



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0115372
(43) 공개일자 2020년10월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H02J 3/38 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H02J 3/381 (2013.01)

Y04S 10/12 (2020.08)

(21) 출원번호 10-2020-0038265

(22) 출원일자 2020년03월30일

심사청구일자 2020년03월30일

(30) 우선권주장

1020190037028 2019년03월29일 대한민국(KR)

(71) 출원인

인천대학교 산학협력단

인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)

(72) 발명자

김학만

서울특별시 서대문구 성산로7길 45(연희동)

이운규

인천광역시 연수구 송도미래로 30, 송도 BRC 스마트밸리 지식산업센터 C동 905호(송도동)

유형준

인천광역시 남동구 논현남로30번길 9 (논현동)

(74) 대리인

특허법인충정

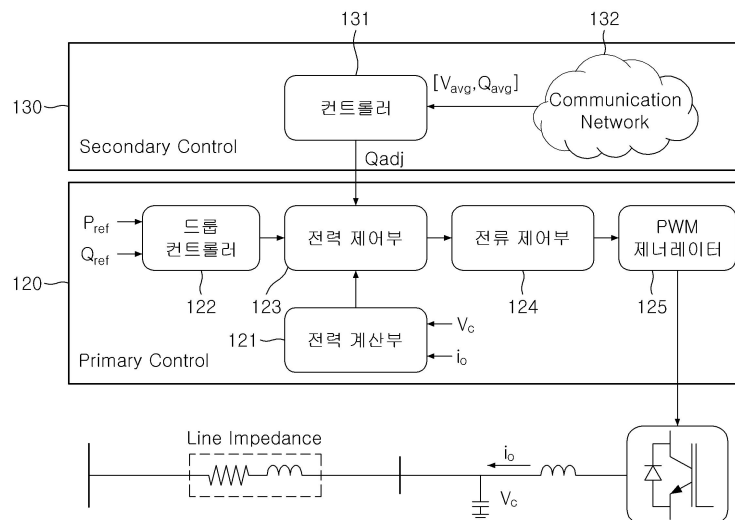
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치

(57) 요약

컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치는 기존에 중앙 집중식 형태가 아닌 컨센서스 알고리즘을 이용한 분산형 LVRT(Low Voltage Ride Through) 제어 기법을 적용하여 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT 기능을 수행할 수 있다.

대표도



(52) CPC특허분류

Y04S 40/00 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415159276
과제번호	20168530050030
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	에너지국제공동연구사업
연구과제명	고품질 마이크로그리드를 위한 Resilient 하이브리드 기술 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	인천대학교산학협력단
연구기간	2018.04.01 ~ 2019.03.31

명세서

청구범위

청구항 1

무효 전력 공유를 유지하면서 전압 저하 동안 분산 발전장치(Distributed Generation, DG)의 출력 전압을 복구하기 위해 상기 DG에 주입되는 최종 무효 전력을 계산하는 2차 제어 계층; 및

상기 2차 제어 계층으로부터 상기 최종 무효 전력을 주입받고, 측정된 전력과 상기 최종 무효 전력을 이용하여 기준 전류값을 계산하고, 상기 계산된 기준 전류값을 이용하여 기준 전압값을 계산하여 상기 DG의 출력 전압을 복구하는 제1 제어 계층을 포함하며, 상기 제1 제어 계층은 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT(Low Voltage Ride Through) 기능을 수행할 수 있는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

청구항 2

컨센서스 알고리즘으로부터 생성된 무효 전력 정보와 LVRT(Low Voltage Ride Through) 곡선에서 전압 강하에 따라 결정된 무효 전력 정보를 이용하여 무효 전력 공유를 유지하면서 전압 저하 동안 분산 발전장치(Distributed Generation, DG)의 출력 전압을 복구하기 위해 상기 DG에 주입되는 최종 무효 전력을 계산하는 2차 제어 계층; 및

상기 2차 제어 계층으로부터 상기 최종 무효 전력을 주입받고, 측정된 전력과 상기 최종 무효 전력을 이용하여 기준 전류값을 계산하고, 상기 계산된 기준 전류값을 이용하여 기준 전압값을 계산하여 상기 DG의 출력 전압을 복구하는 제1 제어 계층을 포함하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

청구항 3

제1항 또는 제2항 있어서,

상기 1차 제어 계층은,

주파수 변동에 따라 주파수 드롭 계수를 결정하고, 전압 변동에 따라 전압 드롭 계수를 결정하는 드롭 루프 제어를 수행하는 드롭 컨트롤러;

외부로부터 입력된 전압과 전류를 수신하여 전력 정보를 계산하는 전력 계산부; 및

상기 결정된 주파수 드롭 계수를 비례 적분 제어에 의해 제1 기준 전류값을 계산하고, 측정된 무효 전력에서 상기 결정된 전압 드롭 계수와, 상기 1차 제어 계층으로부터 수신된 최종 무효 전력의 차이를 계산하고, 비례 적분 제어를 통해 제2 기준 전류값을 계산하는 전력 제어부를 포함하는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 전력 제어부는 하기의 수학적 식 1과 수학적 식 2를 이용하여 상기 제1 기준 전류값과 상기 제2 기준 전류값을 계산하는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

[수학적 식 1]

$$I_d^* = k_p^p [k_w(f_{ref} - f) - P] + k_i^p \int [k_w(f_{ref} - f) - P] dt$$

[수학적 식 2]

$$I_q^* = k_p^p [(Q + Q_{adj}) - k_v(V_{ref} - V)] + k_i^p \int [(Q + Q_{adj}) - k_v(V_{ref} - V)] dt$$

여기서, k_p^P 및 k_i^P 는 전력 제어의 비례 및 적분 계수이고, P와 Q는 각각 측정된 유효 전력 및 무효 전력이고, f_{ref} 와 V_{ref} 는 각각 기준 주파수와 전압을 나타낸다. f와 V는 측정된 주파수와 전압이고, kw 및 kv 는 각각 주파수 드롭 계수 및 전압 드롭 계수임.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 제1 기준 전류값과 상기 제2 기준 전류값을 하기의 수학적식 3과 수학적식 4에 대입하여 제1, 2 기준 전압값 (U_d , U_q)을 계산하는 전류 제어부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

[수학적식 3]

$$U_d = k_p^c [I_d^* - I_d] + k_i^c \int [I_d^* - I_d] dt + V_d + I_q(\omega L_f)$$

[수학적식 4]

$$U_q = k_p^c [I_q^* - I_q] + k_i^c \int [I_q^* - I_q] dt + V_q - I_d(\omega L_f)$$

여기서, k_p^c 와 k_i^c 는 전류 제어부의 비례 이득과 적분 이득, V_d 와 V_q 는 측정된 전압의 dp 구성요소, I_d 와 I_q 는 측정된 전류의 dp 구성요소, L_f 는 인덕턴스 필터, w는 마이크로그리드 시스템의 측정된 각 주파수를 나타내고, 수학적식에서 *는 지령치를 의미하고, *가 없는 구성요소는 측정치를 의미함.

