

論 文
37~1~5

回轉子 交流勵磁方式의 自立形 誘導發電機의 定常狀態 解析

Steady State Analysis of a Stand-alone Induction Generator with AC Rotor Excitation

朴 旻 鎬* · 鄭 勝 基** · 李 鎭 雨***
(Min-Ho Park · Seung-Gi Jeong · Jin-Woo Lee)

ABSTRACT

In this paper, a stand-alone wound rotor induction generator system is proposed and its steady state characteristics are analyzed. It is shown that the self-excitation of the system can be achieved by exciting the rotor through the PWM inverter. The analysis is based upon the equivalent circuit and the steady state dq model of the machine. The results show that the proposed system can be made to generate constant voltage constant frequency power for various speed and load conditions.

1. 서 론

유도기는 종래에 범용 전동기로서 널리 사용되어 온 반면 발전기로서는 그 용도가 매우 국한되어 왔다. 그러나 근래에 와서 풍력, 소수력 등과 같이 일정한 회전속도를 유지하기 어려운 기계적 에너지 원으로부터 전기에너지를 얻는 장치로서 유도발전기는 새로운 가능성을 보이고 있으며 또한 정지형 전력변환장치의 발달은 여기에 더욱 넓은 응용범위의 확장을 가능케 하고 있다.

유도기는 전동기로 운전되거나 발전기로 사용되거나를 막론하고 항상 여자에 필요한 지상의 무효전력을 외부로부터 공급받아야 한다. 유도발전기가 기존의 전력계통에 연계되어 있을 경우에는 여자용 무효전력이 계통으로부터 공급되므로 발전에 문제

가 없으나 계통에서 분리된 자립형의 단독발전용으로 사용하고자 할 경우에는 여자를 위한 특별한 고려가 필요하다. 농형유도기에 대해서는 단순히 고정자단에 콘덴서를 부착하는 여자방식이 널리 채용되어 왔는데 이 경우 발전전압과 주파수가 부하 및 속도에 따라 변동함으로 해서 상용전원으로 사용하는 데에는 어려움이 따르게 된다. 최근에는 전압형 혹은 전류형 인버터의 스위칭작용을 이용한 여자방식이 제안되었으나 여기에서도 전압과 주파수 중 한 가지는 운전조건의 변화에 대응하여 변동될 수밖에 없어 계통에서 분리되어 있는 한 농형유도발전기의 고정자단에서 직접 일정전압 일정주파수의 전력을 얻는 것은 불가능한 것으로 알려져 왔다.^{1,2)}

이러한 어려움은 기본적으로 농형유도기의 單入出力機(Singly-fed machine)로서의 특성, 즉 발전전력의 수수와 여자가 동시에 고정자단을 통해 이루어져야 한다는 점에 기인한다. 따라서 復數入出力機(doubly-fed machine), 즉 권선형 유도기를 사용하여 이러한 문제를 해결하고자 하는 것은 매우 자연스러운 귀결이라 할 수 있을 것이며 실제로 권선형 유도기는 회전자를 적절한 전압(혹은 전류)과 주파수로 여자함으로써 발전전압과 주파수를 임의

*正 會 員 : 서울大學校 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 光云大學校 電氣工學科 專任講師
 ***正 會 員 : 서울大學校 電氣工學科 博士課程
 接受日字 : 1987年 9月 5日
 1次修正 : 1987年 11月 13日
 2次修正 : 1987年 1月 6日

로 제어하는 것이 가능하다.³⁾

본 논문에서는 계통에서 분리된 자립형의 권선형 유도발전시스템을 제안하고 이의 정상상태 특성을 해석하였다. 이를 위해 등가임피던스의 개념을 도입하고 유도기의 d_q 모델을 적용, 자기여자(self-excitation)을 포함한 시스템의 특성방정식을 유도하였다. 여기에서 구한 이론적 결과를 3.5KW 용량의 유도기에 대하여 실시한 실험결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 입증하였다.

