

태양광-풍력 하이브리드 발전시스템

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이홍원
(hongwlee@reseat.re.kr)

1. 머리말

화석연료 고갈과 지구온난화 대응으로 친환경 신재생에너지의 개발 및 이용이 전 세계적으로 활발하게 전개되고 있다. 신재생에너지원에는 태양(solar), 풍력(wind), 수력(hydro), 바이오매스(biomass), 연료전지(fuel cell), 지열(geothermal), 조수(tidal) 및 파도(wave) 등 다양한 에너지가 있다. 이 중에서 태양광발전(PV: Photovoltaic)과 풍력발전은 어디서나 쉽게 이용할 수 있고 비용 대비 효과가 큰 장점을 지니고 있어 가장 광범위하게 활용되고 있다. 하지만 이들 시스템은 공통적으로 기상변화 등 변화하는 자연현상에 크게 영향을 받는다. 따라서 생산한 전력과 수용가의 전력수요 간에 불균형이 발생되기 때문에 전력공급에서의 신뢰도가 떨어진다. 이런 문제는 서로 다른 종류의 신재생에너지원을 결합시키면 상호보완 효과를 통해 많은 부분을 완화시킬 수 있다.

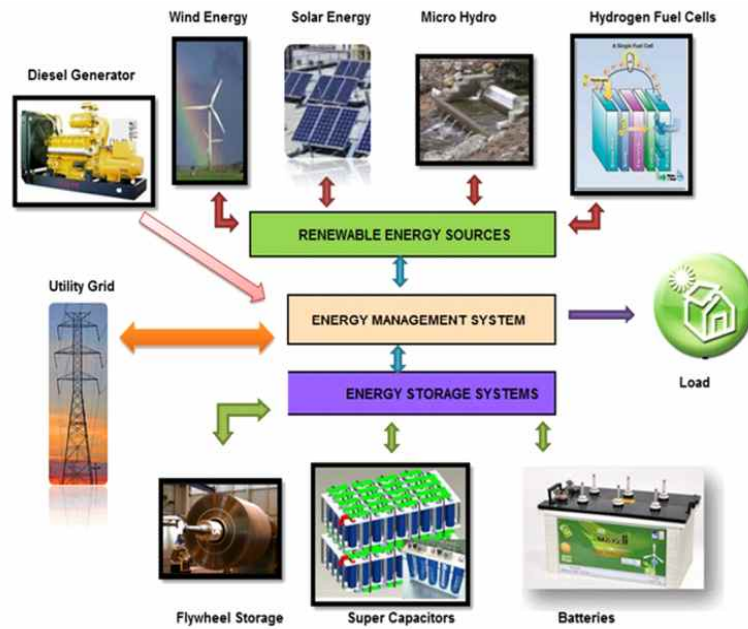
이와 같은 신재생에너지 하이브리드 시스템(HRES: Hybrid Renewable Energy System)은 일반적으로 에너지저장시스템(ESS: Energy Storage System)과 함께 디젤발전기와 같은 종래의 전력공급 장치를 추가 구성함으로써 보다 안정적으로 전력을 공급할 수 있다. 다음은 HRES의 주류를 이루는 태양광-풍력 하이브리드 발전시스템에 있어서, 용량의 최적화(size optimization) 기법, 컨버터(converter)와 제어기(controller) 설계, 시스템 성능평가 기술의 동향에 대해 기술한다. 또한 하이브리드 발전시스템의 최적용량 설계 및 경제성 분석 사례와 HRES 단지 사례를 소개한다.

2. 신재생에너지 하이브리드 시스템

일반적으로 HRES에는 <그림 2-1>과 같이 풍력발전, 태양광발전 등의 다양한 신재생에너지원과 디젤발전기와 같은 종래의 분산발전(DG: Distributed Generation) 시스템이 주전원으로 구성된다. 여기에 ESS, 컨버터, 제어기, EMS(Energy Management System, 에너지관리시스템) 등이 안정적이고 효율적인 시스템 운용을 위해 구성된다.

특히 ESS는 HRES이 생산한 발전량과 공급해야 할 전력 부하 간의 불균형을 보완해주는 필수 주성 요소이다. ESS의 종류에는 배터리 에너지저장시스템(BESS: Battery Energy Storage System), 펌프 수력저장장치(PHS: Pumped Hydro Storage), 압축공기 에너지저장

장치(CAES: Compressed Air Energy Storage), 수소기반 에너지저장시스템(HESS: Hydrogen-based Energy Storage System), 초전도자석 에너지저장장치(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage), 플라이휠 에너지저장시스템(FESS: Flywheel Energy Storage Systems), 슈퍼커패시터 에너지저장시스템(Super Capacitor Energy Storage Systems) 등 다양한 방식이 있다.



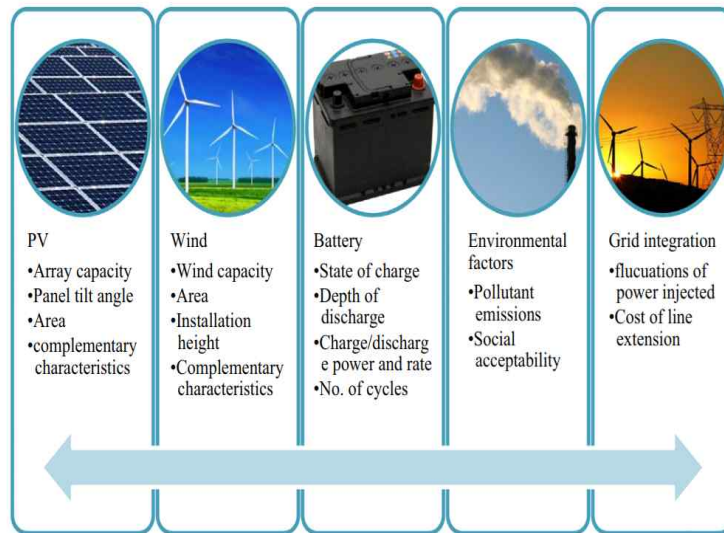
<그림 2-1> HRES의 구성⁽²⁾

HRES의 운용 방식은 기존의 전력망에 연결하여 운용하는 계통연계운전형(grid-connected)과 독자적으로 운용하는 독립형(stand-alone)으로 나눌 수 있다. 또한 발전용량의 크기에 있어서 지원하는 전력부하의 크기에 따라 수kW급에서 수백kW급이 있다. 일반적으로 5kW보다 작은 소형 시스템은 일반적으로 벽지의 독립주택이나 통신-방송 중계시스템 등에 이용된다. 5kW보다 크고 100kW보다 작은 중형 시스템은 대부분 전력망이 없는 소수의 가구 및 편의시설이 있는 벽지에서 주로 독립적으로 운전되고 일부는 전력망과 연결하여 운용된다. 소규모 지역용인 100kW 이상의 대형 시스템은 주로 기존 전력망과 연결되고 전력이 남거나 부족 시 전력망과 전력을 교환한다.

3. 태양광-풍력 하이브리드 시스템의 최적화

태양광-풍력 하이브리드 시스템에 있어서, 시스템 비용과 안정적인 전력 공급 능력 간의 균형을 맞추기 위해 발전용량에 대한 최적화가 매우 중요하다. 태양광-풍력시스템의 전력공급 능력은 설치 지역의 기상 조건과 전력부하 패턴에 크게 좌우된다. 최적화에 앞서 기상과 전력부하 패턴을 파악하고 요소 시스템들에 대한 정밀한 모델링이 필요하다.

또한 <그림 3-1>은 태양광-풍력시스템의 최적화 시 적용되는 파라미터와 고려해야 할 요소들을 보여준다. 태양광시스템에는 태양전지 어레이(array) 용량, 태양전지 패널의 설치각도와 설치면적이 해당되고, 풍력시스템에서는 발전용량, 풍력터빈의 회전면적, 타워 높이가 등이 있다. 배터리에서는 잔존용량(SOC: State of Charge), 방전도(DOD: Depth of Discharge), 충전-방전의 출력, 속도 및 사이클 회수, 그리고 전력망 구축에서는 전력공급의 변동성과 전력선의 연장 비용이 포함되며 환경측면에서는 온실가스 배출, 사회적 수용성이 포함된다.



