

권선형유도발전기 CVCF를 위한 2차 여자 제어법에 관한 연구 (II)

안진우
거제전문대

황영문
부산대학교

A Study on the 2nd Excitation Method for CVCF Generation of Doubly-fed Induction Generator (II)

Jin Woo AHN
Geoje Junior College

Young Moon HWANG
Pusan Nat'l Univ.

Abstract

This paper deals with the control strategy for constant voltage, constant frequency (CVCF) generation of doubly-fed induction generator. As induction machine is a nonlinear and multivariable machine, so, the influential factors for CVCF generation of induction generator are the magnitude of output voltage, load current and its power factor, slip of the machine, etc. To get appropriate control scheme and to research the effect of its parameters, the control equation of induction machine is derived and tested.

The derived condition is very useful for the CVCF control of the machine and for determining the characteristics of the system.

The simulation results show that magnetizing reactance and rotor resistance is a very important parameter in this control system.

1. 서론

최근 에너지문제가 심각히 대두되면서 여러방면으로 대체에너지자원을 검토하고 있다. 그 중 풍력, 소수력, 조력등과 같이 일정한 회전속도를 유지하기 어려운 동력원에서 전기적 에너지를 얻는 장치로 유도발전기가 그 효용성을 인정받고 있다. 유도발전기는 보수나 여자의 문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있으나 근본적으로 비선형 다변수함수이며 무효전력의 제어능력이 없어 실용성의 측면에서 검토의 여지가 많이 남아있다.

유도기의 발전기로서의 동작은 타어식과 자어식으로 나뉜다. 타어식은 전원에 연결되어 있는 경우로 슬립이 음이 되는 구간에서 동작된다. 자어식은 전원과 독립되는 경우로, 농형유도기의 단자에 콘덴서를 부착하여 공진현상을 이용하는 방법과 권선형유도기를 이용하여 제어시스템을 구성하는 방법을 들 수 있으나 농형유도기를 사용하는 경우는 단입출력이기 때문에 근본적으로 전력의 수수와 여자가 고정자를 통해야하므로 동시에 두 조건을 만족시킬 수 없는 것이 단점이다.

본 연구에서는 복수 입출력을 사용하여 정전압 정주파수 제어방식을 제안하고 제안된 제어식을 이용하여 정상상태 제어특성을 검토하였다.

2. 교류발전기의 원리

동기발전기는 회전자가 동기속도로 회전하므로 회전자에 직류전압을 인가하여 동기속도의 회전자계를 발생시킨다. (회전계자형인 경우). 또한 동기발전기는 직류발전기와 마찬가지로 잔류자기가 있어 이것으로 정격전압의 2~3% 정도의 전압이 유기되므로 이것을 정류하여 여자전류로 이용하면 자어식교류발전기의 구성이 가능하다.

유도기의 경우 회전자가 회전하면 이 회전속도는 전원주파수보다 늦든지 빠르든지 할 것이다. 늦은 경우는 회전방향과 같게, 빠른 경우는 회전방향과 반대되게 회전자에 슬립주파수의 전류를 흘려주면 동기와 마찬가지로 전기적으로는 동기속도로 회전하는 자계로 간주할 수 있을것이다. 즉 유도발전기의 경우 동기속도로 회전하는 회전자계를 발생시키기 위해서는 회전자의

회전속도와 동기속도의 차이 슬립주파수의 전류를 흘려주어야 한다. 그러므로 2차회로의 임피던스가 회전자의 회전속도에 따라 변하게 되고 여자상태를 제어하기 위해서는 슬립을 고려한 2차여자전압 또는 여자전류를 회전자에 인가해야한다. 즉 출력전압의 크기는 2차인가전압의 크기와 슬립주파수, 부하전류, 공극자속의 포화의 정도에 따라 변할 것이다.

또한 부하가 인가되면 고정자전압강화본도 보상해야 할 것이다. 이상과 같이 복수 입출력기인 권선형유도발전기의 경우, 회전속도와 부하조건을 고려하면 CVCF발전이 가능하며 이를 위해서는 유도기를 수학적으로 모델화하는 것이 선행되어야 할 것이다.

