

# 풍력-디젤 하이브리드 발전의 필요성 및 시스템 설계상의 주의점

## The Needs of Wind-Diesel Hybrid Power Generation and Technical Notes in the Design

남용운 · 한정우 · 방제성  
Y. Y. Nam, J. W. Han and J. S. Bang

### 1. 서 론

풍력-디젤 하이브리드 발전은 디젤발전기와 풍력발전기를 동시에 계통에 투입하여 수용가에 공급하는 것으로 계통의 크기와 풍력 투입률에서 현재 중앙전력계통에 접속되어 운용하는 풍력발전과 차별된다.

이러한 하이브리드 발전은 중앙전력계통의 혜택을 받을 수 없는 독립발전의 원격지와 떼어 놓을 수 없다. 이는 중앙계통에 접속 가능한 지역에선 발전 단가가 높은 디젤발전을 하지 않기 때문이다. 중앙

계통이 잘 발달한 작금에도 세계인구의 큰 비율이 중앙계통의 혜택을 못 받고 있는 실정으로 이러한 원격지역에서는 디젤 발전을 채용하고 있거나 아예 전기 없는 곳도 있다. 풍력-디젤 하이브리드 발전의 시장은 디젤발전을 채용한 지역 또는 전기의 혜택을 누리지 못하는 지역이 될 수 있어 그 성장 잠재력이 크다.

풍력-디젤 하이브리드 발전을 도입하는 이유는 운영비가 낮은 풍력발전의 장점과 지속적인 발전이 가능한 디젤의 장점을 결합하여 경제적인 이득뿐만 아니라 화석연료 사용량을 줄여 환경을 보호하기

Domestic Market Off-Grid Only	Regions of Specific Interest
<i>(Specify units – MW potential, # of units)</i>	<i>(not year-dependent)</i>
2010 16,000 turbines/yr, 11 MW	1. Western states (ranches, etc.)
2015 40,000 turbines/yr, 28 MW	2. Tribal lands (Alaska, Navajo)
2020 85,000 turbines/yr, 60 MW	3. Islands, sailboats (New England, Washington)
International Market Off-Grid Only	Countries of Specific International Interest
<i>(Specify units – MW, # of units)</i>	<i>Off-Grid</i>
2010 24,000 turbines/yr, 17 MW	1. China
2015 60,000 turbines/yr, 42 MW	2. India
2020 150,000 turbines/yr, 105 MW	3. Caribbean

그림 1 분산발전 수요예측<sup>1)</sup>

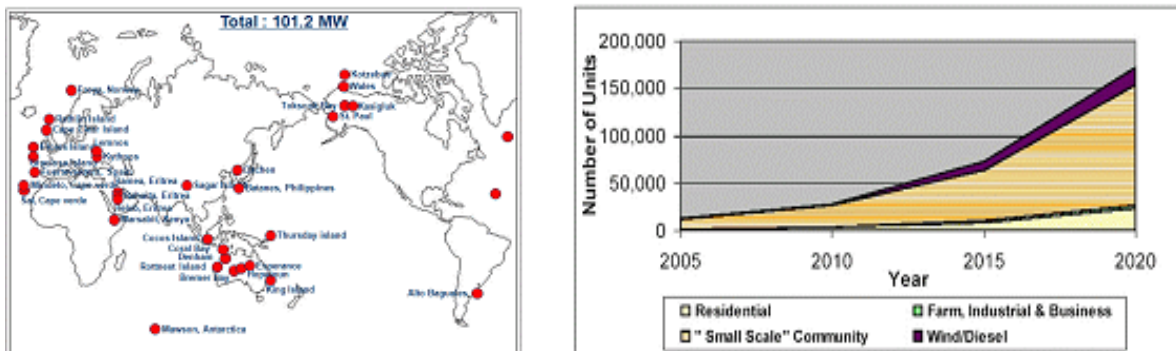


그림 2 풍력-디젤 시장<sup>1)</sup>

위함이다. 그러나 풍력발전기 시스템이 고가이기 때문에 시스템 선정 시 경제성 확보에 주의가 필요하다. 경제성은 시스템의 가격뿐만 아니라 대상 지역의 부하 특성 및 풍황 특성과 밀접한 관계가 있다.