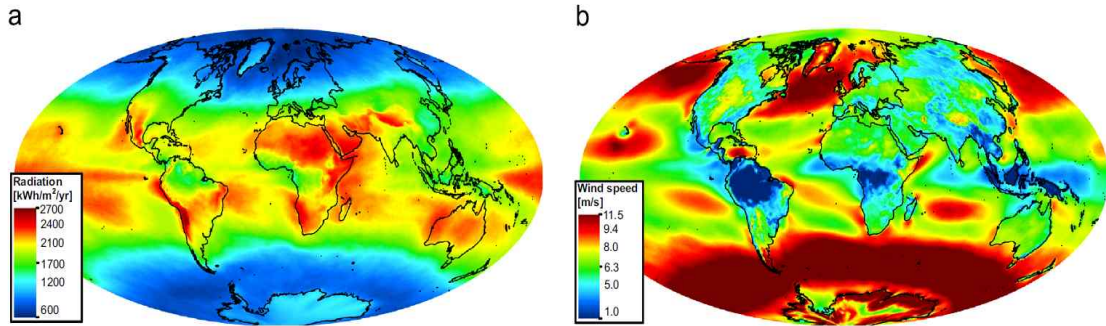
<그림 3-1> 태양광-풍력시스템 최적화에서의 주요 요소⁽¹⁾

3-1. 기상 조건 및 전력부하⁽³⁾

태양광-풍력시스템의 전력생산량은 지역별 기후 조건에 크게 영향을 받는다. 따라서 하이브리드 시스템의 사업성 검토나 사이트 결정에 앞서 기후 조건을 분석하는 것이 매우 중요하고 기상 데이터가 중요한 툴(tool)이 된다. 이러한 기상 데이터는 대부분 지역 기상대에서 입수할 수 있다. 기상 데이터 중 일사량(amount of solar radiation), 주위온도, 풍속과 같은 파라미터가 특히 중요하다. 태양 및 풍력에너지에 있어 지역 또는 지구 전체 스케일로 공간-시간별 변화 상태를 제공하는 모델과 데이터베이스는 이미 광범위하게 개발되어 있다. 또한 온라인에서 얻은 데이터를 이용한 글로벌 맵(global map)을 활용하여 에너지이용 가능성(energy availability)을 평가할 수 있다.

<그림 3-2>는 지구 전체에 대해 수평면의 일사량 수준, 100m 높이에서의 풍력 이용가능 양을 개략적으로 나타낸다. 수평면의 연간 일사량은 위도가 높아질수록 감소되어 극지방에서 제일 적지만 모든 위도 지역에서 태양광 입사평면 각도를 최적화하면 연간 일사량은 지역의 기상 조건에 더 크게 영향을 받는다. 풍속에서는 극지방에 가까울수록 이용 잠재량이 높고 일부 지역에서는 변화된 패턴이 나타난다. 대규모 스케일에서의 풍속 패턴은 온도차와 지구 회전에 의해 발생된다. 하지만 보다 작은 스케일에서는 지형

차이와 지표면의 거친 수준(roughness)에 영향을 받는 것에 주목할 필요가 있다. 해안에서 가까운 곳, 보다 복잡한 지형에서는 수백 미터 내에서 큰 차이가 나타날 수 있다.



<그림 3-2> 태양에너지(a)와 풍력에너지(b)의 이용 가능성에 대한 글로벌 맵⁽³⁾

하이브리드 시스템의 발전용량 최적화에서 앞서 기상 데이터와 함께 파악해야 할 연간 평균 전력부하는 일반적으로 지역의 중앙급전지령소(load dispatch center)에서 입수할 수 있다. 입수가 불가능할 때는 인공신경망(ANN: Artificial Neural Network)을 이용하여 합성할 수 있다. Arabali⁽⁵⁾는 전력부하의 하한과 상한 값으로 가우스 분포(Gaussian distribution)를 이용하여 시간별 부하변화를 모델링했으며, 통계적 방법 또한 주택 내의 에너지 소비 예측에 널리 이용되고 있다. 일부 연구자들은 주택 내의 에너지 소비 예측을 위해 선형, 비선형 및 다중선형 회귀분석(regression analysis)을 이용하기도 한다.

3-2. 요소 시스템의 모델링⁽¹⁾

3-2-1. 태양광시스템

태양전지의 평형모델(equivalent model)을 바탕으로 태양전지의 I-V곡선에 기초한 시뮬레이션 모델이 Zhou 등⁽⁶⁾에 의해 제안되었으며, 분석을 단순화해주는 다양한 수학적 모델이 도입됐다. 태양전지 패널의 설치 각을 대상으로 한 단순 모델, 태양광 출력을 하늘의 청명도의 함수로 나타내는 모델, 개방회로의 전압과 단락회로의 전류로 태양광 출력을 제시하는 모델, 태양광 출력을 추정하기 위해 경사면에 태양광의 확산, 산란, 반사 및 복사 효과를 고려한 모델 등이 제안됐다. 태양광발전효율 산출에 총열손실계수가 적용되었으며, Yang 등⁽⁷⁾은 모든 경사면에서 확산된 일사 복사량을 추정하기 위해 Perez 모델을 적용했다. 이 모델은 표면복사를 추정하기 위해 휘도계수(brightness coefficient)를 이용한다.

3-2-2. 풍력시스템

풍력시스템의 수학적 모델링에는 풍력터빈의 동력학과 풍력발전기 모델이 포함된다. 풍력터빈에 있어 와이블 분포(Weibull distribution)에 기초한 모델, 표준모델 이용 후 풍속분포에 기초하는 모델, 로터의 회전면적(rotor swept area)을 매개로 한 모델 등 여러 모델들이 제안됐다. 풍력터빈의 곡선은 평균풍속으로 모델링하기 때문에 실제와 똑같은

특성은 나타나지 않지만 순간풍속의 변동은 풍력터빈 성능에 크게 영향을 미친다. Zamani와 Riahy⁽⁸⁾는 순간 풍속변동 영향을 고려하여 풍력터빈 출력을 산출하는 새로운 방법을 제안했다. 그들은 풍속의 순간 변화를 추적하기 위해 출력곡선을 수정하기 위한 에너지 패턴 인자(EPF)와 터빈 제어성(Ca) 인자를 도입했다. 전력부하, 평균풍속, 풍력터빈의 출력곡선을 기초로 하는 풍력시스템의 모델링 방법이 제안됐다. 풍력과 발전출력의 예측을 위한 다양한 통계적, 파라메트릭, 비 파라메트릭 및 참조모델(statistical, parametric and non-parametric and reference models)에 대한 상세 검토가 보고되었다.

3-2-3. 에너지저장시스템

태양광-풍력시스템은 자연적이고 간헐적인 기후 조건에 전적으로 의존하므로 신뢰도에서 크게 취약하다. 시스템의 신뢰도를 향상시키고 남은 에너지를 저장하기 위해 모든 HRES에는 배터리가 필요하므로 이에 대한 다양한 성능해석용 모델이 개발되고 있다. 배터리는 내부저항 등을 요소로 하는 등가회로 형태의 모델링이 가능하다. 일부 연구자들은 각 시간단계별 에너지 충전-방전량을 제공하는 동역학적 배터리 모델(KiaNM)을 활용했다. 이 모델링 방법에서 배터리는 DC출력으로 변환 가능한 것과 바로 변환할 수 없는 간헐 에너지(bound energy), 2개 층으로 모델링이 이뤄진다. 잔존용량을 나타내는 파라미터인 SOC를 이용하는 다른 경험적 접근법도 있다. 배터리는 순간 SOC로 모델링이 가능한데, 순간 SOC는 이전 순간(previous instant)의 SOC, 자가방전률(self-discharge rate)과 충전-방전 동안의 배터리 효율과 함수관계를 갖는다. 하이브리드 시스템 내 연속전지의 SOC를 예측하기 위한 간단한 수학적 모델과 하이브리드 시스템의 신뢰도 평가를 위한 잔존용량에 대한 확률적 모델(probabilistic model)⁽⁹⁾이 제안되었다. 이외에 연속전지의 수명 예측을 위해 제안된 다양한 모델에 관한 검토도 많이 보고되고 있다.

3-3. 평가 기준 및 프로세스

3-3-1. 신뢰도(reliability)⁽¹⁾

태양광-풍력에너지 시스템의 예측 불가능한 특성 때문에 시스템의 안정적 공급능력에 대한 신뢰도 분석은 하이브리드 시스템 설계에서 매우 중요하다. 신뢰도 분석에서 전력공급이 불가능한 확률을 나타내는 LPSP(Loss of Power Supply Probability, 전력공급상실 확률)는 널리 이용되는 주요 지수 중 하나이고, 전력부하가 시스템의 발전용량을 초과할 확률을 나타내는 LOLP(Loss of Load Probability, 부하상실확률) 지수도 있다. 그밖에 LOLR(Loss of Load Risk, 부하상실위험), DPSP(Deficiency in Power Supply Probability, 전력공급부족확률), EENS(Expected Energy Not Supplied, 예상비공급에너지) 등이 있다.

