

# 계통 연계형 권선형 유도발전기의 동작특성 연구

金燦起<sup>†</sup>, 韓相烈<sup>\*</sup>, 秋鎭夫<sup>\*\*</sup>

## Study on the Operating Characteristics of Double Fed Induction Generator Connected AC network

Chan-Ki Kim, Sang-Yul Han and Jin-Boo Choo

### 요 약

본 논문은 이중여자권선을 갖는 권선형 유도발전기와 농형유도발전기사이의 운전특성비교를 보여준다. 농형유도발전기는 자화리액턴스에 의한 무효전력소비 때문에, 역률을 보상하기 위한 콘덴서를 필요로 하나, DFIG는 회전자에 Back-To Back컨버터를 가지고 있기 때문에 저속/고속에서 유도발전기가 운전이 가능하다. 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형유도기와 DFIG의 응답특성이 분석되었다.

### ABSTRACT

This paper shows the comparison of operating characteristics between squirrel cage induction generator and DFIG(Double Fed Induction Generator). Because squirrel cage induction generator consume the reactive power due to magnetizing reactance, the capacitor is need to compensate the reactive power. Otherwise, two back-to-back PWM voltage-fed inverters connected between the stator and the rotor allow sub/super synchronous operation with low distortion currents. In this paper, the response characteristics of squirrel cage induction generator and DFIG, were analyzed and investigated using PSCAD/EMTDC.

**Key Words :** Wind-Power, EMTDC, DFIG

### 1. 서 론

신 재생에너지 연계에 사용되는 유도기는 농형 유도기와 권선형 유도기로 분류할 수 있는데, 이를 다시 컨버터의 위치와 운전특성에 따라 분류해 보면 표 1과 같다.

표 1에서 권선형 유도발전기는 속도 조정 범위가 넓고 인버터 용량이 줄어들 수 있다는 장점 때문에 최근에 많이 주목을 받고 있다. 농형유도기는 유도기의

상호 인덕턴스를 보상하기 위한 무효전력 보상용 콘덴서를 갖고 있기 때문에 부하탈락 시에 유도기 모선에 과전압, 저차 고조파 Instability 그리고 전압안정도의 문제를 유발할 수 있다.

표 1 유도기의 종류  
Table 1 The kind of Induction Machine

속도	발전기	계통과의 연결	운전속도 범위(%)	인버터의 용량(%)	제어
가변속	농형 유도기	계통 직결	100~108	-	간단
	농형 유도기	컨버터	50~120	100	보통
	권선형 유도기	계통 직결 (저항제어)	100~130	-	보통
	권선형 유도기	계통 직결	70~130	25~30	복잡

<sup>†</sup> 교신저자 : 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원  
E-mail : ckkim@kepri.re.kr  
<sup>\*</sup> 정회원, (주)효성중공업 연구소 선임연구원  
<sup>\*\*</sup> 정회원, 한전 전력연구원 수석연구원  
접수일자 : 2006. 2. 6                    1차 심사 : 2006. 3. 11  
2차 심사 : 2006. 3. 30                    심사완료 : 2006. 3. 31

반면에 권선형 유도 발전기는 농형 유도 발전기에 비하여 속도제어범위가 넓고, 특히 회전자에 인버터를 설치하는 경우에는 속도 제어 범위뿐만 아니라 인버터의 용량도 작아지기 때문에 제어가 복잡하다는 단점을 제외하고는 대단히 주목받고 있는 제어방식이다. 본 논문에서는 이러한 권선형 유도발전기의 특성을 농형 유도 발전기의 특성과 비교하여 고찰해보도록 하겠다.

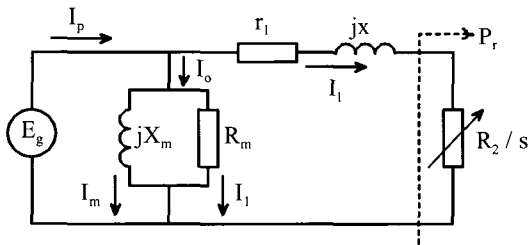
### 2. 권선형 유도 발전기의 특성<sup>[1]</sup>

정상상태에서 유도기의 토크 방정식은 식 1과 같이 표현될 수 있으며, 발전기 모드에서 최대 토크 방정식은  $dT_d/ds = 0$  조건을 이용하여 풀면 식 2가 된다.

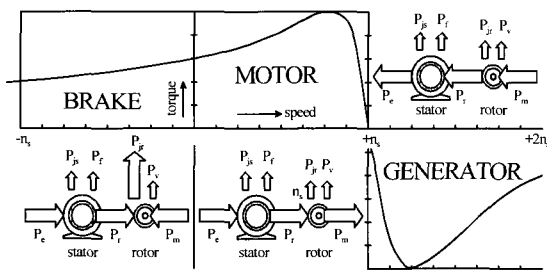
$$T_d = \frac{3 \cdot R_r \cdot E_g^2}{s \cdot \omega_s \cdot [(R_s + R_r/s)^2 + (X_s + X_r)^2]} \quad (1)$$

$$T_{d-max} = \frac{3 \cdot E_g^2}{2 \cdot \omega_s \cdot [-R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}]} \quad (2)$$

여기서,  $R_r$ 은 회전자저항,  $R_s$ 는 고정자 저항,  $E_g$ 는 출력전압,  $s$ 는 슬립,  $\omega_s$ 는 정격속도,  $X_s$ 는 고정자 인덕턴스 그리고  $X_r$ 는 회전자 인덕턴스



(a) 유도기 등가회로



(b) 유도기 운전모드

그림 1 유도기의 등가회로와 운전특성 곡선  
Fig. 1 Equivalent Circuit and Operating Characteristics of Induction Generator

그림 1은 유도기의 등가회로를 보여주고 있으며, 그림 1(b)는 식 1에서 구한 토크 방정식을 이용하여 토크-속도 특성곡선을 그린 것을 보여주고 있다. 그림 1로부터 정격속도에서는 토크가 이론적으로 “0[零]”이며, 발전기 모드에서는 슬립이 Negative가 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 1에서 보여주는  $R_2/s$  저항이 Negative가 된다는 의미이며, 이것은 최종적으로 유도기의 전력 흐름이 회전자에서부터 고정자로 전달되는 발전기 모드로 동작한다는 것을 의미한다. 한편, 유도 발전기는 역률을 보상하기 위해서 유도 발전기의 출력단에 콘덴서를 설치하는데, 이때 콘덴서의 값은 회전자의 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 보상하는 값이어야 한다. 즉, 필요한 무효 전력 값은 다음과 같다.

