



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0110449
(43) 공개일자 2022년08월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H02J 3/00 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H02J 3/00 (2013.01)

Y04S 40/00 (2020.08)

(21) 출원번호 10-2022-0089337

(22) 출원일자 2022년07월20일

심사청구일자 2022년07월20일

(71) 출원인

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

박정욱

서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 제3공학관 C621

윤기포

서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 제3공학관 C727

(74) 대리인

권성현, 유광철, 백두진, 강일신, 김정연

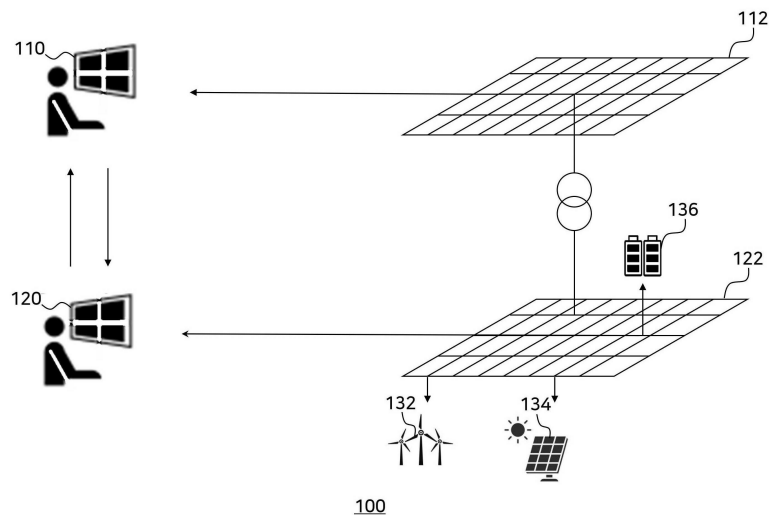
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법 및 장치

(57) 요약

본 개시의 일 실시예에 따르면, 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 배전 계통의 발전 변화량을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 획득하는 단계, 복수의 발전기를 포함하는 배전 계통에 대응하는 배전 계통 운영자로부터 배전 계통의 가능 운영 영역(FOR; Feasible Operation Region)을 수신하는 단계, 제1 전력 민감도 파라미터 및 가능 운영 영역을 기초로 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정하는 단계 및 배전 계통 운영자에 최종 참조 전력을 전송하는 단계를 포함할 수 있다.

대표도



100

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711156916
과제번호	2020R1A3B2079407
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	에너지 대전환 전력망 연구단
기 여 율	1/1
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2022.03.01 ~ 2023.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

임의의 부하의 크기 변화량에 대한 배전 계통의 발전 변화량을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 획득하는 단계;

복수의 발전기를 포함하는 상기 배전 계통에 대응하는 배전 계통 운영자로부터 상기 배전 계통의 가능 운영 영역(FOR; Feasible Operation Region)을 수신하는 단계;

상기 제1 전력 민감도 파라미터 및 상기 가능 운영 영역을 기초로 상기 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정하는 단계; 및

상기 배전 계통 운영자에 상기 최종 참조 전력을 전송하는 단계

를 포함하는, 적어도 하나의 프로세서에 의해 수행되는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1 전력 민감도 파라미터 및 상기 가능 운영 영역을 기초로 상기 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정하는 단계는,

상기 배전 계통의 경계 버스에서 상기 제1 전력 민감도 파라미터를 이용하여 상기 배전 계통의 참조 전력을 산출하는 단계; 및

상기 가능 운영 영역과 상기 참조 전력을 비교하여 상기 배전 계통의 상기 최종 참조 전력을 결정하는 단계

를 포함하는, 적어도 하나의 프로세서에 의해 수행되는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 가능 운영 영역과 상기 참조 전력을 비교하여 상기 배전 계통의 상기 최종 참조 전력을 결정하는 단계는,

상기 참조 전력이 상기 가능 운영 영역의 경계 또는 상기 경계의 내부에 위치하는 경우, 상기 참조 전력을 상기 배전 계통의 상기 최종 참조 전력으로 결정하는 단계

를 포함하는, 적어도 하나의 프로세서에 의해 수행되는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 가능 운영 영역과 상기 참조 전력을 비교하여 상기 배전 계통의 상기 최종 참조 전력을 결정하는 단계는,

상기 참조 전력이 상기 가능 운영 영역의 경계 밖에 위치하는 경우, 상기 가능 운영 영역의 경계 상의 복수의 포인트 중 상기 참조 전력까지의 거리가 최소가 되도록 하는 포인트를 상기 최종 참조 전력으로 결정하는 단계

를 포함하는, 적어도 하나의 프로세서에 의해 수행되는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 배전 계통 운영자는 제2 전력 민감도 파라미터 및 상기 최종 참조 전력을 기초로 상기 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정하는, 적어도 하나의 프로세서에 의해 수행되는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 제2 전력 민감도 파라미터는 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 상기 복수의 발전기 각각의 발전 변화량을 기초로 하는, 적어도 하나의 프로세서에 의해 수행되는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법.

청구항 7

제1항에 기재된 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법을 실행시키도록 컴퓨터로 판독 가능한 기록매체에 기록된 컴퓨터 프로그램.

청구항 8

임의의 부하의 크기 변화량에 대한 배전 계통의 발전 변화량을 기초로 하는 제1 전력 민감도 파라미터, 복수의 발전기를 포함하는 상기 배전 계통의 가능 운영 영역 및 상기 배전 계통의 최종 참조 전력 중 적어도 하나를 저장하도록 구성된 메모리;

상기 배전 계통에 대응하는 배전 계통 운영자로부터 상기 가능 운영 영역을 수신하고, 상기 배전 계통으로 상기 최종 참조 전력을 전송하도록 구성된 통신 모듈; 및

상기 메모리와 연결되고, 상기 메모리에 저장된 컴퓨터 판독 가능한 명령어들을 실행하도록 구성된 적어도 하나의 프로세서

를 포함하고,

상기 프로세서는,

상기 제1 전력 민감도 파라미터를 획득하고,

상기 배전 계통 운영자로부터 상기 가능 운영 영역을 수신하고,

상기 제1 전력 민감도 파라미터 및 상기 가능 운영 영역을 기초로 상기 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정하고,

상기 배전 계통 운영자에 상기 최종 참조 전력을 전송하도록 구성된 명령어들을 실행하는, 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 장치.

발명의 설명**기술 분야**

[0001] 본 개시는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 종래의 일반적인 전력 계통 시스템에서 송전 계통 운영자와 배전 계통 운영자는 서로에 대한 아무런 정보 없이 전력 계통을 운영해 왔다. 그러나, 재생 에너지의 보급률 증가로 배전 계통 운영자가 송전 계통 운영자에 미치

는 영향이 증가함에 따라, 종래 방법에 따른 조류 분석 모델의 효용성을 기대하는 것은 어렵다. 그러나, 송전 계통 운영자와 배전 계통 운영자의 긴밀한 상호 작용을 위해 서로의 민감한 데이터를 공유하는 것은 조심스러울 뿐 아니라, 상대방의 데이터를 이용한다고 해도 조류 분석을 위한 연산량이 대폭 증가한다는 문제가 발생한다. 따라서, 종래의 방법만으로는 발전기에 최적의 전력을 할당하는 것이 쉽지 않은 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 본 개시는 상술한 문제를 해결하기 위하여 송전 계통 운영자 및 배전 계통 운영자 각각의 전력 민감도를 기반으로 서로 민감한 데이터를 공유하지 않고도 협조적으로 전력을 제어할 수 있는, 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법 및 장치가 제공된다.

과제의 해결 수단

- [0007] 본 개시의 일 실시예에 따르면, 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 배전 계통의 발전 변화량을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 획득하는 단계, 복수의 발전기를 포함하는 배전 계통에 대응하는 배전 계통 운영자로부터 배전 계통의 가능 운영 영역(FOR; Feasible Operation Region)을 수신하는 단계, 제1 전력 민감도 파라미터 및 가능 운영 영역을 기초로 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정하는 단계 및 배전 계통 운영자에 최종 참조 전력을 전송하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0008] 일 실시예에 따르면, 제1 전력 민감도 파라미터 및 가능 운영 영역을 기초로 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정하는 단계는, 배전 계통의 경계 버스에서 제1 전력 민감도 파라미터를 이용하여 배전 계통의 참조 전력을 산출하는 단계 및 가능 운영 영역과 참조 전력을 비교하여 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0009] 일 실시예에 따르면, 가능 운영 영역과 참조 전력을 비교하여 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정하는 단계는, 참조 전력이 가능 운영 영역의 경계 또는 경계의 내부에 위치하는 경우, 참조 전력을 배전 계통의 최종 참조 전력으로 결정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0010] 일 실시예에 따르면, 가능 운영 영역과 참조 전력을 비교하여 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정하는 단계는, 참조 전력이 가능 운영 영역의 경계 밖에 위치하는 경우, 가능 운영 영역의 경계 상의 복수의 포인트 중 참조 전력까지의 거리가 최소가 되도록 하는 포인트를 최종 참조 전력으로 결정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0011] 일 실시예에 따르면, 배전 계통 운영자는 제2 전력 민감도 파라미터 및 최종 참조 전력을 기초로 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정할 수 있다.
- [0012] 일 실시예에 따르면, 제2 전력 민감도 파라미터는 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 복수의 발전기 각각의 발전 변화량을 기초로 할 수 있다.
- [0013] 본 개시의 다른 실시예에 따르면, 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법을 실행시키도록 컴퓨터로 판독 가능한 기록매체에 기록된 컴퓨터 프로그램이 제공될 수 있다.
- [0014] 본 개시의 또 다른 실시예에 따르면, 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 장치는 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 배전 계통의 발전 변화량을 기초로 하는 제1 전력 민감도 파라미터, 복수의 발전기를 포함하는 배전 계통의 가능 운영 영역 및 배전 계통의 최종 참조 전력 중 적어도 하나를 저장하도록 구성된 메모리, 배전 계통에 대응하는 배전 계통 운영자로부터 가능 운영 영역을 수신하고, 배전 계통으로 최종 참조 전력을 전송하도록 구성된 통신 모듈 및 메모리와 연결되고, 메모리에 저장된 컴퓨터 판독 가능한 명령어들을 실행하도록 구성된 적어도 하나의 프로세서를 포함하고, 프로세서는 제1 전력 민감도 파라미터를 획득하고, 배전 계통 운영자로부터 가능 운영 영역을 수신하고, 제1 전력 민감도 파라미터 및 가능 운영 영역을 기초로 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정하고, 배전 계통 운영자에 최종 참조 전력을 전송하도록 구성된 명령어들을 실행할 수 있다.

