

벡터제어에 의한 자립식 유도발전기의 여자특성 해석

이 규 민, 구 태 만
울 산 대 학 교 전기전자정보시스템공학부

Excitation Characteristics Analysis of an Isolated Induction Generator by applying Vector Control

Kyu-Min Lee, Tae-Man Koo
Department of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

Abstract - The lagging reactive power should be supplied for the excitation of isolated squirrel-cage induction generators by external circuit. This paper deals with a technique to drive the equations for analysis of the excitation characteristics and performance of an isolated squirrel-cage induction generator from the conventional equivalent circuit of induction machine, transform the equations into d-q coordinates to use vector control technique, and carry out the simulation of an induction generator system with various conditions using MATLAB. The results of the simulation indicate that moderate reactive power can be controlled effectively to maintain constant voltage over a wide range of the rotor speeds and loads.

1. 서 론

오늘날 화석에너지 고갈과 환경문제로 인해 대체에너지에 대한 관심이 고조되면서 현재 연구 및 실용화 단계에 진입하고 있는 대체에너지원으로는 풍력, 태양력, 연료전지 등을 들 수 있다. 이들 중 풍력발전이 이용되는 발전기는 형태에 따라 유도발전기와 동기발전기로 나누어지며 유도발전기에서 농형은 정전압 정주파수 발전이 어렵고 여자를 위한 지상 무효전력을 공급받아야 하는 문제점이 있으나 기계적으로 견고하고 유지보수의 비용이 적어 다른 발전기에 비해 매우 경제적이다. 또한 전력전자 기술의 발달로 농형 유도기에서 발생하는 문제점들의 대부분을 극복할 수 있게 되었다. 유도발전기의 발전방식은 계통과 연계여부 즉, 여자전력을 공급받는 방식에 따라 타여자식과 자여자식으로 구분된다. 타여자식에서 농형 유도기는 계통과 연결되며, 동기속도 이상으로 회전할 때 슬립은 음(-)이 되고 기계적 입력이 전기적 출력으로 변하여 발전기로 동작한다. 계통과 독립되어 운전되는 자여자식의 경우에는 여자를 위하여 무효전력을 공급해야 한다. 무효전력을 공급하는 수단으로 커패시터 뱅크를 이용하면 풍속에 따른 회전자의 속도변화로 일정한 전압을 얻을 수 없다. 그러나 무효전력의 크기를 조절하는 방법으로 이런 문제를 해결할 수 있다 [1]. 본 논문에서는 무효전력의 크기를 인버터 스위칭 주파수의 조절에 의해 해결하며 초기 여자를 위하여 커패시터에 배터리를 연결하는 방법을 이용한다. 정전압에 대한 여자 특성을 고찰하기 위하여 벡터 제어기법을 이용하여, 기존 벡터로는 온도에 대한 변화가 다소 적은 1정자 자속을 선택하였다.

2. 본 론

1. 여자 현상

1턴스에 유입되는 무효전력은 인덕터에 저장되는

에너지의 함수로 $Q = 2\omega W_{L,ave}$ 이고 커패시터에 유입되는 무효전력도 커패시터에 저장되는 평균에너지의 함수로 $Q = -2\omega W_{C,ave}$ 로 나타낼 수 있다. 즉, 커패시터에 유입되는 무효전력은 음의 값이고 인덕터에 유입되는 무효전력은 양의 값으로 커패시터는 '무효전력의 공급원'이라할 수 있다. 유도기의 여자에 필요한 무효전력은 커패시터에 의해서 공급된다. 발전기 단자에 커패시터가 연결된 경우 L-C 공진회로와 같게 되며 이것이 발전회로가 되어 유도발전기는 커패시터에 의해서 여자될 수 있다.

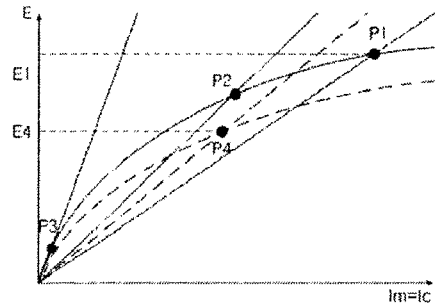


그림 1 여자특성 곡선
Fig. 1 Excitation Characteristics.