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

단,  $Q_1 = I_r^2 x$ ,  $Q_2 = E^2 / X_m$

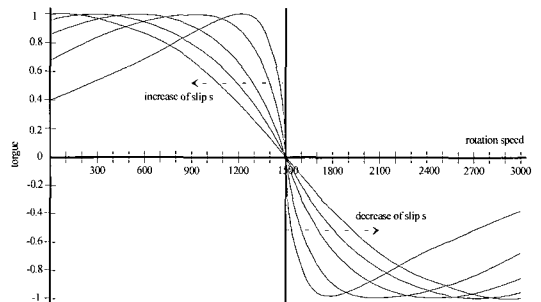


그림 2  $R_2$ 을 변화했을 경우에 유도기의 속도-토크 특성

Fig. 2 Speed-Torque Characteristics according to changing  $R_2$

그림 1에서 알 수 있는 사실은 속도(슬립)가 변화함에 따라 회전자 저항  $R_2$ 의 값을 조정하면 일정한 토크를 얻을 수 있다는 사실이다. 즉, 그림 1(b)에서 보여주는 유도기의 속도-토크 특성이 그림 2와 같이 가변 속도-토크 특성으로 변한다는 사실이다. 권선형 유도발전기의 기본적인 원리는 이러한 회전자 2차 저항을 제어함으로써 넓은 범위에서 정 토크 제어를 행할 수 있다는 점이다. 한편, 유도기는 전동기모드에서 동작하면서 발전기모드로 운전될 수가 있고, 발전기 모드에서 운전하면서 전동기 모드에서 운전될 수 있다.

한편, 그림 2에서 보여주는 방법은 회전자의 저항을 가변함으로써 유도기의 특성을 변화시키는 방법이나

이 방법은 회전자의 전력을 2차 저항을 통하여 소비시키는 방법이기 어떤 의미에서는 비효율적으로 생각할 수 있다. 이러한 회전자 전력을 계통으로 Feed 또는 Feed Back하는 방식이 궁극적으로 DFIG (Double fed Induction Generator) 방식으로 이러한 DFIG의 속도-토크 특성은 그림 3과 같다.

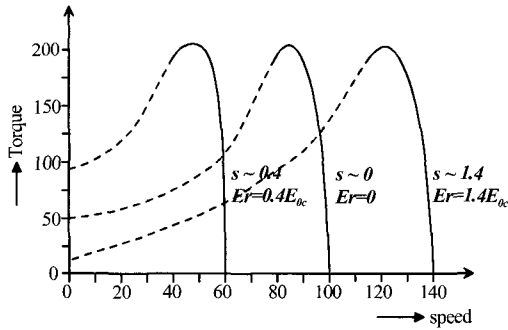
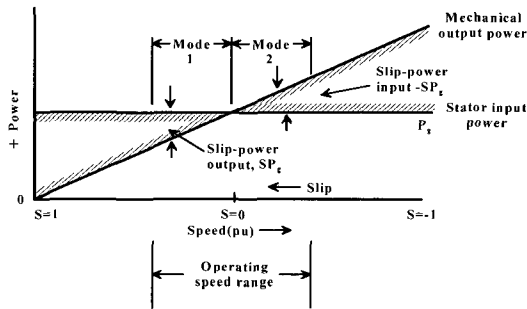
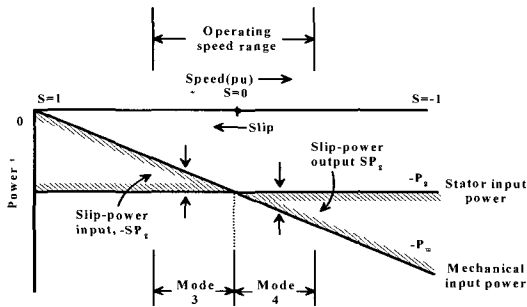


그림 3 슬립에 따른 이중 여자 방식 유도기의 속도-토크특성 곡선  
 Fig. 3 Speed-Torque Characteristics of Double Fed Induction Machine According to the slip



(a) 권선형 유도전동기의 운전 모드



(b) 권선형 유도발전기의 운전모드

그림 4 권선형 유도기의 동작 모드  
 Fig. 4 Operating Mode of Double Fed Induction Machine

그림 3에서 DFIG의 속도-토크 특성은 슬립에 따라 변화하기 때문에 일정토크 제어를 위해서 가변속도에 대한 적응력이 있고, 이러한 특성은 불확실한 전원을 가진 풍력시스템에서 대단히 큰 장점으로 통할 수 있다. 유도기의 동작 특성을 그림 3에서 보여주는 각각의 동작모드를 발전영역과 전동기 영역으로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

**2.1 Mode1(Sub-synchronous Motoring 영역) :**

고정자 입력 전력( $P_g$ )는 일정하고, 슬립 출력( $SP_g$ )는 계통으로 되돌려진다. 따라서 계통은 전동기가 소비하는 순수한 기계적인 에너지  $P_m$ 만을 공급한다. 회전자에서 슬립 출력은 고정자와 같은 방향으로 자속을 발생시키고 로터 속도는 고정자의 속도와 슬립사이의 차이( $\omega_e - \omega_{sl}$ )에 따라 회전한다. 동기속도에서는 회전자권의 Back-To-Back 컨버터는 회전자에 DC 여자전류를 공급하고, 유도기는 동기기와 같이 운전된다.

