



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0123786  
(43) 공개일자 2024년08월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H02J 3/24 (2006.01) H02J 3/38 (2022.01)  
(52) CPC특허분류  
H02J 3/241 (2023.08)  
H02J 3/381 (2023.08)  
(21) 출원번호 10-2024-0103408(분할)  
(22) 출원일자 2024년08월02일  
심사청구일자 2024년08월02일  
(62) 원출원 특허 10-2019-0153283  
원출원일자 2019년11월26일  
심사청구일자 2022년02월18일

(71) 출원인  
한국전력공사  
전라남도 나주시 전력로 55(빛가람동)  
연세대학교 산학협력단  
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)  
(72) 발명자  
박정욱  
서울특별시 강남구 압구정로29길 71, 20동 701호  
김용학  
대전광역시 유성구 엑스포로 448, 엑스포아파트 305동 1103호  
(뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
특허법인아주

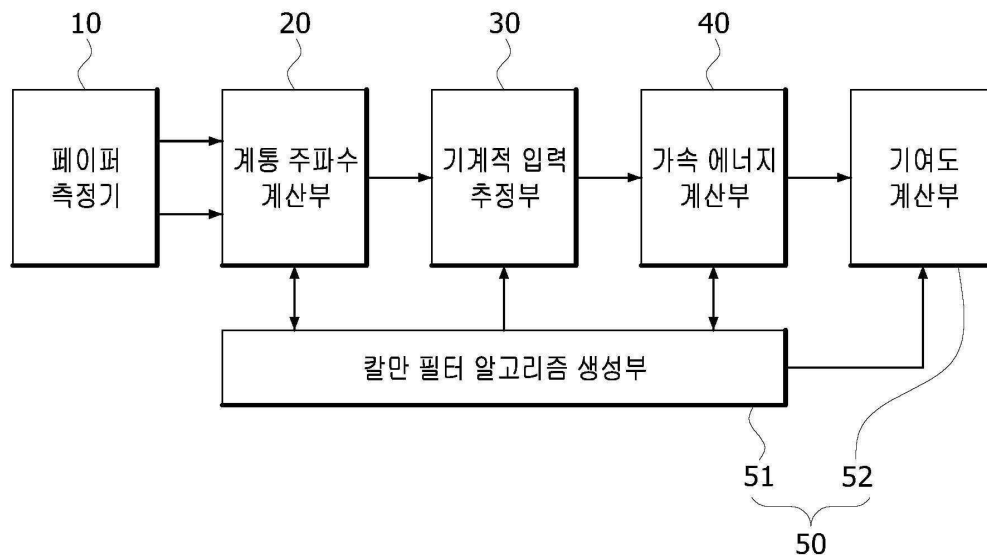
전체 청구항 수 : 총 1 항

(54) 발명의 명칭 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치

(57) 요약

본 발명의 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치각 발전기의 모선 주파수와 전기적 출력을 취득하는 페이지 측정기; 모선 주파수로부터 계통 주파수를 계산하는 계통 주파수 계산부; 계통 주파수와 전기적 출력으로부터 지역별 기계적 입력을 추정하는 기계적 입력 추정부; 기계적 입력과 전기적 출력의 편차로부터 지역별 가속력 및 지역별 가속에너지를 계산하는 가속에너지 계산부; 및 계통 주파수의 변화량과 지역별 가속에너지를 토대로 주파수 추종에 대한 기여도를 검출하는 기여도 검출부를 포함하고, 계통 주파수 계산부는 모선 주파수와 발전기의 용량으로부터 계통 주파수를 계산하며, 기여도 검출부는 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 주파수 추종에 대한 기여도를 검출하는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H02J 2203/20 (2023.08)

Y04S 40/20 (2020.08)

(72) 발명자

**김태완**

서울특별시 서대문구 연희로10길 19, 202호

**남수철**

서울 도봉구 쌍문4동 시루봉로6길 53, 현대2차 20  
2동 505호

---

**임성훈**

서울특별시 동작구 성대로1길 9, 115동 904호 (상  
도동)

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

각 발전기의 모선 주파수와 전기적 출력을 취득하는 페이지 측정기;

상기 모선 주파수로부터 계통 주파수를 계산하는 계통 주파수 계산부;

상기 계통 주파수와 전기적 출력으로부터 지역별 기계적 입력을 추정하는 기계적 입력 추정부;

상기 기계적 입력과 상기 전기적 출력의 편차로부터 지역별 가속력 및 지역별 가속에너지를 계산하는 가속에너지 계산부; 및

상기 계통 주파수의 변화량과 상기 지역별 가속에너지를 토대로 주파수 추종에 대한 기여도를 검출하는 기여도 검출부를 포함하고,

상기 계통 주파수 계산부는 상기 모선 주파수와 상기 발전기의 용량으로부터 상기 계통 주파수를 계산하며,

상기 기여도 검출부는 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 상기 주파수 추종에 대한 기여도를 검출하는 것을 특징으로 하는 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 여러 대의 발전기가 운전중인 전력계통에 대하여 페이지 측정기를 통해 취득한 모선 주파수 및 발전기의 전기적 출력 데이터로부터 지역별 주파수 추종 기여도를 산정하는 지역별 주파수추종 기여도 산정 장치에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0002] 전력시장운영규칙에 따르면 계통의 주파수를 유지범위 이내로 유지하기 위해 1,500MW 이상의 주파수조정예비력을 확보하여야 한다.

[0003] 주파수조정예비력은 주파수 유지 예비력과 주파수 복구 예비력으로 구분된다. 주파수 유지 예비력은 1차 주파수 응답에 투입되는 예비력으로 발전기의 주파수추종운전(Governor Free, 주파수추종) 응답에 의한다.

[0004] 예비력을 확보하기 위해 대부분의 발전기에 대하여 기준출력 상한치를 입찰공급가능용량의 95%로 설정하는 발전 제약사항을 적용하여 운영발전계획을 수립한다.

[0005] 석탄화력 이외의 발전기로 예비력이 우선 확보될 수 있도록 석탄화력 발전기는 기준출력 상한치를 95%~100%로 설정할 수 있도록 하고, 원자력 발전기는 입찰공급가능용량의 100%에서 출력을 고정하는 조항이 있다. 그러나, 현재에는 우선적으로 예비력을 보유해야 하는 발전기를 선정하는 기준에 대한 조항은 없다.

[0006] 본 발명의 배경기술은 대한민국 공개특허공보 10-2014-0091951호(2014.07.23)의 '예비력 운영 가변 제어 장치'에 개시되어 있다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 전술한 문제점을 개선하기 위해 창안된 것으로서, 본 발명의 일 측면에 따른 목적은 여러 대의 발전기가 운전중인 전력계통에 대하여 페이지 측정기를 통해 취득한 모선 주파수 및 발전기의 전기적 출력 데이터로부터 지역별 주파수 추종 기여도를 산정하는 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치를 제공하는 데 있다.

## 과제의 해결 수단

- [0009] 본 발명의 일 측면에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치는 각 발전기의 모선 주파수와 전기적 출력을 취득하는 페이지 측정기; 상기 모선 주파수로부터 계통 주파수를 계산하는 계통 주파수 계산부; 상기 계통 주파수와 전기적 출력으로부터 지역별 기계적 입력을 추정하는 기계적 입력 추정부; 상기 기계적 입력과 상기 전기적 출력의 편차로부터 지역별 가속력 및 지역별 가속에너지를 계산하는 가속에너지 계산부; 및 상기 계통 주파수의 변화량과 상기 지역별 가속에너지를 토대로 주파수 추종에 대한 기여도를 검출하는 기여도 검출부를 포함하고, 상기 계통 주파수 계산부는 상기 모선 주파수와 상기 발전기의 용량으로부터 상기 계통 주파수를 계산하며, 상기 기여도 검출부는 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 상기 주파수 추종에 대한 기여도를 검출하는 것을 특징으로 한다.

