

조력발전소를 위한 수차발전기의 기동·정지 제어시스템 개발

(Development of Start·Stop Control System at Water Turbine Generator
for Tidal Power Plant)

조병옥* · 박철원**

(Byong-Og Cho · Chul-Won Park)

Abstract

Recently, tidal power generation has gained much attention. South Korea's tidal power generation systems were imported from abroad by turnkey type and have being operated. Therefore, for efficient operation and technological independence of a tidal power system, development of core technology is required.

This paper deals with the start·stop control system of water turbine generator in the tidal power plant, as one of our development project results. Using the SCADA system, the status and operations of water turbine generator in the tidal power plant, as well as simulation for calculation of maximum power were carried out. A small model type of start·stop control device was also developed. In addition, the control system in Sihwa tidal power plant was modeled, and the results obtained by the dynamic simulation were given in graphics by 2D simulator.

Key Words : Dynamic Simulation, Efficient Operation, Maximum Power, Sihwa Tidal Power Plant, SCADA, Start·Stop Control System, 2D Simulator, Water Turbine Generator

1. 서 론

최근 지구온난화의 영향, 화석연료고갈 및 국제유가

상승 등의 이유로 신재생에너지에 대한 관심과 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 지구온난화에 대한 규제와 온실가스 감축에 대한 국제협약인 기후변화 협약의 실질적 이행에 대한 교토의정서에 의하여 우리나라도 2012년에 비준하여 온실가스 감축의무대상국으로 지정되어 청정에너지에 대한 개발 수요가 증가하고 있다[1-2]. 청정에너지 중 해양에너지는 거의 무한에 가까운 에너지를 제공하기 때문에 관심이 증대되고 있다. 이 중에서 조력발전(tidal generation)은 조석간만의 차가 큰 강의 하구나 만을 방조제와 같은 둑으로 쌓아 조지를 형성하고 밀물과 썰물로 인한

* 주저자 : 이엠퍼스트 대표이사
** 교신저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
* Main author : Emfirst Co.
** Corresponding author : Gangnueng-Wonju
National University
Tel : 033-760-8786, Fax : 033-760-8781
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 18일
1차심사 : 2014년 3월 20일
심사완료 : 2014년 4월 22일

조지 내외의 수위차를 이용하여 전기를 생산하는 발전방식이다[3]. 국내 최초로 건설된 시화호 조력발전소는 시설용량이 254,000[kW×10]대의 동기발전기식 벌브형 수차발전기이다. 이 시스템의 핵심기술은 SIEMENS, ANDRITZ Hydro 등에서 도입, 운용되어 있고 하자처리 완료기간은 2012년 11월이다.

한편 조력발전소의 계측제어 시스템은 기존의 분산제어시스템(DCS : Distributed Control System)에서 컴퓨터를 포함한 대규모 시스템의 원격감시제어시스템(SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition)으로 발전하였고 통합관리시스템으로 확대, 적용되고 있다. 그러나 선진국은 이 플랜트 예측제어시스템의 구축 및 기술이전을 기피하고 있다. 그러므로 핵심원천기술개발과 국산화를 통하여 효율적인 운용과 기술의 축적이 절실히 필요한 실정이다[4].

국내 조력발전 관련 연구는 매우 미미하다. 조력발전설비 자동기동 및 최대출력 운전 설계[5]가 시도되었고, 파랑특성을 고려한 조력발전소 여자시스템 적용에 관한 연구[6]와 해양환경을 고려한 조력발전소 조속기 운영특성 분석[7]이 진행되었다. 시화호 조력발전소의 발전량 산출과 발전량극대화를 위한 최적운전 모델, 모션 한계가격산정 등이 연구되었다[8-11]. 최근 조력발전의 핵심기술 국산화를 위해 조력발전 수차 발전기 기동정지 시스템제어 장치 개발과제[1]가 시작되었으며, 조력 발전을 위한 수차발전시스템의 모델링과 가상 시뮬레이터 개발안, 시화조력발전소 수차 발전기 제어시스템의 동적 특성 해석 등이 발표되었다[12-15].

