

3상 농형유도기를 사용한 자여식 단상유도발전기의 속도특성

김재민* · 홍문석** · 진충민** · 좌종근***

Speed Characteristics of Self-Excited Single-Phase Induction Generator using Three-Phase Squirrel-Cage Induction Machine

Jae-Min Kim*, Mun-Seok Hong**, Chung-Min Jin** and Chong-Keun Jwa***

ABSTRACT

The speed characteristics of self-excited single-phase induction Generator using Three-Phase Squirrel-Cage Induction Machine which has only two series capacitors with respect to the load are analyzed in this paper. The symmetrical component method and the condition of equivalent circuit are applied to develop an equivalent model of this generator. The speed characteristics of this generator are computed by using this model and compared with those of the self-regulated generator.

Key words : Speed characteristics, self excited, induction generator

1. 서 론

단상교류전원으로 1990년대에 들어서면서 자기유도 단상 유도발전기가 단상 동기발전기에 비하여 우수한 특징으로 인하여 여러 연구자들에 의하여 연구되고 있다.

3상 유도기를 사용한 경우는 고정자 권선을 Y 또는 Δ 로 결선하고 단자에 커패시터를 단상부하에 대하여 병렬로 접속하는 발전기¹⁾와 Y결선 단자에 부하에 대하여 직병렬로 접속한 자기조절형 발전기^{2,3,4)} 등이

있다. 단상 유도기로는 보조권선 단자에 커패시터를 주권선 단자에 부하를 접속하는 발전기⁵⁾와 보조권선과 주권선 단자에 직병렬커패시터를 조합한 자기조절형 발전기^{6,7)} 등이 연구대상이 되고 있다.

이 가운데 3상 농형유도기를 사용한 자기조절형 단상 유도발전기에 대하여 Tadashi등^{2,3)}은 정속운전시 저항부하나 유도성부하를 대상으로 운전특성을 검토하고 Kim등⁴⁾은 속도특성에 대하여도 검토하고 있다. 그러나 이들 연구에서는 직렬커패시터만으로 운전되는 경우에 대한 검토는 되어있지 않다.

본 연구에서는 자기조절형 발전기에서 병렬커패시터를 사용하지 않는 자기여자 발전기를 구성하여 속도특성에 대하여 검토하고자 한다. 특성을 검토하기 위하여 대칭좌표법을 이용하여 등가회로를 등가회로 조건⁸⁾을 이용하여 구성하였다. 구성된 등가회로에서 커패시터의 커패시턴스 변화에 따른 속도특성을 구하

* 제주대학교 산업대학원

Graduate School of Industry, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

*** 제주대학교 전기공학과, 산업기술연구소

Dept. of Electrical Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

고 자기조절형 발전기의 속도특성과 비교하였다.

II. 해석이론

2.1 회로의 구성

본 연구에 사용한 발전기는 Fig. 1에 보인 것처럼 3상 농형유도기의 고정자 $v-w$ 상에 자기여자용 커패시턴스 C_1 및 C_2 를 직렬로 접속하고 중성점 o' 와 u 상에 단상부하 Z_L 를 접속한 것으로 구성이 간단하다.

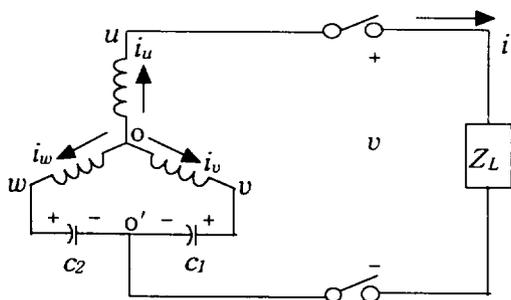


Fig. 1 A self-excited single-phase induction generator

2.2 등가회로

특성 계산을 하기 위하여 등가회로정수 중 여자리액턴스는 포화의 영향을 받으며, 고정자와 회전자와 누설리액턴스는 같고 철손 저항은 무시하였으며 공간고조파 영향은 무시하고 전압, 전류의 파형은 정현파로 가정한다.

본 연구에서 사용하는 기호 중 prime(')는 2차측을 1차측으로 환산한 값을 dot(·)는 페이저 표시, 전압, 전류의 소문자는 순시치, 대문자는 실효치를 표시한다.

