

특집 : 풍력발전 시스템 동향

풍력발전시스템과 전압품질

김 호 성

(공주대 전기전자공학부 교수)

1. 서론

계통망에 연계되는 풍력발전시스템을 건설할 때 중요하게 고려해야할 점은 계통망의 전압품질에 미치게 될 풍력발전시스템의 영향이다. 풍력발전시스템을 계통망에 접속하므로써, 전압변동, sag/swell, 고조파왜곡, 플리커등이 발생되며 심지어 전압의 불안정이 야기되기도 한다. 이에 따라, 여러 유럽국가에서 추천하는 규정에서는 풍력발전시스템의 전력량에 대한 계통망의 단락용량의 비율이 적어도 20이상 이 되도록 권고하고 있다⁽¹⁾. 그러나 이론적으로 안정성을 보장하는 풍력발전시스템의 전력량에 대한 계통망의 단락용량 비율은 5까지 낮출 수 있다⁽²⁾. 풍력발전시스템의 계통연계시에 발생하는 전력품질문제를 심도있게 파악함으로써 양질의 전력 품질을 유지하면서도 계통망의 사용율을 높일 수 있을 것이다.

기존의 대부분의 발전기는 계통망과 동기를 이루는 3상 동기발전기에 의하여 계통망에 전력을 공급한다. 그 이유는 동기발전기가 유도발전기에 비하여 일반적으로 복잡하고 비싸다는 단점이 있음에도 불구하고, 독립운전과 계통연계운전이 모두 가능하고 용량성 무효전력과 유도성 무효전력을 모두 자유롭게 공급할 수 있다는 장점을 갖기 때문이다. 그러나 유도발전기는 튼튼하고, 설계비용이 비싸지 않으며, 제어시스템이 비교적 간단하고, 구동토크의 변동에 대하여 속도의 가변으로 대응이 가능하다는 장점 때문에 풍력발전기로서는 높은 타당성을 갖는다⁽²⁾. 유도발전기는 유효전력을 공급하는 한편 무효전력을 소비한다. 계통의 거의 모든 장비가 무효전력을 소비를 한다고 볼 수 있으며, 무효전력의 이동은 전압의 변동을 야기한다.

본 란에서는 유도발전기를 사용하는 풍력발전시스템의 특징을 분석하고, 계통망에 미치는 전압품질저하의 원인을 밝힌다. 이에 대한 대책으로서 지금까지 사용되거나 연구되어온 대표적인 풍력발전시스템의 전압품질 제어방법들을 소개한다.

2. 풍력발전시스템의 특징

계통망의 전압품질에 영향을 미치는 풍력발전시스템의 원인은 공기역학적인 부분과 기계역학적인 부분, 그리고 전기적인 부분으로 나타난다. 따라서 이러한 세 가지 면에서 풍력발전시스템을 분석할 필요가 있다.

2.1 풍력에너지의 특징

풍력이란 바람에 의한 에너지이다. 바람이 어디서 와서 어디로 가는지, 언제 올는지, 그리고 얼마나 올는지 아무도 예측할 수 없는 것처럼 풍력에너지도 예측불허하다. 그림 1은 풍력에너지의 시간대별 변화 양상을 보인다. 100일간의 장시간 대에서나 10분의 짧은 시간대에서 모두 풍력에너지는 심하게 변화하고 있는 것을 볼 수 있다.

각 풍력발전기의 출력은 공기의 밀도와 풍속의 3승에 비례한다. 그림 2는 풍속에 따른 풍력발전기의 동작영역과 출력을 보인다⁽³⁾. 풍력발전기는 풍속이 컷인속도(cutting-in speed) v_c 이상이 될 때부터 동작하여 풍속의 3승에 비례한 출력을 내기 시작한다. 풍속이 정격속도(rated wind speed) v_r 를 넘게 되면 풍력발전기는 최대 정격출력으로 출력을 제한하여 운전한다. 풍속이 컷아웃속도(cut-out speed) v_f 에 이르게 되면 풍력발전기는 자체보호를 위하여 운전을 중지한다. 그림에서

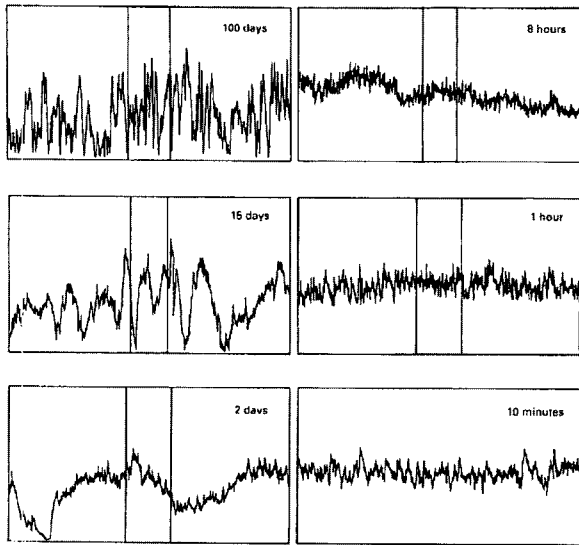


그림 1 풍력에너지의 시간대별 변화 양상

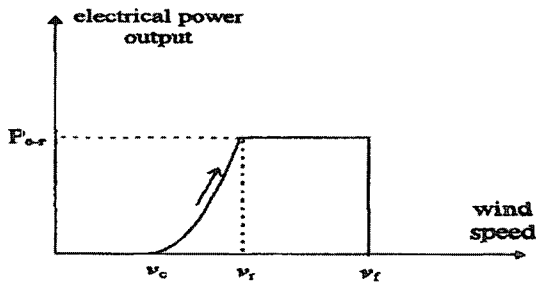


그림 2 풍속에 따른 풍력발전기의 출력전력

알 수 있듯이 풍속이 정격속도와 컷아웃속도 사이에 있는 경우 풍력발전기는 풍력의 크기에 관계없이 일정한 출력을 계통망에 공급한다. 그러나 풍속이 컷인속도와 정격속도 사이에 있을 때는 풍력발전기의 출력은 풍속에 따라 크게 변동하게 된다. 이러한 변동은 불규칙하게 발생하므로 랜덤효과(random effect)라고도 부른다. 출력전력의 심한 변화는 다른 분산발전시스템과 구분되는 풍력발전의 특징이기도 하며 이러한 출력전력의 변화는 계통망의 전압품질을 떨어뜨리는 주원인이 된다.