풍력을 독립계통에 투입하는데 경제성 이외에 기술적인 어려움은 풍력의 변동성을 극복하는데 있다. 바람은 일정하게 부는 경우가 드물어 풍력발전량이 초단위에서 시간/일간/월간/연간 단위로 변동한다. 이러한 변동성은 필연적으로 전기 품질을 나쁘게 하기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다. 풍력발전기에서 일반적으로 초단위의 단기 변동성은 발전기의 제어에 영향을 주고, 장기변동성은 경제성에 영향을 준다고 알려져 있다. 하이브리드 시스템에서는 계통이 작기 때문에 풍력이 차지하는 비율이 커 초단위의 단기 변동성은 전력품질에 영향을 주고, 일단위의 변동성은 시스템의 경제성에 영향을 준다. 초단위의 변동성에 대한 대책으로 몇 가지가 제시되고 있는데, 이 변동성에 대한 대책에 따라 하이브리드 시스템이 분류되기도 한다.

아무튼 하이브리드 시스템의 설계는 경제성과 전력품질을 확보하는 초점을 맞추어야 하는데, 여기에는 대상지역의 특성 파악과 이에 따른 최적 시스템 선정, 전력품질 확보를 위한 대책 및 제어전략이 매우 중요하다. 여기서는 풍력-디젤 하이브리드 시스템의 이해를 돕기 위하여 풍력-디젤 발전의 특성, 설계시 고려해야할 사항에 대해서 소개한다.

## 2. 필요성 및 시장

### 2.1 필요성

대규모 중앙 집중 전력계통이 없는 지역에서는 디젤발전을 일반적으로 채용하고 있고, 지구상에는 여전히 전기의 혜택을 누리지 못하는 지역이 많이 있는 현실이다. 그리고 세계적으로 추진하고 있는 이산화탄소 배출규제가 국가의 경제성장을 좌우할 정도의 중요한 이슈가 되어있다. 디젤발전의 고비용과 이산화 탄소배출 문제를 해결하기 위해 중앙 집중식 전력계통이 보급은 비용 문제로 어렵다. 그런데 세계의 경제 발전에 따라 전기 혜택을 받지 못한 지역에서 전기에 대한 수요가 증가할 수 있다. 따라서 독립 디젤발전에 대한 수요는 그림 1과 같이 크게 증가할 전망이어서 디젤발전이 갖고 있는 문제가 더욱 심화될 수 있다.

이러한 상황을 타개할 수 있는 가장 현실적인 대

안은 풍력발전기를 독립전력 계통에 투입하는 것이다. 즉 풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템을 도입하여 연료절감과 이에 따른 이산화탄소 배출을 줄일 필요가 있다.

### 2.2 시장

현재 독립발전을 하는 지역과 아직 전기가 공급되고 있지 않은 지역이 잠재 시장으로, 주시장은 그림 2에서 보는 바와 같이 동남아시아 도서국가(예: 인도네시아, 필리핀 등)와 뉴질랜드, 중남미 도서국가 등이다.

시장규모는 2008년 기준으로 2,000억원, 2020년에는 1조 규모로 확대될 전망이다.

국내의 경우도 도서 지역으로 사람이 거주하는 유인도는 482개로 2007년 기준으로 평균전력 200kW 이상인 곳만 울릉도와 백령도를 포함하여 16개에 이른다(표 1 참조). 시장규모는 2020년 1,000억 이상이 될 것으로 전망된다.

