**원전 출력 제어와 재생 에너지 간 그리드 충돌 문제 원인 분석 및 해결 방안**

저자: 박준호 배효현 이승재 문시호 손우영 여청기 강동호 원예성 김채원 황영준 도현수 이재원 박영빈 박준서 이찬빈 이승환 박준혁

경상북도 김천시 송설로 90 (김천중고등학교)

**ABSTRACT:** 대한민국이 2050 탄소 중립 정책을 추진함에 따라 원자력 기반의 에너지 생산 방법에서 재생에너지를 이용하는 지속 가능한 방법으로 바꾸는 에너지 전환 시대가 열렸다. 하지만 태양광 및 풍력 발전과 같은 신재생에너지는 변동성이 높아 전력 수급의 불균형으로 이를 해결하기 위한 ‘출력제한’이 발생한다. 출력제한 과정에서 전력이 버려지고 막대한 경제적 손실을 초래하므로 시급한 해결책이 필요성을 느끼고 탐구를 진행하게 되었다. 우선 공급 불안정과 에너지 자원 간 충돌 현상의 원인을 원전의 특성과 에너지 그리드의 한계를 통해 분석하고 현재는 ESS기술을 통해 에너지 과잉 생산 문제를 보완하고 있다는 것을 파악하였다. 하지만 ESS 화재 혹은 전력을 효율적으로 이용하기 위한 제어시스템이 필요하다는 기술적 한계가 있고, 제도적인 측면에서도 전력시장의 구조개편을 통한 실시간 시장의 도입과 보조서비스 가치의 합리화, 전력구매제도 개선 등의 과제가 존재한다. 이를 바탕으로 본 연구는 신재생에너지와 원자력발전소의 에너지 불균형을 줄이고, 과잉 생산으로 남는 잉여 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 그리드 시스템을 설계하는 것을 목적으로 제주도에서의 에너지 그리드의 적용을 구상하였다.

**서론 ( Introduction )**

(1) 에너지 전환 시대 배경 제시 - 국내에서는 원자력발전에 대한 입장을 놓고 아직도 치열하게 논쟁 중이긴 하지만, 에너지 공급 체계를 화석연료와 원자력 기반의 지속 불가능한 방법에서 재생에너지를 이용하는 지속가능한 방법으로 바꾸는 에너지전환이 인류에게 주어진 시대적 과제라는 점은 분명하다. 화석연료나 광물은 결국 언젠가는 고갈될 것이고, 각 국가들은 에너지 자원을 국가안보 차원에서 다루고 있으며, 대기오염과 기후위기의 문제를 풀기 위해서도 에너지전환 말고는 대안이 없기 때문이다. 결국, 에너지전환 과제는 이제 선택이 아니라 필수의 시대에 접어들었다.

(2) 신재생 에너지 문제점 - 하지만 신재생에너지로 인해 발생하는 출력제어라는 문제점이 대두되고 있다. 신재생 에너지를 생산하고 싶어도, 전력 생산을 중단하라는 명령을 받는 상황이 자주 일어나고 있다. 신재생 에너지의 전력의 과잉 공급으로 원전 발전을 의도적으로 줄이는 감발 운전이 늘어나고 있는 것도 문제이다. 출력 제한이란 전력의 수급 균형과 계통 안정도를 유지하기 위한 조치이다. 우리나라의 전력 계통에서는 단위 시간당 전력의 공급과 수요를 일치시켜 일정한 주파수와 송배전 수준에 맞는 전압을 유지해야 한다.

그런데 만약 수급 불균형이 발생하거나 공급이 급증해 출력량에 큰 변화가 생길 경우, 계통주파수와 전압이 불안정해져 계통 안정도에 영향을 미칠 수 있고, 이에 따라 대규모 정전과 같은 사고가 발생할 수 있다. 이를 만연에 방지하고자 전력거래소는 수급 불균형 혹은 출력량에 큰 변화가 생겼을 때 발전사업자에게 발전기 출력량을 제한하라는 명령을 전달한다.

재생에너지에 대한 출력제한의 근본적인 원인은 바로 ‘변동성’과 관련이 있다. 태양광, 풍력발전과 같은 재생에너지의 출력량은 일조량과 풍속이라는 자연 현상에 따라 달라진다. 즉, 재생에너지가 확대될수록 출력량의 예측성이 떨어지기 때문에 전력의 수급 균형과 계통 안정도를 유지하는 것은 더욱 어려워진다.

게다가 대형 기저 발전원(화력발전, 원자력발전 등)을 중심으로 구성된 우리나라의 전력 계통에서는 출력을 유연하게 조절하는 것이 쉬운 일이 아니다. 이에 따라 재생에너지의 변동성에 대처할 수 있는 유연성 자원이 부족한 경우 재생에너지 출력제한 조치가 불가피할 수 있다. 특히 전력수요가 낮은 경부하 기간 또는 하루 중 풍력·태양광 발전량이 겹치는 낮 시간대에 수급 불균형이 일어나 전력 부하가 급격히 떨어지는 덕커브 현상이 심화하는 경우에도 재생에너지 출력제한 조치가 가해질 수 있다.

