

풍력발전용 유도 발전기 최적 슬립제어

최선필¹, 박지호², 노태균³, 김동완⁴, 우정인⁵
¹동아대학교, ²동명대학, ³유한대학

Optimal Slip Control of Wind Induction Generator

Sun-Pill Choi¹, Jee-Ho Park², Tae-Gyun Noh³, Dong-Wan Kim⁴, Jung-In Woo⁵
¹Donga University, ²Dongmyung College, ³Yuhan 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

가변속 풍력발전 시스템은 정속 풍력발전 시스템과 비교해서 연간 누적 발전량이 높고, 풍력발전기의 피치각 제어가 없으므로 발전기의 전기자반작용 및 구동축의 기계적 스트레스가 감소하고 소음이 감소하는 등의 이점이 있다. 특히 풍력발전기는 시변적이고 충격적인 동력원에 의해서 발전력을 얻게 되므로, 발전기의 구조가 간단하고 견고하며 보수가 용이한 유도발전기가 그 활용을 넓히고 있고, 특히 농형 유도발전기는 가격이 저렴하고, 브러시가 없어 견고하며 유지보수 측면에서 높은 장점을 가지고 있다. 그러나 순시 여자력이 부족한 것이 단점이다.

본 논문에서는 농형 유도전동기를 고정자 측에서 여자하고, 시변 충격적인 형태의 모의 풍동력을 회전자에 가하여 농형 유도 발전기를 운전시킨다. 또한 슬립에 의해 운전되는 유도기는 가변 풍력에 따라 진동적인 슬립변화를 가지게 되고, 여자용 인버터의 제어에 의해서 부족한 순시여자력을 보완할 수 있는 슬립추종형 여자제어 방식을 적용한 고효율 발전 시스템의 구성을 제안한다. 발전기의 출력 주파수의 검출에 의하여 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) 인버터에 관한 제어 시키므로써 여자전원을 순시 부족여자를 보상하고, 또한 출력 전력을 검출하여 슬립을 제어하므로써 발전기의 출력전력을 제어하고자 한다.

제안된 시스템을 전력전자 전용 시뮬레이터인 PSIM Tool을 이용하여 가변 슬립에 따르는 출력특성과 모의 풍력을 투입할때의 시뮬레이션 결과에 의해서 그 타당성을 검토한다.

2. 본 론

2.1 농형유도발전기 등가회로

풍력발전기의 운전에는 축속도-출력 특성곡선의 정점(peak)을 추종하게 하는 방식의 정속도 운전 방식이 있

고, 이와 다른 가변속 풍력발전 시스템은 발전기의 여자전원의 조절로써 정속 발전에서 풍차익이나 기어비 등의 역할을 대신하여 축속도-출력 특성곡선의 최대 출력점을 추종한다. 이러한 방식은 정속발전을 요구하는 동기발전 시스템보다는 특성의 조절에 의해 운전영역을 확장시킬 수 있는 유도발전기 시스템에 적용되고 있다.

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

그림 1 에서 X_s , X_r , X_m 은 각각 정격주파수에 대한 고정자누설리액턴스, 회전자누설리액턴스, 여자리액턴스, R_s , R_r , R_m 은 각각 고정자, 회전자 및 여자축 저항이고 w , v , V_T 는 고정자 여자각속도, 회전자속도와 여자전압을 나타낸다.

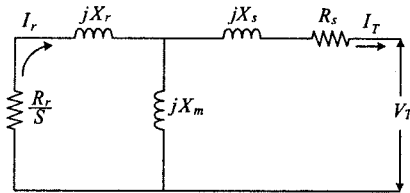


Fig. 1. Equivalent model of induction generator

발전기의 출력 어드미턴스 Y_G 는 식(1)과 같다.

$$Y_G = \frac{1 + Y_m Z_r}{Z_r + Z_s + Z_r Z_s Y_m} \tag{1}$$

여기서

$$Y_m = \frac{1}{jX_m} \quad Z_r = \frac{R_r}{S} + jX_r \quad Z_s = R_s + jX_s$$

$$S = \frac{(w - v)}{w}$$

또 회전자 전류 I_r 은 식(2)와 같다.

$$I_r = -\frac{V_T}{Z_r + Z_s + Z_r Z_s Y_m} \tag{2}$$

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

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

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.

