

碩士學位論文

直列 補償커패시터를 가진 單相
自己勵磁 스타인메츠結線 誘導發電機의
相平衡을 위한 커패시턴스의 決定

濟州大學校 大學院

1952
電氣工學專攻

金錫訓

2009年 12月

直列 補償커패시터를 가진 單相
自己勵磁 스타인메츠結線 誘導發電機의
相平衡을 위한 커패시턴스의 決定

指導教授 左 宗 根

金 錫 訓

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

金錫訓의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

金 一 煥



委 員

金 豪 贊



委 員

左 宗 根



濟州大學校 大學院

2009年 12月

**Determination of Capacitances for Phase
Balance of Single-Phase Self-Excited
Steinmetz Connection Induction Generator
with Series Compensation Capacitor**

Seok-hun Kim

(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

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	ii
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
II. 회로구성과 해석	3
1. 회로구성과 회로방정식	3
2. 단위법 주파수와 자화리액턴스의 계산	7
3. 평형운전을 위한 직병렬 커패시턴스의 결정	7
4. Chan과 Lai에 의한 직병렬 커패시턴스의 결정	9
III. 결과 및 고찰	11
IV. 결 론	21
참 고 문 헌	22
감사의 글	24

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Single-phase self-excited Steinmetz connection induction generator with series compensation capacitor	1
Fig. 2 Variation of generated frequency with load impedance (power factor=1, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=250\mu\text{F}$)	15
Fig. 3 Variation of generated frequency with load impedance (power factor=0.8 lag, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=120\mu\text{F}$)	16
Fig. 4 Variation of load terminal voltage with load impedance (power factor=1, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=250\mu\text{F}$)	17
Fig. 5 Variation of load terminal voltage with load impedance (power factor=0.8 lag, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=120\mu\text{F}$)	17
Fig. 6 Variation of output power with load impedance (power factor=1, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=250\mu\text{F}$)	18
Fig. 7 Variation of output power with load impedance (power factor=0.8 lag, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=120\mu\text{F}$)	19
Fig. 8 Variation of efficiency with load impedance (power factor=1, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=250\mu\text{F}$)	20
Fig. 9 Variation of efficiency with load impedance (power factor=0.8 lag, $b=1$, $c_p=120\mu\text{F}$, $c_s=120\mu\text{F}$)	20

LIST OF TABLES

Table 1 Equivalent circuit parameters of three phase induction machine in per unit	11
Table 2 Comparison of computed results of Chan and Lai's and proposed method	12
Table 3 Computed results of a , X_m , C_s and C_p for phase balance	12
Table 4 Computed results of C_p/C_s , VUF, and phase currents by proposed analytical method	13
Table 5 Absolute errors of VUF and phase current by computed and practical values of C_p and C_s , for phase balance	14
Table 6 Variation of generated frequency with load impedance	15
Table 7 Variation of load terminal voltage with load impedance	16
Table 8 Variation of output power with load impedance	18
Table 9 Variation of efficiency with load impedance	19

SUMMARY

This paper presents a straightforward analytical method to determine both the series compensation and parallel excitation capacitances for phase balance operation required for single-phase self-excited Steinmetz connection induction generator with series compensation capacitor. For this analysis, the method of symmetrical coordinate is used to derive the related expressions.

Four nonlinear simultaneous equations, which are set up by the condition of self-excitation and condition of voltage balance without complicated algebraic manipulation, are solved for the values of two capacitances, the per unit frequency, and the exciting reactance by the application software. The validity of this proposed method is investigated by substituting the solved results for the voltage unbalance factor and equations of phase current, and it is found that the phase balance of this generator can be obtained.

Moreover, the performance characteristics of Steinmetz connection induction generator which is connected with and without series compensation capacitor are analyzed. The analyzed results show that generator with series compensation capacitor carries better performance.

I. 서론

자기여자에 의한 유도발전기의 단자전압은 직류 분권발전기의 전압확립 과정과 유사하게 단자에 적당한 여자커패시터가 접속되어 있을 때 유도기의 포화곡선과 커패시터의 용량성 리액턴스에 의하여 최종전압이 얻어진다. 이 발전기는 타여자로 운전되는 계통연계 발전기와는 달리 단자전압과 주파수가 발전기의 부하, 여자커패시터, 보상커패시터 그리고 속도 등 발전기의 외부 조건과 발전기의 등가회로 정수 등 내부 상태에 따라 변동되므로 여러 가지 여자방식과 보상방법에 의한 발전기의 특성개선이 필요하다.

이에 따라, 각상에 여자커패시터를 접속한 3상 자기여자 발전기에 대한 대표적인 해석방법으로 루우프 임피던스법[1]과 마디 어드미턴스법[2]이 보고 되었고, 이들에서는 자기여자 발전조건식을 실수부와 허수부로 나누어 여자리액턴스와 단위법 주파수의 다항식으로 구성하여 해석하고 있다. 또한, 독립 단상전원이 필요한 경우에 3상 유도기에 다양하게 커패시터를 접속하여 단상 자기여자 발전기로 사용할 때가 있다. 이에 대한 연구로 한 개의 커패시터를 사용하는 경우는 부하단자에 접속된 것[3], 부하단자 상보다 뒤진 상에 접속된 스타인메츠결선[4][6][8], 두개를 사용하는 경우는 스타인메츠결선에서 부하에 직렬 보상커패시터를 사용한 것[5][7][10], 그리고 세 개를 사용하는 경우는 부하단자에는 병렬 커패시터를 나머지 두개 상에는 같은 직렬 커패시터를 사용한 것[9]과 세 개의 커패시터와 가상 중성점을 사용한 스미스결선[11] 등이 보고 되었고 이들은 모두 루우프 임피던스법을 적용하여 해석하고 특성을 분석하고 있다.

