

## 출력 특성을 고려한 단상 자기여자 유도 발전기의 특성 해석

김철진\*, 이관용\*, 조영래\*\*, 백수현\*\*  
 한라대학교\*, 동국대학교\*\*

### Performance analysis and Design of self-excited Induction Generators considering output voltage

Cherl-Jin Kim\*, Kwan-Yong Lee\*, Young-Rae Cho\*\*, Soo-Hyun Baek\*\*  
 Halla Univ\*, Dongguk Univ\*\*

**Abstract** - This paper describes the performance analysis and design of 1-phase self-excited induction generators. The minimum parallel capacitance of self-excited capacitor connected auxiliary winding and the series capacitance of regulating voltage capacitor connected main winding is proposed the suitable value using circuit equations of main and auxiliary winding. For the steady state analysis, the equivalent circuit of 1-phase induction generators is used as circuit modeling using the double-revolving field theory. The validity of designed generator system will be confirmed by experimental and computed results.

보조권선에는 각각 자기여자를 위한 병렬 커패시터와 전압안정화를 위한 직렬 커패시터 및 저항성 부하를 연결하였다. 전압 유기에 기인하는 여자(excitation) 성분은 회전자의 잔류 자기에 의한 자계와 보조권선에 연결된 병렬 커패시터  $C_p$ 에 의한 전계의 지속적인 에너지 순환에 기인한다. 또한, 주권선에 직렬로 연결된 직렬 커패시터  $C_s$ 가 무효전력을 공급함으로써 적정 부하 범위에서 전압안정화를 기할 수 있다. 아래의 그림 1.은 본 연구에 적용한 소형 2권선 유도 발전기의 시스템의 기본 구조를 나타낸 것이다.

## 1. 서 론

최근 자원 고갈에 대응하기 위한 풍력 발전 시스템 등 대체 에너지 시스템과 자력 발전이 가능한 개별 독립형 발전 시스템의 성능 향상과 개발이 요구되고 있다. 일반적인 교류 발전의 대안으로서 3상 자기여자 유도 발전기(SEIG)의 명확한 장점에 관해서는 다수의 연구가 진행되고 있다. 이러한 장치는 대용량의 출력 범위에 적합하나, 소형의 개별 발전시스템에는 2권선 유도 발전기가 적합하다 할 수 있다. 본 연구에서는 소형이며 경제적이고 브러시를 갖지 않으며, 유지 보수가 용이한 소형 2권선 자기여자 유도 발전기를 대상으로 적합한 등가 모델을 설정하고 이를 근거로 특성 분석 및 해석을 수행하였다.

본 논문에서 제시한 시스템은 자기여자를 위한 병렬 커패시터와 전압안정화를 위한 직렬 커패시터 및 저항성 부하를 전기적으로 90°의 위상각을 갖는 보조권선과 주권선 양 단자에 각각 연결하고, 직. 병렬 커패시터의 정전용량을 선정이론을 제안하였다. 제안된 정전용량 선정이론과 시스템의 정상상태 해석은 2중 회전 자계를 기본으로 한 등가회로부터 특성분석을 수행하였다. Matlab을 이용한 시뮬레이션과 제작된 발전 시스템의 실험을 통한 해석 및 분석으로부터 제안된 이론과 해석의 타당성을 입증하였다.

## 2. 2권선 자기여자 유도 발전기의 특성

### 2.1 기본구조

본 연구에서 적용한 소형 2권선 자기여자 유도 발전 시스템의 구조는 그림 1.과 같다. 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 회전한다. 소형 유도 발전기는 농형 회전자를 갖는 유도 발전기로서 전기적으로 90°도의 위상각을 갖는 2권선을 사용하였다. 주권선 및

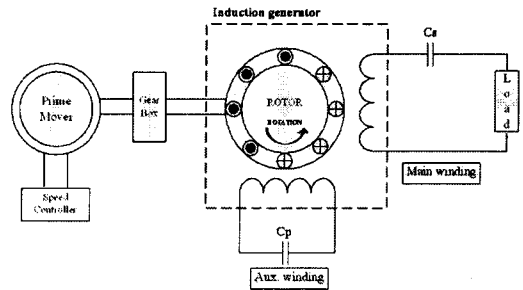


그림 1. 자기여자 유도 발전기의 기본 구조

### 2.2 시스템 모델링

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

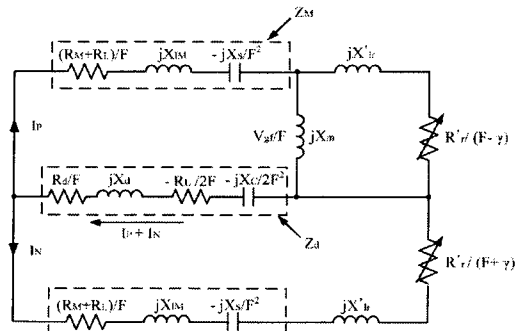


그림 2. 정규화된 2권선유도 발전기의 등가회로

그림 2.에서 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.

