

Analysis of Operating Characteristic of Self Excited Induction Generator with Steinmetz Connection

姜 尚 秀[†] · 左 宗 根^{*}
(Sang-Su Kang · Chong-Keun Jwa)

Abstract - This paper analyzes the operation characteristics of a self excited induction generator with Steinmetz connection. For this analysis, the symmetrical components analysis is used to obtain the related expressions and the excitation capacitance and the magnetizing reactance are determined in turn by the condition of self excitation which includes the input impedance of the generator as viewed across load terminals. Two simultaneous equations of the condition of self excitation itself are solved by using the real and imaginary function in an application software. This method is applied to simulate the operation characteristics when the generator is driven at rated speed and the specified excitation capacitor is connected across the lagging phase. The results show that better operation characteristics except generated frequency are obtained by using relatively large excitation capacitance and resistive load.

Key Words : Induction Generator, Steinmetz Connection, Self-Excited, Operation Characteristics

1. 서 론

근래에 화석에너지의 사용이 급격히 증가하면서 고유가로 인한 경제적인 부담증가와 지구온난화 등의 환경문제가 대두되면서 이에 대한 대책의 하나로 대체에너지의 개발과 보급에 대한 관심이 높아지고 있다. 대체에너지원 중에 풍력, 소수력, 바이오가스 등에 의한 에너지변환장치로 가격과 구조면에서 우수한 유도발전기의 사용 비율이 높아지고 있고 소용량의 경우에 커패시터에 의한 다양한 자기여자 발전기들이 개발되고 있다.

이에 따라, 이 발전기에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 오고 있으며 3상 자기여자 발전기에 대한 대표적인 연구로 Murthy 등[1]은 루우프 임피던스 법에 의하여, Quazen과 Mcpherson[2]은 마더 어드미턴스 법에 의하여 자기여자 발전 조건식을 단위법 주파수와 자화리액턴스의 다항식으로 구성하여 해석하고 있다.

또한, 대체에너지원에 의한 독립 단상전원이 필요한 지역에서 3상으로 운전하는 경우에 비하여 출력은 감소하지만 3상 유도기를 단상 자기여자 유도발전기로 사용하는 경우가 있다. 이에 대한 연구로 Al-Bahrani와 Malik[3]는 부하측에 단일 커패시터가 접속된 델타와 와이 결선된 발전기의 특성을 등가 회로를 구성하여 해석하였다. Chan[4]은 단일 커패시터에 의한 델타결선 발전기와 스타인메츠결선 발전기의 특성을 비교하여

커패시터가 부하단자 상보다 위상이 뒤진상에 접속된 스타인메츠결선 발전기가 좋은 특성이 얻어지는 것을 보였다. Chan과 Lai[5]는 스타인메츠결선 발전기에서 부하와 직렬로 접속된 보상커패시터의 영향을 검토하였고, Fukami 등[6]은 전압 변동을 줄이기 위하여 부하에는 병렬커패시터를 두 개의 상에는 같은 직렬커패시터를 사용한 발전기를 개발하여 해석하였다. Chan과 Lai[7]는 3개의 커패시터와 가상중성점을 사용한 스미스결선 발전기의 특성을 해석하였고, Chan과 Lai[8]는 스타인메츠결선에서 발전을 하기위한 최소 커패시턴스와 특정 단자전압을 유지하기 위한 커패시턴스를 반복법에 의하여 결정하는 방법을 보고하였다.

이상의 스타인메츠결선 자기유도 발전기의 해석에서 커패시터 단자에서 본 임피던스를 사용하여 자기여자 발전조건식을 구성하고 이를 실수부와 허수부로 나누어 실수부에서 발전 주파수를, 허수부에서 커패시턴스를 구하고, 실수부와 허수부로 나눌 때 지루한 대수계산을 해야 하며 특성해석을 위해서 부하 단자에서 본 임피던스를 사용하고 있으므로 그 처리과정이 복잡하게 된다. 이를 개선하기 위하여 강과 좌[9]는 부하단자에서 본 임피던스를 사용하여 여자커패시턴스를 결정하는 방법을 제시하여 Chan과 Lai[8]의 방법과 비교하여 잘 일치함을 확인하였으나 이 방법을 적용한 제반운전특성은 분석되어 있지 않다.

