(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0084409
(43) 공개일자 2024년06월13일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02J 3/38 (2022.01) *H02J 3/00* (2006.01)
H02J 3/36 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H02J 3/381 (2023.08)
H02H 3/006 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0004587
(22) 출원일자 2023년01월12일
심사청구일자 2023년01월12일
(30) 우선권주장
1020220167404 2022년12월05일 대한민국(KR)

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김인수
인천광역시 연수구 송도문화로84번길 84, 102동 2104호(송도동, 베르디움 더퍼스트)
장지연
전라남도 목포시 신흥로 13, 103동 903호(상동, 우성아파트)
(74) 대리인
양성보

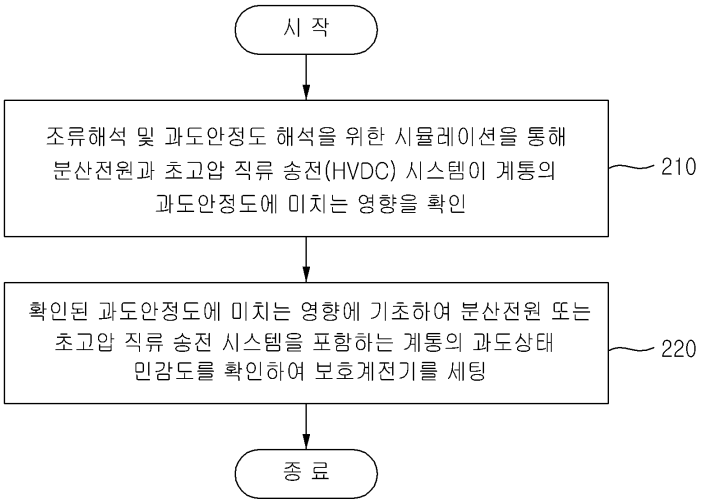
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **분산전원 및 초고압 직류 송전 시스템의 주입에 따른 전력계통의 안정도 분석**

(57) 요 약

분산전원 및 초고압 직류 송전 시스템의 주입에 따른 전력계통의 안정도 분석 기술이 개시된다. 일 실시예에 따른 컴퓨터 시스템에 의해 수행되는 전력계통의 안정도 분석 방법은, 조류해석 및 과도안정도 해석을 위한 시뮬레이션을 통해 분산전원과 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템이 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인하는 단계; 및 상기 확인된 과도안정도에 미치는 영향에 기초하여 상기 분산전원 또는 상기 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하여 보호계전기를 세팅하는 단계를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도2



(52) CPC특허분류
H02J 3/00125 (2023.08)
H02J 3/36 (2023.08)
H02J 2203/10 (2023.08)
H02J 2203/20 (2023.08)
H02J 2300/24 (2023.08)
Y02E 10/50 (2020.08)
Y02E 60/60 (2020.08)
Y04S 10/123 (2020.08)
Y04S 40/20 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711156272
과제번호	2019M3F2A1073401
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	에너지클라우드기술개발사업
연구과제명	[Ezbaro] 에너지 클라우드 가상물리시스템 설계 및 최적 운영 기술 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	인하대학교
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

컴퓨터 시스템에 의해 수행되는 전력계통의 안정도 분석 방법에 있어서,

조류해석 및 과도안정도 해석을 위한 시뮬레이션을 통해 분산전원과 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템이 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인하는 단계; 및

상기 확인된 과도안정도에 미치는 영향에 기초하여 상기 분산전원 또는 상기 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하여 보호계전기를 세팅하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 확인하는 단계는,

PSO(Particle swarm optimization)을 통해 전력 손실, 설치 비용, 전압변동을 최소화하는 목적함수를 설정하고, 상기 설정된 목적함수에 기초하여 탐색된 위치에 상기 설정된 목적함수가 수렴함에 따라 도출된 최적화 결과의 분산전원을 투입하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 확인하는 단계는,

교류 선로로 구성된 계통을 유지하고 초고압 직류 송전을 설치하는 방법과 교류 선로로 구성된 계통을 제거하고 초고압 직류 송전을 설치하는 방법을 포함하는 초고압 직류 송전 설치 방법에 따른 과도반응을 확인하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 확인하는 단계는,

상기 분산전원이 침투하였을 때 주파수 안정도를 확인하고, 상기 확인된 주파수 안정도에 기초하여 임계 고장 제거 시간을 결정하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 확인하는 단계는,

상기 결정된 임계 고장 제거 시간에 기초하여 초고압 직류 송전 설치에 따른 주파수 변동을 확인하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 분산전원은, 인버터 기반의 태양광 시스템인 것을 특징으로 하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 세팅하는 단계는,

분산전원과 초고압 직류 송전이 모두 설치되지 않은 경우, 분산전원과 초고압 직류 송전이 모두 설치된 경우, 분산전원만 설치된 경우, 및 초고압 직류 송전만 설치된 경우를 포함하는 각각의 시스템에 대해 보호계전기 동작에 따른 분산전원 및 초고압 직류 송전을 포함하는 계통의 주파수 변동을 확인하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 세팅하는 단계는,

보호계전기 타임 다이얼(Time dial)을 변경하여 분산전원과 초고압 직류 송전을 포함하는 계통의 민감도를 확인하는 단계

를 포함하는 전력계통의 안정도 분석 방법.

청구항 9

전력계통의 안정도 분석을 위한 컴퓨터 시스템에 있어서,

조류해석 및 과도안정도 해석을 위한 시뮬레이션을 통해 분산전원과 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템이 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인하는 영향 확인부; 및

상기 확인된 과도안정도에 미치는 영향에 기초하여 상기 분산전원 또는 상기 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하여 보호계전기를 세팅하는 보호계전기 세팅부

를 포함하는 컴퓨터 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 아래의 설명은 전력계통의 안정도 분석 기술에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 전력계통은 변화하는 환경 하에서 전력의 수요가 증가함에 따라 대규모화되어가고 있으며, 분산전원 및 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템 등 새로운 기술의 기기들이 도입됨에 따라 복잡해지고 있다. 이러한 복잡한 전력계통에서 외란 및 고장이 발생할 경우, 고장에 대한 각각 설비의 반응은 각자 다르고 어떠한 고장이 어떤 위치에서 발생했는지에 따라서도 천차만별로 달라진다. 특히, 인버터 기반의 분산전원은 관성이 약하므로 대형 동기 발전기를 기반으로 운영되는 전력계통에 침투하였을 때 과도상태 반응을 확인할 필요가 있다. 또한, 전력전자설비를 통해 계통과 연결되는 초고압 직류 송전 시스템이 있는 계통에서 고장이 발생하였을 때 초고압 직류 송전 시스템의 유무에 따른 전력계통의 과도안정도를 확인할 필요가 있다. 이와 같이, 전력계통에서 발생할 수 있는 다양한 문제나 현상을 신속하게 해석 및 분석하는 것은 전력 손실을 줄이고 대규모 광역 정전 사태를 방지할 수 있다.

[0004] 한편, 대한민국공개특허 제10-2018-0072991호(2018.07.02. 공개일)에 예측정보를 이용하여 배전계통 전압안정도를 향상시키는 기술이 개시된 바 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 분산전원과 초고압 직류 송전 시스템이 전력계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인하는 방법 및 시스템을 제공할 수 있다.

[0007] 분산전원과 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하는 방법 및 시스템을 제공할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0009] 컴퓨터 시스템에 의해 수행되는 전력계통의 안정도 분석 방법은, 조류해석 및 과도안정도 해석을 위한 시뮬레이션을 통해 분산전원과 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템이 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인하는 단계; 및 상기 확인된 과도안정도에 미치는 영향에 기초하여 상기 분산전원 또는 상기 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하여 보호계전기를 세팅하는 단계를 포함할 수 있다.

[0010] 상기 확인하는 단계는, PSO(Particle swarm optimization)을 통해 전력 손실, 설치 비용, 전압변동을 최소화하는 목적함수를 설정하고, 상기 설정된 목적함수에 기초하여 탐색된 위치에 상기 설정된 목적함수가 수렴함에 따라 도출된 최적화 결과의 분산전원을 투입하는 단계를 포함할 수 있다.

[0011] 상기 확인하는 단계는, 교류 선로로 구성된 계통을 유지하고 초고압 직류 송전을 설치하는 방법과 교류 선로로 구성된 계통을 제거하고 초고압 직류 송전을 설치하는 방법을 포함하는 초고압 직류 송전 설치 방법에 따른 과도반응을 확인하는 단계를 포함할 수 있다.

[0012] 상기 확인하는 단계는, 상기 분산전원이 침투하였을 때 주파수 안정도를 확인하고, 상기 확인된 주파수 안정도에 기초하여 임계 고장 제거 시간을 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0013] 상기 확인하는 단계는, 상기 결정된 임계 고장 제거 시간에 기초하여 초고압 직류 송전 설치에 따른 주파수 변동을 확인하는 단계를 포함할 수 있다.

[0014] 상기 분산전원은, 인버터 기반의 태양광 시스템일 수 있다.

[0015] 상기 세팅하는 단계는, 분산전원과 초고압 직류 송전이 모두 설치되지 않은 경우, 분산전원과 초고압 직류 송전이 모두 설치된 경우, 분산전원만 설치된 경우, 및 초고압 직류 송전만 설치된 경우를 포함하는 각각의 시스템에 대해 보호계전기 동작에 따른 분산전원 및 초고압 직류 송전을 포함하는 계통의 주파수 변동을 확인하는 단계를 포함할 수 있다.

[0016] 상기 세팅하는 단계는, 보호계전기 타임 다이얼(Time dial)을 변경하여 분산전원과 초고압 직류 송전을 포함하는 계통의 민감도를 확인하는 단계를 포함할 수 있다.

[0017] 전력계통의 안정도 분석을 위한 컴퓨터 시스템은, 조류해석 및 과도안정도 해석을 위한 시뮬레이션을 통해 분산전원과 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템이 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인하는 영향 확인부; 및 상기 확인된 과도안정도에 미치는 영향에 기초하여 상기 분산전원 또는 상기 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하여 보호계전기를 세팅하는 보호계전기 세팅부를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0019] PSO를 통한 최적화 방법론을 통해 전력 손실, 전압변동, 설치비용을 최소화하는 방식으로 분산전원의 설치가 가능하다.

