

碩士學位論文

스타인메츠結線 自己勵磁 誘導發電機의
運轉特性 分析



濟州大學校 大學院

電氣工學專攻

姜 尙 秀

2008年 12月

스타인메츠結線 自己勵磁 誘導發電機의 運轉特性 分析

指導教授 左 宗 根

姜 尙 秀

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 12月

姜尙秀의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

이 기 영

委 員

金 世 鎬

委 員

左 宗 根

濟州大學校 大學院

2008年 12月

Analysis of Operating Characteristic
of Self-Excited Induction Generator
with Steinmetz Connection

Sang-Su Kang

(Supervised by Professor Chong-Keun Jwa)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2008. 12.

목 차

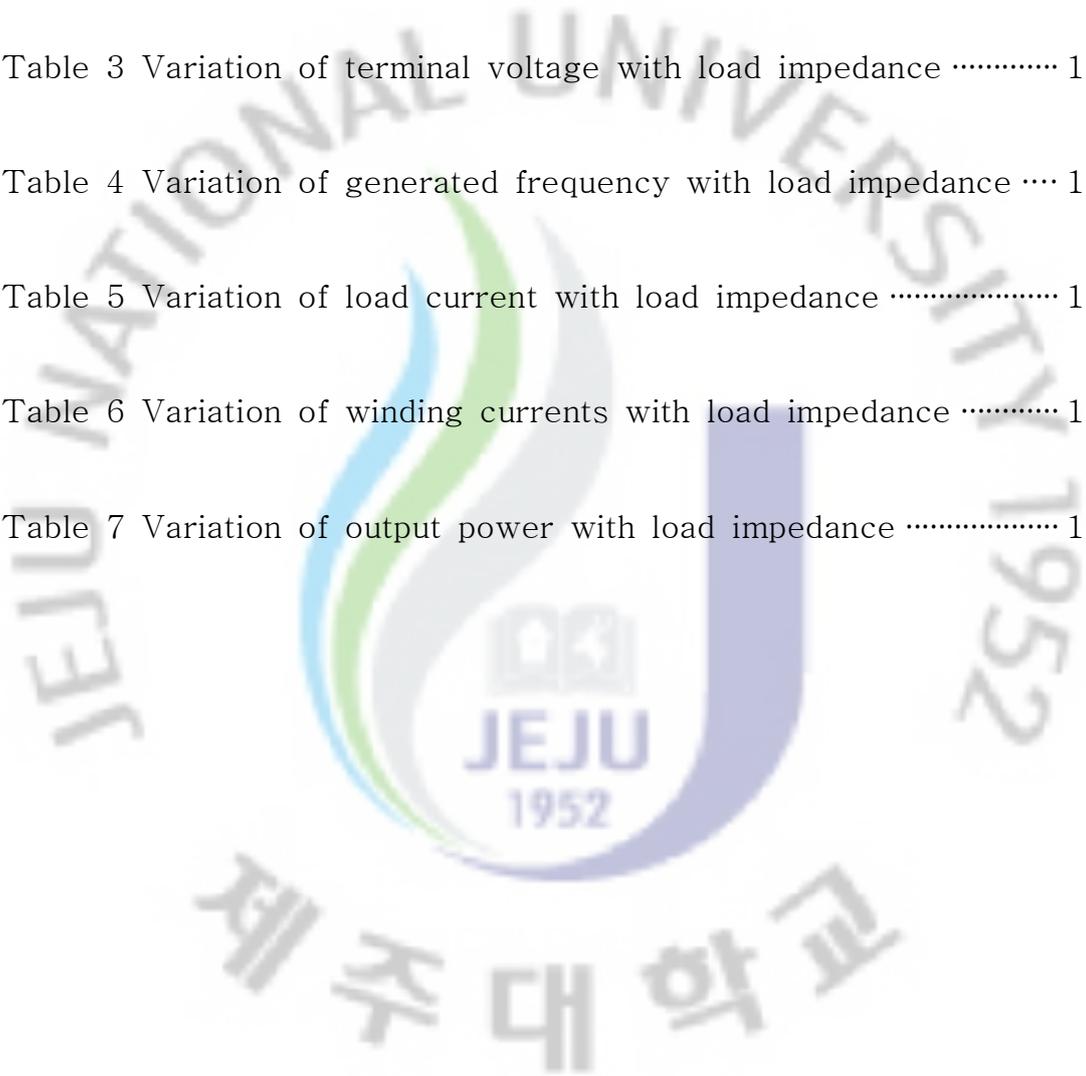
LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	ii
SUMMARY	iii
I. 서론	1
II. 자기여자 유도발전기의 해석이론	3
1. 스타인메츠결선과 회로방정식	3
2. 해석을 위한 등가회로	4
3. 발전기의 특성해석	6
III. 분석결과 및 검토	10
IV. 결론	20
참고 문헌	21
감사의 글	23

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Self-excited induction generator with Steinmetz connection	3
Fig. 2 Per phase equivalent circuits	5
Fig. 3 Variation of voltage unbalance factor with load impedance	12
Fig. 4 Variation of current unbalance factor with load impedance	12
Fig. 5 Variation of terminal voltage with load impedance	13
Fig. 6 Variation of generated frequency with load impedance	14
Fig. 7 Variation of load current with load impedance	15
Fig. 8 Variation of winding currents with load impedance	18
Fig. 9 Variation of output power with load impedance	19

LIST OF TABLES

Table 1 Equivalent circuit parameters in per unit	11
Table 2 Variation of unbalance factors with load impedance	11
Table 3 Variation of terminal voltage with load impedance	13
Table 4 Variation of generated frequency with load impedance	14
Table 5 Variation of load current with load impedance	15
Table 6 Variation of winding currents with load impedance	16
Table 7 Variation of output power with load impedance	18



SUMMARY

This paper analyzes the operation characteristics of a self-excited induction generator with Steinmetz connection. For this analysis, the symmetrical components analysis is used to obtain the related expressions and the excitation capacitance and the magnetizing reactance are determined in turn by the condition of self excitation which includes the input impedance of the generator as viewed across load terminals. Two simultaneous equations of the condition of self excitation itself are solved by using the real and imaginary function in an application software. This method is applied to simulate the operation characteristics when the generator is driven at rated speed and the specified excitation capacitor is connected across the lagging phase. The results show that better operation characteristics except generated frequency are obtained by using relatively large excitation capacitance and resistive load.

I. 서론

근래에 화석에너지의 사용이 급격히 증가하면서 고유가로 인한 경제적인 부담 증가와 지구온난화 등의 환경문제가 대두되면서 이에 대한 대책의 하나로 대체 에너지의 개발과 보급에 대한 관심이 높아지고 있다. 대체에너지원 중에 풍력, 소수력, 바이오가스 등에 의한 에너지원에 의해 구동되는 소용량 전원으로 사용하는 경우 적합한 독립발전기들의 개발이 필요하게 되었다.

적합한 독립전원으로 커패시터 자기여자 유도발전기(Self-excited induction generator : SEIG)가 낮은 단위원가, 브러시 없는 회전자구조, 여자를 위한 분리 전원의 생략, 견고함, 유지의 용이, 그리고 심한 과부하와 단락회로에 대한 자기 보호 등으로 인하여 개발되고 있다.

