

碩士學位論文

자기 여자 유도 발전기의 최소
커패시턴스의 결정법

110.489

濟州大學校 大學院

電氣工學科

秦 忠 民

2000年 12月

자기 여자 유도 발전기의 최소 커패시턴스의 결정법




指導教授 左 宗 根

秦 忠 民

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000年 12月

秦忠民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

2000年 12月

Determining Method of Minimum-capacitance for Self-excited Induction Generator

Chung-Min Jin

(Supervised by professor Chong-Keun Jwa)

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

**DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

2000. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 해석 이론	3
1. 등가 회로	3
2. 기존의 해석 방법	5
3. 제안한 해석 방법	13
4. 특 성 식	17
III. 사례 연구	18
IV. 결론	23
참고문헌	24

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Per-phase equivalent circuit of Induction generator with load	3
Fig. 2	Simplified equivalent circuit of Induction generator	8
Fig. 3	Flow chart for the computation of C_{min}	12
Fig. 4	Variation of C with the load impedance	22
Fig. 5	Variation of f with the load impedance	22

LIST OF TABLES

Table 1	Parameter of Al Jabri and Alolah to confirm the validity of proposed method	18
Table 2	Comparison of minimum capacitance and frequency between conventional and proposed method	18
Table 3	Parameter of Harrington used to determinate capacitance to maintain specific terminal voltage	19
Table 4	Minimum capacitance value and frequency value with load impedance at $pf = 1.0$	20
Table 5	Minimum capacitance value and frequency value with load impedance at $pf = 0.8$	21

SUMMARY

This paper presents a simple method for determining the minimum value of capacitance required for initiating self excitation in three-phase self-excited induction generator. Based on the steady-state equivalent circuit model of induction generator, this paper describes simple and direct method to find the minimum capacitance requirement under R-L load. Using the loop impedance method and nodal admittance method, the minimum capacitance is determined by self-excitation condition. The method proposed in this paper are compared with conventional method to confirm the validity and feasibility. These computed values can be used to predict practically the minimum value of the terminal capacitance required for self-excitation. For stable operation C must be chosen to be slightly greater than C_{\min} . To maintain a constant terminal voltage, a method for determining the frequency, terminal capacitance, and exciting reactance is also described.

I. 서론

화석 에너지 자원의 감소로 인하여 근래에 들어 재생 가능한 자연 에너지의 이용에 많은 관심을 가지게 되었다. 이들 에너지 자원중 풍력과 소수력을 이용한 에너지 변환기로 농형 유도 발전기가 기존의 동기 발전기 보다 우수한 장점을 가지고 있으므로 많이 사용되고 있다. 이들 장점으로서는 기기의 견고함, 브러시가 없는 간단한 회전자 구조, 운전의 용이함, 단위 가격당 고출력, 싼 단위 가격, 높은 운전 유지 능력과 신뢰성, 그리고 직류 여자가 없다는 점등이다(Harrington 과 Bassiouny,1998).

이러한 장점으로 커패시터 자기 여자 유도 발전기가 독립된 전력 발생 시스템에 사용되고 있다. 3상 유도기에 적당한 커패시터가 고정자 단자에 연결되고 회전자가 원동기에 의해 적당한 속도로 구동되면 이 유도기는 자기 여자 유도 발전기(self excited induction generator : SEIG)로 운전될 수 있다(Murthy등, 1988). 이 자기 여자 과정에 필요한 커패시터의 최소값 결정에 대한 연구들이 보고되고 있다. 이들 가운데 3가지 방법이 자기 여자에 필요한 최소 커패시턴스값 결정을 위한 계산에 사용되고 있다.

첫 번째 방법은 연산자 임피던스 매트릭스의 특성 방정식의 근을 구하여 그 근을 가지고 유도 발전기의 최소 커패시턴스의 값을 결정하지만, 이 경우 자기 여자 과정을 나타내는 특성 방정식의 차수가 각각 유도성이나 용량성 부하의 경우에는 10차식이 되고 저항성 부하의 경우에는 8차식이 된다(Grantham등, 1989). 두 번째 방법은 3상 유도기의 상당등가 회로에서 자기 여자 조건을 이용하기 위하여 루우프 임피던스 개념(Malik등, 1987 과 Jabri등, 1990)과 마디 어드미턴스 개념(Chan, 1993)을 적용하는 방법이다. 최소 커패시턴스를 구하기 위한 방정식은 루우프 임피던스 법에서는 유도성 부하에 대하여 주파수와 용량성 리액턴스를 미지수로 하는 2차와 6차 방정식이 되고, 마디 어드미턴스 법에서는 주파수

를 미지수로 하는 6차식이 된다. 세 번째 방법은 임의 기준 틀에서 상태 변수로서 자속 쇄교수를 사용한 복소형의 미분 방정식을 이용하는 방법이다(Harrington 과 Bassiouny,1998). 이 방법에서는 정상 상태에서 상태 변수의 미분항을 0으로 놓아 얻어진 복소 임피던스 행렬식을 가지고 해석하고 있다.

이상의 방법 가운데 세 번째 방법을 제외한 다른 두 방법은 부하 조건이 달라짐에 따라 고차 방정식의 계수와 차수가 달라지므로 식의 유도 과정이 복잡하게 되며 세 번째 방법은 복소 임피던스 행렬식을 얻는 과정이 다소 복잡하고 또한 회로 조건이 달라지면 행렬식을 재구성해야 되는 불편함이 따른다.

