

명세서

발명의 명칭: 그리드포밍 축발전기 기반 선

박 전력 관리 방법 및 장치와 이를 이용하는 선박

기술분야

- [1] 본 발명은 그리드포밍 축발전기에 기반한 선박 전력 계통 관리 기술에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 그리드포밍 축발전기의 전력을 선박 전력 계통에 안정적으로 투입하고 축발전기를 선박 전력 계통에 안정적으로 연계시키기 위한 선박 전력 관리 방법 및 장치와 이를 이용하는 선박에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 선박의 탄소 배출량을 줄이기 위해 대체 에너지 자원을 활용한 선박 추진 및 전력 생산에 대한 요구가 증가하고 있다. 대체 에너지 자원으로는 배터리, 연료전지, 태양열발전 등이 각광을 받고 있으며, 기존의 동력 장치의 프로펠러 축에 발전기를 설치하는 축 발전기도 대체 에너지원의 일환으로 최근 많은 선박에 적용되고 있다.
- [3] 선박 전력 관리 시스템(ship power management system)은 복수의 동기발전기들과 선박의 프로펠라 축 상의 축발전기에 연결된 전력변환기의 동작을 제어하도록 구성된다(도 1 참조). 선박 전력 계통의 제어시스템은 수 십년간 동기발전기 기반으로 정형화되어 있으며, 산업 특성상 검증된 전체 제어 시스템의 구조 변경보다는, 대체에너지 자원의 전력변환기가 기존 동기발전기를 모사하는 방식이 선호된다. 따라서, 대체에너지를 위한 전력변환기는 기존의 동기발전기의 제어 방식, 즉 전압 드롭 및 주파수 드롭 특성을 모사해야 한다.
- [4] 한편, 대체에너지 자원의 전력변환기 대부분에서는 전력변환기의 그리드포밍 전압 제어 루프에 의한 임피던스와, 출력단에 공통 모드 노이즈 차단을 위한 절연변압기가 적용되기 때문에, 회로 내 임피던스에 의한 전압 강하가 발생하게 된다. 하지만, 부하 전류에 따라 동기발전기와 동일한 전압 드롭 특성을 모사하기가 불가능하며, 현재 이를 보완해 줄 수 있는 이차 전압 제어가 선박 전력 제어 시스템에 존재하고 있지 않다.
- [5] 따라서, 선박 전력 계통에서 그리드포밍 축발전기 등의 대체에너지 자원을 사용할 때, 병렬 운전 간 무효전력 공급 문제 및 단독 운전 시 전압 강하 문제가 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 적절한 방안이 요구되고 있다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [6] 본 발명은 종래 기술의 요구에 부응하기 위해 도출된 것으로, 본 발명의 목적은 그리드포밍 축발전기에 연결된 전력변환기의 전압 제어에 가상 임피던스를 적용하여 전력변환기가 외란에 대해 충분한 관성을 가질 수 있고, 축발전기의 발생

전력을 선박 전력 계통에 효과적으로 투입할 수 있는 선박 전력 관리 방법 및 장치를 제공하는데 있다.

- [7] 본 발명의 다른 목적은 새로운 자체 이차 전압 제어 알고리즘을 이용하여 선박 전력 계통의 축발전기에 연결된 전력변환기에서 축발전기 시스템 내 전압 강하를 효과적으로 보상할 수 있는 선박 전력 관리 방법 및 장치를 제공하는데 있다.
- [8] 본 발명의 또 다른 목적은, 별도의 이차 전압 제어기가 존재하지 않는 선박 전력 관리 시스템에서도 축발전기의 병렬 운전 또는 단독 운전 모드에 따라 축발전기에 연결된 전력변환기를 이용하여 자체 이차 전압 제어를 수행할 수 있는, 선박 전력 관리 방법 및 장치를 제공하는데 있다.
- [9] 본 발명의 또 다른 목적은, 전술한 선박 전력 관리 방법 또는 선박 전력 관리 장치를 이용하는 선박을 제공하는데 있다.

과제 해결 수단

- [10] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 측면에 따른 그리드포밍 축발전기 기반 선박 전력 관리 장치는, 그리드포밍 축발전기 기반 선박 전력 계통을 위한 선박 전력 관리 장치로서, 축발전기 계통 투입 시퀀스를 구비하는 적어도 하나의 명령; 및 상기 적어도 하나의 명령을 저장하는 메모리에 연결되어 상기 적어도 하나의 명령을 수행하는 프로세서를 포함한다. 상기 프로세서는, 상기 적어도 하나의 명령에 의해, 선박 전력 계통에 축발전기를 전기적으로 연결하는 단계; 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계; 상기 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계; 상기 직류단 캐패시터의 전류를 이용하여 상기 축발전기를 자화시키는 단계; 상기 축발전기를 자기발전시키는 단계; 상기 전력변환기의 그리드측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계; 상기 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제어하여 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터를 충전시키는 단계; 및 상기 축발전기가 선박 전원 계통의 분산형 발전기로서 동작하도록 상기 전력변환기를 통해 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계를 수행한다.
- [11] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명의 다른 측면에 따른 그리드포밍 축발전기 기반 선박 전력 관리 방법은, 선박 전력 계통에 축발전기를 전기적으로 연결하는 단계; 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계; 상기 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계; 상기 직류단 캐패시터의 전류를 이용하여 상기 축발전기를 자화시키는 단계; 상기 축발전기를 자기발전시키는 단계; 상기 전력변환기의 그리드측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계; 상기 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제어하여 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터를 충전시키는 단계; 및 상기 축발전기가 선박 전원 계통의

분산형 발전기로서 동작하도록 상기 전력변환기를 통해 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계를 포함한다.

- [12] 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계는 상기 그리드측 컨버터를 제어하여 상기 직류단 캐패시터의 정격 전압의 적어도 일부를 충전하는 것을 포함할 수 있다. 충전된 직류 전압은 상기 전력변환기의 제어에 의해 유지될 수 있다.
- [13] 상기 선박 전력 관리 방법(이하 간략히 '상기 방법'이라고도 한다)은 상기 축발전기를 자화시키는 단계 전에 상기 그리드측 컨버터를 그리드피딩 모드로 제어하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [14] 상기 방법은, 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터가 정격 전압 또는 기설정 전압으로 충전되면, 상기 그리드측 컨버터를 상기 그리드피딩 모드에서 그리드포밍 모드로 전환시키는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [15] 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계는 미리 설정되거나 실시간 수집되는 측정값들에 기초하여 결정되거나 선택된 제어 드롭 계수에 따라 상기 그리드측 컨버터의 전압 제어를 수행하는 것을 포함할 수 있다.
- [16] 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계는 피드백된 출력 전압 레퍼런스와 미리 설정된 고정형 가상 임피던스 각각을 출력 전압 레퍼런스에서 감산 연산하여 전압 제어기에 전달하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [17] 상기 가상 임피던스는 가상 인덕턴스와 가상 저항을 더하여 구성될 수 있다.
- [18] 상기 방법은, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 및 자속 제어 중 적어도 하나 이상을 수행하여 상기 직류단 캐패시터의 전압을 유지하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [19] 상기 방법은, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 및 자속 제어 중 적어도 하나 이상을 수행하여 상기 선박 전력 계통의 공통 결합점에 상기 전력변환기를 연계시키는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [20] 상기 방법은, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 또는 자속 제어를 위해 고정자 저항 오차를 포함하도록 정의되는 준정정 라푸노프 함수를 이용하여 상기 축발전기에 대한 고정자 저항을 적응적으로 추정하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [21] 상기 추정하는 단계는, 상기 준정정 라푸노프 함수의 도함수를 이용하여 방정식을 풀 때, 방정식 해답의 빠른 수렴을 위해 저역통과필터를 이용한 적분 제어를 수행하는 것을 더 포함할 수 있다.
- [22] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명의 또 다른 측면에 따른 선박 전력 관리 방법을 이용하는 선박은, 그리드포밍 축발전기 기반 선박 전력 계통을 위한 선박 전력 관리 방법을 이용하는 선박으로서, 축발전기 계통 투입 시퀀스를 구현하는 적어도 하나의 명령을 저장하는 메모리와 상기 메모리에 연결되어 상기 적어도 하나의 명령을 수행하는 프로세서를 구비하는 선박 전력 관리 장치; 및 상기 선박 전력 관리 장치가 탑재된 선체를 포함한다. 여기서, 상기 프로세서는, 상기 적어도 하나의 명령에 의해, 선박 전력 계통에 축발전기를 전기적으로 연결하

는 단계; 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계; 상기 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계; 상기 직류단 캐패시터의 전류를 이용하여 상기 축발전기를 자화시키는 단계; 상기 축발전기를 자기발전시키는 단계; 상기 전력변환기의 그리드측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계; 상기 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제어하여 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터를 충전시키는 단계; 및 상기 축발전기가 선박 전원 계통의 분산형 발전기로서 동작하도록 상기 전력변환기를 통해 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계를 수행한다.

- [23] 상기 선박에서 상기 프로세서는, 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계에서, 상기 그리드측 컨버터를 제어하여 상기 직류단 캐패시터의 정격 전압의 적어도 일부를 충전하고, 상기 전력변환기의 제어를 통해 충전된 직류단 전압을 유지할 수 있다.
- [24] 상기 선박에서 상기 프로세서는, 상기 축발전기를 자화시키는 단계를 수행하기 전에 상기 그리드측 컨버터를 그리드피딩 모드로 제어하는 단계를 더 수행할 수 있다.
- [25] 상기 선박에서 상기 프로세서는, 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터가 정격 전압 또는 기설정 전압으로 충전되면, 상기 그리드측 컨버터를 상기 그리드피딩 모드에서 그리드포밍 모드로 전환시키는 단계를 더 수행할 수 있다.
- [26] 상기 선박에서 상기 프로세서는, 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계에서, 미리 설정되거나 실시간 수집되는 측정값들에 기초하여 결정되거나 선택된 제어 드롭 계수에 따라 상기 그리드측 컨버터의 전압 제어를 수행할 수 있다.
- [27] 상기 선박에서 상기 프로세서는 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계에서, 피드백된 출력 전압 레퍼런스와 미리 설정된 고정형 가상 임피던스 각각을 출력 전압 레퍼런스에서 감산 연산하여 전압 제어기에 전달하는 단계를 더 수행할 수 있다.
- [28] 상기 선박에서 상기 프로세서는, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 및 자속 제어 중 적어도 하나 이상을 수행하여 상기 직류단 캐패시터의 전압을 유지하는 단계를 더 수행할 수 있다.
- [29] 상기 선박에서 상기 프로세서는, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 또는 자속 제어를 위해 고정자 저항 오차를 포함하도록 정의되는 준정정 라푸노프 함수를 이용하여 상기 축발전기에 대한 고정자 저항을 적응적으로 추정하는 단계를 더 수행할 수 있다.
- [30] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명의 또 다른 측면에서는 전술한 선박 전력 관리 장치가 탑재된 선체를 포함하는 선박을 제공할 수 있다.

발명의 효과

[31] 본 발명에 의하면, 선박에 적용되는 그리드포밍 축발전기의 효율적인 계통 연계 방법과, 선박 전력 계통의 전력 품질 향상을 위한 자체 이차 전압 제어 방법을 제공할 수 있다. 특히, 축발전기에 연결된 전력변환기의 그리드피딩과 그리드포밍 제어 모드들 간의 전환시 안정성 확보를 위해 가상 임피던스 기반의 그리드포밍 제어 모드를 제공할 수 있고, 이를 통해 농형 유도기기 기반 축발전기의 효율적인 전력 계통 투입을 구현할 수 있다.

