

벡터 제어 방식에 의한 자립형 유도 발전기의 제어

기태훈* 정승기** 박민호*
* 서울대 ** 광주대

The Control of Stand-Alone Induction Generator with Vector Control

Kee Tae-Hoon*, Jeong Seung-Gi** and Park Min-Ho*

* Seoul National University ** Kwangjuon University

ABSTRACT

The stand alone induction generator has been excited by capacitor bank or voltage source inverters. The conventional excitation methods offer several restrictions on the operation of the induction generator in various operating conditions. To overcome the restrictions, this paper presents the induction generator system excited by the current controlled inverter which operates on the principle of vector control. The proposed control scheme is based on the rotor flux oriented indirect vector control. The steady state characteristics are investigated to yield control ranges under various operating conditions. Through the simulation, it is confirmed that the system has good dynamic characteristics within the controllable ranges given by the steady state analysis.

I. 서론

과거의 유도기는 주로 전동기로서 사용되어 왔고 발전기로서 사용되는 예는 매우 드물었다. 이는 유도기가 동기기에 비해 정전압 정주파수의 발전을 행하는 데에 어려움이 있고 또 여자를 위하여 항상 지상의 무효전력을 공급 받아야 하는 등의 취약점을 지니고 있기 때문이다. 그러나 유도기는 기계적으로 견고하고 보수 유지의 부담이 적어 중소용량의 극지 발전에 적용이 용이한 것으로 평가되고 있다. 특히 풍력이나 소수력 등과 같이 에너지원의 특성상 일정한 회전동력을 얻기가 어려운 장소에서는 비동기 발전기로서의 유도 발전기가 적합한 특성을 지니고 있다.

이러한 점을 감안해 볼 때 유도 발전기가 유망한 분야로는 전력 계통에서 고립된 지역에서 대체 에너지원을 사용하는 중소용량의 극지 발전이라 할수 있다. 그러나 자립형 유도 발전기의 실현을 위해서는 발전기의 자화 전류를 공급해 주기 위한 여자 방식의 구안이 관건이 된다. 가장 손쉬운 방법으로 콘덴서를 사용한 자기 여자 방식이 있으나 운전조건의 변동에

따라 출력 전압의 제어가 어렵고 좁은 운전가능 영역에 있어서 문제가 있다[1],[2]. 이에 대신하는 방법으로 인버터의 스위칭 작용이 무효 전력을 발생할수 있다는 점에 착안, Novotny 등이 제시한 인버터 여자형 유도 발전기가 있다[3],[4]. 이 방식은 광범위한 속도 영역에서 출력전압을 제어하기가 비교적 용이하다는 장점이 있다. 그러나 그때의 발전 상태는 콘덴서 여자형과 마찬가지로 기본적으로 발전기의 자기 포화 상태에 의존하므로 과도한 여자전류와 효율의 저하를 초래할 수 있다.

본 연구에서는 인버터 여자형 유도 발전기의 개선책의 하나로써 근래 교류 전동기의 속도 제어에 보편화 되고 있는 전류 제어형 PWM 인버터를 적용 하였다. 제어 기법으로는 회전자 최고자속 기준의 벡터제어 방식을 원용함으로써 운전 특성의 향상을 꾀하였으며 제한 운전조건의 변화에 따른 특성의 변화 및 운전범위를 고찰하였다.

II. 시스템의 구성

전력 회로의 구성

그림 1에 본 연구에서 제안한 유도 발전기 시스템의 개략도를 보였다. 전체 시스템은 원동기와 발전기, 여자용 인버터, 그리고 초기 충전 회로로 구성된다. 본 연구의 대상으로 삼은 유도 발전기는 3상 60 Hz 4극의 3.5kW 권선형 유도기로서 슬립링을 단락하여 농형과 같이 사용하는 것으로 하였다. 기계의 계상수는 다음과 같다.