표 1 국내 200KW 이상 독립발전 현황

발전소	설비용량 (kW)	발전량 (MWh)	평균전력 (kW)	연료소비량 (kl)
조도	2,200	6,577	751	1,847
울릉도	9,500	37,726	4,307	10,084
흑산도	3,500	11,981	1,368	3,255
추자도	4,400	13,493	1,540	3,479
거문도	3,500	8,288	946	2,242
덕적도	2,900	6,129	700	1,647
위도	2,850	4,421	505	1,225
백령도	9,000	26,364	3,010	6,667
대청도	1,850	4,060	463	1,169
소청도	550	2,060	235	606
연평도	3,350	8,556	977	2,284
자월도	950	1,905	217	537
홍도	1,250	2,198	251	631
장자도	1,250	3,091	353	838
개야도	1,500	2,252	257	606
승봉도	950	2,488	284	671
계	49,500	141,589		37,788

## 3. 원격지 동력의 특성

### 3.1 원격지의 특성

전기가 발명되기 이전의 모든 동력 시스템은 분산 시스템으로 소비 현지에서 동력을 발생하였으나 전기 발명 이후에는 전력계통을 통한 중앙 집중식

동력 시스템에 의존하게 되었다. 풍력-디젤엔진 하이브리드 발전은 원격지의 독립발전을 고려한 시스템이다. 따라서 원격지의 동력활용의 종류와 사회 환경에 따라 독립발전의 시스템의 특성이 다르다. 먼저 원격지에서 동력을 활용하는 형태는 다음의 3가지로 분류된다.

- 원격지역의 특수한 용도 : 예, 통신, 관개(농업용수 공급)
- 산업화된 국가에서 원격지 공동체
- 개도국의 공동체

사회적인 환경으로 원격지 동력 시스템의 요구 조건과 제약 사항이 달라지는데, 무인 지역에서는 비용보다 시스템의 신뢰성이 더 중요하고, 산업화된 국가에서는 높은 생활 수준 및 정밀산업이 많아 전력품질, 가용성, 비용이 중요하고, 개도국에서는 훈련된 인력의 부족으로 유지보수의 용이성 우선시 된다.

### 3.2 원격지 동력의 요구사항

원격지 동력계통은 중앙계통에 비하여 매우 작은 계통이므로 수용가에서 사용하는 전기 기기의 작동에 따라 계통의 주파수/전압이 허용치 이상으로 변동할 수 있기 때문에 부하가 대단히 중요하다. 부하의 변동성은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 하루 동안 다소 규칙적으로 변동
- 큰 기기의 스위치 조작으로 짧은 주기의 요동이 있음
- 주 또는 철에 따라 크게 변동

따라서 중앙계통에 비하여 부하의 변동성에 대한 대책이 초단위로 요구된다.

## 4. 풍력-디젤 하이브리드 발전의 개요

### 4.1 디젤발전

디젤발전이 원격지에 동력을 공급하기 위한 가장 보편적인 동력 시스템으로 부하에 따라 다수의 디젤발전기를 사용하기도 한다. 복수개의 발전기를 사용할 경우 그 중 일부의 발전기가 기저 부하를 담당한다. 그리고 언제라도 전면적 보수를 위하여 충분한 예비 용량을 갖추고 있다.

운전상의 제약 사항으로 디젤엔진은 최소 부하 이상으로 운전하도록 권장된다(예, 40% 부하 이상). 최소 부하 이하 운전의 경우 효율이 낮고 엔진의 과도한 마모가 일어날 수 있다. 따라서 정격부하 근처에서 운전될 확률이 높은 복수개의 발전기를 사용하는 것이 효율이 높다.

원격지 부하는 피크치가 상당히 큰 특성이 있고 연속적인 부하변동에 따른 문제가 있어 많은 디젤발전 플랜트에서 시스템 용량이 부적절 하거나 비효율적으로 제어가 되고 있다. 그럼에도 디젤 발전은 장기간의 신뢰할 수 있는 동력 공급원임은 틀림 없다.

디젤발전은 운영비가 고비용(연료비+연료 운반비)이라 것이 가장 큰 단점이고 장점은 충분히 검증된 기술이라는 점이다.

### 4.2 풍력발전

풍력발전은 지난 10년간 기술적, 산업적으로 크게 발전하여 이제 석탄 또는 핵발전과 경쟁할 만큼 경제성을 갖추게 되었다. 풍력발전에서 가장 큰 문제점은 계절-계절, 시간-분-초 단위 스케일로 출력이 변동한다는 점과, 바람이 불지 않으면 발전을 할 수 없다는 점 즉, 지속성이 없다는 점이다. 디젤독립계통에 풍력발전기를 투입하여 하이브리드 발전을 할 경우에는 풍황이 부하와 일치하지 않으면 풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템을 도입하기 힘들다.