2. 시스템의 구성 및 운전방식

그림 1에 본 연구에 사용된 시스템의 계통도를 보였다. 전 시스템은 발전기와 부하, 여자회로로 구성되며 여자회로는 정류기와 인버터를 통해 발전기의 고정자단자와 회전자의 슬리핑 사이를 연결한다. 따라서 고정자단에서 발전된 전력의 일부가 회전자에 여자전력으로 인가되는 자력식 발전시스템이 구성되며 이때 회전자의 주파수는 인버터의 주파수에 의해 결정된다. 즉 원하는 고정자 주파수를 F_s 라 하고 원동기 회전속도에 해당하는 주파수는 $F_s - F_m = sF$ (s : 슬리핑)로 된다. 한편 발전전압의 크기는 회전자의 전류, 혹은 전압에 의해 좌우되는데 본 연구에서는 정현파 PWM 방식을 채택함으로써 인버터의 변조비 δ 의 조절을 통해 출력전압이 제어되도록 하였다.

초기의 전압확립(voltage build-up)은 인버터의 직류측에 별도의 외부 직류전원을 인가함으로써 이루어진다. 발전기가 회전하고 있는 상태에서 외부전원이 인가되면 회전자에 전류가 흐르게 되고 이

전류가 고정자에 전압을 유기한다. 고정자 전압의 정류된 값이 어느 이상으로 되면 외부전원은 직렬 연결된 다이오드를 통해 차단되고 자기여자(self-excitation)과정이 시작된다. 자기여자에 의해 고정자 전압이 어떤 값으로 안정되는 과정에는 직류분권발전기나 농형유도발전기의 경우에서와 같이 기계의 자기포화특성이 중요한 역할을 한다. 즉 고정자 전압에 의해 유기되는 회전자 전류와 회전자 전류에 의해 유기되는 고정자 전압이 서로 평형을 이루는 점에서 안정한 동작점이 결정되는데 여기서 인버터의 주파수와 변조비가 동작점의 위치를 결정하는 변수로 작용한다.

이와 같은 교류여자에서는 공극내 회전자계와 회전자의 속도차이에서 오는 유도전압(induced voltage 혹은 slip voltage) 및 회전자의 속도로 인한 속도전압(speed voltage)이 동시에 존재함으로 해서 동기기에서와는 달리 고정자와 회전자 간에 전력의 수수가 이루어진다. 이때 여자전력의 흐름은 동기속도 이하($F_s > F_m$)에서는 회전자에서 고정자 방향으로, 동기속도 이상($F_s < F_m$)에서는 고정자에서 회전자 방향으로 된다. 따라서 전 속도영역에서의 운전을 위해서는 회전자의 여자가 양방향성의 전력을 취급할 수 있는 장치에 의해 이루어져야 하나 본 연구에 사용된 그림 1의 시스템에 있어서는 정류기에 의해 전력의 방향이 제한되기 때문에 동기속도 이하의 속도범위로 해석과 실험을 국한하였다.

3. 등가회로

콘덴서나 인버터에 의해 여자되는 농형유도발전기의 경우에는 시스템의 등가회로를 유도기의 상당등가회로에 고정 혹은 가변콘덴서가 접속된 것으로 보아 간단히 취급될 수 있었다.^{4,5)} 그러나 그림 1의 권선형유도발전기 시스템에 있어서는 회전자가 단락되어 있지 않고 여자루우프를 통하여 고정자와 연결되어 있으므로 해서 서로간에 영향을 미치기 때문에 등가회로의 일의적 규정에 어려움이 따른다. 따라서 이러한 일종의 피이드백 효과를 표현하기 위하여 본 연구에서는 등가 임피던스의 개념을 도입하였다.