[0020] 전력 손실, 전압변동, 설치 비용을 최소화하기 위해 최적화되고 약간의 제어기 설계가 된 분산전원의 주입은 때로 계통의 주파수 안정도를 향상시키는 효과가 있음을 확인함에 따라 분산전원의 주입 시 최적화의 중요성 그리고 제어기 설계의 중요성을 확인하여 이를 적용할 계기를 마련할 수 있다.

[0021] 계통에 HVDC를 설치할 때 기존의 교류 선로를 유지하고 직류 링크(HVDC)를 연결하는 경우가 기존의 교류 선로를 없애고 HVDC를 설치하여 오직 직류 선로로만 연결하는 경우보다 안정적임을 확인할 수 있다.

[0022] 분산전원과 HVDC를 가진 계통에 대해 보호계전기의 동작 지연 시간에 따른 민감도를 기반으로 최적화된 보호계전기 세팅의 중요성을 확인할 수 있다. 실제 HVDC를 가지는 계통에 대해 보호계전기를 설계할 때 최적화된 보호 협조의 필요성을 제시할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 일 실시예에 있어서, 컴퓨터 시스템의 구성을 설명하기 위한 블록도이다.

도 2는 일 실시예에 있어서, 전력계통의 안정도 분석 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 3은 일 실시예에 있어서, 분산전원, HVDC의 과도반응을 확인하기 위한 예이다.

도 4는 일 실시예에 있어서, 분산전원 최적화를 설명하기 위한 흐름도이다.

도 5는 일 실시예에 있어서, 분산전원의 침투 여부에 따라 모선별 전압의 크기를 설명하기 위한 도면이다.

도 6 및 도 7은 일 실시예에 있어서, 3상 단락 고장 발생 시, 고장 위치와 분산전원의 침투 여부에 따른 계통의 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

도 8은 일 실시예에 있어서, HVDC의 설치에 따른 고장해석을 설명하기 위한 그래프이다.

도 9는 일 실시예에 있어서, 고장 제거 지연 시간이 2주기일 때, HVDC 설치에 따른 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

도 10은 일 실시예에 있어서, 보호계전기 세팅 및 전류-시간 특성곡선을 설명하기 위한 그래프이다.

도 11은 일 실시예에 있어서, 보호계전기 동작에 따른 분산전원 및 HVDC을 가진 계통의 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

도 12는 일 실시예에 있어서, HVDC를 가진 계통에 고장이 발생했을 때 HVDC 모선의 전압과 HVDC를 통해 흐르는 직류 전류를 설명하기 위한 그래프이다.

도 13은 일 실시예에 있어서, HVDC 설치 방법에 따른 HVDC를 통해 흐르는 피상전력의 크기 비교를 설명하기 위한 그래프이다.

도 14는 일 실시예에 있어서, HVDC 설치 방법에 따른 시스템의 주파수 변동 비교를 설명하기 위한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 이하, 실시예를 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0027] 도 1은 일 실시예에 있어서, 컴퓨터 시스템의 구성을 설명하기 위한 블록도이고, 도 2는 일 실시예에 있어서, 전력계통의 안정도 분석 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0028] 컴퓨터 시스템(100)의 프로세서는 영향 확인부(110) 및 보호계전기 세팅부(120)를 포함할 수 있다. 이러한 프로세서의 구성요소들은 컴퓨터 시스템에 저장된 프로그램 코드가 제공하는 제어 명령에 따라 프로세서에 의해 수행되는 서로 다른 기능들(different functions)의 표현들일 수 있다. 프로세서 및 프로세서의 구성요소들은 도 2의 전력계통의 안정도 분석 방법이 포함하는 단계들(210 내지 220)을 수행하도록 컴퓨터 시스템을 제어할 수 있다. 이때, 프로세서 및 프로세서의 구성요소들은 메모리가 포함하는 운영체제의 코드와 적어도 하나의 프로그램의 코드에 따른 명령(instruction)을 실행하도록 구현될 수 있다.

[0029] 프로세서는 전력계통의 안정도 분석 방법을 위한 프로그램의 파일에 저장된 프로그램 코드를 메모리에 로딩할 수 있다. 예를 들면, 컴퓨터 시스템에서 프로그램이 실행되면, 프로세서는 운영체제의 제어에 따라 프로그램의 파일로부터 프로그램 코드를 메모리에 로딩하도록 컴퓨터 시스템을 제어할 수 있다. 이때, 프로세서는 영향 확인부(110) 및 보호계전기 세팅부(120) 각각은 메모리에 로딩된 프로그램 코드 중 대응하는 부분의 명령을 실행

하여 이후 단계들(210 내지 220)을 실행하기 위한 프로세서의 서로 다른 기능적 표현들일 수 있다.

[0030] 단계(210)에서 영향 확인부(110)는 조류해석 및 과도안정도 해석을 위한 시뮬레이션을 통해 분산전원과 초고압 직류 송전(HVDC) 시스템이 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 영향 확인부(110)는 PSO(Particle swarm optimization)을 통해 전력 손실, 설치 비용, 전압변동을 최소화하는 목적함수를 설정하고, 설정된 목적함수에 기초하여 탐색된 위치에 설정된 목적함수가 수렴함에 따라 도출된 최적화 결과의 분산전원을 투입할 수 있다. 영향 확인부(110)는 교류 선로로 구성된 계통을 유지하고 초고압 직류 송전을 설치하는 방법과 교류 선로로 구성된 계통을 제거하고 초고압 직류 송전을 설치하는 방법을 포함하는 초고압 직류 송전 설치 방법에 따른 과도반응을 확인할 수 있다. 영향 확인부(110)는 분산전원이 침투하였을 때 주파수 안정도를 확인하고, 확인된 주파수 안정도에 기초하여 임계 고장 제거 시간을 결정할 수 있다. 영향 확인부(110)는 결정된 임계 고장 제거 시간에 기초하여 초고압 직류 송전 설치에 따른 주파수 변동을 확인할 수 있다.

[0031] 단계(220)에서 보호계전기 세팅부(120)는 확인된 과도안정도에 미치는 영향에 기초하여 분산전원 또는 초고압 직류 송전 시스템을 포함하는 계통의 과도상태 민감도를 확인하여 보호계전기를 세팅할 수 있다. 세팅부(120)는 분산전원과 초고압 직류 송전이 모두 설치되지 않은 경우, 분산전원과 초고압 직류 송전이 모두 설치된 경우, 분산전원만 설치된 경우 및 초고압 직류 송전만 설치된 경우를 포함하는 각각의 시스템에 대해 보호계전기 동작에 따른 분산전원 및 초고압 직류 송전을 포함하는 계통의 주파수 변동을 확인할 수 있다. 세팅부(120)는 보호계전기 타임 다이얼(Time dial)을 변경하여 분산전원과 초고압 직류 송전을 포함하는 계통의 민감도를 확인할 수 있다.

[0032] 도 3은 일 실시예에 있어서, 분산전원, HVDC의 과도반응을 확인하기 위한 예이다.

[0033] 도 3은 IEEE 30-bus system의 단선 다이어그램을 나타낸 예이다. 컴퓨터 시스템은 동기 발전기, 분산전원, HVDC의 과도반응을 확인하기 위해 IEEE 30-bus system을 테스트 피더로 선정하여 과도안정도 해석을 진행할 수 있다. IEEE 30-bus system은 많은 루프를 가진 환상형 계통이다. 계통 내에 6개의 변압기를 포함하여 132, 33, 11, 1kV를 포함하는 4 가지의 전압으로 이루어진다. IEEE 30-bus system은 6 개의 동기 발전기와 15 개의 부하를 가지고 있다.

[0034] 컴퓨터 시스템은 과도안정도를 확인하기 위하여 기존의 무한 모선(Slack)을 동기 발전기로 대체할 수 있다. 이때, 동기 발전기는 정격 300 MVA, d축 동기 리액턴스 2 p.u., q축 동기 리액턴스 2 p.u., 영상분 리액턴스 0.1 p.u., 영상분 레지스턴스 0 p.u., 역상분 리액턴스 0.2 p.u., 역상분 레지스턴스 0 p.u.의 특징을 포함한다.

[0035] 컴퓨터 시스템은 PSO(Particle swarm optimization)를 통한 분산전원을 최적화할 수 있다. 이때, 분산전원으로 투입되는 재생 에너지 중 인버터를 통해 계통과 연결되는 특징을 가지고 있는 태양광 시스템이 분산전원으로 선정될 수 있다.

[0036] 도 4는 일 실시예에 있어서, 분산전원 최적화를 설명하기 위한 흐름도이다.

[0037] 컴퓨터 시스템은 파라미터들을 초기화할 수 있다. 컴퓨터 시스템은 파라미터들을 초기화(410)함에 따라 목적함수에 기초하여 입자들의 속도 및 위치를 계산하여 값을 결정할 수 있다(420). 컴퓨터 시스템은 계산된 입자들의 속도 및 위치의 값에 대해 목적함수에 기초하여 평가할 수 있다(430). 컴퓨터 시스템은 입자들의 최적값과 군집의 최적값을 계산할 수 있다(440). 컴퓨터 시스템은 계산된 입자들의 최적값과 군집의 최적값이 종료 조건(예를 들면, 반복 횟수 200)을 만족(450)하면, 입자들의 최적값과 군집의 최적값을 최적화 결과로 출력할 수 있다(460). 컴퓨터 시스템은 계산된 입자들의 최적값과 군집의 최적값이 종료 조건을 만족하지 못하면 입자들의 속도 및 위치를 재계산할 수 있다.

[0038] 컴퓨터 시스템은 흐름도에 기반한 PSO(Particle swarm optimization) 방법을 통해 전력 손실, 설치 비용, 전압변동을 최소화하고자 하는 목적함수를 수렴시킬 수 있다. 또한, PSO을 통한 분산전원 최적화의 결과는 다음과 같다. 버스 19, 21, 24, 26, 30번에 각각 33.2913, 1.2475, 34.4553, 9.9948, 24.2839 MVA의 용량의 태양광 시스템이 설치되고, 이에 따른 분산전원의 침투율은 33.86% 이다.