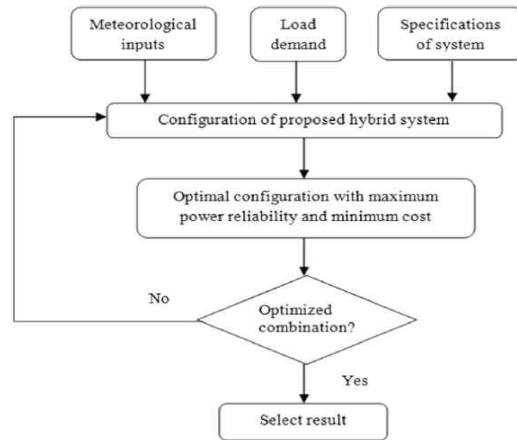
3-3-2. 경제성 분석⁽¹⁾

태양광-풍력에너지의 경제성 분석에는 시스템의 연간 에너지 생산량에 대한 연간 총 에너지 비용을 나타내는 LCE(Levelized Cost of Energy, 발전단가 비용)가 널리 사용된다. 또한 수명기간 중의 비용인 LCC(Life Cycle Cost)를 연간으로 계산한

ALCC(Annualized Life Cycle Cost)가 있다. ALCC는 장비구입과 보수유지 및 운영비용의 합인 LCC에 CRF(Capital Recovery Factor, 자본회수지수)를 곱해 산출한다. 또한 연구자들이 가장 많이 사용하는 파라미터로는 전 시계열 현금흐름에서의 총 현재가치를 의미하는 NPV(Net Present Value, 순현재가치)가 있다. 여기에는 초기투자, 예비부품 및 보수유지 비용이 포함된다. NPV는 현재의 시가를 미래의 시가와 비교하기 때문에 인플레이션을 고려한다.

3-3-3. 최적화 실행 프로세스⁽⁴⁾

일반적인 최적화 프로세스는 <그림 3-3>과 같이 첫 번째 단계는 기상 데이터와 전력 부하 및 시스템 입력 데이터를 제안된 하이브리드 시스템에 입력한다. 두 번째 단계에서는 최고 신뢰도 및 최소 비용 조건으로 수학적식을 구성한다. 다음 단계는 시스템의 최적화 기준을 충족시키도록 시스템을 최적화하는 단계이다.



<그림 3-3> 하이브리드 시스템의 일반적 최적화 실행 프로세스⁽⁴⁾

3-4. 시스템 최적화 기술⁽⁴⁾

3-4-1. 종래의 최적화 접근법

종래 방법에는 그래픽구조법(graphical construction technique), 반복기법(iterative technique), 확률접근법(probability approach), 트레이드-오프 접근법(trade-off approach), 선형계획법(linear programming technique) 등이 있다. 그래픽구조법은 단순하여 이해하기 쉽지만 융통성이 없고 많은 가정(approximation)에 바탕을 두므로 지금은 널리 활용되고 있지 않다.

반복기법은 개략적인 해법을 얻을 수 있는 수학적 방법이다. 시스템 구성이 목표치에 도달할 때까지 해석과정을 되풀이하는 방식으로 최적화 및 설계 초기 단계에 사용된다. Yang 등은 반복기법을 이용하여 HSWSO(Hybrid Solar-Wind System Optimization) 모델을 제안했고, Kellogg 등은 풍력터빈 크기와 태양전지 모듈 수를 최적화하기 위해 반복기법

을 사용했다. 반복기법은 컴퓨터 작업량이 많고 대부분 연구에서 2개의 주요 파라미터인 태양전지 패널의 설치각과 풍력터빈의 타워높이에 대한 최적화는 다루지 않았다.

확률접근법은 파라미터의 무작위 변동 효과를 반영한다. 이 방법은 고정 값 대신 분포 값으로 변동성과 불확실성을 정량화할 수 있다. 하지만 하이브리드 시스템의 동적 변동 성능을 나타낼 수 없는 것이 주요 단점이다. Karaki 등⁽¹⁰⁾은 자율 태양광-풍력에너지 변환시스템에 이 방법을 적용했다. 요구되는 배터리 용량의 상한값을 고정하고 배터리의 충전-방전 사이클에 기초하여 하이브리드 시스템의 EENS를 예측했다. 분리된 태양광과 풍력 모델을 결합하고 중첩이론(convolution theory)을 적용했다.

트레이드-오프 접근법은 하이브리드 시스템에 널리 이용되고 있지는 않으며, 최대 신뢰도와 최소 비용을 동시 추구하는 계통 연계형 태양광-풍력시스템의 설계 검토 및 의사결정 지원용으로 트레이드-오프-위험 접근법이 제시되었다.

선형계획법은 1939년 Leonid Kantorovich에 의해 개발되어 신재생에너지 시스템의 용량 최적화에 널리 이용되고 있다. Chedid 등⁽¹¹⁾은 환경도 고려하며 전력비 최소화를 위해 태양광-풍력시스템의 최적화에 이 기법을 적용했다. Huneke 등⁽¹²⁾은 인도와 콜롬비아의 실제 독립형 시스템의 태양광-풍력-배터리-디젤발전의 최적화를 위해 선형계획법을 사용했다. 이 두 연구에서 실용성이 확보된 태양광-배터리-디젤발전기를 구성할 수 있었다. 이상의 모든 기법 중 선형계획법은 의사결정 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다. 선형계획법은 다른 방법에 비해 융통성이 크고 보다 넓은 범위에 걸쳐 문제를 쉽게 해결할 수 있는 장점이 있다.

3-4-2. 새로운 최적화 접근법

GA(Genetic Algorithm, 유전자알고리즘)는 1960~1970년 John Holland가 개발한 검색 프로세스이다. GA는 다중해법으로 문제를 풀 수 있고 기존의 시뮬레이션과 각종 모델에 적용하기 쉽고 이해하기 쉬운 장점을 갖고 있어 태양광-풍력시스템의 최적화 설계용으로 많이 이용되고 있다. 전력수요를 만족시키며 최저 비용을 실현하는 최적의 유닛 수량을 선택하는 독립형 태양광-풍력시스템의 용량 최적화에 GA가 제안되었으며, Yang 등⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾은 의사결정 파라미터로 태양전지 모듈, 풍력터빈, 배터리 용량, 태양전지 패널의 설치 각, 풍력터빈 타워높이를 적용하는 태양-풍력-배터리시스템의 구성 최적화에 GA를 적용했다. 또한 Shadman 등⁽¹⁵⁾은 용량, 비용, 발전량 등 다중항목에 대한 최적화에 MOGA(Objective Genetic Algorithm)를 제안했다.

PSO(Particle Swarm Optimization, 입자무리최적화)는 조류와 어류의 이동행동을 기반으로 Kennedy와 Eberhart에 의해 개발됐다. PSO 방법은 처리속도가 빠르고 계산을 단순하게 끝낼 수 있는 장점이 있다. 이 알고리즘의 한계는 부분 최적화 경향을 지니고 있는 점이다. 이 방법은 태양광-풍력 시스템에 있어 아직은 초기 단계로 연구 발표는 소수에 지나지 않는다. Basir and Sadeh⁽¹⁶⁾는 풍력-태양광-조수-배터리 시스템의 용량 결정을 위해 PSO를 적용했다. 시스템의 신뢰도 수준 평가에는 ELF(Equivalent Loss Factor)를 지표로 사용했다. 이 연구에서 풍력-태양광-배터리 시스템과 풍력-태양광-조수-배터

리 시스템과의 비교에서 후자가 더 경제적인 것으로 나타났다. MPSO, PSO-RF, PSO-CF, PSO-W 등의 많은 파생 PSO도 도입되어 적용되고 있다.

SA(Simulated Annealing)는 재료의 풀림(annealing) 프로세스를 활용하는 방법으로서 1983년 Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi에 의해 개발됐다. 이것은 전역 최적화(global optimization)를 위한 계층기반의 임의탐색법이다. 주요 장점은 국소최소치(local minima) 문제를 피할 수 있고 비선형 모델, 무질서하고 불량한 데이터 처리 등 다양한 기능을 갖고 있는 점이다. 출력의 질이 떨어지는 단점이 있고 초기 적용 단계에 있다. Ekren and Ekren⁽¹⁷⁾은 태양광-풍력-배터리 시스템의 총비용 최소화에 SA를 사용했다.