한편 풍력발전기의 구조적 특징에 의하여 발생하는 전력의 변동도 존재한다. 동일지역 동일시점에서 발생하는 풍력에너지도 지상으로부터의 고저에 따라 그 크기가 다르다. 풍력발전기는 일반적으로 수평형의 날개구조를 갖고 있으며 날개는 직경이 거의 100m에 이르기 때문에 날개가 위로 향했을 때 받는 풍력에너지와 아래로 향했을 때 받는 풍력에너지의 크기가 무시하지 못할 정도로 달라진다. 이로 인하여 출력전력

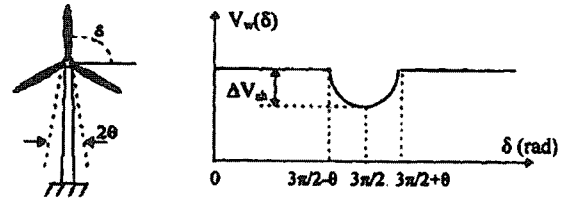


그림 3 풍력발전기의 배면효과(tower shadow effect)

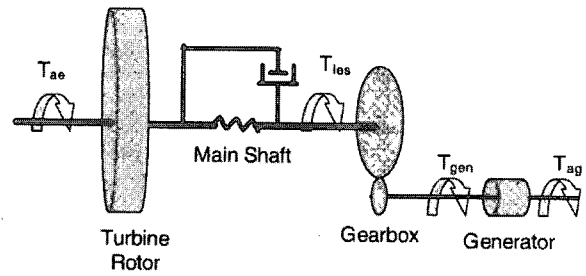


그림 4 풍력발전시스템의 기계적 모델

에 주기적인 진동이 발생하며 이러한 효과를 쓸림효과(shear effect)라고 한다. 식 (1)은 쓸림효과를 표현한 것이다⁴⁾.

$$\frac{V_w}{V_{wh}} = \left(\frac{z}{z_h} \right)^\alpha \quad (1)$$

단 V_w : 회전날개의 등가풍속

V_{wh} : 허브축에서의 풍속

z : 회전날개의 등가높이

z_h : 허브축의 높이

α : 쓸림계수(shear exponent)

또한 풍력발전기의 날개가 발전타워의 바로 앞을 지나게 되면 후면에 있는 타워에 의하여 풍력에너지가 감소하게 된다. 이러한 효과를 배면효과(tower shadow effect)라고 한다. 쓸림효과와 배면효과는 모두 주기적인 전압의 외란을 야기한다. 풍력발전기의 회전날개가 3개의 구조로 되어 있는 경우 3nP의 전압고조파를 발생 시킨다. 그림 3에 배면효과를 설명한다.

2.2 풍력발전시스템의 기계적 모델링

그림 4는 풍력발전시스템의 기계적 모델을 보인다⁵⁾.

회전날개의 모델

풍력발전기가 회전날개로부터 받는 토크는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$T_{ae} = \frac{1}{2} \pi \rho C_i(\lambda) R^3 v_w^2 \quad (2)$$

- 단, ρ : 공기밀도
- R : 회전날개의 반경
- $\lambda = \Omega_b R / v_w$: 풍속에 대한 회전날개팁의 속도 비
- Ω_b : 풍력발전기의 회전각속도(rad/s)
- $C_i = C_p / \lambda$.

허브축의 모델

$$\frac{dT_{les}}{dt} = \frac{1}{T_n} (T_{ae} - T_{les}) \quad (3)$$

- 단, T_{ae} : 회전날개가 받는 토크
- T_{les} : 터빈축의 토크
- T_n : 허브의 시정수

기어박스의 모델

$$\frac{d\Omega_b}{dt} = \frac{1}{J_t} (T_{les} - G_T T_{gen}) \quad (4)$$

- 단, T_{gen} : 터빈의 기계적토크(mechanical torque)
- G_T : 기어박스 비
- J_t : 발전기와 기어박스 결합의 시정수

발전기는 커플링을 통하여 기어박스로부터 터빈의 기계적 토크를 받는다. 커플링의 타입에는 유연축(compliant shaft), 커플링과 유연축(coupling and compliant shaft), 레이트 커플링(rate coupling), 또는 강체축(stiff shaft) 등이 있으며 강체축의 경우는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$T_m = K(\theta_G - \theta_g) \quad (5)$$

- 단, K : 강성계수
- θ_G : 기어박스축의 축각도
- θ_g : 발전기축의 축각도.

2.3 풍력발전기의 전기적 모델링

유도발전기를 사용한 풍력발전기는 유도전동기와 같이 그림 5의 등가회로로 모델링 된다. 그림 5로부터 총임피던스는 식 (6)과 같이 정리된다.

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2/s + jX_2)}{R_2/s + j(X_m + X_2)} \quad (6)$$

컴퓨터에 의하여 수치해석적으로 슬립 0으로부터 -1.0에 대하여 역율을 구해보면 그림 6과 같이 된다^[6].

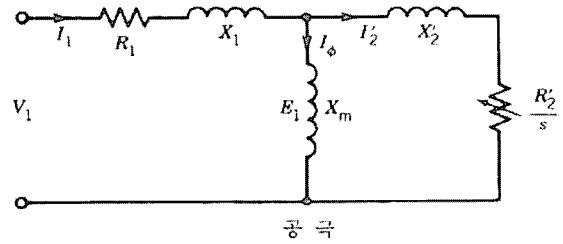


그림 5 유도발전기를 사용한 풍력발전기의 모델링(IEEE 권고)

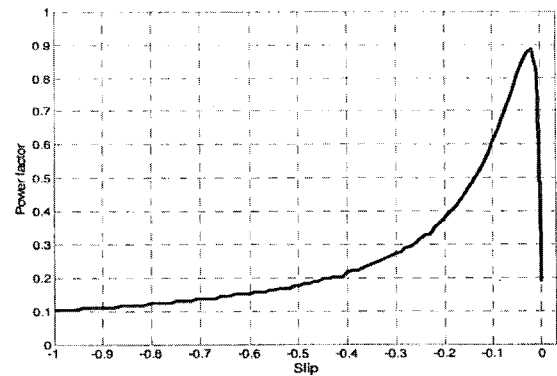


그림 6 유도발전기에서 슬립에 따른 역률

일반적인 유도발전기의 운전슬립인 -0.02에서 -0.19 사이에서 발전기의 역율은 0.887로부터 0.394에 이른다. 이는 유도발전기의 운전이 매우 많은 유도성 무효전력을 소비함을 의미한다.