[0039] 도 5는 일 실시예에 있어서, 분산전원의 침투 여부에 따라 모선별 전압의 크기를 설명하기 위한 도면이다.

[0040] 전압이 안정한 범위 내에 존재하는지 확인하기 위해 조류해석을 통해 모선의 전압의 크기가 확인될 수 있다. 사전에 조류해석이 진행될 수 있고, 분산전원의 전압보상 효과가 확인될 수 있다.

[0041] 도 5를 참고하면, 분산전원이 침투하지 않은 기존 IEEE 30-bus system 과 분산전원이 침투한 IEEE 30-bus system에 대한 조류해석 결과를 전압의 관점에서 나타낸 것이다. 분산전원이 침투한 경우, 30개의 모선에서 전

압이 모두 보상된 것을 확인할 수 있다. 특히 30번 모선의 전압보상은 약 0.0675 p.u.이다.

[0042] 컴퓨터 시스템은 분산전원의 침투에 따른 고장해석을 진행할 수 있다. 분산전원은 외란 및 고장이 발생하였을 때, 계통의 과도반응에 영향을 미친다. 컴퓨터 시스템은 분산전원이 침투하였을 때 과도상태 주파수 안정도를 확인할 수 있다. 컴퓨터 시스템은 분산전원 침투에 따른 주파수 안정도에 기초하여 임계 고장 제거 시간을 결정할 수 있다. 예를 들면, 임계 고장 제거 시간 결정을 위해 50Hz 기준으로 $\pm$ 0.4% 범위 내 있을 수 있는 최대 고장 제거 지연 시간을 임계 고장 제거 시간으로 정의하기로 한다. 또한, 실시예에서 분산전원은 태양광 시스템이고 DIgSILENT PowerFactory에서 제공하는 기본적인 제어기가 설정되어 있음을 가정하기로 한다.

[0043] 컴퓨터 시스템은 도 4의 1번 모선에 있는 동기 발전기를 기준으로 하여, 동기 발전기로부터의 거리에 따른 3상 단락 고장의 파급 효과를 확인하기 위해 3가지의 고장 위치를 선정할 수 있다. 고장 위치는 모선 3과 모선 4를 연결하는 선로(선로 3-4), 모선 14와 모선 15를 연결하는 선로(선로 14-15), 모선 27과 모선 29를 연결하는 선로(선로 27-29)로 각각 거리가 먼, 중간, 가까운 위치의 고장을 의미한다. 분산전원이 침투하지 않은 경우와, 분산전원이 침투한 경우에 대해 각각 3가지 고장 위치에 3상 단락 고장이 발생될 수 있다.

[0044] 표 1을 참고하면, 총 6개의 시나리오가 구성될 수 있으며, 각각의 시나리오에 대해 임계 고장 제거 시간을 결정하여 나타낸 것이다.

[0045] 표 1: 고장 위치와 분산전원 침투에 따른 임계 고장 제거 시간 결정

시나리오	고장 위치	분산전원 침투 여부	임계 고장 제거 시간 [주기]
1	선로 3-4	x	1
2	선로 3-4	o	1.5
3	선로 14-15	x	3.5
4	선로 14-15	o	4
5	선로 27-29	x	6.5
6	선로 27-29	o	7

[0046]

[0047] 표 1을 통해 알 수 있듯이, 전원으로부터 가까운 위치에서 고장이 발생한 경우(시나리오 1, 시나리오 2), 임계 고장 제거 시간이 짧고, 전원으로부터 먼 위치에서 고장이 발생한 경우(시나리오 5, 시나리오 6), 임계 고장 제거 시간이 상대적으로 길게 나타난다. 또한, 분산전원이 계통에 침투한 경우, 임계 고장 제거 시간이 0.5 주기씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 곳곳에 배치된 분산전원의 침투로 인해 동기 발전기의 출력변동을 막아주는 효과가 발생될 수 있다. 실시예에서 3상 단락 고장에 대해 주파수 변동의 폭을 $\pm$ 0.4% 잡았기 때문에, 임계 고장 제거 시간이 전체적으로 짧게 나타날 수 있다.

[0048] 도 6 및 도 7은 일 실시예에 있어서, 3상 단락 고장 발생 시, 고장 위치와 분산전원의 침투 여부에 따른 계통의 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

[0049] 도 6은 고장 제거 시간이 5주기일 때, 고장 위치와 분산전원 침투 여부에 따른 주파수 변동을 나타낸 그래프이고, 도 7은 고장 제거 지연 시간이 200주기일 때, 고장 위치와 분산전원 침투 여부에 따른 주파수 변동을 나타낸 그래프이다. 도 6 과 도 7의 차이는 고장이 발생하고 고장이 제거되기까지의 시간인 고장 제거 지연 시간에 있다.

[0050] 고장 제거 지연 시간이 짧은 경우(예를 들면, 도 6의 5주기)와 고장 제거 지연 시간이 긴 경우(예를 들면, 도 7의 200주기) 모두에 대해 분산전원은 주파수의 최댓값을 낮추는 효과가 있다. 분산전원이 침투하지 않은 경우는 대체로 높은 주파수 최댓값을 가지지만 수렴 속도는 약간 빠른 특징을 보인다. 이처럼, 분산전원이 침투했을 때 주파수의 피크 값을 낮추는 효과가 있다. 표 2는 고장 제거 지연 시간이 5, 50, 200주기인 경우에 대해 3 가지의 고장 위치별 분산전원의 피크 값 감소 효과를 비율로 나타낸 것이다. 다시 말해서, 분산전원이 침투하지 않은 계통의 주파수 피크 값 대비 분산전원이 침투한 계통의 주파수 피크 값의 감소분을 비율로써 나타낸다.

[0051] 표 2: 고장 위치와 고장 제거 지연 시간에 따른 분산전원의 주파수 피크 값 감소 비율

	선로 3-4 고장	선로 14-15 고장	선로 27-29 고장
5주기	0.145 %	0.062 %	0.041 %
50주기	1.660 %	0.692 %	0.045 %
200주기	7.391 %	3.220 %	2.069 %

[0052]

[0053] 그러나, 분산전원의 침투율(예를 들면, 70%)이 매우 높은 시스템의 경우, 시스템이 외란 또는 고장이 발생했을 때 분산전원의 큰 출력변동으로 인해 계통의 안정도를 악화시킬 수 있다.

[0054] 도 8은 일 실시예에 있어서, HVDC의 설치에 따른 고장해석을 설명하기 위한 그래프이다.

[0055] HVDC은 전력전자 소자를 통해 교류 기반의 계통에 연결되어 기존의 교류 선로로 구성된 계통과 과도반응이 다를 수 있다. 컴퓨터 시스템은 계통에 HVDC을 설치하고, 설치 방법에 따른 과도반응을 확인할 수 있다.

[0056] 실시예에서 설치된 HVDC의 데이터는 표 3과 같다. HVDC은 전력 손실 감소 측면에서 장점을 보이는 곳으로 위치가 선정될 수 있다. 예를 들면, IEEE 30-bus system의 2번과 6번 모선 사이에 설치하는 것을 가정하였기로 한다.

[0057] 표 3: HVDC의 특성 및 데이터

[0058]

파라미터	특성	
HVDC의 타입, 전압	HVDC LCC, 90MW, 132kV(교류), 180kV(직류)	
점호각	최솟값	최댓값
	5°	180°
인버터 컨트롤	컨트롤 모드	P_{dc}
	파워 셋포인트	90MW
	전압 컨트롤 드룹	0 Ohm
	임계 전류	15%
소호각	최솟값	최댓값
	17°	180°

[0059] 도 8은 일 실시예에 있어서, 고장 제거 지연 시간이 1주기일 때, 초고압 직류 송전 시스템 설치에 따른 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

[0060] 컴퓨터 시스템은 HVDC의 과도안정도를 확인하기 위해 HVDC을 설치하지 않은 경우, 기존의 교류 선로를 없애고 HVDC을 설치한 경우, 기존의 교류 선로를 유지하고 HVDC을 설치한 경우로 나누어 3 가지의 과도반응을 비교할 수 있다. 다시 말해서, 교류 선로를 유지한 채로 HVDC을 설치한 경우 전류는 교류 선로와 HVDC모두를 통해 흐를 수 있다.

[0061] 도 8을 참고하면, 고장 제거 지연 시간이 1주기일 때, 3 가지의 시나리오에 대한 주파수 변동을 나타낸 것이다. HVDC을 설치하지 않은 경우, 주파수 변동이 작지만 HVDC을 설치한 경우, 주파수 변동이 매우 크다. 특히, 기존 교류 선로를 없애지 않고 HVDC을 설치한 경우 주파수의 피크 값은 50.61Hz로 인데 기존 교류 선로를 없애고 HVDC을 설치한 경우 주파수의 피크 값은 51.65 Hz으로 매우 높게 나타난다.

[0062] 도 9는 일 실시예에 있어서, 고장 제거 지연 시간이 2주기일 때, HVDC 설치에 따른 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

[0063] 도 9는 고장 제거 지연 시간이 2주기일 때, HVDC 설치에 따른 주파수 변동을 나타낸 것이다. 도 8과 비교했을 때, 고장 제거 지연 시간이 1주기 증가했을 뿐이지만, 기존의 교류 선로를 없애고 초고압 직류 송전 시스템 설치한 경우, 주파수 피크 값이 매우 크며 고장해석이 수렴하지 않았다. 초고압 직류 송전 시스템을 통한 계산의 복잡도 역시 증가하였다. 이를 통해, 계통에 HVDC을 설치하지 않는 경우 주파수의 과도반응이 가장 안정함을 확인할 수 있다. 또한, HVDC이 설치된 계통에서는 3상 단락 고장이 발생했을 때 시스템의 안정도를 악화될 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, HVDC을 설치할 때 기존의 교류 선로를 유지한 채로 HVDC을 설치하는 경우가, 교류 선로를 없애고 HVDC을 설치하는 경우보다 주파수 변동의 측면에서 안정함을 확인할 수 있다. 따라서, HVDC을 설치한 계통은 과도상태에서 안정도가 낮아짐이 확인될 수 있다.