(3) 경제적 피해 – 출력 제어 조치로 버려지는 전력은 약 수 조 원에 달할 전망이다. 제주에너지공사는 현재 상태로 보면 2034년에 제주지역 태양광 및 풍력 발전의 출력 제한 횟수가 연간 326회로 증가할 것으로 추산되며, 출력 제어량은 발전량의 40% 정도인 시간당 293만1천㎿이 될 것으로 예상된다. 이로 인한 누적 손실은 1조2천600억원 이상으로 분석되고 있다.

(4) 현 상황 - 정부는 이런 문제를 해소하기 위해 관련 기술을 도입하거나 하드웨어적인 시설을 설치하는 작업을 하고 있다. 이에 대표적인 예시가 완도와 제주도를 잇는 세 번째 해저케이블 공사이다. 두 번째 대안은 전력 공급의 가장 바탕이 되는 화력발전, 이른바 머스트런 발전량을 줄이는 것이다. 세 번째 대안은 남는 전기를 배터리에 저장하는 방법인 ESS의 도입이다. 마지막 기술적 대안은 남는 신재생에너지를 다른 에너지원으로 전환하는 P2X 기술의 도입이다.

(5) 에너지 시스템의 미래 - 전문가들이 제안하는 미래 에너지 시스템은 에너지 안보가 가능하고 지속가능한 발전, 기후변화 대응이 가능해야 한다. 그러면서 탄소제로 정책을 위한 기술적 문제를 해결하기 위한 대안으로 원자력과 재생 에너지 하이브리드 시스템이 제안되었다. 이를 통해 전력망 운영의 안정성은 물론 전력 품질 유지도 가능하다는 것이다.

(5) 연구의 목적 - 이에 본 연구에서는 신재생 에너지와 원자력 발전소의 에너지 불균형을 줄이고, 과잉 생산으로 남는 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 차세대 그리드 시스템을 설계해 보려고 한다.

**본론**

**(1) 공급 불안정성 및 에너지 자원 간 충돌 현상의 원인**

이처럼 에너지 그리드의 주 에너지인 태양광, 풍력 등 신재생에너지는 일조량, 기후 등 자연을 이용한 것으로 변동성과 불확실성이 크다는 특징이 있다. 그 중에서도 현재 국내 재생 에너지의 대부분을 차지하는 태양광 발전의 경우, 덕 커브(Duck Curve)라는 문제점으로 인해 공급 불안정성이 발생한다. 덕 커브(Duck Curve)란 신재생에너지, 특히 태양광 발전량이 증가하면서 일출에서 일몰 사이인 Daytime에 순 부하가 급감하며 나타나는 부하곡선을 뜻한다. 재생 에너지 비중이 증가하기 전에는 전력 수요가 하루 2회 소폭 상승 및 하강하는 ‘카멜 커브’를 보이며 예측할 수 있었으나 태양광 발전 설비 보급의 증대와 앞서 언급한 바와 같이 에너지 그리드를 활용하며 태양광 에너지의 비중이 더욱 높아지게 되었고, 이에 따라 변동 폭이 증가하며 덕 커브의 형태를 보이게 되었다. 덕 커브로 인해 수요 및 공급 불확실성이 증가하는 등 전력망을 안정적으로 운영하기 어려운 문제가 발생하였다. 순 부하량의 예측 정확성이 떨어졌고, 운영유지비의 부담이 가중되었다. 또한 태양광 발전 보급 확대에 따라 이런 불안정성은 더욱 심해질 것이라는 전망이 있다.

<원전의 특성>

원자력 발전이란 핵분열이 연쇄적으로 일어나면서 생기는 막대한 에너지를 통해 에너지를 발전해내는 기술을 의미한다. 우라늄 1g이 핵분열할 때 나오는 에너지는 석유 9드럼, 석탄 3톤을 태울 때 나오는 에너지량과 동일한만큼 엄청난 양의 에너지를 생산할 수 있다. 원전은 이처럼 높은 에너지 효율을 지니고 있지만, 그 이면에는 상당한 위험성을 지니고 있다. 원자력 발전으로 생성되는 핵폐기물은 기후 위기에 버금가는, 혹은 그 이상의 위험을 초래할 수 있다. 원전에서 나오는 고준위 핵폐기물은 1g만으로도 수천 명의 사망자가 발생할 수 있을 수준의 독성을 지녔으며, 사람이 1m 근접 시 10~20초면 즉사하는 수준의 방사성 물질을 방출한다. 이러한 방사능 성분이 사라지는 데는 약 10만 년이 소요된다. 그러나 인류는 아직 원전 폐기물을 안전하게 보관할 기술을 확보하지 못한 채, 임시저장 시설에 보관하고 있다는 문제점이 존재한다.