본 논문에서는 조력발전 수차 발전기 기동정지 시스템제어 장치 개발을 기술한다. 먼저 다수의 수차발전기가 설치되어있는 조력발전소의 수차발전기 상태 및 조작을 SCADA 시스템을 이용하여 최대발전량 산정을 위한 시뮬레이션과 발전기 기동정지 제어장치 축소 모형을 개발하였다. 또한 시화 조력발전 제어시스템을 모델링한 후 동특성 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 2D 시뮬레이터를 통해 그래픽형태로 감시프로그램을 구현하였다.

2. 조력발전 최적운용 시뮬레이션

2.1 연계운영의 정의

조력발전의 경우 조지용량에 따라 10~40대의 수차발전기를 설치하게 된다. 즉 수차발전기의 수가 많기 때문에 각각의 가동 이후 전력계통운영시는 통합운전기능을 조속기에 장착하여 주기적으로 변화하는 조석과 파랑과 파도의 변화에 따른 전압 조정 및 주파수를 조절하여 전체 발전기를 동시에 운전해야 한다. 다수의 발전기를 동시에 운전하는 경우에는 발전 중 전압 및 주파수 등이 일정 범위 내에서 운전이 가능토록 연계운영시스템(Joint Control System)을 구축해야 한다. 이를 통하여 다수의 수차 조속기를 전체부하와 연계하여 1대를 운영하는 것처럼 출력을 일정하게 운전하는 것이 가능하여 진다.

2.2 조력발전 공정 분석

조위의 예측 흐름과 조력발전의 한 사이클에서 최대발전량을 확보할 수 있는 최적발전개시시점과 초소발전정지시점을 결정하는 과정이 필요하다. 조위 예측 및 발전량 모형은 일정지연시간 계산으로 순서적 방법이지만 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[1].

2.3 연계운영 최적제어장치

최대발전량 산정에 의한 수차 발전기 기동정지 결정은 조위변화, 조지수위변화, 수차효율변화, 수문방류량변화, 홍수량변화 등의 변동하는 다변수를 시간적으로 해석하여 조석간만의 전체 유량에 대한 최대발전량을 산정하고, 다수의 수차발전기의 유효전력과 무효전력 및 주파수의 변동을 종합 설정포인트(Set-point)로 정하고 조절해야 한다. 그림 1은 최적운영계획을

조력발전소를 위한 수차발전기의 기동·정지 제어시스템 개발

수행하기 위한 조위변수, 조지특성, 수차성능특성, 수 무배수특성, 수차역배수특성 등 입력 및 출력변수를 나타낸다.

Data Input
Active Load Setpoint for Joint Control
Reactive Load Setpoint for Joint Control
Head Water Level
Tailwater Level
Deviation Limit for CSP
CSP
Interval n
Unit Active Power
Unit Reactive Power
Unit Operation Hours
Unit Operation Priority
Supervisory
Ready for Sequence
Line Operation
Lo Selected
Frequency Regulation Mode
Peak Power Regulation Mode
Active Power Setpoint Mode
Operator Select Default Priority
Operator Select Operation Hour Priority
Output Signal
Optimization Active Output Signal
Optimization Alarm
Unit Active Power Opt Setpoint
Unit Reactance Power Opt Setpoint
Actual Actual Unit Priority
Unit Start Opt
Unit Stop Opt

그림 1. 최적운영계획 계산 입출력 변수
Fig. 1. Input and output variables of calculation for optimal operation plan

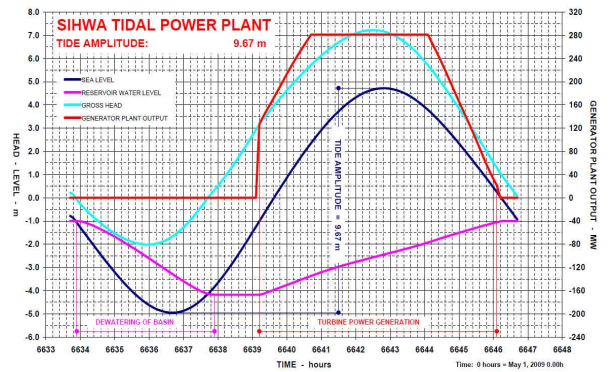
2.4 연계운영 출력결과 분석

아래는 시화호 조력발전소를 대상으로 계산된 운영 결과 그래프, 기동정지시간, 발전시간 및 발전량의 결과를 제시하였다[1].