[0064] 도 10은 일 실시예에 있어서, 보호계전기 세팅 및 전류-시간 특성곡선을 설명하기 위한 그래프이다.

[0065] 분산전원과 HVDC의 주입은 계통의 과도반응에 영향을 미친다. 특히 HVDC이 설치된 계통은 주파수 안정도가 좋지 않을 때도 있다. 설비들이 설치된 계통에서 고장이 발생했을 때 고장의 파급 효과를 최소화하고 고장으로 인한 손실을 최소화하기 위해서 적절한 보호계전기의 세팅이 필요하다.

[0066] 도 10을 참고하면, 보호계전기가 설치된 보호계전기에 대한 전류-시간 특성곡선을 나타낸 것이다. IEEE 30-bus system에서 14번 모선에서 3상 단락 고장이 발생하는 상황을 가정하기로 한다. 14번 모선과 연결된 선로 위주로 간단히 릴레이가 세팅될 수 있다. 또한, 도 10의 연두색 그래프는 고장에 대한 1차 보호에 관한 것이고, 싸

이언색 그래프는 2차 보호를 위한 계전기의 세팅을 나타낸다. 도 10처럼 조류해석을 진행했을 때의 상황으로 보호계전기의 세팅 값보다 작은 전류가 흐르므로 선로의 릴레이가 동작하지 않는다. 14번 모선에서 고장이 발생한 경우 1차 보호를 위해 14번 모선과 12, 15번 모선을 연결하는 선로의 계전기들이 0.05초의 지연 후 개방된다. 따라서 2차 보호를 위한 계전기들은 동작하지 않는다.

[0067] 도 11은 일 실시예에 있어서, 보호계전기 동작에 따른 분산전원 및 HVDC을 가진 계통의 주파수 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

[0068] 표 4는 분산전원과 HVDC 설치를 기준에 의해 총 4 가지 종류로 시스템을 분류한 것이다.

[0069] 표 4: 분산전원과 초고압 직류 송전 시스템 설치에 따른 시스템 분류

[0070]

케이스	상태
1	분산전원과 HVDC가 모두 설치되지 않은 30 버스 시스템
2	분산전원만 설치된 30 버스 시스템
3	HVDC만 설치된 30 버스 시스템
4	분산전원과 HVDC가 모두 설치된 30 버스 시스템

[0071] 도 11은 도 10과 같은 보호 협조를 바탕으로 할 때, 표 4의 네 가지 시스템에 대해 각각의 주파수 특성곡선을 나타낸 것이다.

[0072] 보호계전기가 동작 지연 시간이 0.05초일 때, 분산전원만 설치된 계통(케이스 2)의 경우에 주파수 감소 수준은 분산전원과 HVDC이 모두 설치되지 않은 기본 계통(케이스 1)의 주파수 감소 수준에 비해 작았다.

[0073] HVDC만 설치된 계통(케이스 3)의 경우에 주파수 감소 수준은 분산전원과 HVDC이 모두 설치되지 않은 기본 계통(케이스 1)의 경우와 비교했을 때 더 크다. 즉, HVDC을 설치한 계통은 더 큰 주파수 변동의 특성을 보인다. 또한, HVDC만 설치한 계통(케이스 3)의 경우와 분산전원과 HVDC 모두를 설치한 계통(케이스 4)의 경우를 비교했을 때, 분산전원을 설치한 경우 주파수 감소량이 더 작음을 확인할 수 있다. 최대 주파수에서 최소 주파수를 뺀 값을 주파수 변동이라 정의했을 때, 200초간 DIgSILENT의 RMS/EMT Simulation의 결과 각각의 주파수 변동은 각각 1.44(케이스 1), 0.44(케이스 2), 1.99(케이스 3), 1.06(케이스 4) Hz이다. 다시 말해서, 보호계전기가 동작했을 때 주파수 안정도는 분산전원만 설치된 계통, 분산전원과 초고압 직류 송전 시스템이 모두 설치된 계통, 분산전원과 HVDC이 모두 설치되지 않은 계통, HVDC만 설치된 계통 순으로 좋았다.

[0074] 컴퓨터 시스템은 보호계전기 타임 다이얼(Time dial)을 변경할 수 있다. 도 10에서 1차 보호를 위한 보호계전기의 동작 지연 시간은 0.05초이다. 컴퓨터 시스템은 동작 지연 시간을 0.1초로 지연시켰을 때 분산전원과 초고압 직류 송전 시스템 시스템을 가지는 계통의 민감도를 확인할 수 있다. 이때, 타임 다이얼 이외에 고장 위치, 고장 종류 등 모든 조건이 동일하다. 보호계전기의 개방 시간이 0.05초에서 0.1초로 지연되었을 때 주파수 변동의 값은 각각 1.47(케이스 1), 0.48(케이스 2), 2.08(케이스 3), 1.15(케이스 4) Hz이다. 다시 말해서, 보호계전기의 타임 다이얼이 약간 증가했을 때에도, 주파수 변동의 값이 케이스 2, 케이스 4, 케이스 1, 케이스 3 순으로 작고 안정적이라는 사실은 동일하게 나타난다.

[0075] 보호계전기의 동작 지연 시간이 0.05초인 경우와 0.1초인 경우 각각 주파수 감소량(변동)을 통해서 보호계전기 동작 지연 시간이 0.05초인 경우와 0.1초인 경우 주파수 감소량의 차이를 구하면 0.033(케이스 1), 0.044(케이스 2), 0.087(케이스 3), 0.097(케이스 4) Hz이고, 50Hz 기준으로 각각 0.00066(케이스 1), 0.00088(케이스 2), 0.00174(케이스 3), 0.00194(케이스 4) p.u.이다.

[0076] 4 가지의 경우 중에서, HVDC을 포함하는 2 가지의 경우가 HVDC을 포함하지 않는 두 가지 경우보다 주파수 변동이 약 2~3배 크다는 사실을 알 수 있다. 즉, HVDC를 가진 계통은 HVDC를 가지지 않는 계통보다 보호계전기 동작 지연 시간에 따른 과도반응이 민감하다.

[0077] 도 12는 일 실시예에 있어서, HVDC를 가진 계통에 고장이 발생했을 때 HVDC 모선의 전압과 HVDC를 통해 흐르는 직류 전류를 설명하기 위한 그래프이다.

[0078] HVDC를 가진 계통의 경우 계통의 과도상태 주파수 안정도가 HVDC를 포함하지 않는 계통의 경우보다 좋지 않다.

[0079] 도 12는 계통에 3상 단락 고장이 발생했을 때, HVDC가 연결된 모선의 전압 및 HVDC를 통해 흐르는 직류 전류를 나타낸 것이다. 고장이 발생했을 때, HVDC 모선의 전압은 감소하고, HVDC를 통해 매우 큰 전류가 흐르게 된다. 이러한 변동으로 인해 시스템 전체에 큰 변동을 초래하고 따라서 시스템의 주파수 안정도가 낮아진 것이다.

[0080] 도 13은 일 실시예에 있어서, HVDC 설치 방법에 따른 HVDC를 통해 흐르는 피상전력의 크기 비교를 설명하기 위한 그래프이다.

[0081] 계통에 3상 단락 고장이 발생했을 때, 교류 선로를 없애고 HVDC를 설치하는 방법과 교류 선로를 유지하고 HVDC를 설치하는 방법에 따른 HVDC를 통해 흐르는 피상전력의 크기를 나타낸다. 교류 선로를 없애고 HVDC를 설치한 경우가 교류 선로를 유지하고 HVDC를 설치한 경우보다 고장이 발생했을 때 HVDC를 통해 흐르는 피상전력의 크기가 크다. 다시 말해서, HVDC에 의한 큰 변동이 시스템 전체에 더 큰 변동을 초래한다.

[0082] 도 14는 일 실시예에 있어서, HVDC 설치 방법에 따른 시스템의 주파수 변동 비교를 설명하기 위한 그래프이다.

[0083] HVDC 설치 방법에 따른 시스템의 주파수 변동을 나타낸 것이다. 도 12를 통해 확인 하였듯이, HVDC를 가지는 계통에 고장이 발생하였을 때 HVDC를 통해 큰 직류 전류가 흐르게 된다. 이와 같은 변동은 시스템 전체의 더 큰 변동을 초래하게 됨에 따라 도 14와 같이 시스템의 주파수 변동이 커지게 된다. 특히, 도 13에서, 기존의 교류 선로를 없애고 HVDC를 설치한 경우에 HVDC를 통한 피상전력의 전송이 더 컸다. 도 14에서 HVDC를 통한 전력 전송의 크기 변동이 더 크게 나타났던 교류 선로를 없애고 HVDC를 설치하는 경우의 주파수 변동이 교류 선로를 유지하고 HVDC를 설치하는 경우보다 더 크게 나타난다.

[0084] 이와 같이, 탄소 중립과 함께 재생에너지 기반의 분산전원이 계통에 침투하고 있으며, 앞으로 더 많은 분산전원이 계통에 침투될 것을 예상된다. 인버터 기반으로 계통과 연계되는 분산전원은 출력특성이 동기 시스템과 다르므로 계통의 과도안정도에 영향을 미치고 있다.

[0085] 또한, 직류 기반의 분산전원이 계통에 주입됨에 따라 HVDC가 함께 발전하고 있으며, 교류 기반의 계통에 HVDC가 설치되는 것 역시 전력전자 소자를 통한 연결이기 때문에 전력계통의 과도반응이 달라질 수 있다.

[0086] 분산전원 및 HVDC의 주입에 따른 다양한 사례 연구를 통해 분산전원과 HVDC가 계통의 과도안정도에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 또한, 적절한 보호 설비의 세팅 및 고장으로 인한 파급 최소화를 위해 분산전원과 HVDC의 주입에 따른 시스템의 민감도를 확인할 수 있다.

