

## 풍력발전시스템의 계통연계 보호방식에 관한 연구

김응상 · 김일동\*

한국전기연구원, \*두원공과대학

### A Study on the Protection Method with Interconnection of Wind-Power Generation System

Eung-Sang Kim and Il-Dong Kim\*

Korea Electrotechnology Research Institute

\*Doowon Technical College

#### 요 약

전력계통의 전원설비 방식은 대규모 집중전원방식과 소규모 분산전원방식으로 크게 분류할 수 있으나 지금까지의 우리나라의 전원방식은 대규모집중방식 위주로 전원계획을 수립하여 왔다. 그러나 최근에 신에너지 전원설비인 태양광, 연료전지 및 풍력발전 등의 환경 친화적인 전원방식이 급증하고 있는 추세이고 국가적으로도 이러한 전원설비를 장려하고 있다. 그러나 이러한 신에너지 전원방식은 독자적으로 모든 부하를 충당할 수 없으며 고장시 전원공급에 차질이 발생할 우려가 있어 전력계통과의 연계가 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 여러 형태의 신에너지 전원설비 중 풍력발전시스템을 저압 및 특별고압계통에 연계하는 경우에 발생하는 보호문제에 대해서 시뮬레이션과 분석을 통해 각종 사고에 대한 보호방식과 협조방안에 대한 방안을 제시하였다.

**Abstracts** — Generation facilities of the power system are mainly classified into large-scale concentrated generation and small-scale dispersed generation, but generation planning of the Korea power system has been focusing on the large-scale generation so far. Recently, however, applications of dispersed generation sources including solar cell, fuel cell, wind power, etc. have been rapidly increasing and being strongly promoted, and such generation sources should be comprehensively considered in both planning and operating. Since it is not always possible that the dispersed generation alone meets all the load interconnected to it is especially when a fault occurs, interconnection into the existing utility is desirable and recommended. In relation to wind power generation systems interconnected at the low and extra high voltage levels, this paper performs the simulation and analysis of the system protection and suggests protection coordination plans on various faults which possibly occur.

#### 1. 서 론

최근 지구환경 문제와 고유가 시대가 동시에 대두되면서 화석연료의 사용에 대한 억제 및 절약 운동이 진행되고 있고, 이러한 문제를 해결해 줄 수 있는 하나의 방법으로 대체에너지의 개발이 촉진되고 있다. 대체에너지 전원 중에서 가장 증가 속도가 빠른 풍력발전시스템은 현재 전 세계적으로 약 3000 MW 이상이 설치되어 있으며<sup>1)</sup>, 국내 또한 제주도, 전북 부안, 전남 신안군, 울릉도, 경북 포항 및 강원도 대관령 등지에 약 8 MW 정

도가 기 설치되어 있거나 추가로 설치를 추진 중에 있다. 기존 논문들은 풍력발전시스템의 정상특성, 즉 평균 풍속에 따른 발전기 출력, 전력조류, 전압변동, 주파수변동을 연구하여 왔다<sup>2)3)</sup>. 이외에도, 배전계통에 풍력발전시스템을 연계운전하기 위해서는 기존 계통 내 수용가의 전력품질을 나쁘게 하지 않기 위한 순시전압강하 및 상승, 주파수변동을 포함한 전력품질을 사전에 분석하여 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다<sup>4)5)</sup>. 본 논문에서는 풍력발전시스템을 계통에 연계하는 경우에 원활한 운용과 설비 및 사용자에게 대한 안전을 확보하기 위

한 여러 가지 보호방식과 이들의 협조방안을 도출하고자 유도발전기, 연계리액터, 배전선로, 가변부하장치 등을 EMTDC/PSCAD 모델링 하였으며, 보호협조에 관련된 다양한 시뮬레이션을 통해 풍력발전시스템의 계통연계와 연계되는 계통의 형태에 따라 발생할 수 있는 사고 상황에 대한 보호계전방식을 제시하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2-1. 풍력발전시스템

#### 2-1-1. 구성

풍력발전시스템은 상대적으로 부하가 작은 1000 kW 급 정도의 배전계통에 연계된다. 이런 소형풍력발전시스템은 구조상의 단순함, 동기점중의 불필요, 발전기에 제공하는 댐핑이 우수하기 때문에 동기발전기보다 유도발전기를 채택한다. 큰 슬립을 가진 유도발전기는 주기적인 토크펄스를 제어할 수 있는 우수한 댐핑을 가지고 있는 반면에 동기발전기는 주기를 가지고 블레이드가 타위를 통과할 때 발생하는 순간적인 토크 펄스를 제어하는 충분한 댐핑을 제공하지 못하기 때문이다. 이런 유도발전기를 포함한 풍력발전시스템을 그림 1에 나타내었다.