청구항 6

제1항 또는 제2항 있어서,

상기 2차 제어 계층의 컨트롤러는 하기의 수학적식 5에 의해 상기 1차 제어 계층으로 주입되는 제1 무효 전력 정보 Q_L 를 계산하는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

[수학적식 5]

$$Q_L = \begin{cases} 0 & , \quad 0.8 \leq V_g^{pu} \leq 1.1 \\ Q_{max} & , \quad V_g^{pu} < 0.5 \\ k(V_{g0} - V_g) & , \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, V_{g0} 와 V_g 는 전압 강하의 전후에 그리드 전압이고, Q_{max} 는 컨버터의 최대 전력 용량임.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 2차 제어 계층의 컨트롤러는 하기의 수학적식 6에 의해 상기 1차 제어 계층으로 주입되는 제2 무효 전력 정보 Q_C 를 계산하는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

[수학식 6]

$$Q_C = \left\{ k_p^q (Q_{avg} - Q_{ref}) + k_i^q \int (Q_{avg} - Q_{ref}) dt \right\} + \left\{ k_p^v (V_{ref} - V_{avg}) + k_i^v \int (V_{ref} - V_{avg}) dt \right\}$$

여기서, k_p^q , k_i^q , k_p^v , and k_i^v 는 2차 제어 계층에서의 비례 계수와 적분 계수이고, V_{avg} 와 Q_{avg} 는 컨센서스 알고리즘으로부터 계산된 전압의 평균값과 무효 전력의 평균값이고, V_{ref} 는 기준 전압값임.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 2차 제어 계층의 컨트롤러는 상기 제1 무효 전력 정보 Q_L 와 상기 제2 무효 전력 정보 Q_C 를 합산기를 통해 합산하여 최종 무효 전력(Q_{adj})을 계산하고, 상기 계산한 최종 무효 전력을 상기 1차 제어 계층으로 투입되는 것을 특징으로 하는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 마이크로그리드 분산 제어 장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, 기존에는 중앙 집중식 형태가 아닌 컨센서스 알고리즘을 이용한 분산형 LVRT(Low Voltage Ride Through) 제어 기법을 적용하여 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT 기능을 수행할 수 있는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 분산형 에너지 자원(Distributed Energy Resources, DERs)과 에너지 저장 시스템(Energy Storage Systems, ESS)이 마이크로그리드(Microgrid, MG) 시스템에 적용된 이후, DERs와 ESS의 갑작스러운 분리는 전체 MG 시스템의 안정성과 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다.
- [0003] AC 마이크로그리드(MG) 시스템은 신재생 에너지 자원 및 에너지 저장 시스템과 같은 인버터 기반 분산 발전기(Distributed Generators, DGs)로 구성되어 있으며, 독립 또는 계통 연계 모드로 작동 할 수 있다.
- [0004] 계통 연계형 시스템 운영이 가장 경제적인 운영임에도 불구하고 고장이나 전압 저하와 같은 유틸리티 그리드의 교란은 MG 운영에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- [0005] 유틸리티 그리드로부터의 교란으로 인해 DG가 MG 시스템에서 분리 될 수 있다. 교란 이후에 이들 DGs에 대한 추가 재연결 프로세스가 필요하다. DG의 급격한 단절은 MG 시스템의 안정성과 신뢰성에 영향을 줄 수 있다.
- [0006] 종래의 마이크로그리드 시스템은 분산 발전이 증가함에 따라 계통 내 사고 발생시 저전압에 의해 분산 발전이 계통에서 분리되는 문제가 발생한다.
- [0007] 기존에는 중앙 집중식 형태로 별도의 중앙 컨트롤러를 통해 마이크로그리드(MG) 시스템의 안정적인 작동을 유지하기 위한 LVRT(low-voltage ride-through) 기능을 수행하여 전압을 복구하고 분산 발전의 분리를 방지하였다.
- [0008] 하지만 계통 내 통신 장애 발생시 중앙 집중식 제어기는 고장에 따라 해당 위치의 분산 전원에서 LVRT 제어를 수행하지 못하는 문제가 발생한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 한국 등록특허번호 제10-1375812호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명은 기존에는 중앙 집중식 형태가 아닌 컨센서스 알고리즘을 이용한 분산형 LVRT(Low Voltage Ride Through) 제어 기법을 적용하여 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT 기능을 수행할 수 있는 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치를 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0011] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 따른 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치는,
- [0012] 무효 전력 공유를 유지하면서 전압 저하 동안 분산 발전장치(Distributed Generation, DG)의 출력 전압을 복구하기 위해 상기 DG에 주입되는 최종 무효 전력을 계산하는 2차 제어 계층; 및
- [0013] 상기 2차 제어 계층으로부터 상기 최종 무효 전력을 주입받고, 측정된 전력과 상기 최종 무효 전력을 이용하여 기준 전류값을 계산하고, 상기 계산된 기준 전류값을 이용하여 기준 전압값을 계산하여 상기 DG의 출력 전압을 복구하는 제1 제어 계층을 포함하며, 상기 제1 제어 계층은 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT(Low Voltage Ride Through) 기능을 수행할 수 있는 것을 특징으로 한다.
- [0014] 본 발명의 특징에 따른 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치는,
- [0015] 컨센서스 알고리즘으로부터 생성된 무효 전력 정보와 LVRT(Low Voltage Ride Through) 곡선에서 전압 강하에 따라 결정된 무효 전력 정보를 이용하여 무효 전력 공유를 유지하면서 전압 저하 동안 분산 발전장치(Distributed Generation, DG)의 출력 전압을 복구하기 위해 상기 DG에 주입되는 최종 무효 전력을 계산하는 2차 제어 계층; 및
- [0016] 상기 2차 제어 계층으로부터 상기 최종 무효 전력을 주입받고, 측정된 전력과 상기 최종 무효 전력을 이용하여 기준 전류값을 계산하고, 상기 계산된 기준 전류값을 이용하여 기준 전압값을 계산하여 상기 DG의 출력 전압을 복구하는 제1 제어 계층을 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0017] 전술한 구성에 의하여, 본 발명은 기존에는 중앙 집중식 형태가 아닌 컨센서스 알고리즘을 이용한 분산형 LVRT(Low Voltage Ride Through) 제어 기법을 적용하여 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT 기능을 수행할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0018] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 LVRT 동작을 위한 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치와 전체 시스템을 나타낸 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 분산 제어 장치의 1차 제어 계층과 2차 제어 계층을 나타낸 도면이다.
- 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 1차 제어 계층의 내부 구성을 나타낸 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 2차 제어 계층의 내부 구성을 나타낸 도면이다.
- 도 5는 본 발명의 실시예의 LVRT 용량의 요구 조건을 나타낸 도면이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예의 무효 전력 지원 용량을 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0019] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.