이상의 연구 가운데 부하에 직렬 보상커패시터를 사용한 자기조절 자기여자 단상 스타인메츠결선 발전기는 부하전압변동이 적고 출력을 증가시킬 수 있는 등의 장점을 가지고 있다[5][7][10]. 이 연구에서는 자기여자 발전조건식을 스칼라 임피던스함수로 정리한 후 Hook와 Jeeves[5][7]의 패턴 탐색법으로 여자리액턴스와 단위법 주파수를 구하여 특성을 계산하고 있다. 또한 상평형을 얻기 위한 병렬 여자커패시턴스와 직렬 보상커패시턴스를 페이지도에 의하여 저항부하와 유도성부하의 경우에 구할 수 있는 도식적 결정방법을 제시하고 있으나 해석적 방법

은 보고 되어 있지 않다[7].

본 논문에서는 스타인메츠결선 자기조절 자기여자 단상 유도발전기를 대칭좌표법에 의하여 해석하고, 이 발전기가 상평형 운전할 수 있는 병렬 여자커패시턴스와 직렬 보상커패시턴스를 자기여자 발전조건과 전압 평형조건을 사용하여 결정하는 간명한 해석적 방법을 제시한다. 결정방법의 타당성을 검토하기 위하여 실험과 시뮬레이션을 통하여 검증된 유도기의 등가회로 정수를 사용하여 계산한 결과로부터 방법의 타당성을 확인한다. 또한, 직렬 보상커패시터를 가진 발전기와 갖지 않은 발전기의 부하변화에 따른 운전특성을 시뮬레이션하여 비교 분석한다.



II. 회로구성과 해석

1. 회로구성과 회로방정식

단상 전원으로 사용되는 보상커패시터를 접속한 자기여자 스타인메츠결선 유도발전기의 회로구성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 부하와 여자커패시터가 각각 서로 다른 상에 접속되고, 병렬 여자커패시터는 부하가 접속된 상에 대하여 뒤진 상에, 직렬 보상커패시터는 부하와 직렬로 연결되어 있다.

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

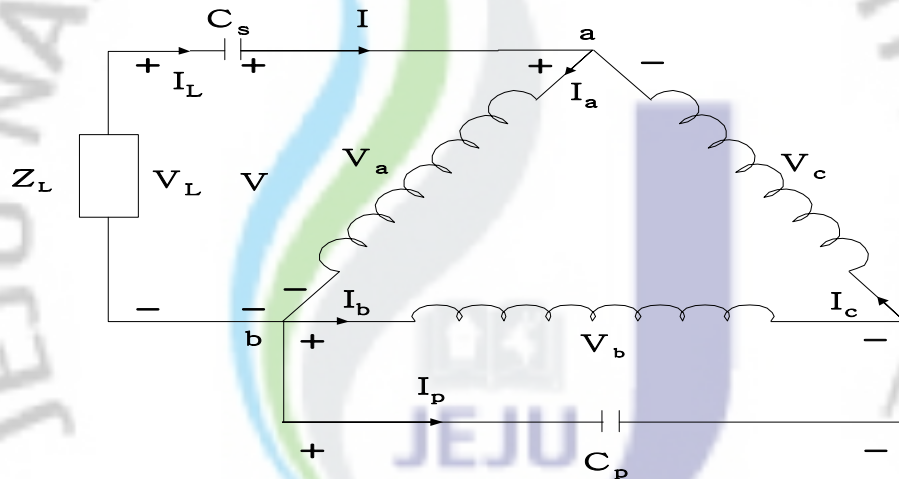


Fig. 1 Single-phase self-excited Steinmetz connection induction generator with series compensation capacitor

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_p 는 여자커패시터 전류, 그리고 Z_L 은 부하임피던스이다.

이 회로에 대하여 전압, 전류 평형식을 세우면

$$V = V_a \quad (1)$$

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

$$I_p = \frac{V_b}{Z_{cp}} = I_c - I_b \quad (3)$$

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

$$I_L = -I \quad (5)$$

이 되고, 여기서 Z_{cp} 는 병렬 여자커패시터의 임피던스이다.

발전기와 외부회로의 접속이 비대칭으로 되어 있으므로 고정자 권선의 상전압과 전류는 불평형이 된다. 불평형 회로해석을 위하여 대칭좌표법을 사용하여 식 (1)과 식 (3)에서 대칭성분인 정상분 전압 V_1 과 역상분 전압 V_2 를 구하면

$$V_1 = \frac{Z_1(Z_{cp} - \frac{\alpha}{\alpha^2 - \alpha} Z_2)}{Z_1 Z_2 + Z_{cp}(Z_1 + Z_2)} V \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{Z_2(Z_{cp} + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1)}{Z_1 Z_2 + Z_{cp}(Z_1 + Z_2)} V \quad (7)$$

이 된다. 여기서 α 는 대칭성분 연산자로 $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이며 Z_1 과 Z_2 는 각각 발전기의 정상분과 역상분 임피던스이고, Z_{cp} 는 병렬 여자커패시터 임피던스로 다음식과 같다.

$$Z_1 = \frac{R_s}{a} + jX_s + \frac{jX_m \frac{R_c}{a} (\frac{R_{r1}}{a-b} + jX_r)}{jX_m \frac{R_e}{a} + (\frac{R_e}{a} + jX_m)(\frac{R_{r1}}{a-b} + jX_r)} \quad (8)$$

$$Z_2 = \frac{R_s}{a} + jX_s + \frac{jX_m \frac{R_c}{a} (\frac{R_{r2}}{a+b} + jX_r)}{jX_m \frac{R_c}{a} + (\frac{R_c}{a} + jX_m)(\frac{R_{r2}}{a+b} + jX_r)} \quad (9)$$

$$Z_{cp} = -jX_{cp} = -j \frac{1}{2\pi f C_p a^2} \quad (10)$$

여기서 a 와 b 는 각각 단위법 주파수와 속도이고, f 는 기준주파수이다. 식 (4)로부터 부하 단자에서 본 발전기의 입력 임피던스 Z_{in} 을 구하면 다음과 같다.