- ▶ 기호
- $R, X$  : 저항, 리액턴스
- $V, I$  : 전압, 전류
- $f_R$  : 파라미터 정격 주파수(발전 주파수)
- $f$  : 실제 회전자 주파수(여자 주파수)
- $F$  : 정규화 주파수( $f_R/f$ )
- $\omega$  : 실제속도에 대한 동기속도
- $\omega_R$  : 정격 주파수에 대한 동기속도
- $\gamma$  : 정규화 회전자 속도
- $s$  : 슬립 ( $s = \frac{\omega_R - \omega}{\omega_R} = \frac{F - \gamma}{F}(P.U)$ )
- $P$  : 전력
- $C_r, C_p$  : 직·병렬 커패시터
- $X_c, X_p$  : 직·병렬 리액턴스
- $\eta$  : 전 효율(overall efficiency)

- ▶ 아래첨자
- $s, r, g$  : 고정자, 회전자, 공극
- $P, N$  : 순방향, 역방향
- $M, A$  : 주권선, 보조권선
- $l, L, m, C$  : 누설, 부하, 자화, 정전용량

그림 2.로부터 2권선 유도 발전기 시스템을 위한 특성 방정식은 아래와 같다.

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

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

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

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

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

$$\bar{I}_F = \frac{\frac{V_g}{F} (\bar{Z}_M + \bar{Z}_d + \frac{R_r}{F + \gamma} + jX_b)}{D} \quad (5)$$

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

$$\bar{I}_N = V_g \bar{Z}_d / \bar{D} F \quad (6)$$

$$\bar{I}_M = \bar{I}_P + \bar{I}_N \quad (7)$$

$$\bar{I}_A = j(\bar{I}_P - \bar{I}_N) \quad (8)$$

$$P_{\alpha\alpha} = |I_M|^2 R_L \quad (9)$$

$$P_{in} = 2|I_M|^2 \frac{R_r v}{F - \gamma} + 2|I_N|^2 \frac{R_r v}{F + \gamma} \quad (10)$$

$$Overall\ efficiency = \frac{P_{\alpha\alpha}}{P_{in} + P_C + P_{FW}} \quad (11)$$

( $P_c$ : 코어 손실,  $P_{FW}$ : 풍동 및 마찰손실)

### 2.3 파라미터의 결정

파라미터의 결정을 위해 그림 2.는 그림 3.으로 간소화 할 수 있다.

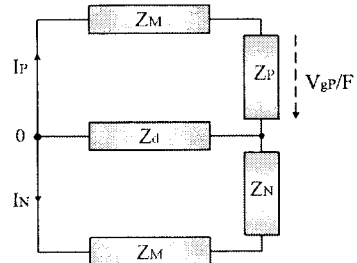


그림 3. 간소화된 등가회로

간소화된 등가모델에서 자기여자 조건에 의해 node 0의 전류 합은 0이고, 따라서 루프 임피던스는 다음 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\frac{1}{Z_M + Z_P} = \frac{1}{Z_M + Z_N} - \frac{1}{Z_d} \quad (12)$$

여기서,  $Z_M = (R_M + R_L)F + jX_{M'} - jX_{s'}F^2$

$$Z_d = R_d F + jX_d - \frac{1}{2F^2} X_c - \frac{1}{2F} R_L$$

$$Z_P = jX_{M'} (\frac{R_r'}{F - \gamma} + jX_{b'}) / \frac{R_r'}{F - \gamma} + j(X_{M'} + X_{b'})$$

$$Z_N = \frac{R_r'}{F + \gamma} + jX_{b'}$$

단위 주파수  $F$ 에 의한 자화리액턴스  $X_m$ 을 결정하기 위해 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_P = \frac{(Z_M + Z_N) \cdot Z_d}{Z_M + Z_N + Z_d} - Z_M \quad (13)$$

식 (13)에서  $X_m$ 을 제외한, 모든 파라미터는 정격 주파수에서 결정된 값을 적용한다. 따라서 결정된 파라미터 값으로부터  $F$ 에 따른  $X_m$ 을 아래의 식 (14)로 구한다.

$$Z_P(F, X_m) = \frac{jX_{M'} (\frac{R_r'}{F - \gamma} + jX_{b'})}{\frac{R_r'}{F - \gamma} + j(X_{M'} + X_{b'})} \quad (14)$$

식 (14)는 실수부와 허수부로 나눌 수 있고, 허수부를 이용함으로써 Matlab을 통해 용이하게  $X_m(F)$ 을 구할 수 있다.

