

리퍼선의 고조파 저감에 대한 연구

이유상 *, 손영광 *, 강구열 **, 권성민 **
 울산대학교 *, HD현대중공업 **

Research on Harmonic Reduction of the Reefer ships

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

ABSTRACT

전력전자 분야의 발전으로 산업계에서 꾸준히 VFD 부하가 증가해 왔다. 대부분 VFD 부하는 다이오드 정류기를 통해 계통에 연결되기 때문에 계통의 THD를 악화시킨다. 특히 선박 중에서 냉장 운송을 하는 리퍼선의 경우, 냉장 컨테이너에 사용되는 모터가 VFD 부하로 바뀌는 추세인데, 이에 따라 선박 계통의 고조파가 대부분 선급의 고조파 제한치인 총 고조파 왜곡률 8%, 개별고조파 5%를 초과할 수 있게 된다. 본 논문에서는 대용량의 VFD 부하가 포함되는 선박에서 부하단과 직결된 변압기의 위상의 변화를 통해 고조파를 상쇄시켜 계통의 전압 THD를 감소시키는 방법을 소개한다.

조파는 전력 품질에 부정적인 영향을 미치며, 전압 THD를 악화시키는 요인이 된다.

냉장 컨테이너 외에도 리퍼선에서는 다양한 전기 부하가 다이오드 정류기를 통해 계통에 연결되고 있다. 예를 들어, HVAC(Heating, Ventilation and Air Conditioning), 조명 시스템, 공조기, 펌프 및 기타 기계 장비 등에서도 VFD 기술이 사용되고 있으며, 이에 따라 고조파 발생이 더욱 증가하고 있다. 이러한 경향은 전체 전력 시스템의 품질에 부정적인 영향을 미치므로, 고조파 저감을 위한 기술적 접근이 필요하다.

1. 서 론

전력전자 기술의 발전과 함께, 리퍼선에서의 VFD 부하의 사용이 증가하고 있다. 특히, 냉장 운송을 수행하는 리퍼선에서는 냉장 컨테이너의 효율적인 온도 유지를 위해 VFD를 활용한 모터 구동이 필수적이다. 이러한 VFD 부하는 선박 전력 시스템 전체 부하의 약 50~70%까지 차지하기도 하고 있으며, 이는 전력 소비의 대부분을 차지하는 주요 요인으로 작용하고 있다. 그러나 VFD가 다이오드 정류기(DFE, Diode Front End)를 통해 전력 시스템에 연결되면서 총 고조파 왜곡률(THD)이 증가하는 부작용이 발생하고 있다.

고조파는 전력 시스템의 품질을 저하할 뿐만 아니라, 전기전자 장비의 성능 저하, 과열 및 고장을 초래할 수 있다. 특히, 선박의 경우 고조파가 허용 한계를 초과할 경우 선급 및 강선 규칙 위반으로 이어질 수 있으며, 이는 선박의 안전 운항에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로, 리퍼선의 전력 시스템에서 발생하는 고조파를 효과적으로 관리하고 저감하는 기술적 접근이 필요하다. 본 논문에서는 변압기의 위상 조정을 통해 고조파를 상쇄하는 방법을 제안한다.^[1]

2. 본 론

2.1 리퍼선의 전력 단선도

그림 1에서 볼 수 있듯이, 리퍼선에 사용되는 냉장 컨테이너의 모터는 VFD로 구동되며, 이는 고조파를 발생시키는 주요 원인 중 하나이다. VFD는 전압과 주파수를 조절하여 모터의 속도를 제어하는데, 이 과정에서 고조파가 생성된다. 이러한 고

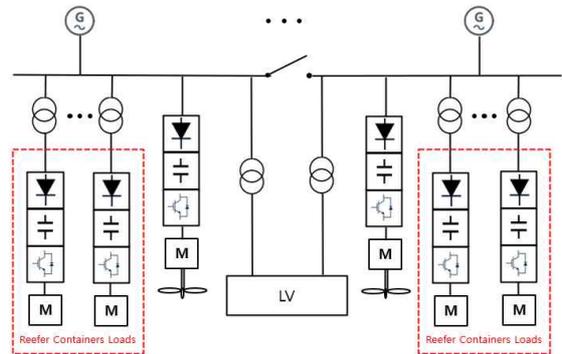


그림 1 리퍼선의 전력 단선도

Fig. 1 Single-line diagram of the reefer ship's power system

2.2 선급 고조파 규정

선박의 전력 시스템에서 고조파의 관리는 매우 중요하며, 이를 위해 다양한 선급 기관에서는 고조파 왜곡에 대한 규정을 수립하고 있다. 이러한 규정은 전력 품질을 보장하고 선박의 안전한 운항을 지원하기 위해 필수적이다. 전압 THD와 개별 고조파 왜곡률에 대한 기준은 각 선급 기관마다 다소 상이하지만, 대부분의 기관이 비슷한 기준을 제시하고 있다.