고조파 성분의 영향을 무시한다고 하면 정류기에는 유효성분의 전류만이 유입되는 것으로 볼 수 있으므로 그림 1에 표시한 것과 같이 정류기의 입력단에서 본 相當등가 임피던스를 R_e 의 등가저항으로 나타내기로 한다. R_e 는 인버터 출력단에 접속

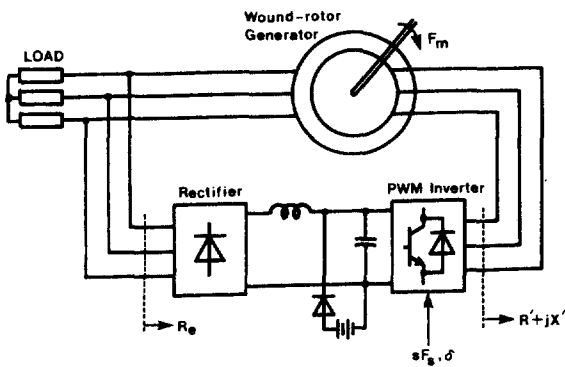


그림 1. 자립형 권선형 유도발전기 시스템
Fig. 1. Stand-alone wound rotor induction generator system

된 임피던스 Z' = 함수로 표현된다. Z' 는 발전기의 회전자단에서 본相當등가 입력임피던스로서 다음과 같이 정의된다.

$$Z' = R' + jX' \quad (1)$$

문제를 간략화하기 위해 정류기 및 인버터에서의 손실을 무시하면 전력의 연속조건에서부터

$$3 \frac{V_s^2}{R_e} = 3 \frac{R'}{R'^2 + X'^2} V_r^2 \quad (2)$$

이 성립하고 이로부터 다음의 관계식이 얻어진다.

$$R_e = \frac{R^2 + X^2}{\beta^2 R} \quad (3)$$

여기서 $R = a^2 R'$, $X = a^2 X'$ (a : 권선비)로서 고정자측으로 환산된 값을 나타내고 β 는

$$\beta = a \frac{V_r'}{V_s} = \frac{V_r}{V_s} \quad (4)$$

로서 회전자전압과 고정자전압의 비를 나타내므로 이하에서 이를 '여자비(excitation ratio)'라 칭한다. 정현파 PWM의 경우 여자비는 다음과 같이 변조비 δ 의 상수배로 표현된다.⁶⁾

$$\beta = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} a\delta = 0.827a\delta \quad (5)$$

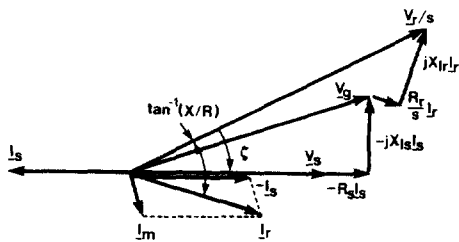
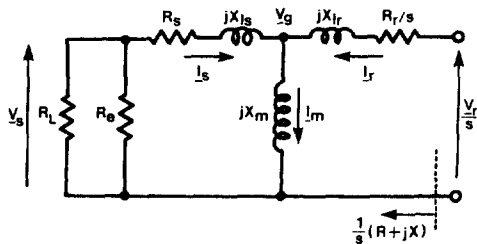


그림 2. (a) 등가회로 (b) 페이서도
Fig. 2. (a) Equivalent circuit (b) Phasor diagram

그림 2 (a)는 등가저항 R_e 를 포함하여 그림1을 상당등가회로로 표현한 것이며 그림 2 (b)에 이에 대한 페이서도를 나타내었다. 이 등가회로로부터 회전자 입력임피던스를 R_e 의 함수로 표현할 수 있게 되는데 실수부와 허수부에 대하여 각각 정리하면

$$R = s \left[\frac{R_r}{s} + \frac{R_a X_m^2}{R_a^2 + (X_{ls} + X_m)^2} \right] \quad (6)$$

$$X = s \left[X_{lr} + \frac{R_a^2 + (X_{ls} + X_m) X_{ls}}{R_a^2 + (X_{ls} + X_m)^2} X_m \right] \quad (7)$$

