

3상 유도발전기의 안정된 동작을 위한 자기여자현상에 대한 연구

조영래°, 맹인재, 백수현, 이관용\*, 김철진\*  
 동국대학교, \*한라대학교

A Study on Self-Excited characteristic for stable operation of Three-Phase Induction Generator

Y. R. Cho°, I. J. Maeng, S. H. Baek, K. Y. Lee\*, C. J. Kim\*  
 Dongguk University, \*Halla University

**Abstract** - Induction generator is the most common generator in wind energy systems because of its simplicity, ruggedness, little maintenance, price and etc. But the main drawbacks in induction generator is its need of reactive power means to build up the terminal voltage. This drawback is not an obstacle today where PWM inverters can accurately supplies the induction generator with its need from reactive power. For a insurance of three-phase induction generator requires capacitive reactance of the terminal. Most of previous work uses numerical iterative method to determine this minimum capacitor. But the numerical iteration takes long time and divergence may be occurs.

In this paper is presented the design methods of the minimum self-excited capacitor required for induction generator operation. And a new formula from the equivalent circuit for stable generation operation of self-excited induction generator calculates the proper capacity to obtain the terminal voltage of the load stage. The validity of proposed design methods is confirmed by experimental and computed results.

1. 서 론

최근 자원 고갈에 대응하기 위한 풍력 발전 시스템 등 대체 에너지 시스템과 자력 발전이 가능한 개별 독립형 발전 시스템의 성능 향상과 개발이 요구되고 있다. 유도발전기는 구조가 간단하고, 견고하며, 유지비용이 적고, 경제적이기 때문에 풍력발전시스템에서 가장 일반적인 발전기라 할 수 있다. 그러나 유도발전기의 경우 단자전압을 확립하기 위해서 무효전력이 필요하며, 이러한 단점은 최근 들어 PWM인버터의 적용으로 해결할 수 있게 하였다. 3상 유도발전기에 유기기전력 확보를 위해서는 단자에 용량성 리액턴스가 필요하다. 기존의 연구결과에 의하면 최소의 커패시터를 결정하기 위해서 반복적인 연산을 적용하는 방법을 사용하였다. 그러나 수학적 반복연산을 시행하는 것은 많은 연산시간과 발산 등의 오차를 발생할 수 있다.

본 연구에서는 유도발전기의 동작에 필요한 최소한의 자여자 커패시터에 대한 설계 방안을 제안하였다. 또한, 자여자 유도발전기의 안정된 발전작용을 기하기 위하여 등가회로부터 도출한 관계식을 적용하여 부하단의 단자전압을 확립하기 위한 적정용량을 산출하였으며, 제안된 설계방안의 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

2. 3상 유도발전기의 특성

2.1 기본구조

일반적인 3상 유도기는 그림 1과 같이 불평등한 3상 커패시터와 저항성 부하가 연결되어 있다. 커패시터와 부하는 각상에 병렬로 연결되어 있으며, 불평등한 어드미턴스  $Y_{ab}$ ,  $Y_{bc}$ ,  $Y_{ca}$ 를 갖는다. 기하학적인 성분분석을 위하여 정방향, 역방향 시퀀스 등가회로를 이용하여 불평등한 시스템을 분석하였다. 또한, 손실이 적고 다루기 쉬운 등가회로를 위해서 간단하고, 확실한 가정하였다.

자화리액턴스를 제외한 모든 등가회로 파라미터들은 포화에 영향을 미치지 때문에 일정하게 고려하였고, 유도기의 코어손실은 계산을 쉽게 하기 위해 무시하였다. 유도된 전압과 전류의 기자력공간고조파와 시간고조파도 무시하였다. 고정자와 회전자 누설리액턴스는 동일하다고 놓았다. 단위주파수 'F'는 (F-v)에서 제외하고 단위속도 'v'와 동일하다. 역방향시퀀스등가회로의 자화리액턴스  $X_{m2}$ 는 병렬의 회전자 저항과 비교하여 높은 값을 갖으나 포화되지는 않는다. 회전자는 상 시퀀스 a-b-c와 같은 방향으로 회전한다.

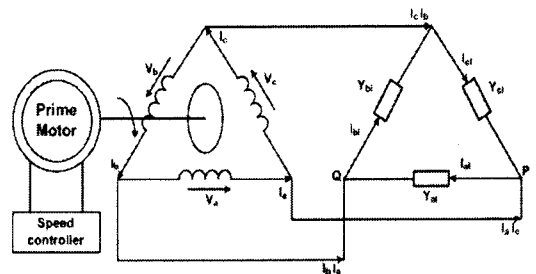


그림 1. 자여자 유도발전기의 개념도

2.2 시스템 모델링

그림 2에서는 간소화된 정방향 등가회로를 나타내었다.