[32] 또한, 본 발명에 의하면, 축발전기에서 동기발전기의 전압 드롭 특성 및/또는 주파수 드롭 특성을 모사할 때, 그리드포밍 전력변환기 및 연계 장비(절연변압기 등)에서 발생하는 전압 강하를 해결하기 위해 전력변환기에서 병렬 운전과 단독 운전 각각에 대해 미리 설정된 전압 기준에 맞게 자체 이차 전압 제어를 수행함으로써 선박 전력 계통에서 축발전기가 효과적으로 그리드포밍 동작을 수행하도록 할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[33] 도 1은 본 발명의 일실시예에서 따른 그리드포밍 축발전기 기반 선박 전력 관리 방법을 적용할 수 있는 선박 전력 계통에 대한 개략도이다.

[34] 도 2는 도 1의 선박 전력 계통에 채용할 수 있는 선박 전력 관리 시스템(ship power management system)의 전압 드롭 특성을 설명하기 위한 그래프이다.

[35] 도 3은 도 1의 선박 전력 계통에 채용할 수 있는 선박 전력 관리 시스템의 주파수 드롭 특성을 설명하기 위한 그래프이다.

[36] 도 4는 도 1의 선박 전력 계통에 채용할 수 있는 선박 전력 관리 장치에 대한 개략적인 블록도이다.

[37] 도 5는 도 4의 선박 전력 관리 장치에 채용할 수 있는 농형 유도 발전기 제어 과정을 설명하기 위한 블록도이다.

[38] 도 6은 도 5의 선박 전력 관리 장치에 의해 수행될 수 있는 SCIG 제어 단계들에 대한 흐름도이다.

[39] 도 7은 도 6의 SCIG 제어 단계들 중 제1 작동모드(Phase I)를 설명하기 위한 블록도이다.

[40] 도 8은 도 6의 SCIG 제어 단계들 중 제2 작동모드(Phase II)를 설명하기 위한 블록도이다.

[41] 도 9는 도 6의 SCIG 제어 단계들 중 제3 작동모드(Phase III)를 설명하기 위한 블록도이다.

[42] 도 10은 도 6의 SCIG 제어 단계들에 적용할 수 있는 적응적 자속 제어 과정을 설명하기 위한 블록도이다.

[43] 도 11은 도 4의 선박 전력 관리 장치에 채용할 수 있는 그리드포밍 전력변환기의 가상 임피던스 기반 전압 제어 과정을 설명하기 위한 블록도이다.

[44] 도 12는 본 발명의 또 다른 실시예에서 따른 선박 전력 관리 방법에 채용할 수 있는 자체 이차 전압 제어 구조를 설명하기 위한 예시도이다.

- [45] 도 13a 내지 도 13c는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법의 안정도 확인 모델에 대한 특정 인자 수정에 따른 근궤적을 나타낸 도면들이다.
- [46] 도 14는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법에 채용할 수 있는 시뮬레이션 제어 구성도이다.
- [47] 도 15a 내지 도 15b는 도 14의 시뮬레이션 제어 구성에 따른 그리드피딩과 그리드포밍의 제어모드 전환 간 유효전력 및 무효전력에 대한 시뮬레이션 결과들을 나타낸 그래프들이다.
- [48] 도 16a 및 도 16b는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법을 실제 선박에 적용하여 그리드피딩과 그리드포밍의 제어모드 전환 간 유효전력 및 무효전력에 대한 시뮬레이션 결과들을 나타낸 그래프들이다.
- [49] 도 17a 및 도 17b는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법에서 자체 이차 전압 제어를 적용하기 전과 후의 그리드포밍 전력변환기가 동기발전기와 병렬 운전할 때의 역률, 유효전력 및 무효전력을 나타낸 그래프들이다.
- [50] 도 18a 및 도 18b는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법에서 자체 이차 전압 제어를 적용하기 전과 후의 그리드포밍 전력변환기가 동기발전기와 병렬 운전할 때의 기준 전압과 출력 전압을 나타낸 그래프들이다.
- [51] 도 19a 및 도 19b는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법에서 그리드포밍 전력변환기의 단독 운전 시의 역률, 유효전력 및 무효전력을 나타낸 그래프들이다.
- [52] 도 20a 및 도 20b는 본 실시예의 선박 전력 관리 방법에서 그리드포밍 전력변환기의 단독 운전 시의 기준 전압과 출력 전압을 나타낸 그래프들이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [53] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [54] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. '및/또는'이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.
- [55] 본 출원의 실시예들에서, 'A 및 B 중에서 적어도 하나'는 'A 또는 B 중에서 적어도 하나' 또는 'A 및 B 중 하나 이상의 조합들 중에서 적어도 하나'를 의미할 수 있다. 또한, 본 출원의 실시예들에서, 'A 및 B 중에서 하나 이상'은 'A 또는 B 중에서

하나 이상' 또는 'A 및 B 중 하나 이상의 조합들 중에서 하나 이상'을 의미할 수 있다.

- [56] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 '연결되어' 있다거나 '접속되어' 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 '직접 연결되어' 있다거나 '직접 접속되어' 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.
- [57] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, '포함한다' 또는 '가진다' 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [58] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가진 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [59] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예를 보다 상세하게 설명하고자 한다. 본 발명을 설명함에 있어 전체적인 이해를 용이하게 하기 위하여 도면상의 동일한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고 동일한 구성요소에 대해서 중복된 설명은 생략한다.
- [60] 도 1은 본 발명의 일 실시예에서 따른 그리드포밍 축발전기를 가진 선박 전력 계통의 전력 관리 방법(이하 간략히 '선박 전력 관리 방법')을 적용할 수 있는 선박 전력 계통에 대한 개략도이다.
- [61] 도 1을 참조하면, 선박(1000)에 탑재되는 선박 전력 계통은 동기발전기들(synchronous generators, 100, 110, 120), 스위치보드(130), 축발전기(shaft generator, SG, 150), 전력변환기(power converter, 200), 절연변압기(230) 및 회로차단기(circuit breaker, 250)를 포함할 수 있다.
- [62] 동기발전기들(100, 110, 120)은 유지 보수를 고려하여 동일한 제조사의 제품이 설치될 수 있다. 동기발전기들(100, 110, 120)은 셋 모두가 분산 전원들로서 동시에 사용될 수 있고, 어느 하나 또는 둘만이 분산 전원으로써 사용될 수 있다.
- [63] 또한, 동기발전기들(100, 110, 120)은 선박 전력 계통에서 주요 발전 장치를 구성하며, 그 크기에 차이가 있을 수 있지만 동일한 제조업체에서 공급하고 동일한 조속기(governor) 및 자동전압조정기(automatic voltage regulator, AVR)를 사용할

수 있다. 따라서 동기발전기들 간의 무효전력 공유는 AVR에 의한 1차 전압 제어로도 충분하다. 조속기의 주파수 제어는 같은 엔진이라도 엔진의 연소 특성이 다를 수 있기 때문에 2차 주파수 제어(secondary frequency control, SFC)가 일반적으로 적용된다. 선박 전력 계통(shipboard microgrid)의 모든 동기발전기들의 주파수 및 전압에 대한 드롭 곡선은 각각 3% 및 2.5% 드롭으로 설계될 수 있다.

- [64] 스위치보드(130)는 동기발전기들에 각각 연결되는 회로차단기들을 구비할 수 있다. 회로차단기들은 제1, 제2 및 제3 회로차단기들로 지칭될 수 있다.
- [65] 축발전기(150)는 선박의 프로펠라(propeller, 140)와 메인 엔진(160)을 연결하는 프로펠라 축 상에 설치되고, 프로펠라 축을 통해 전달되는 메인 엔진(160)의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있다. 축발전기(150)는 유도발전기를 포함할 수 있고, 유도발전기는 농형 유도발전기(squirrel-cage induction generator, SCIG)를 포함할 수 있다. 이하의 설명에서 축발전기(150)는 SCIG(150)으로도 지칭될 수 있다.
- [66] 전력변환기(200)는 축발전기(150)와 절연변압기(230) 사이에 배치될 수 있고, 백투백 컨버터(back-to-back converter)로 구현될 수 있다. 백투백 컨버터는 축발전기(150)가 있는 발전기측 컨버터(generator-side converter), 선박 전력 계통의 공통 연결점(point of common coupling, PCC)이 있는 그리드측 컨버터(grid-side converter), 및 이들 사이에 연결되는 직류단(DC-link) 캐패시터로 구성될 수 있고, 발전기측 컨버터와 그리드측 컨버터는 직류단 캐패시터의 직류단 전압을 공유하도록 구성될 수 있다. 공통 연결점(PCC)은 분산형 선박 전력 계통에 연결되는 선박 내외의 부하들(loads)에 전력을 공급하는 선박 내 발전 자원들의 공통의 모선을 지칭할 수 있다.
- [67] 또한, 백투백 컨버터의 그리드측 컨버터는 최대전력점 추종과 같은 풍력발전 제어나 태양광발전 제어와 다르게 전력 흐름을 제어한다. 따라서, 발전기측 컨버터는 SCIG(150)의 토크를 제어함으로써 직류단 캐패시터의 직류단 전압을 원하는 수준으로 유지하도록 구성될 수 있고, 그리드측 컨버터는 독립적인 분산형 발전기나 동기발전기들을 포함한 발전 유닛들 중 하나로서 전력을 생성하도록 구성될 수 있다.
- [68] 절연변압기(230)는 선박 전력 계통에서 대체에너지 자원인 축발전기(150)와 전력변환기(200)를 포함하는 분기 계통을 선박 전력 계통의 메인 계통과 물리적으로 분리하도록 기능한다.
- [69] 회로차단기(250)는 축발전기(150), 전력변환기(200) 및 절연변압기(230)를 포함하는 분기 계통을 선박 전력 계통의 메인 계통과 선택적으로 연결하거나 분리하도록 기능한다. 회로차단기(250)는 스위치보드(130) 상에 다른 회로차단기들과 함께 설치될 수 있다. 그 경우, 회로차단기(250)는 제4 회로차단기로 지칭될 수 있다.

