

Mode-adaptive Droop 제어 기반 하이브리드 전기추진선박 직류 전력 시스템의 다중 발전기 독립제어 기법

노을*, 주기환*, 서정민*, 추경민**
 한화에어로스페이스*, 한국전기연구원**

Decentralized Control Technique for Multi-generator DC Shipboard Microgrids based on Mode-adaptive Droop Control

Noh Eul*, Ki-Hwan Ju*, Jeong-Min Seo*, Kyoung-Min Choo**
 Hanwha Aerospace*, Korea Electrotechnology Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 Mode-adaptive Droop 제어가 적용된 하이브리드 전기추진선박의 직류전력시스템에서 다수의 발전기를 연계할 수 있는 제어 기법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 통신을 사용하지 않으므로 각 발전기는 모션 전압으로 부하량을 판단하며 부하에 따라 발전기를 순차적으로 기동 및 정지시켜 엔진이 최적효율을 유지할 수 있도록 제어한다. 제안된 발전기의 독립제어 알고리즘은 MATLAB Simulink기반의 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

1. 서론

최근 항만의 환경오염이 심해짐에 따라 국제해사기구 IMO에서는 선박의 탄소배출 규제를 강화하고 있다. 이에 따라 선박의 탄소배출량을 줄이기 위한 기술의 일환으로서 배터리와 전동기 기반의 추진시스템을 갖는 전기추진선박의 적용 사례가 증가하고 있다.^[1] 전기추진선박에서 추진 전력을 공급하기 위해 대용량의 전력시스템이 필요하며 에너지 손실을 최소화하기 위해 배터리 연계 시 에너지 변환단계가 적고 높은 변환효율을 갖는 직류전력시스템이 선호된다.^[2] 또한 직류전력시스템은 중장거리 운항을 위한 배터리-디젤엔진발전기 기반의 하이브리드 전기추진선박에서 가변속발전기의 적용을 통해 디젤엔진의 연료소비량을 최적화 할 수 있다. 그러나 엔진의 가변속은 발전기의 출력 동특성을 크게 저하시키므로 안정적인 전력 공급을 위한 전력시스템의 적절한 제어가 필요하다. 기존 연구에서는 하이브리드 전기추진선박 전력시스템에서 Mode-adaptive Droop 제어를 적용하여 최적운전을 수행하는 비통신 제어기법이 제안되었다.^[3] 그러나 이 논문에서는 하나의 가변속발전기와 Energy Storage System(ESS)를 갖는 단순한 시스템만을 고려하였으며 다수의 발전기를 운용하여 엔진 효율을 향상시키는 최적 운용제어에 대한 고려가 부족하였다. 따라서 본 논문에서는 기존의 Mode-adaptive Droop 제어가 적용된 전기추진선박의 직류전력시스템에서 다수의 가변속발전기와 배터리의 자율적인 연계가 가능한 독립제어기법을 제안한다.

2. 하이브리드 전기추진선박 직류전력시스템의 다중 발전기 독립제어 기법

2.1 Mode-adaptive Droop 제어 기반 하이브리드 전기추진선박 직류전력시스템 제어방법^[9]

본 논문에서 적용된 전기추진선박의 Mode-adaptive Droop 제어 기법 및 특성은 그림 1, 표 1과 같다. 적용된 기법에서는 전압에 따라 동작모드를 세 구간으로 나누어 제어하였고 모드 I 과 II에서는 가변속발전기가, 모드 II에서는 ESS가 모션전압을 제어하도록 하였다. 이 제어기법을 통하여 계통 전압은 설계된 전압 범위 안에서 통신 없이 안정적으로 제어되며 넓은 부하범위에서 발전기가 최적 엔진효율을 출력($P_{G,opt}$)을 갖는 모드 II에서 동작한다.

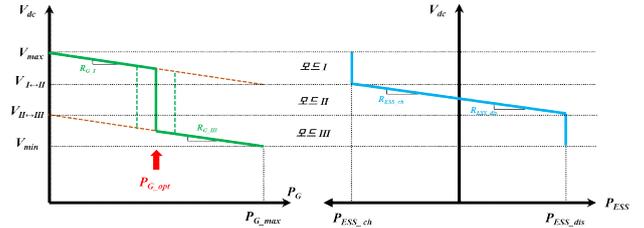


그림 1 Mode-adaptive Droop 제어 곡선
 Fig. 1 Mode-adaptive Droop curve

표 1 동작 모드별 특성

Table 1 Operation modes and its characteristic

모드	출력 특성	전압범위	전압제어
I	$P_{ESS,ch} > P_{load} - P_{G,opt} > -P_{G,opt} + P_{ESS,ch}$	$V_{max} > V_{dc} > V_{I-II}$	발전기
II	$P_{ESS,dis} > P_{load} - P_{G,opt} > -P_{ESS,ch}$	$V_{I-II} > V_{dc} > V_{II-III}$	ESS
III	$P_{G,max} > P_{load} - P_{G,opt} > P_{ESS,dis}$	$V_{II-III} > V_{dc} > V_{min}$	발전기