$$Z_{in} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_{cp}(Z_1 + Z_2)}{3Z_{cp} + Z_1 + Z_2} = R_{in} + jX_{in} \quad (11)$$

발전기에 정해진 부하를 접속하고 자기여자 발전기로 운전할 때 발전기와 부하 회로에서 부하 전류에 의한 임피던스강하는

$$(Z_{in} + Z_{cs} + Z_L)I_L = 0 \quad (12)$$

이 된다. 이때 Z_{cs} 는 직렬 보상커패시터의 임피던스이고, Z_L 은 부하 임피던스로 다음식과 같다.

$$Z_{cs} = -jX_{cs} = -j \frac{1}{2\pi f C_s a^2} \quad (13)$$

$$Z_L = \frac{R_L}{a} + jX_L \quad (14)$$

발전기로 운전될 때 부하 전류 I_L 은 0이 될 수 없으므로 자기여자에 의한 발전조건식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} + Z_{cs} + Z_L = 0 \quad (15)$$

따라서, 발전기의 속도 b 와 C_p , C_s 그리고 Z_L 이 주어지면 식 (15)에 의해서 단위법 주파수 a 와 자화리액턴스 X_m 을 구할 수 있다.



2. 단위법 주파수와 자화리액턴스의 계산

발전기의 제 특성치들을 구하기 위해서는 먼저 발전기의 속도, 직병렬 커패시턴스, 그리고 부하 임피던스가 주어졌을 때 자기여자에 의한 발전조건식에 의하여 단위법 주파수와 자화 리액턴스를 구하는 것이다.

본 논문에서는 발전조건식인 식 (15) 자체를

$$\operatorname{Re}(Z_{in} + Z_{cs} + Z_L) = 0 \quad (16)$$

$$\operatorname{Im}(Z_{in} + Z_{cs} + Z_L) = 0 \quad (17)$$

로 놓아 복잡한 대수계산 없이 풀 수 있도록 응용 소프트웨어의 실수함수와 허수함수의 기능을 사용하여 연립방정식을 푼다.

3. 평형운전을 위한 직병렬 커패시턴스의 결정

발전기의 속도와 부하 임피던스가 주어진 상태에서 평형운전하기 위해서는 발전기의 주파수와 자화리액턴스, 그리고 병렬 여자커패시턴스와 직렬 보상커패시턴스가 미지수가 된다. 그러므로 4개의 미지수를 결정하기 위한 4개의 연립방정식이 필요하다.

우선 4개의 미지변수가 포함된 자기여자 발전조건식으로 식 (16)과 식 (17)을 사용한다. 또한, IEC에서 규정한 전압 불평형률(VUF)을 식 (6)과 식 (7)로부터 다음식과 같이 정의된다.

$$VUF = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (18)$$

평형운전 상태에서는 $VUF = 0$ 이므로, 이것은 $V_2 = 0$ 임을 의미하므로 식 (7)에서

$$Z_{cp} + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 = 0 \quad (19)$$

이고, 식 (1)에서

$$V = V_a = (V_1 + V_2) \quad (20)$$

이며, 위의 평형운전 조건을 이용하면

$$V_1 = V \quad (21)$$

이 되므로 식 (6)은

$$\frac{Z_1(Z_{cp} - \frac{\alpha}{\alpha^2 - \alpha} Z_2)}{Z_1 Z_2 + Z_{cp}(Z_1 + Z_2)} = 1 \quad (22)$$

이 된다.

그러므로 자기여자 발전조건식인 식 (14)와 식 (15), 그리고 평형운전 조건식에 의한 식 (19)와 식 (22)로 4개의 연립방정식을 세워 조건에 맞는 직병렬 커패시턴스, 단위주파수, 그리고 자화리액턴스를 결정할 수 있다.

그리고 식 (19)와 식 (22)에는 직렬 커패시턴스 항이 없으므로 하나의 식만을 사용하면 평형운전 조건식인 식 (19)는

$$Re(Z_{cp} + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1) = 0 \quad (23)$$

$$Im(Z_{cp} + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1) = 0 \quad (24)$$

을 의미하므로, 앞의 자기여자 발전조건식과 연립하여 직병렬 커패시턴스를 결정할 수 있다.

4. Chan과 Lai에 의한 직병렬 커패시턴스의 결정[7]

이 방법은 평형운전조건인 식 (19)와 이 조건하에서의 페이지도로 부터 직병렬커패시턴스를 결정한다.

저항부하의 경우에는 위의 방법에 의해

$$|Z_{cs}| = X_{cs} = \frac{Z_1}{2\sqrt{3}} \quad (25)$$

$$X_{cs} = 2X_{cp} \quad (26)$$

또는

$$C_s = 2C_p \quad (27)$$

을 얻고, C_p , C_s 를 다음과 같은 과정으로 결정한다.

- i) 단위법 속도 b 와 부하저항 R_L 을 입력한다.
- ii) 단위법 주파수 a 의 초기값을 가정한다.
- iii) 식 (25)와 식 (26)로부터 X_{cs} 와 X_{cp} 를 계산한다.
- iv) iii)의 X_{cs} 와 X_{cp} 를 사용하여 자기여자 발전조건식인 식 (15)를 스칼라 임피던스함수로 하여 a 와 X_m 그리고 Z_1 을 구한다.
- v) 단위법 주파수 a 가 순차반복에 의해 충분히 작은값이 될 때까지 iii)과 iv)의 단계를 반복한다.
- vi) 최종값 a 와 X_m 을 사용하여 C_p 와 C_s 를 결정한다.
- vii) 발전기의 성능을 계산한다.

유도성 부하의 경우에는 위의 방법에 의해

$$X_{cs} = \frac{|Z_1| \sin(\phi + \pi/6)}{\sqrt{3} \cos\phi} \quad (28)$$

$$X_{cp} = \frac{\cos\phi}{\sin(\phi + \pi/6)} X_{cs} \quad (29)$$

을 얻는다. 여기서 ϕ 는 부하의 역률각이고, C_p 와 C_s 의 결정과정은 저항부하의 경우와 같다.

