복합발전 계통연계 시 보상장치 필요성 분석을 위한 거리에 따른 무효전력 민감성 분석

정승민*, 유연태*, 송성윤*, 장길수*
고려대*

A sensitivity analysis about reactive power according to the interconnection distance of wave-offshore hybrid generation system

Seungmin Jung*, Yeuntae Yoo*, Sungyoon Song*, Gilsoo Jang*
Korea University*

Abstract - The designed hybrid generation system (HGS) not only consider the voltage condition of grid connection point but also do reactive power support according to the transmission system operator's directions. The PCS operation plan in HGS should be supported by precise transferred quantity expectation about reactive power because the system has large physical areas and also be interconnected with grid through long transmission system. Therefore, the realistic measuring process about transferred reactive power quantity by utilizing HGS is required to consider additional compensation plan. In this paper, an reactive power transferred capability of HGS with expected parameter is analyzed, and imposed to the simulation process that is performed on EMTDC environment. Basically, grid information and system characteristics were utilized with Jeju island in Korea, and the performance analysis is carried out based on the composed layout in ongoing project.

1. 서 론

복합발전 시스템은 무효전력 공급을 수행할 수 있는 전력변환시스템(PCS)가 다수 연계되어 있다. 이는, 각 시스템의 유효전력 출력에 적합한 무효전력 제어가 수반되어야 함을 의미한다. 특히 복합발전 내부의 풍력발전의 경우 앞 단의 풍력발전 출력에 의한 풍황 감소가 예상되며, 그에 따른 뒤 단의 풍력발전 출력 감소가 예상된다. 이러한 출력변동을 고려하여 실시간으로 무효전력 공급을 수행한다면, 무효전력 가용량 최대화를 도모할 수 있으며, 계통 운영자의 요구에 효과적으로 대처할 수 있다 [1]. 그러나 이러한 무효전력 제어를 구축하기에 앞서, 복합발전 시스템의 계통 연계 시 무효전력 전달이 적절하게 이루어지는지 검토하는 과정이 필요하며, 이러한 과정은 복합발전의 연계거리가 늘어날수록 증가하게 된다. 충전 전류 등을 고려하여, 연계 거리 변동에 따른 무효전력 전달량을 PSCAD를 이용해 측정함으로서, 연계과정에 필요한 무효전력 보상장치 등을 사전에 검토할 수 있다.

본 논문에서는 복합발전의 각 영역에서 발생할 수 있는 손실 량을 빠르게 예측하고, 복합발전에 무효전력을 할당했을 시 계통에 전달되는 무효전력 량을 측정하고자 한다. 해당 과정을 거리별로 분석하여 무효전력 전달 예상량을 산정함으로서, 추가적인 보상 장치 고려 시 반영할 수 있다. 일반적인 유도성 리액터 구성과정을 포함하여, 과전압 현상을 보상한 후 무효전력 공급을 진행하였다. 유/무효전력 출력 변동 신호를 반영할 수 있도록 시뮬레이션을 구성하고, 무효전력 지령을 변화시킴으로서, 계통에 공급되는 무효전력 크기를 PSCAD로 측정하였다. 3 MW급 풍력터빈 4기와 2.4 MVA급 PCS에 연동된 파력발전기를 구성하여 유효성을 판단하였다 [2].

2. 본 론

2.1 시스템 구성

대규모 분산전원의 경우는 기존의 배전선로에 연계되는 소규모 풍력발전기와는 달리 최소 전용배전선 연계 또는 송전계통 연계를 고려해야 하기 때문에, 기존에 고려하지 않던 안정도 등 다양한 문제가 발생할 수 있다. 복합발전은 단위 용량이 10MW 이상인 대용량 신재생에너지원으로 기존 분산전원과 비교했을 시 상대적으로 규모가 크며, 추 후 다수의 시스템 연계 시에는 송전급 계통 연계가능성이 있다. 본 논문에서는 복합발전 시스템 예상 구성 위치인 차귀도를 기준으로 송전급(154kV) 연계 가능성을 분석하고자 한다.

설비 예상위치는 송전망에서 상당한 거리가 예상되며, 전용선로를 통한 연계가 고려되고 있다. 배전선로를 고려하면 인근 지역에 접속기준을 바탕으로 연계가 가능하나, 대규모 발전설비 연계 분석을 위해 한림 변전소(154kV) 연계 분석을 수행하고자 한다.