본 논문에서는 3상 농형 자기 여자 유도 발전기의 자기 여자에 필요한 최소 커패시턴스를 최소의 계산으로 보다 간단하고 명확하게 결정할 수 있는 방법을 루우프 임피던스 법과 마디 어드미턴스 법에 의하여 제시하였다. 또한 지정된 단자 전압을 유지하기 위해 필요한 주파수, 여자 리액턴스, 그리고 단자 커패시턴스의 값을 구하는 간명한 방법도 제시하였다.

II. 해석 이론

1. 등가 회로

해석을 위한 등가 회로를 구성하기 위하여 다음의 가정을 둔다.

- i) 등가 회로의 여자 리액턴스를 제외하고 모든 파라메타는 상수이다.
- ii) 고정자와 회전자 권선의 누설 리액턴스는 같다.
- iii) 기기의 철손은 무시한다.
- iv) 유도 전압과 전류의 기자력 공간 고조파 와 시고조파는 무시하고 전압, 전류 파형은 정현파로 가정한다.

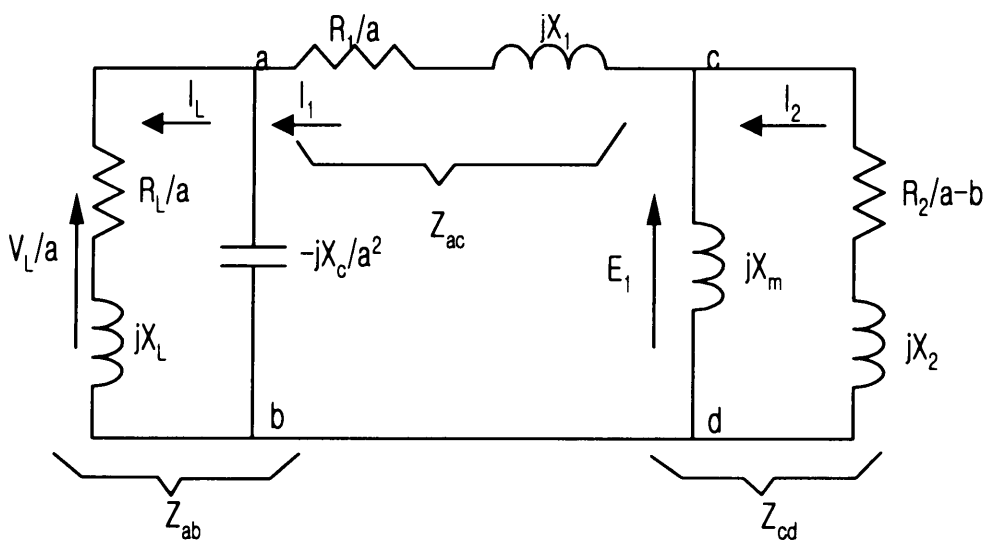


Fig. 1 Per-phase equivalent circuit of induction generator with load

Fig. 1은 자기 여자 유도 발전기의 정상 상태 해석을 위한 일반적인 상당 등가 회로이다. 여기서 사용한 기호는 다음과 같다.

R_1, R_2	: 상당 고정자, 회전자 저항
X_1, X_2	: 상당 고정자, 회전자 누설 리액턴스
X_m	: 여자 리액턴스
X_{mu}	: 여자 리액턴스의 불포화 값
X_c	: 단자 커패시터 C 의 상당 용량성 리액턴스
R_L, X_L	: 상당 부하 저항, 부하 리액턴스
R_2', X_2'	: 등가 회전자 저항, 등가 회전자 누설 리액턴스
f_B, f	: 각각 정격 주파수, 발전 주파수
ω_B, ω	: 각각 정격 각속도, 회전 각속도
a	: 단위법 발전 주파수 $a = f/f_B$
b	: 단위법 회전 속도 $b = \omega/\omega_B$
V_L, E_1	: 각각 상당 단자 전압과 공극 전압
I_1, I_2, I_L	: 각각 상당 고정자 전류, 회전자 전류와 부하 전류

회전수 변화에 의한 주파수 변동을 고려하기 위해서 모든 리액턴스와 전압은 단위법 주파수에 의해 조정되었다. 기기가 자기 여자 되려면 커패시턴스는 어떤 최소값보다 커야한다. 안정된 출력 전압을 얻기 위해서 기기는 자기 포화의 적당한 수준에서 동작되어야한다. 따라서 여자 리액턴스 X_m 은 일정 상수가 아니고 부하와 회로 조건에 따라 변화한다. 자기 여자 전압을 얻기 위해서는 비포화 여자 리액턴스 값보다 작은 여자 리액턴스가 되어야한다. 그러므로 $X_m = X_{mu}$ 조건에서 최소 커패시턴스 값이 구해진다.

2. 기존의 해석 방법

1) N. H. MALIK 와 A. A. MAZI 의 해석 방법

Malik와 Mazi는 정상 상태 등가 회로와 연산자 등가 회로를 이용한 두 가지 방법으로 C_{min} 값을 비교 결정하였다. 두 방법에 있어서 C_{min} 의 값은 실험적으로 같으나 해법 기술에 있어서 다소 차이가 있을 뿐이다. 첫 번째 방법은 Newton-Raphson 방법으로 해결할 수 있는 두 개의 비선형 방정식을 포함하며 두 번째 방법은 복소근을 갖는 비선형 방정식을 포함한다.