이 방법의 문제점은 평형운전에 대한 페이저도를 이용하고, 여기서 얻은 X_{cs} 와 X_{cp} 를 그대로 사용할 수 없고 수치계산 과정을 거쳐 결정하여야 하고, 수치계산을 위하여 자기여자 발전조건식을 스칼라함수로 정리하는 과정에서 지루한 대수계산을 하여야 하는 것이다.

III. 결과 및 고찰

제안한 방법의 타당성을 검토하기 위하여 사용한 3상 유도기[4][5][7]은 농형 4극, 정격출력 2.2kW, 전압 220V, 전류 9.4A, 주파수 50Hz이고 기준 임피던스는 40.5374Ω이다. 이 유도기의 단위법으로 표시한 등가회로 정수인 고정자 권선저항 R_s 와 리액턴스 X_s , 고정자 측으로 환산한 회전자 권선 정상분 저항 R_{r1} , 역상분 저항 R_{r2} 와 리액턴스 X_r , 그리고 철손분저항 R_c 를 Table 1에 보인다.

Table 1 Equivalent circuit parameters of three phase induction machine in per unit

Equivalent circuit parameters	
$R_s = 0.0844$	$X_s = 0.112$
$R_{r1} = 0.0621$	$R_{r2} = 0.0981$
$X_r = 0.1$	$R_c = 22$

단위법으로 표시한 자화리액턴스 X_m 과 공극전압 E_1 사이의 관계는

$$E_1 = \begin{cases} 1.345 - 0.203X_m, & X_m < 1.728 \\ 1.901 - 0.525X_m, & 1.728 \leq X_m < 2.295 \\ 3.156 - 1.08X_m, & 2.259 \leq X_m < 2.446 \\ 37.49 - 15.12X_m, & 2.446 \leq X_m < 2.48 \\ 0, & 2.48 \leq X_m \end{cases} \quad (29)$$

과 같고, 기계손 $P_{fw} = 0.013$ 이다.

먼저 본 논문의 계산에 사용한 응용소프트웨어(Math cad)의 적용 가능성을 조사하기 위하여 자기조절 자기여자 스타인메츠결선 발전기의 Chan과 Lai의 패턴 탐색법으로 계산된 결과[5]와 제안한 방법을 사용하여 응용소프트웨어에 의하여 계산한 결과를 Table 2에 보였다. 계산조건은 발전기의 단위법 속도 $b=1$ 이고, 저항 부하가 접속되고 직병렬 커패시턴스를 각각 $C_p = 125\mu\text{F}$, $C_s = 370\mu\text{F}$ 인 커패시터가 접속되었을 때, 초기값으로 단위법 주파수는 $a = 0.95$, 자화리액턴스는 $X_m = X_{mu} = 2.48\text{pu}$ 인 미포화치를 사용하였다.

Table 2 Comparison of computed results between Chan and Lai's and proposed method

Z_L [pu]	Chan and Lai		Proposed		Percentage error	
	a [pu]	X_m [pu]	a [pu]	X_m [pu]	a (%)	X_m (%)
5	0.9880	1.6447	0.9881	1.6537	0.010	0.547
2	0.9823	1.6715	0.9824	1.6800	0.010	0.509
1.2	0.9764	1.6862	0.9765	1.6938	0.010	0.481
0.5	0.9635	1.6609	0.9591	1.6333	-0.457	-1.662

Table 2에서 백분율 오차는 Chan과 Lai의 결과를 기준으로 계산한 것이고 이 표에서 보듯이 두 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있으므로 이 발전기의 제반 특성계산에 적용이 가능하다. 제안한 방법에 의하여 발전기의 상평형운전을 하기 위한 직병렬 커패시턴스와 주파수, 자화리액턴스의 계산한 결과를 Table 3에 보였다.

계산조건은 발전기의 단위법 속도 $b = 1$ 이고 저항 부하와 유도성 부하가 접속되었을 때, 초기값으로 $a = 0.95$ pu, $X_m = 2.48$ pu, $C_p = 125\mu\text{F}$, $C_s = 370\mu\text{F}$ 으로 주어 계산한 것이다.

Table 3 Computed results of a , X_m , C_s and C_p for phase balance

pf[pu]	Z_L [pu]	a [pu]	X_m [pu]	C_p [μF]	C_s [μF]
1	1	0.9799	2.4570	69.399	138.8
	0.8	0.9750	2.0004	87.183	174.37
	0.5	0.9592	1.3326	141.8	283.59
	0.3	0.9274	0.9367	244.43	488.86
0.8 lag	1	0.9750	2.0004	87.183	76.929
	0.8	0.9686	1.6400	109.7	97.152
	0.5	0.9477	1.1234	179.39	160.81
	0.3	0.9059	0.8541	312.79	287.39

Table 3에서 보듯이 부하 임피던스가 작아질수록 a 와 X_m 은 작아지지만 상평형

운전을 위한 직병렬 커패시터스는 커야 됨을 알 수 있다.

Table 4는 Table 3의 결과를 이용하여 계산한 C_p/C_s 의 비, 전압 불평형률, 각 상전류, 그리고 Chan과 Lai의 도식적 방법에 의한 C_p/C_s 의 비를 보이고 있다.

