

청정(Green) 수소 확대를 위한 재생에너지 Power to Gas의 전력공급기술

태양광, 풍력 등 재생에너지는 저탄소 발전원으로서 급속 성장하고 있지만, 계통안정성에 대한 위협이 우려되고 있다. 재생에너지의 변동성을 해결하고 에너지를 장기 저장하는 수단으로서 수전해장치를 통한 수소 등 합성연료 변환 및 저장이 떠오르고 있지만, 재생에너지의 변동성은 수전해장치의 입장에서 성능과 내구성을 저하시키는 위협요인이 된다. 변동이 큰 재생에너지원에 대응하기 위해 어떠한 전력공급장치가 필요하고, 어떤 방식으로 운전해야 하는지를 고찰해 본다. 주식회사 지필로스는 이에 대해 수전 전력 및 전압의 변동이 가능한 스위칭 소자 기반의 전력공급장치를 제안하고, 전력공급장치의 상세 구성과 발전원에 대응하는 설계 및 운전 전략에 대해 간단하게 소개하고자 한다.

1. 재생에너지 계통 영향의 특징

화석연료 사용에 의한 이산화탄소의 증가와 그로부터 파생된 지구 온난화와 기후변화는 인류에게 지속 가능한 에너지 공급 방식을 찾게 하였으며, 다년간의 연구개발을 통해 태양광과 풍력을 비롯한 재생에너지 기술이 등장하게 되었다. 재생에너지는 발전장치의 설치가 일단 끝나면 연료를 공급하지 않아도 되기 때문에 연료 공급 인프라를 고려하지 않고 수요지에 인접하게 설치할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 최근 급증하고 있는 태양광과 풍력의 경우, 발전원이 되는 태양광과 바람이 지형과 기후, 날씨에 따라 출력이 변동되며 이 변동이 제어되지 않으므로 경직성 전원으로 분류되며, 수력과 지열 같은 다른 재생에너지원과 구분하여 가변성 재생에너지(Variable Renewable Energy, VRE)라고 부른다.

가변성 재생에너지에 의한 계통 영향은 재생에너지의 출력이 변동함에 따라 발생하는 발전량과 부하의 불균형에 의해 발생한다. 세계에너지기구(IEA)를 비롯한 여러 계통 연구/관리기관은 가변성 재생에너지의 비중에 따른 계통 영향을 그 비중 증가에 따라 여섯 단계로 나누어 정의하였으며, 현재

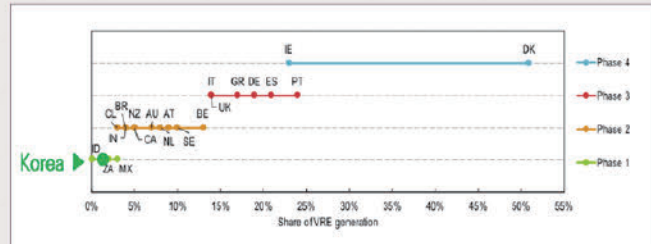


그림 1 국가별 VRE 비중에 따른 계통영향¹⁾

표 1 가변성 재생에너지의 비중 증가 단계에 따른 계통 영향²⁾

단계	VRE 비중	계통 영향
1	< 5%	계통 운영에 영향을 주지 않음
2	3~15%	VRE에 의해 순간적인 문제가 발생
3	10~25%	계통 운영 패턴에 영향을 줌. 유연성 문제(Flexibility issue) 발생
4	> 25%	VRE 공급을 중심으로 운영 패턴이 수립. 안정성 문제(Stability issue) 발생
5	-	구조적 전력수급 불균형 현상 발생
6	-	계절 단위 에너지 저장 필요

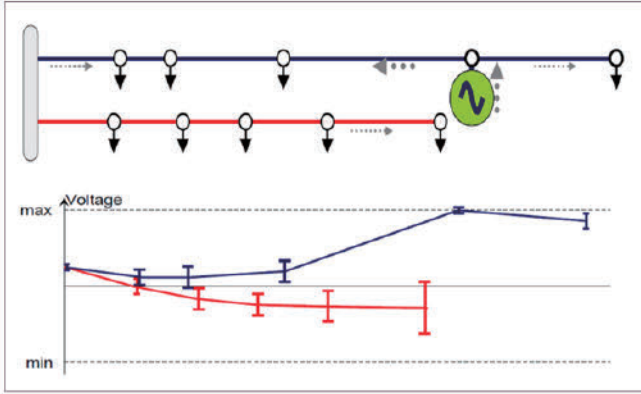


그림 2 분산전원에 의한 연계지점 전압상승의 모식도

4단계까지 확인되고 있다. 우리나라의 경우 전체로 볼 때 1단계에 있으나 풍력터빈이 급증한 제주도에 한정하여 2단계 수준에 근접해 있다. 최근의 정책 기조와 보급 속도를 볼 때 계통 영향이 증가할 것으로 보인다.