첫 번째 방법으로 정상 상태 등가 회로를 이용한 방법에 있어서는 Fig. 1에서의 전류 I_1 에 의한 루우프 방정식은 다음과 같다.

$$Z \cdot I_1 = 0 \quad (1)$$

여기서, Z 는 I_1 에 의한 전 루우프 임피던스이고 정상 상태 자기 여자 하에서 $I_1 \neq 0$ 이므로 $Z=0$ 이다. 즉, Z 의 실수부와 허수부가 각각 0 이 됨을 의미한다. 이것은 미지 변수 X_m, a 에 대한 다음의 두 개의 비선형 방정식을 동시에 만족해야한다.

$$P(X_m, a) = (p_1 X_m + p_2) a^3 + (p_3 X_m + p_4) a^2 + (p_5 X_m + p_6) a + (p_7 X_m + p_8) = 0 \quad (2)$$

$$Q(X_m, a) = (q_1 X_m + q_2) a^4 + (q_3 X_m + q_4) a^3 + (q_5 X_m + q_6) a^2 + (q_7 X_m + q_8) a + q_9 = 0 \quad (3)$$

X_m, a 의 값은 기기의 파라메타, 속도 그리고 단자 커패시턴스의 값이 주어졌을 때, 식(1)과 (2)를 연립 계산하여 얻어진다. 즉, 다음의 과정을 순차적으로 반복함으로써 C_{min} 값을 구할 수 있다.

- i) 단자 커패시턴스 C 의 값을 가정하고 X_m, a 에 대해 식(1)과(2)를 계산한다. C 의 초기값은 발전기의 자기 여자를 위해 충분히 커야한다.
- ii) 점차적으로 C 의 값을 감소시키면서 그에 대한 X_m 의 값을 계산하고 X_m 대 C 의 그래프를 얻는다.
- iii) C_{min} 의 값은 X_m 대 C 의 곡선의 교점으로부터 얻어진다.

두 번째 방법으로 연산자 등가 회로를 이용한 방법에 있어서는 Fig. 1에서 $a = -jb$ 로 놓고 여기서, $p =$ 미분 연산자이며 자기 여자 하에서 $I_1 \neq 0$ 이므로 그에 대응하는 특성 방정식은 다음과 같다.

$$k_1 p^4 + k_2 p^3 + k_3 p^2 + k_4 p + k_5 = 0 \quad (4)$$

따라서, C_{min} 값의 결정은 다음의 과정을 반복하여 구할 수 있다.

- i) C 의 값을 가정하고 식(3)의 근을 계산한다.
- ii) 근이 양의 실근을 갖지 않는다면 C 의 새로운 값을 가지고 양의 실근을 가질 때까지 반복한다.

2) A.K.AL Jabri의 해석 방법

Fig. 1에서 전류 I_1 에 의한 루우프 방정식은 식(1)과 같다. 여기서, Z 는 전 루우프 임피던스로

$$Z = \left(\left(\frac{R_L}{a} + jX_L \right) // -j \frac{X_c}{a^2} \right) + \frac{R_1}{a} + jX_1 + \left(jX_m // \left(\frac{R_2}{a-b} + jX_2 \right) \right) \quad (5)$$

이며, 자기 여자 조건하에서 $I_1 \neq 0$ 이므로 식(1)에서 $Z=0$ 즉, Z 의 실수부와 허수부가 각각 0임을 의미한다. 따라서 Z 의 실수부와 허수부는 다음과 같다.

$$-p_1 a^3 + p_2 a^2 + (p_3 X_c + p_4) a - p_5 X_c = 0 \quad (6)$$

$$-q_1 a^4 + q_2 a^3 + (q_3 X_c + q_4) a^2 - (q_5 X_c + q_6) a - q_7 X_c = 0 \quad (7)$$

이제 C_{min} 의 값을 구하기 위해 식(6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$X_c = \frac{p_1 a^3 - p_2 a^2 - p_4 a}{p_3 a - p_5} \quad (8)$$

그리고 식(7)을 다시 쓰면

$$X_c = \frac{q_1 a^4 - q_2 a^3 - q_4 a^2 + q_6 a}{q_3 a^2 - q_5 a - q_7} \quad (9)$$

이다. 따라서 식(8)과 (9)를 같다고 놓으면

$$\frac{p_1 a^3 - p_2 a^2 - p_4 a}{p_3 a - p_5} = \frac{q_1 a^4 - q_2 a^3 - q_4 a^2 + q_6 a}{q_3 a^2 - q_5 a - q_7} \quad (10)$$

이고, 다시 a 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$a_4 a^4 - a_3 a^3 + a_2 a^2 - a_1 a + a_0 = 0 \quad (11)$$

따라서, 식(11)의 양의 실근을 식(8) 혹은 (9)에 대입하여 X_c 의 값을 구한다. 여기서 C_{\min} 의 값은 다음과 같이 결정된다.