이에 따라, 이 발전기에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 오고 있으며 3상 자기 여자 발전기에 대한 대표적인 연구로 Murthy 등[1]은 루우프 임피던스 법에 의하여, Quazen과 Mcpherson[2]은 마디 어드미턴스 법에 의하여 자기여자 발전조건식을 단위법 주파수와 자화리액턴스의 다항식으로 구성하여 해석하고 있다.

또한, 대체에너지원에 의한 독립 단상전원이 필요한 지역에서 3상으로 운전하는 경우에 비하여 출력은 감소하지만 3상 유도기를 단상 자기여자 유도발전기로 사용하는 경우가 있다. 이에 대한 연구로 Al-Bahrani와 Malik[3]는 부하측에 단일커패시터가 접속된 델타와 와이 결선 발전기의 특성을 등가회로로 구성하여 해석하였다. Chan[4]은 단일 커패시터에 의한 델타결선 발전기와 스타인메츠결선 발전기의 특성을 비교하여 커패시터가 부하단자 상보다 위상이 뒤진 상에 접속된 스타인메츠결선 발전기가 좋은 특성이 얻어지는 것을 보였다. Chan과 Lai[5]는 스타인메츠결선 발전기에서 부하와 직렬로 접속된 보상커패시터의 영향을 검토하였고, Fukami 등[6]은 전압변동을 줄이기 위하여 부하에는 병렬커패시터를 두 개의 상에는 같은 직렬커패시터를 사용한 발전기를 개발하여 해석하였다. Chan과 Lai[7]는 3개의 커패시터와 가상중성점을 사용한 스미스결선 발전기의 특성을 해석하였고, Chan과 Lai[8]는 스타인메츠결선에서 발전을 하기 위한 최소 커패시턴스와 특정 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스를 반복법에 의하여

결정하는 방법을 발표하였다.

이상의 스타인메츠결선 자기여자 유도발전기의 해석에서 커패시터 단자에서 본 임피던스를 사용하여 자기여자 발전조건식을 구성하고 이를 실수부와 허수부로 나누어 실수부에서 발전주파수를, 허수부에서 커패시턴스를 구하고 있다. 그러나 실수부와 허수부로 나눌 때 번거로운 대수계산을 해야 하며 특성해석을 위해서 부하단자에서 본 임피던스를 사용하고 있으므로 그 처리과정이 복잡하게 된다. 이를 개선하기 위하여 강과 좌[9]는 부하단자에서 본 임피던스를 사용하여 여자 커패시턴스를 결정하는 방법을 제시하였으나 이 방법을 적용한 제반운전특성은 분석되어 있지 않다.

본 논문에서는 스타인메츠결선 자기여자 발전기의 부하단자에서 본 임피던스에 의한 자기여자 조건을 사용하여 아무런 대수계산 없이 응용 소프트웨어(Mathcad)의 실수함수와 허수함수 기능을 사용하여 최소 커패시턴스와 자화리액턴스를 차례로 결정하여 발전기의 특성을 대칭성분에 의하여 해석할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한, 이 방법에 의하여 서로 다른 여자커패시턴스를 사용한 경우의 발전기 운전특성을 분석하기 위하여 발전기가 정격속도로 회전한다고 가정하여 부하변화에 따른 변화를 시뮬레이션하여 분석하고 활용가능성을 검토하고자 한다.

II. 자기여자 유도발전기의 해석이론

1. 스타인메츠결선과 회로방정식

단상부하에 전력을 공급하는 단일 여자커패시터에 의하여 운전되는 3상 유도 발전기에 대한 스타인메츠결선은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보듯이 부하와 여자 커패시터가 각각 다른 상에 접속되고 커패시터는 부하가 접속된 상에 대하여 뒤진 상에 연결되어 있다.

해석의 편의상 전류의 방향을 전동기로 동작할 때의 방향으로 정하고 회로의 모든 정수는 기준 주파수 때의 값을 사용한다.

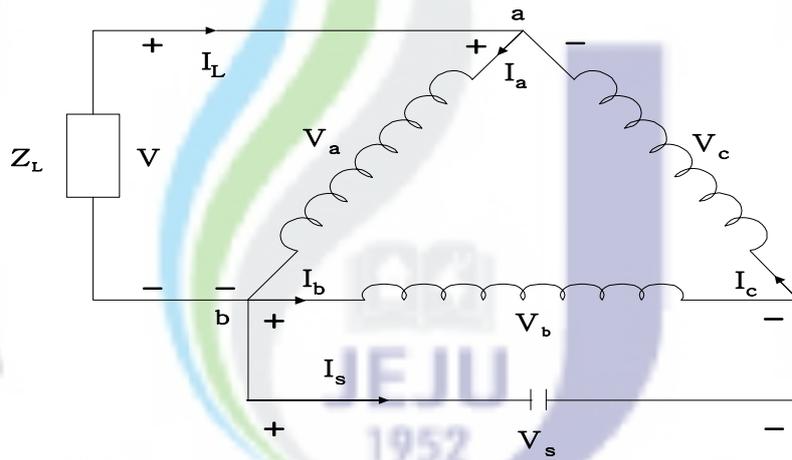


Fig. 1 Self-excited induction generator with Steinmetz connection

여기서, V 는 단자전압, I_L 은 부하전류, V_a, V_b, V_c 는 각각 상전압, I_a, I_b, I_c 는 각각 상전류, I_s 는 여자커패시터 전류, V_s 는 여자커패시터 전압, 그리고 Z_L 은 부하 임피던스이다.

Fig. 1의 회로에 대하여 전압, 전류평형 식을 세우면 다음의 식(1), (2), (3), (4)와 같다.

$$V = V_a \tag{1}$$

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (2)$$

$$I_s = \frac{V_b}{Z_c} = I_c - I_b \quad (3)$$

$$I_L = I_a - I_c \quad (4)$$

여기서 Z_c 는 여자커패시터의 임피던스이다.

2. 해석을 위한 등가회로

발전기의 부하가 단상일 때 발전기의 각 권선에는 불평형전압이 유도되므로 대칭분 등가회로에 의하여 해석한다. 발전기 상결선이 델타이고 중성점이 존재하지 않으므로 영상분 전압은 나타나지 않는다. 따라서 등가회로는 정상분과 역상분 등가회로만을 사용한다.