풍력발전설비의 제어기는 기계적 제어장치(피치각 제어, 요각제어, 브레이크제어), 발전기의 제어·보호장치 및 교류계통과의 인터페이스에 필요한 연계설비로 구성된다. 연계설비의 구성은 계통연계 보호장치(보호계전장치, 차단기, 개폐기), 변압기, 축정설비, 보상장치로 구성되어 계통과의 병렬운전을 안전하게 수행하게 한다.

#### 2-1-2. 특성

소형 풍력발전시스템은 앞서 말한 바와 같이 일반적으로 유도발전기를 사용한다. 유도발전기의 풍력발전시스템 구성시 가장 큰 단점은 무효전력을 제어할 수 없다는 것이다. 이런 점은 풍력발전시스템의 계통연계시 전압변동이 발생할 경우 이에 대한 전압조정이 어렵게 된다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 역률조정 커패시터를 연계시스템에 포함시키는데, 이로 인하여 유도발전시스템이 단독운전 될 때 자기여자에 의한 과전압이 발생하며 주파수도 상승하게 된다.

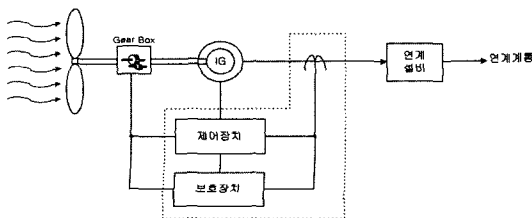


그림 1. 풍력발전시스템의 배전계통 연계 예.

풍력발전설비의 출력은 블레이드를 회전시키는 풍속의 조정이 불가하므로 일정치 않다. 따라서, 풍력발전설비의 정상특성은 정격풍속의 아래에서 선형특성에 따라 최대 출력을 낼 수 있도록 조정되며, 정격풍속의 이상에서 스톱과 피치에 의하여 제한되어 일정출력을 내게 된다. 풍력발전설비의 순시특성은 풍속의 급작스런 변화에 의한 높은 주파수대의 변동을 가지게 되고 이것은 정격의 30% 이상을 초과하기도 한다.

#### 2-1-3. 계통연계시 고려사항

기존의 계통과의 보호협조, 단독운전시 안전성, 긴급상황시 연락 및 복구방법에 대한 공급신뢰도, 그리고 전력품질문제로 나눌 수 있다. 풍력발전시스템의 계통연계로 인한 계통의 전압변동이 큰 문제가 되며 연계시 사고가 발생하는 경우에는 여러 가지 문제를 발생시킬 수 있으므로 연계시에 적합한 조건을 만족하는 보호계전방식을 만족하여야 한다.

### 2-2. 계통연계 보호방식

#### 2-2-1. 연계계통의 단락, 지락사고시 보호 방식

##### 2-2-1-1. 단락사고

풍력발전시스템의 유도발전기 같은 회전기는 내부 임피던스가 낮고 정전압을 가지고 있기 때문에 큰 과전류가 흘러 사고의 검출이나 보호가 용이하다. 그러나 역변환장치를 이용하는 경우에는 과전류 보호기능이나 과전류 제한기능의 순시동작에 의하여 유출하는 단락전류가 제한되지만 분리지점의 전압이 저하하기 때문에 UVR(부족전압제한기, 27)를 설치하여 보호한다. 이때 연계계통 이외의 단락사고나 루프 절체시의 순시 위상차 등에 의한 계통측의 순시전압 저하시에 오동작을 방지하기 위해서 UVR의 동작시간을 순시전압 저하시간보다 길게 하고 발전설비를 분리시키지 않고, 운전을 계속하며 자동 복귀 할 수 있는 시스템으로 구성하여야 한다.

##### 2-2-1-2. 지락사고

지락사고시에는 접지방식에 따라 그 현상들이 다르게 나타나므로 접지방식에 따라 보호방식을 달리 해야 한다. 아래의 항목에 대해 현재 연구가 진행되었다.

