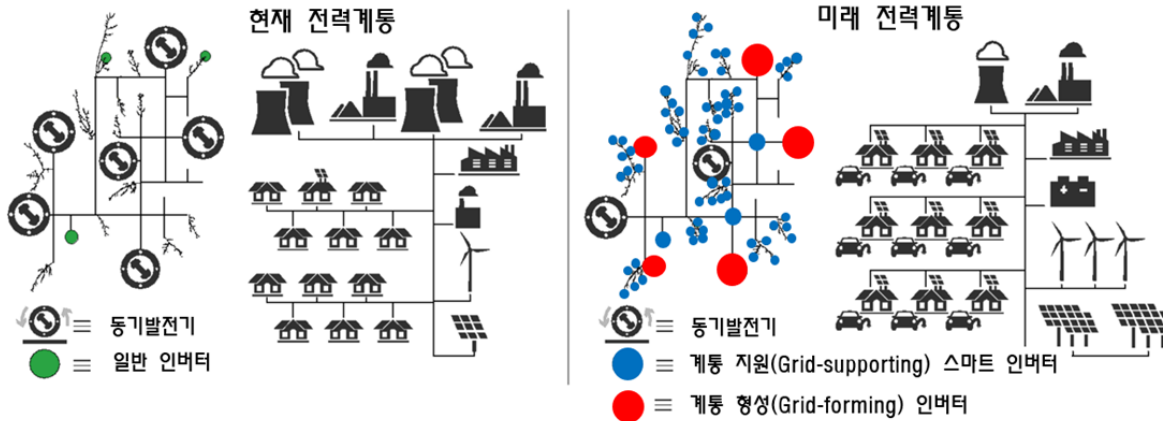


Green Energy; Technology of Smart Inverter

그린에너지, 스마트 인버터 기술

Sungwoo Bae
 배성우



[스마트 인버터, 계통 형성(Grid-forming) 인버터 기반 미래 전력계통 개념도]

그린에너지, 에너지저장장치와 같은 분산자원의 전력계통 투입률이 증가함에 따라 전력계통 구조, 운영방식의 변화에 대한 관심이 증가하고 있다. 현재까지의 전력계통은 원자력발전소, 화력발전소 등 대형 발전소에서 운전되는 전기-기계장치인 대형 동기발전기에 의해 계통 관성이 유지되고 있다. 태양광발전, 풍력발전과 같은 그린에너지와 에너지저장장치 등의 분산전원은 대부분 직류출력 특성을 가지고 있으므로, 직류전력을 교류전력으로 변환하는 전력변환장치인 인버터를 통해 교류 전력계통에 투입된다. 계통연계형 인버터는 단순히 직류전력을 교류전력으로 변환할 뿐만 아니라 그린에너지의 최대 발전전력 추종, 전압레벨 변환, 전력품질 유지 등 다양한 기능을 수행해야 하므로, 여러 단의 전력변환을 수행하는 컨버터로 구성된다. 그린에너지와 같은 분산자원의 전력계통 투입 증가로 계통 운영 측면에서 유연성 자원 확보로 인한 전력계통의 유연성을 강화할 수 있는 이점이 있다. 하지만, 관성이 있는 전기기계 장치인 대형 동기발전기와 달리 계통연계형 인버터는 전력전자 장치인 다단(Multi-stage) 컨버터로 구성되어 있으므로 별도 장치나 기능을 탑재하지 않는 이상 관성이 없다. 이러한

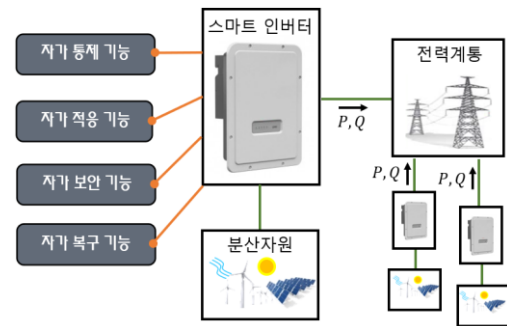


Fig. 1. 스마트 인버터의 주요 기능

이유로 단순 기능만을 탑재한 일반 인버터 기반 그린에너지의 전력계통 투입률이 급증하게 되면, 그린에너지 분산전원의 출력 변동성과 불확실성에 의한 문제점뿐만 아니라 기존 전력계통에서 나타나지 않았던 다양한 문제들이 발생할 수 있다. 예를 들어, 갑작스러운 전압강하, 전력손실, 부하 비대칭 등의 전력품질 저하로



저자 **배성우 교수** | 한양대학교 공과대학 전기생체공학부 전기공학전공

배성우 교수는 한양대학교 공과대학 전기생체공학부 전기공학전공 부교수로 재직 중이다. 한양대학교에서 전자전기컴퓨터공학 학사 학위, 미국 University of Texas at Austin에서 Electrical and Computer Engineering (ECE) 석사, 박사 학위를 취득하였으며, 2012년부터 2013년까지 삼성전자 종합기술원에서 책임연구원으로 재직했다. 배성우 교수는 한양대학교에서 전력계통, 신재생분산전원, 스마트그리드를 중심으로 강의와 연구를 진행하며, 전력에너지시스템 연구실을 운영하고 있다.