단

$$R_a = R_s + \frac{R_L + R_e}{R_L + R_e}$$

식(3), 식(6) 및 식(7)은 미지수 R_e , R , X 에 대한 세 개의 방정식을 구성하므로 이들로부터 주어진 속도, 부하 및 여자비에 대하여 등가평형임피던스를 결정할 수 있다. 그러나 여기서의 임피던스 평형은 시스템 내 전력의 평형, 즉 전압확립의 충분조건은 되지 못한다. 그 이유는 등가임피던스의 해는 어떠한 X_m 의 값에 대해서도 존재하나 실제 주어진 조건 하에서 전력평형을 만족하는 동작점에서의 X_m 은 유일하게 존재해야 하기 때문이다. 따라서 동작점을 결정하기 위해서는 전력의 평형이 함께 고려되어야 하는데 가장 단순하게는 X_m 을 변화시켜가면서 이에 해당하는 등가임피던스를 산정하고 이들이 전력의 평형을 만족하는가의 여부를 판단하는 방식을 생각할 수 있다. 이 방법은 비교적 간단하기는 하나 정량적 계산 이상의 의미를 갖지 못하며 계산 시간이 길어지는 단점이 있으므로 본 연구에서는 다음절에 기술하는 바와 같은 좀 더 해석적인 방법을 고안하여 동작특성을 산정하였다.

4. dq 모델에 의한 해석

동기속도로 회전하는 dq 좌표축상에서 권선형유도기의 정상상태 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & X_s & 0 & X_m \\ -X_s & R_s & -X_m & 0 \\ 0 & sX_m & R_r & sX_r \\ -sX_m & 0 & -sX_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X_s = X_m + X_{ls}, \quad X_r = X_m + X_{lr}$$

여기서 고정자 전압과 회전자 전압의 순시치를

$$\begin{aligned}
 v_{as} &= \sqrt{2} V_s \cos w_s t \\
 v_{bs} &= \sqrt{2} V_s \cos (w_s t - 2\pi/3) \\
 v_{cs} &= \sqrt{2} V_s \cos (w_s t + 2\pi/3) \\
 v_{ar} &= \sqrt{2} V_r \cos (sw_s t + \mu) \\
 v_{br} &= \sqrt{2} V_r \cos (sw_s t + \mu - 2\pi/3) \\
 v_{rc} &= \sqrt{2} V_r \cos (sw_s t + \mu + 2\pi/3)
 \end{aligned} \tag{9}$$

이라 하면 dq축상에서의 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$V_{qs} = \sqrt{3} V_s, \quad V_{ds} = 0 \tag{10}$$

$$V_{qr} = \sqrt{3} V_r \cos \zeta, \quad V_{dr} = \sqrt{3} V_r \sin \zeta \tag{11}$$

$$\zeta = -\theta_{ro} - \mu \tag{12}$$

위의 변환과정에서 q축은 $t=0$ 의 시점에서 고정자 a 상에 일치하며 회전자 a 상은 이에 대해 θ_{ro} 의 초기위상을 갖는 것으로 가정한다. 식(11)에서의 ζ 는 그림 2(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 고정자와 회전자 전압간의 위상차를 나타내며 발전기의 부하 각에 해당하는 의미를 지닌다. 식(4)를 이용하여 식(10)과 식(11)을 결합하면 아래와 같이 회전자 및 고정자의 dq축 전압간의 관계가 주어진다.

$$V_{qr} = \beta \cos \zeta V_{qs} \tag{13}$$

$$V_{dr} = \beta \sin \zeta V_{ds}$$

여기서 동작점을 결정하기 위해 전력의 평형조건을 유도하게 되는데 이에는 유효전력의 평형과 무효전력의 평형이 함께 고려되어야 한다. 먼저 유효전력의 평형관계식은 여자회로 내에서의 손실을 무시할 때

$$-V_{qs} I_{qs} = V_{qr} I_{qr} + V_{dr} I_{dr} + V_{qs}^2 / R_L$$

로 되므로 (13)식을 대입하여

$$I_{qs} + \beta \cos \zeta I_{qr} + \beta \sin \zeta I_{dr} = -V_{qs} / R_L \tag{14}$$

로 표현된다. 무효전력의 평형에 있어 회전자로 유입되는 무효전력은 인버터의 스위칭작용에 의해 자동적으로 공급되므로 고정자단에서의 평형만을 고려하면 된다. 부하측에 R_L 과 병렬접속된 리액턴스 X_L 을 가정하면

$$-V_{qs} I_{ds} = V_{qs}^2 / X_L$$

즉

$$I_{ds} = -V_{qs} / X_L \tag{15}$$

이 평형조건으로 되는데 순저항부하의 경우에 있어서는 고정자 d축 전류가 영인 조건으로 귀착된다.