발명의 효과

- [0016] 본 개시의 일부 실시예에 따르면, 송전 계통 운영자 시스템 및 배전 계통 운영자 시스템 모두에서 전압 안정성을 유지할 수 있다.
- [0017] 본 개시의 일부 실시예에 따르면, 협조적인 전력 제어 방법에서 배전 계통 운영자가 높은 전력 민감도로 복수의 발전기들을 최적화하여, 결과적으로 협조적인 전력 제어 방법의 발전기들이 더 많은 전력을 생산함에 따라 동적 주파수 응답을 개선할 수 있다.
- [0018] 본 개시의 일부 실시예에 따르면, 주파수 변동을 완화하기 위한 송전 계통 운영자의 부담이 감소시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0020] 도 1은 본 개시의 일 실시예에 따른 전력 시스템을 나타내는 모식도이다.
- 도 2는 본 개시의 일 실시예에 따른 송전 계통 운영자와 복수의 배전 계통 운영자의 구성을 나타내는 블록도이다.
- 도 3은 본 개시의 일 실시예에 따른 송전 계통 운영 장치 및 배전 계통 운영 장치의 내부 구성을 나타내는 블록도이다.
- 도 4는 본 개시의 일 실시예에 따른 송전 계통을 나타내는 모식도이다.
- 도 5는 본 개시의 일 실시예에 따른 전력 민감도 히트맵의 예시를 나타낸다.
- 도 6은 본 개시의 일 실시예에 따라 송전 계통 운영자가 최종 참조 전력을 결정하는 예시를 나타낸다.
- 도 7은 본 개시의 일 실시예에 따른 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법의 예시를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0021] 이하, 본 개시의 실시를 위한 구체적인 내용을 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명한다. 다만, 이하의 설명에서는 본 개시의 요지를 불필요하게 흐릴 우려가 있는 경우, 널리 알려진 기능이나 구성에 관한 구체적 설명은 생략하기로 한다.
- [0022] 첨부된 도면에서, 동일하거나 대응하는 구성요소에는 동일한 참조부호가 부여되어 있다. 또한, 이하의 실시예들의 설명에 있어서, 동일하거나 대응되는 구성요소를 중복하여 기술하는 것이 생략될 수 있다. 그러나 구성요소에 관한 기술이 생략되어도, 그러한 구성요소가 어떤 실시예에 포함되지 않는 것으로 의도되지는 않는다.
- [0023] 개시된 실시예의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 개시는 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시예들은 본 개시가 완전하도록 하고, 본 개시가 통상의 기술자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것일 뿐이다.
- [0024] 본 명세서에서 사용되는 용어에 대해 간략히 설명하고, 개시된 실시예에 대해 구체적으로 설명하기로 한다. 본 명세서에서 사용되는 용어는 본 개시에서의 기능을 고려하면서 가능한 현재 널리 사용되는 일반적인 용어들을 선택하였으나, 이는 관련 분야에 종사하는 기술자의 의도 또는 관례, 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 발명의 설명 부분에서 상세히 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 본 개시에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌, 그 용어가 가지는 의미와 본 개시의 전반에 걸친 내용을 토대로 정의되어야 한다.
- [0025] 본 명세서에서의 단수의 표현은 문맥상 명백하게 단수인 것으로 특정하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 또한, 복수의 표현은 문맥상 명백하게 복수인 것으로 특정하지 않는 한, 단수의 표현을 포함한다. 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 있음을 의미한다.
- [0026] 본 개시의 일 실시예에 따르면, '메모리'는 전자 정보를 저장 가능한 임의의 전자 컴포넌트를 포함하도록 넓게 해석되어야 한다. '메모리'는 임의 액세스 메모리(RAM), 판독-전용 메모리(ROM), 비-휘발성 임의 액세스 메모리(NVRAM), 프로그램가능 판독-전용 메모리(PROM), 소거-프로그램가능 판독 전용 메모리(EPROM), 전기적으로 소거

가능 PROM(EEPROM), 플래쉬 메모리, 자기 또는 광학 데이터 저장장치, 레지스터들 등과 같은 프로세서-판독가능 매체의 다양한 유형들을 지칭할 수도 있다. 프로세서가 메모리로부터 정보를 판독하고/하거나 메모리에 정보를 기록할 수 있다면 메모리는 프로세서와 전자 통신 상태에 있다고 불린다.

- [0027] 본 개시의 일 실시예에 따르면, '운영자'와 '운영 장치'는 서로 동일한 의미로 해석될 수 있다. 즉, '송전 계통 운영자'는 '송전 계통 운영 장치'로 해석될 수 있다. 또한, '배전 계통 운영자'는 '배전 계통 운영 장치'로 해석될 수 있다.
- [0028] 도 1은 본 개시의 일 실시예에 따른 전력 시스템(100)을 나타내는 모식도이다. 전력 시스템(100)은 전력 생산자로부터 전력 소비자에게 전기를 공급하기 위하여 상호간에 연결된 네트워크 및 해당 네트워크를 관리하는 관리자를 포함하는 시스템 지칭할 수 있다. 도시된 바와 같이, 전력 시스템(100)은 송전 계통 운영자(110), 송전 계통(112), 배전 계통 운영자(120), 배전 계통(122) 및 복수의 발전기(132 내지 136) 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 여기서, 송전 계통 운영자(110)와 배전 계통 운영자(120)는 각각 독립된 하나의 시스템 및/또는 장치로 구성될 수 있다.
- [0029] 송전 계통 운영자(110)는 송전 계통(112)을 관리할 수 있다. 구체적으로, 송전 계통 운영자(110)는 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 결정하기 위한 데이터를 송수신할 수 있다. 또한, 송전 계통 운영자(110)는 송전 계통(112) 및/또는 배전 계통 운영자(120)로부터 수신된 데이터를 기초로 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 결정하기 위한 새로운 데이터를 생성할 수 있다.
- [0030] 배전 계통 운영자(120)는 배전 계통(122)을 관리할 수 있다. 구체적으로, 배전 계통 운영자(120)는 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 결정하기 위한 데이터를 송수신할 수 있다. 또한, 배전 계통 운영자(120)는 배전 계통(122) 및/또는 송전 계통 운영자(110)로부터 수신된 데이터를 기초로 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 결정하기 위한 새로운 데이터를 생성할 수 있다.
- [0031] 송전 계통 운영자(110) 및/또는 배전 계통 운영자(120)는 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 결정하기 위한 데이터를 독립적으로 수집 및/또는 생성할 수 있다. 예를 들어, 송전 계통 운영자(110)는 송전 계통(112)으로부터 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 기초로 새로운 데이터를 생성할 수 있다. 다른 예를 들어, 배전 계통 운영자(120)는 배전 계통(122)으로부터 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 기초로 새로운 데이터를 생성할 수 있다.
- [0032] 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 결정하는 데에는 송전 계통 운영자(110) 및 배전 계통 운영자(120)의 데이터가 모두 요구될 수 있다. 그러나, 요구되는 데이터가 민감한 정보를 포함하는 경우, 해당 데이터를 서로 공유하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 개시에서는, 이를 해결하기 위하여 송전 계통 운영자(110) 및/또는 배전 계통 운영자(120)의 민감한 정보를 노출하지 않으면서 복수의 발전기(132 내지 136) 각각의 발전량을 산출할 수 있도록 하는 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법 및 장치가 제공된다. 특히, 복수의 발전기(132 내지 136) 각각이 태양 발전 에너지, 풍력 발전 에너지, 수력 발전 에너지 등과 같은 재생 에너지를 생성하는 경우, 복수의 발전기(132 내지 136) 전력 시스템(100)에 발생하는 발전 불일치 및/또는 전력 불일치와 같은 문제가 해결될 수 있다.
- [0033] 한편, 도 1에는 송전 계통(112)과 배전 계통(122)이 분리된 두 개의 네트워크로 도시되었으나, 송전 계통(112)과 배전 계통(122)은 서로 연결되어 하나의 네트워크에 포함될 수 있다. 본 개시에서는, 송전 계통(112)과 배전 계통(122)을 포함하는 네트워크를 '전력 계통'으로 정의된다. 이와 같은 전력 계통의 예시는 도 4에 도시되어 있다.
- [0034] 도 2는 본 개시의 일 실시예에 따른 송전 계통 운영자(210)와 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240)의 구성을 나타내는 블록도이다. 도시된 바와 같이, 하나의 송전 계통 운영자(210)는 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240)와 연결될 수 있다. 또한, 송전 계통 운영자(210) 및 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240) 각각은 적어도 하나의 프로세서를 포함할 수 있다.
- [0035] 송전 계통 운영자(210)는 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240) 각각의 발전량을 결정하도록 구성된 제1 프로세서(212) 및/또는 제2 프로세서(214)를 포함할 수 있다. 또한, 송전 계통 운영자(210)는 복수의 발전기(예: 복수의 발전기(132 내지 136)) 각각의 발전량을 결정하도록 구성된 제1 프로세서(212) 및/또는 제2 프로세서(214)를 포함할 수 있다.
- [0036] 제1 프로세서(212)는 전력 계통의 전력 흐름을 분석하도록 구성된 프로세서를 지칭할 수 있다. 예를 들어, 제1 프로세서(212)는 전력 계통에 분배된 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 복수의 배전 계통 각각의 전력 변화량