계통 전체에 미치는 영향과 별개로, 분산전원의 측면에서 재생에너지원은 계통운영에 문제를 일으킬 수 있다. 그림 2는 송전선의 중간에 연계된 발전장치의 운전 시 송전선의 전압분포를 나타낸 것이다. 변전소는 송전선 말단의 부하가 정격 범위 내 운전이 가능하도록 기준 대비 소폭 높은 전압으로 송전하게 된다. 송전을 주요 목적으로 하는 분산전원은 필요 시 상위계통에 송전하기 위해 연계점에서의 전압을 높여 송전하게 되며, 이는 연계점 주변의 전압을 상승시키는 효과로 나타난다. 국내에서도 태양광 설치가 활발한 전남 지역을 위주로 송전선 전압 현상이 나타나고 있다.

가변성 재생에너지원이 분산전원의 형태로 널리 보급될 때 연계점 주변의 부하는 재생에너지원의 출력 발생 여부와 연계 송전선 및 부하 용량에 따라 수전 전압이 급격하게 변하게 되며, 이는 계통 전반의 재생에너지 비중에 관계없이 나타날 수 있는 현상이다. 특히 수용가에 직접 설치가 가능한 태양광의 경우, 자가 소비량 이상으로 발전할 시 높은 전압을 공급하다가 순간적으로 출력이 정지할 때 나타나는 저전압에 의해 부하에도 이상이 발생할 수 있으며, 연계선 용량 이상의 출력이 일시적으로 발생하거나 대용량 부하가 일시적으로 탈락하는 경우 전압이 급증하여 주위의 부하가 손상될 수 있다.

재생에너지원의 계통연계 영향과 문제점을 해결하기 위하여 재생에너지의 출력변동을 추종할 수 있는 에너지 저장장치의 필요성이 증가하고 있으며, 국내에도 2010년 후반부터 리튬이온 배터리 기반 ESS의 보급이 활발히 진행되고 있다. 다만 재생에너지의 용량이 증가하면서 발생하는 안정성 문제를 해결하기 위해서는 에너지 밀도와 용량이 더 큰 에너지 저장 및 제어 수단이 필요하다.

2. 수전해 기술

수전해는 순수한 수소의 획득 수단으로 19세기에 그 기술이 확립되어 있었으나, 석유화학 공정에서 얻어지는 부생수소가 수전해에 비해 저렴하고 수소의 활용도도 제한되어 있기 때문에 수전해 기술의 추가적인 개발 및 사업화는 오랜 시간 정체되었다. 탄소를 발생하지 않는 에너지원을 찾으려는 노력의 일환으로 20세기 후반에 나타난 연료전지 기술이 주목받고, 연료전지를 활용한 발전 시스템 및 자동차용 파워트레인이 등장하게 되면서, 연료전지에 필요한 수소를 생산하면서도 화석연료에 의존하지 않아야 하는 난제를 해결하는 수단으로 수전해 기술이 다시 주목을 받게 되었고, 수전해를 통한 수소 생산은 가변성 재생에너지의 경직성 및 안정성 문제의 대책으로 평가받고 있다.

2.1 Power to Gas

Power to Gas(이하 P2G)는 전력을 수소, 메탄(SNG) 등 합성연료로 변환하여 저장하는 방식을 이르는 단어이다. P2G는 수전해장치를 활용해 전력을 수소화하고, 탄소포집저장(CCS) 기술을 접목해 합성연료를 생산하여 수송 및 산업부분의 연료로 활용하는 과정과 그 과정에 필요한 기술을 포함한다.

가변성 재생에너지 설비는 상시 발전하지 않으므로 실제 출력 대비 많은 용량이 필요하게 되며, 이러한 설비가 최대한 운전하게 되면 계통이 소화하지 못하는 전력이 넘치는 문제가 발생하게 된다.

