

3상 농형유도기를 사용한 자기조절형 자여식 단상유도발전기의 단자커패시턴스의 결정

김재민*·좌종근**

Determination of Terminal Capacitances for the Self-Regulated Self-Excited Single-Phase Induction Generator using Three-Phase Squirrel-Cage Induction Machine

Jae-Min Kim* and Chong-Keun Jwa**

ABSTRACT

This paper presents an analytical method for determining the capacitances of terminal capacitors which are connected at the self-regulated self-excited single phase induction generator using three phase induction machine. To determine the capacitances, an equivalent circuit of the generator for variable speed operation is derived by a method of symmetrical coordinates. By using this equivalent circuit, the output characteristics and the conditions of self excitation are used to compute the capacitances at a specified operating condition. The results of proposed method are compared with the Tadashi's experimental results to validate the proposed method.

Key words : Terminal capacitance, self regulated, self excited, induction generator

1. 서론

3상 농형유도전동기를 사용한 자기조절형의 컨덴서자여식 단상 유도발전기¹⁾는 농형유도기를 이용할 수 있기 때문에 단상동기발전기에 비하여 구조가 간

단하고 견고하며 유지보수가 쉽고 가격이 저렴한 특징을 가지고 있다. 이 발전기는 고정자의 3상 단자에 자기여자를 위한 컨덴서를 부하에 대하여 직·병렬로 접속하기 때문에 단상유도기를 사용한 발전기에 비하여 효율적으로 여자기자력을 확보할 수 있고 고조파를 억제하여 출력전압파형을 개선할 수 있는 점등의 장점이 있다.

자기여자 단상유도발전기로는 3상유도기에 단일 컨덴서를 사용하거나²⁾ 단상유도기에 병렬 컨덴서 하나만 사용한 경우³⁾도 있지만 자기조절형의 단상유도

* 제주대학교 산업대학원
Graduate School of Industry, Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 전기공학과, 산업기술연구소
Dept. of Electrical Eng., Res. Inst. Ind. Tech.,
Cheju Nat'l Univ.

발전기에 대하여 Muiythy 등^{4, 5)}은 단상유도기를 사용하여 자기조절 가능한 회로 구성을 제시하고 이 시스템들을 해석하기 위한 이론을 정리하고 실험에 의하여 검토하였다. Tadashi 등¹⁾은 3상유도기를 사용한 새로운 구성의 자기조절형 단상유도발전기를 제안하여 정속도로 회전할 때 저항부하나 유도성부하에서도 아무런 제어장치 없이 출력전압을 보상할 수 있음을 이론과 실험을 통하여 확인하였다. 또한 Tadashi 등⁶⁾은 이 발전기의 정상특성을 대칭좌표법에 의하여 해석하고 등가회로를 구성하여 산정하고 있다.

그러나 이들 연구에서는 자기여자 현상을 일으키는 직렬컨덴서의 용량(C_s)을 무부하전압 특성곡선에서 결정하고 저항부하와 유도성부하시의 출력전압변동이 가장 작게되는 병렬컨덴서의 용량(C_p)를 실험에 의하여 결정하고 있으며 속도변화에 대한 출력특성을 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 이 발전기의 속도 변화시의 출력특성을 얻기 위한 등가회로를 대칭좌표법에 의하여 재구성하고 이 등가회로로부터 자기여자 발전 상태의 조건식과 출력식을 이용하여 운전조건이 주어졌을 때 주파수, 여자리액턴스, 부하임피던스, 그리고 직·병렬컨덴서의 커패시턴스를 동시에 결정할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 결정된 커패시턴스를 사용하여 지정된 부하에 대한 발전기 출력, 전압, 그리고 주파수의 속도특성도 검토하였다.