2.1.1 복합발전 연계 일반

차귀도-한림변전소의 지리적 거리는 13.6km로 나타나며, 추가적인 거리를 고려할 때 15km의 송전설비 구성이 예상된다. 직접적인 AC 연계를 고려할 경우, 설비의 건설이 비교적 간단하며 DC에 비해 저렴할 수 있으나, 충전전류의 영향을 고려해야 하며 보상설비 구성이 예상된다. 표 1은 풍력발전단지의 계통 연계 시 교류를 고려한 해외 사례를 나타낸 것으로 본 논문에서는 예상되는 연계거리와 공통적인 요소들을 취합, 분석하였다. 구성된 복합발전 설비를 송전급 전압으로 승압하여, 154 변전소인 한림변전소에 연계하여, 거리에 따른 전압 비교를 수행하고자 한다. 계통모델의 경우 등가 모선을 구성하였으며, 15km의 송전거리 고려, 미 고려시의 전압변동을 비교하였다.

<표 1> 유럽의 해상풍력 연계 거리 비교 (교류 연계)

	해안 거리(km)	수심(m)	전압레벨(kV)
Egmond aan Zee	10-18	15-20	34/150
Scroby Sands	2.5	3-12	33(직접연계)
Butendiek	34	16-20	33/155
Horns Rev	14	6-14	36/150
Nysted	9	6-9.5	33/132
Greater Gabbard	23	20-50	33/132

2.1.2 계통 구성

계통에서의 전압 변동을 확인하기 위해 POI(Point of Interconnection) 기준으로 등가 모델을 구성하고 케이블 정보를 선정해야 한다. 등가 모델의 경우, 복합발전 구성 이전에 유효성 검증을 위해 SCR 값을 기준으로 구현하였으며, 10MW급 복합발전 출력을 고려하여 케이블을 설정하였다. 선정된 케이블 정보는 표 2와 같다.

<표 2> 시뮬레이션 Cable data

Size (SQMM)	70 mm2
허용전류	363 A
Insulation resistance (20°C)	31 Ω/km
Insulation resistance (60°C)	0.4647 Ω/km
Conductor resistance	0.277 Ω/km
Inductance	0.26 mH/km
Reactance	0.098 Ω/km

2.1.3 모의 환경 구성(유도성 리액터 구성)

복합발전 설비 용량 및 연계지점에 대한 정보를 바탕으로 예상되는 전압변동을 시뮬레이션으로 확인하고, 이를 회복하기 위한 보상설비 구성과 제어 방안을 모의하고자 한다. 선로의 무효전력 성분에 의한 전압변동 현상을 확인하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 환경을 구성하였다.

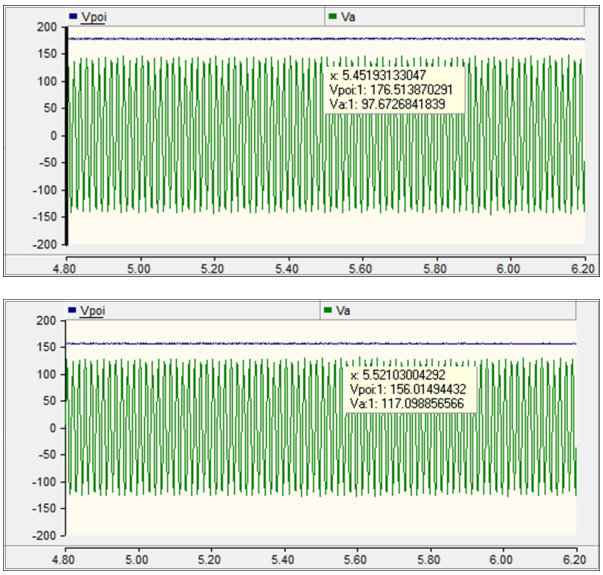
연계지점은 제주도의 154kV 변전소의 SCR 설정 값을 입력하고 (SCR-15, X/R-15, 22.9kV 기준) 등가 모선으로 설정하였다. 15km의 교류 케이블로 인한 전압변동은 케이블 무효전력을 고려하여 보상을 진행하였다. 케이블의 분로 정전용량 (shunt capacitance)으로 인해 HVAC 케이블은 무효전력을 생산해 낸다. 이것으로 인해 AC 가공선로 또는 HVDC보다 송전 케이블에서 주변 전력계통과의 상호 작용이 더 복잡해진다. 케이블 양 단에서의 전압 크기 및 위상각에 따라 케이블 전체에 무효전력 충전 전류가 분포한다. 무효전력 충전전류로 인한 손실을 최소화하기 위하여 케이블 양 단에 무효전력 보상설비가 설치될 필요가 있다. 케이블에서 만들어진 무효전력은 케이블 양 단에 동일한 양만큼 분포하는 것으로 가정한다. 케이블의 총 무효전력 중에서 50%는 내륙 모

