

자기 여자 유도 발전기의 최소 커패시턴스의 결정법

진 충 민* · 좌 종 근**

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

Chung-Min Jin* and Chong-Keun Jwa**

ABSTRACT

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, this paper presents simple and direct method to find the minimum capacitance requirement under R-L load. Using the loop impedance and nodal admittance, the minimum capacitance is determined by self excitation condition. These computed values can be used to predict practically the minimum value of the terminal voltage required for self-excitation. To maintain a constant terminal voltage, a method for determining the frequency, terminal capacitance, and exciting reactance is also described.

Key words : Induction generator, self-excited, minimum capacitance

1. 서 론

화석 에너지 자원의 감소로 인하여 근래에 재생 가능한 자연 에너지의 이용에 많은 관심을 가지게 되었다. 이들 에너지 자원중 풍력과 수력을 이용한 에너지 변환기로 농형 유도 발전기가 기존의 동기 발전기 보다 우수한 장점을 가지고 있으므로 많이 사용되고 있다. 이들 장점으로는 기기의 견고함, 브러시가 없는 간단한 회전자 구조, 운전의 용이함, 단위 비용당 고출력, 산 단위 가격, 높은 유지 능력과 신뢰성,

그리고 직류 여자가 없다는 점등이다¹⁾.

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 발전기로 운전될 수 있다²⁾. 이 자기 여자 과정에 필요한 커패시터의 최소값 결정에 대한 연구들이 보고되고 있다. 이들 가운데 3가지의 방법이 자기 여자에 필요한 최소 커패시턴스 계산에 사용되고 있다.

첫 번째 방법은 operational impedance matrix의 특성 방정식의 근을 구하여 최소 커패시턴스값을 결정하지만, 자기 여자 과정을 나타내는 특성 방정식의 차수는 유도성이나 용량성 부하의 경우에는 10차식

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ

** 제주대학교 전기·전자공학부, 산업기술 연구소

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

이되고 저항성 부하의 경우에는 8차식이 된다³⁾. 두 번째 방법은 3상 유도기의 상당 등가회로에서 자기 여자 조건을 이용하기 위하여 루우프 임피던스⁴⁾⁵⁾와 마디 어드미턴스⁶⁾ 개념을 적용하는 방법이다. 최소 커패시턴스를 구하기 위한 방정식은 임피던스 법에서는 유도성 부하에 대하여 주파수와 용량성 리액턴스를 미지수로 하는 2차와 6차 방정식이 되고, 어드미턴스 법에서는 주파수를 미지수로 하는 6차식이 된다. 세 번째 방법은 임의 기준틀에서 상태 변수로서 자속 쇄교수를 사용한 복소형의 미분 방정식을 이용하는 방법이다¹⁾. 정상 상태에서 상태 변수의 미분항을 0으로 놓아 얻어진 복소 임피던스 행렬식을 가지고 해석하고 있다.

이상의 방법 가운데 세 번째 방법을 제외하고 다른 방법들은 부하 조건에 따라 고차 방정식의 계수와 차수가 달라지므로 식의 유도 과정이 복잡하게 된다. 세 번째 방법도 복소 임피던스 행렬식을 얻는 과정이 복잡하고 회로조건이 달라지면 행렬식을 재구성해야 되는 불편이 따른다.

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

II. 등가회로와 해석

2.1. 등가회로

해석을 위한 등가회로를 구성하기 위하여 다음의 가정을 둔다.

- 1) 등가회로의 여자 리액턴스를 제외하고 모든 파라메타는 상수이다.
- 2) 고정자와 회전자 권선의 누설 리액턴스는 같다.
- 3) 기기의 철손은 무시한다.
- 4) 유도 전압과 전류의 기자력 공간 고조파와 시간 고조파는 무시한다.