- [0020] 분산 발전장치(Distributed Generation, DG)은 유틸리티 그리드로부터 교란으로 인해 마이크로그리드 시스템으로부터 분리될 수 있다.
- [0021] 분산 발전장치(Distributed Generation, DG)가 마이크로그리드 시스템에 적용된 이후에 DG의 갑작스러운 분리는 전체 마이크로그리드 시스템의 안전성과 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다.
- [0022] 따라서, 마이크로그리드 시스템은 분리된 DG에 대한 추가 재연결 프로세스가 필요하다.
- [0023] 이러한 마이크로그리드 시스템의 안정적인 동작을 위해서는 LVRT(Low Voltage Ride Through) 기능을 고려해야 한다.
- [0024] 본 발명은 마이크로그리드 시스템의 LVRT 동작을 위한 컨센서스(Consensus) 알고리즘에 기반한 분산 제어를 제공한다.
- [0025] LVRT 작동을 위한 기존의 컨트롤러는 전압 저하 시 전압 복원에만 집중했으나, 무효 전력 공유를 고려하지 않았다.
- [0026] 컨트롤러의 신뢰성은 마이크로그리드 시스템의 LVRT 작동의 중요한 측면이다.
- [0027] 본 발명의 컨트롤러는 컨센서스 알고리즘을 기반한 분산 제어의 사용으로 신뢰성을 향상시킬 수 있다.
- [0028] 본 발명은 전력 공유를 위한 드롭 제어를 갖는 1차 계층과 무효 전력 및 전압 제어를 위한 2차 계층으로 구성된 계층적 제어에 기반한다.
- [0030] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 LVRT 동작을 위한 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 장치와 전체 시스템을 나타낸 도면이고, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 분산 제어 장치의 1차 제어 계층과 2차 제어 계층을 나타낸 도면이고, 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 1차 제어 계층의 내부 구성을 나타낸 도면이고, 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 2차 제어 계층의 내부 구성을 나타낸 도면이다.
- [0031] 마이크로그리드(MG) 시스템은 안정적인 작동을 유지하기 위한 LVRT(low-voltage ride-through) 기능을 고려해야 한다.
- [0032] 본 발명은 컨센서스 알고리즘을 이용한 분산형 LVRT 제어 기법을 적용하여 하나 이상의 통신 라인이 고장나더라도 통신을 지속하여 LVRT 기능을 수행할 수 있는 성능을 제공한다.
- [0033] 본 발명의 마이크로그리드 시스템의 LVRT 동작을 위한 동적 컨센서스 알고리즘에 기반한 분산 제어를 제공한다. 이러한 본 발명의 분산 제어 방법은 1차 레이어(Primary Layer)와 2차 레이어(Secondary Layer)로 구성된 계층적 제어를 기반으로 한다.
- [0034] 1차 제어 계층(120)은 전력 조절을 담당하고, 2차 제어 계층(130)은 마이크로그리드 시스템의 LVRT 작동을 담당합니다. 드롭 컨트롤러(122)는 마이크로그리드 시스템의 병렬 분산 발전장치들 간의 전력 공유를 유지하기 위해 1차 제어 계층(120)에서 사용된다.
- [0035] 동적 컨센서스 알고리즘은 LVRT 동작을 위한 정확한 무효 전력 공유 및 전압 복원을 제어하기 위해 2차 제어 계층(130)에서 사용된다.
- [0036] 본 발명의 컨센서스를 기반한 마이크로그리드 분산 제어 시스템은 전력 공유를 위한 드롭 루프 제어를 갖는 1차 제어 계층(120)과 무효 전력 및 전압 제어를 갖는 2차 제어 계층(130)으로 구성된 계층적 제어에 기반한다.
- [0037] 마이크로그리드 시스템에서 DG(Distributed Generation) 사이의 출력 무효 전력 및 출력 전압의 평균값을 찾기 위해 2차 제어 계층(130)에서 동적 컨센서스 알고리즘을 사용한다.
- [0038] 분산 제어 시스템은 복수의 DG(Distributed Generation)(110)로 이루어져 있다.
- [0039] LVRT 동작을 위한 각각의 DG(110)는 전압 저하 동안 시스템 전압을 보상하기 위하여 무효 전력을 제공한다.
- [0040] 각각의 DG(110)는 1차 제어 계층(120)과 2차 제어 계층(130)을 포함한 분산 제어 장치(100)의 제어를 받는다.
- [0041] 도 1에 도시된 분산 제어 시스템의 시스템 파라미터는 다음의 표 1과 같다.