3. 풍력발전시스템과 전압품질

전형적으로 풍력발전시스템은 수기 또는 수백기의 풍력발전기를 공통버스 또는 "컬렉터버스(collector bus)"에 전기적으로 접속하여 구성된다. 풍력발전기는 480V 또는 660V의 저전압 발전을 하며 승압용변압기를 사용하여 11kV 또는 34.5kV로 승압하여 배전계통에 접속된다.

풍력발전시스템과 관련하여 발생하는 전압품질문제는 크게 세 그룹으로 분류하여 볼 수 있다^[7].

- 1) 전력망으로부터 발생되어 풍력발전시스템에 영향을 미치는 과도적인 전압현상
- 2) 풍력발전시스템으로부터 발생되어 전력망에 영향을 주는 과도적인 전압현상
- 3) 국부적인 풍력발전시스템으로부터 발생하는 전압변동 등의 지속적인 전압문제

다음에 풍력발전시스템과 관련하여 발생하는 전압품질문제의 각 요인에 대하여 간단히 설명한다.

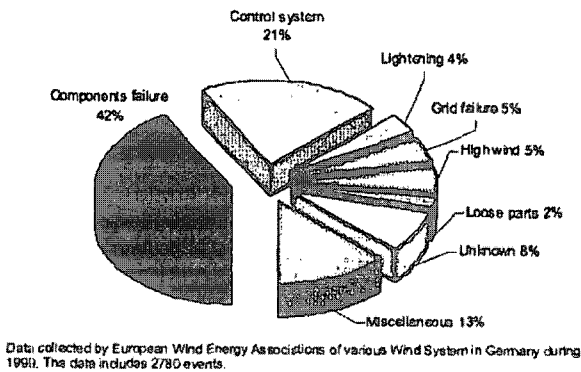


그림 7 독일 풍력발전기의 고장원인 분석⁽⁷⁾

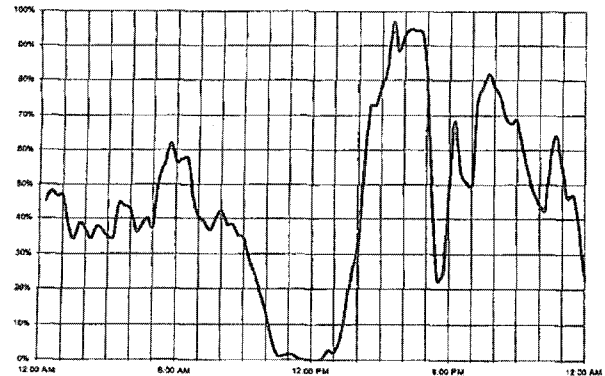


그림 8 무효전력보상을 하지 않은 풍력발전기의 전압프로필

3.1 외부적인 과도 전압문제

제작사에 따라 또는 모델에 따라 다르기는 하지만 풍력발전기는 외부전압의 과도현상에 대하여 민감하다. 예를 들어 전력망의 일부에서 정전사고가 발생하여 풍력발전기가 접속되어 있는 전력망에 순시전압저하(voltage sag)현상이 발생하는 경우 풍력발전기가 트립되어 발전이 중지 될 수 있다. 이는 국부적인 전력망의 정전과 풍력발전의 중단이 겹쳐져서 사고를 악화시키는 쪽으로 진행할 수 있다. 풍력발전의 잦은 중단은 수익의 감소를 가져올 뿐만 아니라, 풍력발전기의 수명을 줄이는 원인이 된다.

커패시터스위칭과 같은 작은 과도전압에 의해서도 풍력발전기는 영향을 받을 수 있다. 작은 전압의 스텝변화에 대해서도 풍력발전기의 기어박스는 토크의 스텝적인 변화를 받게 되고, 이러한 현상이 지속되면 기어박스는 빨리 마모되어 수명이 짧아지게 된다. 풍력발전시스템의 고장원인을 분석해보면 30-40%의 원인이 기어박스에서 발생하는 것을 볼 때 이는 심각한 문제이다⁽⁷⁾.

3.2 내부적인 과도 전압문제

이 문제는 대부분 풍력발전기를 가동할 때 발생한다. 2장에서 설명한 것처럼 풍력발전기는 전기적으로 유도전동기와 같은 등가회로를 갖는다. 풍력의 속도가 컷인속도(cut-in speed)이상이 되어 풍력발전기가 계통에 접속되어 시동을 하면, 유도전동기의 기동시와 마찬가지로 막대한 크기의 여자 전류가 무효전류의 형태로 흐르게 된다. 이러한 기동전류는 보통 정격전류의 2배 또는 3배에 이르며 10초이상 지속된다.

이러한 갑작스런 전류의 유입은 계통망에 무시할 수 없는 크기의 순시전압저하(voltage sag)을 유발하게 된다. sag의 정도는 계통망의 강인성과 풍력발전기의 용량 및 구조에 따라 달라진다. 대부분의 전기사업자는 수전점(PCC)에서 풍력발전시스템이 계통에 심각한 영향을 주지 않도록 순시전압저

하(sag)의 크기, 지속시간, 그리고 주파수에 대하여 기준을 정하고 있다. 순시전압저하의 기준은 보통 2 내지 3%정도이며, 풍력발전시스템이 이보다 큰 순시전압저하를 야기하는 경우 전기사업자는 문제가 해소될 때까지 풍력발전시스템의 운전을 정지하도록 요구할 수 있다.

