

명세서

청구범위

청구항 1

여기의 방향을 따라 발전기(190)의 편향을 나타내는 측정 신호를 출력할 수 있는 센서 유닛(170), 제어 신호에 의해 제어가능한 발전기(190)에 작용하는 액츄에이터 유닛(180)을 포함하는 제어 장치에 있어서, 액츄에이터 유닛(180)이 발전기(190)의 고조파 공진 발전의 설정 진폭으로부터 발전기(190)의 편향의 편차에 대응하도록 측정 신호와 고조파 설정점 신호로부터 액츄에이터 유닛(180)을 위한 제어 신호를 추론하도록 구성되는 제어기 메인 유닛(200), 그리고 액츄에이터 유닛(180)을 활성화한 후 발전기(190)의 잔여 발전의 진폭이 설정 진폭까지 위상-동기적으로 증폭되며 그리고 이러한 공정에서 잔여 발전에 포함된 에너지가 사용되도록 측정 신호로부터 비활성화된 액츄에이터 유닛(180)에서 발전기의 잔여 발전의 실제 위상 및 실제 진폭을 결정하고 실제 위상 및 실제 진폭에 따라 조정되는 고조파 설정점 신호를 제어기 메인 유닛(200)으로 출력하도록 구성되는 제어기 확장 유닛(600)을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 2

제1항에 있어서, 제어기 메인 유닛(200)은 고조파 설정점 신호를 위한 제어기 장치(225, 325)이며, 여기서 제어기 장치(225, 325)는 적어도 하나의 비례 전달 요소(224, 324)와 비례 전달 요소(224, 324)에 나란히 정렬된 하나의 적분 전달 요소(222, 324)를 포함하며 그리고 제어기 메인 유닛(200)의 제어기 입력은 두 개의 전달 요소(222, 224, 322, 324)와 연결되며, 그리고 제어기 장치(225, 325)의 전달 함수는 s-평면내 제어기 각 주파수(ω_r)에서 켈레 복소수 극 또는 z-평면내 $e^{\pm j\omega_r T}$ 에서 극을 가지며, 여기서 T는 제어기 장치(225, 325)의 이산 입력 신호의 샘플링 시간이며 ω_r 은 0보다 큰 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 3

제2항에 있어서, 적분 전달 요소(222, 322)의 적분 동작 계수와 비례 전달 요소(224, 324)의 증폭 인자는 제어기 장치(225, 325)가, 제어기 입력에서 계단 함수에 의해 변조된 제어기 각 주파수(ω_r)의 고조파 입력 신호의 고조파 입력 신호의 입력시, 제어기 출력에서 상승 진폭을 갖는 제어기 각 주파수(ω_r)의 고조파 발전을 발생할 수 있도록 선택되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 4

제3항에 있어서, 적분 동작 계수 및 증폭 인자는 제어기 장치(225, 325)의 전달 함수의 영(zero)이 발전기(190)의 전달 함수의 극을 보상하도록 선택되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 5

제1항에 있어서, 제어기 확장 유닛(600)은 : 액츄에이터 유닛(180)에 의해 발전기(190)의 잔여 발전의 진폭이 위상-동기적으로 증폭되며 그리고 잔여 발전에 포함된 에너지가 이용가능하도록 측정 신호로부터 발전기(190)의 잔여 발전의 실제 위상 및 실제 진폭을 결정하

며 실제 위상 및 실제 진폭으로부터 고조파 설정점 신호를 위한 동기화 정보를 결정하도록 구성되는 포착 유닛(610); 그리고

동기화 정보를 수신하며 그리고 동기화 정보에 기초하여 고조파 설정점 신호를 위한 위상 및 초기 진폭값을 결정하도록 구성된, 동기화 유닛(620)을 포함하는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

포착 유닛(610)은 :

측정 신호로부터, 전류 발진 주파수에 대한 추정값으로부터, 측정 신호에 포함된 측정 잡음의 변화에 대한 추정값으로부터, 그리고 측정 신호의 일정한 진폭 오프셋에 대한 추정값으로부터 잔여 발진의 시간 내 변화에 대한 추정값을 결정하도록 구성되는 필터 유닛(612); 그리고

잔여 발진의 시간내 변화에 대한 추정값으로부터 실제 위상 및 실제 진폭을 기술하는 동기화 정보를 결정하고 동기화 정보를 출력하도록 구성되는 제어 유닛(616)을 포함하는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

제어 유닛(616)은 동기화 정보의 출력 후 필터 유닛(612)을 비활성화시키도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 8

제6항에 있어서,

제어 유닛(616)은 동기화 정보의 출력 후 액츄에이터 유닛(180)을 활성화시키도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 9

제6항에 있어서,

제어기 확장 유닛(600)은 초기 진폭값에서 설정 진폭값까지 사전결정된 시간 주기 내에 설정점 발진의 진폭을 증가시키도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 10

제1항에 있어서,

필터 유닛(612)은 칼만 필터(Kalman filter)인 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 11

제1항에 있어서,

제어기 확장 유닛(600)은 발진기(190)의 전류 발진 주파수를 기술하는 순간 인터벌 주파수 정보로 저장하도록 구성되는 주파수 스토리지 유닛(630)을 포함하며, 그리고

제어기 확장 유닛(600)은 발진기(190)의 잔여 발진의 실제 위상 및 실제 진폭을 추정 및/또는 고조파 설정점 신호를 발생하기 위해 저장된 주파수 정보를 사용하도록 더 구성되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 12

제1항에 있어서,

제어 장치는 여기 유닛(590), 코리올리 유닛(585) 또는 검출 유닛(580)으로서 발진기를 형성하는 회전 속도 센서(500, 505)의 일부이며, 그리고 액츄에이터 유닛은 힘 전달기(561)이고,

코리올리 유닛(585)은 코리올리 유닛(585)이 여기의 방향을 따라 여기 유닛(590)의 움직임을 따르며 그리고 코

리올리 유닛(585)이 여기의 방향에 직교인 검출 방향으로 따라 추가적으로 움직일 수 있도록 여기 유닛(590)에 부착되며, 그리고

검출 유닛(580)은 검출 유닛(580)이

여기의 방향을 따라 여기 유닛(590)의 움직임을 따르며 검출 유닛(480)이 여기의 방향에 직교인 검출 방향을 따라 추가적으로 움직일 수 있거나, 또는

여기의 방향에 직교인 검출 방향을 따라 코리올리 유닛(585)의 움직임을 따르며 여기의 방향을 따라 고정되는 여기 유닛(590) 또는 코리올리 유닛(585)에 이와 같이 부착되는 것을 특징으로 하는, 제어 장치.

청구항 13

고조파 공진 발진에 대해 여기의 방향으로 여기가능한 움직일 수 있게 지지된 발진기(190),

여기의 방향을 따라 발진기(190)의 편차를 나타내는 측정 신호를 출력하기에 적합한 센서 유닛(170),

제어 신호에 의해 제어가능한 발진기(190)에 작용하는 액츄에이터 유닛(180)을 포함하며,

액츄에이터 유닛(180)이 공진 발진의 설정 진폭으로부터 발진기(190)의 편향의 편차에 대응하도록 측정 신호와 고조파 설정점 신호로부터 액츄에이터 유닛(180)을 위한 제어 신호를 추론하도록 구성된 제어기 메인 유닛(200), 그리고

액츄에이터 유닛(180)을 활성화한 후 발진기(190)의 잔여 발진의 진폭이 설정 진폭까지 위상-동기적으로 증폭되며 그리고 이러한 공정에서 잔여 발진에 포함된 에너지가 사용되도록 측정 신호로부터 비활성화된 액츄에이터 유닛(180)에서 발진기의 잔여 발진의 실제 위상 및 실제 진폭을 결정하고 실제 위상 및 실제 진폭에 적합한 고조파 설정점 신호를 제어기 메인 유닛(200)으로 출력하도록 구성된 제어기 확장 유닛(600)

을 포함하는, 회전 속도 센서.

청구항 14

제13항에 있어서,

발진기는 여기의 방향을 따라 힘 전달기(561)에 의해 편향될 수 있으며 공진 각 주파수(ω_0)를 갖는 발진할 수 있는 여기 유닛(590)인, 회전 속도 센서.

청구항 15

센서 유닛(170)에 의해 여기의 방향을 따라 발진기(190)의 편향을 나타내는 측정 신호를 발생하는 단계,

비활성화된 액츄에이터 유닛(180)에서 발진기(190)의 잔여 발진의 실제 위상 및 실제 진폭의 추정에 기초하여 위상 및 진폭 동기 고조파 설정점 신호를 발생하는 단계,

액츄에이터 유닛(180)이 고조파 발진으로부터 발진기(190)의 편차에 대응하도록 측정 신호 그리고 위상 및 진폭 동기 고조파 설정점 신호로부터 액츄에이터 유닛(180)을 위한 동기화된 제어 신호를 발생하는 단계, 그리고

동기화된 제어 신호 제공시 또는 제공 후 액츄에이터 유닛(180)을 활성화시키는 단계

를 포함하는, 고조파 커맨드 변수와 더불어 제어 장치를 동작하기 위한 방법.

청구항 16

제15항에 있어서,

제어기 메인 유닛(200)은 고조파 설정점 신호를 위한 제어기 장치(225, 325)이며, 여기서 제어기 장치(225, 325)는 적어도 하나의 비례 전달 요소(224, 324)와 비례 전달 요소(224, 324)에 나란히 정렬된 적분 전달 요소(222, 324)를 포함하며 그리고 제어기 메인 유닛(200)의 제어기 입력은 두 개의 전달 요소(222, 224, 322, 324)와 연결되며, 그리고

제어기 장치(225, 325)의 전달 함수는 s-평면내 제어기 각 주파수(ω_r)에서 켈레 복소수 극 또는 z-평면내 $e^{\pm j\omega_r T}$ 에서 극을 가지며, 여기서 T는 제어기 장치(225, 325)의 이산 입력 신호의 샘플링 시간이며 ω_r 은 0보다

큰 것을 특징으로 하는, 고조파 커맨드 변수와 더불어 제어 장치를 동작하기 위한 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 제어 유닛(control unit)에 관한 것으로, 특히 고조파 커맨드 변수(harmonic command variable) 또는 고조파 설정점 신호(harmonic set point signal)를 갖는 회전 속도 센서에 관한 것이다. 본 발명은 또한 고조파 커맨드 변수를 갖는 제어 장치를 동작하기 위한 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 종래의 제어 방법은 일정하거나 또는 단지 느리게 변하는 커맨드 변수들로 문제들을 제어하도록 맞추어지며, 여기서 방해(disturbance)로부터 영향을 받는 제어된 공정 변수의 값은 사전결정된 설정점에 가깝게 유지되거나, 또는 각각 변하는 설정점에 가능한 한 가깝게 갱신된다. 예를 들어 코리올리 힘(Coriolis force)의 분석을 위한 미소기계적 회전 속도 센서(micromechanical rotation rate sensor)로서 몇몇 어플리케이션은 자신의 공진 주파수 및, 제어 루프(control loop)에 의해 정의된 발진 진폭을 발진기의 여기에 제공한다. 이러한 공정에서, 제어기는 사전결정된 고조파 설정점 신호와 측정된 발진기 움직임 사이의 차이가 없도록 제어기는 제어기에 의해 발생된 힘 신호(force signal)를 제어한다.

[0003] 이러한 공정에서, 일반적으로 여기(excitation)의 방향을 따라 발진기의 움직임을 반영하는 측정 신호는 처음에 복조기(demodulator)에 공급된다. 복조기는 측정 신호와 각 주파수(angular frequency)(ω_d)의 고조파 신호를 곱하며, 이는 발진기의 공진 각 주파수(ω_0)에 대응한다. 제어 자체는 일정한 베이스밴드(baseband)에서 또는 공진 각 주파수로부터 독립적인 임의의 경우에서 설정점 신호에 의해 수행된다. 그 다음 제어기의 출력 신호는 각 주파수(ω_m)를 갖는 고조파 신호에 대해 변조기에서 재-변조되며, 이는 발진기의 공진 주파수(ω_0)에 대응한다. 그 다음 변조적(modulation product)이 사전결정된 설정 신호와 비교된다. 두 신호 간의 차는 최종적으로 액츄에이터(actuator)를 제어하며, 이는 제어기 신호에 기초하여 발진기가 사전결정된 설정 발진에 따라 발진하도록 발진기에 대해 힘을 수행한다. 제어가 베이스밴드에서 수행됨에 따라서, 저역 통과 필터(low pass filter)는, 특히 이중 공진 주파수에서, 주파수 변환적(frequency conversion product)을 여과할 수 있지만, 그러나, 이러한 공정에 의해 제어기의 폭(width)과 따라서 편향(deflection)의 변화에 대한 제어기의 반응 속도(reaction speed)가 제한된다.

[0004] 출원일에 독일 특허출원 DE 102010055631.9는 아직 공개되지 않았으며 발진기의 공진 각 주파수(ω_0)의 주파수 대역(frequency band)에서 고조파 설정점 신호를 갖는 제어가 기술된다.

[0005] 어플리케이션의 많은 분야에서 발진기는 드라이브의 비활성화 후 감쇠 진폭(decaying amplitude)으로 발진한다. 발진기의 감쇠 위상(decay phase) 동안 활성화된 제어에서, 활성화 시간(activation time)은 감쇠 발진과 설정점 신호 간의 위상 및 진폭 차이에 의존한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 목적은 고조파 커맨드 변수를 위한 제어 장치의 스위치-온 행위(switch-on behaviour)를 개선하기 위한 제어 개념이다. 목적은 독립항의 요지에 의해 해결된다. 게다가 실시예가 대응하는 종속항에 주어진다.

[0007] 발명의 이어지는 실시예에서, 실시예의 장점 뿐만 아니라 실시예의 기능이 도면에 기초하여 기술될 것이다. 실시예의 요소는, 요소가 서로 배제하지 않는 한에 있어서는, 서로 조합될 것이다.

도면의 간단한 설명

[0008] 도 1은 발명의 실시예에 따른 제어 장치를 갖는 장치의 개략적인 블록도를 예시하며, 제어 장치는 고조파 설정점 신호에 기초하여 고조파 발진을 제어하기 위한 제어기 메인 유닛(controller main unit)과 고조파 설정점 신호를 동기화하기 위한 제어기 확장 유닛(controller extension unit)을 포함한다.

