

유도발전기식 풍력발전시스템의 STATCOM 적용 타당성 분석

배병열¹⁾, 한 병문²⁾

Application Feasibility Analysis of STATCOM for Wind Power System with Induction Generator

Byung-Yeol Bae, Byung-Moon Han

Key words : STATCOM, EMTDC, 풍력발전 시스템

Abstract : The wind power is known as the most promising future energy source to obtain the electricity. Induction generator is a simple energy conversion unit in the wind power generation system but it consumes the reactive power from the interconnected power system. Switched capacitor banks are normally used to compensate the reactive power, which bring about the transient overvoltage. This paper proposes a method for compensating the reactive power with STATCOM. A detail simulation model for analyzing the interaction between the wind power system and the commercial power system was developed using EMTDC software. The developed simulation model can be effectively utilized to plan the reactive power compensation for newly designed wind power system.

1. 서론

연계운전용 풍력발전에는 유도 발전기와 동기 발전기가 사용되는데 유도 발전기는 계통에 직접 연결되어 있어 전압조정과 위상 조절이 필요하지 않아 전기적 시스템이 비교적 간단하다는 장점이 있다[1]. 그러나 속도 범위가 좁아 풍차의 회전수를 고정시켜 주어야 하기 때문에 풍력이용률이 낮고 역률도 낮은 단점이 있다.

유도발전기를 사용하는 경우 낮은 역률을 보상하기 위해 기존의 시스템은 발전기 측에 전력용 커패시터와 스위치로 구성된 뱅크를 달아 무효전력을 보상하였다. 그러나 커패시터 뱅크는 가격은 저렴하지만 동작점이 연속적으로 바뀌는 경우 개폐동작을 빈번하게 일으켜 과전압발생에 따른 차단기의 유지보수 문제를 일으킬 수 있고 실시간 보상이 불가능한 단점이 있다[2].

STATCOM은 선로와 병렬로 연결되어 실시간으로 선로에 무효전류를 주입 또는 흡수함으로써 유도 발전기에 요구되는 무효전력을 발생하고 모선의 전압안정도를 유지하는 역할을 한다[3,4]. 그러나 STATCOM만으로 무효전력을 보상하기에는 STATCOM의

용량이 커져 고비용 문제가 발생함으로 최대출력으로 운전 시 요구되는 무효전력을 일정값의 커패시터 뱅크로 보상하고 출력저하 시 변동하는 값에 대해서는 STATCOM이 보상하면 실시간으로 무효전력을 보상하여 시스템의 안정도모와 제작비용을 절감할 수 있다는 이점이 있다.

본 논문에서는 이러한 점에 착안하여 750kW급 유도발전기로 구성된 풍력발전시스템에 고정커패시터와 STATCOM으로 무효전력을 효율적으로 보상하는 방법을 제안하고 그 타당성을 분석하기 위해 EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션모델을 개발하였다. 개발된 모델의 유용성을 확인하고자 소프트스타터에 의한 유도발전기의 기동을 분석하였고 커패시터뱅크와 STATCOM에 의한 무효전력보상효과를 분석하였다. 또한 대표적인 배전계통을 예로 하여 선로사고 시 유도발전기에 미치는 영향을 분석하였다.

1) 明知大學 電氣工學科 博士課程

E-mail : ghostial@mju.ac.kr

Tel : (031)335-6563 Fax : (031)321-0271

2) 明知大學 電氣工學科 教授 工博

E-mail : erichan@mju.ac.kr

Tel : (031)330-6366 Fax : (031)321-0271

2. 계통연계 풍력발전 시스템

그림 1은 농형 유도발전기를 이용한 풍력발전 시스템의 개념도를 나타낸 것이다.