표 1

Symbol	Parameters	Value	Unit
V_{ref}	Rated RMS voltage	110	V
f_{ref}	Rated voltage frequency	60	Hz
f_s	Switching frequency	10	kHz
L_f	Filter inductance	1	mH
C_f	Filter capacitance	10	μ F
k_p^p	Primary power controller proportional coefficient	0.01	-
k_i^p	Primary power controller integral coefficient	0.05	-
k_p^c	Primary current controller proportional coefficient	5	-
k_i^c	Primary current controller integral coefficient	200	-
k_p^h	Secondary reactive power controller proportional coefficient	0.5	-
k_i^h	Secondary reactive power controller integral coefficient	300	-
k_p^v	Secondary voltage controller proportional coefficient	0.8	-
k_i^v	Secondary voltage controller integral coefficient	200	-
Z_1	Line impedance#1	$0.08 + j0.94$	Ω
Z_2	Line impedance#2	$0.04 + j0.46$	Ω
Z_3	Line impedance#3	$0.06 + j0.62$	Ω
Z_4	Line impedance#4	$0.06 + j0.62$	Ω

[0042]

[0043]

1차 제어 계층(120)은 전력 조정을 담당하고, 2차 제어 계층(130)은 전압 복원을 담당한다. 드롭 제어는 DG(110) 간의 전력 공유를 유지하기 위해서 1차 제어 계층(120)에서 사용한다. 동적 컨센서스 알고리즘은 2차 제어 계층(130)에서 무효 전력 및 시스템 전압을 제어하는데 사용된다.

[0044]

도 1에 도시된 바와 같이, 컨트롤러에서 전압 및 전류 측정값(v_c 및 i_o)을 이용하여 전력 제어 루프의 유효 전력 및 무효 전력을 계산한다.

[0045]

유효 전력 및 무효 전력 레퍼런스(P_{ref} 및 Q_{ref})는 1차 제어 계층(120)의 드롭(Droop) 컨트롤러에 사용된다.

[0046]

2차 제어 계층(130)은 평균 전압 및 무효 전력(V_{avg} 및 Q_{avg})을 사용하여 교란 중에 계통 전압을 복구하기 위해 필요한 무효 전력(Q_{adj})을 계산한다. 컨버터에는 인덕터(L_f)와 커패시터(C_f)가 있는 출력 필터가 사용된다.

[0048]

전류 제어부(124)는 전압 소스 컨버터(Voltage Source Converter, VSC)가 사용된다. 전압 소스 컨버터의 컨트롤러는 비례 적분(PI) 제어 기술로 dq 기준 프레임에서 회전되어 구현된다.

[0049]

1차 제어 계층(120)은 전력 계산부(121), 드롭 컨트롤러(122), 전력 제어부(123), 전류 제어부(124) 및 PWM 제너레이터(125)로 구성된다. 유효 전력, 주파수, 무효 전력, 전압 저하 제어는 병렬 DG(110) 간의 유효 전력 및 무효 전력 공유를 유지하는데 사용된다.

[0050]

전력 계산부(121)는 DG(110)로부터 입력된 전압과 전류를 수신하여 측정된 전력 정보를 계산한다.

[0051]

드롭 컨트롤러(122)는 주파수 변동에 따라 주파수 드롭 계수를 결정하고, 전압 변동에 따라 전압 드롭 계수를 결정하는 드롭 루프 제어를 수행한다.

[0052]

도 2에 도시된 바와 같이, 전력 제어부(123)와 전류 제어부(124)의 제어 다이어그램(Diagram)이 나타나 있다.

[0053]

전력 제어부(123)는 결정된 주파수 드롭 계수와 측정된 전력 정보를 차이 계산하고, 비례 적분 제어에 의해 제1 기준 전류값을 계산하고, 측정된 무효 전력에서 결정된 전압 드롭 계수와, 1차 제어 계층(120)으로부터 수신된 최종 무효 전력의 차이를 계산하고, 비례 적분 제어를 통해 제2 기준 전류값을 계산한다.

[0054]

전력 제어부(123)는 디커플링(Decoupling) 제어 방법을 기반으로 기준 전류값(Reference)을 수학적 1과 수학적 2에 의해 계산한다.

[0055]

전력 제어부(123)는 측정된 유효 전력 및 무효 전력, 주파수, 전압을 수학적 1과 수학적 2에 대입하여 제1, 2

기준 전류값(I_d^* and I_q^*)을 계산한다.

수학식 1

$$I_d^* = k_p^p [k_w(f_{ref} - f) - P] + k_i^p \int [k_w(f_{ref} - f) - P] dt$$

수학식 2

$$I_q^* = k_p^p [(Q + Q_{adj}) - k_v(V_{ref} - V)] + k_i^p \int [(Q + Q_{adj}) - k_v(V_{ref} - V)] dt$$

여기서, k_p^p 및 k_i^p 는 전력 제어의 비례 및 적분 계수이고, P와 Q는 각각 측정된 유효 전력 및 무효 전력이고, f_{ref} 와 V_{ref} 는 각각 기준 주파수와 전압을 나타낸다. f와 V는 측정된 주파수와 전압이고, kw 및 kv 는 각각 주파수 드롭 계수 및 전압 드롭 계수를 나타낸다.

하기의 수학식 3 및 수학식 4에 나타낸 바와 같이, 전류 제어부(124)는 수학식 1과 수학식 2에 의해 계산된 제 1, 2 기준 전류값을 수학식 3과 수학식 4에 대입하여 제1, 2 기준 전압값(U_d , U_q)을 계산한다.

수학식 3

$$U_d = k_p^c [I_d^* - I_d] + k_i^c \int [I_d^* - I_d] dt + V_d + I_q(\omega L_f)$$

수학식 4

$$U_q = k_p^c [I_q^* - I_q] + k_i^c \int [I_q^* - I_q] dt + V_q - I_d(\omega L_f)$$

여기서, k_p^c 와 k_i^c 는 전류 제어부(124)의 비례 이득과 적분 이득, V_d 와 V_q 는 측정된 전압의 dp 구성요소, I_d 와 I_q 는 측정된 전류의 dp 구성요소, L_f 는 인덕턴스 필터, w는 마이크그리드 시스템의 측정된 각 주파수를 나타낸다. 수학식에서 *는 지령치를 의미하고, *가 없는 구성요소는 측정치를 의미한다.

PWM 제너레이터(125)는 제1, 2 기준 전압값(U_d , U_q)에 따라 전력 변화를 제어할 수 있다.