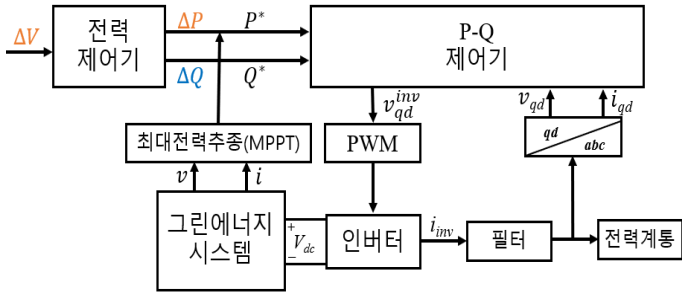
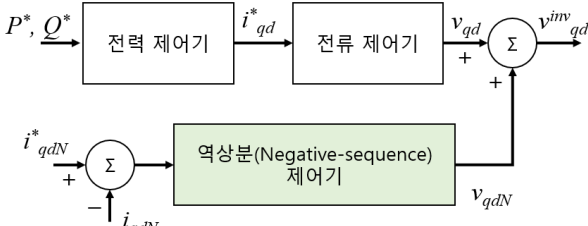


Fig. 2. 계통 지원 모드 스마트 인버터 제어 블록 다이어그램



역상분 제어 기능	
기능 1	계통 불균형 전류 보상
기능 2	유효 전력 오실레이션 보상
기능 3	무효 전력 오실레이션 보상

Fig. 3. 계통 지원 모드 역상분 제어 블록 다이어그램/기능

전력계통의 안정적 운영에 어려움을 겪을 수 있다. 이러한 문제 발생의 원인으로 관성이 있는 동기발전기 계통 투입 비중은 줄어드는 대신 관성이 없는 일반 인버터의 계통 투입률이 늘어나게 되어 전력계통 관성이 줄어드는 것을 들 수 있다. 이러한 문제는 스마트 인버터로 완화될 수 있기에 분산전원과 연계된 스마트 인버터에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

스마트 인버터란 전력계통 연계지점에서 측정된 전력 데이터와 외부에서 전달된 데이터를 기반으로 선제적, 자율적 의사결정 기능이 탑재된 인버터라고 정의할 수 있다 [1]. Fig. 1에 나타난 바와 같이 스마트 인버터의 주요 기능에는 자가 통제, 자가 적응, 자가 보안, 자가 복구 기능이 있다. 예를 들어, 스마트 인버터는 비정상적인 계통운전 상황에서 전력품질 향상을 위한 계통 보조 서비스를 제공할 수 있다. 이러한 스마트 인버터 운전모드를 계통 지원(Grid-supporting) 모드라고 한다 [2], [3]. 또한, 스마트 인버터는 계통 형성(Grid-forming) 모드로도 동작하여 자연재해와 같은 계통 내 위급 상황이 발생했을 때, 전력계통과 분리되어 독립 운전모드 마이크로그리드를 형성하거나 전력계통 복구를 위해 도움을 줄 수도 있다. 즉, 계통 형성 운전모드 스마트 인버터는 정상 시 혹은 정전 이후 계통 전력 복구 시 전력계통 주파수, 전압 확립에 기여하여 다른 발전기의 동기 기준이 될 수 있는 동기발전기에서의 Black start 동작이 가능하다 [4]. Black start 기능을 탑재한 스마트 인버터와 계통 지원 모드만 수행하는 스마트 인버터를 구분하기 위해, 이러한 인버터를 계통 형성(grid-forming) 인버터로 명명하기도 한다.

본 고에서는 [1], [4]를 분석 정리하여 스마트 인버터의 주요 기능, 기술의 개념 중심으로 스마트 인버터에 대해 살펴본다.

I. 자가 통제 기능

스마트 인버터의 자가 통제(Self-governing) 기능은 전력계통에 단순히 유효전력만 투입하는 것이 아니라 전력계통 이상상황 발생 시 무효전력을 투입하여 마이크로그리드나 전력계통의 전압, 주파수 조절이 가능하도록 계통을 지원하는 것을 말한다 [1]. 즉, 스마트 인버터는 자가 통제 기능으로 앞서 기술한 계통 지원 모드, 계통 형성 모드 기능을 통해 전력계통 이상상황 발생 시 전력계통 품질 유지, 이상상황 복구에 도움을 줄 수 있다.