II. 해석이론

2.1. 회로의 구성

본 연구에 사용한 발전기는 Fig. 1에 보인 것처럼 3상 농형유도기의 고정자 3상 단자에 C_s 및 C_p 를 단상부하에 대해서 직·병렬로 접속한 것으로, 구성이 간단하며 콘덴서 C_s 의 효과에 의해서 발전기의 진상 전류가 부하 변화에 따라 자기 조절할 수 있으며 제어장치 없이 정속운전시 거의 일정한 출력전압을 얻을 수 있다. 또한 3상 권선에서 자기여자하기 위한 여자기작용의 확보도 용이하며 과부하 내성을 크게 취할 수 있다는 등의 이점이 있다.

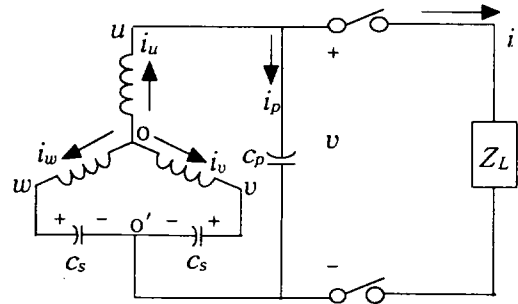


Fig. 1 A self-regulated self-excited single-phase induction generator

2.2. 등가회로

2.2.1. 특성 계산상의 가정

- (1) 발전기 회로정수 중 여자리액턴스는 포화의 영향을 받으며, 회전속도는 가변 한다.
- (2) 고정자 및 회전자 리액턴스는 같다.
- (3) 철손 저항은 무시한다.
- (4) 공간 고조파 영향은 무시하고 전압, 전류 파형은 정현파로 가정한다.

2.2.2. 등가 회로의 유도

본 연구에서 사용하는 기호는 다음과 같다. prime(')는 2차측을 1차측으로 환산한 값을 나타내며 dot(.)는 페이저 표시, 전압, 전류의 소문자는 순시치, 대문자는 실효치로 한다.

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_{cs}, x_{cp} : 콘덴서 C_s, C_p 의 리액턴스

v, i, V, I : 출력 전압, 전류

R, X : 부하저항, 부하리액턴스

Z_e : x_{cp} 와 부하임피던스의 합성등가임피던스

V_{1f}, V_{1b} : 고정자 권선 선간전압의 정상분, 역상분

I_{1f}, I_{1b} : 고정자 권선 상전류의 정상분, 역상분

Z_{gf}, Z_{gb} : 발전기 임피던스의 정상분, 역상분

E_m : 공극 전압

r_1, r_2' : 고정자와 회전자의 1상당 저항

x_1, x_2' : 고정자와 회전자의 1상당 누설 리액턴스

x_m : 여자리액턴스

α : 페이저 오퍼레이터 $\alpha = e^{j2\pi/3}$

- 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 = ω/ω_B

Fig. 1에서 고정자 권선이 성형 접속이기 때문에 상전류의 영상분은 존재하지 않는다. 따라서 상전류 I_u, I_v, I_w를 대칭분으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} I_u = I_V + I_{1b} \\ I_v = a^2 I_V + a I_{1b} \\ I_w = a I_V + a^2 I_{1b} \end{cases} \quad (1)$$

또한 Fig. 1에서 고정자 권선의 선간 전압 V_{uv}, V_{vw}는

$$\begin{cases} V_{uv} = Z_e I_u - (-jx_{cs}) I_v \\ V_{vw} = -jx_{cs} I_v - (-jx_{cs}) I_w \\ V_{wu} = -jx_{cs} I_w - Z_e I_u \end{cases} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며, (1)식을 (2)식에 대입하여 정리하면 정상분 V_y와 역상분 V_b는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{V}_y = \frac{1}{3} (\dot{V}_{uv} + a \dot{V}_{vw} + a^2 \dot{V}_{wu}) \\ = \frac{1}{3} [(1-a^2)(Z_e - j2x_{cs}) I_V \\ + (1-a^2)(Z_e + jx_{cs}) I_{1b}] \\ \dot{V}_b = \frac{1}{3} (\dot{V}_{uv} + a^2 \dot{V}_{vw} + a \dot{V}_{wu}) \\ = \frac{1}{3} [(1-a)(Z_e + jx_{cs}) I_V \\ + (1-a)(Z_e - j2x_{cs}) I_{1b}] \end{cases} \quad (3)$$

