

자기여자 현상 및 출력전압 안정화를 고려한 단상유도발전기의 설계방안

김 철 진*, 이 관 용*, 김 영 태**, 신 흥 교***
한라대학교*, 원주대학교**, 경상대학교***

A Design Scheme of Single-Phase Induction Generator Considering Self-excitation and Voltage Regulation

Cherl-Jin Kim*, Kwan-Yong Lee*, Young-Tae Kim**, Heung-kyo Shin***
Halla Univ*, Wonju College**, Gyeongsang Univ***

Abstract – This paper describes the performance analysis and design of single-phase self-excited induction generators. In this study, it is proposed to design the proper capacitance for self-excitation and voltage regulation, also. This methods are based on the induced MMF equations between main and the auxiliary winding. For the least influence between the two capacitors, the self-excited capacitor is selected under no load condition, while the series capacitor is designed under loaded condition. For the steady state analysis, the equivalent circuit of single-phase induction generators is used as circuit modeling using the double-revolving field theory. The validity of proposal methods and designed generator system will be confirmed by experimental and computed results.

1. 서 론

에너지 고갈에 대응하기 위한 대체 에너지 시스템의 성능 향상 및 개발에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 이러한 대체 에너지 시스템 중에서 풍력을 이용한 소형의 개별 발전시스템에는 경제적이고 소형이며 브레이시를 갖지 않으며, 유지 보수가 용이한 2권선 유도 발전기가 적합하다 할 수 있다.

본 연구에서는 자기여자 현상과 출력전압의 안정화 특성을 갖는 2권선 단상유도 발전기의 설계조건을 도출하였다. 대상 발전기는 자기여자를 위한 병렬 커패시터와 출력단의 전압안정화를 위한 직렬 커패시터를 각각 보조권선과 주권선에 연결한 구조적 특징을 갖는다. 이 시스템의 정상상태에서 자기여자 현상 및 전압안정화에 적합한 커패시터의 용량은 2중 자계 이론을 기본으로 한 등가회로로부터 제안하였다. 제안한 커패시터의 용량 선정방법으로부터 직·병렬 커패시터의 상호 영향을 최소화하기 위해 병렬 커패시터는 무부하 상태에서, 직렬 커패시터는 부하가 연결된 상태에서 결정하였다. 또한, 속도 변화에 따른 동작 주파수와 출력전압 특성을 기준주파수로 정규화하여 나타내었다.

또한, 본 연구에서는 Matlab을 이용한 시뮬레이션과 제작한 발전 시스템의 실험을 통한 비교 검토결과로부터 제안한 커패시터의 용량 결정방법 및 설계의 타당성을 입증하였다.

2. 2권선 자기여자 유도 발전기의 특성

2.1 기본구조

시스템은 원동기, 변속용 기어, 병렬 커패시터, 2권선 유도 발전기 및 부하로 구성하였다. 원동기는 속도 가변이 가능한 제어기를 갖는 유도 전동기이며, 제어 대상이 되는 유도 발전기의 축에 커플링을 통해 연결되어 회전한

다. 소형 유도 발전기는 농형 회전자를 갖는 유도 발전기로서 전기적으로 90° 의 위상각을 갖는 2권선을 사용하였다. 주권선 및 보조권선에는 각각 자기여자를 위한 병렬 커패시터 C_p 와 전압안정화를 위한 직렬 커패시터 C_s 및 저항성 부하를 연결하였다. 아래의 그림 1은 본 연구에 적용한 소형 2권선 유도 발전기의 시스템의 기본 구조를 나타낸 것이다.