## 발명의 효과

- [0011] 본 발명의 일 측면에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치는 전력계통의 발전 동적 특성을 측정할 수 있는 페이지 측정기의 효율성을 제고하고, 이를 반영하여 발전기의 주파수추종 운전에 대한 지역별 기여도를 평가하도록 한다.
- [0012] 본 발명의 다른 측면에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치는 지역별 주파수추종 기여도를 기반으로 발전원 구성을 계획하여 사고 발생시 주파수 안정도를 향상시키도록 한다.
- [0013] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치는 지역별 주파수추종 기여도를 기반으로 주파수조정예비력을 계획하여 예비력 확보량 절감 및 예비력 구입비 절감이 가능하도록 한다.

## 도면의 간단한 설명

- [0014] 도 1 은 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치의 블록 구성도이다.
- 도 2 는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 방법의 순서도이다.
- 도 3 은 본 발명의 일 실시예에 따른 칼만 필터 알고리즘 개요도이다.
- 도 4 는 본 발명의 일 실시예에 따른 칼만 필터 알고리즘 순서도이다.
- 도 5 는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 데이터의 동요 방정식 충족 예를 나타낸 도면이다.
- 도 6 은 본 발명의 일 실시예에 따른 측정 벡터의 시간에 따른 데이터를 정규화한 예를 나타낸 도면이다.
- 도 7 은 본 발명의 일 실시예에 따른 출력 행렬의 시간에 따른 데이터를 나타낸 도면이다.
- 도 8 은 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 주파수추종 기여도 산정 결과를 나타낸 도면이다.
- 도 9 는 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 응답량 증가시 계통 주파수를 나타낸 도면이다.
- 도 10 은 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 응답량 증가시 계통 주파수(확대)를 나타낸 도면이다.
- 도 11 은 케이스별 사고 발생시 계통 주파수 변화를 나타낸 도면이다.

## 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0015] 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치를 첨부된 도면들을 참조하여 상세하게 설명한다. 이러한 과정에서 도면에 도시된 선들의 두께나 구성요소의 크기 등은 설명의 명료성과 편의상 과장되게 도시되어 있을 수 있다. 또한 후술되는 용어들은 본 발명에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서, 이는 이용자, 운용자의 의도 또는 관례에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 이러한 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0016] 본 명세서에서 설명된 구현은, 예컨대, 방법 또는 프로세스, 장치, 소프트웨어 프로그램, 데이터 스트림 또는 신호로 구현될 수 있다. 단일 형태의 구현의 맥락에서만 논의(예컨대, 방법으로서만 논의)되었더라도, 논의된 특징의 구현은 또한 다른 형태(예컨대, 장치 또는 프로그램)로도 구현될 수 있다. 장치는 적절한 하드웨어, 소프트웨어 및 펌웨어 등으로 구현될 수 있다. 방법은, 예컨대, 컴퓨터, 마이크로프로세서, 집적 회로 또는 프로

그래밍가능한 로직 디바이스 등을 포함하는 프로세싱 디바이스를 일반적으로 지칭하는 프로세서 등과 같은 장치에서 구현될 수 있다. 프로세서는 또한 최종-사용자 사이에 정보의 통신을 용이하게 하는 컴퓨터, 셀 폰, 휴대용/개인용 정보 단말기(personal digital assistant: "PDA") 및 다른 디바이스 등과 같은 통신 디바이스를 포함한다.

[0017] 도 1 은 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치의 블록 구성도이다.

[0018] 도 1 을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 장치는 페이지 측정기(10), 계통 주파수 계산부(20), 기계적 입력 추정부(30), 가속에너지 계산부(40), 및 기여도 검출부(50)를 포함한다.

[0019] 페이지 측정기(10)는 각 발전기의 모선 주파수와 전기적 출력 데이터를 취득한다.

[0020] 계통 주파수 계산부(20)는 페이지 측정기(10)에서 취득된 각 발전기의 주파수로부터 계통 전체를 대표할 수 있는 계통 주파수를 계산한다.

[0021] 기계적 입력 추정부(30)는 계통 주파수 계산부(20)에 의해 계산된 계통 주파수와 전기적 출력 데이터로부터 지역별 기계적 입력을 추정한다.

[0022] 가속에너지 계산부(40)는 기계적 입력 추정부(30)에 의해 추정된 기계적 입력과 전기적 출력의 편차로부터 지역별 가속력 및 지역별 가속에너지를 계산한다.

[0023] 기여도 검출부(50)는 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 상기 주파수 추종에 대한 기여도를 검출한다. 기여도 검출부(50)는 칼만 필터 알고리즘 생성부(51) 및 기여도 계산부(52)를 포함한다.

[0024] 칼만 필터 알고리즘 생성부(51)는 동요방정식을 기반으로 계통 주파수 변화량과 지역별 가속에너지 데이터를 이용하여 칼만 필터 알고리즘을 생성한다.

[0025] 기여도 계산부(52)는 칼만 필터 알고리즘 생성부(51)에 의해 생성된 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 주파수 추종에 대한 기여도를 계산한다.

[0026] 이하 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 방법을 도 2 내지 4 를 참조하여 상세하게 설명한다.

[0027] 도 2 는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수추종에 대한 기여도 계산 방법의 순서도이고, 도 3 은 본 발명의 일 실시예에 따른 칼만 필터 알고리즘 개요도이며, 도 4 는 본 발명의 일 실시예에 따른 칼만 필터 알고리즘 순서도이다.

[0028] 먼저, 페이지 측정기(10)는 각 발전기의 모선 주파수와 전기적 출력 데이터를 취득한다(S10).

[0029] 이어 계통 주파수 계산부(20)는 페이지 측정기(10)에서 취득된 각 발전기의 주파수로부터 계통 전체를 대표할 수 있는 계통 주파수를 계산한다(S20).

[0030] 기계적 입력 추정부(30)는 계통 주파수 계산부(20)에 의해 계산된 계통 주파수와 전기적 출력 데이터로부터 지역별 기계적 입력을 추정한다(S30). 발전기의 기계적 입력은 페이지 측정기(10)에서 측정할 수 없으므로, 기계적 입력은 페이지 측정기(10)에서 취득한 주파수와 전기적 출력 데이터로부터 추정될 수 있다.

[0031] 가속 에너지 계산부는 기계적 입력 추정부(30)에 의해 추정된 기계적 입력과 전기적 출력의 편차로부터 지역별 가속력 및 지역별 가속에너지를 계산한다(S40).

[0032] 동기발전기의 과도안정도는 동요방정식(Swing equation)을 통해 해석할 수 있다. 회전자의 위상각과 각속도를 각각  $\theta_m$  [rad],  $\omega_m$  [rad/sec], 기계적 입력과 전기적 출력을 각각  $P_m$ ,  $P_e$ , 정규화된 관성정수를  $H$  [MJ/MVA]라 하면, 동요방정식은 수학식 1과 같다.

### 수학식 1

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{2H}{f_s} \frac{df}{dt} = P_m - P_e$$

[0033]

[0034] 회전자의 기준 각속도와 계통의 기준 주파수를 각각  $\omega_s$ ,  $f_s$ 라고 하면, 둘 사이의 관계는 수학식 2와 같다.