(가) 중성점 비접지 계통, 중성점 접지계통에서 연계 변압기의 중성점을 비접지한 경우

(나) 중성점 접지계통에서 연계용변압기의 중성점을 접지한 경우

(다) 단락보호에 파이롯 와이어 또는 전류차동계전기를 채용한 경우

(가)의 경우 OVGR을 이용하여 검출차단하고 동작시간을 조정하여 관련 보호계전기와 협조를 이루며 (나)의 경우는 OCGR 혹은 DOCGR을 채용하여 사고를 검출하게 하였다. (다)의 경우는 CDR(전류차동 계전기)만으

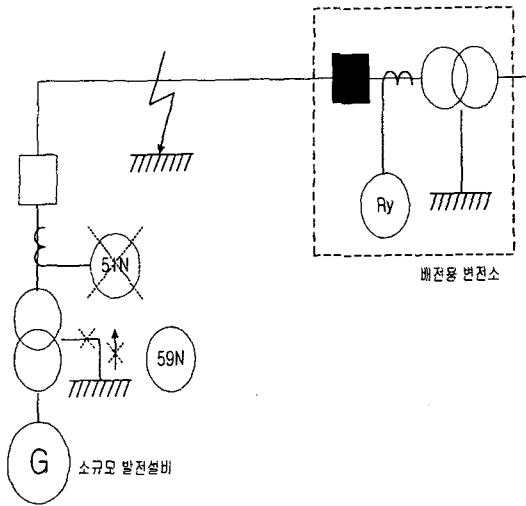


그림 2. 중성점 비접지계통의 경우.

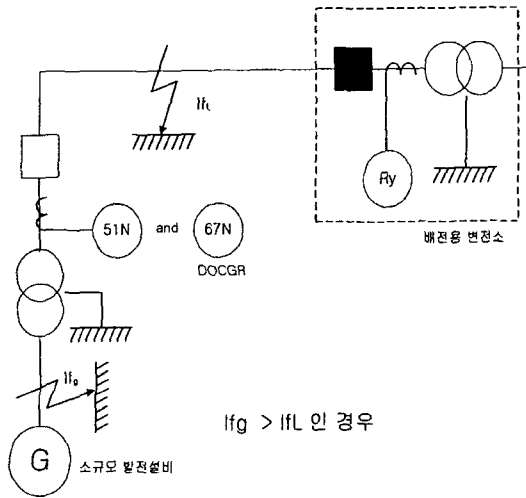


그림 3. 수송가내 사고의 지락전류가 계통사고의 지락전류보다 큰 경우.

로도 충분하지만 연계계통이 비접지, 중성점이 고저항 접지인 경우나 CDR이 고장인 경우에 대비하여 OVGR, DOCGR을 같이 설치한다.

2-2-2. 단독운전 방지대책

상위 계통사고에 의하여 계통전원과 분리된 경우 또는 작업으로 인한 선로용 개폐기를 개방한 경우 등에 의한 단독운전을 방지하기 위한 보호방식이 채용되어야 하며 역조류가 있는 경우와 없는 경우로 구별하여 보호한다. 단독운전을 검출할 수 없는 경우는 전송차단장치를 구비해야한다.

2-2-2-1. 역조류가 있는 경우

계통이 개방된 경우에 일반사업자 전원으로부터 분리된 부분계통의 발전출력과 부하의 평형상태가 비교적 크게 벗어나면 전압과 주파수의 변동이 생기기 때문에 OVR(과전압계전기, 59)나 UVR, OFR(주파수상승계전기, 81O), UFR(주파수저하계전기, 81U)로 검출하여 연계를 차단할 수 있지만, 발전출력과 부하의 크기가 대체로 평형을 이루는 경우에는 전압과 주파수의 변동이 작아 이들 계전기로는 검출이 곤란하다. 따라서 소규모발전설비의 연계용량을 상시 बैं크의 최저부하이하로 한정하여 बैं크단위로 발전출력과 부하의 수급 Balance가 이루어지지 않도록 관리할 필요가 있다. 배전용변전소의 변압기의 용량과 소규모발전설비의 용량이 비슷하면 배전용변전소의 상위계통의 사고로 배전용변전소의 차단기가 차단되더라도 소규모 발전설비 측에 단독운전 검출 기능을 가진 전압과 주파수에 변동이 적어 단독운전 검출 계전기가 동작하기 어렵게 된다. 따라서 이러한 부동작의 위험성을 방지하기 위해서는 상시 역조류가 있는 소규모 발전설비의 총 출력의 한도는 경부하시 부하탈락까지 고려하여 배전용변전소의 변압기 बैं크용량의 10~20% 정도로 하며 बैं크의 최저부하는 계통이나 부하의 실태에 따라 다르기 때문에 전력회사의 실측조사 결과에 의하는 것이 바람직하다. 또한 사고 후 배전용변전소의 계전기가 동작한 후 배전용변전소의 차단기가 동작하여 사고를 차단하고 차단된 상태에서 사고가 자연적으로 제거되는 경우에는 그 기간동안 단독운전이 이루어질 위험성이 있다. 이러한 배전선 사고시 단독운전을 확실하게 방지하기 위한 대책으로는 전송차단장치를 설치하여야 하나 가격 및 유지비용이 많이 소요되므로 새로운 기술 도입이나 단독운전방지 장치를 여러 알고리즘으로 이중화하는 등의 대책이 필요하다.