- 정격 전압 220 V 정격 전류 14 A
- 고정자 저항 $R_s = 0.29 \Omega$ 회전자 저항 $R_r = 0.31 \Omega$
- 회전자 및 고정자 누설 인덕턴스 $L_{ls} = L_{lr} = 2.57 \text{ mH}$
- 자화 인덕턴스 $L_m = 34.5 \text{ mH}$

여자용 인버터는 히스테리시스 전류 제어기에 의해 CRPWM (Current Regulated PWM) 으로서 동작하며 기준 전류는 제어 루프를 통해 주어진다. 그리고 초기 충전 회로는 발전기가 전압 확립(voltage build up)을 하기 위한 초기 전류를 공급하기 위해 필요하며 전압 확립이 이루어지고 나면 다이오드에 의해 인버터 속과 차단된다.

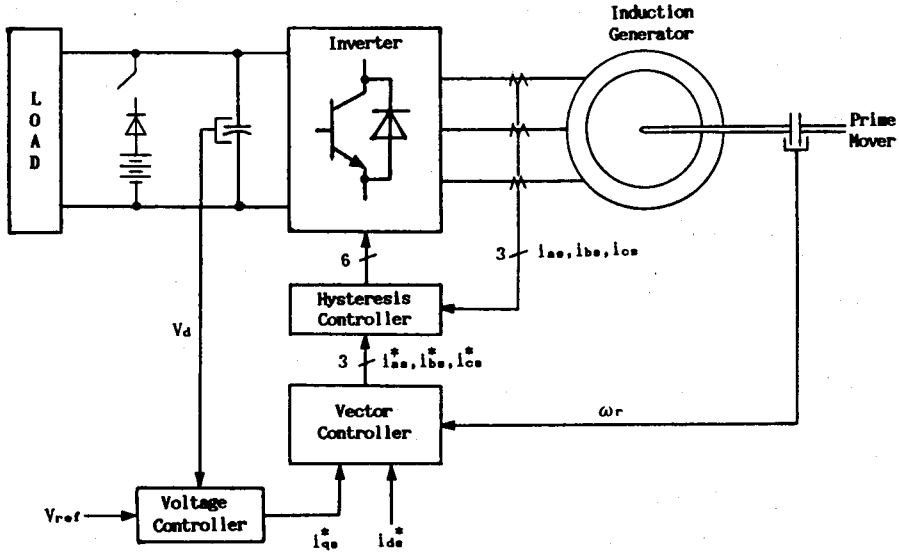


그림 1. 유도발전기 시스템의 구성

본 시스템에서 부하는 인버터 직류측에 접속되어 있으며 제어 루우프에서 직류 전압 V_d 를 제어, 부하에 일정한 전력을 공급하는 것으로 하였다. 그리고 해석과 실험의 편의상 부하는 저항부하인 것으로 가정한다.

제어 루우프

제어 루우프는 전압 제어기와 벡터 제어부로 구성된다. 벡터 제어부에서는 고정자 전류의 q축 성분과 d축 성분간에 상호 간섭이 없는 회전자 최고자속을 기준으로 한 벡터 제어를 행한다. 이에 대해서는 많은 문헌에서 언급되어 있으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.[5],[6]

회전자 최고 자속 λ_{qr} 과 λ_{dr} 에 대한 미분 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$p\lambda_{qr} + R_r i_{qr} + \omega_1 \lambda_{dr} = 0 \tag{1}$$

$$p\lambda_{dr} + R_r i_{dr} + \omega_1 \lambda_{qr} = 0 \tag{2}$$

여기서

$$\omega_1 = \omega_e - \omega_r \tag{3}$$

로서 ω_e 와 ω_r 은 고정자 전류의 각속도, 회전자의 전기적 회전 각속도를 각각 나타낸다.

식 (1),(2)에서 회전자 자속 기준 제어가 되려면 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\lambda_{qr} = p\lambda_{qr} = 0 \tag{4}$$

$$p\lambda_{dr} = 0 \tag{5}$$

한편

$$\lambda_{qr} = L_{m1} i_{qs} + L_r i_{qr} \tag{6}$$

$$\lambda_{dr} = L_{m1} i_{ds} + L_r i_{dr} \tag{7}$$

의 관계가 있으므로 식 (4)-(7)을 식 (1)-(2)에 대입하여 다음의 결과를 얻는다.

$$\omega_1 = \frac{R_r \cdot i_{qr}}{L_r \cdot i_{dr}} \tag{8}$$

즉 주어진 i_{qr} 와 i_{dr} 로부터 슬립 주파수가 식(8)을 만족하도록 조절하면 벡터 제어를 행할수 있다.