본 발명은 마이크그리드 시스템의 LVRT 성능을 향상시키기 위해 동적 컨센서스 알고리즘을 기반으로 한 DG(110)의 분산 제어를 제안한다.

본 발명의 제어 방법은 Droop 제어가 있는 1차 제어 계층(120)과, LVRT 기능이 있는 2차 제어 계층(130)으로 구성된 계층적 제어를 기반으로 한다.

동적 컨센서스 알고리즘을 기반으로 2차 제어 계층(130)은 무효 전력 공유를 유지하면서 전압 저하 동안 DG(110)의 출력 전압을 복구하기 위해 주입되는 무효 전력을 계산한다.

동적 컨센서스 알고리즘은 전압 저하가 발생하는 동안 무효 전력 공유와 전압 복원을 달성하기 위해 2차 제어

계층(130)을 사용한다.

[0068] 2차 제어 계층(130)의 제어 다이어그램은 도 4에 도시되어 있다.

[0069] 통신 네트워크(132)는 DG(110) 간의 정보를 교환하는데 사용된다.

[0070] 또한, 동적 컨센서스 알고리즘은 DG(110) 간의 무효 전력과 전압의 평균값을 찾는데 사용된다.

[0071] 2차 제어 계층(130)은 PI 레귤레이터를 통해 무효 전력을 제어할 수 있다.

[0072] PI 레귤레이터는 무효 전력을 제어하고, 컨센서스 알고리즘으로부터 얻은 기준이 되는 전압값을 제어하는데 사용된다.

[0073] 2차 제어 계층(130)의 컨트롤러(131)는 동적 컨센서스 알고리즘으로부터 평균 무효 전력을 수신하고, 평균 무효 전력과 기준 무효 전력을 감산기(133a)에 의해 뺄셈 연산을 수행하고, PI 레귤레이터(134a)를 통해 무효 전력을 제어한다.

[0074] 2차 제어 계층(130)의 컨트롤러(131)는 동적 컨센서스 알고리즘으로부터 평균 전압을 수신하고, 평균 전압과 기준 전압을 감산기(133b)에 의해 뺄셈 연산을 수행하고, PI 레귤레이터(134b)를 통해 전압을 제어한다.

[0075] 컨트롤러(131)는 무효 전력과 전압을 합산기(135)를 통해 덧셈 연산하여 Q_C 를 계산한다.

[0076] Q_C 는 컨센서스 알고리즘으로부터 생성된 무효 전력 정보이고, 전압 지원의 요건이다.

[0077] 1차 제어 계층(120)으로 주입되는 무효 전력 정보 Q_L 는 도 2에서 전압 지원 요건에 따라 결정되고, 하기의 수식 5에 의해 계산된다.

수식식 5

$$Q_L = \begin{cases} 0 & , \quad 0.8 \leq V_g^{pu} \leq 1.1 \\ Q_{max} & , \quad V_g^{pu} < 0.5 \\ k(V_{g0} - V_g) & , \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

[0078] 여기서, V_{g0} 와 V_g 는 전압 강하의 전후에 그리드 전압이고, Q_{max} 는 컨버터의 최대 전력 용량이다.

[0079] 2차 제어 계층(130)의 컨트롤러(131)는 그리드 전압(V_g)이 0.5 PU 이상으로 떨어지면, 최대 무효 전력(Q_{max})이 주입되어 전압 강하를 보상한다.

[0080] 2차 제어 계층(130)의 컨트롤러(131)는 그리드 전압(V_g)이 데드 구간(0.8 PU 내지 1.1 PU)에 있다면, 무효 전력 정보 Q_L 이 0이 된다.

[0081] 그렇지 않은 경우 무효 전력 정보 Q_L 은 k 이득과 하강된 전압을 곱하여 결정한다.

[0082] 무효 전력 정보 Q_C 은 무효 전력 공유를 유지하고, 시스템 전압을 회복하는데 사용되며, 컨센서스 알고리즘에 의해 계산된다.

[0083] 도 5는 본 발명의 실시예의 LVRT 용량의 요구 조건을 나타낸 도면이고, 도 6은 본 발명의 실시예의 무효 전력 지원 용량을 나타낸 도면이다.

[0084] LVRT의 요구 사항을 충족시키기 위해 DG는 전압 저하 동안 계통 전압을 향상시키기 위해 무효 전력을 주입해야 한다.

- [0086] 예를 들어, 시스템 전압이 0.5초 동안 0.3pu 이상으로 떨어지면 점차적으로 최대 1.5s 내에서 명목상 그리드 전압(Vg)의 90%로 회복되고 도 5의 적색 곡선 위에 머물러 있으면 DG가 연결 상태를 유지해야 한다.
- [0087] 계통 전압이 적색 곡선 아래로 떨어지면, DG를 분리 할 수 있다.
- [0088] 그리드 전압이 20%이면, 그리드 전압의 a1% 강하는 무효 전력의 적어도 ak% 증가를 필요로 한다. 여기서, k는 기율기 상수로 각국의 그리드 코드에 따라 Drop 전압에 따라 필요한 무효 전력을 결정하도록 조정될 수 있다. 예를 들어, 호주의 기율기 상수 k는 덴마크와 독일의 경우 2인 반면, MG 시스템에서 기율기 상수 k는 6보다 커야 한다. 계통 전압이 50% 이상으로 떨어지면, DG는 최대 무효 전력(Qmax)을 공급해야 하며, 계통 전압의 감소가 70% 이상인 경우 DG를 분리해야 한다.
- [0089] 컨센서스 알고리즘은 DG(110) 간의 무효 전력 및 전압의 평균값을 계산하는데 사용된다. 각 DG(110)는 통신 네트워크(132)에서 하나의 노드로 간주될 수 있다.
- [0090] 각 노드는 로컬 상태 및 이웃 노드와의 통신을 기반으로 각 단계에서 업데이트를 수행할 수 있다.
- [0091] DG(110)의 네트워크 토폴로지는 노드 집합 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 과 엣지 $\mathcal{E}$ 를 가진 무방향 연결 그래프 (undirected connected graph) $G = (N, \mathcal{E})$ 를 이용하여 표현된다.
- [0092] i-DG의 이웃들은 $N_i = \{j \in N | \{i, j\} \in \mathcal{E}\}$ 에 의해 나타낼 수 있다.
- [0093] 모든 DG(110)에서 정보를 업데이트하기 위한 선형 반복 알고리즘(Linear iterative Algorithm)은 하기의 수학적식 6과 같다.