이러한 가변성이 수 시간 수준이라면 배터리 등 전기화학적 방식으로도 대응이 가능하지만, 가변성 재생에너지원, 특히 태양광과 바람은 계절적 변동성도 가지고 있으므로 표 1의 5-6단계 계통 영향 예측과 같이 수개월 단위의 장기적 저장을 필요로 하며, 그 용량도 수십 GWh 단위로 매우 크다.

아래 그림 3과 같이 전기화학적 저장방식은 일 단위, 수백 MWh 수준의 전력저장에 적합하며 실제로도 활용되고 있으나, 용량의 증가와 비용의 증가가 완전 비례하므로 GWh 이상의 저장은 비용 대비 효율이 적다. P2G 기술을 통한 합성

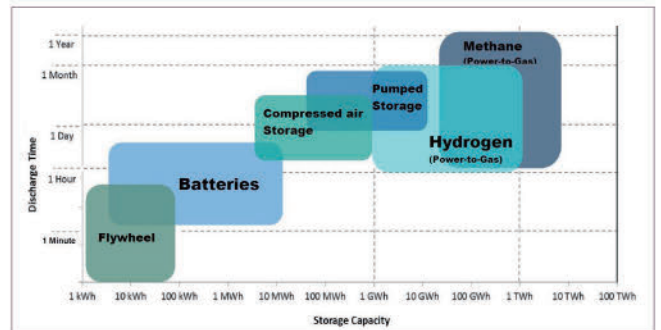


그림 3 용량 및 저장기간에 따른 전력저장방식 비교¹⁾

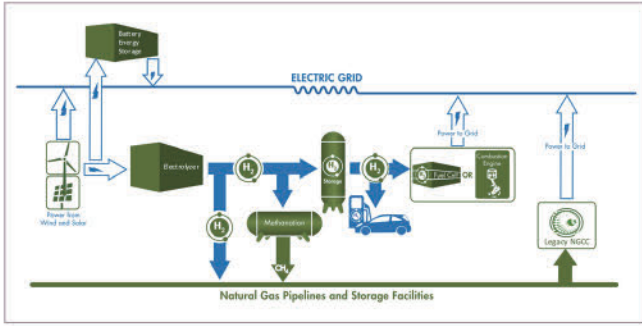


그림 4 수전해장치에 기반한 전력-가스 계통의 연계도^[4]

연료 저장은 가압을 통해 필요한 공간을 줄일 수 있으며, 장기 저장 및 저장 상태의 운송이 가능한 장점이 있다.

Power to Gas의 의미는 전력의 대용량 장기저장에만 있는 것이 아니라, 그림 4에 도시된 것과 같이 전력 계통과 가스 계통이 상호 연계됨을 의미하기도 한다. Power to Gas 기술의 개발은 자체 생산 전력의 연료화를 통해 연료의 해외 의존도를 줄이고 산업 전체의 탄소배출을 줄이는 효과가 기대되고 있다.

2.2 수전해 기술의 개요

수전해와 수소 연료전지는 에너지의 흐름이 반대인 것을 제외하면 원리가 거의 동일하여, 기본적으로 환원극(양극)과 산화극(음극)의 전기화학적 반응의 조합으로 나타난다. 수전해 셀의 전압은 표준상태 개방회로전압(1.23V)에서 셀 내부 저항에 의해 전류밀도에 비례하여 나타나는 과전압의 합으로 표현되며, 여러 셀을 겹쳐 만들어지는 수전해 스택의 전압은 셀 전압에 스택한 셀의 수를 곱하여 도출한다. 수전해도 내부의 전해질과 양극 구성에 따라 운전 조건이 크게 상이하며, 이를 정리하면 표 2와 같다.

공통적으로 수전해장치는 직류전력을 사용하며 수전하는 전력의 변동에 의해 스택 내부에 역조류가 발생할 경우, 설계하지 않은 반응에 의해 전극 촉매의 손상이 발생하므로, 공급되는 전압과 전류의 안정성이 장치의 성능과 수명에 직접적

표 2 수전해 방식에 따른 주요 특징 비교^[5]

항목	알칼리 방식	양이온 교환막	고온 수전해
전해질	KOH 수용액	이온 교환막	고체 세라믹
전극 소재	니켈 합금	귀금속(백금, 이리듐 등)	니켈 첨가 세라믹
운전 온도	50~90℃	상온~80℃	700~1000℃
출력변동속도	수수십초	1초 내외	-
상업화 단계	완전 상업화		개발단계
특징	액체 전해질	높은 전류밀도	효율 높음

으로 영향을 준다. 상기한 특성을 보자면, 수전해장치는 가변성 재생에너지가 증가하여 변동성이 증가한 계통 환경에서 운영하기에 적절한 기술로 보이지 않을 수 있다. 수전해장치의 전력 공급 기술이 개선되어야 하는 이유다.