을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있다. 이와 같이 제1 전력 민감도 파라미터는 수학식 1로 정의될 수 있다. 여기서, m은 복수의 발전기 각각의 버스(bus)의 개수를 나타내고, n은 전력 계통 내 전체 버스의 개수를 나타낸다. 또한, P_{iG} 및 Q_{iG} 는 각각 i번 발전기의 버스에서 제공되는 유효 전력 및 무효전력을 나타낸다. 또한, P_{iL} 및 Q_{iL} 은 각각 i번 버스와 연관된 유효 부하 및 무효 부하를 나타내고, P_i 및 Q_i 는 부하(또는, 전압이 제어되는 버스)의 유효 전력 및 무효 전력을 나타낸다.

수학식 1

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{2G} \\ \vdots \\ \Delta P_{mG} \\ \frac{\Delta P_{mG}}{\Delta Q_{2G}} \\ \vdots \\ \Delta Q_{mG} \end{bmatrix} = -[\mathbf{K}^{sq}]^{-1} \cdot \mathbf{K}^{row} \cdot \begin{bmatrix} -\Delta P_{2L} \\ \vdots \\ -\Delta P_{mL} \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ -\Delta Q_{2L} \\ \vdots \\ -\Delta Q_{mL} \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$

[0037]

[0038] 전력 민감도 파라미터는 수학식 2에 의해 산출될 수 있다. 여기서, \mathbf{K}^{sq} 및 \mathbf{K}^{row} 는 각각 K의 $2(m-1)*2(m-1)$ 부분 행렬 및 $2(m-1)*2(n-1)$ 부분 행렬을 나타낸다. 또한, K는 Jacobian 행렬의 역행렬로, 유효 전력 및 무효 전력의 변화에 대한 버스에서의 위상각(phase angle)과 크기(magnitude) 사이의 선형적 관계를 나타낸다.

수학식 2

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{11} & \mathbf{S}^{12} \\ \mathbf{S}^{21} & \mathbf{S}^{22} \end{bmatrix} = -[\mathbf{K}^{sq}]^{-1} \cdot \mathbf{K}^{row}$$

[0039]

[0040] 수학식 2에서, \mathbf{S}^{11} , \mathbf{S}^{12} , \mathbf{S}^{21} 및 \mathbf{S}^{22} 는 S의 $(m-1)*(n-1)$ 의 부분 행렬을 나타낸다. 송전 계통 운영자는 수학식 1 및 2를 이용하여 (배전 계통의)발전-부하 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있고, 본 개시에서 제1 전력 민감도 파라미터로 표시된다. 이와 유사하게, 배전 계통 운영자는 수학식 1 및 2를 이용하여 (발전기의)발전-부하 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있고, 본 개시에서 제2 전력 민감도 파라미터로 표시된다.

[0041] 한편, 복수의 배전 계통은 각각 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240)에 대응될 수 있다. 즉, 복수의 배전 계통은 각각 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240)에 의해 관리되는 배전 계통을 지칭할 수 있다.

[0042] 제2 프로세서(214)는 제1 프로세서(212)에 의해 산출된 제1 전력 민감도 파라미터를 획득할 수 있다. 또한, 제2 프로세서(214)는 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240) 중 적어도 하나의 운영자로부터 가능 운영 영역(FOR; Feasible Operation Region)을 획득할 수 있다. 여기서, 가능 운영 영역은 배전 계통 운영자에 의해 배전 계통에 포함된 발전기(들)로부터 획득된 데이터(예: flexibility)를 기초로 산출될 수 있다. 예를 들어, 가능 운영 영역은 배전 계통 운영자에 의해 배전 계통에 포함된 발전기들 각각의 flexibility의 합집합 영역으로 결정될 수 있다.

[0043] 제2 프로세서(214)는 제1 민감도 파라미터를 이용하여 배전 계통의 참조 전력을 산출할 수 있다. 여기서, 참조

전력은 배전 계통 운영자의 데이터 없이 송전 계통 운영자에 의해 직접 산출된 배전 계통의 전력량을 나타낼 수 있다. 참조 전력은 수학적 식 3을 따라 산출될 수 있다. 여기서, $P_{T,G}$ 및 $Q_{T,G}$ 는 각각 송전 계통의 버스에서의 유효 전력 및 무효 전력을 나타내고, $P_{T,L}$ 및 $Q_{T,L}$ 은 각각 송전 계통의 버스에서의 유효 부하 및 무효 부하를 나타낸다. 또한, P_B 및 Q_B 는 배전 계통의 경계 버스에서의 유효 전력 및 무효 전력을 나타낸다. 한편, 수학적 식 3은 수학적 식 1을 기초로 한다.

수학적 식 3

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{T,G} \\ \Delta P_B \\ \Delta Q_{T,G} \\ \Delta Q_B \end{bmatrix} = S_{TSO} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{T,L} \\ \Delta Q_{T,L} \end{bmatrix}$$

[0044]

[0045]

제2 프로세서(214)는 제1 전력 민감도 파라미터(또는, 참조 전력) 및 가능 운영 영역을 기초로 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정할 수 있다. 구체적으로, 제2 프로세서(214)는 가능 운영 영역에 대한 참조 전력의 상대적인 위치에 따라 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정할 수 있다. 이에 대한 상세한 설명은 도 6에 후술된다.

[0046]

제2 프로세서(214)는 최종 참조 전력을 복수의 배전 계통 운영자(220 내지 240)에 각각 전송할 수 있다. 제N 배전 계통 운영자(240)는 복수의 발전기(예: 복수의 발전기(132 내지 136)) 각각의 발전량을 결정하도록 구성된 제3 프로세서(252) 및/또는 제4 프로세서(254)를 포함할 수 있다. 여기서, 복수의 발전기는 제N 배전 계통 운영자(240)에 의해 관리되는 발전기(들)를 지칭할 수 있다.

[0047]

제3 프로세서(252)는 전력 계통의 전력 흐름을 분석하도록 구성된 프로세서를 지칭할 수 있다. 예를 들어, 제3 프로세서(252)는 전력 계통에 분배된 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 복수의 발전기 각각의 전력 변화량을 기초로 제2 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있다. 여기서, 복수의 발전기는 제N 배전 계통 운영자(240)와 연관된 발전기(들)를 지칭할 수 있다.

[0048]

제4 프로세서(254)는 제3 프로세서(252)에 의해 산출된 제2 전력 민감도 파라미터를 획득할 수 있다. 또한, 제4 프로세서(254)는 복수의 발전기 각각의 flexibility를 획득할 수 있다. 그리고 나서, 제4 프로세서(254)는 제2 전력 민감도 파라미터 및 flexibility를 기초로 발전기에 대한 최종 발전량을 결정할 수 있다. 한편, 제4 프로세서(254)는 획득된 복수의 발전기 각각의 flexibility를 집계하여 제N 배전 계통 운영자(240)의 가능 운영 영역을 결정하고, 결정된 가능 운영 영역을 송전 계통 운영자(210)로 전송할 수 있다.

[0049]

도 3은 본 개시의 일 실시예에 따른 송전 계통 운영 장치(310) 및 배전 계통 운영 장치(330)의 내부 구성을 나타내는 블록도이다. 송전 계통 운영 장치(310)는 하나 이상의 배전 계통 운영 장치(330)에 할당되는 전력량(즉, 최종 참조 전력)을 제어하기 위한 프로그램 등이 실행 가능하고 유/무선 통신이 가능한 임의의 컴퓨팅 장치를 지칭할 수 있다. 도시된 바와 같이, 송전 계통 운영 장치(310)는 메모리(312), 프로세서(314), 통신 모듈(316) 및 입출력 인터페이스(318)를 포함할 수 있다. 또한, 배전 계통 운영 장치(330)는 대응하는 배전 계통에 분배된 복수의 발전기 각각에 할당되는 전력량(즉, 최종 전력량)을 제어하기 위한 프로그램 등이 실행 가능하고 유/무선 통신이 가능한 임의의 컴퓨팅 장치를 지칭할 수 있다. 배전 계통 운영 장치(330)는 메모리(332), 프로세서(334), 통신 모듈(336) 및 입출력 인터페이스(338)를 포함할 수 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, 송전 계통 운영 장치(310) 및 배전 계통 운영 장치(330)는 각각의 통신 모듈(316, 336)을 이용하여 네트워크(320)를 통해 정보 및/또는 데이터를 통신할 수 있도록 구성될 수 있다. 또한, 입출력 장치(322)는 입출력 인터페이스(318)를 통해 송전 계통 운영 장치(310)에 정보 및/또는 데이터를 입력하거나 송전 계통 운영 장치(310)로부터 생성된 정보 및/또는 데이터를 출력하도록 구성될 수 있다.

