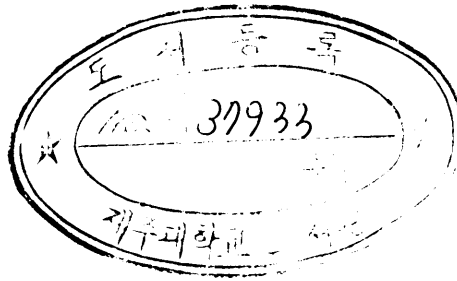


17
562.43
7 658H

碩士學位論文

불평형 비정현파 선간전압 조건하에서의
계통연계 유도발전기의 해석



濟州大學校 大學院

電氣工學科

趙 榕 哲

1998年 12月

불평형 비정현파 선간전압 조건하에서의
계통연계 유도발전기의 해석

指導教授 左 宗 根

趙 榕 哲

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1998年 12月

趙榕哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

1998年 12月

Analysis of Grid Connected Induction Generators
under Unbalanced Nonsinusoidal Line Voltage
Conditions

Young-Cheol Jo

(Supervised by professor Chong-Keun Jwa)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1998. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	3
II. 유도기의 등가회로	6
1. 유도기의 등가회로 구성	6
1.1 n 차 고조파 전압에 대한 등가회로	6
1.2 불평형 비정현파전압에 의한 등가회로	10
2. 등가회로 정수의 결정	13
2.1 고정자 권선저항 측정	13
2.2 초기 값의 산정	14
2.3 연립방정식의 구성	16
III. 유도발전기의 해석	19

1. 3상 불평형 비정현파 그리드 전압인가시	19
2. 단상 비정현파 그리드 전압인가시	23
IV. 실험결과 및 고찰	25
1. 회로정수의 결정	25
2. 유도발전기 해석	28
2.1 불평형전압을 인가하였을 때	28
2.2 단상일 경우	35
V. 결 론	37
참고문헌	38

Summary

This paper presents an analysis of steady state characteristics of induction generator that has no neutral connection, under unbalanced nonsinusoidal grid line voltage condition. For this analysis, we propose determining method of T-type equivalent circuit parameters. By the conventional determining method of Sen and Sarma, parameters are determined from open secondary circuit at no-load test and parallel circuit of exciting reactance and secondary impedance at blocked-rotor test. In the proposed method, parameters can be determined by four simultaneous equations obtained from T-type equivalent circuit conditions by using the results of no-load and blocked-rotor tests. Initial values for solving these equations are evaluated from simplified equivalent circuit and parameters are determined using iterative computation. The performance characteristics are computed by not only parameters of the test and the design data of a manufacturer but also proposed parameters. Symmetrical component and double revolving field theory are applied for unbalanced voltage analysis, and harmonic analysis is used for nonsinusoidal analysis. The analysis is restricted under unbalance grid voltage condition, but it is considered that this

analysis can be applied under unbalanced nonsinusoidal grid voltage condition, because results computed by proposed parameters are good agreement with measured results. Therefore, we will be able to expect good results in steady state analysis of induction generators by using proposed method of analysis and determining method of parameters.

I. 서 론

근래에 들어서면서 화석에너지의 고갈에 직면하고 환경의 중요성이 부각되면서 대체에너지자원으로 소수력이나 풍력에너지의 이용에 대한 관심이 높아지고 있다. 이들 에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 중소용량 발전기로 농형 유도발전기가 다른 발전기에 비하여 저렴한 가격과 적은 유지보수, 그리고 견고한 회전자를 가지며 비동기운전을 하는 등의 이점으로 많이 사용되고 있다. 이에 따라 이 발전기가 전력계통에 연계되어 운전하는 경우가 많으므로 계통의 상태에 따른 정도 높은 특성해석이 요구되고 있다. 이를 위하여 적절한 등가회로와 회로정수 산정이 필수적이며 적합한 해석이론의 도출이 필요하다.

유도기의 정상상태에서의 동작특성을 정확하게 해석하기 위하여 여러 가지 등가회로와 회로정수 결정법이 제안되어져 왔으며, KS C-4201(Korean Standards, 1986), JEC-37(일본전기학회, 1967) 그리고 IEEE Std 112-1996(IEEE Power Engineering Society, 1998)에 상세하게 설명되고 있다. 이들 규정 중에서 무부하시험은 정격주파수의 정격전압으로 시험하게 되어있고, 구속시험에서는 특수 농형 전동기나 대용량 권선형 유도전동기는 정격주파수, 이외에 정격의 50% 주파수의 정격전류로 시험하도록 되어있다. IEEE 표준시험방법에서는 정격의 25% 주파수로 시험하도록 되어 있으나 20Hp이하의 전동기에서는 정격주파수만으로도 시험할 수 있다(Sen, 1997). 또한 T

형 등가회로의 회로정수결정방법으로 Sen과 Sarma(1994)는 무부하시험시 2차 회로를 개방하고 구속시험시 여자리액턴스 X_m 과 2차 임피던스 Z_2 를 병렬 합성하여 정수를 결정하고, Ishizaki and Hirayama (1967)는 변형된 T형 등가회로를 사용하여 1차 및 2차 누설리액턴스를 분리하지 않고 정수를 결정하고 있다. 그러나 이 정수결정방법들에는 등가회로에서 각 시험조건을 고려하여 개략적으로 계산하는 부분들이 있으므로 특성계산시 오차의 원인이 될 수 있다.

그리고 유도발전기가 계통에 연계운전될 때에 계통조건에 따른 해석이 필요하게 됨에 따라 초기의 연구로서 변화하는 전압과 주파수 조건아래에서의 계통연계 유도발전기의 특성에서는 한정된 변화범위 내에서 계통전압과 주파수의 동요에 인한 성능의 악화는 아주 크지 않음을 보이고 있다 (Murthy 등, 1990). 이 연구의 연장으로 계통전압이 불평형인 경우의 해석에서는 이론적 모델에 자기포화영향을 고려한 전압의존 회로정수를 가지고 재구성하여 특성을 해석하고 있다. 해석결과 불평형 운전이 발전기와 시스템 성능에 큰 영향을 준다는 것을 보이고 있다(Ghorashi 등, 1994).

본 연구에서는 등가회로 결정시 오차의 원인이 되는 시험조건을 모두 고려하여 정밀하게 정수를 결정하는 새로운 정수결정법을 제안하였다(조용철 등, 1998). 또한 제안된 정수결정법에 의해 구하여진 정수와 Sen과 Sarma의 정수결정법에 의한 정수를 가지고 실험치와 비교하여 제안된 정수결정법이 보다 정밀한 정수를 구할 수 있음을 확인하였다.

또한 유도발전기가 비정현과의 불평형전압으로 운전되는 경우에 대한 해석이 발표되어 있지 않으므로 이의 기초적인 해석을 중성점 비접지 유도발전기를 대상으로 하여 제시하였다. 이에 대한 해석은 3상과 단상으로 나누어 해석하였고 불평형 전압인가시의 해석은 대칭좌표법과 2회전자계설을 이용하고 비정현과 전압인가시의 해석은 조과분석을 이용하였다. 해석결과를 검증하기 위하여 제안된 회로정수를 사용하여 특성을 계산하고 실험치와 비교하여 본 연구의 해석방법이 타당함을 보이고자 하였다.

II. 유도기의 등가회로

1. 유도기의 등가회로 구성

1.1 n 차 고조파 전압에 대한 등가회로

유도기에 n 차 고조파전압 V_{n1} 이 인가되었다고 하면 슬립 s_n 일 때 고정자 및 회전자의 회로에는 다음과 같은 방정식이 성립된다(일본전기학회, 1970).

$$\begin{aligned} V_{n1} &= (r_1 + jnX_1)I_{n1} + jnX_m I_{n2} \\ 0 &= jnX_m I_{n1} + \left(\frac{r_2}{s_n} + jnX_2\right)I_{n2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

V_{n1} : n 차 고조파 1차 상전압

I_{n1} : n 차 고조파 1차 상전류

I_{n2} : n 차 고조파 2차 상전류

r_1 : 1차 권선 1상의 저항

r_2 : 2차 권선 1상의 저항

X_m : 1차 및 2차 권선의 상호리액턴스

X_1 : 1차 권선 1상의 자기리액턴스

X_2 : 2차 권선 1상의 자기리액턴스

이다.

