

風力 驅動 自己勵磁 誘導發電機의 端子 커패시턴스 豫測

左 宗 根*

Predicting Terminal Capacitance of Wind-driven Self-excited Induction Generators

*Jwa Chong-Keun**

Summary

The loop analysis to predict the terminal capacitance value required for self excitation of an isolated self-excited induction generator supplying a balanced R-L load is investigated. Two nonlinear equations have to be solved to obtain this capacitance value. In this paper a straightforward method is introduced to predict the capacitance requirement for most all of saturated region under constant speed operation. A simple method is also introduced for computing the capacitance required for maintaining the preset terminal voltage under the variable load.

序 論

범세계적으로 비재생에너지원의 감소에 대비하여 대체에너지원으로서 풍력, 소수력 그리고 바이오가스등의 이용에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 가운데 풍력에 의해 구동되는 고립전원용 발전기는 동기발전기 이외에 유도발전기도 변동하는 부하에 대응하여 단자전압과 주파수를 일정하게 제어하기 곤란한 점등의 결점에도 불구하고 동기발전기에 비해 견고하며, 단가가 낮고, 구조(브러시없는 회전자구조)가 간단하며, 직류여자전원이 불필요하고, 심한 과부하나 단락에 대한 자기보호와 유지, 보수등의 용이성등의 장점이 많아 널리 사용되고 있다.

이러한 고립 전원용 유도발전기는 단자커패시터에 의한 자기여자작용을 이용한 것이고 이에대한

정상상태 해석 문제는 기기회로정수, 회전수, 부하 임피던스 및 단자커패시턴스가 주어졌을때 단자 전압과 주파수를 구하여 특성을 구하는 것들이 대부분이다. 이들 중 Murthy et al(1982)은 기기회로정수 변화에 따른 단자전압 대 출력특성을, Quazene과 McPherson(1983)은 부하저항 변화에 따른 선간전압, 주파수 대 회전자속도특성을, Malik와 Hague(1986)은 기기철손을 고려하여 커패시턴스의 변화, 속도변화, 부하변화, 부하역률 변화에 따른 특성들을, Malik와 Mazi(1987)는 무부하조건에서 최소 커패시턴스, 부하시의 커패시턴스 그리고 최대 가용출력에 대한 단자커패시턴스의 영향을 Ammasaigounden et al(1986)은 극수변경에 따른 특성을 조사하였다.

한편, Al Jabri와 Aloiah(1990), Chan(1993)은 자기여자작용에 필요한 최소의 커패시턴스와 주파

* 공과대학 전기공학과(Dept. of Electrical Ebgineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

수를 불포화자화리액턴스를 이용하여 구하는 방법을, Chan (1993)은 정해진 단자전압을 유지할 수 있는 커패시턴스를 반복법에 의해 구하는 방법을 제시하였다.

이의 중요성에 따라 본 연구에서는 풍력구동 자기여자 유도발전기가 정격속도로 운전된다는 가정 하에서 기기회로정수, 회전수, 부하임피던스 및 여자회로의 자기포화특성곡선이 주어졌을때 이 곡선의 거의 모든 영역에서 자기여자작용을 일으킬 수 있는 커패시턴스의 값을 구하여 분석한다. 그리고 부하변동시에 주어진 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스의 값을 구하기 위한 간결한 방법을 제시한다.

等價回路 및 解析

그림1은 1상당 고립자기여자유도발전기에 평형 R-L부하가 걸릴때의 정상상태의 등가회로이다. 이 등가회로는 모든 리액턴스와 전압이 정격주파수로 환산된 것으로 철손을 무시하고 여자리액턴스만 포화의 영향을 받는다고 가정한다.