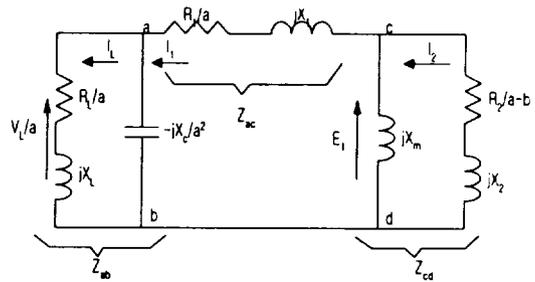


Fig. 1 Per-phase equivalent circuit of Induction generator with load

그림 1은 자기 여자 유도 발전기의 정상 상태 해석을 위한 일반적인 상당 등가회로이다. 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
- $X_{m_{sc}}$ = 여자 리액턴스의 불포화 값
- X_c = 단자 커패시터 C의 상당 용량성 리액턴스
- R_L, X_L = 상당 부하 저항, 부하 리액턴스
- R_2', X_2' = 등가 회전자 저항, 회전자 누설 리액턴스
- a, b = 각각 p.u. 주파수와 속도
- 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 상수가 아니고 부하와 회로 조건에 따라 변화한다. 자기 여자 전압을 얻기 위해서는 비포화 여자 리액턴스값보다 작은 여자 리액턴스가 되어야한다. 그러므로 $X_m = X_{m_{sc}}$ 조건에서 최소 커패시턴스값이 구해진다.

2.2. 루우프 임피던스법

Fig. 1에서 전류 I_1 에 의한 루우프 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, Z 는 전 루우프 임피던스로

$$Z = Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd} \quad (2)$$

이다. 그리고

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= \left(\frac{R_L}{a} + jX_L \right) // -j \frac{X_C}{a^2}, \\ Z_{ac} &= \frac{R_1}{a} + jX_1, \\ Z_{cd} &= jX_m // \left(\frac{R_2}{a-b} + jX_2 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

이다.

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

$$\begin{cases} Re(Z) = 0 \\ Im(Z) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

이다.

또한, 여기서

$$\begin{aligned} Re(Z) &= \frac{R_1}{a} + \frac{X_C^2 R_L}{a^5} \\ &\quad \left(\frac{R_L}{a} \right)^2 + \left(X_L - \frac{X_C}{a^2} \right)^2 \\ &\quad + \frac{X_m^2 R_2}{a-b} \\ &\quad \left(\frac{R_2}{a-b} \right)^2 + (X_m + X_2)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Re(Z) &= X_1 - \frac{X_C R_L^2}{a^4} + \frac{X_C X_L (X_L - \frac{X_C}{a^2})}{\left(\frac{R_L}{a} \right)^2 + \left(X_L - \frac{X_C}{a^2} \right)^2} \\ &\quad + \frac{X_m R_2^2}{(a-b)^2} + \frac{X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left(\frac{R_2}{a-b} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

이다.

최소 커패시턴스를 구하기 위하여 식(5),(6)을 식(4)의 조건을 이용하여 수치해석법을 사용하여 프로그래밍 하여 풀거나 식(2),(3)을 식(4)의 조건으로 응용 소프트웨어에 의하여 풀 수 있다.

2.3. 마디 어드미턴스법

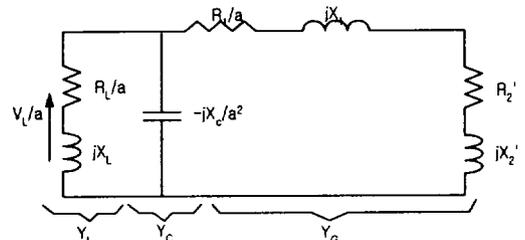


Fig. 2 Simplified equivalent circuit

Fig. 2에서 키르히호프의 전류 법칙에 의해서,

$$Y \cdot \frac{V_1}{a} = 0 \quad (7)$$

이고, 자기 여자 조건하에서 $V_1 \neq 0$ 이므로 세 가지 어드미턴스의 합이 0이어야 한다.

$$Y = Y_L + Y_C + Y_G = 0 \quad (8)$$

이다. 그리고,

$$\begin{aligned} Y_L &= \frac{1}{\frac{R_L}{a} + jX_L}, \\ Y_C &= \frac{1}{-j \frac{X_C}{a^2}}, \\ Y_G &= \frac{1}{\left(\frac{R_1}{a} + R_2 \right) + j(X_1 + X_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} R_2' &= \frac{(a-b)X_m^2 R_2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}, \\ X_2' &= \frac{X_m R_2^2 + X_m X_2 (a-b)^2 (X_m + X_2)^2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

이며, Y_L 은 부하 어드미턴스, Y_C 는 단자 커패시턴

스의 어드미턴스, 그리고 Y_G 는 고정자와 여자 리액턴스와 병렬인 회전자 가지의 합성 어드미턴스이다. 자기 여자 상태에서는 $Y=0$ 이 되어야 하므로 Y 의 실수부와 허수부가 각각 0 이 되어야한다.