[0087] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(field programmable gate array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0088] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치에 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0089] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도

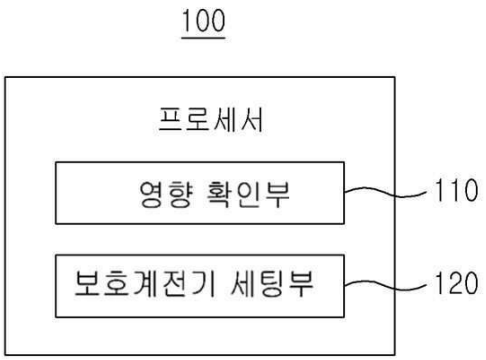
록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0090] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

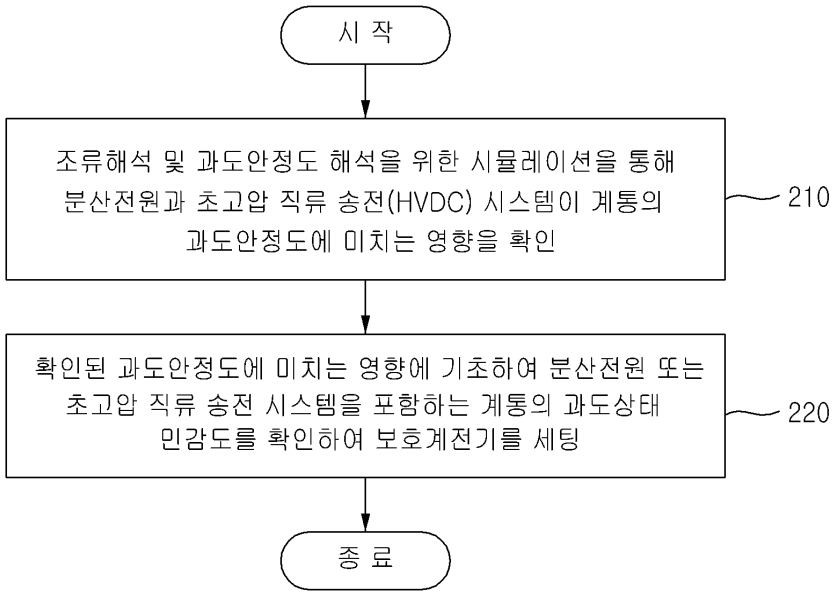
[0091] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