- [70] 전술한 선박 전력 계통은 선박 전력 관리 시스템(ship power management system, SPMS, 300)에 의해 관리될 수 있다. SPMS(300)는 동기발전기들(100, 110, 120), 축발전기(150) 및 전력변환기(200)의 전력을 제어할 수 있다.
- [71] 또한, SPMS(300)는 축발전기(150)를 기동시키고자 할 때 축발전기(150)의 자화(magnetization)를 위해 외부의 무효 전력을 공급할 수 있도록 전력변환기(200)의 발전기측 컨버터를 액티브 프론트-엔드 컨버터(active front-end convertor)로 구현할 수 있다.
- [72] 또한, SMPS(300)는 축발전기(150)에서 발생하는 전력을 선박 전력 계통에 효율적으로 투입할 수 있는 계통 투입 제어 시퀀스를 적용하도록 구성될 수 있다.
- [73] 또한, SMPS(300)는 축발전기(150)의 그리드포밍 분산 발전을 안정시키기 위해 선박 전력 계통의 제한된 임피던스(X)와 저항(R) 비율(bounded X/R ratio)을 고려하여 SMPS(300)의 전압 제어 회로에 기설정된 고정형 가상 임피던스(fixed virtual impedance, 간략히 'VImp')를 적용하도록 구성될 수 있다.
- [74] 또한, SPMS(300)는 전력변환기(200)의 그리드측 컨버터에 의해 이차 주파수 제어(secondary frequency control, SFC)를 수행하도록 구성될 수 있다. 더욱이, SMPS(300)는, 이차 전압 제어가 존재하지 않는 선박 전력 계통에서 전력변환기(200) 자체에서 이차 전압 제어를 수행하도록 구성될 수 있다.
- [75] 자체 이차 전압 제어는 병렬 운전과 단독 운전에 따라 각기 다른 목표값을 기반으로 전압을 제어하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, SMPS(300)는 축발전기(150)와 적어도 하나의 동기발전기(100)의 병렬 운전시 목표 역률 값을 기준으로 전압 제어를 수행할 수 있고, 축발전기(150)의 단독 운전시 절연변압기(230)의 2차측 전압을 목표 전압(예를 들어 1[pu])으로 하여 축발전기(150), 전력변환기(200) 또는 선박 전력 계통의 전압 제어를 수행할 수 있다.
- [76] 참고로, 선박의 대부분은 교류 계통으로 전력 계통망을 적용하고 있기 때문에, 이러한 대체에너지 자원들은 전력변환기를 통해 선내 전력 계통망에 연계되어야 한다. 전력변환기는 기본적으로 기존의 선내 동기발전기와 병렬 운전을 하며 선내 부하에 전력을 공급해야 하며, 선박 운전 상태에 따라 단독으로 선내 부하에 전력을 공급할 수 있는 기능도 갖추어야 한다. 따라서, 선박의 대체에너지 기반 전력변환기는 필수적으로 그리드포밍(Grid-forming) 제어를 수행하여야 하며, 대체에너지의 특성에 따라 그리드피딩(Grid-feeding) 제어를 수행하기도 한다.
- [77] 예를 들어, 태양광 발전의 최대 전력점 추정 제어를 위한 목표 전력값 추종제어(P, Q제어) 및 농형유도발전기의 초기 자화 단계에서 전력 공급 제한 등의 목적으로 그리드피딩 제어가 필요하다. 또한, 선박의 전력 계통은 독립된 단독 계통이기 때문에, 선내 부하에 항상 전력 공급이 가능하여야 하기 때문에, 전력변환기가 그리드피딩 제어를 수행하는 상황에서도 언제나 그리드포밍 제어 모드로 순간 제어 모드 전환이 가능하여, 대체에너지원의 단독 운전이 가능하여야 한다.
- [78] 그리드피딩 모드가 위상 고정 루프를 통해 계통과 동기화된 상태로 유효전력 및 무효전력 제어를 수행하는 반면, 그리드포밍 모드는 설정된 드롭(droop, 부하

분담)에 의해 출력 전압의 크기와 주파수 목표 값이 정해진다. 따라서, 그리드포밍 모드에서 그리드포밍 모드로 전환 시, 대체에너지 자원에 연결된 전력변환기의 출력 전압은 순간적으로 변하게 되고, 이때 전력변환기의 출력 전압은 계통 전압의 위상, 크기 및 주파수의 차이를 내재하게 된다. 이는 전력변환기 제어 계통에 일종의 외란으로 작용하며, 일반적인 전력변환기의 낮은 관성은 이 외란을 견디지 못하기 때문에 대체에너지 자원이 그리드포밍 모드로 전환되지 못하고 주파수, 전압 발산에 의하여 계통에서 탈락하게 된다.

- [79] 이에 본 실시예에서는 그리드포밍 축발전기에 연결된 전력변환기의 전압 제어에 가상 임피던스를 적용하여 전력변환기가 외란에 대해 충분한 관성을 가질 수 있고, 축발전기의 발생 전력을 선박 전력 계통에 효과적으로 투입할 수 있는 선박을 제공할 수 있다. 또한, 본 실시예에 의하면, 자체 이차 전압 제어 알고리즘을 이용하여 선박 전력 계통의 축발전기에 연결된 전력변환기에서 축발전기 시스템 내 전압 강하를 효과적으로 보상할 수 있고, 이차 전압 제어가 존재하지 않는 선박 전력 관리 시스템에서도 축발전기의 병렬 운전 또는 단독 운전 모드에 따라 축발전기에 연결된 전력변환기를 이용하여 자체 이차 전압 제어를 수행할 수 있는 선박을 제공할 수 있다.
- [80] 도 2는 도 1의 선박 전력 계통에 채용할 수 있는 선박 전력 관리 시스템(ship power management system)의 전압 드롭 특성을 설명하기 위한 그래프이다. 그리고 도 3은 도 1의 선박 전력 계통에 채용할 수 있는 선박 전력 관리 시스템의 주파수 드롭 특성을 설명하기 위한 그래프이다.
- [81] 도 2에 예시한 바와 같이, 선박 전력 계통에서 동기발전기들은 유지 보수를 고려하여 동일한 제조사 제품의 3기 또는 4기가 설치되기 때문에, 자동전압조절기에 의한 각 동기발전기의 전압 드롭(voltage droop) 특성은 동기발전기들 간에 매우 유사하여 별도의 이차 전압 제어(secondary voltage control, SVC)를 적용하지 않고 고정될 수 있다(fixed without SVC). 자동전압조절기는 동기발전기에 일체로 결합되어 제공될 수 있다.
- [82] 한편, 도 3에 예시한 바와 같이, 동일한 타입의 동기발전기들이라도 발전기 엔진의 연소 특성이 서로 상이할 수 있다. 따라서, 단일 선박의 선박 전력 계통에 사용되는 복수의 동기발전기들 간의 주파수 드롭(frequency droop) 특성은 이차 주파수 제어(secondary frequency control, SFC)에 의해 조정될 수 있다(adjusted by SFC).
- [83] 더욱이, 동기발전기들과 함께 대체에너지 자원, 특히 선박의 프로펠라 축에 결합된 축발전기를 포함하는 분산형 선박 전력 계통에서는 축발전기의 그리드포밍 작동 모드에서 축발전기의 전력을 선박 전력 계통의 공통 연결점(point of common coupling, PCC)에 효과적으로 연계할 수 있도록 즉, 축발전기가 동기발전기와 같이 동작할 수 있도록 이차 전압 제어 및 이차 주파수 제어 중 적어도 하나를 수행하는 것이 필요하다.

- [84] 따라서 본 실시예의 선박 전력 관리 장치는 축발전기와 전력변환기를 포함하는 축발전기 시스템이 동기발전기의 동작을 복제하는 플러그 앤 플레이(plug and play) 분산 전원으로 동작하도록 구성될 수 있다.
- [85] 특히, 축발전기는 통상 선박의 정상 운항 시 독립형 분산 발전기로 운용되나 엔진 등의 추진 기관의 잉여동력 감소 및 축발전기 동력의 축속 의존성으로 인해 한계가 있다. 축발전기의 안전하고 효율적인 작동을 보장하기 위해 선박 전원 관리 장치는 전술한 제한 사항을 모니터링하고 특정 상황에서 부하 차단 또는 동기발전기 운전 시작과 같은 조치를 구현하도록 구성될 수 있다. 이러한 조치는 선박 전력 계통에서 고출력 부하로 인한 축발전기의 과부하, 거친 파도로 인한 추진 엔진의 기계적 부하 변동, 추진 엔진 감속 등의 상황에 대한 조치도 포함할 수 있다.
- [86] 이와 같이, 본 실시예의 선박 전력 관리 장치는 축발전기를 포함한 분산형 선박 전력 계통에서 축발전기의 신속한 계통 투입 시퀀스를 적용하도록 구성될 수 있다. 또한, 선박 전력 관리 장치는 그리드피딩에서 그리드포밍으로 작동 모드를 안정적으로 전환하기 위해 고정형 가상 임피던스 기반의 제어 알고리즘을 적용하도록 구성될 수 있다. 또한, 선박 전력 관리 장치는 그리드포밍 작동 모드에서 축발전기의 전력변환기에 의해 자체 이차 전압 제어를 적용하도록 구성될 수 있다.
- [87] 도 4는 도 1의 선박 전력 계통의 선박 전력 관리 시스템에 채용할 수 있는 선박 전력 관리 장치에 대한 개략적인 블록도이다.
- [88] 도 4를 참조하면, 선박 전력 관리 장치(400)는, 도 1의 선박 전력 계통을 관리하는 선박 전력 관리 시스템(SPMS, 300)에 대응될 수 있다. 선박 전력 관리 장치(400)는 적어도 하나의 프로세서(410) 및 메모리(420)를 포함할 수 있다. 또한, 선박 전력 관리 장치(400)는 선박 네트워크나, 외부의 전용 배전망 혹은 상용 배전망의 관리자, 사용자 등의 단말이나 통신 장치와 연결되어 통신을 수행하는 송수신 장치(430)를 더 포함할 수 있다. 또한, 선박 전력 관리 장치(400)는 입력 인터페이스 장치(440), 출력 인터페이스 장치(450), 저장 장치(460) 등을 더 포함할 수 있다. 선박 전력 관리 장치(400)에 포함된 각각의 구성 요소들은 버스(bus, 470)에 의해 연결되어 서로 통신을 수행할 수 있다.
- [89] 좀더 구체적으로, 프로세서(410)는 메모리(420) 및 저장 장치(460) 중에서 적어도 하나에 저장된 소프트웨어 모듈이나 프로그램 명령(program command)을 실행할 수 있다. 일례로, 프로세서(410)는 가상 임피던스 제어부(412), 축발전기 계통 투입부(414), 자체 이차 전압 제어부(416) 및 모드 전환부(418)를 구비할 수 있고, 이러한 구성부들은 소프트웨어 모듈이나 프로그램 명령 형태로 프로세서(410)에 탑재될 수 있고, 그 구성 및/또는 기능에 대하여는 아래에서 상세히 설명될 것이다. 전술한 프로세서(410)는 중앙 처리 장치(central processing unit, CPU), 그래픽 처리 장치(graphics processing unit, GPU), 또는 본 발명의 실시예들에 따른 방법들이 수행되는 전용의 프로세서로 구현될 수 있다.

