조력발전용 수차발전기의 기동·정지시스템에 관한 연구

A Study on Start·Stop System at Water Turbine-Generator for Tidal Power Plant

오 민 환* · 박 철 원*
(Min-Hwan Oh · Chul-Won Park)

Abstract - Tidal power is one of new and renewable energy sources. Tidal power is generated by using the gap in the water level between the water outside and inside the embankment. All tidal power plant in Korea were being operated by import of turn-key from abroad. The know-how and technology which are the most important to build predictive control system has become increasingly difficult to obtain from advanced countries because most of them avoid to transfer, which the domestic development of the control system is needed. In this paper, a study on start-stop system at water turbine-generator for tidal power plant at the beginning of development was presented. For improvement the efficiency and develop of core technology of the start-stop system, the technique and characteristics of tidal power, modeling, maximum generation calculation method, and optimal control of joint control system in Sihwa tidal power plant were studied.

Key Words : Joint control system, Maximum generation calculation method, Start-stop system, Tidal power plant, Water turbine-generator

1. 서 론

지구온난화 규제와 온실가스 감축에 관한 국제협약인 기후변화협약의 실질적 이행을 위한 교토의정서에 의하여 우리나라도 2013년부터는 온실가스 감축의무대상의 지정이 유력화 되고 있어 청정에너지에 대한 개발 수요가 증가하고 있다. 해양에너지는 조류, 조력, 파력, 온도차 등을 이용하여 청정에너지를 발생시키는 기술로서, 거의 무한에 가까운 에너지원을 제공하기 때문에 관심이 증대되고 있다. 그중 조력발전(tidal generation)은 조석간만의 차가 큰 강의 하구 또는 만을 방조제와 같은 둑으로 쌓아 조지를 형성하고 밀물과 썰물로 인한 조지 내외의 수위차를 이용하여 전기를 생산하는 발전방식이다[1]. 국내 최초로 건설된 시화호조력발전소는 시설용량이 254,000[MVA]로 10대의 동기발전기식 별브형 수차발전기로 이루어졌다. 시화호조력발전소의 중요기술은 SIEMENS, ANDRITZ Hydro 등 외산으로도입되었는데, 하자처리 만료기간 이후에는 K-water의 협조가 원활하게 이루어질 전망이나 현재는 정보를 공유하기 쉽지 않다.

조력발전은 정현파 형식으로 변하는 조위 특성 때문에 낙차도 시간함수에 따라 변하게 되어 발전기 출력이 정현파 형식으로 변하는 특징이 있고, 파랑 또는 태풍 발생 시 발전기 유입측 해수면의 급격한 변동으로 전력동요(power swing) 현상이 발생하기 쉽다. 조차는 에너지 요소로 인하여 한정된 시간에 전기를 생산하기 때문에 운전요소가 발전

량에 미치는 영향이 크다. 이 요소들을 효과적으로 제어함으로써 상황별 발전량을 예측하고 최적의 발전조건을 결정하는 것이 가능해지는데, 이를 관리하는 중요한 부분이 발전소 예측제어시스템이다[2]. 조력발전소의 예측제어시스템은 기존의 분산제어시스템(DCS:Distributed Control System)에서 컴퓨터를 포함한 대규모 시스템인 원격감시제어시스템(SCADA:Supervisory Control and Data Acquisition)으로 발전하고 있다. 또 시스템과 시스템을 연계하여 플랜트의 운영효율을 증가시키는 통합관리시스템으로 확대, 적용되고 있다[3]. 그러나 첨단기술에 해당하는 플랜트 예측제어시스템의 구축 기술은 선진국에서 기술이전을 기피하고 있기 때문에 원천기술개발 및 국산화가 절실히 필요한 실정이다[4,5].

국내 조력발전 관련 연구는 매우 미흡하다. 2005년 조력발전설비 자동기동 및 최대출력 운전 설계[6]가 시도되었고, 2008년 파랑특성을 고려한 조력발전소 여자시스템 적용에 관한 연구[7], 2010년 해양환경을 고려한 조력발전소 조속기 운영특성 분석[8]이 진행되었다. 2009년 시화호조력발전소의 발전량 산출과 발전량극대화를 위한 최적운전 모델, 모션 한계가격산정 등이 연구되었다[9~11]. 최근 조력발전의 핵심기술 국산화를 위하여 조력발전 수차 발전기 기동정지 시스템 제어 장치 개발과제[3,12]가 시작되었으며, 조력 발전을 위한 수차발전시스템의 모델링과 가상 시뮬레이터 개발안 등이 발표되었다[13~17].