이 발전기의 회전각속도 ω 와 정격주파수 f_B 에 대응하는 동기각속도를 ω_B 라고 하면 단위법으로 표시한 회전 속도 b 는

$$b = \frac{\omega}{\omega_B} \quad (5)$$

로 정의되고, 발전주파수를 f 라 하면 단위법으로 표시한 발전 주파수 a 는 식(6)으로 정의된다.

$$a = \frac{f}{f_B} \quad (6)$$

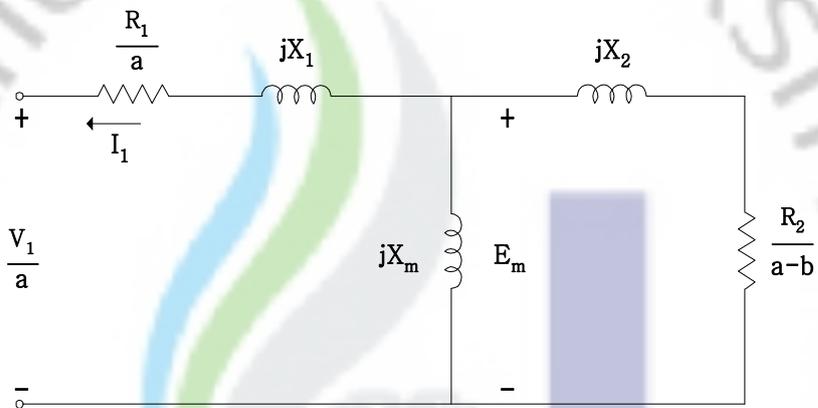
슬립 s 는

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{a\omega_B - b\omega_B}{a\omega_B} = \frac{a - b}{a} \quad (7)$$

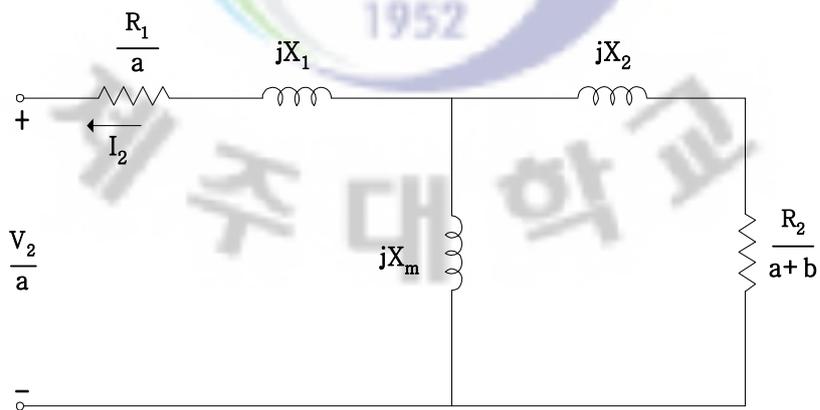
이며, 역상분일 경우 슬립 s_2 는 식(8)과 같다.

$$s_2 = 2 - s = 2 - \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_s + \omega_m}{\omega_s} = \frac{a\omega_B + b\omega_B}{a\omega_B} = \frac{a+b}{a} \quad (8)$$

슬립 s 로 표시한 원래의 등가회로에서 공극전압, 권선 리액턴스, 여자 리액턴스들은 발전주파수의 영향을 받으므로 이것들을 정격주파수의 값으로 조정한 상당 등가회로는 Fig. 2와 같다.



a) Positive equivalent circuit



b) Negative equivalent circuit

Fig. 2 Per phase equivalent circuits

여기서, V_1, V_2 는 각각 정상분과 역상분 입력전압, I_1, I_2 는 각각 정상분과 역상분 전류, R_1, R_2 는 각각 상당 고정자와 회전자 저항, X_1, X_2 는 각각 상당 고정자와 회전자 리액턴스, X_m 은 여자 리액턴스이다.

발전기의 정상분 임피던스 Z_1 과 역상분 임피던스 Z_2 는 Fig. 2에 등가회로를 이용하여 식(9)와 (10)으로 구할 수 있다.

$$Z_1 = \frac{R_1}{a} + jX_1 + \frac{jX_m \left(\frac{R_2}{a-b} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{a-b} + j(X_m + X_2)} \quad (9)$$

$$Z_2 = \frac{R_1}{a} + jX_1 + \frac{jX_m \left(\frac{R_2}{a+b} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{a+b} + j(X_m + X_2)} \quad (10)$$

3. 발전기의 특성 해석

불평형 문제를 해석하기 위한 전력불변 대칭성분 변환행렬[10]은

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

로 주어진다. 여기서 α 는 페이저 연산자로 $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.

식(1)과 (3)을 대칭성분 변환행렬을 사용하여 대칭성분인 정상분 전압 V_1 과 역상분 전압 V_2 를 구하면 식(12)와 (13)과 같다.

$$V_1 = \frac{Z_c Z_1 - \frac{\alpha}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 Z_2}{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2} \sqrt{3} V \quad (12)$$

$$V_2 = \frac{Z_c Z_2 + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 Z_2}{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2} \sqrt{3} V \quad (13)$$

식(12)와 (13)에서 V_1 , V_2 를 계산하여 식(14)로 부터 전압불평형률(VUF; voltage unbalance factor)을 구할 수 있다.

$$VUF = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (14)$$

정상분 전류 I_1 과 역상분 전류 I_2 는

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \quad (15)$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \quad (16)$$

이며, 식(15)와 (16)에서 I_1 , I_2 를 계산하여 식(17)로 부터 전류불평형률(CUF; current unbalance factor)을 구할 수 있다.

$$CUF = \frac{|I_2|}{|I_1|} \quad (17)$$

각 권선전류는 식(18), (19), (20)과 같다.

$$I_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_1 + I_2) \quad (18)$$

$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(\alpha^2 I_1 + \alpha I_2) \quad (19)$$

$$I_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(\alpha I_1 + \alpha^2 I_2) \quad (20)$$

부하단자에서 본 발전기의 입력임피던스 Z_{in} 을 구하면 식(21)과 같다.

$$Z_{in} = \frac{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2}{3Z_c + Z_1 + Z_2} = R_{in} + jX_{in} \quad (21)$$

주어진 부하가 접속되어 자기여자 발전기로 동작할 때 부하와 발전기 회로에 대하여 부하전류에 의한 임피던스강하는 식(22)와 같다.

$$(Z_{in} + Z_L)I_L = 0 \quad (22)$$

여기서, Z_L 은 부하임피던스로 부하저항 R_L 과 부하리액턴스 X_L 그리고 단위법 주파수 a 로 표시하면 식(23)이 된다.

$$Z_L = \frac{R_L}{a} + jX_L \quad (23)$$

발전기가 발전되어 부하에 전력을 공급할 때 부하전류 I_L 은 영(zero)이 될 수 없으므로 자기여자에 의한 발전조건식은

$$Z_{in} + Z_L = 0 \quad (24)$$

이며, 식(24)를 실수부와 허수부로 표시하면 식(25)와 (26)이 된다.

$$R_e(Z_{in} + Z_L) = 0 \quad (25)$$

$$I_m(Z_{in} + Z_L) = 0 \quad (26)$$

이 식은 발전기의 등가회로 정수들이 주어지고 주어진 부하임피던스와 발전기의 단위법속도에 대하여 자화리액턴스 X_m , 여자커패시터의 용량성 리액턴스 X_c , 그리고 a 의 함수이다. 먼저 자기여자를 위한 최소 커패시턴스는 동기속도 무부하 시험에서 구한 공극전압 E_m 과 X_m 의 관계식에서 미포화치 X_{mu} 를 적용하여 식(25)와 (26)을 응용소프트웨어의 실수함수와 허수함수기능을 사용해서 a 와 X_{cu} 를 구한다. X_{cu} 를 참고로 하여 임의의 X_c 를 결정한 후, 이를 사용하여 다시 식(25)와 (26)에서 위와 같은 방법으로 a 와 X_m 을 구한다.

