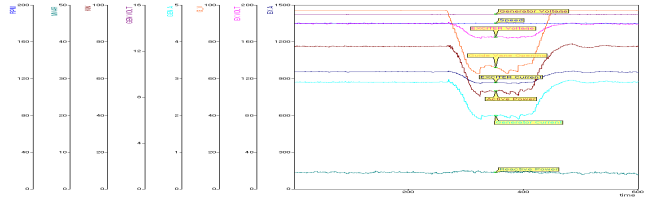
$$V = E \pm X_a I_a \quad (E = BL\nu) \quad \text{---------- 2-2}$$

B : 자속
L : 철심길이
ν : 속도

이에 대한 입증 시험에 대한 조건은 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 입증 시험 조건

발전소	출력변동	G/V개도	전압제어
소양강	50~80MW	50~95%	DROOP



〈그림 4〉 출력 시험

그림 4의 시험은 낙차가 일정하고 G/V 을 제어하여 출력을 변동시킨 결과이며, 조력발전소에서 G/V 을 고정시키고 낙차가 변하여 출력이 변동하는 것과 같다. 전압, 속도, 무효전력은 일정하고, 출력 , 전류, 계자전압, 계자전류는 변동하므로 시화 조력 발전기 운영시 파랑에 의해 발전기 전압, 속도, 무효전력은 일정하지만 계자전압, 계자전류, 출력은 변동할 것으로 예상된다.

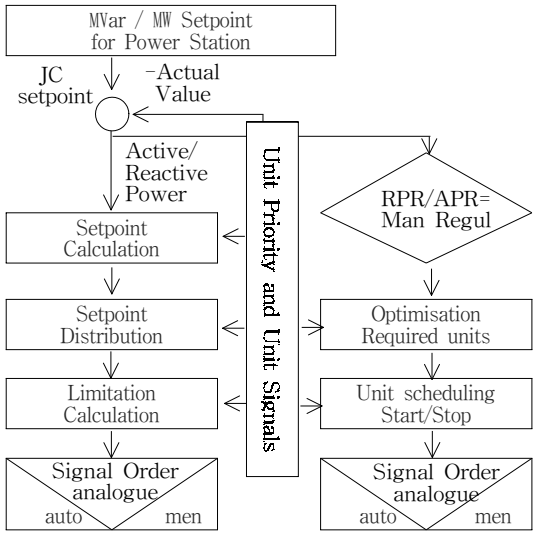
3. 조력 여자시스템의 제어 방향

여자시스템의 전압 제어는 크게 세 종류로 나누어 진다. 첫째, Voltage Droop 제어로서 일반적으로 발전기 제어에서 사용하는 방식이며 제어기에 전압을 설정하면 그 설정된 전압으로 제어기가 항상 제어하게 되는데 이 설정값은 운영자에 의해 변동된다. 둘째, Power Factor(역율) 제어이며, 설정된 역율 값으로 제어하는 방식이다. 셋째, Auto Reactive Power Regulator(무효전력제어) 방식은 설정된 무효전력으로 운영하는 방식으로 각각의 제어방식을 조력 발전기에 적용시 파랑에 따라 나타날 현상은 <표 3>과 같다.

〈표 3〉 제어조건에 따른 현상

구 분	Droop	P.F	AQR	비 고
유효 출력	○	○	○	※ 파랑에 따른 낙차 변동 조건 ○ : 변동 × : 고정
무효 전력	×	○	×	
계자 전류	○	○	○	
계자 전압	○	○	○	
역 율	○	×	○	
발전기 전압	×	○	×	

표 3에서 AQR 제어와 Droop 제어는 파랑에 의한 변동 인자는 같으나 AQR 제어에서는 운영자가 낮은 출력과 높은 출력에 따라 무효전력을 계산하여 제어해야할 필요성이 있다. 그렇지 않으면 낮은 출력에서는 역율이 낮게 운영될 우려가 있으므로, 발전기 전압 변동이 없는 Droop 모드로 운영함이 바람직하다. 또한, 시화호조력발전소 제어에는 발전기 10대를 동시에 전압/역률 및 주파수 제어가 가능하도록 하는 Joint Control System이 있다. (그림5 참조)



〈그림 5〉 Joint Control System

시화호조력발전소는 중앙 급전의 지시에 의한 출력 변동이나 GF(Greed Frequency)에 응동하는 중앙 급전 발전소는 아니지만 계통의 전압 변동에 따라 전압 제어가 가능하도록 설계되어 있다. 현재의 전력거래시스템에서는 무효전력에 대한 거래가 이루어지지 않지만 향후 이에 대한 요금이 정산될 때 전압/무효전력을 일괄 제어할 수 있는 이 기능은 유용하게 사용될 것이며, 이 기능은 충주1수력의 기능과 다르게 조작시에만 사용토록 해야 타 제어에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

4. 결 론

시화호조력발전소는 해수의 조석간만의 차를 이용하는 발전설비로서 해수면의 증감에 따라 출력이 결정된다. 그러나 여름철 태풍에 의한 파도나 겨울철 바람에 의한 파랑으로 인하여 조위차가 급격하게 변하게 되면 발전기 단자전압의 변동으로 동기투입이 어렵게 되거나 전력동요 현상이 발생하게 되는데 이는 정상적인 설비 운영의 장애요소로 작용하게 된다. 따라서 본 논문에서는 해수면의 파랑 특성이 조력 발전설비의 여자시스템에 미치는 영향을 분석하였는데 시화호조력발전소의 경우 파랑 특성이 여자시스템에 미칠 영향은 적은 것으로 분석되었다. 그러나 제어모드는 Droop 방식으로 운전하여야 하며, 전압/무효전력을 일괄 제어하는 Joint Control은 상시 운영이 아닌 필요시에만 운영해야 적정한 설비 운영이 이루어 질 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] Principles of Electric Machines and Power Electronics
[2] ANSI C50.13 Field Short Time Thermal Over Load
[3] 시화호조력발전소건설공사 실시설계 보고서(한국수자원공사 2005.8)
[4] 우리나라 연안의 파랑관측 자료(한국항만협회 1984)