TABLE 1에서 정리한 바와 같이 일반적으로 인버터의 동작 모드는 역률 100%로 그린에너지에서 사용가능한 최대 유효전력을 전력계통에 전달하는 단순 계통 투입(Grid-feeding) 모드, 앞서 설명한 계통 지원 모드, 계통 형성 모드로 분류될 수 있다. 또한, Table 1에서 제시된 바와 같이 인버터에서 발전되는 교류 전력의 주파수 기준이 어떤 것인가에 따라 전력계통 추종(Grid-following) 모드와 전력계통 형성(Grid-forming) 모드로 인버터의 동작모드를 구분할 수도 있다. 계통 추종 모드에서 인버터는 전력계통에서 이미 확립된 주파수를 추종하여 교류전력을 전력계통에 투입한다. 앞서 기술한 단순 계통 투입 모드, 계통 지원 모드가 계통 추종 모드 동작에 해당한다. 반면에 계통 형성 모드에서 인버터는 동기발전기와 유사하게 스스로 동기 기준을 만들어 교류전력을 발전할 수 있어 정전 이후 스스로 발전(Black start)이 가능하고, 전력계통과 분리된 마이크로그리드에서도 독립운전이 가능하다.

1.1 계통 지원 모드

계통 지원(Grid-supporting) 모드에서 계통연계형 인버터는 전류원(Current source)으로 동작한다. 즉, 계통 지원 모드에서 스마트 인버터는 전력계통 운전 주파수 센싱을 통해 계통 주파수를 추종하는 교류전력을 전력계통에 투입한다. 이러한 인버터의 동작은 전압원(Voltage source)으로 동작하는 계통 형성 모드 인버터의 동작과 크게 구분된다. 계통 지원 모드에서 인버터는 임계치 이상의 전압강하와 같은 다양한 계통 이상상황에서도 일정 시간 동안에는 동작 상태 유지가 필요하며, 이러한 기능을 Low Voltage Ride-Through(LVRT) 기능이라고 한다 [1]. 즉, 계통 지원 모드에서 스마트 인버터는 전력계통의 순간적인 이상상황을 감지하고, 일정 시간 동안 시스템 동작상태를 유지하여 전력계통의 전압 안정도 유지를 지원할 수 있어야 한다. 스마트 인버터의 이러한 계통 지원 기능은 대칭 이상상황과 비대칭 이상상황에 대한 지원 기능으로 분류할 수 있다 [1].

1.1.1 대칭 이상상황에 대한 계통 지원 모드

계통연계형 인버터 보급이 증가함에 따라 인버터 기반 분산전원 시스템에서의 갑작스러운 전력손실은 전압강하보다 더 심각한 문제를 초래할 수 있다 [5]. 최근 그린에너지의 전력계통 투입률이 증가함에 따라 미국 전기전자공학회(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)에서는 2003년에 제정한 계통연계형 인버터에 대한 표준(IEEE Std. 1547-2003 [6])을 개정하여 새로운 표준인 IEEE Std. 1547-2018 [7]을 발표하였다. IEEE Std. 1547-2018에 따르면, 전력계통 이상상황으로 인한 임계치 이상의 전압강하에도 분산전원과 연계된 스마트 인버터는 전력계통에 연계된 상태로 일정 시간 동안 무효 전력을 전력계통에 투입하여야 한다 [7]. 이러한 스마트 인버터 동작을 LVRT 기능이라고 하며, LVRT 기능이 필요한 이유는 전력계통 전압강하로 인버터 동작이 중지되면, 인버터 운전 정지로 인한 추가 전압강하로 전력계통의 전압 안정도 한계를 초래할 수 있기 때문이다.

TABLE 1

계통연계형 인버터 동작 모드 분류에 따른 기능 및 특징

계통 추종 (Grid-following) 인버터	단순 계통 투입 모드* (Grid-feeding) *일반 인버터	<ul style="list-style-type: none"> 전력계통은 정상상태로 운전된다고 가정 전류원으로 동작하며, PLL 제어를 통해 이미 확립된 계통 주파수를 추종 그린에너지(태양광, 풍력 등) 최대 전력 추종 역률 100% 제어 (유효전력만 투입, 무효전력 투입은 0)
	계통 지원 모드 (Grid-supporting)	<ul style="list-style-type: none"> 전력계통은 대체로 정상상태로 운전된다고 가정 전류원으로 동작하며, PLL 제어를 통해 이미 확립된 계통 주파수를 추종 단순 계통 투입 모드 기능에 추가된 보조 서비스 제공 가능 ✓ 전력계통 전압강하 시 무효전력 공급을 통한 안정화 지원 ✓ 전력계통 부하 불균형 해소 지원
계통 형성(Grid-forming) 인버터		<ul style="list-style-type: none"> 정전 복구 시 동기 기준을 형성하여 재시동 가능(Black start)하며, 계통 안정도 유지 담당 전압원으로 동작하며, 부하전력 분담, 전압 크기, 주파수, 위상 제어 가능 유효전력, 무효전력 제어