(3)식의 V_y, V_b를 발전기의 임피던스의 정상분 Z_{gf}와 역상분 Z_{gb}로 표현하면 다음과 같이 된다

$$\begin{cases} \dot{V}_y = -(1-a^2) Z_{gf} I_V \\ \dot{V}_b = -(1-a) Z_{gb} I_{1b} \end{cases} \quad (4)$$

따라서 (3), (4)식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} Z_e - j\frac{2}{3} x_{cs} + Z_{gf} & \frac{1}{3} (Z_e + jx_{cs}) \\ \frac{1}{3} (Z_e + jx_{cs}) & \frac{1}{3} Z_e - j\frac{2}{3} x_{cs} + Z_{gb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_V \\ I_{1b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5)식으로 회로를 구성하면 Fig. 2와 같이 된다.

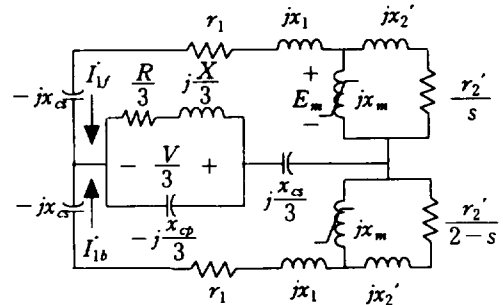


Fig. 2 Equivalent circuit of the generator at rated frequency

정격 주파수 f_B, 발전 주파수 f, 정격 각속도 ω_B, 회전 각속도를 ω라고 하면 단위법으로 표시한 회전 속도 b와 발전 주파수 a는 다음과 같이 표현된다.⁷⁾

$$\begin{cases} b = \frac{\omega}{\omega_B} \\ a = \frac{f}{f_B} \end{cases} \quad (6)$$

그리고 유도성 리액턴스와 공극에서 유도되는 전압은 주파수 f에 비례하고, 용량성 리액턴스는 주파수 f에 반비례하므로 주파수와 함께 동기속도 변화에 따라 슬립의 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{s} = \frac{a}{a-b} \quad (7)$$

$$\frac{1}{2-s} = \frac{a}{a+b} \quad (8)$$

이들을 고려하여 임의의 회전속도에서 특성을 구하기 위한 등가회로는 Fig. 3과 같이 된다.

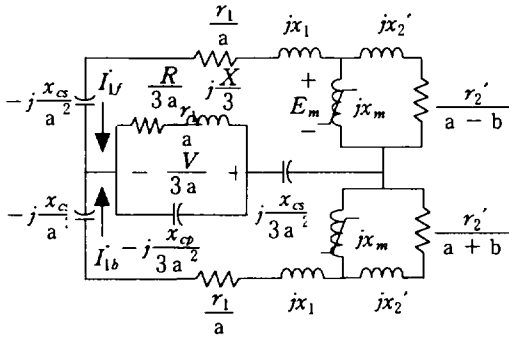


Fig. 3 Equivalent circuit of the generator at variable frequency

Fig. 3에서 주파수 변동을 고려한 발전기 임피던스의 정상분 Z_{gf} 와 역상분 Z_{gb} 는 다음과 같이 된다.

$$\frac{Z_{gf}}{a} = \frac{r_1}{a} + jx_1 + \frac{jx_m(\frac{r_2'}{a-b} + jx_2')}{\frac{r_2'}{a-b} + j(x_m + x_2')} \quad (9)$$

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

$$\frac{Z_e}{3a} = \frac{-j\frac{x_{cp}}{3a^2}(\frac{R}{3a} + j\frac{X}{3})}{\frac{R}{3a} + j(\frac{X}{3} - \frac{x_{cp}}{3a^2})} \quad (11)$$

Fig. 3에서 공극 전압 E_m 과 여자리액턴스 x_m 의 관계를 알면 이 등가회로에서 발전 특성을 산정할 수 있다.