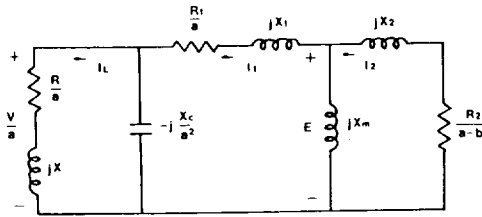


Fig.1. Per Phase Equivalent circuit of the Induction Generator with Load

이 회로에서

- R_1, R_2 1상당 고정자 및 회전자(고정자환산) 저항
- X_1, X_2 1상당 고정자 및 회전자(고정자환산) 누설리액턴스
- R, X 1상당 부하저항 및 리액턴스
- X_m, X_c 1상당 자화리액턴스 및 단자커패시터의 용량성리액턴스
- V, E 1상당 단자전압 및 공극전압
- I_1, I_2, I_L 1상당 고정자, 회전자(고정자환산) 및

부하전류

- a, b 단위법 주파수 및 속도이다.

지금까지 보고된 자기여자 유도발전기의 정상상태 해석 방법은 Quazene과 McPherson(1983), Ammasaigounden et al(1986), Chan(1993) 등의 절점(node)어드미턴스법과 Murthy et al(1982), Malik와 Hague(1986), Al Jabri와 Alolah(1990) 등의 폐로(loop)임피던스법이 있으나 원리적으로 서로 관련이 있는 방법들이다.

본 연구에서는 R-L부하시 주파수방정식의 차수가 작은 폐로임피던스법을 사용하여 해석한다. 그림1에서 폐로방정식은 다음과 같이 쓸 수 있고

$$ZI_1 = 0 \tag{1}$$

여기서 Z는 전폐로임피던스이다. 자기여자 조건하에서는 $I_1 \neq 0$ 이므로 Z의 실수부와 허수부가 모두 0이 되어야 함을 의미한다. 즉 Z는

$$Z = \left(\frac{R}{a} + jX \right) / \left(-j \frac{X_c}{a^2} \right) + \left(\frac{R_1}{a} + jX_1 \right) + \left(jX_m \right) / \left(\frac{R_2}{a-b} + jX_2 \right) \tag{2}$$

이고, 실수부는

$$\left(p_1 X_m + p_2 \right) a^3 + \left(p_3 X_m + p_4 \right) a^2 + \left[\left(p_5 X_m + p_6 \right) X_c + p_7 \right] a + \left(p_8 X_m + p_9 \right) X_c = 0 \tag{3}$$

이며, 허수부는

$$\left(q_1 X_m + q_2 \right) a^4 + \left(q_3 X_m + q_4 \right) a^3 + \left[\left(q_5 X_m + q_6 \right) X_c + q_7 X_m + q_8 \right] a^2 + \left[\left(q_9 X_m + q_{10} \right) X_c + q_{11} X_m + q_{12} \right] a + q_{13} X_c = 0 \tag{4}$$

이다. (3), (4)의 계수 $p_i (i=1, 2, \dots, 9)$, $q_i (i=1, 2, \dots, 13)$ 는 부록에 보인다. 이 식에서 X_c, X_m, a, b 의 미지수 중 2개를 알면 나머지를 구할 수 있다. 여기서 X_m 과 b 의 값이 주어졌을 때 X_c 와 a 를 구하기 위해 (3), (4)식을 정리하면 실수부는

$$P_1 a^3 + P_2 a^2 + \left(P_3 X_c + P_4 \right) a + P_5 X_c = 0 \tag{5}$$

허수부는

$$Q_1 a^4 + Q_2 a^3 + \left(Q_3 X_c + Q_4 \right) a^2 + \left(Q_5 X_c + Q_6 \right) a + Q_7 X_c = 0 \tag{6}$$

로 되고, 계수 $P_i (i=1, 2, \dots, 5)$, $Q_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 는 부록에 보인다.

(5), (6)식에서 X_c 를 소거하기 위하여 X_c 에 대해서 정리하면

$$X_c = \frac{P_1 a^3 + P_2 a^2 + P_3 a}{-(P_3 a + P_5)} \quad (7)$$

$$X_c = \frac{Q_1 a^4 + Q_2 a^3 + Q_3 a^2 + Q_4 a}{-(Q_3 a^2 + Q_5 a + Q_7)} \quad (8)$$

이 되고, 다음식이 얻어진다.

$$A_1 a^4 + A_2 a^3 + A_3 a^2 + A_4 a + A_5 = 0 \quad (9)$$

여기서 계수 $A_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 는 부록에 보인다.