그림1은 유도발전기의 전형적인 여자특성을 나타내는데, 여자회로는 포화특성을 가지므로 두 선이 만나는 점에서 전압이 형성된다. 주파수와 커패시터가 동시에 감소할 경우 $P_1 \rightarrow P_4$ 에서 전압이 감소하고 커패시터의 값이 작아지면 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ 로 전압이 작아져 임계값을 벗어나면 전압이 확립되지 않는다[1]. 일반적으로 커패시터 여자에 의한 유도발전기의 출력전압과 주파수는 부하, 회전자의 속도, 커패시터의 용량 및 여자회로의 포화특성에 따라 변동한다. 무효전력을 적절히 조절하기 위해서 인버터의 스위칭을 이용하여 커패시터의 용량을 조절하는데 이것은 여자전류의 조절을 의미한다.

2.2 자립식 풍력 시스템

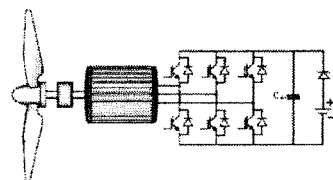


그림 2 시스템 개략도
Fig. 2 System Arrangement.

그림 2는 기계적으로 연결된 인버터 여자형 유도발전기의 개략도이다. 초기 여자는 커패시터에 충전된 전압에 의해서 이루어진다. 즉, 외부 직류전원은 커패시터를 충전시키고 이 에너지가 유도발전기의 자기회로를 여자시켜 철심과 공극에 일정 크기의 자속밀도를 만든다. 여기서 외부 직류전원은 초기 여자만을 위해 사용되므로 용량이 클 필요가 없다. 외부 직류전원이 없어도 철심의 잔류자속에 의해 전압이 발생될 수 있지만 인버터의 스위칭 손실과 발전기의 내부에서 발생하는 전력 손실 등으로 인하여 발전기의 잔류자속을 항상 유지하기 어렵기 때문에 여기서는 외부 직류전원을 이용한다[2]. 인버터의 스위칭 작용으로 직류 커패시터는 3상 커패시터처럼 작용을 한다. 인버터의 스위칭 주파수가 변할 때 직류 커패시터의 용량이 유도발전기 측에서 변하는 것처럼 보인다. 이와 같이 직류 커패시터는 유도발전기의 여자에 필요한 무효전력 즉, 무효전류를 제공한다.

2.3 고정자 자속 중심의 벡터제어

회전자의 속도와 부하의 변화에 무관하게 출력전압을 일정히 유지할 수 있도록 제어하기 위하여 고정자 자속 중심의 벡터제어기법을 이용한다. 그림 2는 고정자 자속을 기준벡터로 한 벡터도이다. 고정자 자속을 기준벡터로 하는 제어는 누설 인덕턴스의 변화에 영향을 받지 않고 단지 고정자 저항의 변화에 영향을 받는다[3]. 물론 고정자 저항의 변화는 예상 자속의 정확도를 떨어뜨리는 경향이 있으나 일반적으로 정격전압에 가까운 일정한 단자전압을 발생하도록 제어하면 고정자 저항의 변화에 대한 효과는 무시할 수 있다. d축 전류를 자속의 방향에 일치시키면 d축 전류에 의해서 자속을 조절할 수 있고 q축 전류는 토크를 조절할 수 있게 된다. 역기전력의 성분으로 나타나는 d축과 q축의 예상 쇄교자속은 다음 식과 같다.