이때 회전자 전류와 자속은 다음과 같이 결정된다.

$$i_{qr} = - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \tag{9}$$

$$i_{dr} = 0 \tag{10}$$

$$\lambda_{qr} = 0 \tag{11}$$

$$\lambda_{dr} = L_{m1} i_{ds} \tag{12}$$

그리고 발전기가 회전 방향으로 발생하는 토크는

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} i_{qs} \tag{13}$$

와 같이 주어진다.

만일 i_{ds} 를 일정한 값으로 놓아 회전자 최고 자속을 일정하게 유지 시키면 식 (13)에서 발전기의 토크를 i_{qs} 에 직접적으로 비례하게끔 제어할 수 있음을 알수 있다.

그림 2에 벡터 제어를 통한 슬립 전압의 제어 루우프를 도시하였다. 인버터의 직류측 전압 V_d 를 피드백하여 PI 제어기를 거쳐 이를 고정자 q축전류의 기준치로 잡는다. 여기서 한 가지 주목할 것은 PI 제어기의 이득이 음의 값을 갖도록 되어 있다는 점이다. 이렇게 함으로써 정상 상태에서 i_{qr} 는 음수가 되어 회전과 반대 방향의 토크를 발생, 기계적 에너지가 발전기로 흡수 되도록 한다.

운전 과정에서 자속 성분 전류 i_{ds} 는 항상 일정한 값으로 유지하여 회전자 자속을 정격치가 되도록 한다.

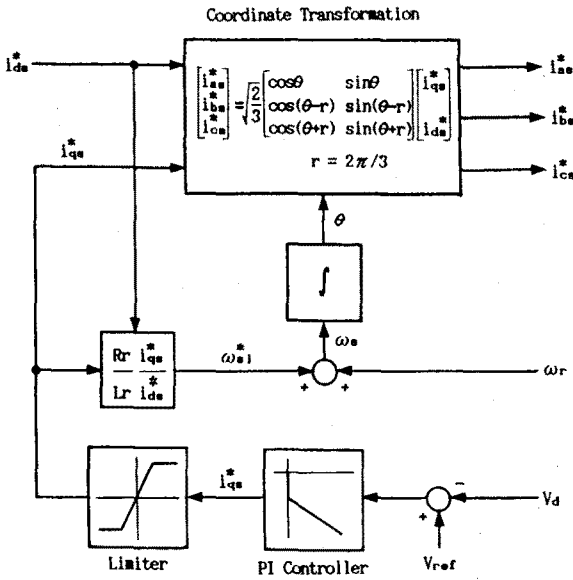


그림 2. 벡터제어방식에 의한 전압제어 무우프

III. 정상 상태 특성

정상 상태 관계식

시스템의 운전 조건에 따른 정상 상태 특성의 변화를 고찰하기 위하여 식(14)와 같이 동기 속도로 회전하는 dq 축상의 발전기 모델을 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_m \\ -\omega_s L_m & R_s & -\omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s L_m & R_r \\ \omega_s L_m & 0 & -\omega_s L_m & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (14)$$

이를 구역 행렬의 표현식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ss} & Z_{sr} \\ Z_{rs} & Z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

로 정의하면 식 (15)의 구역 행렬들은 다음과 같이 된다.

$$Z_{ss} = R_s I + \omega_s L_m J \quad (17)$$

$$Z_{sr} = \omega_s L_m J \quad (18)$$

$$Z_{rs} = \omega_s L_m J \quad (19)$$

$$Z_{rr} = R_r I + \omega_s L_r J \quad (20)$$

본 시스템에서는 발전기가 전류 제어형 인버터에 의해 운전되므로 고정자 전류를 독립 변수로 취하는 것이 바람직하다. 따라서 식(15)에서 회전자 전류와 고정자전압을 고정자전류의

