

---

# 이차여자시스템에 의한 파력발전시스템의 출력제어

김문환\*

## The Output Power Control in the Sea-Wave Input Generation System by the Secondary Excited System

Moonhwan Kim

### 요 약

본 논문은 이차여자 유도발전기시스템의 파력발전시스템에의 적용에 관한 연구내용을 요약한다. 불규칙적인 파력 입력에 따라 변화하는 발전기의 출력을 슬립주파수에 맞추어 컴퓨터로 이차전류를 제어하여 출력전압과 출력전류를 안정화시키고자 하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 확인하기 위하여 실험실 레벨의 파력 시뮬레이터를 제작한 후 이차여자 유도발전기를 구동하였다. 파력과 같은 불규칙입력 발전시스템에 대한 이차여자 유도발전 시스템의 유효성을 실험적으로 확인하였다.

### ABSTRACT

This paper deals with the secondary excited induction generator applied to random energy input generation system. As it is preferred to stabilize the output voltage and frequency in the constant level, microcomputer controlled inverter connected to the secondary windings supplies the secondary current with slip frequency. For testing the appropriateness of this paper, the input torque simulator, which generate the statistically varied wave power input torque in the laboratory to drive the secondary excited induction generator, are constructed. The experimental and numerical results show the advantage of secondary excited induction generator system for the random input wave generation system.

### 키워드

불규칙 자연에너지 입력 발전 시스템, 파력발전, 이차여자유도발전기, 파워스펙트럼

### 1. 서론

경제활동규모에 비하여 부존자원이 절대적으로 부족한 우리 나라로서는 자연에너지의 이용은 풀어야 할 영원한 과제가 아닐 수 없다. 특히 삼면이 바다로 둘러싸인 우리로서 해양에너지는 무한한 에너지원으로 기술력을 집중시켜야 할 곳으로 생각된다. 풍력, 파력 등의 자연에너지는 특성상 에너지밀도가 매우 희박하며 확률적인 관점에서 보더라도 매우 불규칙하게 에너지의 크기가 변화한

다. 따라서 자연에너지를 무엇인가의 방법으로 전기에너지로 변환하였다고 하더라도 전기적 부하의 요구에 적절히 대응할 수 있도록 출력안정화 기법을 적용하여야 한다. 자연에너지와 같은 불규칙한 입력에서 일정한 주파수와 일정한 크기의 출력을 얻을 수 있는 방법으로 이차여자발전시스템을 들 수 있다. 이차여자발전시스템(Secondary Excited Generation System)의 적용에는 크게 다음의 두 가지 이점을 들 수 있다. 하나는 출력전류, 전압 파형을 고주파성분이 없는 깨끗한 정현

---

\*신라대학교

파를 얻을 수 있다는 점이다. 다른 점으로는 종래의 '교류발전기-정류기-인버터'의 구성에 비하여 발전제어시스템의 용량(KVA)을 비교적 적게 설계할 수 있다. 이차여자발전시스템의 파력발전(Sea Wave Input Generation System)에의 적용을 실험적으로 확인하기 위하여 우선 파력에너지를의 시뮬레이터를 구성하였다. 불규칙한 파도에너지를의 데이터는 JAMSTEC(일본해양과학기술센터)에서 행한 파력발전 실험결과를 이용하였다.[1]-[5] 발전시스템의 해석은 입출력 파형에서 얻어진 파워스펙트럼 밀도(Power Spectrum Density: PSD)의 해석에 착안하여 이루어졌다. 이 해석을 바탕으로 불규칙입력발전시스템의 파워흐름도(Power Flow Diagram)를 밝힐 수 있었으며 임의의 불규칙한 입출력 파형을 재현하여 실험실 레벨의 토크시뮬레이터(Torque Simulator)를 제작할 수 있었다. 개발한 시뮬레이터는 임펄스타입 및 웰즈 터빈을 각각 사용한 유도발전기시스템의 시뮬레이션에 적용하였다. 이 시뮬레이션시스템을 구축함으로써 실물크기의 시스템이 아닌 실험실 레벨에서 보다 손쉽게 정전압정주파수의 안정된 출력을 얻는 제어방법을 개발 할 수 있게 되었다.