2.2 제안하는 다중 발전기 독립제어 기법

전력시스템에서 다수의 발전기를 연계하여 부하에 따라 순차적으로 운용할 경우 하나의 대용량 발전기를 이용하는 것에 비해 디젤엔진의 연료소비효율을 더욱 개선할 수 있다.^[4] 그러나 비통신 제어기법이 적용된 직류전력시스템에서 발전기들은 서로의 상태를 인지하지 못하므로 동작 순서를 사전 정의하고 부하의 변화에 따라 발전기를 시동 및 정지할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 2.1절의 Mode-adaptive Droop 제어가 적용된 직류전력시스템에서 다수의 발전기 운용을 위해 제안하는 제어 기법은 그림 2와 같다. 제안된 기법에서 모든 발전기는 표 1에서와 같이 모션전압을 통해 부하량과 동작모드를 판별한다. 상기된 바와 같이 모드 II에서 발전기는 최적 출력($P_{G,opt}$)으로 제어되므로 발전기에 이 외의 부하를 발생시키는 모드 III과 I을 각각 발전기의 시동과 정지가 필요한 부하 조건으로 정의하였

다. 즉 현재 동작모드가 모드 I일 경우 동작중인 모든 발전기는 $P_{G,opt}$ 보다 낮은 출력을 가져 경 부하 동작에 의해 엔진효율이 낮아지므로 하나의 발전기를 정지하여 남은 발전기의 부하율을 증가시켜 엔진효율을 증가시킨다. 반대로 현재 동작모드가 모드 III인 경우 동작중인 모든 발전기는 $P_{G,opt}$ 보다 높은 출력을 가져 높은 부하율에 의해 엔진효율이 낮아지므로 하나의 발전기를 기동하여 동작중인 발전기에 걸리는 부하를 분담하여 엔진효율을 증가시킨다. 즉, 제안하는 알고리즘은 넓은 부하영역에서 모드 II의 동작모드를 유지하여 동작중인 발전기들이 상시 최적 엔진효율을 갖는 출력($P_{G,opt}$)을 발생시키도록 발전기를 시동 및 정지시킨다. 이 때 다수의 발전기를 순차적으로 운용하기 위해 발전기 기동시간(T_{GS})과 사전 정의된 발전기의 기동순서(n), 총 발전기 대수(N)를 고려하여 발전기별 동작 지연시간을 다르게 설정하였으며 각 발전기의 동시 동작을 방지하기 위해 T_{GS} 를 연계된 모든 발전기의 실제 기동 및 정지에 의한 지연시간보다 큰 값으로 선정하였다. 그림 3은 세 개의 발전기가 연계된 전력시스템에서 그림 2의 알고리즘이 적용되었을 때 각 발전기의 기동 및 정지 순서를 나타낸다.

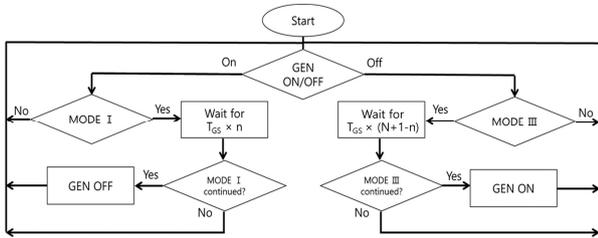


그림 2 제안하는 발전기 기동 및 정지 독립제어 알고리즘
Fig. 2 Proposed decentralized control algorithm for generator start-up and stop

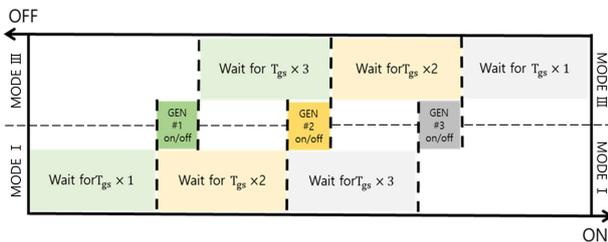


그림 3 제안하는 알고리즘 기반 발전기 기동 및 정지 개념도
Fig. 3 Concept diagram of generator start-up and stop sequence based on proposed control algorithm