자기여자 발전 중의 C_s , C_p 의 산정은 지정된 단자 전압, 출력, 회전속도, 그리고 회로정수가 주어졌을 때 자기여자에 의하여 발전하기 위한 단자 커패시턴스는 다음과 같이 결정한다.

Fig. 3의 등가회로에서 자기여자로 발전되어 운전되는 경우는 다음 식을 동시에 만족시켜야 한다.

$$\begin{cases} Z_f I_f = 0 \\ Z_b I_b = 0 \end{cases} \quad (12)$$

그리고 (12)식이 성립되기 위해서는 발전 중에는 전류가 흐르므로 다음 식이 성립되어야 한다.

$$\begin{cases} I_f \neq 0 \\ I_b \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

따라서

$$\begin{cases} Z_f = 0 \\ Z_b = 0 \end{cases} \quad (14)$$

이 되어야 하고, (12)식에서 Z_f 와 Z_b 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{Z_{gf}}{a} - j\frac{x_{cs}}{a^2} + \frac{(\frac{Z_e}{3a} + j\frac{x_{cs}}{3a^2})(\frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{x_{cs}}{a^2})}{\frac{Z_e}{3a} + \frac{Z_{gb}}{a} + j(\frac{x_{cs}}{3a^2} - \frac{x_{cs}}{a^2})} \\ &= R_e Z_f + jI_m Z_f \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{x_{cs}}{a^2} + \frac{(\frac{Z_e}{3a} + j\frac{x_{cs}}{3a^2})(\frac{Z_{gf}}{a} - j\frac{x_{cs}}{a^2})}{\frac{Z_e}{3a} + \frac{Z_{gf}}{a} + j(\frac{x_{cs}}{3a^2} - \frac{x_{cs}}{a^2})} \\ &= R_e Z_b + jI_m Z_b \end{aligned} \quad (16)$$

그리고, (14)식이 만족되기 위해서는 다음 식과 같아야 한다.

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

$$I_m Z_f = 0 \quad (18)$$

$$R_e Z_b = 0 \quad (19)$$

$$I_m Z_b = 0 \quad (20)$$

이상의 자기여자 발전 조건식인 (17), (18), (19), (20)식과 출력 특성식인 (25), (26)식을 위에서 지정한 조건을 가지고 연립하여 풀면 단위법으로 표시한 주파수 a , 여자리액턴스 x_m , 부하저항 R , 부하리액턴스 X , 그리고 단자 용량성 리액턴스 x_{cs} 와 x_{cp} 를 결정할 수 있다.

2.3. 발전기 특성의 계산

임의의 부하상태에서의 특성을 계산하기 위하여

부하임피던스(R 과 X), 회전속도(b), 단자 커패시턴스(C_s 와 C_p), 그리고 등가회로 정수들이 주어지면 이 상태에서의 a 와 x_m 을 (17), (18)식에서 구한다.

정격주파수 f_B 에서 발전 중의 공극전압 E_m 과 여자리액턴스의 관계를 직선적으로 근사화하면

$$E_m = -K_1 x_m + K_2 \quad (21)$$

이고, 여기서 K_1 과 K_2 는 실험에 의해서 얻어진다.

따라서 앞에서 구한 x_m 과 a 를 사용하여 특성을 계산할 수 있다.