## II. 불규칙파 입력 발전시스템의 해석과 시뮬레이션

자연에너지는 에너지밀도가 낮고, 불규칙한 형태를 하고 있어 유용하게 사용하기 위해서는 에너지변환, 축적방법, 고 효율화 등, 폭넓은 분야에서의 연구가 필요하다고 할 수 있다. 연구의 첫 단계로 에너지변환 시스템의 전기-기계요소의 해석과 시스템의 평가를 해야 한다. 이를 위해, 시스템에의 입출력 파형이 불규칙 파임을 고려하여 입출력 파형의 PSD 해석에 의하여 전체시스템을 해석할 수 있는 기법을 개발, 적용시켰다. 해석결과 시스템의 특성상 확정짓기 어렵거나 계측이 곤란한 변수도 전체 파워흐름도 속에서 특정 지어 컴퓨터시뮬레이션으로 그 양상을 파악할 수 있게 되었다. 실제규모의 실험에서 파라미터를 변화시켜가며 실험하기가 어려운 점을 고려할 때 정전압·정주

파수를 얻기 위한 제어기법개발에 강력한 수단이 될 수 있다.

에너지변환의 한 단계(#i)에서 다음 단계 (#j)로의 에너지변환이 선형적이라고 가정하면, 다음의 방정식이 성립한다.

$$S_{\#j}(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega) \cdot S_{\#i}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_{\#i}(\omega) \quad (1)$$

여기서,  $S(\omega)$ 는 파워스펙트럼 밀도를,  $H(\omega)$ 는 주파수 영역의 전달함수를 나타낸다.

상기 해석 기법을 적용시킨 파력발전시스템의 파워 흐름도를 그림 1(a)에 보인다. 그림 1(b)는 시스템 구성을 보인다. 시스템에서 공기실은 위아래로 움직이는 해면의 상하 운동을 공기의 흐름으로 바꾸고, 4매의 공기변 작용에 의하여 공기터빈을 일정한 방향으로 회전시킨다. 에어터빈에 직결되어 있는 발전기에서 최종적으로 전기에너지를 얻는 시스템이다. 각 에너지변환 단계에서 측정된 출력 파형의 PSD 파형으로 (1)식을 이용하여 각 단계의 전달함수를 구할 수 있었다.

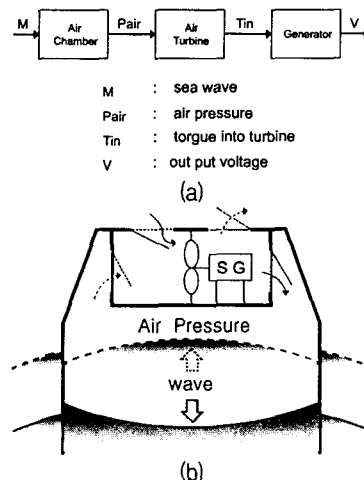


그림 1. 파워 흐름도(a)와 공기실(b)  
Fig. 1 Power flow(a) and air chamber(b) of the generation system

그림 2에 해면의 파도를 위쪽에 그리고 공기압

의 파형을 아래쪽에 보인다. 그림 2(a)는 실측된 파도와 공기압의 파형을 보이며 그림 2(b)는 컴퓨터시뮬레이션으로 재현한 파형을 보인다.

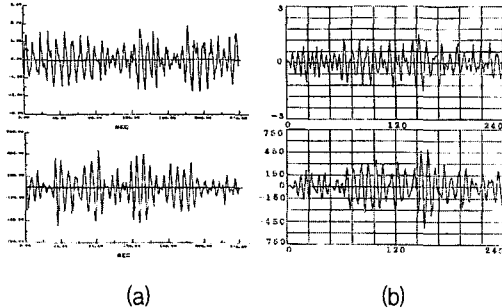


그림 2. 파도(위)와 공기압(아래)의 파형  
Fig. 2 wave form of sea wave(upper) and air pressure(down)

이 파형들로부터 PSD해석에 기인한 선형화 해석기법의 유효성을 확인할 수 있다. 그림 3은 컴퓨터시뮬레이션으로 재현한 공기터빈에 걸리는 토크의 PSD 파형을 보인다.