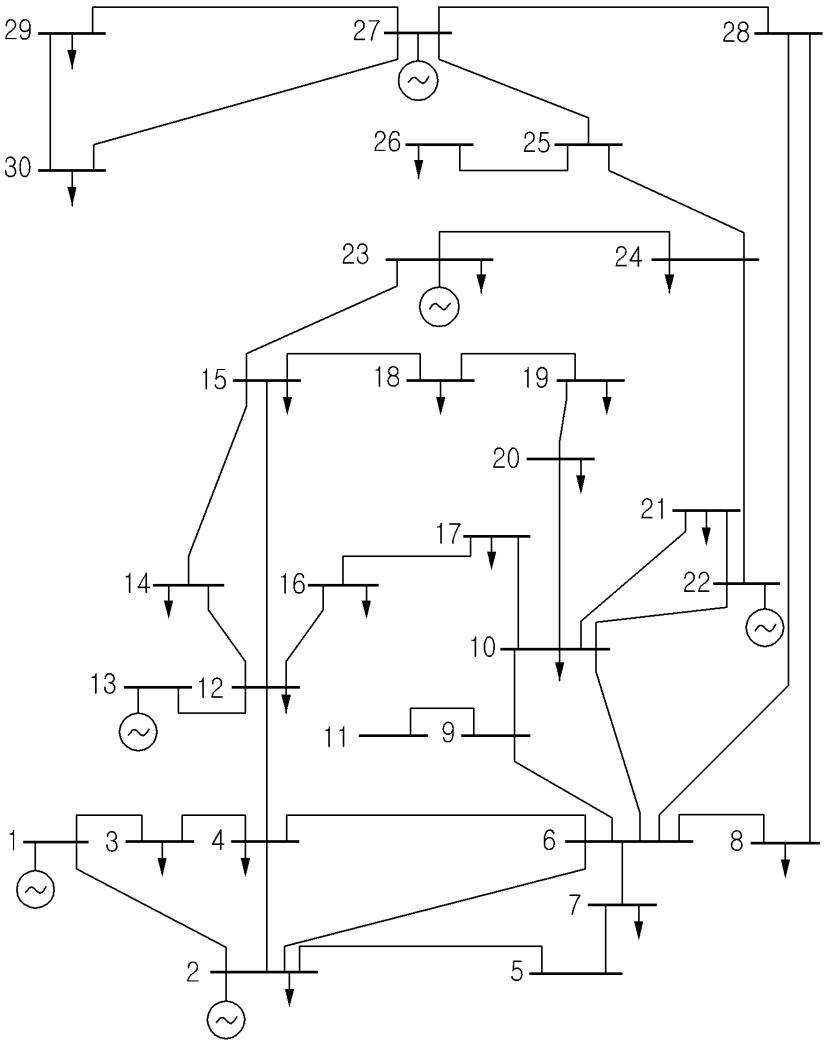
도면1



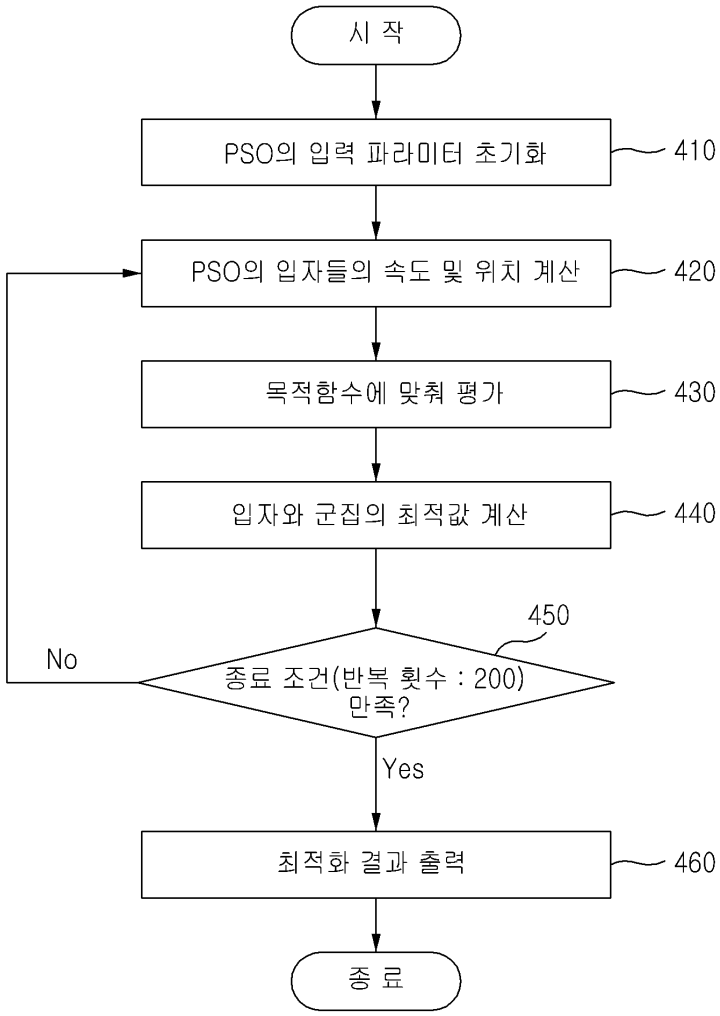
도면2



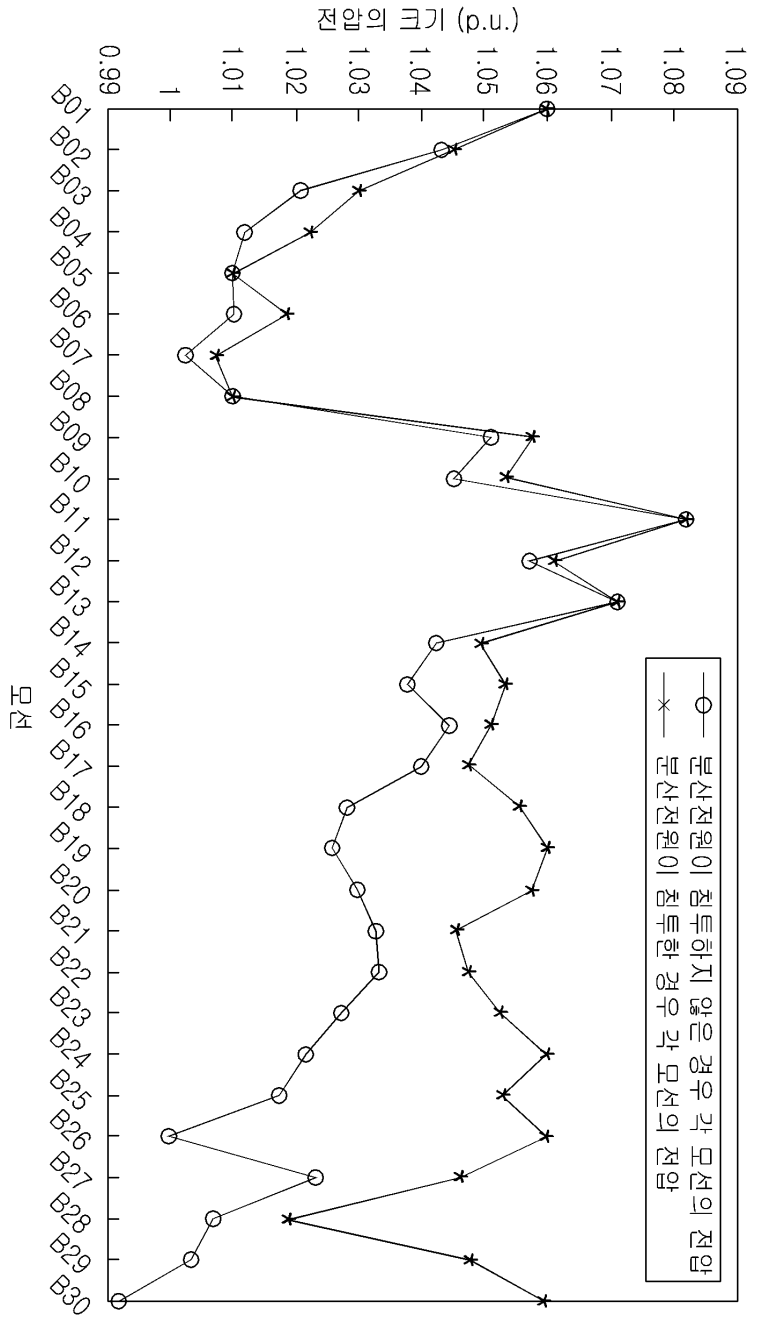
도면3


29
27
28
30
26
25
23
24
15
18
19
20
21
17
14
16
22
10
13
12
11
9
1
3
4
6
8
7
2
5

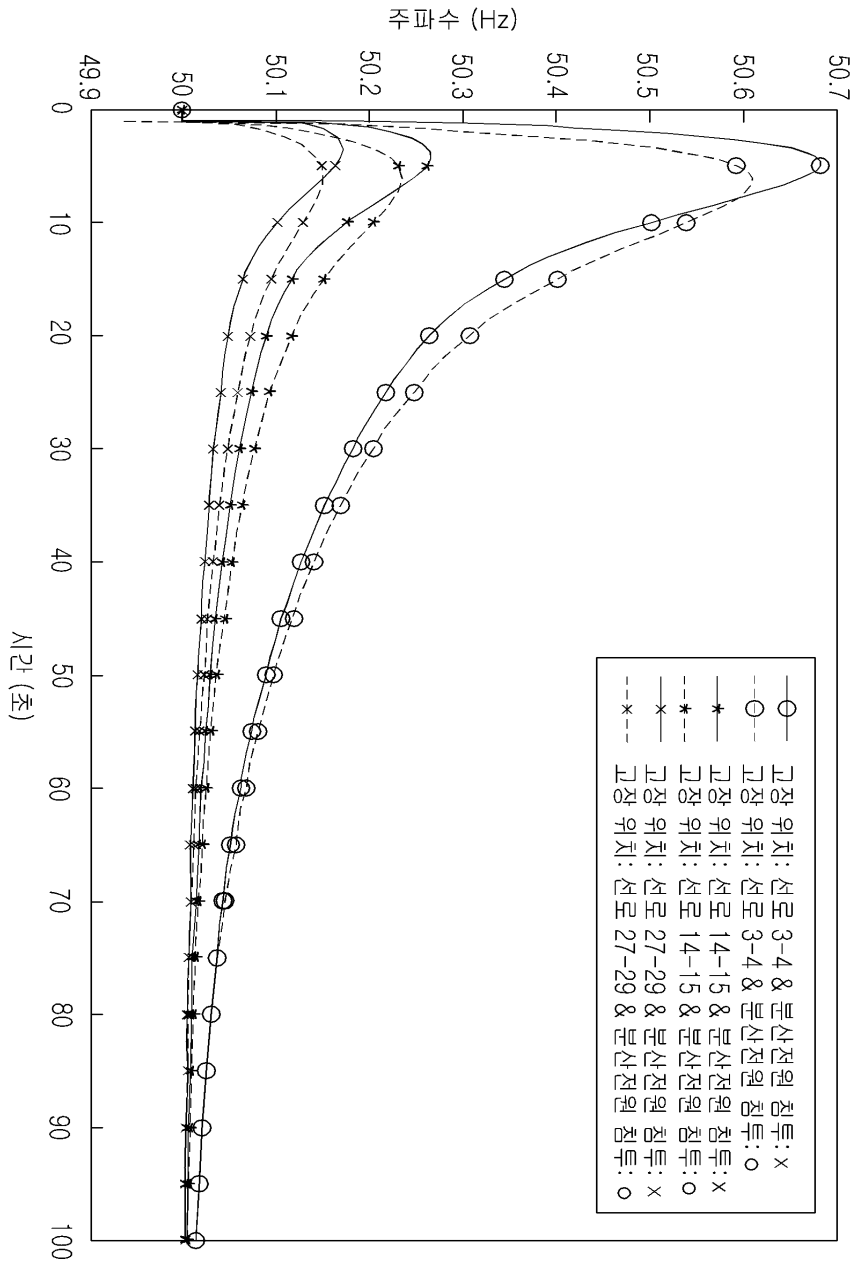
도면4


시 작
PSO의 입력 파라미터 초기화
410
PSO의 입자들의 속도 및 위치 계산
420
목적함수에 맞춰 평가
430
입자와 군집의 최적값 계산
440
450
종료 조건(반복 횟수 : 200)
만족?
No
Yes
최적화 결과 출력
460
종 료

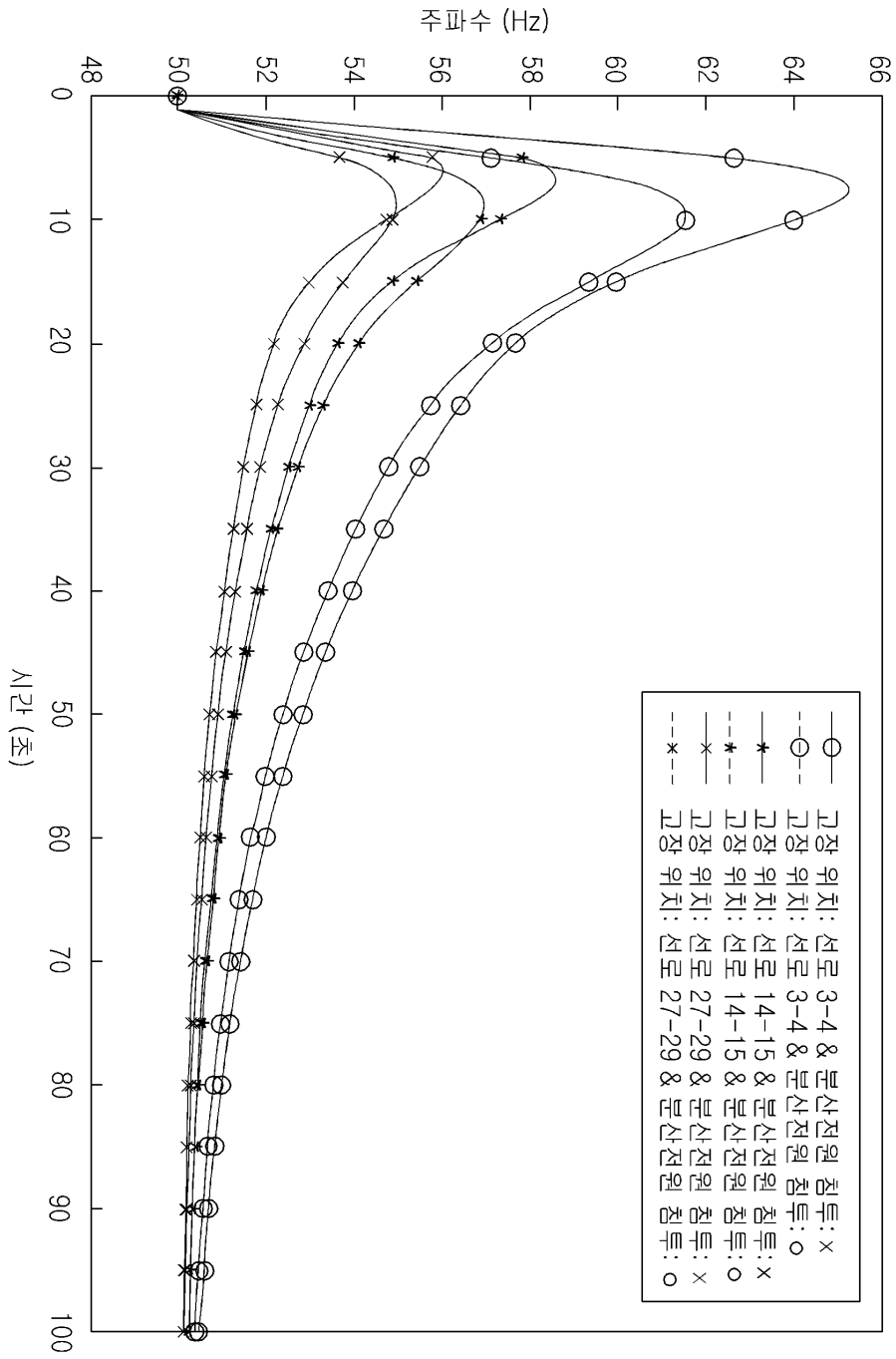
도면5


전압의 크기 (p.u.)
0.99
1
1.01
1.02
1.03
1.04
1.05
1.06
1.07
1.08
1.09
모선
B01
B02
B03
B04
B05
B06
B07
B08
B09
B10
B11
B12
B13
B14
B15
B16
B17
B18
B19
B20
B21
B22
B23
B24
B25
B26
B27
B28
B29
B30
부산전원이 참투하지 않은 경우 각 모선의 전압
부산전원이 참투한 경우 각 모선의 전압