**2.2 Mode 2(Super Synchronous Motoring) :**

이 모드에서 슬립은 Negative가 되고, 슬립 출력은 회전자에서 소모된다. 슬립 출력은 전체 기계적인 출력에 의해 고정자 입력을 공급하기 때문에 계통은 고정자입력에 추가적으로 슬립파워를 공급한다. 이 상태에서, 슬립 전압은 역방향(Reverse Direction)이 되고 로터에 유기되는 자속은 고정자의 자속과는 반대가 된다.

**2.3 Mode 3(Sub-Synchronous Generation) :**

이 모드에서는 유도기가 발전모드로 동작하는 것으로 축에서 기계적인 에너지가 공급되고 이 에너지는 다시 전기적인 에너지로 변환된다. 일정 Negative 축 토크를 가지고, 슬립 출력은 회전자에 입력이 되고, 전체 고정자 출력은 일정하게 된다. 슬립 전압은 Positive Sequence(자속의 방향이 고정자 자속의 방향과 같다)가 되고, 동기속도에서 유도기는 동기발전기로써 동작한다.

**2.4 Mode 4(Super Synchronous Regeneration) :**

이 모드에서, 고정자 출력은 일정하게 되고, 추가적인 기계적인 입력은 슬립 출력으로써 반영되고 Phase Sequence는 역방향이 되어 회전자는 반대방향으로 회전하게 된다. 승압변압기는 Back-To-Back 컨버터의 Line 쪽에 설치되게 되고 이러한 승압 변압기는 컨버터의 전압 레벨의 부담을 줄여준다.

표 2는 이상에서 논한 권선형 유도기의 동작특성에 관한 내용이다. 그리고 그림 5는 권선형 유도기의 회전자에 인가되어 있는 Back-To-Back 컨버터에 따른 운전특성을 보여주고 있다. 만약 Back-To-Back 컨버터가 전류형인 경우에는 회전자 전류는 일정하고 회전자 전압은 가변이 되고, 그림 4에서 보여주는 그림은 Back-To-Back 컨버터가 전압형인 경우를 말한다.

표 2 권선형 유도기의 운전특성  
Table 2 Operating Characteristics of Double Fed Induction Generator

	Sub synchronous	Synchronous	Super synchronous
Slip Power	계통으로 공급	0	계통에서 흡수
Rotor Flux	고정자와 같은 방향	DC 자속	고정자와 반대방향
Rotor Voltage	일정	일정	일정
Rotor Current	슬립에 비례	0	슬립에 비례
Stator Power	일정	일정	일정
Stator Voltage	일정	일정	일정
Stator Current	일정	일정	일정

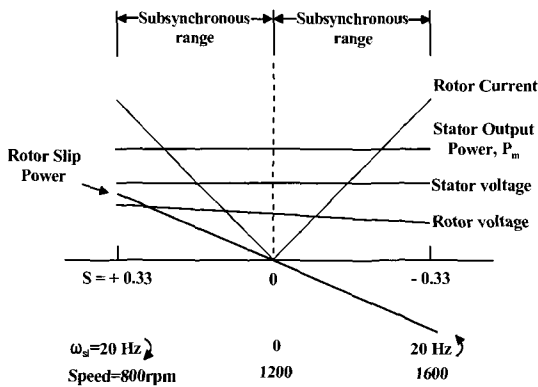


그림 5 권선형 유도기의 동작 모드  
Fig. 5 Operating Mode of Double Fed Induction Machine

### 3. 권선형 유도기의 Back-To-Back 컨버터<sup>[2-5]</sup>

#### 3.1 유도 발전기의 벡터 제어

권선형 유도기의 또 다른 특징주의 하나는 회전자의 전류 주파수와 크기를 제어함에 따라 권선형 유도기의 고정자의 전압과 주파수를 제어할 수 있다는 또 다른

장점을 가지고 있다. 다음 수식은 권선형 유도기에서 유도기 회전자 전류와 주파수가 유도기 고정자 전류와 주파수와 상관계수를 d/q이론을 통하여 분석한 수식이다.

고정자가 계통에 연결되어 있기 때문에, 고정자 저항의 영향이 적고, 고정자 자화 전류  $i_{ms}$ 가 일정하다고 고려한다면, 고정자-자속 기준 하에서, 토크와 dq 축 전압, 전류와 자속은 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$\lambda_s = \lambda_{ds} = L_o i_{ms} = L_s i_{ds} + L_o i_{dr}$$

$$\lambda_{dr} = \frac{L_o^2}{L_s} i_{ms} + \sigma L_r i_{dr}, \lambda_{qr} = \sigma L_r i_{qr}, i_{qs} = -\frac{L_o}{L_s} i_{qr} \quad (4)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - w_{stip} \sigma L_r i_{qr}$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - w_{stip} (L_m i_{ms} + \sigma L_r i_{dr}) \quad (5)$$

$$T_e = -3 \frac{P}{2} L_m i_{ms} i_{qr} \quad (6)$$

여기서,  $w_{stip} = w_e - w_r$ ,  $\sigma = 1 - \frac{L_o^2}{L_s L_r}$ ,  $L_m = \frac{L_o^2}{L_s}$ ,  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $L_m$ ,  $L_o$  = 고정자, 회전자상호 그리고 누설 인덕턴스,  $R_s$ ,  $R_r$  = 고정자, 회전자 저항

고정자 자속 각은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_{\alpha s} = \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt$$

$$\lambda_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \quad (7)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}}$$