식 (1)을 Matrix 형식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + jnX_1 & jnX_m \\ jnX_m & r_2/s_n + jnX_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n1} \\ I_{n2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

가 되고, 또 행렬

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

를 이용하여 회로변환을 하면 전류는

$$\begin{bmatrix} I_{n1} \\ I_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n1} \\ I_{n2}' \end{bmatrix} \quad (4)$$

같이 변환된다. 따라서 전압 및 임피던스 행렬에 대해서도 이 행렬[C]로 변환하면 전압 및 전류의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + jnX_1 & jn\alpha X_m \\ jn\alpha X_m & \alpha^2(r_2/s_n + jnX_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n1} \\ I_{n2}' \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 식으로부터 Fig. 1과 같은 n 차 고조파전압을 인가했을 때의 등가회로를 그릴 수 있다.

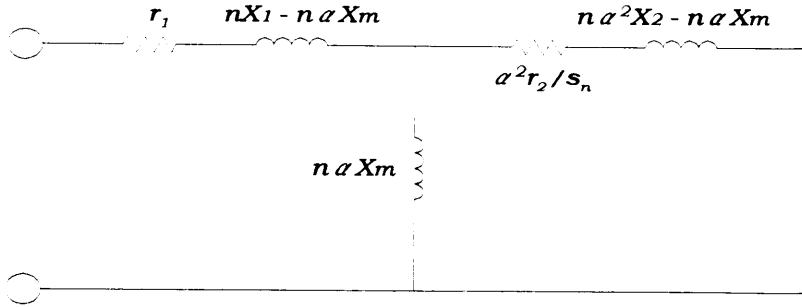


Fig. 1 Equivalent circuit for the n th harmonic voltage

여기서 $\alpha = u_e = \frac{k_{u1} Z_1}{k_{u2} Z_2}$ (실효권수비)로 하면 Fig. 1의 임피던스는 다음과 같이 된다.

$$nx_0 = u_e nX_m \quad nx_0' = nX_m / u_e \quad (6)$$

이므로

$$\begin{aligned} nX_1 - n\alpha X_m &= nx_1 \\ n\alpha X_m &= u_e nX_m = nx_0 \\ n\alpha^2 X_2 - n\alpha X_m &= u_e^2 x_2 = nx_2' \\ \alpha^2 r_2 &= u_e^2 r_2 = r_2' \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 x_0 : 1차측에서 본 여자리액턴스

r_2', x_2' : 1차측에 환산한 2차측의 저항 및 누설리액턴스

이런 임피던스를 이용한 Fig. 1은 Fig. 2로 된다.

지금까지는 무부하손을 고려하지 않았으므로 이 등가회로에 무부하손을 대표하는 저항을 여자리액턴스와 직렬로 접속하고, 2차 전류 I_{n2}' 대신에 이

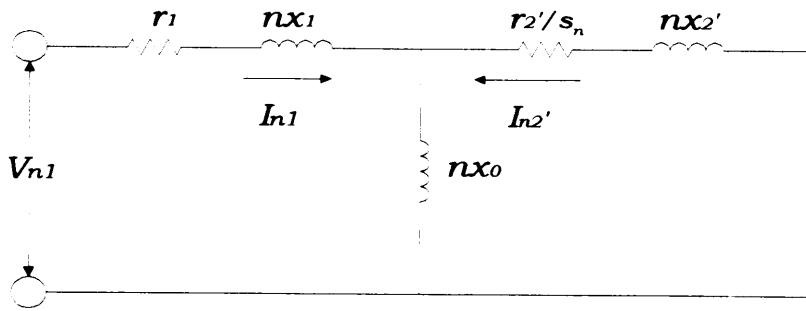


Fig. 2 Equivalent circuit ($\alpha = u_e$)

와 크기가 같고 방향이 반대인 1차 부하전류 I_{n1}' 으로 생각을 하면 Fig. 3 이 되는데 이것이 무부하손을 고려한 등가회로이다.

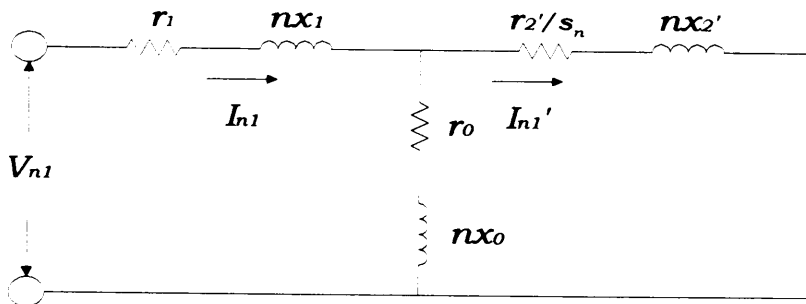


Fig. 3 T-type equivalent circuit

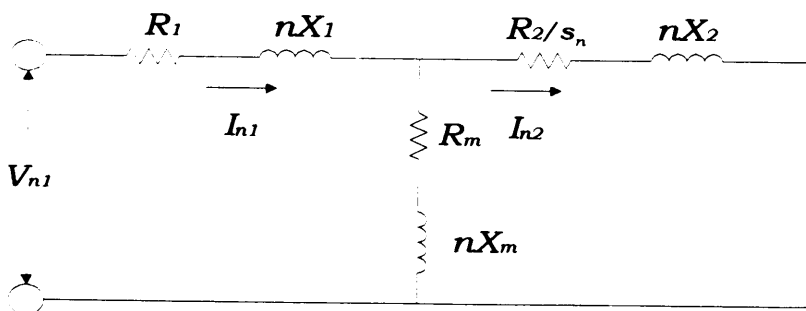


Fig. 4 Equivalent circuit of induction motor

불평형정현과 3상전압이므로 각 고조파 3상전압도 양성분으로 분해하여 치환하면 된다. 이때 기본파 및 차수가 $n=3h+1$ ($h=2,4,6,\dots$)인 고조파 전압의 전류에 의한 회전자속의 회전방향은 공급전압의 상회전방향(유도기의 회전방향)과 동일하고 차수가 $n=3h+2$ ($h=1,3,5,\dots$)인 고조파전압의 전류에 의한 회전자속의 회전방향은 상회전방향과 반대이므로 기본파 및 차수가 $n=3h+1$ ($h=2,4,6,\dots$)인 전압의 정상분에 의한 전류가 만드는 회전자속과 차수가 $n=3h+2$ ($h=1,3,5,\dots$)인 전압의 역상분에 의한 전류가 만드는 회전자속은 정상분으로 치환해야 한다.

전동기의 극수를 P , 회전수를 $N(RPM)$, 기본파전압의 주파수를 $f(Hz)$ 라 하면 기본파에 대한 동기속도는 $N_s = \frac{120f}{P}$ [RPM]이므로 n 차 고조파전압의 주파수 $nf(Hz)$ 에 대한 동기속도는 nN_s 이고 n 차 고조파전압의 정상분 전압이 인가될 때의 슬립은 $s_n = \frac{nN_s - N}{nN_s}$ 이다. 그리고 역상분전압이 인가될 때는 $\frac{nN_s + N}{nN_s} = 2 - s_n$ 이다.

여기서 $N = (1 - s_1)N_s$ 이므로 $s_n = \frac{n - (1 - s_1)}{n}$ 이며 이를 고려하여 불평형 비정현과 전압이 인가될 때의 T형 등가회로는 Fig. 5와 같이 된다.

이 등가회로에서 R_1 과 X_1 은 고정자 권선저항과 리액턴스, R_2 와 X_2 는 회전자 권선저항과 리액턴스(고정자측 환산치), 그리고 R_m 과 X_m 은 무부하손을 대표하는 저항과 여자리액턴스이다. 그리고 첨자가 두 개있는 기호에서 제

1첨자는 고조파의 차수, 제2첨자에서 1은 정상분이고 2는 역상분을 표시한다.