하지만, IEEE Std. 1547-2018에서는 전력계통 이상상황이 오래 지속되어 전압강하가 너무 오래 지속되면 스마트 인버터는 전력계통에서 분리되어야 한다고 명시하고 있다 [7]. 또한, 인버터의 전력계통 투입 유효전력을 조정할 때, 인버터의 최대 전류제한을 초과하지 않도록 무효전력도 같이 증가시키며 제어하여야 한다. 그렇지 않을 경우 인버터 동작이 정지될 수 있다. Fig. 2는 계통 지원 모드 스마트 인버터의 제어 블록 다이어그램의 예시이다.

1.1.2 비대칭 이상상황에 대한 계통 지원 모드

비대칭 이상상황은 배전계통에서 불균등하게 분포된 단상 부하 등과 같은 비대칭 고장으로 인해 발생할 수 있다 [1]. 스마트 인버터는 계통의 이러한 비대칭 이상상황에 발생 시에 정상분(Positive-sequence) 무효전력 보상뿐만 아니라 역상분(Negative-sequence) 무효전력 보상을 통해 계통 운영을 지원할 수 있다 [8]. Fig. 3과 같이 계통 전류 역상분 보상을 위해 q 축 및 d 축 전류 제어를 제어기에 추가함으로써 로컬 계통의 부하 비대칭 이상상황을 해결할 수 있다. 그러나 이러한 제어 방식은 계통연계 접속점에서의 역상분 전압은 보상할 수 없다. 유효 및 무효 전력에 남아 있는 리플로 인해 DC 버스 전압 리플이 발생할 수 있고, 이러한 리플이 커져서 DC 버스 커패시터의 정격 전압을 초과할 경우 DC 버스 커패시터를 손상시킬 수 있다. 일반적으로 역상분 제어기의 설정 값을 조정함으로써 이러한 전압 리플을 완화할 수 있다. 또한, 정격 전력에서 전류를 제한하면서 가능한 최대의 전력 리플을 줄이는 제어를 수행할 수도 있다 [1].

1.2 계통 형성 모드

전술한 바와 같이 전류원으로 동작하는 계통 추종 스마트 인버터와 달리, 계통 형성(Grid-forming) 스마트 인버터는 전압원으로 동작하며 [1], 동기발전기와 유사하게 전력계통 정전 복구 시 동기 기준을 형성하여 전력계통을 재시동하는 기능(Black start)이 있다. 이러한 계통 형성 스마트 인버터의 Black start 기능은 전압형 HVDC(High Voltage Direct Current) 컨버터 스테이션의 Black start 동작과 유사한 원리로 작동한다. 비대칭적이고, 유도성 리액턴스 성분이 상대적으로 적은 약한 그리드(Weak grid)에서도 충분한 유연성과 안정도 마진을 제공하기 위하여, 계통 형성 인버터는 동일 용량의 단순 계통 투입 인버터보다 더 높은 정격으로 설계된다 [1]. 전력계통에서 모든 인버터가 계통 형성 모드 인버터로 동작할 필요는 없으며, 계통 형성 모드 인버터로 동작하기 위해서는 에너지저장장치(예: 배터리), 마이크로터빈 등 즉시 투입 가능한 전원이 필요하다. 대부분의 스마트 인버터는 계통 지원 모드로만 동작하는 계통 추종형 스마트 인버터이며, 그린에너지원으로 동작하는 스마트 인버터 시스템에 충분한 용량의 에너지 저장장치가 장착된 경우 계통 형성 모드로 동작할 수 있다.

독립 운전모드 마이크로그리드를 구성하거나, 여러 마이크로그리드가 함께 운전되는 마이크로그리드 간 계통 형성을 위해서는 스마트 인버터 간, 혹은 다른 발전원 간에 서로 총 부하를 분배하여 계통 내 모든 발전원이 최적 운전제어 되어야 한다. 이러한 최적 전력분배와 계통 전압/주파수 제어목적 달성을 위해서는 중앙 집중 제어방식 또는 분산 제어방식이 사용된다 [1].

1.2.1 중앙 집중 제어방식

중앙 집중 제어방식으로 동작하는 인버터는 통신 링크를 통한 2차 제어 구조로 제어된다 [1]. 구체적인 제어방식으로 마스터-슬레이브(Master-Slave), 분산 제어가 있으며 자세한 사항은 아래에서 살펴보기로 한다.