도 2a는 다른 실시예에 따른 도 1의 제어기 확장 유닛의 세부사항을 갖는 단순 블록도를 예시한다.

도 2b는 또 다른 실시예에 따른 도 2a의 제어기 확장 유닛의 다른 세부사항을 갖는 블록도를 예시한다.

도 3a는 실시예에 따른 제어 장치를 갖는 장치의 개략적인 블록도를 예시하며, 제어 장치는 고조파 설정점 신호를 위한 연속 PI 제어기(continuous PI controller)와 불감 시간 요소(dead time element)를 갖는 제어기 메인 유닛으로 지칭된다.

도 3b는 도 3a에 따른 PI 제어기의 전달 함수(transfer function)를 개략적으로 예시한다.

도 4a는 고조파 설정점 신호를 위한 이산 PI 제어기(discrete PI controller)와 불감 시간 요소를 갖는 제어기 메인 유닛을 지칭하는 실시예에 따른 제어 장치를 갖는 장치의 개략적인 블록도를 예시한다.

도 4b는 도 4a의 제어기 메인 유닛의 전달 함수를 개략적으로 예시한다.

도 5a는 실시예에 따른 제어 장치를 갖는 장치의 개략적인 블록도를 예시하며, 장치는 고조파 설정점 신호를 위한 이산 PI 제어기와 대역 통과와 유사하게 작동하는 제어기 확장을 갖는 제어기 메인 유닛을 지칭한다.

도 5b는 도 5a의 제어기 확장의 전달 함수를 개략적으로 예시한다.

도 6a는 발명의 또 다른 실시예에 따른 회전 속도 센서의 미소기계적 부분의 개략적인 평면도이다.

도 6b는 도 6a의 회전 속도 센서의 미소기계적 부분의 개략적인 단면도이다.

도 6c는 도 6a 및 도 6b에 따른 회전 속도 센서의 개략적인 블록도이다.

도 7은 발명의 또 다른 실시예에 따른 회전 속도 센서의 미소기계적 부분의 개략적인 평면도이다.

도 8은 제어 장치를 동작하기 위한 방법을 위해 단순화된 공정 흐름을 예시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0009] 도 1에 도시된 바와 같이 장치(100)는 발진기(oscillator)(190) 및 제어기 메인 유닛(200)과 제어 확장 유닛(600)을 갖는 제어 장치를 포함한다. 발진기(190)는 질량(mass)이며, 질량은 여기의 방향을 따라 움직일 수 있게 매달려 있으며 그리고 공진 주파수(ω_0)와 더불어 여기의 방향을 따라 발진할 수 있다. 고정 케이스에서 발진기(190)는 공진 각 주파수(ω_0)와 함께 병진 또는 회전 발진을 수행한다. 실시예에 따라서 발진기(190)는 회전 속도 센서의 여기 유닛, 코리올리 유닛 또는 검출 유닛이다. 회전 속도 센서는 예를 들어 MEMS(microelectromechanical system : 미소전자기계적 시스템)로서 형성될 수 있다.

[0010] 센서(170)는 발진기의 움직임을 포착하고 측정 신호를 출력하며, 이는 여기의 방향을 따라 발진기(190)의 전체 편향을 반영한다. 측정 신호는 제어기 메인 유닛(200)을 위한 제어기 입력 신호에 대응한다. 제어기 메인 유닛(200)은 제어기 입력 신호와 제어기 확장 유닛(600)으로부터 출력된 고조파 설정점 신호를 비교하며 신호 차(signal difference)에 기초하여 제어기 출력 신호를 발생하며, 제어기 출력 신호는 액츄에이터 유닛(actuator unit)(180)으로 출력된다. 제어기 메인 유닛(200)은 액츄에이터 유닛(180)이 사전결정된 고조파 설정점 신호와 발진기(190)의 측정된 움직임 간의 차이가 없어지도록 힘 신호를 발생하도록 제어기 출력 신호를 결정한다.

[0011] 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)은 액츄에이터 유닛(180)이 활성화될 수 있는 액츄에이터 활성화 유닛(actuator activation unit)(695)을 포함한다. 도 1의 블록도에서 액츄에이터 활성화 유닛(695)은 액츄에이터 유닛(180)에 대한 제어기 출력 신호의 공급에 있어서 스위치로서 예시되며, 여기서 스위치는 제어기 확장 유닛(600)의 출력 신호에 의해 제어가능하다.

[0012] 제어기 확장 유닛(600)은 제어 장치에 의해, 예를 들어 동작 전압(operation voltage)을 스위치 온 함으로써 활성화된다. 액츄에이터 유닛(180)은 처음에 비활성으로 머무른다. 이전의 히스토리에 따라서, 액츄에이터 유닛(18)이 비활성화되면 발진기(190)는 잔여 발진(residual oscillation)이 다루어지거나 잔여 발진을 수행한다. 제어기 확장 유닛(600)은 액츄에이터 유닛(180)이 측정 신호로부터 여전히 비활성화되는 동안 발진기(190)의 이와 같은 잔여 발진의 실제-위상 및 실제-진폭을 결정하며 실제 위상 및 실제 진폭에 적합한 동기화된 설정점 신호를 제어기 메인 유닛에 공급한다. 고조파 설정점 신호 또는 고조파 설정점 신호로부터 추론된 동기화된 제어 신호가 활용가능하게 되는 즉시, 발진기(190)의 잔여 발진의 진폭이 설정 진폭으로 위상 동기 증폭되며 그리고 이러한 공정에서 잔여 발진에 포함된 에너지가 사용되도록 제어기 확장 유닛(600)은 액츄에이터 활성화 유닛(695)을 통해 액츄에이터 유닛(180)을 활성화시킨다.

[0013] 제어기 확장 유닛(600)은 매우 짧은 시간에 모든 고려가능한 초기 상태로부터 시작하여 자신의 설정된 진폭으로

발전기를 설정하며 발전기를 설정된 진폭으로 유지하도록 한다. 발전기(190)가 감쇠 시간 내에 임의의 시간에서 드라이브 또는 액추에이터 유닛(180)을 비활성화시킨 후 설정 진폭으로 발전되도록 한다면 잔여 발전이 특별히 일어난다.

- [0014] 실시예에 따르면 제어 장치(200, 600)와 발전기(190)는 내비게이션 기구(navigation instrument), 특히 가능한 짧은 시간 내 짧은 시간 전력 고장 후 방해받지 않는 동작 상태로 이동되어야 하는 항공기를 위한 내비게이션 기구의 회전 속도 센서로 구성된다. 제어기 확장 유닛(600)은 발전기(190)의 현재 감쇠하는 잔여 발전의 진폭과 위상을 추정한다.
- [0015] 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)은 진폭과 위상을 추정하기 위한 칼만 필터(Kalman filter)를 포함한다. 잔여 발전의 진폭과 위상으로부터 고조파 설정점 신호의 위상 및 진폭 정정 스위치-온을 위한 초기 진폭뿐만 아니라 초기 위상이 내부 신호 실행시간(internal signal runtime)의 고려 하에 추론된다. 짧은 시간동안 스위치-오프 후 재위임(recommissioning)의 주기가 감소되도록 본 잔여 발전이 사용된다. 본 잔여 발전의 진폭이 클수록, 발전기가 설정된 진폭으로 다시 발전하도록 하기 위해 필요한 시간은 더 적다. 따라서, 특히 전력 공급의 짧은 고장 후 제어 장치(200, 600)를 포함하는 시스템의 재위임 시간(램프 업 시간(ramp up time))은 감소된다.
- [0016] 도 1에 예시된 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)은 포착 유닛(capturing unit)(610)과 동기화 유닛(620)을 포함한다. 포착 유닛(610)은 측정 신호로부터 적어도 장치(100)의 활성화 위상에서, 예를 들어 동작 전압을 다시 스위치 온 한 후 발전기(190)의 잔여 발전의 실제 위상 및 실제 진폭을 결정한다. 추가 시스템 파라미터, 예를 들어, 신호 실행시간 및 신호 지연시간(retardation time) 뿐만 아니라 실제 위상 및 실제 진폭으로부터, 포착 유닛(610)은 동기화 정보를 결정하며, 이는 동기화 유닛(620)에 의해 발생된 고조파 설정점 신호의 위상 및 진폭을 표시한다. 동기화 유닛(620)은 동기화 정보를 수신하며 그리고 동기화 정보에 의해 결정된 고조파 설정점 신호를 제어기 메인 유닛(200)으로 전달한다. 예를 들어, 제어기 메인 유닛(200)은 동기화 유닛(620)으로부터 출력된 고조파 설정점 신호와 측정 신호로부터 차 신호(difference signal)를 형성하는 합산 유닛(summation unit)(221)을 포함한다.
- [0017] 실시예에 따르면 고조파 설정점 신호의 공진 각 주파수(ω_r)는 발전기(190)의 공진 각 주파수(ω_0)에 의해 결정되며, 여기서 이러한 주파수는 또한 실제 위상 및 실제 진폭을 위한 추정에 있어서 초기값으로서 통합된다. 다른 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)은 온도 포착 유닛(temperature capturing unit)을 포함하며, 여기서 포착 유닛(610)은 실제 위상 및 실제 진폭의 추정이 발전기(190)의 온도 정정 공진 각 주파수(temperature corrected resonance angular frequency)에 기초하도록 하며, 그리고 여기서 고조파 설정점 신호는 온도 정정 공진 각 주파수로 발전한다.
- [0018] 도 1에 예시된 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)은 주파수 스토리지 유닛(frequency storage unit)(630)을 포함하며, 주파수 스토리지 유닛(630)은 일시적인 간격에서 발전기(190)의 현재의 발전 주파수를 기술하는 주파수 정보를 저장한다. 실시예에 따르면 주파수 스토리지 유닛(630)은 비-휘발성 스토리지(non-volatile storage)에 주기적으로 현재의 공진 각 주파수를 주기적으로 저장한다. 예를 들어, 어플리케이션 전형적인 온도 변화가 이어질 수 있도록 갱신 주파수가 선택된다. 실시예에 따르면 갱신 주파수는 1Hz에서 100Hz 까지의 범위, 예를 들어 약 10Hz이다.
- [0019] 제어기 확장 유닛(600)은 발전기(190)의 잔여 발전의 실제 위상 및 실제 진폭을 추정하기 위한 주파수 정보를 검색하고/하거나 고조파 설정점 신호를 발생하기 위해, 예를 들어 설정점 신호를 발생하는 발전기의 제어를 위해 거기에 저장된 주파수 정보를 사용한다. 재위임을 위한 관련 시간 주기에서, 이것은 발전기(190)의 발전의 감쇠 시간내에 온도를 의미하며 따라서 발전기(190)의 공진 각 주파수는 비-휘발성 스토리지에서 진행중인 동작 동안 마지막 저장된 구동 주파수를 위한 값이 재시작 후 실제 공진 각 주파수 발전기(190)를 위한 충분히 양호한 근사치를 나타내며 그리고 제어를 위한 초기값으로서 사용될 수 있도록 거의 변하지 않는다. 예를 들어, 미소기계적 회전 속도 센서내 발전기는 10s의 범위에서 시상수(time constant)를 갖는다. 힘 전송을 비활성화한 후, 예를 들어 동작 전압의 손실 후, 발전기는 약 30s 후 여전히 설정 진폭의 약 5%로 발전한다.
- [0020] 실시예에 따르면 포착 유닛(610)의 시퀀스 제어는 제어기 확장 유닛(600)이 위상 및 진폭 동기 고조파 설정점 신호를 출력한다면 액추에이터 유닛(180)만이 활성화되도록 액추에이터 활성화 유닛(695)을 제어한다. 실시예에 따르면 액추에이터 활성화 유닛(695)은 스위칭 장치, 예를 들어 디지털 스위치이며, 스위칭 장치는 위상 및 진폭 정정 고조파 설정점 신호가 제어기 메인 유닛(200)에 대해 활용가능한 경우에만 액추에이터 유닛(180)에 제

여기 메인 유닛(200)의 제어기 출력 신호를 공급한다.

[0021] 다른 실시예에 따르면 포착 유닛(610)은 적어도 동기화 정보를 결정한 후 더 이상 필요없는 제어기 확장 유닛(600)의 이와 같은 부분적인 유닛을 비활성화시킨다.

[0022] 도 2a는 포착 유닛(610)의 세부내용을 예시한다. 실시예에 따르면 포착 유닛(610)은 필터 유닛(612)을 포함한다. 예를 들어, 아날로그 측정 신호는 이러한 공정에서 샘플링 시간(T)으로 샘플되며 디지털 측정 신호로 변환된다. 필터링 유닛(612)은 측정 신호의 샘플링 값으로부터, 측정 신호에 포함된 측정 잡음의 변화에 대한 추정값으로부터, 그리고 잔여 발진의 경우 변화를 위한 측정 신호 추정값의 일정한 진폭 오프셋(constant amplitude offset)을 위한 추정값으로부터 예를 들어 추정된 영점(zero point)을 추정한다. 실시예에 따르면 필터 유닛(612)은 이러한 공정에서 예를 들어 주파수 스토리지 유닛(630)으로부터 관측되는 주파수 정보를 사용한다. 제어 유닛(616)은 잔여 발진의 경우에 변화의 추정값으로부터 실제-위상 및 실제-진폭에 기초한 동기화 정보를 결정한다. 이러한 공정에서 제어 유닛(616)은 필터링으로 인한 지연, 요구된 계산 및 순간 발진 지연을 고려한다. 제어 유닛(616)은 이러한 방식으로 계산된 고조파 설정점 신호가 발진기(190)의 실제 발진을 갖는 위상에 존재하는 고조파 설정점 신호의 진폭과 시간(t_0)을 위한 초기 위상(ϕ_0)과 초기값(A_s)을 계산한다.

[0023] 동기화 유닛(620)은 예를 들어 제어가능한 발진 회로(622)를 포함하며, 제어가능한 발진 회로(622)의 위상은 제어가능하다. 실시예에 따르면 또한 발진기의 주파수가 제어가능하다. 예를 들어, 발진기의 주파수는 발진기(190)의 고조파 공진 각 주파수의 온도-중속 변화가 이어질 수 있도록 온도-제어된다. 다른 실시예에 따르면 발진기 회로(622)의 공진 각 주파수(ω_r)는 주파수 스토리지 유닛(630)으로의 최종 진입에 의해 결정된다. 최종 저장된 주파수에 관한 정보는 주파수 스토리지 유닛(630)으로부터 직접적으로 또는 제어 유닛(616)을 통해 발진기 회로(622)에 공급될 수 있다.

