

## 독립 유도발전기의 정상상태 해석

김도진\* · 좌종근\*\*

### Steady State Analysis of Isolated Induction Generator

Do-Jin Kim\* and Chong-Keun Jwa\*\*

#### ABSTRACT

This Paper describes a method of steady state analysis of isolated self excited induction generator using the loop impedance method. In this method, the complex loop impedance based on the condition of self excitation need not be divided into two parts, the real part and imaginary part. This involves the simplest algebraic calculations, but the accuracy of this is as good as the conventional method. The availability of this method is verified by comparing the results of this method with those of conventional.

**Key Words** : Steady state, induction generator, loop impedance method

#### 1. 서론

지구 대기중의 전 전력은  $10^{14}$ [MW]로 계산되어 왔고 이 가운데 풍력의 잠재전력은  $10^6$ [MW]로 평가되고 있다[1]. 한편, 화석에너지자원 고갈과 환경 문제로 대체에너지원에 관심을 가지게 되었고 그 가운데에서도 풍력발전시스템은 오래전부터 관심의 대상이 되어 왔다.

이 시스템의 하나로 사용되는 독립 자기여자 3상 농형 유도 발전기는 다른 발전기에 비해서 경제적이며 구조가 간단하고 유지보수가 용이하다는 장점으로 널리 사용되고 있다. 이 발전기는 계통 연계운전시와는

달리 단자전압과 주파수를 계산하여야 하며 이 과정이 기기의 자기포화 때문에 복잡하게 되고 포화조건에서 대응하는 적절한 정수를 선택하는 것이 필요하다. 등가회로에 의한 정상상태 해석에서는 등가회로 정수, 단자 커패시턴스, 속도, 그리고 부하조건이 주어졌을 때 단자전압과 주파수를 구하게 된다[2].

등가회로에 의한 정상상태 해석방법도 루우프 임피던스법과 마디 어드미턴스법이 발전기의 성능을 예측하는데 사용되고 있다[1,2,4,5]. 그러나 자기여자 조건에 의한 루우프 임피던스나 마디 어드미턴스의 실수부와 허수부로 구성된 연립방정식이나 고차다항식을 구성하는데 길고 복잡한 대수계산이 필요하게 된다. 더구나 이들 식의 계수들은 등가회로 모델에 따라 변화한다. 즉, 부하조건이나 철손을 고려하거나 또는 보상 용량성 리액턴스를 추가하는 경우는 방정식들이나 다항식의 차수가 달라진다[6]. 이와는 다르게 연산등가회로를 사용한 방법도 있으나 이 또한 미분연산자

\* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소

Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Res. Inst. Adv. Tech., Cheju Nat'l Univ.

에 의한 고차다항식을 구성하여 푸는 문제로 처리과정이 복잡하다[3].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 마디 어드미턴스를 실수부와 허수부만으로 분리하여 반복법에 의하여 실수부로는 단위법 주파수를 허수부로는 자화리액턴스를 구하는 방법이 발표되었다[6]. 루우프 임피던스와 마디 어드미턴스를 실수부와 허수부만으로 단순하게 나누어 수치해석방법이나 응용 소프트웨어를 사용하는 방법도 발표되었다[7]. 그러나 이들 방법은 모두 자기여자 조건을 실수부와 허수부로 나누어 각각 적용하고 있다.

본 논문에서는 루우프 임피던스법을 사용하여 정상 상태에서 독립 자기여자 유도발전기를 해석하였다. 기존의 방법과 다르게, 임피던스의 실수부와 허수부로 분리하여 연립방정식을 풀지않고 자기여자에 의한 복소 루우프 임피던스 자체를 해석할 수 있는 간명한 방법을 제안하였다. 또한 제안한 방법의 유용성을 검증된 회로정수를 사용하여 확인하고 단자전압과 주파수특성을 검토하였다.

## II. 해석이론

독립 유도발전기의 정상상태 해석을 위하여 다음의 가정을 둔다.