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

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

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 풍력발전 모의 시스템

시스템에서 농형 유도기 발전 능력을 고찰하기 위해서 그림 2 과 같은 단순 시스템을 3상, 4극, 200V, 60Hz, 1.2Kw, 1900rpm으로 구동시켰을 때의 출력 실측 파형을 그림 3 에 나타낸다. 그림에서 파형 ①, ②는 전기자 출력 전압, 전류 파형이고, 파형 ③은 이때의 전력 파형으로서 유도 전동기 구동의 역특성을 나타 내고 있다. 각 파형은 소형 농형 유도기의 적은 관성에 의해서 순시 기 자력의 유기부족에 의한 유기 고조파가 포함되는 것을 볼 수 있다.

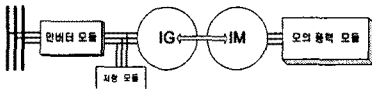


Fig. 2. Simple wind generation system for test

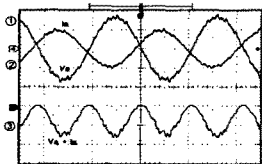


Fig. 3. Output wave form for squirrel-cage induction generator

2.3 시뮬레이션

농형 유도기의 발전 순시구동 특성을 실험결과와 비교 하기 위하여 그림 4 과 같은 시뮬레이션 구성도를 제안 한다.

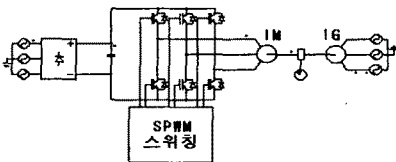


Fig. 4. Simulation circuit for squirrel-cage induction generator

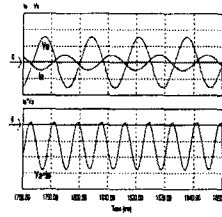


Fig. 5. Voltage, current, power wave by simulation

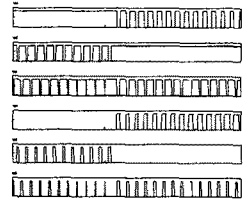


Fig. 6. SVPWM inverter switching signal

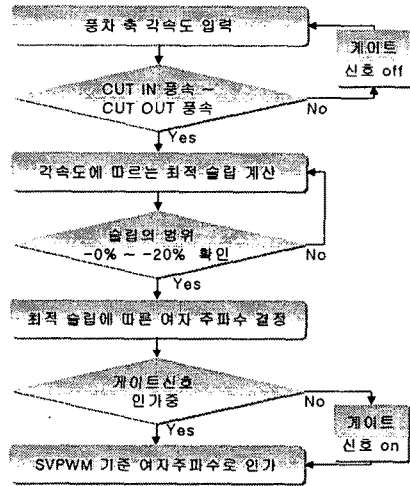


Fig. 7. Flow-chart for optimal slip control

구성한 유도발전기 모듈에서 위와 같이 결과 파형을 얻었다. 상단부의 파형은 여자 전원 60Hz를 인가하고 구동 축 속도 1880rpm에서 발전 출력이 나타났으며 이때의 발전기 출력 전압, 전류 및 순시전력을 시뮬레이션 하여 그림 5 에 나타낸다.

SVPWM 스위칭 방식은 상태 공간 벡터를 활용하여 한 상태의 스위칭을 반복형태로 인가 하지 않고 벡터 형태로 분산하여 타 스위칭 방식에 비해 보다 높은 DC단 전력 사용효율을 나타내며, 영전압 상태를 스위칭 컷오프를 하지 않고 스위칭 상단과 하단을 분리하여 한쪽 전체를 온 시킴으로써 다음 스위칭 구간에서의 스위칭 스트레스 및 리플저감 효과를 나타내어 보다 유연한 유도기 제어가 가능한 방식이다. SVPWM은 8개의 스위칭 상태를 가지고 있고 기준 전압 벡터에 가까운 유효 스위칭 벡터를 선택하고, 한 주기 기준 해석으로 벡터 인가 시간을 결정한다. 그림 6 은 SVPWM 방식을 적용한 인버터 스위칭 신호 파형을 나타내고 있다.