### 4.3 풍력-디젤 하이브리드 발전의 가능성

풍력-디젤 하이브리드는 상호 단점을 보완하여 경제적인 이득을 추구하기 위한 것으로 풍력발전은 디젤발전의 연료 절감하고 디젤발전은 바람이 약할 경우 지속적인 발전수단을 제공한다. 풍력발전기를 하이브리드 발전에 투입하는 개념으로는 그림3과 같이 2가지가 있다.

두 번째 개념의 종래 많이 사용된 풍력-디젤 하이브리드 시스템에서는 통상 디젤엔진을 항상 가동하고 풍력 투입률이 크지 않다. 이러한 경우 연료절약 효과가 그리 크지 않다고 보고되어있다<sup>3)</sup>.

첫번째 개념에서는 풍황에 따라 풍력투입률이 100%로 발전할 경우도 있다. 풍력투입률이 20% 이하에서는 풍력의 변동성이 전력품질에 미치는 영향이 허용할 만한 수준이지만 그 이상에서는 그림 4와 같이 전력품질이 크게 나빠진다. 따라서 풍력-디젤 하이브리드 발전을 효과적으로 도입하기 위해서

는 전력품질을 제어할 필요가 있다.

하이브리드 시스템에서 풍력발전기 도입 비용이 매우 크기 때문에 초기 투자비가 커 전주기 경제성 관점에서 시스템을 다루어야 한다. 경제성을 확보하기 위해서는 풍력투입률을 높여야 하며, 바람이 충분할 경우 디젤발전기를 완전히 정지할 수 있어야 실제로 하이브리드 발전을 하는 효과를 볼 수 있다.

풍력-디젤 하이브리드 발전의 상업화 가능성은 경제성 확보에 달려 있고 이를 위해서는 풍력 투입률을 높이기 위한 제어 전략과 시스템 제어 기술이 주요한 관건이 된다. 이러한 기술은 현재의 기술로 충분히 개발 가능하며, 경제성보다 현시점에서 더 중요한 화석 연료 사용을 줄이는 시스템이므로 앞으로 수요가 늘어날 전망이다.

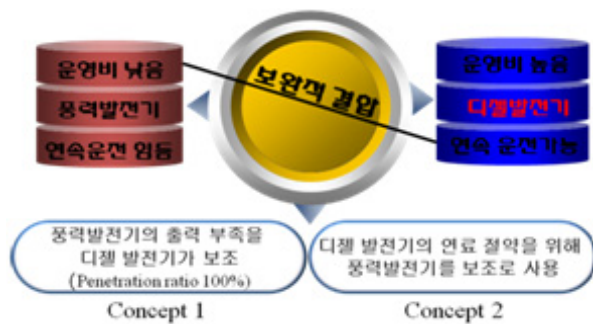


그림 3 풍력발전 투입 개념

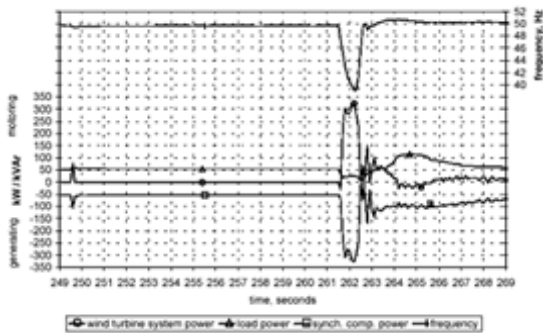


그림 4 풍력발전기 시동 시 주파수 변동<sup>2)</sup>

### 5. 풍력-디젤 하이브리드 발전의 일반 고려사항

풍력-디젤 하이브리드 발전은 제어할 대상이 많아 어려운 시스템으로 풍력터빈의 출력 변동성과 부하의 빠른변화(작은 계통일 수록 큼)로 단순한 디젤 백업으로는 충분하지 않고 적합한 전략이 필요하다. 경제적인 시스템을 위해서는 선정한 시스템의 특성과 이에 따른 설계상의 고려 사항에 대하여 숙지 하고 있어야 한다.