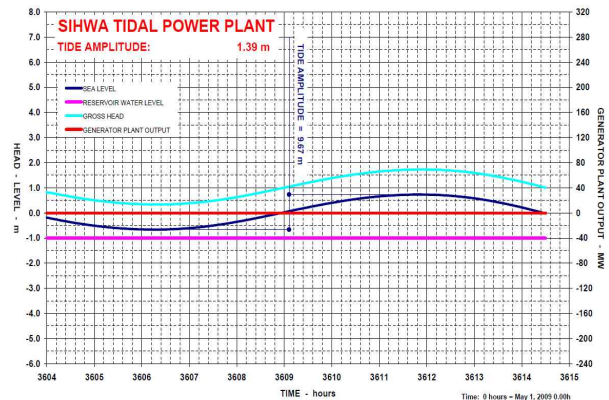
2.4.1 수위와 발전출력 곡선

그림 2는 시화호 조력발전소의 낙차(head)별 해수위(sea level), 조지수위(reservoir water level), 발전량 출력(generator plant output) 곡선이다. 시화호 조

력발전소의 최대조위(gross head) 9.67m부터 최소조위 1.37m까지 7개의 대표적인 조위패턴 중 최대조위와 최소조위일 때의 해수위와 조지수위 및 그 차, 발전기 기동정지 시간을 나타낸다. 그림 2로부터 낙차가 클수록 발전시간이 길고 낙차가 낮을수록 발전시간이 짧은 것을 알 수 있다.



(a) 최대조위 9.67m



(b) 최소조위 1.37m

그림 2. 시화호 조력발전소의 낙차별 해수위, 조지수위, 최대조위, 발전량 출력곡선

Fig. 2. Sea level, reservoir water level, gross head, generation plant out of Sihwa tidal P/P

2.4.2 발전시간 및 발전량 분석

표 1은 낙차별 발전시간 및 발전량로서, 2009년 12월 8일 18:00부터 3개의 조석에 대하여 계산한 결과이다. 1개 6분단위로 계산에서 조위 높이에 따라 발전시간 및 발전출력이 달라지는 것을 알 수 있다.

표 1. 낙차별 발전시간 및 발전량
Table 1. Generation time and generation plant output according to falling difference

번호	해수위 (EL.m)	조지수위 (EL.m)	낙차 (m)	가동시각	시작 낙차(m)	발전 시간(Hr)
				정지시각	종료 낙차(m)	발전량 (Mwh)
1	2.969	-2.165	5.139	12.8 18 : 00	3.95	4.8
				12.8 22 : 48	2.275	860.766
2	2.542	-2.121	4.604	12.9 08 : 30	3.78	4.7
				12.9 11 : 12	2.00	741.885
3	2.511	-1.917	4.429	12.9 19 : 00	3.90	3.7
				12.9 22 : 42	2.72	593.859

3. PC 기반 에뮬레이터

3.1 최적화 알고리즘을 적용한 소프트웨어 모듈 개발[1]

PC기반 의사결정 최적화 알고리즘은 첫째, 검조소의 1일치 조석 데이터를 조위가 0.1m 씩 증가할 때마다 입력으로 받는다. 둘째, 입력으로 받은 내측 조위 값을 이용하여 유량값을 산정한다. 셋째, 발전량을 계산한다. 끝으로 유량값과 발전량을 시간간격으로 저장한다. 최적화 알고리즘 처리 PC기반 에뮬레이터의 프로세스는 데이터 파싱, 전력량 계산, 6분 단위 누적, 최적화 알고리즘 검증 뷰어 프로세스로 구성하였다[16].

3.2 구현알고리즘의 검증

데이터의 기준은 검조소의 1일치를 기준으로 하였다. 관측소명은 안산, 위도는 37.191910(°), 경도는 126.647083(°)이다[1]. 표 2는 최적화 알고리즘을 이용하여 수집한 입력 데이터에 대한 결과이다. 발전 기동·정지와 배수수문 개·폐의 조건에서, 첫째 발전 기동은 외조위가 상승 289cm가 될 때 시작하여 고점을 넘어 외조위가 하강 405cm로 내려갈 때까지 이고, 둘째 배수는 외조위가 하강 355cm부터 배수하여 저점

을 넘어 외조위가 다시 상승 189cm로 올라올 때까지로 선정하였다.