표 1과 같이, 대부분의 선급 기관은 전압 THD를 8% 이하로 제한하고 있으며, 개별 고조파의 왜곡률은 25차 이하에서 5%를 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있다. 이러한 기준은 선박의 전력 시스템에서 발생할 수 있는 고조파의 영향을 최소화하고, 전력 품질을 유지하기 위한 중요한 기준으로 작용한다.

표 1 선급별 전압 THD 규정

Table 1 Voltage THD Regulations by Classification Society

선급 기관	전압 THD	단일 고조파 왜곡
DNV	8%	5%
ABS	8%	5%
KR ¹⁾	8%	5%
ClassNK	8%	5%

2.3 제안하는 고조파 저감 방법

2.3.1 제안하는 고조파 저감 방법 검증

제안하는 계통에서 냉장 컨테이너로 전력을 공급하는 변압기들의 권선 결선을 그림 2와 같이 Δ - Δ (델타-델타) 변압기와 Y- Δ (와이-델타) 변압기를 5:5 비율로 사용한다. 변압기 간의 30도 위상차를 통해 계통측에서는 고조파가 상쇄되며, 12 펄스 변환기와 같은 고조파 저감 효과를 얻을 수 있다. 시뮬레이션에 사용한 변압기의 파라미터는 표 2과 같다. 냉장 컨테이너는 VFD 부하와 R-L 부하로 구성되어 있고 부하가 항상 최대 출력으로 작동하지는 않는다. 선박에서는 그림 2와 같이 변압기를 통해 계통에서 냉장 컨테이너로 전력이 전달된다. 본 연구에서 저감하고자 하는 전압 5차 고조파와 전압 7차 고조파는 대부분 다이오드 정류기에서 발생하기 때문에 정류기 하단의 VFD는 저항으로 모사하였고, 선박의 발전기는 일정한 전압을 공급하는 전압원으로 모사 하였다. 발전기의 임피던스는 발전기 용량 기준 퍼유닛 임피던스 20%로 설정하였다. 고조파 해석에 있어 발전기의 임피던스는 차과도 임피던스와 과도 임피던스 사이의 값을 가지는데 그 값은 통상 20% 내외의 수준이다.

표 2 변압기의 파라미터

Table 2 Transformer Parameter

Rated capacity	4,300[kVA]	Impedance P.U.	0.08
Rated voltage	6600/450[V]	Resistance P.U.	0.006
Frequency	60[Hz]		

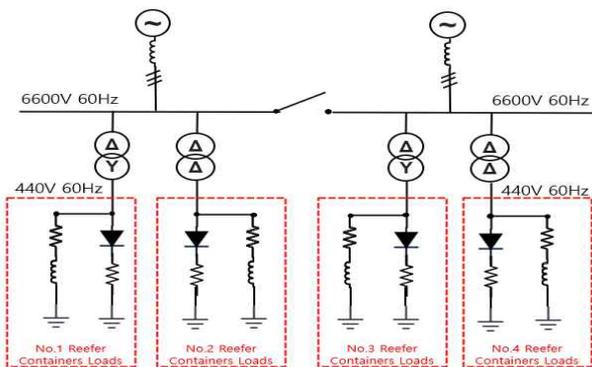


그림 2 제안한 리퍼션 전력 시스템의 시뮬레이션 모델

Fig. 2 The simulation model of reefer ship proposed power system

1) KR은 단일 고조파 관련 규정이 3% 초과 금지에서 2023년부터 5% 초과 금지로 타 선급과 비슷한 기준으로 변경됨.

2.3.2 제안하는 고조파 저감 방법 검증 조건

선박에서는 운전 모드에 따라서 부하율이 달라진다. 따라서, 제안하는 시스템의 시뮬레이션 모델로 R-L 부하와 VFD 부하의 비율에 따라 전압 고조파를 확인하여 감소율을 확인하였다. 또한, 리퍼션에서 일부 냉장 컨테이너는 비어 있고, 일부만 사용하는 경우를 가정하여, 각 냉장 컨테이너가 전력 불평형시 THD 감소율을 확인하였다.