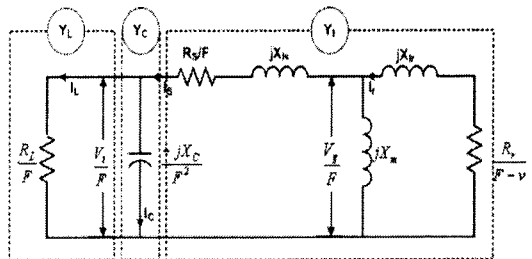


그림 2. 간소화된 정방향 등가회로

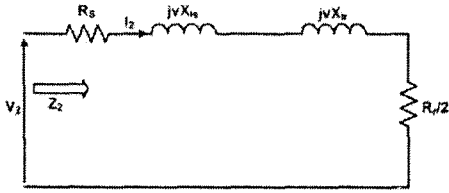


그림 3. 간소화된 역방향 등가회로

등가회로를 해석하기 위해서 정방향과 역방향의 등가회로를 구성하였다. 위의 간소화된 등가회로를 정규화 시킴으로써 3상 유도발전기는 각각의 속도에서 특성 분석을 할 수 있다. 그림 2로부터 3상 유도발전기 시스템을 위한 특성 방정식은 아래와 같다.

$$Z_1 = R_s + jvX_l + jvX_m \times \left[ \frac{vR_r}{F-v} + jX_l \right] / \left[ \frac{vR_r}{F-v} + jX_l + jvX_m \right] \quad (1)$$

$$Z_2 = R_s + \frac{R_r}{2} + jvX_l \quad (2)$$

위의 방정식에서 그림 2의  $I_5$ 에 대한 loop 방정식은 다음과 같다.

$$I_5 Z = 0 \quad (3)$$

여기서 Z는 전류  $I_5$ 에 대한 loop 임피던스이다. 정상상태 동작에서  $I_5 \neq 0$ 이면, 임피던스 Z는 0이 된다.  $Z_5$ 의 실수부 및 허수부를 각각 0으로 하면, 2차 연립방정식을 구할 수 있으며, 이는 식 (4), (5)의 값으로 나타내었다.

$$F(D_1 X_m + D_2) + (D_3 X_m + D_4) = 0 \quad (4)$$

$$F(D_5 X_m + D_6) + (D_7 X_m + D_8) = 0 \quad (5)$$

식 (4), (5)의 비선형방정식에서 F와  $X_m$ 은 미지수이다. 여기서,

$$\begin{aligned} D_1 &= 2G_1 X_l - 4G_L X_l + B_5 R_s - B_4 P_2 \\ D_2 &= X_l [G_1 X_l - 3G_L X_l + B_5 R_s - B_4 P_2] \\ D_3 &= vR_r [B_5 - B_4] - vD_1 \\ D_4 &= P_3 - vD_2 \\ D_5 &= 2B_5 X_l - 4B_4 X_l + G_L P_2 - G_1 R_s + 3 \\ D_6 &= X_l [B_5 X_l - 3B_4 X_l + G_L P_2 - G_1 R_s] + 3X_l \\ D_7 &= vR_r (G_L - G_1) \\ D_8 &= P_4 - vD_6 \end{aligned}$$

이며, 일정한 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_1 &= R_s + \frac{R_r}{2} \\ P_2 &= P_1 + R_s \\ G_1 &= K_1 P_1 + 2K_2 X_l \\ B_5 &= K_2 P_1 + 2K_1 X_l \\ P_3 &= vR_r [B_4 P_2 - B_5 R_s + 3G_L X_l - G_1 X_l] \\ K &= -(Y_{af} + aY_{bf} + a^2 Y_{cf}) / (3Y_2 + Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf}) \end{aligned}$$

위의 방정식을 이용하여 단위 발전된 주파수 F와 포화된 자화 리액턴스  $X_m$ 을 얻었다. 다음은 포화된 자화 리액턴스  $X_m$ 과 상응하는 정규화된 공극전압  $V_g/F$ 를 결정해야 한다.  $X_m$ 과  $V_g/F$ 의 적절한 자화특성은 동기속도실험에서 얻을 수 있다. 특성방정식은 발전과 관련하여 정규화된 등가회로를 이용하였다. 또한 F를 구하였다

때문에, F와 v가 동일하다는 가정은 무시한다. 그리하여 제제산에 의해서 다음과 같이 얻어진다.

$$I_1 = \frac{V_g}{jFX_m} + \frac{V_g}{\left[ \frac{FR_r}{F-v} + jFX_l \right]} \quad (6)$$

$$V_1 = V_g - (R_s + jFX_l)I_1 \quad (7)$$

$$V_2 = KV_1 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \quad (9)$$

위의 식으로부터 유도발전기의 상전압과 전류를 다음의 방정식을 사용하여 계산하였다.