- [90] 메모리(420) 및 저장 장치(460) 각각은 휘발성 저장 매체 및 비휘발성 저장 매체 중에서 적어도 하나로 구성될 수 있다. 예를 들어, 메모리(420)는 읽기 전용 메모리(read only memory, ROM) 및 랜덤 액세스 메모리(random access memory, RAM) 중에서 적어도 하나로 구성될 수 있다.
- [91] 송수신 장치(430)는 선박 내부, 외부 또는 내외부 간의 통신, 예를 들어, 근거리 무선 네트워크, 케이블 연결, 위성 통신, 범용 기지국과의 무선 통신 등을 위한 통신 인터페이스나 서브통신시스템을 포함할 수 있다.
- [92] 입력 인터페이스 장치(440)는 키보드, 마이크, 터치패드, 터치스크린 등의 입력 수단들에서 선택되는 적어도 하나와 적어도 하나의 입력 수단을 통해 입력되는 신호를 기저장된 명령과 매핑하거나 처리하는 입력 신호 처리부를 포함할 수 있다.
- [93] 출력 인터페이스 장치(450)는 프로세서(410)의 제어에 따라 출력되는 신호를 기저장된 신호 형태나 레벨로 매핑하거나 처리하는 출력 신호 처리부와, 출력 신호 처리부의 신호에 따라 소정 레벨의 진동, 빛, 소리 등에서 선택되는 적어도 어느 하나의 형태로 해당 신호나 신호에 포함된 정보를 출력하는 적어도 하나의 출력 수단을 포함할 수 있다. 적어도 하나의 출력 수단은 스피커, 디스플레이 장치, 프린터, 광 출력 장치, 진동 출력 장치 등의 출력 수단들에서 선택되는 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [94] 도 5는 도 4의 선박 전력 관리 장치에 채용할 수 있는 농형 유도 발전기 제어 과정을 설명하기 위한 블록도이다.
- [95] 먼저 농형 유도 발전기(SCIG, 150)의 제어에 대한 환경을 설명하면 다음과 같다. SCIG(150) 제어는 직접 토크 제어(direct torque control, DTC) 방법을 사용할 수 있다. DTC 방법은 폐루프 제어(closed-loop control)를 위해 회전자 각도 위치에 의존하는 자속 벡터 제어(flux vector control)와 달리 회전자축(rotor shaft) 속도 또는 위치에 대한 피드백을 제공하기 위한 위치 엔코더(position encoder)를 필요로 하지 않는다. DTC 방법은 모델 기반이므로 최적의 제어 성능을 위해 정확한 모델 매개변수(model parameters)에 의존한다. 따라서 고정자 자속 쇄교 벡터(stator flux linkage vector)와 이 벡터에 의해 생성되는 토크는 SCIG(150)의 모터 모델(motor model)을 기반으로 추정될 수 있다.
- [96] 이와 같이 고정자 자속 쇄교의 추정은 본 실시예의 SCIG 제어 프로세스에서 중요하다. 그리고, 고정자 자속 쇄교의 추정은 SCIG(150)에 측정된 고정자 저항의 정확도에 따라 달라지므로, 정확한 고정자 자속 쇄교의 추정을 위해 정확한 고정자 저항을 실시간 모니터링하는 것이 필요하다. 즉, SCIG 모델 매개변수의 불확실성으로 인해 토크 제어가 실패하고 전력 공급과 수요의 불균형이 발생하면 선박에서 정전이 발생할 수 있다.
- [97] 한편, SCIG(150)는 자체 자화(self-excitation)를 수행하도록 설계되지 않으므로 자화를 위해서는 외부의 무효전력이 필요하다. 따라서, 본 실시예의 선박 전력

관리 장치에 연결되는 전력변환기는 수동 변환기 대신 능동 프런트 엔드 변환기(active front-end converter)를 사용하도록 구성될 수 있다.

- [98] 본 실시예의 선박 전력 관리 장치는 도 5에 나타낸 바와 같이 모터 모델(motor model)에 SCIG(150)의 모터 전압 및 전류(motor voltage and current), 직류(DC) 전압, 스위칭 명령을 입력하고, 모터 모델로부터 토크(torque) 및 자속 쇄교(flux linkage)에 대한 값이나 신호를 받을 수 있도록 구성될 수 있다. 직류 전압은 SCIG(150)에 연결된 발전기측(generator-side) 컨버터의 직류단 캐패시터측 단자 간의 전압으로서 직류단 전압에 대응될 수 있다.
- [99] 또한, 선박 전력 관리 장치는 DC 전압 레퍼런스(voltage reference)와 DC 전압에 기초하여 토크 레퍼런스(torque reference)를 생성하고, 토크 비교기(torque comparator)를 통해 토크와 토크 레퍼런스를 비교하여 토크 오차(torque error, ΔTorque , ΔT)를 산출하도록 구성될 수 있다. 또, 선박 전력 관리 장치는 자속 쇄교 비교기(flux linkage comparator)를 통해 자속 쇄교와 자속 쇄교 레퍼런스를 비교하여 자속 오차(flux error, ΔFlux , ΔF)를 산출하도록 구성될 수 있다. 그리고, 선박 전력 관리 장치는 토크 오차와 자속 오차를 히스테리시스 펄스 선택기(hysteresis pulse selector, HPS)에 입력하고, HPS를 통해 토크 오차와 자속 오차에 기초한 스위칭 명령(switch commands)을 생성하도록 구성될 수 있다. 스위칭 명령은 SCIG(150)에 연결된 발전기측 컨버터의 제어에 사용될 수 있다.
- [100] 전술한 선박 전력 관리 장치는 SCIG(150)를 분산 발전기로 기능하도록 하기 위해 후술하는 SCIG 제어 단계들을 수행할 수 있다.
- [101] 본 실시예의 설명에서 용어 '레퍼런스'는 부하, 전원 공급 장치 변동, 온도 변화 및 시간에 관계없이 해당 물리량을 일정하게 혹은 고정적으로 이상적으로 생성하는 전자 장치나 이 전자 장치에 의해 생성되는 기준 물리량을 지칭할 수 있다. 예를 들어, 전압 레퍼런스는 주변 환경이나 조건에 관계없이 일정한 전압 또는 고정 전압을 이상적으로 생성하는 전자 장치나 이 전자 장치에 의해 생성된 전압을 지칭할 수 있다. 생성된 전압은 기준 전압에 대응될 수 있다.
- [102] 도 6은 도 5의 선박 전력 관리 장치에 의해 수행할 수 있는 SCIG 제어 단계들에 대한 흐름도이다. 도 7은 도 6의 SCIG 제어 단계들 중 제1 작동모드(Phase I)를 설명하기 위한 블록도이다. 도 8은 도 6의 SCIG 제어 단계들 중 제2 작동모드(Phase II)를 설명하기 위한 블록도이다. 그리고, 도 9는 도 6의 SCIG 제어 단계들 중 제3 작동모드(Phase III)를 설명하기 위한 블록도이다.
- [103] 도 6을 참조하면, 선박 전력 관리 장치는 그리드포밍 SCIG의 계통 투입 시퀀스로서 3개의 제어 단계들 또는 제1 내지 제3 작동모드들을 수행할 수 있다. 즉, 선박 전력 관리 장치에 의해 수행되는 선박 전력 관리 방법은 선박 전력 계통의 적어도 일부인 그리드(grid)에 축발전기를 연결하여 직류단 캐패시터에 충전된 그리드측 전류를 이용하여 축발전기를 자화(magnetization)하는 단계(S610), 축발전기가 그리드에 전력을 공급(feeding)하기 전에 그리드측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 전력 제어를 수행하여 발전기측 컨버터가 직류단 캐

패시터를 충전하도록 자체 전력을 발생시키는 단계(S630), 및 축발전기가 선박 전원 계통의 분산형 발전기로서 동작하도록 축발전기의 분산 발전을 위한 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계(S650)를 포함할 수 있다.

- [104] 좀더 각 단계를 구체적으로 설명하면, 도 7에 나타낸 바와 같이 제1 제어단계(phase I)에서, 그리드측 컨버터(220)는 선박 전력 관리 장치의 제어에 의해 적어도 하나의 동기발전기(100)가 연결된 선박 전력 계통으로부터 전력(P)을 공급받아 직류단 캐패시터(215)를 충전할 수 있다. 그리드측 컨버터(220)는 직류단 캐패시터(215)의 정격 직류 전압의 90%까지 충전하고 충전된 직류 전압을 유지할 수 있도록 전력 제어를 수행할 수 있다.
- [105] 또한, 제1 제어단계에서, 발전기측 컨버터(210)는 직류단 캐패시터(215)의 직류단 전압(DC-link voltage)을 활용하여 농형유도발전기(SCIG)의 회전자를 자화시킬 수 있다. 자화는 발전기측 컨버터(210)의 소정 전압(V_s)에 따른 전류를 축발전기의 권선(coil)에 흐르게 하여 자계를 만드는 것으로, 권선에 기자력 즉 자속 또는 자류(magnetic flow)의 생성 능력을 생성하는 것을 지칭할 수 있다. 제1 제어단계에서 축발전기는 발전을 시작하지 않았기 때문에 발전기의 토크는 0으로 제어될 수 있다.
- [106] 제2 제어단계(phase II)는 축발전기가 자가 발전을 시작하도록 하고, 축발전기의 정상 발전 여부를 확인하는 단계이다. 도 8에 나타낸 바와 같이 제2 제어단계에서, 그리드측 컨버터(220)는 적어도 하나의 동기발전기(100)로부터 전력을 공급받고 있는 그리드측으로부터 발전기측으로 전력이 공급되는 것을 차단하기 위해 그리드피딩 모드로 제어될 수 있다. 이때 그리드측 컨버터(220)의 전력 기준값은 0이다. 즉, 그리드측 컨버터(220)는 제로 전력 레퍼런스로 전력 제어될 수 있다.
- [107] 또한, 제2 제어단계에서, 발전기측 컨버터(210)는 자가 발전을 시작하여 직류단 캐패시터(215)를 정격 전압으로 충전하도록 제어될 수 있다. 이를 위해 선박 전력 관리 장치는 축발전기의 토크를 제어할 수 있다. 정상적으로 자가 발전(self-generation)이 수행되어 축발전기의 전기에너지가 직류단 캐패시터(215)의 직류단 전압을 정격 전압까지 충전하게 되면, 선박 전력 관리 장치는 축발전기 시스템의 제어 모드를 제3 제어단계로 전환시킬 수 있다.
- [108] 제3 제어단계(phase III)에서는, 도 9에 나타낸 바와 같이 농형유도발전기 기반의 축발전기가 선박 전력 계통의 동기발전기(100)와 동일한 역할을 수행할 수 있도록, 그리드측 컨버터(220)는 그리드포밍 모드로 전환될 수 있다. 이때, 그리드측 컨버터(220)가 가상 임피던스 기반으로 그리드포밍 모드에 대해 충분한 관성을 가지도록, 선박 전력 관리 장치는 그리드측 컨버터(220)의 전압 제어 회로에 대해 미리 설정되거나 실시간 수집되는 측정값들에 기초하여 결정되거나 선택된 제어 드롭 계수에 따라 전압 제어(voltage control with droop)를 수행할 수 있다. 그에 의해 그리드측 컨버터(220)는 그리드피딩 모드에서 그리드포밍 모드로의 전환을 안정적으로 빠르게 즉, 순간 전환할 수 있다. 선박 전력 관리 장치는 그리

드측 컨버터(220)의 모드 전환을 수행하기 직전까지 회로차단기(250)를 개방된 상태로 유지할 수 있다.