본 논문에서는 스타인메츠결선 자기여자 발전기의 부하단자에서 본 임피던스에 의한 자기여자 조건을 사용하여 아무런 대수계산 없이 응용소프트웨어의 실수함수와 허수함수 기능을 사용하여 최소 커패시턴스와 자화리액턴스를 차례로 결정하여 발전기의 특성을 대칭성분에 의하여 해석할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한, 이 방법에 의하여 서로 다른 여자커패시턴스를 사용한 경우의 발전기 운전특성을 분석하기 위하여

* 正 會 員 : 濟州大學校 電氣電子工學部 教授 · 工博

† 교신저자, 學生會員 : 濟州大學校 電氣工學科 碩士課程

E-mail: kss8583@nate.com

接受日字 : 2008年 8月 27日

最終完了 : 2008年 10月 30日

발전기가 정격속도로 회전한다고 가정하여 부하변화에 따른 변화를 시뮬레이션 하여 분석하고 활용가능성을 검토하고자 한다.

2. 해석이론

단상부하에 전력을 공급하는 단일 여자커패시터에 의하여 운전되는 3상 유도발전기에 대한 스타인메츠결선은 그림 1과 같다. 그림 1에서 보듯이 부하와 여자커패시터가 각각 다른 상에 접속되고 커패시터는 부하가 접속된 상에 대하여 뒤진 상에 연결되어 있다.

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

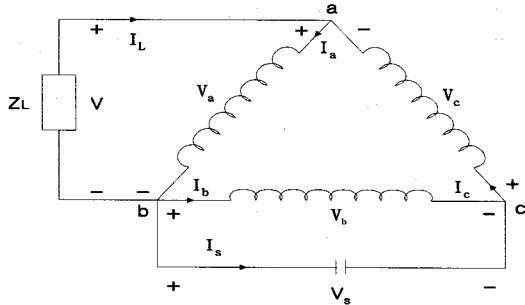


그림 1 스타인메츠결선 자기여자 유도발전기
Fig. 1 Self-excited induction generator with Steinmetz connection

그림 1의 회로에 대하여 전압, 전류평형 식을 세우면

$$V = V_a \tag{1}$$

$$V_a + V_b + V_c = 0 \tag{2}$$

$$I_s = \frac{V_b}{Z_c} = I_c - I_b \tag{3}$$

$$I_L = I_a - I_c \tag{4}$$

이 되고, 여기서 Zc는 여자커패시터의 임피던스이다.

식(1)과 식(3)을 전력불변 변환행렬[10]을 사용하여 대칭 성분인 정상분 전압 V1과 역상분 전압 V2를 구하면

$$V_1 = \frac{Z_c Z_1 - \frac{\alpha}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 Z_2}{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2} \sqrt{3} V \tag{5}$$

$$V_2 = \frac{Z_c Z_2 + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \alpha} Z_1 Z_2}{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2} \sqrt{3} V \tag{6}$$

이 된다. 여기서 Z1과 Z2는 각각 발전기의 정상분과 역상분 임피던스를 α는 연산자로 e^{j $\frac{2\pi}{3}$} 를 표시한다.

이 과정에서 정상분 전류 I1과 역상분 전류 I2는

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \tag{7}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \tag{8}$$

의 관계를 적용하였다.