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (10)$$

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + aV_2 \quad (11)$$

$$V_c = V_0 + aV_1 + a^2 V_2 \quad (12)$$

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (13)$$

따라서, 부하와 연결된 전류는 식 14와 같다.

$$I_{af} = \frac{V_a}{R_{af} + jFX_{af}} \quad (14)$$

식 14와 같이  $I_b$ ,  $I_c$ 를 구하였으며, 3상 차역자 유도발전기의 출력은 식 15와 같음을 알 수 있다.

$$P = I_{af}^2 R_{af} + I_{bf}^2 R_{bf} + I_{cf}^2 R_{cf} \quad (15)$$

### 2.3 자기여자를 위한 최소커패시터의 선정

다른 부하와 속도상태에서 유도발전기동작에 필요한 최소커패시터의 식을 얻는 것은 루프해석법 대신에 절전법을 사용하였다. 제안된 방식에서 어드미턴스의 실수부는  $X_c$ 의 함수가 없으므로 어드미턴스를 0으로 하여 동일한 값의 동작주파수를 얻을 수 있으며,  $X_c$ 의 값을 계산하기 위해서 허수부를 사용한다. 제안된 방법은 다음과 같이 나타내었다.

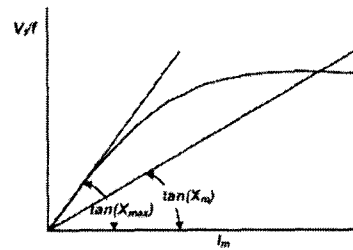


그림 4. 유도발전기의 포화특성

그림 4에서 나타난 회로의 단자전압  $V_g$ 에서 절전법을 적용하여 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{V_g}{a} Y_i = 0 \quad (16)$$

여기서,  $Y_i = Y_l + Y_L + Y_C$  (여기의 모든 어드미턴스는 그림 2.에서 나타내었다.), 그리고 어드미턴스의 실수부와 허수부는  $Y_i = 0$ 로 얻어진다.

대부분의 대수동작은 다음과 같이 나타낸다.

1. 다음의 방정식은 실수부를 통해서 얻어진다.

$$C_4 a^4 + C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0 = 0 \quad (17)$$

여기서 계수  $C_n(n=0, 1, 2, 3, 4)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_4 &= X_L^2 R_r (L_2 L_3 - L_1) + X_L^2 R_s L_2^2 + R_L L_1^2, \\ C_3 &= X_L^2 R_r (L_1 - L_2 L_3) - 2v(X_L^2 R_s L_2^2 + R_L L_1^2), \\ C_2 &= R_L^2 (R_r L_2^2 - R_r L_1 + R_r L_2 L_3) + X_L^2 R_s (R_L^2 L_2^2 v^2) \\ &\quad + 2R_L R_r R_s (L_2 L_3 - L_1) + R_L (L_1^2 v^2 + R_L^2 L_3 + R_s^2 L_2^2), \\ C_1 &= R_L^2 R_r (L_1 - L_2 L_3) - 2v R_L R_s L_2^2 (R_s + R_L), \\ C_0 &= (R_L^2 + L_2^2 v^2) R_L R_s (R_L + R_s) \text{이다. 여기서 } L_1, L_2, L_3 \end{aligned}$$

는 다음과 같다.  
 $L_1 = X_r (X_r + X_m) + X_r X_m$   
 $L_2 = X_r + X_m$  그리고,  $L_3 = X_s + X_m$ 이다. 위의 방정식은  $X_c$ 를 포함하고 있지 않다. 주파수는 동작주파수를 얻기 위해서 식 (17)을 풀어서 얻어진다. 여기서 4개의 근을 얻는데, 물리적인 의미로 오직 양의 실수근을 갖는다. 그러나 하나의 정의 실수근이 없다면 자여자는 발생하지 않는다.

2. 허수부를 통하여 최소의 단자커패시터 식을 구한다.

$$C_{\min} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{X_L a}{M_3} + \frac{M_4}{M_1^2 + M_2^2} \right) \quad (18)$$

식 17의 계수  $M_1, M_2, M_3$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_1 &= R_s R_r - f(f-v)L_1 \\ M_2 &= R_r L_3 + R_s (f-v)L_2, \\ M_3 &= R_L^2 + X_L^2 f^2 \text{ 그리고} \\ M_4 &= R_r M_2 - L_2 f(f-v)M_1 \text{이다.} \end{aligned}$$

위 수식에서 우리는 합성방정식이 어드미턴스의 실수부는  $X_c$ 의 함수가 없어서 어드미턴스를 0으로 하여 동일한 값의 동작주파수를 얻을 수 있으며, 최소 커패시터의 값을 계산하기 위해서 허수부를 사용하였다. 제안된 수식은 전압을 발생하는 유도발전기에서 필요한 최소의 커패시터를 계산하였다. 또한 제한된 수식은 반복법을 필요로 하지 않게 되었다.