선에, 나머지 50%는 해상 케이블 끝에 존재한다고 간주한다. 케이블에 의해서 생산되는 진상 무효전력은 다음과 같이 계산된다. 여계를 위해서 3심 해저 케이블을 이용해 PSCAD 내부에 송전시스템을 구성하였다.

$$Q_{cable} = \sqrt{3} \cdot V_{cable} \cdot 2\pi f_{grid} \cdot \frac{V_{cable}}{\sqrt{3}} \cdot C_{cable} \cdot L \quad (1)$$

여기서, Ccable = 0.17 μF/km [1], 송전 케이블의 전압 Vcable = 154 kV, 주파수 fgrid = 60 Hz와 길이 L = 20 km로 가정하였다.

구성된 PSCAD/EMTDC 소프트웨어 시뮬레이션을 바탕으로 해당 지점의 전압을 측정하고, 보상과정을 진행하였다. 충전전류를 보상하지 않을 시 전압 실효치와 단상(a상)의 전압 파형을 보면 전압 상승 효과가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 연계 기준의 전압 변동 범위(1.05%, 161.7kV)를 초과하기 때문에, 별도의 보상설비 없이는 복합발전의 계통연계를 진행할 수 없을 것으로 보인다. 하단의 그림은 케이블 양쪽 지점에 리액턴스 성분을 통하여 보상과정을 진행한 결과를 나타낸다.



<그림 1> (a) 무보상시 전압, (b) 보상과정 포함된 연계지점 전압

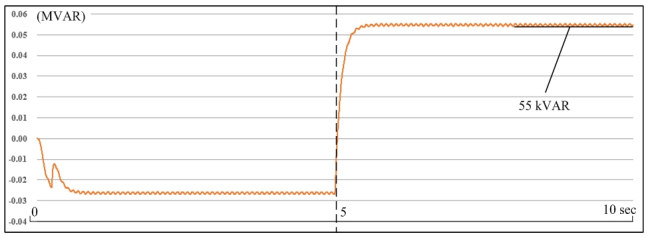
2.2 민감성 분석

복합발전에서 생성되는 전력을 계통에 효율적으로 전달하고, 연계 지점의 전압 안정성을 유지하기 위해 무효전력 공급의 안정성 확보가 요구된다. 일반적으로 신재생에너지의 장거리 연계 시, 계통 연계지점의 무효전력 보상을 위해 SVC, STATCOM과 같은 보상 설비를 고려하게 된다.

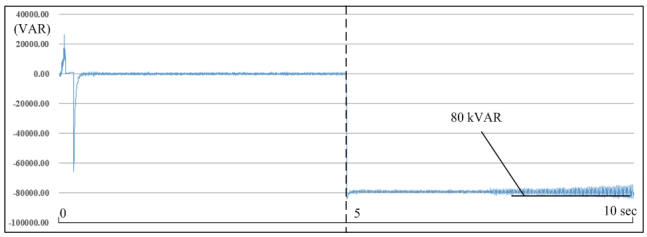
해당 보상 설비들의 경우, 대규모 신재생에너지원일수록 필요성이 증가하게 되지만, 현재 복합발전설비의 경우 단일 시스템 연계를 고려하고 있어 추가적인 무효전력 보상 설비의 필요성은 낮다. 다만, 송전시스템이 비교적 장거리(20km)로 고려되고 있으므로, 본 논문에서 거리에 따른 무효전력 공급량을 비교함으로서 무효전력 공급의 안정성과 추가적인 보상설비의 필요성을 검토하고자 한다. 구성된 복합발전 시스템에서 연계예상 거리인 20km 기준으로 무효전력 출력을 80 kVAR를 할당하여, 연계지점에서의 무효전력 출력을 측정하였다. 전압은 1.0 p.u.(22.9kV)에 일치하도록 병렬리액터를 구성하고, 추가적인 보상설비가 없을 시 무효전력 전달량을 측정하고자 하였다.