표 2. 입력데이터에 의한 알고리즘의 결과
Table 2. Results of optimal algorithm using input data

항목	데이터(cm)	비고
10기당 2조석	1,033,272	2개의 조석에 의한 발전량 산정, 단위 : kWh
1년 (약705조석)	728,456,834	알고리즘1(입력 데이터) 발전량 : 발전기효율은 각각 η_{tng} 90% 일 때
시화조력 발전량(1년)	552,000,000	계획 발전량
발전효율 상승	131.97%	알고리즘1(입력 데이터) 적용 시

3.3 발전기 기동정지 제어장치 H/W 플랫폼

그림 3은 발전기 기동정지 제어장치 H/W 플랫폼 구조이다. 시스템버스를 중심으로 상위의 시스템 통신 모듈은 SCADA 및 IEC61850으로 중앙 제어 시스템 및 시뮬레이터 시스템이 연결된다. 또 하위의 CPU 모듈, 필드 버스 모듈, 메모리 모듈과 연결되는데 필드 버스 모듈은 조력 발전기와 IEC61850으로 통신을 하게 된다.

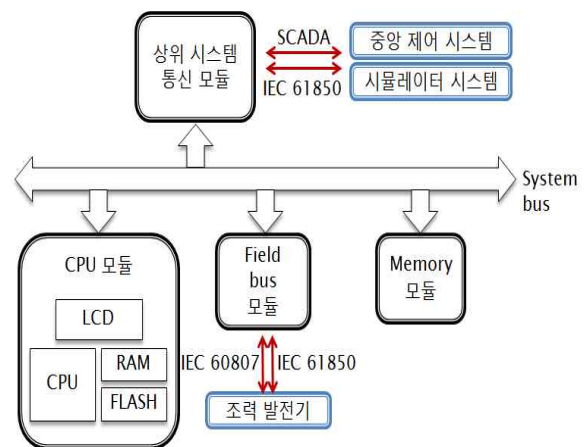
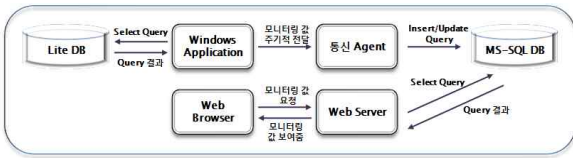


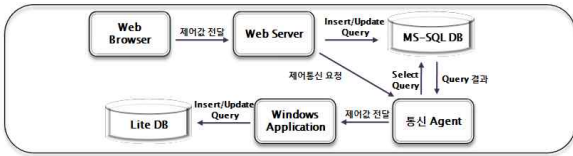
그림 3. 발전기 기동정지 제어장치 H/W 플랫폼 구조도
Fig. 3. Block diagram of generator start · stop control device H/W platform

3.4 제어장치 축소모형 구현

그림 4는 전체 프로세서에 대한 도식화된 흐름도이다. 그림 4와 같이 축소 모형 프로그램은 윈도우 어플리케이션(Window Application), 인트로 페이지, 차트 데이터 뷰어, 검색 데이터 뷰어로 구성하였다. 그림 5는 구현한 축소 모형 장비 사진이다.



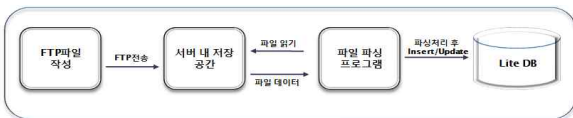
(a) 모니터링 값 흐름



(b) 제어값 흐름



(c) 최적화 알고리즘 처리 흐름



(d) 하위 통신 데이터 흐름

그림 4. 전체 프로세서 흐름도
Fig. 4. Flow chart of overall process

4. 조력발전소 다기계통 제어시스템 모델링과 시뮬레이션

4.1 모델링 및 동특성 시뮬레이션

4.1.1 조력발전시스템 모델링

PSS/E에서 구현한 조력발전시스템은, 시화조력 #1~#5까지 총 5군으로 나누었고 각각의 군은 2기의 발전기로 구성하였다. 각각의 선로를 위에 표시된 녹색