부하단자에서 본 발전기의 입력임피던스 Zin을 구하면 다음 식과 같다.

$$Z_{in} = \frac{Z_c Z_1 + Z_c Z_2 + Z_1 Z_2}{3Z_c + Z_1 + Z_2} = R_{in} + jX_{in} \tag{9}$$

주어진 부하가 접속되어 자기여자 발전기로 동작할 때 부하와 발전기 회로에 대하여 부하전류에 의한 임피던스강하는 다음식과 같다.

$$(Z_{in} + Z_L) I_L = 0 \tag{10}$$

여기서, ZL은 부하 임피던스로 부하저항 RL과 부하리액턴스 XL 그리고 단위법 주파수 a로 표시하면

$$Z_L = \frac{R_L}{a} + jX_L \tag{11}$$

이 된다.

발전기가 발전되어 부하에 전력을 공급할 때 부하전류 IL은 0이 될 수 없으므로 자기여자에 의한 발전조건식은 다음과 같다.

$$Z_{in} + Z_L = 0 \tag{12}$$

식(12)를 실수부와 허수부로 표시하면

$$R_e(Z_{in} + Z_L) = 0 \tag{13}$$

$$I_m(Z_{in} + Z_L) = 0 \tag{14}$$

이 된다. 이 식은 발전기의 등가회로 정수들이 주어지고 주어진 부하임피던스와 발전기의 단위법속도에 대하여 자화리액턴스 Xm, 여자커패시터의 용량성 리액턴스 Xc, 그리고 a의 함수이다. 먼저 자기여자를 위한 최소 커패시턴스는 동기속도 무부하 시험에서 구한 공극전압 Em과 Xm의 관계식에서 미포화치 Xmu를 적용하여 식(13)과 (14)를 응용소프트웨어의 실수함수와 허수함수기능을 사용하여 a와 Xcu를 구한다. Xcu를 참고로 하여 임의의 Xc를 결정한 후, 이를 사용하여 다시 식(13)과 (14)를 사용하여 위와 같은 방법으로 a와 Xm을 구한다.

다음에 a와 Xm을 사용하여 Em과 Xm의 관계식으로부터 Em을 구하여, 정상분 등가회로로부터 V1을 계산하고, 식(5)로부터 V를, 그리고 식(6)에 V를 대입하여 V2를 계산한다.

식(7)과 (8)에서 I1과 I2가 계산되고 이들로부터 각 상전류

와 식(4)로부터 부하전류가 계산되고 부하 복소전력 S_L 은

$$S_L = V(-I_L)^* = P_L + jQ_L \quad (15)$$

로 구할 수 있다. 여기서 *는 공액 복소수를, P_L 과 Q_L 은 각각 부하전력과 무효전력이다.

3. 분석결과 및 검토

본 논문의 분석에 사용한 3상 유도기[3]는 농형 4극, 정격 상전압 220[V], 상전류 2.9[A], 주파수 60[Hz]이고 기준임피던스는 75.86[Ω]이다. 이 유도기의 단위법으로 표시한 등가회로 정수 고정자 권선저항 R_s 와 리액턴스 X_s , 그리고 고정자측으로 환산한 회전자 권선저항 R_r 과 리액턴스 X_r 를 표 1에 보인다.

표 1 단위법으로 표시한 등가회로 정수
Table 1 Equivalent circuit parameters in per unit

R_s	X_s	X_m	R_r	X_r
0.09175	0.2112	equation (16)	0.06354	0.2110

그리고 동기속도 무부하 시험결과 얻어진 공극전압 E_m 과 자화리액턴스 X_m 사이의 관계는

$$E_m = 1.71352 - 0.92556X_m^3 + 0.9093X_m^4 - 0.25929X_m^5 \quad (16)$$

의 X_m 의 다항식으로 표현한다.