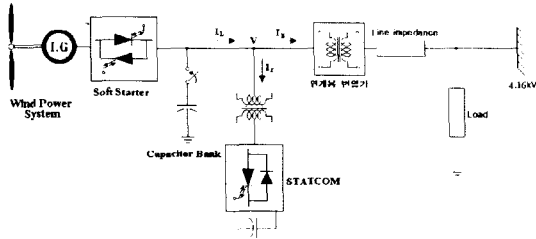


Fig. 1. Wind power system diagram

농형유도발전기는 출력발생시 자상으로 동작하여 연계계통으로부터 무효전력을 흡수한다. 이 무효전력의 양에 따른 커패시터와 스위치를 직렬로 연결한 बैं크 다수를 병렬 연결하여 운전 중의 무효전력 소모량에 따라 계단식으로 투입한다.

이럴 경우 동작점에 따라 스위치의 개폐동작을 빈번하게 일으켜 스위치의 유지보수 문제를 일으키고 적은 수의 बैं크를 둘 경우 실시간 보상이 불가능하다. 본 연구에서는 운전 중 유도발전기가 소모하는 무효전력의 평균치를 일정값의 커패시터뱅크로 보상하고 운전중 수시로 바뀌는 양은 STATCOM으로 보상하는 방법을 제안한다.

3. EMTDC 시뮬레이션

3.1 연계 배전계통 모델

풍력발전 시스템이 연계된 배전계통은 용량이 5000kVA인 변압기와 선간전압이 4.16kV인 IEEE 13-bus를 기반으로 구성하였다.[6]

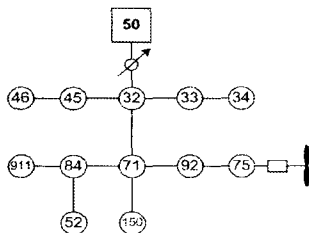


Fig. 2. IEEE 13-BUS distribution system

그림 2는 풍력발전 시스템이 연결된 IEEE 13-bus 배전계통의 단선도를 나타낸 것이다. 이 배전계통은 분산부하와 집중부하들로 구성되어 있으며 분산부하의 경우 편의상 앞단 버스에 집중 부하의 형태로 연결된 것으로 가정하였다. 그리고 풍력발전 시스템은 bus 75에 연결하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 시뮬레이션 전체 모델

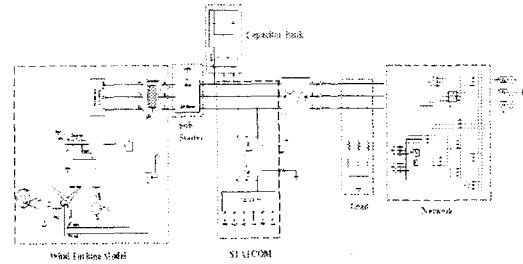


Fig. 3. EMTDC simulation model

Table 1. System parameters

발전기 (Induction Gen.)	발전기 용량	750 [kW]
	전압	690 [V]
	전류	1 [kA]
부하	부하용량	420 [kVA]
	역률	0.84
계통연계용 변압기 (Δ-Δ결선)		0.69 : 4.16
계통전압		4.16 [kV]
커패시터 बैं크 용량	커패시터 단독구동	550 uF, Δ 결선
	커패시터-STATCOM	400,200,100 uF, Δ 결선

풍력 발전용 유도발전기와 연계된 소프트 스타터와 STATCOM의 성능을 검증하기 위해서 다음과 같은 시나리오로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 총 2.5초간 하였으며, 1초 후 STATCOM을 동작시켰다. 먼저 풍력 발전 동작 파형, 소프트 스타터의 동작, 유도 발전기에 의한 무효전력을 제거하기 위한 STATCOM의 동작과 STATCOM이 연결된 선로의 전·후 무효전력, 그리고 커패시터 बैं크의 유·무에 따른 STATCOM의 보상 등을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

3.3 풍력발전 시뮬레이션 결과

그림 4(a)의 파형은 풍속이며 터빈의 제한 풍속은 Cut in velocity 3.5 m/s, Cut out velocity 20 m/s, Rated velocity 14 m/s로 설정하였으며, 정격속도 주위에서 풍속이 발생하도록 설정하였다. 이 풍속을 받아 피치각 조절을 하여 얻은 발전기 토크가 그림 4(b)이다. 유도기의 특성상 발전기로 동작을 하려면 토크 값이 음의 값을 가져야 하므로 풍력터빈에서 받은 토크 값에 -1을 곱하여 발전기로 보낸다.

