

선박용 직류 배전 시스템의 경부하 효율 개선을 위한 발전기 제어 방법

고상기, 설승기
서울대학교

Control of Synchronous Generator to Improve Light Load Efficiency for DC Marine Vessels

Sanggi Ko, Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 능동형 정류기를 갖는 선박 직류 배전 시스템을 위한 동기발전기 제어 방법을 제안한다. 자동자속 조정기의 자속 설정값을 부하에 따라 능동적으로 변화시켜 저부하에서의 발전기 효율을 개선한다. 실험을 통해 20 % 이하의 부하에서 최대 10%p의 효율 향상을 확인하였다

1. 서론

전기 추진 선박의 연비 개선을 위해 선박 직류 배전 시스템이 도입되고 있다. 선박 직류 배전 시스템은 디젤 엔진의 속도를 부하에 따라 가변하여 최적 효율 운전점에서 운전할 수 있어 시스템의 효율이 향상된다.

직류 배전 시스템은 다양한 형태로 구성될 수 있다. 발전기의 교류 출력을 직류로 변환해주는 정류기를 다이오드 정류기(Diode Front-End, DFE)로 구성하거나 스위치 소자로 이루어진 능동형 정류기(Active Front-End, AFE)로 구성할 수 있다. 기존 교류 배전 시스템에서는 계통의 전압을 항상 일정하게 유지해 주기 위해 계자를 통해 발전기 단자 전압을 조정할 수 있는 계자 권선형 동기 발전기(Wound Rotor Synchronous Generator, WRSG)만이 사용 가능했지만 직류 배전 시스템에서는 계자 권선형 동기 발전기와 영구 자석형 동기 발전기(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 모두 사용 가능하다.

본 논문에서는 능동형 정류기와 계자 권선형 동기 발전기를 사용하는 직류 배전 시스템에서 계자 권선형 동기 발전기 제어 방법을 제안한다.

2. 능동형 정류기를 갖는 선박용 직류 배전 시스템

선박 직류 배전 시스템은 크게 3가지 제어시스템을 필요로 한다. 그 첫번째는 엔진의 속도를 제어하는 조속기(Governor)이다. 조속기는 엔진의 연료 공급량을 조절해 엔진의 속도를 제어하는 장치로 교류 배전 시스템에서는 발전된 교류 주파수가 일정하게 유지하기 위하여 엔진이 항상 일정한 속도로 운전될 수 있도록 엔진을 제어하였다. 직류 배전 시스템에서는 부하에

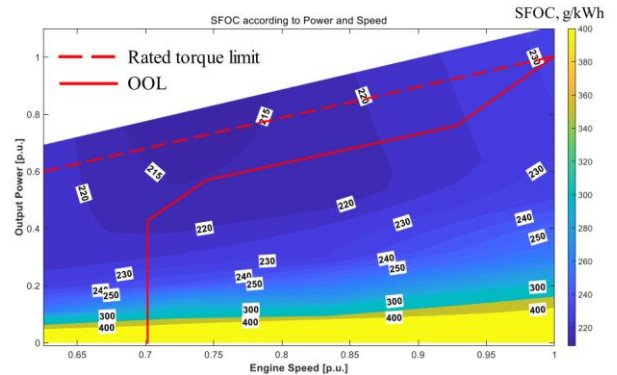


그림 1. 디젤 엔진 연료 소모량 지도^[1]

따라 엔진의 속도를 가변하여 엔진의 최적 효율 운전점에서 운전될 수 있도록 제어해 주어야 한다. 그림 1은 디젤 엔진의 연료 소모량을 나타낸 지도이다.

빨간색 실선은 부하별 최적 효율 운전점(Optimal Operation Line, OOL)을 의미한다. 조속기는 발전기의 부하량에 따라 최적 효율 운전점들을 따라 속도를 제어해 주게 된다.

