

VFD 부하가 포함된 선박전력계통의 고조파해석

이원영*, 손영광*, 강구열**, 권성민**
울산대학교*, HD현대중공업**

Harmonic Analysis of Ship Power Systems with VFD Loads

Won-Young Lee*, Young-Kwang Son*, Goo-Yeol Kang**, Seong-min Gwon**
Ulsan University, HD Hyundai Heavy Industries

ABSTRACT

프로펠러뿐만 아니라 각종 펌, 펌프, 컴프레서 등의 구동을 위한 VFD 부하가 선박 전력 계통에 점차 많이 포함되고 있다. 대부분의 VFD 부하는 다이오드 정류기를 통해 선박 전력 계통에 연결되므로, VFD 부하가 많이 포함될수록 전력 계통의 전압과 전류 파형이 악화된다. 선박 전력 계통은 선급 규정에 따라 일반적으로 전압 THD는 8% 이내, 단일 고조파는 5% 이내의 값을 가져야 하는데, VFD 부하가 다수 포함될 경우 이 기준치를 만족하지 못하게 된다. 본 논문에서는 선박 전력 계통의 VFD 부하 비율, 수동필터 설치 여부 등에 따른 선박 전력 계통의 전압 고조파 해석 결과를 소개한다. 특히, VFD 부하 비율이 어느 정도 수준에 이르러야 선급 규정을 만족하지 못하는지, 그렇다면 어느 정도 크기의 수동필터를 설치해야 선급 규정을 만족할 수 있는지 등에 대한 유용한 고조파 해석 결과를 제시한다.

1. 서 론

전기기기 및 전력 반도체 기술과 산업이 발전함에 따라 지난 수십 년간 전기 추진 시스템이 해양 산업에 점차 도입되는 추세이다. 일반적으로 전기 선박에서 사용되는 전력변환장치들은 다이오드를 활용한 정류기와 평활 커패시터, 가변 전압 및 주파수 출력을 위한 PWM 인버터이다. 선박에서 전력 반도체 소자의 사용이 증가함에 따라, 전력 소비와 고조파로 인한 악영향을 줄이기 위해 고조파 규정을 준수하는 것이 중요하다.[1]

현재 대부분의 선급 규정에 따르면 일반적으로 전압 THD는 8% 이내, 단일 고조파는 5% 이내의 값을 가져야 한다. 그러나 선박에 VFD 부하가 다수 포함되는 경우, VFD 부하 구동을 위한 직류단(DC-link)을 만들기 위해 계통에 3상 다이오드 정류기가 연결되어야 하므로 고조파 성분이 늘어나 해당 기준치를 만족하지 못할 확률이 높아진다.

본 논문에서는 선박 전력 계통에서 VFD 부하 비율에 따라 전압 고조파 성분이 어느 정도 나타나는지 확인하고, L 필터, RLC 수동 병렬 필터의 설치 여부에 따라 고조파 성분과 전압 THD를 얼마나 줄일 수 있는지 검토한다. 또한, DNV, ABS, KR 선급뿐만 아니라 다른 선급들의 규정을 만족하기 위해 어느 정도의 수동필터 크기가 필요한지 분석하며, 제안하는 시스템을 통해 시뮬레이션 해석 결과를 제시한다.

2. 선박전력계통의 고조파해석

2.1 선급별 전압 고조파 관리기준

선급 고조파 규정은 선박 전력계통에서 발생하는 고조파가 전력 품질에 미치는 영향을 최소화하기 위해 필수적이다. 고조파가 심해질 경우 전력 시스템 내 장비가 과열되거나 전자기 간섭이 발생할 수 있으며, 통신 시스템에 오류가 생길 위험이 있다. DNV, ABS, Lloyd's Register, KR 등 선급들은 해양 전력 시스템의 고조파 왜곡을 관리하기 위한 기준을 표 1과 같이 설정하고 있다. 대부분의 경우, 전압 고조파 왜곡(THD)을 8% 이하로, 개별 고조파는 5% 이하로 제한하고 있다. 일반적으로 저차 전압 고조파가 크게 나타나므로 5차와 7차와 같은 저차 고조파의 억제가 주요한 이슈가 된다.[2],[3]

표 1 선급별 고조파 규정 비교

선급 기관	전압 THD 제한	단일 고조파 왜곡 제한
DNV	8%	5%
ABS	8%	5%
KR ¹⁾	8%	5%
ClassNK	8%	5%
Lloyd's Register	8%	25차 초과 시 1.5%

2.2 수동필터

선박 전력계통에서 고조파를 억제하기 위해 수동 필터는 보통 저항(R), 인덕터(L), 커패시터(C) 소자를 조합하여 사용되며, 간단한 라인 리액터 형태나 RLC 공진 필터 형태로 구성한다. 수동 필터는 크게 동조 필터와 고차 필터로 나눌 수 있다.

