

## 풍력발전용 유도발전기 시스템의 최적제어

°최선필, 허태원, 박지호, 노태균\*, 정재륜\*, 우정인  
 동아대학교, 유한대학교\*

### Optimal Power Control of Wind Induction Generator System

°SunPill Choi, TaeWon Heo, JeeHo Park, TaeGyun Noh\*, JaeRoun Jung\*, JungIn Woo  
 Dong-A Univ., YuHan College\*

#### ABSTRACT

In this study, We proposed high efficiency wind power generator system for induction generator used SVPWM swiching inverter.

First, We propose Equivalent Circuit for Induction Generator, it's characteristics equation, and power equation of slip. In addition, we suggest Pick Power Traction Slip control methods, adapted variable wind power system. We study simulation result for the proposed system and output power by slip effect. and we identify SVPWM of suitable wind power system by comparison between SPWM and SVPWM

Consequently, we show that the system control result from variable wind power is suitable.

#### 1. 서 론

최근의 급격한 환경 오염은 청정 에너지의 활용과 함께 풍력 및 태양전지 등에 의한 전원 개발을 급속히 요구하고, 이에 부응하여 효율적으로 적용될 수 있는 발전기와 그 시스템의 개발이 요구되고 있다. 특히 풍력발전기는 시변적이고 충격적인 동력원에 의해서 발전력을 얻게 되므로, 발전기의 구조가 간단하고 견고하며 보수가 용이한 유도발전기가 그 활용을 넓히고 있다.

본 논문에서는 농형 유도전동기를 고정자 여자하고, 시변 충격적인 풍동력을 회전자에 가하여 유도발전기로써 운전시킨다. 슬립에 의해 운전되는 유도기는 풍력에 따라 진동적인 슬립변화를 가지게 되므로 고효율의 정출력 발전을 얻기 위한 여자방법을 제안한다. 또한 발전기의 출력 주파수를 검출하여 스위칭 전압에 의해서 여자전원을 제어하고 또한 출력 전력을 검출하여 슬립을 제어하므로써

발전기의 출력전력을 고 효율로 제어하고자 한다. 제안된 시스템에서 가변 슬립에 따르는 출력특성을 시뮬레이션에 의해서 그 타당성을 검토한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 농형유도발전기 특성

유도 전동기에서 슬립출력이 되는 회전자를 유도발전기의 슬립축 동력원으로 등가시킨 유도발전기의 등가모델은 그림 1과 같다. 해석의 단순화를 위해 전압과 전류는 정현파로 가정한다.

그림 1에서  $X_s$ ,  $X_n$ ,  $X_m$  은 각각 정격주파수에 대한 고정자누설리액턴스, 회전자누설리액턴스, 여자리액턴스,  $R_s$ ,  $R_r$ ,  $R_m$  은 각각 고정자, 회전자 및 여자축 저항이고  $\omega$ ,  $v$ ,  $V_T$ 는 고정자 여자각속도, 회전축속도와 여자전압을 나타낸다.

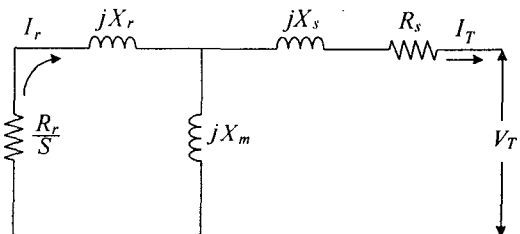


그림 1 유도발전기 등가모델

Fig. 1 Equivalent Model of Induction Generator

발전기의 출력 어드미턴스  $Y_G$  는 식 (1)과 같다.

$$Y_G = \frac{1 + Y_m Z_r}{Z_r + Z_s + Z_r Z_s Y_m} \quad (1)$$

여기서

$$Z_r = \frac{R_r}{S} + jX_r, Z_s = R_s + jX_s$$

$$Y_m = \frac{1}{jX_m} \quad S = \frac{(w - v)}{w}$$

또 회전자 전류  $I_r$  은 식 (2)와 같다.

$$I_r = -\frac{V_T}{Z_r + Z_s + Z_r Z_s Y_m} \quad (2)$$

여기서 풍력발전 특유의 진동적 출력에 대한 레귤레이션 효율을 고찰하기 위해서 슬립 어드미턴스를 구하면,

$$Y_G = \frac{A_0 S^2 + A_1 S + A_2 + j(B_0 S^2 + B_1 S + B_2)}{R_r(C_0 S^2 + C_1 S + C_2)} \quad (3)$$

단,  $A, B, C$ 는 시스템의 정수이며 참고란에 나타낸다.