그림 2는 연계 예상 거리인 20km 기준 연계 지점의 무효전력 흡수량 그래프이다. 그림 3과 같은 복합발전 무효전력 출력을 진행할 경우로서, 발생한 무효전력이 전부 전달되지 못하고 선로 성분과 상쇄되는 것을 확인할 수 있다. Cable의 경우 충전 전류가 상당하기 때문에 이를 보상하기 위해 병렬 리액터를 구성하게 되지만, 해당 기기는 고정 설비로서, 전압 안정성에 초점을 맞추게 되고, 무효전력 공급 측면에서는 위와 같은 양상을 보이게 된다. 해당 특성은 선로가 길어질수록 높아지는 현상을 보인다. 그림 4의 그래프의 경우, 기준 연계거리 보다 낮거나 높은 사례연구를 통해 복합발전 시스템의 무효전력 전달 효과를 판단하고자 출력하였다.

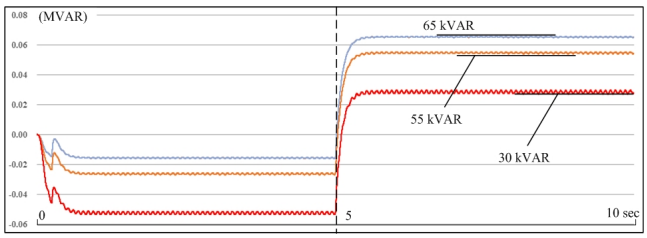
연계된 선로 정수 및 보상설비(병렬 리액터)의 경우, 20km 기준 설비와 동일한 규격으로 진행하였으며, 무효전력 출력의 경우도 다른 사례와 동일하게 설정하였다. 전압 변동의 경우 모두 2% 미만의 변동을 보이며



<그림 2> 연계지점 기준 무효전력 출력 그래프 (20km 기준)



<그림 3> 복합발전 시스템 기준 무효전력 출력 그래프



<그림 4> 연계지점 무효전력 출력 그래프 (5km, 10km, 20km, 40km 기준)

그래프로는 출력하지 않았다. 복합발전 무효전력 출력은 일정하지만 거리가 10km 미만의 경우에는 무효전력 출력이 80% 이상 PCC로 전달되는 것을 확인할 수 있으며, 10km 이하의 거리에서는 무효전력 전달 효율이 크게 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 해당 사항을 반영한다면 복합발전 시스템을 적정 거리에서 연계할 경우에는 복합발전의 무효전력 공급량을 활용하여 계통 운영에 반영할 수 있을 것으로 보인다.

3. 결 론

본 논문에서는, 복합발전의 무효전력 전달능력을 확인하고 추가 무효전력 보상 설비의 필요성을 파악하기 위해, 제주도 계통정보를 기반으로 계통 시스템을 모의, 구성된 복합발전시스템을 연계하여 거리별로 무효전력 전달 가능량을 측정하였다. 구성된 유도성 리액터를 바탕으로 안정된 전압 상태에서의 무효전력 전달 가능량을 확인한 결과 10 km 미만의 송전시스템을 통해 계통에 연계할 경우 추가적인 보상설비를 고려할 필요성은 낮은 것으로 예상된다. 그러나 장거리 연계가 진행 될 경우, 무효전력 전달이 상당량 감소되기 때문에, 별도의 무효전력 공급 방안을 마련할 필요가 있을 가능성이 있다. 시뮬레이션 분석에 나타난 바와 같이, 감소하는 무효전력 전달 양은 절대 값으로 나타나며(20km의 경우, 약 0.055 MVAR), 80 kVAR의 무효전력을 할당하면 해당 값을 보상하고 남은 무효전력이 출력되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 송전 거리가 길어질수록, 계통에 무효전력을 공급하기 위해서 기본적으로 공급해야 하는 무효전력 양이 증가한다고 볼 수 있다. 이는 유효전력 공급에 수반되는 손실을 증가시키는 원인이 될 수 있으며, 계통 연계지점의 무효전력 공급을 복합발전이 아닌 부가적 보상설비가 담당해야 할 필요성이 증가된다고 볼 수 있다.

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 (10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축)의 지원으로 수행되었으며, 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구임 (20134030200340).

[참 고 문 헌]

[1] G. Xydis, “On the exergetic capacity factor of a wind - solar power generation system,” Journal of Cleaner Production, Vol. 47, pp. 437-445, 2013.

[2] 홍기용, 이강수, 이광호, 김경환, 손정민, “부유식 파력-해상풍력 복합발전 기술개발 기획연구 소개,” 한국해양환경에너지학회 학술대회논문집, pp. 37-38 2013.