새로운 검출기법으로는 크게 수동적 방식과 능동적 방식으로 구분하며 이를 조합하여 채용하는 방식으로 단독운전을 검출한다. 수동적 방식은 단독운전 이행시의 전압이상과 주파수 등의 급변을 검출하는 방식이며, 일반적으로 고속성으로 우수하지만 불감대 영역이 있는 점과 급격한 부하변동 등에 의한 빈번한 자동작의 우려가 있다. 구현기법으로는 전압위상 도약 검출방식, 3차 고조파 전압급증검출 방식, 주파수 변화율 검출방식 등이 있다.

능동적 방식은 역변환장치의 제어계와 외부에 부가한 저항 등에 의해, 상시의 전압과 주파수에 변동을 주고, 단독 운전에 현저하게 나타나는 변동을 검출하는 방식으로 원리적으로는 불감대 영역이 없는 점에서 우수하지만, 일반적으로 검출에 시간이 소요되며, 다른 능동적 방식을 채용하는 신에너지 전원설비가 동일계통에 다수 연계되어 있으면 유효하게 동작하지 않을 우려가 있다.

기법으로는 주파수 Shift 방식, 유효전력 변동방식, 무효 전력 변동방식, 부하 변동방식이 있다.

2-2-2-2. 역조류가 없는 경우

역조류가 없는 연계계통에서는 단독운전상태가 되면 신에너지 전원이 있는 수용가 측으로부터 계통측으로 전력이 유출되므로 RPR(역전력 계전기, 32P)로서 검출하여 연계를 차단할 수 있다. 그러나 저압연계에 있어서 구내 부하와 신에너지 전원설비의 발전출력이 평형상태가 되면 역조류가 없는 상태에서도 전력계통을 역충전할 우려가 있으므로 역충전 방지기법을 적용해야 한다. 상시운전방식에서는 수용가의 수전전력이 일정치를 하회하는 경우에 UPR(부족전력계전기, 37) 또는 역변환장치 출력제어 기능에 의해 부족전력을 검출하여 신에너지 전원설비의 출력을 정지시킴으로서 역조류를 방지하는 방식이다. 전력계통이 정지한 경우에는 수용가의 수전전력이 일정치를 하회하므로 이를 이용하여 신에너지 전원설비의 출력을 정지시킨다. 신에너지 전원설비가 정지하므로 UVR에 의해 부족전압을 검출하여 분리개소의 차단장치를 차단함으로써 역충전을 방지한다. 전력계통

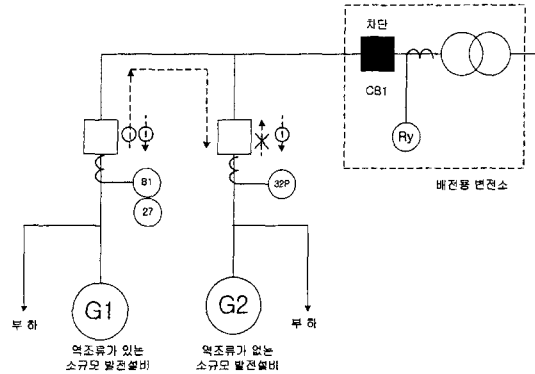
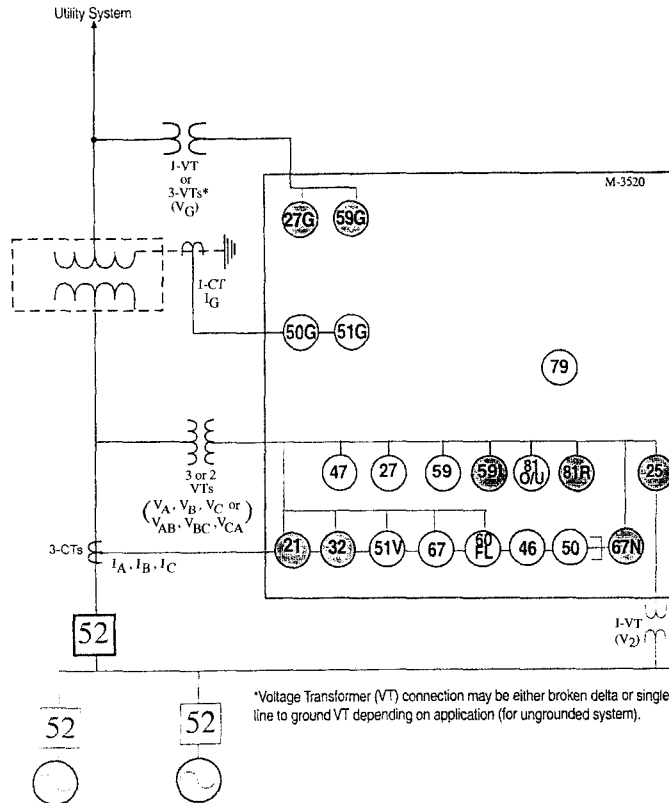


그림 4. 역조류가 있는 계통과 없는 계통이 혼재된 경우의 단독운전.