### 수학식 2

$$[0035] \quad \omega_s = 2\pi f_s$$

[0036] 동요방정식에서 외란에 의해 전기적 출력  $P_e$ 가 변화하면 기계적 입력  $P_m$ 과  $P_e$ 의 편차에 따라 발전기 회전자의 회전이 가속 또는 감속한다. 따라서 기계적 입력  $P_m$ 과 전기적 출력  $P_e$ 의 편차를 가속력(또는 감속력)  $P_a$ 로 정의하면, 가속력(또는 감속력)  $P_a$ 는 수학식 3과 같이 표현된다.

### 수학식 3

$$[0037] \quad P_a = P_m - P_e$$

[0038] 가속력을 시간에 대하여 적분하면 발전기에 대한 가속(감속)에너지에 대한 식이 된다. 가속(감속)에너지를  $E_a$ 라고 하면, 시간  $t_0$ 초부터  $t_1$ 초까지 누적되는 가속(감속)에너지는 수학식 4와 같다.

### 수학식 4

$$[0039] \quad E_a = \int_{t_0}^{t_1} P_a dt$$

[0040] 이어, 칼만 필터 알고리즘 생성부(51)는 동요방정식을 기반으로 계통 주파수 변화량과 지역별 가속에너지 데이터를 이용하여 칼만 필터 알고리즘을 생성한다(S50).

[0041] 수학식 1의 동요방정식의 양변을 적분하면, 주파수 변화량과 가속에너지 사이의 관계가 나타나며, 0초부터  $t$ 초까지의 주파수 변화량과 발전기의 가속에너지는 수학식 5와 같이 표현할 수 있다.

### 수학식 5

$$[0042] \quad \frac{2H}{f_s} \Delta f = E_a = \int_0^t P_a d\tau$$

[0043] 전력 계통을 총 N개의 지역으로 나누었을 때, 수학식 5를 기반으로 계통 주파수 변화량과 지역별 가속에너지 사이에서 지역별 주파수추종 기여도를 산정한다.

[0044] 발전기의 기계적 입력은 페이지 측정기(10)에서 측정할 수 없으므로 페이지 측정기(10)에서 취득한 주파수와 전력 출력 데이터로부터 기계적 입력을 추정하고, 이를 이용하여 가속에너지를 계산하여야 한다.

[0045] 추정 기계적 입력과 이를 이용하여 계산한 추정 가속에너지를 각각  $\hat{P}_m$ ,  $\hat{E}_a$ 라고 한다. 계통 주파수 변화량을  $\Delta f_{sys}$ 라고 하고, 지역별 추정 가속에너지를  $\hat{E}_{a,i}$ , 지역별 주파수추종 기여도를  $w_i$ 로 정의한다. 여기서  $i$ 는 N개의 지역 중  $i$ 번째 지역의 데이터를 의미한다.

[0046] 칼만 필터 알고리즘은 주파수 변화량과 지역별 가속에너지 사이에서 지역별 주파수추종 기여도  $w_i$ 를 산출하는

것을 목표로 하며, 이를 표현하면 수학식 6과 같다. 도 3은 칼만 필터 알고리즘의 개요도이다.

### 수학식 6

$$\Delta f_{sys} = \sum_i \omega_i \hat{E}_{\alpha,i} = \omega_1 \hat{E}_{\alpha,1} + \omega_2 \hat{E}_{\alpha,2} + \dots + \omega_N \hat{E}_{\alpha,N}$$

[0047]

[0048] 수학식 6은 주파수 변화량과 가속에너지 사이의 관계식이다. 이러한 수학식 6을 기반으로 칼만 필터 알고리즘의 시스템 모델을 구성할 수 있다.

[0049] 칼만 필터 알고리즘은 상태변수와 측정데이터로 구성된 상태 공간 시스템 모델을 기반으로 하여 시간에 따른 측정데이터로부터 상태변수를 추정한다.

[0050] 상태 공간 시스템 모델은 상태 방정식과 측정 방정식으로 이루어지고 측정 잡음, 시스템 잡음을 포함하는 형태로 구성된다.

[0051] 상태 공간 시스템 모델이 N개의 상태변수와 m개의 측정데이터로 구성되는 경우 특정 시간 k에서의 상태 공간 시스템 모델 표현식은 수학식 7 내지 10과 같다.

### 수학식 7

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k$$

[0052]

### 수학식 8

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k$$

[0053]

### 수학식 9

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{y}_k + \mathbf{v}_k$$

[0054]

### 수학식 10

$$\mathbf{w} \sim N(0, \mathbf{Q}), \mathbf{v} \sim N(0, \mathbf{R})$$

[0055]

[0056] 이때, 상태 공간 시스템 모델 구성요소는 표 1과 같다.

표 1

[0057]

표기	크기	이름
$\mathbf{x}_k$	$N \times 1$	상태변수 벡터
$\mathbf{y}_k$	$m \times 1$	출력 벡터
$\mathbf{z}_k$	$m \times 1$	측정 벡터
$\mathbf{A}$	$N \times N$	상태 행렬
$\mathbf{H}_k$	$m \times N$	출력 행렬
$\mathbf{w}_k$	$N \times 1$	시스템 잡음
$\mathbf{Q}$	$N \times N$	시스템 잡음 공분산

$\mathbf{v}_i$	$m \times 1$	측정 잡음
$\mathbf{h}$	$m \times m$	측정 잡음 공분산

[0058] 특정 시간  $k$ 에서의 상태변수 벡터를  $\mathbf{x}_k$ 라고 정의할 때 수학적 7은 시간에 따른 상태변수의 변화를 나타내는 상태 방정식으로, 여기서  $\mathbf{A}$ 는 이전 상태에 기반한 상태전이 행렬이고,  $\mathbf{w}_k$ 는 시스템 잡음이다. 시스템 잡음은 평균 0, 공분산행렬  $\mathbf{Q}$ 를 갖는 정규분포 잡음 변수로 시스템 모델과 실제 시스템의 차이에서 발생하는 부정확성, 시스템 자체의 잡음 등을 포함한다.

[0059] 수학적 8과 9는 상태변수 벡터  $\mathbf{x}_k$ 와 시스템의 출력 벡터  $\mathbf{y}_k$ , 그리고 그 출력을 측정한 측정 벡터  $\mathbf{z}_k$ 의 관계를 나타낸 식이다. 여기서  $\mathbf{H}_k$ 는 상태변수 벡터와 시스템의 출력에 관계되는 출력 행렬이고,  $\mathbf{v}_k$ 는 측정 잡음으로, 평균 0, 공분산행렬  $\mathbf{R}$ 을 갖는 정규분포 잡음 변수이다.

[0060] 특정 시간  $k$ 에서 칼만 필터 알고리즘의 추정 과정은 도 4와 같으며 크게 예측 단계와 보정 단계로 나눌 수 있다.

[0061] 예측 단계에서는 이전 시간  $k-1$ 에서 추정된 상태변수에 대하여 현재 시간  $k$ 에서 예상되는 상태변수를 계산하며, 이 단계는 연역적으로 이루어진다.

[0062] 보정 단계에서는 예측 단계에서의 예측 값과 실제 측정값 사이의 오차를 이용하여 이를 귀납적으로 수정한다.

[0063] 윗첨자  $-$ 는 그 값이 예측 단계에서 계산되는 값을 의미한다. 상태변수 벡터의 추정 값은  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 로 표기하고, 실제 상태변수와 오차는  $\tilde{\mathbf{x}}_k^-$ 로 표기한다.

[0064] 예측 단계와 보정 단계에서의 상태변수 오차는 각각 수학적 11, 12와 같고, 오차 공분산이란 상태변수 오차의 공분산을 의미하고, 예측 단계와 보정 단계에서의 오차 공분산은 수학적 13, 14와 같다.