3.3 지속적인 전압품질문제

그림 1에서 언급한 것처럼 풍력에너지 자체가 시간적으로 변동을 하기 때문에 전압변동은 풍력발전의 영원한 문제이다. 풍력에너지의 시간적 분포는 마치 프랙탈 이론처럼 짧은 시간대에서도 긴 시간대에 모두 같은 양상으로 분포하고 있다. 따라서 풍력발전시스템에서 발전하는 전압도 시간적으로 항상 변동한다고 볼 수 있다. 그림 8은 무효전력보상을 하지 않은 풍력발전기의 전압프로필 예를 보인다.

이와 같은 전압의 변동이 기준 범위를 넘어서면 순시전압상승/저하(sag/swell)의 문제를 일으킬 것이며, 전압변동의 크기가 작더라도 발생빈도에 따라 가시적인 문제를 일으키는 플리커(flicker)의 문제를 야기할 수 있다.

한편 주파수변환기를 사용하는 가변속 풍력발전기는 변환기의 비이상적인 동작에 의하여 계통에 비정현적인 전류를 주입하게 된다. 이러한 왜곡된 전류는 계통망의 회로조건과 결합하여 계통전압의 왜곡을 가져온다. 변환기가 이상적으로 동작한다고 하여도 변환기의 스위칭주파수의 배수에 비례하는 주파수대의 노이즈는 피할 수 없다. 현대의 풍력발전시스템에 채용되는 변환기의 스위칭 주파수는 2kHz이상이므로 풍력발전시스템은 그 배수에 해당되는 노이즈원이라고 볼 수 있다. 기존의 EN50160이나 IEEE519의 규정은 전원전압 기본파의 40차 이하의 저차 고조파 전류에 대하여만 규정을 하고 있기 때문에 이러한 변환기의 스위칭에 의해 발생하는 노이즈에 대한 규정도 새로이 수립할 필요가 있다고 할 수 있다⁽⁸⁾.

4. 풍력발전시스템의 전압유지

풍력발전시스템과 관련한 전압품질에 관한 연구는 비교적 초기의 단계라고 할 수 있으며, 현재로서는 수전점(PCC)에서의 전압유지(voltage regulation)에 관한 연구가 주를 이루고 있다고 보여진다. 지금까지 사용되거나 연구되어온 전압유지 방법으로는 직렬인덕터(series inductor), 스위칭커패시터(switched capacitor), 전압조정기(AVR)과 연계한 온로드 탭체인저(OLTC; on load tap changer), 정지형무효전력보상기(static var compensator: SVC), 배전용정지형보상기(distribution static compensator: DSTATCOM), dynamic var compensator(D-Var; 상품명), 초전도자기에너지저장장치(superconducting magnetic energy storage system: SMES), 배터리에너지저장장치(battery energy storage system: BMES), 통합전압품질제어기(unified voltage quality controller: UVQC), 그리고 동적전압보상기(DVR; dynamic voltage restorer) 등이 있으며 풍력발전기의 제어적인 방법으로 로터속도 피드백제어(rotor-speed

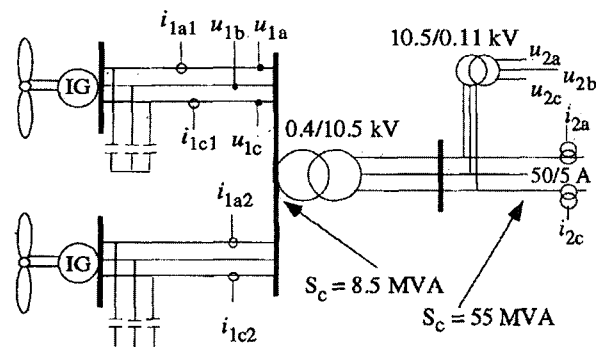


그림 9 두 대의 풍력발전기가 한 대의 승압용 변압기에 의하여 11kV 배전계통에 접속된 구성도

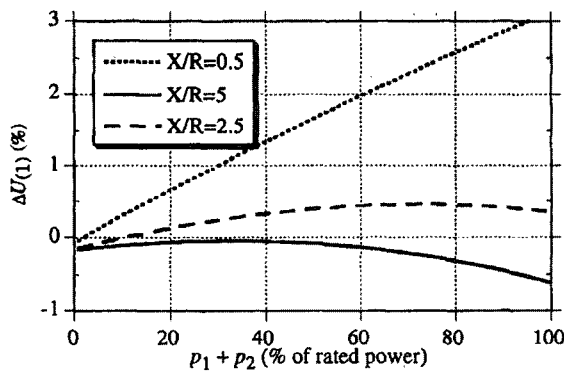


그림 10 변압기의 X/R 비에 따른 풍력발전 시스템의 유효전력량에 대한 전압변동

feedback control) 등의 방법이 있다. 이 중 몇 가지 대표적인 방법들을 정리해 본다.

4.1 직렬인덕터(series inductor)

풍력발전기와 계통망 사이에 직렬인덕터를 추가함으로써 X/R의 비를 높이면, 직렬인덕터에서 전압강하가 증가하고 풍력발전기의 전압조정에 시간지연이 발생하는 단점이 있는 반면, 풍력발전기의 단락전류용량이 감소하고 과도 안정도가 높아진다는 장점을 얻을 수 있다^[5,9].

그림 9는 두 대의 풍력발전기가 한 대의 승압용 변압기에 의하여 11kV 배전계통에 접속된 구성도를 보인다. 이때 변압기는 등가적으로 저항성분 R과 인덕턴스성분 X로 기능한다고 볼 수 있다. 그림 10에 변압기의 X/R 비가 0.5, 2.5, 및 5인 경우에 대하여 두 대의 풍력발전 시스템의 유효전력량에 따른 전압변동을 보인다. 그림 10에서 알 수 있듯이 X/R 비는 전압변동에 중요한 인수가 된다. X/R=0.5인 경우는 일반적이지는 않으나, 수용가 사이의 거리가 상대적으로 멀리 떨어진 농촌지역에서 있을 수 있는 경우이다.

4.2 온라인 탭체인저(OLTC)

전통적으로 고전압 배전계통의 전압은 그림 11과 같이 자동전압제어(AVC: automatic voltage control) 릴레이를 부가한 온로드 탭체인저(OLTC) 변압기를 사용하여 일정하게 유지한다. 자동전압조정릴레이의 기능은 전압 레벨이 규정된 상한 및 하한의 한계값 사이에 있도록 유지하는 것이다. 그림 12는 전압강하 보상 AVC릴레이의 동작원리를 보인다^[10, 11].