$$C_{\min} = \frac{1}{2\pi f Z_b X_c} \quad (12)$$

3) T. F. CHAN의 해석 방법

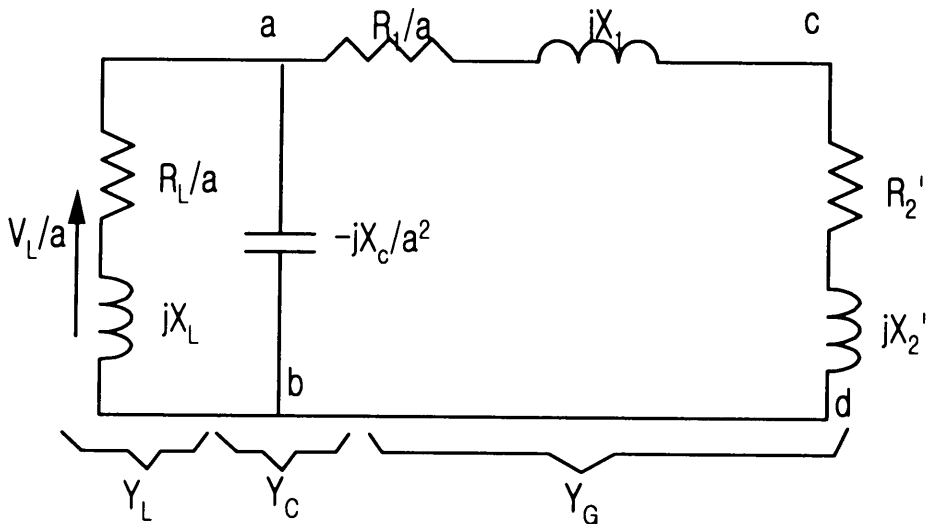


Fig. 2 Simplified equivalent circuit of induction generator

Fig. 2에서 등가 회전자 저항(R_2)과 등가 회전자 누설 리액턴스(X_2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_2 = \frac{(a-b)X_m^2 R_2}{R_2^2 + (a-b)^2(X_m + X_2)^2}, \quad (13)$$

$$X_2 = \frac{X_m R_2^2 + X_m X_2 (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}$$

그리고 acd가지의 임피던스 Z_{ad} 는 다음과 같다.

$$Z_{ad} = R_{ad} + jX_{ad} = \left(\frac{R_1}{a} + R_2\right) + j(X_1 + X_2) \quad (14)$$

이제 부하 어드미턴스 Y_L 과 고정자와 여자 리액턴스와 병렬인 회전자까지의 합성 어드미턴스 Y_G 는 다음과 같이 주어진다.

$$Y_L = \frac{1}{\frac{R_L}{a} + jX_L} = \frac{1}{R_L^2 + a^2 X_L^2} (aR_L - ja^2 X_L) \quad (15)$$

$$Y_G = \frac{1}{R_{ad} + jX_{ad}} = \frac{1}{R_{ad}^2 + X_{ad}^2} (R_{ad} - jX_{ad}) \quad (16)$$

키르히호프의 전류 법칙에 의해서,

$$\frac{V_L}{a} \cdot (Y_C + Y_L + Y_G) = 0 \quad (17)$$

이고, 자기 여자 조건하에서 $V_L \neq 0$ 이므로 세 가지 어드미턴스의 합이 0

이어야한다.

$$Y = Y_L + Y_C + Y_G = 0 \quad (18)$$

즉, 식(18)의 실수부와 허수부가 각각 0임을 의미하므로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{aR_L}{R_L^2 + a^2 X_L^2} + \frac{R_{ad}}{R_{ad}^2 + X_{ad}^2} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{a^2}{X_c} - \frac{aX_L}{R_L^2 + a^2 X_L^2} - \frac{X_{ad}}{R_{ad}^2 + X_{ad}^2} = 0 \quad (20)$$

식(19)는 주파수 a 만의 함수이고 식(20)은 a, X_c 의 함수이므로 식(19)를 a 에 대한 6차 다항식으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$p_6 a^6 + p_5 a^5 + p_4 a^4 + p_3 a^3 + p_2 a^2 + p_1 a + p_0 = 0 \quad (21)$$

C_{\min} 의 값은 식(21)의 양의 실근 중 가장 큰 값 $a_{\max} = \max\{a_i, i \leq 6\}$ 을 가지고 식(20)을 정리한 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$C_{\min} = \frac{1}{2\pi f_b Z_b a_{\max}^2} \left\{ \frac{a_{\max}^2 X_L}{R_L^2 + a_{\max}^2 X_L^2} + \frac{X_{ad}}{R_{ad}^2 + X_{ad}^2} \right\} \quad (22)$$

4) R. J. Harrington의 해석 방법

Harrington의 해석 방법은 일반적으로 R-L부하를 갖는 자기 여자 유도

발전기의 복소 임피던스 매트릭스에 바탕을 두고 있다.

$$\begin{bmatrix} p\lambda_{qds} \\ p\lambda_{qdr} \\ pv_{qds} \\ pi_{lqd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s + j\omega & B_s & 1 & 0 \\ B_r & T_r + js & 0 & 0 \\ \frac{T_{ss}}{C} & \frac{-B_{ss}}{C} & j\omega & \frac{-1}{C} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R}{L} + j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qds} \\ \lambda_{qdr} \\ v_{qds} \\ i_{lqd} \end{bmatrix} \quad (23)$$

식(23)에서 정상 상태 전압 방정식은 상태 변수의 시간 도함수를 0으로 놓음으로써 얻어진다.(즉, $p=0$) 따라서, 복소 임피던스 매트릭스의 행렬식은 다음과 같이 표현된다.

$$(T_s + j\omega)\{(T_r + js)(j\omega(j\omega - R/L) + 1/LC)\} - B_s B_r (j\omega(j\omega - R/L) + 1/LC) - B_r B_{ss} (j\omega - R/L)/C - (T_r + js)(j\omega - R/L)T_{ss}/C = 0 \quad (24)$$

식(24)의 실수부는

$$\begin{aligned} & C\{s(RT_s\omega + L\omega^3) + \omega^2(B_r B_s L + T_r R - T_s T_r L)\} \\ & = s\omega(1 - T_{ss}L) + B_r(B_s - RB_{ss}) - T_r(T_s + RT_{ss}) \end{aligned} \quad (25)$$

이고, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$C = \frac{a_1 s + a_0}{b_1 s + b_0} \quad (26)$$

그리고 식(24)의 허수부는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} & s\{(RT_{ss} + T_s) + C\omega^2(R - T_s L)\} - C\omega(T_r T_s R + T_r L\omega^2 \\ & - B_r B_s R) - \omega(B_r B_{ss} L + T_r T_{ss} L - T_r) = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