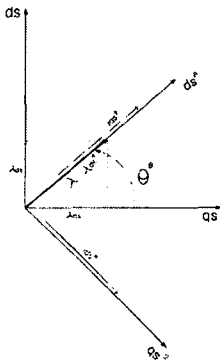


그림 2 고정자 자속 기준 벡터도
Fig.2 Vector Diagram for Stator Flux Oriented Vector Control.

$$\lambda_{ds}^s = \int (V_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt \quad (1)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (V_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt \quad (2)$$

$$\lambda_s = \sqrt{\lambda_{ds}^{2s} + \lambda_{qs}^{2s}} \quad (3)$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}^s}{\lambda_{ds}^s} \right) \quad (4)$$

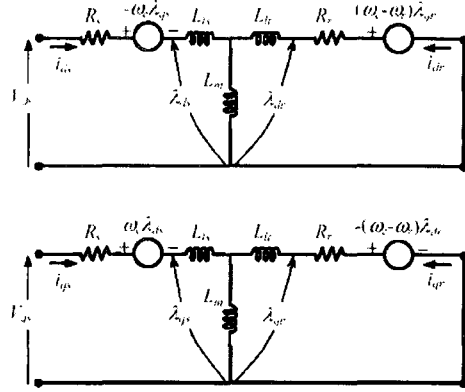


그림 3 회전좌표계에서의 d축과 q축의 등가회로
Fig. 3 D-Q Equivalent Circuit in the Synchronously Rotating Reference Frame.

그림 3은 회전좌표계에서의 d축과 q축의 등가회로를 나타낸다. 동기속도로 회전하는 좌표계에서 d축과 q축의 등가회로와 전압방정식은 다음과 같다.

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (5)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^e + L_r i_{dr}^e \quad (6)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (7)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L_r i_{qr}^e \quad (8)$$

$$R_r i_{dr}^e + p \lambda_{dr}^e - (w_e - w_r) \lambda_{qr}^e = 0 \quad (9)$$

$$R_r i_{qr}^e + p \lambda_{qr}^e + (w_e - w_r) \lambda_{dr}^e = 0 \quad (10)$$

여기서 총 고정자 자속을 회전좌표계의 d축으로 놓았으므로 $\lambda_{ds}^e = \lambda_s$ 이며 $\lambda_{qs}^e = 0$ 으로 미분치 $\frac{d\lambda_{qs}^e}{dt} = 0$ 이다. 이것으로부터 고정자 자속과 관련된 식을 구하면 여자제어 방정식을 유도할 수 있다. 여자제어 방정식은 다음 식과 같다.

$$(1 + T_r p) \lambda_s = (1 + \sigma T_r p) L_s i_{ds}^e - w_{sl} T_r \sigma L_s i_{qs}^e \quad (11)$$

여기서 $w_{sl} = w_e - w_r$, $T_r = L_r / R_r$, $p = d/dt$,

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$ 이고 이 식에서는 i_{qs}^e 의 변화가 λ_{ds}^e 에 영향을 미칠 것이다.

그러므로 decoupling 전류로 i_{qs}^e 의 영향을 제거하면 i_{ds}^e 에 의해 고정자 자속을 제어할 수 있다. decoupling 전류와 슬립 각속도는 다음 식과 같다.

$$i_{deco} = \frac{w_{sl} T_r \sigma i_{qs}^e}{1 + \sigma T_r p} \quad (12)$$

$$w_{sl} = \frac{L_s (1 + \sigma T_r p) i_{qs}^e}{T_r (\lambda_s - \sigma L_s i_{ds}^e)} \quad (13)$$

2.4 고찰

표 1은 시뮬레이션에 사용된 유도발전기의 제정수이다.

파라미터	값
고정자 저항	0.016[Ω]
회전자 저항	0.015[Ω]
고정자 누설 인덕턴스	0.06[mH]
회전자 누설 인덕턴스	0.06[mH]
상호 인덕턴스	3.5[mH]
극수	4
정격속도	1800rpm
관성 및 마찰계수	2.0

표 1. 유도발전기 파라미터
Table 1 Parameters of Induction Generator.

