

PWM 인버터 여자에 의한 권선형 유도 발전기의 정상상태 특성 해석에 관한 연구

박민호 *
* 서울대

정승기 **
** 광운대

STEADY STATE ANALYSIS OF A PWM INVERTER - EXCITED WOUND ROTOR INDUCTION GENERATOR

Min H. Park Seung G. Jeong
Seoul Natn'l Univ. Kwangwoon Univ.

I. 서론

유도발전기가 계통에 연계되어 운전되고 있을 경우에는 여자에 필요한 무효전력이 계통으로부터 공급되므로 여자에 문제가 없으나 계통에서 분리된 독립된 발전기로 사용할 경우에는 여자를 위한 별도의 대책이 강구되어야 한다. 농형 유도발전기의 경우 고정자단에 콘덴서를 부착함으로써 자기여자를 하는 방식이 널리 사용되어 왔으며 콘덴서 대신 전압형, 혹은 전류형의 인버터를 통해 발전을 하는 방법도 제안되어 왔다. 그러나 농형 유도발전기는 원천적으로 발전전압 및 주파수가 부하와 속도의 변화에 따라 변동하게 되며 이로부터 바로 정전압 정주파수 (CVCF) 의 전원을 얻는다는 것은 불가능하다.

본 연구에서는 농형 유도기 대신 권선형 유도기를 사용함으로써 가변속 구동원으로부터 정전압 정주파수의 전원을 얻을 수 있는 독립된 발전 시스템을 제안하고 이의 정상상태특성을 해석하였다.

II. 시스템의 구성

그림1에 본 연구의 대상인 유도발전 시스템을 나타내었다. 여자회로는 전파정류회로 및 PWM 인버터로 구성되어 있으며 발전 전력의 일부를 고정자로부터 받아들여 회전자를 여자함으로써 독립된 자력식 발전시스템이 구성되도록 하였다. 발전기의 회전 속도가 F_m 이라 할 때 고정자 출력주파수는 인버터의 여자주파수 sF 를 적절히 조절함으로써 $F = F_m + sF$ 의 일정주파수가 유지되도록 한다. 이 때 발전전압은 PWM 인버터의 변조비를 변화시킴으로써 제어된다.

초기의 전압확립을 위해 별도의 직류전원을 사용하였으며 정상상태 운전시 고정자와 회전자간의 변압기 효과에 의해 여자회로 내에는 유효전력이 순환하게 된다. 따라서 자기여자, 즉 전압확립은 기계적 입력이 부하의 소비전력과 순환전력에 의한 손실의 합과 평형을 이루는 점에서 결정된다. 이와 함께 시스템 내에서의 무효전력 또한 평형을 이루어야 하는데 이때의 무효전력은 인버터의 스위칭 작용을 통해 자동적으로 공급된다.

III. 등가회로

여자 회로를 통한 전력의 흐름을 표현하기 위해 그림1에 표시한 바와 같이 정류기의 입력단에서 본 등가 임피던스 Z' 와 회전자의 등가 입력 임피던스 $Z'' = R' + jX'$ 를 정의하면 이들 간에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$Re = \frac{R^2 + X^2}{\beta^2 R} \quad (1)$$

단

$$\beta = a (Vr' / Vs) = Vr / Vs \quad (2)$$

$$R = a^2 R', \quad X = a^2 X'$$

여기서 β 를 "여자비" 라 칭하며 이는 PWM 인버터의 변조비의 상수배로 표현된다. Re 를 포함하여 시스템의 등가회로를 그리면 그림 2와 같다. 그림 2로부터