식(26)을 식(27)에 대입하여 정리하면

$$\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 = 0 \quad (28)$$

이고, 따라서 s , ω 는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$s = -\frac{\alpha_1}{2\alpha_2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_1}{2\alpha_2}\right)^2 - \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_2}\right)} \psi = \omega_r + s \quad (29)$$

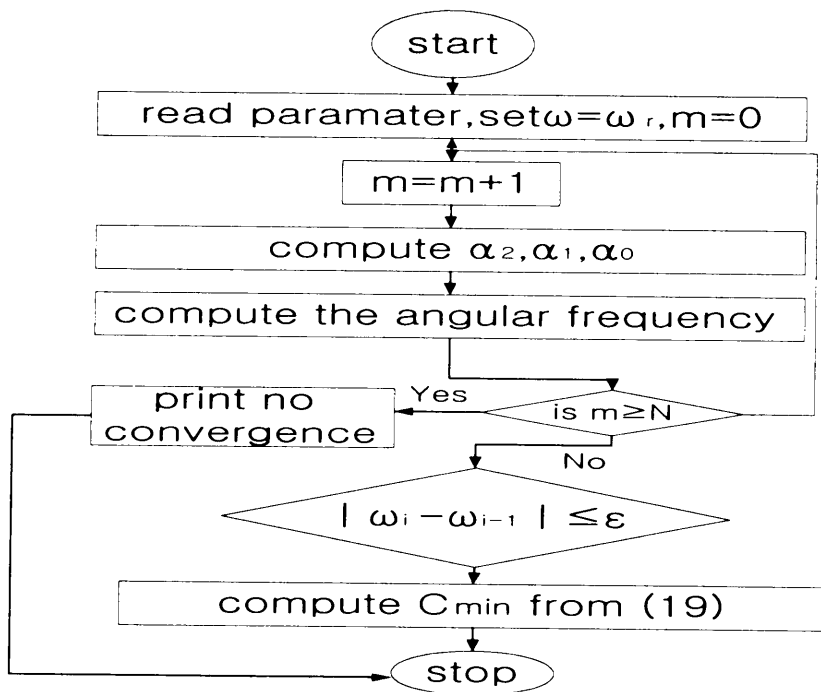


Fig. 3 Flow chart for the computation of C_{min}

Fig. 3은 자기 여자 커패시턴스의 최소 값을 계산하기 위한 Harrington의 순서도를 보여준다. 따라서 C_{min} 의 값은 방정식 (26)에 의해 구할 수 있다.

3. 제안한 해석 방법

1) 루우프 임피던스법

Fig. 1에서 전류 I_1 에 의한 루우프 방정식은 식(1)과 같다. 여기서, Z 는 전 루우프 임피던스로

$$Z = Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd} \quad (30)$$

이고 여기서 각 가지의 임피던스는

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= \left(\frac{R_L}{a} + jX_L \right) // -j \frac{X_c}{a^2}, \\ Z_{ac} &= \frac{R_1}{a} + jX_1, \\ Z_{cd} &= jX_m // \left(\frac{R_2}{a-b} + jX_2 \right) \end{aligned} \quad (31)$$

이다.

자기 여자 조건하에서 $I_1 \neq 0$ 이므로 식(1)에서 $Z=0$, 즉 Z 의 실수부와 허수부가 각각 0 이 되어야 함을 의미한다. 따라서 $Z = Re(Z) + jIm(Z)$ 이므로

$$\begin{cases} Re(Z) = 0 \\ Im(Z) = 0 \end{cases} \quad (32)$$

이다. 여기서

$$Re(Z) = \frac{R_1}{a} + \frac{\frac{X_c^2 R_L}{a^5}}{\left(\frac{R_L}{a} \right)^2 + \left(X_L - \frac{X_c}{a^2} \right)^2} + \frac{\frac{X_m^2 R_2}{a-b}}{\left(\frac{R_2}{a-b} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} \quad (33)$$

$$Im(Z) = X_1 - \frac{\frac{X_c R_L^2}{a^4} + \frac{X_c X_L}{a^2} (X_L - \frac{X_c}{a^2})}{(\frac{R_L}{a})^2 + (X_L - \frac{X_c}{a^2})^2} + \frac{\frac{X_m R_2^2}{(a-b)^2} + X_m X_2 (X_m + X_2)}{(\frac{R_2}{a-b})^2 + (X_m + X_2)^2} \quad (34)$$

이다.

최소 커패시턴스 값을 구하기 위하여 식(33)과 (34)를 식(32)의 조건을 이용하여 수치 해석법으로 프로그래밍 하여 풀거나 식(30)과 (31)를 식(32)의 조건으로 응용 소프트웨어에 의하여 풀 수 있다.

2) 마디 어드미턴스법

Fig. 2에서 키르히호프의 전류 법칙에 의해서

$$Y \cdot \frac{V_L}{a} = 0 \quad (35)$$

이고, 자기 여자 조건하에서 $V_L \neq 0$ 이므로 세 가지 어드미턴스의 합이 0 이어야한다. 즉,

$$Y = Y_L + Y_C + Y_G = 0 \quad (36)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} Y_L &= \frac{1}{\frac{R_L}{a} + jX_L}, \\ Y_C &= \frac{1}{-j\frac{X_c}{a^2}}, \\ Y_G &= \frac{1}{(\frac{R_1}{a} + R_2) + j(X_1 + X_2)} \end{aligned} \quad (37)$$

이때 Y_L 은 부하 어드미턴스, Y_C 는 단자 커패시턴스의 어드미턴스, 그리고 Y_G 는 고정자와 여자 리액턴스와 병렬인 회전자 가지의 합성 어드미턴스이다. 그리고 등가 회전자 저항과 등가 회전자 누설 리액턴스는

$$R_2' = \frac{(a-b)X_m^2 R_2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}, \quad (38)$$

$$X_2' = \frac{X_m R_2^2 + X_m X_2 (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}$$

이다.