이 정지하더라도 역변환장치 등이 정상적으로 동작하지 않아 신에너지 전원설비의 출력이 정지하지 않는 경우에는 UPR에 의해 수전전력 저하를 검출하여 분리개소를 차단하여 역충전을 방지할 수 있다. 특고압 연계에



\*Voltage Transformer (VT) connection may be either broken delta or single line to ground VT depending on application (for ungrounded system).

그림 5. 계통연계용 발전기의 보호방식의 예.

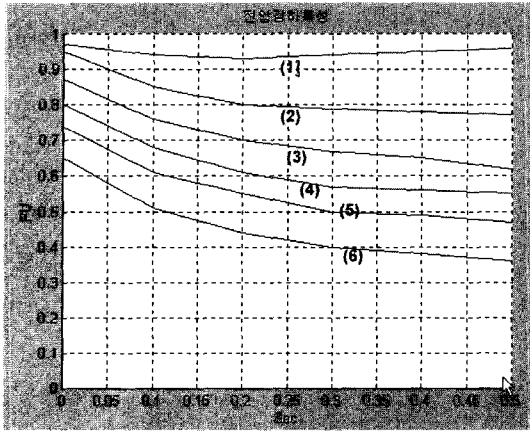


그림 6. 전압강하 특성.

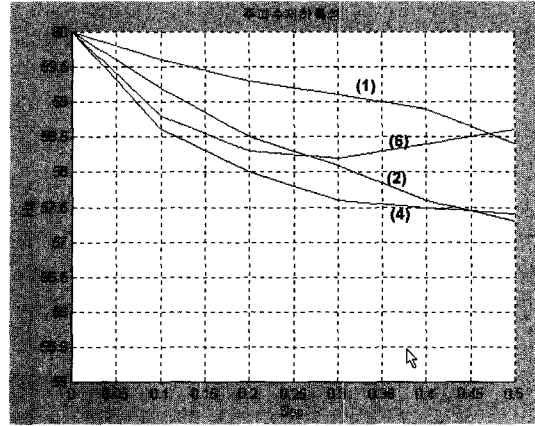


그림 7. 주파수저하 특성.

있어서는 동일계통에서 역조류가 있는 연계수용가가 혼재되어 있으면 상시 역조류가 있는 수용가측에서 단독 운전 검출기능 등에 의하여 차단될 때까지는 역조류가 없는 수용가측의 RPR은 검출할 수 없게 된다. 그림 4에서 역조류가 있는 발전설비 G1과 역조류가 없는 G2가 한 계통에 혼재된 경우에 어떠한 이유로 배전용변전소의 CB1이 차단되면 G1과 G2는 단독운전이 이루어지고 G2의 RPR은 G1의 UFR, UVR의 동작으로 단독운전을 검출할 때까지는 동작하지 않는다. 따라서 이러한 경우에는 전송차단방식으로 단독운전을 검출하여야 한다.

2-2-3. 풍력발전시스템의 보호 방식

소규모 발전설비의 전압제어제의 이상 등에 의한 전압상승은 절연열화 및 부품 성능저하의 원인이 되며 전압저하는 동력부하의 기기과열 등의 피해를 입힌다. 이로부터 기기들을 보호하기 위해서는 OVR와 UVR를 설치하여야 하며, 동기투입설비 및 용량이 큰 경우에는 발

전기의 사고를 신속하게 차단하기 위한 설비를 갖추어야 한다.

2-2-4. 풍력발전시스템의 계통연계 보호방식 구성 사례

그림 5는 계통연계용 발전기의 보호방식의 일례를 나타낸 것이다.