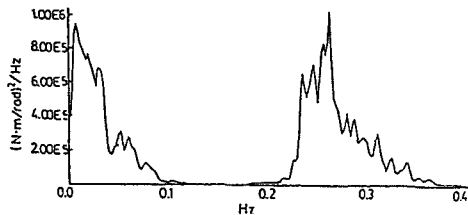


그림 3. 공기터빈 구동 토크의 PSD 밀도  
Fig. 3 PSD of the torque into air turbine

실험적으로 에어터빈에 걸리는 토크의 변화량을 직접 계측하기는 매우 어렵다고 할 수 있다. 파력발전 시스템의 각각의 에너지변환 단계에서 파형과 파라미터들의 변화를 재현할 수 있었다. 해석결과의 유효성을 확인하기 위하여 웰즈 터빈을 사용한 발전시스템에도 적용시켰다. 웰즈 터빈은 상기의 임펠스타입 터빈과 달리, 터빈에 닿는 공기흐름의 방향이 바뀌어도 회전방향이 항상 일정하게 유지되는 터빈으로, 공기흐름의 방향이 불규칙하게 변하는 파력발전시스템에서 각광을 받고

있다.

두 타입의 터빈을 사용한 시스템을 해석하여 얻어진 터빈 토크의 시뮬레이터를 실험실에서 재현하였으며 얻어진 실험결과와 한 예를 다음에 보인다.

### III. 이차여자유도발전 시스템

PSD 해석에 기초한 해석기법을 이용하여 정전압·정주파수의 출력을 얻기 위한 이차여자유도발전 시스템의 제어설계에 적용하였다.<sup>[6],[7]</sup> 발전기의 회전자가 파도에 의한 토크에 따라 불규칙하게 변화하면 정주파수는 이차 권선을 슬립주파수로 제어함에 따라 이룰 수 있고, 또, 정전압은 출력전압의 실효치를 궤환제어 함으로서 일정하게 얻을 수 있다. 그림 4는 유도발전기의 단면을 보여준다.

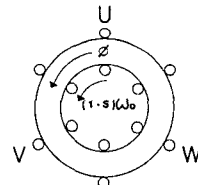


그림 4. 유도발전기의 단면도  
Fig. 4 Schematic sectional view of induction generator

회전자의 회전속도가  $(1-s)\omega_0$  [rad/sec]이면 이차 권선은  $s\omega_0$  [rad/sec]의 속도로 여자된다. 결과적으로 주 자속은 (2)식과 같이 둘의 합인  $\omega_0$ 의 속도로 회전하게 된다.

$$s\omega_0 + (1-s)\omega_0 = \omega_0 \quad (2)$$

일반적으로 유도기의 과도응답해석에는 이축이론이 널리 사용되고 있다. (3)식에 유도기의 이축이론을 보인다. 식에서  $\alpha, \beta$ 축은 자계와 동기하여 회전한다.

$$\begin{pmatrix} V_{1\alpha} \\ V_{1\beta} \\ V_{2\alpha} \\ V_{2\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & -\omega_0 L_1 & 0 & -\omega_0 M \\ \omega_0 L_1 & R_1 & \omega_0 M & 0 \\ 0 & -s\omega_0 M & R_2 & -s\omega_0 L_2 \\ s\omega_0 & 0 & s\omega_0 L_2 & R_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -i_{1\alpha} \\ -i_{1\beta} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 아래첨자 1 과 2는 각각 유도기의 일차 축과 이차 축을 나타낸다. 그리고  $\omega_0$ ,  $s$ ,  $V$ ,  $I$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $M$  는 각각 주 자속의 회전속도, 슬립, 전압, 전류, 저항, 자기 그리고 상호 인덕턴스를 나타낸다. 단,  $L_1 = l_1 + M$ ,  $L_2 = l_2 + M$ 이다.  $l_1$ ,  $l_2$  는 각각 일, 이차 축의 자기인덕턴스이다. (3)식에서 이차 축의 전류, 전압의 크기는 다음 (4), (5)식으로 표현된다.