소프트 스타터가 없다면 유도기가 풍력에 의해 회전하기 시작하면서 동기속도 이상으로 돌기 전까지 전동기 동작을 하기 때문에 초기토크 값은 양의 수를 갖게 되어 발전기도 유효전력을 흡수하게 되나 소프트 스타터로 인해 유도기가 발전기동작을 할 때까지 발전기의 유효전력 유입을 정격미만으로 제한한다.

그림 4의 (c), (d)는 발전기의 유·무효전력 파형이다. 유효전력 750kW를 계통으로 보내는 것을 볼 수 있으며 이는 계통 연계용 변압기를 통해 4.16kV의 배

전계통에 전력을 보낸다. 발전용량 중 선로 손실과 부하에 의해 소비된 전력 420kW를 뺀 나머지 전력 330kW를 계통으로 보내게 된다.

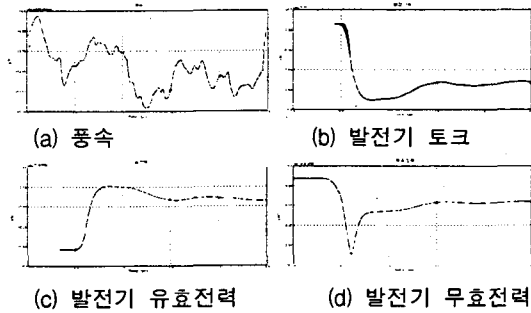


Fig. 4. Wind power system simulation results

3.4 소프트 스타터(Soft starter)

풍력발전의 문제 중 하나는 발전기가 배전계통에 연계될 때 과도시 플리커 현상이 발생될 수 있으며 강인하지 못한 배전계통에서는 더욱 그 현상이 두드러진다. 이런 문제점은 전력을 공급받는 수용가에게 악영향을 미친다. 또한 과전류와 전압강하가 발생으로 풍력발전기의 기계적인 손상을 가져온다. 소프트 스타터는 이러한 문제점을 해결하기 위해 사용되고 있는 방식이다.

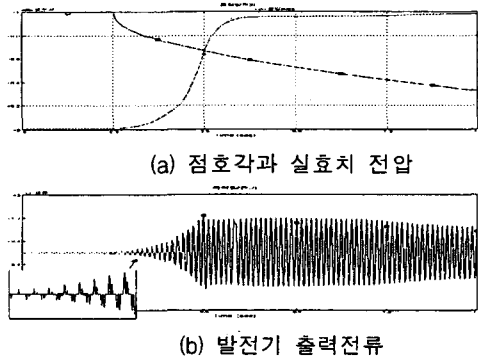


Fig. 5. Simulation results of the soft-starter

그림 5(a)는 소프트 스타터의 점호각과 발전기 출력전압의 실효값이다. 점호각의 증가에 따라 전압의 값이 1p.u.로 서서히 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 발전기 출력전류 파형이다. 발전기 투입 시 초기 전류가 소프트 스타터에 의해 점진적으로 증가하여 발전기가 정상상태에 도달할 때에 맞추어 전류가 안정되고 있다.

3.5 커패시터 뱅크에 의한 보상

풍력발전 시스템에서는 발전기 무효전력 양에 따라 커패시터 뱅크를 스텝으로 투입, 차단하므로써 무효전력을 보상하게 된다. 그림 6(a)는 발전기와 커패시터 뱅크의 무효전력 파형이다. 커패시터 뱅크를 스텝으로 주기 때문에 무효전력이 연속적으로 보상되

지 않는다. 그림 6(b)는 커패시터 뱅크 투입에 따른 과도전류 파형이며 이로 인해 커패시터 뱅크는 스트레스를 받게 된다.