- 1) 자기포화의 영향을 받는다고 가정한 자화리액턴스를 제외하고 모든 등가회로정수는 상수로 본다.
- 2) 기기의 철손은 무시한다.
- 3) 공간고조파와 시간고조파 기자력은 무시한다.

이상의 가정하에서의 IEEE 권장 T형 등가회로는 Fig. 1과 같다.

이 등가회로에서 각 기호는 다음과 같고 회전자측의 값은 고정자측으로 환산한 값이다.

- $R_1, R_2$  : 고정자와 회전자 저항
- $X_1, X_2$  : 고정자와 회전자 누설 리액턴스
- $X_m$  : 자화 리액턴스
- $X_C$  : 단자 커패시터의 커패시턴스

- $R_L$  : 부하저항
- a, b : 단위법 주파수와 속도
- $I_1, I_2, I_L$  : 고정자, 회전자, 그리고 부하전류
- $V_L, E_1$  : 단자전압과 공극전압

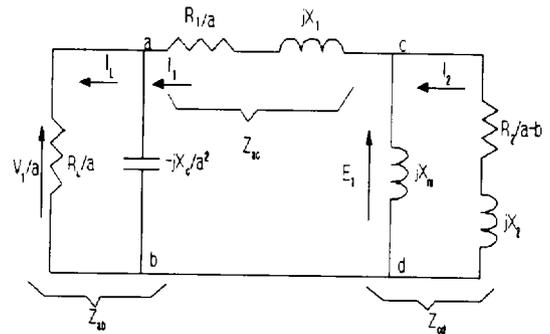


Fig. 1. Per phase equivalent circuit of isolated induction generator with resistance load

## 2.1 최소 커패시터의 결정

독립 유도발전기가 발전하기 위한 최소 커패시턴스의 값을 루우프 임피던스법에 의해서 결정한다. Fig. 1.에서 자기여자에 의하여 발전할 경우 루우프 acdba에 의하여 루우프 방정식을 세우면

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

이고, 여기서

$$Z = Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd} \tag{2}$$

이며, 각 가지 임피던스는

$$Z_{ab} = \frac{R_L}{a} // -j\frac{X_C}{a^2} \tag{3}$$

$$Z_{ac} = \frac{R_1}{a} + jX_1 \tag{4}$$

$$Z_{cd} = jX_m // (\frac{R_2}{a-b} + jX_2) \tag{5}$$

이다.

자기여자에 의하여 발전하는 경우에는  $I \neq 0$  이므로 루우프 전 임피던스  $Z=0$  이 되어야 한다. 즉,

이 때의 루우프 전 임피던스는

$$Z = \frac{-j \frac{X_L R_L}{a^3}}{\frac{R_L}{a} - j \frac{X_C}{a^2}} + \frac{R_1}{a} + jX_1 + \frac{jX_m \left( \frac{R_2}{a-b} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{a-b} + j(X_m + X_2)} \quad (6)$$

이다.

상수인 회로정수 그리고 주어진 부하저항과 발전기 속도에서 발전하는데 필요한 최소 커패시턴스를 다음과 같이 결정한다. 식 (6)을  $X_C$  와  $a$  의 함수로하여 이들식에 포함된  $X_m$  의 값을 동기속도 무부하시험에서 얻어진 미포화값  $X_{mu}$  로 하여  $X_C$  의 최소값과  $a$  를 구한다. 즉,

$$f(X_C, a) = Z \quad (7)$$

로 하고  $Z=0$ 의 조건을 이용하여 식 (7)을 응용소프트 웨어를 이용하여 푼다.

## 2.2 자화리액턴스의 결정과 특성계산

주어진 저항부하와 발전기 속도에서의 발전기 특성을 계산하기 위하여 전철에서 구한 커패시턴스의 최소치보다 큰값으로  $X_C$ 를 적절히 선정한다. 식 (6)을  $X_m$ 과  $a$ 의 함수로하여 이들식에 포함된  $X_m$ 의 값을 위 식에서 정한  $X_C$  를 사용하여 구한다. 즉,

$$g(X_m, a) = Z \quad (8)$$

로 하고  $Z=0$ 의 조건을 이용하여  $X_m$ 과  $a$ 를 구한다.