OLTC를 사용한 전압유지방식은 분산발전계통이 없었던 기존의 배전계통에서는 효과적으로 동작하였으나, 풍력발전

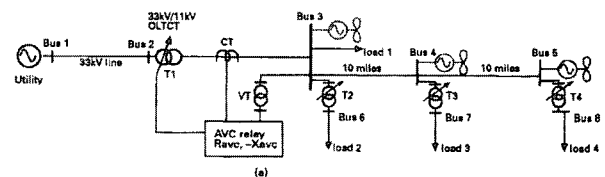


그림 11 풍력발전기가 포함된 전형적인 33kV/11kV 변전계통

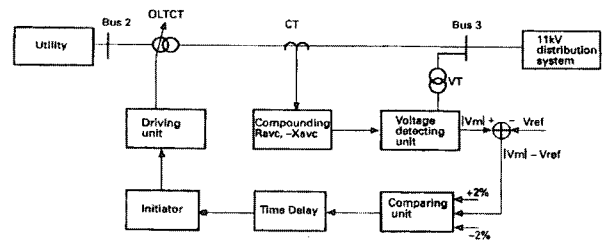


그림 12 전압강하 보상 AVC릴레이의 동작원리

시스템이 개입되는 경우 다음과 같은 문제가 발생된다³⁾.

- 1) AVC릴레이의 성능이 역율에 의존적이므로 운전조건에 따라 역율이 시시각각으로 크게 변하는 풍력발전시스템의 적용에는 문제가 있다.
- 2) 기존의 OLTC방식은 전력의 흐름이 일정 방향인 경우에 적용되는 알고리즘을 갖고 있었으나, 풍력시스템이 결부 되면 전력의 흐름이 반대로 될 수 있으므로 새로운 제어 알고리즘의 수립이 요구된다.
- 3) AVC릴레이의 동작은 전형적으로 15초 내지 180초로서 매우 긴 시간이다. 이는 풍력발전시스템에서 나타나는 짧은 시간대의 전압변동을 효과적으로 제어할 수 없다는 한계를 보인다.

4.3 스위칭커패시터(switced capacitor)

스위칭커패시터를 접속한 풍력발전시스템의 구성도를 그림 13에 보인다. 스위칭 커패시터는 그림에서처럼 풍력발전기와 인접하게 설치할 수도 있고 계통의 다른 곳에 설치하여 역율을 보상할 수도 있다.

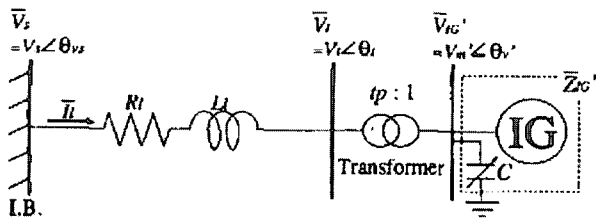


그림 13 스위칭커패시터를 접속한 풍력발전시스템의 구성도

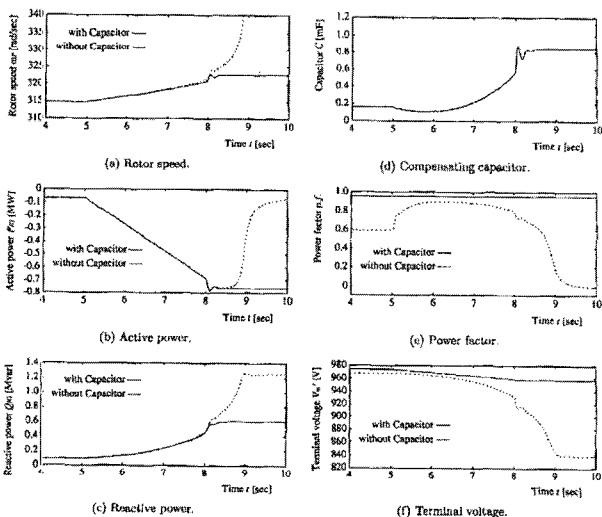


그림 14 스위칭커패시터를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 있어서 풍력발전기의 운전성능 비교

풍속에너지가 변할 때 스위칭커패시터를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 있어서 풍력발전기의 운전성능을 그림 14에 보인다¹²⁾.

실제로 스위칭커패시터를 계통에 접속할 때 그림 15와 같이 과도적인 진동이 발생한다. 이러한 진동은 보호계전기를 동작시켜서 계통망에 사고가 난 것으로 오인하여 비상발전기를 가동시키는 오류를 범하게도 하는 등의 문제를 야기할 수 있다. 커패시터뱅크의 단계를 어떻게 설정하는가에 따라 스위칭커패시터뱅크의 운전시 평균적인 스위칭 회수가 달라지게 된다. 커패시터뱅크의 단계를 많게 하면 요구되는 무효전력을 신속히 공급하여 전압의 유지와 계통의 안정을 도모할 수 있으나, 스위칭커패시터뱅크의 스위칭이 많아지게 되는 단점이 있다. 또한 스위칭이 늦어져서 요구하는 무효전력을

