

# 스타인메츠결선 자기여자 유도 발전기의 커패시턴스 결정

강 상 수\* · 좌 종 근\*\*

## Determination of Capacitance of Self Excited Induction Generator with Steinmetz Connection

Sang-Soo Kang\* · Chong-Keun Jwa\*\*

### ABSTRACT

This paper describes a simple and straightforward method for determining the minimum capacitance required to self excitation in a three-phase induction generator with Steinmetz connection. Using the input impedance of the induction generator and the self-excitation condition, the capacitance is computed by real and imaginary function in an application software. This solution method is applied to determine the capacitance required to maintain the specified terminal voltage when the generator is supplying load. The computed results are compared with Chan and Lai's results to verify the proposed method.

**Key Words** : Induction generator, Steinmetz connection, Capacitance

### 1. 서 론

최근 화석 에너지의 고갈과 지구 환경문제가 대두되면서 대체 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 대체 에너지원에 의한 에너지 변환장치로 가격과 구조면에서 우수한 유도발전기의 사용이 일반화되고 있는 실정이다. 이에 따라 커패시터 자기여자 3상 유도 발전기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

대표적으로 Murthy 등[1]은 루우프 임피던스법을 Quazen과 Mcpherson[2]은 마디 어드미턴스법에 의한 발전기의 정상상태 해석을 위시하여 최근에 까지 지속적인 연구가 수행되고 있다.

또한 단상 전원이 필요한 경우에 3상 유도기를 단상 자기여자 유도 발전기로 운전하는 경우의 연구로는 A1-Bahrani와 Malik [3]는 등가회로를 사용하여 부하측에 단일 커패시터가 접속된 델타와 성형결선된 발전기의 특성을 해석하였다. Chan[4]은 단일 커패시터에 의한 델타결선 발전기와 스타인메츠결선 발전기의 특성을 검토하여 커패시터가 전원단자보다 위상이 뒤진 상에 접속되는 경우가 가장 좋은 특성이 얻어지는 것을 확인하였다. Fukami 등[5]은 전압변동을 줄이기 위하여 부하에 병렬 커패시터를 두 개의

\* 제주대학교 대학원  
Graduate school of Cheju Nat'l Univ.  
\*\* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술 연구소  
Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ.,  
Res. Inst. Adv. Tech.

상에는 직렬 커패시터를 사용한 발전기를 개발하였다. Chan과 Lai[6]는 스타인메츠 결선에서 최소 커패시턴스와 특정 단자 전압을 유지하기 위한 커패시턴스의 값을 반복법에 의하여 결정하였다. 문과 좌[7]는 부하단자에 커패시터가 접속된 발전기에서 직렬 커패시터가 long shunt와 short shunt로 접속된 경우에 대하여 등가회로를 구성하여 특성을 해석하였다.

여자 최소 커패시턴스를 결정하는 방법으로 Chan과 Lai[6]의 연구에서는 커패시터 단자에서 본 임피던스를 실수부와 허수부로 나누어 실수부에서 발전 주파수를 구하고 이 결과를 이용하여 허수부에서 커패시턴스를 구하고 있다. 특정 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스도 반복법에 의하여 계산하고 있으나 임피던스를 실수부와 허수부로 나눌 때 복잡한 대수 계산이 필요하게 된다.

본 논문에서는 발전기 특성 해석시 필요한 부하단자에서 본 입력 임피던스와 자기여자 조건을 사용하여 실수부와 허수부로 분리하지 않고 응용 소프트웨어의 복소함수의 실수함수와 허수함수 기능을 사용하여 최소 커패시턴스를 결정하는 방법을 제시한다.

또한, 특정 전압을 유지하기 위한 커패시턴스도 입력 임피던스와 단자 전압식을 연립방정식으로 하여 풀 수 있는 간명한 방법도 제시하고자 한다.

## II. 해석이론

### 2.1 회로 구성과 해석

본 논문에 사용한 단상부하에 전력을 공급하는 단일 커패시터에 의하여 자기여자 되는 3상 유도발전기에 대한 스타인메츠 결선은 Fig. 1과 같다. 그림에서 보듯이 부하와 커패시터가 각각 다른 상에 접속되고 커패시터는 발전기의 성능이 더 좋은 것으로 보고 되고 있는 부하에 대하여 지상에 연결되어있다.