출력 회전자 전류  $I_r$  는 식(4)와 같이 주어진다.

$$|I_r|^2 = \left(\frac{S}{R_r}\right)^2 \frac{V_T^2}{C_0 S^2 + C_1 S + C_2} \quad (4)$$

발전기 출력은 식 (5)와 같다.

$$P_G = -V_T^2 R_e [Y_G] (R_e \text{ 는 실수부})$$

$$P_G = -\frac{V_T^2 (A_0 S^2 + A_1 S + A_2)}{R_r (C_0 S^2 + C_1 S + C_2)} \quad (5)$$

$P$ 의 최대치가 되는 슬립  $S$ 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$S = -\frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (6)$$

따라서, 발전기의 슬립 임피던스 정수의 변동에 따라 가변되는 여자전압과 발전출력을 고찰 할 수 있다.

## 2.2 농형 유도 발전기의 풍력운전 시스템

그림 1의 등가회로와 같은 농형 유도 발전기를 운전하여 그 출력 특성을 고찰하고 등가 시뮬레이션 하기 위해서 그림 2와 같은 시스템이 제안된다. 제안된 시스템에서 유도발전기의 고정자 여자전원은 계통 연계된 인버터 및 컨버터에 의해서 공급되고, 이때 계통전원은 정류되어 유도전동기의 고정자를 초기 여자하고 슬립 구동되는 회전자에 의해서 발전 모드로 전환되고 유도발전기로 운전되고, 발전 출력의 일부는 전원측 회생 전력으로 환원된다. 여자전원의 제어는 게이팅 회로에 의해 펄스 패턴으로 제어되고 있다.

시스템에서 농형 유도기 발전 능력을 고찰하기 위해서 3상, 4극, 200V, 60Hz, 1.2Kw, 1900rpm으로

구동시켰을 때의 출력 실측파형을 그림 3에 나타낸다. 그림에서 파형 ①, ②는 전기자 출력 전압, 전류 파형이고, 파형 ③은 이때의 전력파형으로서 농형 유도 전동기 구동의 역특성을 나타내고 있다. 각 파형은 소형 농형유도기의 적은 관성에 의해서 순시 기차력의 유기부족에 의한 유기 고조파가 포함되는 것을 볼 수 있다.

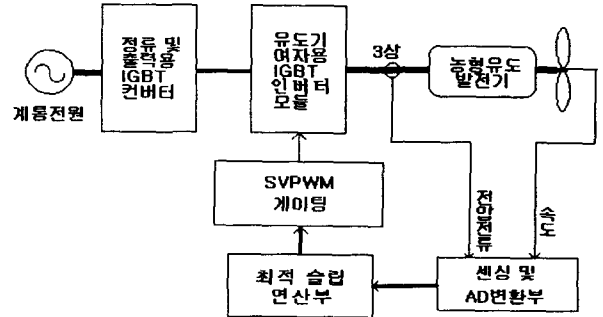


그림 2 시스템 구성도

Fig. 2 Configuration of the system

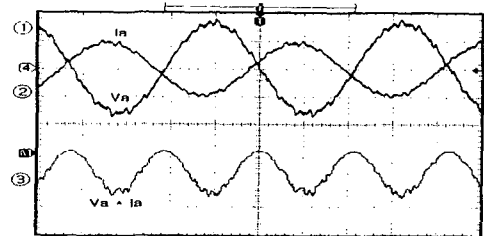
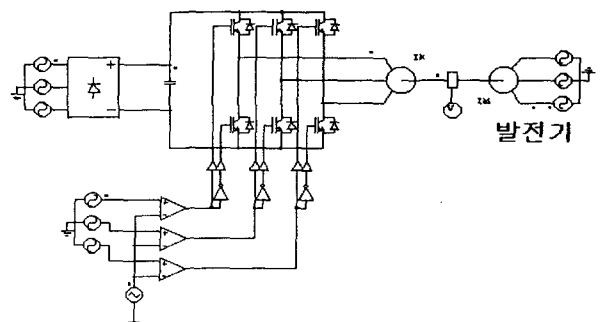