V_{uv}, V_{vw}, V_{wu} : 고정자 권선의 선간 전압

i_u, i_v, i_w

I_u, I_v, I_w : 고정자 권선의 상전류

x_{c1}, x_{c2} : 커패시터 C_1, C_2 의 리액턴스

v, i, V, I : 출력 전압, 전류

R, X : 부하저항, 부하리액턴스

Z_L : 부하임피던스

V_f, V_b : 고정자 권선 선간전압의 정상분, 역상분

I_f, I_b : 고정자 권선 상전류의 정상분, 역상분

Z_{gf}, Z_{gb} : 발전기 임피던스의 정상분, 역상분

E_m : 공급 전압

r_1, r_2' : 고정자와 회전자의 1상당 저항

x_1, x_2' : 고정자와 회전자의 1상당 누설 리액턴스

x_m : 여자리액턴스

α : 페이저 오퍼레이터

$$\alpha = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

α^2 : 페이저 오퍼레이터

$$\alpha^2 = e^{-j2\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

s : 슬립

f_B : 정격 주파수

f : 발전 주파수

ω : 회전 각속도

ω_B : 정격 각속도

a : 단위법 발전 주파수 $a = f/f_B$

b : 단위법 회전 속도 $b = \omega/\omega_B$

Fig. 1에서 고정자 권선이 Y결선이므로 상전류의 영상분은 존재하지 않는다. 따라서 상전류 I_u, I_v, I_w 를 대칭분으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} I_u = I_f + I_b \\ I_v = \alpha^2 I_f + \alpha I_b \\ I_w = \alpha I_f + \alpha^2 I_b \end{cases} \quad (1)$$

또한 Fig. 1에서 고정자 권선의 선간 전압

$$\hat{V}_{uv}, \hat{V}_{vw}, \hat{V}_{wu}$$

$$\begin{cases} \hat{V}_{uv} = \hat{Z}_L I_u + jx_{c1} I_v \\ \hat{V}_{vw} = -jx_{c1} I_v + jx_{c2} I_w \\ \hat{V}_{wu} = -jx_{c2} I_w - \hat{Z}_L I_u \end{cases} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며, (1)식에 (2)식에 대입하여 정리하면 정상분 \hat{V}_f 와 역상분 \hat{V}_b 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{V}_f = \frac{1}{3}(\dot{V}_{uv} + a\dot{V}_{vw} + a^2\dot{V}_{wu}) \\ = \frac{1}{3} [\{(1-a^2)(Z_L - jx_{c1} - jx_{c2})\} I_f \\ + \{(1-a^2)Z_L + j(a-a^2)x_{c1} \\ + j(1-a)x_{c2}\} I_b] \\ \dot{V}_b = \frac{1}{3}(\dot{V}_{uv} + a^2\dot{V}_{vw} + a\dot{V}_{wu}) \\ = \frac{1}{3} [\{(1-a)Z_L + j(a^2-a)x_{c1} \\ + j(1-a^2)x_{c2}\} I_f \\ + \{(1-a)(Z_L - jx_{c1} - jx_{c2})\} I_b] \end{cases} \quad (3)$$

(3)식의 \dot{V}_f , \dot{V}_b 를 발전기의 임피던스의 정상분 Z_{gf} 와 역상분 Z_{gb} 로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} \dot{V}_f = -(1-a^2)Z_{gf}I_f \\ \dot{V}_b = -(1-a)Z_{gb}I_b \end{cases} \quad (4)$$

따라서 (3), (4)식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}Z_L - j\frac{x_{c1}+x_{c2}}{3} + Z_{gf} & \frac{1}{3}Z_L + j\frac{ax_{c1}+x_{c2}}{3(1+a)} \\ \frac{1}{3}Z_L + j\frac{(1+a)x_{c1}-ax_{c2}}{3} & \frac{1}{3}Z_L - j\frac{x_{c1}+x_{c2}}{3} + Z_{gb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_f \\ I_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

등가회로 조건으로는

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ff} & Z_{fb} \\ Z_{bf} & Z_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_f \\ I_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

에서 $Z_b = Z_{bf}$ 일 때 등가회로를 구성할 수 있으나⁸⁾.

(5)식에서 $Z_b \neq Z_{bf}$ 이므로 등가회로를 구성할 수 없다.