<에너지 그리드의 한계>

대한민국의 경우, 전기료는 타 국가 대비 저렴한 편이다. 평소 전기를 저렴하게, 편리하게 이용할 수 있다는 점은 큰 장점이지만, 에너지 그리드의 상용화에서는 오히려 한계로 작용한다. 과거에는 REC(Renewable Energy Certificates)가 있어서 생산한 전력을 비싸게 판매할 수 있었는데, 이 제도가 일몰되었다. 한국은 전기료가 저렴하여서 에너지 그리드 구축을 위한 투자 비용에 비해 이익을 내기 어려운 상황이기도 하다. 에너지 그리드 구축 비용을 수익으로 회수하려면, 짧게는 5~10년이 있어야 회수할 수 있다는 전망이 즐비한데, 이 기간도 전력 거래가 제도적으로 마련이 되었을 대 경우다. 결국, 현재 미진한 제도와 비용적인 부문의 한계가 존재한다. 이처럼, 현재 대한민국의 경우, 스마트그리드의 경제적 효율이 낮으며 제도적 관건 또한 충분히 갖추어지지 못했다고 할 수 있다. 또한, 스마트그리드의 보안 문제 역시 한계라고 할 수 있다. 에너지 그리드에 대하여 소규모 분산 전원공격, 양방향 통신 프로토콜 공격, 보안에 취약한 스마트 미터 등에 대한 공격 등이 가능하다. 사이버 테러 공격자는 일단 공격 거점을 확보하게 되면 연계된 네트워크를 통해서 전력 거래 관련 시스템을 포함한 에너지 그리드 전체 전력망을 공격할 수 있어 에너지 그리드를 활용함에 있어 큰 걸림돌이 된다.

**(2) 재생에너지 현황(2050 탄소 제로 정책) 및 가격 경쟁력(대한민국의 재생에너지 발전비율, 발전소 분포, 원전 비율, 분포)**

현재 대한민국에서는 2050 탄소 중립 정책을 추진하고 있다. 여기서 탄소 중립이란 인간의 활동에서 생성되는 온실가스의 배출을 최대한 줄이고. 남은 온실가스는 흡수, 제거하여 실질적인 탄소 배출량을 0으로 만드는 정책이다. 지구 온난화로 인해 여러 이상기후들이 발생하고 있고, 최근 30년 사이에 지구 평균 온도가 1.4℃ 상승하며 전 세계적으로 온난화 경향이 심해졌다. 이에 심각성을 느끼고 1997년 교토의정서 채택, 2015년 파리협정 채택 등을 함으로써 지구 온난화를 막기 위해 노력해 왔다. 파리 협정의 목표는 산업화 이전 대비 지구 평균 온도 상승을 2℃보다 훨씬 아래로 유지하고, 1.5℃로 억제하기 위해 노력하는 것이다. 세계 각국은 2016년부터 자발적으로 온실가스 감축 목표를 제출했고, 모든 당사국은 2020년까지 ‘파리협정 제4조 제19항’에 근거해 지구평균기온 상승을 2℃ 이하로 유지하고, 나아가 1.5℃를 달성하기 위한 ‘장기저탄소발전전략 (LEDS\*)’과 ‘국가온실가스감축목표(NDC\*\*)’를 제출하기로 합의했다.

그래서 탄소를 배출하지 않기 위해서 온실가스를 만들어 내지 않는 에너지원인 신재생 에너지에 초점을 두고 있다. 현재 한국의 에너지 분야는 2018년 1차 에너지 공급량의 85%를 차지한 화석연료의 높은 비중, 1차 에너지 공급량의 84%에 달하는 에너지 수입 의존도, IEA 국가 중 가장 높은 산업용 에너지 사용을 보이고 있다. 지난 2018년 한국은 에너지 공급 중 재생에너지 비중에 있어 IEA 국가 중 최하위를 기록했다. 따라서 한국 정부는 재생에너지의 발전 비중을 2030년까지 20%, 2040년까지 30~35%로 확대하여 에너지 사용에서 석탄과 원자력발전의 비중을 줄이려고 노력하고 있다고 한다. 현재는 그 초기 단계인 수소 산업을 육성함으로써 에너지 전환 정책을 펼치고 있다. 뿐만 아니라 그린뉴딜 정책을 추진함으로써 강력한 산업 수출 기반을 유지하는 동시에 산업 분야를 탈탄소화하고 경제 활동과 에너지 소비를 디커플링하는 것이다. 한국 정부는 에너지의 전환을 위해 디지털화가 가져다주는 기회를 활용함으로써 4차 산업혁명이 제시하는 이점을 통해 경제 발전 뿐만 아니라 에너지 전환을 적극 지원할 것이라고 밝혔다. 빅데이터 플랫폼 구축, 5G 네트워크 및 인공지능(AI)의 산업적 융합, 스마트 워크와 저탄소 산업 단지 활성화 등이 방안으로 제안되면서 정책 가능성이 보다 늘어났다. 그리고 친환경 에너지 과세 제도를 발전시키며 탄소 배출을 줄이려는 노력을 보이고 있다.

이러한 정책을 뒷받침하기 위해 발전소들도 여럿 건설되고 잇다. 화력, 수력, 풍력, 태양광 등의 에너지 분야에서 쓰이는 발전소들이 더 많이 건설되고 있다. 화력에너지의 경우, 2021년 기준 61개소가 설치되었다. 대부분은 한국전력이 건설하였고 주로 서쪽에 많이 분포하고 있다. 수력 발전소는 22개소가 운영되고 있고 전 지역에 골고루 배치되어 이용되고 있다. 이와 같이 대한민국 정부는 재생에너지의 발전을 위해 여러 가지 신재생에너지를 만들어내기 위한 발전소를 세우고 있다.