식(14)와 식(15)에서 전류 및 전압의 항을 소거하기

위하여 식(8)의 역함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} A & -B & M & -N \\ B & A & N & M \\ sM & -sN & E & -F \\ sN & sM & F & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} \tag{16}$$

식(16)의 행렬요소에 대한 표현식은 부록 1에 수록하였다. 식(16)과 식(13)을 사용하여 식(14)와 식(15)를 정리하면

$$\begin{aligned}
 \beta(s+1)M \cos \zeta + \beta(s-1)N \sin \zeta \\
 = -A - \beta^2 E - D/R_L
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\beta N \cos \zeta + \beta M \sin \zeta = -B - D/X_L \tag{18}$$

로 되는데 이는 미지수 X_m 과 ζ 에 대한 방정식으로 이로부터 주어진 속도, 부하 및 여자비의 조건하에서 X_m 을 결정할 수 있다. 일단 X_m 이 주어지면 앞절에서 설명한 방법에 의해 등가임피던스를 산정할 수 있고 등가회로상에서 각부의 전압과 전류가 계산된다.

5. 정상상태 특성

앞절에서 제시한 방법에 의해 계산된 여자특성을 그림 3에 도시하였다. 제 2상한에 본 연구에 사용된 유도기의 상수(부록2 참조)에 대한 X_m 의 값을 여러 단계의 여자비에 대하여 슬립의 함수로 나타내었다. 이 곡선들은 그 모양에 있어 유형농도발전기에서의 결과와 유사하며 각각의 최소점에서 오른쪽 부분만이 안정된 운전범위에 해당한다. 즉 발전기의 출력이 증가하여 속도가 떨어지게 되면 슬립이 증가하고 이에 따라 X_m 도 증가한다 이는 공극전압의 감소, 즉 출력의 감소를 초래하여 발전기의 속도를 다시 증가시키는 방향으로 작용한다. 슬립이 감소하는 경우에는 이와 반대로 작용하여 안정된 운전점을 유지한다. 제 1상한의 곡선은 대상기의 자화특성곡선으로서 점선으로 표시한 것과 같이 제 2상한의 곡선과 결합하여 제 4상한의 공극전압에 대한 곡선을 도출할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 동기속도 이하 속도의 전 범위내에서 어떠한 여자비에 대해서도 발전전압의 최대치가 존재하며 그 값은 운전조건에 관계없이 거의 일정하다.

그림 4에는 고정자의 상전압을 여러 단계의 슬립에 대하여 여자비의 함수로 나타내었다. 여기서 점선은 유도기를 전동기로 사용했을 경우의 정격단자

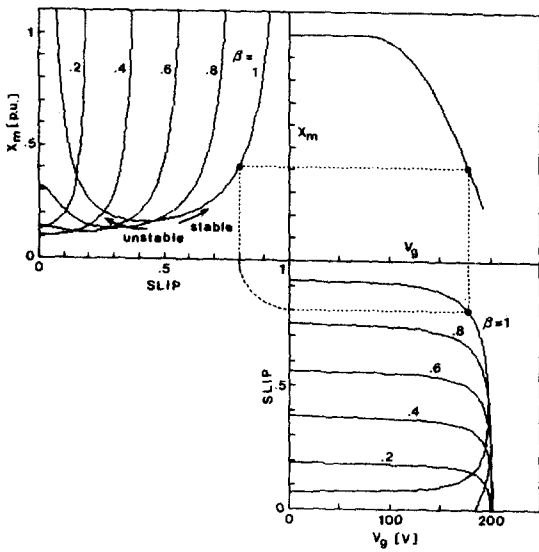


그림3. 여자특성으로 부터의 공극전압의 산정
Fig. . Excitation characteristic and evaluation of airgap voltage