$$I_2 = \frac{R_L + R_1 + j\omega_0 L_1}{j\omega_0 M} I_1 \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{A + B + C}{j\omega_0 M} I_1 \quad (5)$$

단, (5)식에서

$$A = s\omega_0^2(M^2 - L_1 L_2), \quad B = R_2(R_1 + R_L)$$

$$C = j\omega_0\{L_1 R_2 + sL_2(R_1 + R_L)\} \text{ 이다.}$$

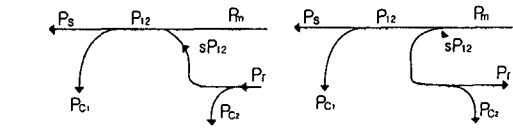
유도기의 고정자 축의 출력파워  $P_s$ , 회전자 축의 입력파워  $P_r$ , 그리고 기계적 입력 파워  $P_m$ 은 (6)-(8)식으로 표현된다.

$$P_s = -R_1 I_1^2 + \omega_0 M(i_{2\beta} i_{1\alpha} - i_{2\alpha} i_{1\beta}) \quad (6)$$

$$P_r = R_2 I_2^2 + s\omega_0 M(i_{2\beta} i_{1\alpha} - i_{2\alpha} i_{1\beta}) \quad (7)$$

$$P_m = (1-s)\omega_0 M(i_{2\beta} i_{1\alpha} - i_{2\alpha} i_{1\beta}) \quad (8)$$

(6)-(8)의 방정식에 따라 동기속도 이상과 이하의 각각의 경우의 파워 흐름도를 그림 5에 나타낸다.



(a) at subsynchronous (b) at supersynchronous  
 그림 5. 동기속도 이하(a)과 이상(b)에서의 파워흐름도  
 Fig. 5 Power flow at sub- and supersynchronous speed of rotor

공기터빈에서 발전기에 걸리는 파워를  $P_m$ 이라고 하면 동기속도 이하에서는 일차 축에 전달되는 파워  $P_{12}(=P_m/(1-s))$ 가 기계적 입력 파워  $P_m$ 보다 커진다. 이 경우 이차 축 전원에서 부족한 파워  $P_r(=sP_{12})$ 를 보충하게 되며 출력은  $P_1(=P_{12})$ 으로 일정하게 된다. 반대로 동기속도 이상에서는 이차 축 파워가 일차 축으로 나오게 되어 회생제동의 상태가 된다. 이처럼 동기속도의 상하의 경우, 이차 축의 여자전원  $P_r$ 을 제어함으로써 정전압·정주파수 출력을 이룰 수 있다. 이는 종래의 ‘교류기-정류기-인버터’보다 파워변환의 용량(KVA)이 적게 된다는 것을 의미한다.

#### IV. 정전압·정주파수 출력시스템의 구현

그림 6에 이차여자제어방식을 적용한 불규칙입력 발전시스템을 보인다. 토크시플레이터는 불규칙 토크신호 발생기, PWM 트랜지스터 초퍼, 그리고 직류모터로 구성되어 있다. 불규칙 토크신호 발생기는 백색노이즈와 필터로 구현하고 있다. 필터는 실측된 발전시스템의 PSD해석에서 구한 각 에너지변환단계의 전달함수를 이용하여 구성하였다. PWM 트랜지스터 초퍼는 파력발전시스템의 공기터빈에서 나오는 토크의 시플레이션 파형에 따라 직류모터의 전기자 전류를 제어한다. 정주파수 제어는 (2)식에 의해 정해지는 기준이 되는 현재 슬립주파수와 바로 전 단계의 슬립주파수의 차를 비교하여 전 단계의 슬립주파수에 정해진 양만큼 한 단계를 더해주거나 빼준 슬립주파수 값을 사용한다. 발전기의 출력전압 값은 유도기의 이차 전류 치와 슬립 값으로 결정된다. 이차 전류