본 논문에서는 국내 조력발전소가 해외로부터 일괄도입(turn-key) 방식으로 수입, 운영되고 있는 시점에서, 향후 효율성 있는 원천기술 확보와 개선된 기동정지시스템을 개발하기 위하여, 먼저 조력발전의 특성과 방식을 살펴본 후, 조력발전 최대발전량 산정방법, 시간 개선 기법(time advanced method), 연계운영 장비인 조인트 제어시스템

† 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

* 정 회 원 : 도화엔지니어링 기술고문 · 공박
접수일자 : 2014년 3월 16일
수정일자 : 2014년 4월 24일
최종완료 : 2014년 5월 8일

(joint control system)과 그 최적제어에 대하여 알아보고자 한다.

2. 조력발전의 특성과 방식

2.1 조력발전의 특성

조력에너지는 주로 달의 인력에 의한 조위가 상승과 하강을 반복하는 진동에 의해서 발생한다. 조력발전소는 해상에 설치하는 대규모 플랜트로서 설비의 운영과 감시 및 유지관리를 위한 별도의 제어시스템이 필요하다.

조력발전의 기본원리는 수력발전과 유사한데, 저낙차 수력발전에 몇 가지 복잡한 요소들이 추가된다. 즉, 조석현상의 가장 큰 특징은 지역적으로 차이는 있으나 규칙적으로 일어나는 현상이기 때문에 예측이 가능하다. 또한 조수량이 비교적 일정하여 계절적 변화나 연변화가 거의 없다는 것이 수력발전에 비해 유리하며 대체적으로 주간, 월간, 연간 발전량의 예측이 가능하다.

2.2 조력발전 방식

그림 1은 조력발전 방식별 사이클을 나타낸다. 조력발전 방식은 조지의 개수와 흐름이용 방법에 따라 단조지, 복조지, 단류식, 복류식으로 구분된다. 어느 경우든 발전시 한 방향의 흐름만을 이용하는 방식을 단류식이라 한다. 이 운전 방식은 발전→대기→충수→대기의 사이클을 반복하므로 발전 출력의 단속이 불가피하지만 발전방식이 간단하고 발전 설비의 가격도 저렴하여 실용적으로 평가된다.

그림 1 조력발전 방식별 사이클
Fig. 1 Cycle of tidal generation types

단조지 복류식(single-pool double-cation)은 창조 및 낙조 모두 발전이 가능하며 단조지 단류식에 비하여 발전시간을 연장시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 경우에도 조지와 외해의 수위차가 있어야 발전이 가능하기 때문에 발전은 단속적이며 수차발전기도 양방향 발전이 가능해야 하기 때문에 단류식 수차발전기보다 구조가 복잡하다. 또한 두 경우 모두 조지의 개수에 따라 단조지와 복조지 방식으로 분류되며 복조지 방식의 경우 조지의 운영형태에 따라 연결식과 분리식으로 분류된다. 모든 방식에서 최대발전량을 계산하기 위해서는 수차발전기의 기동·정지 시점이 중요한데, 이에 따라 조석의 크기에 따른 최적 기동·정지 시점을 결정하는 제어시스템이 중요하게 평가된다.

3. 조력발전 최대발전량 산정방법

3.1 이론적 배경

조력발전은 조력발전 사이클에 따라 발전이 이루어지고, 조위와 조지간의 수두차와 조지에 유입되는 유량에 의하여 발전이 가능하여진다. 또 수심에 따른 저수량 곡선, 발전·배수 및 시간에 따른 조위·조지 수위변화곡선, 수차와 수문의 총수량, 수차발전기와 수문의 조건변화 등과 같은 자료를 이용하여 산출이 가능하여진다.

발전량은 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$E = 9.8QH\eta_g \quad (1)$$

여기서, E : 발전량[kW]

H : 조위-조지의 수위차[m]

η_g : 수차 및 발전기 효율[%]

조석 한주기 동안의 발전량은 발전개시시의 수두차에 민감하며 발전시간이 긴 경우라도 총 발전량이 최대가 되는 것은 아니다. 최대 발전량을 얻기 위해서는 해당 조건의 수차발전기의 최대 발전 가능한 시작수위와 정지수위와 같은 운전 변수를 결정해야 한다.