품질 계수(Quality Factor, Q-Factor)는 공진 회로에서 에너지 저장량 대비 손실량의 비율을 나타내며, R값으로 조정 가능하다. Q값이 높을수록 필터링의 효과가 선명해지지만, 너무 큰 값의 경우 오히려 전체 고조파 왜곡(THD)에 악영향을 미칠 수 있기에 적절한 값을 찾는 것이 중요하다.

1) 한국선급의 "Rules for the Classification of Steel Ships"에 따르면 단일 고조파 왜곡 규정은 2019년 기준 3% 이하였으나 2023년 5% 이하로 개정됨

3. 표준전력시스템의 구성

다양한 전압과 전력 용량을 가진 전력 시스템을 대표하여 표준전력시스템을 그림 1과 같이 구성하였으며, 해당 시스템의 공통된 파라미터는 표 2에 정리하였다. 표준전력시스템에서 다이오드 정류 부하는 VFD 부하를 의미한다. 이는 현재 대부분의 VFD 부하가 3상 다이오드 정류기를 통해 계통에 연계되기 때문이다. 발전기 용량은 1MW로 설정하였고, L_g 는 발전기 용량을 기준으로 퍼유닛 인덕턴스 20%로 설정하였다. 고조파를 해석함에 있어 발전기의 등가 임피던스는 차과도 임피던스와 과도 임피던스 사이의 값을 가지게 되는데, 일반적으로 이 값은 약 20% 내외이다. 수동필터 설계 시 각 R, L, C값은 일반적인 수동 고조파 필터 설계에 따라 구성하였다.[4] Q값은 50 이상부터 필터의 효과 차이가 크지 않기 때문에 50으로 설정하였다.[5]

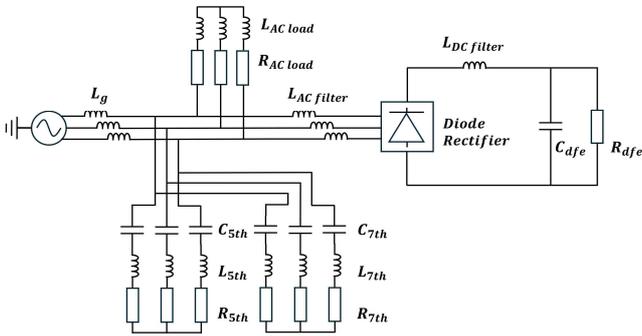


그림 1 제안하는 표준전력시스템의 구성도

표 2 제안하는 표준전력시스템의 파라미터

Parameter	Value	Parameter	Value
R_{5th}	0.0251Ω	R_{7th}	0.0729Ω
L_{5th}	0.693mH	L_{7th}	1.436mH
C_{5th}	406μF	C_{7th}	100μF
계통용량	1MW	L_g	1.027mH

4. 시뮬레이션 결과분석

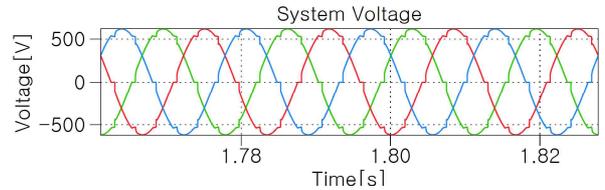
선박 전력 계통에서 부하의 크기는 THD에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 요소라고 볼 수 있다. 발전기 용량이 1MW인 전력 시스템에서 100kW VFD 부하가 10개 연결되어 있다고 가정할 시, 각각의 부하를 따로 연결했을 때는 THD 규정을 만족하는 것처럼 보이지만, 10개가 모두 연결된 상황에서는 만족하지 않을 수 있다. 이는 고조파를 포함한 부하 크기에 비례하여 계통 측의 전압 고조파가 나빠지기 때문이다. 한편, 발전기 임피던스가 작을수록 이상적인 전압원에 가까워지므로 전압 고조파는 낮아질 것이다.