[0024] 고조파 설정점 신호의 진폭은 발진기(190)의 발진의 추정된 실제-진폭에 대응하는 초기 진폭값(A_s)에 기초한 시간 함수($r(t)$)에 따라서 발진기(190)의 고조파 발진의 진폭의 설정값까지 램프 업 되도록 제어된다. 예를 들어 제어 유닛(616)은 이러한 공정에서 추정된 실제 진폭의 초기값 및 설정점 진폭의 종료 값(end value)을 갖는 램프 신호(ramp signal)를 출력하며, 시간 경과에서의 램프 신호의 변화 및/또는 램프 신호의 시상수가 실제 위상에 적합하다.

[0025] 배율기 유닛(multiplier unit)(626)은 진폭 신호($A_s \cdot r(t)$)와 발진기 회로(622)의 출력 신호를 곱한다. 합산점(221)에서 고조파 설정점 신호와 측정 신호 간의 차가 형성된다. 실시예에 따르면 일단 그들의 결과가 제어 유닛(616)으로 전송되면 제어 유닛(616)은 필터 유닛(612)을 비활성화시킨다. 필터 유닛(612)의 비활성화는 예를 들어 전력 소모를 감소시킨다. 게다가 실현에 있어서 마이크로프로세서에서 추정을 위해 필요한 계산 용량은 장치의 정상적인 동작동안 필요한 계산 동작을 자유롭게 할 수 있다. 다른 실시예에 따르면, 제어 유닛(616)은 액츄에이터 유닛(180)이 시간(t_0)에서 스위치 되도록 도 1의 액츄에이터 활성화 유닛(695)을 제어한다.

[0026] 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)은 프리-스테이지 유닛(pre-stage unit)(640)을 포함한다. 프리-스테이지 유닛(pre-stage unit)(640)은 측정 신호로부터 잔여 발진의 진폭(A)이 최소 임계치(A_{min}) 아래로 떨어지는지를 판단한다. 만일 그러하다면 발진기는 임의의 중요한 잔여 움직임을 더 이상 수행하지 않으며 그리고 발진기는 자신의 휴지기(resting state)로부터 문제없이 시작될 수 있다는 것이 가정될 것이다. 실시예에 따르면 그 다음 고조파 설정점 신호가 초기 진폭($A_s=A_{min}$)으로 시작된다. 휴지기(state of rest)로부터 시작 동안의 위상은 임의적이며 고조파 설정점 신호의 주파수는 예를 들어 발진기(190)에 대한 온도 및 선형 온도 모델의 지식으로부터 결정될 수 있거나 또는 주파수 스토리지 유닛(630)으로부터 관측될 수 있다. 실시예에 따르면 프리-스테이지 유닛(pre-stage unit)(640)은 여러 발진 주기로부터 최대값(A_{max}) 및 최소값(A_{min})을 결정하며 그리고 값(A_{max} 및 A_{min})으로부터 식 1과 식 2에 따라서 전류 발진 진폭(A)과 전류 발진 오프셋(A_0)을 위한 개략적인 값을 계산한다:

$$(1) \quad A = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2}$$

$$(2) \quad A_0 = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}$$

[0027]

[0028]

예를 들어, 제어기 확장 유닛(600)은 디지털 회로, 예를 들어 주문형 반도체(application specific integrated circuit: ASIC), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor: DSP) 또는 필드 프로그래머블 게이트 어레이(field programmable gate array: FPGA)로서 구현된다. 제어기 확장 유닛(600)과 제어기 메인 유닛(200)은 동일하거나 상이한 컴포넌트로 형성될 수 있다. 다른 실시예에 따르면 제어기 확장 유닛(600)과 제어기 메인 유닛(200)은 완전하거나 부분적으로 프로그램이며, 프로그램은 컴퓨터 또는 마이크로프로세서로부터 수행된다.

[0029]

실시예에 따르면 필터 유닛(612)은 칼만-필터(Kalman-filter)이다. 진폭 및 위상을 위한 값의 추정은 발진기 여러 진폭의 감쇠 시상수에 비해서 빠르게 수행된다. 따라서 실시예에 따르면 발진기의 움직임(y_0)은 비감쇠 고조파 발진(undamped harmonic oscillation)으로 가정된다:

$$(3) \quad y_0(t) = A \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot t)$$

[0030]

[0031]

측정 신호($y^*(t)$)는 실제 발진기 움직임(y_0) 외에 불가피한 측정 잡음(w)과 상수 오프셋(A_0)을 또한 포함한다.

$$(4) \quad y^* = y + A_0 = y_0 + w + A_0$$

[0032]

[0033]

발진기 움직임($y_0(t)$)은 식(5) 내지 식(10)과 더불어 미분 방정식 시스템의 해(solution)로서 고려된다:

$$(5) \quad \dot{y}_0 = A \cdot \omega_{0M} \cdot \cos(\omega_{0M} \cdot t)$$

$$(6) \quad \ddot{y}_0 = -A \cdot \omega_{0M}^2 \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot t)$$

$$(7) \quad x_1 = y_0$$

$$(8) \quad x_2 = \dot{y}_0$$

$$(9) \quad \dot{x}_1 = x_2$$

$$(10) \quad \dot{x}_2 = -\omega_{0M}^2 \cdot x_1$$

[0034]

[0035] 이러한 시스템의 상태의 설명은 다음과 같이 식(11)과 더불어 행렬 표현을 이용해 표시될 수 있다:

$$(11) \quad \dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{0M}^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{x} = \underline{A} \cdot \underline{x}$$

[0036]

[0037] 계차 방정식 시스템(difference equation system)을 획득하기 위해, 상기 시스템은 측정 신호의 사용된 샘플링 T에 대하여 이산화된다. 이것은 라플라스 변환(Laplace transformation)에 의해 표현된다.

$$(12) \quad \underline{\phi}(s) = [s \cdot \underline{I} - \underline{A}]^{-1}$$

$$(13) \quad \underline{\phi}(s) = \begin{bmatrix} s & -1 \\ \omega_{0M}^2 & s \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{s}{s^2 + \omega_{0M}^2} & \frac{1}{s^2 + \omega_{0M}^2} \\ \frac{-\omega_{0M}^2}{s^2 + \omega_{0M}^2} & \frac{s}{s^2 + \omega_{0M}^2} \end{bmatrix}$$

$$(14) \quad \underline{\phi}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{0M} \cdot t) & \frac{1}{\omega_{0M}} \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot t) \\ -\omega_{0M} \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot t) & \cos(\omega_{0M} \cdot t) \end{bmatrix}$$

[0038]

$$(15) \quad \underline{\phi}(T) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{0M} \cdot T) & \frac{1}{\omega_{0M}} \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \\ -\omega_{0M} \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) & \cos(\omega_{0M} \cdot T) \end{bmatrix}$$

[0039]

[0040] 계차 방정식 시스템을 위한 요소는 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$(16) \quad x_1(k+1) = \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot x_1(k) + \frac{1}{\omega_{0M}} \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot x_2'(k)$$

$$(17) \quad x_2'(k+1) = -\omega_{0M} \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot x_1(k) + \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot x_2'(k)$$

[0041]

[0042] 계산 및 구현을 단순히 하기 위해, 다음과 같이 ω_{0M} 을 갖는 상태 변수(state variable)(x_2')를 정상화하는 것이 바람직하다:

$$(18) \quad x_1(k+1) = \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot x_1(k) + \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \frac{x_2'(k)}{\omega_{0M}}$$

$$(19) \quad \frac{x_2'(k+1)}{\omega_{0M}} = -\sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot x_1(k) + \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \frac{x_2'(k)}{\omega_{0M}}$$

[0043]

[0044]

새로운 상태 변수와 더불어

$$(20) \quad x_2 = \frac{x_2'}{\omega_{0M}}$$

[0045]

[0046]

이산화된 시스템의 상태의 설명은 다음과 같이 표시될 수 있다:

$$(21) \quad \underline{x}(k+1) = \underline{\phi}(T) \cdot \underline{x}(k) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{0M} \cdot T) & \sin(\omega_{0M} \cdot T) \\ -\sin(\omega_{0M} \cdot T) & \cos(\omega_{0M} \cdot T) \end{bmatrix} \cdot \underline{x}(k)$$

[0047]

$$(22) \quad y(k) = \underline{c}^T \cdot \underline{x}(k) + w(k) = [1 \quad 0] \cdot \underline{x}(k) + w(k)$$

[0048]

측정 잡음(w)의 변화를 위해 부호(R)가 다음으로 사용된다.

[0049]

실시예에 따른 잡음 측정값(y*)에 기초하여 칼만-필터는 실제 시스템 상태(x)의 추정값(x̂)을 얻기 위해 사용된다. 칼만 필터는 다음 식의 세트로 기술될 수 있다:

$$(23) \quad \underline{P}^*(0) = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{bmatrix} \underline{x}^*(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$(24) \quad \underline{k}(k) = \underline{P}^*(k) \cdot \underline{c} \cdot \{ \underline{c}^T \cdot \underline{P}^*(k) \cdot \underline{c} + R \}^{-1}$$

$$(25) \quad \tilde{\underline{P}}(k) = \underline{P}^*(k) - \underline{k}(k) \cdot \underline{c}^T \cdot \underline{P}^*(k)$$

$$(26) \quad \underline{P}^*(k+1) = \underline{\phi} \cdot \tilde{\underline{P}}(k) \cdot \underline{\phi}^T$$

$$(27) \quad y(k) = y^*(k) - A_0$$

$$(28) \quad \hat{\underline{x}}(k) = \underline{x}^*(k) + \underline{k}(k) \cdot \{ y(k) - \underline{c}^T \cdot \underline{x}^*(k) \}$$

$$(29) \quad \underline{x}^*(k+1) = \underline{\phi} \cdot \hat{\underline{x}}(k)$$

[0050]

[0051] 요소별로 고려함으로써 칼만 필터 방정식은 다음과 같이 식(30) 내지 식(42)으로 표시될 수 있다. 여기서 행렬 \underline{P}^* 와 $\tilde{\underline{P}}$ 의 대칭이 사용되었다:

$$(30) \quad k_1(k) = \frac{P_{11}^*(k)}{P_{11}^*(k) + R}$$

$$(31) \quad k_2(k) = \frac{P_{12}^*(k)}{P_{11}^*(k) + R}$$

$$(32) \quad \tilde{P}_{11}(k) = P_{11}^*(k) - P_{11}^*(k) \cdot k_1(k)$$

$$(33) \quad \tilde{P}_{12}(k) = P_{12}^*(k) - P_{11}^*(k) \cdot k_2(k)$$

$$(34) \quad \tilde{P}_{22}(k) = P_{22}^*(k) - P_{12}^*(k) \cdot k_2(k)$$

$$(35) \quad P_{11}^*(k+1) = \cos^2(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{11}(k) + 2 \cdot \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{12}(k) + \sin^2(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{22}(k)$$

(36)

$$P_{12}^*(k+1) = -\cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{11}(k) + (\cos^2(\omega_{0M} \cdot T) - \sin^2(\omega_{0M} \cdot T)) \cdot \tilde{P}_{12}(k) + \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{22}(k)$$

(37)

$$P_{22}^*(k+1) = \sin^2(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{11}(k) - 2 \cdot \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{12}(k) + \cos^2(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \tilde{P}_{22}(k)$$

$$(38) \quad y(k) = y^*(k) - A_0$$

$$(39) \quad \hat{x}_1(k) = x_1^*(k) + k_1(k) \cdot (y(k) - x_1^*(k))$$

$$(40) \quad \hat{x}_2(k) = x_2^*(k) + k_2(k) \cdot (y(k) - x_1^*(k))$$

$$(41) \quad x_1^*(k+1) = \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \hat{x}_1(k) + \sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \hat{x}_2(k)$$

$$(42) \quad x_2^*(k+1) = -\sin(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \hat{x}_1(k) + \cos(\omega_{0M} \cdot T) \cdot \hat{x}_2(k)$$

[0053]

[0054] 추정된 신호(\hat{x}_1)의 음(negative)의 값으로부터 양의 값(positive value)까지 영 교차(zero crossing)는 적절한 위상에서 진폭 제어의 설정 신호를 시작하기 위해 사용된다. 검출된 영 교차와 일치하도록 시간 제로(time zero)가 선택된다. 그 다음 추정된 신호는 $\sin(\omega_{0M} \cdot T \cdot k)$ 에 비례한다.

[0055]

진폭 제어의 설정점 신호는 초기 위상 0을 갖는 추정된 신호의 영 교차에서 정확히 시작해야 한다. 그러나 T의 임시 해상도를 갖는 샘플링 값만이 활용가능하기 때문에, 일반적으로 영 교차는 정확히 충족되지 않을 수 있다.

실시예에 따르면 이러한 이유 때문에 추가적으로 고려될 위상($\Delta\varphi_0$)은 영 교차 이전의 샘플링 값($\hat{x}_{1,0}$)과 식

(43)에 따른 선형 보간에 의해 영 교차에 뒤 이은 샘플링 값($\hat{x}_{1,1}$)으로부터 결정된다:

$$(43) \quad \Delta\varphi_0 = \frac{\hat{x}_{1,j}}{\hat{x}_{1,j} - \hat{x}_{1,0}} \cdot \omega_{0M} \cdot T$$

[0056]

[0057]

이러한 위상은 단지 후속하는 사이클에서 효과적이 되며, 이는 추가적으로 고려되어야 할 지연을 초래한다. 더욱이, 실현에 따라 추가 지연이 신호 처리 동안(예를 들어, 측정값의 포착 동안) 고려되어야 한다. 다중 샘플링 시간에서 이들 추가 지연은 n_{osc} 인 것으로 가정된다. 그 다음 필요한 초기 위상(φ_0)은 식(44)을 따른다:

$$(44) \quad \varphi_0 = \Delta\varphi_0 + (n_{osc} + 1) \cdot \omega_{0M} \cdot T = \frac{\hat{x}_{1,j}}{\hat{x}_{1,j} - \hat{x}_{1,0}} \cdot \omega_{0M} \cdot T + (n_{osc} + 1) \cdot \omega_{0M} \cdot T$$

[0058]

[0059]

도 2b는 제어 장치의 필터 유닛(612)으로서 칼만-필터의 세부내용을 예시한다.