두번째는 직류단 전압 제어 시스템이다. 능동형 정류기를 갖는 직류 배전 시스템에서는 능동형 정류기가 독립적으로 직류단 전압 제어를 수행하게 된다. 동기 발전기와 능동형 정류기 사이에 필터를 삽입하면 발전기의 단자 전압을 계통 전압으로 생각할 수 있다. 발전기 단자 전압을 측정 후 위상 동기화 제어기(Phase Locked Loop, PLL)를 통해 계통의 전압과 위상 정보를 알아내면 능동형 정류기는 역률 1 제어를 통해 출력을 제어한다. 하지만 동기 발전기와 능동형 정류기 사이의 필터는 시스템의 부피와 무게, 비용을 증가시키기 때문에 일반적으로는 PWM 스위치에 대한 동기 발전기의 절연을 강화시키고 동기 발전기와 능동형 정류기를 직결하는 형태로 사용한다. 이렇게 되면 발전기의 단자 전압은 능동형 정류기의 출력 전압과 같기 때문에 앞서 설명한 제어 방법을 적용할 수 없게 된다. 별도의 전압 센서 없이 능동형 정류기의 전압 지령을 활용해 동기 발전기의 고정자 자속을 추정하고 위상 동기화 제어기를 이용하면 자속의 위치와 크기도 파악할 수 있다. 발전기 내부 역기전력은 고정자 자속에 90도 앞서기 때문에 최종적으로 발전기 내부 역기전력의 위치와 크기를 알 수 있게 된다. 추정한

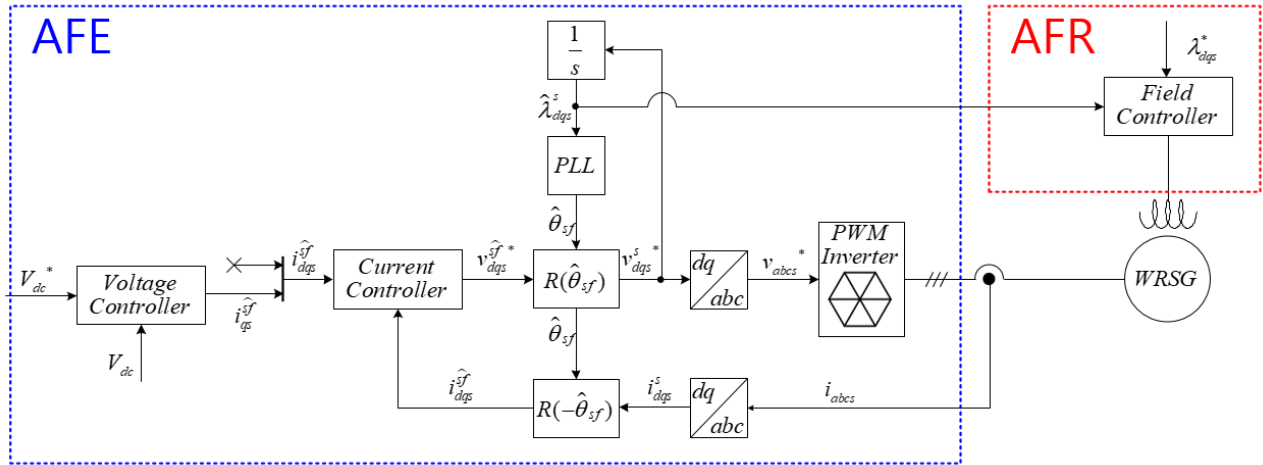


그림 2. 직류 배전 시스템 제어 블록 다이어그램

내부 역기전력 정보를 이용해 앞선 경우와 마찬가지로 역률 1 제어를 수행한다.

마지막으로 동기 발전기의 계자를 제어하는 자동 전압 조정기(Automatic Voltage Regulator, AVR)가 필요하다. 자동 전압 조정기는 발전기의 단자 전압을 측정해 단자 전압이 일정하도록 동기 발전기의 계자를 제어한다. 발전기의 속도가 변하면 발전기의 자속이 일정하게 유지되도록 단자 전압 크기 지령을 변동해 주어야 한다. 하지만 위에서 언급한 동기 발전기와 능동형 정류기가 직접 연결된 형태에서는 발전기의 단자 전압을 측정할 수 없기 때문에 새로운 형태의 계자 제어 방식이 필요하다. 따라서 발전기의 자속을 일정하게 제어하는 자동 자속 조정기(Automatic Flux Regulator, 이하 AFR)가 제안되었다^[2]. 자동 자속 조정기는 별도의 전압 센서 없이 능동형 정류기의 전압지령을 이용해 추정된 발전기의 자속을 속도와 관계없이 일정하게 제어한다. 그림 2는 조속기를 제외한 발전부 제어 시스템의 제어 블록 다이어그램을 보여준다.