발전기의 부하변화에 따른 제 특성을 분석하기에 앞서 여자 커패시터의 커패시턴스를 구하기 위하여 발전기의 속도 $b=1$ [p.u.]로 유지하고 부하임피던스를 1[p.u.], 그리고 부하역률 0.8인 상태에서 여자리액턴스의 미포화치 $X_{mm}=1.7458$ [p.u.]를 적용하여 식(13)과 (14)에서 커패시터의 용량성 리액턴스 X_c 와 주파수 a 의 초기 값을 각각 1[p.u.]와 0.98[p.u.]를 적용하여 계산한 결과 $C=60.8706$ [μF]와 $a=0.97864$ [p.u.]를 얻었다. 본 논문에서는 이를 기초로 하여 여자커패시터의 커패시턴스를 임의로 $C=65$ [μF]와 $C=100$ [μF]를 사용한 경우에 대한 발전기의 특성을 분석하기 위하여 발전기가 정격속도로 회전한다고 가정하고 부하역률이 각각 1과 0.8일 때 부하변화에 따른 제 특성을 검토한다.

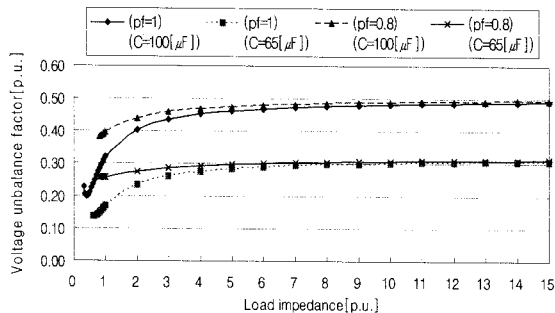


그림 2 부하임피던스에 따른 전압불평형률의 변화
Fig. 2 Variation of voltage unbalance factor with load impedance

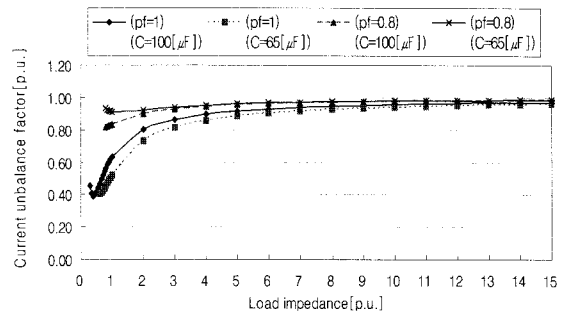


그림 3 부하임피던스에 따른 전류불평형률의 변화
Fig. 3 Variation of current unbalance factor with load impedance

그림 2와 그림 3은 각각 전압불평형률(VUF)과 전류불평형률(CUF)이 여자커패시턴스와 부하역률에 따른 변화를 보이는 것으로 둘 다 부하임피던스가 작을 때 변동률 값이 비교적 작고 변동정도가 크며 부하임피던스가 커짐에 따라 변동률은 커지고 변동은 작음을 알 수 있다. 전압불평형률은 여자커패시턴스가 65[μF]일 때가 작고 역률이 1인 경우가 작으며, 전류 불평형률은 역률이 1일 때가 작고 여자커패시턴스가 65[μF]일 때가 역률에 따른 변화폭이 크며, 전류의 불평형이 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

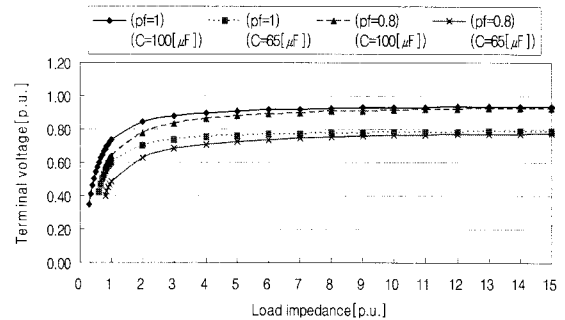


그림 4 부하임피던스에 따른 단자전압의 변화
Fig. 4 Variation of terminal voltage with load impedance

부하임피던스에 따른 발전기 단자전압 변화를 그림 4에 보인다. 그림 4에서 보듯이 부하임피던스가 작을 때 단자전압이 낮고 부하임피던스가 커짐에 따라 전압이 높아지고 있으며, 100[μF]를 사용하고 역률이 1인 경우가 상대적으로 전압이 높음을 알 수 있다.