2.3 시뮬레이션 결과

제안하는 Mode-adaptive Droop제어가 적용된 선박용 직류 전력시스템의 다중 발전기 독립제어 기법을 검증하기 위해 MATLAB Simulink를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 세 대의 발전기와 한 대의 ESS, 단일 모선을 갖는 전력시스템을 모의하였으며 표 2의 파라미터를 적용하였다. 그림 4는 모선 전압과 발전기, ESS의 출력량에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내며 모든 발전기를 상시 구동하는 기존 Mode-adaptive Droop제어와 발전기를 부하에 따라 순차 구동하는 제안된 알고리즘이 적용된 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 알고리즘이 적용되었을 때 모드 II에서 동작하는 부하 영역이 크게 확장되었음을 확인할 수 있으며 더 넓은 부하범위에서 발전기의 출력이 최적 엔진효율을 갖는 $P_{G,opt}$ 로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

표 2 시뮬레이션 파라미터

Table 2 Simulation parameters

파라미터	값[단위]	파라미터	값[단위]	파라미터	값[단위]
V_{max}	660[V]	$P_{G_{1,2,3,opt}}$	300[kW]	$R_{G_{1,2,3,MODE I}}$	1.3×10^{-4}
V_{min}	540[V]	$P_{G_{1,2,3,opt}}$	204.99[kW]	$R_{G_{1,2,3,MODE III}}$	1.3×10^{-4}
V_{I-II}	620[V]	$P_{ESS,dis}$	220[kW]	$R_{ESS,dis}$	1.7×10^{-4}
V_{II-III}	580[V]	T_{GS}	15[sec]	N	3

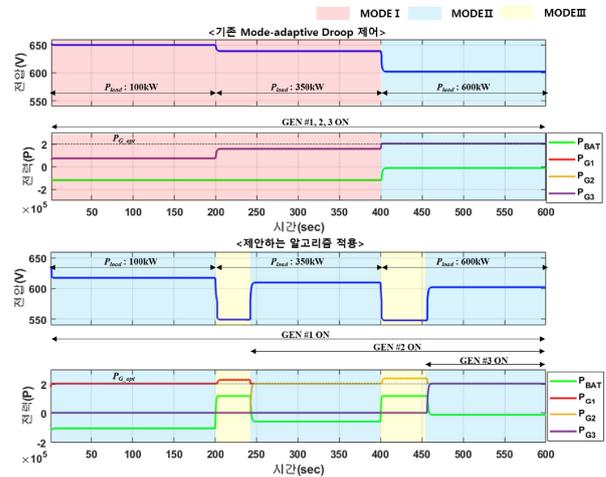


그림 4 기존 제어기법과 제안하는 제어기법 비교

Fig. 4 Comparison between the conventional and the proposed control technique

3. 결론

본 논문에서 제안된 다중 발전기 독립제어기법은 Mode-adaptive Droop 제어 기반의 하이브리드 전기추진선박 직류전력시스템에 적용되어 통신 없이 다수의 발전기를 순차적으로 기동 및 정지하며 엔진의 연료소비효율을 최적화한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘이 넓은 부하범위에서 발전기의 출력을 최적 엔진효율을 갖는 크기로 제어하면서도 준수한 전압제어 성능을 가짐을 확인하였다. 그러나 본 논문에서 제안된 알고리즘은 그림 1에 나타난 정해진 드롭 곡선만을 고려하였으므로 컨버터의 정 전류 제어영역, 배터리 과충전/과방전 방지 동작 등 드롭 곡선을 왜곡하는 제어 알고리즘과도 연계할 수 있도록 알고리즘의 추가적인 개선연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] L. Xu et al., "A Review of DC Shipboard Microgrids—Part I: Power Architectures, Energy Storage, and Power Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 37, No. 5, pp. 5155–5172, May 2022.
- [2] G. F. Reed, B. M. Grainger, A. R. Sparacino, and M. Zhi-Hong, "Ship to grid: Medium-voltage DC concepts in theory and practice," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 10, No. 6, pp. 70–79, Nov. 2012.
- [3] 노을, 이현구, 추경민, 황평익, "가변속발전기 기반 선박용 직류 전력 시스템의 독립운전 제어기법," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 886–887, 2023.
- [4] B. Zahedi, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen, "Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems," Journal of Power Sources, Vol. 255, pp. 341–354, 2014