### 수학적 11

[0065] 
$$\tilde{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-$$

### 수학적 12

[0066] 
$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$$

### 수학적 13

[0067] 
$$\mathbf{P}_k^- = Cov[\tilde{\mathbf{x}}_k^-] = E[\tilde{\mathbf{x}}_k^- (\tilde{\mathbf{x}}_k^-)^T]$$

### 수학적 14

[0068] 
$$\mathbf{P}_k = Cov[\tilde{\mathbf{x}}_k] = E[\tilde{\mathbf{x}}_k \tilde{\mathbf{x}}_k^T]$$

[0069] 예측 단계와 보정 단계에서 상태변수 벡터의 평균 제곱 오차(Mean Square Error, MSE)는 수학적 15, 16과 같다.



### 수학식 15

$$MSE(\hat{\mathbf{x}}_k^-) = E[(\hat{\mathbf{x}}_k^-)^T \hat{\mathbf{x}}_k^-] = tr(\mathbf{P}_k^-)$$

### 수학식 16

$$MSE(\hat{\mathbf{x}}_k) = E[\tilde{\mathbf{x}}_k^T \tilde{\mathbf{x}}_k] = tr(\mathbf{P}_k)$$

여기서  $tr$ 은 행렬의 대각합(trace)를 뜻하고, 상태변수 벡터의 평균 제곱 오차는 오차 공분산 행렬의 대각합과 같다.

칼만 필터 알고리즘은 예측 단계와 보정 단계에서 각각 상태변수 벡터 추정 값의 평균 제곱 오차를 최소화하는 것을 목적으로 유도된 계산식에 따라 추정을 수행한다.

예측 단계는 연역적 상태변수 예측 및 예측 오차 공분산 계산으로 이루어진다.

연역적 상태변수 예측은 수학식 17과 같고, 이전 시간  $k-1$ 에서 추정한 상태변수 벡터 추정 값  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^-$ 로부터 현재 시간  $k$ 의 상태변수 벡터 예측 값  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 을 계산한다.

### 수학식 17

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^-$$

이에 대한 상태변수 벡터 예측 값에 대한 오차 공분산은 수학식 18과 같이 계산할 수 있다.

### 수학식 18

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}$$

보정 단계는 측정데이터의 예측 오차 계산, 최적 칼만 이득 계산, 귀납적 상태변수 보정, 보정 오차 공분산 계산으로 이루어진다.

측정데이터의 예측 오차  $\tilde{\mathbf{z}}_k$ 는 수학식 (19)와 같이 계산된다.

### 수학식 19

$$\tilde{\mathbf{z}}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_k^-$$

최적 칼만 이득  $\mathbf{K}_k$ 는 측정데이터의 예측 오차에 의한 보정의 가중치를 의미하며 수학식 20과 같이 계산된다.

## 수학식 20

$$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R]^{-1}$$

귀납적 상태변수 보정은 상태변수 벡터 예측 값  $\hat{x}_k^-$ 에 측정데이터의 예측 오차를 이용한 보정을 수행하여 최종 추정 값  $\hat{x}_k$ 를 구하는 방식으로 이루어지며, 수학식 21과 같이 계산된다.

## 수학식 21

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k \tilde{z}_k \\ &= \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \end{aligned}$$

보정된 최종 상태변수 벡터 추정 값  $\hat{x}_k$ 에 대한 오차 공분산  $P_k$ 는 수학식 22와 같이 계산되며, 그 값은 시간 k+1에서의 예측단계에서 사용된다.

## 수학식 22

$$\begin{aligned} P_k &= P_k^- - K_k H_k P_k^- \\ &= (I - K_k H_k) P_k^- \end{aligned}$$

이러, 기여도 계산부(52)는 칼만 필터 알고리즘 생성부(51)에 의해 생성된 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 주파수 추종에 대한 기여도를 계산한다(60).

국내 전국계통 대상으로 제안하는 주파수추종에 대한 기여도 계산 방법을 적용한 예를 설명한다.

도 5 는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 데이터의 동요 방정식 충족 예를 나타낸 도면이고, 도 6 은 본 발명의 일 실시예에 따른 측정 벡터의 시간에 따른 데이터를 정규화한 예를 나타낸 도면이며, 도 7 은 본 발명의 일 실시예에 따른 출력 행렬의 시간에 따른 데이터를 나타낸 도면이며, 도 8 은 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 주파수추종 기여도 산정 결과를 나타낸 도면이며, 도 9 는 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 응답량 증가시 계통 주파수를 나타낸 도면이며, 도 10 은 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 응답량 증가시 계통 주파수(확대)를 나타낸 도면이며, 도 11 은 케이스별 사고 발생시 계통 주파수 변화를 나타낸 도면이다.

국내 전국계통을 서울·경기, 인천, 강원, 충청, 전라, 경상의 6개 지역으로 구분하였다. 국내 전력계통에서 10초에 신고리 #3 발전기(1,400MW) 탈락 사고가 발생했을 때, 칼만 필터 알고리즘에 필요한 데이터를 구하였다.

수학식 6을 기반으로 하여 칼만 필터 알고리즘을 구성하기 위해서는 계통 주파수 변화량  $\Delta f_{sys}$ 와 지역별 추정 가속에너지 데이터가 필요하다.

페이저 측정기(10)로 취득한 주파수는 계통 구성에 따라 모선마다 그 값이 다르다. 따라서 단일 모선에서 측정된 주파수는 계통 전체의 기계적 입력 및 전기적 출력에 대해 동요방정식을 충족하지 못한다.

칼만 필터 알고리즘을 구성할 때 하나의 대표 주파수 데이터가 필요하다. 이를 위해 계통 주파수를 사용할 수 있다. 계통 주파수( $f_{sys}$ )란 전체 전력계통을 대표할 수 있는 주파수를 의미한다.

지역별 최대 용량 발전기 모선의 주파수를 측정하여 계통 주파수를 계산한다. i번째 지역 최대 용량 발전기 모선에서 측정된 주파수 데이터를  $f_i$ [Hz], i번째 지역 최대 용량 발전기의 용량을  $S_i$ [MVA]라고 하면, 계통 주파수를 수학식 23과 같이 계산할 수 있다.

### 수학식 23

$$f_{sys} = \frac{\sum_i S_i f_i}{\sum_i S_i}$$

[0096]

[0097]

이 때, 지역별 주파수 측정 발전기 모선 및 해당 발전기 용량은 표 2와 같다.

표 2

[0098]

지역	발전기	$S_i$ [MVA]
서울·경기	위례 열병합 #1	476
인천	영흥 #5	1,046
강원	삼척 #1	1,230
충청	태안 #9	1,254
전라	한빛 #1	1,284
경상	한울 #4	1,220

[0099]

도 5의 (a)는 삼천포 #1 발전기 모선에서 측정한 주파수와 전국 발전기의 총 기계적 입력 및 전기적 출력을 비교한 것이며 (b)는 계통 주파수와 전국 발전기의 총 기계적 입력 및 전기적 출력을 비교한 것이다. 수학식 1의 동요방정식에 의하면 주파수의 변화율이 0인 경우 기계적 입력과 전기적 출력의 값이 같아야 한다. 도 5의 (a)에서 단일 모선에서 측정한 주파수는 동요방정식을 충족하지 않는 반면, (b)에서 계통 주파수는 동요방정식을 충족하는 것을 확인할 수 있다.

[0100]

발전기의 기계적 입력은 페이저 측정기(10)에서 측정할 수 없으므로 페이저 측정기(10)에서 취득한 주파수와 전력 출력 데이터로부터 기계적 입력을 계산할 수 있다. 동요방정식으로부터 지역별 기계적 입력은 수학식 24와 같이 계산할 수 있다.