1.2.1.1 통신 기반 마스터-슬레이브 제어방식

마스터-슬레이브 제어방식의 계통 형성 스마트 인버터는 전류원으로 동작하는 계통 추종형 인버터와 달리 전압의 크기와 주파수를 조절할 수 있는 전압원으로 동작한다 [1]. 마스터 인버터는 전압과 주파수를 조절할 수 있으며, 슬레이브 인버터가 계통에 전력을 투입하기 전에 먼저 동작을 시작하여 계통 위상, 주파수 동기 기준을 확립한다 [1]. 전력계통 또는 마이크로그리드에 필요한 계통 형성 인버터(마스터 인버터)의 수는 동기발전기와 마찬가지로 계통의 크기에 따라 달라진다. 예를 들어, 소형 마이크로그리드의 경우, 단일 계통 형성 인버터(마스터 인버터)만으로도 주 계통 AC 버스 전압과 주파수를 조절할 수 있다. 반면에

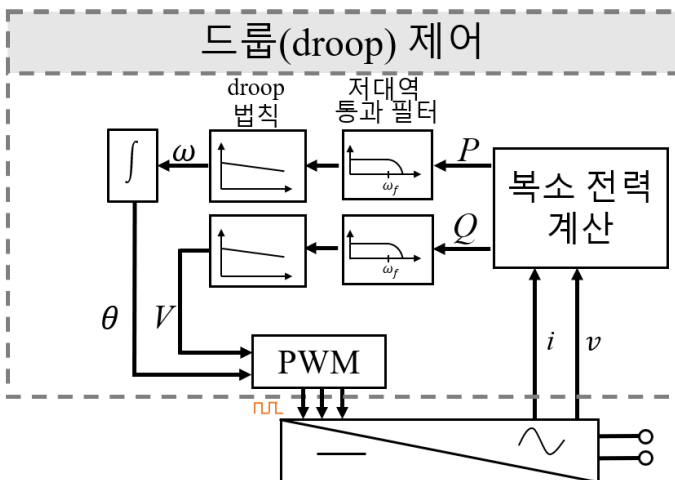


Fig. 4. 드롭 제어방식 제어 블록 다이어그램

중대형 마이크로그리드 혹은 전체 전력계통의 경우, 하나의 계통 형성 인버터로 계통 부하 변동에 대응할 수 없으므로, 계통 부하 변동에 대처하기 위해 다수의 계통 형성 인버터(마스터 인버터)가 필요하다. 이는 전력계통 운영을 위해 많은 수의 동기발전기가 계통 관성 유지를 위해 필요한 이유와 동일하다. 다수의 계통 형성 인버터를 동기 주파수로 운전하기 위해서는 계통 형성 스마트 인버터 간에 동기 기준 위상과 주파수를 공유할 수 있는 통신 링크가 필요하다 [1].

1.2.1.2 저대역 통신 기반 분산 제어방식

저대역 통신 기반 분산 제어 방식의 개별 계통 형성 모드 스마트 인버터는 전력계통의 정격 전압, 정격 주파수를 레퍼런스 값으로 하여, 출력 전압 레벨과 주파수를 제어한다 [1]. 하지만, 각 인버터 출력 레퍼런스 전압과 주파수는 마이크로그리드에 있는 모든 인버터의 평균 전류에 따라 미세 조정되기도 한다. 즉, 이러한 인버터 평균 전류와 각 인버터의 피크 전류 차이에 따른 에러 신호와 드롭 제어에 기반한 부하전력 분담률에 따라 인버터 출력 레퍼런스 전압, 주파수를 정격 값에서 미세조정 한다. 이 때, 로컬 센서 및 인접한 분산전원에서 취득한 데이터를 활용하여 저대역 통신만으로 인버터를 제어한다 [1].

1.2.2 분산 제어방식

계통 형성 모드 스마트 인버터의 분산 제어방식에는 드롭(Droop) 제어, 가상 동기발전기/관성 제어, 가상 발전기 제어 방식이 있으며, 각각의 방식은 아래에서 살펴보기로 한다.

1.2.2.1 드롭 제어방식

계통 형성 모드 스마트 인버터의 드롭(Droop) 제어방식 [9]은 1990년대에 처음으로 제안되었다. 구체적인 제어 원리는 일반 동기발전기가 전력계통의 정상상태에서 운전되는 원리와 유사하게, 유도성 리액턴스 성분이 주로 분포된 강한 계통(Strong grid)에서는 유효전력-주파수(P- ω), 무효전력-전압(Q-V)의 선형 드롭 법칙(Droop laws)에 따라 제어된다 [4]. Fig. 4는 이러한 드롭 제어 방식의 제어 블록 다이어그램을 보여준다. 반면에 유도성 리액턴스 성분이 상대적으로 적게 분포된 소규모 독립형 마이크로그리드와 같은 약한 그리드(Weak grid)에서는 무효전력-주파수(Q- ω), 유효전력-전압(P-V)의 선형 드롭 법칙에 따라 제어된다. 이러한 드롭 제어 법칙에 따라 계통 내 모든 인버터는 다음과 같이 운전된다.