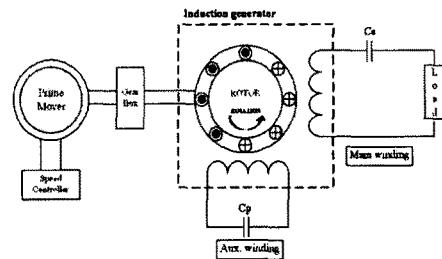


그림 1. 자기여자 유도 발전기의 기본 구조

2.2 시스템 모델링

해석을 위한 2권선 유도기의 등가회로는 2중 회전 자계 이론을 기본으로 모델링하였다[1,2,3]. 2권선 자기여자 유도 발전기의 정상상태 주파수 정규화 등가회로를 그림 2에 나타내었다.

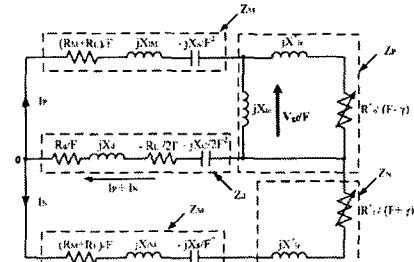


그림 2. 정규화된 2권선유도 발전기의 등가회로

그림 2에서 역방향 자계를 기준으로 한 자화 리액턴스는 고정자 측에서 본 회전자 저항과 비교해 그 값이 매우 크기 때문에 무시 할 수 있다. 또한, 자기여자를 위해 공급되는 보조권선의 무효전력 성분은 주권선과 보조권선의 임피던스 차에 의한 값으로 나타낼 수 있다. 여기서, 정격 주파수에서 측정된 파라미터들을 상수로 취하고 정규화 시킴으로써 2권선 SEIG는 각각의 속도에서 특성 분석을 할 수 있다. 그림 2로부터 2권선 유도 발전기 시스템을 위한 특성 방정식은 아래와 같다.

$$R_d = [R_A' - R_M] / 2 \quad (1)$$

$$X_d = [X_{IA'} - X_{IM}] / 2 \quad (2)$$

$$\bar{Z}_d = R_d + jX_d - \frac{R_L}{2F} - \frac{jX_C}{2F^2} \quad (3)$$

$$(R_A' = \frac{R_A}{a^2}, X_{IA'} = \frac{X_A}{a^2}, X_c = X_p - X_s)$$

$$\bar{Z}_M = \frac{R_M + R_L}{F} + jX_{IM} - j\frac{X_s}{F^2} \quad (4)$$

$$\bar{Z}_P = jX_m(\frac{R_r}{F-\gamma} + jX_{lm}) / \frac{R_r}{F-\gamma} + j(X_m + X_{lm}) \quad (5)$$

$$\bar{Z}_N = \frac{R'}{F+\gamma} + jX_{lr} \quad (6)$$

동가회로에서 자기여자 조건에 의해 node 0의 전류 합은 0이고, 따라서 루프 임피던스는 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\frac{1}{Z_M + Z_P} = \frac{1}{Z_M + Z_N} - \frac{1}{Z_d} \quad (7)$$

정규화 주파수 F 에 의한 자화리액턴스 X_m 을 결정하기 위해 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_P = \frac{(Z_M + Z_N) \cdot Z_d}{Z_M + Z_N + Z_d} - Z_M \quad (8)$$

식 (8)에서 Z_m 을 제외한, 모든 파라미터는 정격 주파수에서 결정된 값을 적용한다. 따라서 결정된 파라미터 값으로부터 F 에 따른 Z_m 을 아래의 식 (9)로 구한다.

$$Z_P(F, X_m) = \frac{jX_m(\frac{R_r}{F-\gamma} + jX_{lr})}{\frac{R_r}{F-\gamma} + j(X_m + X_{lr})} \quad (9)$$

식 (9)는 실수부와 허수부로 나눌 수 있고, 허수부를 이용함으로써 Matlab을 통해 용이하게 $Z_m(F)$ 을 구할 수 있다. 2권선 SEIG의 동기속도테스트 결과로부터 얻어진 자화특성곡선($X_m - V_g$)을 이용하여 식 (9)에서 결정된 자화 리액턴스 X_m 에 대응하는 공극전압 V_g 를 아래의 식 (10) - (11)의 특성방정식에 적용하여 2권선 SEIG의 출력특성을 알 수 있다.