이외의 새로운 접근법으로 인공지능을 기반으로 자연으로부터 영감을 받은 알고리즘이 많이 도입되고 있다. 개미집단 알고리즘(ant colony algorithms), BFO(Bacterial Foraging Algorithm), ABC(Artificial Bee Colony), BBO(Biogeography-Based Optimization), HS(Harmony Search), GSA(Gravitational Search Algorithm), ICA(Imperialist Competitive Algorithm), 터부검색(TS: Tabu Search) 등이 적용되고 있다.

3-4-3. 하이브리드 최적화 알고리즘

하이브리드 알고리즘은 2종 또는 그 이상의 최적화 접근법을 결합하는 방법으로서 최근 급격하게 발전하고 있다. 하이브리드 SA-TS, CS(Chaotic Search)와 HS(Harmony Search)와 SA를 결합한 DCHSSA(Discrete Chaotic Harmony Search-based Simulated Annealing), 하이브리드 PSO-HS, 개선된 SAPSO(Simulated Annealing Particle Swarm Optimization), Fuzzy 적용 GA, 하이브리드 IPF(Iterative-Pareto-Fuzzy), MCDA(Multi Criteria Decision Analysis), MCDM(Multi Criteria Decision Making) 등 다양한 알고리즘들이 태양광-풍력시스템의 최적화에 적용되고 있다. 이상의 차세대 알고리즘 중 GA가 일부 단점에도 불구하고 태양광-풍력시스템의 용량 최적화에 가장 많이 이용되는 것으로 알려지고 있다.

3-5. 컨버터와 제어기 설계⁽¹⁾

신재생에너지는 연속적이지 않은 공급 특성 때문에 적절하게 감시하지 않으면 발전 출력의 품질과 안전성이 문제가 될 수 있다. 이에 따라 몇 종류의 관리용 제어기가 개발되고 있다. 제어부분의 첫 단계는 최대 출력을 내는 것으로서 주로 DC-DC 컨버터를 통과한 후 부하나 전력망으로 공급된다. 단위비용, 에너지의 과부족 상태, 발전유닛의 상태, 배터리 방전-충전 손실 등을 알려주는 하이브리드 시스템용 제어기가 Cheldid 등⁽¹⁸⁾에 의해 제안됐다. Lagorse 등⁽³⁹⁾은 퍼지 로직(fuzzy logic)을 이용한 지능형 에너지 관리 방법을 제안했다. 이 방법은 모든 소 불력들이 시스템 전체를 위해 작동하는 것으로 보는 다중 에이전트 시스템(multi-agent system)에 기초하여 설계되었고 시스템 내 변화가 있을 때 제어방법을 변경하지 않고도 쉽게 작동이 가능한 장점이 지니고 있다.

태양광-풍력-배터리 시스템의 효율적인 에너지 관리를 위한 최적화된 제어기가 제안되었으며 다양한 부하 시나리오에 대해 MATLAB-Simulink 환경에서 프로그래밍 된 제어방

법이 하이브리드 시스템에 효율적으로 작동하는 것으로 밝혀졌다. 태양광-풍력-배터리-분산발전시스템의 에너지 흐름 관리 및 제어용 모델예측(Model Predictive) 제어기술에 기초한 에너지 전송 모델(energy dispatch model)이 Tazvinga 등⁽¹⁹⁾에 의해 개발됐다.

하이브리드 시스템용으로서 AC 부하를 갖는 태양광-풍력-배터리 시스템의 관리제어시스템이 설계됐다. 이 시스템의 주목적은 출력의 연속성과 배터리 SOC를 유지하는 것이다. DC-DC 컨버터가 태양광발전 출력의 MPPT(Maximum Power Point Tracking)에 사용되고 또 다른 DC-DC 컨버터는 3상 브리지 정류기(bridge rectifier)와 조합하여 풍력 측의 MPPT에 사용됐다. Liu 등⁽²⁰⁾은 단점이 있는 유도전동기 대신 영구자석 브러시리스(brushless) 전동기를 적용한 고효율 시스템을 개발했다.

Chen 등⁽²¹⁾은 시스템 크기가 커지고 비용이 올라가는 복수의 컨버터 사용을 피하기 위해 태양광-풍력시스템의 전력망 연결을 위한 다중입력 컨버터(multi input converter)를 제안했다. 이 기술은 MPPT가 태양-풍력시스템 양쪽에 사용되므로 출력전력을 독립적으로 또는 동시에 공급할 수 있고, 일사량이나 풍속의 변화로 인한 큰 폭의 전압 변동에도 대응할 수 있다. 독립형 태양광-풍력 하이브리드 시스템에 대해 배터리 충전을 위한 반 격리 다중입력(semi-isolated multi-input) 컨버터가 제안됐다.⁽²²⁾ 이 컨버터는 태양광-풍력시스템의 MPPT를 지원할 수 있고 양쪽의 전압 차가 커도 반 격리된 특성으로 원활한 작동이 가능하다. 슬라이딩 모드(sliding mode)를 이용한 다중입력 DC-DC 벡 부스터 컨버터(buck boost converter)는 컨버터와 제어기의 추가 비용을 줄여준다.⁽²³⁾

태양광과 풍력 양쪽에 MPPT용으로 인공신경망을 적용한 독립형 하이브리드 시스템이 제안됐다.⁽²⁴⁾ 태양광 측에는 최대 출력을 얻기 위해 RBFN(Radial Base Function Network)이 사용되고 풍력 측에는 엘만 신경망(Elman neural network)이 사용됐다. Kabalci⁽²⁵⁾는 MPPT 기법과 상간 변압기(inter phase transformer)를 구성하여 태양광-풍력 두 시스템을 3상 풀 브리지 인버터(full bridge inverter)로 연결한 하이브리드 시스템을 시뮬레이션을 이용하여 설계했다. 인버터는 SPWM(Silent Pulse Width Modulation) 변조 방법으로 제어된다. 신재생에너지 시스템과 전력망을 결합하기 위한 전류형 다중입력 DC-DC 컨버터가 제안됐다.⁽²⁶⁾ 제어기를 갖는 영구자석 동기발전기는 정격풍속 이하에서도 최대 출력 전력을 추출할 수 있다. 이외에 신재생에너지원과 전력망 연결을 위한 다양한 멀티 레벨의 컨버터와 제어방법이 제안되고 있다.

3-6. 시스템 성능 평가⁽¹⁾

모든 하이브리드 시스템은 실시간 성능을 파악하는 데에는 적절한 평가가 필요하다. 따라서 하이브리드 시스템의 성능평가 기술도 중요한 연구 분야로 발전하고 있다. Tina 등⁽²⁷⁾은 시간스텝별 시뮬레이션 대신 통계적 방법을 적용했다. 이 방법에서 신뢰도 분석을 위해 파리티미터로 EENS와 직결되는 EIR(Energy Index of Reliability)을 적용했으며 몇 사례에서 시간스텝별 시뮬레이션과 잘 부합되는 결과를 얻었다. 또한 확률접근법을 이용한 메가와트 평가모델이 개발되었다.⁽²⁸⁾ 이 모델은 풍속, 발전기 정격, 구성요소들의 효율, 최대부하에 대한 시스템 정격 비율에 따르는 영향을 조사하는 데에 이용할 수 있다.

Bakos 등⁽²⁹⁾은 초기투자회수기간에 기초한 하이브리드 시스템의 경제성 분석을 제안했다. Karaki 등⁽³⁰⁾은 태양광패널 용량과 에너지저장 용량 평가에 있어서 하드웨어 고장으로 인한 정전과 1차 에너지 변동을 고려한 확률모델을 개발했다. 기상 데이터를 이용하여 독립형 하이브리드 시스템을 평가하는 단순모델이 Hashem 등⁽³¹⁾에 의해 제시됐다. 이 모델은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용, 건설 이전 단계에서 시스템을 평가할 수 있다.

Bekele 등⁽³²⁾은 변화하는 기상 조건하에 하이브리드 시스템의 출력 예측을 위해 수치 모델을 도입했다. 이 모델에는 태양광, 풍력, 배터리 및 에너지 평형의 수학적 모델들이 결합된다. 연간, 일간 시스템의 출력 예측에 지역 기상대의 데이터베이스와 부하 데이터를 이용했다. 능동-반응 출력제어 및 잉여전력(dump power) 제어를 위한 하이브리드 시스템이 Hirose 등⁽³³⁾에 의해 제안됐다. 이 방법으로 실제 덤프 로드의 적용 없이 잉여전력을 제어할 수 있다. 하이브리드 시스템의 성능은 일일 시간대별 태양광 패널의 설치 경사각에 따라 평가되며, 노출되는 반사 패턴에 따른 연구도 이뤄지고 있다. 배터리의 확률모델을 이용하는 HRES의 신뢰도에 대한 예측 방법이 Priyanka 등⁽³⁴⁾에 의해 제안됐다.