3. 경부하 효율 개선을 위한 동기 발전기 제어

2장에서 살펴본 자속 조정기는 발전기 고정자의 자속을 항상 정격 운전점에서의 자속값으로 제어한다. 일반적으로 동기 발전기는 출력 밀도를 높이기 위해 철심을 어느 정도 포화(saturation)시켜 사용한다. 그림 3은 발전기의 개방회로 특성을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 동기 발전기는 철심이 포화된 영역에서 운전을 하게 된다.

능동형 정류기와 연결된 동기 발전기의 경우 발전기 단자 전압, 발전기 자속값을 변동시킬 수 있다. 발전기의 자속값은 발전기의 철손과 관련이 있으며 정격 운전점이 아닌 줄어든 자속 운전점에서 운전을 하게 되면 발전기의 철손이 줄어들지만 발전기의 상전류가 증가하여 동손이 증가한다. 실험을 통해 주어진 부하 조건에서 동손과 철손의 합이 최소가 되는 운전점, 즉 효율이 최대가 되는 최적 자속값을 도출하고 주어진 자속값을 이용해 발전기를 제어한다면 발전기의 효율을 개선할 수 있게 된다. 이러한 효율 개선은 저부하 영역에서 유효할 것으로 기대할 수 있다.

4. 실험 결과

그림 4는 실험장치의 구성을 나타낸다. 영구 자석 전동기를 이용하여 엔진을 모의하였다. 동기 발전기는 배터리로 전원을 공급받는 자동 자속 조정기에 의해 자속값이 제어된다. 능동형 정류기는 직류단 전압을 제어한다. 직류단에는 일정 출력 부하가 연결되어 발전기에 부하를 인가한다. 그림 5와 그림 6은 실험에 사용한 실험 장치의 실제 모습이다.

본 논문에서는 발전기의 경부하 효율을 개선하는 것이 목표이므로 모든 실험 결과는 동기 발전기의 정격값을 기준으로 나타내었다. 발전기 속도를 0.5 pu로 운전하면서 부하를 0.05 ~ 0.2 pu까지 0.05 pu 간격으로 인가하였다. 각 부하에 대해 발전기의 자속을 0.3 ~ 1 pu로 변동시키며 발전기의 효율을 측정하였다. 발전기의 효율은 엔진을 모의하는

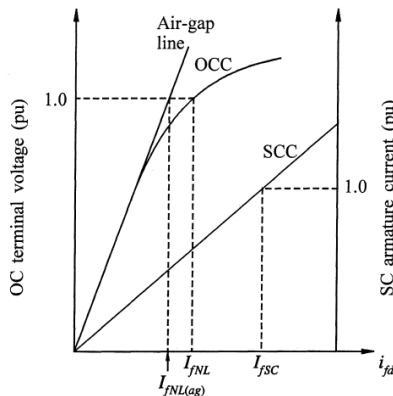


그림 3. 동기 발전기의 개방 회로 특성(Open Circuit Characteristic, OCC) 및 단락 회로 특성(Short Circuit Characteristic, SCC)^[3]