[0050]

메모리(312, 332)는 비-일시적인 임의의 컴퓨터 판독 가능한 기록매체를 포함할 수 있다. 일 실시예에 따르면, 메모리(312, 332)는 RAM(random access memory), ROM(read only memory), 디스크 드라이브, SSD(solid state drive), 플래시 메모리(flash memory) 등과 같은 비소멸성 대용량 저장 장치(permanent mass storage device)를 포함할 수 있다. 다른 예로서, ROM, SSD, 플래시 메모리, 디스크 드라이브 등과 같은 비소멸성 대용량 저장

장치는 메모리와는 구분되는 별도의 영구 저장 장치로서 송전 계통 운영 장치(310) 또는 배전 계통 운영 장치(330)에 포함될 수 있다. 또한, 메모리(312, 332)에는 운영체제와 적어도 하나의 프로그램 코드(예를 들어, 송전 계통 운영 장치(310)에 설치되어 구동되는 배전 계통 운영 장치(330)에 할당되는 전력량(즉, 최종 참조 전력)을 제어하기 위한 코드)가 저장될 수 있다.

[0051] 이러한 소프트웨어 구성요소들은 메모리(312, 332)와는 별도의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록매체로부터 로딩될 수 있다. 이러한 별도의 컴퓨터에서 판독가능한 기록매체는 이러한 송전 계통 운영 장치(310) 및 배전 계통 운영 장치(330)에 직접 연결가능한 기록 매체를 포함할 수 있는데, 예를 들어, 플로피 드라이브, 디스크, 테이프, DVD/CD-ROM 드라이브, 메모리 카드 등의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록매체를 포함할 수 있다. 다른 예로서, 소프트웨어 구성요소들은 컴퓨터에서 판독 가능한 기록매체가 아닌 통신 모듈(316, 336)을 통해 메모리(312, 332)에 로딩될 수도 있다. 예를 들어, 적어도 하나의 프로그램은 개발자들 또는 어플리케이션의 설치 파일을 배포하는 파일 배포 시스템이 네트워크(320)를 통해 제공하는 파일들에 의해 설치되는 컴퓨터 프로그램에 기반하여 메모리(312, 332)에 로딩될 수 있다.

[0052] 프로세서(314, 334)는 기본적인 산술, 로직 및 입출력 연산을 수행함으로써, 컴퓨터 프로그램의 명령을 처리하도록 구성될 수 있다. 명령은 메모리(312, 332) 또는 통신 모듈(316, 336)에 의해 프로세서(314, 334)로 제공될 수 있다. 예를 들어, 프로세서(314, 334)는 메모리(312, 332)와 같은 기록 장치에 저장된 프로그램 코드에 따라 수신되는 명령을 실행하도록 구성될 수 있다.

[0053] 통신 모듈(316, 336)은 네트워크(320)를 통해 송전 계통 운영 장치(310)와 배전 계통 운영 장치(330)가 서로 통신하기 위한 구성 또는 기능을 제공할 수 있으며, 송전 계통 운영 장치(310) 및/또는 배전 계통 운영 장치(330)가 다른 사용자 단말 또는 다른 시스템(일례로 별도의 클라우드 시스템 등)과 통신하기 위한 구성 또는 기능을 제공할 수 있다. 일례로, 송전 계통 운영 장치(310)의 프로세서(314)가 메모리(312) 등과 같은 기록 장치에 저장된 프로그램 코드에 따라 생성한 요청(예를 들어, 가능 운영 영역 전송 요청 등) 또는 데이터(예를 들어, 최종 참조 전력)는 통신 모듈(316)의 제어에 따라 네트워크(320)를 통해 배전 계통 운영 장치(330)으로 전달될 수 있다. 역으로, 배전 계통 운영 장치(330)의 프로세서(334)의 제어에 따라 제공되는 제어 신호나 명령이 통신 모듈(336)과 네트워크(320)를 거쳐 송전 계통 운영 장치(310)의 통신 모듈(316)을 통해 송전 계통 운영 장치(310)에 수신될 수 있다.

[0054] 입출력 인터페이스(318, 338)는 입출력 장치(322, 342)와의 상호 작용을 위한 수단일 수 있다. 구체적으로, 입출력 장치(322, 342)는 오디오 센서 및/또는 이미지 센서를 포함한 카메라, 키보드, 마이크로폰, 마우스 등의 입력 장치를 포함할 수 있다. 추가적으로, 입출력 장치(322, 342)는 디스플레이, 스피커, 햅틱 피드백 디바이스(haptic feedback device) 등과 같은 출력 장치를 포함할 수 있다. 다른 예로, 입출력 인터페이스(318, 338)는 터치스크린 등과 같이 입력과 출력을 수행하기 위한 구성 또는 기능이 하나로 통합된 장치와의 인터페이스를 위한 수단일 수 있다.

[0055] 송전 계통 운영 장치(310) 및 배전 계통 운영 장치(330)는 도 3의 구성요소들보다 더 많은 구성요소들을 포함할 수 있다. 그러나, 대부분의 종래기술적 구성요소들을 명확하게 도시할 필요성은 없다. 일 실시예에 따르면, 송전 계통 운영 장치(310)는 상술된 입출력 장치(322) 중 적어도 일부를 포함하도록 구현될 수 있다. 또한, 송전 계통 운영 장치(310)는 트랜시버(transceiver), GPS(Global Positioning system) 모듈, 카메라, 각종 센서, 데이터베이스 등과 같은 다른 구성요소들을 더 포함할 수 있다.

[0056] 일 실시예에 따르면, 송전 계통 운영 장치(310)의 프로세서(314) 하나 이상의 배전 계통 운영 장치(330)에 할당되는 전력량(즉, 최종 참조 전력)을 제어하기 위한 프로그램을 동작하도록 구성될 수 있다. 이 때, 해당 프로그램과 연관된 코드가 송전 계통 운영 장치(310)의 메모리(312)에 로딩될 수 있다. 프로그램이 동작되는 동안에, 송전 계통 운영 장치(310)의 프로세서(314)는 입출력 장치(322)로부터 제공된 정보 및/또는 데이터를 입출력 인터페이스(318)를 통해 수신하거나 통신 모듈(316)을 통해 배전 계통 운영 장치(330)으로부터 정보 및/또는 데이터를 수신할 수 있으며, 수신된 정보 및/또는 데이터를 처리하여 메모리(312)에 저장할 수 있다. 또한, 이러한 정보 및/또는 데이터는 통신 모듈(316)을 통해 배전 계통 운영 장치(330)에 제공될 수 있다.

[0057] 송전 계통 운영 장치(310)의 하나 이상의 배전 계통 운영 장치(330)에 할당되는 전력량(즉, 최종 참조 전력)을 제어하기 위한 프로그램이 동작되는 동안에, 프로세서(314)는 입출력 인터페이스(318)와 연결된 입출력 장치(322)를 통해 입력되거나 선택된 전력 제어를 위한 데이터를 메모리(312)에 저장하거나 통신 모듈(316) 및 네트워크(320)를 통해 배전 계통 운영 장치(330)에 제공할 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 프로세서(314)는 네트워크(320)를 통해 연결된 배전 계통 운영 장치(330)를 통해 전력 제어와 연관된 데이터를 수신할 수

있으며, 수신된 데이터 등을 메모리(312)에 저장하거나 통신 모듈(316) 및 네트워크(320)를 통해 배전 계통 운영 장치(330)에 제공할 수 있다.

[0058] 배전 계통 운영 장치(330)의 프로세서(334)는 복수의 사용자 단말 및/또는 복수의 외부 시스템으로부터 수신된 정보 및/또는 데이터를 관리, 처리 및/또는 저장하도록 구성될 수 있다. 일 실시예에 따르면, 프로세서(334)는 송전 계통 운영 장치(310)로부터 수신된 사용자 입력 및 사용자 입력에 따른 데이터를 관리, 처리 및/또는 저장할 수 있다.

[0059] 도 4는 본 개시의 일 실시예에 따른 송전 계통(400)을 나타내는 모식도이다. 도시된 바와 같이, 송전 계통(400)은 복수의 버스, 복수의 발전기 및 복수의 부하를 포함할 수 있다. 또한, 송전 계통(400)은 복수의 배전 계통 운영자(410, 420, 430, 440)와 연관될 수 있다. 즉, 송전 계통 운영자는 도 2에서와 같이 복수의 배전 계통 운영자(410, 420, 430, 440)와 연결될 수 있다.

[0060] 도 4의 송전 계통(400)은 IEEE 39-bus test system의 예시이다. 이와 같은 송전 계통(400)은 39개의 버스(여기서, #1 내지 #39), 10개의 발전기(여기서, G1 내지 G10) 및 19개의 부하(여기서, ↓)를 포함할 수 있다. 도 4를 참고하면, 복수의 배전 계통 운영자(410, 420, 430, 440)는 각각 #2, #9, #17 및 #22의 경계 버스에 연결되어 있다. 또한, 복수의 배전 계통 운영자(410, 420, 430, 440) 각각은 33개의 버스, 3개의 발전기 및 32개의 부하와 연결되어 있다.