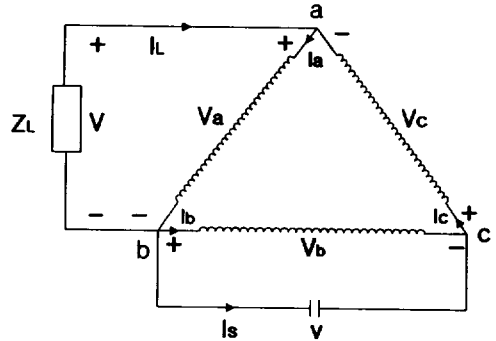


Fig. 1 Steinmetz connection for a three-phase self-excited induction generator

해석의 편의상 전류의 방향을 전동기로 동작할 때의 방향으로 정하고 회로의 모든 정수는 기준 주파수 때의 값을 사용하였다.

전압, 전류에 대한 회로방정식과 대칭좌표법을 적용하여 구한 정상분 전압  $V_1$ 과 역상분 전압  $V_2$ 는 다음 식과 같다.

$$V_1 = \frac{Z_c Z_1 - \frac{\alpha}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 Z_2}{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2} \sqrt{3} V \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{Z_c Z_2 + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 Z_2}{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2} \sqrt{3} V \quad (2)$$

여기서,  $Z_1$ 과  $Z_2$ 는 각각 발전기의 정상분과 역상분 임피던스를,  $Z_c$ 는 여자 커패시턴스의 임피던스를, 그리고  $\alpha$ 는 페이저 연산자로  $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 를 표시한다.

부하 단자에서 본 발전기의 입력 임피던스를 구하면 다음 식과 같다.

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

주어진 부하가 접속되어 자기여자 발전기로 동작할 때 부하와 발전기 회로에 대하여 부하 전류에 의한 임피던스 강하는 다음 식과 같다.

$$(Z_{in} + Z_L)I_L = 0 \quad (4)$$

여기서,  $Z_L$ 은 부하 임피던스로 부하저항  $R_L$ 과 부하 리액턴스  $X_L$ , 그리고 단위법 주파수  $\omega$ 로 표시하면

$$Z_L = \frac{R_L}{a} + jX_L \quad (5)$$

이 된다.

발전기가 발전될 때 부하전류  $I_L$ 은 0이 될 수 없으므로 자기여자에 의한 발전 조건식은 다음과 같다.

$$Z_{in} + Z_L = 0 \quad (6)$$

식(6)을 실수부와 허수부로 나누어 표시하면

$$R_a(Z_{in} + Z_L) = 0 \quad (7)$$

$$I_m(Z_{in} + Z_L) = 0 \quad (8)$$

이 된다. 식(6)은 자화 리액턴스  $X_m$ , 여자 커패시터의 용량성 리액턴스  $X_c$ , 그리고  $a$ 의 함수이므로 주어진 부하 임피던스  $Z_L$ 과 발전기의 단위법 속도  $b$ 에 대한  $a$ ,  $X_m$  또는  $a$ ,  $X_c$ 를 식(7)과 (8)을 연립하여 구할 수 있다.

자기여자를 위한 최소 커패시턴스는 동기속도 무부하 시험에서 구한 공극전압  $E_m$ 과  $X_m$ 의 관계식에서 비포화  $X_{m0}$ 를 사용하여  $a$ ,  $X_c$ 를 구하여 계산한다.

또한, 발전기와 단자전압  $V$ 는

$$V = V_a = \frac{1}{\sqrt{3}} V_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} V_2 \quad (9)$$

이다.

따라서 특정한 단자전압  $V$ 를 유지하기 위한  $X_c$ 의 값도 주어진 부하와 발전기 속도를 사용하여 식

(7), (8), (9)를 연립하여 풀면  $X_m$ ,  $X_c$ ,  $a$ 를 동시에 구할 수 있다.