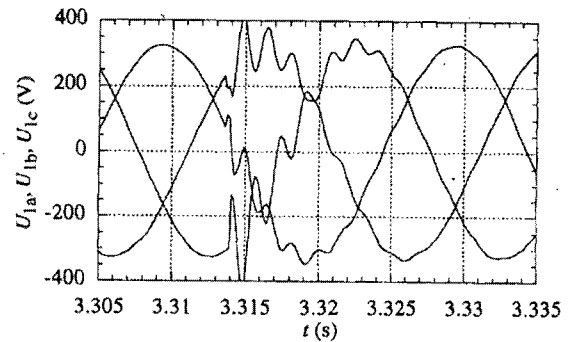


그림 15 스위칭커패시터를 접속할 때 발생하는 전압의 과도현상

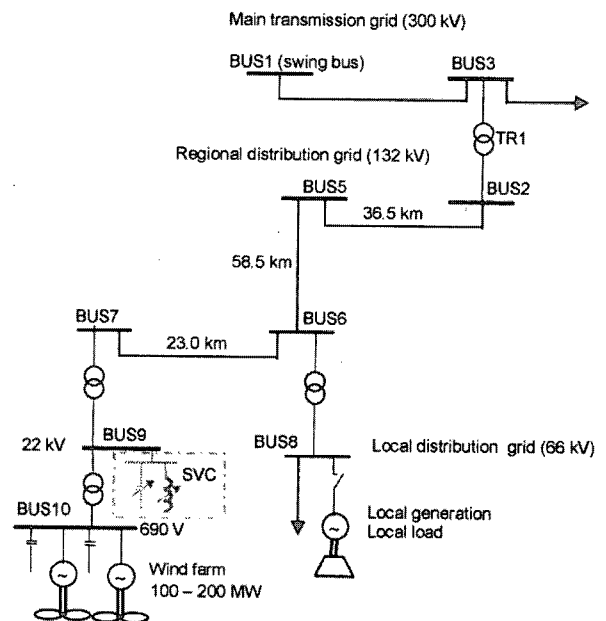


그림 16 SVC를 Bus9에 설치한 풍력발전시스템의 계통도

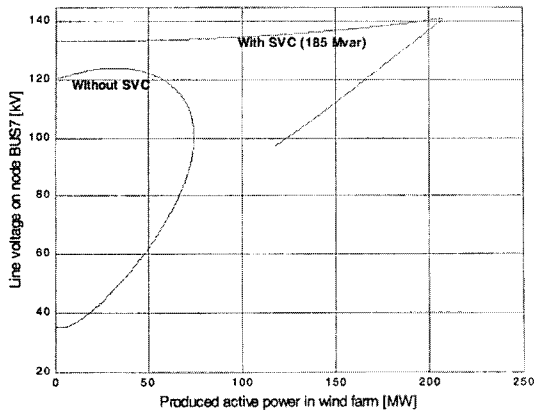


그림 17 풍력발전기의 유효전력과 단자전압의 관계(시뮬레이션)⁽¹³⁾

제때에 공급하여 주지 못하면 계통의 안정이 깨어질 수 있다.

4.4 Static var compensator(SVC)

정지형무효전력보상기(Static var compensator: SVC)는 가변적인 서셉턴스(susceptance)를 계통에 공급할 수 있으며 동작이 스위칭커패시터(SC)에 비하여 빠르다는 장점이 있다. 그림 16은 SVC를 Bus9에 설치한 풍력발전시스템의 계통도를 보인다.

그림 17은 SVC를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 있어서 풍력발전기가 Bus7에 공급할 수 있는 유효전력과 단자전압의 관계를 보인다. SVC를 설치하지 않은 경우는 약 75MW정도의 유효전력에서 단자전압이 붕괴되는 것을 볼 수 있다. 계통의 규정전압을 고려하면 약 70MW가 풍력발전시스템이 공급할 수 있는 최대 전력이다.

그러나 185Mvar 용량의 SVC를 Bus9에 설치한 경우 Bus7에서 풍력발전시스템의 단자전압은 좋은 레귤레이션 특성을 보이며 공급가능한 유효전력도 200MW를 넘는 것을 볼 수 있다. OLTC, SC와 병행하여 SVC를 사용하면 좀더 작은 용량의 SVC로써 단자전압을 유지할 수 있을 것으로 사료된다^(7,14).

4.5 DSTATCOM

배전용정지형보상기(DSTATCOM)는 순수한 전력전자변환기를 사용한 무효전력보상기로서 계통에 무효전류를 공급할 수 있다. SVC가 공급해 주는 무효전류의 크기가 계통전압의 크기에 비례하는 제한을 받는 것에 비하여 STATCOM은 계통의 전압의 크기와는 독립적으로 STATCOM의 공급능력 범위 내에서 계통에 무효전류를 공급할 수 있다는 점에서 차이가 있다. 최근에는 STATCOM의 기능에 SC의 기능을 결합하여 무효전류보상용량에 대한 보상기의 사이즈를 크게 줄이고 동특성도 개선시킨 D-var라는 제품도 시장에 선을 보이고

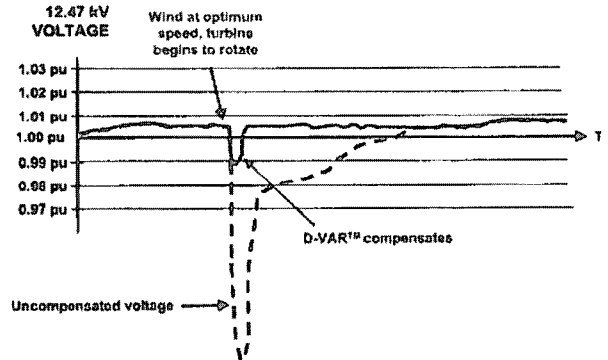


그림 18 계통망에 순시전압저하(sag)이 발생한 경우에 있어서 풍력발전시스템의 전압 프로파일

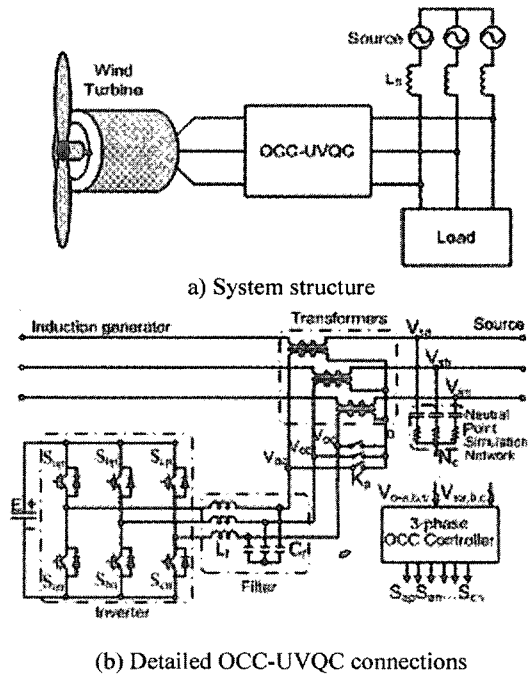


그림 19 1-사이클제어(OCC; one cycle control) UVQC

있다⁽¹⁷⁾. 그림 18은 계통망에 순시전압저하(sag)가 발생한 경우에 있어서 D-var를 사용하여 보상을 한 경우와 보상하지 않은 경우를 비교한 풍력발전시스템의 전압 프로파일을 보인다.