2권선 SEIG의 동기속도테스트 결과로부터 얻어진 자화특성곡선( $X_m - V_g$ )을 이용하여 식 (14)에서 결정된 자화리액턴스  $X_m$ 에 대응하는 공극전압  $V_g$ 를 식 (5) - (11)의 특성방정식에 적용하여 2권선 SEIG의 출력특성을 알 수 있다.

### 2.4 자기여자 및 전압안정화

기기가 외부 원동기에 의해 구동될 때, 회전하는 회전자의 잔류자속으로 고정자 권선에는 미소 전압이 유기된다. 보조권선 양단에 적절한 커패시터를 연결하면 진상 전류가 흐른다. 이것은 회전자 잔류자속을 증가시키고,

유도전압과 커패시터 사이의 전압 차는 보조권선 여자전류가 회전자에 무효전력을 공급하기 위한 조건으로 회전자와 잔류자속을 발생시키는 회전자 전류보다 진상으로 되어야 한다. 전압의 지속적인 상승은 회전자 코어의 자기 포화에 의해 억제되고, 정상상태에 도달하게 된다. 자기여자는 주권선과 보조권선 각각의 정전용량, 속도, 기기 파라미터, 자화 특성과 부하에 의존하며, 전계와 자계 사이의 지속적인 에너지 순환에 기인한다. 또한, 부하변동에 의해 나타나는 불안정한 전압은 주권선에 직렬로 연결된 직렬 커패시터  $C_p$ 가 무효전력을 공급함으로써 적정 부하 범위에서 전압안정화를 기할 수 있다.

### 2.4.1 병렬 커패시터 $C_p$ 의 선정

이중회전자계이론으로부터 2권선 SEIG에 적용되는 자기여자 커패시터  $C_p$ 를 선정한다. 주권선과 보조권선의 전류는 각각  $i_m = \sqrt{2}I_m \cos \omega t$ ,  $i_a = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \theta_a)$ 이므로, 이에 따른 기자력은 식 (15)와 같이 표현된다.

$$F(\theta, t) = F_m(\theta, t) + F_a(\theta, t) \\ = \sqrt{2}N_m I_m \cos \omega t \cos \theta + \sqrt{2}N_a I_a \cos(\omega t + \theta_a) \cos(\theta + 90^\circ) \quad (15)$$

여기서,  $\theta_a$ 는 2권선 간의 위상차이고, 식 (15)를 다시 표현하면 식 (16)과 같고 식의 우변 1항은 역방향 회전자계를, 2항은 순방향 회전자계를 각각 나타낸다.

$$F(\theta, t) = \frac{1}{\sqrt{2}}[(N_m I_m - N_a I_a \sin \theta_a) \cos(\omega t + \theta) - (N_a I_a \cos \theta_a) \sin(\omega t + \theta)] \\ + \frac{1}{\sqrt{2}}[(N_m I_m + N_a I_a \sin \theta_a) \cos(\omega t - \theta) + (N_a I_a \cos \theta_a) \sin(\omega t - \theta)] \quad (16)$$

식 (16)에서  $N_m I_m = N_a I_a$ 이고,  $\theta_a = 90^\circ$  일 경우 역방향 회전자계는 0이 되어, 순방향 기자력만 존재하게 된다. 따라서  $N_m I_m = N_a I_a$ 의 조건하에서 누설인덕턴스를 무시하고, 등가회로로부터 병렬 커패시터  $C_p$ 의 최적 값을 선정할 수 있다. 또한, 식 (17)과 같이  $N_m I_m = N_a I_a$ 는 임피던스의 비로 표현이 가능하다.

$$N_m Z_m = N_a Z_a, \quad N_m \sqrt{R_m^2 + (\omega L_m)^2} = N_a \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a - \frac{1}{\omega C_p})^2} \quad (17)$$