### 5.1 시스템의 특성

10Kw(W/T)+5Kw(D/G) 와 1Mw(W/T)+30MW (Grid) 시스템은 매우 다른 시스템이다(두 개의 극단적인 시스템 예). 큰 시스템은 복수의 디젤발전기를 사용할 수 있고 운전 전략을 조정할 수 있어 연료 소비량을 최소화 할 수 있으며, 풍력발전기의 이점을 최대화할 수 있다. 한계점으로는 대형 수퍼차지드 디젤엔진은 자주, 신속하게 시동/정지를 할 수 없다는 것이다.

큰 부하(100-1000개의 수용가)는 작은 부하보다 평탄한 특성이 있다(평균효과). 그리고 수 Mw 계통의 경우 복수개의 풍력발전기를 적용할 수 있는데, 지리적으로 떨어져 있다면 출력 변동이 단일 풍력발전기보다 작을 수 있다(평균효과). 출력 변동은 풍력발전기 갯수의 제공근에 비례하여 감소하는데, 떨어진 정도에 따라 수초에서 수분 동안의 변동이 감소한다. 따라서 큰 디젤발전계통과 작은 디젤발전계통은 특성이 다른데, 큰 시스템이 이점이 많다. 참고로 10Kw-200Kw 범위를 작은 시스템이라고 한다.

### 5.2 디젤발전기의 선정

풍력발전기를 디젤발전 계통에 투입 시 다음의 요인으로 연료 절감 계산에 주의가 필요하다. 첫째, 디젤발전기는 일반적으로 초과 용량인 경우가 많다. 이는 소형 시스템에서는 피크치에 통상 부하의 5배에 달하고, 또한 미래 수요를 대비한 여유용량이 필요하기 때문이다. 따라서 운전이 불가피(저부하 운전은 효율이 낮음)하다. 부하가 0일 때의 연료 소비량은 최대 부하의 연료소비의 1/3에 달한다. 두번째, 실제의 시스템에서 복수개의 D/G 사용하고 있고 제어 컴퓨터가 없어도 관리자(운전자)가 수동으로 D/G를 부하에 맞춰 조작하고 있어 풍력발전기 투입에 투입에 따른 이익을 정량화 하기 힘들기 때문이다.

디젤발전기의 용량은 부하 피크치를 고려하여 결정하고, 통상부하의 크기의 분포를 고려하여 복수개의 발전기를 사용하는 것이 유리하다. 발전기의 크기는 발전기 사용 갯수에 따라 결정한다. 복수개의 디젤발전기를 사용하는 것이 연료 절약에 유리한 점은 이미 언급한바 있다. 복수개의 발전기를 사용하면 정격부하로 운전할 가능성이 큰데, 정격부하 운전이 얼마나 효율적인가를 보여주는 사례로, 운전평균부하 2배(기준은 10배) 용량의 D/G와 배터리로 40% 연료



절감 사례가 있음(캐나다에서 상용화, cyclic charging system, 풍력발전기는 사용치 않음, D/G를 풀 부하로 운전하여 배터리를 충전하고 정지함).

### 5.3 풍력발전기 용량 선정

풍력발전기 선택에는 많은 요인이 있다. 디젤발전기와 부하에 대한 상대적인 크기를 먼저 고려되어야 한다. 어떤 경우에서는 하나의 큰 용량의 발전기보다 작은 여러 개의 발전기를 선호하는데, 개수가 많을수록 출력에서 평탄화 효과가 있기 때문이다.

발전기 종류로는 대부분 동기 또는 유도발전기를 선호한다. 유도발전기는 외부에서 무효전력을 공급해야 하는 어려움이 있으나 계통에 동기화가 보다 간단하고 계통과의 동적연동에 문제가 적다. 동기발전기는 자기기동성이 있으나 강한 AC 전력 출력원으로 동기화 또는 안정성에 문제가 있을 수 있다. 많은 프로젝트에서 계속 운전되는 동기발전기(무효 전력공급용)와 유도발전기를 사용하고 있다. 이러한 구조에서는 동기발전기를 계속 구동하는 손실이 있다(7Kw 발전기일 경우 그 손실은 약 700W임).