[0060]

(예를 들어, 3개의 회전 속도 센서로 구성된 관성 측정 유닛(inertial measurement unit: IMU)에서) 공동 전자 장치(common electronic) 때문에 시스템이 여러 발진기로 구성되며 발진기의 구동이 함께 시작되어야 한다면 발진기의 영 교차는 필연적으로 동일한 샘플링 사이클 내에서 발생하지 않아야 한다. 이러한 이유 때문에 그들의 영 교차를 이미 가지고 있는 이들 발진기에 대한 시작 위상은 각각의 추가적인 샘플링 사이클 동안 $\omega_{0M} \cdot T$ 만큼 증가 된다. 이것은 최종 발진기가 자신의 영 교차를 가질 때까지 또한 수행된다.

[0061]

예를 들어, 동기화 조건(측정된 발진기 신호의 영 교차)이 이들 센서 중 적어도 하나를 위해 검출되자마자, 이러한 센서의 구동은 상기-기술된 방법에 따라서 시작된다. 그 다음 나머지 센서의 스위치-온은 또한 그들의 개별적인 동기화 조건이 충족되자마자 수행될 수 있다. 구동에 대한 스위칭을 위한 시간은 이러한 공명에서 개별적으로 모든 센서를 위해 선택된다. 구동의 공통 스위치-온 시간만이 가능한 공통 전자장치를 갖는 다른 실시예에 따라서, 모든 센서를 위한 동기화 조건이 검출될 때까지 기다려진다. 샘플링 사이클당 동기화 조건이 한 차례 평가될 수 있으며, 각각의 센서에 대해, 이의 동기화 조건이 이미 획득되었기 때문에, 샘플링 시간에 대응하는 위상 $\omega_{0M} \cdot T$ 이 각각의 추가적인 샘플링 사이클을 위한 시작 위상에 추가된다.

[0062]

도 3a에 예시된 실시예는 제어기 메인 유닛(200)이 장치(100) 내의 제어기 메인 유닛(200)의 아날로그 실시예에 기초하는 원리의 동작의 모드를 명확히 하기 위해 기술된다. 제어기 메인 유닛(200)은 적분 동작 계수(K_i)를 갖는 적분 전달 요소(222)와 증폭 인자(K_p)를 갖는 비례 전달 요소(224)를 구비하는 고조파 커맨드 변수 또는 고조파 설정점 신호를 위한 PI 제어기(225)를 포함한다. 고조파 커맨드 변수를 위한 PI 제어기(225)는 제어기 입력에서 일정한 진폭의 고조파 발진으로부터 제어기 출력에서 동일한 주파수 및 시간 비례 진폭을 갖는 고조파 발진을 발생한다.

[0063]

도 3b는 PI-제어기(225)의 전달 함수($G_{R0}(s)$)에 의해 시간 비례 진폭을 갖는 고조파 출력 신호($u(t)$)로 사인파 변조 계단 함수 신호($x_d(t)$)의 변환을 예시한다. PI-제어기의 기술된 행위는 후속적으로 기술된 바와 같이 제어기 파라미터(K_i , K_p)의 치수화(dimensioning)를 요구한다. 식(45)은 $x_d(t)=\sigma(t)$ 에 대해 제어기 출력 신호($u(t)$)와 제어기 입력 신호($x_d(t)$) 사이의 관계를 제공한다.

$$(45) \quad u(t) = (K_p + K_i \cdot t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \sigma(t)$$

[0064]

[0065]

제어기 출력 신호($u(t)$)와 제어기 입력 신호($x_d(t)$)의 라플라스-변환(Laplace-transform)은 식(46a)과 식(46b)의 결과를 가져온다:

$$(46a) \quad X_d(s) = \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2}$$

$$(46b) \quad U(s) = K_p \cdot \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} + K_i \cdot \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot s}{(s^2 + \omega_0^2)^2}$$

[0066]

[0067] 따라서 고조파 설정점 신호를 위한 PI-제어기(225)의 전달 함수($G_{R0}(s)$)는 식(47)의 결과를 가져온다:

$$(47) \quad G_{R0}(s) = \frac{U(s)}{X_d(s)} = K_P \cdot \frac{s^2 + 2 \cdot \frac{K_I}{K_P} \cdot s + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2}$$

[0068]

[0069] 연속 PI-제어기(225)를 위한 특성으로는 일반화된 적분 성분으로부터 생기는 $s = \pm j\omega_0$ 에서 켈레 복소수 극(conjugate complex pole)이다. 제어기 입력에서 주파수(ω_0)의 고조파 발전과 함께, PI-제어기(225)는 제어기 출력에서 위상 시프트를 발생하지 않는다. 임의적인 위상(arbitrary phase)의 조절을 위해 제어기 메인 유닛(200)은 따라서 PI-제어기(225)에 직렬로 제어기 불감 시간(controller dead time)(T_R)를 지닌 불감 시간 요소(226)을 추가적으로 포함한다. 따라서 제어기 메인 유닛(200)의 제어기 전달 함수($G_R(s)$)는 식(48)의 결과를 가져온다:

$$(48) \quad G_R(s) = G_{R0}(s) \cdot e^{-T_R \cdot s} = K_P \frac{s^2 + 2 \cdot \frac{K_I}{K_P} \cdot s + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-T_R \cdot s}$$

[0070]

[0071] 제어기 파라미터(K_i , K_p)는 식(48)에 따른 제어기 전달 함수에서 제어기 영(controller zero)이 식(49)에 따른 시스템 전달 함수에서 켈레 복소수 시스템 극을 보상하도록 선택된다.

$$(49) \quad G(s) = \frac{A}{(s + s_0)^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-T_s \cdot s} = G_o(s) \cdot e^{-T_s \cdot s}$$

[0072]

[0073] 제어기 파라미터(K_i , K_p)의 결정을 위해 식(48)과 식(49)의 계수를 동등하게 함으로써 식(50a)과 식(50b)의 결과는 다음과 같다:

$$(50a) \quad 2 \cdot \frac{K_I}{K_P} = 2 \cdot s_0$$

$$(50b) \quad \omega_0^2 = \omega_0^2 + s_0^2$$

[0074]

[0075] 일 실시예에 따르면 발전기(190)의 댐핑(s_0)과 공진 각 주파수(ω_0)는 $s_0 \ll \omega_0$ 이 충족되며 따라서 식(50b)은 매우 양호한 근사치로 충족되도록 선택된다. 식(50a)으로부터 식(50c)은 적분 동작 계수(K_I) 대 증폭 인자(K_P)의 비율을 위한 치수화 규칙에 따라서 결과는 다음과 같다:

$$(50c) \quad \frac{K_I}{K_P} = s_0$$

[0076]

[0077] 정정된 개 루프(open loop)의 전달 함수($G_k(s)$)는 시스템 전달 함수($G_s(s)$)와 제어기 전달 함수($G_R(s)$)의 곱의 결과이다. 켈레 복소수 시스템 극과 켈레 복소수 제어기 영(0)을 위한 표현이 식(50b), (50c)에 따른 적절한 치수화에 의해 상쇄되어 없어지기 때문에, 정정된 개 루프의 전달 함수($G_k(s)$)는 식(51)의 결과를 가져온다:

$$(51) \quad G_k(s) = G_S(s) \cdot G_R(s) = A \cdot K_P \cdot \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-(T_S + T_R) \cdot s}$$

[0078]

[0079]

종래의 PI-제어기와 더불어 피드백 제어에 의해 +90° 에서 -90° 로 위상 점프는 주파수 $\omega=0$ 에서 정정된 개 루프의 위상 주파수 응답에서 발생한다. 대조적으로 고조파 커맨드 변수를 위해 설계된 PI-제어기(225)에서 180° 위상 점프는 주파수(ω_0)에서 발생하지만, 그러나 180° 위상 점프는 반드시 +90° 과 -90° 사이일 필요는 없다. 따라서 일 실시예에 따르면 제어기 불감 시간(T_R)은 따라서 180° 위상 점프가 ω_0 에서 되도록이면 정확히, 예를 들어 식(52a)에 따라 제어기 파라미터를 치수화함으로써 발생하도록 선택된다:

$$(52a) \quad (T_S + T_R) \cdot \omega_0 = \frac{3}{2} \cdot \pi$$

[0080]

[0081]

위상 시프트가 90° 보다 작은 ω_0 에서 단독으로 시스템 불감 시간(T_S)에 의해 발생 된다면, 180° 의 위상 비율이 인버팅 제어기(inverting controller)에 의해 또한 발생 될 수 있다. 이 경우에 ω_0 에서 제어기 불감 시간(T_R)에 의해 발생된 위상과 시스템 불감 시간(T_S)에 의해 각각 발생 된 위상은 단지 $\pi/2$ 에 더해져야 한다. 그 다음 제어기 불감 시간(T_R)을 위한 치수화 규칙은 다음과 같다:

$$(52b) \quad (T_S + T_R) \cdot \omega_0 = \frac{\pi}{2}$$

[0082]

[0083]

정정된 개 루프의 주파수 응답으로부터 폐 루프의 안정도 특성은 나이퀴스트 판별법(Nyquist criterion)을 통해 추론될 수 있다. 정정된 개 루프는 범용 적분기 및 시스템 불감 시간(T_S)과 제어기 불감 시간(T_R)의 조합으로 이루어진다. 식(52a) 또는 식(52b)에 따른 제어기 불감 시간(T_R)의 적절한 치수화에 의해 주파수(ω_0)에서 위상 특성은 보다 낮은 주파수 $\omega < \omega_0$ 에 대해 +90° 와 보다 높은 주파수 $\omega > \omega_0$ 에 대해 -90° 사이의 180° 점프를 갖는다. 폐 루프의 전달 함수($G_w(s)$)는 정정된 개 루프($G_k(s)$) 중 하나로부터 생긴다:

$$(53) \quad G_w(s) = \frac{G_k(s)}{1 + G_k(s)}$$

[0084]

[0085]

제어기 불감 시간(T_R)이 식(52a)에 따라서 결정될 때 폐 루프는 정정된 개 루프의 중심지(locus)가 $0 \leq \omega < \omega_0$ 에 대해 점 -1을 둘러싸지 않거나 포인트 -1을 통해 실행되지 않을 때 정확히 안정적이다.

[0086]

대조적으로 제어기 불감 시간(T_R)이 식(52b)에 따라서 결정되고 PI-제어기(225)가 180° 위상을 발생할 때 폐 루프는 네거티브 실수축(negative real axis)에서 정정된 개 루프의 중심지가 -1 보다 큰 값에서 시작할 때 정확히 안정적이다.

[0087]

간격 $0 \leq \omega < \omega_0$ 에서 절대값 특성은 이득 크로스오버 주파수에서 0dB 라인을 교차하며, 여기서 이득 크로스오버 주파수에서 ω_0 에 대한 주파수 거리는 폐루프의 대역폭을 결정한다. 증폭 인자(K_p)를 통해 절대값 주파수 응답이나 이득 크로스오버 주파수가 폐루프의 결과적인 대역폭이 조절가능하도록 종좌표(ordinate)를 따라서 이동될 수 있다. 일 실시예에 따르면 증폭 인자(K_p)는 대역폭이 안정성 기준(stability criteria)에 의해 주어진 허용치(limits) 내에서 최대가 되도록 선택된다.

[0088]

요약하면, 제어기 메인 유닛(200)은 고조파 커맨드 변수를 위한 PI-제어기(225)를 포함하며, PI-제어기(225)는 고조파 설정점 신호를 공급받으며 증폭 인자(K_p)를 갖는 비례 전달 요소(224)와 적분 동작 계수(K_I)를 갖는 적분

전달 요소(222)를 포함한다. 적분 동작 계수(K_I)와 증폭 인자(K_p)는 s -평면에서 PI-제어기(225)의 제어기 전달 함수의 영과 시스템 전달 함수를 기술하는 발전기(190)의 켈레 복소수 극이 보상되도록 선택된다.

[0089] 일 실시예에 따르면 여기서의 방향의 편향에 대한 발전기(190)의 댐핑(s_0)은 발전기(190)의 공진 각 주파수(ω_0)보다 훨씬 작으며 sec^{-1} 에서 적분 동작 계수(K_I) 대 증폭 인자(K_p)의 비율은 댐핑(s_0)에 대략적으로 응답한다. 더욱이, 증폭 인자(K_p)는 결과적인 대역폭이 각각의 안정성 요구조건에 대해 가능한 한 높도록 선택될 수 있다. 그 다음 적분 동작 계수(K_I)는 식(12c)에 따라서 댐핑(s_0)과 증폭 인자(K_p)로부터 종속적으로 선택된다.

[0090] 일 실시예에 따르면 액츄에이터(180)로부터 형성된 시스템, 발전기(190) 및 센서 유닛(170)은 시스템 불감 시간(T_s)을 가지며 그리고 제어기 메인 유닛(200)은 PI-제어기(225)에 직렬로 작용하는 제어기 불감 시간(T_R)을 갖는 불감 시간 요소(226)를 갖는다. 제어기 불감 시간(T_R)은 발전기(190)의 공진 주파수(ω_0)에 종속적으로 선택되며 시스템 불감 시간(T_s)은 주파수(ω_0)에서 정정된 개루프의 위상 주파수 응답이 보다 높은 주파수를 향해 $+90^\circ$ 에서 -90° 까지 위상 점프를 갖도록 선택된다.

[0091] 본 실시예의 제1 변형에 따르면 고조파 커맨드 변수를 위한 PI-제어기는 부호를 뒤집지 않으며 제어기 불감 시간(T_R)은 공진 각 주파수(ω_0)의 곱 및 시스템 불감 시간(T_s)과 제어기 불감 시간(T_R)의 합이 결과적으로 $3\pi/2$ 를 갖도록 선택된다. 본 실시예의 다른 변형에 따르면 PI-제어기(225)는 부호를 반전시키며, 각각 약 180° 위상을 이동시키며, 그리고 공진 각 주파수(ω_0)에서 제어기 불감 시간(T_R)과 시스템 불감 시간(T_s)에 의해 영향을 받는 위상은 공진 각 주파수(ω_0)의 곱 및 시스템 불감 시간(T_s)과 제어기 불감 시간(T_R)의 합이 결과적으로 $\pi/2$ 를 갖도록 단지 $\pi/2$ 에 더해진다.