그림 3 농형 유도 발전기의 출력 파형

Fig. 3 Output wave form for squirrel-cage induction machine

## 2.3 농형 유도 발전기의 시뮬레이션

농형 유도기의 발전 순시구동 특성을 실험결과와 비교하기 위하여 그림 4와 같은 시뮬레이션 구성도를 제안한다. 여자 전원 60Hz를 인가하고 구동속도 1880rpm에서 발전 출력이 나타났으며 이때의 발전기 출력 전압, 전류 및 순시전력을 시뮬레이션 하여 그림 5에 나타낸다.



-그림 4 농형 유도발전기 시뮬레이션 구성도

Fig. 4 Simulation circuit for squirrel-cage induction generator

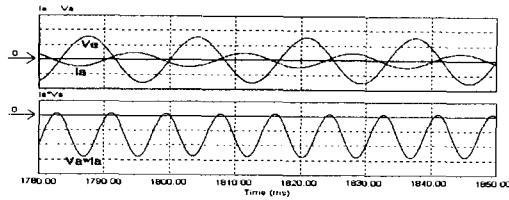


그림 5 시뮬레이션 전압 전류 및 순시전력 파형  
Fig. 5 Voltage, current, power wave by simulation

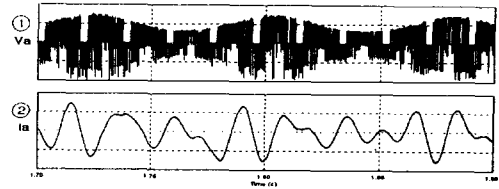


그림 7 발전기 출력단 전압전류 파형  
Fig. 7 Voltage and current wave in generator

## 2.4 최대출력 제어 시스템의 시뮬레이션 결과 및 검토

농형 유도발전기는 슬립 구동력과 여자전류에 따라 출력이 가변되므로 여자전력을 제어 및 공급하는 방법에 따라 발전기의 효율을 높일 수 있고 전력 밀도를 높일 수 있다. 여자전류와 주파수를 패턴 제어 하고 충격 구동력에 의한 유도발전력과 여자전류와의 공극 상태 에너지의 평형을 얻기 위해서 여자전원의 스위칭 패턴을 SVPWM으로 채택하여 시뮬레이션 한다.

제안된 시스템에서 식 (5), (6)에 의한 최대 전력 제어를 위해 SVPWM 인버터와 컨버터를 부가하고 제어연산 모듈을 드라이브 형태로 부가한 시뮬레이션시스템을 그림 6 과 같이 구성하고 유도발전기의 각 정수들을 표 1과 같이 채택하여 패턴 형식과 발전기 최대출력의 관계, 슬립 변동에 따르는 전압 및 전류 변동을 그림 7에서 시뮬레이션 결과로 나타낸다.

그림 7 에서 파형 ①은 농형 유도 발전기의 상 출력 전압 파형이며 SVPWM에 의한 여자특성을 나타내고 있으며 정현적 주기 펄스 패턴을 보이고

표 1 유도기 시뮬레이션 상수

Table 1 Simulation parameter of Induction machine

Parameters	value	Parameters	value
Rs	0.294Ω	Ls	0.00139H
Rr	0.156Ω	Lr	0.00074H
Pole	6	Lm	0.041H