3-7. 소프트웨어 툴⁽¹⁾

시뮬레이션은 하이브리드 시스템의 해석과 평가 시 소요되는 시간과 비용을 줄여준다. 다양한 소프트웨어가 이를 목적으로 사용되고 있다. 여기에는 HOMER, RETScreen, HYBRID2, iLOGA, Hybrids 등 다수의 툴이 개발되고 있다. Connolly 등⁽³⁵⁾과 Sinha 등⁽³⁶⁾은 이들 소프트웨어의 응용성, 능력, 단점에 대해 검토했다. 이들 툴 중 HOMER(Hybrid Optimization Model for Electric Renewable)는 미국의 NREA(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발됐으며 연구자들이 가장 많이 사용한다. 이 소프트웨어는 광범위한 에너지원(또는 발전기)과 컨버터 및 부하에 대해 하이브리드 시스템의 최적화에 이용되며, 기술과 경제적 요소 양쪽 데이터를 이용하여 1년 데이터를 1분 시간간격으로 시뮬레이션이 가능하다. GAMS (General Algebraic Modeling System)는 선형 및 비선형 최적화로 광범위한 시뮬레이션이 가능하다. 이 시스템은 변화수용능력이 좋아 복잡한 상황을 처리할 수 있고 BALMOREL, MARKAL-TIMES, WILMAR Planning Tools과 같은 툴을 내부에 구성하고 있다. HYBRID2(Massachusetts 대학교 개발)는 부하, 에너지원, 출력변환장치의 모델링과 시뮬레이션에 이용되고 시간간격 조절에 융통성이 있는 등 정교한 시뮬레이션이 가능하다. RETSCREEN은 가장 많이 다운로드가 된 툴이고 기존 시스템과 신재생 프로젝트의 기술과 경제성 평가에 활용할 수 있다.

3-8. 연구 추이⁽¹⁾

연구 문헌을 통해 하이브리드 발전시스템에 대한 최적화 동향을 다음과 같이 요약할 수 있다. ① 용량 최적화 과제 해결에 초기에는 도표나 반복기법을 사용했지만 분석 인자가 늘어남에 따라 다중목적 최적화가 가능한 알고리즘에 초점을 두기 시작했다. ② 인공지능 알고리즘 선택이 늘어나고 있고, 여기에는 GA, NDSA II로 부르는 수정된 GA, PSO와 이의 파생 알고리즘(ant colony optimization, artificial bee colony, improved bat

등)의 사용이 증가되고 있다. ③ 용량의 최적화와 더불어 시스템의 총 손실을 최저 수준으로 유지하기 위해 마이크로 그리드 내의 다양한 요소들의 배치 연구도 진행하는 과제 중의 하나다. ④ 배터리는 수명과 비용 측면에서 전 시스템 내에 가장 취약한 부분이다. 일반적으로 발전소 수명 동안 배터리는 3~4번 교체되고 자주 유지보수가 필요하므로 비용과 교체회수를 줄이는 연구가 필요하다. ⑤ 에너지저장기술 중 CAES와 PHS는 저장용량은 크지만 특수한 사이트에만 적용 가능하고, SMES는 98%에 근접한 효율로 대량 저장은 가능하지만 단시간 저장과 비용이 높다. 수소저장 방식은 효율이 40~60% 수준이며 고압탱크가 필요하다. 커패시터 방식은 수명은 길지만 단시간 저장에만 가능하다. ⑥ HRES에서의 핵심 이슈의 하나는 발전출력의 간헐성이다. 향후 신재생에너지 비율이 증가되므로 이러한 전압변동문제는 중점적으로 다뤄져야 할 과제이다. ⑦ 컨버터는 HRES 내의 전력 전송에 중요 역할을 한다. 태양광-풍력시스템의 일부는 개별 컨버터 방식이고 나머지는 다중입력 컨버터를 적용한다. 전력 품질과 전력망 연계 문제를 해결하는 데에는 고효율 컨버터와 제어기술이 필요하다. ⑧ 종래의 전력에 비해 HRES의 발전 가격은 아직 높으므로 시스템 효율과 부품 가격에서의 큰 폭의 개선이 요구된다.

4. HRES의 최적화 및 경제성 평가 연구 사례⁽³⁷⁾

4-1. 개요

이 연구는 일반용, 주택용, 산업용 부하에 따른 풍력-태양광 하이브리드 시스템의 최적 용량을 경제성 평가를 바탕으로 설계하는 방법을 제시한다. 경제성 평가는 구성된 하이브리드 시스템의 각 발전시스템별 초기비용, 교체비용, 유지보수비용, 효율, 수명과 이자율, 프로젝트 기간의 순 현재비용을 기준으로 수행한다. 최적 용량 설계는 독립형과 계통연계형 두 시스템에 대해 수행하고 동일 부하의 디젤발전시스템과 경제성을 비교한다.

4-2. 구성 요소 모델링

4-2-1. 경제성 평가 모델링

이 사례의 경제성 평가모델로는 HOMER를 이용한다. HOMER는 순 현재비용을 사용하여 다양한 조합의 발전용량에 대해 경제성을 비교 분석함으로써 최적 발전용량을 설계하는 소프트웨어이다. 경제성 분석에는 하이브리드 시스템을 구성하는 각 구성요소에 대한 비용이 필요하다. 여기서 비용에는 순 현재비용(Net Present Cost: NPC), 발전단가 비용(Cost of Energy: COE), 운영비용(Operating Cost: OC), 잔존가치, 구성품의 초기비용, 교체비용, 유지보수비용(O&M Cost) 등이 있다. 이 연구에서는 프로젝트 기간 동안 모든 가격이 같은 비율로 상승하는 것으로 가정하였다.

4-2-2. 부하 모델링

경제성 분석에 필요한 연간 부하 사용량 모델은 에너지관리공단의 ‘수용가 부하곡

선을 이용한 전력사용 형태분석자료(2005년~2006년)’의 일반용, 주택용, 산업용 부하 데이터를 사용하였다. 이 부하 데이터는 대표 지역, 계절별 대표 월의 산업별 실제 부하를 한 시간 단위로 평균한 것이다. 부하 모델링은 HOMER에서 제공하는 무작위 변동(random variability) 기능을 이용하여 대표 월의 실제 부하를 바탕으로 매일 24시간 동안의 순간부하를 1년간 모델링하였다. 일반용 부하의 일평균 전력량은 2,395kWh, 피크부하는 300kW, 평균부하는 99.8kW, 부하율은 33.3%이다. 주택용 부하 모델에서는 일평균 전력량 3,852kWh, 피크부하 300kW, 평균부하 160kW, 부하율 53.5%이며, 산업용 부하는 일평균 전력량 4,374kWh, 피크부하 300kW, 평균부하 182kW, 부하율은 60.8%이다

4-2-3. 하이브리드 발전시스템의 모델링

(1). 풍력발전시스템 : 이 연구에서 풍력발전은 1기당 용량이 10kW인 BWC Excel-S 소형 풍력발전기로 가정하였고 수명은 25년, 정격풍속은 12m/s이다. 풍력 발전 출력을 구하는 모델은 다음과 같다.

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta)$$

여기서 ρ 는 공기밀도, A 는 회전익의 회전면적, V 는 풍속, 그리고 $C_p(\lambda, \beta)$ 는 출력계수이다. 이 연구는 특정지역을 지정하여 경제성 평가를 하는 것이 아니므로 풍속 데이터는 HOMER에서 제공하는 샘플 데이터로 연간 평균풍속 6m/s를 적용했다.

(2). 태양광발전시스템 : 태양광 발전 출력은 식은 다음 식을 이용해 산출한다.

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left[\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right]$$

여기서, Y_{PV} 는 PV 모듈의 정격용량(kW), f_{PV} 는 PV 정격감소계수(de-rating factor)(%), G_T 는 PV 모듈의 일사량(kW/m²), $G_{T,STC}$ 는 표준 조건에서의 일사량(kW/m²)이다. MOHER 일사량 데이터는 NASA와 연동되어 있어 NASA 서버에 접속하여 위도와 경도, 시간대를 입력하면 1년간 위성으로 측정된 일사량과 청명도 데이터를 얻을 수 있다. 일사량의 연간 평균 청명도는 0.563, 1일 평균 일사량은 5.55kWh/m²이다. 태양광 모듈의 수명은 20년, 모듈의 단위용량은 20kW로 가정하였다.