$Y = Re(Y) + jIm(Y)$ 이므로

$$\begin{cases} Re(Y) = 0 \\ Im(Y) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

이다.

또한, 여기서

$$Re(Y) = \frac{aR_L}{R_L^2 + a^2X_L^2} + \frac{\frac{R_1}{a} + R_2}{(\frac{R_1}{a} + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (12)$$

$$Im(Y) = \frac{-a^2X_L}{R_L^2 + a^2X_L^2} + \frac{\frac{a^2}{X_c}}{(\frac{R_1}{a} + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (13)$$

이다.

최소 커패시턴스를 구하기 위하여 식(12), (13)을 식(11)의 조건을 이용하여 수치해석법을 사용하여 프로 그래밍 하여 풀거나 식(8), (9)을 식(11)의 조건으로 응용 소프트웨어에 의하여 풀 수 있다.

이상의 제안한 루우프 임피던스 법이나 마디 어드미턴스법은 최소의 대수 계산으로 자기 여자에 필요한 최소의 커패시턴스를 구할 수 있을 뿐만 아니라 주파수와 여자 리액턴스가 미지수로 주어진 경우에도 식을 수정하지 않고 적용할 수 있다. 따라서 종래의 방법에 의한 고차 방정식을 구성하여 풀거나 복소 임피던스 행렬을 사용하는 경우에 비하여 제안한 방법은 종래의 방법이 회로조건이 달라지거나 미지수를 달리 할 경우 식을 다시 구성하여야 하는데 반하여 훨씬 능률적으로 계산을 쉽게 할 수 있다.

2.4. 특성식과 정전압 유지를 위한 커패시턴스

그림 1의 등가회로로부터 고정자 전류 I_1 , 회전자

전류 I_2 , 부하 전류 I_L , 단자 전압 V_L , 그리고 출력 P 는 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_1}{a} + jX_1 - \frac{j\frac{X_c}{a^2}(\frac{R_L}{a} + jX_L)}{\frac{R_L}{a} + j(X_L - \frac{X_c}{a^2})}} \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{-E_1}{\frac{R_2}{a-b} + jX_2} \quad (15)$$

$$I_L = \frac{-j\frac{X_c}{a^2}}{\frac{R_L}{a} + j(X_L - \frac{X_c}{a^2})} I_1 \quad (16)$$

$$V_L = (\frac{R_L}{a} + jX_L)I_L \quad (17)$$

$$P = 3|I_L|^2R_L \quad (18)$$

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

$$E_1 = K_1 + K_2X_m + K_3X_m^2 + K_4X_m^3 \quad (19)$$

여기서, 계수 K_1, K_2, K_3, K_4 는 시험결과로부터 계산된다.

정해진 조건 아래서 지정된 전압을 유지하기 위한 단자 커패시턴스는 루우프 임피던스법과 특성식에서는 식(4)의 조건식과 식(17)에서, 마디 어드미턴스법과 특성식에서 식(11)의 조건식과 식(17)에서 단자 커패시턴스, 주파수, 그리고 여자 리액턴스를 미지수로 하여 결정할 수 있다.

III. 사례연구

본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 사용한 기기의 파라메타는 다음과 같다⁵⁾.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.071 pu, & R_2 &= 0.0881 pu, \\ X_1 &= X_2 = 0.1813 pu, \\ X_{m1} &= 3.23 pu \end{aligned}$$

그리고 기준 임피던스 $Z_b = 43.3\Omega$ 이고, 기준 주파수 $f_b = 60\text{Hz}$ 이다. Al Jabri는 발전기가 기준 속도인 $b = 1\text{pu}$ 로 회전할 때 부하저항 $R_L = 1.0\text{pu}$ 과 부하 리액턴스 $X_L = 2.0\text{pu}$ 가 접속된 경우 종래의 방법으로 최소 커패시턴스와 주파수를 계산하였다. 이 결과와 제안한 방법과 비교하면 표1과 같이 잘 일치하고 있으므로 제안한 방법으로 능률적으로 계산할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of minimum capacitance and frequencies between conventional method and proposed method