이에 보답하듯 재생에너지의 발전 비용도 빠르게 감소하고 있다. 2021년 1월 31일에 에너지경제연구원이 IEA의 ‘전력생산 비용전망’ 최신 보고서를 분석한 결과, 2025년 한국에서 LOCE(균등화 발전단가)가 가장 저렴한 발전은 원자력으로 나타났다고 한다. 원전의 LOCE는 53.30달러로 가장 낮았고 재생에너지 중에서는 태양광 에너지가 상업용이 98.13달러, 대규모 발전단지는 96.56달러였다. 세계적으로 보았을 때, 한국 뿐 아니라 다른 나라들도 원전의 비용은 늘어나고 있지만 재생에너지 생산 비용은 낮아지고 있다. 에너지경제연구원은 최근 신규 원자력 발전소는 건설 기간 지연 등의 이유로 높은 비용이 들었지만, 재생에너지는 많은 해외 주요국에서 가장 저렴한 발전원이 되었다고 한다. 이를 보면 이후에는 재생에너지의 생산 비용이 점점 하락하며 곧 완벽한 에너지원이 될 것이라 예측할 수 있다.

우리나라의 태양광 폴리실리콘과 웨이퍼는 중국의 저가 제품에 밀려나 경쟁력이 약화되었고 태양전지와 풍력 산업은 경쟁력은 있으나 점점 그 추이가 낮아지는 경향을 보인다고 했다. 이를 통해서 알 수 있듯이 아직까지는 우리나라의 재생에너지 경쟁력이 전 세계적으로 보았을 때, 약하다고 할 수 있다. 그러나 현재, 지속적으로 발전 중인 재생에너지들과 점점 하락하고 있는 재생에너지 생산 비용을 보면 머지않아 다른 국가들의 재생에너지와의 경쟁력을 확보할 수 있을 것이라고 전망된다. 그리고 정부도 이를 개선하기 위해 경매를 활용한 경쟁과 재생에너지 전원에 대한 시장통합을 고려한 기존의 RPS 제도의 수정이나, 해외의 사례와 같이 RPS제도를 폐지하고 FiP로의 전환이 필요한 시점이라고 생각하여 정책들을 제안하고 수정하며 경쟁력을 가지기 위한 준비를 하고 있다.

**(3) 과잉(잉여) 에너지를 특정 형태로 저장시켜서 이를 보완할 방법 (ESS기술, 수소 형태로 저장 등 참고)**

재생에너지나 원자력 발전으로 인해 과잉 에너지가 발생하게 되는데, 이를 출력 제한으로 해결할 수 있다. 예를 들어, 제주도에서는 재생에너지의 비율이 점차 증가하면서 2022년 기준 19.2%로 5년 전보다 약 2배나 증가하였다. 이로 인한 재생에너지의 변동성과 공급 과잉이 발생해 과도한 에너지 생산으로 인한 전력망의 불안정성을 막기 위한 방안으로 태양광이나 풍력 발전량을 제한한다. 이렇게 발전을 제한하게 되면 에너지가 손실된다는 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해 에너지를 다른 형태로 바꾸어 저장하여 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는데, 이를 섹터 커플링(Sector coupling)이라고 한다. 이것의 핵심이 되는 ESS(에너지 저장 체계)는 에너지를 저장하였다가 필요할 때 이를 사용할 수 있게 하는 체계 전체를 의미한다. ESS에는 다음과 같이 다양한 종류가 존재한다.

이 중 주목받고 있는 기술은 다음과 같다.

텍스트, 스크린샷, 폰트, 번호이(가) 표시된 사진

자동 생성된 설명

1) 가스 저장 방식

가스 저장 방식, 즉 p2g(power to gas) 기술은 물을 전기 분해하여 수소를 생산하는 수전해와 이산화탄소를 메탄으로 바꾸는 이산화탄소 메탄화로 두 종류가 있다. 수전해는 남는 전력으로 PEMEC, SOEC등을 이용해 물을 수소로 바꾼다. 변환된 수소를 수소차에 바로 사용하거나 연료전지에 연료로 사용해 전기로 다시 변환시킬 수 있다. 이때 수전해 방법에 따라서 효율이 크게 변화하기에 적절한 방안을 택하는 것이 중요하다. 다음으로 이산화탄소 메탄화는 수소와 이산화탄소를 반응시켜 메탄을 만드는 것을 말한다. 앞서 소개한 수전해 기술과 이산화탄소 메탄화 기술을 용합시켜 후자의 수소 공급을 원활하게 할 수 있을 것 같다. 이때 반응시키는 촉매의 종류에 따라 니켈기반 고체 촉매를 사용하는 열화학적 메탄화 기술과 미생물을 사용하는 생물학적 메탄화 기술로 나누어진다. 두 기술은 각각 장단점이 존재하는데, 열화학적 메탄화 기술은 이미 상용화 되어있는 촉매를 사용하기에 활용하기 쉽다는 장점이 있지만, 촉매 반응을 통한 높은 압력과 온도유지를 위한 에너지사용으로 인해 효율이 떨어진다는 단점이 존재한다. 생물학적 메탄화 기술은 미생물을 사용하기에 상대적으로 구성이 단순해 경제성 확보가 용이하다는 장점이 있지만, 아직 많이 개발되지 않은 분야로 상용화가 어렵다는 단점이 있다.