(3). 축전지 및 컨버터 모델링 : 시뮬레이션에 적용된 축전지는 가장 일반적인 Rolls/Surrette사의 S6CS25P 납축전지로 설정하였고 단위용량은 6.94kWh, 효율은 80%이다. 이 축전지는 2개가 한 세트를 이루며 잦은 충·방전이 예상되어 수명은 4년으로 가정하였다. 컨버터는 인버터와 정류기가 같이 결합된 통합형시스템으로 구성하고 정류기 효율은 95%, 수명은 15년, 용량은 최대 500kW로 설정하였다.

(4). 각 요소의 비용 모델링 : 순 현재비용에서 연간이자율(할인율)은 8%, 프로젝트 기간은 25년을 적용했다. 각 발전 구성요소들의 국내 비용은 공개된 자료가 없어 외국자료를 적용했다. 풍력터빈, 태양광패널(1kW), 배터리(set), 컨버터(1kW), 디젤발전기(70kW)의 초기 구입가는 각각 26,000\$, 7,000\$, 700\$, 800\$, 18,000\$로 가정하고, 유지보수비는 각각 100\$/y, 20\$/y, 20\$/y, 20\$/y, 0.15\$/h를 적용했다.

4-3. 최적용량 설계 및 경제성 분석

최적용량 설계 및 경제성 분석은 다음 3 가지의 경우를 고려하여 수행하였다. 먼저 디젤발전기만을 사용하는 경우로서 발생 비용과 디젤발전기가 발생하는 온실가스배출량을 평가한 후 신재생에너지만을 생산하는 독립형 발전시스템의 발생 비용을 평가하여 디젤발전시스템과 비교한다. 마지막으로 계통연계형 하이브리드시스템을 설계하여 소요 비용을 평가한다. 최적 용량의 설계에 있어서, 시스템 각 구성요소의 용량 적용은 풍력은 2기, 태양광은 20kW, 배터리는 2대, 그리고 컨버터는 10kW단위로 용량을 증가시켜 적용한다. HOMER는 가정한 각 단위발전시스템의 용량 범위 내 가능한 모든 용량 조합에 대해 자원 데이터 및 발전모델을 이용하여 총 프로젝트 기간 동안의 발전량을 계산하여 부하 모델에 대한 충족 여부를 판단한다. 만약 가정한 용량 조합이 부하 모델을 충족시키면 그 용량 조합에 대해 각종 비용, 이자율 등을 경제성 모델에 적용하여 NPC를 계산한다. 최종적으로 HOMER는 부하 모델을 충족하는 용량 조합 그룹 중 NPC가 제일 낮은 용량 조합을 최적의 용량 조합으로 결정한다.

4-3-1. 디젤발전시스템

디젤발전기의 용량은 각 부하의 피크부하가 300kW인 것을 고려하여 350kW 발전기를 적용하였다. 디젤유 가격은 리터당 0.8\$로 가정하고 수명은 20년, 효율(열효율 및 기계효율)은 일반적인 디젤발전시스템 효율인 35%로 설정하였다. 비용 분석 결과는 <표 4-1>에서와 같이 부하가 가장 큰 산업용은 NPC는 가장 높지만 kW 당 발전비용에서는 제일 낮았다. 부하가 가장 작은 일반용이 발전단가는 제일 높게 나타났다. 이는 각 케이스별 초기 설치비용은 같지만 일반용에서의 부하율이 가장 낮기 때문으로 분석된다. 디젤발전시스템에서 연간 발생하는 대기오염물질은 연료를 더 많이 소비하는 산업용 부하에서 가장 많이 배출되었다.

<표 4-1> 디젤발전시스템의 비용(\$)

부하	일반용	주택용	산업용
NPC	4,653,503	5,793,573	6,196,136
COE	0.499	0.368	0.364
OC	427,503	534,304	527,015

4-3-2. 독립형 하이브리드 시스템

풍력, 태양광, 배터리, 컨버터로 구성된 독립형 하이브리드시스템을 세 종류의 부하 조건에 대해 용량설계 및 비용분석을 수행하였다. 최적 시스템의 용량 조합은 <표 4-2>과 같이 부하가 클수록 풍력과 PV 용량이 커지며, 배터리는 최대 900세트(12,492kWh)를 가정하였기 때문에 더 이상 증가하지 않았다. <표 4-3>는 부하별 최적 시스템의 구성요소별 비용을 나타낸다. NPC 및 OC는 부하 크기와 동일한 순서로 높게 나타났으나 COE는 부하 크기와 반대로 나타났다. 이는 신재생 하이브리드 시스템의 경우 용량이 클수

록 발전단가에서 유리한 것을 의미한다. 디젤발전시스템과 비교하면 NPC와 COE가 1.7~2.0배 높아 하이브리드 시스템보다 디젤발전이 경제성에서 유리하다. 그러나 하이브리드 시스템의 운전비용(OC)은 오히려 0.35~0.4배로 현저히 낮기 때문에 OC가 높아질 수밖에 없는 오지나 도서지역에서는 경제성 차이를 좁힐 수 있다. 또한 디젤발전에 비해 오염물질이 배출되지 않으므로 공해문제로 인한 사회적 비용을 감안하면 장기운전의 경우 디젤시스템과의 경제성 차이를 더욱 줄일 수 있을 것이다.

<표 4-2> 최적의 독립형 하이브리드 시스템 구성(kW)

구성요소	일반용	주택용	산업용
풍력발전기	600	740	980
PV	380	680	780
배터리(kWh)	9,993	12,492	12,492
컨버터	250	250	250

<표 4-3> 최적의 독립형 하이브리드 시스템 비용(\$)

부하	일반용	주택용	산업용
NPC	7,809,658	11,265,552	12,750,214
COE	0.838	0.751	0.749
OC	148,917	199,681	214,732

4-3-3. 계통연계형 하이브리드 시스템

독립형 시스템과 동일한 발전시스템에 대한 계통연계형 하이브리드 시스템의 최적용량을 설계하고 경제성을 분석하였다. 계통으로의 전력판매단가는 일반용과 주택용은 0.09(\$/kWh), 그리고 산업용은 0.07(\$/kWh)로 부하별 차등요금을 적용하였다. 계통에서 구매 가능한 전력은 각 부하 모두 최대 300kW로 설정하였다.

<표 4-4>과 <표 4-5>는 계통연계형 시스템에 대한 최적의 시스템 구성과 비용을 보여준다. <표 4-3>의 독립형 시스템의 분석 결과와 비교하면 NPC는 21%, COE는 20%, 그리고 OC는 71%정도로 낮아진 것을 알 수 있다.

<표 4-4> 최적의 계통연계형 하이브리드 시스템 구성(kW)

구성요소	일반용	주택용	산업용
풍력발전기	80	60	20
PV	20	20	20
배터리(kWh)	416	416	416
컨버터	50	50	50

<표 4-5> 최적의 계통연계형 하이브리드 시스템 비용(\$)

부하	일반용	주택용	산업용
NPC	1,608,242	2,248,318	2,191,663
COE	0.171	0.150	0.129
OC	107,285	172,118	176,553

계통연계형에서 계통전력의 단가가 하이브리드 시스템 전력단가보다 싸기 때문에 NPC 및 COE가 크게 감소하였지만 OC는 하이브리드 시스템의 운영비용이 여전히 존재하므로 상대적으로 덜 감소한 결과를 나타낸다. 따라서 디젤발전시스템이나 독립형 하이브리드 시스템에 비해 계통연계형이 훨씬 더 경제적인임을 알 수 있다. 이것은 아직은 계통 전력의 단가가 디젤발전이나 하이브리드 시스템의 발전 단가보다 크게 낮기 때문에 당연하다.

전체 발전시스템에 대한 계통연계의 비율에서는 일반용 부하의 경우 전체 전력의 75%를 계통전력이 차지하고 전체 비용에서도 65%가 계통전력비용이 차지하는 것으로 나타났다. 또한 부하가 커질수록 계통전력의 비중이 커지는 경향을 보인다. 산업용의 경우는 부하도 크지만 계통전력의 구입단가가 다른 부하의 경우보다 싸기 때문에 전체 전력의 95%를 계통전력에 의존한다. 계통연계 시 전력거래 현황에서 일반용 부하의 경우 전력 구입과 판매가 이뤄졌지만 나머지 부하에서는 판매는 이뤄지지 않는 것으로 나타났다. 일반용 부하는 피크부하가 주택용이나 산업용과 같기 때문에 하이브리드 시스템 용량은 다른 부하용 시스템과 비슷하지만 부하율이 작아 발전한 전력의 사용률도 낮아 남은 전력을 판매한 것으로 보인다. 또한 산업용 경우는 평균 전력소비량이 많으므로 전력구매량도 가장 크게 나타났다.