- **시스템 주파수 동기화** : 계통 내 모든 인버터 시스템은 동일한 주파수로 동작하게 된다.
- **부하전력 분담** : 계통 내 모든 인버터는 드롭 계수에 따라 인버터 용량에 비례하여 부하 전력을 분담한다.

1.2.2.2 가상 동기발전기/관성 제어방식

Fig. 5에서 보는 바와 같이 계통 형성 모드 스마트 인버터의 가상 동기발전기/관성 제어방식은 스마트 인버터가 관성이 있는 동기발전기의 동역학 특성을 모사하여, 교류전력을 출력하는 것을 말한다. 즉, 가상 동기발전기 제어방식은 스마트 인버터 출력단에서 측정된 전압, 주파수 등의 측정값을 디지털 동기발전기 Emulator 입력 값으로 Feedback시켜, 가상 동기발전기의 동특성이 실시간으로 인버터 출력 전력에 반영되게 할 수 있다 [4]. 이러한 방식으로 스마트 인버터 출력 특성에 가상 관성을 만들어낼 수 있다. 계통 형성 모드 스마트 인버터의 요구성능에 따라 정밀도가 높은 가상 동기발전기 모델에서 단순한 스윙 동역학 모델까지 다양한 가상 동기발전기/관성 제어기 설계가 가능하다 [4].

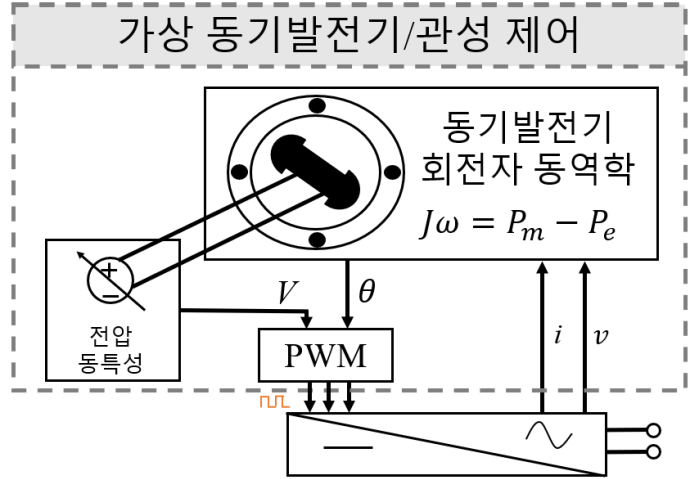


Fig. 5. 가상 동기발전기/관성 제어방식 블록 다이어그램

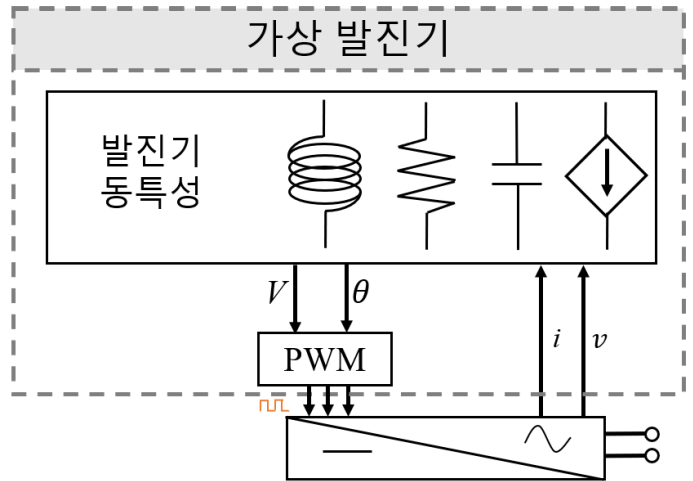


Fig. 6. 가상 발전기 제어방식 블록 다이어그램

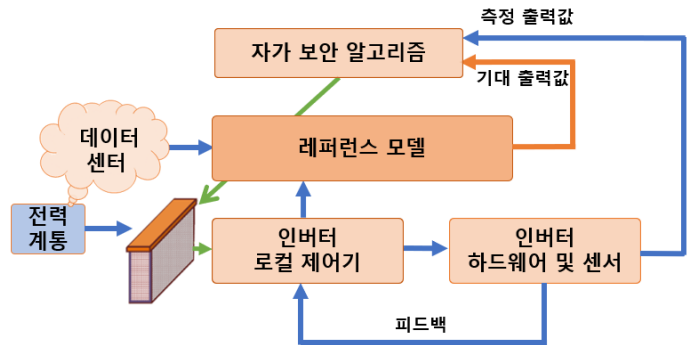


Fig. 7. 사이버 공격에 대비한 감시/제어명령 레퍼런스 모델을 활용한 자가 보안 시스템 블록 다이어그램 [1]