정속도로 운전 할 경우에 자기여자에 필요한 커패시턴스를 구하기 위하여 유도발전기를 동기속도로 회전시켜 정격주파수의 전원으로 측정하여 계산한 여자회로의 자화리액턴스와 공극전압사이의 관계식이 다음과 같은 형으로 구간 선형화하여 주어진다.

$$X_m = K_1 - K_2 E \quad (10)$$

여기서 K_1, K_2 는 계수이고, E 의 변화로 X_m 이 변화하므로 E 의 변화에 따른 (10)의 식의 X_m 을 (9)식에 대입하여 단위범 주파수 a 를 구하고 이를 (7) 또는 (8)식에 대입하여 E 의 거의 전영역에 대한 커패시턴스를 구할 수 있다.

그리고 부하변동시에 지정된 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스를 구하기 위해서는 그림1의 발전기단자 외부회로를 단순화하여 임피던스를

$$Z_L = (-j \frac{X_c}{a}) // (\frac{R}{a} + jX) = R_L + jX_L \quad (11)$$

로 하고, 실수부와 허수부는 다음과 같다.

$$R_L = \frac{RX_c^2}{a[a^2 R^2 + (a^2 X - X_c)^2]} \quad (12)$$

$$X_L = \frac{(-XX_c + R^2 + a^2 X^2)X_c}{a^2 R^2 + (a^2 X - X_c)^2} \quad (13)$$

단자전압과 공극전압사이의 관계식은 다음과 같고

$$V = \left[\frac{R_1^2 + X_1^2}{(-\frac{R_1}{a} + R_L)^2 + (X_1 - X_L)^2} \right]^{1/2} aE \quad (14)$$

부하변화와 공극전압을 고려하여 (9)식에 의하여 근을 구하기 위한 추측값으로 택한 속도 b 에 가장 접근한 주파수 a 를 구하고 이것들을 (14)식에 대입하여 지정된 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스를 구한다.

事例 研究 및 分析

연구의 타당성을 입증하기 위하여 표1과 같은 등가회로정수를 갖는 유도발전기(Malik and Mazi, 1987)에 제시된 방법을 적용하였다.

Table 1. Circuit Parameters of Induction Generator for Case Study

Base Parameters	Circuit Parameters (per phase) [pu]
$Z_{ms} = 43.4$ [Ohms]	$R_1 = 0.071$ $R_2 = 0.0881$
Frequency 60[Hz]	$X_1 = 0.1813$ $X_2 = 0.1813$
Speed 1800[rpm]	$X_m = 2.23$

위와 같은 발전기에 임피던스 $R + jX = 1.0 + j2.0$ [pu]인 부하가 접속되고 속도 $b = 1$ [pu]로 운전할때 필요한 주파수와 커패시턴스를 구하여 Al Jabri 와 Alolah(1990)의 계산 결과와 비교하면 다음과 같다.

proposed results $a = 0.97968$ [pu]
 $C = 45.73878$ [micro-F]
 Alolah's results $a = 0.9795$ [pu]
 $C = 45.698$ [micro-F]

이 결과들에서 보는 바와 같이 모든 결과가 잘 일치하고 있으므로 본 해석방법이 타당함을 알 수 있다.

이에 따라 여기서는 제시된 해석방법으로 계산하여 자기유도에 필요한 커패시턴스를 예측하기 위하여 표2와 같은 정격, 등가회로 정수와 여자특성을 갖는 유도발전기(Chan, 1993)에 대하여 적용하여 분석하였다.