[0101]

여기서  $H_i$ 는 지역  $i$ 의 평균 관성정수[MJ/MW]이며 수학식 25와 같이 계산된다. 여기서  $j$ 는 지역  $i$ 에 속하는 발전기의 번호이며,  $S_j$ 는  $j$  발전기의 용량[MVA]이고  $H_j$ 는  $j$  발전기의 관성정수[MJ/MW]이다.

### 수학식 24

$$P_{m,i,calc} = \frac{2H_i}{f_o} \frac{df_{sys}}{dt} + P_{e,i}$$

[0102]

### 수학식 25

$$H_i = \frac{\sum_j S_j H_j}{\sum_j S_j}$$

[0103]

[0104]

계산된 기계적 입력은 계통 주파수의 변화율 계산 과정에서 발생한 잡음을 포함하므로 칼만 필터를 적용하여 잡음을 제거할 수 있다. 이를 위한 칼만 필터 알고리즘의 시스템 모델은 수학식 26, 27과 같다.

수학식 26

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k$$

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_{m,i,k} \\ \frac{d\hat{P}_{m,i,k}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_{m,i,k-1} \\ \frac{d\hat{P}_{m,i,k-1}}{dt} \end{bmatrix} + \mathbf{w}_k$$

[0105]

수학식 27

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

$$[P_{m,i,calc,k}] = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{P}_{m,i,k} \\ \frac{d\hat{P}_{m,i,k}}{dt} \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k$$

[0106]

[0107] 지역별 추정 기계적 입력을  $\hat{P}_{m,i}$ 을 이용하여 지역별 추정 가속력, 추정 가속에너지를 수학식 28과 같이 계산할 수 있고, 이를 각각  $\hat{P}_{a,i}$ ,  $\hat{E}_{a,i}$ 라고 한다.

수학식 28

$$\hat{P}_{a,i} = \hat{P}_{m,i} - P_{e,i} \quad , \quad \hat{E}_{a,i} = \int_0^t \hat{P}_{a,i} d\tau$$

[0108]

[0109] 지역별 주파수추종 기여도를 수학식 6과 같이 표현할 수 있을 때, 이를 추정하기 위한 칼만 필터 알고리즘 시스템 모델은 수학식 29, 30과 같다.

수학식 29

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{1,k} \\ \omega_{2,k} \\ \vdots \\ \omega_{6,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{1,k-1} \\ \omega_{2,k-1} \\ \vdots \\ \omega_{6,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1,k} \\ \mathbf{w}_{2,k} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{6,k} \end{bmatrix}$$

[0110]

수학식 30

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

$$[\Delta f_{ss,k}] = [\hat{E}_{a1,k} \ \hat{E}_{a2,k} \ \cdots \ \hat{E}_{a6,k}] \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

[0111]

[0112] 추정의 대상이 되는 상태변수 벡터  $\mathbf{x}_k$ 는 지역별 주파수추종 기여도  $\omega_{i,k}$ 로 구성된다. 전국계통을 6개 지역으로 구

분하였으므로 상태변수 벡터는  $6 \times 1$  행렬이다.

[0113] 상태 행렬  $\mathbf{A}$ 는  $6 \times 6$  행렬로, 시간에 따른 상태변수 벡터의 변화를 표현하며, 이를 단위행렬로 설정하여 주파수 추종 기여도의 예측에 있어 시간에 따른 변화가 없다고 가정한다.

[0114] 시스템 잡음  $\mathbf{w}_k$ 은  $6 \times 1$  행렬로,  $\mathbf{w}_k$ 는 지역별 주파수추종 기여도  $\omega_{i,k}$ 에 대한 잡음으로 지역별 주파수추종 기여도의 예측 단계에 작용한다. 시스템 잡음의 공분산 행렬  $\mathbf{Q}$ 는  $6 \times 6$  행렬로, 수학식 31과 같이 파라미터  $\zeta$ 를 대각 성분으로 갖는다.

### 수학식 31

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \zeta & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \zeta & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \zeta \end{bmatrix}$$

[0115]

[0116] 측정 벡터  $\mathbf{z}_k$ 는  $1 \times 1$  행렬로, 계통 주파수  $f_{sys}$ 의 변화량  $\Delta f_{sys,k}$ 이며 기준 주파수인 60Hz에서 벗어난 값을 의미한다.

[0117] 도 6은 측정 벡터  $\mathbf{z}_k$ 의 시간에 따른 데이터를 나타낸 것으로, 최종 값이 1이 되도록 정규화(Normalize)하였다.

[0118] 출력 행렬  $\mathbf{H}_k$ 는  $1 \times 6$  행렬로, 수학식 6을 나타내는 행렬이다. 지역별 추정 가속에너지  $\hat{E}_{a,i,k}$ 와 지역별 주파수추종 기여도  $\omega_{i,k}$ 를 통해 계통 주파수의 변화를 나타낸다.

[0119] 도 7은 출력 행렬  $\mathbf{H}_k$ 의 시간에 따른 데이터를 나타낸 것으로, 각각 같은 값으로 정규화하였다.

[0120] 측정 잡음  $\mathbf{v}_k$ 은  $1 \times 1$  행렬이므로 측정 잡음의 공분산 행렬  $\mathbf{R}$  또한  $1 \times 1$  행렬로, 하나의 파라미터  $R$ 을 갖는다.

[0121] 위 데이터에 대해 칼만 필터 알고리즘을 적용하여 지역별 주파수추종 기여도 추정을 수행하고, 그 값이 수렴하도록 추정을 반복 수행한다.

[0122] 도 8과 표 3은 해당 데이터 셋에 대해 추정 과정을 70회 반복하여 지역별 주파수추종 기여도가 수렴한 결과 및 지역별 순위를 나타낸 것이다.

표 3

[0123]

지역	주파수추종 기여도	순위
서울, 경기	0.4886	1
전라	0.2738	2
충청	0.1050	3
인천	0.0421	4
강원	0.0415	5
경상	0.0293	6

[0124] 동일한 사고에 대하여 발전기의 드롭계수를 조정하여 지역별로 응답량을 35MW씩 증가시키고, 주파수 최저점의 상승폭을 비교하였다. 도 9는 지역별 응답량 35MW 증가 시 계통 주파수의 변화를 나타낸 것이고, 도 10은 이를 확대한 것이다.

[0125] 표 4는 지역별 응답량 35MW 증가 시 계통 주파수의 최저점 및 응답량을 증가시키지 않은 경우 대비 주파수 최저점 상승폭 및 그 순위를 나타낸 것이다.

표 4

응동량 증가 지역	주파수 최저점 [Hz]	주파수 최저점 상승폭 [Hz]	순위
증가하지 않음	59.9220	-	-
서울, 경기	59.9272	0.0052	1
전라	59.9262	0.0042	2
충청	59.9260	0.0040	3
인천	59.9258	0.0038	4
강원	59.9257	0.0037	5
경상	59.9248	0.0024	6

- [0127] 탈락한 발전기 용량(1,400MW) 대비 증가한 응동량(35MW)이 작기 때문에 주파수 최저점 상승폭이 작지만 지역별로 차이가 있다. 지역별 주파수추종 기여도 순위와 지역별 응동량 증가 시 계통 주파수 최저점 상승폭 순위를 비교해보았을 때 동일한 순위가 나타났다.
- [0128] 따라서 사고 발생시 제안하는 지역별 주파수추종 기여도 산정 방법을 통해 지역별 주파수추종 기여도를 산정하여 계통 주파수 회복, 특히 주파수 최저점에 기여하는 정도를 평가할 수 있다.
- [0129] 한편, 표 3에서의 지역별 주파수추종 기여도 순위에 따르면 서울·경기 지역의 주파수추종 기여도가 가장 높고, 경상 지역의 주파수추종 기여도가 가장 낮게 나타난다.
- [0130] 서울·경기 지역과 경상 지역의 주파수추종 기여도가 주파수 회복에 미치는 영향을 확인하기 위하여 해당 지역 발전기의 드롭계수를 조정하여 응동량을 증가시켜 동일한 주파수 응답을 보이는 Case를 비교하였다.
- [0131] Case 1: 초기 설정 상태
- [0132] Case 2: 서울·경기 지역에서 주파수추종 응답량 68.68MW 추가 투입하도록 설정
- [0133] Case 3: 경상 지역에서 주파수추종 응답량 112.08MW 추가 투입하도록 설정
- [0134] 세 가지 Case에 대하여 주파수 최저점과 1차 회복 주파수는 도 11과 표 5와 같다.