$$R = s[R/s + RaXm^2 / G] \quad (3)$$

$$X = s[Xlr + (Ra^2 + (Xls+Xm)Xls)Xm/G] \quad (4)$$

단 $Ra = Rs + RlRe/(Rl+Re)$

$$G = Ra^2 + (Xls+Xm)^2$$

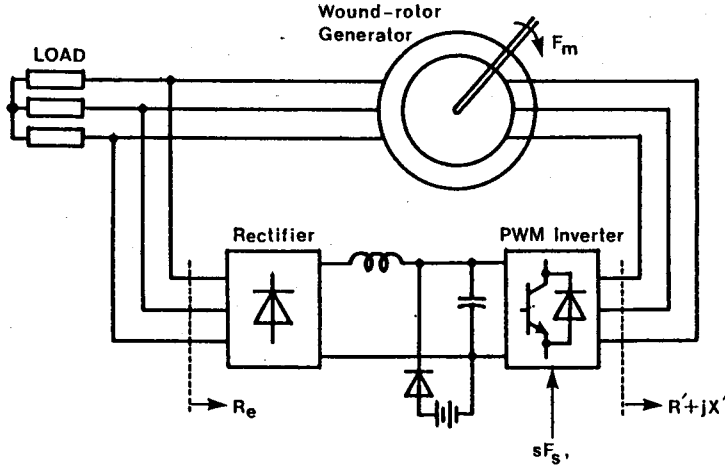


그림 1. 권선형 유도발전기 시스템

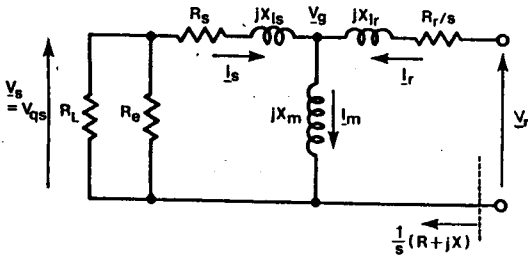


그림 2. 상당 등가회로

식 (1), (3) 및 (4) 는 R_e , R , X 에 대한 일련의 방정식이며 이의 해로부터 주어진 속도, 부하 및 변조비에 대한 등가회로상의 정수를 결정할 수 있다.

IV. dq 모델에 의한 해석

제안된 시스템의 운전 조건을 결정하기 위해서는 자기포화를 포함한 에너지의 평형관계식을 유도하여야 한다. 일반적인 유도기의 정상상태 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & X_s & 0 & X_m \\ -X_s & R_s & -X_m & 0 \\ 0 & sX_m & R_r & sX_r \\ -sX_m & 0 & -sX_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

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

$$V_{qr} = \sqrt{3} V_r \cos \delta = \beta \cos \delta V_{ds} \quad (6)$$

$$V_{dr} = \sqrt{3} V_r \sin \delta = \beta \sin \delta V_{ds}$$

로 주어지고 유효전력의 평형식은

$$-V_{qs}I_{qs} = V_{qr}I_{qr} + V_{dr}I_{dr} + V_{qs}^2 / R_l \quad (7)$$

무효전력의 평형식은

$$-V_{qs}I_{ds} = V_{qs}^2 / X_l \quad (8)$$

식 (5), (6)을 사용하여 (7), (8) 에서 전류 및 전압을 소거하면 다음의 관계식이 얻어진다.

$$\beta (s+1)M \cos \delta + \beta (s-1)N \sin \delta = -A - \beta^2 E - D/R \quad (9)$$

$$N \cos \delta + \beta M \sin \delta = -B - D/X_l \quad (10)$$

여기서

$$D = (R_s^2 + X_s^2)(R_r^2 + X_r^2) + 2sX_m^2(R_s R_r - sX_s X_r) + s^2 X_m^2$$

$$A = R_s(R_r^2 + s^2 X_r^2) + sR_r X_m^2$$

$$B = X_s(R_r^2 + s^2 X_r^2) - s^2 X_r X_m^2$$

$$E = R_r(R_s^2 + X_s^2) + sR_s X_m^2$$

$$F = sX_r(R_s^2 + X_s^2) - sX_s X_m^2$$

$$M = -X_m(R_r X_s + sR_s X_r)$$

$$N = X_m(R_s R_r - sX_s X_r + sX_m^2)$$

식 (9), (10)은 제안된 시스템이 평형상태에서 자기여자가 되기 위한 조건식에 해당하며 이의 해로부터 주어진 조건 하에서의 자화리액턴스가 구해진다.

V. 정상상태 특성

일단 X_m 이 구해지고 나면 앞서의 식 (1)-(4)로부터 등가 임피던스를 계산해 내고 이 값을 사용, 등가회로 상에서 각 부의 전압과 전류를 구할 수 있다. 그림 3 및 4에 이에 대한 결과를 나타내었다.

그림 5는 일정한 공극전압을 발전하기 위한 여자비와 슬립 사이의 관계를 보인 것으로 정격전압 부근에서는 이들 간에 거의 선형적인 관계가 유지되어야 함을 알 수 있다.