함수로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$I_r^{qd} = -Z_{rr}^{-1} Z_{rs} I_s^{qd} \quad (21)$$

$$V_s^{qd} = (Z_{ss} - Z_{sr} Z_{rr}^{-1} Z_{rs}) I_s^{qd} \quad (22)$$

$$I_r^{qd} = \frac{\omega_s L_m}{R_r^2 + \omega_s^2 L_r^2} (\omega_s L_r I + R_r J) I_s^{qd} \quad (23)$$

이 되고 고정자 전압은

$$V_s^{qd} = (R I + X J) I_s^{qd} \quad (24)$$

$$\text{단 } R = R_s + k R_r \quad (25)$$

$$X = \omega_s L_s + k \omega_s L_r \quad (26)$$

$$k = \frac{\omega_s \omega_s L_m^2}{R_r^2 + \omega_s^2 L_r^2} \quad (27)$$

식 (24)에서 $R I + X J$ 는 유도기 입력 단에서 본 입력 임피던스 행렬에 해당한다.

발전영역의 산정

주어진 시스템이 전압확립을 하여 발전이 이루어지기 위해서는 기계적 입력이 발전기내의 손실 보다 커서 고정자단을 통해 인버터 속으로 전달될 수 있어야 한다. 즉 고정자 입력전력 P_s 가 음의 값이 되어야 한다.

$$P_s = v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} = (V_s^{qd})^t I_s^{qd} \quad (28)$$

이므로 식(24)로부터

$$\begin{aligned} P_s &= (I_s^{qd})^t [R I + X J] I_s^{qd} \\ &= (I_s^{qd})^t [R I - X J] I_s^{qd} \\ &= R (I_s^{qd})^t I_s^{qd} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\text{즉 } P_s = R (I_{qs}^2 + I_{ds}^2) \quad (30)$$

제II절에서 설명한 벡터제어를 사용하였을 경우 슬립 주파수가 식(8)에 의해 주어지므로 이를 식 (25)와 (27)에 대입하면

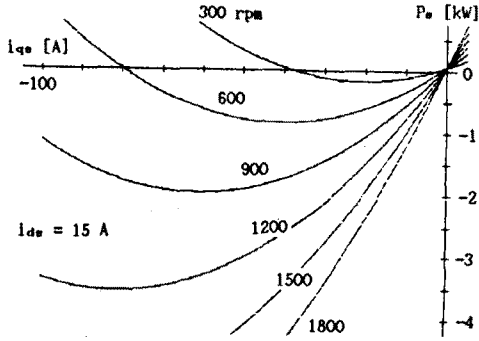
$$R = R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2}{L_r} \frac{i_{qs} i_{ds}}{i_{qs}^2 + i_{ds}^2} \quad (31)$$

이 되므로 식 (30)은

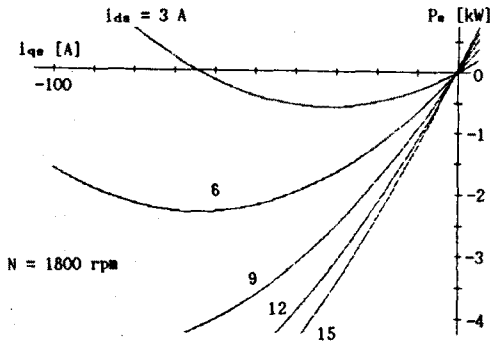
$$P_s = (R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r) i_{qs} + \frac{L_m^2}{L_r} \omega_s i_{ds} i_{qs} + R_s i_{ds}^2 \quad (32)$$

와 같이 된다.