Table 2. Specifications and Circuit Parameters of Analyzed Induction Generator

Specifications	Circuit Parameters(per phase) [pu]
3φ . 4 pole	$R_1 = 0.0982$ $R_2 = 0.0621$
frequency 50(Hz)	$X_1 = 0.112$ $X_2 = 0.0952$
voltage 380[V]	$X_m = \begin{cases} 2.58 - 0.211E, & 0 \leq E < 0.398 \\ 2.87 - 0.957E, & 0.398 \leq E < 0.610 \\ 3.41 - 1.829E, & 0.610 \leq E < 0.844 \\ 4.85 - 3.534E, & 0.844 \leq E < 0.974 \\ 7.45 - 6.208E, & 0.974 \leq E < 1.20 \\ 0, & 1.20 < E \end{cases}$
current 5.4[A]	
output 2[Kw]	
star connected	
squirrel cage	

그림2에서 그림5까지는 정격속도 $b=1$ [pu]일 때 저항부하($R=1$ [pu])와 유도성 부하($Z=0.8+j0.6$ [pu])에 대한 자기여자에 필요한 커패시턴스의 변화를 공극전압, 여자리액턴스, 주파수 및 단자전압의 변화와의 관계곡선이다.

그림 2는 공극전압 변화에 대한 커패시턴스의 변화를 고정부하의 종류에 따라 보인 것으로 유도성 부하가 저항 부하보다 큰 커패시턴스로서 자기여자가 가능함을 알 수 있고, 공극전압이 커질수록 커패시턴스의 값도 서서히 증가하다가 자기포화의 영향으로 급히 증가하는 경향을 보이고 있다.

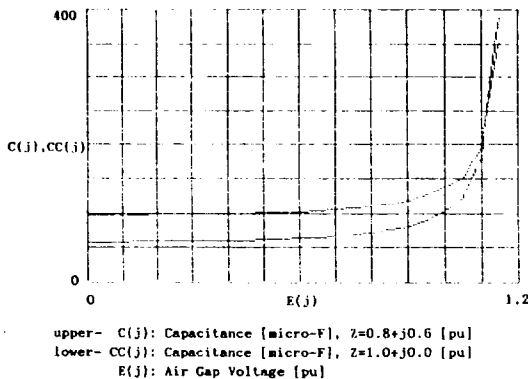


Fig. 2 Variation of Capacitance with Airgap Voltage and Load Impedance

여자 리액턴스 변화에 따른 커패시턴스의 변화는

그림3과 같고 커패시턴스의 값은 여자리액턴스의 값이 작아질 수록 커짐을 알 수 있다.

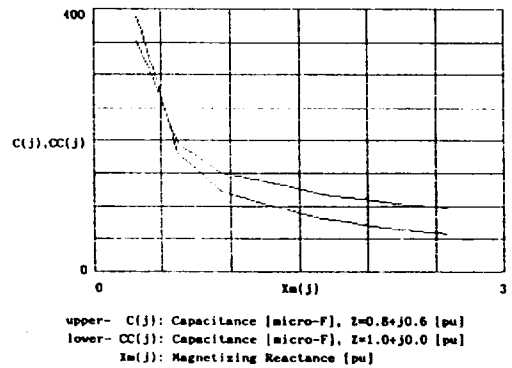


Fig. 3 Variation of Capacitance with Magnetizing Reactance and Load Impedance

주파수 변화에 대한 커패시턴스의 변화는 그림4와 같고 유도성 부하가 저항 부하보다 넓은 범위의 주파수에서 발전이 가능하고, 저항부하는 작은 커패시턴스를 사용할 수 있으며 모든 부하에서 주파수가 낮아질 수록 큰 커패시턴스가 필요하다.

그림5는 커패시턴스의 변화에 대한 단자전압의 변화를 나타낸 것으로 저항부하가 유도성부하에 비해 작은 커패시턴스로 단자전압을 유지할 수 있으며 낮은 단자전압이 필요할 때 커패시턴스의 값은 거의 변화가 없고 높은 단자전압이 필요할 때 큰