자기 여자 상태에서는 $Y=0$ 이 되어야 하므로 Y 의 실수부와 허수부가 각각 0 이 되어야한다. 따라서 $Y = Re(Y) + jIm(Y)$ 이므로

$$\begin{cases} Re(Y) = 0 \\ Im(Y) = 0 \end{cases} \quad (39)$$

이다. 또한, 여기서

$$Re(Y) = \frac{aR_L}{R_L^2 + a^2 X_L^2} + \frac{\frac{R_1}{a} + R_2'}{\left(\frac{R_1}{a} + R_2'\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (40)$$

$$Im(Y) = \frac{-a^2 X_L}{R_L^2 + a^2 X_L^2} + \frac{a^2}{X_c} - \frac{X_1 + X_2'}{\left(\frac{R_1}{a} + R_2'\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (41)$$

이다.

최소 커패시턴스 값을 구하기 위하여 식(40)과 (41)를 식(39)의 조건을 이용하여 수치 해석법으로 프로그래밍 하여 풀거나 식(36)과 (37)를 식

(39)의 조건으로 응용 소프트웨어에 의하여 풀 수 있다.

이처럼 앞에서 제안한 루우프 임피던스 법이나 마디 어드미턴스법은 최소의 대수 계산으로 자기 여자에 필요한 최소의 커패시턴스 값을 구할 수 있을 뿐만 아니라 주파수와 여자 리액턴스가 미지수로 주어진 경우에도 식을 수정하지 않고 적용할 수 있다. 따라서 기존의 방법을 가지고 고차 방정식을 구성하여 풀거나 복소 임피던스 행렬식을 사용하여 계산하는 경우에는 회로 조건이 달라지거나 미지수를 달리 할 경우 식을 다시 구성하여야 하는데 반하여 제안한 방법은 기존의 방법보다 훨씬 빠르고 능률적으로 계산을 쉽게 할 수 있었다.

4. 특성 식

Fig. 1의 등가 회로부터 고정자 전류 I_1 , 회전자 전류 I_2 , 부하 전류 I_L , 단자 전압 V_L 그리고 출력 P 는 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_1}{a} + jX_1 - \frac{j\frac{X_c}{a^2}(\frac{R_L}{a} + jX_L)}{\frac{R_L}{a} + j(X_L - \frac{X_c}{a^2})}} \quad (42)$$

$$I_2 = \frac{-E_1}{\frac{R_2}{a-b} + jX_2} \quad (43)$$

$$I_L = \frac{-j\frac{X_c}{a^2}}{\frac{R_L}{a} + j(X_L - \frac{X_c}{a^2})} I_1 \quad (44)$$

$$V_L = (\frac{R_L}{a} + jX_L)I_L \quad (45)$$

$$P = 3|I_L|^2 R_L \quad (46)$$

이 식들에서 공극 전압 E_1 은 동기 속도 무부하시험 결과를 이용하여 X_m 의 3차식으로 다음과 같이 표현하였다.

$$E_1 = K_1 + K_2 X_m + K_3 X_m^2 + K_4 X_m^3 \quad (47)$$

여기서, 계수 K_1, K_2, K_3, K_4 는 시험 결과로부터 계산된다.

정해진 조건 아래서 지정된 전압을 유지하기 위한 단자 커패시턴스는 루우프 임피던스법과 특성식에서는 식(32)의 조건식과 식(45)에서, 마디 어드미턴스법과 특성식에서는 식(39)의 조건식과 식(45)에서 단자 커패시턴스, 주파수, 그리고 여자 리액턴스를 미지수로 하여 결정할 수 있다.

III. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사용한 기기의 파라메타는 다음과 같다(Al Jabri 와 Alolah, 1998).

Table 1 Parameter of Al Jabri and Alolah to confirm the validity of proposed method

R_1	R_2	X_1	X_2	X_{mu}
0.071pu	0.0881pu	0.1813pu	0.1813pu	3.23pu

그리고 기준 임피던스 $Z_b=43.3\Omega$ 이고, 기준 주파수 $f_b=60\text{Hz}$ 이다. Al Jabri는 발전기가 기준 속도 $b=1pu$ 로 회전할 때 부하 저항 $R_L=1.0pu$ 과 부하 리액턴스 $X_L=2.0pu$ 가 접속된 경우 기존의 방법으로 최소 커패시턴스와 주파수를 계산하였다. 그 결과를 제안한 방법의 결과와 비교하면 Table 1과 같이 잘 일치하고 있으므로 본 논문에서 제안한 방법으로 자기 여자 유도 발전기의 최소 커패시턴스를 능률적으로 계산할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of minimum capacitance and frequencies between conventional and proposed method

parameters method	$C_{min}[\mu\text{F}]$	a [pu]
conventional	45.698	0.9795
proposed	45.715	0.97956

그리고 지정된 단자 전압을 유지하기 위한 커패시턴스를 결정하기 위해서 사용한 기기의 정격과 정수는 다음과 같다(Harrington,1998). 정격으로는 출력 2kW, 3상 4극, 주파수 50Hz, 전압 380V, 그리고 전류는 5.4A이다.