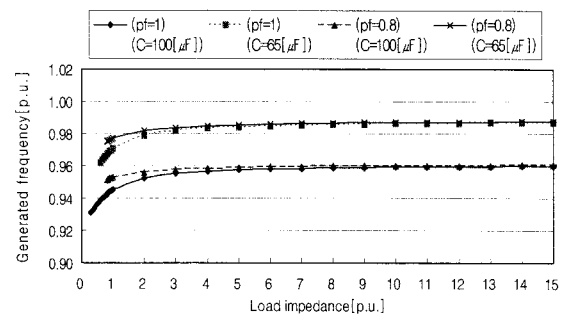


그림 5 부하임피던스에 따른 발전주파수의 변화
Fig. 5 Variation of generated frequency with load impedance

그림 5는 발전주파수의 변화로 부하임피던스가 작을 때 주파수가 낮고 부하임피던스가 커짐에 따라 높아지고 있다. 65[μ F]를 사용한 경우가 주파수가 높으며 역률이 0.8인 경우가 높음을 알 수 있다.

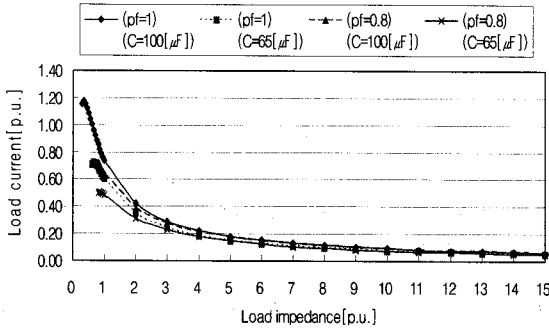


그림 6 부하임피던스에 따른 부하전류의 변화
Fig. 6 Variation of load current with load impedance

부하임피던스에 따른 부하전류 변화를 그림 6에 보인다. 그림 6에서 알 수 있듯이 100[μ F]를 사용하고 역률이 1인 경우가 상대적으로 부하전류가 많이 흐르며, 모든 경우에서 부하임피던스 증가에 따라 전류가 지수 함수적으로 감소하고 있다.

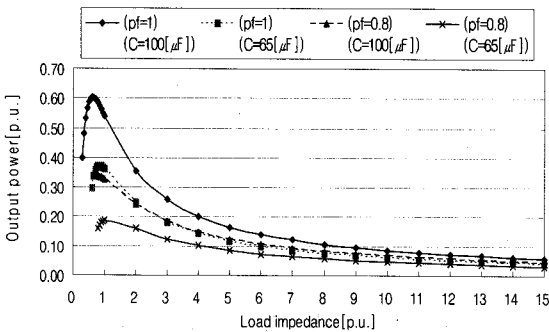


그림 7 부하임피던스에 따른 출력전력의 변화
Fig. 7 Variation of output power with load impedance

그림 7은 발전기 부하임피던스에 따른 출력전력의 변화를 나타낸 것으로 부하임피던스가 작을 때 여자커패시턴스와 역률에 따라 변화정도가 크게 나타나고 있음을 보이고 있다. 그림 7에서 보듯이 100[μ F]일 때와 역률이 1일 때가 큰 출력이 얻어짐을 알 수 있다. 또한, 최대출력도 여자커패시턴스와 역률에 따라 다른 부하임피던스 값에서 발생하고 있다. 즉, 100[μ F]와 역률 1일 때는 $Z_L=0.6$ [p.u.]에서 $P=0.60311$ [p.u.] 이고, 100[μ F]와 역률 0.8일 때는 $Z_L=0.8$ [p.u.]에서 $P=0.33724$ [p.u.] 이며, 65[μ F]와 역률 1일 때는 $Z_L=0.85$ [p.u.]에서 $P=0.37306$ [p.u.] 이고, 65[μ F]와 역률 0.8일 때는 $Z_L=1$ [p.u.]에서 $P=0.18759$ [p.u.] 이다.