#### 2.4 특성 해석 및 시뮬레이션

식 18을 증명하기 위해서 [1]의 논문에 있는 파라미터를 적용하였다. 파라미터들은  $X_m=3.23$  pu,  $R_s=0.017$  pu,  $R_r=0.0881$  pu,  $X_s=X_r=0.1813$  pu,  $Z_b=43.3$  pu,  $N=1800$  rev/min,  $f_b=60$ Hz,  $R_L=1$  pu,  $b=1$ pu이다. 또한 식 16에 적용하고, 주파수에 대해서 풀면, 2개의 실근을 얻을 수 있다. 2개의 실근  $a_1=0.5191$ 이고,  $a_2=0.9937$ 이다.

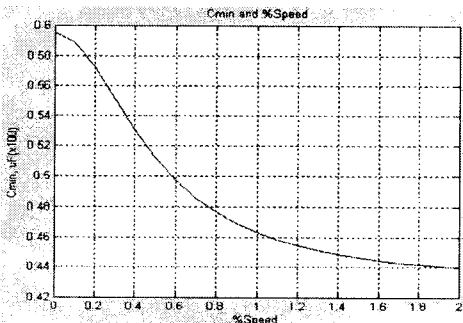


그림 5.  $a_1=0.5191$ 일 때의 %속도- $C_{\min}$  곡선

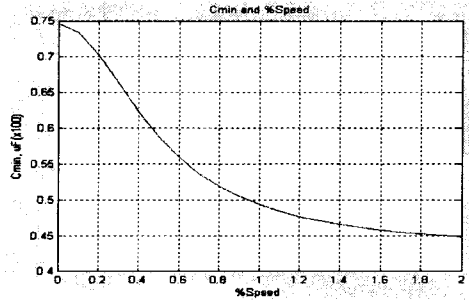


그림 6.  $a_2=0.9937$ 일 때의 %속도- $C_{\min}$  곡선

그림 5, 6은 위의 파라미터를 이용하여 Matlab에서 시뮬레이션을 하였으며, 두 개의 시뮬레이션에서처럼 최소의 커패시터는 45μF 정도의 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 자여자 유도발전기에서 필요한 최소의 커패시턴스를 위한 새로운 식을 제안하였다. 제안된 식은 간단하며, 반복적인 계산이 필요하지 않다. 따라서 이러한 이유로 인해 제안된 식은 향후에 자여자 유도발전기에서 필요한 최소한의 커패시턴스를 결정하는데 많은 영향을 줄 것을 기대된다. 또한 제안된 식의 적용으로 인해 반복이나 오차 없이 반복법에 의해서 구해지는 결과를 쉽게 얻을 것으로 전망한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] ALI M. ELTAMALY, "New Formula to Determine the Minimum Capacitance Required for Self-Excited Induction Generator", IEEE Trans, pp. 106-110, 2000
- [2] A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik, "Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor", IEEE Trans, Vol. 5, No. 4, December 1990
- [3] J. Faiz, A.A.Dadgari, S. Horning, A. Keyhani, "Design of a three-phase Self-Excited Induction generator
- [4] S.S. Murthy, Sandeep Acharya, "MATLAB based steady state analysis of self excited induction generator"
- [5] S.S. Murthy, B.P. Singh, C. Nagamani, K.V.V. Satyanarayana, "Studies on the use conversional induction motors as self-excited induction generators", IEEE Trans, Vol. 3, No. 4, December 1988
- [6] S.S. Murthy, "A generalised operational equivalent circuit of induction machines for transient/dynamic studies in different operating conditions", pp. 622-630
- [7] T.F. Chan, "Analysis of self-excited induction generators using an iterative method", IEEE Trans, Vol. 10, No. 3, September 1995
- [8] A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik, "Selection of the excitation capacitor for dynamic braking of induction machines", IEE proceeding-B, Vol. 140, No. 1, January 1993
- [9] S. Wekhande, V. Agarwal, "A variable speed constant voltage controller for self-excited induction generator with minimum control requirements", IEEE, July 1999
- [10] A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik, "Voltage control of parallel operated self excited induction generators", IEEE Trans, Vol. 8, No. 2, June 1993