- [109] 또한, 제3 제어단계에서, 발전기측 컨버터(210)는, 그리드포밍 전력변환기로써 선박 전력 계통의 공통 결합점(PCC)에 맞게 선박 전력 계통에 전력을 공급하여 선박 전력 계통과 적절하게 연계할 수 있도록, 및/또는 직류단 캐패시터(215)의 전압을 유지하도록 동작할 수 있다. 즉, 선박 전력 관리 장치는 축발전기 및 발전기측 컨버터(210) 중 적어도 하나 이상을 제어하여 축발전기에 대한 토크 제어(torque control) 및 자속 제어(flux control) 중 적어도 하나 이상을 수행할 수 있다.
- [110] 전술한 본 실시예의 제1 내지 제3 제어단계들에 의하면, 불필요한 회로차단기 동작 및 동기화 과정을 생략할 수 있으므로, 신속하고 효율적인 계통 운영의 이점을 가질 수 있다.
- [111] 도 10은 도 6의 SCIG 제어 단계들에 적용할 수 있는 적응적 자속 제어 과정을 설명하기 위한 블록도이다.
- [112] 도 10을 참조하면, 선박 전력 관리 장치에 구비될 수 있는 적응적 자속 관측기(adaptive flux observer, 간략히 'adaptive observer')는 축발전기의 고정자 전압 벡터(V_s), 엔진 조속기(engine governor)로부터 얻은 SCIG의 회전자 속도(rotor speed, ω_r), 및 고정자 저항 적응적 방식(stator resistance adaptive scheme) 처리기로부터 얻은 추정 저항(estimated resistance, $\hat{R}_s$)에 기초하여 추정 고정자 전류 벡터(estimated stator current vector, $\hat{i}_s$)를 생성하고, SCIG로부터 얻은 고정자 전류(i_s)에서 추정 고정자 전류 벡터를 빼는 연산을 통해 관측자의 상태 추정 오차 벡터(state estimation error vector, e_p)를 생성할 수 있다. 고정자 저항 적응적 방식 처리기에는 상태 추정 오차 벡터가 저역통과필터(low-pass filter, LPF)를 통해 입력되고, 적응적 자속 관측기로부터의 추정 고정자 전류 벡터가 입력될 수 있다.
- [113] 이와 같이 본 실시예에서는, 선박 전력 관리 장치가 엔진 조속기에 의해 측정되는 회전자 속도를 얻을 수 있다고 가정하고, SCIG의 직접 토크 제어(DTC)에서 정확한 고정자 저항을 추정할 수 있음을 알 수 있다. 실제로 이러한 가정은 회전자 속도가 엔진 조속기에 의해 측정되고 있기 때문에 분산 애플리케이션에 적용할 수 있다.
- [114] 예를 들어, SCIG의 상태 공간 모델은 회전자 레퍼런스 dq-축에서 설정될 수 있다. 이 경우, 상태 행렬(state matrix, A)에서 불확실한 고정자 저항을 해결하기 위해 준정정 행렬(semi-positive definite matrix)인 추정 상태 행렬(estimated state matrix)를 사용하는 상태 관측자를 이용할 수 있다. 이러한 상태 관측자를 이용하면, 축발전기의 상태 추정 오차를 계산할 수 있고, 고정자 전류 오차를 가진 오차 벡터를 정의할 수 있다. 그리고, 오차 벡터의 2차 함수와 포지티브 이득(positive gain)을 갖는 고정자 저항 오차를 포함하는 준정정 라푸노프 함수(semi-positive definite Lyapunov function)를 정의하여, 상태 관측자가 고정자 저항을 적응적으로 추정하도록 할 수 있다.

- [115] 준정정 라푸노프 함수는 해답을 구하지 않고 안정도를 판별할 수 있는 방법들 중 하나로서, 추정 상태 행렬의 성분이 모두 실수이고 소정의 대칭 크기의 정정 행렬이 모든 벡터에 대하여 특정 부등식을 만족하도록 정의될 수 있다. 이러한 준정정 라푸노프 함수는 3차원 그래프에서 아래로 볼록하므로 그 도함수가 0과 같을 때 최소값으로 수렴될 수 있다.
- [116] 준정정 라푸노프 함수의 도함수에 의하면, 오류 벡터는 본질적으로 추정 저항에 의존하는 점을 고려하여 합들의 합을 최소화함으로써 라푸노프 함수의 최소 점을 얻을 수 있다. 따라서 고정자 저항의 추정은 준정정 라푸노프 함수의 도함수를 이용하는 방정식을 풀어 얻을 수 있다. 이때, 방정식 해답의 빠른 수렴을 위해 LPF를 이용한 적분 제어가 적용될 수 있다.
- [117] 도 11은 도 4의 선박 전력 관리 장치에 채용할 수 있는 그리드포밍 전력변환기의 가상 임피던스 기반 전압 제어 과정을 설명하기 위한 블록도이다.
- [118] 도 11에 예시한 바와 같이, 선박 전력 관리 장치는 가상 임피던스 기반으로 축발 전기에 연결되는 전력변환기의 전압 제어를 수행할 수 있다. 전력변환기는 그리드포밍 모드에서 작동할 때, 전압 제어기(voltage controller), 전류 제어기(current controller), PWM 제어기(pulse width modulation controller), 인덕터 필터(inductor filter, L filter), 및 캐패시터 필터(capacitor filter, C filter)를 이용하는 피드백 제어 회로 구조에 더하여 인덕터 필터의 출력 전류(i_L)를 전류 컨트롤러의 입력에 반영하는 전류 피드백(feedback) 회로 구조를 가지면서 전압 제어기의 입력에 가상 임피던스(virtual impedance, 411)를 적용하는 구조를 가지도록 구성될 수 있다.
- [119] 이와 같이, 그리드측 컨버터의 제어 루프는 외부 루프와 내부 루프로 구분하여 구성될 수 있다. 외부 루프는 외부 제어 루프로, 내부 루프는 내부 제어 루프로 각각 지칭될 수 있다. 외부 제어 루프는 측정된 전력과 드롭 기능을 기반으로 기준 전압(reference voltage)을 조정하도록 구성될 수 있다. 그리고 내부 제어 루프는 두 개의 컨트롤러, 즉 전압 제어기 및 전류 제어기를 사용하여 외부 제어 루프의 기준을 따르도록 출력 전압을 제어하도록 구성될 수 있다.
- [120] 특히, 선박 전력 관리 장치는 그리드측 컨버터의 출력 전압의 위상각 레퍼런스(θ_o^*)를 가진 출력 전압 레퍼런스($V_o^* \angle \theta_o^*$)를 전압 제어기(voltage controller)에 입력할 때, 피드백된 출력 전압 레퍼런스($V_o \angle \theta_o$)와의 오차를 반영하면서 동시에 그리드측 컨버터의 출력 전류(i_o)에 따른 미리 결정된 가상 임피던스(411)를 반영하도록 그리드측 컨버터의 전압 제어 동작을 제어할 수 있다.
- [121] 전술한 바와 같이 선박 전력 관리 장치는 전력변환기의 모드 전환 중에 시스템 안정성을 보장하기 위해 그리드측 컨버터에 대해 가상 임피던스(411) 기반의 전압 제어를 수행할 수 있다. 가상 임피던스(411)는 미리 결정되거나 고정되는 고정형 가상 임피던스를 포함할 수 있다. 가상 임피던스(411)는 가상 인덕턴스(virtual inductance, L_v)와 가상 저항(virtual resistance, R_v)을 더한 형태를 가질 수 있다. 이러한 가상 임피던스(411)를 라플라스 변환하면, " $L_v s + R_v$ "와 같이 표현될 수 있다.

가상 인덕턴스는 가상 인덕턴스 성분으로, 가상 저항은 가상 저항 성분으로도 지칭될 수 있다.

- [122] 본 실시예의 가상 임피던스 기반 전압 제어에 의하면, 그리드측 컨버터는 전압 소스로 작동하고 동기발전기와 유사한 미리 정의된 드롭 기능에 따라 출력 전압을 효과적으로 제어할 수 있다. 또한, 소정의 가상 임피던스를 채택하여 그리드측 컨버터의 출력 임피던스를 변경함으로써 내부 제어 루프의 폐쇄 루프 전달 기능을 조정할 수 있다. 가상 임피던스가 시스템 역학에 미치는 영향은 고유값을 추적하여 분석하는 것이 가능하다.
- [123] 도 12는 본 발명의 또 다른 실시예에서 따른 선박 전력 계통 운전 방법에 채용할 수 있는 자체 이차 전압 제어 구조를 설명하기 위한 예시도이다.
- [124] 도 12를 참조하면, 선박 전력 제어기에 포함될 수 있는 자체 이차 전압 제어기 (self-secondary voltage controller, 416)는 역률 계산기(power factor calculation), 가감 연산기들, 히스테리시스 비교기들, 단독 운전으로 전환(switched at standalone)하기 위한 절체스위치를 구비하고, 공칭 출력 전압(V_{nom})에 오프셋 전압(V_{offset})을 더하여 얻은 제어된 공칭 출력 전압을 그리드포밍 전력변환기에 제공하도록 구성될 수 있다. 그리드포밍 전력변환기는 도 11에서와 같이 전류 피드백 회로로 인해 임피던스를 내포할 수 있다.
- [125] 본 실시예에서는 해결하고자 하는 문제 즉, 축발전기 시스템의 출력단에 공통 모드 노이즈 저감을 위한 절연변압기가 설치된 경우, 출력 전류에 따른 전압 강하를 수반하게 된다. 따라서, 동기발전기의 자동전압조절기와 동일한 전압 드롭 특성을 제어하기가 어렵고, 이에 따른 동기발전기와의 무효 전력 분담 문제, 단독 운전 시 전압 강하 문제를 해결하기 위해 자체 이차 전압 제어를 적용한다.
- [126] 전술한 자체 이차 전압 제어기 구조에 의하면, 전압 드롭 곡선의 전압 값의 높낮이를 히스테리시스 기반 제어 값으로 조절할 수 있다. 동기발전기와의 병렬 운전 시에는 목표 역률 값 즉, 일반적인 선박 전력 부하의 역률 값 예컨대, 0.8로 이차 전압 제어를 수행하고, 단독 운전 시에는 절연변압기 2차측의 전압을 정격 전압으로 유지할 수 있도록 이차 전압 제어를 수행할 수 있다. 그리고 자체 이차 전압 제어가 가상 임피던스의 제동 역할을 방해하지 않도록 자체 이차 전압 제어기 (416)의 대역폭은 그리드포밍 전력변환기의 대역폭의 1/20 수준으로 선정할 수 있다.
- [127] 이하에서는 가상 임피던스 제어, 축발전기 계통 연계 시퀀스, 자체 이차 전압 제어의 검증을 위해 근궤적을 활용한 안정도 평가, 시뮬레이션 및 실험 결과를 설명하기로 한다.
- [128] 먼저, 그리드포밍 전력변환기 모델링 및 근궤적 기반 안정도 평가를 위해, 그리드포밍 전력변환기의 수식 모델을 만들고 가상 임피던스 적용 여부 및 성부 조합 여부에 따른 시스템의 안정도를 평가하였다.
- [129] 이하에서 설명할 수식 모델의 수학적식에 사용되는 기호들의 상세 정의를 나타내면 다음의 표 1과 같다.

[130] [표1]

기호	내용
a, b, c, d, e, f, g, h	소신호 모델 상수들
$G_{pwm}(s), G(s)$	PWM 및 내부 루프의 전달함수
$G_i(s), G_f(s)$	전압제어기 및 전류제어기의 전달함수
k_{pwm}, τ_{pwm}	PWM의 이득 및 시상수
k_p, k_u, k_p, k_g	그리드포밍 제어의 제거기 이득들
L_f, C_f, R_f	필터 인덕턴스, 캐패시턴스 및 레지스턴스
L_v, R_v	가상 인덕턴스 및 가상 레지스턴스
m_p, m_i, n	주파수 및 전압 드롭 효율
p_g, q_g, P_g, Q_g	유효 및 무효 전력과 저역필터된 유효 및 무효 전력
R_g, X_g, Z_g, δ_g	선로 저항, 리액턴스, 임피던스 크기 및 임피던스 각
R_o, X_o, i_o, i_i	출력 저항, 리액턴스, 출력 전류 및 선로 전류
u_d, u_g	컨버터 전압 명령
V_g, V_o, V_b	모션 전압, 컨버터 출력 전압 및 절연변압기 출력 전압
v_o	컨버터 출력 전압
$Z_o(s), \tilde{Z}_o(s)$	가상 임피던스가 없는 출력 임피던스 및 가상 임피던스가 있는 출력 임피던스
δ_o, ϕ, ϕ'	부하각, 역률각, 역률 레퍼런스
$\theta_o, \theta_g, \theta_{og}$	컨버터 출력 전압의 위상각, 모션 전압, 부하각
$\bar{\theta}_g$	평형점에서의 부하각
ω_c	저역통과필터 차단 주파수
ω_{nom}, V_{nom}	각주파수 및 출력전압의 공칭값
$\omega_o, \omega_o^*, V_o, V_o^*$	각주파수 및 그 레퍼런스와 출력 전압 및 그 레퍼런스

[131] 우선, 축발전기에서 발전하여 얻는 전력의 유효전력과 무효전력은 수학식 1과 같이 표현될 수 있다.

