

선박 축 발전기 연계 그리드 포밍을 위한 MVA급 동기 전력 제어 로직 개발

김상현, 박승빈, 설승기
HD한국조선해양

Development of MVA-level synchronous power control logic for grid forming linked to ship shaft generator

Sanghyun Kim, Seungbin Park, Seung-Ki Sul
HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering

ABSTRACT

축 발전기 시스템은 선박의 대형 추진엔진 축에 발전기와 전력변환기기를 연결하여 전력을 생산하는 시스템이다. 통상적으로 대형 선박의 발전 시스템 용량은 MVA 이상이며, 이러한 선박에 적용되는 축 발전 시스템은 선박의 발전 엔진의 동기 발전기의 용량과 비슷하다. 통상의 그리드 팔로잉(Grid-Following) 제어를 축 발전기 시스템에 적용할 경우, 전력 컨버터의 빠른 동작 특성으로 인해, 선박에 내재한 동기 발전기와의 병렬 운전 시 과도 응답 불균형을 초래하고, 기동전류가 큰 유도전동기 직입 기동 시 과도한 순시 전류가 발생하여 축 발전기의 계통 측 컨버터의 과전류 차단 상태를 야기 할 수 있다. 또 병렬 운전 중인 선박 발전기가 사고로 정지할 경우 축 발전기도 같이 정지하게 되어 선박 전체에 정전을 초래하는 위험한 상황에 이를 수도 있다. 본 논문은 선박 발전 시스템에서 이와 같은 여러 문제를 동시에 해결할 수 있는 그리드 포밍(Grid-Forming)을 기반으로 한 동기 전력 제어 방식을 제안한다. 그리드 포밍 제어는 통상의 동기 발전기와 유사하게 독자적으로 전압과 주파수를 생성하므로 위에서 언급한 다양한 문제점에서 비교적 자유롭다. 제안하는 방법은 MVA급 축 발전기 시스템과 연계한 시뮬레이션 및 실험으로 검증되었다.

1. 서 론

최근 세계적으로 증가하는 친환경 에너지 수요 급증에 따라 친환경 선박에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히, 기존 중유 시스템 대비 이산화탄소를 대폭 저감 할 수 있는 LNG 연료를 함께 사용하는 이중 연료(Dual Fuel) 엔진이 많이 사용되고 있다. 하지만, 해당 방법은 액화천연 가스(LNG)를 연료로 사용하기 때문에 기존 대비 연료비용이 많이 소요된다는 단점이 있어, 연료 효율을 높이는 여러 방법이 이전보다 큰 관심을 받고 있다. 그중에서도 특히, 대형 선박의 축 발전기 시스템이 많은 주목을 받고 있다.

축 발전기 시스템은 에너지 효율이 높은 선박의 대형 추진엔진 축에 발전기와 전력변환기기를 연결하여 전력을 생산하는 시스템이다. 그림 1은 대형 선박의 축 발전기 시스템 구성도를 나타낸다. 대형 추진엔진을 통해 추진 동력의 여유분을 이용하여 전력을 생산하므로 별도의 발전 엔진을 이용하여 전력을 생산할 때보다 선박의 전체 연료 사용량을 저감 할 수 있어 대형 선박에 적합한 솔루션이다. 축 발전기의 용량은 통상적으로

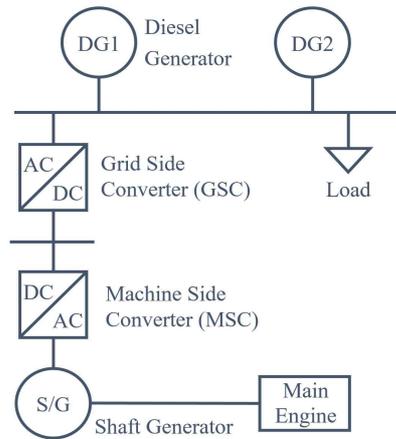


그림 1 대형 선박의 축 발전기 시스템 구성도
Fig. 1 Shaft generator system diagram of a large ship

기존 발전 엔진의 동기 발전기 용량과 비슷하고, 선박이 추진하는 상황에서는 기존 발전기와 병렬로 운전된다.