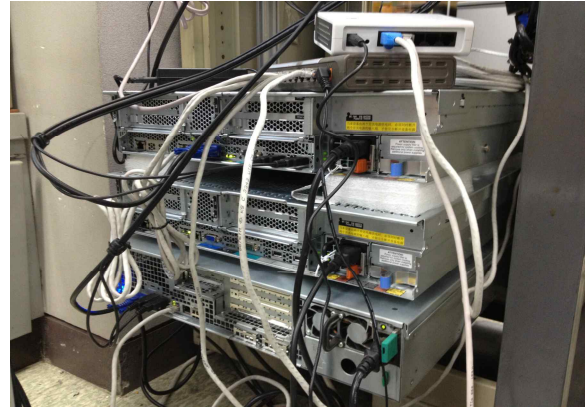
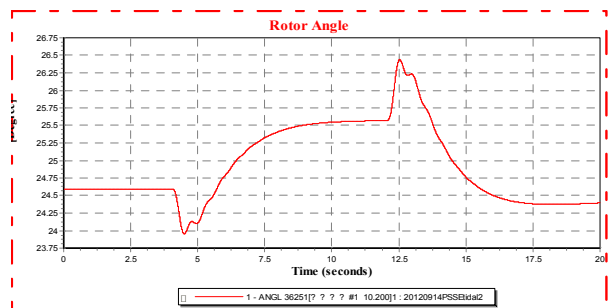


그림 5. 제어장치 축소 모형 장비
Fig. 5. Small model type of start · stop control device

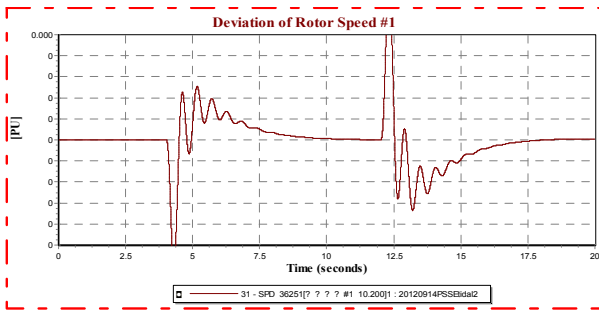
과 주황색의 화살표는 조류 계산을 통해 구해진 유효전력과 무효전력의 흐름을 보여준다[14, 17].

4.1.2 동특성 시뮬레이션

조속기 기준값의 증가 및 감소는 유량(조위차)의 변화를 입력으로 받고 가이드 베인(Guide vane)과 터빈의 위켓 게이트(Wicket gate), 러너 블레이드(Runner blade)를 제어함으로써 발전기의 회전자속도와 기계적출력을 제어하게 된다. 시뮬레이션 조건은, 주기 당 샘플수는 12S/C, 총 시뮬레이션 시간은 20초로 설정하였다. 과도 조건은 전체 기간 중 처음 4초까지는 정상상태로 운전을 시키고, 4초에서 발전기 1군의 조속기 기준값을 0.03(3%) 증가시키고, 12초까지 운전하였다. 그 후에 12초에서 기준값을 0.03(3%) 다운시키고, 20초까지 시뮬레이션을 진행하였다.



(a) 회전자 각도



(b) 회전자 속도편차

그림 6. 발전기 1군에서의 여러 가지 신호
Fig. 6. Several signals at generator in group 1

그림 6은 발전기 1군에서의 여러 가지 신호이다. 원하는 채널은 회전자각, 유효전력, 무효전력, 단자전압, 계자전압, 단자전류, 속도편차, 기계적출력, 등을 설정할 수 있으나, 본 논문에서는 회전자각, 회전자 속도편차만을 나타내었다.

4.2 2D 시뮬레이터

4.2.1 시뮬레이터 플랫폼 안 도출

시뮬레이터는 PC기반의 윈도우 환경에서 구동되며 조력발전 축소모델의 시뮬레이션 기능을 제공한다. 도출된 플랫폼은 초기화면, 광역(모든 채널)감시, 세부(각 채널)감시 3가지로 구분된다.