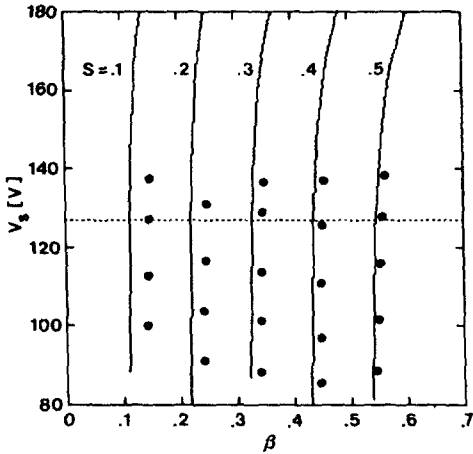


그림 4. 슬립변화에 따르는 고정자전압의 변화
(-이론치 ● 실험치)
Fig. 4. Variation of stator phase voltage for various slip (-theoretical ●experimental)

전압을 나타내며 이 값의 약 110%에 이르는 전압까지 수행한 실험결과를 같이 표시하였다. 이론치와 실험치 간의 오차는 슬립이 낮은 값으로 내려감에 따라 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 회전자 여자주파수가 낮아질수록 단위주파수에 대한 스위칭손실의 증가 및 인버터의 안정한 동작을 위

해 삽입되는 시간지연이 미치는 효과의 증대에 기인하는 것으로 생각된다.

일정 슬립에서 부하의 변동에 따른 영향을 그림 5에 보였다. 부하가 증가할수록 일정전압을 유지하기 위한 여자비도 따라서 증가하여야 하며 이는 그림 4에서의 오차가 시스템 내의 손실을 무시한데서 오는 것임을 시사한다고 볼 수 있다.

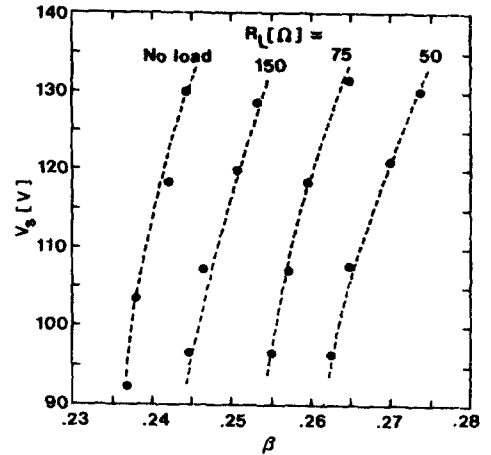


그림 5. 부하변화에 따른 고정자 상전압의 변화(s = 0.2)
Fig. 5. Stator phase voltage for various load(s = 0.2)

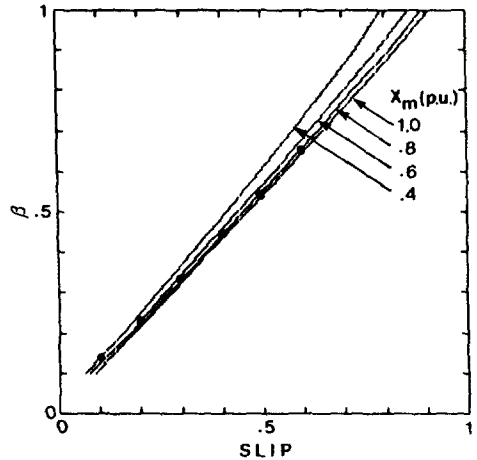


그림 6. 일정공극전압에 대한 여자비와 슬립의 관계
Fig. 6. Relationships between excitation ratio and slip for constant airgap voltage