3. 권선형유도발전기의 제어방정식

유도기가 전동기 또는 발전기로 동작하는 것은 에너지의 흐름이 변하는 것이지 기계의 특성이나 등가회로가 변하는 것은 아니다. 그러므로 일반적으로 이용되는 유도기의 표현식을 이용하여 제어방정식을 유도해야 할 것이다.

해석을 단순화하기 위해, 고정자 및 회전자의 권선은 대칭으로 분포되어 있고 그러므로 MMF의 분포는 정현적이라 가정한다. 또 철손과 슬롯의 단부효과도 무시하며, 전력변환장치를 사용하는 경우 발생하는 고주파성분도 무시하고 해석을 행한다. 일반적으로 고정자속을 기준으로 한 권선형유도기의 쇄교자속은 식 (1), (2)로 표현된다.⁽⁴⁾

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{I}_s + M \vec{I}_r e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$\vec{\Psi}_r e^{j\omega t} = M \vec{I}_s + L_r \vec{I}_r e^{j\omega t} \quad (2)$$

여기서

$\vec{\Psi}_s$: 고정자 총 쇄교 자속	M : 상호인덕턴스
$\vec{\Psi}_r$: 회전자 총 쇄교 자속	ω_r : 회전자 각속도
L_s : 고정자 자기 인덕턴스	\vec{I}_s : 고정자 전류벡터
L_r : 회전자 자기 인덕턴스	\vec{I}_r : 회전자 전류벡터

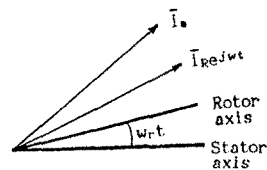


그림 1. 고정자속을 기준한 전류벡터
Fig. 1. Current vector in stator coordinate

이다. 그러므로 유도기의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + L_s \frac{d\vec{I}_s}{dt} + M \frac{d(\vec{I}_r e^{j\omega t})}{dt} \quad (3)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + L_r \frac{d\vec{I}_r}{dt} + M \frac{d(\vec{I}_s e^{-j\omega t})}{dt} \quad (4)$$

여기서 V_m : 고정자 전압벡터
 V_R : 회전자 전압벡터

이다. 유도발전기는 무부하상태에서나 부하상태에서도 항상 일정한 단자전압을 유지해야한다. 이 전압을 V_s 라 한다. 회전자 단자전압은 두 성분으로 나뉜다. 무부하일때 일정 고정단자전압을 위한 회전자 단자전압 V_{RO} 와 부하상태에서 일정단자전압을 유지하기위한 부가적인 회전자 단자전압 V_{RE} 로 나눌 수 있다. 이 전압에 의한 전류를 I_{RO} 와 I_{RE} 라 한다.

$$V_R = V_{RO} + V_{RE} \quad (5)$$

$$I_R = I_{RO} + I_{RE} \quad (6)$$

이상의 조건을 이용하여 유도기의 CVCF발전을 위한 제어조건을 구해보자.

i) 무부하 조건
 발전기의 출력단에 부하가 연결되지 않으면 부하전류는 흐르지 않는다. 즉, $I_a = 0$ 인 경우이다. 이 조건을 식 (3)과(4)에 대입하면

$$\bar{V}_s = M \frac{d}{dt} (\bar{I}_{RO} e^{j\omega t}) \quad (7)$$

$$\bar{V}_{RO} = R_r \bar{I}_{RO} + L_r \frac{d}{dt} \bar{I}_{RO} \quad (8)$$

와 같이된다.

ii) 부하 연결조건
 발전기의 출력단은 부하가 연결되면 $I_a \neq 0$ 인 경우이다. 즉, 식 (3)과(4)에서

$$\bar{V}_s = R_a \bar{I}_a + L_a \frac{d}{dt} \bar{I}_a + M \frac{d}{dt} (\bar{I}_R e^{j\omega t}) \quad (9)$$

$$\bar{V}_R = R_r \bar{I}_R + L_r \frac{d}{dt} \bar{I}_R + M \frac{d}{dt} (\bar{I}_a e^{-j\omega t}) \quad (10)$$