## 2.2 Chan과 Lai의 방법

최소 커패시턴스를 구하기 위하여 Fig. 1의 회로에서 커패시터가 접속된 단자에서 본 다음과 같은 임피던스  $Z'_{in}$ 을 사용하고 있다.

$$Z'_{in} = \frac{Z_L Z_1 + Z_L Z_2 + Z_1 Z_2}{3Z_L + Z_1 + Z_2} = R'_{in} + jX'_L \quad (10)$$

주어진 부하와 속도에 대하여 미포화 자화 리액턴스  $X_{m0}$ 를 사용하면 식(10)은  $a$ 만의 함수가 된다. 자기여자 조건식은

$$Z'_{in} + Z_c = 0 \quad (11)$$

이 되고, 이식을 실수부와 허수부로 분리하면

$$R'_{in}(a) = 0 \quad (12)$$

$$X'_L(a) - \frac{X_c}{a^2} = 0 \quad (13)$$

이 된다. 식(12)에서  $a$ 를 구하고, 이것을 식(13)에 대입하여  $X_c$ 를 구하여 커패시턴스를 계산한다.

또한, 주어진 부하와 속도에 대하여 특정한 단자전압을 유지하기 위한  $X_c$ 도 반복법을 사용하여, 초기 값으로  $a_0 = b$ ,  $E_m = \frac{V}{a_0}$ 로 하여  $E_m$ 과  $X_m$ 의 관계식으로부터  $X_m$ 을 구하고, 식(12)와 (13)에서  $a$ 와  $X_c$ 를 계산하여 식(1)로  $V_1$ 을 구한 다음 정상분 등가회로에서  $E_m$ 을 구하는 과정을 반복하여,  $V_1$ 의 연속 반복 값이 최소가 될 때까지 계산하여 결정하고 있다.

III. 분석결과 및 검토

본 논문의 해석에 사용한 3상 유도기[3]는 농형 4극, 정격 상전압 220[V], 정격 상전류 2.9[A], 정격 주파수 60[Hz]이고 기준 임피던스는 75.86[Ω]이다. 동기회로 정수는 고정자 저항과 리액턴스는 각각  $R_s=0.09175$ [pu]와  $X_s=0.2112$ [pu]이고, 고정자 측으로 환산한 회전자 저항과 리액턴스는 각각  $R_r=0.06354$ [pu]와  $X_r=0.2110$ [pu]이다. 그리고 동기속도 무부하 시험 결과 얻어진 공극전압  $E_m$ 과  $X_m$ 사이의 관계는

$$E_m = 1.71352 - 0.92556X_m^3 + 0.90931X_m^4 - 0.25929X_m^5 \quad (14)$$

으로 주어진다.

Table 1에 제안한 방법과 Chan과 Lai의 방법에 의하여 구한 주파수와 최소 커패시턴스를 역률 1과 0.8의 부하 임피던스가 각각 0.6, 1, 10[pu]의 경우에 대한 결과를 보였다. 이 때 발전기의 속도는 1[pu]로 유지하고 자화리액턴스  $X_m$ 은 미포화 값인 1.7458[pu]를 사용하였고 주파수와 커패시턴스의 용량성 리액턴스의 초기값으로 각각 0.98[pu]와 1[pu]를 적용하였다.

Table 1. Frequency and minimum capacitance by proposed method and Chan and Lai's method

pf	$Z_L$	Proposed method		Chan & Lai's method	
		$a$ [pu]	$C_{min}$ [μF]	$a$ [pu]	$C_{min}$ [μF]
1	0.6	0.96208	64.8272	0.96208	64.8248
	1	0.97435	54.8536	0.97435	54.8562
	10	0.99330	45.934	0.99330	45.9352
0.8	0.6	0.97034	69.7754	0.97304	69.7768
	1	0.97864	60.8705	0.97864	60.8705
	10	0.99354	47.061	0.99354	47.0623

제안한 방법은 부하단자에서 본 임피던스를 실수부

와 허수부로 나누지 않고 응용 소프트웨어의 복소함수의 실수함수와 허수함수 기능을 사용하여 식(7)과 (8)을 적용하였으나 Chan과 Lai의 방법은 여자 커패시터 접속단자에서 본 임피던스를 식(12), (13)과 같이 실수부와 허수부로 나누어 계산하므로 전산처리 전에 계산이 복잡하다.