2) 이차전지 이용

우리가 흔히 사용하는 휴대폰, 노트북 같은 전자기기에 들어있는 재충전이 가능한 이차전지를 통해 에너지를 저장해 필요할 때 사용할 수 있다. 이차전지에는 일반적으로 많이 사용하는 리튬 이온 전지와 요즘 주목받고 있는 나트륨 이온 전지가 있다. 이차전지를 이용하여 에너지를 저장하기 위해서는 대용량 에너지를 저장할 수 있어야 하고, 수명이 길어야 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 보인다. 전기차에서 수명이 다한 배터리를 이러한 ESS에 사용하는 기술을 UBESS라고 한다. UBESS는 충전 용량과 재충전 횟수가 반비례를 이룬다는 점을 이용한다. 또한 플로우 배터리라는 기술이 있는데, 이 플로우 배터리란 별도의 탱크에 저장된 양극과 음극의 두 가지 전해질 용액을 사용하는 이차전지의 종류 중 하나이다. 기존의 이차전지 배터리와 달리 고정된 전극과 유동적인 전해질을 가지고 있어 전력과 에너지를 분리할 수 있다. 이를 이용하여 단기간에 많은 양의 전력을 공급하거나 장기간에 걸쳐 적은 양의 전력을 공급하는 등 전력 출력을 임의로 조절하기 쉽다는 장점이 있다. 또한, 전해질을 담는 탱크의 용량을 키움으로써 배터리의 용량을 쉽게 늘릴 수 있다.

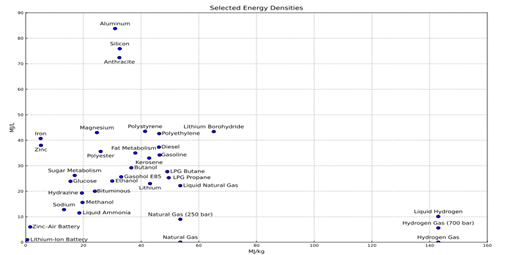
3) 플라이휠

플라이휠은 남는 전력을 회전체의 회전에너지로 변환시켜 저장한 다음 필요할 때 전력 회생이라는 과정을 통해 전기 에너지로 다시 변환하는 것이다. 이는 앞서 설명한 화학적으로 에너지를 저장하는 두 방식과 다르게 물리적인 방식으로 에너지를 저장하기에 더 안전하고 수명이 길다는 장점이 있다. 이때, 초전도체 위에서 영구자석의 부상력을 이용한 베어링을 사용하는 초전도 플라이휠은 매우 높은 효율과 안정성을 가질 수 있다는 장점이 있다. 이는 초전도체 베어링은 일반적인 기계 베어링과 달리 마찰로 인해 발생하는 에너지 손실이 거의 없기 때문이다.

4) 탄소나노튜브

흑연의 전력 저장 용량은 372 mAh/g인데 비해 탄소나노튜브의 저장 용량은 1400 mAh/g이상으로 압도적으로 많은 전력을 저장할 수 있다. 탄소나노튜브는 또한 탄소나노튜브는 부피 대비 표면적이 넓다. 이로 인해 전극과 전해질과의 접촉 면적이 넓어지면서 향상된 성능의 배터리를 제작할 수 있다. 이러한 탄소나노튜브를 활용한 예로, 화학 에너지를 저장하는 배터리와 달리 전기 에너지 그 자체를 저장하는 커패시터의 전극에 탄소나노튜브를 사용할 수 있다. 커패시터는 배터리에 비해 매우 소량의 에너지만 저장할 수 있는데, 탄소나노튜브를 사용함으로써 에너지 저장량을 늘릴 수 있다.

에너지 밀도는 단위 부피 또는 단위 무게 당 가지고 있는 에너지의 양을 의미한다. 전지나 연료의 효율을 나타내는 지표이며, 에너지 밀도는 단위 중량당 혹은 체적당 에너지를 얼마나 저장할 수 있는지로 측정한다. 에너지 밀도가 높다면 같은 에너지를 가지고 있다 하더라도 부피가 작거나 무게를 적게 만들 수 있기 때문에 ESS기술에서는 에너지 밀도가 높은 것이 중요하다.



(4) 열손실을 줄일 수 있는 최적화 방법.

리튬 이온 전지의 열 손실은 전지의 효율성과 수명에 중요한 영향을 미친다. 리튬이온 전지 내부의 열을 효과적으로 관리하기 위해서는 열 전도성이 우수한 소재를 사용해야 한다. 열 전도성이 높은 소재는 열이 전지 내부에서 균일하게 분산되어 열 손실을 줄일 수 있다.

열 전도성이 뛰어나면서도 연성이 높은 고분자 소재는 전지 내부의 열을 효과적으로 분산시키는 역할을 한다.