$$\bar{I}_P = \frac{\frac{V_g}{F} (\bar{Z}_M + \bar{Z}_d + \frac{R_r}{F+\gamma} + jX_{lr})}{D} \quad (10)$$

$$\bar{D} = \left[(\bar{Z}_M + \bar{Z}_d) (\bar{Z}_M + \bar{Z}_d + \frac{R_r}{F+\gamma} + jX_{lr}) \right] - \bar{Z}_d^2$$

$$\bar{I}_N = V_g / \bar{D} \quad (11)$$

$$\bar{I}_M = \bar{I}_P + \bar{I}_N \quad (12)$$

$$\bar{I}_A = j(\bar{I}_P - \bar{I}_N) \quad (13)$$

$$P_{out} = |I_M|^2 R_L \quad (14)$$

$$P_{in} = 2|I_M|^2 \frac{R_r v}{F-\gamma} + 2|I_{SN}|^2 \frac{R_r v}{F+\gamma} \quad (15)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_C + P_FW} \quad (16)$$

2.3 자기여자를 위한 병렬 커피시터 C_p 의 선정

이중회전자계이론으로부터 2권선 SEIG에 적용되는 자기여자 커피시터 C_p 를 선정한다. 주권선과 보조권선의

전류는 각각 $i_m = \sqrt{2} I_m \cos \omega t$, $i_o = \sqrt{2} I_o \cos (\omega t + \theta_o)$ 이므로, 아래 따른 기자력은 식 (17)과 같이 표현된다.

$$F(\theta, t) = F_m(\theta, t) + F_o(\theta, t) \\ = \sqrt{2} N_m I_m \cos \omega t \cos \theta + \sqrt{2} N_o I_o \cos (\omega t + \theta_o) \cos (\theta + 90^\circ) \quad (17)$$

여기서, θ_o 는 두 권선 간의 위상차이고, 식 (17)을 다시 표현하면 식 (18)과 같고, 식의 우변 1항은 역방향 회전자계를, 2항은 순방향 회전자계를 각각 나타낸다.

$$F(\theta, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(N_m I_m - N_o I_o \sin \theta) \cos (\omega t + \theta) - (N_o I_o \cos \theta) \sin (\omega t + \theta)] \\ + \frac{1}{\sqrt{2}} [(N_m I_m + N_o I_o \sin \theta) \cos (\omega t - \theta) + (N_o I_o \cos \theta) \sin (\omega t - \theta)] \quad (18)$$

식 (18)에서 $N_m I_m = N_o I_o$ 이고, $\theta_o = 90^\circ$ 일 경우 역방향 회전자계는 0이 되어, 순방향 기자력만 존재하게 된다. 따라서 $N_m I_m = N_o I_o$ 의 조건하에서 누설인덕턴스를 무시하고, 동가회로로부터 병렬 커피시터 C_p 의 최적 값을 선정할 수 있다. 또한, 식 (19)와 같이 $N_m I_m = N_o I_o$ 는 임피던스의 비로 표현이 가능하다.

$$N_m Z_m = N_o Z_o,$$

$$N_m \sqrt{R_m^2 + (\omega L_m)^2} = N_o \sqrt{R_o^2 + (\omega L_o - \frac{1}{\omega C_p})^2} \quad (19)$$

식 (19)로부터 병렬 커피시터 C_p 에 관하여 정리하면 식 (20)과 같다.

$$\therefore C_p = \frac{1}{\omega \left[R_o + \omega L_o - \left(\frac{N_o}{N_m} \right) (R_m + \omega L_m - \sqrt{2R_m \omega L_m}) \right]} \quad (20)$$

2.4 전압 안정화를 위한 직렬 커피시터 C_s 의 선정

부하의 변동에 따른 출력전압의 불안정 요소를 개선하기 위해 주권선에 직렬 커피시터 C_s 를 연결한다. 직렬 커피시터 C_s 의 선정은 무부하 상태에서 주권선의 회로는 개방회로로 회로 해석이 불가능하므로, 주권선에 부하를 연결한 상태에서 직렬 커피시터 C_s 의 값을 선정한다.