4-4. 결론

분석을 통하여 디젤시스템의 경우 독립형 하이브리드 시스템에 비해 순 현재비용과 발전단가가 낮아 하이브리드 시스템보다 경제적이지만 연간 총운영비용이 높고 오염물질 배출로 인한 사회적 비용이 크므로, 벽지, 도서지역에서는 경제성 차가 크게 좁혀질 것으로 분석되었다. 계통연계형 시스템은 계통전력의 단가가 현저히 싸기 때문에 디젤이나 독립형 시스템에 비해 훨씬 경제적으로 분석되었다. 그러나 계통전력은 발전 시 배출하는 공해물질에 따르는 사회적 비용을 고려하면 경제성 차는 다소 줄어들 수 있다. 또한 HRES은 용량이 클수록 경제성이 향상되는 것으로 분석되었다. 향후 평가 대상 시스템의 정확한 부하소비량 데이터와 신재생에너지원에 대한 상세 정보가 제공되면 보다 최적의 용량 설계와 경제성 평가가 가능할 수 있을 것이다.

5. HRES 단지 사례

5-1. 국내

국내에는 온실가스 감축 필요성에 따라 친환경의 에너지 자립섬 조성사업, 에너지신산업 사업화 지원 사업 등의 공공제도에 힘입어 어느 정도 HRES의 추진 분위기는 조성되고 있다. 특히 도서지역은 전력망이 없는 곳이 많아 분산발전의 수요가 많고 소음이나 사이트 확보측면에서 육지에 비해 유리해 태양광-풍력 복합시스템 중심으로 HRES 단지가 확대되고 있다. 현재 국내의 HRES 단지 중 성공 사례로는 <그림 4-1>의 전라남도 진도

군 가사도의 하이브리드 발전 단지를 들 수 있다.⁽³⁸⁾ 이 단지는 2012년 이후 정부와 한국전력공사가 추진하고 있는 마이크로그리드(MG)를 이용한 에너지자립섬 시범단지로 지정되어 2013년 신재생에너지 기반 용·하이브리드 에너지시스템 및 계통연계 기술개발 연구과제의 지원을 받아 2014년 10월 최초로 태양광-풍력 하이브리드 발전 단지로 조성되었다. 에너지자립섬은 태양광, 풍력 등 신재생에너지와 배터리 등을 이용해 필요한 에너지를 스스로 생산하여 사용할 수 있는 섬을 말한다. 가사도는 현재 170여 가구, 290여 명이 거주하며, 평균 부하량은 95kW이다. 가사도에 구축된 설비로는 태양광발전 314kW(8개소), 풍력 400kW(100kW×4대)이고 비상용 디젤발전기(100kW×3대), 에너지저장장치(3MWh)와 에너지관리시스템을 갖추고 있다. 현재 발전량의 약 80%를 신재생에너지로 공급하고, 일사량이 좋은 날은 태양광발전만으로 전력공급이 가능하다. 사용하고 남은 전력은 에너지저장장치로 저장되고 100% 충전할 경우 24시간 공급이 가능하다. 풍력터빈은 초속 3m에서 발전을 시작 15m에서 100% 출력을 얻는다. 연간 약 3억2천만원의 전력비용을 절감하고 있다.

전라남도 고창군은 2013년 신재생에너지 기반 제로에너지타운을 조성하여 운영하고 있다. 실증단지에는 신재생에너지기술, 건물에너지 부하감소기술 등이 적용되고 단지 전체 100세대 중 29세대에 제로에너지기술을 적용했다. 설비로는 태양광(3kW), 태양열-지열 하이브리드 냉난방-급탕시스템(태양열 8kW, 지열 10.5kW)이 설치되었다.

전라남도 완도군은 도서지역의 디젤발전을 대체하기 위해 태양광-풍력 하이브리드 단지 사업을 추진했다. 완도군 소재 원도 등의 도서(40가구)를 신재생 자립섬으로 조성했으며, 설비로는 태양광 120kW(9~24kW/섬), 풍력 19.2kW(2.4kW/섬)와 기존의 디젤발전기 120kW(15kW/섬)가 운용되고 있다. 이외에 전라남도 신안군, 고창군, 완도군 및 제주특별자치도의 마라도와 가파도 등에 하이브리드 발전시스템이 설치되었다.

한편 국내 HRES의 단지 중 가사도 프로젝트는 한전이 에너지자립섬 구축의 성공 사례를 만들었다는 점에서 큰 의미가 있다. 가사도에서의 마이크로그리드 운영 노하우를 바탕으로 선진 기술을 보유한 한전과 국내 기업들이 힘을 모으면 캐나다, 중동, 중남미지역 등에 태양광, 풍력과 이들의 하이브리드 발전시스템에 대한 수출 가능성도 높아 보인다.

5-2. 해외

해외에 있어서 신재생에너지는 지역별 에너지 잠재량, 국가 정책(탈 원전 등)에 따라 적합한 신재생에너지가 활발하게 이용되고 있다. 예로서 덴마크, 영국, 독일, 스웨덴 등과 같이 풍력자원이 풍부하고 도서지역이 많은 북해 연안국들은 해상으로의 풍력단지 건설이 확대되고 있으며, 목재펠릿과 같은 바이오매스 연료 이용도 활성화되고 있다. 한편 국토가 넓고 사막 지역이 많은 중국, 미국 등에는 특히 태양광발전이 풍력발전과 함께 크게 확대되고 있다.

해외의 HRES 적용에 있어 덴마크의 삼소섬(Samsø island)은 대표적인 성공 사례로 알려져 있다.⁽⁴⁰⁾ 주민 4300명이 거주하는 삼소섬은 1997년 신재생에너지 개발을 시작으로 10년 만에 에너지 100% 자급자족을 이뤄냈다. 2000년까지 설치한 1MW 해상풍력터빈 11대로 섬 내 22개 마을에 전력을 공급하고 2002년에 10대를 추가 설치하여 23MW의 발전능력을 보유하고

있다. 또한 중앙에 바이오매스 보일러를 설치한 지역난방시스템으로 주택의 3/4에 난방을 공급하고 나머지 가정에선 석유난로를 태양열 집열장치 또는 바이오매스 보일러로 교체했다. 이를 통해 섬 전체 전력수요의 100%, 열수요의 70%를 공급한다. 이 섬은 지역주민, 관련기구 및 기관 투자로 운영되며 잉여전력(생산전력의 약 40%)은 판매한다.

다음은 영국 서튼(Sutton)에 위치한 탄소배출 제로 주거공동체, 베드제드(BedZed)가 또 하나의 사례가 된다.⁽⁴¹⁾ 이 단지는 화석에너지 대신 모든 주택에 태양광발전, 목재 열병합 자가발전과 같은 신재생에너지 기술과 자연채광, 슈퍼 단열재, 3중 유리창 등 에너지절약기술 적용으로 난방에너지의 66%, 수돗물 사용량의 36%를 절감하는 등 에너지제로에 가까운 친환경 주거단지를 구축했다. 저소득층, 자선단체, 환경단체, 건축사무소, 엔지니어링 회사 등의 협력으로 추진되었고 주거단지의 1/3을 저소득층에 임대하고 있다. 이러한 친환경 주거 단지의 성공으로 영국 정부는 2016년부터 세워지는 신규주택을 탄소 무배출 건물로 설계하도록 하였고 2020년까지 베드제드와 같은 에코타운 10개 건설 계획을 수립했다.

6. 맺음말

최근 환경문제에 대한 대응 방안의 하나로 소규모 자립형 전력망인 마이크로그리드에 대한 기술과 실용화가 진전되고 있다. 이러한 마이크로그리드 구축의 핵심적인 요소 중에는 HRES가 있다. 우리나라는 국토가 좁고 태양, 풍력 등 신재생에너지원의 잠재량이 빈약하므로 간헐적인 태양에너지와 풍력에너지와 같은 신재생에너지 이용에는 하이브리드 방식이 필수적으로 보인다.

우리나라는 에너지자립섬 추진 사업, 에너지신산업 사업화지원 사업 등의 공적지원 제도로 태양광-풍력발전시스템 중심의 HRES 설치에 관심이 늘어나고 있다. 하지만 지자체의 규제 강화, 정부기관과 민간사업자간에 전기공급단가의 이견 등으로 새로운 단지의 건설은 저조한 상태에서 머무르고 있는 것으로 보인다. 단지 운용에서도 신재생에너지로 100% 자립을 한 곳은 진도의 가사도 정도로 알려져 있고 대부분은 70%대의 자급률 수준으로 부족분은 디젤발전이 의존하고 있다.