본 절에서는 선박 전력 시스템이 1MW일 때를 기준으로 표준전력 시스템을 구성하여 VFD 부하단의 크기에 따라 침투율 대비 전압 THD 및 개별 고조파 성분이 검출되는 양이 어느 정도 차이가 나는지 확인한다. 또한, THD 및 고조파 성분이 필터 설치 대비 얼마나 줄어드는지, 선급별 고조파 규정을 만

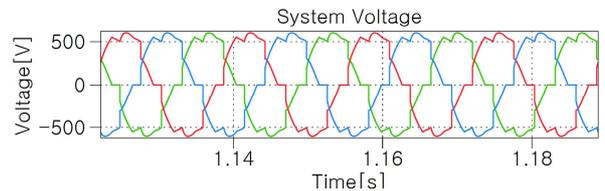
족하기 위해 어떤 필터를 사용하는 것이 효과적인지 MATLAB/SIMULINK 및 PLECS 기반의 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.

4.1 부하단 크기에 따른 고조파 성분 비교

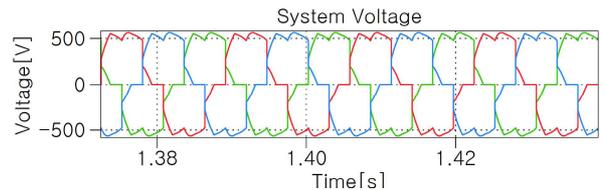
제안하는 표준전력시스템을 토대로 본 절에서는 부하 크기에 따른 고조파 성분을 비교한다. AC 부하단은 전체 부하 크기의 10%로 설정하였고, L filter와 수동필터는 없는 조건이다. 아래 그림 2는 DFE 부하가 각각 100kW, 500kW, 1MW라고 가정할 시 계통의 전압 파형을 나타내었다. 표 3은 전압 THD와 개별 고조파를 각 부하별 크기에 따라 정리한 표이다. 총 부하의 크기에 따라 개별 고조파 성분과 전압 THD가 달라짐을 확인하였으며 부하 구성이 다르더라도 총 부하가 같다면 THD와 개별 고조파의 값이 동일함을 확인하였다.



(a) 100kW DFE Load 연결 시



(b) 500kW DFE Load 연결 시



(c) 1MW DFE Load 연결 시

그림 2 부하 크기별 계통 측의 전압 파형

표 3 부하 크기에 따른 고조파 성분비교

부하 구성	총 부하	5차 고조파	7차 고조파	전압 THD
100kW*1	100kW	2.16%	1.4%	4.4%
100kW*3	300kW	6.31%	3.46%	9.6%
500kW*1	500kW	10.08%	4.85%	13.7%
500kW*2	1MW	17.0%	7.59%	21.2%
1MW*1	1MW	17.0%	7.59%	21.2%

4.2 AC 리액터에 따른 고조파 성분 비교

본 절에서는 계통에 직렬 연결된 AC 리액터가 DFE 부하단 앞에 연결되었을 때 전압 THD와 개별 고조파가 얼마나 발생하는지 확인한다. AC 부하는 전체 부하 크기의 10%인 100kW라고 가정하였으며, DFE 부하가 1MW일 때를 기준으로 시뮬레이션하여 아래 표 4에 나타내었다. 발전기 전체 용량이

1MW인 시스템에서 VFD 부하가 1MW인 것은 현실적이지는 않지만, 최악의 경우에 표 4와 같은 고조파 결과가 나올 수 있음을 의미한다. VFD 부하 비중이 높아지는 경우, AC 리액터를 추가하는 것만으로는 고조파 규정을 만족할 수 없음을 알 수 있다.

표 4 AC 리액터 크기에 따른 THD 및 고조파 변화

리액터 종류	크기(p.u)	5차고조파	7차고조파	전압THD
AC	0%	17.0%	7%	21.2%
AC	5%	15.1%	6.9%	18.9%
AC	10%	13.3%	6.4%	16.9%

4.3 RLC 수동필터 설치 시의 고조파 성분 비교

본 절에서는 RLC 수동필터가 연결되었을 때 전압 THD와 개별 고조파의 저감 수준을 확인한다. 4.1절과 마찬가지로 AC 부하는 전체 부하 크기의 10%라고 가정하였다. 그림 3은 DFE 부하 크기가 1MW이고 5차, 7차 고조파 필터가 적용되었을 때의 전압 파형이며, 고조파 필터 적용 여부에 따른 THD와 저차 고조파는 표 5에 정리하였다. AC 리액터를 적용하는 것보다 큰 THD 저감 성능을 확인할 수 있다.