다음에 a 와 X_m 을 사용하여 E_m 과 X_m 의 관계식으로부터 E_m 을 구하고, 정상분 등가회로로부터 V_1 은

$$V_1 = \frac{aE_m}{\left(\frac{R_L}{a} + \frac{R_1}{a}\right) + j(X_L + X_1)} \left(\frac{R_L}{a} + jX_L\right) \quad (27)$$

로 계산하고, 식(12)로부터 V 를, 그리고 식(13)에 V 를 대입하여 V_2 를 계산한다.

식(15)와 (16)에서 I_1 과 I_2 를 구하면 각 권선전류와 식(4)로부터 부하전류가 계산되며 부하 복소전력 S_L 은 식(28)로 구할 수 있다.

$$S_L = V(-I_L)^* = P_L + jQ_L \quad (28)$$

여기서 $*$ 는 공액 복소수를, P_L 과 Q_L 은 각각 부하전력과 무효전력이다.

Ⅲ. 분석결과 및 검토

본 논문의 분석에 사용한 3상 유도기는 농형 4극, 정격 상전압 220V, 상전류 2.9A, 주파수 60Hz이고 기준임피던스는 75.86Ω이다.

이 유도기의 동기속도 무부하 시험결과 얻어진 공극전압 E_m 과 자화리액턴스 X_m 사이의 관계는 다음 식(29)와 같다.

$$E_m = \begin{cases} 1.8559 - 0.4187X_m & \text{for } X_m \leq 1.4599 \\ 2.3432 - 0.7522X_m & \text{for } 1.4599 < X_m < 1.7458 \\ 4.1676 - 1.7959X_m & \text{for } X_m \geq 1.7458 \end{cases} \quad (29)$$

X_m 의 구간을 정하여 구간 선형화해서 X_m 과 E_m 의 관계를 다항식으로 가정하면

$$E_m = \beta - \gamma X_m^3 + \delta X_m^4 - \tau X_m^5 \quad (30)$$

이고, 여기서 β , γ , δ , τ 를 구하면

$$\begin{cases} \beta = 1.71352 \\ \gamma = -0.92556 \\ \delta = 0.90931 \\ \tau = -0.25929 \end{cases} \quad (31)$$

이다. 따라서 공극전압 E_m 과 자화리액턴스 X_m 사이의 관계는

$$E_m = 1.71352 - 0.92556X_m^3 + 0.90931X_m^4 - 0.25929X_m^5 \quad (32)$$

의 X_m 의 다항식으로 표현한다.

이 유도기의 단위법으로 표시한 등가회로 정수는 고정자 권선저항 R_1 과 리액턴스 X_1 , 그리고 고정자측으로 환산한 회전자 권선저항 R_2 와 리액턴스 X_2 를 Table 1에 나타내고 있다 [3].

Table 1 Equivalent circuit parameters in per unit

R_1 [pu]	X_1 [pu]	X_m [pu]	R_2 [pu]	X_2 [pu]
0.09175	0.2112	equation (32)	0.06354	0.2110

발전기의 부하변화에 따른 제 특성을 분석하기에 앞서 여자커패시터의 커패시턴스를 구하기 위하여 발전기의 속도 $b=1pu$ 로 유지하고 부하임피던스를 $1pu$, 그리고 부하역률 0.8 인 상태에서 여자리액턴스의 미포화치 $X_{mu}=1.7458pu$ 를 적용하고 식(25)와 (26)에서 커패시터의 용량성 리액턴스 X_c 와 주파수 a 의 초기 값을 각각 $1pu$ 와 $0.98pu$ 를 적용하여 계산한 결과 $C=60.8706\mu F$ 과 $a=0.97864pu$ 를 얻었다. 본 논문에서는 이를 기초로 하여 여자커패시터의 커패시턴스를 임의로 $C=65\mu F$ 과 $C=100\mu F$ 을 사용한 경우에 대한 발전기의 특성을 분석하기 위하여 발전기가 정격 속도로 회전한다고 가정하고 부하역률이 각각 1 과 0.8 일 때 부하변화에 따른 제 특성을 검토한다.

Table 2 Variation of unbalance factors with load impedance

Load impedance [pu]	VUF [pu]				CUF [pu]			
	pf=1		pf=0.8		pf=1		pf=0.8	
	C=100[μF]	C=65[μF]	C=100[μF]	C=65[μF]	C=100[μF]	C=65[μF]	C=100[μF]	C=65[μF]
0.30	0.22849				0.45584			
0.60	0.23736	0.13699			0.46886	0.41023		
0.80	0.28495	0.14930	0.38360	0.25719	0.56287	0.45370	0.81582	0.93262
0.90	0.30425	0.15996	0.39026	0.25638	0.60113	0.48827	0.82468	0.91887
1	0.32066	0.17043	0.39674	0.25692	0.63367	0.52199	0.83392	0.91153
3	0.43664	0.26174	0.45810	0.28647	0.86468	0.81467	0.92842	0.94092
5	0.46300	0.28418	0.47524	0.29830	0.91735	0.88627	0.95504	0.96140
7	0.47460	0.29420	0.48318	0.30402	0.94054	0.91819	0.96740	0.97157
9	0.48108	0.29976	0.48772	0.30739	0.95348	0.93587	0.97445	0.97762
11	0.48524	0.30336	0.49060	0.30952	0.96178	0.94730	0.97885	0.98131
13	0.48818	0.30594	0.49267	0.31108	0.96767	0.95552	0.98206	0.98416
15	0.49034	0.30774	0.49422	0.31220	0.97203	0.96121	0.98446	0.98610