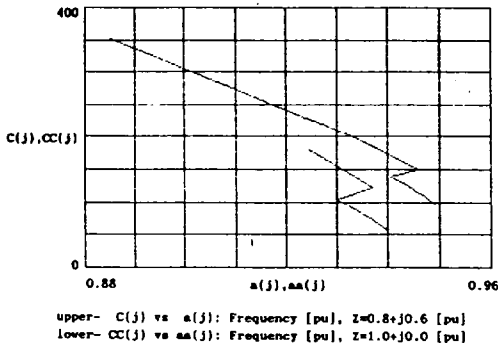


Fig. 4 Variation of Capacitance with Frequency and Load Impedance

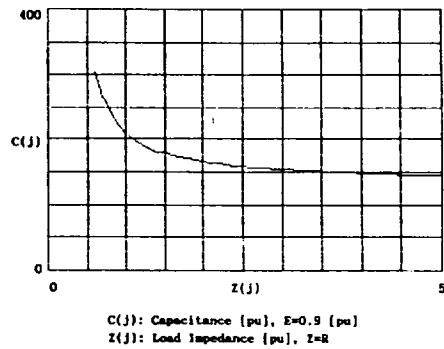


Fig. 6 Variation of Capacitance with Load Impedance

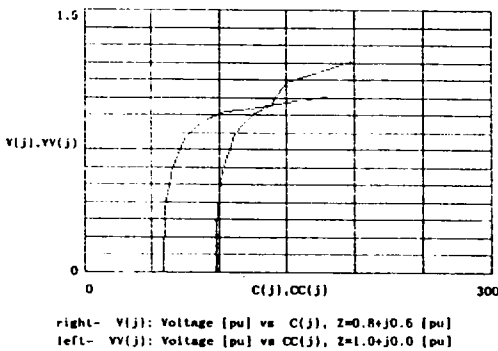


Fig. 5 Variation of Terminal Voltage with Capacitance and Load Impedance

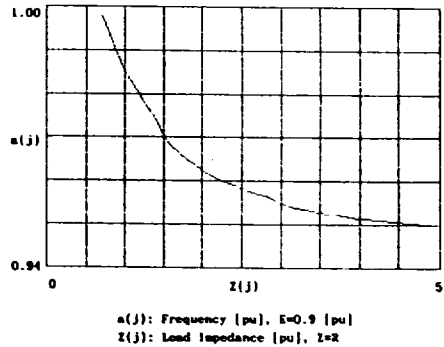


Fig. 7 Variation of Frequency with Load Impedance

커패시턴스가 요구됨을 알 수 있다.

그림6와 그림7은 속도 $b=1$ (pu), 공극전압 $E=0.9$ (pu)일때 정격단자전압 $V=1$ (pu)을 유지하기 위한 커패시턴스와 주파수의 변화를 저항부하 임피던스의 변화로 표시한 것이다.

그림 6은 커패시턴스와 부하임피던스와 관계 곡선으로 부하임피던스가 작을 때 큰 커패시턴스가 필요하고 부하 임피던스의 증가에 따라 커패시턴스는 감소한다.

그림7은 부하 임피던스 변화에 대한 주파수의 변화를 보인 것으로 부하 임피던스의 증가에 따라 주파수가 감소함을 알 수 있다.

摘 要

풍력으로 구동되는 자기여자 유도발전기가 정격

속도로 운전할 때 여자회로의 자기포화곡선을 구간 선형화하여 거의 모든 영역에서 자기여자작용을 일으킬 수 있는 커패시턴스의 값을 구하여 분석하였다. 또한 정격 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스의 값을 구하기 위한 간결한 방법도 제시 하였다.

일정 부하, 정격속도 운전시에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- 1) 공극전압이 커질수록, 여자리액턴스가 작아질수록 커패시턴스가 커진다.
- 2) 주파수가 낮아질때, 높은 단자전압이 필요할 때 큰 커패시턴스가 필요하다.
- 3) 부하의 종류와 크기에 따라 필요커패시턴스가 다르다.

일정 공극전압, 정격속도, 부하변화시에 정격전압을 유지할때는 부하임피던스가 증가함에 따라 커패시턴스가 작아지고, 주파수도 떨어진다.