여기에서  $\theta_s$ 는 고정자-자속 위치이다. 수식 5로부터 토크는  $i_{qr}$ 에 비례한다. 그리고  $v_{qr}$ 을 사용하여 제어된다. 회전자 여자 전류  $i_{dr}$ 은  $v_{dr}$ 을 사용하여 제어된다. 모든 무효전력이 고정자에 의해 기기에 공급된다고 가정하면,  $i_{dr}^*$ 은 0으로 설정 될 것이다. 지령 q축 회전자 전류는 외부 속도-제어 루프 혹은 기기에 인가된 지령 토크로부터 구해진다. 이 두 가지 선택사항은 발전기의 속도 제어 모드 혹은 토크 제어 모드로 칭한다. 공급 측 컨버터를 위해 수행된 dq 전류의 제어에 대한 것과 유사한 분석은 dq 회전자 기기 전류의 제어를 위해서도 수행될 것이다. 식 5의 회전자-전압 방정식으로부터 우리는 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{v}'_{dr} &= R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} \\ \dot{v}'_{qr} &= R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

$i_{dr}$  과  $i_{qr}$  의 오차는 PI 제어기에 의해 처리되어 각각  $v_{dr}$  과  $v_{qr}$  로 주어진다. 이러한 전류를 확실하게 효과적으로 추종하기 위해 보상 조건을  $v_{dr}$  과  $v_{qr}$  에 더하여 다음과 같이 지령 전압  $v_{dr}^*$ ,  $v_{qr}^*$  을 얻는다.

$$\begin{aligned} v_{dr}^* &= \dot{v}'_{dr} - \omega_{slip} \sigma L_r I_{qr} \\ v_{qr}^* &= \dot{v}'_{qr} - \omega_{slip} (L_m i_{ms} + \sigma L_r I_{dr}) \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.2 풍력시스템의 제어 특성

DFIG는 무효전력(벡터 제어 모드에서 D축에 해당)과 유효전력(벡터 제어 모드에서 Q축에 해당)을 동시에 제어할 수 있는 특징을 가지고 있으며, 유효전력의 지령 값은 터빈의 토크-속도 특성곡선에 따르고, 무효전력은 일반적인 동기발전기와 같이 계통의 전압변동을 보상하는 Auto운전과 운전자의 지령에 의한 Manual 운전으로 나눌 수 있다.

그림 6은 토크-속도 특성곡선을 보여주고 있는 것으로 일반적인 동작 특성은 그림 6의 B와 C사이이고, 이 동작 영역에서 선형 에너지가 얻어진다. 그리고 매우 낮은 속도 동작영역인 Rotational Speed(A-B)에서 토크는 거의 Aerodynamic Noise Constraint에 의해서 제한 받고, 이점에서 제어기는 토크가 증간하는 것을 허용하고 정격속도인 C-D 모드로 가속한다. 만약 속도가 더욱 증가하여 D-E로 바뀌게 되면, Electromagnetic은 상수가 되고 시스템이 E점에 도달하는 경우에는 Pitch 제어가 Torque 제어기로부터 받아서 풍력에너지의 입력을 제어하고, 매우 높은 속도에서 Pitch 제어기는 풍력에너지를 제한한다.

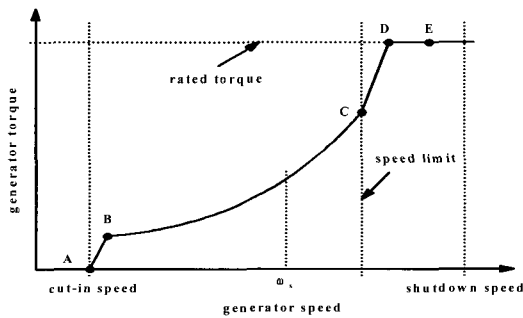


그림 6 터빈제어를 위한 토크-속도 제어 특성  
Fig. 6 Torque-speed characteristic for turbine control strategy

#### • D축 제어

$$\dot{i}_{dr} = \left( \frac{\bar{\lambda}_{ds} + \bar{L}_{ss} \times \dot{i}_{ds}}{\bar{L}_m} \right) = \frac{\bar{V}_s}{\omega_s \bar{L}_m} + \frac{\bar{L}_{ss}}{\bar{L}_m} \times \dot{i}_{ds} \quad (10)$$

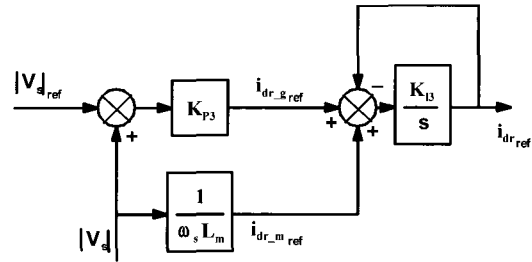
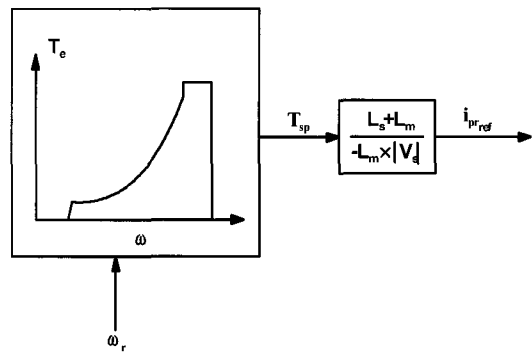


그림 7 단자전압과 역률 제어 블록

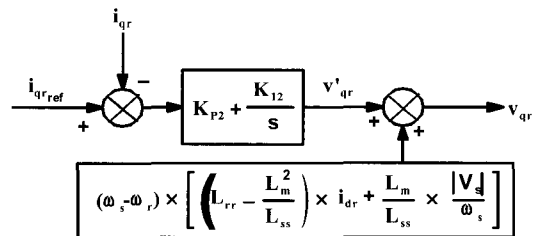
Fig. 7 Terminal Voltage and Power Factor Control Block

#### • Q축 제어



(a) Primary Stage

$$\dot{i}_{qr} = \left( \frac{\bar{\lambda}_{qs} + \bar{L}_{ss} \times \dot{i}_{qs}}{\bar{L}_m} \right) = \frac{\bar{L}_{ss}}{\bar{L}_m} \times \dot{i}_{qs} \quad (11)$$