Table 4 Computed results of C_p/C_s , VUF, and phase currents by proposed analytical method

pf[pu]	Z_L [pu]	Proposed C_p/C_s	Chan&Lai C_p/C_s	VUF[pu]	Phase currents[pu]		
					I_a	I_b	I_c
1	1	0.5	0.5	7.4124×10^{-5}	0.1707	0.1709	0.1707
	0.8	0.5	0.5	2.4776×10^{-4}	0.5317	0.5322	0.5332
	0.5	0.5	0.5	2.3145×10^{-4}	1.0748	1.0767	1.0754
	0.3	0.5	0.5	2.9485×10^{-4}	1.8894	1.8919	1.8910
0.8 lag	1	1.1333	1.1495	7.6606×10^{-6}	0.5479	0.5479	0.5479
	0.8	1.1292	1.1495	4.3549×10^{-5}	0.8199	0.8195	0.8198
	0.5	1.1155	1.1495	2.8655×10^{-5}	1.4683	1.4681	1.4682
	0.3	1.0884	1.1495	3.0674×10^{-4}	2.5916	2.5944	2.5940

이 Table에서 보듯이 저항 부하에서는 제안한 방법과 Chan과 Lai의 방법에 의한 C_p/C_s 는 같지만 유도성 부하에서는 다르다는 것을 알 수 있다. 전압 불평형률과 각 상전류에서 보는 바와 같이 전압 불평형률이 소수점 이하 4자리로 작고 각 상전류도 거의 같은 값을 가진 상평형 운전상태가 얻어짐을 알 수 있다.

Table 5는 Table 3에서 보인 계산된 C_p 와 C_s 의 값이 현실적으로 쉽게 실현될 수 없으므로 실제로 사용되는 값을 사용하여 구한 전압 불평형률과 각 상전류를 계산하여 Table 4의 결과를 기준으로 하여 구한 절대오차를 나타내었다. Table에서 보듯이 절대오차는 역률이 1이고 부하임피던스가 1일 때 전압 불평형률은 비교적 작고 상전류는 비교적 큼을 알 수 있고, 이것을 제외한 부하에서는 반대의 경향을 보이고 있다.

Table 5 Absolute errors of VUF and phase current by computed and practical values of C_p and C_s , for phase balance

pf[pu]	Z_L [pu]	Practical		Absolute errors			
		C_p [pu]	C_s [pu]	VUF[pu]	I_a	I_b	I_c
1	1	70 (30//40)	140 (40//100)	4.522×10^{-4}	0.088	0.090	0.0896
	0.8	90 (40//50)	175	2.552×10^{-3}	0.022	0.039	0.028
	0.5	140 (40//100)	280 (30//250)	1.569×10^{-3}	3×10^{-3}	0.016	0.011
	0.3	240 (40//200)	490 (40//50//400)	4.105×10^{-3}	0.017	0.054	0.022
0.8 lag	1	90 (40//50)	80 (30//50)	3.692×10^{-3}	2.2×10^{-3}	8.3×10^{-3}	0.021
	0.8	110 (10//100)	100	3.556×10^{-3}	0.011	0.018	7.7×10^{-3}
	0.5	180 (30//150)	160 (10//150)	1.371×10^{-3}	7×10^{-3}	0.014	1.6×10^{-3}
	0.3	310 (10//300)	290 (40//250)	4.593×10^{-3}	0.028	0.055	6.5×10^{-3}

이 결과에서도 보듯이 계산된 C_p 와 C_s 의 값과 근사한 실제의 값을 가지는 커패시터를 병렬로 조합하여 사용할 때도 상평형에 준하는 운전상태를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이때 계산조건은 $b=1$ 로 하고 C_p 와 C_s 의 값은 Table 5의 실제값을 주었고 초기 값으로 $a = 0.97\text{pu}$, $X_m = 2.48\text{pu}$ 로 하였다.

보상커패시터의 영향을 검토하기 위하여 자기조절 스타인메츠결선 발전기와 스타인메츠결선 발전기의 특성을 시뮬레이션하여 검토한다. 이를 위하여 C_p 와 C_s 의 값을 Table 3과 4에서 부하역률이 1인 저항부하와 0.8인 유도성부하로 나누어 부하임피던스가 0.8pu 부근에서 평형운전이 된다고 가정하여 역률이 1일 때는 $C_p = 125\mu\text{F}$, $C_s = 250\mu\text{F}$ 로 역률이 0.8일 때는 $C_p = C_s = 125\mu\text{F}$ 로 하였다.

Table 6과 Fig. 2와 3은 각각 스타인메츠결선 발전기(C_p 만 사용)와 자기조절 스타인메츠결선 발전기(C_p , C_s 모두사용)가 정격속도로 역률 1의 저항 부하와 역률 0.8의 유도성부하를 지고 운전할 때의 부하임피던스 변화에 따른 발전주파수

의 특성을 보이고 있다. 그림에서 보듯이 모든 부하에서 부하임피던스가 커짐에 따라 발전주파수도 커지는 것을 알 수 있다.

Table 6 Variation of generated frequency with load impedance

Z_L [pu]	Generated frequency[pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 250[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 125[\mu\text{F}]$
0.4	0.9533	0.9577	-	0.9609
0.5	0.9593	0.9618	-	0.9597
0.625	0.9647	0.9661	-	0.9608
0.8	0.9699	0.9705	-	0.9648
1	0.9738	0.9741	0.9785	0.9695
1.25	0.9771	0.9773	0.9809	0.9743
2	0.9824	0.9825	0.9847	0.9818
2.5	0.9843	0.9843	0.9861	0.9842
5	0.9881	0.9881	0.9890	0.9885
10	0.9901	0.9902	0.9905	0.9904
12.5	0.9905	-	0.9908	0.9907
20	0.9911	-	0.9913	0.9913
25	0.9913	0.9913	0.9914	0.9914