[132] [수식1]

$$p_g = \frac{V_o V_g}{Z_g} \cos(\delta_g - \theta_{og}) - \frac{V_g^2}{Z_g} \cos \delta_g, q_g = \frac{V_o V_g}{Z_g} \sin(\delta_g - \theta_{og}) - \frac{V_g^2}{Z_g} \sin \delta_g$$

[133] 수학식 1에서,

$$\theta_{og} = (\theta_o - \theta_g)$$

이고,

$$\delta_g = \tan^{-1}(X_g/R_g)$$

이다.

- [134] 선박 전력 제어기에 의한 이차 주파수 제어까지 반영한 드롭에 따른 전압의 주파수 및 크기는 수학식 2와 같이 정의될 수 있다. 선박 전력 제어기는 선박 전력 관리 장치에 포함될 수 있다.

[135] [수식2]

$$\omega_o^* = \omega_{nom} - \left(m_p + \frac{m_i}{s} \right) P_g, V_o^* = V_{nom} - n Q_g.$$

- [136] 한편, 도 11에 사용된 그리드포밍 전력변환기의 전압 제어 수식 모델은 아래의 수학식 3과 같이 표현될 수 있다.

[137] [수식3]

$$\begin{aligned} v_o &= G(s)v_o^* - \underbrace{[Z_o(s) + \frac{(L_v s + R_v)G_v(s)G_i(s)G_{pvm}(s)}{T(s)}]}_{V_{Imp} \text{ term}} i_o \\ &= G(s)v_o^* - \tilde{Z}_o(s)i_o \end{aligned}$$

- [138] 수학식 3에서,

$$T(s) = L_f C_f s^2 + R_f C_f s + G_i(s)G_{pvm}(s)(G_v(s) + C_f s) + G_v(s)$$

이다.

- [139] 수학식 3에 의하면, 그리드포밍 전력변환기의 출력 전압은 전압 목표 값과 전압 출력 값에 따른 전달 함수 G(s)와 출력 전류에 의해 차감되는 임피던스

$$\tilde{Z}_o(s)$$

로 이루어짐을 알 수 있다. 도 11에서 가상 임피던스를 제외한, 전력변환기 출력 전압의 모델은 수학식 4와 같이 표현될 수 있다.

[140] [수식4]

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{G_v(s)G_i(s)G_{pvm}(s)}{T(s)} v_o^* - \frac{L_f s + R_f + 2G_i(s)G_{pvm}(s)}{T(s)} i_o \\ &= G(s)v_o^* - Z_o(s)i_o \end{aligned}$$

- [141] 수학식 3과 수학식 4를 비교하면, 임피던스

$$\tilde{Z}_o(s)$$

와

$$Z_o(s)$$

만 다르기 때문에 시스템 모델을 만든 후 임피던스 값만 변경하여 가상 임피던스의 성능을 평가할 수 있다.

- [142] 수학식 4에 수학식 2에 정의된 전압 크기를 대입하면, 다음과 같은 전압 크기에 대한 수학식 5를 생성할 수 있다.

[143] [수식5]

$$V_o = |G(s)| (V_{nom} - nQ_g) - \frac{R_o}{V_o} P_g - \frac{X_o}{V_o} Q_g$$

[144] 위의 수학적식 1에 저역통과필터를 적용하여, 수학적식 5에 대입하면 아래의 수학적식 6을 얻을 수 있다.

[145] [수식6]

$$V_o = |G(s)| (V_{nom} - nQ_g) - \frac{R_o}{V_o} \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right) \left(\frac{V_o V_g}{Z_g} \cos(\delta_g - \theta_{og}) - \frac{V_g^2}{Z_g} \cos \delta_g \right) - \frac{X_o}{V_o} \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right) \left(\frac{V_o V_g}{Z_g} \sin(\delta_g - \theta_{og}) - \frac{V_g^2}{Z_g} \sin \delta_g \right)$$

[146] 위의 수학적식 2의 주파수 수식을 적분하여, 수학적식 1에 적용된 유효전력 값을 저역통과필터를 적용한 후, 수학적식 4를 대입하면 다음의 수학적식 7을 얻을 수 있다.

[147] [수식7]

$$\theta_o = \theta_{nom} - m_p \int_{-\infty}^t P_g d\tau - m_i \int_{-\infty}^t \int P_g d\tau - \angle G(s) - \delta_o$$

[148] 여기서 δ_o 는 전력변환기의 부하각이며, 삼각함수에 의해 아래의 수학적식 8과 같이 정의된다.

[149] [수식8]

$$\delta_o = \sin^{-1} \frac{X_o I_o \cos \phi - R_o I_o \sin \phi}{V_o^*}$$

[150] 수학적식 8에서, δ_o 값이 상대적으로 매우 작고

$$V_o \approx V_o^*$$

라고 가정하면, 수학적식 8은 아래의 수학적식 9와 같이 간략하게 표현될 수 있다.

[151] [수식9]

$$\delta_o = \sin^{-1} \frac{\frac{X_o}{V_o} P_g - \frac{R_o}{V_o} Q_g}{V_o^*} \approx \frac{\frac{X_o}{V_o} P_g - \frac{R_o}{V_o} Q_g}{V_o^*} \approx \frac{X_o}{V_o^2} P_g - \frac{R_o}{V_o^2} Q_g$$

[152] 한편, 저역통과필터를 적용한 수학적식 1은 아래의 수학적식 10과 같이 선형화된 형태로 표현될 수 있다.

[153] [수식10]

$$\Delta P_g = \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right) (g \Delta V_o + h \Delta \theta_o), \Delta Q_g = \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right) (e \Delta V_o - f \Delta \theta_o)$$

[154] 수학적식 10에서

$$\bar{\theta}_g = \delta_g - \theta_{o0} + \theta_g$$

이다.

[155] 그리고

$$e = \frac{V_g}{Z_g} \sin \bar{\theta}_g, f = \frac{V_o V_g}{Z_g} \cos \bar{\theta}_g, g = \frac{V_g}{Z_g} \cos \bar{\theta}_g, h = \frac{V_o V_g}{Z_g} \sin \bar{\theta}_g$$

이다.

[156] 수학식 10을 수학식 6에 대입하면, 그리드포밍 전력변환기의 전압 크기 선형 모델을 구할 수 있다. 그리드포밍 전력변환기의 전압 크기 선형 모델은 수학식 11과 같이 표현될 수 있다.

[157] [수식11]

$$\Delta V_o = -nG(s) \left(\frac{\omega_t}{s + \omega_t} \right) (e \Delta V_o - f \Delta \theta_o) - \left(\frac{\omega_t}{s + \omega_t} \right) (a \Delta V_o + b \Delta \theta_o)$$

[158] 수학식 11에서

$$a = \frac{R_o V_g^2}{V_o^2 Z_g} \cos \delta_g + \frac{X_o V_g^2}{V_o^2 Z_g} \sin \delta_g, b = \frac{R_o V_g}{Z_g} \sin \bar{\theta}_g - \frac{X_o V_g}{Z_g} \cos \bar{\theta}_g$$

이다.

[159] 위의 수학식 9와 수학식 10을 수학식 7에 대입하면, 그리드포밍 전력변환기의 전압 위상 선형 모델을 구할 수 있다. 그리드포밍 전력변환기의 전압 위상 선형 모델은 수학식 12와 같이 표현될 수 있다.

[160] [수식12]

$$\Delta \theta_o = -\frac{1}{s} \left(m_p + \frac{m_t}{s} \right) \left(\frac{\omega_t}{s + \omega_t} \right) (g \Delta V_o + h \Delta \theta_o) - \left(\frac{\omega_t}{s + \omega_t} \right) (c \Delta V_o + d \Delta \theta_o)$$

[161] 수학식 12에서

$$c = \frac{2X_o V_g^2}{V_o^2 Z_g} \cos \delta_g - \frac{2R_o V_g^2}{V_o^2 Z_g} \sin \delta_g, d = \frac{X_o V_g}{Z_g} \sin \bar{\theta}_g + \frac{R_o V_g}{Z_g} \cos \bar{\theta}_g$$

이다.

[162] 다음, 수학식 11과 수학식 12를 결합하면 그리드포밍 전력변환기의 상태 공간 모델을 구할 수 있다. 그리드포밍 전력변환기의 상태 공간 모델은 수학식 13과 같이 표현될 수 있다.

[163] [수식13]

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_{gf} = \mathbf{A}_{gf} \Delta \mathbf{X}_{gf} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{gf}$$

[164] 수학식 13에서

$$\mathbf{X}_{gf} = [\Delta \theta_o \quad \Delta D \theta_o \quad \dots \quad \Delta D^i \theta_o \quad \Delta V_o \quad \Delta D V_o \quad \dots \quad \Delta D^j V_o]^T$$

이다. D^n 은 n 차 미분을 나타낸다.

[165] 위의 수학적식 13에 사용된 인자는 다음과 같이 구할 수 있다. 우선, 수학적식 11에 사용된 $G(s)$ 는 수학적식 15와 같이 정리될 수 있다.

[166] [수식14]

$$G(s) = \frac{g_{n2}s^2 + g_{n1}s + g_{n0}}{g_{d5}s^5 + g_{d4}s^4 + g_{d3}s^3 + g_{d2}s^2 + g_{d1}s + g_{d0}}$$

[167] 수학적식 14에서,

$$g_{n0} = g_{n2} = g_{d0} = k_{vp}k_{ip}k_{pwm},$$

$$g_{n1} = k_{pwm}(k_{vp}k_{ii} + k_{vi}k_{ip}),$$

$$g_{d1} = k_{pwm}k_{ip}k_{vi} + k_{pwm}k_{ii}k_{vp} + k_{vi},$$

$$g_{d2} = k_{pwm}k_{ip}k_{vp} + k_{pwm}k_{ii}C_f + k_{vp} + k_{vi}\tau_{pwm},$$

$$g_{d5} = L_f C_f \tau_{pwm},$$

$$g_{d3} = R_f C_f + k_{pwm}k_{ip}C_f + k_{vp}\tau_{pwm},$$

및

$$g_{d4} = L_f C_f + R_f C_f \tau_{pwm}$$

이다.

[168] 다음, 수학적식 14를 수학적식 11에 대입하면,

$$\Delta V_o$$

에 관한 미분 방정식을 수학적식 15와 같이 만들 수 있다.

[169] [수식15]

$$(g_{d5}s^6 - b_{26}s^6 - b_{25}s^4 - b_{24}s^3 - b_{23}s^2 - b_{22}s - b_{21})\Delta V_o \\ = (b_{16}s^5 + b_{15}s^4 + b_{14}s^3 + b_{13}s^2 + b_{12}s + b_{11})\Delta \theta_o$$

[170] 수학적식 15의 인자의 상세 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [171] \quad b_{11} &= n\omega_c f g_{n0} - \omega_c b g_{d0}, & b_{21} &= \zeta \omega_c g_{d0} - n\omega_c e g_{n0}, \\ b_{12} &= n\omega_c f g_{n1} - \omega_c b g_{d1}, & b_{22} &= -g_{d0} + \zeta \omega_c g_{d1} - n\omega_c e g_{n1}, \\ b_{13} &= n\omega_c f g_{n2} - \omega_c b g_{d2}, & b_{23} &= -g_{d1} + \zeta \omega_c g_{d2} - n\omega_c e g_{n2}, \\ b_{14} &= -\omega_c b g_{d3}, & b_{24} &= -g_{d2} + \zeta \omega_c g_{d3}, \\ b_{15} &= -\omega_c b g_{d4}, & b_{25} &= -g_{d3} + \zeta \omega_c g_{d4}, \\ b_{16} &= -\omega_c b g_{d5}, & b_{26} &= -g_{d4} + \zeta \omega_c g_{d5}, \\ \zeta &= -(1+a) \end{aligned}$$

[172] 위와 비슷한 방식으로 수학적식 14를 수학적식 12에 대입하면,

$$\Delta \theta_o$$

에 대한 미분 방정식을 수학적식 16과 같이 만들 수 있다.