식 (17)로부터 병렬 커패시터  $C_p$ 에 관하여 정리하면 식 (18)과 같다.

$$\therefore C_p = \frac{1}{\omega \left\{ R_a + \omega L_a - \left( \frac{N_a}{N_m} \right) (R_m + \omega L_m - \sqrt{2R_m \omega L_m}) \right\}} \quad (18)$$

### 2.4.2 직렬 커패시터 $C_s$ 의 선정

부하의 변동에 따른 출력전압의 불안정 요소를 개선하기 위해 주권선에 직렬 커패시터  $C_s$ 를 연결한다. 직렬 커패시터  $C_s$ 의 선정은 무부하 상태에서 주권선의 회로는 개방회로로 회로 해석이 불가능하므로, 주권선에 부하를 연결한 상태에서 직렬 커패시터  $C_s$ 의 값을 선정한다. 자기여자 커패시터  $C_p$ 가 결정되고, 등가 부하저항  $R_L$ 을 주권선에 연결하면 다음의 식 (19)로부터  $C_s$ 를 개선할 수 있다.

$$N_m \sqrt{(R_m + R_L)^2 + (\omega L_m - \frac{1}{\omega C_s})^2} = N_a \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a - \frac{1}{\omega C_p})^2} \quad (19)$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega \left\{ R_m + R_L + \omega L_m - \left( \frac{N_a}{N_m} \right) (R_a + \omega L_a - \frac{1}{\omega C_p}) \right\}} \quad (20)$$

## 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 1.은 본 연구에 적용된 단상유도 발전기의 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1. 단상 유도 발전기 파라미터

Parameters	Value
$R_M$ [ $\Omega$ ]	22.0624
$R_A$ [ $\Omega$ ]	40.5166
$R_r$ [ $\Omega$ ]	35.656
$X_{IM}$ [ $\Omega$ ]	11.2029
$L_M$ [H]	0.866
$L_A$ [H]	0.435
$X_{IA}$ [ $\Omega$ ]	17.6142
$X_{Ir}$ [ $\Omega$ ]	15.9025
$X_M$ [ $\Omega$ ]	192.332
$C_p$ [ $\mu F$ ]	10
$f_n$ [Hz]	60
Turn ratio	1.14842
$P_n$ [W]	180

Matlab 시뮬레이션 결과는 그림 4.와 같으며 그림으로부터 발전에 요구되는 토크를 예측할 수 있다.

그림 5.는 자기여자를 위한 병렬 커패시터  $C_p$ 의 정전용량( $\mu F$ ) - 속도(rpm) 곡선으로 Matlab 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸다. 경계점을 기준으로 안정 영역과 불안정영역이 존재하며, 실제로 회전자 속도에 따른 안정한 자기여자를 위한 임계 정전용량을 확인할 수 있다.

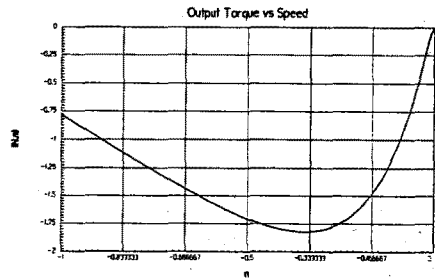


그림 4. 2권선 SEIG의 발전 영역의 슬립-토크 곡선

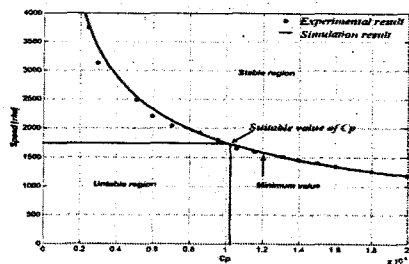


그림 5. 병렬 커패시터  $C_p$ 의 정전용량( $\mu F$ ) - 속도(rpm)

그림 6.은 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.

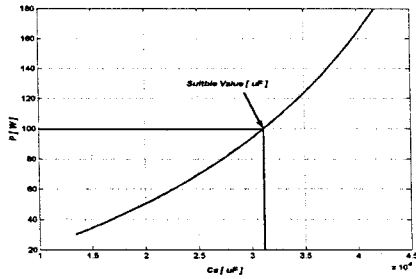


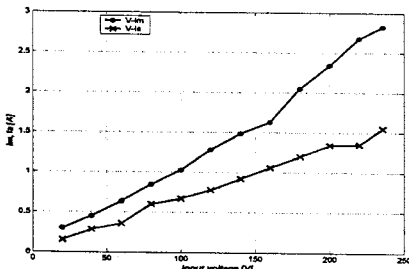
그림 6. 직렬 커패시터  $C_s$ 의 정전용량( $\mu F$ ) - 부하([W])