[열 전도성이 높은 고분자 소재]

탄소섬유, 탄소계 필러들은 열전도도가 높고 기계적 물성이 우수하며 가벼워서 고기능성 복합재료를 요하는 분야에서 응용이 기대되는 신소재이다. 탄소나노튜브는 3,000W/m.K 이상의 우수한 전기전도도 값을 가지고 큰 종횡비로 인해 소량의 첨가만으로 열전도도의 향상을 기대할 수 있다. 꿈의 신소재로 불리는 ‘그래핀’ 은 탄소 원자가 벌집 모양으로 연결된 얇은 막 구조 형태다. 두께가 0.35nm에 불과할 정도 얇지만 구리보다 100배 높은 전기 전도성과 다이아몬드보다 2배 높은 열전도도를 가지고 있으며 강철보다 강한 것으로 알려져있다. 대만 National Tsing Hua 대학의 Ma 교수팀은 그래핀에 파이렌 유도체와 π-π stacking을 통해 에폭시 매트릭스와 그래핀의 상용성을 개선하여 에폭시 매트릭스와의 복합체를 형성하여 열전도도가 증가함을 알아냈다. 그래핀 함량 4phr에서 매트릭스 수지대비 열전도도가 10배 증가하였으며, 동일함량의 MWCNT를 이용한 복합체에 비해 열전도가 5배 이상 증가됨을 알아내었다.

SOEC 시스템에서의 열 손실을 최소화하기 위해 절연재를 최적화하는 연구가 중요한데, 최근에는 세라믹 파우더를 방열 소재로 사용한 고분자 복합재료가 널리 사용되고 있다. 특히 Al2O3, SiC등의 세라믹들은 높은 열전도도와 절연 특성을 가지고 있어 열전도성 소재로 각광받아 왔다. 일반적으로 세라믹 고분자 복합재료의 열전도도는 8.2 W/m.K이다. 이는 세라믹 소재의 분자 구조와 결정 구조에 기인한다. 세라믹 소재는 일반적으로 분자 구조의 밀도가 높다. 고밀도 구조는 열 전달을 용이하게 하고, 분자 간의 밀접한 접촉과 높은 밀도는 열이 빠르게 전달되도록 한다. 또한 세라믹 소재는 보통 결정 구조의 밀도가 높다. 결정 구조의 밀도는 원자 또는 이온 사이의 거리와 산화 작용의 강도에 의해 결정된다. 높은 결정 구조의 밀도는 열이 빠르게 전달되도록 한다.

**(5) 한계(기술적, 상용화)**

Ess 기술의 한계

에너지저장장치가 태양광발전과 함께 사용되면서 재생에너지의 단점을 보완할 수 있지만 이에 따른 문제점도 발생하고 있다 바로 ESS 화재이다. ESS 시스템에 사용되는 배터리는 리튬이온 전지로 그 특징은 다음과 같다.일반적으로 리튬이온 배터리는 가볍고, 자가 방전에 의한 전력손실이 적고, 고 에너지 밀도와 출력 전압을 가지고, 무게대비용량이 크고, 원하는 크기로 제작이 용이하다는 장점을 가지고있다. 하지만 장시간 고온 노출 시 발화, 충격에 의한 양극 접촉으로 폭발 등 안전 문제가 크며, 과충전 시 내부 온도 상승으로인한 폭발 위험성 있다. 또한 물과 접촉 시 발열반응을 일으켜폭발할 위험이 있다. 리튬이온전지는 위와 같은 특징이 있어 실제 적용할 경우 주의깊게 취급되어야 한다.

또 다른 문제점은 Ess의 보급이 전력시스템이 끼치는 부정적인 영향이다.

이는 Ess의 충전,방전 패턴 특성에 기인한 문제로 ess 보급이 확대될수록 전력시스템 관리상 복잡한 문제가 출현하기 때문인것으로 보인다. Ess는 방전시 주파수를 상승시키고 충전시에는 주파수를 하락시키는 작용을 하는데 충전,방전을 제어하지못하면 주파수 요동이 나타나고 배터리가 완전히 방전되면 전력시스템에서 탈락하는것과 유사한 효과가 발생한다. 따라서 ess를 경제적이고 효율적으로 이용하기 위해서는 전력시스템 차원에서의 충전 방전을 최적화 할 수 있는 제어시스템이 필요하다.

스마트 그리드 문제점

통신망이 필수인 만큼 정보유출 위험이라는 단점이 존재한다. IoT 월트 투데이에 따르면 스마트그리드는 업데이트 시기를 놓쳤을 때나 네트워크를 공유할 경우 해킹에 노출될 수 있다는 문제점이 있다.

P2x기술

P2X는 재생에너지 등 전력을 수소, 열, 기타 합성연료 형태로 저장하는 방식으로 재생에너지 전력으로 수소를 생산할 때 X는 수소가 되며 보통 P2G(Power-to-gas)로 명명된다. P2G방식에서 문제점은 재생에너지의 발전비중이 낮고 비용이 높은 것과 수소의 생산 가능 용량도 아직 낮은 수준이다.

그리고 제도적인 측면에서도 풀어야할 과제가 존재한다 전력시장에 필요한 제도적 개선사항으로는 전력시장의 구조개편을 통한 실시간 시장의 도입과 보조서비스 가치의 합리화,송배전 비용의 분리 및 전력구매제도 개선 등이 있다.

**결론**

이를 통해 탐구한 내용을 바탕으로 제주도에서의 에너지 그리드의 적용을 구상해보았다. 우선, 제주도의 현재 발전소의 위치를 코딩을 통해 알아보았다.