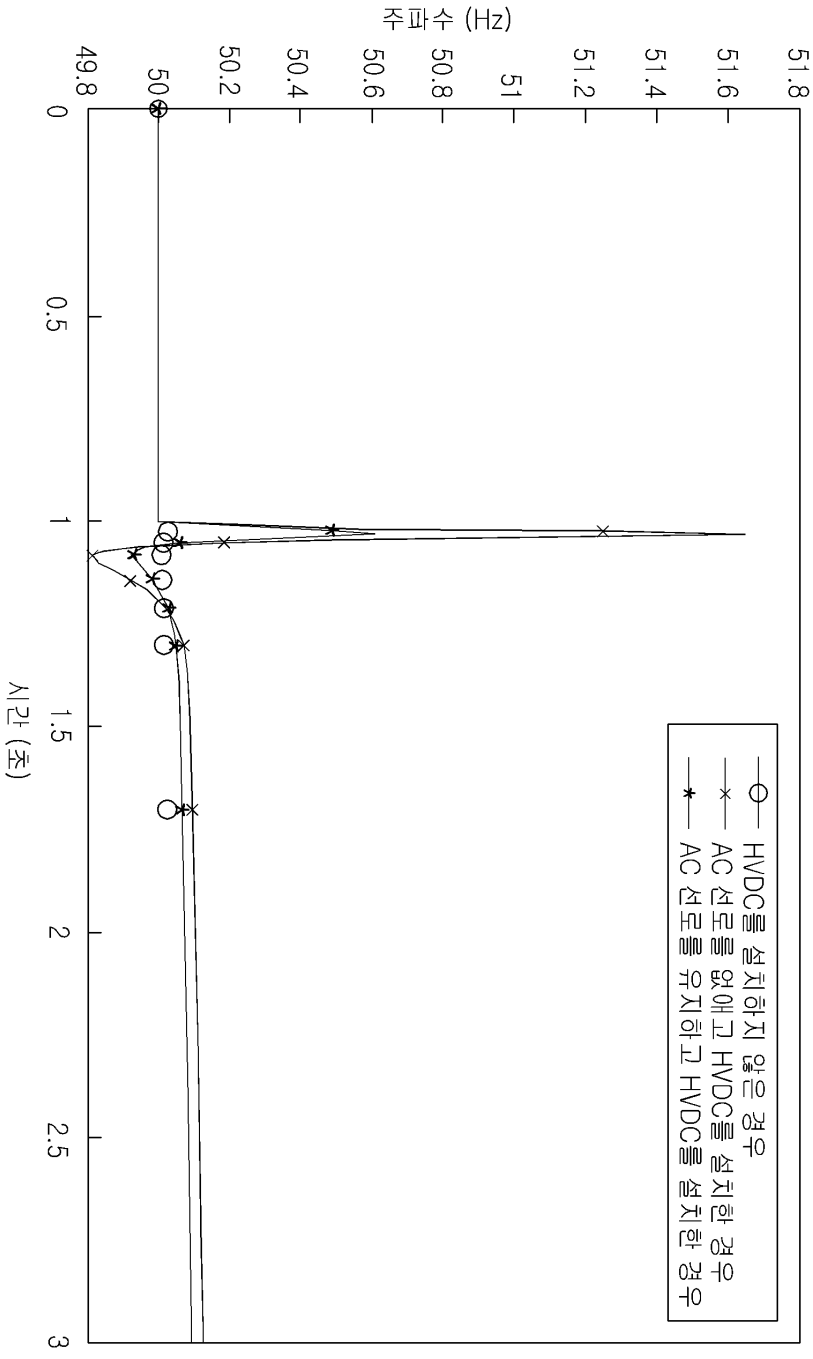
도면6


주파수 (Hz)
50.7
50.6
50.5
50.4
50.3
50.2
50.1
50
49.9
시간 (초)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
고장 위치: 선로 3-4 & 분산전원 침투: x
고장 위치: 선로 3-4 & 분산전원 침투: o
고장 위치: 선로 14-15 & 분산전원 침투: x
고장 위치: 선로 14-15 & 분산전원 침투: o
고장 위치: 선로 27-29 & 분산전원 침투: x
고장 위치: 선로 27-29 & 분산전원 침투: o

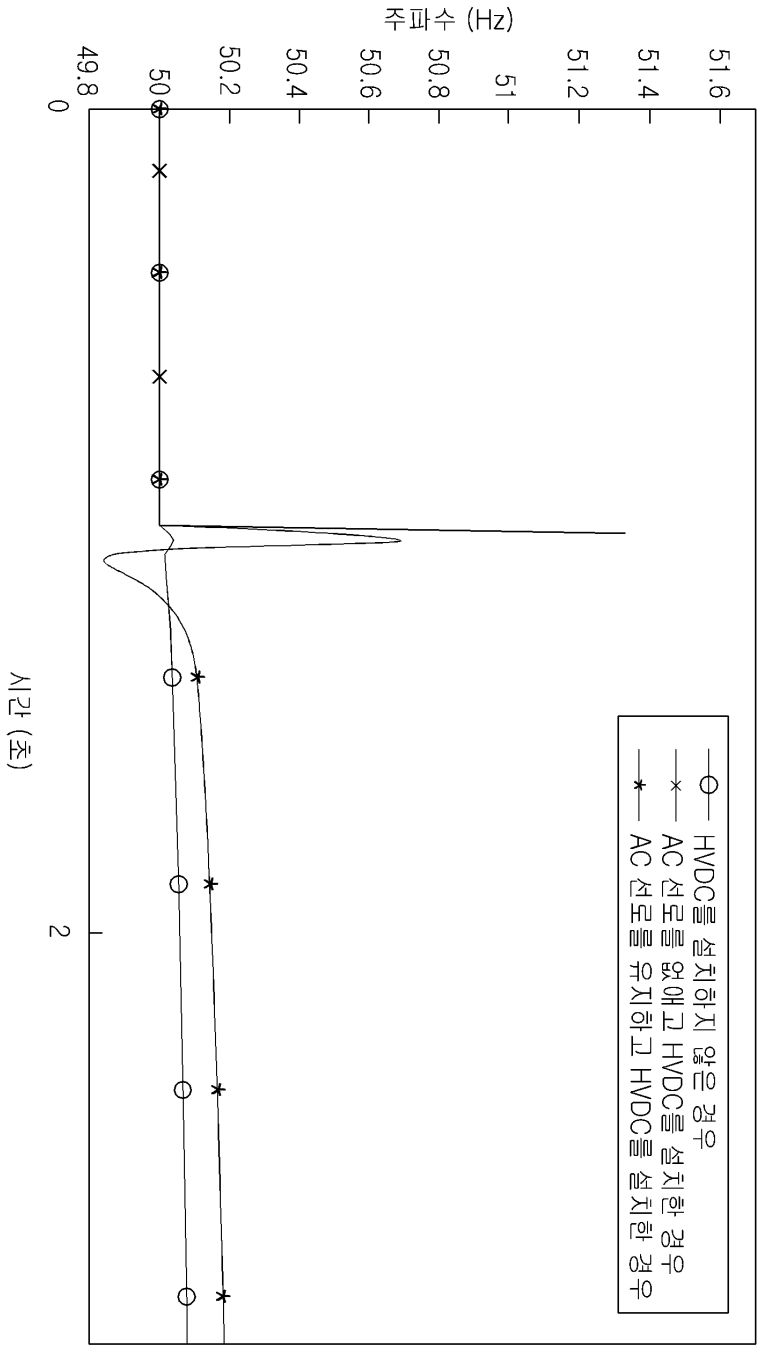
도면7


주파수 (Hz)
시간 (초)
48
50
52
54
56
58
60
62
64
66
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
고장 위치: 선로 3-4 & 분산전원 침투: X
고장 위치: 선로 3-4 & 분산전원 침투: O
고장 위치: 선로 14-15 & 분산전원 침투: X
고장 위치: 선로 14-15 & 분산전원 침투: O
고장 위치: 선로 27-29 & 분산전원 침투: X
고장 위치: 선로 27-29 & 분산전원 침투: O

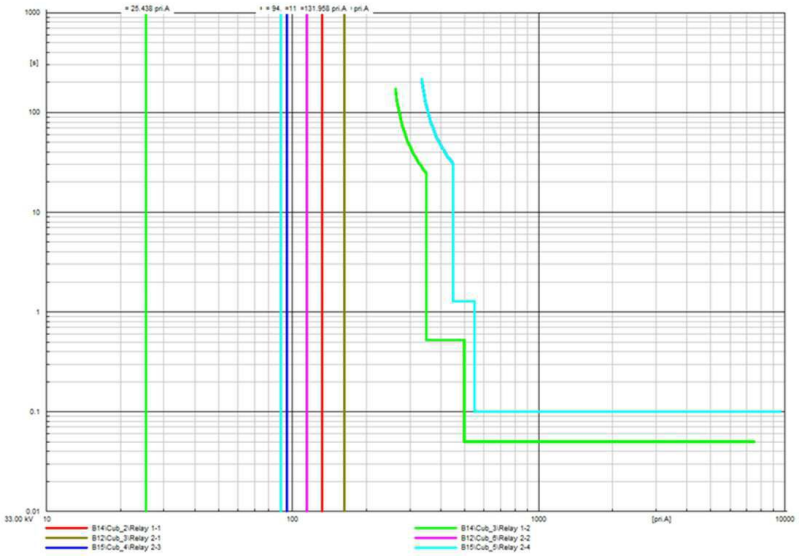
도면8


주파수 (Hz)
51.8
51.6
51.4
51.2
51
50.8
50.6
50.4
50.2
50
49.8
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
시간 (초)
HVDC를 설치하지 않은 경우
AC 선로를 없애고 HVDC를 설치한 경우
AC 선로를 유지하고 HVDC를 설치한 경우

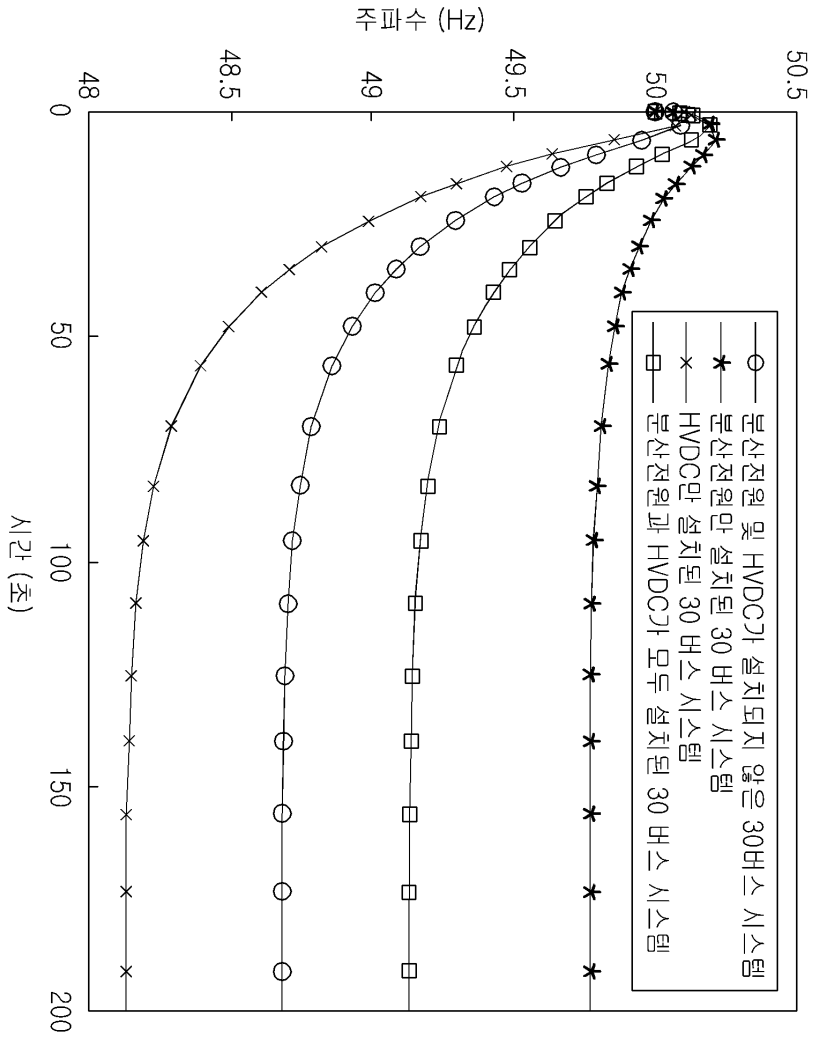
도면9


주파수 (Hz)
51.6
51.4
51.2
51
50.8
50.6
50.4
50.2
50
49.8
0
2
시간 (초)
HVDC를 설치하지 않은 경우
AC 선로를 없애고 HVDC를 설치한 경우
AC 선로를 유지하고 HVDC를 설치한 경우