[0092] 제어기 메인 유닛(200)이, 보다 높은 주파수 변환 곱의 댐핑을 위해 저역 통과 필터(low pass filter)를 요구하는, 베이스밴드 변환(baseband transformation)를 제공하지 않음에 따라서, 제어기 메인 유닛(200)은 상당히 보다 넓은 대역으로 형성될 수 있다. 제어기 메인 유닛(200)은 베이스밴드 변환을 제공하는 비교 제어기 보다 방해에 보다 빨리 반응한다.

[0093] 도 4a 및 도 4b는 제어기 메인 유닛(200)이 증폭기 인자(K_p)를 갖는 이산 비례 전달 요소(324)와 적분 동작 계수(K_I)를 갖는 이산 적분 전달 요소(322)와 함께 고조파 설정점 신호를 위한 이산 PI-제어기(325)를 갖는다. 실시예에 따르면 센서 유닛(170)에 의해 출력된 아날로그 측정 신호는 샘플링 유닛(321)에 의해 샘플링 시간(T)을 갖도록 샘플되며 이산 PI-제어기(325)를 위해 디지털 입력 신호로 변환된다. 다른 실시예에 따르면 센서 유닛은 디지털 측정 신호를 미리 출력한다.

[0094] 액츄에이터(180), 발전기(190) 및 센서 유닛(170)을 포함하는 시스템이 시스템 불감 시간(T_s)을 갖는 실시예에 따라서, 제어기 메인 유닛(200)은 제어기 불감 시간(T_R)을 갖는 이산 PI-제어기(325)에 직렬로 정렬된 불감 시간 요소(326)를 포함한다. 다음으로 제어기 불감 시간(T_R) 뿐만 아니라 시스템 불감 시간(T_s)은 식(54a)과 식(54b)에 따라서 샘플링 시간(T)의 곱으로서 표현된다:

[0095] (54a), (54b)
$$T_s = \beta_s \cdot T \text{ 및 } T_R = \beta_D \cdot T.$$

[0096] 이러한 공정에서 제어기 불감 시간(T_R)은 정정된 개루프가 공진 각 주파수(ω_0)에서 보다 높은 주파수를 향해 $+90^\circ$ 에서 -90° 까지 위상 점프를 갖도록 결정된다.

[0097] 일 실시예에 따르면 적분 동작 계수(K_I) 대 증폭 인자(K_p)의 비율은 제어기 전달 함수의 제어기 영(zero)이 s -평면에서 시스템 전달 함수의 켈레 복소수 시스템 극을 보상하도록 조절된다. 다른 실시예에 따르면 제어기 파라미터는 등가 베이스밴드 시스템(equivalent baseband system)의 페루프의 전달 함수가 이중 실 고유치(double real eigenvalue)를 갖도록 선택된다. 예를 들어 제어기 메인 유닛(200)은 디지털 회로, 예를 들어 ASIC(application specific integrated circuit), DSP(digital signal processor) 또는 FPGA(Field Programmable Gate Array)로서 또는 컴퓨터 또는 마이크로프로세서를 위한 프로그램으로서 구현된다.

[0098] 도 4b는 도 4a에 따른 고조파 커맨드 변수를 위한 이산 PI-제어기(325)의 z -전달 함수($G_{R0}(z)$)를 예시한다. 전달 함수($G_{R0}(z)$)는 PI-제어기(325)가 계단 함수($\sigma(k)$)에 의해 변조된 고조파 발전을 포함하는 입력 신호(x_d

(k))로부터 식(55)에 의해 표현된 바와 같이 제어기 출력 신호(u(k))로서 시간 비례 진폭(time proportional amplitude)을 갖는 동일한 주파수의 고조파 발진을 발생하도록 결정된다:

[0099] (55)
$$u(k) = (K_p + K_I \cdot T \cdot k) \cdot \sin(\omega_0 \cdot T \cdot k) \cdot \sigma(k)$$

[0100] 입력 함수(x_d(k))와 출력 함수(U(z))는 식 (56a) 및 식(56b)에 따라서 z-변환의 결과를 가져온다:

$$X_d(z) = \frac{z \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1}$$

[0101] (56a)

[0102] (56b)

$$U(z) = K_p \cdot \frac{z \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1} + K_I \cdot \frac{T \cdot z^3 \cdot \sin(\omega_0 \cdot T) - T \cdot z \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{(z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1)^2}$$

[0103] 그 다음 고조파 커맨드 변수를 위한 이산 PI-제어기(325)의 전달 함수(G_{R0}(z))는 식(56c)의 결과를 가져온다:

[0104] (56c)

$$G_{R0}(z) = \frac{U(z)}{X_d(z)} = \frac{(K_p + K_I \cdot T) \cdot z^2 - 2 \cdot K_p \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + K_p - K_I \cdot T}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1}$$

[0105]

[0106] 범용 적분 부분 때문에 이와 같은 이산 PI-제어기는 $z = e^{\pm j \cdot \omega_0 \cdot T}$ 에서 극을 가지며 입력에서 주파수(ω₀)의 고조파 발진과 함께 출력에서 위상 이동을 발생하지 않는다. 그럼에도 불구하고 임의적인 위상을 조절할 수 있도록 하기 위해, 제어기 메인 유닛(200)은 일 실시예에 따라서 지연(β_D)을 갖는 불감 시간 요소(326)를 구비한다. 그 다음 불감 시간 요소(326)와 이산 PI-제어기(325)를 갖는 제어기 메인 유닛(200)의 제어기 전달 함수(G_{R0}(z))는 식(57)의 결과를 가져온다:

[0107] (57)

$$G_R(z) = G_{R0}(z) \cdot z^{-\beta_D} = \frac{(K_p + K_I \cdot T) \cdot z^2 - 2 \cdot K_p \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + K_p - K_I \cdot T}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1} \cdot z^{-\beta_D}$$

[0108]

[0109] 따라서 식(49)에 따른 연속 제어 시스템의 모델이 이산화되어야 한다. 이러한 목적을 위해 식(49)에 따른 제어 시스템의 전달 함수(G(s))에서 시스템 불감 시간(T_s)은 최초 표현에서 식(54a)에 따른 샘플링 시간(T)의 곱으로서 표현된다:

$$G(s) = \frac{A}{(s + s_0)^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-\beta_s \cdot T_s} = G_0(s) \cdot e^{-\beta_s T_s}$$

[0110] (58)

[0111] 일반적으로 전달 함수(G(s))를 갖는 연속 제어 시스템의 이산화된 모델의 계단 전달 함수(G(z))는 식(59)에 따라서 계산될 수 있다:

[0112]

(59)

$$G(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\}$$

[0113]

식(59a) 내지 식(59(e)에 따라서 이어지는 축약

$$(59a) \quad K_s = \frac{A}{s_0^2 + \omega_0^2}$$

$$(59b) \quad b_1 = 1 - e^{-s_0 \cdot T} \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) - \frac{s_0}{\omega_0} \cdot e^{-s_0 \cdot T} \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)$$

$$(59c) \quad b_2 = e^{-2 \cdot s_0 \cdot T} - e^{-s_0 \cdot T} \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) + \frac{s_0}{\omega_0} \cdot e^{-s_0 \cdot T} \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)$$

$$(59d) \quad a_1 = 2 \cdot e^{-s_0 \cdot T} \cdot \cos(\omega_0 \cdot T)$$

$$(59e) \quad a_2 = -e^{-2 \cdot s_0 \cdot T}$$

[0114]

[0115]

과 함께, 발진기(190)를 위한 계단 전달 함수(G(z))는 식(60)에 따라서 식(58)과 식(59)의 결과를 가져온다:

$$G(z) = K_s \cdot \frac{b_1 \cdot z + b_2}{z^2 - a_1 \cdot z - a_2} \cdot \frac{1}{z^{\beta_s}} = G_0(z) \cdot \frac{1}{z^{\beta_s}}$$

[0116]

(60)

[0117]

본 발명의 일 실시예에 따르면 제어기 불감 시간(T_R)은 정정된 개루프의 위상 주파수 응답이 공진 각 주파수(ω₀)에서 보다 높은 주파수를 향해 +90° 으로부터 -90° 까지 위상 점프를 갖도록 결정된다. 정정된 개루프를 위한 z-전달 함수는 식(57)에 따른 제어기 전달 함수(G_R(z))와 식(58)에 따른 시스템 전달 함수(G(z))의 곱으로부터 식(51)과 유사한 결과가 된다:

$$G_K(z) = G_0(z) \cdot G_{R0}(z) \cdot z^{-(\beta_s + \beta_D)}$$

[0118]

(61)

[0119]

식(52a) 및 식(52b)에 유사하게 제어기 파라미터(β_D)는 정정된 개루프(G_R(z))의 전달 함수가 공진 각 주파수(ω₀)에서 +90° 으로부터 -90° 까지 위상 점프를 갖도록 선택된다:

$$(\beta_s + \beta_D + \frac{1}{2}) \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{3}{2} \cdot \pi$$

[0120]

(62a)

[0121]

식(52a)과 비교해 볼 때 발명자는 연속 제어기에 대하여 ½ ω₀T의 추가적인 부분을 발견했으며, 이것은, 추가적인 절반 샘플링 사이클의 이산화로 다시 추적될 수 있는, 지연을 표현한다. 시스템 불감 시간(β_S · T)에 의해 발생된 위상 시프트와 이산화(discretization)는, 각각, 공진 각 주파수(ω₀)에서 90° 보다 작으면, 연속 제어기의 경우에 있어서 180° 의 위상 점프가 제어기에서 - 부호에 의해 발생될 수 있기 때문에, 이산화에 의해 발생

된 위상, 제어기 불감 시간($\beta_D \cdot T$) 그리고 시스템 불감 시간($\beta_S \cdot T$)은 단지 $\pi/2$ 가 될 필요가 있다. 따라서, β_D 를 위한 치수화는 본 경우에 있어서 식(62b)의 결과를 가져온다:

$$(\beta_S + \beta_D + \frac{1}{2}) \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{\pi}{2}$$

[0122] (62b)

[0123] 식(62a)과 식(62b)은 정상적으로 β_D 에 대해 비-적분 값을 초래한다. 일반적으로, 제어기 파라미터(β_D)는 식(63)에 따라서 적분 부분(n_D)와 $a_D > 1$ 인 나머지 $1/a_D$ 를 갖는다:

$$\beta_D = n_D + \frac{1}{a_D}$$

[0124] (63)

[0125] 일 실시예에 따르면 적분 부분(n_D)은 n_D 로 표시된 길이에 따라서 지연 체인(retardation chain)에 의해 근사될 수 있으며 샘플링 사이클의 분수($1/a_D$)은 식(64)에 따라 1차의 전대역 통과 필터(all-pass filter)에 의해 근사될 수 있다:

$$z^{-\frac{1}{a_D}} \approx \frac{\alpha_D \cdot z + 1}{z + \alpha_D}$$

[0126] (64)

[0127] 일 실시예에 따르면 전대역 통과 필터의 파라미터(α_D)는 식(64)에 따른 정확한 전달 함수($z^{-\frac{1}{a_D}}$)의 위상과 전대역 통과 근사치의 위상이 가능한 한 멀리 공진 각 주파수(ω_0)에서 일치하도록 선택된다. 이들 조건으로부터 식(65)은 전대역 통과 필터의 파라미터(α_D)를 위한 조건 방정식을 가져온다:

[0128] (65)

$$-\frac{\omega_0 \cdot T}{a_D} = \arctan\left(\frac{\alpha_D \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{\alpha_D \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) + 1}\right) - \arctan\left(\frac{\sin(\omega_0 \cdot T)}{\cos(\omega_0 \cdot T) + \alpha_D}\right)$$

[0129] 일 실시예에 따르면 α_D 는 내포된 인터벌을 통해 식(66)에 따른 함수의 영(zero)이 결정되도록 결정된다.

[0130] (66)

$$f(\alpha_D) = \arctan\left(\frac{\alpha_D \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{\alpha_D \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) + 1}\right) - \arctan\left(\frac{\sin(\omega_0 \cdot T)}{\cos(\omega_0 \cdot T) + \alpha_D}\right) + \frac{\omega_0 \cdot T}{a_D}$$

[0131] 식(63)과 식(66)에 따라서 n_D 와 α_D 의 결정은 추가 제어기 파라미터(K_P 및 K_I)를 결정하는 방식으로부터 독립적이다.

[0132] 도 4a에 따라서 이산 PI-제어기(325)의 치수화를 포함하는 제어기 유닛을 제조하기 위한 방법의 일 실시예에 따라서, 이산 PI-제어기(325)의 증폭 인자(K_P)와 적분 동작 계수(K_I)는 식(57)에 따른 제어기 전달 함수($G_R(z)$)에서 제어기 영이 식(60)에 따른 제어기 전달 함수($G(z)$)의 결레 복소수 시스템 극을 보상하도록 선택된다. z^1 에 대하여 식(57)과 식(60)의 동등 계수는 식(67)에 따른 치수화 규칙을 가져온다:

[0133] (67)

$$K_P = K_I \cdot T \cdot \frac{e^{-s_0 \cdot T}}{1 - e^{-s_0 \cdot T}}$$

[0134] z^0 에 대하여 동등 계수는 식(68)에 따른 치수화 규칙을 가져온다:

[0135] (68)

$$K_P = K_I \cdot T \cdot \frac{1 + e^{-2 \cdot s_0 \cdot T}}{1 - e^{-2 \cdot s_0 \cdot T}}$$

[0136] 일 실시예에 따르면 발진기(190)의 댐핑(s_0)과 샘플링 시간(T)은 식(69a)과 식(69b)에 따라서 근사치가 충분히 정확하도록 $s \cdot T \ll 1$ 이 유지되도록 선택된다:

[0137] (69a)

$$e^{-s_0 \cdot T} \approx 1 - s_0 \cdot T$$

[0138] (69b)

$$e^{-2 \cdot s_0 \cdot T} \approx 1 - 2 \cdot s_0 \cdot T$$

[0139] 식(69a) 및 식(69b)에 따른 근사치와 더불어 식(67) 및 식(68)에 따른 2개의 독립적인 치수화 규칙은 식(70)에 따라서 단일 치수화 규칙에 의해 근사화될 수 있다:

[0140] (70)

$$K_P = K_I \cdot T \cdot \frac{1 - s_0 \cdot T}{s_0 \cdot T}, \quad \text{각각} \quad K_I \cdot T = K_P \cdot s_0 \cdot T$$

[0141] 일 실시예에 따르면 적분 동작 계수(K_I) 대 증폭 인자(K_P)의 비율은 발진기의 댐핑(s_0)과 동일하거나 거의 동일하게 설정된다. 제어기 영에 의해 시스템 극의 보상을 포함하는 기술된 방법에 따라서 이산 PI-제어기(325)의 치수화는 폐 루프의 양호한 기준 작용을 유도한다.