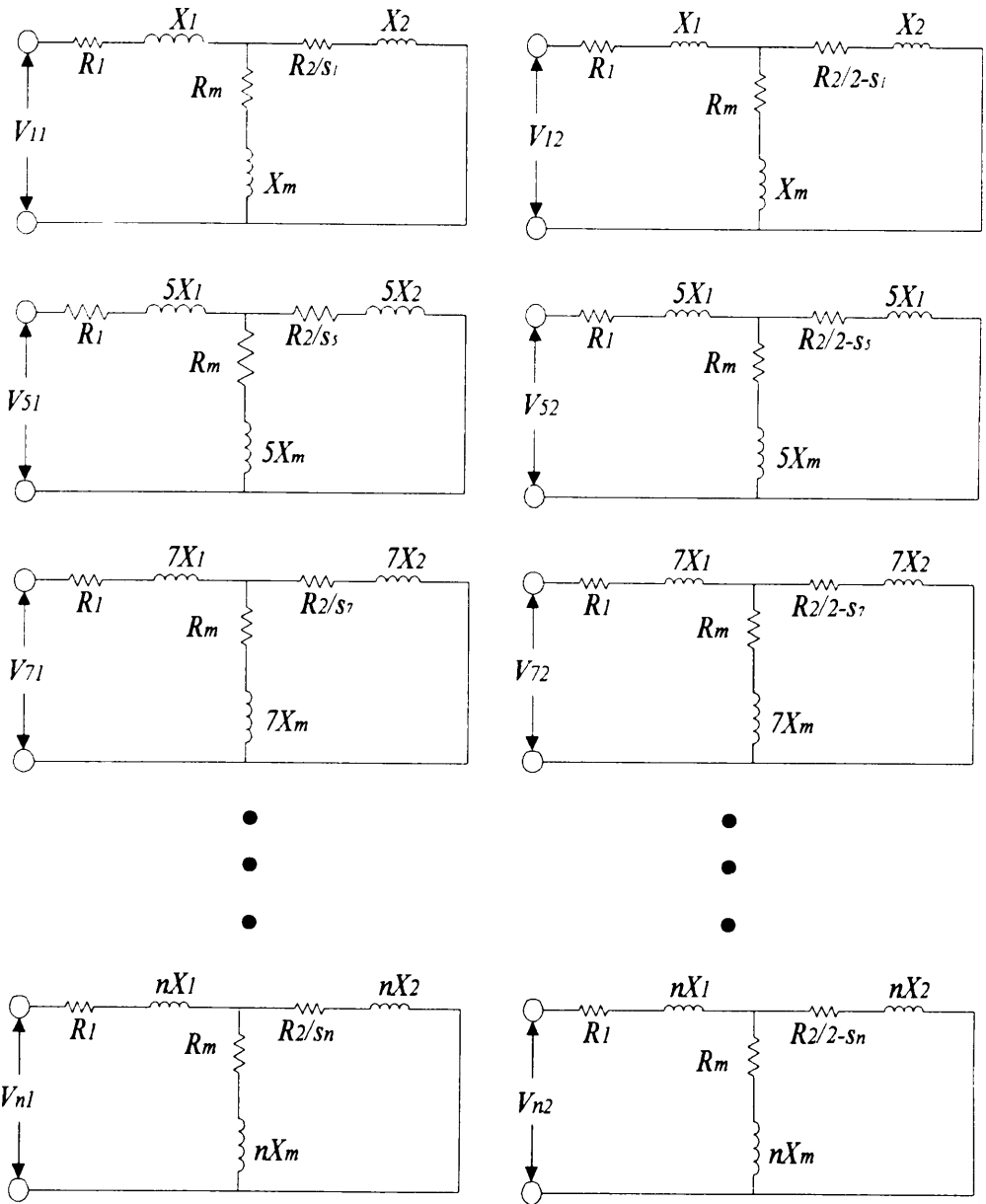


Fig. 5 Equivalent circuit

2. 등가회로 정수의 결정

등가회로에서 $R_1, X_1, R_m, X_m, R_2, X_2$ 의 회로정수는 무부하시험과 회전자 구속시험의 결과 그리고 직류로 측정한 고정자권선의 저항으로 결정되어진다. 유도전동기에서 무부하시험과 구속시험은 여자전류와 회전손실에 대한 정보를 준다. 이 시험은 일정한 주파수에서 고정자권선에 평형 3상전압을 인가하여 시험하도록 되어있다. 그러나 대부분의 전원이 불평형상태이기 때문에 이를 대칭좌표법으로 하여 정상분과 영상분으로 나누어 구하여야 하지만 실측에 있어서 이를 나누어 측정하기는 불가능하다. 그러므로 기본파에 의한 정상상태를 측정하여 회로정수를 구하고자 한다.

2.1 고정자 권선 저항 측정

3상 유도 발전기 고정자 권선이 델타(delta)결선된 경우 권선 직류저항을 전압강하법에 의하여 측정한다. 권선 저항은 고정자 동손을 계산하기 위하여 필요하며 이 경우 권선은 대칭권선으로 각 상의 저항이 같은 값이라고 가정한다. 권선 2단자에서 측정한 단자전압을 V_{dc} , 전류를 I_{dc} 라고 하면 단자저항 R_{11} 은 1상의 저항 R_1 으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{11} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2}{3} R_1 \quad (8)$$

그러므로 R_1 은

$$R_1 = \frac{3}{2} \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (9)$$

가 된다. 이때 전류는 운전조건과 거의 같은 온도가 되도록 정격전류로 한다.

2.2 초기 값의 산정

2.2.1 무부하시험

무부하시험은 정격주파수, 정격전압으로 시험하여야 하나 대부분의 전원이 불평형이 되므로 무부하 선간전압을 $V_{ab0}, V_{bc0}, V_{ca0}$ 라 할 때 1상의 전압 $V_0 = (V_{ab0} + V_{bc0} + V_{ca0})/3$ 으로 하고, 무부하 선전류 I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} 라 할 때 1상의 전류 $I_0 = (I_{a0} + I_{b0} + I_{c0})/3\sqrt{3}$ 으로 계산하여 고정자권선의 저항과 누설리액턴스 그리고 회전자회로를 무시하여 등가회로를 구성하면 다음의 Fig. 6과 같다.

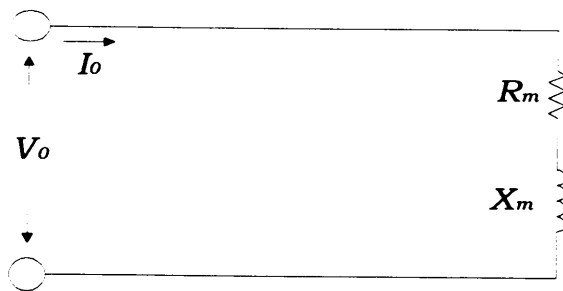


Fig. 6 Simplified no-load equivalent circuit

무부하 임피던스 Z_0 는 다음과 같다.

$$Z_0 = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} = \frac{V_0}{I_0} \quad (10)$$

무부하 출력을 P_0 라하고 R_m 과 X_m 을 구하여 보면

$$P_0 = 3 I_0^2 R_m \quad (11)$$

$$R_m = \frac{P_0}{3} I_0^{-2} \quad (12)$$

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_0}{I_0}\right)^2 - R_m^2} \quad (13)$$

로 구한다.

2.2.2 구속시험

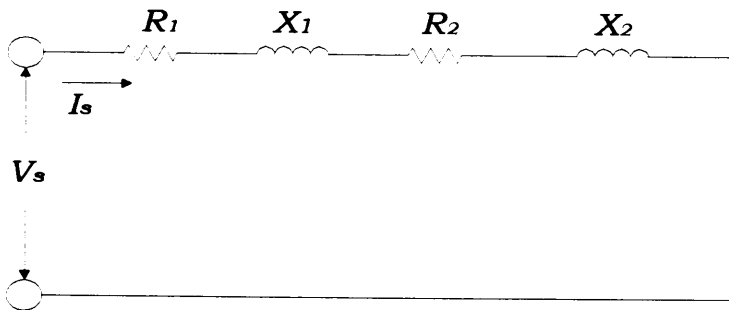


Fig. 7 Simplified block-rotor equivalent circuit

회전자를 구속하여 정격주파수와 정격전류로 시험하여야 하나 이 경우도 전원이 불평형이므로 1상의 전압 V_s , 전류 I_s 를 무부하시험시와 같이 평균치를 가지고 계산한다. 여자임피던스 Z_m 을 무시하여 등가회로를

구성하면 Fig. 7과 같다.