2-3. 계통연계 시뮬레이션 및 분석

2-3-1. 자동 부하 제한

소규모 발전설비 계통과의 분리시 연계 배전선로로 흐르는 전류가 급격히 증가하여 배전용 변전소의 OCR이 동작할 우려가 있는 경우에는 수용가 부하를 자동으로 제한하기 위한 자동부하 차단장치를 설치하여야 한다. 또한 계통측의 순시정전시 모든 부하가 발전기 부하가 되어 발전기는 과부하 상태가 되기 때문에 부하를 제한하지 않으면 안 된다. 부하제한을 위한 계전기는 UVR, UFR를 AND 결합하여 한시(약 1초)출력으로 사용하며 설정치는 부하량에 따라 전압강하 특성과 주파수저하특

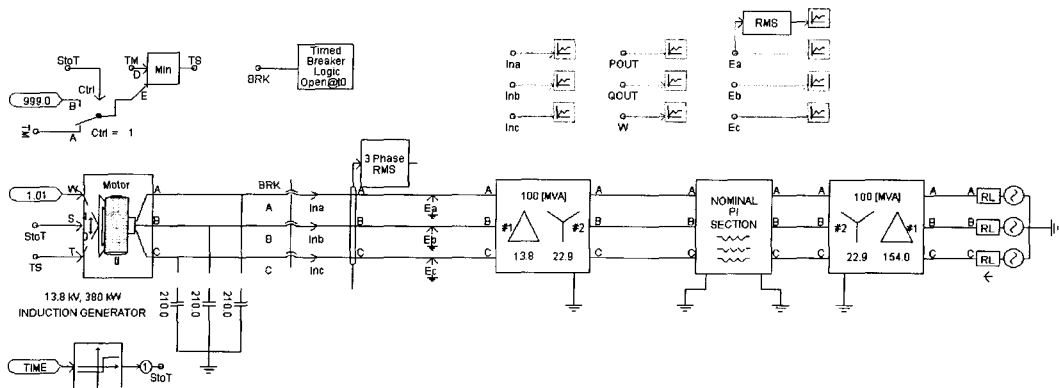


그림 8. 유도발전기 계통투입을 위한 시뮬레이션 계통.

성이 상이함으로 이를 고려하여 적절하게 정정한다. 보통 UVR은 정격전압의 70%, UFR는 1 Hz 정도 설정한다. 그림 6과 7는 연계된 발전기가 370 kW인 경우에 각 부하별로 순시정전시 전압강하와 주파수저하 특성을 시뮬레이션 한 결과이다. 여기서 부하의 크기는 각각 (1) 500 kW, (2) 750 kW, (3) 1,000 kW, (4) 1,250 kW, (5) 1,500 kW, (6) 2,000 kW이다.

2-3-2. 풍력발전시스템의 연계

풍력발전시스템의 계통 투입시에는 자기여자현상, 역률저하, 계통투입시의 돌입전류에 의한 전압강하를 주의해야한다. 풍력발전시스템, 즉 유도발전기의 기동시에는 자기회로의 에너지 평형을 위해 계통으로부터 순간적으로 많은 무효전력을 취하기 때문에는 돌입전류의 크기와 시간, 전압강하 등을 충분히 검토할 필요가 있다. 그

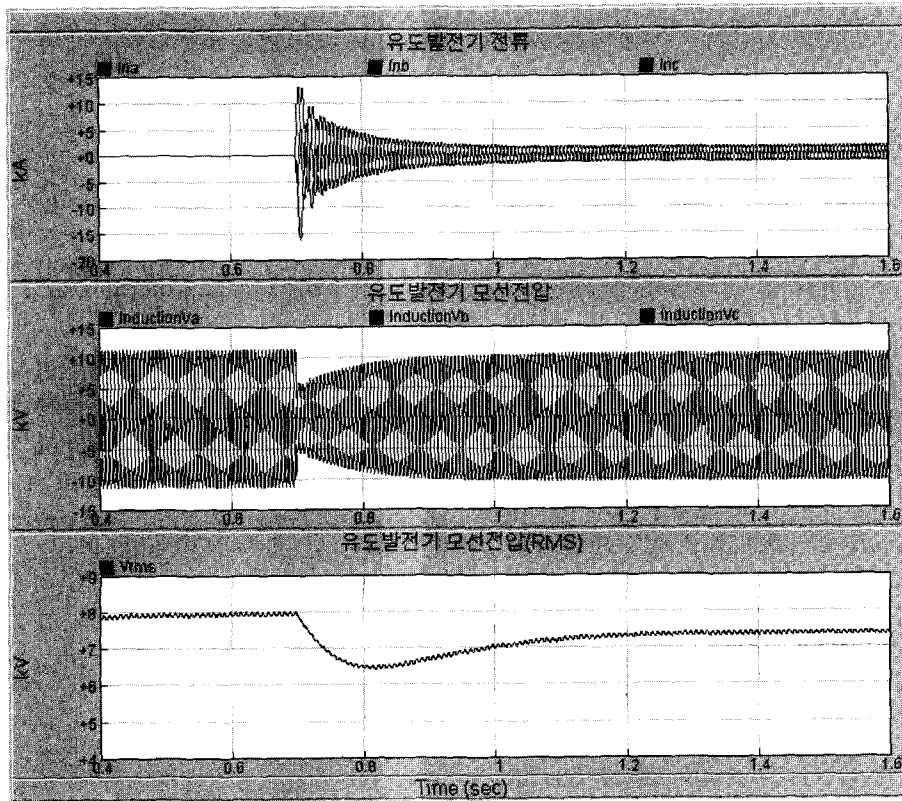


그림 9. 유도발전기 계통투입시 돌입전류 및 모션전압.