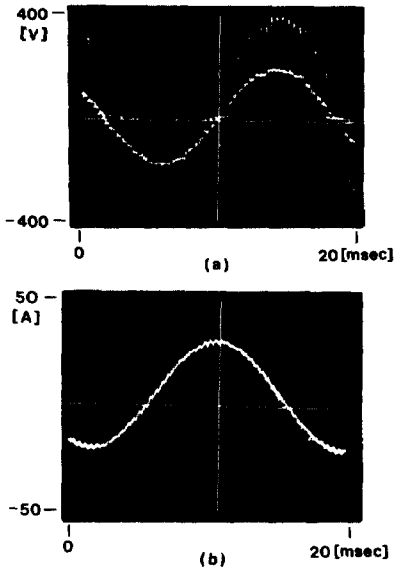


그림 7. 무부하시 (a) 고정자 전압 및 (b) 회전자 여자전류의 파형(s=0.2)

Fig. 7. Waveforms of (a) voltage and (b) rotor excitation current at no load, s=0.2

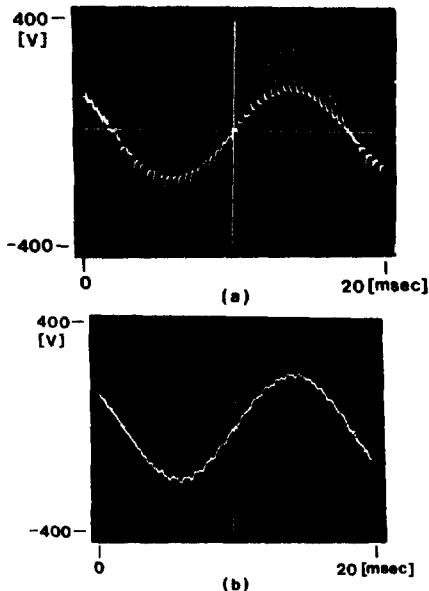


그림 8. (a) 부하 인가시와 (b) 필터부착시의 고정자전압(L=2mH, C=9.4μF)

Fig. 8. Waveforms of stator voltage (a) when the generator is loaded and (b) when the filter is used(L=2mH, C=9.4μF)

이상의 결과에서 속도와 부하의 제반조건에 대응하여 여자비를 적절히 조절함으로써 출력전압을 제어할 수 있음을 알 수 있는데 그림6에 무부하시 일정공극전압, 혹은 일정 자화리액턴스를 유지하기 위한 여자비와 슬립 사이의 관계를 나타내었다. 부하가 인가될 경우 여자비는 증가하여야 하므로 그림 6의 각각의 곡선은 해당 공극전압을 유지하기 위한 여자비의 하한치의 변화를 나타낸다. 실험치는 무부하에서 정격단자전압($X_m=0.8p.u.$)을 유지하면서 측정된 것으로서 이론치와 거의 일치하고 있다.

그림 7은 고정자전압과 회전자여자전류의 파형으로서 인버터의 스위칭에 의한 고조파성분이 출력전압에 포함되어 있음을 볼 수 있다. 이는 부하가 증가할수록 감소하는 경향을 보이는데 그림8(a)는 상당 50Ω의 부하를 인가했을 경우의 파형이다. PWM인버터의 출력단에 LC필터를 삽입하면 고조파는 더욱 감소하여 그림 8(b)와 같이 정현파에 가까운 파형을 얻을 수 있다. 필터는 고조파성분뿐 아니라 기본파의 크기에도 영향을 미치므로 이를 고려하기 위해서는 앞서의 해석에서 회전자 축의 변수에 수정을 가할 필요가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 권성형 유도발전기로 상용전원에 요구되는 정전압 정주파수의 발전이 자립형 발전에서도 가능함을 입증하였다. 등가회로와 정상상태 dq 모델에서 유도된 제한조건으로부터 자기여자상태에서의 평형운전점을 결정하고 해석의 타당성을 실험을 통해 보였다.