와 같이된다. 여기서 식 (7)과(8)의 조건을 이용하여 풀면

$$V_{RO} = V_s Z_r / X_m e^{j\omega t} \quad (11)$$

여기서

$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + (sX_r)^2} \quad (12)$$

$$\theta_r = \tan^{-1} sX_r / R_r \quad (13)$$

이다. 고정자단에 지상역률의 부하가 연결된 경우는

$$\bar{V}_s = R_L \bar{I}_s + L_L \frac{d}{dt} \bar{I}_s \quad (14)$$

식 (14)와 같이 쓸 수 있고 위 조건을 이용하여 풀면

$$V_{RE} = \frac{Z_r Z_L I_s e^{j(\omega t - \theta_L + \theta_a)} + sX_m I_{sc} e^{j(\omega t - \theta_r - \theta_L - \pi)}}{X_m} \quad (15)$$

여기서

$$|Z_L| = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (16)$$

$$\theta_a = \tan^{-1} X_L / R_L \quad (17)$$

$$\theta_L = \tan^{-1} X_L / R_L \quad (18)$$

이다. 또한 같은 방법으로 회전자여자전류 I_R 도 구할 수 있다.

4. 여자조건식에 대한 고찰

앞에서 유도한 여자조건식을 살펴보자. 식 (11), (15)는 무부하 및 부하인가시 고정자 전압의 크기와 주파수를 일정하게 하위할 여자전압의 조건을 유도한 것이다. 무부하시 여자전압의 크기는 $V_s \cdot Z_r / X_m$ 으로, V_s 는 출력전압으로 일정하나 $|Z_r|$ 은 회전자임피던스로 슬립에 따라 변하는 값이다. 즉, 속도에 따라 시정수가 변한다. 또 X_m 은 공극전압에 따라 포화의 정도가 변하므로 제어시마다 그 크기를 알 수 있어야 한다. 부하가 연결되어 고정자전류가 흐를때 이로 인한 전압강화를 보상하는 성분이 V_{RE} 이다.

이것은 무부하에서 영향을 미치는 성분 즉 출력전압, 슬립, 자화 리액턴스의 부하전류등이 다변수로 작용하며 이 값들이 커질때 V_{RE} 도 커져야 함을 알 수 있다.

여자전압 V_R 의 주파수는 SWS로 되는 것은 당연한 것이다. 그리고 V_R 의 위상은 부하의 역률, 고정자 및 회전자시정수, 슬립등에 영향을 받아 동기의 경우와는 다르다. 즉 동기의 경우 슬립은 없으며 회전자에 항상 직류를 인가함으로써 정수의 영향은 없다. 동기기에서도 일정전압을 유지하기위해 부하의 역률에 따라 여자조건을 조정하듯이 유도기에서도 여자조건을 조정해야 한다. 다만 영향을 미치는 요소가 많을 뿐이다.

5. 특성해석을 위한 시뮬레이션

여자조건식을 이용하여 정상상태특성을 검토하기 위해 전산기 시뮬레이션을행했다. 시뮬레이션의 흐름도는 그림 2에 있다.