그림 6에 자기여자에 의해 전압이 확립된 상태에서 발전 전압과 이때의 회전자 여자전류의 파형을 보았다.

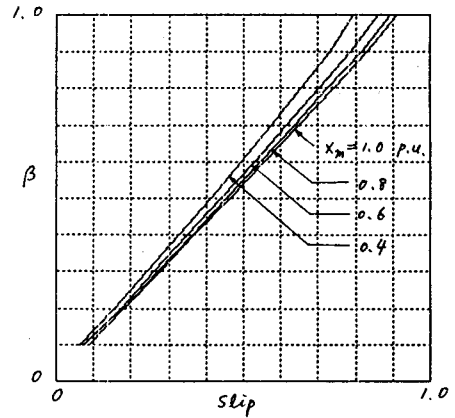


그림 5. 전압확립을 위한 여자비와 슬립 사이의 관계

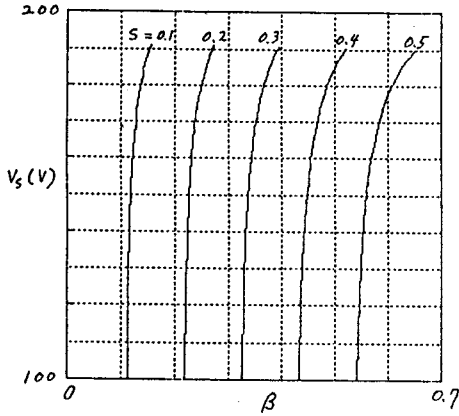


그림 3. 여자비에 대한 상전압의 변화

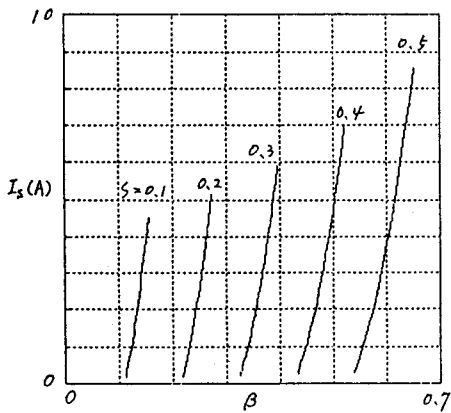


그림 4. 여자비에 대한 전류의 변화

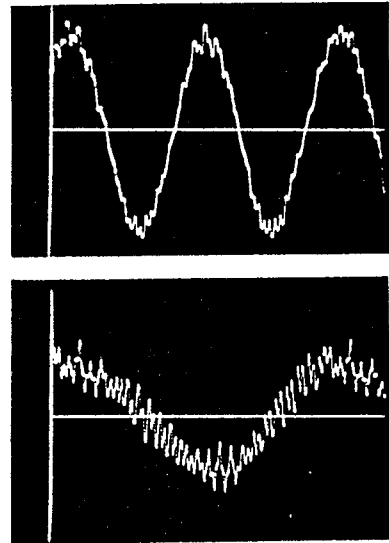


그림 6. 발전전압 (위) 및 회전자 여자전류 (아래)의 파형

VI. 결 론

본 연구에서는 속도 및 부하가 변동하는 상태에서 일정한 전압과 주파수를 갖는 전원을 얻기 위한 권선형 유도발전기 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템이 등가회로와 dq모델을 사용함으로써 해석될 수 있음을 보였고 해석 결과를 확인하기 위한 실험을 행하였다. 이들로부터 권선형 유도발전기는 적절한 회전자여자를 통하여 계통에서 독립된 상태에서도 자기여자가 가능하며 CVCF 전원으로서의 실용화에 가능성이 있음을 보였다.

VII. 참고문헌

- [1] J.A.A. Melkebeek and D.W.Novotny, "Steady state modelling of regeneration and self excitation in induction machines," IEEB Trans., vol.PAS-102, no.8, 1983.
- [2] F.J.Brady, "A mathematical model for the doubly-fed wound rotor generator," IEEB Trans., vol. PAS-103, no.4, 1984
- [3] D.W.Novotny, et.al., "Self-excitation in inverter-driven induction machines," IEEB Trans., vol.PAS-96, no.4, 1977.
- [4] S.S.Murthy, et.al., "Analysis of self excited induction generators," Proc.IEE, vol.129, Pt.C, no.6, 1982