여기서 단락임피던스를 구하여 보면

$$Z_s = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \frac{V_s}{I_s} \quad (14)$$

R_1 의 값은 알고 있으므로 다음 식에 의하여 R_2 를 구할 수 있다.

$$P_s = 3I_s^2(R_1 + R_2) \quad (15)$$

$$R_1 + R_2 = \frac{P_s}{3I_s^2} \quad (16)$$

X_1 과 X_2 의 값을 같다고 놓고

$$X_1 + X_2 = \sqrt{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)^2 - (R_1 + R_2)^2} \quad (17)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{(X_1 + X_2)}{2} \quad (18)$$

에 대입하여 풀어 각각의 회로정수의 초기 값을 구할 수 있다.

2.3 연립방정식의 구성

Fig. 4의 등가회로에 무부하전압을 인가하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $Z_1 = R_1 + jX_1$, $Z_m = R_m + jX_m$, $Z_{20} = \frac{R_2}{s} + jX_2$, $Z_{2s} = R_2 + jX_2$ 라 하면 무부하 합성 임피던스 $Z_0 = \frac{V_0}{I_0}$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

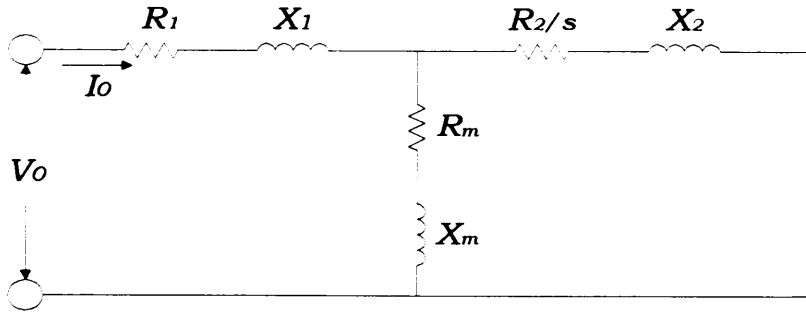


Fig. 8 No-load equivalent circuit

$$\frac{V_0}{I_0} = \left| Z_1 + \frac{Z_m Z_{20}}{Z_m + Z_{20}} \right| \quad (19)$$

또한 무부하 전력은

$$P_0 = \text{Re} \left(Z_1 + \frac{Z_m Z_{20}}{Z_m + Z_{20}} \right) I_0^2 \quad (20)$$

로 나타낼 수 있다.

그리고 같은 방법으로 Fig. 4의 등가회로에 구속전압을 인가하면 Fig. 9로 나타낼 수 있다.

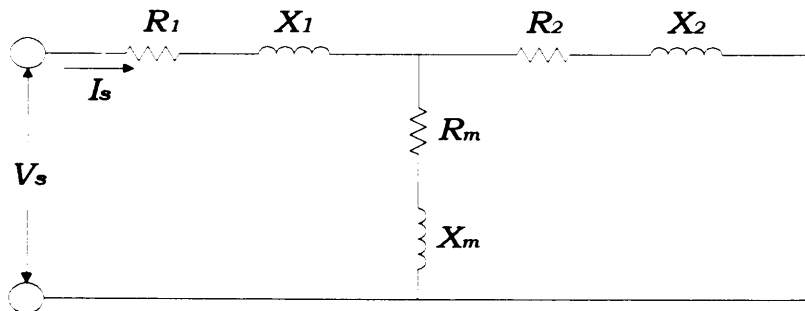


Fig. 9 Block-rotor equivalent circuit

여기서 합성임피던스 $Z_s = \frac{V_s}{I_s}$ 이므로

$$\frac{V_s}{I_s} = \left| Z_1 + \frac{Z_m Z_{2s}}{Z_m + Z_{2s}} \right| \quad (21)$$

로 나타낼 수 있고, 또한 구속시 전력은

$$P_s = \operatorname{Re} \left(Z_1 + \frac{Z_m Z_{2s}}{Z_m + Z_{2s}} \right) I_s^2 \quad (22)$$

가 된다.

위에서 정리한 식(19), (20), (21), (22)를 연립방정식으로 하여 $R_1, X_1, R_m, X_m, R_2, X_2$ 의 값을 구할 수 있다.

Ⅲ. 유도발전기의 해석

1. 3상 불평형 비정현파 그리드 전압인가시

해석하고자하는 계통연계 유도발전기 시스템은 Fig. 10에 보였다.

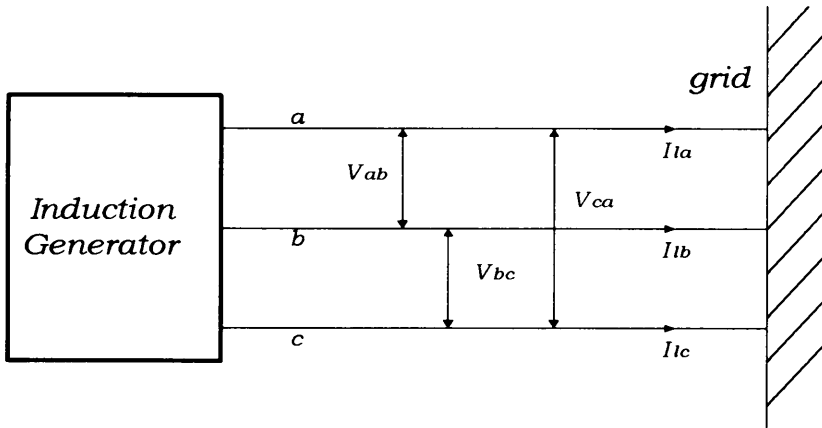


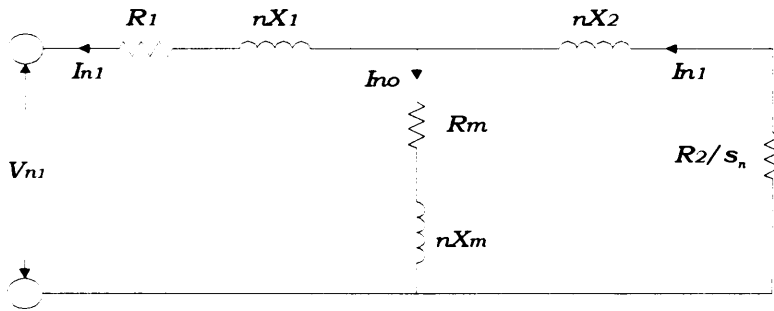
Fig. 10 Schematic of grid connected induction generator

부하와 변압기 등은 생략하였고 불평형 n 차 고조파전압 ($n=1,5,7, \dots$)의 대칭분 즉, 정상분 전압, 역상분 전압, 그리고 영상분 전압을 각각 V_{n1} , V_{n2} , V_{n0} 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있고

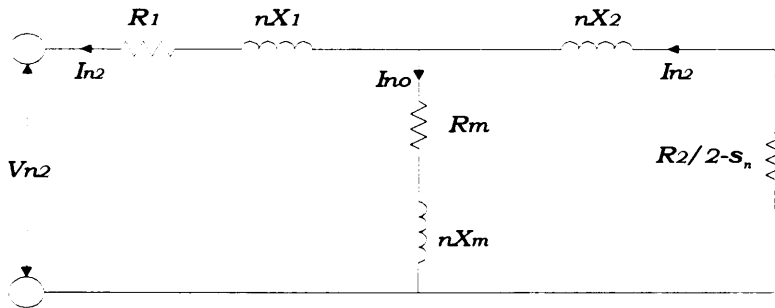
$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ V_{n2} \\ V_{n0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{nab} \\ V_{nbc} \\ V_{nca} \end{bmatrix} \quad (23)$$

같은 형식으로 n 차 고조파 정상분, 역상분, 그리고 영상분 선전류 I_{n1} , I_{n2} , I_{n0} 를 n 차 고조파 각 상의 선전류 I_{n1a} , I_{n1b} , I_{n1c} 로부터, 그

리고 n 차 고조파 정상분, 역상분, 그리고 영상분 상전류 I_{n1}, I_{n2}, I_{n0} 를 n 차 고조파 각 상전류 $I_{nab}, I_{nbc}, I_{nca}$ 로부터 얻을 수 있다. 그러나 유도발전기의 중성점을 이용하지 않는 3상 3선 시스템이므로 영상분은 고려하지 않는다. 유도발전기의 n 차 고조파 불평형전압 인가시의 정상분과 역상분 등가회로를 Fig. 11에 보였다.