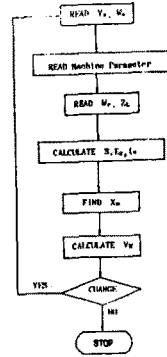


그림 2. 시뮬레이션 흐름도
 Fig.2. Simulation flow chart

5.1 부하전류에 따른 자화리액턴스의 변화

유도기가 전동기로 동작하는 경우는 고정자누설임피던스의 영향으로 공극전압이 단자전압보다 항상 낮게 된다. 그러나 발전기로 동작하는 경우는 일위적으로 정할 수 없으며, 부하의 특성에 따라 달라지게 된다. 즉, 지상역률의 부하가 연결된 경우는 전동기의 경우와 반대로 공극전압이 단자전압보다 높게 된다. 또 지상역률의 부하인 경우는 단자전압이 공극전압보다 오히려 낮아진다. 그러므로 공극전압과 밀접한 관계가 있는 자화 리액턴스도 부하의 성질에 따라 크게 변하며 유도발전기제어에 있어 중요한 파라미터가된다. 그림 3은 부하의 역률이 0.6 Lag 인 경우를 나타낸 것이다. 공극전압이 구해지면 공극전압과 자화 리액턴스의 관계에서 자화리액턴스의 크기를 구할 수 있다. 그림 4는 그림 3에 해당하는 자화리액턴스를 나타낸 것이다. 출력전압이 높을 수록, 부하가 클 수록, 부하의 역률이 낮을 수록 (지상역률인 경우) 자화리액턴스의 포화의 정도는 커지고 그 크기는 작아진다.

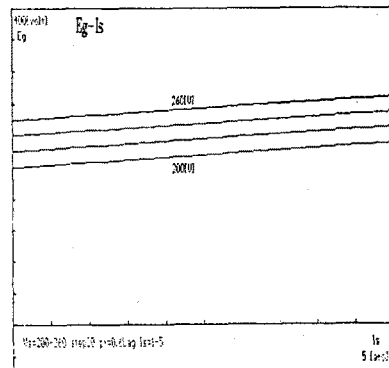


그림 3. 부하전류와 공극전압의 관계 (역률 0.6 Lag)
 Fig.3. Load current vs. airgap voltage (pf = 0.6 Lag)

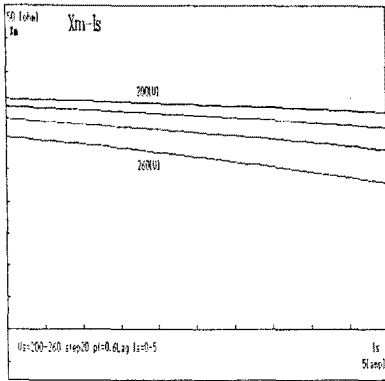


그림 4. 부하전류와 여자리액턴스의 관계 (역률 0.6Lag)
Fig.4. Load current vs. magnetizing reactance (pf=0.6 Lag)

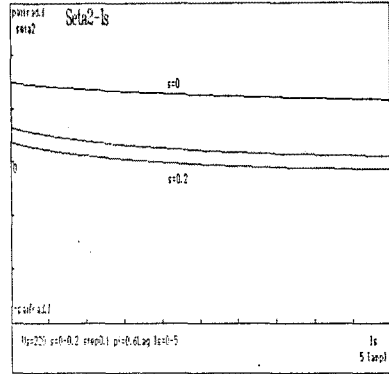


그림 6. 부하전류와 위상각의 관계 (역률 0.6 Lag)
Fig.6. Load current vs. phase (pf =0.6 Lag)

5.2. 부하전류에 따른 여자전압의 변화

그림 5는 부하의 역률을 변화시키면서 부하전류에 따른 여자전압의 크기를 살펴본 것이다. 슬립이 작을수록 여자전압이 작아도 되는 것은 슬립 S 가 전압 증폭률로 작용하기 때문이다. 지상부 하일때는 부하가 증가함에 따라 여자전압이 비례하여 증가하나 진상역률일때는 오히려 감소하는 경향인데 이는 동기기의 합성곡선(Compounding curve)과 유사한 특성이다. 그러나 동기기와는 달리 유도기는 여자전압의 크기뿐만 아니라 극성도 부하의 특성에 따라 바뀐다. 즉 진상역률의 부하인 경우는 여자전압이 옴이 되는 구간이 생기는데 이것은 유도발전기가 필요로 하는 무효전력을 부하측에서 충분히 공급하기 때문에 2차 여자전력을 공급할 필요가 없는 경우이다.