(b) Secondary Stage

그림 8 속도 제어 블록

Fig. 8 Speed control Block

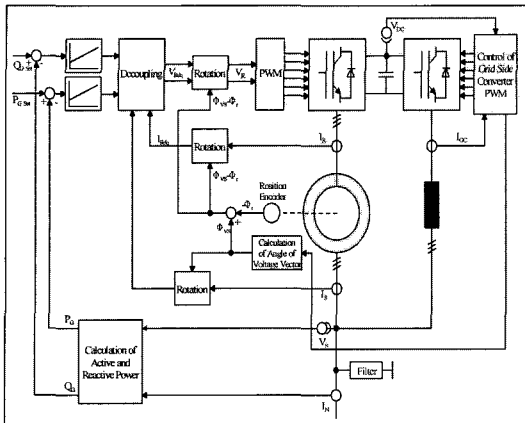


그림 9 DFIG의 벡터 제어 블록  
Fig. 9 Vector Control Block Diagram for DFIG

3.3 권선형 유도기의 계통 측 인버터의 설계

DFIG의 공급 측 컨버터의 목적은 회전자 출력방향과 크기 변화에는 상관없이 직류 링크 전압을 일정하게 유지 하는 것으로 기준 좌표가 고정자(혹은 공급원) 전압 벡터 위치에 기준을 두고 따르는 벡터-제어 방식이 사용되며 공급원과 공급 측 컨버터 사이의 유효 및 무효 전력의 독립적인 제어가 가능하다. PWM 컨버터의 전류 제어는 D축 전류가 직류 링크 전압을 제어하고 Q축 전류 구성성분은 무효전력을 제어 하는데 사용된다.

그림 10은 공급 측 컨버터의 기법의 도식적인 개요를 보여준다. 인덕터 양단의 평형 전압은 다음과 같다.

$$\begin{matrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{matrix} = \begin{matrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{matrix} R + L \frac{d}{dt} \begin{matrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{matrix} + \begin{matrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{matrix} \quad (12)$$

식 (12)를 \$w\_c\$로 회전하는 dq 기준 동기좌표로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{matrix} v_d \\ v_q \end{matrix} = \begin{matrix} R i_d + L \frac{d i_d}{dt} - \omega_e L i_q + v_{d1} \\ R i_q + L \frac{d i_q}{dt} - \omega_e L i_d + v_{q1} \end{matrix} \quad (13)$$

유효 및 무효 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{matrix} P = 3(v_d i_d + v_q i_q) \\ Q = 3(v_d i_q - v_q i_d) \end{matrix} \quad (14)$$

공급전압의 회전각의 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_c = \int \omega_c dt = \tan^{-1} \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad (15)$$

여기에서 \$v\_\alpha\$와 \$v\_\beta\$ 는 \$\alpha, \beta\$ (정지좌표계)의 고정자 전압 성분이다.

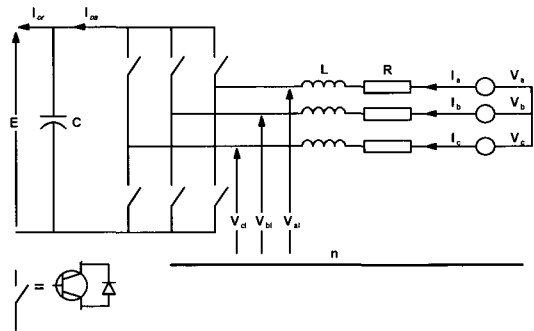


그림 10 공급 측 컨버터 구성  
Fig. 10 Supply-Side Converter Arrangement

식 13에 의해 주어진 고정자-전압 위치에 따라 기준 좌표의 d축을 정렬하면 \$v\_q\$는 영(零)이 된다. 공급전압의 크기가 일정하기 때문에 \$v\_d\$도 일정한 값을 갖는다. 유효 전력과 무효 전력은 각각 \$i\_d\$와 \$i\_q\$에 비례한다. 리액터의 저장과 컨버터에서의 스위칭과 손실 때문에 고조파를 고려하지 않으면 우리는 다음과 같은 수식을 얻는다.

$$\begin{matrix} E i_{os} = 3v_d i_d, v_d = \frac{m_1}{2\sqrt{2}} E, \\ i_{os} = \frac{3}{2\sqrt{2}} m_1 i_d, C \frac{dE}{dt} = i_{os} - i_{or} \end{matrix} \quad (16)$$

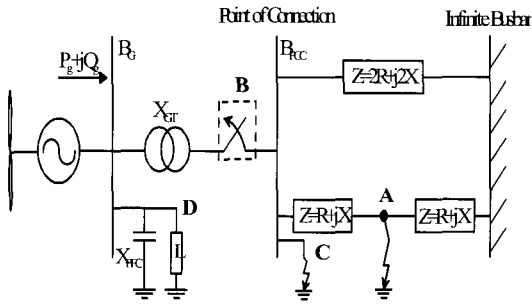
식 16에서 우리는 직류 링크 전압이 \$i\_d\$를 통해 제어 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 제어 기법은 표준 PI 제어기를 통해 직류 링크 전압의 오차로부터 지령치 \$i\_d\$와 \$i\_d\$ 및 \$i\_q\$를 위한 전류 제어 루프를 이용한다.

4. 농형 유도기와 권선형 유도기의 동작 특성

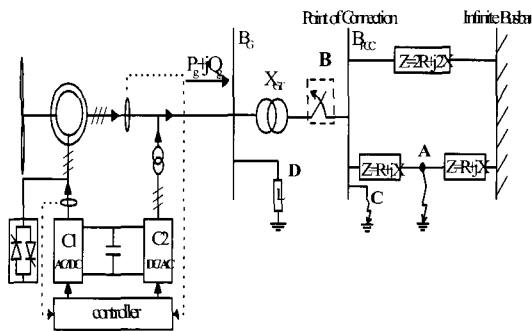
4.1 시스템 모의

농형 유도 발전기와 이중 권선형 유도 발전기(DFIG

: Double Fed Induction Generator)의 동작특성을 비교하기 위한 계통의 구성은 다음과 같다.