표 5

	Case 1	Case 2	Case 3
$f_{min}$ [Hz]	59.8492	59.8586 (+0.0094)	59.8587 (+0.0095)
$f_{set}$ [Hz]	59.9040	59.9099 (+0.0059)	59.9120 (+0.0080)

- [0136] Case 2와 3에서는 각각 서울·경기 지역과 경상 지역에서 주파수추종 응동량이 증가하도록 설정하였으므로 초기 설정 상태인 Case 1에 비하여 주파수 최저점과 1차 회복 주파수가 모두 상승한 것을 확인할 수 있다. Case 2와 3에서 주파수 최저점은 각각 0.0094Hz, 0.0095Hz 상승하여 거의 동일한 상승폭을 보였다.
- [0137] Case 2에서 서울·경기 지역의 주파수추종 응답량은 68.68MW 증가하였고, Case 3에서 경상 지역의 주파수추종 응답량은 112.08MW 증가하였다.
- [0138] 34.60MW의 추가 주파수추종 응답량 차이에도 불구하고 주파수 최저점이 동일하므로 경상 지역보다 서울·경기 지역의 주파수추종 응답량이 주파수 회복에 더 큰 기여도를 갖는다고 판단할 수 있다.
- [0139] 이와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 주파수추종 기여도 산정 장치 및 방법은 전력계통의 발전 동적 특성을 측정할 수 있는 페이저 측정기(10)의 효율성을 제고하고, 이를 반영하여 발전기의 주파수추종 운전에 대한 지역별 기여도를 평가하도록 한다.
- [0140] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 주파수추종 기여도 산정 장치 및 방법은 지역별 주파수추종 기여도를 기반으로 발전원 구성을 계획하여 사고 발생시 주파수 안정도를 향상시키도록 한다.
- [0141] 게다가, 본 발명의 일 실시예에 따른 지역별 주파수추종 기여도 산정 장치 및 방법은 지역별 주파수추종 기여도

를 기반으로 주파수조정예비력을 계획하여 예비력 확보량 절감 및 예비력 구입비 절감이 가능하도록 한다.

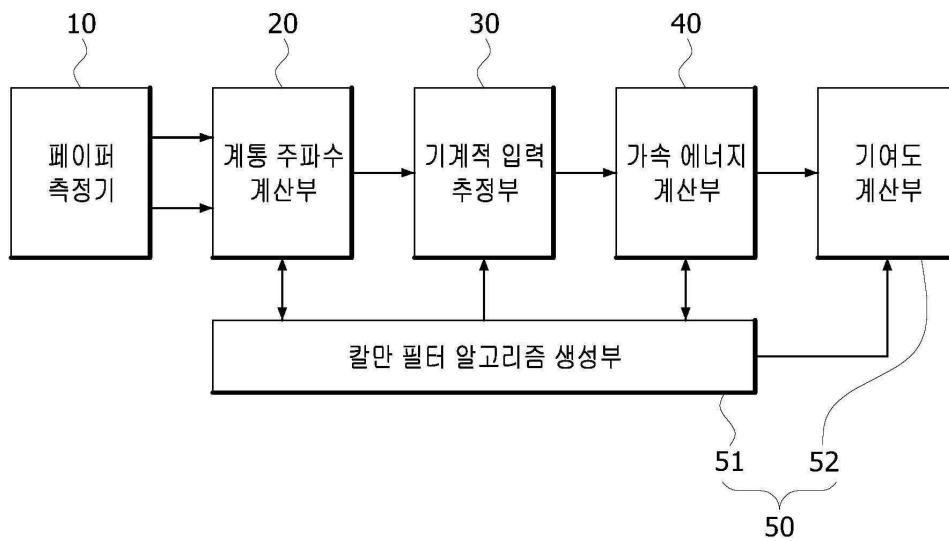
[0142] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 하여 설명되었으나, 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 기술이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 아래의 특허청구범위에 의하여 정해져야할 것이다.

## 부호의 설명

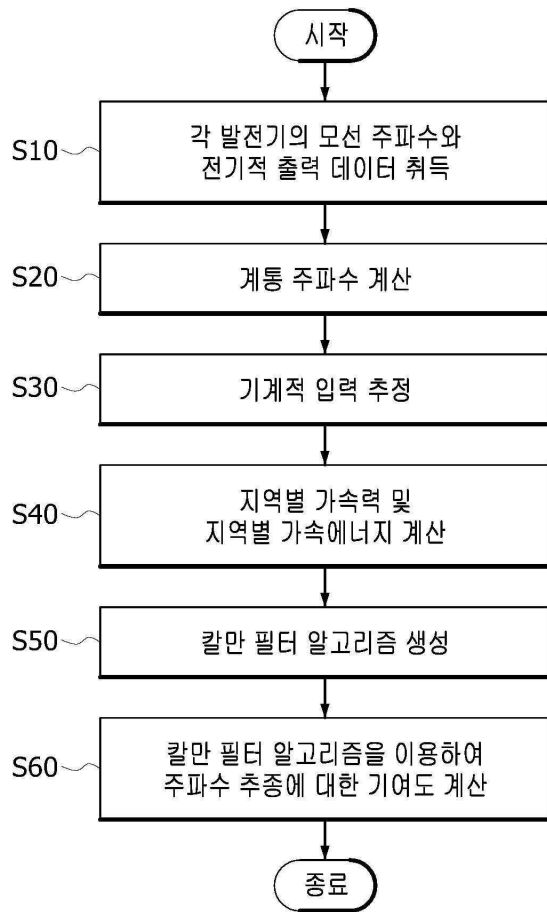
[0144] 10: 페이지 측정기  
20: 계통 주파수 계산부  
30: 기계적 입력 추정부  
40: 가속에너지 계산부  
50: 기여도 검출부  
51: 칼만 필터 알고리즘 생성부  
52: 기여도 계산부