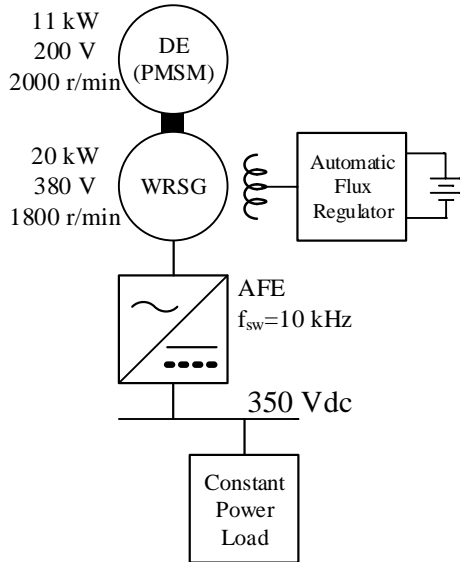


그림 4. 실험장치 구성도

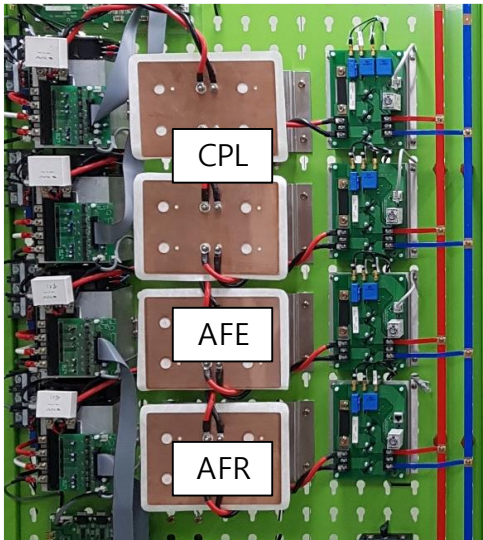


그림 5. 실험장치 모습-배전반

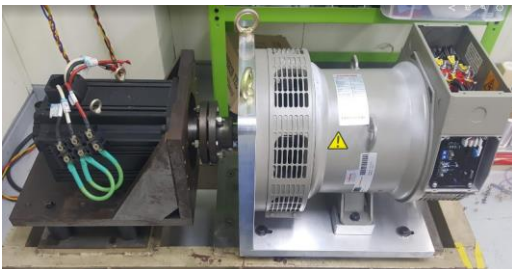


그림 6. 실험장치 모습-발전기

영구자석 전동기의 토크를 통해 계산한 기계적 입력과 계자 회로의 전기적 입력을 시스템 입력으로, 일정 전력 부하로 인가하는 부하를 출력으로 하여 계산하였다.

실험 결과는 그림 7에 나타내었다. 부하가 작을수록 정격 자속에서의 효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 부하가 작을수록 낮은 자속값에서 효율이 높은

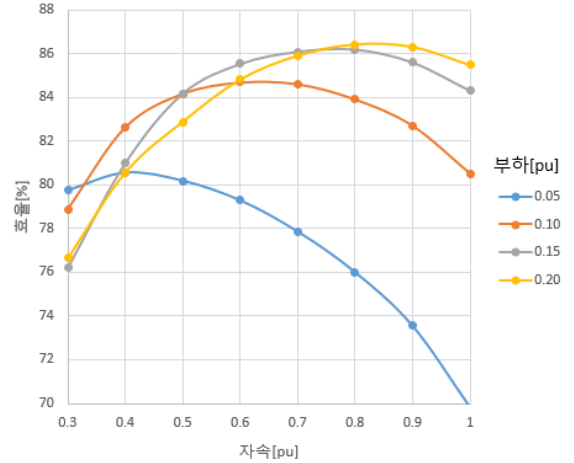


그림 7. 부하별 자속에 따른 발전기 효율

것을 볼 수 있다. 5% 부하에서는 정격 자속점에서 운전 시 발전기 효율이 70% 미만이었는데 자속을 40% 수준으로 낮췄을 때 효율이 80%가 되는 것을 볼 수 있다. 실험 결과를 바탕으로 부하별 최적 효율을 갖는 자속값을 추출할 수 있고 이를 바탕으로 부하에 따라 발전기의 자속을 제어하면 경부하 구간에서의 효율을 개선시킬 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 선박 직류 배전 시스템을 위한 동기발전기 제어 방법을 제안하였다. 자동 자속 조정기 기반 제어에서 부하에 따라 자속 설정치를 능동적으로 변화시켜 효율을 개선할 수 있었다. 실험을 통해 20% 이하의 부하에서 최대 10%p의 효율 향상을 확인하였다. 일반적으로 전기 추진 선박의 경우 엔진-발전기를 저부하 영역에서 운전하는 시간이 길기 때문에 제안한 방법을 적용하여 저부하 영역의 효율을 개선시킬 경우 연료비를 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Y. Son, S. Lee, S. Ko, Y. Kim and S. Sul, "Maritime DC Power System with Generation Topology Consisting of Combination of Permanent Magnet Generator and Diode Rectifier", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 6, No. 2, pp. 869-880, 2020, June
- [2] K. Satpathi, A. Ukil, J. Pou, and M. A. Zagrodnik, "Design, Analysis, and Comparison of Automatic Flux Regulator with Automatic Voltage Regulator-Based Generation System for DC Marine Vessels", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 4, No. 3, pp. 694-706, 2018, September
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Professional, 1994