[0142] 도 5a 및 도 5b는 제어기 메인 유닛(200)이 제어기 확장(328)을 갖는 일 실시예를 지칭하며, 제어기 확장(328)은 도 4a에 따라서 PI-제어기(325) 및 불감 시간 요소(326)에 직렬로 정렬된다. 이어서 제어기 확장(328)의 구조는 베이스밴드를 위한 아날로그 제어기 확장으로부터 추론된다.

[0143] 예를 들어 발진기(190)는 ω_0 에서 공진 각 주파수 이외에 공진 각 주파수(ω_0)를 초과하거나 초과하지 않는 기계적인 구조 공진과 같은 추가 공진을 가질 수 있다. 제어기 확장(328)은 이들 추가 공진들이 보다 강하게 감쇄되도록 형성된다. 이것을 위해 원하는 대역폭을 넘어서는 킥 주파수(kink frequency)에서 여분의 극을 갖는 1차의 지연 요소(PT_1 -요소)가 베이스밴드에서 종래의 PI-제어기에 더해질 것이다. 이러한 추가적인 제어기 극은 제어기가 더 이상 고주파수를 위한 비례 요소로서 작용하지 않지만, 제어기의 절대값 주파수가 20db/decade로 떨어지는 것에 영향을 준다. 베이스밴드에서 이와 같은 확장의 계단 응답($y(k)$)은 식(71)에 따른 입력 신호($u(k)$)로서 계단 함수($\sigma(k)$)를 야기한다:

[0144] (71)

$$y(k) = \left(1 - e^{-\frac{k \cdot T}{T_1}}\right) \cdot \sigma(k)$$

[0145] 입력 신호($u(k)$)의 z 변환($u(z)$)은 계단 신호의 z 변환에 대응한다:

[0146] (72a)

$$U(z) = \frac{z}{z-1}$$

[0147] 출력 신호(y(k))의 z 변환(Y(z))은 식(72b)의 결과를 가져온다:

[0148] (72b)

$$Y(z) = \frac{z}{z-1} - \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_1}}}$$

[0149] 따라서 베이스밴드에서 이와 같은 제어기 확장의 전달 함수(G_{RE0}(z))를 위한 식(47)에 유사하게

[0150] (73)

$$G_{RE0}(z) = \frac{1 - e^{-\frac{T}{T_1}}}{z - e^{-\frac{T}{T_1}}}$$

[0151] 의 결과를 가져온다.

[0152] 일 실시예에 따르면 대역통과 대역에서 제어기 확장(328)은 이제 제어기 확장(328)이 동일한 주파수의 고조파 발진과 더불어 계단 함수에 의해 변조된 공진 각 주파수(ω₀)의 고조파 발진의 입력에 응답하도록 베이스밴드에서 제어기 확장에 유사하게 구성되며, 여기서 베이스밴드 확장의 계단 응답은 도 5b의 우측에 예시된 바와 같이 엔벨로프(envelope)를 정의한다.

[0153] 도 5b는 엔벨로프가 대역통과 대역에서 이산 제어기 확장의 전달 함수(G_{RE0}(z))에 따라서 계단 응답의 결과를 가져오는 부호 발진(sign oscillation)과 더불어 출력 신호 위에 부호 변조 계단 함수(u(k))의 변환을 예시한다. 전달 함수(G_{RE0}(z))와 더불어 대역통과 대역에서 제어기 확장(328)의 입력 신호는 식(74)의 결과를 가져온다:

[0154] (74)

$$u(k) = \sin(\omega_0 \cdot T \cdot k) \cdot \sigma(k)$$

[0155] 제어기 출력 신호(y(k))는 엔벨로프가 베이스밴드에서 PT₁-제어기 확장의 계단 응답에 대응하는 고조파 발진이다:

[0156] (75)

$$y(k) = (1 - e^{-\frac{kT}{T_1}}) \cdot \sin(\omega_0 \cdot T \cdot k) \cdot \sigma(k)$$

[0157] z-변환(U(z) 및 Y(z))은 식(76a)과 식(76b)의 결과를 가져온다:

[0158] (76a)

$$U(z) = \frac{z \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1}$$

$$Y(z) = z \cdot \frac{\sin(\omega_0 \cdot T)}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + 1} - z \cdot \frac{e^{-\frac{T}{T_1}} \cdot \sin(\omega_0 \cdot T)}{z^2 - 2 \cdot e^{-\frac{T}{T_1}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + e^{-2\frac{T}{T_1}}}$$

[0159] (76b)

[0160] 대역통과 대역을 위한 제어기 확장(328)의 전달 함수($G_{RE}(z)$)는 식(77)의 결과를 가져온다:

$$G_{RE}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{(1 - e^{-\frac{T}{T_1}}) \cdot z^2 - e^{-\frac{T}{T_1}} \cdot (1 - e^{-\frac{T}{T_1}})}{z^2 - 2 \cdot e^{-\frac{T}{T_1}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot T) \cdot z + e^{-2\frac{T}{T_1}}}$$

[0161] (77)

[0162] 전달 함수($G_{RE}(z)$)를 갖는 제어기 확장(328)은 중간대역 주파수로서 공진 주파수(ω_0)를 갖는 1차의 대역통과와 유사하게 이산 PI-제어기(325)에 직렬로 작용한다. 식(78)에 따라서 공진 각 주파수(ω_0) 근처 좁은 영역내 공진 각 주파수(ω_0)에서 정정된 개루프의 절대값과 위상은 변하지 않고 유지된다.

$$\omega_0 - \frac{1}{T_1} \leq \omega \leq \omega_0 + \frac{1}{T_1}$$

[0163] (78)

[0164] 이러한 영역에서 정정된 개 루프의 절대값 주파수 응답은 거의 영향을 받지않는 반면에, 이러한 영역 밖에서 가능한 원하지 않는 공진이 하락 될 수 있도록 절대값의 상당한 하락(drop)이 발생한다.

[0165] 도 6a 내지 도 6c는 추가 실시예에 따른 미소기계적 회전 속도 센서(500)를 지칭한다. 회전 속도 센서(500)는 제1 스프링 요소(541)에서 매달리는 여기 유닛(590), 예를 들어, 여기 프레임을 포함한다. 제1 스프링 요소(541)는 여기 유닛(590)을 도 6b에 예시된 지지 기관(550)에 단단히 연결되는 부착 구조물(551)에 결합한다. 스프링 요소(541)는 단지 약하게 여기(501)의 방향을 따라 지지 기관(550)에 대하여 여기 유닛(590)의 편향을 감쇠시킨다. 제2 스프링 요소(542) 위에 검출 유닛(580)은 여기 유닛에 결합되며 그리고 주로 여기(501)의 방향에 직교인 검출 방향(502)을 따라 여기 유닛(590)에 대하여 움직일 수 있다. 여기(501)의 방향과 검출 방향(502)은 지지 기관(550)의 표면에 나란하게 구동한다. 제1 및 제 2 스프링 요소(541, 542)는 예를 들어 작은 교차 단면을 갖는 빔형 구조이며, 작은 교차 단면은 결합 될 구조의 각각의 사이에 형성된다.

[0166] 일 실시예에 따르면 회전 속도 센서(500)는 제1 힘 전달 및 센서 유닛(561, 571), 예를 들어, 정전력 전달기와 센서를 포함하며, 이는 여기(501)의 방향을 따라 발진에 대해 여기 유닛(590)과 검출 유닛(580)으로부터 형성된 시스템을 여기시키며/시키거나 여기 유닛(590)의 대응하는 편향을 포착할 수 있다. 회전 속도 센서(500)는 제2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572), 예를 들어, 정전력 전달기와 센서를 포함하며, 이는 검출 유닛(580)에 대해 작용하며/하거나 자신의 편향을 포착할 수 있다. 일 실시예에 따르면 제2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572) 중 적어도 하나는 제2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572)이 방해에 의해 야기되거나 또는 측정 변수에 의해 야기된 폐 루프 시스템의 경우에 검출 유닛(580)의 편향에 대응하도록 제어된다.

[0167] 회전 속도 센서(500)의 동작 동안 제1 힘 전달 및 센서 유닛(561, 571)은 예를 들어 여기(501)의 방향을 따라 발진에 대해 여기 유닛(590)을 여기시키며, 여기서 검출 유닛(580)은 여기 유닛(590)과 함께 대략 동일한 진폭과 위상으로 움직인다. 정렬이 기관 평면에 직교인 축 근처에서 회전될 때 코리올리 힘이 여기 유닛(590)과 검출 유닛(580)에 작용하며, 이는 검출 방향(502)으로 여기 유닛(590)에 대하여 검출 유닛(580)을 편향시킨다. 제 2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572)은 편향 유닛(580)의 편향을 포착하며 따라서 기관 평면에 직교인 축 근처에서 회전 운동을 포착한다.

[0168] 일 실시예에 따라서 힘 전달 및 센서 유닛(561, 572, 562, 572) 중 적어도 하나의 유닛은 액츄에이터 및 상기 기술된 장치(200) 중 하나의 의미 내에서 발진기로서 여기 유닛(590)이나 검출 유닛(580)으로서 작용한다.