최대 발전량 계산을 위한 시뮬레이션에서 조력발전 방식은 최대 발전량을 매회 조석마다 계산하여야 한다. 최대 발전량에 영향을 미치는 인자 중 수차발전기의 기동·정지 시점이 중요하게 여겨진다. 수차발전기의 기동·정지 결정방법은 시간개선기법과 전체최적기법(full optimization method)의 2가지 방법이 있다. 시간개선기법은 조지의 잔여용적과 특정 수두 차에서 수차 발전을 고려하여 발전시간을 산정한 뒤 시간개선값(time advanced value)을 조정하여 최대 발전량이 발생하는 발전 개시 낙차를 결정하고, 전체최적기법은 매 조석마다 발전가능하며 최저낙차에서 정격낙차까지 0.1m 씩 변화시키면서 발전량을 산정하여 최대 발전량이 발생하는 발전 개시 낙차를 결정한다[3].

3.2 시간 개선 기법

최적 기동시기 결정을 위한 수두차 결정 방법은 반복계산법과 최적화이론 방법이 있다. 그림 2는 시간개선기법의 흐름도를 나타낸다. 그림 2와 같이 시간개선기법은 반복계산법으로 매 조석마다 발전 가능 최저 수두에서 최고 수두차

까지 0.1m씩 변화시키면서 매 6분마다 발전량을 산정하고 누적 발전량이 최대발전전량이 발생하는 시작과 종료의 시간을 결정한다[3].

그림 2 시간 개선 기법의 흐름도

Fig. 2 Flowchart of time advanced method

4. 연계운영 장비 개발

4.1 연계운영의 정의

조력발전의 경우 조지용량에 따라서 10~40대의 수차발전기를 설치하게 된다. 조력발전에서는 수차발전기의 수가 많기 때문에 각각의 가동 이후 전력계통운영시는 통합운전기능을 조속기에 장착하여 주기적으로 변화하는 조석과 파랑과 파도의 변화에 따른 전압 조정 및 주파수를 조절하여 전

체 발전기를 동시에 운전해야 한다.

다수의 발전기를 동시에 운전하는 경우에는 발전 중 전압 및 주파수 등이 일정 범위 내에서 운전이 가능토록 연계운영 장비인 조인트 제어시스템을 구축해야한다. 이를 통하여 다수의 수차조속기를 전체부하와 연계하여 1대를 운영하는 것처럼 출력을 일정하게 운전하는 것이 가능하다.

4.2 조력발전 공정 분석

그림 3은 공정별 연계 분석도를 나타낸다. 그림 3과 같이 조위의 예측 흐름과 조력발전의 한 사이클에서 최대발전량을 확보할 수 있는 최적발전개시시점과 최소발전정지시점을 결정하는 과정이 필요하다. 조위 예측 및 발전량 모형은 일정지연시간 계산으로 순서적방법이지만 발전설비기동정지, 연계운영 및 원격감시제어는 피드백 방법이기 때문에 별도의 처리가 필요하다. 따라서 모형의 계산 방법인 조위예측, 발전량의 예측결과를 파일로 저장하여 다음 공정의 입력 값으로 사용할 수 있게 하는 방법을 제안하였다.

그림 3 공정별 연계 분석도

Fig. 3 Block diagram of link analysis of process steps

4.3 기동·정지 시스템

본 연구에서 제시된 수차발전기의 기동·정지 시스템 제어 장치구조가 전체 시스템에서 차지하는 범위는 그림 4와 같다. 제안된 부분은 상위 시스템과 하위 시스템의 중간적인 위치에서 수차 발전기의 기동·정지에 대한 부분을 담당하여

그림 4 계층제어 구조 분석도

Fig. 4 Block diagram of hierarchical control structure analysis

동작을 처리하는 역할을 담당하므로 미들웨어(Middleware)라는 개념으로 정의 하였다.

4.4 연계운영의 최적제어

4.4.1 연계운영 최적장치의 블록도

그림 4는 연계운영 최적제어장치 개발 블록도이다. 최대 발전량 산정에 의한 수차 발전기 기동정지 결정은 조위변화, 조지수위변화, 수차효율변화, 수문방류량변화, 홍수량변화 등의 변동하는 다변수를 시간적으로 해석하여 조석간만의 전체 유량에 대한 최대발전량을 산정한다.

그림 5는 연계운영 최적제어장치 개발 블록도를 나타낸다. 다수의 수차발전기의 유효전력과 무효전력 및 주파수의 변동을 종합 Set-point하고 조절하게 된다.