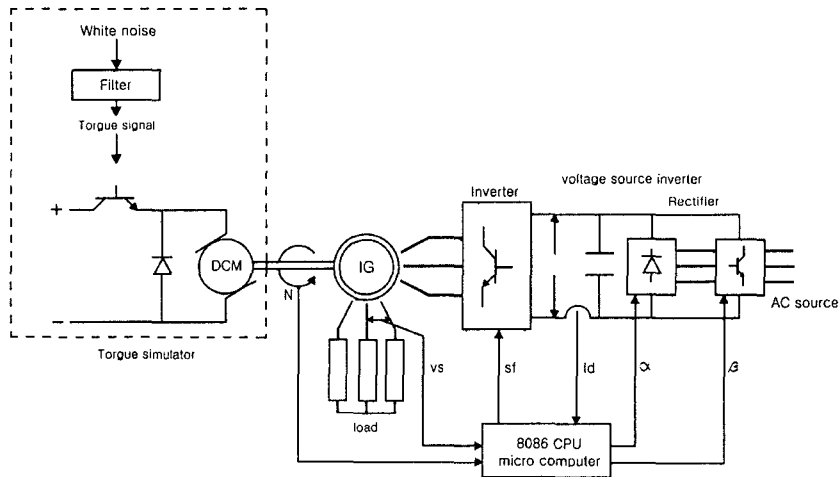


그림 6. 발전시스템의 개략도  
Fig. 6 Schematic total generation system

치를 제어할 수 있도록 사이리스터 삼상 전파정류기가 사용되었다. 점호각은 기준 출력 전압 치와 바로 전 단계의 출력 전압의 차에서 결정된다. 점호각의 증감에는 신뢰도향상을 위해 델타변조방식을 채용하였다. 그림 6에서 보이는 일차 측 출력전압  $V_s$ 의 계환제어는 부하의 값이 바뀌어도 출력전압  $V_s$ 를 일정히 유지시킨다. 마이크로시스템은 인버터 주파수 값과 정류기의 점호각을 제어한다. 실험시스템의 샘플링 값은 5msec이다. 실험대상인 해양의 파도 주기와 비교하여 충분히 적은 값이라고 할 수 있다.

서 알 수 있듯이 부하가 변화할 때의 시스템의 응답을 보여준다. 실험결과에서 알 수 있듯이 실험실레벨의 파력발전시스템을 구축하여 출력전압의 값을 일정하게 제어하여 양호한 결과가 얻어졌다. 그림 10은 정전압·정주파수 제어된 출력전압의 파형과 PSD 분포를 보여준다. 전압형 인버터의 채택과 슬립주파수에 의한 제어로 출력전압 주파수가 기준치에 일치하며, 파형도 정현파로 얻을 수 있었다. 이러한 결과들은 파력발전시스템에의 이차여자발전시스템의 적용과 정전압·정주파수의 유용한 출력을 얻을 수 있는 것을 보여준다.

### V. 실험 결과

실험에서는 6극, 용량 2.2(KVA)의 권선형 유도발전기와 2극, 용량 2 (KW)의 직류전동기가 사용되었다. 토크시뮬레이터에는 두 종류의 공기터빈을 적용하였다. 임펄스타입과 웰즈 터빈이다 각각의 실험결과를 그림 7-10에 보인다. 그림 7, 8 그리고 10은 임펄스 타입의 공기터빈의 실험 결과이며 그림 9에 웰즈 터빈의 실험결과를 보인다.