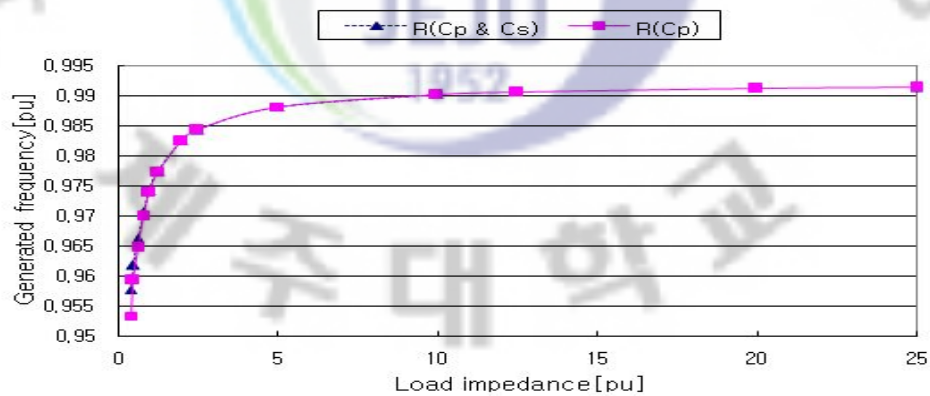


Fig. 2 Variation of generated frequency with load impedance
(power factor=1, b=1, $C_p=120\mu\text{F}$, $C_s=250\mu\text{F}$)

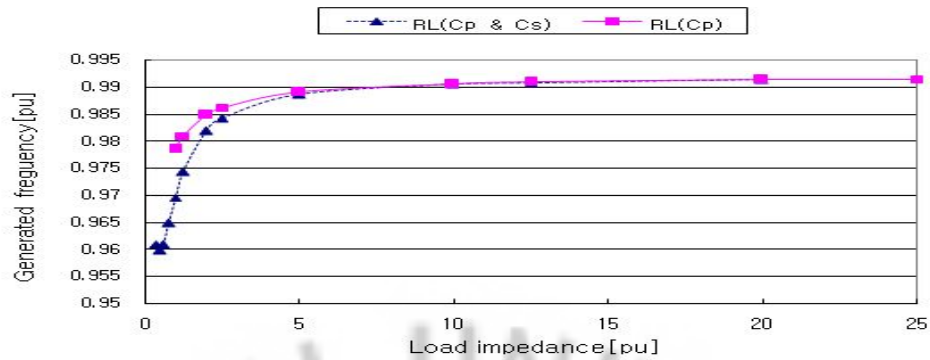


Fig. 3 Variation of generated frequency with load impedance
(power factor=0.8 lag, $b=1$, $C_p=120\mu\text{F}$, $C_s=120\mu\text{F}$)

Table 7과 Fig. 4와 5는 각각 스타인메츠결선 발전기와 자기조절 스타인메츠결선 발전기가 정격속도로 역률 1의 저항 부하와 역률 0.8의 유도성 부하를 지고 운전할 때의 부하임피던스 변화에 따른 부하단자전압의 특성을 보이고 있다. 그림에서 보듯이 모든 부하에서 자기조절 스타인메츠 결선 발전기의 전압이 부하 변화에 관계없이 거의 일정하게 유지될 수 있음을 알 수 있다.

Table 7 Variation of load terminal voltage with load impedance

Z_L [pu]	Terminal voltage[pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 250[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 125[\mu\text{F}]$
0.4	-	0.8836	-	0.9785
0.5	0.4131	0.9258	-	1.1105
0.625	0.7494	0.9289	-	1.1958
0.8	0.8638	0.9852	-	1.2174
1	0.9382	0.9977	-	1.1433
1.25	0.9925	1.0150	0.6714	1.0931
2	1.0628	1.0455	0.8843	1.0896
2.5	1.0683	1.0616	0.9400	1.0997
5	1.0916	1.079	1.0467	1.1295
10	1.0822	1.1181	1.0913	1.1228
12.5	1.0777	-	1.1006	1.1447
20	1.0643	-	1.0876	1.0846
25	1.0555	1.0458	1.1406	1.1388

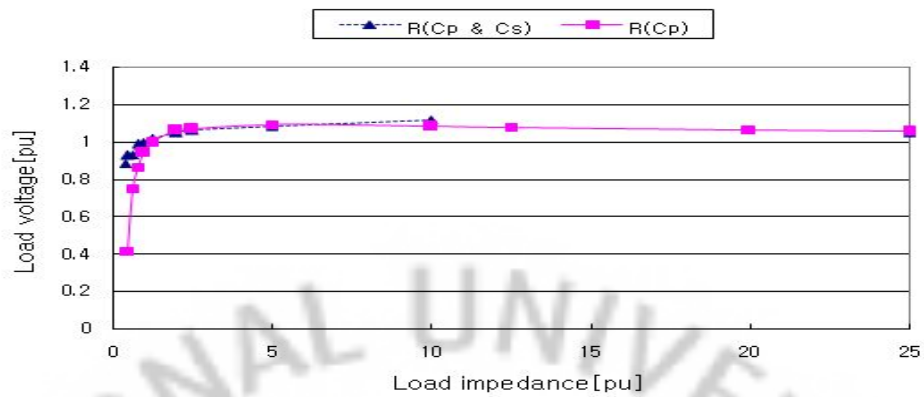


Fig. 4 Variation of load terminal voltage with load impedance
(power factor=1, b=1, C_p=120μF, C_s=250μF)

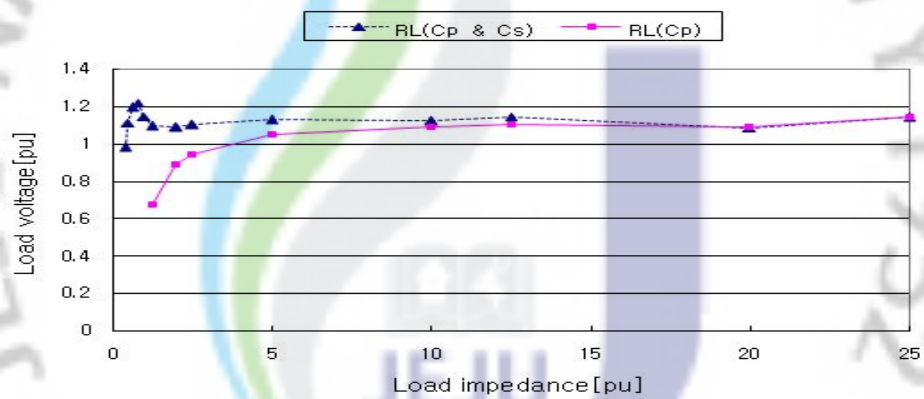


Fig. 5 Variation of load terminal voltage with load impedance
(power factor=0.8 lag, b=1, C_p=120μF, C_s=120μF)

Table 8과 Fig. 6과 7은 Table 6과 7과 같은 조건으로 운전할 때 발전기의 출력특성을 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유도성 부하일 때 부하임피던스가 2.5pu보다 작을 때 자기조절 스타인메츠결선 발전기가 같은 부하에서 더 많은 출력을 낼 수 있으며 많은 부하를 지고 운전할 수 있음을 알 수 있다.