그림 5 연계운영 최적제어장치 개발 블록도

Fig. 5 Block diagram of optimal control device development for joint control

4.4.2 수차발전기의 기동정지시간 결정

검조소의 조위자료에서 시간분할을 6분간으로 하고 2일 (480개) 데이터를 이용하여 최대발전량 산정계산결과를 제시하였다. 그림 6은 조석별 기동·정지 시간 및 낙차 변환을 나타낸다. 그림 6과 같이 시작시간과 끝나는 시간이 조석의 크기에 따라 달라지므로 최대 생산을 위한 기동·정지 결정이 매우 중요함을 알 수 있다.

4.4.3 수차발전기의 계통연결

수차발전기를 전체계통과 연계하여 전력공급을 위해서는 수차발전기의 보조기기의 정상상태, 수차의 조속기 시스템

가동 및 GV open 및 회전이 정상이어야 하며, 발전기 여자 시스템의 전류공급과 전압형성이 정상이어야 하고 전력 계통과의 전압, 위상, 주파수가 일치하여야 전력을 공급할 수 있다. 그림 7은 수차발전기 계통투입순서도로서 각 unit에 대한 기동·정지 흐름도를 나타낸다.

그림 6 조석별 기동·정지 시간 및 낙차 변환

Fig. 6 Start-stop time and falling water level difference conversion by tidal

그림 7 수차발전기의 계통투입순서도

Fig. 7 Flowchart of injection to power system of water turbine generator

4.4.4 발전출력 조인트 제어

그림 8은 발전출력 조인트 제어시스템의 개념도이다. 상기 그림 7의 8단계에서 P_j , Q_j minimum을 설정 운영하게 되어 유닛 주파수를 조절하고, 해수위와 조지 수위간의 낙차에 따라 출력을 조절한다. 이때, 각 유닛에서는 파도, 파랑 및 유속 등 외란에 따라 각 유닛별로 출력이 각기 다른 변화를 가져오게 된다. 또 조속기에 의한 조정율을 변화하여 각 유닛별 출력을 조절함으로써 종합적으로 출력을 증감하게 된다. 전원과 부하사이의 부하변동이나 전원변동을 자동전압조절

하며, 유닛별 유속과 파랑 등을 감시하여 속도를 일정하게 조절함으로써 총체적으로 운영하게 된다.

그림 8 발전출력 조인트 제어 개념도

Fig. 8 Block diagram of generation output joint control

4.4.5 조속기 운전

그림 9는 조속기 제어 시스템이다. 그림 9와 같이 수차발전기가 계통에 병인된 후 조속기는 조석 수위를 추종하여 수위제어기로부터 유효낙차를 계산하고 계산된 낙차에 따라 유량과 수차출력을 제어하는 유량제어기와 가이드 베인의 개도를 조정하는 개도 제어기 등과 함께 최대출력 운전이 될 수 있도록 가이드 베인과 런너 블레이드 각도를 제어한다. 이때 속도 제어기는 계통주파수와 부하 특성에 따라 수차의 속도를 비교하면서 전력계통 주파수에 맞게 제어한다.

그림 9 조속기 제어 시스템

Fig. 9 Governor control system

5. 결 론

본 논문에서는 조력발전의 핵심기술 국산화를 위하여 조력발전 수차 발전기 기동정지 시스템제어시스템에 관하여 기초 연구를 수행하였다. 조력발전소는 조석간만을 예측하고 조지의 수량관리를 최적화하고, 다수의 수차발전기를 통합 조작하는 대규모 시스템을 간단화하는 미들웨어시스템을 제시하였다. 조력발전의 각 조석에 따른 최대발전량 산정 시뮬레이션과 기동정지 시간 결정 방법을 논하였다. 또 조력발전 수차발전기의 연계운영 장비인 조인트 제어에 대한 개념도와 하드웨어장치용 미들웨어 개발을 위한 블록도와 순서도를 제시하였다.

현재 PC 기반 기동·정지 제어시스템의 최적화 알고리즘을 구현하고 시제품 하드웨어 설계가 진행 중이다. 향후 발전량의 극대화와 시스템의 현장 최적화를 위해서 조력발전소의 현장 데이터를 활용한 테스트베드의 현장 적용과 함께 실제 병렬운전 결과를 분석하는 등의 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지 융합원천기술개발 사업 연구과제인 동시에 2013년도 인택전기전자로부터 연구비를 지원받아 수행한 연구과제입니다.