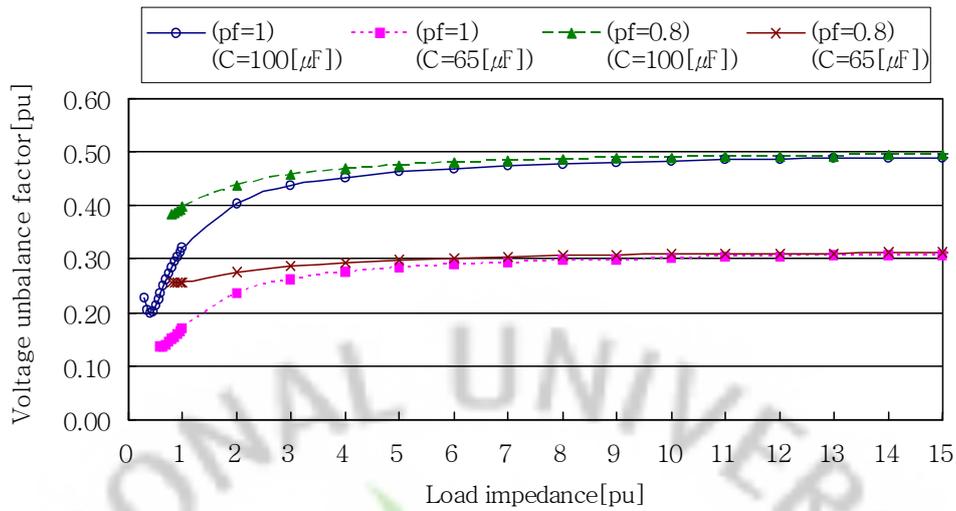


Fig. 3 Variation of voltage unbalance factor with load impedance

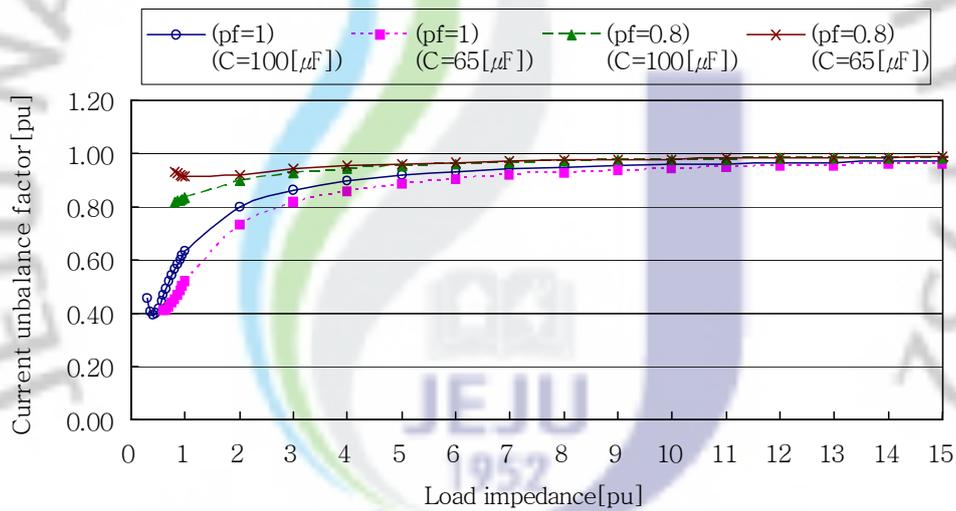


Fig. 4 Variation of current unbalance factor with load impedance

Table 2와 Fig. 3, Fig. 4는 각각 전압불평형률과 전류불평형률을 여자커패시턴스와 부하역률에 따른 변화를 나타내는 것으로 둘 다 부하임피던스가 작을 때 불평형률 값이 비교적 작고 변동정도가 크며, 부하임피던스가 커짐에 따라 불평형률은 커지고 변동정도는 작아지고 있다. 전압불평형률은 여자커패시턴스 $65\mu\text{F}$ 일 때가 $100\mu\text{F}$ 일 때보다 작고, 역률 1인경우가 역률 0.8일 때보다 작게 나타나고 있다. 전류불평형률은 역률 1일 때가 0.8일 때보다 작고 여자커패시턴스가 $65\mu\text{F}$ 일 때 역률에 따른 변화폭이 크며, 전류의 불평형이 심하게 나타나고 있다.

Table 3 Variation of terminal voltage with load impedance

Load impedance [pu]	Terminal voltage[pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	C=100[μ F]	C=65[μ F]	C=100[μ F]	C=65[μ F]
0.30	0.34626			
0.60	0.60155	0.42317		
0.80	0.68273	0.54610	0.58072	0.40175
0.90	0.71121	0.57771	0.61209	0.44961
1	0.73450	0.60174	0.63870	0.48423
3	0.88004	0.73694	0.83168	0.68313
5	0.90979	0.76272	0.87834	0.72774
7	0.92253	0.77359	0.89928	0.74772
9	0.92962	0.77957	0.91117	0.75906
11	0.93413	0.78336	0.91886	0.76636
13	0.93723	0.78597	0.92420	0.77147
15	0.93950	0.78787	0.92815	0.77523

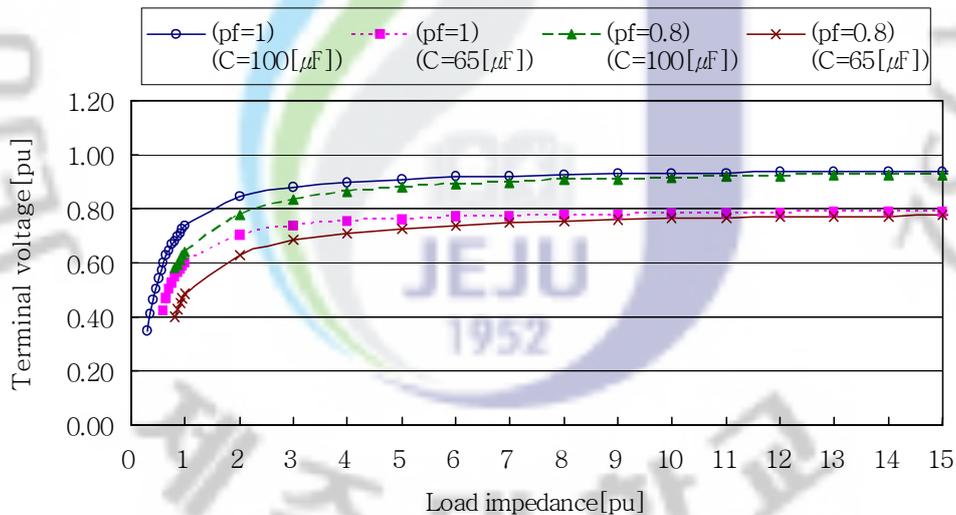


Fig. 5 Variation of terminal voltage with load impedance

Table 3과 Fig. 5는 부하임피던스에 따른 발전기 단자전압의 변화를 나타내는 것으로 부하임피던스가 작을 때 단자전압이 낮고 부하임피던스가 커짐에 따라 전압이 높아지고 있다. 그리고 여자커패시턴스 100 μ F일 때가 65 μ F일 때 보다 전압이 대체적으로 높으며, 역률 1인 경우가 역률 0.8일 때 보다 전압이 높게 나타나고 있다.

Table 4 Variation of generated frequency with load impedance

Load impedance [pu]	Generated frequency [pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	C=100[μ F]	C=65[μ F]	C=100[μ F]	C=65[μ F]
0.30	0.93127			
0.60	0.93870	0.96200		
0.80	0.94252	0.96689	0.95139	0.97503
0.90	0.94404	0.96876	0.95208	0.97606
1	0.94534	0.97034	0.95269	0.97695
3	0.95505	0.98167	0.95763	0.98379
5	0.95740	0.98430	0.95894	0.98554
7	0.95845	0.98547	0.95955	0.98634
9	0.95904	0.98612	0.95990	0.98680
11	0.95942	0.98654	0.96012	0.98709
13	0.95969	0.98684	0.96028	0.98730
15	0.95989	0.98705	0.96040	0.98745

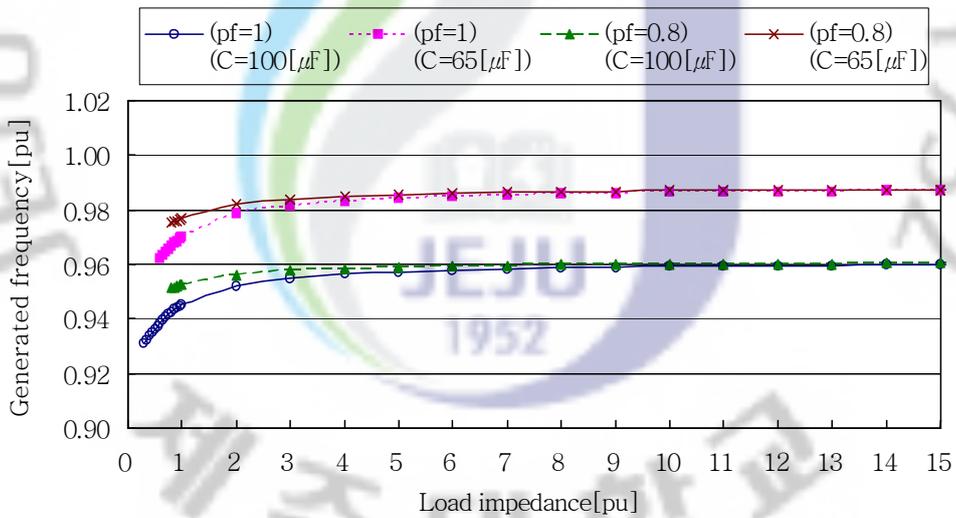


Fig. 6 Variation of generated frequency with load impedance

Table 4와 Fig. 6은 부하임피던스에 따른 발전주파수의 변화로 부하임피던스가 작을 때 주파수가 낮고 부하임피던스가 커짐에 따라 높아지고 있다. 그리고 여자 커패시턴스 65 μ F일 때가 100 μ F일 때보다 주파수가 높으며, 역률 0.8인 경우가 역률 1보다 높게 나타나고 있다.