① 초기화면

그림 7은 축소모델의 계통도이다. 시뮬레이션 진행 버튼 클릭 시 광역 감시 화면으로 전환되고 시뮬레이션이 시작된다.

② 광역감시

그림 8은 광역감시 화면이다. 레이아웃의 좌측 서브프레임에서는 모니터링 대상 발전기와 채널을 선택할 수 있는 메뉴를 제공한다. 채널 선택 메뉴에서는 클릭시 해당 채널만을 모니터링하는 세부 감시 화면으로 전환이 된다. 발전기 선택 메뉴에서는 발전기 버튼을 클릭시 현재 모니터링 중인 채널

에서 선택한 발전기의 시뮬레이션 진행 상황을 확인할 수 있도록 하였다. 세부감시도 가능하다.

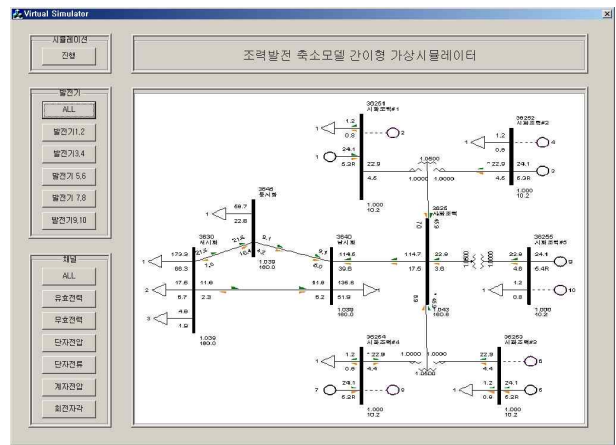


그림 7. 시뮬레이터 초기화면
Fig. 7. Initial screen of simulator

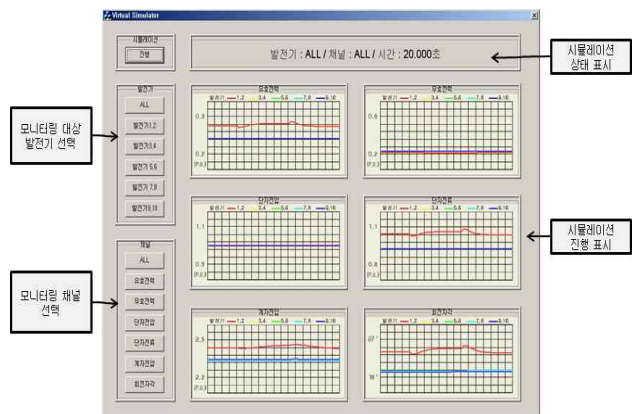


그림 8. 시뮬레이터 광역감시 화면
Fig. 8. Wide-area monitoring screen of simulator

5. 결론

본 논문에서는 해양 청정에너지중의 하나인 조력발전의 핵심기술 국산화를 위하여 조력발전 수차 발전기 기동정지 시스템제어 장치 축소 모형을 개발하였다. 이를 위해 첫째, 조력발전의 각 조석에 따른 최대발전량 산정 시뮬레이션을 수행하였다. 둘째, 최적화 알고리즘을 적용한 S/W 모듈을 개발하였고 발전기 기동정지 제어장치 축소 모형을 위한 발전기 기동정지 H/W 플랫폼을 설계하였다. 끝으로 PSS/E를 이용

하여 조력발전시스템을 모델링한 후 동특성 시물레이션을 진행하였으며 시물레이션 결과를 모니터링 할 수 있는 시물레이터를 구현하였다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(2010T100100415)과 2013년도 인택전기전자로부터 연구비를 지원받아 수행한 연구 과제입니다.

References

[1] Min-Hwan Oh, Chul-Won Park, Byong-Og Cho, Yoon-Sang Kim 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.

[2] Min-Hwan Oh, Jae-Hoon Kim, Kwang-Chul Shin, "Introduction of Joint control system for the Shiwa Tidal Power Plant Construction", KIEE summer conference, Vol. D, pp. 2222~2223, 2008.