Fig. 3의 등가회로에서 고정자 권선을 흐르는 상전류 I_u, I_v, I_w 의 정상분 I_{Iv} 와 역상분 I_{Ib} 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$I_{Iv} = \frac{E_m}{\frac{r_1}{a} + jx_1 - j\frac{x_{cs}}{a^2} + \frac{(\frac{Z_e}{3a} + j\frac{x_{cs}}{3a^2})(\frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{x_{cp}}{a^2})}{\frac{Z_e}{3a} + \frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{2x_{cp}}{3a^2}}} \quad (22)$$

$$I_{Ib} = \frac{\frac{Z_e}{3a} + j\frac{x_{cs}}{3a^2}}{\frac{Z_e}{3a} + \frac{Z_{gb}}{a} - j\frac{2x_{cp}}{3a^2}} I_{Iv} \quad (23)$$

상전류 I_u, I_v, I_w 는 (22), (23)식의 결과와 (1)식에서 구할 수 있다.

$$I_u = I_{Iv} + I_{Ib}$$

부하 전류 I 는

$$I = \frac{-j\frac{x_{cp}}{a^2}}{\frac{R}{a} + jX - j\frac{x_{cp}}{a^2}} I_u \quad (24)$$

로 주어지며, 단자 전압 V 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$V = (R + jaX)I \quad (25)$$

출력 P_o 와 발전 주파수 f 는 다음 식으로 구할 수

있다.

$$P_o = |I|^2 R \quad (26)$$

$$f = a f_B \quad (27)$$

III. 해석결과 및 검토

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 사용한 3상 유도발전기는⁶⁾ 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 (21)식의 계수는 $K_1 = 2.00$, $K_2 = 191.25$ 이다.

먼저 Tadashi의 실험결과 얻은 단자 커패시턴스와 본 연구에서 계산한 값을 비교하여 Table 1에 보였다.

Table 1 Comparison of terminal capacitances

Methods	Capacitance	
	C_s [μF]	C_p [μF]
Tadashi's method	150	100
Proposed method	143	98.73

Table 1에서 제안한 방법의 커패시턴스는 Tadashi의 실험결과 단자전압 178.1V, 출력 1400W, 그리고 회전속도는 1800rpm으로 운전할 때의 조건을 사용하여 계산하였다.

계산시 사용한 초기값으로는 단위법으로 표시한 주파수 a 는 단위법으로 표시한 속도 b 가 1로 운전하고 있으므로 0.99로 주고 여자리액턴스 x_m , 용량성 단자리액턴스 x_{cs} 와 x_{cp} 는 운전 조건을 고려하여 발전기 1상의 임피던스인 28.57을, 부하저항 R 과 리액턴스 X 는 이 값의 반을 취하였다.

위에서 계산된 $a, x_m, x_{cs}, x_{cp}, R$, 그리고 X 를 사용하여 특성을 계산하고 Tadashi의 실험결과와 비교하여 Table 2에 보였다.

결과에서 보는 바와 같이 제안한 방법이 잘 일치하고 있으므로 운전조건이 주어졌을 때 해석식에 의하여 동시에 C_s 와 C_p 를 결정할 수 있다.

Table 2 Comparison of terminal voltage, output, and frequency characteristics at load impedance $Z_L = 15.936 + j10.514$

Methods	a[pu]	$x_m[\Omega]$	V[V]	$P_o[W]$	f[Hz]
Proposed methods	0.984	25.224	178.109	1400	59.04
Tadashi's methods	0.984	24.375	189.564	1586	59.04

(Measured values : $V=178.1V$, $P_o=1400W$)

제안한 방법에 의하여 구한 직·병렬 커패시턴스와 실험에 의하여 결정된 Tadashi의 커패시턴스를 사용하여 부하임피던스가 $Z_L=15.936+j10.514[\Omega]$ 일 때의 발전기 속도 변화에 대한 출력전압특성을 Fig. 4, 출력특성을 Fig. 5, 그리고 주파수특성을 Fig. 6에 보였다. 이들 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 주파수는 회전수에 의존하여 변화하므로 단자커패시턴스가 다른 값을 가져도 변함이 없지만 출력전압이나 출력은 단자커패시턴스에 따라 커패시턴스 값이 큰 경우가 커짐을 알 수 있다. 그리고 회전수가 빨라짐에 따라서 모든 특성값들이 커짐을 알 수 있다. 따라서 본 해석방법을 적용하여 자기조절형 자기여자발전기의 속도특성을 예측하여 운전과 설계자료로 활용될 수 있을 것이다.