(a) Positive sequence.



(b) Negative sequence.

Fig. 11 Sequence equivalent circuit.

다음의 식에서 첨자가 세 개있는 기호에서 제1첨자는 고조파의 차수, 제2첨자에서 1은 1차 회로이고 2는 2차 회로, 그리고 m 은 여자회로, 제3첨자

에서 1은 정상분이고 2는 역상분을 표시한다. Fig. 4의 등가회로에서부터 각 지로의 n 차 고조파전압에 대한 임피던스는

$$Z_{n1} = Z_{n2} = R_1 + jnX_1 \quad (24)$$

$$Z_{n21} = \frac{R_2}{s_n} + jnX_2 \quad (25)$$

$$Z_{n22} = \frac{R_2}{2-s_n} + jnX_2 \quad (26)$$

$$Z_{nm} = R_m + jnX_m \quad (27)$$

이므로 고정자와 회전자의 n 차 고조파전압에 대한 대칭분 전류는

$$I_{n1} = \frac{V_{n1}}{Z_{n1} + \frac{Z_{nm}Z_{n21}}{Z_{nm} + Z_{n21}}} \quad (28)$$

$$I_{n2} = \frac{V_{n2}}{Z_{n2} + \frac{Z_{nm}Z_{n22}}{Z_{nm} + Z_{n22}}} \quad (29)$$

$$I_{n21} = I_{n1} \frac{Z_{nm}}{Z_{nm} + Z_{n21}} \quad (30)$$

$$I_{n22} = I_{n2} \frac{Z_{nm}}{Z_{nm} + Z_{n22}} \quad (31)$$

가 된다.

n 차 고조파 정상분 시스템에 공급되는 전력은

$$P_{n1} = -3 I_{n21}^2 R_2 (1-s_n)/s_n \quad (32)$$

이고, n 차 고조파 역상분 시스템에 공급되는 전력은

$$P_{nin2} = 3 I_{n2}^2 R_2 (1 - s_n) / (2 - s_n) \quad (33)$$

이므로, 축에 공급되는 총전력은

$$P_{nin} = P_{nin1} + P_{nin2} \quad (34)$$

이다. 따라서 총입력 전력은

$$P_{in} = \sum P_{nin} \quad (35)$$

으로 구한다.

그리드에 공급되는 n 차 고조파 유효전력은

$$\begin{aligned} P_{nout} &= 3 \operatorname{Re}(V_{n1} I_{n1}^* + V_{n2} I_{n2}^*) \\ &= \operatorname{Re}(V_{nab} I_{nab}^* + V_{nbc} I_{nbc}^* + V_{nca} I_{nca}^*) \end{aligned} \quad (36)$$

이고, n 차 고조파 무효전력은

$$\begin{aligned} Q_n &= 3 \operatorname{Im}(V_{n1} I_{n1}^* + V_{n2} I_{n2}^*) \\ &= \operatorname{Im}(V_{nab} I_{nab}^* + V_{nbc} I_{nbc}^* + V_{nca} I_{nca}^*) \end{aligned} \quad (37)$$

으로 구할 수 있다.

그러므로 총유효출력 P_{out} 과 총무효전력 Q 는 다음과 같다.

$$P_{out} = \sum P_{nout} \quad (38)$$

$$Q = \sum Q_n \quad (39)$$

2. 단상 비정현파 그리드 전압인가시

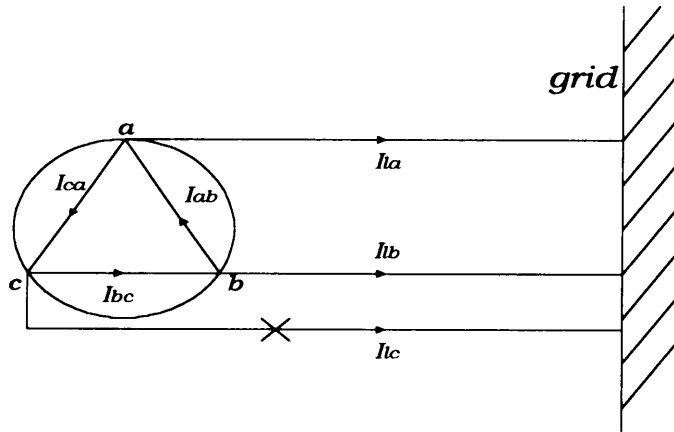


Fig. 12 System under single-phasing condition

3상 불평형의 극단적인 경우로서 Fig. 12에서와 같이 c선이 개방되어 단상 운전상태가 되면 n 차 고조파 선전류는

$$I_{nla} = I_{nab} - I_{nca} \quad (40)$$

$$I_{nlb} = I_{nbc} - I_{nab} \quad (41)$$

$$I_{nlc} = I_{nca} - I_{nbc} = 0 \quad (42)$$

이고, 식 (42)에서

$$I_{nca} = I_{nbc} \quad (43)$$

이므로,

$$I_{n1} = I_{n2} \quad (44)$$

이며, 각 n 차 고조파 상전류와 n 차 고조파 대칭분 전류와는

$$I_{nab} = I_{n1} + I_{n2} = 2I_{n1} \quad (45)$$

$$I_{nbc} = a^2 I_{n1} + a I_{n2} = -I_{n1} \quad (46)$$

$$I_{nca} = a I_{n1} + a^2 I_{n2} = -I_{n1} \quad (47)$$

의 관계가 있다.

또한 선간전압과 대칭분 사이의 관계는

$$\begin{aligned} V_{nab} &= V_{n1} + V_{n2} = Z_{n1} I_{n1} + Z_{n2} I_{n2} \\ &= (Z_{n1} + Z_{n2}) I_{n1} \end{aligned} \quad (48)$$

으로 주어지고, 여기서 n 차 고조파 정상분 전류는

$$I_{n1} = \frac{V_{nab}}{Z_{n1} + Z_{n2}} \quad (49)$$

가 된다.

그리드에 공급되는 n 차 고조파 유효전력과 무효전력은 각각

$$P_{nout} = Re(V_{nab} I_{n1a}^*) \quad (50)$$

$$Q_n = Im(V_{nab} I_{n1a}^*) \quad (51)$$

으로 구할 수 있고, 총유효전력 P_{out} 과 총무효전력 Q 는 형식적으로 식 (38)과 식 (39)와 같다

IV. 실험결과 및 고찰

유도발전기의 특성해석을 위하여 실험에 사용된 기기의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of Prime mover and Generator

	Pole	Power(kW)	Voltage(V)	Amper(A)	Frequency(Hz)	RPM
Prime mover	4P	1.5	220	6.0	60	1720
Induction generator	4P	0.75	220	3.5	60	1710

1. 회로정수의 결정

유도발전기에 대한 저항측정, 무부하시험 그리고 구속시험의 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Test results

a) Measured DC voltage and current in stator winding

$V_{12}(V)$	$V_{23}(V)$	$V_{31}(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$I_3(A)$
11.6	11.6	11.8	2.36	2.34	2.3

b) Measured values in case of no-load test applying rated voltage

$V_{12}(V)$	$V_{23}(V)$	$V_{31}(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$I_3(A)$	P_0	N
219.7	220.6	217.4	2.27	2.43	2.32	138	1798

c) Measured values in case of blocked-rotor test applying rated current

$V_{12}(V)$	$V_{23}(V)$	$V_{31}(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$I_3(A)$	$P_s(W)$
50.2	49.95	49.58	3.43	3.49	3.33	157

Table 2의 전압과 전류가 불평형이므로 이들의 3상 평균치를 사용하여 Sen과 Sarma의 방법과 제안한 방법에 의하여 계산된 회로정수의 값들을 Table 3에 보였다.