계산 결과에서 보듯이 제안한 방법에 의한  $a$ 와  $C_{min}$ 의 값이 Chan과 Lai의 것과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 정격단자 전압을 유지하기 위한 커패시턴스의 값을 주파수와 함께 역률 1과 0.8의 부하에 대하여 부하 임피던스가 0.6에서 10[pu]까지 변화시켜 계산한 결과이다. 계산은 식(7), (8), 그리고 (9)를 연립 방정식으로 하여 발전기의 속도는 1[pu], 단자 전압은 1[pu]가 유지되는 것으로 하였다. 초기값으로  $X_m$ 은 동기속도 무부하 시험 결과로 얻어진 식(14)를 이용하여 정상분 동기회로에서  $V_1$ 이 1[pu]에 근사한  $E_m=1.2$ [pu]일 때의 값 1.54275[pu]를,  $a$ 는 0.98[pu]를, 그리고  $X_c$ 는  $Z_L$ 이 2[pu]까지는 0.5[pu]를, 10[pu]까지는 0.6[pu]를 적용하였다.

Table 2. Capacitance required to maintain the terminal voltage at 1[pu]

$Z_L$ [pu]	Power factor=1		Power factor=0.8	
	$a$ [pu]	$C$ [μF]	$a$ [pu]	$C$ [μF]
0.6	0.95972	69.9793	0.96853	73.4716
0.8	0.96674	65.3201	0.97305	69.3918
1	0.97106	63.3945	0.97621	66.6461
2	0.98059	60.4162	0.98325	61.6899
4	0.98773	54.2670	0.98876	55.5260
6	0.98955	53.9039	0.99028	54.5421
8	0.99048	53.6764	0.99100	54.2308
10	0.99104	53.5678	0.99174	54.1533

계산결과 부하가 감소할수록 주파수는 커지고 필요한 커패시턴스는 작아지고 있고 역률이 높은 경우가 낮은 경우에 비해서 주파수는 큰 차이가 없으나 커패시턴스는 약간 작아짐을 알 수 있다.

이들 결과는 Chan과 Lai가 제안한 방법의 결과와 잘 일치하고 있으므로 스타인메츠결선 자기여자 유도 발전기의 운전시 필요한 여자 커패시턴스를 결정하는 간명한 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

스타인메츠 결선 자기여자 유도 발전기의 운전시 필요한 최소 커패시턴스와 특정한 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스의 간명한 결정방법을 제안하였다. 제안한 방법은 부하단자에서 본 임피던스와 자기 여자조건을 사용하여 실수부와 허수부로 분리하지 않고 응용 소프트웨어의 복소함수의 실수 함수와 허수 함수 기능을 사용하여 여자 커패시턴스를 결정함으로써 종래 사용되고 있는 방법에 비해서 전산처리 전의 계산을 대폭 생략할 수 있었다. 방법의 타당성을 Chan과 Lai의 방법과 비교하고 검토하여 입증하였다.

#### 참고문헌

- [1] S.S. Murthy, O.P. Malik and A.K. Tandon, 1982, Analysis of Self-excited Induction Generator, IEE proc., Vol.129, Pt. C, No.6, pp.260-265.
- [2] L. Quazen and G. Mcpherson Jr., 1983, Analysis of the Isolated Induction Generator, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, No.8, pp.2793-2798.
- [3] A.H. Al-Bahrani and N.H. Malik, 1990, 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.
- [4] T.F. Chan, 1999, 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.
- [5] T. Fukami, Y. Kaburaki, S.Kawahara, and T. Miyamoto, 1999, 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.
- [6] T.F. Chan and Loi Lei Lai, 2002, 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.
- [7] 문창호, 좌종근, 2003, 3상유도기를 이용한 단상 자기여자 유도발전기에 해석, 제주대학교 첨단기술 연구소논문집, 제14권, 2호, pp.52-58.