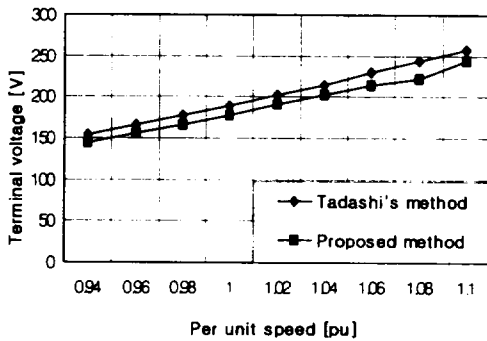


Fig. 4 Terminal voltage vs speed at $Z_L = 15.936 + j10.514[\Omega]$

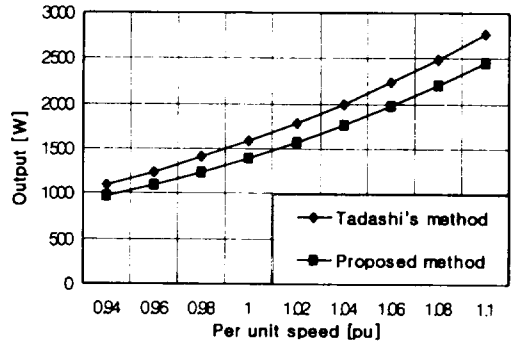


Fig. 5 Output vs speed at $Z_L = 15.936 + j10.514[\Omega]$

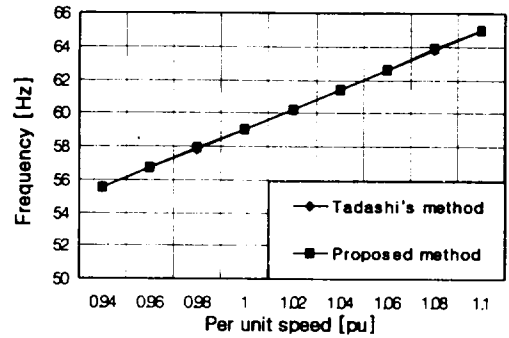


Fig. 6 Frequency vs speed at $Z_L = 15.936 + j10.514[\Omega]$

IV. 결론

3상 농형유도기를 사용한 자기조절형의 자기여자 단상유도발전기의 직·병렬 커패시턴스를 해석식에 의하여 산정하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 이 발전기의 속도 변화시의 출력특성을 얻기 위한 등가 회로를 대칭좌표법에 의하여 재구성하고 이 회로로부터 자기여자 발전 조건식과 출력식을 이용하여 지정된 운전조건에서 직·병렬 커패시턴스를 동시에 결정하였다. 또한 결정된 커패시턴스를 사용하여 지정된 부하에 대한 속도특성도 검토하였다.

방법의 타당성을 검토하기 위하여 Tadashi 등이 제안한 실험에 의하여 결정된 직·병렬 커패시턴스와

비교하여 검토하였고, 두 방법에 의한 해석결과도 분석하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 방법이 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) 深見正, 今村道徳, 宮本紀男, 1995, 自己調節形自勵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
- 2) Al-Bahrani, A. H., and Malik, N. H., 1990, Steady State Analysis and Performance Characteristics of A Three Phase Induction Generator Self Excited with A Single Capacitor, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 4, pp. 725-732
- 3) Rahim, Y. H. A., Aloah, A. I., and Al-Mudaiheem, R.I, 1993, Performance of Single Phase Induction Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 3, pp. 389-395
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 深見正, 蕪城裕一, 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勵單相誘導發電機, 電氣學會産業應用部門全國大會論文集, pp. 363-366
- 7) Mcpherson, G, and Laramore, R. D., 1981, An introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, pp. 305-306