그러나 (5)식에서 $x_{c1} = x_{c2} = x_c$ 일 때 등가회로의 조건을 만족하므로

$$x_{c1} = x_{c2} = x_c \quad (7)$$

라고 하면 (5)식은 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}Z_L - j\frac{2}{3}x_c + Z_{gf} & \frac{1}{3}(Z_L + jx_c) \\ \frac{1}{3}(Z_L + jx_c) & \frac{1}{3}Z_L - j\frac{2}{3}x_c + Z_{gb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_f \\ I_b \end{bmatrix} \quad (8)$$

따라서 (8)식을 이용하여 등가회로를 구성하면 Fig. 2와 같이 된다.

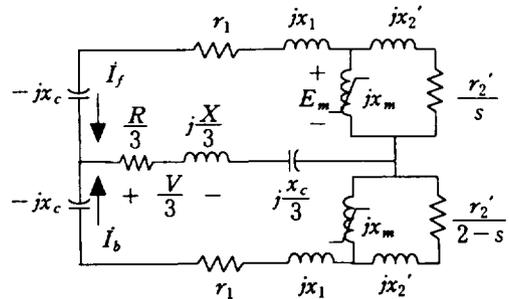


Fig. 2 Equivalent circuit of the generator at rated frequency

정격 주파수 f_B , 발전 주파수 f , 정격 각속도 ω_B , 회전 각속도를 ω 라고 하면 단위법으로 표시한 회전 속도 b 와 발전 주파수 a 는 다음과 같이 표현된다⁹⁾.

$$\begin{cases} b = \frac{\omega}{\omega_B} \\ a = \frac{f}{f_B} \end{cases} \quad (9)$$

또한 등가회로의 조건과 임의의 회전속도에서 특성을 구하기 위한 등가회로는 Fig. 3과 같이 된다.

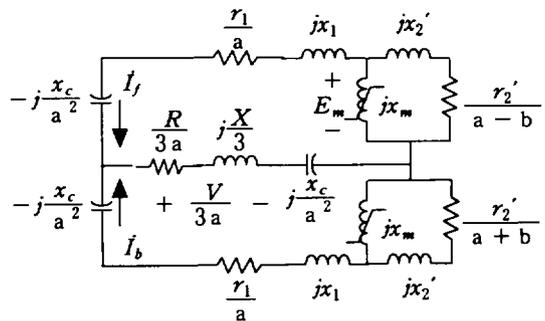


Fig. 3 Equivalent circuit of the generator at variable frequency

정격주파수 f_B 에서 발전 중의 공극전압 E_m 과 Fig. 3에서 주파수 변동을 고려한 발전기 임피던스의 정상분 Z_{gf} 와 역상분 Z_{gb} 는 다음과 같이 된다.

$$\frac{Z_{gf}}{a} = \frac{r_1}{a} + jx_1 + \frac{jx_m(\frac{r_2'}{a-b} + jx_2')}{\frac{r_2'}{a-b} + j(x_m + x_2')} \quad (10)$$

$$\frac{Z_{gb}}{a} = \frac{r_1}{a} + jx_1 + \frac{jx_m(\frac{r_2'}{a+b} + jx_2')}{\frac{r_2'}{a+b} + j(x_m + x_2')} \quad (11)$$

$$\frac{Z_L}{3a} = \frac{R}{3a} + j\frac{X}{3} \quad (12)$$

Fig. 3에서 공극 전압 E_m 과 여자리액턴스 x_m 의 관계를 알면 이 등가회로에서 발전 특성을 산정 할 수 있으며, 자기여자로 발전되어 운전되는 경우는 다음 식을 만족시켜야 한다.

$$Z_f I_f = 0 \quad (13)$$

그리고 (13)식이 성립되기 위해서는 발전 중에는 전류가 흐르므로 다음 식이 성립되어야 한다.

$$I_f \neq 0 \quad (14)$$

따라서

$$Z_f = \frac{Z_{gf}}{a} - j\frac{x_c}{a^2} + \frac{(\frac{Z_L}{3a} + j\frac{x_c}{3a^2})(\frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{x_c}{a^2})}{\frac{Z_L}{3a} + \frac{Z_{gb}}{a} + j(\frac{x_c}{3a^2} - \frac{x_c}{a^2})} = 0 \quad (15)$$

이 되어야 하며, (15)식은

$$R_e Z_f = 0 \quad (16)$$

$$I_m Z_f = 0 \quad (17)$$

이 됨을 의미한다.

2.3 발전기 특성의 계산

임의의 부하상태에서의 특성을 계산하기 위하여 부하임피던스(R 과 X), 회전속도(b), 커패시턴스(C),

그리고 등가회로 정수들이 주어지면 이 상태에서의 a 와 x_m 을 (16), (17)식에서 구한다.