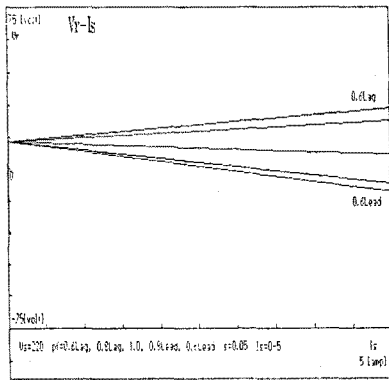


그림 5. 부하전류와 여자전압의 관계 (슬립 0.05)
Fig.5. Load current vs. excitation voltage (slip= 0.05)

5.3. 부하전류에 따른 여자전압의 위상각의 변화

그림 6은 슬립을 변화시키면서 부하전류에 따른 여자전압의 위상각을 출력전압을 기준으로 살펴본 것이다. 유도발전기는 동기발전기와 달리 슬립이 있어 이것은 앞서 살펴본 여자의 상때뿐만 아니라 부하각에도 영향을 미친다. 즉 여자전압이 교류이므로 여자전압의 주파수에 따라 여자회로의 시정수가 변하므로 부하각도 변화하게 된다. 그러나 이 위상각이 동기기의 부하각과 같이 작용하는 것은 아니다. 다만 식 (11), (15)에서 알 수 있듯이 부하의 역률이나 크기도 영향을 미친다. 여기서 위상각은 출력전압과 여자전압간의 위상차를 나타내며 θ_2 가 양의 값이면 여자전압이 뒤지는 경우, θ_2 가 음의 값이면 여자전압이 앞서는 것을 의미한다. 유도발전기가 공급해야 할 무효전력량은 부하의 크기에는 무관하고 역률에 영향을 받으므로 부하가 증가하면 위상각 θ_2 는 작아진다.

5.4. 기계정수의 변화에 따른 출력전압의 변화

유도발전기의 일정전압, 일정주파수 제어에서 주파수 제어부유프는 비교적 간단하나 전압제어부유프는 다변수, 비선형의 특성을 가짐을 알았다. 특히 유도발전기의 정수는 상수 또는 공극전압의 함수로만 주어져 있으며, 온도등으로 인한 정수의 변화는 고려하지 않았다. 그러나 기계정수의 변화도 출력전압의 영향을 미친다고 보고되어 기계의 정수값이 10% 정도 변했을때 출력전압에의 영향을 살펴보았다.

그림 7은 여자리액턴스 X_m 의 변화가 출력전압에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 지상역률인 경우는 부하가 커질수록 X_m 의 변화에 따른 영향이 커진다. 이 10% 변할때 출력전압은 5~15% 정도변하게 되는데 이는 여자를 위한 무효전력의 공급량이 커져야 하기 때문이다. 그러나 역률 1 이거나 진상역률인 경우는 부하에 무관하게 일정한 오차를 유지한다. 하여튼 지상이나 진상의 경우 모두 정확한 여자리액턴스의 산정이 매우 중요한과제임을 알 수 있다.

회전자저항 R_r 의 변화에 따른 영향은 그림 8에 나타내었다. R_r 은 부하가 적을때 오히려 출력전압에 미치는 영향이 큰데 이는 회전자저항이 슬립의 함수이며 식 (11), (15)에서 무부하 여자전압의 항에서는 주항요소라 되나 부하 여자전압항에서는 주항요소로 작용하지 못하기 때문이다.

그의 고정자저항 R_s , 고정자 및 회전자누설리액턴스 X_{ls} , X_{lr} 의 변화에 따른 출력전압의 영향은 그림 9, 10, 11에 나타내었으며 이값의 변화는 출력전압에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

6. 결론

유도발전기의 CVCF 발전을 위한 여자조건을 구하고 이를 바탕으로 각 변수에 따른 정상상태특성을 해석하였다. 고정자저항, 고정자 및 회전자누설리액턴스의 변화는 출력전압에 큰 영향을 미치지 않으나 여자리액턴스와 회전자저항의 변화는 출력전압에 미치는 영향이 매우 크므로 제어시 정확한 값의 산정이 요구된다.