4.6 UVQC 또는 DVR

풍력발전시스템이 계통망의 전압품질에 일으키는 문제는 크게 나누어서 기동시와 스위칭에 의해 발생하는 과도전압변동과 풍속의 변화에 따르는 연속적인 전압변동의 두 가지로 볼 수 있다. 1-사이클제어 통합전압품질제어기(OCC-UVQC)는 그림 19와 같이 풍력발전기와 계통망 사이에 위치하며 다음과 같은 기능을 갖는다⁽¹⁵⁾.

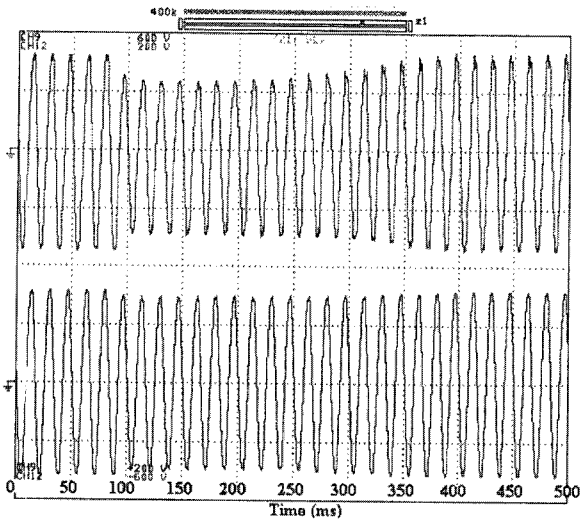


그림 20 풍력발전시스템이 기동시에 발생하는 순시전압저하의 보상^[15]

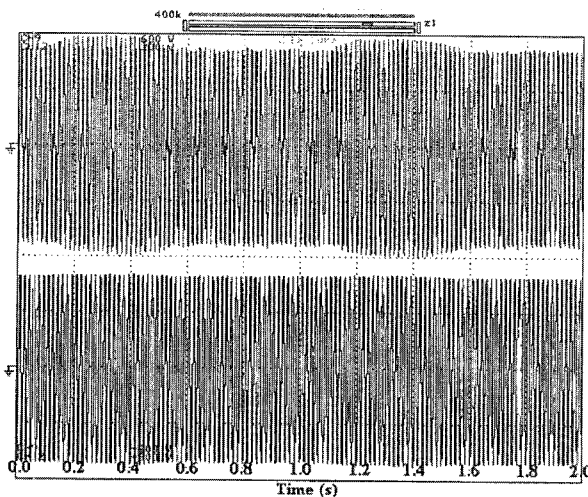


그림 21 풍속의 변동에 의하여 발생하는 전압변동의 보상^[15]

- 1) 순시전압저하 및 상승(sag/swell), 또는 일반적인 전압 변동을 보상한다.
- 2) 기준값의 계산이 필요하지 않아 제어기의 구성이 간단하다.
- 3) 스위칭주파수가 일정하다.
- 4) 전압이 전원주파수 보다 매우 짧은 스위칭주기 내에 수렴하므로 동특성이 뛰어나다.

그러나 OCC-UVQC는 동적전압보상기(DVR: dynamic voltage restorer)의 일종으로서 제어기를 아날로그적으로 값싸게 구성한 DVR의 구현방법으로 볼 수 있다^[16].

그림 20은 풍력발전시스템이 기동시에 발생하는 순시전압저하를 OCC-UVQC가 보상하여 계통전압을 안정하게 유지

하는 실험파형을 보인다. 그림 21은 풍속의 변동에 의하여 발생하는 전압변동을 OCC-UVQC가 보상하여 계통전압을 안정하게 유지하는 실험파형을 보인다.

5. 맺는말

1990년대 후반 들어 풍력발전시스템이 배전계통망의 전력 품질에 미치는 상호 영향에 관한 연구에 대하여 관심이 나타나기 시작하다가, 환경친화 에너지에 대한 관심의 증가와 함께 2003년도 이후부터는 풍력발전시스템과 계통망의 전압품질에 관련된 연구가 급격히 증가하고 있는 상황이다. 따라서 이제 태동기라고 볼 수 있는 풍력발전시스템의 전압보상 및 전압유지에 관련한 기술 분야에 전력전자분야의 연구자들의 관심이 요구된다.

풍력에너지와 관련된 산업이 발전하기 위하여는 풍력발전시스템의 계통망 접속에 관련한 국가적·국제적 규정이 수립되어야 한다. 미국의 IEEE규정이나 유럽의 EN규정에서는 분산발전시스템에 대한 일반적인 규정은 수립되어 있으나, 끊임없는 에너지의 변동이 내재적으로 발생하는 특유의 특성을 갖는 풍력발전시스템에 대하여는 아직까지 독립된 규정을 마련하지 못하고 있다. 그러나 일찍이 풍력발전을 장려하고 산업화 하여온 덴마크의 경우는 2000년부터 풍력발전시스템의 계통연계 규정을 수립하는 노력을 기울인 덕분에 2004년에는 100kV 미만의 계통망에 적용되는 풍력발전시스템의 계통연계규정을 수립하여 적용하고 있고^[18], 100kV이상의 계통망에 적용되는 풍력발전시스템의 계통연계규정에 대하여도 초안을 마련한 상태이다^[19].

우리나라의 경우 덴마크와 같이 반도국가로서 3면이 바다로 둘러 쌓여 있고, 사람이 살지 않는 산악지역이 많은 등 풍력에너지를 개발할 수 있는 가능성이 많이 있다고 생각되어진다. 우리나라에서 풍력발전 산업을 성공시키기 위하여는 좋은 품질의 풍력에너지가 있는 지역을 조사·확보하고, 기존의 계통망과 풍력발전시스템 간의 전력품질에 상호 나쁜 영향을 미치지 않는 전기기술의 개발이 요구되며, 우리나라 실정에 맞는 풍력발전시스템의 계통연계규정을 수립하는 작업이 선행되어야 할 것이다.