여자리액턴스의 관계를 직선적으로 근사화하면

$$E_m = -K_1 x_m + K_2 \quad (18)$$

이고, 여기서 K_1 과 K_2 는 실험에 의해서 얻어진다.

Fig. 3의 등가회로에서 고정자 권선을 흐르는 상전류 I_u, I_v, I_w 의 정상분 I_f 와 역상분 I_b 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

정상분 전류는

$$I_f = \frac{E_m}{\frac{r_1}{a} + jx_1 - j\frac{x_c}{a^2} + \frac{(\frac{Z_L}{3a} + j\frac{x_c}{3a^2})(\frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{x_c}{a^2})}{\frac{Z_L}{3a} + \frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{2x_c}{3a^2}}} \quad (19)$$

이고, 역상분 전류는

$$I_b = \frac{\frac{Z_L}{3a} + j\frac{x_c}{3a^2}}{\frac{Z_L}{3a} + \frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{2x_c}{3a^2}} \quad (20)$$

이다. 부하전류 I 는

$$I = I_u = I_f + I_b \quad (21)$$

로 주어지며, 단자 전압 V 는

$$V = (R + jaX)I \quad (22)$$

이며, 출력 P_o 와 발전 주파수 f 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$P_o = |I|^2 R \quad (23)$$

$$f = a f_B \quad (24)$$

III. 해석결과 및 검토

본 해석에 사용한 3상 유도기²⁾는 4극, 2.2kW, 220V, 8.4A, 60Hz의 농형유도전동기이고 회로정수는

$r_1 = 0.80\Omega$, $r_2' = 0.61\Omega$, $x_1 = x_2' = 1.11\Omega$ 이며 (18)식의 계수는 $K_1 = 2.00$, $K_2 = 191.25$ 이다.

제시한 발전기와 자기조절형 발전기의 속도특성을 비교하기 위해서 자기조절형 발전기의 직렬커패시턴스 C_s 는 $150\mu F$ 로 하고 병렬커패시턴스 C_p 는 $100\mu F$ 로 하였고 제시한 발전기에서는 C 를 $200\mu F$, $250\mu F$, $300\mu F$ 로 변화시켜 특성을 계산하였다. 여기서 C 는 지정된 부하시 최소 발전 가능한 C 를 유도기의 $E_m - x_m$ 특성²⁾곡선에서 x_m 의 최대치가 $x_m = 41.111\Omega$ 이므로 (16), (17)식을 사용하여 정격속도($b = 1pu$)에서 구하면 $C = 75.68\mu F$, $a = 0.977pu$ 이 되므로 적절한 전압을 유도하기 위해서는 이 보다 큰 커패시턴스를 사용하여야 하므로 위의 값을 적용하였다. 이 때 부하는 $Z_L = 15.936 + j10.514\Omega$ 으로 고정시켰으며 속도는 $b = 0.94pu(1692rpm)$ 에서 $0.02pu(36rpm)$ 간격으로 $b = 1.12pu(2016rpm)$ 까지 계산가능한 범위에서 변화시켰다.

특성식에 의하여 계산한 발전기 속도변화에 따른 출력전압특성을 Fig. 4, 출력전력특성을 Fig. 5, 그리고 주파수특성을 Fig. 6에 보였다. 출력전압특성이나 출력전력특성에서 보는 바와 같이 회전수가 증가할수록 전압과 출력이 점진적으로 증가하고 커패시턴스가 클수록 증가정도가 커짐을 알 수 있다. 또한 자기조절형 발전기의 특성이 제시한 발전기의 특성보다 더 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 주파수 특성은 자기조절형 발전기나 제시한 발전기 모두 같은 특성, 즉 속도증가에 따른 주파수 증가를 보이고 같은 회전수에서 제시한 발전기의 특성이 커패시턴스 값에 관계없이 거의 같은 값으로 약간 작아지고 있다.