Table 8 Variation of output power with load impedance

Z_L [pu]	Output Power[pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 250[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 125[\mu\text{F}]$
0.4	-	1.8692	-	1.8923
0.5	0.3275	1.6486	-	1.949
0.625	0.8668	1.3338	-	1.8087
0.8	0.9046	1.1744	-	1.4664
1	0.8571	0.9697	-	1.0362
1.25	0.7700	0.8055	0.2869	0.7589
2	0.5548	0.5370	0.3114	0.4724
2.5	0.4493	0.4437	0.2816	0.3852
5	0.2355	0.2301	0.1747	0.2035
10	0.1160	0.1125	0.0950	0.1006
12.5	0.0920	-	0.0773	0.0836
20	0.0561	-	0.0472	0.0469
25	0.0442	0.0434	0.0415	0.0414

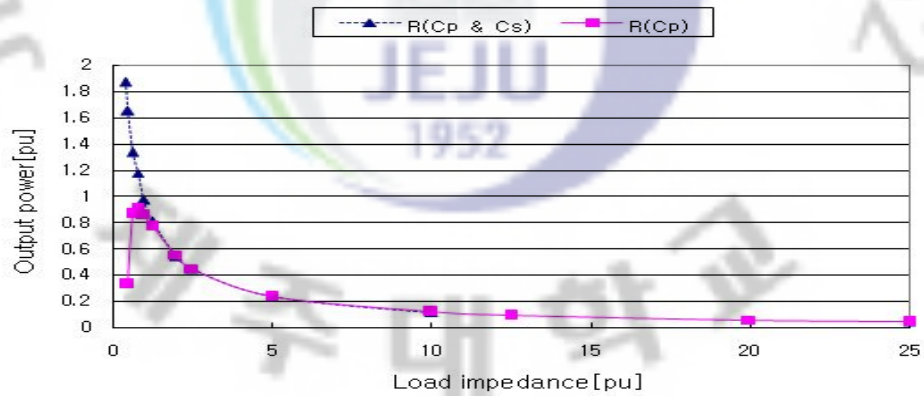


Fig. 6 Variation of output power with load impedance
(power factor=1, $b=1$, $C_p=120\mu\text{F}$, $C_s=250\mu\text{F}$)

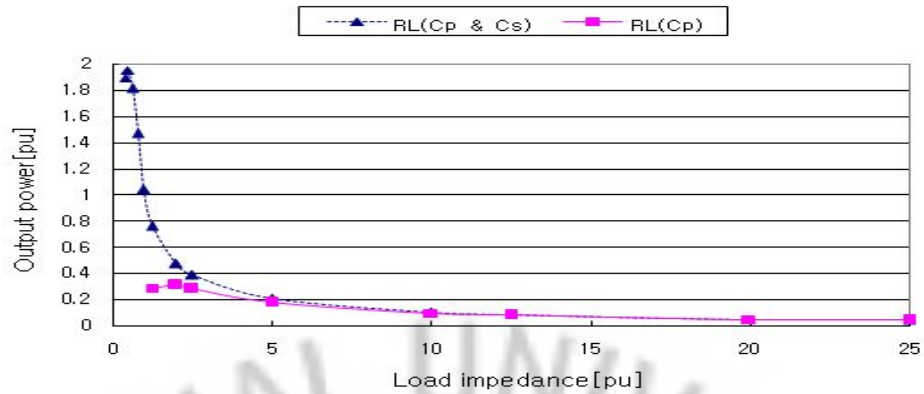


Fig. 7 Variation of output power with load impedance
(power factor=0.8 lag, $b=1$, $C_p=120\mu\text{F}$, $C_s=120\mu\text{F}$)

Table 9과 Fig. 8과 9은 Table 6과 7과 같은 조건으로 운전할 때 발전기의 효율특성을 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유도성 부하일 때 자기조절 스타 인메츠결선 발전기가 같은 부하에서 더 좋은 효율을 낼 수 있음을 알 수 있다.

Table 9 Variation of efficiency with load impedance

Z_L [pu]	Efficiency[pu]			
	pf=1		pf=0.8	
	$C_p = 125[\mu\text{F}]$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 250[\mu\text{F}]$	$C_p = 125\mu\text{F}$	$C_p = 125[\mu\text{F}]$ & $C_s = 125[\mu\text{F}]$
0.4	-	0.4695	-	0.4286
0.5	0.5095	0.4254	-	0.4739
0.625	0.4303	0.3602	-	0.4781
0.8	0.3467	0.3126	-	0.4244
1	0.2852	0.2606	-	0.3537
1.25	0.2331	0.2153	0.1714	0.2766
2	0.1493	0.1405	0.1141	0.1591
2.5	0.1188	0.1149	0.0925	0.1217
5	0.0602	0.0586	0.0476	0.0552
10	0.0292	0.0283	0.0244	0.0258
12.5	0.0231	-	0.0197	0.0213
20	0.0140	-	0.0119	0.0118
25	0.0110	0.0108	0.0104	0.0104