Table 3 Calculated circuit parameters

Parameter (Ω) Methods	R_1	X_1	R_2	X_2	R_m	X_m
	Sen's & Sarma's method	7.50147	10.65261	6.82475	10.65261	17.70125
Proposed method	7.50147	11.18111	6.77866	10.65261	14.07944	149.91131

Table 3의 회로정수를 이용하여 계산하여 실험치와 비교하여 Table 4에 보이고 있다.

Table 4 Compared results between Sen's & Sarma's and Proposed method

Methods	Computed values				Measured values
	Sen's & Sarma's method	error(p.u)	Proposed method	error(p.u)	
$V_0(V)$	218.76483	0.00214	219.23333	0	219.2
$P_0(W)$	52.49787	0.14125	45.99999	0	46
$V_s(V)$	48.85388	0.01702	49.70001	0	49.7
$P_s(W)$	52.53956	0.00394	52.33335	0	52.3

Table 4에 보는바와 같이 제안한 방법이 Sen과 Sarma의 방법에 비해서 정확한 결과가 얻어짐을 알 수 있다. Sen과 Sarma의 방법은 무부하시험시의 2차 회로를 개방하여 취급하고 구속시험시에도 여자회로의 리액턴스만을 고려하여 계산하였기 때문에 오차가 발생하였다. 따라서 제안한 방법은 유도기의 정상상태 등가회로 정수를 결정하는 하나의 방법으로서 타당함을 알 수 있다.

2. 유도발전기의 해석

중성점 비접지상태로 계통전압이 불평형 비정현파인 전력계통에 연계운전되는 유도발전기의 특성해석의 타당성을 검증하기 위하여 제안한 방법으로 실측하여 계산한 회로정수, 제작회사의 실측자료를 이용하여 계산한 회로정수, 그리고 제작회사의 설계자료에 의한 회로정수를 Table 5에 보였다.

Table 5 Parameters

Parameters (Ω) Methods	R ₁	R ₂	X ₁	X ₂	R _m	X _m
Proposed method	7.50147	6.77866	11.18111	10.65261	14.07944	149.91131
Manufacturer's data (12.5°C)	6.87	8.78223	8.14073	8.01891	18.26186	136.40514
Manufacturer's data (75°C)	8.60836	6.80418	8.28325	8.02510	16.08444	136.3301
Design data (20°C)	7.97850	7.51903	8.23572	8.02350	16.89975	136.34949
Design data (75°C)	9.702	7.701	9.986	9.986	17.50143	137.57566

2.1 불평형전압을 인가하였을 때

이들 회로정수를 이용하여 계산한 원동기 회전수 변화에 따른 3상 불평형 상태의 출력과 무효전력 그리고 선전류의 값을 실측결과와 비교검토하기 위하여 Table 6-10과 Fig. 13-17에 보였다.

여기에서의 계산은 실측한 계통전압이 정현파이므로 불평형정현파 전압

이 인가되는 경우로 한정하였다.

다음의 Table과 Fig.의 각각의 값들은 다음과 같다.

Computed Value 1 : by proposed parameters

Computed Value 2 : by manufacturer's parameters (at 12.5°C)

Computed Value 3 : by manufacturer's parameters (at 75°C)

Computed Value 4 : by design data (at 20°C)

Computed Value 5 : by design data (at 75°C)

Table 6 Output power

Voltage(V)			Output power (W)	Measured Value	Computed Value 1	Computed Value 2	Computed Value 3	Computed Value 4	Computed Value 5
Vab	Vbc	Vca							
218	215	217	1804.7	45.9	68.73	127.92	114.68	120.27	129.376
219	214	219	1812.4	34.8	7.37	68.55	37.89	50.85	63.82
220	216	218	1833.4	264	220.41	99.76	179.44	145.71	122.73
219	216	219	1852.0	479	409.49	250.12	374.19	321.62	289.63
220	216	219	1869.2	599	585.24	390.81	556.96	486.56	445.71
220	216	219	1888.7	775	780.90	550.11	763.64	673.00	621.60

Output Power

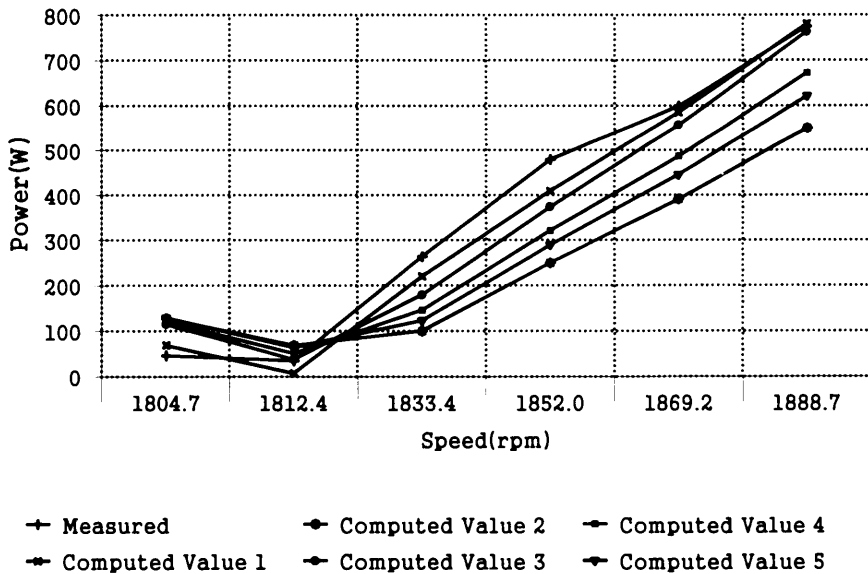


Fig. 13 Output Power

Table 7 Reactive power

Voltage(V)			Reactive power (Var)	Measured Value	Computed Value 1	Computed Value 2	Computed Value 3	Computed Value 4	Computed Value 5
Vab	Vbc	Vca							
218	215	217	1804.7	280.00	863.22	949.15	951.81	950.68	928.16
219	214	219	1812.4	870.00	877.79	961.77	968.48	965.60	943.85
220	216	218	1833.4	941.00	916.92	988.07	1009.91	1000.42	982.60
219	216	219	1852.0	1030.00	961.29	1010.00	1053.13	1035.53	1022.61
220	216	219	1869.2	1080.00	1017.80	1050.00	1110.00	1079.53	1072.26
220	216	219	1888.7	1270.00	1092.5	1084.38	1175.73	1135.10	1135.74