[0061] 도 5는 본 개시의 일 실시예에 따른 전력 민감도 히트맵(500)의 예시를 나타낸다. 상술한 바와 같이, 송전 계통 운영자(예: 송전 계통 운영자(210))는 복수의 배전 계통 각각의 발전량을 결정하는 데에 요구되는 제1 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있다. 이 경우, 송전 계통 운영자는 전력 민감도 히트맵(500)을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있다. 즉, 송전 계통 운영자는 전력 민감도 히트맵(500)을 기초로 배전 계통 운영자와의 전기적 상대 거리에 대한 정보를 획득할 수 있다.

[0062] 도 5를 참고하면, 3번 배전 계통 운영자에는 실제 전력 민감도가 높은 버스들이 가장 많이 분포되어 있다. 즉, 3번 배전 계통 운영자는 송전 계통과 전기적 거리가 가장 가깝다. 반면, 2번 배전 계통 운영자에는 9번 버스를 제외하고는 전력 민감도가 높은 버스들이 분포되어 있지 않다. 즉, 2번 배전 계통 운영자와 송전 계통의 전기적 거리는 상대적으로 멀다. 이와 같이, 송전 계통 운영자는 전력 민감도 히트맵(500)을 기초로 복수의 배전 계통 운영자 각각과의 전기적 상대 거리에 대한 정보를 획득하고, 획득된 정보를 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있다.

[0063] 한편, 배전 계통 운영자 또한 히트맵(미도시)을 기초로 제2 전력 민감도 파라미터를 산출할 수 있다. 이 경우, 히트맵의 가로축 및 세로축은 각각 버스 번호 및 발전기의 번호를 나타낼 수 있다. 여기서, 제2 전력 민감도 파라미터는 전력 계통에 포함된 임의의 부하의 크기 변화량에 따른 발전기의 발전 변화량을 나타낸다. 그리고 나서, 배전 계통 운영자는 제2 전력 민감도 파라미터 및 최종 참조 전력을 이용하여 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정할 수 있다. 이와 관련된 상세한 설명은 도 6에 후술된다.

[0064] 도 6은 본 개시의 일 실시예에 따라 송전 계통 운영자가 최종 참조 전력을 결정하는 예시를 나타낸다. 상술한 바와 같이, 송전 계통 운영자는 전력 민감도 히트맵(예: 전력 민감도 히트맵(500))을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 획득할 수 있다. 그리고 나서, 송전 계통 운영자는 제1 전력 민감도 파라미터를 이용하여 배전 계통의 참조 전력(614, 624)을 산출할 수 있다. 여기서, 참조 전력(614, 624)은 송전 계통 운영자가 배전 계통으로부터 수신된 데이터 없이 직접 예측한 배전 계통의 발전량을 나타낼 수 있다. 즉, 송전 계통 운영자와 배전 계통 운영자가 협조하여 전력을 제어하기 위해서는, 산출된 참조 전력(614, 624)이 배전 계통 운영자의 데이터(여기서, 가능 운영 영역(612, 622))에 의해 유지 및/또는 수정되어야 한다.

[0065] 송전 계통 운영자는 배전 계통 운영자로부터 배전 계통의 가능 운영 영역(612, 622)을 수신할 수 있다. 여기서, 가능 운영 영역(612, 622)은 배전 계통이 운영할 수 있는 유효 전력(P) 및 무효 전력(Q)의 범위를 나타낼 수 있다. 그리고 나서, 송전 계통 운영자는 가능 운영 영역(612, 622)과 참조 전력(614, 624)을 비교하여 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정할 수 있다.

[0066] 한편, 최종 참조 전력을 결정하기 이전에, i 번 배전 계통 운영자가 $f_i=0$ 에 의해 경계가 근사화된 가능 운영 영역을 갖고, βP_B^i 및 βQ_B^i 는 수학적 식 3에 따라 산출된다고 가정될 수 있다. 이 경우, P_B^i 및 Q_B^i 는 각각 초기 유효 전력 및 초기 무효 전력의 변화량을 나타낸다.

[0067] 제1 케이스(610)는 제1 참조 전력(614)이 제1 가능 운영 영역(612)의 경계 내부에 위치하는 예시를 나타낸다.

이 경우, 송전 계통 운영자는 배전 계통의 제1 참조 전력(614)을 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다. 예를 들어, 송전 계통 운영자는 수학적식 4 및 5에 따라 i 번 배전 계통의 최종 참조 전력($P_{B,update}^i, Q_{B,update}^i$)를 결정할 수 있다.

수학적식 4

$$\min \left\{ (\Delta P_{B,update}^i - \Delta P_B^i)^2 + (\Delta Q_{B,update}^i - \Delta Q_B^i)^2 \right\}$$

수학적식 5

$$s.t. f_i(P_B^i + \Delta P_{B,update}^i, Q_B^i + \Delta Q_{B,update}^i) = 0$$

수학적식 4 및 5를 참고하면, 제1 참조 전력(614)이 배전 계통 운영자에 의해 결정된 가능 운영 영역의 경계 내에 위치하는 경우, $f_i(P_B^i + \beta P_B^i, Q_B^i + \beta Q_B^i)$ 는 0 이하의 값을 갖는다. 이에 따라, 송전 계통 운영자는 제1 참조 전력을 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다. 한편, 도 6에는 도시되지 않았으나, 제1 참조 전력(614)이 제1 가능 운영 영역(612)의 경계에 위치하는 경우에도, 송전 계통 운영자는 배전 계통의 제1 참조 전력(614)을 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다.

반면, 제2 케이스(620)는 제2 참조 전력(624)이 제2 가능 운영 영역(622)의 경계 밖에 위치하는 예시를 나타낸다. 이 경우, 송전 계통 운영자는 제2 가능 운영 영역(622)의 경계 상에 위치하는 복수의 포인트 중 참조 전력(624)까지의 거리가 최소가 되도록 하는 포인트(626)를 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다. 예를 들어, 제2 참조 전력(624)이 배전 계통 운영자에 의해 결정된 가능 운영 영역의 경계 밖에 위치하는 경우, $f_i(P_B^i + \beta P_B^i, Q_B^i + \beta Q_B^i)$ 는 0을 초과하는 값을 갖는다. 이에 따라, 송전 계통 운영자는 참조 전력(624)과의 거리가 최소이면서 $f_i=0$ 이 되도록 하는 포인트(626)를 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다.

송전 계통 운영자는 i 번 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정한 후, j 번 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정할 수 있다. 이 때, 송전 계통 운영자가 결정한 j 번 배전 계통의 최종 참조 전력에는 제2 케이스(620)와 같이 i 번 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정함에 따라 발생한 잔여 전력이 포함될 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 송전 계통 운영자는 복수의 배전 계통 운영자 중 가장 민감한 배전 계통 운영자에 가장 큰 전력차(최종 참조 전력과 초기 전력의 차)가 존재하도록 최종 참조 전력을 결정하는 방식으로, 복수의 배전 계통 운영자에게 전력을 효율적으로 할당할 수 있다. 여기서, '가장 민감한' 배전 계통 운영자는 도 5의 3번 배전 계통 운영자와 같이, 임의의 부하 변화량에 따른 총 발전 변화량이 가장 큰 운영자를 지칭할 수 있다. 한편, j 번 배전 계통 운영자가 가장 민감한 경우, j 는 수학적식 6 및 7과 같이 정의될 수 있다.

수학적식 6

$$j = \arg \max_n \left\{ (\Delta P_B^n)^2 + (\Delta Q_B^n)^2 \right\}$$

수학식 7

$$\text{s.t. } f_j(P_B^j + \Delta P_B^j, Q_B^j + \Delta Q_B^j) < 0$$

[0074]

[0075]

상술한 바에 따르면, j번 배전 계통 운영자의 최종 참조 전력은 수학식 3에 의해 산출된 참조 전력과 i번 배전 계통 운영자로부터 발생한 잔여 전력의 합으로 결정될 수 있다. 그러나, 이와 같이 잔여 전력이 포함된 최종 참조 전력이 제2 케이스(620)와 유사하게, j번 배전 계통의 가능 운영 영역의 경계 밖에 위치할 수 있다. 이 경우, 송전 계통 운영자는 수학식 4와 같이 j번 배전 계통 운영자의 최종 참조 전력을 수정할 수 있다.

[0076]

한편, 송전 계통 운영자는 결정된 최종 참조 전력을 배전 계통 운영자에게 전송할 수 있다. 이 경우, 배전 계통 운영자는 제2 전력 민감도 파라미터 및 최종 참조 전력을 기초로 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정할 수 있다. 우선, 배전 계통 운영자는 제2 전력 민감도 파라미터를 기초로 복수의 발전기 각각의 참조 발전량을 결정할 수 있다. 그리고 나서, 배전 계통 운영자는 참조 발전량과 복수의 발전기 각각의 flexibility를 비교하여, 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정할 수 있다. 여기서, 배전 계통 운영자가 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정하는 방법은, 송전 계통 운영자가 복수의 배전 계통 각각의 최종 참조 전력을 결정하는 방법과 유사하게 수행될 수 있다. 즉, 도 6의 송전 계통 운영자, 배전 계통 및 최종 참조 전력은 각각 배전 계통 운영자, 발전기 및 발전량으로 대체되어 해석될 수 있다.