Table 5 Variation of load current with load impedance

Load impedance [pu]	Load current [pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	C=100[μ F]	C=65[μ F]	C=100[μ F]	C=65[μ F]
0.30	1.15419			
0.60	1.00259	0.70528		
0.80	0.85341	0.68263	0.72590	0.50218
0.90	0.79024	0.64190	0.68010	0.49956
1	0.73450	0.60174	0.63870	0.48423
3	0.29335	0.24565	0.27723	0.22771
5	0.18196	0.15254	0.17567	0.14555
7	0.13179	0.11051	0.12847	0.10682
9	0.10329	0.08662	0.10124	0.08434
11	0.08492	0.07121	0.08353	0.06967
13	0.07209	0.06046	0.07109	0.05934
15	0.06263	0.05252	0.06188	0.05168

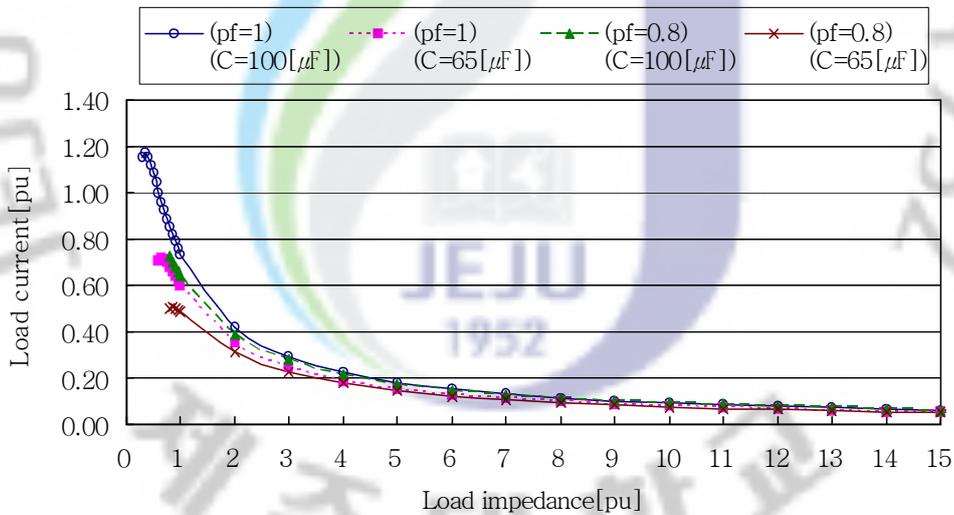


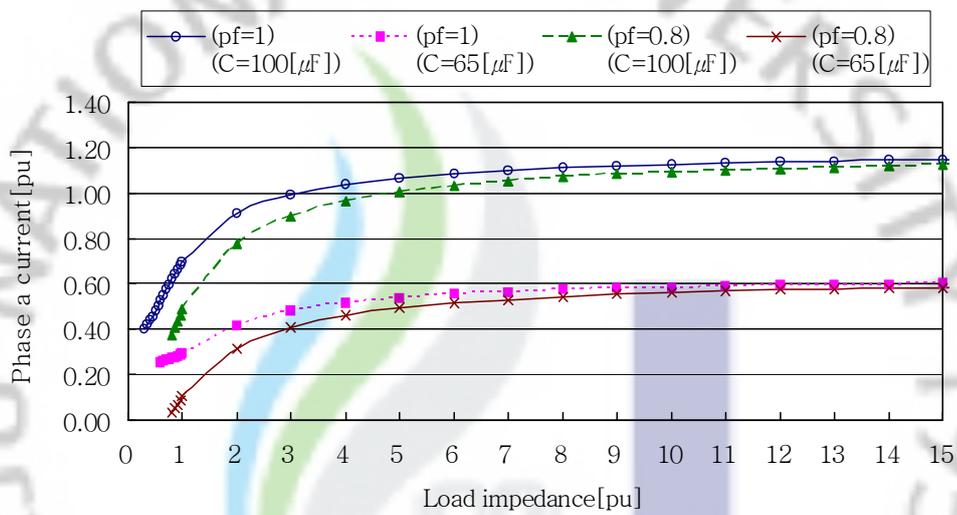
Fig. 7 Variation of load current with load impedance

Table 5와 Fig. 7은 부하임피던스에 따른 부하전류의 변화를 나타내는 것으로 여자커패시턴스 100 μ F일 때가 65 μ F일 때보다 많은 전류가 흐르며, 역률 1인 경우가 역률 0.8보다 부하전류가 많이 흐른다. 또한 모든 경우에서 부하전류가 부하임피던스 증가에 따라 지수 함수적으로 감소하고 있다.

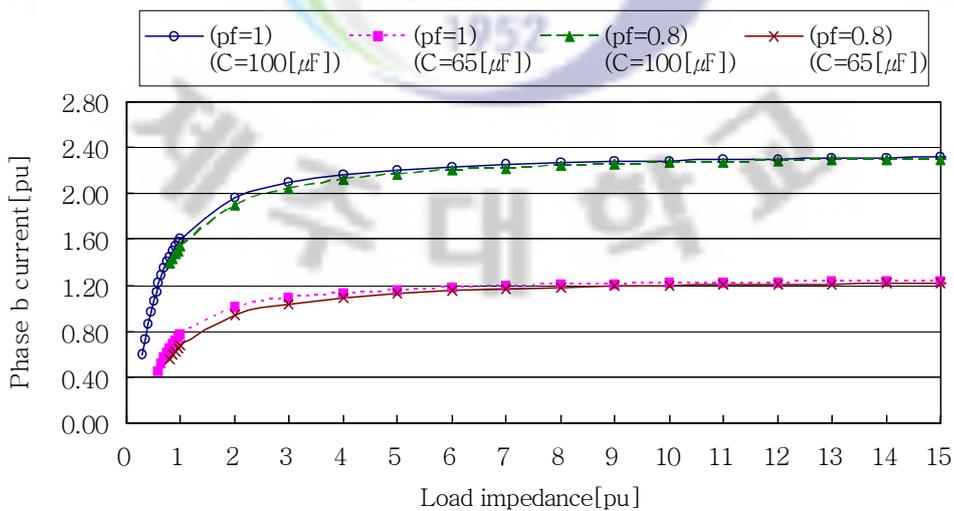
Table 6 Variation of winding currents with load impedance