그림 3 의 (a)와 (b)는 q 축 전류에 따라 고정자 입력전류가 변화하는 것을 여러 단계의 속도와 d 축 전류에 따라 나타내고 있다. 각 곡선에서 원속 아래의 부분이 발전이 이루어지는 영역에 해당한다. 이로부터 발전이 이루어지기 위해서는 발전기의 회전 속도와 d 축 전류가 어느 하한치 이상이 되어야 함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. i_{qe} 의 변화에 대한 발전기 입력전력의 변화

발전 영역을 구하기 위해서 식 (32)를 다음과 같이 i_{qe} 에 대한 2차 함수로 간주하고 근의 존재가능영역을 구하면 된다.

$$\left(\frac{L_m^2}{L_r} \omega_r i_{ds} \right)^2 - 4 \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r \right) R_s i_{ds}^2 > 0 \quad (33)$$

이로부터 발전에 필요한 최소한의 속도는 i_{ds} 에 관계없이 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_{r, \min} = \frac{2L_r}{L_m^2} \sqrt{R_s \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r \right)} \quad (34)$$

그림 4는 속도가 변화할 때 주어진 만큼의 전력을 발전하기 위해 필요한 최소의 i_{ds} 값이 변화하는 상태를 나타내고 있다.

그림 5(a)는 주어진 i_{ds} 에서 여러단계의 출력을 내기 위한 속도와 i_{qe} 간의 관계를 보여주고 있으며 그림 5(b)는 주어진 속도에서 여러 단계의 출력을 내기 위한 i_{ds} 와 i_{qe} 간의 관계를 나타낸다.

전압제어범위

본 연구의 대상이 되는 전류제어형 PWM 인버터가 원활한 동

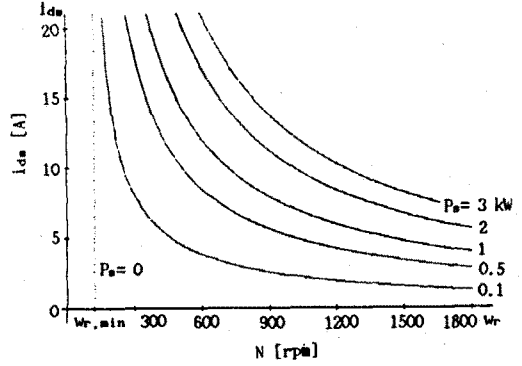
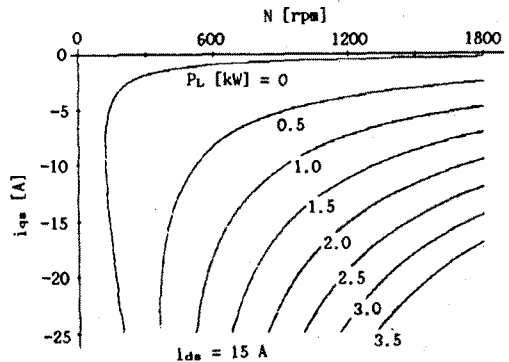
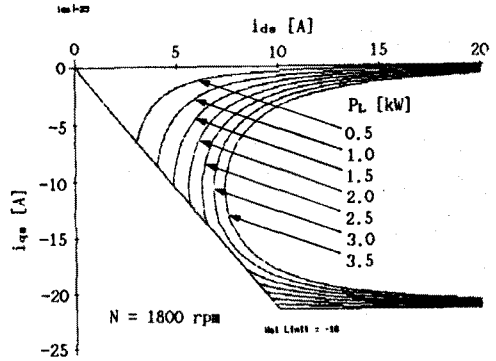


그림 4. 출력에 대한 발전영역의 변화



(a)



(b)

그림 5. 운전조건에 따른 일정출력곡선의 변화

작을 하기 위해서는 직류속 전압이 교류속 전압에 비하여 충분히 커야 한다. 일반적으로 전류제어가 가능한 직류전압의 최소치는 교류속 선간전압의 최대치가 된다 [7].

d 축과 q 축 전압으로 표시된 발전기의 상전압 실효치 V_s 는 다음과 같이 주어진다.