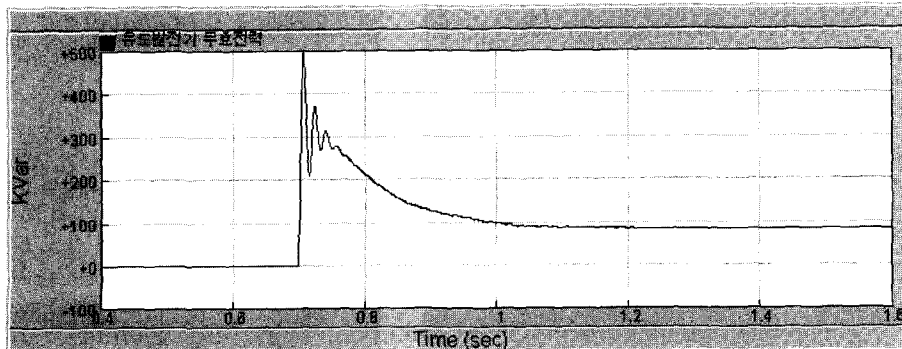


그림 10. 유도발전기 계통투입시 무효전력의 변화.

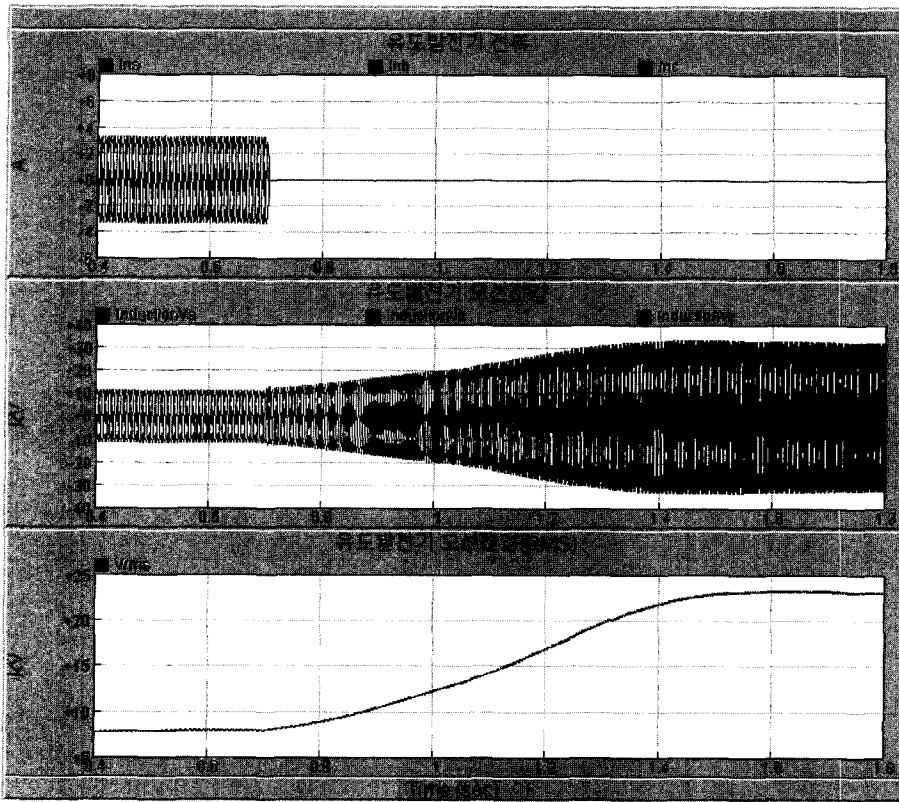


그림 11. 유도발전기 계통분리시 전류 및 모션전압.

림 8은 유도발전기의 계통투입 시뮬레이션 계통을 나타 내었으며 그림 9와 10은 0.7초에 계통에 투입한 경우의 돌입전류, 전압강하, 무효전력을 나타내었다. 그림 11은 계통에 연계되어 운전 중인 유도발전기를 0.7초에 계통 에서 분리하는 경우 시뮬레이션 결과이다.