3. VRE연계 P2G의 전력공급기술

기존의 수전해장치는 수소가 필요한 장소에 직접 설치 운전되었으며, 전원의 안정성 조건이 충족되었기 때문에 아래 그림 5의 (a)와 같이 실리콘 제어 정류기(SCR)에 기반한 단순 정류방식 전력공급장치를 사용하였다. 그러나 P2G 시스템에서 VRE를 에너지원으로 하더라도 수전해장치가 안정적으로 동작하려면, 전력공급장치가 급전 전력의 제어 기능을 가지고 있어야 한다. 그림 5의 (b)에 상기 기능을 포함한 전력변환장치의 구성도를 나타내었으며, 두 방식의 차이점에 대해 설명하도록 한다.

3.1 교류/직류 컨버팅 방식의 변경

VRE 연계를 위한 전력공급장치의 설계 중 가장 큰 변화는 다이오드를 IGBT등 스위칭 가능한 소자로 전환하는 것이다. 스위칭 소자는 PWM 방식으로 On/Off 스위칭을 수행하여 Duty 비율 조절을 통해 수전해장치에 필요한 출력을 제어한다.

또한 스위칭 소자에 의한 전력변환을 활용하면 무효 전력을 발생 또는 흡수하여 VRE에 의한 계통 전압 변동에도 대응할 수 있다. 수전해 스택의 운전전압이 계통전압을 정류하여 얻는 직류전압과 다를 경우 전압을 보정하기 위한 컨버터를

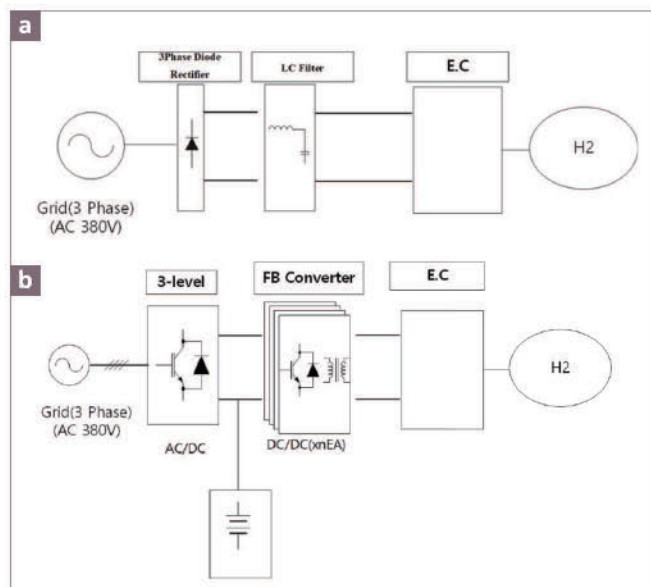


그림 5 수전해 전력공급장치의 구성 비교

추가한다. 이 때 P2G 시스템의 구성과 운전 목표에 따라 컨버터를 모듈화할 수 있다.

계통으로부터의 외란이 수전해장치에 영향을 주는 것을 배제하기 위해서는 절연 방식의 전력공급장치를 구성할 필요가 있고, 이를 컨버터 내부의 절연변압기가 담당한다.

3.2 전력 버퍼의 적용

수전해장치의 내부는 분해할 물과 생산된 수소 및 산소가 흐르는 배관과, 각 유체의 유량 및 압력을 제어하기 위한 전장품이 포함되어 있다. 급격한 전력의 변동은 수전해 스택 자체의 문제일 뿐 아니라, 장치 내 전장품의 손상 가능성이 증가하며 이로부터 파생되는 수소 및 산소의 누출 등 안전사고의 위험성도 증가시킨다. 그러므로 수전해장치가 VRE와 안전하게 연계되려면, VRE의 출력이 순간적으로 변동하더라도 대응할 수 있는 버퍼의 존재가 필요하다.

에너지 버퍼는 대응 속도가 빠르고 충전 속도가 빨라야 하므로, 배터리 등 전기화학적 방식을 사용하되 시스템의 사양에 따라 취사선택이 가능하다.