통상 육상 전력 계통 시스템에서는 계통이 강 계통(Strong grid) 특성을 나타내므로 계통의 전원각과 전압을 추종하는 그리드 팔로잉(Grid-Following) 제어가 주로 사용된다. 선박의 경우 내재한 동기 발전기 용량과 축 발전 시스템의 전력 용량이 유사하며, 선박 동기 발전기 계통이 약 계통(Weak grid) 특성을 나타낸다. 이러한 시스템에서 축 발전 시스템의 계통 측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)의 빠른 동작 특성은, 선박에 내재한 동기 발전기와의 병렬 운전 시 과도 응답 불균형을 초래하여 GSC의 과전류 보호에 의한 축 발전기 출력 차단을 초래할 수 있다. 특히, 기동전류가 큰 유도전동기 직입(In-line) 기동 시 GSC에 제한치 이상의 전류가 발생하여 GSC의 과전류 차단 상태를 야기할 수 있다. 또 선박 발전기가 사고로 정지할 경우 그리드 팔로잉 제어에서는 기존 전원 각이 없으므로, 축 발전기도 같이 정지하게 되어 선박 전체에 정전을 초래하는 위험한 상황에 이를 수도 있다.

본 논문에서는 선박 발전 시스템에서 이러한 여러 문제를 해결하기 위해, 축 발전 시스템에 동기 전력 제어(Synchronous Power Control, SPC)가 가능한 그리드 포밍(Grid-Forming) 방법의 적용을 제안한다. 해당 방법은 동기 발전기의 외부 특성을 모의하여 GSC를 제어하므로, 계통의 관점에서 보면 전력전자 발전원이 동기 발전기와 유사하게 보이도록 운전하는 방법이다^[1]. 이러한 제어 기법은 육상에서 전원 계통이 약 계통일

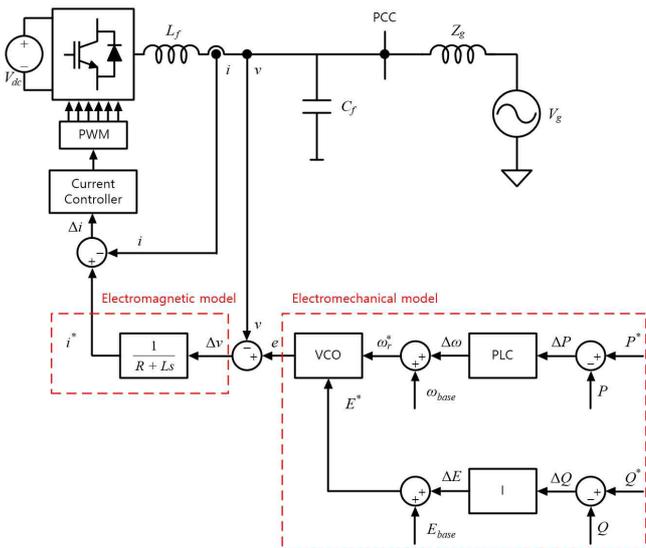


그림 2 동기 전력 제어기 블록 구성도
Fig. 2 Block Diagram of Synchronous Power Controller

때 제어 안정성을 높이기 위해 사용되었다. 또 선박 전력 계통에서 해당 방법을 사용하기 위한 유효 및 무효(유무효) 전력 지령을 계산하는 방법을 새롭게 제안한다. 축 발전기를 구동하는 발전기 쪽 컨버터(Machine Side Converter, MSC)와 GSC로 구성된 MVA급 시스템에서 GSC에 그리드 포밍을 적용하여 유무효 전력을 제어하는 제안된 기법은 시뮬레이션 및 실험으로 검증되었다.