[3] Kyu-Ho Kim et al., "Status and technology of tidal power", Proceedings of the KIEE, Vol. 55, No. 8, pp. 32~37, 2006. 8.

[4] Min-Hwan Oh, "Optimum operating plan of tidal power", Small Hydro/Marine Energy International Joint Seminar, pp. 505~508, 2007.

[5] D.H. Kang et al., "The design for automatic operation of Tidal power generation equipment", KIEE summer conference, pp. 2579~2581, 2005.

[6] 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.

[7] Hyun-Han Kim, June-Kyou Kim, Yeon-Ho Ok, Jin-Geuk Nam, Hung-Chol Choi, Gwang-Yong Han, Kwang-Ho Kim, "The analysis of Governor Operation Characteristics of Tidal Power Station Considering Sea Condition", KIEE summer conference, pp. 1227~1228, 2010. 7.

[8] Jin-Geuk Nam, "Study on the Optimal Operating Model to Maximize the Electric Power Generation of the SHWA Tidal Power Plant", Korea University of Technology and Education, Master's Thesis, pp. 1~52, 2009.

[9] Min-Hwan Oh, Hual-Soo Kim, Jae-Hoon Kim, Guy-Seok Song, "The Development of Model to Calculate Maximum Power for Tidal Power Plant Operation", The Korean Society for New and Renewable Energy 2006 spring conference, pp. 505~508, 2006.

[10] Kyu-Ho Kim, Kyung-Bin Song, Seok-Kee Kwon, Tae-Hoon Kim, "Generator Forecast for Intergrating Shihw

Tidal Power into Power Systems", KIEE power system spring conference, pp. 375~377, 2006.

[11] Kyu-Ho Kim, Kyung-Bin Song, Sang-Bong Rhee, "Assessment of LMP on Energy Function", KIEE summer conference, pp. 64~65, 2010.

[12] Park Chul-Won, Ban Woo-Hyeon, Ahn Sang-Ji, Kim Yoon-Sang, "Review of generator control system for tidal power plant", KIEE power system spring conference, pp. 269~271, 2012. 5.

[13] Chul-Won Park, Woo-Hyun Ban, Yoon-Sang Kim, Min-Hwan Oh, Byung-Ok Cho, Sang-Ji Ahn, "Development of Water Turbine Generator System Modeling and Virtual Simulator for Tidal Power Plant", KIEE summer conference, pp. 910~911, 2012. 7.

[14] Sang-Ji Ahn, Yu-Hyeon Ban, Chul-Won Park, "Dynamic Characteristic Analysis of Water-Turbine Generator Control System of Sihwa Tidal Power Plant", KIEE Vol. 61P, No. 4, pp. 180~185, 2012.

[15] Jeon Jinhong, Cho Changhee, Kim Seulki, Ahn Jongbo, "Development of a Wind Turbine Simulator based on RTDS and MG set", KIEE summer conference, pp. 515~516, 2006. 7.

[16] Yu-Hyeon Ban, Byong-Og Cho, Minhwan Oh, Chulwon Park, "Development of Start-Stop Control System at Water Turbine-Generator in Tidal Power Plant", International Symposium on Green Energy Policy Innovation, Vol. 1, No. 1, Jan. 2013.

[17] PTS(Power Technologies Solution), "PSSE V33 EDUCATION", Siemens, pp. 32~37, 2011.

◇ 저자소개 ◇



조병욱(趙炳昱)

1973년 9월 30일생. 2002년 한국방송대학교 컴퓨터과학과 졸업. 2006년 정보통신특급기술자. 2007년 정보통신특급감리원. 1998~2006년 (주)자라다 기술연구소 연구팀장. 2006~현재 (주)이애플리스트 대표이사. 2007년 한국전력공사 감사패.

2008년 수원시 우수중소기업인상.



박철원(朴哲圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대 전기공학과 졸업. 1996년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1997~2007년 강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 강릉원주

대학교 전기공학과 교수. 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사. 2012년~현재 대한전기학회 논문지 P 권 편집위원장. 2010년 대한전기학회 학술상 수상. 2013년 전력계통보호제어연구회 R&D 대상 수상.