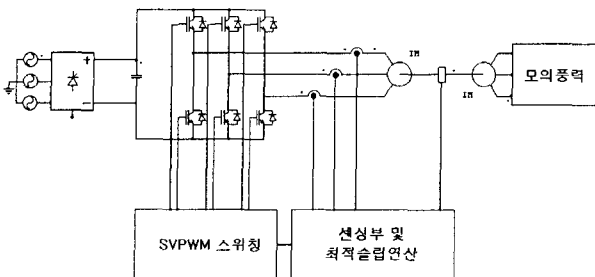


그림 6 최대출력 제어시스템 시뮬레이션 구성도  
Fig. 6 Simulation block for optical power control system

있다. 파형 ②는 한상 출력 전류 파형이며 발전용력위에 지연된 여자전류가 중첩되어 고조파 성분이 포함된 유사정현파로 나타나고 있다.

그림 8은 스위칭 방식을 따른 출력 특성으로서 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)에 의한 패턴과 SVPWM(Space Voltage Vector Pulse Width Modulation)의한 패턴의 여자전류를 가했을 때의 최대 출력 특성을 비교하고 있다.

그림 8에서 곡선 1 은 SPWM 패턴일 때의 최대 출력 곡선이며 곡선 2 는 SVPWM 패턴일 때의 최대 출력 곡선이다. 제안되고 있는 출력 1.2 [Kw]의 유도발전기에 의해서 기동후 1.5 [sec]에서 안정 출력이 얻어지고 SVPWM의 패턴일 때 약 10%의 출력 증대가 있는 것을 보이고 있다. 또한 기동후 1 [sec]에서 부터 공급되는 여자전류가 출력 유지 기전력에 기여하는 것을 볼 수 있다.

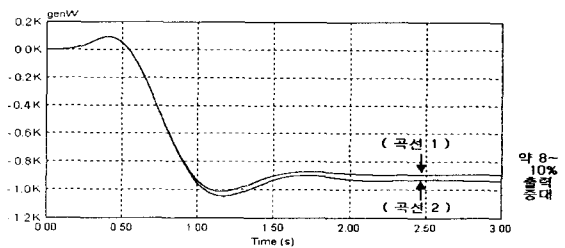


그림 8 SPWM-SVPWM 출력비교  
Fig. 8 Compare the Output Power between SPWM and SVPWM

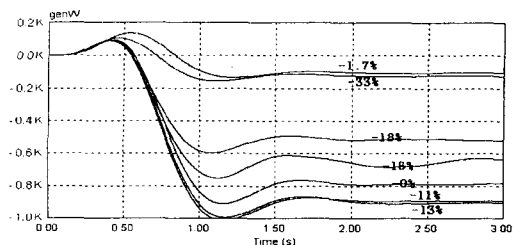


그림 9 일정속도-슬립변동에 의한 출력파형  
Fig. 9 Slip - Output Power wave form

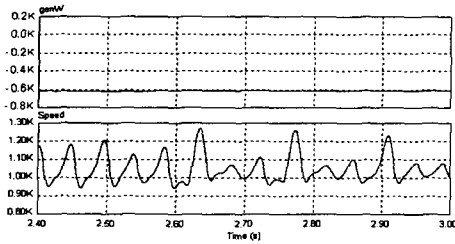


그림 10 속도변동시 출력파형  
Fig. 10 Output Power at variable speed

또한 여자 전류의 패턴을 SVPWM 패턴으로 채택함으로써 직류 링크단의 손실을 줄이고 여자포화가 감소되어 최대 출력이 증대되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9는 슬립 변동에 따르는 출력전력의 특성으로서 슬립 13%에서 최대 출력 4.7 [Kw]를 얻고 있고 슬립 9%, 15%, 18%에서 급격한 선형특성을 보이고 있다. 이는 농형 유도발전기에서 유기기전력에 의한 회전자 단락전류가 임펄스 적으로 발생하여 슬립에 대한 유기기전력의 발생이 급변하는 것을 보이고 있다. 또한 기동후 초기 여자에서는 기동 근처와 정속도 33% 근처에서 여자전류에 의한 회전자의 진동을 보이고 있다.