동기속도 무부하시험에서 얻어진 공극전압  $E_1$ 과  $X_m$ 사이의 관계곡선을 선형근사화 하여 다음과 같이 나타낸다.

$$E_1 = K_1 + K_2 X_m \quad (9)$$

위의 결과와 이 식에 의하여  $E_1$ 이 결정되면 특성은 다음 식들에 의해 구할 수 있다.

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_1}{a} + jX_1 + \frac{-j \frac{R_L X_C}{a^3}}{\frac{R_L}{a} - j \frac{X_C}{a^2}}} \quad (10)$$

$$I_2 = \frac{-E_1}{\frac{R_2}{a-b} + jX_2} \quad (11)$$

$$I_L = \frac{-j \frac{X_C}{a^2}}{\frac{R_L}{a} - j \frac{X_C}{a^2}} I_1 \quad (12)$$

$$V_L = R_L I_L \quad (13)$$

입력  $P_{in}$  과 출력  $P_{out}$  은

$$P_{in} = -3|I_2|^2 \frac{R_2}{a-b} \quad (14)$$

$$P_{out} = 3|I_L|^2 R_L \quad (15)$$

로 구한다.

이상의 제안한 방법은 복소 루우프 임피던스 자체를 사용하고 있으므로 대수계산이 거의 필요 없으며 미지수를 달리할 경우 식을 재구성할 필요없고 회로 조건이 달라질 경우는 최소의 수정으로 단순하고 능률적으로 해석이 가능하다.

## III. 사례연구

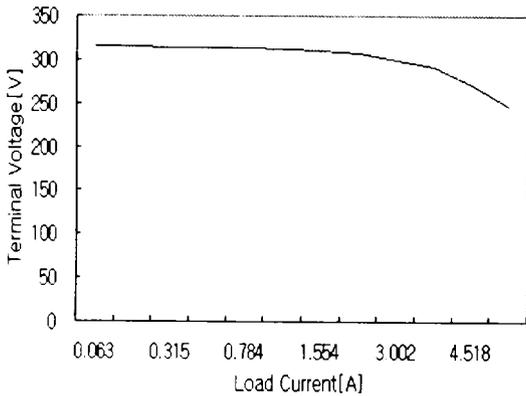
제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 사용한 기기[3]는 정격전압 230[V], 정격전류 8.2[A], 정격출력 2.9[HP], 그리고 정격주파수 50[Hz]의 4극 델타결선된 농형유도기이다. 이 기기의 권선저항 측정, 구속시험, 그리고 동기속도 무부하시험 결과의 등가회로 정수는  $R_1=3.0[\Omega]$ ,  $R_2=3.4[\Omega]$ ,  $X_1=X_2=4.5[\Omega]$ , 그리고 미포화 자화리액턴스  $X_{mu}=106.322[\Omega]$ 이다. 동기속도 무부하시험의 결과 공극전압과 자화리액턴스의 관계식인 식 (9)의 계수는  $K_1=385$ 이며  $K_2=-1.74$ 이다. 독립발전기가 부하저항을 기준임피던스인 48.52 [ $\Omega$ ]을 걸고 동기속도 즉  $b=1$ 로 운전할 때 최소 커패시턴스와 주파수를 계산하고 그 결과와 종래의 방

법의 결과를 Table 1에 보였다.