Load impedance [pu]	I_a [pu]				I_b [pu]				I_c [pu]				
	pf=1		pf=0.8		pf=1		pf=0.8		pf=1		pf=0.8		
	C=100[μ F]	C=65[μ F]											
0.30	0.40416				0.59650					0.82498			
0.60	0.52728	0.25326			1.21943	0.45358				0.98390	0.53616		
0.80	0.62144	0.27211	0.37623	0.03206	1.45297	0.65206	1.39366	0.55279		1.01663	0.60948	1.04994	0.52929
0.90	0.66251	0.28175	0.43524	0.06904	1.53914	0.71388	1.47147	0.62714		1.02848	0.61757	1.06418	0.56465
1	0.69939	0.29426	0.48689	0.10459	1.61100	0.76376	1.53823	0.68319		1.03840	0.62145	1.07563	0.58448
3	0.99345	0.47948	0.89795	0.40987	2.09717	1.08963	2.03976	1.03996		1.12032	0.62761	1.14612	0.63165
5	1.06715	0.53763	1.00549	0.49297	2.20504	1.16069	2.16508	1.12630		1.14404	0.62944	1.16132	0.63400
7	1.10016	0.56435	1.05465	0.53135	2.25225	1.19174	2.22196	1.16559		1.15526	0.63065	1.16823	0.63460
9	1.11891	0.57953	1.08279	0.55347	2.27867	1.20898	2.25439	1.18808		1.16171	0.63144	1.17216	0.63484
10	1.12551	0.58492	1.09282	0.56130	2.28798	1.21505	2.26582	1.19601		1.16405	0.63175	1.17347	0.63490
11	1.13095	0.58937	1.10107	0.56773	2.29558	1.22003	2.27525	1.20251		1.16593	0.63201	1.17457	0.63494
13	1.13933	0.59633	1.11383	0.57783	2.30739	1.22781	2.28991	1.21272		1.16900	0.63244	1.17635	0.63501
15	1.14548	0.60134	1.12328	0.58524	2.31608	1.23337	2.30077	1.22019		1.17131	0.63275	1.17770	0.63504

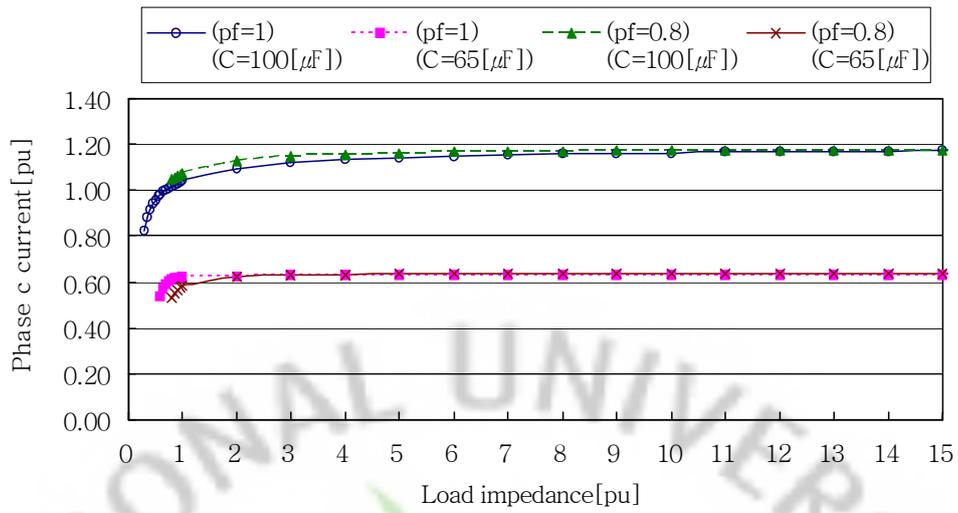
Table 6과 Fig. 8은 부하임피던스에 따른 권선전류 변화를 나타내는 것으로 a상, b상, c상 모두 여자커패시턴스 $100\mu\text{F}$ 일 때가 $65\mu\text{F}$ 일 때보다 많은 전류가 흐르고 있다. 부하역률의 영향은 부하임피던스가 작을 때 역률이 높은 경우와 낮은 경우의 전류차가 a상, b상, c상순으로 작아지고, 부하임피던스가 커짐에 따라 같은 경향을 보이지만 그 차이는 더 작아지고 있다. 부하임피던스에 의한 전류변화는 b상, a상, c상순으로 작아지고 있다. 각 부하임피던스에서 권선전류는 b상, c상, a상순으로 크기가 작아지지만, b상의 경우 커패시턴스가 크면 과전류의 위험이 있다.



a) phase a current



b) phase b current



c) phase c current

Fig. 8 Variation of winding currents with load impedance

Table 7 Variation of output power with load impedance

Load impedance [pu]	Output power [pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	C=100[μ F]	C=65[μ F]	C=100[μ F]	C=65[μ F]
0.30	0.39965			
0.60	0.60311	0.29845		
0.80	0.58265	0.37278	0.33724	0.16140
0.85	0.57272	0.37306	0.33551	0.17231
0.90	0.56203	0.37083	0.33303	0.17969
1	0.53948	0.36209	0.32635	0.18759
3	0.25816	0.18103	0.18445	0.12444
5	0.16554	0.11635	0.12344	0.08474
7	0.12158	0.08549	0.09242	0.06390
9	0.09602	0.06753	0.07380	0.05122
10	0.08688	0.06110	0.06704	0.04658
11	0.07933	0.05579	0.06140	0.04271
13	0.06757	0.04752	0.05256	0.03663
15	0.05884	0.04138	0.04594	0.03205