1.2.2.3 가상 발전기 제어방식

계통 형성 모드 스마트 인버터의 가상 발전기(Oscillator) 제어방식은 비교적 최근에 등장한 제어기법 [10]으로 Fig. 6에서 보는 바와 같이 비선형 발전기의 동특성을 모사하여 스마트 인버터를 제어하는 기법이다 [4]. 가상 동기발전기/관성 제어방식과 유사하게 가상 발전기 제어방식은 디지털 모델로 생성된 가상 발전기를 스마트 인버터가 모사할 수 있도록 인버터 출력전력을 제어하는 기법이다. 가상 동기발전기 제어방식과의 주요 차이점은 스마트 인버터가 모사하는 디지털

가상 발전기 모델의 고유 주파수는 교류 전력계통의 정격 주파수와 일치하게 하고, 나머지 다른 모델 파라미터는 정격 전압과 제어 대역폭에 따라 미세 조정한다는 것이다 [4].

II. 유연성 및 자가 적응 기능

대개 유도성 리액턴스 성분이 상대적으로 적게 분포된 소규모 독립형 마이크로그리드와 같은 약한 그리드(Weak grid)에서 스마트 인버터는 운전된다. 따라서, 계통연계 운전모드와 독립형 마이크로그리드 운전모드 간의 원활한 전환과 더 넓은 범위의 계통 안정도 확보를 위해 스마트 인버터는 유연성 및 자가 적응(Self-adapting) 기능을 가져야 한다 [1].

전력계통은 자연재해, 물리적/사이버 공격 등으로 인해 정전이 발생할 수 있다. 이러한 상황에 대처하기 위해 스마트 인버터는 전력계통 정전 사고를 감지하고, 독립형 마이크로그리드 모드로 운전될 수 있게 제어되어야 한다. 전력계통 정전 사고를 감지하는 가장 간단한 방법은 계통연계점에서 측정된 전압, 주파수가 IEEE Std. 1547-2018에 정의된 정상 작동범위를 벗어났는지 확인하는 것이다. 전력계통 정전사고 탐지오류를 방지하기 위해 IEEE Std. 1547-2018에 정의된 정상 전압 작동범위를 벗어나는 시간 간격을 고려해야 한다 [1].

독립형 마이크로그리드를 구성하거나, 여러 마이크로그리드가 함께 운전되는 마이크로그리드 간 계통 형성을 위해서는 계통 구성요소 간의 동기화된 데이터 공유를 통해 광역 감시제어기(3차 제어기)로 마이크로그리드를 상호 연계시킬 수 있다 [1]. 이러한 가상 데이터를 활용한 광역 감시 제어 구조를 통해 그린에너지의 간헐적인 발전 특성으로 인해 발생하는 전력품질 저하 문제를 개선할 수 있다. 예를 들어, 바람이 심하게 불어 풍속이 풍력터빈 수용 한계 초과가 예측될 경우 풍력터빈의 계통 연계를 잠시 중단할 수 있다.

인버터는 관성이 거의 없으므로, 약한 그리드에서 인버터는 전압 변동에 취약하다. 더욱이, 매우 약한 그리드에서 인버터가 운전될 경우, 안정도 문제로 인버터가 전력계통에서 탈락할 수 있다. 전력계통에 정전이 발생하여 계통과 분리 운전 직후의 독립 운전 모드 마이크로그리드에서 이러한 안정도 문제로 인버터가 갑자기 탈락하게 된다면 독립 모드로 운전 중인 마이크로그리드에서도 연쇄 고장이 발생할 수 있다. 이러한 문제에 대처하기 위해, 올바른 위상 고정 루프(Phase-locked loop, PLL) 대역폭 설계 [11], [12], 전류제어 루프 설계, 전압제어 피드포워드(Feed-forward) 루프에 가상 임피던스 제어기 설계 [13], 및 필터 매개변수 설계 등으로 스마트 인버터는 자가 적응 제어 성능을 향상시켜야 한다.

III. 통신 및 자가 보안 (Self-security) 기능

통신을 통해 외부 데이터를 활용하여 스마트 인버터를 운전함으로써 전력계통 추종 스마트 인버터와 전력계통 형성 스마트 인버터 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만, 스마트 인버터와 전력계통 운영자 간 데이터 통신에 기반하여 스마트 인버터를 운전할 경우 인버터가 사이버 공격 대상이 될 수도 있다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이, 사이버 공격 등에 의한 악의적인 제어명령 데이터와 전력계통 운영자에서 수신하는 정상 제어명령 데이터를 구분하기 위한 레퍼런스 모델 시스템 사용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 사전에 서로 알고 있는 메시지 인증코드(Message Authentication Code, MAC)를 통한 보안 통신을 통해 제어명령 데이터가 전력계통

운영자로부터 수신되었고 해당 제어명령 데이터가 중간에 훼손되거나 해커에 의해 고의로 변경되었는지 확인할 수 있다 [1].