수학적식 6

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \sum_{j \in N_i}^n w_{ij}(x_j(t) - x_i(t))$$

- [0094]
- [0095] 여기서, t는 이산 시간 인덱스이고, X_i 는 Q_i 와 V_i 와 같은 각 DGi에 교환되는 정보이고, x_j 는 인접한 노드들의 정보이고, j는 노드 i에 인접한 DG(110)의 인덱스이고, w_{ij} 는 컨센서스 알고리즘의 가중치이고, N_i 는 노드 i에 연결된 노드들의 집합이고, n은 노드들의 총 개수를 나타낸다.
- [0096] 가중치 매트릭스는 네트워크 토폴로지에 따라 다르다. 링 커넥션은 통신 네트워크(132)에 사용되었고 가중치 매트릭스의 설계는 메트로폴리스 방법을 기반으로 한다. 가중 행렬의 설계는 하기의 수학적식 7에 주어진 메트로폴리스 방법을 기반으로 한다.

수학적식 7

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max[l_{ii}, l_{jj}] + 1} & , j \in N_i \\ 1 - \sum_{k \in N_i} \frac{1}{\max[l_{ii}, l_{kk}] + 1} & , j = i \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}$$

[0097]

[0098] 여기서, l_{ii} and l_{jj} 는 라플라시안 행렬 L의 구성요소이다.

수학식 8

$$x_i(\infty) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(0)$$

[0099]

[0100] 컨센서스 알고리즘의 최종 출력은 수학식 8에 의해 계산을 반복하여 찾는다.

[0101] 메트로폴리스 방법은 가중치 행렬이 업데이트 될 때 i와 j DG의 차수가 필요하다. 가중치 행렬은 네트워크 토폴로지의 변화에 따라 재계산되므로 DG(110) 간의 통신이 실패하더라도 지속적으로 제어할 수 있다. 따라서, 2차 제어 계층(130)에서는 통신 블록으로부터 평균 전압과 무효 전력을 수신하여 PI 제어기를 통해 1차 제어 계층(120)으로 주입되는 무효 전력을 발생하며, 1차 제어 계층(120)으로 주입되는 무효 전력 Q_C 는 다음의 수학식 9와 같다.

수학식 9

$$Q_C = \left\{ k_p^q (Q_{avg} - Q_{ref}) + k_i^q \int (Q_{avg} - Q_{ref}) dt \right\} + \left\{ k_p^v (V_{ref} - V_{avg}) + k_i^v \int (V_{ref} - V_{avg}) dt \right\}$$

[0102]

[0103] 여기서, k_p^q , k_i^q , k_p^v , and k_i^v 는 2차 제어 계층(130)에서의 비례 계수와 적분 계수이고, V_{avg} 와 Q_{avg} 는 컨센서스 알고리즘으로부터 계산된 전압의 평균값과 무효 전력의 평균값이고, V_{ref} 는 기준 전압값이다.

[0104] 최종적으로 요구되는 최종 무효 전력 Q_{adj} 은 무효 전력 공유를 위한 보상된 무효 전력 Q_C 와 전압 저하를 보상하기 위해 필요한 무효 전력 Q_L 의 두 가지 항목으로 구성된다.

[0105] 2차 제어 계층(130)의 컨트롤러(131)는 1차 제어 계층(120)으로 주입되는 제1 무효 전력 정보 Q_L 와 제2 무효 전력 정보 Q_C 를 합산기(136)를 통해 최종 무효 전력을 계산한다.

[0106] 2차 제어 계층(130)의 컨트롤러(131)는 다음의 수학식 10을 이용하여 최종 무효 전력을 계산하고, 계산된 최종 무효 전력을 1차 제어 계층(120)의 전력 제어부(123)로 전송한다.

수학식 10

$$Q_{adj} = Q_C + Q_L$$

[0107]

[0108] 본 발명의 LVRT 동작을 위한 분산 제어 장치(100)는 전압 저하 동안에 무효 전력 공유를 유지하면서 시스템 전압을 복원할 수 있다.

[0109] 본 발명은 통신 장애가 DG(110) 측 또는 PCC에서 발생하지만 모든 DG(110)는 전압 저하 중 각 DG(110)의 단자

전압을 복구하기 위해 안정적인 무효 전력 지원을 유지한다.