(a) 농형유도기를 가진 계통



(b) DFIG를 가진 계통

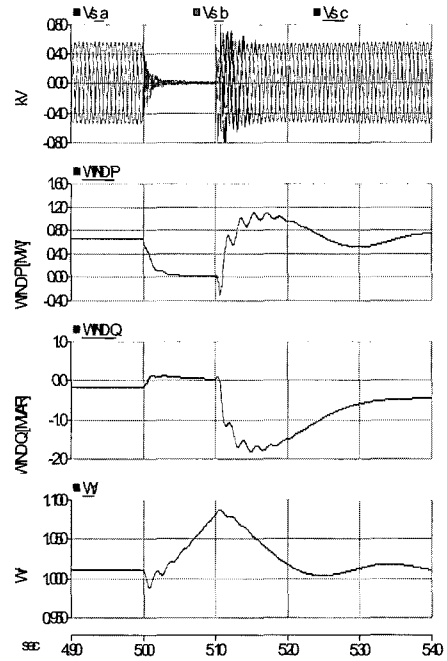
그림 11 고장분석을 위한 AC 계통  
Fig. 11 AC network for Fault Analysis

본 논문에서는 시뮬레이션을 그림 11에서 보는 바와 같은 조건에서 수행하고 서로 비교하였다.

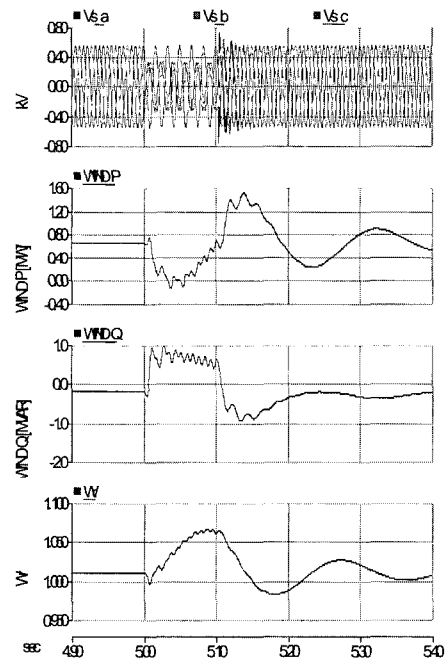
첫 번째로, "A"로 표현된 2중 모선에서 한 선로의 지락사고를 모의한 것으로 이것은 풍력 연계 시스템의 Remote Fault고장과 2중모선 중에서 한선이 고장을 발생한 것을 가정하여 시뮬레이션 한 것이다.

두 번째로, "B"로 표현된 풍력계통의 3상개방상태의 고장을 고려한 것으로 계통에 사고가 발생한 경우에 유도발전기의 안정도를 평가하기 위한 방법으로, 3상 개방상태는 계통의 Islanding상태와 "D"로 표현되는 Local Load가 발전기에 어떤 영향을 미치는지를 보여주는 평가하기 위한 것이다.

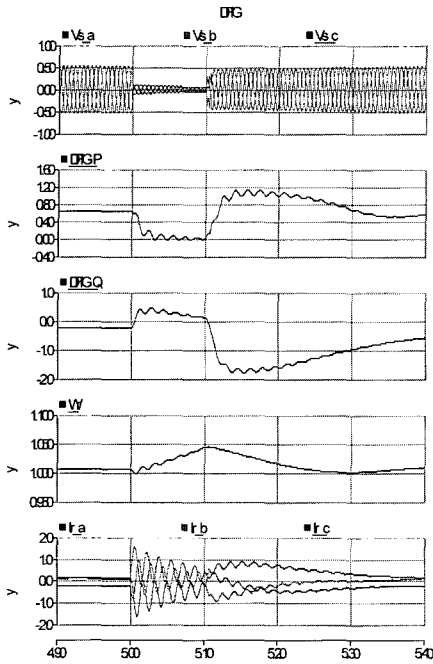
세 번째로, "C"로 표현되는 3상 지락 사고는 일반적으로 계통에서 발생할 수 있는 최악의 사고로써 사고 발생 후에 계통의 전압안정화 단계나 발전기의 안정도와 회복능력을 평가하기 위해서 필요한 것이다.



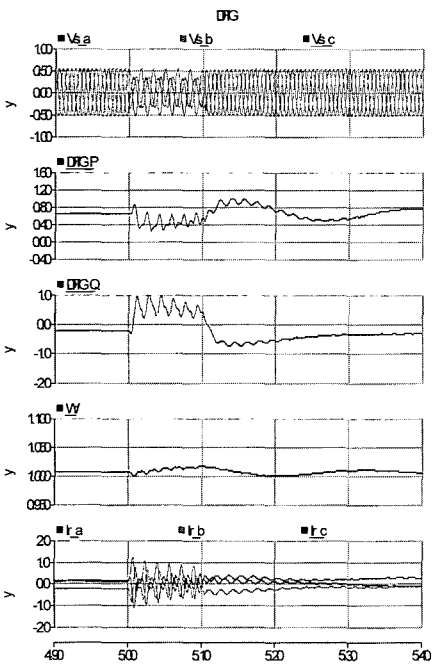
(a) 농형유도기 (3상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도)



(b) 농형유도기 (단상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도)



(c) DFIG (3상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도, 회전자전류)



(d) DFIG (단상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도, 회전자전류)

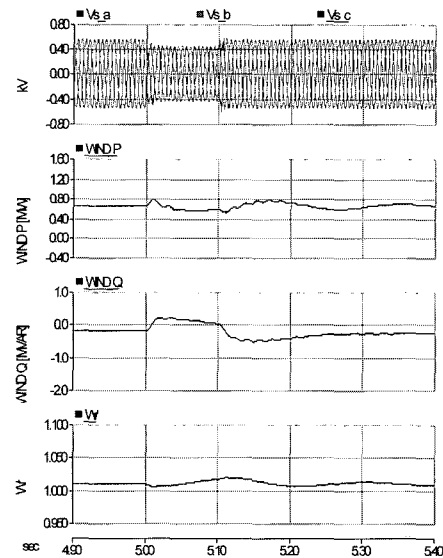
그림 12 근거리 지락 (부하 0.6[MW], 0.15[MVAR])  
Fig. 12 Near AC Fault (Load 0.6[MW], 0.15[MVAR])

그림 12는 그림 11 “A”와 같이 농형유도기와 DFIG의 원거리 고장이 발생한 경우의 응답파형을 보여주고 있는 것이다. 그림 12에서 단상고장과 3상고장의 경우에 DFIG의 응답특성이 농형유도기의 응답특성보다 우수함을 알 수 있다.