[0077]

도 7은 본 개시의 일 실시예에 따른 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법(700)의 예시를 나타낸다. 본 개시의 전력 제어 방법(700)은 송전 계통 운영 장치(또는, 운영자) 및/또는 배전 계통 운영 장치(또는, 운영자) 각각의 프로세서(예: 프로세서(314, 334))에 의해 수행될 수 있다. 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 배전 계통의 발전 변화량을 기초로 제1 전력 민감도 파라미터를 획득하는 단계(S710)로 개시될 수 있다.

[0078]

일 실시예에 따르면, 프로세서는 복수의 발전기를 포함하는 배전 계통에 대응하는 배전 계통 운영자로부터 배전 계통의 가능 운영 영역(FOR; Feasible Operation Region)을 수신할 수 있다(S720). 그리고 나서, 프로세서는 제1 전력 민감도 파라미터 및 가능 운영 영역을 기초로 배전 계통에 대한 최종 참조 전력을 결정할 수 있다(S730). 예를 들어, 프로세서는 배전 계통의 경계 버스에서 제1 전력 민감도 파라미터를 이용하여 배전 계통의 참조 전력을 산출하고, 가능 운영 영역과 참조 전력을 비교하여 배전 계통의 최종 참조 전력을 결정할 수 있다.

[0079]

일 실시예에 따르면, 프로세서는 참조 전력이 가능 운영 영역의 경계 또는 경계의 내부에 위치하는 경우, 참조 전력을 배전 계통의 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 프로세서는 참조 전력이 가능 운영 영역의 경계 밖에 위치하는 경우, 가능 운영 영역의 경계 상의 복수의 포인트 중 참조 전력까지의 거리가 최소가 되도록 하는 포인트를 최종 참조 전력으로 결정할 수 있다.

[0080]

일 실시예에 따르면, 프로세서는 배전 계통 운영자에게 최종 참조 전력을 전송할 수 있다(S740). 그 후, 배전 계통 운영자는 제2 전력 민감도 파라미터 및 최종 참조 전력을 기초로 복수의 발전기 각각의 발전량을 결정할 수 있다. 여기서, 제2 전력 민감도 파라미터는 임의의 부하의 크기 변화량에 대한 복수의 발전기 각각의 발전 변화량을 기초로 할 수 있다.

[0081]

이하에서는, 본 개시의 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법을 구현한 실험레가 개시된다.

[0082]

실험레

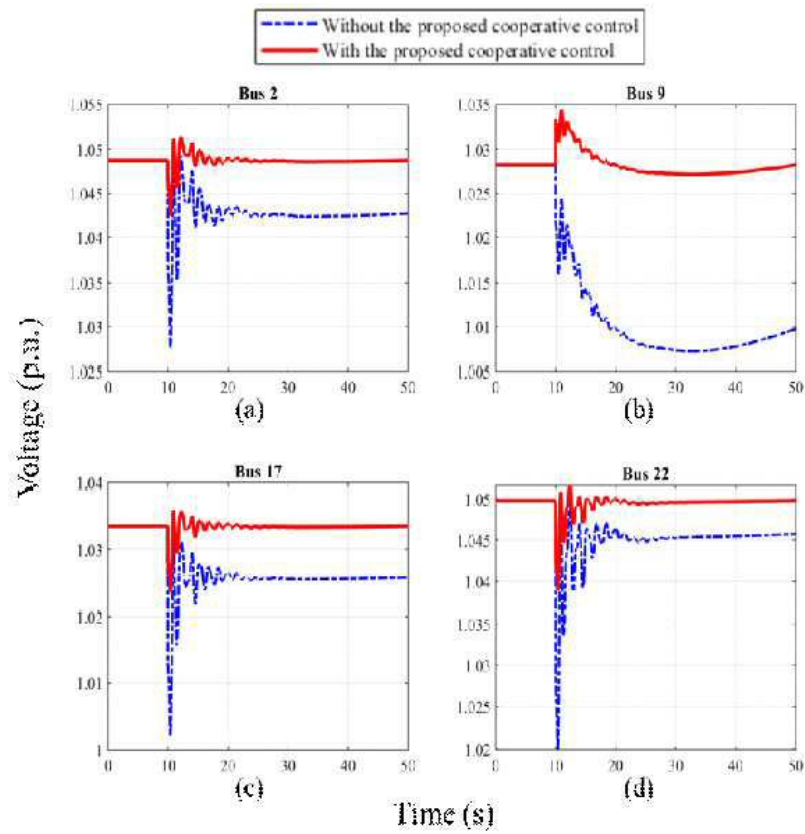
[0083]

본 개시에서 제안된 전력 민감도 기반의 협조적인 전력 제어 방법의 성능은 수정된 IEEE 33-bus 방사형 분배 시스템으로 구성된 4 개의 배전 계통 운영자를 포함하는 IEEE 39-bus에서 실행되었다(도 4 참조). 구체적으로, IEEE 39-bus 테스트 시스템은 39개의 버스, 10개의 발전기 및 19개의 부하를 포함한다. 여기서, 총 부하량은 $6097 + j1409$ MVA이다. 또한, 경계 버스 2, 9, 17, 22에는 4개의 배전 계통 운영자가 연결되어 있고, 배전 계통 운영자는 33개의 버스, 3개의 DG 및 32개의 부하를 포함한다. 여기서, 배전 계통 운영자 각각의 2번, 22번, 33번 버스에는 3개의 발전기가 배치되어 있다.

[0084]

본 개시의 전력 제어 방법의 실효성을 검증하기 위하여, 먼저 부하 변동 실험이 수행되었다. 15번 버스에서 실제 부하 전력이 10초에 320MW에서 640MW로 2 배 증가했다.

표 1

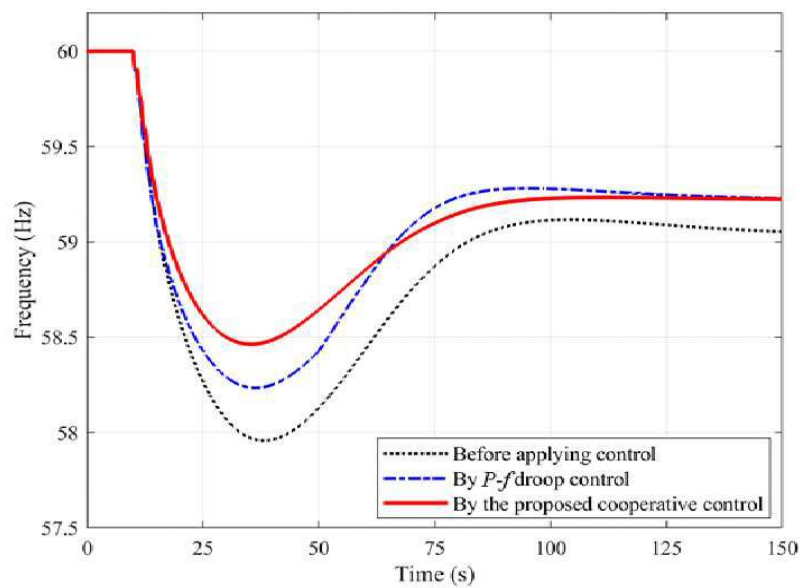


[0085]

[0086]

표 1의 (a), (b), (c) 및 (d)는 각각 네 개의 배전 계통 운영자의 경계 버스인 2, 9, 17 및 22번 버스에서의 전압 응답을 나타낸다. 표 1을 참고하면, 부하 크기가 변화된 후 전압이 초기 값으로 복원되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 개시의 협조적인 전력 제어 방법에 따르는 경우, 송전 계통 운영자 시스템 및 배전 계통 운영자 시스템 모두에서 전압 안정성이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

표 2



[0087]

[0088] 표 2는 종래 전력 제어 방법인 P-fdroop 과 본 개시의 협조적인 전력 제어 방법의 주파수 응답을 비교한 결과를 나타낸다. 여기서, 두 방법에서 발전기들에 의해 생성되는 전력의 총량은 동일하고, P-fdroop에서는 협조적인 전력 제어 방법과 달리 모든 발전기에 동일한 발전량이 할당되었다. 표 2를 참고하면, 협조적인 전력 제어 방법이 P-fdroop보다 주파수의 최소값이 상승한 것을 확인할 수 있다. 즉, 동적 주파수 응답은 종래 방법보다 협조적인 전력 제어 방법의 경우가 더 개선된 결과를 보인다. 이는, 협조적인 전력 제어 방법에서 배전 계통 운영자가 높은 전력 민감도로 복수의 발전기들을 최적화하여, 결과적으로 협조적인 전력 제어 방법의 발전기들이 더 많은 전력을 생산하기 때문이다.

표 3

POWER OUTPUTS FROM GENERATORS IN TSO SYSTEM

Generator	Base case [MW]	P-f droop control [MW]	Proposed cooperative control [MW]
G1	1055	1039	1043
G2	598	597	534
G3	684	683	683
G4	disconnected		
G5	513	512	512
G6	684	683	683
G7	598	597	597
G8	598	597	597
G9	854	853	853
G10	471	454	469
Total	6053	6014	5971

[0089]

[0090] 표 3은 송전 계통 운영자 시스템의 동기(synchronous) 발전기에서 출력되는 전력을 나타낸다. 표 3을 참고하면, 두 방법에서 발전기들에 의해 생성되는 전력의 총량이 동일한 점을 고려했을 때, 주파수 변동을 완화하기 위한 송전 계통 운영자의 부담이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

[0091] 본 개시의 앞선 설명은 통상의 기술자들이 본 개시를 행하거나 이용하는 것을 가능하게 하기 위해 제공된다. 본 개시의 다양한 수정예들이 통상의 기술자들에게 쉽게 자명할 것이고, 본원에 정의된 일반적인 원리들은 본 개시의 취지 또는 범위를 벗어나지 않으면서 다양한 변형예들에 적용될 수도 있다. 따라서, 본 개시는 본원에 설명된 예들에 제한되도록 의도된 것이 아니고, 본원에 개시된 원리들 및 신규한 특징들과 일관되는 최광의의 범위가 부여되도록 의도된다.