[173] [수식16]

$$\begin{aligned} & \left\{ s^3 + (\omega_c + \omega_c d)s^2 + m_p \omega_c h s + m_i \omega_c h \right\} \Delta \theta_o \\ & = (-\omega_c c s^2 - m_p \omega_c g s - m_i \omega_c g) \Delta V_o \end{aligned}$$

[174] 위에 정의된 상수를 이용하여 수학적 식 13에서 정의된 A_{gr} 매트릭스를 다음의 수학적 식 17과 같이 표현할 수 있다.

[175] [수식17]

$$A_1 = \begin{bmatrix} [O]_{2 \times 1} & [I]_{2 \times 2} & [O]_{2 \times 3} \\ & [A_{11}] & \\ & [O]_{5 \times 6} & \\ & [A_{12}] & \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} & [O]_{2 \times 6} \\ & [A_{21}] \\ [O]_{5 \times 1} & [I]_{5 \times 5} \\ & [A_{22}] \end{bmatrix}$$

[176] 수학적 식 17에서 사용된 인자의 상세 정의는 다음과 같다.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{11} \end{bmatrix}, \quad A_{21} = \begin{bmatrix} a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{21} \end{bmatrix},$$

$$A_{12} = [b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \ b_{14} \ b_{15} \ b_{16}] / g_{d5},$$

$$A_{22} = [b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \ b_{24} \ b_{25} \ b_{26}] / g_{d5},$$

$$a_{11} = [-m_i \omega_c h \quad -m_p \omega_c h \quad -\omega_c - \omega_c d],$$

$$a_{21} = [-m_i \omega_c g \quad -m_p \omega_c g \quad -\omega_c c]$$

[178] 여기서, a_{11} , a_{21} 은 계수(coefficients)를 나타낸다.

[179] 도 13a 내지 도 13c는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법의 안정도 확인 모델에 대한 특정 인자 수정에 따른 근궤적을 나타낸 도면들이다.

[180] 도 13a는 그리드포밍 제어기와 계통의 위상 차이 초기값에 대한 근궤적이다. 도 13a에 의하면, 선박 전력 계통과의 초기 위상 차이가 커질수록 특정 근이 양의 실수를 가진 근을 가지게 되어 시스템이 불안정해지는 것을 확인할 수 있다.

[181] 도 13b는 초기 위상 차이로 인하여 시스템이 불안정한 상태에서 가상 임피던스 값을 변경하며 그린 근궤적도이다. 도 13b에서와 같이 가상 임피던스의 가상 인덕턴스 성분을 증가시키는 경우, 양수를 가진 근이 이동하여 음수를 가지게 되므로 시스템이 안정해지는 것을 확인할 수 있다.

[182] 한편, 도 13c에서와 같이 가상 임피던스의 가상 저항 성분만 증가시키는 경우에는 시스템 안정 효과가 크지 않고, 음수 실근을 중심점에서 멀어지게 하므로, 시스템 제동 특성을 안 좋게 만드는 효과가 있음을 확인할 수 있다.

- [183] 도 14는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법에 채용할 수 있는 시뮬레이션 제어 구성도이다.
- [184] 도 14는 농형유도발전기의 전력변환기가 그리드피딩에서 그리드포밍으로 제어 모드를 전환할 때의 시뮬레이션을 위한 선박 전력 제어기의 적어도 일부 구조에 대응될 수 있다. 선박 전력 제어기는 그리드피딩 제어부(417)과 그리드포밍 제어부(418)를 구비할 수 있다.
- [185] 그리드피딩 제어부(417)는 3상(abc) 전압(vabc)을 dq-축에 따라 변환한 q축 출력 전압(v_{oq})과 d축 출력전압(v_{od})을 출력하는 DQ변환부, 위상동기회로(phase locked loop, PLL), 전류 제어기(current controller), DQ역변환부를 구비할 수 있다. 그리드포밍 제어부(418)는 전력 평형(power equation) 처리부, 드롭 함수(droop function) 처리부, 전압 제어기(voltage controller), 전류 제어기(current controller), 2개의 DQ 변환부들, 및 DQ역변환부를 구비할 수 있다.
- [186] 그리드피딩 제어부(417)에서 생성된 제1 컨버터 전압 명령(uabc,feed)과 그리드포밍 제어부(418)에서 생성된 제2 컨버터 전압 명령(uabc,form)은 제1 시간($t=T_1$)에서 스위치보드의 회로차단기의 절체(switched) 동작에 따라 선박 전력 제어기의 PWM 제어 모듈에 선택적으로 인가되어 선박 전력 계통에서의 축발전기에 연결된 전력변환기의 작동 모드를 전환하도록 기능할 수 있다.
- [187] 즉, 선박 전력 제어기는 축발전기의 전력변환기가 제어 모드를 전환할 때, 제1 시간(T_1) 이전에는 그리드피딩 상태로 기준 전력 값이 0이 되도록 제어하고 있다가, 제1 시간(T_1) 이후에 즉시 그리드포밍 모드로 제어 모드를 전환할 수 있다.
- [188] 도 15a 및 도 15b는 도 14의 시뮬레이션 제어 구성에 따른 그리드피딩과 그리드포밍의 제어모드 전환 간 유효전력 및 무효전력에 대한 시뮬레이션 결과들을 나타낸 그래프들이다.
- [189] 도 15a 및 도 15b에서는 가상 임피던스의 적용 여부와 성분 조합에 따른 제어모드 전환 간 유효전력 및 무효전력의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과를 수치로 나타내면 표 2와 같다.

[190] [표2]

	VI	Set A	Set B	Set C	Set D
RMS variation	R_v [pu]	0.0000	0.0030	0.0000	0.0030
	L_v [pu]	0.0000	0.0000	0.0035	0.0035
$\Delta P_{o,RMS}$ [pu]	1)	0.8004	0.7996	0.1829	0.1826
$\Delta Q_{o,RMS}$ [pu]	2)	1.5069	1.5084	0.1224	0.1219
$\Delta \omega_{o^*}^*_{RMS}$ [pu]	3)	0.0482	0.0480	0.0212	0.0212
$\Delta V_{o^*}^*_{RMS}$ [pu]	4)	0.0360	0.0360	0.0031	0.0030

- [191] 도 15a 및 도 15b에서의 세트 A(Set A)의 결과에서 볼 수 있듯이, 가상 임피던스가 없을 경우, 제어 모드 전환 시 유효전력, 무효전력, 전압, 주파수 모두 심한 변동을 겪어 계통에서 탈락되는 것을 확인할 수 있다.
- [192] 그리고 가상 저항 성분만을 가진 세트 B(Set B)의 결과도 세트 A(Set A)와 크게 차이 없는 결과를 보여주며, 계통에서 탈락되는 것을 확인할 수 있다.

- [193] 한편, 가상 인덕턴스 성분을 가진 세트 C(Set C)와 세트 D(Set D)의 경우에는 모든 지표에서 큰 변동 없이 계통 연계되어 그리드포밍 제어를 시작하는 것을 볼 수 있다. 그리드포밍 제어를 정상적으로 수행하므로, 동기발전기 운전을 정지하여도 단독으로 선박 전력 계통의 부하에 전력을 공급할 수 있다.
- [194] 이와 같이, 시뮬레이션을 통해 그리드포밍 제어 모드로 전환을 위해 가상 인덕턴스가 필요함을 할 수 있고, 도 5에서 설명한 것과 같은 효율적인 농형유도발전기 운영 시퀀스가 가능함도 확인할 수 있다. 또한, 도 13a 내지 도 13c를 참조하여 앞서 설명한 근궤적도 결과와 시뮬레이션 결과가 유사함도 확인할 수 있다.
- [195] 도 16a 및 도 16b는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법을 실제 선박에 적용하여 그리드피딩과 그리드포밍의 제어모드 전환 간 유효전력 및 무효전력에 대한 시뮬레이션 결과들을 나타낸 그래프들이다.
- [196] 도 16a 및 도 16b에서와 같이, 본 실시예의 선박 전력 제어기에 대한 실제 선박 상에서의 검증은, 도 15a 및 도 15b를 참조하여 앞서 설명한 시뮬레이션과 동일한 조건에서 그리드포밍 모드로의 제어 모드 전환 시 가상 임피던스의 효과에 대해 실험을 수행하였다. 4개의 가상 임피던스 세트에 대해서 얻은 실험 결과를 표 3에 나타내었다.

[197] [표3]

	VI	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
RMS variation	R_v [pu]	0.0000	0.0011	0.0000	0.0011
	L_v [pu]	0.0000	0.0000	0.0759	0.0759
$\Delta P_{o,RMS}$ [pu]	1)	0.0276	0.0260	0.0153	0.0191
$\Delta Q_{o,RMS}$ [pu]	2)	0.0761	0.1881	0.0482	0.0441
$\Delta \omega_{o,*RMS}$ [pu]	3)	0.0172	0.0168	0.0005	0.0004
$\Delta V_{o,*RMS}$ [pu]	4)	0.0187	0.0475	0.0020	0.0023

- [198] 세트 A(Set A)와 같이 가상 임피던스가 없는 경우, 제어 모드 전환 시 유효전력, 무효전력, 전압, 주파수 모두 심한 변동을 겪어 선박 전력 계통에서 축발전기 시스템이 탈락되는 것을 확인할 수 있다.
- [199] 또한, 가상 저항 성분만을 가진 세트 B(Set B)도 제어 불안정에 의해 선박 전력 계통에서 탈락되는 것을 알 수 있다.
- [200] 시뮬레이션 결과와 동일하게 가상 인덕턴스 성분을 가진 세트 C(Set C)와 세트 D(Set D)의 경우에는 모든 지표에서 큰 변동 없이 선박 전력 계통과 연계되어 축발전기 시스템이 그리드포밍 제어를 시작한 것을 확인할 수 있다.
- [201] 이러한 실험 결과는 전술한 실시예의 근궤적도 결과 및 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다.
- [202] 도 17a 및 도 17b는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법에서 자체 이차 전압 제어를 적용하기 전과 후의 그리드포밍 전력변환기가 동기발전기와 병렬 운전할 때의 역률, 유효전력 및 무효전력을 나타낸 그래프들이다. 그리고 도 18a 및 도 18b는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법에서 자체 이차 전압 제어를 적용하

기 전과 후의 그리드포밍 전력변환기가 동기발전기와 병렬 운전할 때의 기준 전압과 출력 전압을 나타낸 그래프들이다.