참고 문헌

1. 안진우, 김철우, 황영문, 권선형유도발전기 CVCF 발전을 위한 2차 제어법에 관한 연구, 전기학회 추계종합학술대회 pp 341~344, 1988.
2. F. J. Brady, A mathematical model for the double-fed wound rotor generator IERE PAS-103 NO.4. pp 798~802, 1984.
3. R.E Bedford, The synchronous double-fed induction machine, AIEE Trans. Feb. pp 1486~1491, 1957.
4. P.Albrecht, W. Vollstedt, Microcomputer control of a variable speed double-fed induction generator operating on the fixed frequency grid, ETG-Fachberichte Microelectronics in power Elec. and Elec. Drives conf. Rec. pp 363~368, 1982.

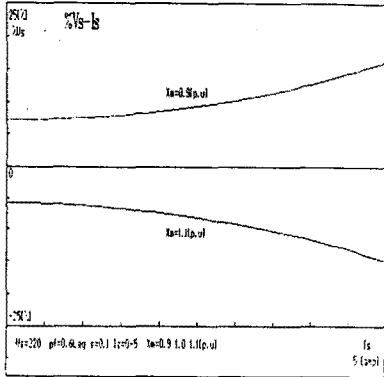


그림 7. 여자리액턴스변화가 출력전압에 미치는 영향
Fig.7. Output voltage's variation due to magnetizing reactance's variation

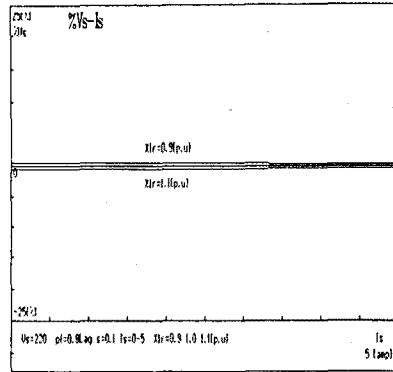


그림 10. 회전자누설리액턴스가 출력전압에 미치는 영향
Fig.10. Output voltage's variation due to rotor leakage reactance's variation

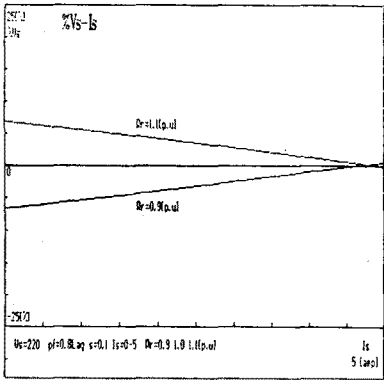


그림 8. 회전자저항의 변화가 출력전압에 미치는 영향
Fig.8. Output voltage's variation due to rotor resistance's variation

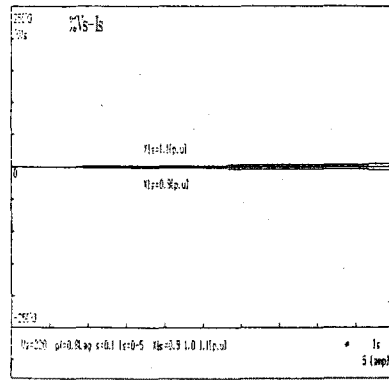


그림 11. 고정자누설리액턴스가 출력전압에 미치는 영향
Fig.11. Output voltage's variation due to stator leakage reactance's variation

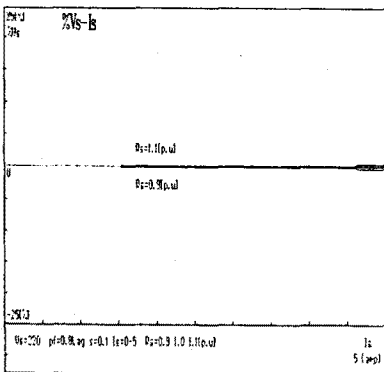


그림 9. 고정자저항의 변화가 출력전압에 미치는 영향
Fig.9. Output voltage's variation due to stator resistance's variation