2.4 시뮬레이션 결과 검토

그림 8 는 본 논문이 제안한 전체 시뮬레이션 구성도이며, 농형유도기 시뮬레이션 상수는 표 1 과 같다.

Table 1. Simulation parameter of Induction machine

Parameters	value	Parameters	value
Rs	0.294	Ls	0.00139
Rr	0.156	Lr	0.00074
Pole	4	Lm	0.041

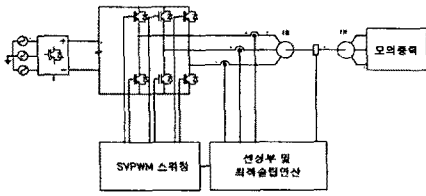


Fig. 8. Simulation block for optimal power control system

그림 8의 전체 시스템 구성도에 의한 시뮬레이션 결과 파형으로 그림 9에서 파형은 농형 유도 발전기의 상 출력 전압 파형이며 SVPWM에 의한 여자특성을 나타내고 있으며 정현적 주기의 펄스 패턴을 보이고 있다. 파형은 한 상 출력 전류 파형이며 발전동력 위에 지연된 여자전류가 중첩되어 왜곡이 발생하였으며 여자 전압이 120도통형이라 고조파 성분이 완전히 여과되지 못한 유사정현파로 나타나고 있다.

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

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

그림 11는 슬립 변동에 따른 출력전력의 특성으로서 슬립 13%에서 최대 출력 0.9 [Kw]를 얻고 있고 슬립 9%, 15%, 18%에서 급격한 선형특성을 보이고 있다. 이는 농형 유도발전기에서 유기기전력에 의한 회전자 단락 전류가 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.

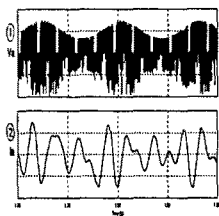


Fig. 9. Voltage and current wave in generator

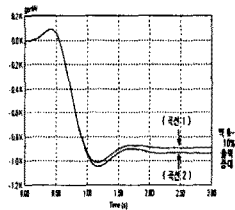


Fig. 10. Compare the Output Power between SPWM and SVPWM

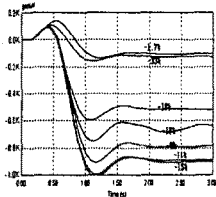


Fig. 11. Slip - Output Power wave form

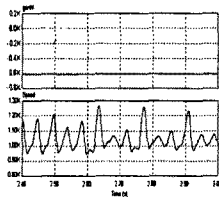


Fig. 12. Output Power at variable speed

그림 12은 정속도 안정 출력에서 부하 가변이나 풍력가

변에 따르는 발전기의 출력특성을 고찰한 것으로서 기동후 2.4 [sec]에서부터 축회전 속도를 900 [rpm]에서 1300 [rpm]으로 진동 시켰을 때의 출력 전력 특성이 거의 변함이 없음을 보여주고 있다. 이는 채택된 SVPWM 패턴에서 가변속 중등적 풍력 구동력에 대응하여 여자전류가 최적으로 제어되고 있음을 보여주며, 안정운전의 범위를 제시하고 있다.

3. 결 론

본문에서는 순시급변의 충격 구동력에 의해 발전되고 있는 풍력발전기로서 그 구조적으로 가장 적합한 농형유도발전기를 발전기로 채택하여 고효율 운전을 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 제어방법에서 SPWM 스위칭과 SVPWM 스위칭 방법을 비교하여 순시 급변 충격 운전되는 유도발전기에서 SVPWM 방식이 우위를 차지하고 있음을, 슬립에 의해 발전되는 유도발전기를 슬립에 의해 직접 제어 하므로써 풍력변동에 따르는 속응 출력제어특성을 제시했다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서영탁, "풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 여자특성", 경북대학교, (1997)
- [2] 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 956965, (1997)
- [3] D.W.Novotny, T.A.Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Clarendon Press Oxford
- [4] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drive", IEEE Press
- [5] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press
- [6] B.K.Bose, Power Electronics and Ac Drives, Prentice Hall, (1986)