## 도면

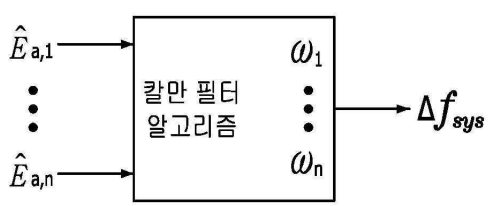
### 도면1



도면2

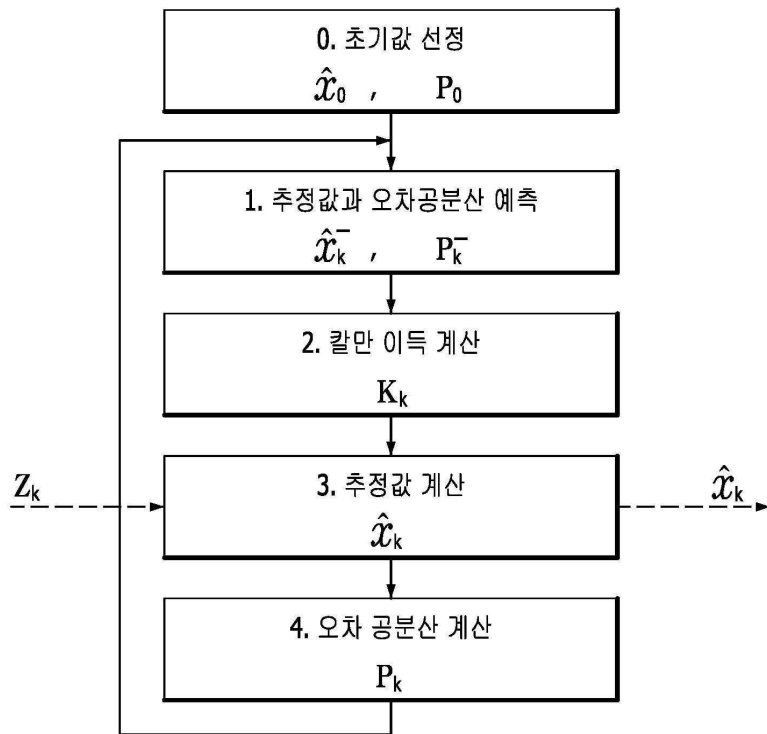


도면3

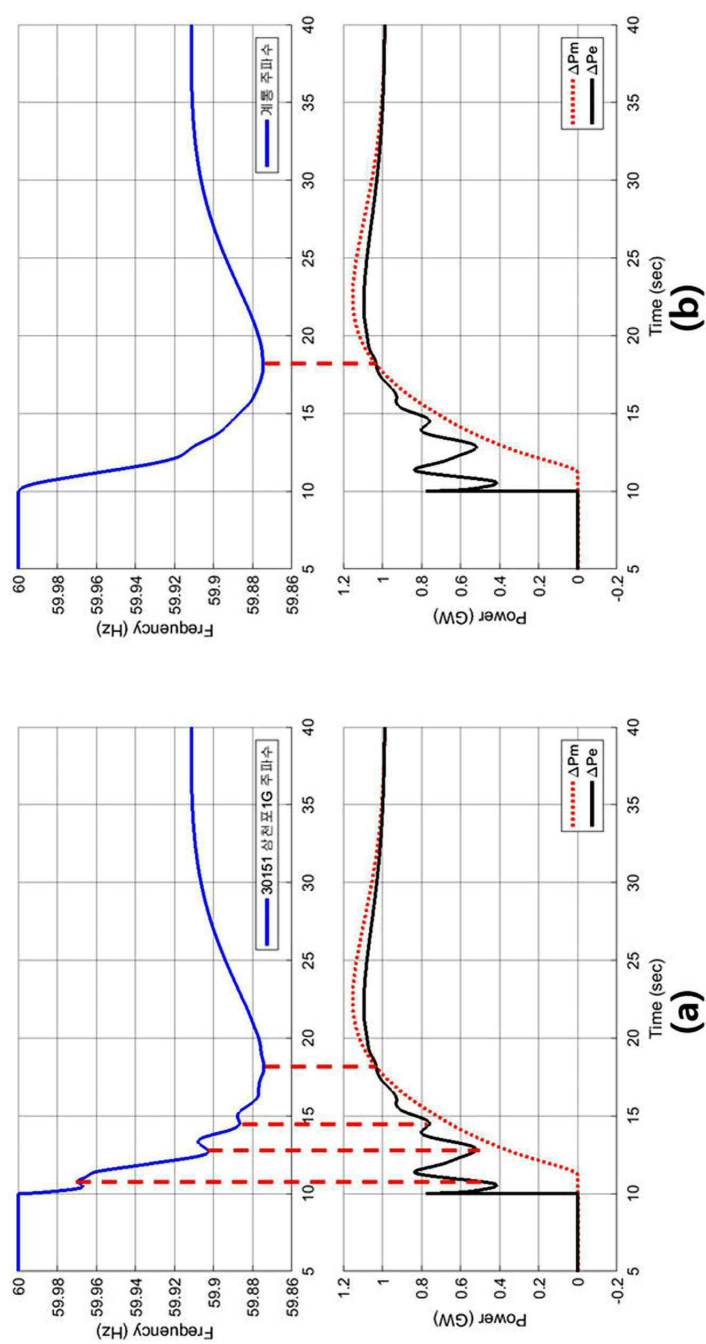




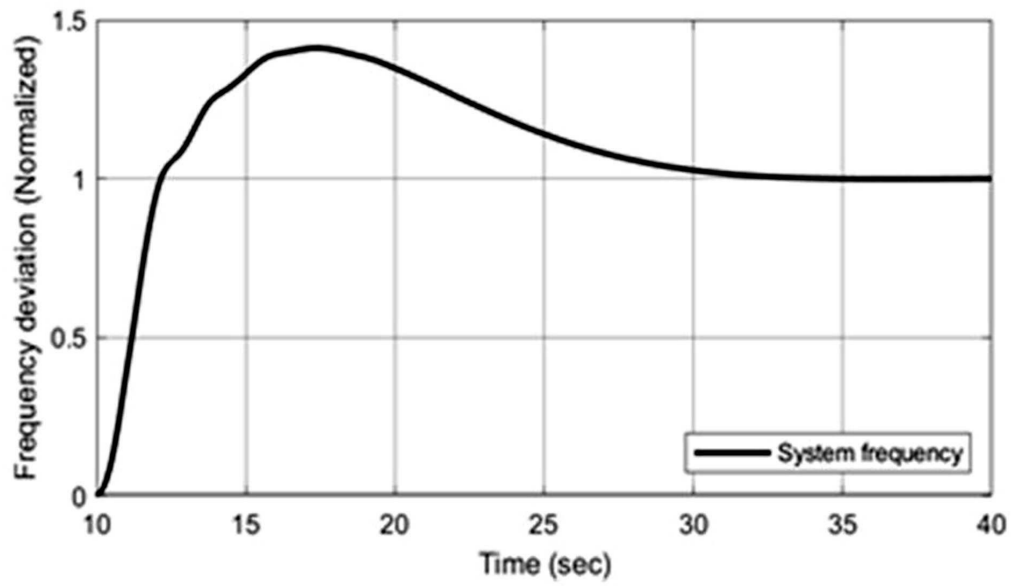
도면4