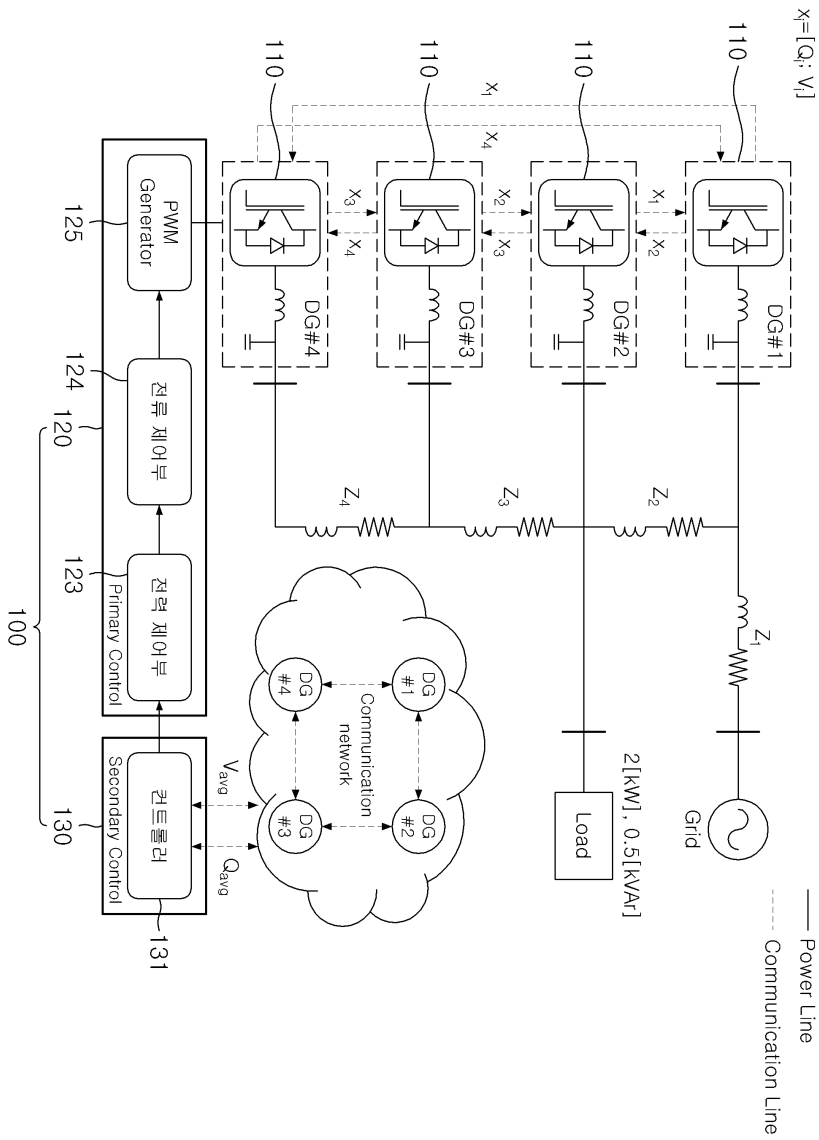
- [0110] LVRT 운영을 위해 제안된 분산 제어를 사용하는 제어 시스템의 신뢰성이 향상되었다. 제안된 분산 제어 기법은 중앙 집중식 기법보다 우수한 성능을 보였다.
- [0111] 이상에서 본 발명의 실시예는 장치 및/또는 방법을 통해서만 구현이 되는 것은 아니며, 본 발명의 실시예의 구성에 대응하는 기능을 실현하기 위한 프로그램, 그 프로그램이 기록된 기록 매체 등을 통해 구현될 수도 있으며, 이러한 구현은 앞서 설명한 실시예의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야의 전문가라면 쉽게 구현할 수 있는 것이다.
- [0112] 이상에서 본 발명의 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

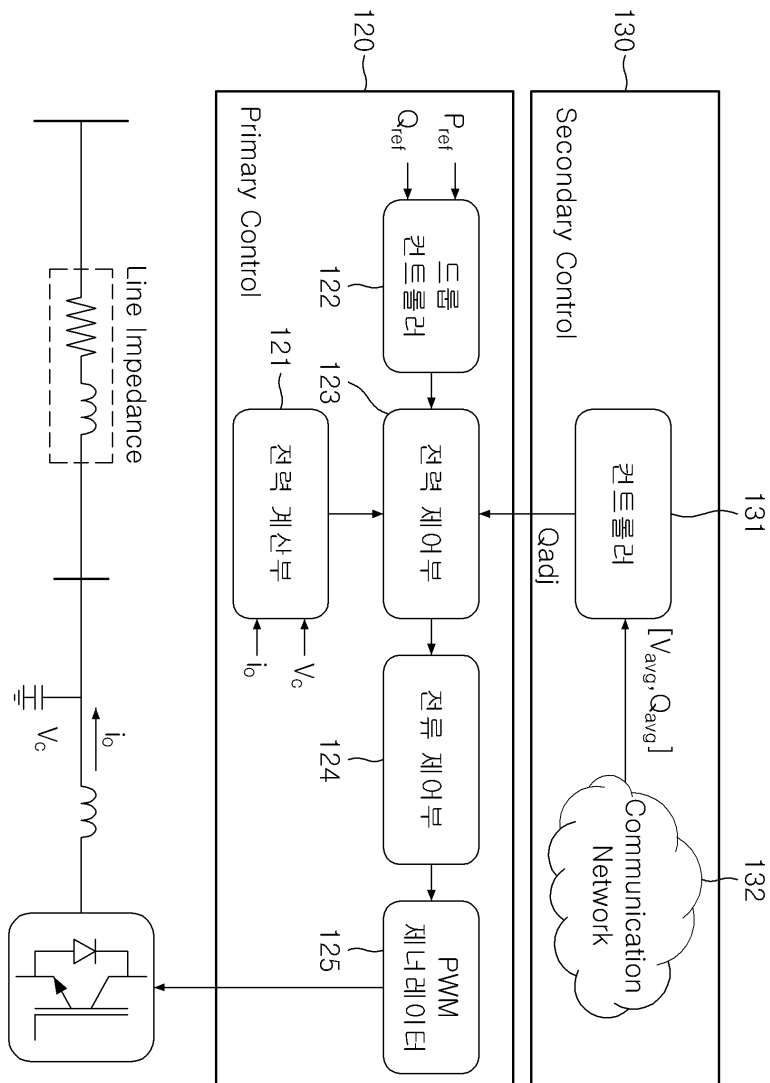
- [0113] 100: 분산 제어 장치
- 110: DG
- 120: 1차 제어 계층
- 121: 전력 계산부
- 122: 드롭 컨트롤러
- 123: 전력 제어부
- 124: 전류 제어부
- 125: PWM 제너레이터
- 130: 2차 제어 계층
- 131: 컨트롤러
- 132: 통신 네트워크