그림 13은 그림 11의 “C”와 같이 풍력시스템의 인근에서 고장이 발생한 경우를 보여주는 것으로 그림 12보다는 고장전류의 크기가 큼을 보여주고, 풍력시스템이 과도하게 흔들림을 알 수 있다. 그림 12와 13에서 단상 사고 시에 전압파형이 2상 지락과 같아 보이는 이유는 풍력발전기의 변압기가  $\Delta$ -Y결선이기 때문이다.

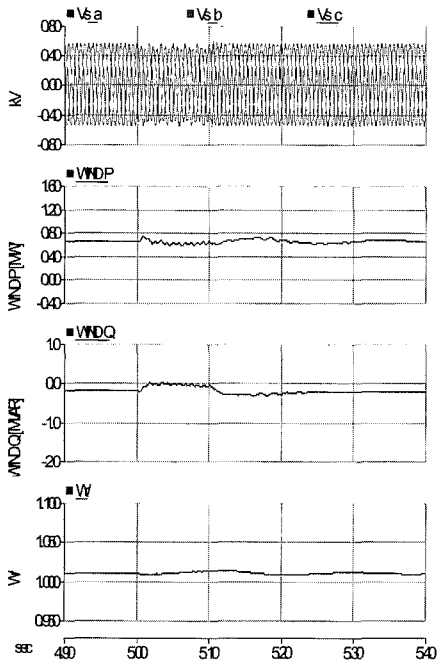
그림 14는 그림 11에서 “B”와 “D”의 조건을 모의한 경우로써 풍력시스템이 단독 운전을 하는 경우에 부하의 양에 따라 풍력시스템의 운전특성을 보여주는 것이다. 그림 14에서도 그림 12와 그림 13의 결과와 마찬가지로 DFIG의 응답 특성이 우수함을 알 수 있다.

한편, 그림 14의 (b)는 local 부하가 작은 상태에서 농형 유도기의 단독운전시의 응답파형을 보여주는 것으로 이 경우에는 유도기의 단자전압이 급격히 증가하는 현상을 알 수 있는데 이러한 이유는 유도기의 속도가 증가함에 따라 유도기의 출력 단에 있는 콘덴서의 정전용량이 주파수에 따라 변화하기 때문에 유도기의 출력 단에 과전압이 유기됨을 알 수 있다. 이러한 특성은 농형 풍력시스템에서 매우 중요한 특성으로 Local 부하가 농형유도기의 안정도에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다.

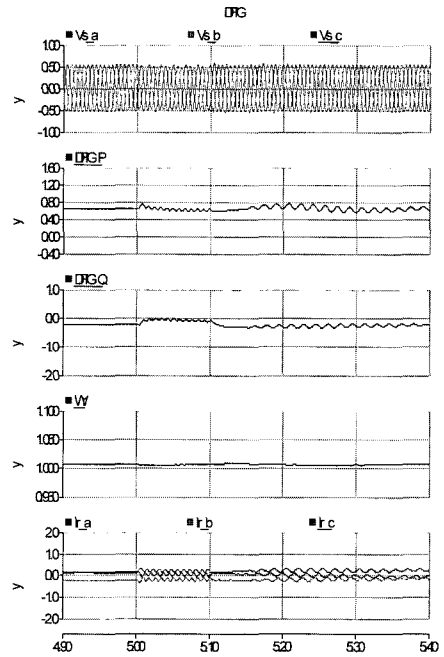


(a) 농형유도기 (3상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도)



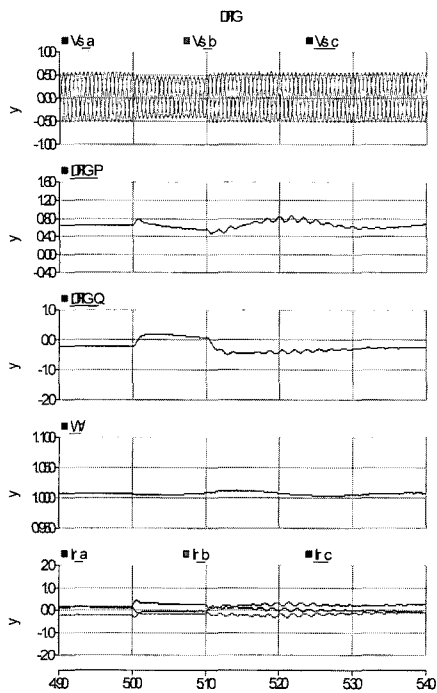


(b) 농형유도기 (단상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도)

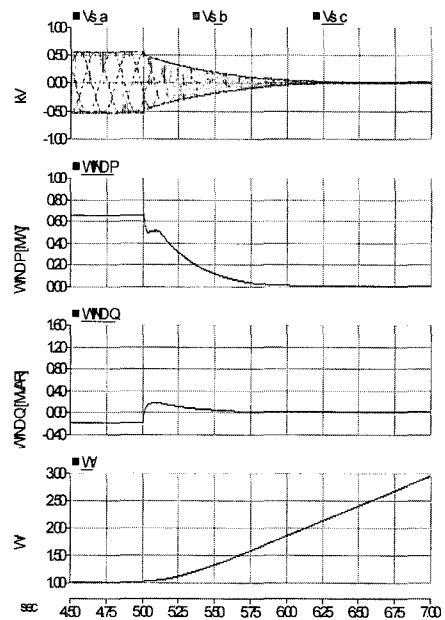


(d) DFIG (단상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도, 회전자전류)