본 연구는 동기속도 이하의 운전범위에만 국한되었으나 동기속도 이상에서의 운전도 회생이 가능한 양방향성 정류기⁷⁾를 도입함으로써 실현할 수 있을 것으로 기대되며 앞으로 이 방향으로의 연구가 진척되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) J.A.A. Melkebeek and D.W. Novotny, "Steady state modelling of regeneration and self excitation in induction machines", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no.8, pp.2725~2733, 1983
- 2) 박민호, 김진오, 김경서, 정승기 "인버터터 여자에 의한 유도 발전기의 연구", *대한전기학회논문지*, 제34권 제8호, pp.331-337, 1985년 8월

- 3) F.J. Brady, "A mathematical model for the doubly-fed wound rotor generator", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, no.4, pp.798-802, 1984
- 4) D.W. Novotny, D.J. Gritter and G.H. Studmann, "Self-excitation in inverter driven induction machines", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-96, no.4, pp. 1117-1125, 1977.
- 5) S.S. Murthy, O.P. Malik and A.K. Tandon, "Analysis of self excited induction generators", Proc. Inst. Elec. Eng., vol. 129, Pt. C, no.6, pp. 260-265, 1982
- 6) A. Schonung and H. Stemmler, "Static frequency with subharmonic control in conjunction with reversible variable speed ac drives", Brown Boveri Rev., vol.51, pp.555-577, 1964.
- 7) W. A. Wilson, "The forced-commutated inverter as a regenerative rectifier", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-14, no.4, pp. 335~340, 1978

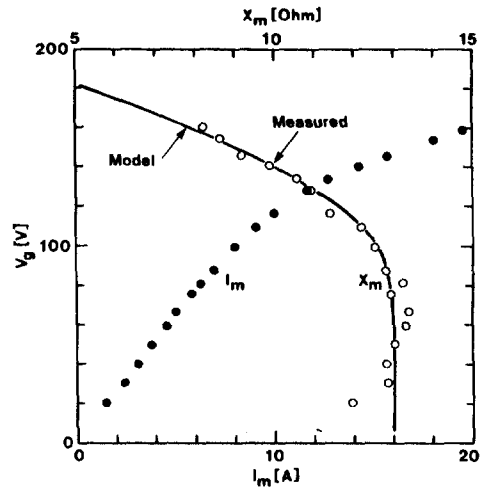


그림 9. 무부하 포화특성곡선 및 자화리액턴스
Fig. 9. No load saturation curve and magnetizing reactance.

부록 1.

식 (16)의 행렬요소는 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 D &= (R_s^2 + X_s^2)(R_r^2 + s^2 X_r^2) + 2sX_m^2 \\
 &\quad (R_s R_r - sX_s X_r) + s^2 X_m^4 \\
 A &= R_s(R_r^2 + s^2 X_r^2) + sR_r X_m^2 \\
 B &= X_s(R_r^2 + s^2 X_r^2) - s^2 X_r X_m^2 \\
 E &= R_r(R_s^2 + X_s^2) + sR_s X_m^2 \\
 F &= sX_r(R_s^2 + X_s^2) - sX_s X_m^2 \\
 M &= -X_m(R_r X_s + sR_s X_r) \\
 N &= X_m(R_s R_r - sX_s X_r + sX_m^2)
 \end{aligned}$$

부록 2. 기계 상수

3 상, 3.5KW 권선형
 정격전압 220[V] 정격전류 14[A]
 60Hz, 4 극, 1700 rpm(전동기 사용시)

$$\begin{aligned}
 R_s &= 0.29[\Omega] & R_r &= 0.31[\Omega] \\
 X_{ls} &= 0.97[\Omega] & X_{lr} &= 0.97[\Omega] \\
 \text{권선비 } a &= 1.13
 \end{aligned}$$

무부하 포화특성은 그림 9와 같으며 해석과정에서 자화리액턴스는 아래와 같이 V_g 의 급수로 표현되는 모델을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 X_m &= C_4 V_g^4 + C_3 V_g^3 + C_2 V_g^2 + C_1 V_g + C_0 \quad [\Omega] \\
 &\quad (V_g > 60[V]) \\
 X_m &= 13[\Omega] \quad (V_g < 60[V])
 \end{aligned}$$

단 $C_0 = 17.95$
 $C_1 = -0.2254$
 $C_2 = 3.697 \times 10^{-3}$
 $C_3 = -2.497 \times 10^{-5}$
 $C_4 = 5.131 \times 10^{-8}$