4. VRE연계 P2G시스템의 급전전략

4.1 계통안정성의 극대화

재생에너지 발전설비는 연간 총발전량을 단위시간으로 나눈 평균 전력을 설비용량으로 나누어 설비의 이용률을 정의하며⁶⁾, 발전원에 따라 10~30%의 이용률을 나타낸다. 재생에너지 설비의 출력 분포에는 발전원과 설비 위치에 따른 차이가 있으나, 아래 그림 6에서 보듯 발전 시간의 대부분이 설비용량의 절반 이하의 출력을 나타내고, 설비용량의 80%를 상회하는 출력은 전체 시간의 4% 이하로 나타난다.

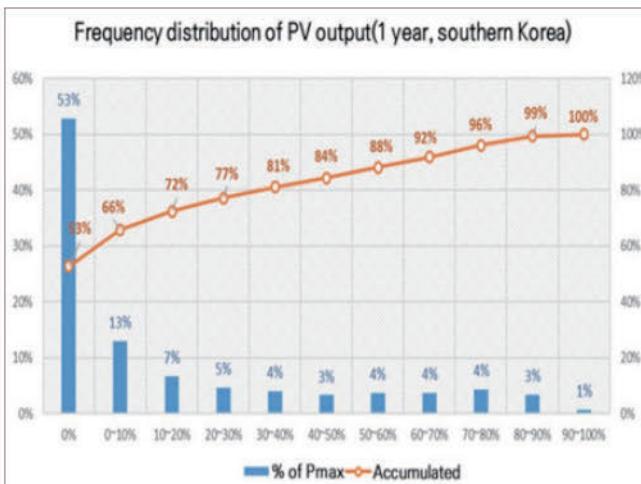


그림 6 국내 태양광의 용량대비 출력 빈도 분석

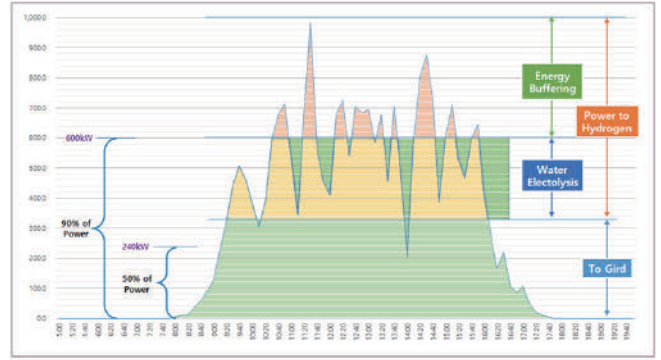


그림 7 태양광 연계 P2G시스템의 급전전략 예시

P2G 시스템이 근처에 연계된 태양광 발전설비의 송전전력 변동성을 제한하고자 하는 경우를 가정하여 운전전략의 예시를 소개하겠다. 그림 7에 도시한 것과 같이 VRE의 출력 프로파일을 기준으로 송전 전력을 정의하고, 송전하지 않을 전력의 일정 비율을 수전해장치의 용량으로 정의할 수 있다.

에너지 버퍼의 충전 용량은 재생에너지 설비용량에서 상기 정의한 용량을 제외한 나머지로 설정할 수 있으며, 버퍼는 재생에너지 출력이 높을 때 충전 영역에 포함되는 전력을 충전한다. 수전해장치는 VRE 출력이 자체 운전전력보다 적거나 없는 경우 버퍼로부터 출력을 인출하여 사용하고, 버퍼에 충전된 에너지량이 일정 수준 이하가 되면 전력 부족에 의한 급정지를 방지하기 위해 수전해장치 및 P2G 시스템의 운전을 종료한다.

운전전략 수립의 상세한 내용은 VRE 발전설비의 에너지원과 발전 프로파일, P2G 시스템과 계통에서 요구하는 에너지의 비중에 따라 변경될 수 있으나, VRE 출력 프로파일에 기반한 P2G 시스템 운전전략의 수립은 수전해장치와 에너지 버퍼의 용량을 최적화하면서도 VRE 발전설비가 계통에 안정적 전력을 공급하도록 할 것이다.