[0092] 비록 예시적인 구현예들이 하나 이상의 독립형 컴퓨터 계통의 맥락에서 현재 개시된 주제의 양태들을 활용하는 것을 언급할 수도 있으나, 본 주제는 그렇게 제한되지 않고, 오히려 네트워크나 분산 컴퓨팅 환경과 같은 임의의 컴퓨팅 환경과 연계하여 구현될 수도 있다. 또 나아가, 현재 개시된 주제의 양상들은 복수의 프로세싱 칩들이나 디바이스들에서 또는 그들에 걸쳐 구현될 수도 있고, 스토리지는 복수의 디바이스들에 걸쳐 유사하게 영향을 받게 될 수도 있다.

[0093] 본 명세서에서는 본 개시가 일부 실시예들과 관련하여 설명되었지만, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 기술자가 이해할 수 있는 본 개시의 범위를 벗어나지 않는 범위에서 다양한 변형 및 변경이 이루어질 수 있다는 점을 알아야 할 것이다. 또한, 그러한 변형 및 변경은 본 명세서에서 첨부된 특허청구의 범위 내에 속하는 것으로 생각되어야 한다.

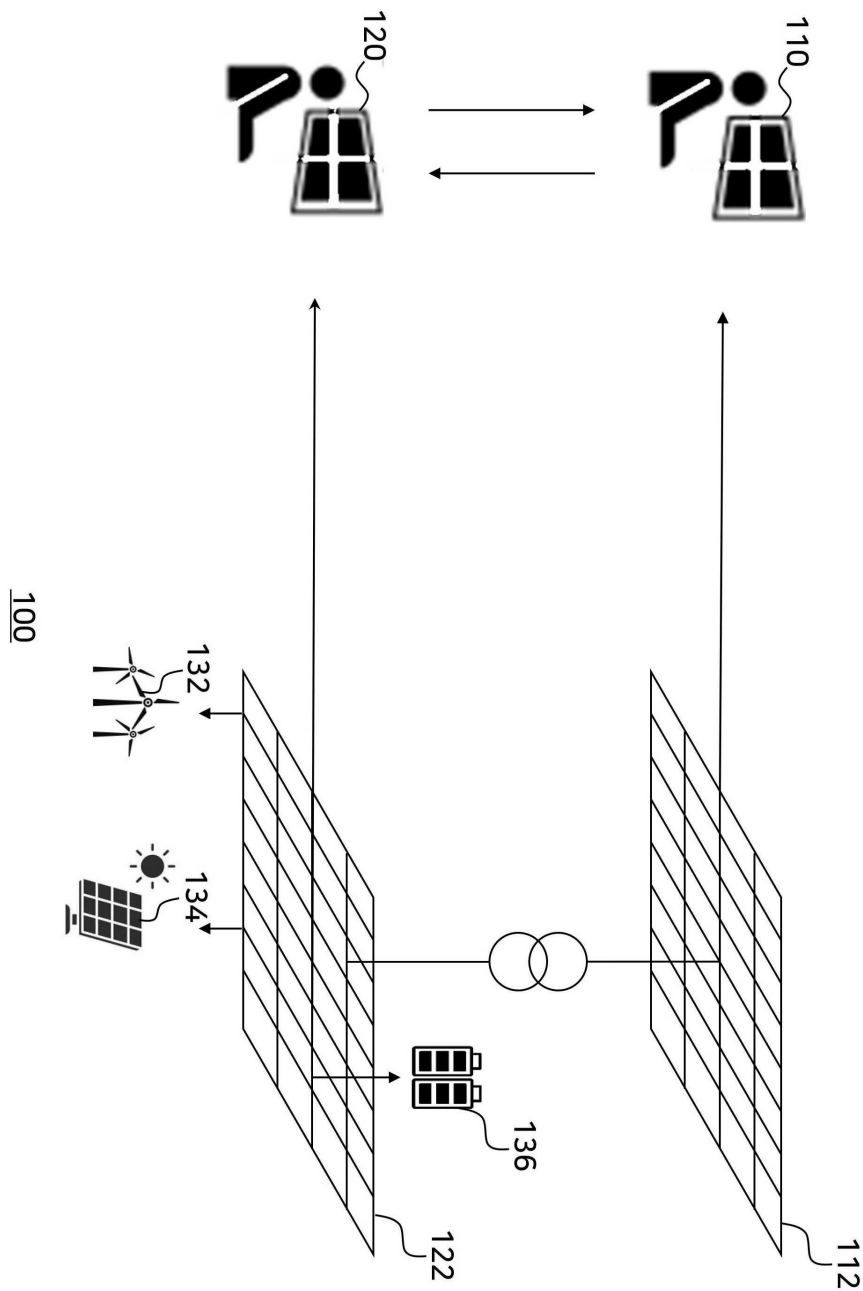
부호의 설명

[0095]

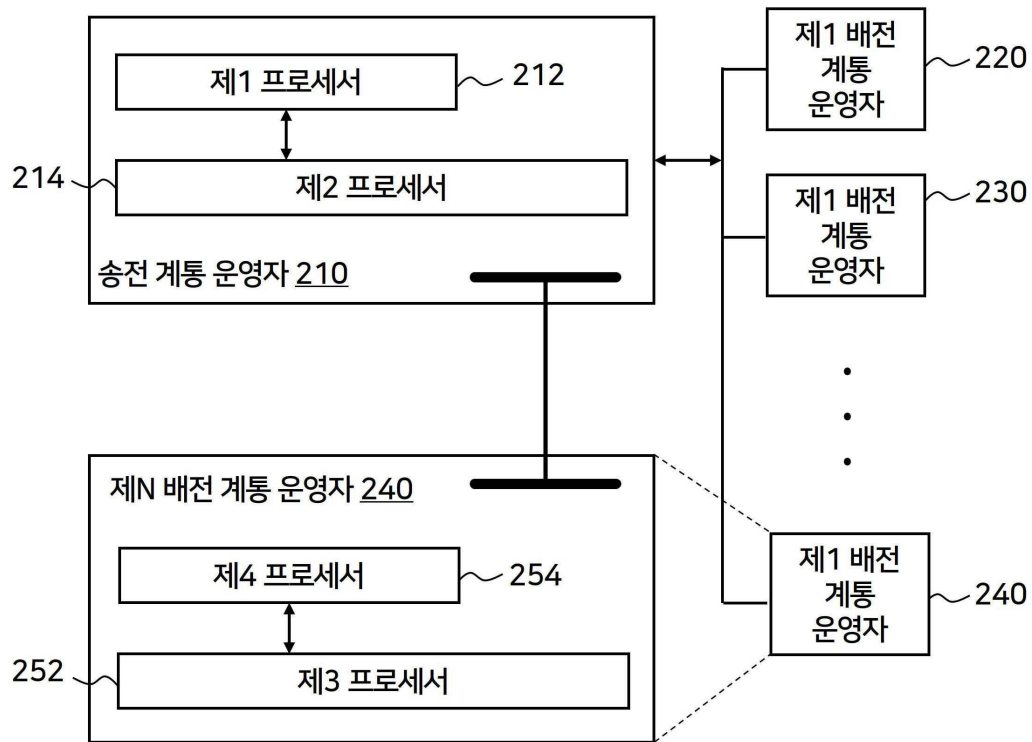
- 100: 전력 시스템
- 110: 송전 계통 운영자(TSO; Transmission System Operator)
- 120: 배전 계통 운영자(DSO; Distribution System Operator)
- 112: 송전 계통
- 122: 배전 계통
- 132 내지 136: 복수의 발전기