IV. 고장진단 및 자가 복구 기능

스마트 인버터의 조기 고장진단 및 자가 복구(Self-healing) 기능은 매우 중요한 기능이다. 특히 독립 운전모드 마이크로그리드와 그린에너지의 계통 투입률이 높은 분산전원 인버터에 있어 이러한 고장진단 및 자가 복구 기능은 더욱 중요하다 [1]. 독립형 마이크로그리드에서 전체 부하 시스템 전력은 인버터들 간에 서로 분담하기 때문에 계통 이상상황으로 사고 발생 시 특정 인버터가 갑자기 탈락된다면 이 사고의 영향으로 다른 인버터 또한 연쇄 탈락되게 될 수 있다 [1]. 이는 앞서 살펴본 약한 그리드에서 안정도 문제로 인버터가 전력계통에서 탈락하여 연쇄 고장에 의한 정전사고가 발생하는 경우와 유사하다.

V. 스마트 인버터 주요 기능 요약 및 전망

본 고에서는 스마트 인버터의 주요 기능인 자가 통제, 자가 적응, 자가 보안, 자가 복구 기능에 대하여 살펴보았다. 스마트 인버터는 자가 통제 기능으로 가상 관성을 만들어 그리드 코드를 만족하면서 전압보상과 보조서비스를 제공할 수 있다. 즉, 그린에너지 계통 투입률이 증가하더라도 계통 형성 인버터를 사용한다면 계통 관성을 유지할 수 있을 것으로 전망된다. 이와 관련하여 계통 형성 인버터의 계통 주파수 및 전압 형성을 위한 중앙 집중/분산 제어방식에 대해 알아보았다. 스마트 인버터 자가 적응 기능은 인버터의 안정적인 운영과 성능 향상을 위하여 전력계통의 전력손실을 감지하고 이에 대응할 수 있는 적응형 제어 기술을 말한다. 자가 보안 기능은 사이버 공격에 대비하기 위해 보안 통신 네트워크를 통해 스마트 인버터를 제어할 수 있는 기술이다. 마지막으로, 스마트 인버터 고장진단에 대한 중요성과 자가 복구 기능에 대하여 살펴보았다.

자가 복구 기술은 통해 계통 고장이 발생했을 때 인버터의 갑작스러운 탈락을 방지할 수 있도록 하는 기술이다.

References

- [1] B. Mirafzal and A. Adib, "On grid-interactive smart inverters: features and advancements," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 160526-160536, 2020.
- [2] J. Hu, Z. Li, J. Zhu, and J. M. Guerrero, "Voltage stabilization: a critical step toward high photovoltaic penetration," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 17-30, Jun. 2019.
- [3] S. A. Khajehoddin, M. Karimi-Ghartemani, and M. Ebrahimi, "Grid supporting inverters with improved dynamics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 5, pp. 3655-3667, May 2019.
- [4] Y. Lin, J. Eto, B. Johnson, J. Flicker, R. Lasseter, H. Pico, G. Seo, B. Pierre, and A. Ellis, "Research roadmap on grid-forming inverters," Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5D00-73476, <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>.
- [5] J. Lamb and B. Mirafzal, "Grid-interactive cascaded H-bridge multilevel converter PQ plane operating region analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5744-5752, Nov. 2017.
- [6] IEEE Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, IEEE Std 1547-2003, 2003.
- [7] IEEE Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces, IEEE Std 1547-2018, 2018.

- [8] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, A. Borrell and L. G. de Vicuña, "Active and reactive power strategies with peak current limitation for distributed generation inverters during unbalanced grid faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 3, pp. 1515-1525, Mar. 2015.
- [9] M. Chandorkar, D. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 29, no. 1 Jan./Feb. 1993.
- [10] B. Johnson, et al, "Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters," *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 31 no. 8, pp. 6002-6015, Aug. 2016. [11] M. Cespedes and J. Sun, "Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 516_523, Apr. 2014.
- [12] L. Jia, X. Ruan, W. Zhao, Z. Lin, and X. Wang, "An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 11, pp. 9561-9574, Nov. 2018.
- [13] J. Xu, S. Xie, Q. Qian, and B. Zhang, "Adaptive feedforward algorithm without grid impedance estimation for inverters to suppress grid current instabilities and harmonics due to grid impedance and grid voltage distortion," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 9, pp. 7574-7586, Sep. 2017.