Table 3 Parameter of Harrington to determinate capacitance maintained specific terminal voltage

R_1	R_2	X_1	X_2	X_{mu}
0.0982pu	0.0621pu	0.112pu	0.0952pu	2.58pu

정격 주파수에서 공극전압 E_1 과 여자 리액턴스 X_m 의 구간 선형화한 여자 특성은 다음과 같다.

$$X_m = \begin{cases} 2.58 - 0.211E_1, & 0 \leq E_1 \leq 0.398 \\ 3.11 - 0.975E_1, & 0.398 \leq E_1 \leq 0.610 \\ 3.41 - 1.829E_1, & 0.610 \leq E_1 \leq 0.844 \\ 4.85 - 3.534E_1, & 0.844 \leq E_1 \leq 0.974 \\ 7.45 - 6.208E_1, & 0.974 \leq E_1 \leq 1.20 \\ 0, & 1.2 < E_1 \end{cases} \quad (48)$$

위의 식으로 계산할 경우 조건문을 구간마다 적용해야하는 불편을 덜기 위하여 식(47)의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$E_1 = -8.29 \times 10^{-4} + 1.966X_m - 1.166X_m^2 + 0.186X_m^3 \quad (49)$$

이들의 정수를 사용하여 지정된 단자 전압 $V_L = 1.0pu$ 와 회전속도 $b = 1.0pu$ 로 회전할 때 부하 변화에 따른 커패시턴스값과 주파수의 계산값을

Table 4와 Table 5에 각각 나타내었고 그에 대한 그래프를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 보였다.

이 결과에서 보는 바와 같이 커패시턴스는 부하 임피던스가 감소함에 따라 증가하고 있으며 역율의 영향은 부하 임피던스가 작을 때 역율 변화에 더 민감함을 알 수 있었다. 주파수도 역율에 따라 제한된 부하 임피던스 범위에서 차이가 있음을 보이고 있다.

Table 4 Minimum capacitance value and frequency value with load impedance at pf = 1.0

load impedance(p.u)	minimum capacitance(μ F)	frequency(Hz)
0.7	116.6	44.9
0.8	98.92	45.55
1.0	79.91	46.45
1.4	63.57	47.4
1.8	56.48	47.95
2.0	54.23	48.15
2.2	52.53	48.3
2.5	50.53	48.45
3.0	48.29	48.7
3.6	46.57	48.9
4.2	45.37	49.05
4.8	44.51	49.15
5.8	43.53	49.25
7.0	42.76	49.35
9.2	41.88	49.5
10.0	41.67	49.5

Table 5 Minimum capacitance value and frequency value with load impedance at pf = 0.8

load impedance (p.u)	minmum capacitance (μF)	frequency (Hz)
0.7	168.7	45.45
0.8	143.2	46.15
1.0	114.9	46.95
1.4	93.54	47.65
1.8	76.1	48.25
2.0	71.9	48.45
2.2	68.58	48.55
2.5	64.71	48.7
3.0	60.12	48.9
3.6	56.38	49.05
4.2	53.78	49.2
4.8	51.86	49.25
5.8	49.61	49.35
7.0	47.8	49.45
9.2	45.72	49.55
10.0	45.18	49.6