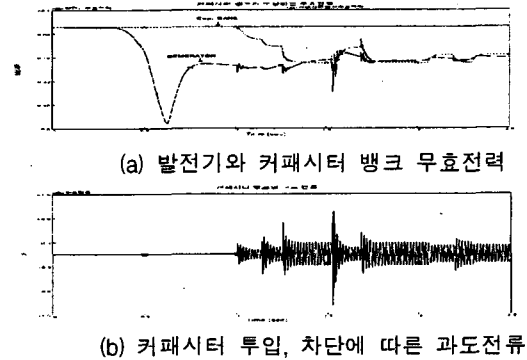


Fig. 6. Reactive power compensation of capacitor bank

3.6 STATCOM에 의한 보상

그림 7은 선로에 커패시터 뱅크가 없는 경우 STATCOM의 발전기 측 무효전력과 STATCOM에서 보상하는 무효전력의 비교파형이다. 그림 6(a)에서와 같이 STATCOM이 무효전력을 잘 추종하며 보상해 주고 있음을 확인할 수 있다. STATCOM이 1초에 동작을 시작할 때 발전기 측의 무효전력은 순간 증가하다 원상태로 돌아온다. 이는 STATCOM 제어기에 의하여 생기는 것으로 초기투입 시 과도현상으로 무효전력이 순간 증가하는 것이다.

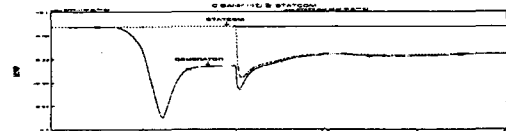
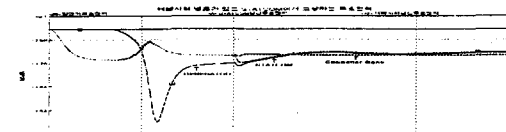


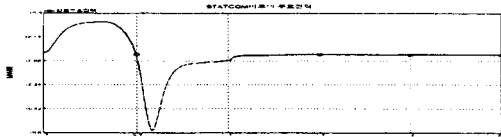
Fig. 7. Reactive-power compensation of STATCOM

3.7 고정커패시터와 STATCOM에 의한 보상

선로에 커패시터뱅크가 연결되어 있는 경우 발전기가 흡수하는 무효전력의 일정량을 커패시터 뱅크가 보상해 주므로 비교적 적은 양의 무효전력만 STATCOM이 보상해주면 된다. 그림 8(a)는 발전기, STATCOM, 그리고 커패시터 뱅크 등의 무효전력파형을 나타낸다. 커패시터 뱅크에 의해서 무효전력이 대부분 보상되고 STATCOM은 커패시터 뱅크가 보상하지 못한 여분의 무효전력만을 보상한다. 커패시터 뱅크가 보상하는 무효전력량은 0.2 MVAR이다. 그림 8(b)는 커패시터 뱅크와 STATCOM에 의해 보상된 선로 무효전력 파형이다.



(a) STATCOM, 커패시터 뱅크, 발전기의 무효전력



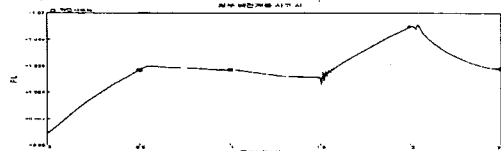
(b) 선로 무효전력

Fig. 8. Reactive-power compensation of static capacitor bank and STATCOM

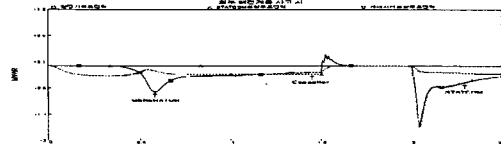
4. 배전계통 사고에 대한 특성 분석

배전계통 사고에 대한 풍력발전의 동특성을 분석하기 위하여 풍력발전이 연계된 그림 2에 보여진 IEEE 13-bus 배전계통의 bus84 와 bus52 사이에 3상 지락사고를 발생시켰다.