- [203] 도 17a, 도 17b, 도 18a 및 도 18b는 자체 이차 전압 제어에 대한 실험 검증 결과를 보여준다. 즉, 동기발전기와 그리드포밍 전력변환기가 병렬 운전 시의 유효전력(active power), 무효전력(reactive power), 역률(power factor) 및 출력 전압(output voltage)에 대한 파형들을 그레이 색상의 농도 차이로 구분하여 각각 나타낸다.
- [204] 자체 이차 전압 제어를 적용하지 않은 경우, 전력변환기의 임피던스 및 절연변압기 측의 전압 강하로 최종 전압 크기 출력 전압의 드롭 특성 곡선(부하-전압)이 부하가 올라감에 따라 동기발전기 드롭 곡선(부하-전압)보다 낮아지게 되어 도 17a 및 도 18a와 같이 선박 전력 계통에 무효 전력을 원활하게 공급하지 못하는 현상이 발생하게 된다.
- [205] 선박 부하의 역률이 0.8인 상태에서 전력변환기의 역률이 0.9까지 올라갔기 때문에, 이 도면들에 표현되어 있지만 다른 동기발전기의 역률이 0.7 수준으로 낮아져 무효전력 분담에 불균형이 발생하였다. 선박의 안전 기준을 정의하는 선급 기준 상(line) 무효 전력의 10% 이상의 불균형에 대해서는 허용을 하지 않기 때문에, 안전 기준에 맞지 않는 운전 상태이다.
- [206] 위에서 설명한 도 12와 같이 본 실시예의 자체 이차 전압 제어 구조를 적용하여 실험한 결과는 도 17b 및 도 18b와 같다. 이 도면들에 의하면, 선박 부하의 역률(power factor)은 0.8로 고정인 상태에서, 다른 동기발전기들과 동일하게 0.8 역률로 무효 전력을 원활하게 공급한 것을 확인할 수 있다.
- [207] 도 19a 및 도 19b는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법에서 그리드포밍 전력변환기의 단독 운전 시의 역률, 유효전력 및 무효전력을 나타낸 그래프들이다. 그리고 도 20a 및 도 20b는 본 실시예의 선박 전력 계통 운전 방법에서 그리드포밍 전력변환기의 단독 운전 시의 기준 전압과 출력 전압을 나타낸 그래프들이다.
- [208] 도 19a, 도 19b, 도 20a 및 도 20b는 그리드포밍 전력변환기가 단독 운전 시의 실험 검증 결과로서, 자체 이차 전압 제어에 대한 적용 유무에 따른 유효전력, 무효전력, 역률 및 출력 전압에 대한 파형들을 그레이 색상의 농도 차이로 구분하여 보여준다.
- [209] 선박 전력 계통 내 축발전기 시스템의 단독 운전 시에 자체 이차 전압 제어를 적용하지 않은 경우, 전력변환기의 임피던스 및 절연변압기 측의 전압 강하로 최종 전압 크기가 출력 전압의 드롭 외에 출력 전류에 의한 전압 강하까지 수반하여, 도 19a 및 도 20a와 같이 부하 크기에 따라 전압 강하가 정격 전압의 4%까지 발생하는 것을 확인할 수 있다.
- [210] 한편, 자체 이차 전압 제어가 적용된 전력변환기의 단독 운전 실험 결과의 파형은 도 19b 및 도 20b에서 확인할 수 있다. 절연변압기 2차측의 전압을 정격 전압 기준 1pu를 유지할 수 있도록 이차 전압 제어가 수행되어, 전력변환기 제어 페루프의 임피던스와 절연변압기의 전압 강하를 보상하기 때문에, 절연변압기 2차측 전압이 1pu로 유지된 것을 확인할 수 있다.

- [211] 전술한 실시예들에서와 같이, 본 발명은 선박에 적용되는 그리드포밍 축발전기의 효율적인 계통 연계 제어 방법 및 선내 전력 계통 전력 품질 향상을 위한 자체 이차 전압 제어 방법을 제공할 수 있다. 또한 동기발전기의 드롭 특성을 모사할 때, 그리드포밍 전력변환기 및 연계 장비(절연변압기 등)에서 발생하는 전압 강하를 해결하기 위해 자체 이차 전압 제어를 수행할 수 있다. 이때, 병렬 운전과 단독 운전 각각의 전압 기준에 맞게 적용할 수 있다. 게다가, 전력변환기의 그리드 피딩과 그리드포밍 제어 모드 전환 시의 안정성 확보를 위해 가상 임피던스 기반의 그리드포밍 제어 모드를 적용할 수 있고, 이를 활용한 농형유도기기 기반 축발전기의 효율적인 계통 투입 시퀀스를 제공할 수 있다. 그리고, 수식 모델을 통해 근계적으로 안정도를 평가하고 MATLAB/SIMULINK 시뮬레이션과 실제 축발전기가 적용된 선박에서의 실증 실험을 통해 본 발명의 효과를 검증하였다.
- [212] 전술한 본 실시예에 따른 방법들은 다양한 컴퓨터 수단을 통해 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위해 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다.
- [213] 컴퓨터 판독 가능 매체의 예에는 롬(rom), 램(ram), 플래시 메모리(flash memory) 등과 같이 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러(compiler)에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터(interpreter) 등을 사용해서 컴퓨터에 의해 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상술한 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 적어도 하나의 소프트웨어 모듈로 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.
- [214] 이상 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허 청구의 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

청구범위

- [청구항 1] 선박 전력 계통에 축발전기를 전기적으로 연결하는 단계;
 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계;
 상기 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계;
 상기 직류단 캐패시터의 전류를 이용하여 상기 축발전기를 자화시키는 단계;
 상기 축발전기를 자기발전시키는 단계;
 상기 전력변환기의 그리드측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계;
 상기 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제어하여 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터를 충전시키는 단계; 및
 상기 축발전기가 선박 전원 계통의 분산형 발전기로서 동작하도록 상기 전력변환기를 통해 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계;
 를 포함하는 선박 전력 관리 방법.
- [청구항 2] 청구항 1에 있어서,
 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계는 상기 그리드측 컨버터를 제어하여 상기 직류단 캐패시터의 정격 전압의 적어도 일부를 충전하는 것을 포함하고, 충전된 직류 전압은 상기 전력변환기의 제어에 의해 유지되는, 선박 전력 관리 방법.
- [청구항 3] 청구항 1에 있어서,
 상기 축발전기를 자화시키는 단계 전에 상기 그리드측 컨버터를 그리드 피딩 모드로 제어하는 단계를 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.
- [청구항 4] 청구항 3에 있어서,
 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터가 정격 전압 또는 기설정 전압으로 충전되면, 상기 그리드측 컨버터를 상기 그리드피딩 모드에서 그리드포밍 모드로 전환시키는 단계를 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.
- [청구항 5] 청구항 4에 있어서,
 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계는 미리 설정되거나 실시간 수집되는 측정값들에 기초하여 결정되거나 선택된 제어 드롭 계수에 따라 상기 그리드측 컨버터의 전압 제어를 수행하는 것을 포함하는, 선박 전력 관리 방법.
- [청구항 6] 청구항 5에 있어서,
 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계는 피드백된 출력 전압 레퍼런스와 미리 설정된 고정형 가상 임피던스 각각을 출력 전압 레퍼런스에서

감산 연산하여 전압 제어기에 전달하는 단계를 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.

[청구항 7] 청구항 5에 있어서,
상기 축발전기에 대한 토크 제어 및 자속 제어 중 적어도 하나 이상을 수행하여 상기 직류단 캐패시터의 전압을 유지하는 단계를 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.

[청구항 8] 청구항 5에 있어서,
상기 축발전기에 대한 토크 제어 및 자속 제어 중 적어도 하나 이상을 수행하여 상기 선박 전력 계통의 공통 결합점에 상기 전력변환기를 연계시키는 단계를 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.

[청구항 9] 청구항 8에 있어서,
상기 축발전기에 대한 토크 제어 또는 자속 제어를 위해 고정자 저항 오차를 포함하도록 정의되는 준정정 라푸노프 함수를 이용하여 상기 축발전기에 대한 고정자 저항을 적응적으로 추정하는 단계를 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.

[청구항 10] 청구항 9에 있어서,
상기 추정하는 단계는, 상기 준정정 라푸노프 함수의 도함수를 이용하여 방정식을 풀 때, 방정식 해답의 빠른 수렴을 위해 저역통과필터를 이용한 적분 제어를 수행하는 것을 더 포함하는, 선박 전력 관리 방법.

[청구항 11] 그리드포밍 축발전기 기반 선박 전력 계통을 위한 선박 전력 관리 장치로서,
축발전기 계통 투입 시퀀스를 구비하는 적어도 하나의 명령; 및
상기 적어도 하나의 명령을 저장하는 메모리에 연결되어 상기 적어도 하나의 명령을 수행하는 프로세서;
를 포함하고,
상기 프로세서는, 상기 적어도 하나의 명령에 의해,
선박 전력 계통에 축발전기를 전기적으로 연결하는 단계;
상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계;
상기 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계;
상기 직류단 캐패시터의 전류를 이용하여 상기 축발전기를 자화시키는 단계;
상기 축발전기를 자기발전시키는 단계;
상기 전력변환기의 그리드측 컨버터를 제로 전력 레퍼런스(zero power reference)로 제어하는 단계;
상기 전력변환기의 발전기측 컨버터를 제어하여 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터를 충전시키는 단계; 및

상기 축발전기가 선박 전원 계통의 분산형 발전기로서 동작하도록 상기 전력변환기를 통해 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계;
를 수행하는 선박 전력 관리 장치.

- [청구항 12] 청구항 11에 있어서,
상기 프로세서는, 상기 축발전기에 연결된 전력변환기의 직류단 캐패시터를 충전하는 단계에서, 상기 그리드측 컨버터를 제어하여 상기 직류단 캐패시터의 정격 전압의 적어도 일부를 충전하고, 상기 전력변환기의 제어를 통해 충전된 직류단 전압을 유지하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 13] 청구항 11에 있어서,
상기 프로세서는, 상기 축발전기를 자화시키는 단계를 수행하기 전에 상기 그리드측 컨버터를 그리드피딩 모드로 제어하는 단계를 더 수행하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 14] 청구항 13에 있어서,
상기 프로세서는, 상기 축발전기의 전력으로 상기 직류단 캐패시터가 정격 전압 또는 기설정 전압으로 충전되면, 상기 그리드측 컨버터를 상기 그리드피딩 모드에서 그리드포밍 모드로 전환시키는 단계를 더 수행하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 15] 청구항 14에 있어서,
상기 프로세서는, 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계에서, 미리 설정되거나 실시간 수집되는 측정값들에 기초하여 결정되거나 선택된 제어 드롭 계수에 따라 상기 그리드측 컨버터의 전압 제어를 수행하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 16] 청구항 15에 있어서,
상기 프로세서는 상기 자체 2차 전압 제어를 수행하는 단계에서, 피드백된 출력 전압 레퍼런스와 미리 설정된 고정형 가상 임피던스 각각을 출력 전압 레퍼런스에서 감산 연산하여 전압 제어기에 전달하는 단계를 더 수행하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 17] 청구항 15에 있어서,
상기 프로세서는, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 및 자속 제어 중 적어도 하나 이상을 수행하여 상기 직류단 캐패시터의 전압을 유지하는 단계를 더 수행하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 18] 청구항 15에 있어서,
상기 프로세서는, 상기 축발전기에 대한 토크 제어 또는 자속 제어를 위해 고정자 저항 오차를 포함하도록 정의되는 준정정 라푸노프 함수를 이용하여 상기 축발전기에 대한 고정자 저항을 적응적으로 추정하는 단계를 더 수행하는, 선박 전력 관리 장치.
- [청구항 19] 청구항 11 내지 청구항 18 중 어느 한 항의 선박 전력 관리 장치가 탑재된 선체를 포함하는 선박.

[청구항 20] 청구항 1 내지 청구항 10 중 어느 한 항의 선박 전력 관리 방법을 이용하는 선박.