지도, 아틀라스, 텍스트이(가) 표시된 사진

자동 생성된 설명

-제주시 풍력 발전소 현황

지도, 텍스트이(가) 표시된 사진

자동 생성된 설명

-제주시 태양광 발전소 현황(2000여개중 700여개만 표시함)

텍스트, 스크린샷, 소프트웨어, 멀티미디어 소프트웨어이(가) 표시된 사진

자동 생성된 설명

텍스트, 스크린샷, 소프트웨어, 멀티미디어 소프트웨어이(가) 표시된 사진

자동 생성된 설명

차례대로 데이터베이스에서 지역 이름을 통해 위도와 경도를 찾는 프로그램, 구한 위도와 경도를 통해 지도에 표시하는 프로그램이다.

이 지도를 바탕으로 에너지 그리드의 에너지 효율 및 실효성을 높일 방안을 다음과 같이 구상해보았다.

방법 1

제주도는 재생에너지의 잉여 문제를 완화시키기 위해 공급측 대책을 적용하여 신재생수용한계량을 확대하고 있으며, 수요를 증가시켜 수용 한계를 늘리려는 노력을 하고 있다. 이런 노력에 대하여 고민해본 결과, 플러스DR 제도를 구상하였다.

플러스DR 제도는 소비자들의 자발적 참여에 의한 수요를 증대시키는 제도로서 제주지역에 신재생 출력제어 발생시, 플러스DR 수요자원이 수요를 증대하여 풍력발전 출력제어량을 줄이는 제도이다. 플러스DR 제도를 시행함으로써 잉여전력을 사용하는 사람들에게 돈을 준다는 것을 알게된 사람들이 남은 잉여전력을 사용하도록 유도하여 잉여전력을 모두 소비하는 것이 목적이다. 이를 통해 버려지는 잉여전력 없이 모든 에너지를 사용할 수 있게 된다.

제도 도입 초기에는 낮은 수익성으로 고객 확보가 어려워 많은 고객이 참여하지 못하고 있을 것으로 예상되지만, 요증대 제도라는 낯선 환경에 잘 적응하지 못해 참여실적은 예상보다 낮은 수준이지만, 참여고객 증가와 플러스DR 참여 횟수가 늘어나게 되면 가시적인 수요증대 효과를 확인할 수 있을 것으로 전망한다. 플러스DR 활성화를 위해서는 제주지역 내 수요자원 추가확보와 함께 신재생 잉여전력을 활용하여 열, 수소,운송 등에 활용할 수 있는 대규모 수요 시설을 발굴하기 위한 노력이 필요할 것이며, 소비자들이 전력수요에 탄력적으로 대응할 수 있는 역량을 보유할 수 있게 가정,상가 등에서 사용할 수 있는 소규모 에너지저장장치 보급 등의 새로운 정책이 필요한 것이다. 제주지역은 앞으로도 신재생 보급이 꾸준히 증가될 예정으로 신재생 수용한계량 확대를 위한 공급측 대책확대, 플러스DR, 제주지역 TOU 제도개선 등 수요측 대책 마련과 함께 전력-비전력 부문간 결합기술인 섹터 커플링을 통한 잉여전력 활용 대책 등을 통해 신재생 수용능력을 증대하기 위한 노력이 필요하다.

방법 2

전력저장장치(ESS)는 HEV, EV 등의 수송용 에너지 분야를 중심으로 리튬 이온 전지의 대용량화, 장기수명화 연구가 진행되어 대형 리튬이온 전지의 상용화가시작되고 있다. 육지에 설치되어 있는 336MW 주파수 조정용 ESS의 알고리즘은 정상모드, 과도모드, 출구제어모드의 3단계로 이루어져 있으나, 제주도에 설치하는 40MW 주파수조정용 ESS의 알고리즘은 HVDC의 주파수제어 영향을 고려하여 육지계통의 ESS의 알고리즘과는 다르게 이루어져 있다.

제주지역 FR-ESS의 제어알고리즘에 대한 적정성을 알아보기 위해 탈락 고장에 대한 자료를 찾아보았고, 발전기 탈락 시 제주지역의 계통주파수는 하락하였다가 HVDC 출력 증가및 ESS 방전에 의해 주파수가 60Hz로 회복된다. 그과정에서 주파수가 부동대역 경계에 도달하였을 때 ESS 출력의 방전 및 정지 과정을 반복하여 주파수가 진동되는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 진동 현상을 해소할 수 있는 ESS의 주파수 부동대역 초과 시 ESS의 출력을 0에서 선형적으로 제어되도록 개선하는 방법과 0.2Hz 변동시 ESS의 전 출력이 가능하도록 속도조정률을 기존 0.33%에서 0.27%로 변경하는 FR-ESS의 주파수제어 알고리즘 개선 방법을 제안하였다.

텍스트, 라인, 도표, 번호이(가) 표시된 사진

자동 생성된 설명

향후 신설되는 50MW ESS를 반영하여 최적으로 안정적인 계통운영이 될 수 있도록 FR-ESS의 적정부동대역, 적정 속도조정률 등 최적의 운전전략을 추가적으로 검토해 볼 필요가 있을 것으로 기대된다.

방법 3

출력제한을 줄일 수 있는 역송 HVDC를 구상하였다. 제주 역송 HVDC를 구축하기 위한 가정은 다음과 같다. 제주도는 육지와 비교하여 발전기들의 숫자와 설비 비용이 적고 발전기 단가의 편차가 커서 모든 거래시간에 역송운전을 시행한다고 가정하면 무의미한 결과가 도출될 수 있다. 따라서 제주도의 발전기 비용은 육지에 비해 대체로 비싼 편이므로, 제주 신재생 발전량이 제주 수요 예측값보다 많은 시간대에만 HVDC 역송운전을 시행한다고 가정한다.