References

- [1] Kyu-Ho Kim, Sook-Kee Kwon, Tae-Hun Kim, "Tidal Generation Technology and Status", Trans. on The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 55, No. 8, pp. 32~37, 2006. 8.
- [2] Bernshtein, L.B., "Tidal power development-a realistic, justifiable and topical problem of today", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 591~599, 1995.
- [3] Chul-Won Park, Yoon-Sang Kim, Min-Hwan Oh, Byong-Og Cho et al., "Development & demonstration of start-stop control system at turbine-generator", Ministry of Knowledge Economy Technology Innovation Program, 1st year report, pp. 1~197, 2012. 10.
- [4] Min-Hwan Oh, Jae-Hoon Kim, Kwang-Chul Shin, "Introduction of Joint control system for the Shiwa Tidal Power Plant Construction", KIEE Summer Conference, pp. 2222~2223, 2008.
- [5] Min-Hwan Oh, "Optimum Operating Plan of Tidal Generation", Small Hydro Power/Marine Energy International Seminar, 2007.
- [6] Kang D.H., Kim J.D., Him J.L., Shin K.C., Oh M.H., Kim J.H., "The Design for Automatic Operation of

- Tidal Power Generation Equipment”, KIEE Summer Conference, pp. 2579~2581, 2005.
- [7] Hyun-Han Kim, Kwang-Ho Kim, Jong-Chan Jeong, Sung-Ho Park, Yeon-Ho Ok, Hyung-Chol Choi, “Tidal Power Station Excitation System for a Considering Wave Characteristic”, KIEE Summer Conference, pp. 251~252, 2008. 7.
- [8] H.H. Kim, J.K. Kim, Y.H. Ok, J.G. Nam, H.C.. Choi, G.Y. Han, K.H. Kim, “The analysis of Governor Operation Characteristics of Tidal Power Station Considering Sea Condition”, KIEE Summer Conference, pp. 1227~1228, 2010. 7.
- [9] Jin-Geuk Nam, “Study on the Optimal Operating Model to Maximize the Electric Power Generation of the SIHWA Tidal Power Plant”, Korea Polytechnic University, Master’s Thesis, pp. 1~52, 2009.
- [10] M.H. Oh, H.S. Kim, J.H. Kim, G.S. Song, “The Development of Model to Calculate Maximum Power for Tidal Power Plant Operation”, KSNRE Spring Conference, pp. 505~508, 2006. 6.
- [11] K.H. Kim, K.B. Song, S.K. Kwon, T.H. Kim, “Generation Forecast for Integrating Sihwa Power into Power Systems”, KIEE PES Autumn Conference, pp. 375~377, 2006.
- [12] K.H. Kim, K.B. Song, S.B. Rhee, “Assessment of LMP on Energy Function”, KIEE Summer Conference, pp. 64~65, 2010.
- [13] C.W. Park, W.H. Ban, S.J. Ahn, Y.S. Kim, B.O. Cho, M.W. Oh, “Development of Water Turbine Generator System Modeling and Virtual Simulator for Tidal Power Plant”, KIEE Summer Conference, pp. 910~911, 2012. 7.
- [14] Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery(Using Matlab/Simulink)”, PRENTICE HALL PTR, pp. 259~350, 1998.
- [15] KENNETH R. McClymont, et. al, “Computer Representation of Excitation System”, IEEE COMMITTEE REPORT, IEEE Trans. on Power Apparatus Systems, pp. 1460~1463, 1968. 6.
- [16] C.W. Park, W.H. Ban, S.J. Ahn, “Dynamic Characteristic Analysis of Water-Turbine Generator Control System of Sihwa Tidal Power Plant”, Trans. on KIEE Vol. 61P, No. 4, pp. 180~185, 2012.
- [17] Deokar, D.N., Lingayat, N.S., Khaparde, S.A., Sukhatme, S.P., “Modelling tidal power plant at Saphale”, TENCON '98. 1998 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, Vol. 2, pp. 544~547, 1998.

저 자 소 개

오 민 환 (吳 旻 煥)

1951년 5월 25일생. 1981년 명지대학교 전기공학과 졸업, 1983년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1994년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1997년 건축전기설비기술사 취득, 1977~1984년 건설부 수자원국 주무관, 1984~2004년 한국수자원공사 책임연구원, 2004~2010년 (주)삼안 시화조력발전 운전제어시스템설계 상무, 2010~현재 (주)도화엔지니어링 소수력발전건설설계 기술고문, 2013~현재 대한전기학회 전기설비부문회 자문위원, 2013년 대한전기학회 학술상 수상.

박 철 원 (朴 哲 圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원. 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사. 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 정교수. 2012년 대한전기학회 학술상 수상.