도면

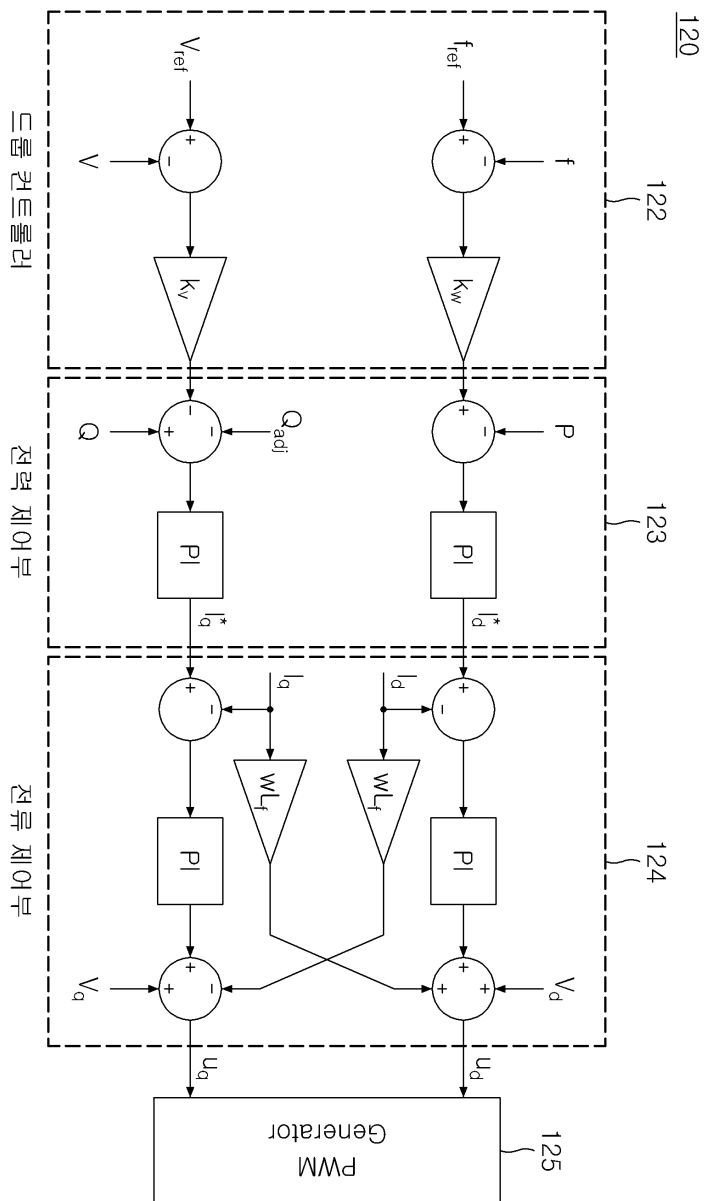
도면1



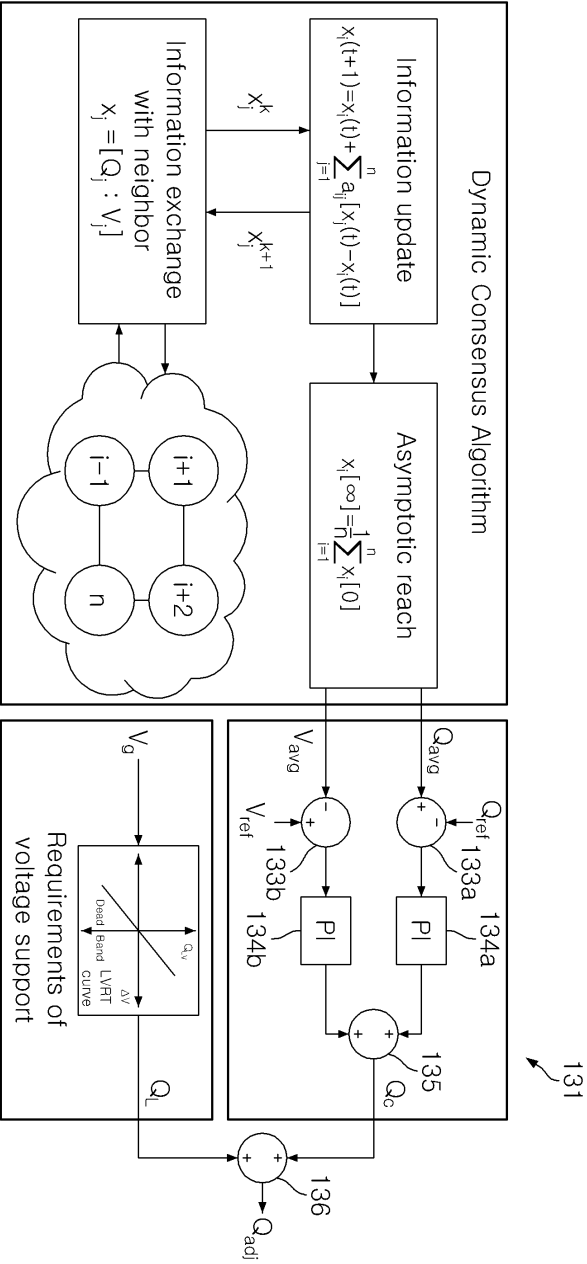
도면2



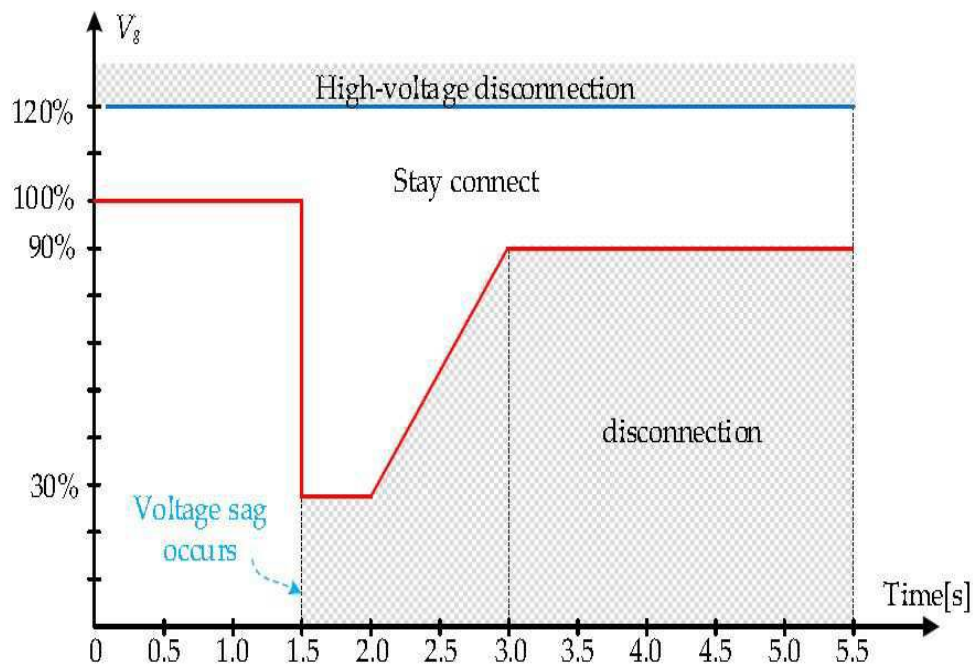
도면3



도면4



도면5



도면6