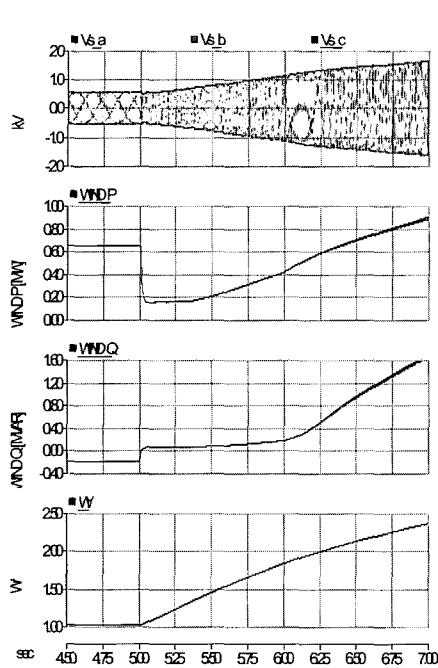
그림 13 원거리 지락 (부하 0.6[MW], 0.15[MVAR])  
Fig. 13 Remote AC Fault (Load 0.6[MW], 0.15[MVAR])



(c) DFIG (3상 지락 사고)  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도, 회전자전류)



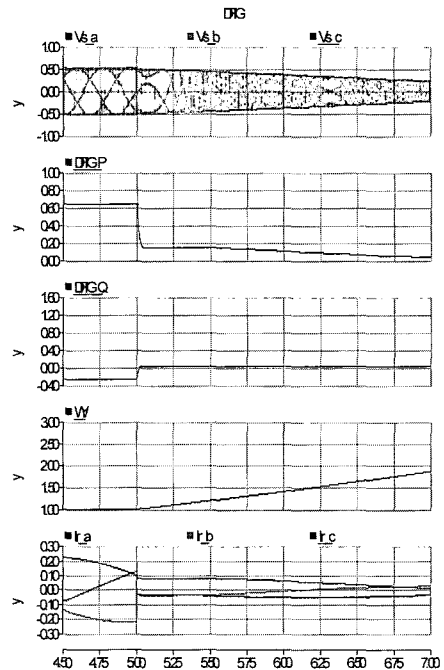
(a) 농형유도기  
(부하 : 0.6[MW], 0.15[MVAR])  
(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도)



(b) 농형유도기

(부하 : 0.15[MW], 0.03[MVAR])

(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도)



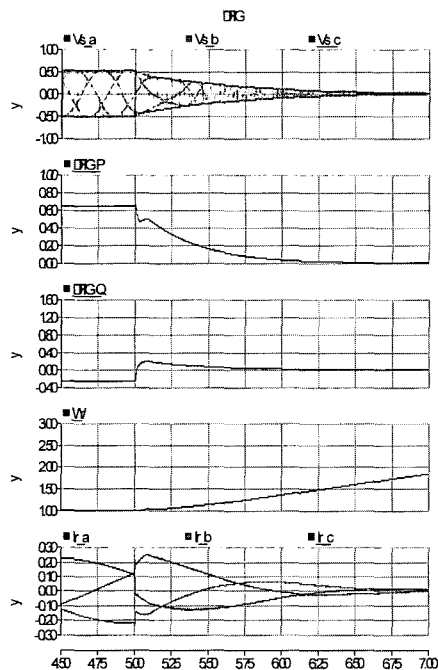
(d) DFIG

(부하 : 0.15[MW], 0.03[MVAR])

(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도, 회전자전류)

그림 14 단독 운전시의 부하변동

Fig. 14 Load variation at the islanding condition of induction machine



(c) DFIG

(부하 : 0.6[MW], 0.15[MVAR])

(Y축 : 3상 전압, 유효전력, 무효전력, 속도, 회전자전류)

## 5. 결 론

본 연구는 이중여자 방식의 권선형 유도기의 동작특성에 대하여 분석한 결과이다. 이중여자 권선형 유도기는 속도에 따른 운전특성이 좋고, 계통의 무효전력을 제어할 수 있으며, 단독운전 시에도 과전압이 발생하지 않는 장점을 가지고 있기 때문에 전력계통에 연계되어 있는 동기발전기와 가장 가까운 운전특성을 가지고 있다. 본 연구를 통하여 이중여자방식의 권선형 유도발전기는 계통 연계 시에 계통의 변화에 영향을 적게 받는 발전기로서 풍력발전기의 보급에 큰 일익을 담당할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] B.Bose, Modern Power Electronics And AC Drives, 2002.
- [2] SLOOTWEG, J.G., POLINDER, H., and KLING, W.L.: 'Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed

induction generator'. Presented at the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 15th-19th July 2001.

- [3] KRAUSE, P.C.: 'Analysis of electric machinery' (McGraw-Hill Inc, New York, 1986).
- [4] HOLDSWORTH, L., and WU, X.: 'Dynamic and steady-state modelling of the doubly-fed induction machine (DFIM) for wind turbine applications', Internal report for Manchester Centre of Electrical Energy (MCEE) at UMIST, 2002.
- [5] BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., and BOSSANYI, E.: 'Wind energy handbook', (John wiley, Chichester 2001).

## 저 자 소 개



### **김찬기(金燦起)**

1968년 12월 17일생. 1991년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 전력연구원 선임연구원.



### **한상열(韓相烈)**

1973년 2월 27일생. 1999년 동국대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 (주)호성중공업 연구소 선임연구원.



### **추진부(秋鎭夫)**

1950년 1월 7일생. 1977년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1977년~현재 전력연구원 수석연구원.