4.2 컨버터 모듈화의 상세

기존 수전해장치는 수소의 안정적 공급이 최우선 과제였기 때문에 시스템의 정격용량으로 운전하는 것이 일반적이었고, 이 때 수전해의 전력공급장치는 다수의 모듈로 구성하는 장점이 크지 않았다. 그러나 P2G 시스템이 재생에너지 설비를 전원으로 하는 경우 시스템 내의 수전해장치는 공급전력이 부족할 경우에도 운전을 지속해야 하므로, 전력공급장치는 설계 용량을 100% 활용할 수 없으며 수전해장치의 고전류 특성에 의해 도선의 굵기가 증가하여 장치 설계와 제작의 제약요소가 된다.

P2G 시스템용 수전해 전력공급장치의 설계에 있어 단위 컨버터의 다수 병렬 구성은 수전해장치의 모든 출력범위에서 거의 동일한 컨버팅 효율을 유지할 수 있게 하며, 컨버터

모듈의 일부 손상이 전체 시스템의 운전을 방해하지 않으므로 P2G 시스템 전체의 신뢰성을 향상할 수 있다. 다수의 수전해 스택이 병렬로 구성된 시스템의 경우, 각 스택을 담당하는 모듈을 배정하여 시스템의 운전전력 저하 시 일부 스택과 컨버터를 선택적으로 종료하는 것으로 스택 및 시스템의 평균 수명을 더 오래 유지할 수 있다.

5. 맺음말

탄소 저감을 위한 국제적 노력은 Power to Gas라는 개념과 함께 전력 계통과 수전해장치에 기존과는 다른 기능과 역할을 요구하고 있다. 국내에서도 제3차 에너지 기본계획과 수소경제 활성화 로드맵을 통해 분산발전 및 재생에너지 비중의 확대, 청정수소 생산기술 확보 계획을 수립하였고, 앞으로 P2G 시스템용 전력공급설비의 활동 가능 영역과 용량은 지속 증가할 것이다.

본문에서 수전해 스택과 VRE의 특성 차이를 전력공급장치의 구성 변화를 통해 해결하고, 재생에너지 출력 변동을 감안한 P2G 시스템용 전력공급장치의 운전전략을 제안하였다. 이후 추가적인 기술 개발을 통해 재생에너지 연계형 P2G 시스템의 활용도와 안정성을 제고하고, 향후 재생에너지와 청정 수소에 기반한 에너지 전환이 성공적으로 이루어지길 희망한다. ■■■

참고문헌

- [1] Getting wind and sun onto the Grid, OECD/IEA, pp. 14, Mar. 2017.
- [2] IEA, Status of power system transformation 2019, International Energy Agency, pp. 5, May 2019.
- [3] EUROPA, Energy storage-the role of electricity, Commission Staff Working Document, European Commission, pp. 12, Feb. 2017.
- [4] A. Meier et al., University of california strategies for decarbonization: replacing natural gas, pp. 57, Feb. 2018.
- [5] 수소·연료전지 기술개발로 신산업 키운다③ 엘캠텍, 350bar급 수전해조 스택기술 개발, 월간수소경제, 12월, 2017.
- [6] 지역별 태양광·풍력 이용률 및 발전원가 분석, 전력레소 신시장개발처 기후신재생전략팀, 12월, 2018.

우민우 ㈜지필로스 기술연구소 책임연구원

1987년 9월 8일생. 2011년 한국과학기술원 화학과 졸업.
2016년 서울대 화학과 석·박통합과정 수료.
2016년~현재 ㈜지필로스 기술연구소 책임연구원.



박가우 ㈜지필로스 대표

1969년 7월 1일생. 1989년~1990년 국방과학연구소 위촉연구원.
1994년~2003년 ㈜포스콘 기술연구소 선임연구원. 2003년~2009년 ㈜플라스코 연구소장.
2009년~현재 ㈜지필로스 대표.



강병근 ㈜지필로스 사업전략영업팀장

1969년 6월 11일생. 1993년 한밭대 전자공학과 졸업.
1993년~2000년 오성아이엔씨 기술연구소 선임연구원. 2002년~2006년 와우테크 기술연구소 책임연구원.
2013년~현재 ㈜지필로스 사업전략영업팀장. 2019년~현재 P2G 연구개발 과제 연구책임자.



조경식 ㈜지필로스 ESS-PCS팀 차장

1981년 11월 20일생. 2001년~2003년 ㈜웅천텍스텍 영업팀. 2008년 경상대 제어계측공학과 졸업.
2010년 동 대학원 졸업(석사). 2011년~2012년 ㈜다원시스 연구팀.
2012년~현재 ㈜지필로스 ESS-PCS팀 차장.