이상의 분석결과에서 보듯이 발전기를 정속도로 운전할 때 발전주파수를 제외하고 여자커패시턴스를 비교적 크게 하고 부하역률이 좋은 저항성 부하일 때가 발전기의 운전특성이 좋아지므로 발전기 운전 전에 제반특성들을 검토하여 운전하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

여자커패시터가 부하가 접속된 상에 대하여 뒤진상에 연결된 스타인메츠 자기여자 유도발전기의 운전특성을 분석하였다. 이를 위하여 부하가 접속된 단자에서 본 발전기의 입력임피던스에 의한 자기여자 조건식 자체를 응용소프트웨어의 실수 함수와 허수 함수 기능을 사용하여 여자커패시턴스와 자화 리액턴스를 차례로 결정하여 대칭성분에 의하여 해석하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 종래의 해석방법에 비하여 전산처리의 대수계산을 대폭 생략할 수 있으며 제안한 방법에 의하여 발전기를 정속도로 운전할 때의 운전특성을 시뮬레이션 하여 분석한 결과 발전주파수를 제외하고 비교적 큰 여자커패시터를 사용하고 저항성 부하에 전력을 공급하는 경우가 운전특성이 양호함을 확인하였다.

따라서 대체에너지원에 의하여 독립 단상전원으로 스타인메츠 자기여자 유도발전기를 사용할 경우 운전 전에 제시한 방법을 사용하여 부하운전에 적합한 여자커패시턴스의 선정은 물론 운전 특성을 시뮬레이션 하여 분석함으로써 운전 효율을 높일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S.S. Murthy, O.P. Malik and A.K. Tandon, Analysis of Self-excited Induction Generator, IEE Proc., Vol. 129, Pt. C, No. 6, pp. 260-265, November 1982.
- [2] L. Quazen and G. Mcpherson Jr., Analysis of the Isolated Induction Generator, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, No. 8, pp. 2793-2798, August 1983.
- [3] A.H. Al-Bahrani and N.H. Malik, 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, December 1990.
- [4] T.F. Chan, 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, December 1999.
- [5] T.F. Chan and L.L. Lai, Steady-state analysis and performance of a single-phase self-regulated self-excited induction generator, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 2, pp. 233-241, March 2002.
- [6] T. Fukami, Y. Kaburaki, S. Kawahara, and T. Miyamoto, 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, September 1999.
- [7] T.F. Chan and Loi Lei Lai, Single-phase Operation of a Three-Phase Induction Generator With the Smith Connection, IEEE Trans. on EC, Vol. 17, No. 1, pp. 47-54, March 2002.
- [8] T.F. Chan and Loi Lei Lai, 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, March 2002.

- [9] 강상수, 좌종근, 스타인메츠결선 자기여자 유도발전기의 커패시턴스 결정, 제주대학교 첨단기술연구소 논문집, 제 18권, PP.13-17, 2007. 12.
- [10] J.E. Brown and C.S. Jha, The starting of a 3-Phase induction motor connected to a Single-phase supply system, Proc. Inst. Elect. Eng. A, Vol. 106, pp. 183-190, April 1959.

저 자 소 개



강 상 수 (姜尙秀)

1981년 12월 23일생. 2007년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2007~현재 동 대학원 석사과정

Tel : 064) 754-3670

Fax : 064) 756-5281

E-mail : kss8583@nate.com



좌 종 근 (左宗根)

1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업.
1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1983~1984 Purdue Univ. visiting scholar.
1979~현재 제주대학교 전기전자 공학부 교수.

Tel : 064) 754-3671

Fax : 064) 756-5281

E-mail : keunjc@cheju.ac.k