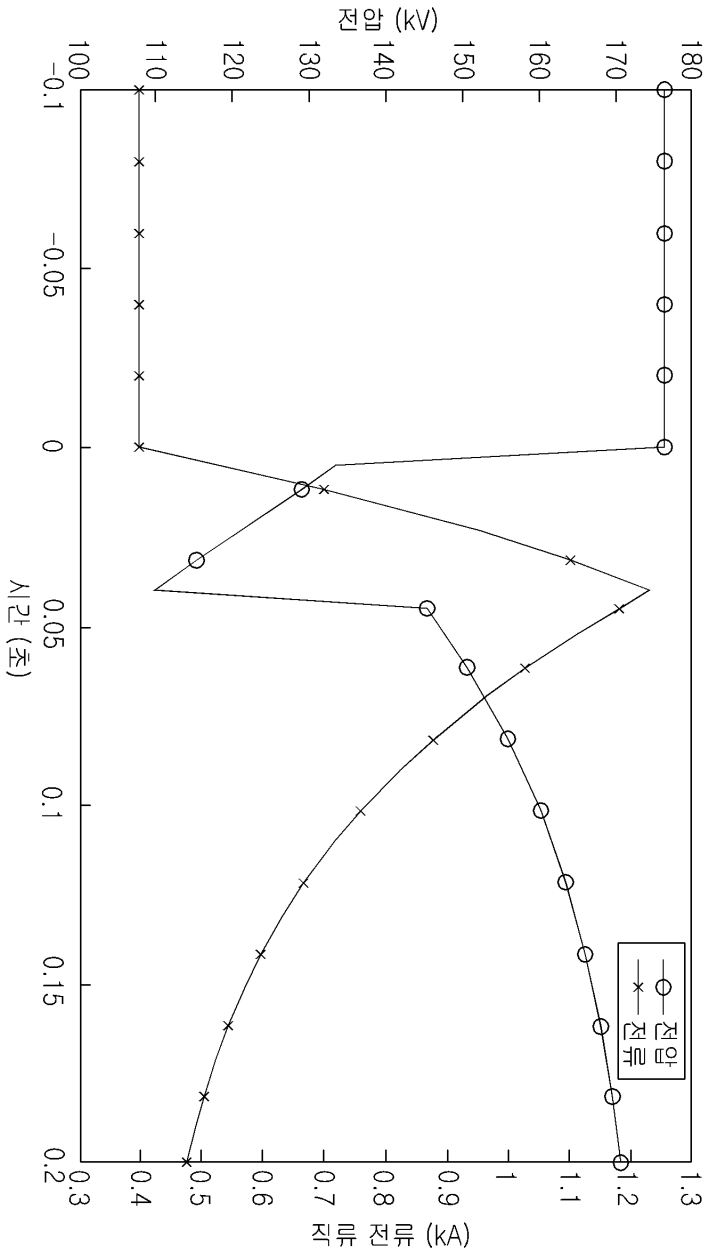
도면10



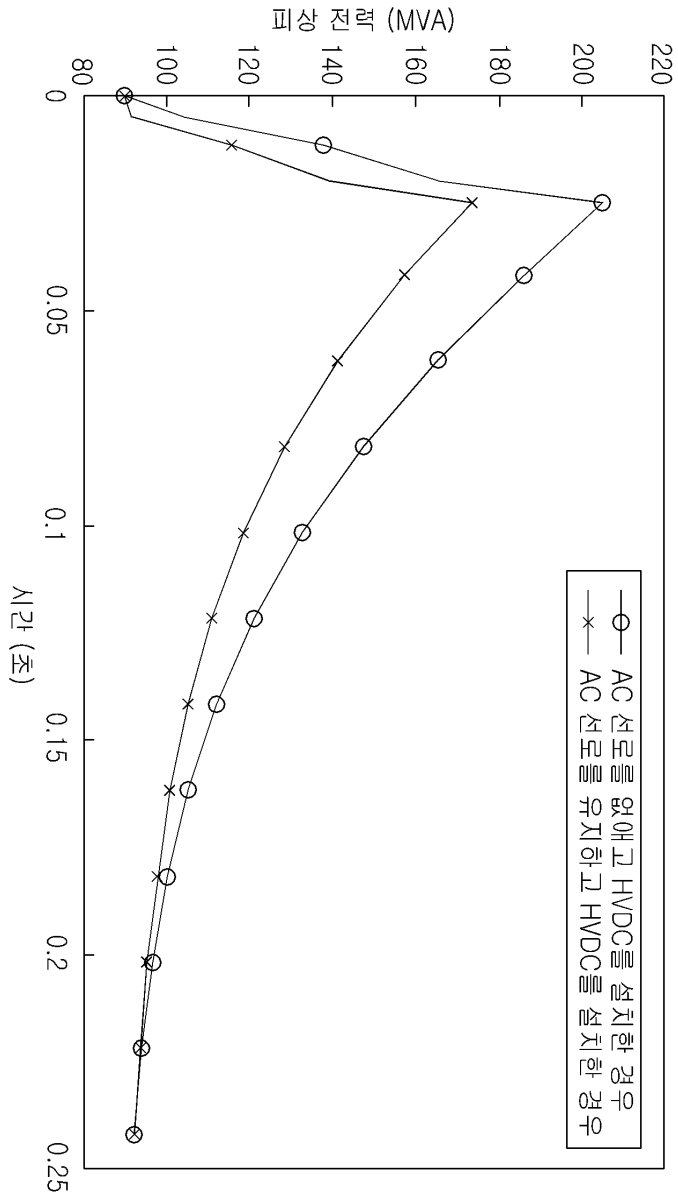
도면11


주파수 (Hz)
48
48.5
49
49.5
50
50.5
0
50
100
150
200
시간 (초)
분산전원 및 HVDC가 설치되지 않은 30버스 시스템
분산전원만 설치된 30 버스 시스템
HVDC만 설치된 30 버스 시스템
분산전원과 HVDC가 모두 설치된 30 버스 시스템

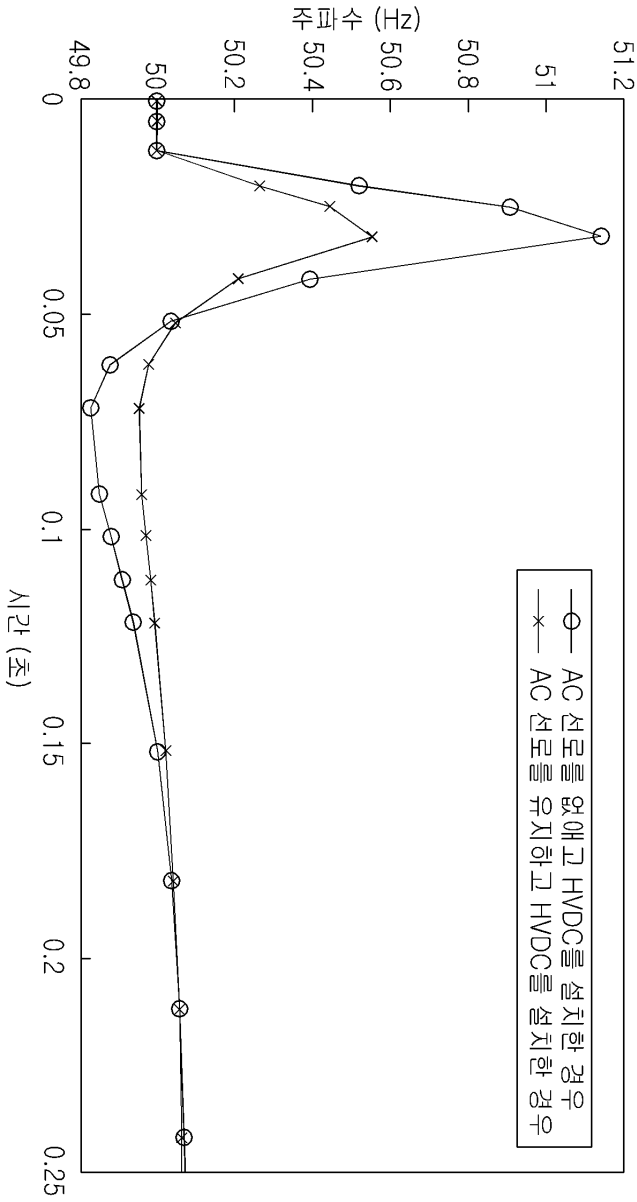
도면12


전압 (kV)
100
110
120
130
140
150
160
170
180
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
0.15
0.2
시간 (초)
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
직류 전류 (kA)
전압
전류

도면13


피상 전력 (MVA)
80
100
120
140
160
180
200
220
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
시간 (초)
AC 선로를 없애고 HVDC를 설치한 경우
AC 선로를 유지하고 HVDC를 설치한 경우

도면14


주파수 (Hz)
51.2
51
50.8
50.6
50.4
50.2
50
49.8
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
시간 (초)
AC 선로를 없애고 HVDC를 설치한 경우
AC 선로를 유지하고 HVDC를 설치한 경우