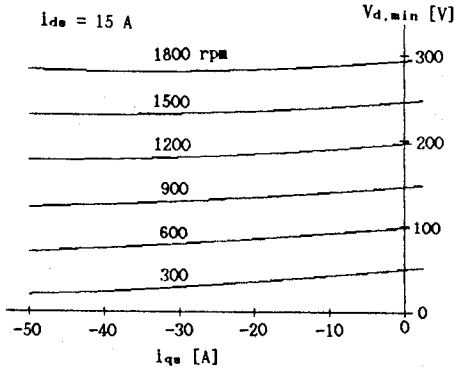
$$V_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{v_{qs}^2 + v_{ds}^2} \quad (35)$$

따라서 직류전압의 최소치는

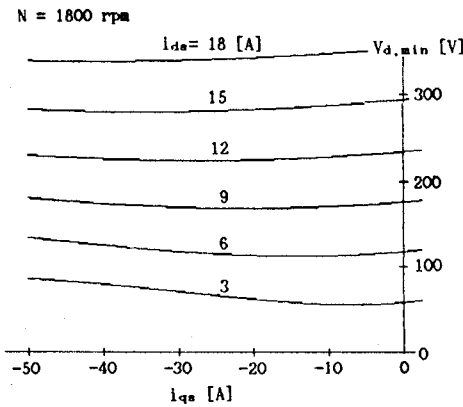
$$V_{d,\min} = \sqrt{6} V_s = \sqrt{2} \sqrt{V_{qe}^2 + V_{ds}^2} \quad (36)$$

이 되고 이 값이 직류속 전압의 제어범위를 결정한다. 만일 이 값 이하로 직류전압을 제어하면 전류는 기준치를 추종하지 못하고 제어가 불가능한 상태로 된다.

식 (36)에 식 (24)-(27)을 대입하면 주어진 운전조건하에서 $V_{d,\min}$ 을 구할 수 있다. 그림 6의 (a)와 (b)는 여러 단계의 속도와 I_{ds} 에 대해 I_{qe} 를 변화시킬 경우 $V_{d,\min}$ 의 변화를 도시하고 있다.



(a)



(b)

그림 6. 제어가능한 최소 출력전압의 변화

IV 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 시스템의 동작특성을 살펴보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

먼저 그림 7은 무부하 상태에서 전압 확립 과정을 보인 것이다. 초기 여자시 약간의 전압 강하를 거친 다음 전압이 기준

치까지 상승하고 있음을 알 수 있다. 그림 8(a)는 일정 출력전압으로 제어하고 있는 상태에서 부하의 증가시 과도 특성을 보여주고 있으며 그림 8(b)는 출력전압의 기준치 변화에 대한 응답 특성을 나타낸다.

그림 9는 III 절에서 설명한 제어범위를 벗어났을 경우의 동작을 보여준다. 먼저 그림 9(a)는 부하저항을 감소시켜 주어진 운전 조건에서 출력이 제어가능범위를 벗어났을 때이며 출력전압이 기준치를 추종하지 못하고 낮은 값에서 정상상태오차를 발생하고 있다. 한편 그림 9(b)에서는 전압기준치를 주어진 상태에서 지나치게 낮게 했을 경우 전류제어가 제대로 이루어지지 못하고 있는 상태를 나타내고 있다.

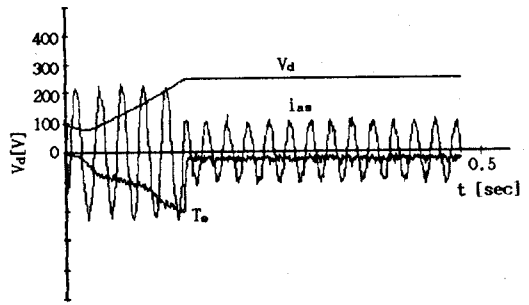
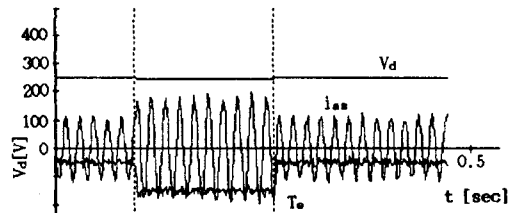
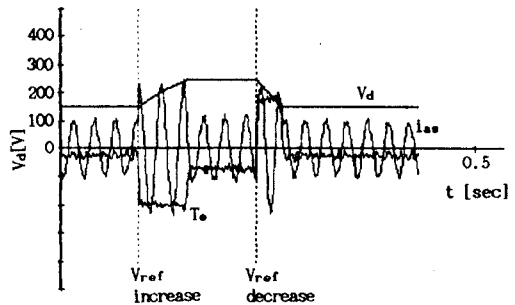