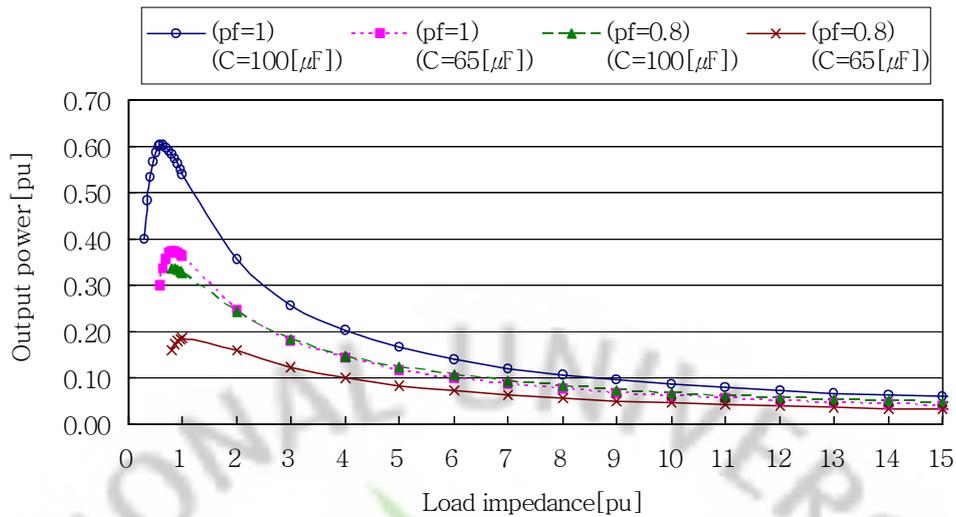


Fig. 9 Variation of output power with load impedance

Table 7과 Fig. 9는 발전기 부하의 출력전력 변화로 부하임피던스가 작을 때 여자커패시턴스와 역률에 따라 변화정도가 크게 나타나고 있음을 보이고 있다. Table 7과 Fig. 9에서 보듯이 여자커패시턴스가 $65\mu\text{F}$ 인 경우보다는 $100\mu\text{F}$ 일 때와 역률이 1일 때가 큰 출력이 얻어짐을 알 수 있다. 또한, 최대출력도 여자커패시턴스와 역률에 따라 다른 부하임피던스 값에서 발생하고 있다. 즉, $100\mu\text{F}$ 과 역률 1일 때는 $Z_L=0.6\text{pu}$ 에서 $P=0.60311\text{pu}$ 이고, $100\mu\text{F}$ 과 역률 0.8일 때는 $Z_L=0.8\text{pu}$ 에서 $P=0.33724\text{pu}$ 이며, $65\mu\text{F}$ 과 역률 1일 때는 $Z_L=0.85\text{pu}$ 에서 $P=0.37306\text{pu}$ 이고, $65\mu\text{F}$ 과 역률 0.8일 때는 $Z_L=1\text{pu}$ 에서 $P=0.18759\text{pu}$ 이다.

이상의 분석결과에서 보듯이 발전기를 정속도로 운전할 때 발전주파수를 제외하고 여자커패시턴스를 비교적 크게 하고 부하역률이 좋은 저항성 부하일 때가 발전기의 운전특성이 좋아지므로 발전기 운전 전에 제반특성들을 검토하여 운전하는 것이 바람직하다.

IV. 결 론

여자커패시터가 부하가 접속된 상에 대하여 뒤진 상에 연결된 스타인메츠 자기 여자 유도발전기의 운전특성을 분석하였다. 이를 위하여 부하가 접속된 단자에서 본 발전기의 입력임피던스에 의한 자기여자 조건식 자체를 응용소프트웨어의 실수 함수와 허수함수 기능을 사용하여 여자커패시턴스와 자화리액턴스를 차례로 결정하여 대칭성분에 의하여 해석하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 종래의 해석방법에 비하여 전산처리 전에 대수계산을 대폭 생략할 수 있으며 제안한 방법에 의하여 발전기를 정속도로 운전할 때의 운전특성을 시뮬레이션하여 분석한 결과 발전 주파수를 제외하고 비교적 큰 여자커패시터를 사용하고 저항성부하에 전력을 공급하는 경우가 운전특성이 양호함을 확인하였다.

따라서 대체에너지원에 의하여 독립 단상전원으로 스타인메츠 자기여자 유도 발전기를 사용할 경우 운전 전에 제시한 방법을 사용하여 부하운전에 적합한 여자 커패시턴스의 선정은 물론 운전 특성을 시뮬레이션하여 분석함으로써 운전 효율을 높일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S.S. Murthy, O.P. Malik and A.K. Tandon, Analysis of Self-excited Induction Generator, IEE proc., Vol. 129, Pt. C, No. 6, pp. 260-265, November 1982.
- [2] L. Quazen and G. Mcpherson Jr., Analysis of the Isolated Induction Generator, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, No. 8, pp. 2793-2798, August 1983.
- [3] A.H. Al-Bahrani and N.H. Malik, Steady State Analysis and Performance Characteristics of a Three-phase Induction Generator Self Excited with a Single Capacitor, IEEE Trans. on EC, Vol. 5, No. 4, pp. 725-732, December 1990.
- [4] T.F. Chan, Performance Analysis of a Three-phase Induction Generator Self-excited with a Single Capacitance, IEEE Trans. on EC, Vol. 14, No. 4, pp. 894-900, December 1999.
- [5] T.F. Chan and L.L. Lai, Steady-state analysis and performance of a single-phase self-regulated self-excited induction generator, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 2, pp. 233-241, March 2002.
- [6] T. Fukami, Y. Kaburaki, S. Kawahara, and T. Miyamoto, Performance Analysis of a Self-Regulated Self-Excited Single-Phase Induction Generator using a Three-phase Machine, IEEE Trans. on EC, Vol. 14, No.3, pp. 622-627, September 1999.
- [7] T.F. Chan and Loi Lei Lai, Single-phase Operation of a Three-Phase Induction Generator With the Smith Connection, IEEE Trans. on EC, Vol. 17, No. 1, pp. 47-54, March 2002.
- [8] T.F. Chan and Loi Lei Lai, Capacitance Requirements of a Three-Phase Induction Generator Self-Excited With a Single Capacitance

and supplying a Single-Phase Load, IEEE Trans. on EC, Vol. 17, No. 1, pp. 90-94, March 2002.

[9] 강상수, 좌종근, 스타인메츠결선 자기여자 유도발전기의 커패시턴스 결정, 제주대학교 첨단기술연구소 논문집, 제 18권, pp.13-17, 2007. 12.

[10] J.E. Brown and C.S. Jha, The starting of a 3-Phase induction motor connected to a Single-phase supply system, Proc. Inst. Elect. Eng. A, Vol. 106, pp. 183-190, April 1959.



감사의 글

2년이란 大學院 생활을 통하여, 일생을 보냄에 있어 피가 되고 살이 되는 좋은 經驗을 많이 하였고, 많은 분들의 따뜻한 關心과 애정 어린 질책 속에 또 다시 한층 성숙해질 수 있었습니다. 진정한 이 時代의 知識人으로서 소양과 자세를 일깨워준 모든 분들께 한 분씩 찾아뵙지 못하고 이렇게 지면으로나마 感謝의 인사를 드리고자 합니다.

항상 부족한 저에게 따뜻한 關心과 애정 어린 질타로 새로운 미래를 향한 바른 길을 인도해 주시어 그 꿈과 희망이 무너지지 않도록 지켜주신 좌종근 교수님께 진심으로 머리 숙여 깊은 感謝를 드립니다.

大學院 생활을 통해 공학자로서의 전공을 가르쳐 주시고 關心과 사랑으로 저에게 배움을 얻게 해주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님께 깊은 感謝를 드립니다.

그리고 항상 바쁜 가운데서도 자료 정리에 도움을 주신 김도진 선배님께 깊은 감사 드리며, 그리고 김재홍 선배님, 현진협 형, 고영준, 김상연 조교선생님과 양완석, 강지운 大學院生 및 그 외 학우 여러분들께 고마움을 전합니다.

한 인간의 희망과 꿈이라는 것이 시간이 지남에 따라 시련과 역경으로 서서히 무너지게 되지만, 그 순간순간 본 논문이 완성되기 까지 저를 위해 항상 기도하시고 지켜봐주신 할머니, 아버지, 어머니 그리고 큰누나, 매형, 작은누나, 남동생에게 感謝와 사랑의 글을 전합니다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름 하나 하나를 되새기지 못함을 죄송하게 생각 하며, 앞으로 저를 지켜봐 주시는 모든 분들의 기대에 어긋나지 않는 사람이 될 수 있도록 最善을 다하겠습니다.

2008年 12月

강상수 올림