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

그리고 지정된 단자 전압을 유지하기 위한 커패시턴스를 결정하기 위해서 사용한 기기의 정격과 정수(단위는 pu)는 다음과 같다¹⁾. 정격으로는 출력 2kW, 3상 4극, 주파수 50Hz, 전압 380V, 그리고 전류는 5.4A이다.

$$R_1 = 0.0982, R_2 = 0.0621, X_1 = 0.112, \\ X_2 = 0.0952, X_{m1} = 2.58$$

구간 선형화한 여자 특성은 다음과 같다.

$$X_m = \begin{cases} 2.58 - 0.211E_1, & 0 \leq E_1 \leq 0.398 \\ 3.11 - 0.975E_1, & 0.398 \leq E_1 \leq 0.610 \\ 3.41 - 1.829E_1, & 0.610 \leq E_1 \leq 0.844 \\ 4.85 - 3.534E_1, & 0.844 \leq E_1 \leq 0.974 \\ 7.45 - 6.208E_1, & 0.974 \leq E_1 \leq 1.20 \\ 0, & 1.2 < E_1 \end{cases} \quad (20)$$

위의 식으로 계산할 경우 조건문을 구간마다 적용하는 불편을 덜기 위하여 식(19)의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$E_1 = -8.29 \cdot 10^{-4} + 1.966 X_m - 1.166 X_m^2 + 0.186 X_m^3 \quad (21)$$

이들의 정수를 사용하여 지정된 단자전압 $V_L = 1.0\text{pu}$

과 회전속도 $b = 1.0\text{pu}$ 로 회전할 때 부하 변화에 따른 커패시턴스값과 주파수를 계산하여 각각 그림3과 그림 4에 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 있다. 주파수도 역율에 따라 제한된 부하 임피던스 범위에서 차이가 있음을 보이고 있다.

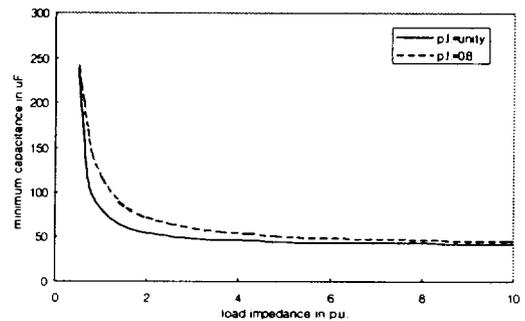


Fig. 3 Variation of C with the load impedance

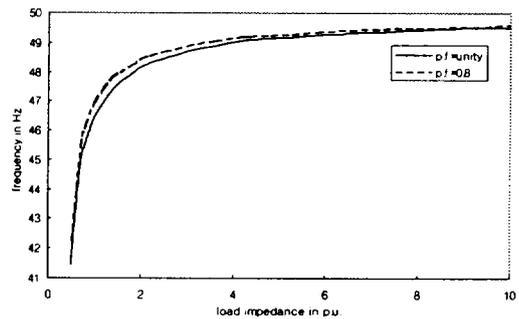


Fig. 4 Variation of f with the load impedance

IV. 결론

3상 자기 여자 유도 발전기의 자기 여자에 필요한 단자 최소 커패시턴스의 간명한 방법을 제안하였다. 종래의 루우프 임피던스 법과 마디 어드미턴스 법을 사용하여 자기 여자 조건에 의하여 최소의 대수 계산으로 능률적이고 용이하게 결정할 수 있도록 하였다. 그리고 운전 조건이 주어졌을 때 지정된 단자 전압을

유지하기 위한 커패시턴스의 결정 방법도 제시하였다.

연구의 타당성을 검증하기 위하여 이미 발표된 문헌의 회로 정수를 사용하여 종래의 방법과 제안한 방법의 계산 결과를 비교하였다. 비교 결과 이들의 값들이 잘 일치하고 있으므로 제안한 방법은 자기 여자 발전기의 해석에 능률적으로 적용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) 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, pp. 244-249.
- 2) S. S. Murthy, B. P. Singh, C. Nagamani and K. V. V. Satyanarayana, 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) A. K. Al Jabri and A. I. Alolah, May 1990, Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator, *Proceedings of IEE*, Vol. 137, Pt. B, No. 3, pp. 154-159.
- 6) T. F. Chan, June 1993, Capacitance requirements of self-excited induction generators, *IEEE trans. on energy conversion*, Vol. 8, No. 2, pp. 304-310.