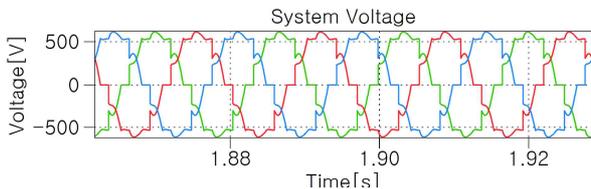


그림 3 수동필터 설치 시 계통 측의 전압파형

표 5 수동필터 설치시의 고조파 성분비교

설치필터	부하크기	5차고조파	7차고조파	전압THD
필터 없을 시	1MW	17.0%	7.6%	21.2%
5th	1MW	2.8%	7.0%	11.4%
7th	1MW	18.3%	2.8%	20.2%
5th+7th	1MW	2.7%	2.6%	10.6%

4.4 수동필터와 리액터 조합 시의 고조파 성분 비교

본 절에서는 각 선급들의 전압 THD 및 개별 고조파 성분을 만족시키기 위해 필요한 필터의 조합과 크기를 확인한다. 그림 4는 부하 측 DFE 1MW 기준으로 수동필터와 AC 리액터 (10%) 조합 시의 계통 측 전압 파형을 나타내었다.

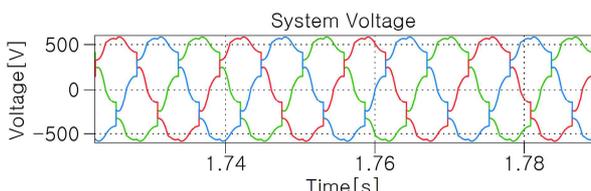


그림 4 RLC 수동필터와 AC 리액터 10% 설치 시 계통 측 전압파형

표 6 수동필터와 리액터 설치시의 고조파 성분비교

필터종류	부하크기	5차고조파	7차고조파	전압THD
5th+7th	500kW	1.4%	1.6%	7.8%
5th+7th	1MW	2.7%	2.6%	10.6%
5th+7th+ L_{AC} (5%)	1MW	2.6%	2.2%	8.7%
5th+7th+ L_{AC} (10%)	1MW	2.4%	1.9%	7.4%

5. 결 론

본 논문에서는 선박 전력 계통에 포함되는 VFD 부하 비율 증가가 전압 THD에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, VFD 부하가 커질수록 THD와 고조파 성분 또한 증가함을 확인하여, 전력 계통의 전체 용량 대비 VFD 부하의 비중이 약 30% 이상 차지하게 되면 선급 기준을 만족하지 못할 수 있음을 시뮬레이션으로 검증하였다.

대부분의 선급 규정에서 요구하는 전압 THD 8%와 단일 고조파 5%를 만족시키기 위해 수동필터가 상당한 효과가 있음을 밝혔으며, 5차와 7차 고조파 성분을 상당 부분 저감하는 데 유의미한 성능을 보이는 것을 확인하였다. VFD 부하율이 전체 시스템 용량 대비 50% 수준일 때까지는 5차, 7차 수동필터만으로 선급 고조파 규정을 만족할 수 있는 것으로 확인되었고, 그 이상에서는 RLC 수동필터와 라인 리액터를 적절히 사용할 경우 VFD 부하단의 크기가 클 경우에도 충분히 각 선급별 규정을 만족할 수 있음을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 HD현대중공업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임

참 고 문 헌

- [1] Kim, Deok-Ki, Kyoung-Kuk Yoon, and Hee-Moon Kim. "An Analysis on the Effectiveness of Harmonics Reduction for Variable Frequency Drive by Reactors." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 21.6 (2015): 770-777.
- [2] DNV, (2024). Rules for Classification: Ships, Part 4 - Chapter 8: Electrical Installations, Section 2 System Design
- [3] Korean Register, "Rules for the Classification of Steel Ships." (2024). Part 6: Electrical equipment and control systems
- [4] Sace, A. B. B. "Technical Application Papers No. 8 Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants." (2010).
- [5] Cho, Young-Sik, and Hanju Cha. "Single-tuned passive harmonic filter design considering variances of tuning and quality factor." *Journal of International Council on Electrical Engineering* 1.1 (2011): 7-13.