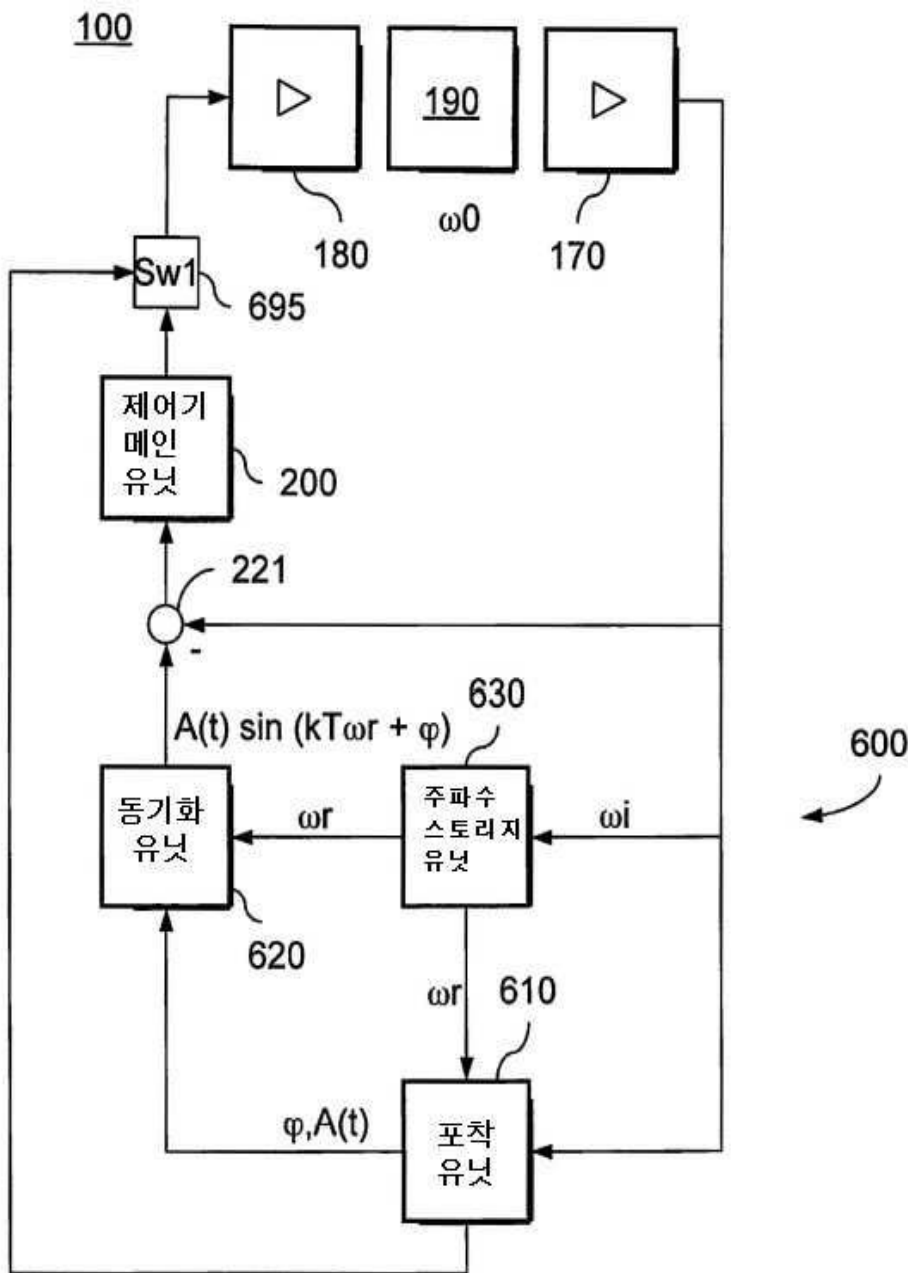
- [0169] 예를 들어 회전 속도 센서(500)의 도 6c에 예시된 일 실시예에 따라서 제1 힘 전달 및 센서 유닛(561, 571)은 여기(501)의 방향을 따라 공진 각 주파수(ω_0)와 더불어 발진에 대해 여기 유닛(590)을 여기시킨다. 그 다음 상기 논의에 따른 제어 루프에서 검출 방향(502)을 따라 검출 유닛(580)(x2-발진기)의 발진은 예를 들어 전술한 바와 같이 고조파 힘 신호에 대응할 수 있다.
- [0170] x2-발진기의 편향은 공통 가동 전극 위 전하(charge)를 통해 포착될 수 있으며, 공통 가동 전극은 여기 유닛(590) 위에 형성된다. 전하는 부착 구조(551)를 통해 측정될 수 있다. 전하 증폭 유닛(521)은 측정된 신호를 증폭한다. 비록 전형적으로 복조 유닛이 측정된 신호를 제어기 유닛으로 공급되기 전에 예를 들어 공진 각 주파수(ω_0)에 대응하는 주파수와 함께 측정된 신호를 변조하지만, 발명의 실시예는 상기 논의에 따라서 상기 논의된 의미 내에서 측정 신호로서 비-복조된 고조파 신호를 제어기 유닛(520)으로 공급하기 위해 제공된다.
- [0171] 발진에 효과적인 댐핑(s_0)은 공진 각 주파수(ω_0)보다 상당히 작다. 신호는 여기 프레임에 걸쳐서 각각 측정되었으며 여기 유닛(590)은 여기(501)의 방향을 따라 여기 유닛(590)의 움직임을 부분적으로 재생한다. 소스가 회전 속도 센서(500)의 바깥에 존재할 수 있는 방해, 또는, 폐 루프 시스템에서, 측정 변수는, 각각, 발진을 중첩하며 자신의 진폭을 변조한다. 제어기 유닛(520)은 변조된 고조파 신호로부터 제2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572)이 각각 방해 또는 측정 변수에 의해 영향을 받는 편향에 대응하는 것에 영향을 끼치는 제2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572)을 위한 제어 신호를 추론한다. 증폭 유닛(522)은 제2 힘 전달 및 센서 유닛(562, 572)의 전극을 위한 적절한 리셋 신호로 제어 신호를 변환한다. 제어기 유닛(520)은 상기 기술된 각각의 제어기 메인 유닛(200)과 제어기 확장 유닛(600) 중 하나를 포함한다.
- [0172] 도 7에 예시된 회전 속도 센서(505)는 여기 유닛(590)과 검출 유닛(580) 사이에 정렬된 코리올리 유닛(585)에 의해 도 6a에 예시된 회전 속도 센서(500)와 다르다. 코리올리 유닛(585)을 여기 유닛(590)에 결합하는 제2 스프링 요소(542)는 검출 방향(502)으로 여기 유닛(590)에 비례하여 코리올리 유닛(585)의 편향을 감안한다. 지지 기판(550)에 의해 부분적으로 연결될 수 있는 제3 스프링 요소(543)는 검출 유닛(580)이 검출 방향(502)을 따라 코리올리 유닛(585)의 움직임을 따를 수 있는 이와 같은 코리올리 유닛(585)에 검출 유닛(580)을 결합하지만, 여기(501)의 방향을 따라 움직임을 따를 수 없다. 검출 유닛(580)은 여기(501)의 방향에 대하여 고정되며 검출 방향(502)을 따라 움직일 수 있다.
- [0173] 다른 실시예에 따라서 제1 또는 제2 힘 전달 및 센서 유닛(561, 562, 571, 572) 중 적어도 하나의 유닛은 검출 유닛(580)이 액추에이터 그리고 여기 유닛(590) 또는 검출 유닛(580)으로서 작용하거나 검출 유닛(580)뿐만 아니라 여기 유닛(590)이 상기 기술된 장치 중 하나에 따라서 발진기로서 작용하며, 이는 대역통과 제어기의 원리에 따라서 동작 된다. 이러한 공정에서 힘 전달 및 센서 유닛(561 및 571)은 x1-발진기를 위해 각각 힘 전달 및 센서 유닛으로서 작용하며 힘 전달 및 센서 유닛(562 및 572)은 x2-발진기를 위해 각각 힘 전달 및 센서 유닛으로서 작용한다.
- [0174] 다른 실시예에 따른 회전 속도 센서는 도 6a 또는 도 7에 예시된 바와 같이 정렬 중 2개의 정렬을 포함하며, 2개의 정렬은 여기 유닛이 서로에 대하여 고정 상태에서 반대되는 발진을 수행하도록 서로에 결합된다. 다른 실시예는 여기 유닛 중 모든 2개의 유닛이 고정 상태에서 반대되는 발진을 수행하도록 서로에 결합되는 도 6a 또는 도 7에 예시된 바와 같이 정렬 중 4개의 정렬을 갖는 회전 속도 센서에 관련된다.
- [0175] 추가 실시예는 도 1, 도 2a 및 도 2b에 예시된 바와 같이 제어기 메인 유닛(200)과 제어기 확장 유닛(600)의 조합을 갖는 회전 속도 센서 장치를 지칭한다. 제어기 메인 유닛(200)은 고조파 설정점 신호를 위해 적어도 하나의 PI-제어기(225, 325)를 포함하며, PI-제어기는 비례 전달 요소(224, 324)에 나란히 정렬된 비례 전달 요소(224, 324)와 적분 전달 요소(222, 322)를 가지며, 여기서 제어기 메인 유닛(200)의 제어기 유닛은 두 개의 전달 요소(222, 224, 322, 324)와 연결된다. 고조파 설정점 신호를 위한 PI-제어기(225, 325)의 전달 함수는 s-평면내 제어기 각 주파수(ω_r)에서 또는 z-평면내 $e^{\pm j\omega_r T}$ 에서 켈레 복소수 극을 가지며, 여기서 T는 PI-제어기(325)의 이산 입력 신호의 샘플링 시간이며 그리고 ω_r 은 0보다 크다.
- [0176] 이를 위하여 적분 전달 요소(222, 322)의 적분 동작 계수와 비례 전달 요소(224, 324)의 증폭 인자는, 제어기 입력에서 계단 함수에 의해 변조된 제어기 각 주파수(ω_r)의 고조파 입력 신호와 더불어 승인시, 고조파 커맨드 변수를 위한 PI-제어기(225, 325)가 제어기 출력에서 상승 진폭을 갖는 제어기 각 주파수(ω_r)의 고조파 발진을 발생하기에 적합하도록 선택된다.

[0177] 고조파 설정점 신호를 위한 PI-제어기(225, 325)는 또한 고정적인 설정점 신호를 위한 종래의 PI-제어기로부터 파생된 제어기를 위해 취해질 수 있으며 각각 s-평면 또는 z-평면내 극의 위치만큼 고조파 설정점 신호와 다르다.

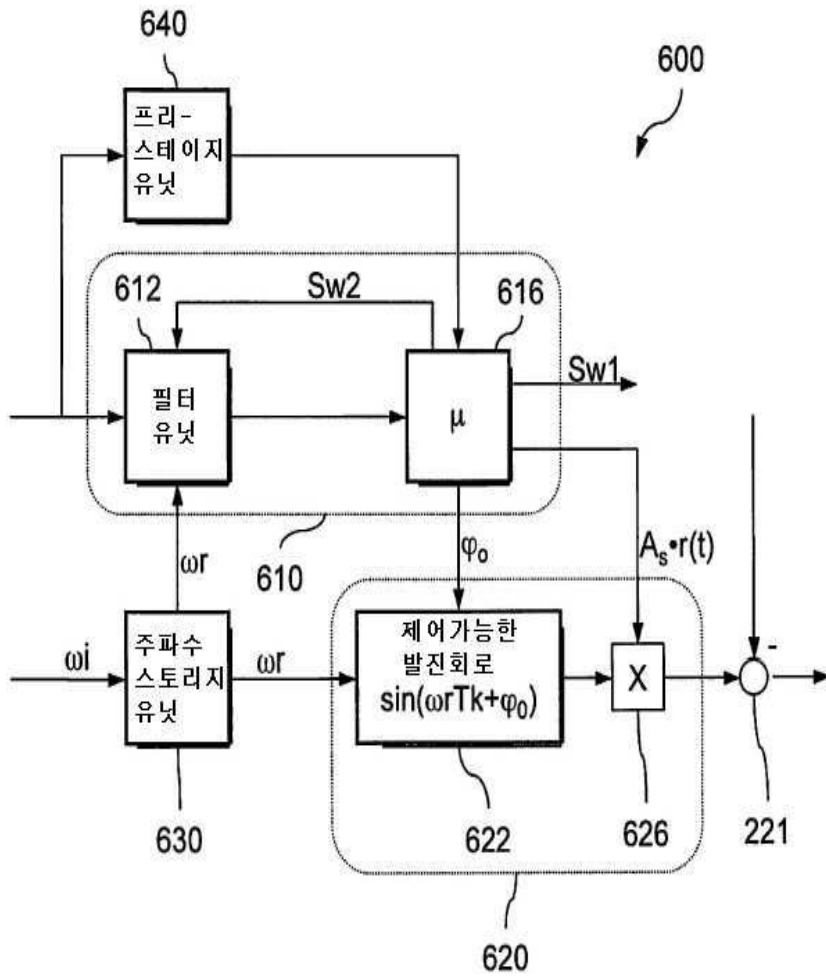
[0178] 도 8은 고조파 커맨드 변수와 더불어 제어 장치를 동작하기 위한 방법을 지칭한다. 센서 유닛은 측정 신호를 발생하며, 측정 신호는 여기(802)의 방향을 따라 발전기의 편차를 나타낸다. 비활성화된 액츄에이터 유닛(804)에서 발전기의 잔여 발전의 실제 위상 및 실제-진폭의 추정(estimation)에 기초하여, 제어기 확장 유닛은 동등한 진폭을 갖는 위상 동기 고조파 설정점 신호를 발생한다. 제어기 메인 유닛은 액츄에이터 유닛이 고조파 발전으로부터 발전기의 편차에 대해 대응할 수 있도록 측정 신호와 동기 설정점 신호로부터 액츄에이터를 위한 동기화된 제어 신호를 발생한다. 동기화된 제어 신호에서 또는 동기화된 제어 신호를 제공한 후 액츄에이터 유닛이 활성화된다(806).