자기여자 커피시터 C_p 가 결정되고, 동가 부하저항 R_L 을 주권선에 연결하면 다음의 식 (21)로부터 C_s 를 개선 할 수 있다.

$$N_m \sqrt{(R_m + R_L)^2 + (\omega L_m - \frac{1}{\omega C_s})^2} \\ = N_o \sqrt{R_o^2 + (\omega L_o - \frac{1}{\omega C_p})^2} \quad (21)$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega \left[R_m + R_L + \omega L_m - \left(\frac{N_o}{N_m} \right) (R_o + \omega L_o - \frac{1}{\omega C_p}) \right]} \quad (22)$$

2.5 특성 해석

단상 유도 발전기의 특성해석을 위해 DC 저항 측정, 회전자 구속시험, 동기속도 시험 및 자기해석 프로그램을 이용하여 파라미터를 산출하고, Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 본 연구에 적용된 단상유도 발전기의 파라미터를 나타낸 것이다. Matlab 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같으며 그림으로부터 발전에 요구되는 풍력 토크를 예측할 수 있다.

그림 4는 자기여자를 위한 병렬 커피시터 C_p 의 정전용량(μF) - 속도(rpm) 곡선으로 Matlab 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸다. 경계점을 기준으로 안정영역과 비안정영역이 존재하며, 설계시 회전자 속도에 따른 안정한 자기여자를 위한 임계 정전용량을 확인할 수 있다.

표 1. 단상 유도 발전기 파라미터

Parameters	Value
R_M [Ω]	22.0624
R_d [Ω]	40.5166
R_s [Ω]	35.656
X_M [Ω]	11.2029
L_M [H]	0.866
L_d [H]	0.435
X_d [Ω]	17.6142
X_s [Ω]	15.9025
X_u [Ω]	192.332
C_p [μF]	10
f_n [Hz]	60
Turn ratio	1.14842
P_n [W]	180

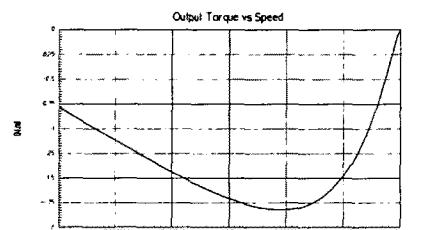


그림 3. 2권선 SEIG의 발전 영역의 슬립-토크 곡선

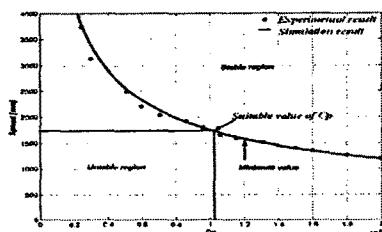


그림 4. 병렬 커패시터 C_p 의 정전용량(μF) ~ 속도(rpm)

그림 5는 전압안정화를 위한 부하 용량 - 직렬 커패시터 C_s 값을 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 100 [W]의 정격부하를 적용한 경우를 기준으로 적합한 직렬 커패시터 C_s 값을 나타내었다.