Reactive Power

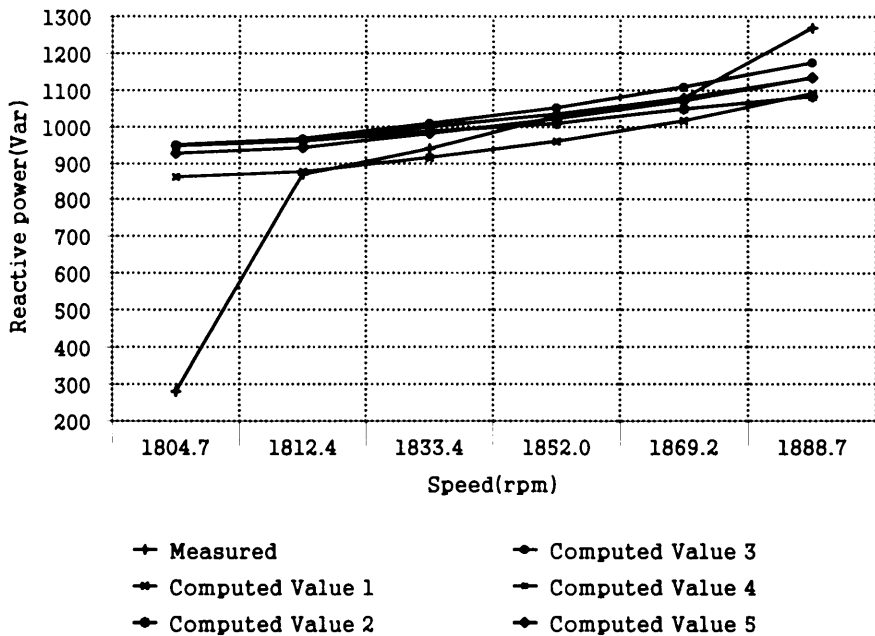


Fig. 14 Reactive Power

Table 8 Line current I_1

Voltage(V)			Current (A) Speed (rpm)	Measured Value	Computed Value 1	Computed Value 2	Computed Value 3	Computed Value 4	Computed Value 5
Vab	Vbc	Vca							
218	215	217	1804.7	2.38	2.41	2.66	2.66	2.66	2.59
219	214	219	1812.4	2.43	2.55	2.82	2.82	2.82	2.73
220	216	218	1833.4	2.67	2.56	2.71	2.77	2.74	2.68
219	216	219	1852.0	3.03	2.86	2.89	3.06	2.98	2.91
220	216	219	1869.2	3.34	3.17	3.03	3.33	3.20	3.13
220	216	219	1888.7	3.74	3.60	3.28	3.74	3.53	3.47

Current I_1

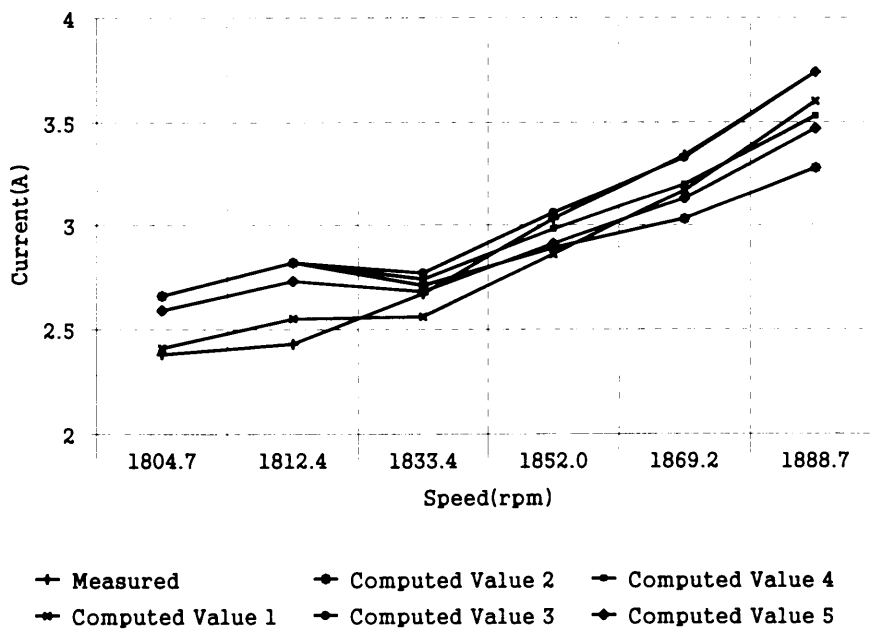


Fig. 15 Line current I_1

Table 9 Line current I_2

Voltage(V)			Current (A) Speed (rpm)	Measured Value	Computed Value 1	Computed Value 2	Computed Value 3	Computed Value 4	Computed Value 5
Vab	Vbc	Vca							
218	215	217	1804.7	2.17	2.33	2.60	2.61	2.60	2.53
219	214	219	1812.4	2.20	2.33	2.58	2.61	2.60	2.52
220	216	218	1833.4	2.48	2.61	2.77	2.87	2.82	2.74
219	216	219	1852.0	2.89	2.82	2.82	3.04	2.94	2.87
220	216	219	1869.2	3.15	3.22	3.09	3.43	3.28	3.19
220	216	219	1888.7	3.60	3.68	3.37	3.88	3.66	3.55

Current I_2

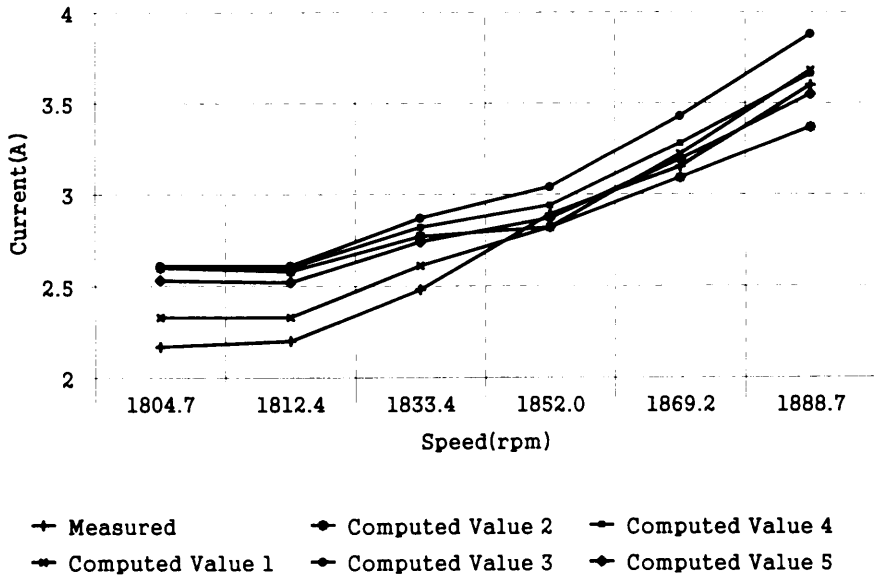


Fig. 16 Line current I_2

Table 10 Line current I₃

Voltage(V)			Current (A) Speed (rpm)	Measured Value	Computed Value 1	Computed Value 2	Computed Value 3	Computed Value 4	Computed Value 5
Vab	Vbc	Vca							
218	215	217	1804.7	2.30	2.18	2.40	2.40	2.40	2.37
219	214	219	1812.4	2.34	2.13	2.30	2.31	2.31	2.30
220	216	218	1833.4	2.62	2.33	2.42	2.52	2.48	2.45
219	216	219	1852.0	3.05	2.62	2.59	2.78	2.69	2.67
220	216	219	1869.2	3.34	2.93	2.73	3.07	2.92	2.90
220	216	219	1888.7	3.78	3.38	3.00	3.51	3.29	3.25

Current I₃

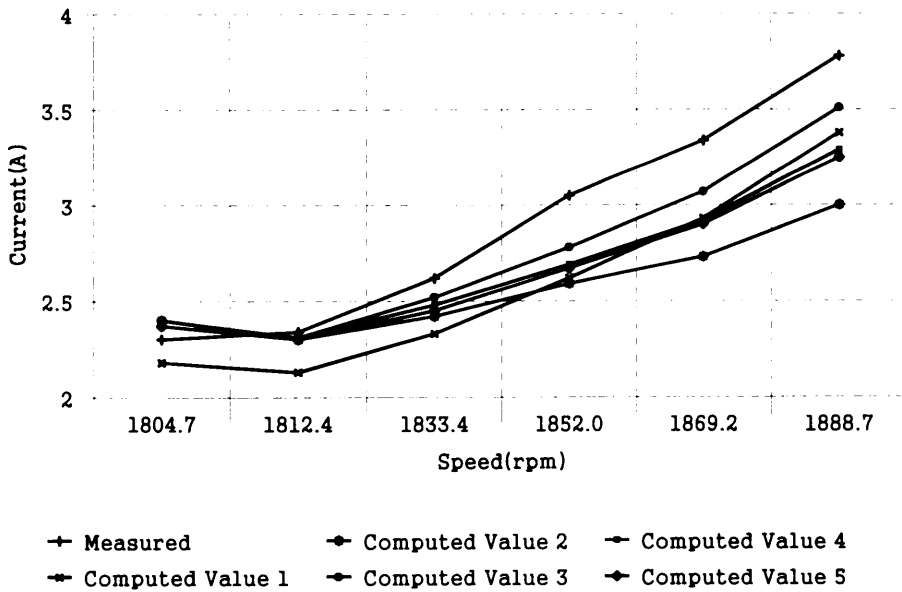


Fig 17 Line current I₃

Table 6과 Fig. 13에서 보듯이 출력이 낮고 회전수가 느린 범위에서는 실측치와 해석결과 사이의 오차가 크고 출력이 높고 회전수가 빠른 범위에서는 오차가 작다. Table 7과 Fig. 14에서 무효전력도 같은 경향을 보이고 있지만 정격전류보다 커지면 오차가 커지고 있다. 불평형 선전류 I_1, I_2, I_3 도 Table 8-10과 Fig. 15-17에서 보는 바와 같이 실측치가 해석결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 제안된 회로정수를 사용한 결과가 측정치와 비교적 잘 접근하고 있음을 알 수 있다.