도면

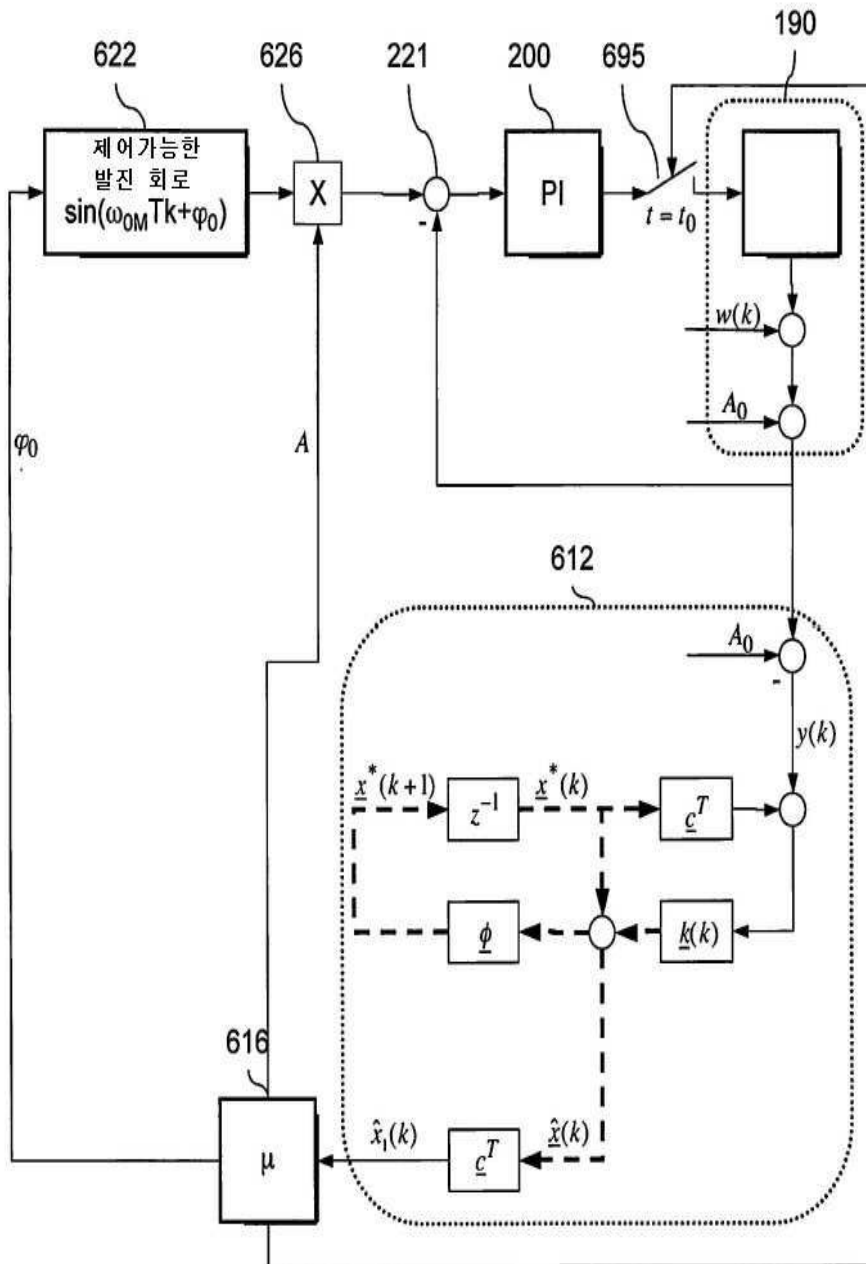
도면1



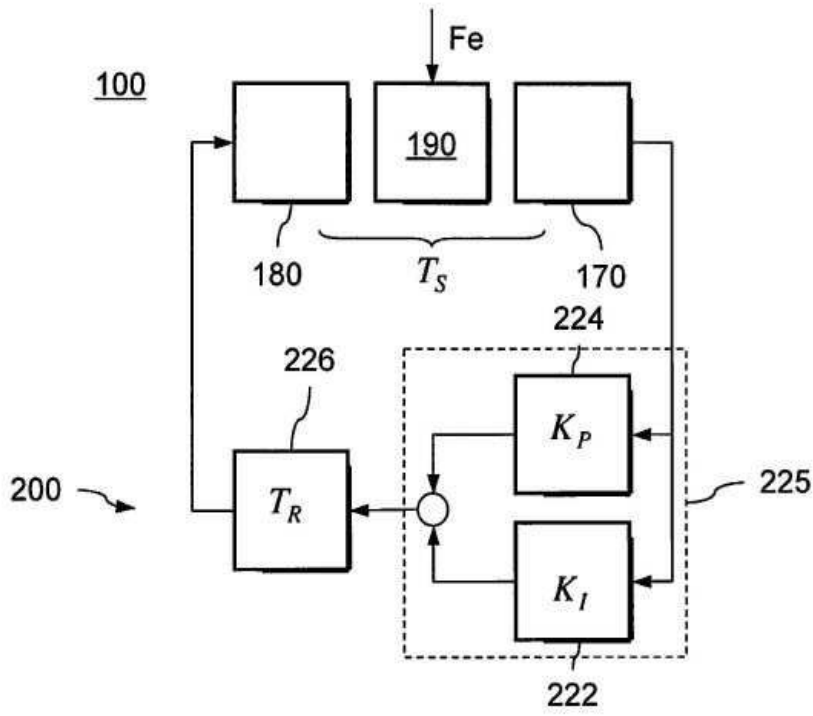
도면2a



도면2b



도면3a

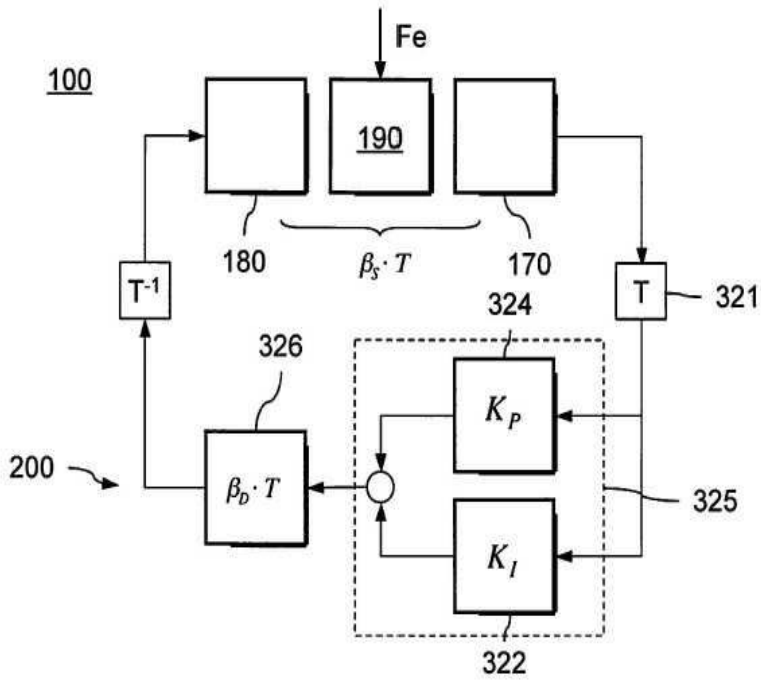


$$\frac{K_I}{K_P} \approx s_0 \quad v_z = \text{sign}(K_I)$$

$$(T_S + T_R) \cdot \omega_0 = \frac{3}{2} \pi \quad \text{for } v_z = +1$$

$$(T_S + T_R) \cdot \omega_0 = \frac{1}{2} \pi \quad \text{for } v_z = -1$$

도면3b

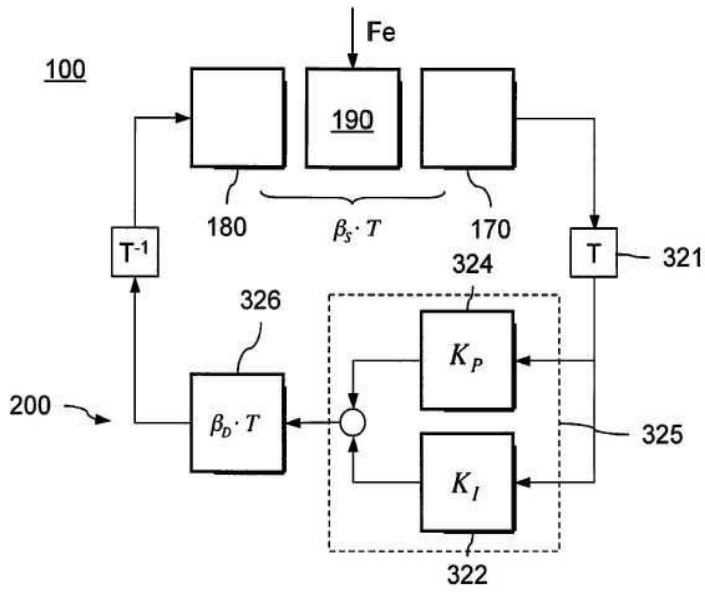


$$\frac{K_I}{K_P} \approx s_0 \quad v_z = \text{sign}(K_I)$$

$$\left(\beta_S + \beta_D + \frac{1}{2} \right) \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{3}{2} \pi \quad \text{for } v_z = +1$$

$$\left(\beta_S + \beta_D + \frac{1}{2} \right) \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{1}{2} \pi \quad \text{for } v_z = -1$$

도면4a

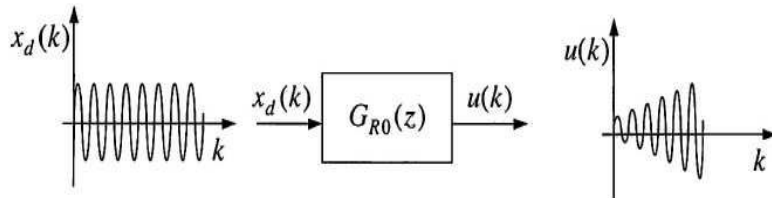


$$\frac{K_I}{K_P} \approx s_0 \quad v_z = \text{sign}(K_I)$$

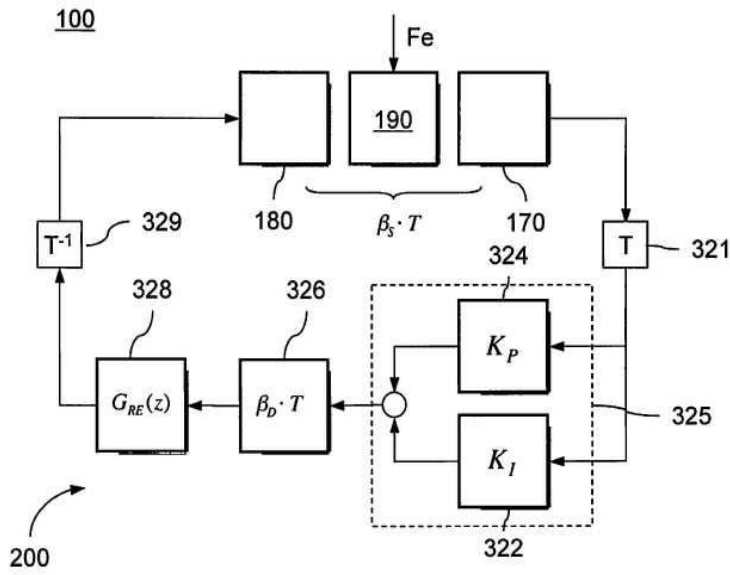
$$\left(\beta_S + \beta_D + \frac{1}{2} \right) \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{3}{2} \pi \quad \text{für } v_z = +1$$

$$\left(\beta_S + \beta_D + \frac{1}{2} \right) \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{1}{2} \pi \quad \text{für } v_z = -1$$

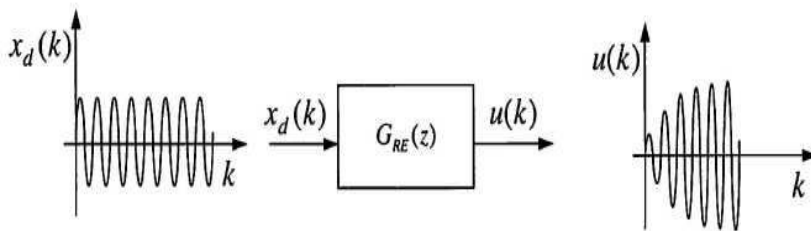
도면4b



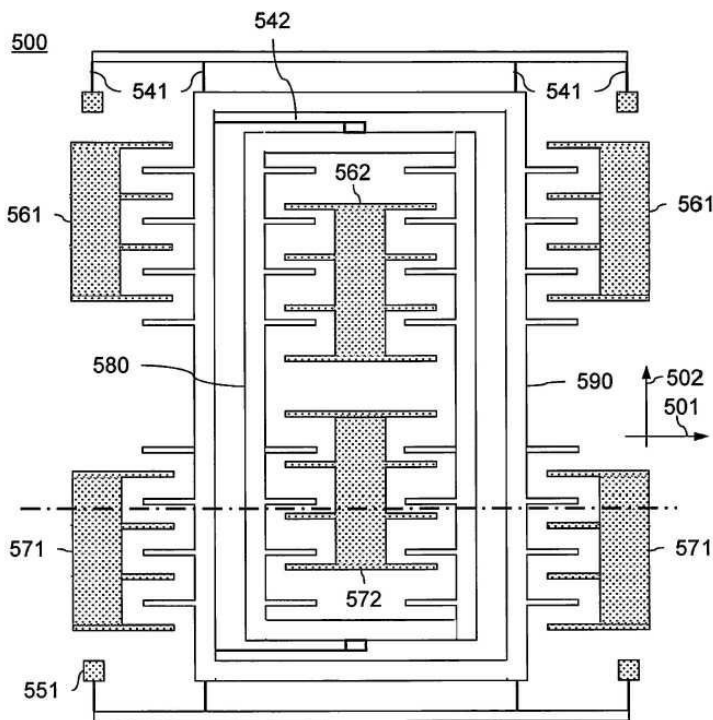
도면5a



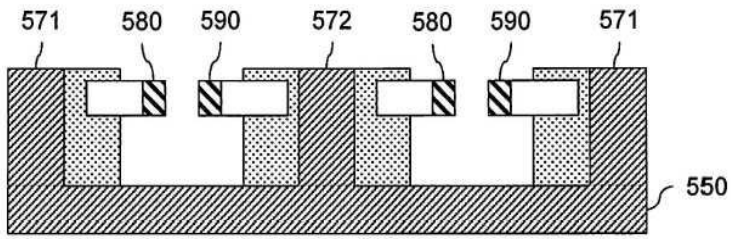
도면5b



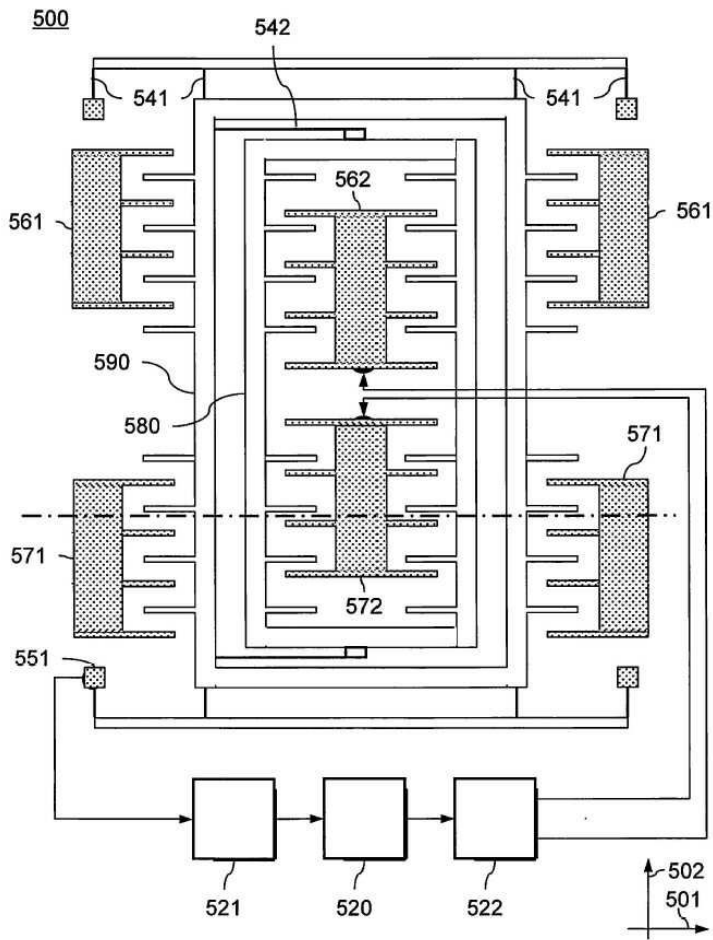
도면6a



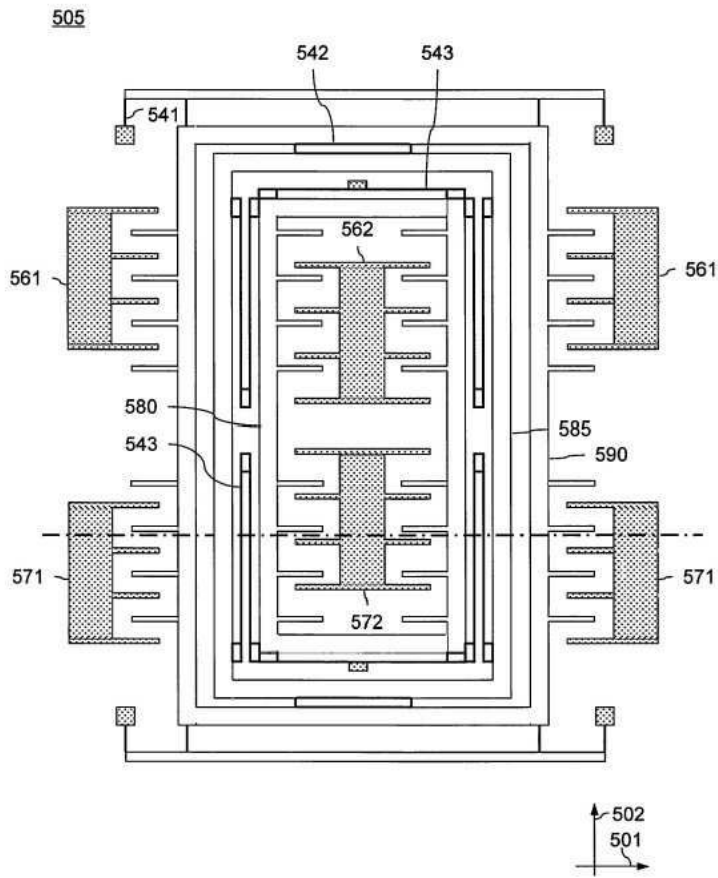
도면6b



도면6c



도면7



도면8