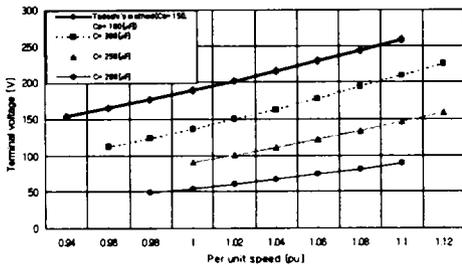


Fig. 4 Output voltage characteristic

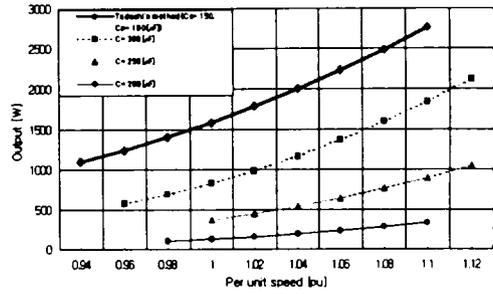


Fig. 5 Output power characteristic

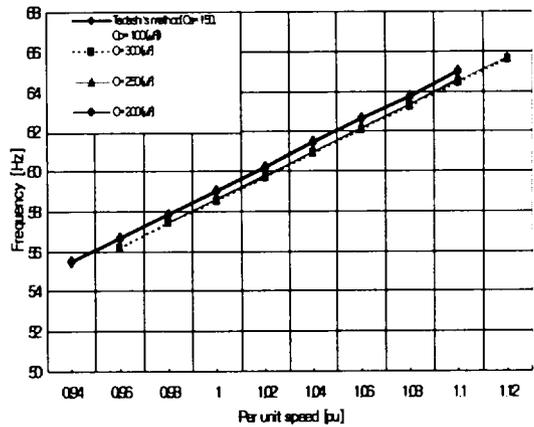


Fig. 6 Output frequency characteristic

이상의 세 가지 특성에서 자기조절형 발전기와 제시한 발전기의 특성상의 차이들은 자기조절형 발전기의 병렬커패시턴스에 의한 전압 보상효과에 의한 것으로 판단된다. 따라서 제시한 발전기도 커패시턴스를 적절하게 선정하여 단상전원으로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

3상 농형유도기를 사용한 자기여자 단상 유도발전기의 속도특성을 해석하였다. 특성을 검토하기 위하여 대칭좌표법을 적용하였고 이에 의한 등가회로를 등가회로 조건을 이용하여 구성하였다. 구성된 등가회로를 사용하여 커패시터의 커패시턴스 변화에 따른

속도특성을 구하고 자기조절형 발전기의 속도특성과 비교 검토하였다.

검토 결과 제시한 발전기의 출력전압특성과 출력전력특성은 커패시턴스의 값이 클수록 크고 속도증가에 따라 점진적으로 증가하는 특성을 보이고 있으며 출력주파수특성은 커패시턴스의 영향을 받지 않고 속도에 비례하여 증가하는 발전기 고유의 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 자기조절형 발전기와의 특성상의 차이는 병렬커패시터의 전압보상효과로 판단되었다.

참고문헌

- 1) Al-Bahrani, A.H., and Malik, N.H., 1990, Steady State Analysis and Performance Characteristics of A Three PhasInduction Generator Self Excited with A Single Capacitor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.5, No.4, pp.725-732.
- 2) 深見正, 今村道徳, 宮本紀男, 1995, 自己調節形自動單相 誘導發電機の特性算定法, 日本電氣學會, 電學論D, 115卷 7号, pp.867-873.
- 3) 深見正, 燕城裕一, 宮本紀男, 1996, 3相かご形誘導機を用いた新しい自己調節形自動單相誘導發電機, 電氣學會産業應用部門全國大會論文集, pp.363-366.
- 4) 김재민, 좌종근, 1999, 3상 농형유도기를 사용한 자기조절형 단상유도발전기의 단자 커패시턴스의 결정, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제10권, 1호, pp.153-159.
- 5) Rahim, Y.H.A., Aloah, A.I., and Al-Mudaiheem, R.I., 1993, Performance of Single Phase Induction Generators, *IEEE Transations on Energy Conversion*, Vol.8, No.3, pp.389-395.
- 6) Murthy, S.S., 1993, A Novel Self-Excited Self-Regulated Single Phase Induction Generator. Part- I : Basic System and Theory, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.3, pp.377-382.
- 7) Murthy, S.S., Ri, H.C., and Tandon, A.K., 1993, A Novel Self-Excited Self-Regulated Single Phase Induction Generator Part-II Experimental Investigation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.3, pp.383-387.
- 8) 竹内壽太郎, 1963, 電氣機器テンソル解析, オーム社, pp.102-115.
- 9) Mcpherson, G. and Laramore, R.D., 1981, *An introduction to Electrical Machines and Transformers*, John Wiley & Sons, pp.305-306.