2. 선박 축발전기 연계 그리드 포밍 제어로직

2.1 그리드 포밍 기반의 동기 전력 제어

동기 전력 제어 방식의 그리드 포밍 방법은 동기 발전기의 외부 특성을 모의하여 GSC가 동기 발전기의 특성을 가지도록 제어한다. 그림 2는 동기 전력 제어기의 블록 구성도를 나타낸다. 그림 2에서 확인 할 수 있듯이, 동기 전력 제어기 블록에서 가장 바깥 쪽의 외부 제어기는 기계적 특성 모델, 내부 제어기는 전자기적(Electromagnetic) 특성 모델로 구성되어 있으며, 해당 제어 모델 출력인 전류지령으로 전류 제어를 수행하여 GSC 출력 전압을 합성하는 구조로 구성되어 있다^[2].

기계적 특성 모델은 동기 발전기의 기계적 입력 전력과 전기적 출력 전력의 전달함수를 묘사하는 방식으로 구성된다. 해당 전달 함수는 감쇠비가 0인 단순 시지연(Time delay) 시스템으로 분석 가능하며 동기 발전기의 전기각과 계통의 전기각의 위상차 및 기전력, 임피던스로 유효 전력을 계산하는 수식으로 구성되어 있다. 이를 묘사하기 위해 동기 전력 제어기는 1차 시지연을 가지는 비례(Proportional) 제어기로 모델링하였으며, 가상 동기 발전기의 관성 모멘트 및 전력 최대값으로 제어기의 이득을 선정할 수 있다. 또한, 무효 전력 제어기는 1차 시지연의 특성을 가지기 위해 적분(Integral) 제어기로 모델링 하였다.

전자기적 특성 모델은 기계적 특성 모델 출력인 가상 동기 발전기의 각 주파수 지령과 전압 크기 지령을 교류 전압 지령으로 합성한 후 현재 전압과의 차를 가상의 시스템 어드미턴스(Admittance)와 곱하여 전류지령을 생성하는 방식으로 모델링 된다. 동기 발전기가 계통에 연계되었을 때, 내부 기전력에 차과도(Subtransient) 임피던스와 전류의 곱을 뺀 값이 계통 전압

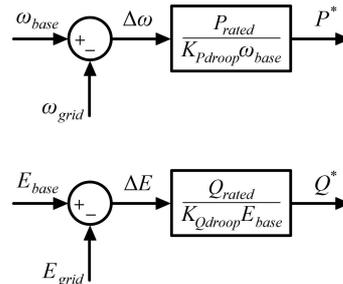


그림 3 동기 전력 제어기 블록 구성도
Fig. 3 Block Diagram of Synchronous Power Controller

과 같다는 전자기적 특성을 모델링한 것이다.

최종적으로 동기 발전기의 특성을 모델링한 제어 방법의 출력인 전류지령을 일반적인 동기좌표계 전류 제어기를 사용하여 컨버터의 출력 전압으로 합성한다.

2.2 선박 전력계통 연계 방법

위와 같은 동기 전력 제어 모델은 축발전 시스템이 주추진 엔진으로부터 발전하고자 하는 유효 전력 및 무효 전력 값을 각각 지령으로 입력해주어야 한다. 신재생 에너지 등에서의 육상의 전력 계통에서는 계통의 전력 용량이 큰 강 계통이므로, 계통의 전압 및 위상 각이 거의 일정하며 그리드 포밍 시스템에서 생성하는 전력을 흡수해줄 수 있기 때문에, 추가적인 전력 지령 생성 없이 동기 전력 제어 컨버터의 용량 내에서 원하는 전력 크기만큼의 상수 값을 입력해주면 된다. 하지만 선박의 전력 계통에서는 동기 전력 제어 기반의 그리드 포밍을 수행하는 축 발전기 시스템 용량이 선박 계통 동기 발전기 용량과 거의 비슷하기 때문에 선박 전력 계통에서 축 발전기의 전력용량 만큼 전력을 흡수할 수 없으며 현재 선박 내의 전력 부하 상황이 고려되어야 한다. 또한, 선박 전력 계통은 병렬 운전 시 유무효 전력 균형을 위해 모든 발전기에서 주파수 및 전압 드롭(Droop) 제어가 수행되기 때문에 계통의 전압 및 주파수가 일정하지 않다. 따라서 선박 전력 계통 내의 축 발전기 시스템의 그리드 포밍에서는 유무효 전력 값을 상수로 입력하는 방법은 불가능하며 추가적인 전력 지령 생성기를 통해 유무효 전력 지령을 입력해야 한다.