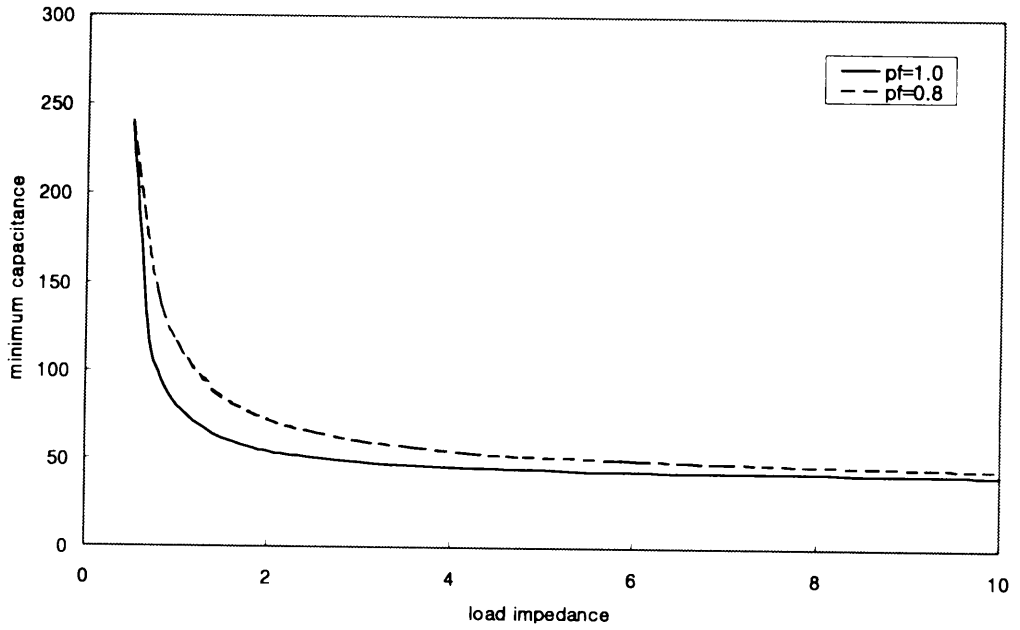


Fig. 4 Variation of C with the load impedance

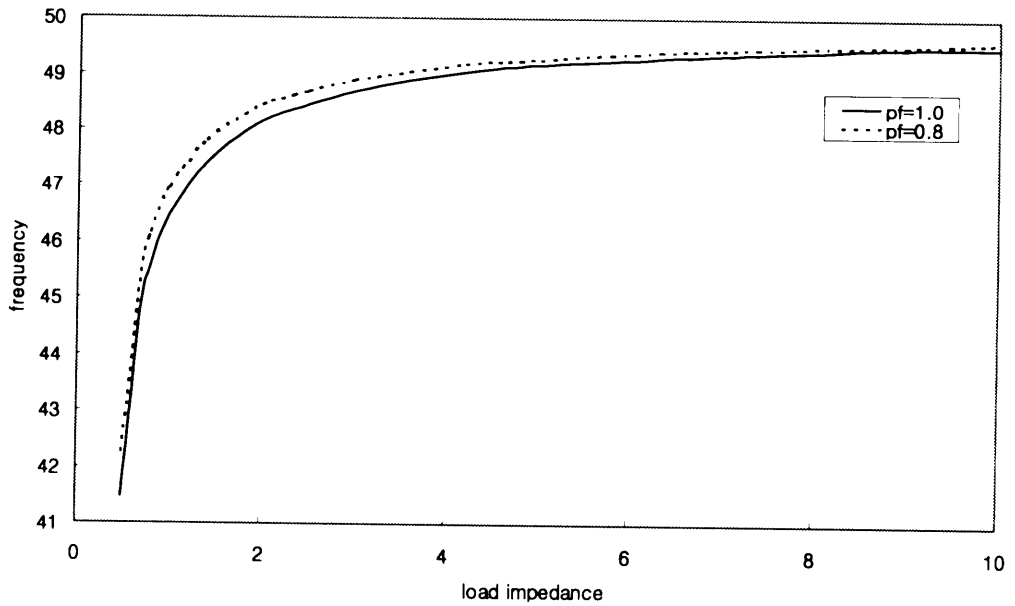


Fig. 5 Variation of f with the load impedance

IV. 결 론

본 논문에서는 3상 자기 여자 유도 발전기의 자기 여자에 필요한 단자 최소 커패시턴스의 결정을 위한 간명한 방법을 제안하였다. 이 방법은 자기 여자 유도 발전기의 정상 상태 등가 회로에 바탕을 두고 있다. 기존의 루우프 임피던스 법과 마디 어드미턴스 법을 사용하여 자기 여자 조건에 의해 최소의 대수 계산으로 단자 커패시턴스의 최소값을 능률적이고 용이하게 결정할 수 있도록 제시하였다. 그리고 특정 운전 조건이 주어졌을 때 부하 변화에 따른 수치적 형태의 변화 없이 지정된 단자 전압을 유지하기 위한 최소 커패시턴스의 결정 방법도 제시하였다.

본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 기존에 발표된 문헌의 회로 정수를 사용하여 종래의 방법과 제안한 방법의 계산 결과를 비교, 검토하였다. 비교 결과 이들의 값이 잘 일치하고 있으므로 본 논문에서 제안한 방법은 자기 여자 유도 발전기를 해석할 때 유용하게 이용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- R. J. Harrington and F. M. M. Bassiouny, September 1998, New approach to determine the critical capacitance for self-excited induction generators, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 13, No. 3.
- S.S.Murthy, B.P. Singh, C. Nagamani and K.V.V. Satyanarayana, December 1988, Studies on the use of conventional Induction motors as self-excited induction generators, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.3, No.4, pp. 842-848.
- C. Grantham, D. Sutanto and B. Mismail, March 1989, Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators, proceedings of IEE, Vol. 136, Part B, No. 2, pp.61-68.
- N. H. Malik, and A. A. Mazi, March 1987, Capacitance requirements for isolated self excited induction generators, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 1, pp.62-69.
- A. K. Al Jabri and A. I. Alolah, May 1990, Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator, Proceedings of IEE, Vol. 137, Part B, No. 3, pp. 154-159.
- T. F. Chan, June 1993, Capacitance requirements of self-excited induction generators, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 8, No. 2, pp. 304-310.

감사의 글

새로운 만남을 시작 한지가 엇그제 같은데 어느덧 대학원 생활의 막바지에 다다랐습니다. 즐거운 일, 힘든 일, 아쉬운 일등 아쉽다는 생각이 남기도 하지만 소중한 시간이었음을 더욱 느끼게 합니다.

짧다면 짧고 길다면 길게 느껴지는 지난 2년 여 동안 저의 논문이 결실을 맺기까지 자상한 지도와 조언을 아끼시지 않으시고 물심양면으로 사랑을 주신 좌종근 교수님께 먼저 깊은 감사를 드립니다. 그리고 대학원 생활 동안 따뜻한 격려와 가르침을 주신 오성보 교수님, 이개명교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님께 감사를 드립니다.

또한 힘들고 빠쁜 일정에도 불구하고 항상 아낌없는 조언과 뜨거운 우정, 토론으로 서로를 격려해준 홍문석, 한성훈, 김용현 원생과 임대관, 문상호, 안진오 선배님께 감사를 드리며 실험과 연구과정에서 많은 도움을 준 전기기기 연구실의 김재민 선생님과 정영준, 정재훈, 현용탁, 이정호 원생께도 고마움의 마음을 전합니다.

그리고 어렵고 힘들 때 옆에서 격려해준 친구 기봉이와 조무경, 한용건, 김병석, 이승현, 고봉조, 문성호, 백경일, 오등운 그리고 고희수형님께도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

끝으로 오늘이 있기까지 보답없는 사랑과 희생을 아끼지 않으신 세상에서 가장 사랑하는 어머니와 할머니, 누님께 이 모든 영광을 돌립니다.

그리고 하늘에서 저를 지켜보고 계신 아버지 영전에 이 논문을 바칩니다.

2000년 12월

진충민 올림