또한 유도발전기의 역률보상을 위한 콘덴서를 설치하

는 경우에 유도발전기가 운전 중 계통에서 분리되는 경 우에는 UVR이나 UFR이 동작하여 발전기를 정지시키 지만 콘덴서의 용량과 발전기의 특성, 부하와 출력이 평 형이 되는 경우 콘덴서에서 나오는 지상전류(지상 무효 전력)가 유도발전기 축을 여자 시켜 고전압이 발생하는 자기여자 현상이 발생한다. 이 경우 수용가의 기기의 손 상을 초래하여 안전성에 문제가 되므로 콘덴서의 설치

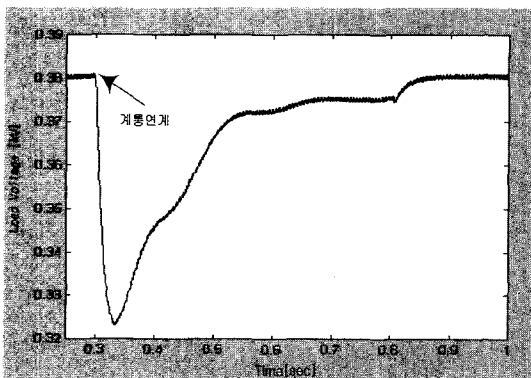


그림 12. 풍력발전시스템 계통연계 및 분리시 전압변동.

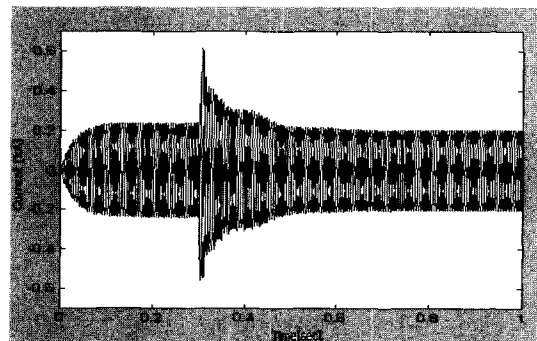


그림 13. 풍력발전시스템 계통 연계시 돌입전류.

위치를 고려해야 하며 OVR를 설치하여야 한다. 그림 12와 13은 최근 수행한 배전계통 연계모델에 의한 시뮬레이션이다. 연계계통은 전력회사측 전원, 변압기 및 배전선로로 구성하였고 풍력발전시스템측은 유도발전기, 연계리액터, 개폐기로 구성하였다. 부하측은 가변부하장치를 사용하여 차단기의 순차투입에 따라 부하량을 변화시켰다.

그림 12는 풍력발전시스템의 연계 시간을 0.3초로 설정하고 모의한 결과이다. 유도발전기는 자체의 여자전원이 없으면 계통을 여자전원으로 사용하므로 배전계통 연계시 무효투입전류가 흐르게 되어 순간전압강하가 일어나게 된 것이다. 그림 13은 연계시간을 0.3초로 설정하고 모의한 결과이며 최고 3배의 전류증가를 보인다.

### 3. 결 론

풍력발전시스템을 계통에 연계하기 위해서는 계통 내 수용가측의 전력품질을 저하시키지 않아야 하고 기존 계통과의 보호협조에 대해서 검토하여야 한다. 본 논문에서는 풍력발전시스템을 계통에 연계하여 사용하는 경우에 야기될 수 있는 보호협조상의 문제를 사전에 시뮬레이션하고 지락이나 단락 등 과대전류가 발생할 수 있는 경우 보호협조에 대한 구체적인 방안을 제시하였다.

회전발전기를 이용하는 풍력발전시스템의 연계계통에

서 지락, 단락사고시의 보호대책, 단독운전 발생시에 보호대책, 풍력발전시스템 자체 사고에 대한 보호대책과 그 이외의 이상현상에 대해 검토·연구하였다.

실제적인 보호방식 구성 예를 제시한 것과 여러 형태의 계통연계에 관한 것을 PSS/U와 EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 통해 분석한 내용 등은 풍력발전시스템 뿐만 아니라 비슷한 분산형전원의 실 계통 연계에 대한 가이드라인을 정비하는데 기본 자료가 될 것으로 고려된다.

### 참고문헌

1. 유교진: “특별고압계통에 연계된 분산형 전원의 단독 운전 검출방식”, T. IEE Japan, 114-B, 7/8, pp. 759-768 (1994).
2. 노세 다도시: “태양광발전시스템의 저압계통 연계 보호방식”, 일본전기학회논문지 B, 114권 7/8호, pp. 716-722 (1994).
3. LooK, M.J.: “Application of Protection Relays on a Large Industrial Utility tie with Industrial Co-generation”, IEEE-PAS, 100, 6, pp. 2804-2812 (1981).
4. Manitoba HVDC Research Centre, “PSCAD/EMTDC installation & Administration manual” (1995).
5. “계통연계운전형 신에너지전원의 표준화 및 보급체제 정비”, 전력연구원 (2000. 12).