그림 3은 선박 전력 계통에서 축 발전기 시스템의 동기 전력 제어 유무효 전력 지령 생성 블록 구성도를 나타낸다. 수식의 ω_{base} 는 정격 각 주파수, ω_{grid} 는 계통 각 주파수, E_{base} 는 정격 전압 크기, E_{grid} 는 계통 전압 크기, P_{rated} 는 GSC 정격 유효 전력, Q_{rated} 는 GSC 정격 무효 전력, K_{Pdroop} 는 계통 동기 발전기 주파수 드롭 비, K_{Qdroop} 는 계통 동기 발전기 전압 드롭 비를 나타낸다.

유효 전력 지령을 생성하기 위해 현재 계통 주파수의 크기와 정격 주파수의 비율을 계산한 후, 이를 만족하는 유효 전력 크기를 계산하는 일종의 드롭 계산의 반대 과정을 수행한다. 마찬가지로 현재 계통 전압의 크기와 정격 전압의 비율을 계산한 후, 이를 만족하는 무효 전력 크기를 계산하는 방법으로 무효 전력 지령을 수행한다. 이러한 방법으로 유무효 전력 지령을 계산하면 현재 선박의 전기 부하 상황에 따른 전력 지령이 계산되며, 드롭 제어 특성이 포함되기 때문에 다른 동기 발전기와의 부하 분담이 자동적으로 수행되어 별도의 통신이 없이도 발전원간의 유무효 전력 균형을 이룰 수 있다.

표 1 시뮬레이션 및 실험 파라미터
Table 1 Parameters of simulation and experiment

Parameter	Mark	Value	Unit
DG rated active power	P_{DG}	2.4	MW
DG rated reactive power	Q_{DG}	1.8	MVar
GSC rated active power	P_{GSC}	2.4	MW
GSC rated reactive power	Q_{GSC}	1.8	MVar
Grid line to line voltage	V_{grid}	690	V
GSC switching frequency	f_{sw}	3.5	kHz

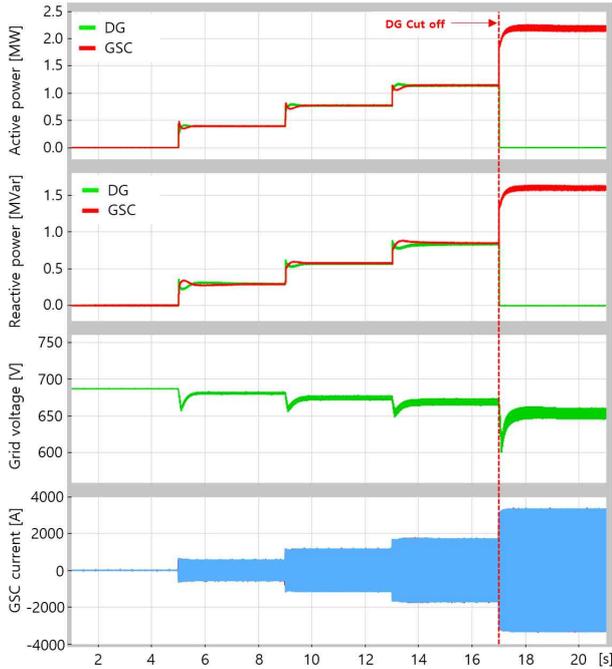


그림 4 선박 전력 계통 모델 그리드 포밍 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Grid forming simulation results of ship power system model