제주 역송 HVDC는 시간대별로 수요예측값에 맞게 제주 신재생 발전량, 제주 중앙급전발전기 출력, HVDC 송전량을 배분할 수 있다. 제주도 수요예측값이 신재생발전량과 같은 경우에는 HVDC 역송운전을 하지 않고 수요예측값을 신재생발전량으로 충당하고 나머지 발전기들의 출력은 0으로 한다.

가격발전계획에서는 총비용을 최소화 하는 경제성을 고려하기 때문에 경제성에 따라 결과가 달라질 수 있다. 우선 제주가 육지 발전기에 비해 경제성이 있는 경우, 제주 수요예측값에 맞게 신재생발전량을 배분하고, 나머지 발전량과 제주 발전기의 출력을 HVDC 역송운전의 상한치에 맞춘다. 제주가 육지 발전기에 비해 경제성이 없는 경우에는 제주 신재생 발전량을 수요예측값에 맞게 먼저 배분하고 나머지 발전량은 HVDC 역송운전을 통해 육지로 보낸다. HVDC 역송운전은 기술적인 문제로 어려움이 있으며, 단기간 문제를 해결할 수 있지만, 근본적인 해결책은 아니므로 더 많은 기술의 발전이 필요하다.

이와 같이 제주도의 에너지 그리드 구성을 통해 에너지 효율과 경제성을 높이는 방안을 구상해보았다. 앞서 제시한 바와 같이 아직 대한민국은 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 인프라가 부족한 상황이기에, 위와 같은 방안을 통한 에너지 그리드를 활용하여 에너지 문제를 해결할 수 있으리라 기대된다.

**REFERENCES**

정세용, 한영희, 박병준, 한상철. (2012). 35 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템 설계 및 제작. Progress in superconductivity, 14(1), 60-65.

이정필, 정세용, 한영희, 성태현. 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 회전 성능 테스트. 대한전기학회 학술대회 논문집,

이정필, 한영희, 정세용, 박병준, 박병철, 성태현. 초전도 플라이휠 에너지 저장장치용 전동 발전기의 에너지 저장 효율 영향 평가. 대한전기학회 학술대회 논문집,

한신. (2022). VRFB 플로우배터리의 동향 및 전망. 전기저널,, 60-69.

박태성, 정지성, 성원호. (2023-11-15). AEM 수전해 장치 상용화 사례 및 개발 동향. 한국가스학회 학술대회논문집, 전남.

박영기. "코어-쉘 구조의 하이브리드 필러를 이용한 3차원 구조의 전기 및 열 전도성 고분자 복합소재 개발." 국내박사학위논문 한양대학교 대학원, 2020. 서울

최세란. "기능화 된 탄소나노튜브와 절연성 세라믹 입자를 포함한 고분자 복합체의 열전도 향상 연구." 국내석사학위논문 중앙대학교 대학원, 2013. 서울

홍진호, 심상은. (2010). 열 전도성 고분자 복합재료의 개발 동향. 공업화학, 21(2), 115-128.

김성철, 백선희. (2021-07-14). 제주 HVDC 역송운전 가격발전계획 영향분석. 대한전기학회 학술대회 논문집, 강원.

김의정, 이승민, 조성빈. (2023-05-02). 제주계통 HVDC 역송 및 장주기 ESS 확보에 따른 중장기 전력수급 전망 및 출력제어율 감소에 관한 연구. 대한전기학회 학술대회 논문집, 제주.

2020.12.20.

한유리. (2018). 해외전력산업동향 미국 캘리포니아주 덕 커브(Duck Curve) 발생 현황과 대응 정책. 전기저널,, 35-41.

" 스마트그리드 축소판‘마이크로그리드’… 韓 상용화가 어려운 이유", 산업일보, 2021.04.15.

정교일, 박한나, 정부금, 장종수, 정명애. (2012). 스마트그리드의 안전성과 보안 이슈. 정보보호학회지, 22(5), 54-61.

최태영 기자, “원전, 과연 기후위기의 대안일까요?”, 그린피스, 2021.07.22

김종수. (2011). 지능형 운송 제주도 실증단지 현황. 전력전자학회지, 16(5), 27-31.

남기범, 이현화. (2019-07-10). 태양광발전과 ESS의 연계성과 문제점. 대한전기학회 학술대회 논문집, 강원.

정선호, 정래혁, 장진우, 전성은, 안선민. (2021-07-14). 제주지역 신재생 출력제어 완화를 위한 플러스DR 도입 및 성과. 대한전기학회 학술대회 논문집, 강원.

정선호. (2022). 제주지역 신재생 출력제어 최소화를 위한 플러스DR 제도 소개. 전기의세계, 71(8), 10-16.

정선호, 정래혁, 장진우, 전성은, 안선민. (2021-07-14). 제주지역 신재생 출력제어 완화를 위한 플러스DR 도입 및 성과. 대한전기학회 학술대회 논문집, 강원. 정선호. (2022). 제주지역 신재생 출력제어 최소화를 위한 플러스DR 제도 소개. 전기의세계, 71(8), 10-16.