MATLAB simulink를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 시뮬레이션에 이용된 유도발전기의 제어 블록 다이어그램이다. 일정한 출력 전압을 얻기 위한 제 조건을 고찰하였다. 풍속의 변화는 10m/s, 9m/s를 반복적으로 입력하고 일정한 출력 전압을 유지하기 위해서는 상당히 큰 크기의 커패시터가 필요하다. 2000V의 전압을 얻기 위한 적정 커패시터의 값은 $2000\mu F$ 이상의 값이고 PWM Generator의 modulation index의 값이 0.3 이하일 경우에는 여자전류의 부족으로 출력전압이 형성되지 않았다. 부하가 일정할 경우 풍속에 따른 전압조절은 속도에 반비례하는 d축 전류를 조절하여 일정한 출력 전압을 유지할 수 있었고 부하 저항의 변화에 따른 출력전압의 변화는 q축 전류에 의해서 제어할 수 있었다. 그림5는 커패시터 크기에 의한 전압형성 식간을 나타내고 그림 6은 가변 풍속에서 각각 다른 부하의 값을 입력하여 시뮬레이션한 결과이다.

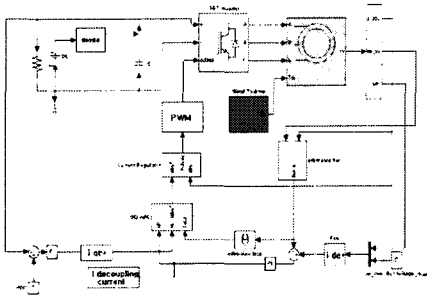


그림 4 유도발전기 제어 블록 다이어그램
Fig. 4 Block Diagram of Induction Generator Control.

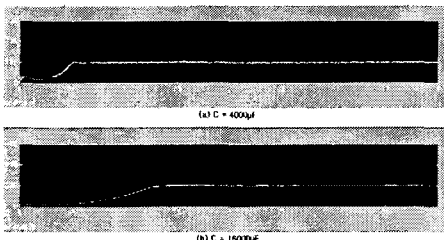
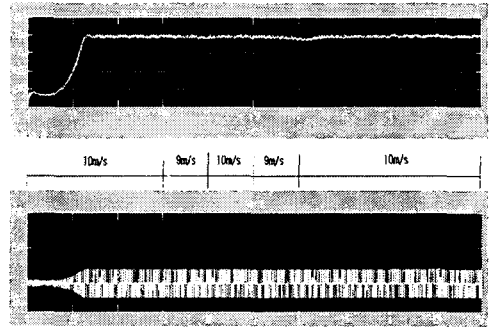


그림 5 커패시터 크기에 따른 전압형성 시간
Fig.5 Generated DC Voltage for Different Capacitance Value.



(a) $R_L = 100\Omega$



(b) $R_L = 150\Omega$

그림 6 조건들의 변화에서 유도발전기의 선간전압과 출력전압

Fig. 6 Generated DC Voltage and Line to Line Voltage at Variation of Conditions.

3. 결 론

농형 유도발전기를 자립형 풍력발전기로 사용하는 시스템에서 여자특성을 규명하기 위한 제방정식을 유도하고, 일정 풍속 이상이면 풍속에 관계없이 일정한 전압을 출력하는 인버터 여자형 시스템을 MATLAB simulink 상에서 구성하여 시뮬레이션하였다. 고정자 자속 기준 벡터제어를 통하여 유도발전기에 적정 무효전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 적정 무효전력을 공급하기 위하여 필요한 커패시터의 값은 일정 이상의 크기를 가지면 크기에 관계없이 일정한 출력전압을 얻을 수 있었고, 커패시터의 크기에 의해 여자특성곡선과 같이 전압형성 시간이 길어지고 리플전압이 감소함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션에서 modulation index의 크기만으로 단자 전압을 제어하여 일정한 값을 유지하였으나 주파수도 함께 고려하면 보다 넓은 범위에서 일정한 출력전압을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 안진우, "회전자 단락 유도발전기의 여자특성 해석", 경성대학교 논문지, 제14권, 제4호, 1993
- [2] D. Seyoum, "Terminal Voltage Control of a Wind Turbine Driven Isolated Induction Generator Using Stator Oriented Field Control", IEEE, p.846-852, 2003
- [3] D. Seyoum, M. F. Rahman, and C. grantham, "inverter Supplied Voltage Control System for an Isolated Induction Generator Driven by a Wind Turbine", IEEE, p.568-575, 2004