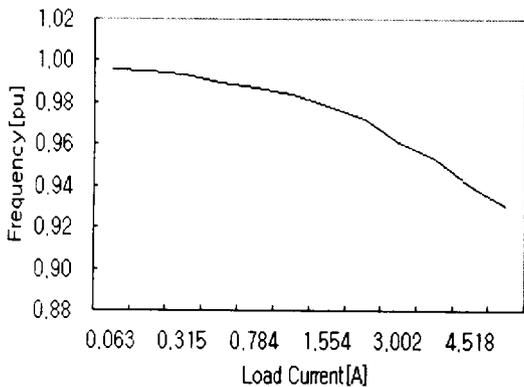
Table 1. Comparison of minimum capacitance and frequency between conventional method and proposed method

method \ parameters	$C_{min}[\mu F]$	a
conventional	43.1668	0.92910
proposed	43.1670	0.92910

이 결과에서 보듯이 두 결과가 잘 일치하고 있으므로 제안한 방법으로 발전기의 특성을 충분히 능률적으로 해석할 수 있음을 알 수 있다.



a) Voltage characteristics



b) Frequency characteristic

Fig. 2. Load characteristics of isolated induction generator.

해석 예로서 발전기의 부하저항이 5000[Ω]에서 50[Ω]까지 변화할 때의 상전압과 주파수의 부하특성을 검토한다. 이 때 발전기의 단자 커패시턴스는 위의 계산한 값을 고려하여  $C=45[\mu F]$ 를 사용하였다. 계산결과를 Fig. 2. a)에는 전압특성을, b)에는 주파수 특성을 각각 보였다.

이 결과에서 보는 바와 같이 단자전압은 부하증가에 따라 서서히 감소하는 분권발전기 특성을 보이고 있고 주파수는 회전수가 일정하더라도 부하증가에 따라 감소하는 유도기의 특성을 나타내고 있다. 따라서 제안한 방법이 독립 유도발전기의 정상상태 해석을 최소의 계산으로 효율적으로 계산할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 사례연구

정상상태에서 독립 자기여자 3상 유도발전기를 루우프 임피던스법에 의하여 해석하였다. 제안한 방법은 자기여자 조건을 이용한 복소 루우프 임피던스에 직접 적용하여 최소 커패시턴스와 주파수를 구하고 식의 변형없이 자화리액턴스와 주파수를 구할 수 있다. 이 방법은 종래 사용되어 오는 루우프 임피던스의 실수부와 허수부로 나누어 연립방정식을 구성하여 해석하는 경우 보다 한결 간단하고 명료하게 해석할 수 있었다. 방법의 유용성을 이미 발표된 문헌의 회로정수를 사용하여 종래의 방법과 제안한 방법의 계산결과를 비교하여 확인하였고 이 발전기의 부하특성도 해석하였다.

#### 참고문헌

- 1) L.Quazen and G.Mcpherson. 1983. "Analysis of the Isolated Induction Generator". *IEEE Trans. on PAS*. Vol. PAS-102. No.8. pp.2793-2797.
- 2) S.S.Murthy, O.P.Malik, and A.K.Tandon. 1982. "Analysis of Self-excited Induction Generators". *IEE Proc.*, vol. 129, pt.C. No.6. pp.260-265.
- 3) A.K.Tandon, S.S. Murthy, and G.J. Berg. 1984.

- "Steady State Analysis of Capacitor Self-excited Induction Generators". *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-103, No.3, pp.612-618.
- 4) N.H.Malik and S.E.Haque. 1986. "Steady State Analysis and Performance of an Isolated Self-excited Induction Generator". *IEEE Trans. on EC*, Vol.EC-1, No.3, pp.134-139.
- 5) L.Shridher, B.Singh, and C.S.Jha. 1993. "A Step Towards Improvement in the Characteristics of Self Excited Induction Generator". *IEEE Trans. on EC*, Vol. 8, No.1, pp.40-46.
- 6) T.F.Chan. 1995. "Analysis of Self-excited Induction Generators using an Iterative Method". *IEEE Trans. on EC*, Vol.10, No.3, pp.502-507.
- 7) 진충민, 좌종근. 2000. "자기여자 유도발전기의 최소 커패시턴스의 결정법". 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.729-731.