그림 10은 정속도 안정 출력에서 부하 가변이나 풍력가변에 따르는 발전기의 출력특성을 고찰한 것으로서 기동후 2.4 [sec]에서 부터 축회전 속도를 900 [rpm]에서 1300 [rpm]으로 진동 시켰을 때의 출력 전력 특성이 거의 변함이 없음을 보여주고 있다. 이는 채택된 SVPWM 패턴에서 가변속 충동적 풍력 구동력에 대응하여 여자전류가 최적으로 제어 되고 있음을 보여주며, 안정운전의 범위를 제시하고 있다.

### 3. 결 론

본문에서는 순시급변의 충격 구동력에 의해 발전되고 있는 풍력발전기로서 그 구조적으로 가장 적합한 농형유도전동기를 발전기로 채택하여 고효율운전을 하기 위한 시스템과 제어방식을 제안했다. 슬립구동에 의해서 2차적 유기기전력특성에 의해 출력되고 있는 유도발전기의 특성에 따르는 제어방법을 찾기 위해서 유도발전기의 등가모델을 제시하고, 등가 어드미턴스와 슬립 출력식을 제시했으며, 출력 어드미턴스 이득에서 여자전류의 공급 방식에 따라 안정적이고 효율적인 최대발전출력을 얻을 수 있는 슬립 특성식이 제안되었다. 제안된 시스템과 슬립운전에 의해 얻어지는 발전 출력특성을 시뮬레이션에 의해 고찰하였으며, 또한 여자전류의 제어

방법에서 SPWM 스위칭과 SVPWM 스위칭 방법을 비교하여 순시 급변 충격 운전되는 유도발전기에서 SVPWM 방식이 우위한 것을 제시하였으며, 슬립에 의해 발전되는 유도발전기를 슬립에 의해 직접 제어 하므로서 풍력변동에 따르는 속응 출력 제어특성을 제시했다. 결과적으로 부하급변과 충격적 구동력에 대해 폭넓은 정출력 제어범위를 가지는 방법을 제시했다.

### 참 고 문 헌

- [1] 원종수, 원충현, 김광현, 1995. AC 서보모터와 마이컴제어. 동일 출판사.
- [2] 서영탁, 풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 여자 특성, 경북대학교.
- [3] Marcelo Godoy Simoes, Bimal K. Bose, Ronald J. Spiegel, "Design and Performance Evaluation of a Fuzzy Logic Pased Variable Speed Wind Generation System", ITIA, Vol 33, No. 4, pp. 956~965, 1997.
- [4] D.W. Novotny, T.A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives, Clarendon Press Oxford.
- [5] Bimal K. Bose, Power Electronics and Variable Frequency Drive, IEEE Press.
- [6] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press.

### [참 고] 식 (3), (4), (5)의 시스템 정수

$$A_0 = \frac{R_s}{R_r} \left(1 + \frac{X_r}{X_m}\right)^2 + \frac{X_r^2}{R_r} (1 + R_s)$$

$$A_1 = 1 + 2R_s$$

$$A_2 = R_r \left\{1 + R_s \left(1 + \frac{1}{X_m^2}\right)\right\}$$

$$B_0 = \frac{X_r}{R_r} \left\{1 + \frac{1}{X_m} \left(X_r + 2X_s + \frac{X_r X_s}{X_m}\right) + \frac{X_s}{X_r} + X_r X_r\right\}$$

$$B_1 = 2X_s$$

$$B_2 = \frac{R_r}{X_m} \left(1 + \frac{X_s}{X_m}\right) + X_s R_r$$

$$C_0 = \left\{ \frac{R_s}{R_r} \left(1 + \frac{X_r}{X_m}\right) - \frac{X_r X_s}{R_r} \right\}^2 + \frac{X_r^2}{R_r^2} \left(1 + R_s + \frac{X_s}{X_r} + \frac{X_s}{X_m}\right)^2$$

$$C_1 = 2 \left\{ \frac{R_s}{R_r} (1 + R_s) + \frac{X_s^2}{R_r} \right\}$$

$$C_2 = \left(1 + R_s + \frac{X_s}{X_m}\right)^2 + \left(X_s - \frac{R_s}{X_m}\right)^2$$