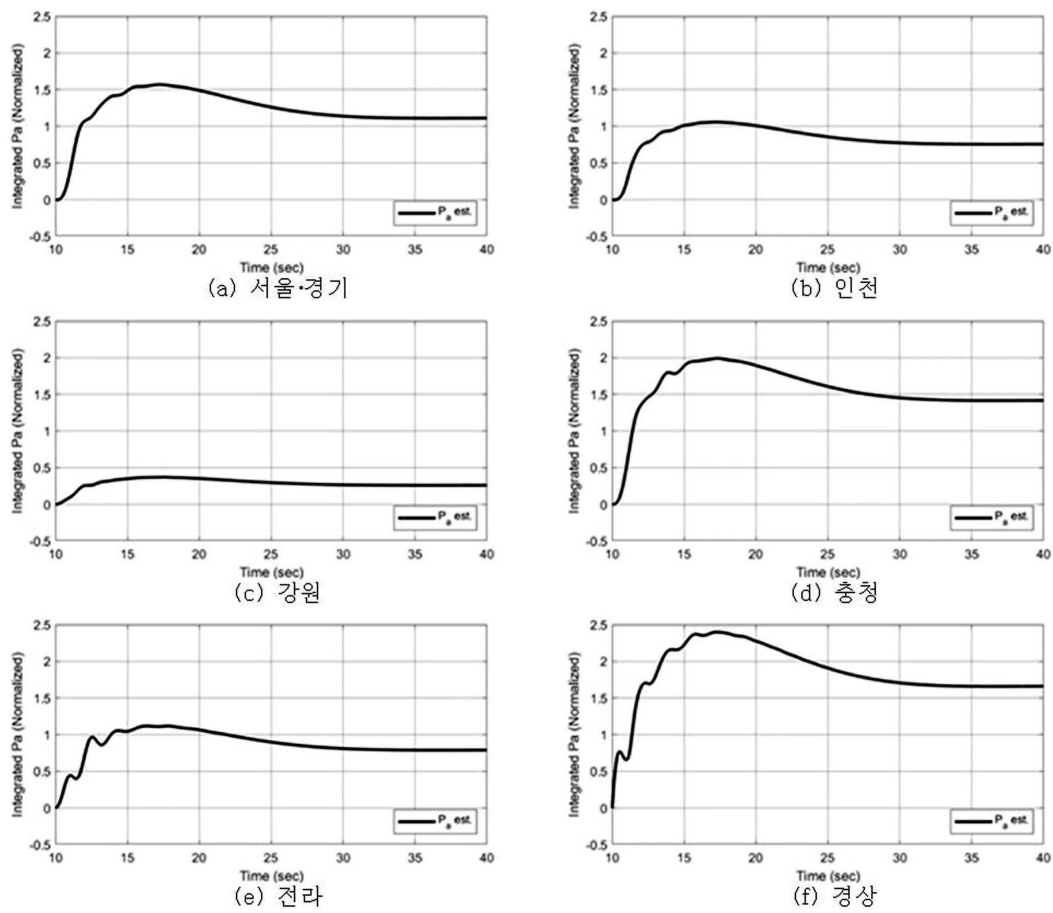
도면5



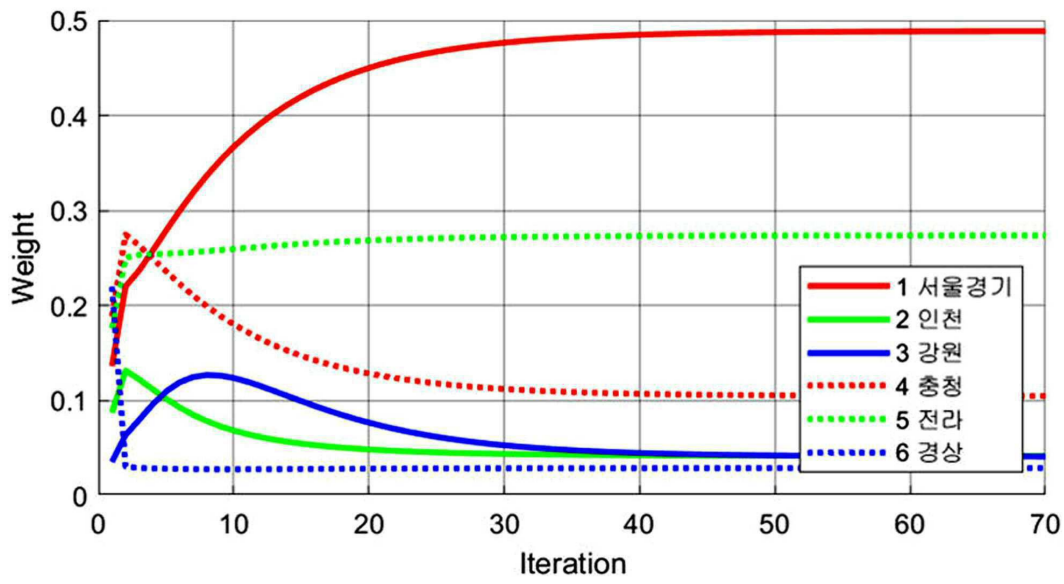
도면6



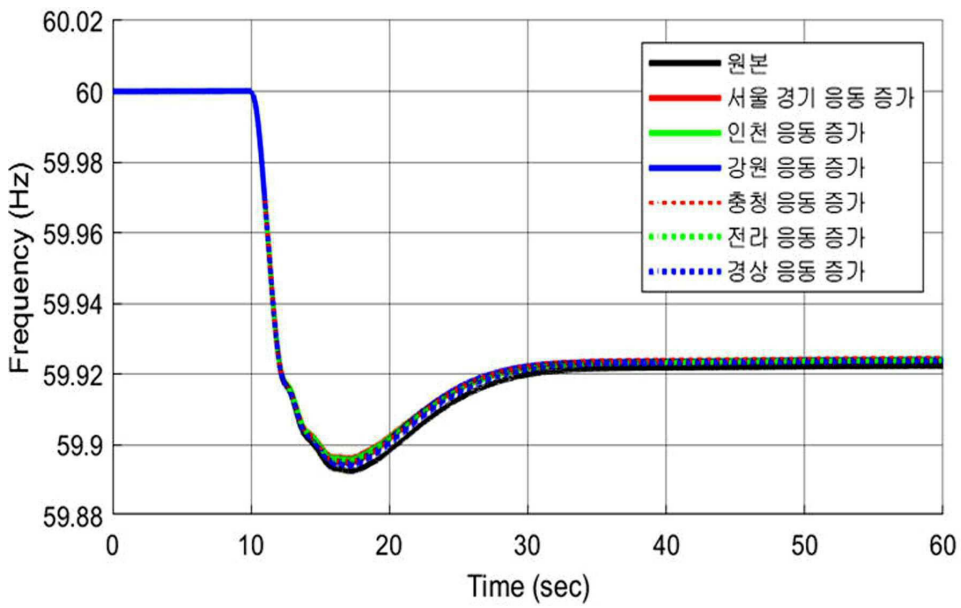
도면7



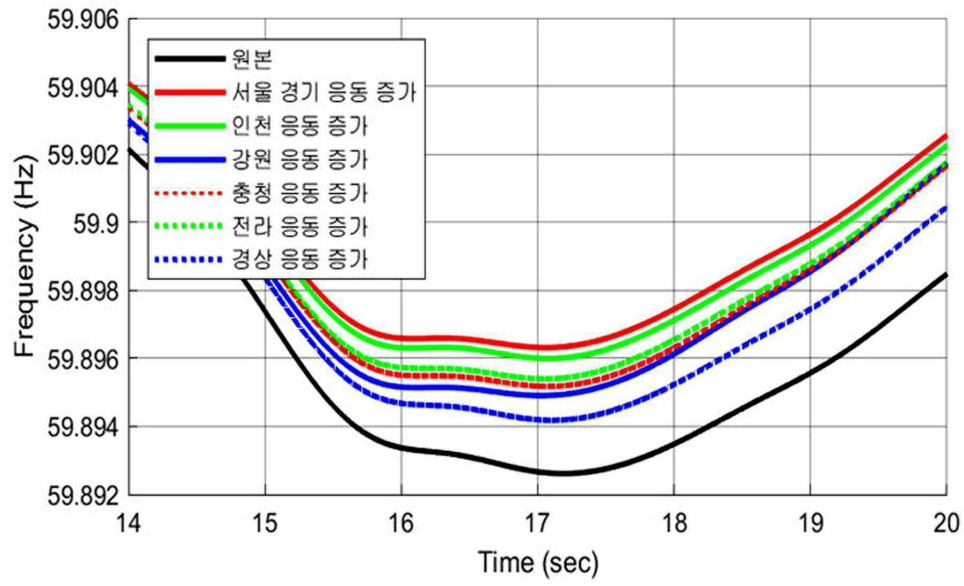
도면8



도면9



도면10



도면11