풍력발전기의 출력이 부하를 초과하고, 또 이차저장장치가 가득찼을 때는 풍력발전의 출력을 다른 방법으로 소진시켜야 하는데 여러가지 방법이 있다. 덤프 부하(Dump Load)를 사용하는 방법, 풍력발전기를 과속도로 운전하는 방법 그리고 풍력발전기 날개의 피치를 제어하는 방법 등이 있는데 어떤 방법이 가장 경제적인지는 단정하기 힘들다.

### 5.4 에너지 저장장치 선택

풍력발전의 변동성에 대한 대책으로 에너지저장장치가 사용된다. 이러한 에너지저장장치를 이차에너지저장장치라고 하는데 다음과 같은 사항들을 장치 선택 시 고려 해야 한다.

- 에너지저장장치가 전략적인 이익만 주는가? 또는 연료를 절약할 수 있는가?
- 저장효율은 얼마인가? 손실이 출력에 비례하는가?
- 계속 손실이 일어나는가?
- 유한수명인가?
- 충방전에 한계가 있는가?
- 유지보수는 무엇인지? 비용은 어느 정도인가?
- 원격 조작이 가능한 시스템인가?
- 부속장치를 포함한 가격은 어느 정도 인가? : 가장 중요

## 5. 결 론

풍력-디젤 하이브리드 발전은 중앙전력계통이 없는 지역의 친환경적이며 지속가능한 그리고 경제성을 갖춘 유일한 발전 시스템이다. 현재 디젤발전을 하고 있는 지역과 전기의 혜택을 못 받는 지역이 잠재 시장으로 풍력발전의 틈새시장으로서의 전망도 밝다. 풍력발전 기술의 발전으로 풍력발전기가 싸지고, 유가가 오르면 더욱 그 필요성이 커질 수 있다.

현재 이 기술은 초기 투자비가 큰 것이 문제점인데 이는 전주기 비용의 관점에서 접근해야 한다. 이런 전주기 비용은 지역 특성에 맞게 최적 시스템을 선정과 적합한 제어 전략 및 제어가 큰 영향을 미친다. 그리고 위에서 고찰한 설계상의 고려사항도 시스템의 전주기 비용을 결정하는 중요한 요인이 된다.

### 참고문헌

- 1) T. Forsyth and I. Baring-Gould, "Distributed Wind Market Application", NREL/TP-500-39851, 2007.
- 2) DTI의 Synchronous Compensators for ini-grids and islanding 최종 보고서
- 3) Per Nielsen, Jens Villadsen, and Stefan Chun, WindPro-2 Manual, EMD.
- 4) Ray Hunter and George Elliot, "Wind-Diesel Systems", Cambridge, 2005.
- 5) H. Nacfaure, "Wind-Diese land Wind Autonomous Energy Systems", Taylor & Francis, 2005.
- 6) J.F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind Energy Explained, Wiley, 2006.

### [저자 소개]

남 용 윤(책임저자)

E-mail : yynam@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7413

1956년 3월 19일생.

1994년 부산대학교 조선공학과 박사 과정 졸업. 1987년 한국기계연구원 입사, 구조안전, 풍력발전분야 등 연구. 한국해양학회, 풍력학회 등의 회원, 공학박사.





한 정 우

E-mail : jwhan@kimm.re.kr

Tel : 042-861-9450

1968년 2월 6일생.

2005년 충남대학교 기계설계공학과 박사 과정 졸업. 1994년 한국기계연구원 입사, 동 연구원 시스템신뢰성연구실에서 구조안전, 풍력발전시스템 개발에 중

사. 대한기계학회, 한국강구조학회 등의 회원, 공학박사



방 제 성

E-mail : jsbang@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7569

1973년 7월 23일생.

2002년 서울대학교 기계항공공학부 석사 졸업. 2004년 한국기계연구원 입사, 시스템신뢰성연구실 근무. 정밀공학회, 철도학회 등의 회원.