## 2.6 실험 결과 및 고찰

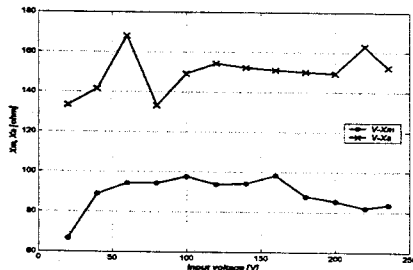
본 연구에서는 2권선 SEIG의 특성을 평가하기 위하여 80[W], 4극,  $V_n=220$ ,  $f_n=60$ [Hz],  $C_p=5[\mu F]$ ,  $C_s=3[\mu F]$ 의 사양을 갖는 단상 유도기로 실험을 수행하였다. 발전 시스템은 원동기(prime mover), 기어(1:3), 커플링 등을 사용하여 구성하였다. 또한 제어기를 통해 원동기를 제어함으로써, 다양한 속도에서 SEIG를 해석하고, 보다 더 폭 넓은 속도 가변을 위해 기어를 연결하였다.

그림 7.은 외부의 원동기로부터 2권선 SEIG를 동기속도로 회전시킨 상태에서 주 권선과 보조 권선에 인가되는 공급 전압에 따른 전류를 나타내는 동기속도 테스트 결과이다.

그림 8.(a)는 무부하 출력전압을 나타내고,(b)는 램프 100W를 주 권선에 연결하여 측정한 출력전압과 출력 전류 파형을 나타낸 결과이다.

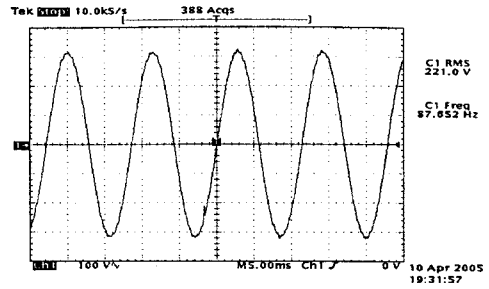


(a) 전류 - 전압 특성

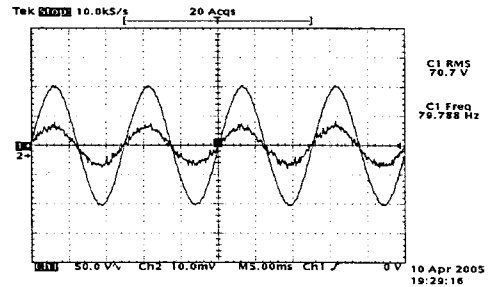


(b) 자화리액턴스 - 전압 곡선

그림 7. 전압에 따른 전류와 자화리액턴스



(a) 무부하 출력전압(100[V]/div)



(b) 부하 출력전압 및 전류(50[V]/div, 1[A]/div)

그림 8. 주 권선 양단의 출력 전압 및 전류

그림 9.는 실험을 위해 설계 및 제작된 단상 자기여자 발전 시스템의 실제 구성을 나타낸 것이다.

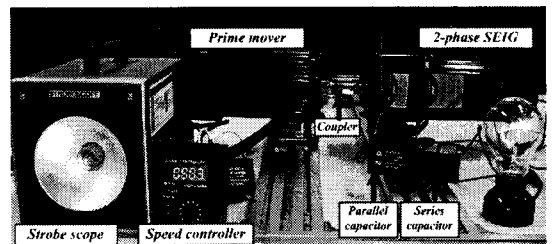


그림 9. 2권선 자기여자 발전시스템

## 3. 결 론

본 연구에서는 2권선 180[W]급 SEIG의 보조 권선 양단에 병렬 커패시터( $C_p$ )와 주 권선 양단에 직렬 커패시터( $C_s$ ) 및 부하를 각각 연결한 자기여자 발전 시스템의 특성 분석 및 실험을 수행하였다. 이중회전자계이론으로부터 자기여자를 위한 병렬커패시터와 전압안정화를 위한 직렬 커패시터의 선정이론을 제안하였으며, 제안된 이론의 타당성은 시뮬레이션과 실험 결과로부터 확인하였다. 이 시스템은 소형이며, 신뢰성이 우수하고, 유지보수가 수월한 독립형 발전기에 적합한 특징을 갖는다.

### [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