그림 7과 9는 일정한 부하를 사용할 때의 실험 결과이다. 그리고 그림 8은 부하전류  $I_d$ 의 변화에

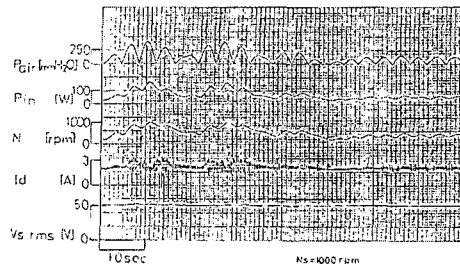


그림 7. 임펄스타입의 실험결과 (일정 부하)  
Fig. 7 Experimental result of impulse type, with constant load

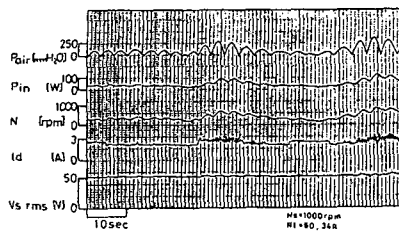


그림 8. 임펄스타입의 실험결과 (변동 부하)  
Fig. 8 Experimental result of impulse type, with varying load

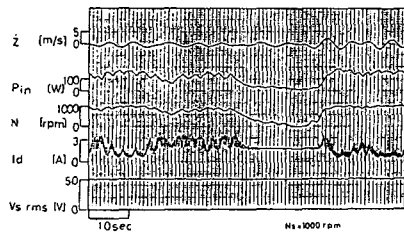


그림 9. 웰즈 터빈의 실험결과(일정 부하)  
Fig. 9 Experimental result of Wells turbine, with constant load

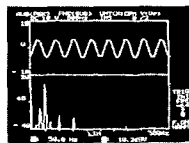


그림 10. 출력전압파형(위)과 그 파워스펙트럼 밀도(아래)  
Fig. 10 Waveform of output voltage(upper) and its power spectrum density(lower)

### V. 결론

PSD함수의 해석에 의하여 파력발전시스템의 해석과 그 전달함수를 구하였다. 이를 기초로, 실험실 레벨의 실험이 가능하게 파력입력의 토크 시뮬레이터를 구축하였다. 이차여자유도기의 이차 측에 인버터의 제어기법을 이차이론에 입각하여 설계하였으며 파력입력 토크시뮬레이터로 그 실효성에 대하여 실험하였다. 실험결과 정전압·정주파수의 안정된 출력을 얻어 그 유효성을 확인하였다. 제안하는

시스템은 종래의 불규칙입력발전시스템에 적용되는 방법보다 보다 더 적은 에너지변환용량으로 안정된 출력을 얻을 수 있다. 그러한 의미에서 본 시스템은 다른 형태의 자연에너지(풍력, 조력 등)를 이용하는 불규칙입력발전 시스템의 해석 및 출력제어에도 폭넓게 사용될 수 있다고 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] Yokomizo, Kaimei형 파력발전장치의 이론해석(제1보), Jamstec 시험연구보고 제10호, 97-127, 2. 1983.
- [2] Hotta, Wells turbine실기성시험, 제1회 파랑에너지심포지엄논문집, Vol. 1, No. 1, 191-199, Tokyo, 11. 1984
- [3] Hotta, 파력발전장치 'Kaimei'의 발전성능에 관하여, (일본)토목학회 심포지엄, Vol. 1, No. 1, Tokyo, 6. 1987
- [4] Nagata, Construction of Offshore Floating Wave Power Device "Mighty Whale", IHI Engineering Review Vol.33, No.1 24-29 1. 2000
- [5] Ohgata, 파력발전의 현상과 장래, (일본)에너지와 자원, 제132호, 50-54, 3. 2002
- [6] Kwack, 2관성 서보계에서의 feedforward control, (일본)고속신호처리응용기술학회지, 21-27, 9. 2001
- [7] Ishii, 벡터제어를 이용한 PWM cyclo-converter의 제어특성, (일본)전기학회산업응용부문대회, 1203-1208, 8. 1999

### 저자 소개



김문환(Moonhwan Kim),

일본 케이오대학 이공학연구소 수료

(공학석사, 공학박사).

일본 요코가와전기 제1연구부 근무,

한국전기연구소 책임연구원

신라대학교 자동차공학과 조교수

※ 관심분야 :정보시스템, 메카트로닉스, 시스템제어, 에너지변환