배전계통에서 발생한 사고는 신속하게 배전계통으로부터 제거시켜 사고로 인한 현상을 최소화 시켜야 하지만 보호기기 사이의 보호협조에 의해 차단기 동작까지는 일정한 동작대기시간이 필요하게 된다. 그 영향으로 간선의 전압이 감소하면 자기적 토크가 기계적인 외부 입력토크에 비해 작아지므로 발전기 회전자속도가 서서히 가속된다. 이후 사고가 제거되어 정격전압이 연계 계통에 인가되면 큰 회전자속도를 가진 유도발전기에 의해 계통에 돌입전류가 발생하고 계전점의 전압이 감소하는 특성을 나타낸다. 이 때, 사고복구시간이 짧은 경우 풍력발전 시스템은 정상상태로 복귀하게 된다.



(a) 회전자 속도



(b) STATCOM, 커패시터뱅크, 발전기의 무효전력

Fig. 9. Characteristics of wind power system in the fault

그림 9는 1초에 STATCOM을 투입하고 1.5초에 0.5초간 3상 지락사고를 발생시킨 뒤 2초에 사고를 복구하였을 때의 파형이다. 그림 9(a)는 회전자속도를 나타낸다. 사고구간동안 회전자속도는 증가를 하지만 사고가 복구된 후 회전자속도는 감소하여 안정상태로 복귀되고 있다. 그림 9(b)는 사고 발생 후 STATCOM의 동작을 나타내었다. 사고 구간동안은 STATCOM이 동작하지 않지만 사고구간이 복귀된 후 STATCOM이 무효전력을 보상하고 있음을 알 수가 있다.

5. 결론

본 논문에서는 750kW급 유도발전기로 구성된 풍력발전시스템에 고정커패시터와 STATCOM으로 무효전력을 효율적으로 보상하는 방법을 제안하고 그 타당성을 분석하기 위해 EMTDC 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 유용성을 확인하고자 소프트스타터에 의한 유도발전기의 기동을 분석하였고 커패시터뱅크와 STATCOM에 의한 무효전력보상효과를 분석하였다. 또한 대표적인 배전계통을 기본 모델로 설정하여 선로사고 시 유도발전기에 미치는 과도특성을 분석하였다.

커패시터 뱅크는 값이 싸나 연속적인 무효전력제어가 어렵기 때문에 풍력발전과 같이 발생전력이 정출력이 아닌 발전시스템에서는 사용하기 어렵다. 또한 STATCOM이 단독으로 무효전력을 제어하면 실시간 제어는 가능하나 시스템 비용이 증가하므로 커패시터 뱅크와 STATCOM을 병렬운전하는 방식이 가장 효과적임을 알 수 있다.

본 논문은 STATCOM과 풍력발전 전력계통간의 상호응동과 동특성을 해석하는데 효과적일 것으로 판단되며, 단순한 제어응답 시뮬레이션이 아닌 실 계통을 설계, 시뮬레이션 함으로써 실 시스템의 기술적인 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 한상근, 박민원, 유인근, "PSCAD/EMTDC를 이용한 동기형 풍력 발전시스템의 출력제어", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 춘계학술대회 논문집, PP. 201-203. 2002.4.
- [2] A. G. Gonzalez Rodriguez, M. Burgos Payan, and C. Izquierdo Mitchell, "PSCAD Based Simulation of the Connection of a Wind Generator to the Network", IEEE Porto Power Tech Conference 10th-13th September, Porto, Portugal, 2001
- [3] 한 병문, 박 중근, "EMTP에 의한 STATCOM과 송전계통의 동적응동 분석", 대한전기학회논문지, 제46권 7호, PP. 991-997. 1997. 7.
- [4] P. Mattavelli and A.M. Stankovi, "Dissipativity-Based Control for STATCOM", IEEE Power Tech'99 Conf. Budapest Hungary, paper BPT 99-369-46, Aug 29 Sept2, 1999.
- [5] Manitoba HVDC Research Centre. "EMTDC V3 User's Manual"
- [6] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991