參 考 文 獻

- Al Jabri, A. K. and Alolah, A. I. 1990, Capacitance Requirement for Isolated Self-excited Induction Generator, IEE Proc., Vol.137, pt. B, No.3, 154-159
- Ammasaigounden, N., Subbiah, M. and Krishnamurthy, M. R., 1986, Wind-driven Self-excited Pole-changing Induction Generators, IEE Proc., Vol.133, pt. B, No.5, 315-321
- Chan, T. F. 1993, Capacitance Requirements of Self-excited Induction Generators, IEEE Trans. on E. C., Vol.8, No.2, 304-311
- Malik, N. H. and Hague, S. E., 1986, Steady State Analysis and Performance of an Isolated Self-excited Induction Generator, IEEE Trans. on E. C., Vol. EC-1, No.3, 134-139
- Malik, N. H. and Mazi, A. A., 1987, Capacitance Requirements for Isolated Self-excited Induction Generators, IEEE Trans. on E. C., Vol. EC-2, No.1, 62-68
- Murthy, S. S., Malik, O. P. and Tandon, A. K., 1982, Analysis of Self-excited Induction Generators, IEE Proc., Vol.129, Pt. C, No.6, 260-265
- Quazene, L. and McPherson, G., 1983, Analysis of the Isolated Induction Generator, IEEE Trans. on P. A. S., Vol. PAS-102, No.8, 2793-2798

附 錄

(3) 식의 계수

$$\begin{aligned} p_1 &= -(R_1 + R_2)X - (X_1 + X_2)R \\ p_2 &= -(R_2X_1 + R_1X_2)X - RX_1X_2 \\ p_3 &= (RX_2 + R_1X + RX_1)b \\ p_4 &= (R_1X + RX_1)X_2b \\ p_5 &= R_2 + R_1 + R \\ p_6 &= (X_1 + X)R_2 + (R_1 + R)X_2 \\ p_7 &= R_1R_2R \\ p_8 &= -(R_1 + R)b \\ p_9 &= -(R_1 + R)X_2b \end{aligned}$$

(4) 식의 계수

$$\begin{aligned} q_1 &= -(X_1 + X_2)X \\ q_2 &= -X_1X_2X \\ q_3 &= (X_1 + X_2)Xb \\ q_4 &= X_1X_2Xb \\ q_5 &= X_2 + X_1 + X \\ q_6 &= (X_1 + X)X_2 \\ q_7 &= R(R_2 + R_1) \\ q_8 &= R(R_2X_1 + R_1X_2)R + R_1R_2X \end{aligned}$$

$q_9 = -(X + X_1 + X_2)b$

$$\begin{aligned} q_{10} &= -(X_1 + X)X_2b \\ q_{11} &= -R_1Rb \\ q_{12} &= -R_1RX_2b \\ q_{13} &= -(R_1 + R)R_2 \end{aligned}$$

(5) 식의 계수

$$\begin{aligned} P_1 &= p_1X_m + p_2 \\ P_2 &= p_3X_m + p_4 \\ P_3 &= p_5X_m + p_6 \\ P_4 &= p_7 \\ P_5 &= p_8X_m + p_9 \end{aligned}$$

(6) 식의 계수

$$\begin{aligned} Q_1 &= q_1X_m + q_2 \\ Q_2 &= q_3X_m + q_4 \\ Q_3 &= q_5X_m + q_6 \\ Q_4 &= q_7X_m + q_8 \\ Q_5 &= q_9X_m + q_{10} \\ Q_6 &= q_{11}X_m + q_{12} \\ Q_7 &= q_{13} \end{aligned}$$

(9) 식의 계수

$$\begin{aligned} A_1 &= P_1Q_3 - P_3Q_1 \\ A_2 &= P_1Q_5 + P_2Q_3 - P_3Q_2 - P_5Q_1 \\ A_3 &= P_1Q_7 + P_2Q_5 + P_4Q_3 - P_5Q_4 - P_5Q_2 \\ A_4 &= P_2Q_7 + P_4Q_5 - P_3Q_6 - P_5Q_4 \\ A_5 &= P_4Q_7 - P_5Q_5 \end{aligned}$$