그림 7. 전압 확립 과정

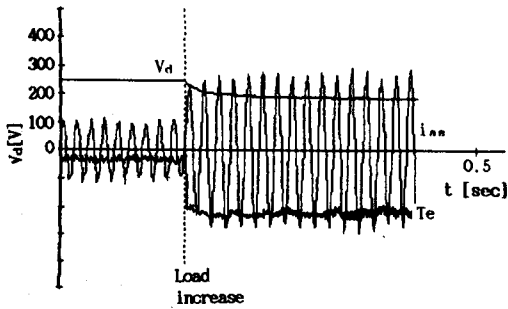


(a) 부하의 변화

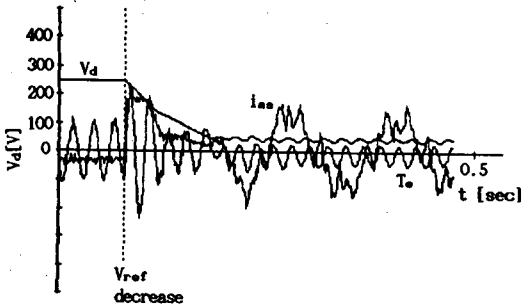


(b) 전압기준치의 변화

그림 8. 과도 응답 특성



(a) 출력범위의 이탈



(b) 전압제어 범위의 이탈

그림 9. 제어범위의 이탈

V. 결론

본 연구에서는 유도전동기 구동에 널리 적용되고 있는 벡터 제어 방식을 유도 발전기에 적용, 그 가능성을 확인하였다. 회전자 기준자속제어 방식을 사용하였을 때 정상상태특성을 살펴 보고 발전가능 제어영역과 출력전압제어가 가능 영역을 산정, 시스템을 실제 적용하였을 때의 한계점을 고찰하였다. 시뮬레이

션을 통해 그 제어 특성을 살펴보고 이론적인 제어범위의 존재를 확인하였다.

벡터제어방식을 유도전동기의 속도모드제어를 위해 사용되어 왔으나 본 연구에서 살펴본 바와 같이 유도 발전기의 속도제어에 있어서도 마찬가지로 적용될 수 있음을 알았다. 차후 본 시스템에 대한 과도 특성을 최적화하기 위한 이득 선정 등에 관련된 연구가 계속될 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] S.A.Daly, A.M.de Paor and R.J.Simpson, "Modelling and control of a wind-driven induction generator for water storage heating," IEE Proc., vol.130, pt.A, no.9, pp.587-595, Dec. 1983.
- [2] A.K.Tandon, S.S.Murthy, and G.J.Berg, "Steady state analysis of capacitor self-excited induction generators," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-103, no.3, pp.612-618, Mar. 1984.
- [3] D.W.Novotny, D.J.Gritter and G.H.Studtmann, "Self-excitation in inverter driven induction machines," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-96, no.4, July/Aug. 1977.
- [4] 박민호, 김진오, 김경서, 정승기, "인버터 여자에 의한 유도발전기의 연구," 대한전기학회 논문지 제 34권 제 8호, pp.331-337, 1985년
- [5] W.Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, 1985.
- [6] S.Ogasawara, H.Akagi and A.Nabae, "The generalized theory of indirect vector control for AC machines," IEEE Trans. on Industry Application, vol.IA-24, no.3, pp.470-478, 1988.
- [7] B.T.Ooi, J.W.Dixon, A.B.Kulkarni and M.Nishimoto, "An integrated AC drive system using a controlled-current PWM rectifier/inverter link," '86 PESC Record, pp.494-501, 1986.