도면

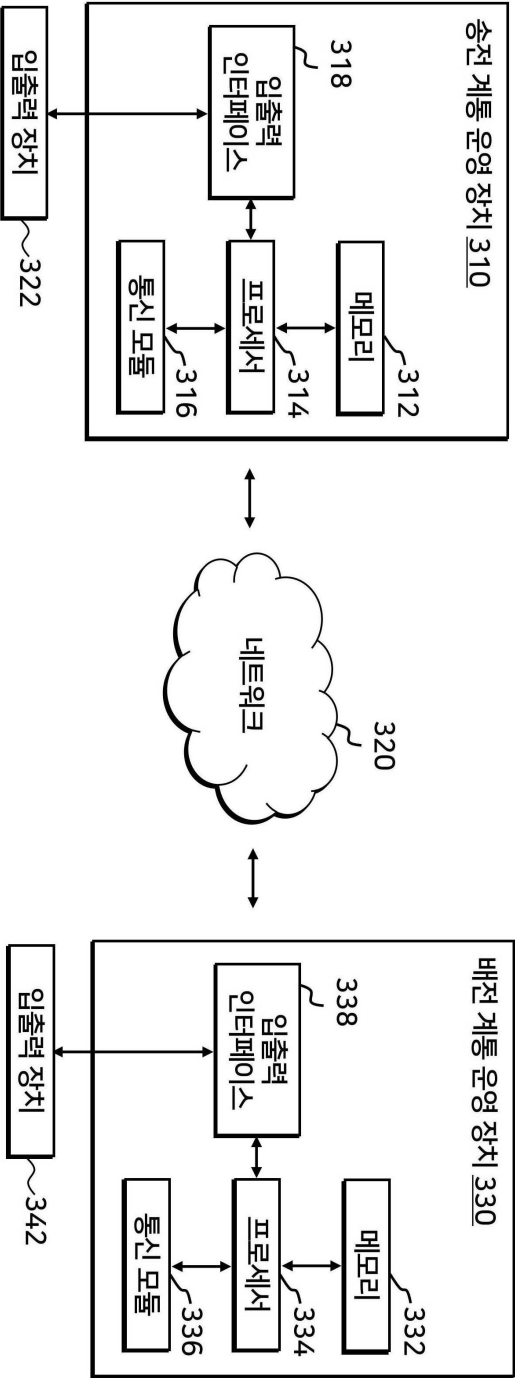
도면1



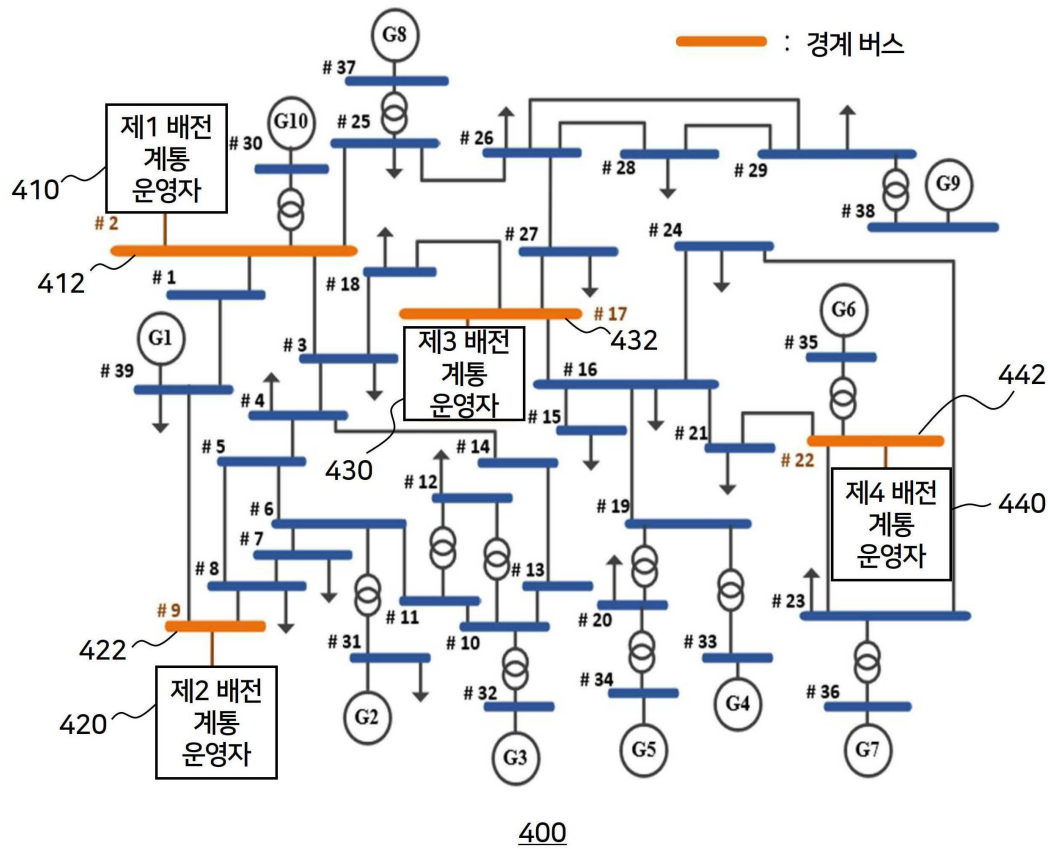
도면2



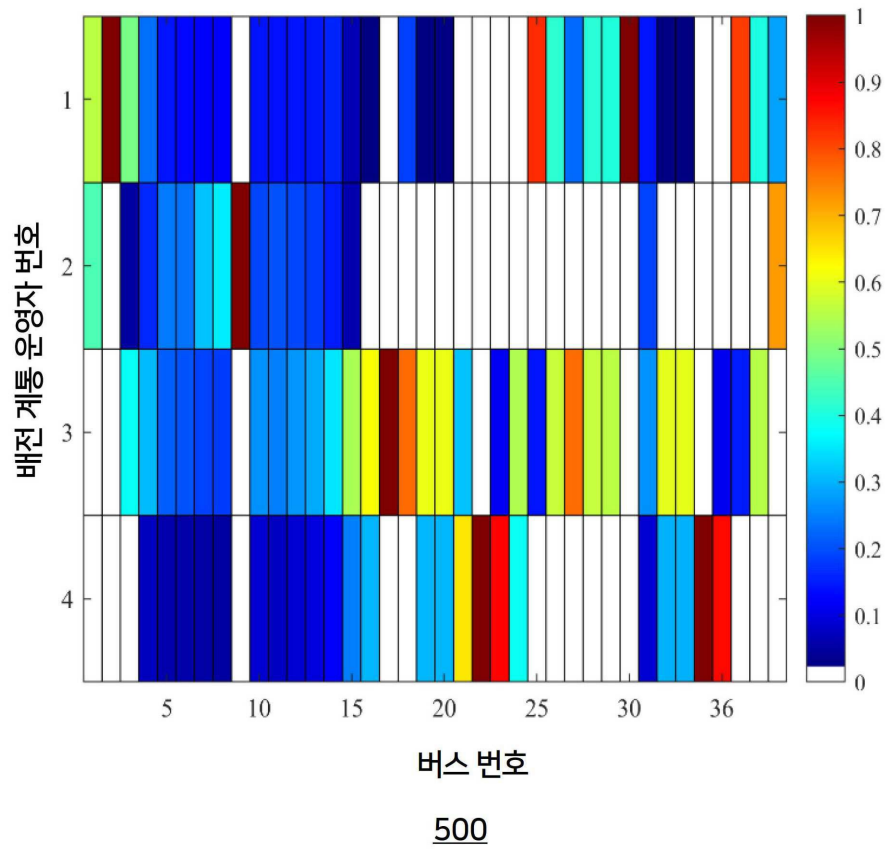
도면3



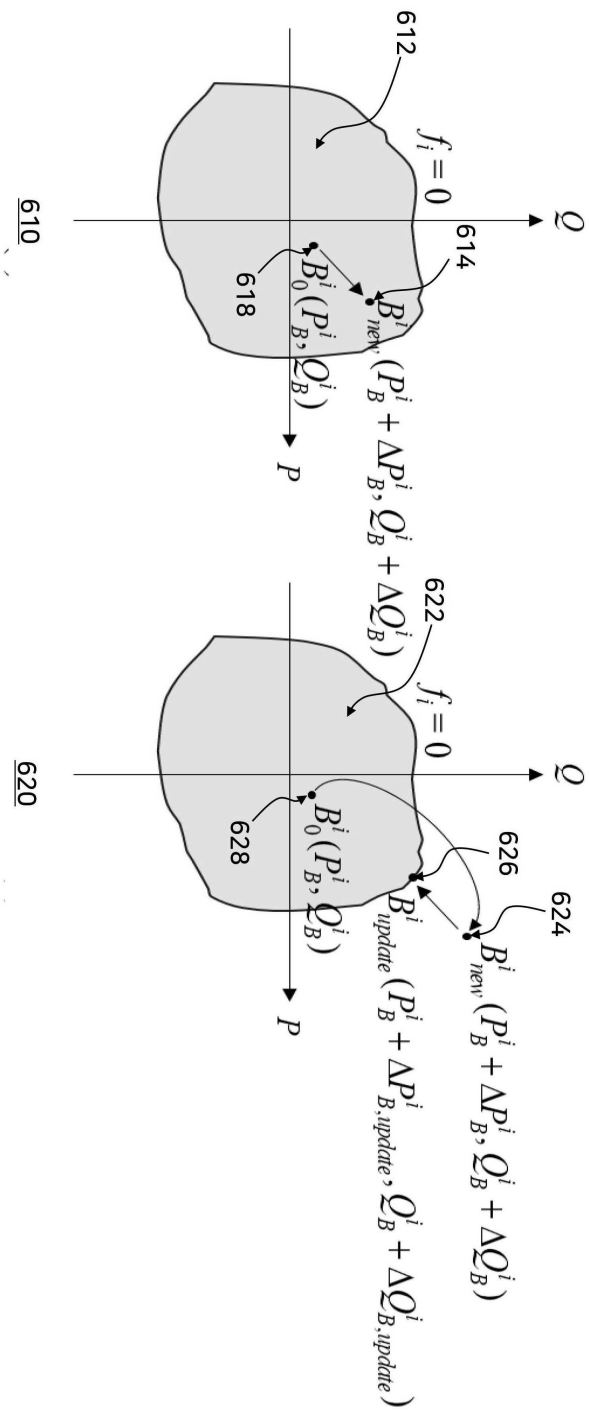
도면4



도면5



도면6



도면7

700
↘