HRES 확대를 위해 공공측면에서는 단지건설과 관련된 각종 허가제를 신고제로 바꾸는 등의 규제 완화와 관련 기준들의 확립이 필요하다. 신재생에너지단지의 입지제한(공원·학교부지 등)의 최소화화 기초단체별로 각각 다른 도로·마을과 신재생 발전소와의 이격거리, 소음 등의 기준의 정비와 통일이 이에 속한다. 또한 사업추진 방법에서도 주민과의 갈등 극복을 위해 유럽의 사례에서와 같은 주민참여형 모델(주주로 참여, 수익배분)이 바람직하며, 공공 지원에 있어서는 주관부서의 난립에 따르는 예산의 분산 및 중복 문제도 통합 운영하여 효율을 올릴 필요가 있다. 이상과 같은 규제 및 지원제도의 개선과 더불어 HRES의 최적화 기술, 제어기술 등의 개발과 적용 확대를 국내 신재생에너지 산업은 성장이 가능할 것으로 보인다.

<참고문헌>

1. Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu, “Hybrid wind-photovoltaic energy system developments: Critical review and findings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 2015, pp. 1135 - 1147
2. A. Hina Fathima, K. Palanisamy, “Optimization in micro grids with hybrid energy systems - A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015, pp.431~446
3. Joakim Widén, Nicole Carpman, Valeria Castellucci, David Lingfors, Jon Olauson, Flore Remouit, Mikael Bergkvist, Mårten Grabbe, Rafael Waters, “Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 2015, pp.356~375
4. Sunanda Sinha, S.S. Chandel, “Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic - wind based hybrid energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 2015, pp.755~769
5. Arabali A, Ghofrani M, Etezadi-Amoli M, Fadali MS, Baghzouz Y. “Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management”, *IEEE Trans Power Delivery* Jan 2013, 28(1), pp.162~170
6. Zhou Wei, Yang Hongxing, Fang Zhaohong. “A novel model for photovoltaic array performance prediction”. *Appl Energy*, 84(12), 2007, pp.1187~1198.
7. Yang Hongxing, Lu Lin, Zhou Wei. “A novel optimization sizing model for hybrid solar - wind power generation system”, *Sol Energy*, 81(1), 2007, pp.76~84
8. Zamani MH, Riahy GH. “Introducing a new method for optimal sizing of a hybrid (wind-PV-battery) system considering instantaneous wind speed variations”, *Energy Sustainable Dev*, 12(2), 2008, pp.27~33.
9. Paliwal Priyanka, Patidar NP, Nema RK. “A novel method for reliability assessment of autonomous PV - wind - storage system using probabilistic storage model”, *Int J Electr Power Energy Syst*, 55(0), 2014, pp.692~703.
10. Karaki SH, Chedid RB, Ramadan R. “Probabilistic performance assessment of autonomous solar - wind energy conversion systems”, *IEEE Trans Energy Convers*, 14, 1999, pp.766~772.
11. Chedid R, Rahman S. “Unit sizing and control of hybrid wind - solar power systems”, *IEEE Trans Energy Convers*, 12(1), 1997, pp.79~85
12. Huneke F, Henkel J, González JAB, Erdmann G, “Optimization of hybrid off- grid energysy stems by linear programming”, *Energy Sustainability Soc*, 2(7), 2012, pp.1~19.
13. Yang H, Zhou W, Lu L, Fang Z, “Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar - wind system with LPSP technology by using genetic algorithm, *Sol*

- Energy, 82(4), 2008, pp.354~367.
14. Yang H, Zhou W, Lou C, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar - wind power generations system", Appl Energy, 86(2), 2009, pp.163~169
 15. Shadmand MB, Balog RS, "Multi-objective optimization an design of photo-voltaic - wind hybrid system for community smart DC micro grid, IEEE Trans Smart Grid, 5(5), 2014, pp.2635~2643.
 16. Bashir M, Sadeh J, "Size optimization of new hybrid stand-alone renewable energy system considering a reliability index", In: Eleventh IEEE international conference in environment and electrical engineering(EEEIC), 2012. pp.989~994
 17. Ekren O, Ekren BY, "Size optimization of a PV-wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing, Appl Energy, 87, 2010, pp.592~598.
 18. Chedid R, Rahman S, "Unit sizing and control of hybrid wind - solar power systems, IEEE Trans Energy Conversion, 12(1), Mar 1997, pp.79~85
 19. Tazvinga Henerica, Zhu Bing, Xia Xiaohua, "Energy dispatch strategy for a photovoltaic wind diesel battery hybrid power system", Sol Energy, 108(0), 2014, pp.412~420
 20. Chunhua Liu KT Chau, Zhang Xiaodong, "An efficient wind photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine", IEEE Trans Ind Electron, 57(3), Mar 2010, pp.831~839
 21. Yaow-Ming Chen Yuan-Chuan Liu, Hung Shih-Chieh, Chung-Sheng Cheng, "Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV-wind power system. IEEE Trans Power Electron, 22(3), May 2007, pp.1070~1077
 22. Cheng-Wei Chen, Kun-Hung Chen, Yaow-Ming Chen. "A semi-isolated multi input converter for hybrid PV-wind power charger system", In: International power electronics conference(IPEC Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), 2014. pp.3592~3597
 23. AR Gautam, OP Mahela, S Singh, RN Mahia, "A double input SMV controlled dc-dc buck boost converter for solar PV-wind energy sources", In: Recent advances and innovations in engineering(ICRAIE), May 2014, pp.1~6
 24. Whei-Min Lin, Chih-Ming Hong, Chiung-Hsing Chen, "Neural-network-based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system", IEEE Trans Power Electron, 26(12), Dec 2011, pp.3571~3581
 25. Kabalci Ersan, "Design and analysis of a hybrid renewable energy plant with solar and wind power", Energy Conversion Manage, 72(0), 2013, pp.51~59
 26. Sungwoo Bae, Kwasinski A, "Dynamic modeling and operation strategy for a micro grid with wind and photovoltaic resources", IEEE Trans Smart Grid 3(4), Dec 2012,

pp.1867~1876

27. Tina G, Gagliano S, Raiti S, “Hybrid solar-wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment”, Sol Energy, 80(5), 2006, pp.578~588.
28. Sarkar S, Ajjarapu V, “MW resource assessment model for a hybrid energy conversion system with wind and solar resources”, IEEE Trans Sustainable Energy, 2(4), Oct 2011, pp.383~391
29. Bakos GC, Tsagas NF, “Techno economic assessment of a hybrid solar-wind installation for electrical energy saving”, Energy Build, 35(2), 2003, pp.139~145
30. Karaki SH, Chedid RB, Ramadan R, “Probabilistic performance assessment of autonomous solar - wind energy conversion systems”, IEEE Trans Energy Convers, 14(3), Sep 1999, pp.766~772.
31. Nehrir MH, La Meres BJ, Venkataramanan G, Gerez V, Alvarado. LA, “An approach to evaluate the general performance of stand-alone wind-photo- voltaic generating systems”, IEEE Trans Energy Convers, 15 (4), Dec 2000, pp.433~439
32. Ching Lee Shun. “Numerical estimation model of energy conversion for small hybrid solar wind system”, Sol Energy 86(11), 2012, pp.3125~3136
33. Hirose T, Matsuo H, “Stand alone hybrid wind - solar power generation system applying dump power control without dump load”, IEEE Trans Ind Electron, 59(2), Feb 2012, pp. 988~997
34. Paliwal Priyanka, Patidar NP, Nema RK, “A novel method for reliability assessment of autonomous PV - wind - storage system using probabilistic storage model”, Int J Electr Power Energy System, 55(0), 2014, pp.692~703
35. Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Leahy. M. “A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems”, Appl Energy, 87(4), 2010, pp.1059~1082
36. Sunanda Sinha, Chandel SS, “Review of software tools for hybrid renewable energy systems”, Renewable Sustainable Energy Rev, 32(0), 2014, pp.192~205.
37. 임중환, “부하특성에 따른 복합발전시스템의 최적용량 설계 및 경제성 분석”, 한국정밀공학회지, 30(10), 2013, pp.1103~1109
38. Theme Focus ; 전력질주, “국내 최초 에너지 자립섬 ‘가사도’”, 전기저널, 2015 JULY, pp.74~79
39. Lagorse J, Simoes MG, Miraoui. A, “A multi agent fuzzy-logic-based energy management of hybrid systems”, IEEE Trans Ind Appl, 45(6), 2009, pp.2123~2129
40. <http://www.ilemonde.com/news/articleView.html?idxno=7290>
41. <http://blog.naver.com/seulye90/120173958692>

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.