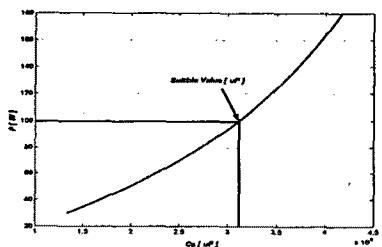
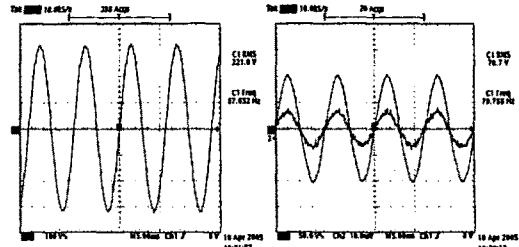


그림 5. 직렬 커패시터 C_s 의 정전용량(μF) ~ 부하([W])

2.6 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 2권선 SEIG의 특성을 평가하기 위하여 80[W], 4극, $V_n=220$, $f_n=60$ [Hz], $C_p=5$ [μF], $C_s=3$ [μF]의 1양을 갖는 단상유도기로 실험을 수행하였다. 발전 시스템은 원동기(prime mover), 기어(1:3), 커플링 등을 사용하여 구성하였다. 또한 제어기를 통해 원동기를 제어함으로써, 다양한 속도에서 SEIG를 해석하고, 보다 더 넓은 속도 변화를 위해 기어를 연결하였다. 그림 6(a)는 무부하 출력전압을 나타내고, (b)는 램프(100W)를 주권선에 연결하여 측정한 출력전압과 출력전류 패형을 나타낸 결과이다.



(a) 무부하 출력전압
(b) 부하 출력전압 및 전류
(100V/div, 1A/div)

그림 6. 주권선 양단의 출력 전압 및 전류

그림 7은 실험을 위해 설계 및 제작된 단상 자기여자 발전 시스템의 실제 구성을 나타낸 것이다.

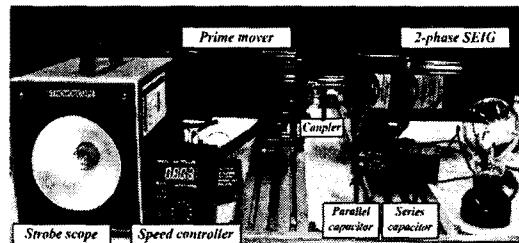


그림 7. 2권선 자기여자 발전시스템

3. 결 론

본 연구에서는 180[W]급 2권선 SEIG의 보조 권선 양단에 병렬 커패시터(C_p)와 주권선 양단에 직렬 커패시터(C_s) 및 부하를 각각 연결한 자기여자 발전 시스템의 특성 분석 및 실험을 수행하였다. 이종회전자제이론으로부터 자기여자를 위한 병렬커패시터와 전압안정화를 위한 직렬 커패시터의 설정이론을 제안하였다. 제안된 이론으로부터 병렬 커패시터 C_p 의 임계 정전 용량 및 속도변화에 대해 요구되는 정전용량, 안정영역(자기여자)과 불안정(자기소자)영역을 제시하였다. 또한, 직렬 커패시터 C_s 설정을 위해 부하 변화에 따른 적합한 정전 용량을 제시하고, 출력 전압 및 전류파형으로 확인하였다. 슬립-토크곡선을 제시하여 발전 시 요구되는 풍력토크를 예측할 수 있다. 제안된 이론의 타당성은 시뮬레이션과 실험결과를 비교하여 양호한 것으로 확인하였다.

따라서, 본 논문에서 제안된 설계식과 시스템은 풍력을 이용한 소형의 개별 발전시스템을 대상으로 하는 각종 산업분야에 보다 효과적으로 적용 가능할 것으로 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-338) 주관으로 수행된 과제입니다.

[참 고 문 헌]

- (1) AE Fitzgerald and C Kingsley "Electric Machinery" McGraw-Hill Book Co. 2nd Ed. 1961, pp. 528-538.
- (2) NN Hancock "Matrix Analysis of Electric Machinery" Pergamon, 1964 pp 103-163 and 220.
- (3) CG Veinott 'Theory and Design of Small induction Motors'. Mc Graw Hill Book Co., 1959, pp 184-196, pp 354-364
- (4) The induction machine handbook, Ion Boldea syed A. Nasar pp895-905