짧은 시간에 글을 작성하다보니 다소 두서없는 부분도 많을 것으로 사료된다. 시간상 공간상 기술하지 못한 기술적인 부분들은 참고자료로 남겨두었으므로^[20-27] 관심 있는 독자께서는 찾아보기를 권합니다. ■

참고 문헌

- [1] Thiringer, T., "Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two

- wind turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, pp. 601-606, Sept. 1996.
- [2] Coath, G.; Al-Dabbagh, M.; Halgamuge, S.K., "Particle swarm optimisation for reactive power and voltage control with grid-integrated wind farms", Power Engineering Society General Meeting/IEEE, Vol.1, pp. 303-308, June 2004.
- [3] Jiang Fan; Salman, S.K., "The effect of integration of wind farms into utility network on voltage control due to the co-ordination of AVC relays", Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97. (Conf. Publ. No. 450), Vol.1, pp.260-265, Nov. 1997.
- [4] Papadopoulos, M.P.; Papathanassiou, S.A.; Tentzerakis, S.T.; Boulaxis, N.G., "Investigation of the flicker emission by grid connected wind turbines", 8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings, Vol.2, pp. 1152-1157, 1998.
- [5] Fengquan Zhou; Joos, G.; Abbey, C., "Voltage stability in weak connection wind farms", Power Engineering Society General Meeting/IEEE, pp. 610-615, June 2005.
- [6] Ha, L.T.; Saha, T.K., "Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network", Power Engineering Society General Meeting/IEEE, Vol.2, pp. 2251-2256, June 2004.
- [7] Kehrl, A.; Ross, M., "Understanding grid integration issues at wind farms and solutions using voltage source converter FACTS technology", Power Engineering Society General Meeting/IEEE, Vol.3, pp. 1822-1828, July 2003.
- [8] Jorgensen, P.; Tande, J.O.; Vikkelso, A.; Norgard, P.; Christensen, J.S.; Sorenson, P.; Kledal, J.D.; Sondergard, L., "Power Quality and Grid Connection of Wind Turbines", 14th International Conference and Exhibition on CIREN(IEE Conf. Publ. No. 438), Vol.1, Page(s)2.6.1-2.6.6, 1997.
- [9] G.C.Paap, F.Jansen, and F.K.A.M.Wiercx, "The Influence of Voltage Sags on The Stability of 10kV Distribution Networks with Large-Scale Dispersed Co-Generation and Wind Generators," CIREN2001, Part 1, CD ROM, June 2001.
- [10] Salman, S.K.; Jiang, F.; Rogers, W.J.S., "Effects of wind power generators on the voltage control of utility distribution networks", International Conference on Renewable Energy - Clean Power, pp. 196-201, Nov 1993.
- [11] Cartwright, P.; Holdsworth, L.; Ekanayake, J.B.; Jenkins, N., "Co-ordinated voltage control strategy for a doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind farm", IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, Volume 151, Issue 4, pp.495-502, Jul 2004.
- [12] Senjyu, T.; Sueyoshi, N.; Kuninaka, R.; Uezato, K.; Fujita, H.; Funabashi, T., "Study on terminal voltage and power factor control of induction generator for wind power generation system", International Conference on PowerCon 2004, Vol.1, pp.753-758, Nov. 2004.
- [13] Palsson, M.P.; Toftevaag, T.; Uhlen, K.; Tande, J.O.G., "Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks", Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Vol.2, 769, 2002.
- [14] Calderaro, V.; Galdi, V.; Raiti, S.; Vaccaro, A., "ICT in distribution networks with wind power generation to improve voltage profiles" Universities Power Engineering Conference 39th, Vol.2, 821, Sept. 2004.
- [15] Sanchez, L.F.; Chen, Y.; Chen, G.; Smedley, K.M., "A unified voltage quality conditioner for wind power generation" Industry Applications Conference, Vol.1, pp. 579-584, Oct. 2005.
- [16] Hyosung Kim, Seung-Ki Sul, "Compensation Voltage Control in Dynamic Voltage Restorers by Use of Feed forward and State Feedback Scheme," IEEE Transaction on Power Electronics, vol.20, No.5, pp. 1169-1177, Sept. 2005.
- [17] Narend Reddy, "D-VAR and SuperVAR Technology Presentation", STEP Group Meeting(power point), San Diego, California, American Superconductor, March 08, 2004.
- [18] Wind turbines connected to grids with voltages below 100kV, Technical Regulations TF3.2.6, Elkraft system, Denmark, May 2004.
- [19] Wind turbines connected to grids with voltages above 100kV, Technical Regulations TF3.2.5,

- Elkraft system, Denmark, December 2004.
- [20] Tande, J.O.G., "Impact of wind turbines on voltage quality", 8th International Conference on Harmonics And Quality of Power, vol.2, pp. 1158-1161, Oct. 1998.
- [21] Saccomando, G.; Svensson, J.; Sannino, A., "Improving voltage disturbance rejection for variable-speed wind turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.17, no.3, pp.422-428, Sept. 2002.
- [22] Morren, J.; de Haan, S.W.H, "Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, no.2, pp. 435-441, June 2005.
- [23] Senjyu, T.; Kinjo, T.; Uezato, K.; Fujita, H., "Analysis of terminal voltage and output power control of wind turbine generator by series and parallel compensation using SMES", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol.6, pp. 4278-4284, June 2004.
- [24] Sun, T.; Chen, Z.; Blaabjerg, F., "Voltage recovery of grid-connected wind turbines with DFIG after a short-circuit fault", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol.3, pp. 1991-1997, June 2004.
- [25] Ahmed, T.; Noro, O.; Matzuo, K.; Shindo, Y.; Nakaoka, M., "Minimum excitation capacitance requirements for wind turbine coupled stand-alone self-excited induction generator with voltage regulation based on SVC", INTELEC '03, pp. 396-403, Oct. 2003.
- [26] Muljadi, E.; Yildirim, D.; Batan, T.; Butterfield, C.P., "Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation", Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, vol.2, pp. 1359-1365, Oct. 1999.
- [27] Brekken, T.; Mohan, N., "A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions", PESC '03, vol.2, pp. 760-764, June 2003.

《저 자 소 개》



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오까야마대학 방문교수. 2000년~2001년 덴마크 Aalborg대학 방문교수. 1987년~2005년 천안공업대학 교수. 2005년~현재 공주대 전기전자공학부 교수. 당 학회 편집위원.