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션 결과

선박 전력 계통 연계 그리드 포밍 방식의 MVA급 축 발전기 시스템을 시뮬레이션으로 검증하였다. 표 1은 시뮬레이션 및 실험 조건을 나타내며, 그림 4는 선박 전력 계통에서의 그리드 포밍 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 선박 발전 엔진의 동기 발전기와 축 발전기 시스템이 동시에 병렬 운전하고 있는 상황에서 부하를 계단(Step)형태로 증가할 때마다 유무효 전력의 분담이 수행되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 병렬 운전이 진행되는 상황에서 선박 발전 엔진의 동기 발전기가 사고로 차단(Cut-off) 되는 상황을 모사하였다. 해당 상황에서도 정전이 되지 않고 축 발전기 시스템 단독운전으로 정상적인 전력 공급이 가능함을 확인할 수 있다.

3.2 실험 결과

그림 5는 육상 전력 계통에서의 그리드 포밍 실험 결과를 나타낸다. GSC에서 육상 전력 계통으로 유무효 전력 지령을 인가하여 원하는 유무효 전력을 계통으로 보내는 실험 상황의 결과이다. 실험 세트의 부하 조건으로 인해 약 170 kVA 수준

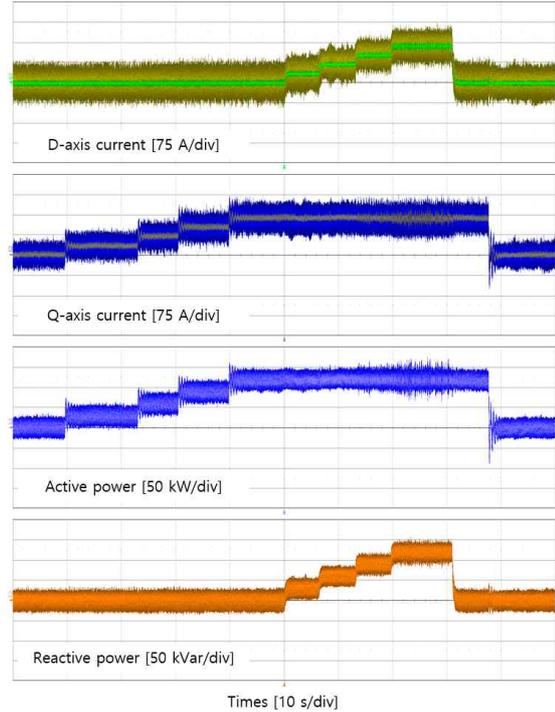


그림 5 육상 전력 계통 그리드 포밍 실험 결과
Fig. 5 Grid forming experimental results of strong grid

의 전력 제어를 수행하였다. 실험 결과에서 전력 제어 및 하위 전류 제어가 정상적으로 수행되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

선박 축 발전기 시스템은 효율이 높은 선박 주 추진 엔진에 연계된 발전기 및 전력변환기를 설치하여 전력을 생산하는 방법이다. 축 발전기 시스템은 전력변환기의 빠른 동특성을 가지고 있어 선박 발전기와 병렬 운전 시 과도 응답 불균형 및 급격한 부하 전류 변동 시 축 발전기의 계통 측 컨버터의 과전류 차단 상태와 같은 문제를 발생시킨다. 또한, 선박 발전기가 정지할 경우 축 발전기도 같이 정지하여 선박 전체에 정전을 초래하는 상황에 이를 수 있다. 본 논문에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위해 선박 축 발전기 시스템에 동기 전력 제어가 가능한 그리드 포밍 방법을 적용하는 것을 제안하였다. 또 선박 전력 계통에서 해당 방법을 사용하기 위한 유무효 전력 지령을 계산하는 방법을 새롭게 제안하였다. 제안하는 방법은 MVA급의 선박 전력 계통에서 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었다.

참고 문헌

- [1] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of power converters in AC microgrids," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- [2] J. Y. Maeng, S. H. Cui, "Soft Start-up Method for Grid-connected Grid-forming Converter," in The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, Vol 29, No. 2 ,pp. 92-98, Apr. 2024.