2.2 단상일 경우

단상운전의 경우에 선전류의 값을 각 회로정수에 의하여 계산한 결과를 Table 11과 Fig. 18에 보였다.

Table 11 Line current I

Voltage (V)	Current (A) Speed (rpm)	Measured Value	Computed				
			Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5
220	1804.4	3.45	3.57	4.01	4.01	4.01	3.85
218	1812.1	3.52	3.57	3.99	4.00	4.00	3.83
218	1834.5	3.99	3.87	4.13	4.28	4.22	4.04
217	1858.5	4.71	4.44	4.44	4.85	4.67	4.47
218	1870.1	5.24	4.83	4.69	5.24	5.00	4.78
218	1889.3	6.08	5.50	5.13	5.94	5.58	5.34

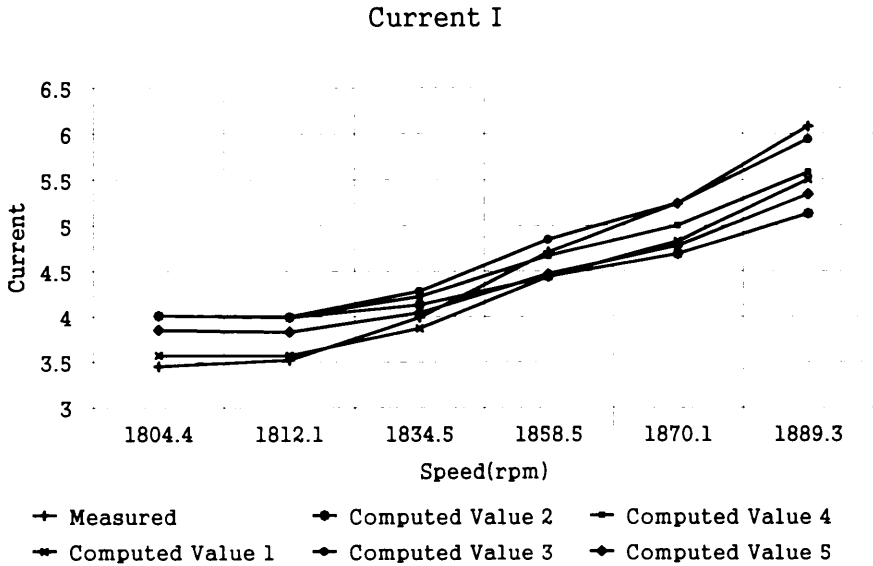


Fig. 18 Line current I

Table 11과 Fig. 18에서 보는 바와 같이 전류의 실측치와 해석결과도 제안된 회로정수에 의하여 해석한 결과가 모든 회전수 범위에서 실측치와 잘 접근하고 있다. 따라서 제안된 회로정수 결정알고리즘으로 정수를 계산하고 제시된 불평형 비정현파 전압이 인가된 유도발전기의 해석식으로 충분히 해석이 가능할 것이다.

V. 결 론

계통전압이 불평형 비정현파의 계통에 중성점 비접지상태로 연계운전되는 유도발전기의 정상상태 특성을 해석하였다.

이를 위하여 유도기의 정상상태 해석을 위한 T형 등가회로 정수결정법을 제시하였다. 기존의 Sen이나 Sarma의 정수결정법은 무부하시험시 2차 회로를 개방하고 구속시험시 여자리액턴스와 2차 임피던스를 병렬 합성하여 정수들을 결정하고 있다.

제안된 등가회로 정수결정법에서는 등가회로에 아무런 제약을 가하지 않고 해석할 수 있도록 무부하시험과 정격주파수의 구속시험 결과를 이용하여 연립방정식에 의하여 정수들을 결정할 수 있도록 하였다. 연립방정식을 풀기 위한 초기치들을 간략화된 등가회로를 이용하여 구하고 이들을 사용하여 반복계산에 의하여 정수들을 결정하였다.

해석을 위하여 제안된 회로정수 뿐만 아니라 제작회사에서 제공한 시험자료와 설계자료에 의한 정수로도 특성을 계산하였다. 불평형해석은 대칭좌표법과 2회전자계설을 이용하였고 비정현파해석은 조파분석을 적용하였다.

해석은 불평형 정현파전압 인가시의 문제로 한정하여 해석하여 제안된 회로정수로 계산한 결과가 실측치와 잘 접근함을 알 수 있었으므로 불평형 비정현파전압 인가시에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 유도발전기의 정상상태 해석에 본 연구에서 제안한 정수결정법과 해석방법을 사용하여 정도 높은 결과를 기대할 수 있다.

참고문헌

- Ghorashi, A. H., Murthy, S. S., Singh, B. P., Singh Bhim, 1994, Analysis of wind driven grid connected induction generators under unbalanced grid conditions, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp. 217-223
- IEEE Power Engineering Society, 1998, IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators, IEEE Std 112-1996, pp. 1-58
- 日本電氣學會, 1967, 誘導電動機の特性算定法, 電氣學會技術報告, I 部, 第83号 pp. 14-19
- 日本電氣學會, 1970, 變壓機・誘導機・交流整流子機(電氣機器各論Ⅱ), pp. 287-290
- Ishizaki, A. and Hirayama, K., 1967, Precise determination of equivalent circuit parameters for performance calculation of polyphase induction machines, IEEJ, Vol. 87, No.1, pp. 173-180
- 趙榕哲, 左宗根, 1998, 誘導機 等價回路 定數의 情密算定, 濟州大學校 産業技術研究所, 第9卷, 1號, pp. 156-162
- Korean Standards, 1986, Calculating methods of three-phase induction motor characteristics, KS C-4201, pp. 1-14

- McPherson, G. and Laramore, R. D., 1990, Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, pp. 276-284
- Murthy, S. S., Jha, C. S., Rao, P. S. N., 1990, Analysis of grid connected induction generators under realistic system conditions, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, pp. 1-7
- 朴旻鎬, 1996, 誘導機器, 東明社, pp. 295-303
- Sarma, M. S., 1994, Electric Machines, West Publishing Co., pp. 301-310
- Sen, P. C., 1997, Principle of electric machines and power electronics, John Wiley & Sons, pp. 222-233

감사의 글

지난 2년동안 저의 논문이 결실을 맺기까지 물심양면으로 도움을 주시고 학문탐구의 길을 열어주신 좌종근교수님께 고개숙여 감사드리오며 그동안 많은 가르침과 조언을 해주신 오성보교수님, 이개명교수님, 김일환교수님, 김세호교수님, 김호찬교수님께 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 대학원 석사과정과 조교생활을 무리 없이 할 수 있도록 도와준 전기공학과 대학원생, 공과대학 조교선생님 그리고 행정선생님들 모두에게 감사로 드립니다.

지금까지 밑감 밟아서 땀을 흘리며 둘째아들의 뒷바라지를 해주신 부모님과 형님내외 그리고 동생에게 이 논문을 바칩니다. 그리고 서로 의지하며 함께 미래를 열어나갈 사랑하는 영애와 짝으나마 저를 걱정하여 주신 장모님과 처가집 식구에게도 감사로 드립니다.