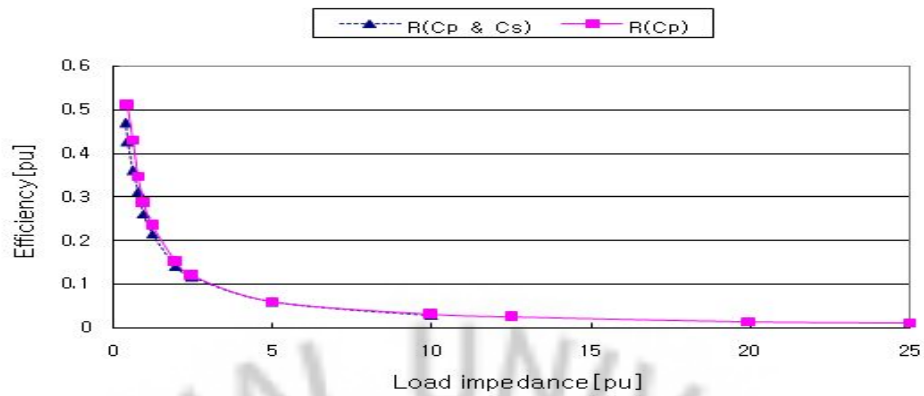


Fig. 8 Variation of efficiency with load impedance
(power factor=1, $b=1$, $C_p=120\mu\text{F}$, $C_s=250\mu\text{F}$)

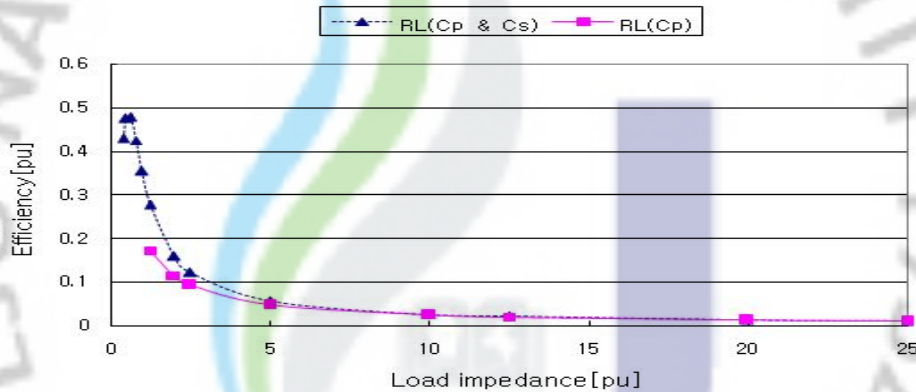


Fig. 9 Variation of efficiency with load impedance
(power factor=0.8 lag, $b=1$, $C_p=120\mu\text{F}$, $C_s=120\mu\text{F}$)

이 상의 결과에서 알 수 있듯이 보상커패시터의 영향이 발전기의 모든 특성에 좋은 결과를 낼 수 있으므로 여자커패시터와 보상커패시터를 적절하게 선정하는 것이 발전기의 운전특성을 개선하는데 중요한 요소가 됨을 알 수 있다.

따라서, 이 발전기의 임의의 속도와 부하 상태에서 상평형운전을 하기 위한 병렬 여자커패시터스나 직렬 보상커패시터스를 제안한 해석적 방법을 적용하여 정도 높은 값으로 계산이 가능하므로 발전기의 평형운전해석에 응용될 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 부하에 직렬로 보상커패시터가 접속된 자기조절 자기여자 단상 스타인메츠결선 유도발전기의 상평형 운전을 위한 직렬 보상커패시턴스와 병렬 여자커패시턴스의 간명한 해석적 결정 방법을 제시하였다.

해석을 위하여 대칭좌표법을 적용하여 관련식을 도출하였고, 또한 자기여자 발전조건과 전압 평형조건을 이용하여 복잡한 대수 계산 없이 세운 두개의 커패시턴스, 단위법주파수, 그리고 자화리액턴스에 관한 네 개의 비선형 연립방정식을 응용소프트웨어에 의하여 결정할 수 있도록 하였다.

이 방법에 의하여 계산된 직병렬커패시턴스를 사용하여 전압 불평형률과 각 상전류에 대입하여 검토한 결과 상평형상태가 얻어짐을 확인하였다. 계산된 보상커패시턴스와 여자커패시턴스에 근사한 실제의 커패시턴스값을 사용할 때에도 상평형에 준하는 운전상태를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

또한 직렬 보상커패시터를 가진 발전기와 갖지 않은 발전기의 부하변화에 따른 운전특성을 시뮬레이션하여 비교 분석하였다. 분석 결과 직렬 보상커패시터를 가진 발전기의 운전 성능이 더 나음을 확인하였다.

그러므로 제안한 방법은 이 발전기의 평형운전은 물론이고 운전상태의 예측해석에도 쉽게 적용이 가능할 것으로 판단된다.

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 Loi Lei Lai, A Novel Single-phase Self-regulated Self-excited Induction Generator Using a Three-phase Machine, IEEE Trans. on EC, Vol. 16, No. 2, pp. 204-207, June 2001.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 강상수, 좌종근, 스타인메츠 결선 자기여자 유도발전기의 운전특성 분석, 전기학회논문지, 57P권, 4호, pp. 383-387, 2008.12.
- [9] 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.

- [10] Y.P. Sun, Single-phase Self-regulated Self-excited Induction Generator with Series Capacitance, Electrical machines and systems, ICEMS 2008 International Conference, pp. 102-104, October 2008.
- [11] 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.



감사의 글

2년이란 大學院 생활을 돌아보니 제게 있어 학위과정의 길은 학문의 길보다는 어찌면 인격수양의 과정에 더 가깝지 않았나 싶습니다. 이제 비로소 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 글로 남기려 하니 옛일이 스쳐지나가면서 베풀지 못하고 받기만 한 삶을 반성하게 됩니다. 많은 분들의 따뜻한 關心과 애정 어린 질책 속에 또 다시 한층 성숙해질 수 있었고, 진정한 이 시대의 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 현진협, 고영준, 김상연, 이진재 조교선생님과 양완석, 강지윤 강상수, 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 저의 가족들에게 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.

2009年 12月

김석훈 올림