2.4 제안하는 고조파 저감 방법 시뮬레이션 결과

2.4.1 R-L, VFD 비율에 따른 THD 변화 분석

제안하는 고조파 저감 방법을 검증하기 위해서 변압기의 위상 변환 전후의 THD를 분석하여 타당성을 입증하였다. 표 3, 표 4는 R-L 부하(역률 0.9)와 VFD 부하의 비율에 따라 각각 Δ - Δ 변압기만을 사용한 기존시스템과 절반을 Y- Δ 변압기를 사용하여 위상 변환한 제안한 시스템의 THD를 측정된 결과이다. 그림 2에서 R-L 부하와 VFD 부하의 비율은 0:100[%], 30:70[%], 50:50[%], 90:10[%]으로 구분하였다.

표 3 기존 시스템의 부하 비율에 따른 전압 THD

Table 3 Voltage THD According to the Load Ratio of the Existing System

부하 비율 (R-L, VFD)	전압 THD	전압 5 고조파	전압 7 고조파
0:100[%]	12.19[%]	9.76[%]	4.37[%]
30:70[%]	8.88[%]	6.82[%]	3.17[%]
50:50[%]	6.69[%]	4.77[%]	2.44[%]
90:10[%]	1.93[%]	0.88[%]	0.58[%]

표 4 제안한 시스템의 후 부하 비율에 따른 전압 THD

Table 4 Voltage THD according to the load ratio after the Proposed System

부하 비율 (R-L, VFD)	전압 THD	전압 5 고조파	전압 7 고조파
0:100[%]	7.52[%]	3.61[%]	1.66[%]
30:70[%]	6.03[%]	2.49[%]	1.25[%]
50:50[%]	4.85[%]	1.74[%]	0.97[%]
90:10[%]	1.55[%]	0.33[%]	0.22[%]

표 3에 정리된 바와 같이, R-L 부하가 0%이고 VFD 부하가 100%인 경우, 전압 THD는 12.19%로 가장 높은 값을 기록하였다. R-L 부하 비율이 증가함에 따라 THD는 점차 감소하여 R-L 부하가 90%일 때 THD는 1.93%로 감소하였다. 전체적으로 Δ -결선 변압기의 THD 수치는 선급 규정인 전압 THD 8%와 단일 고조파 왜곡 5%를 초과하여 만족하지 못한다.

반면, Y-결선 변압기를 통해 위상 변환을 사용한 제안한 시스템의 경우, 표 4에 정리된 바와 같이 THD 수치가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. THD 최악 조건인 R-L 부하가 0%일 때에도 THD가 7.52%로 선급 규정을 만족하는 수치를 나타냈다. R-L 부하 비율이 증가함에 따라 THD는 계속해서 감소하였으며, 90:10 비율에서 1.55%로 나타났다. 모든 조건에서 THD 수치는 선급 규정인 8% 이하로 만족하는 상태이다.

각 부하 조건에서 제안한 시스템의 THD가 기존 시스템보다 얼마나 감소했는지를 퍼센트로 나타내면, R-L 부하 대 VFD 부하 비율이 0:100[%]일 때 약 38.9%, 30:70[%] 비율일 때 약 32.5%, 50:50[%] 비율일 때 약 27.5%, 마지막으로 90:10[%] 비율일 때 약 19.7% 감소하였다.

결론적으로, R-L 부하와 VFD 부하의 비율 변화에 따른 THD 분석 결과, 제안한 시스템이 기존 시스템에 비하여 고조파 저감에 더 효과적임을 확인하였다. Δ-Δ 변압기만으로 구성된 기존 시스템은 선급 고조파 규정을 불만족했으며, 운전 조건에 따라 THD가 8%를 초과하고 개별 고조파도 5%를 초과하기도 하였다. 반면, 제안한 시스템은 규정을 항상 만족하는 THD 수치를 기록하였다. 전체적으로 R-L 부하 비율이 증가함에 따라 전압 THD가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 전력 시스템의 품질을 개선하는 데 중요한 요소로 작용할 수 있다. 특히, R-L 부하와 VFD 부하의 비율이 달라지는 여러 항해 모드에서도 변압기 위상을 변환 하는 것이 유리하다는 결과는 향후 리퍼션의 전력 시스템 설계 및 운영에 있어 주요한 고조파 저감 방법이 될 것으로 예상된다. 전력 시스템 구성의 특성상 별도의 다중 권선 변압기를 적용하는 것이 아니라는 점이 큰 장점이다.

2.4.2 전력 불평형에 따른 THD 변화 분석

냉장 컨테이너의 전력 불평형 상황을 가정하였을 때 THD를 분석하여 타당성을 입증하였다. 본 절에서는 THD가 최악인 상황에서의 전력불평형 상태를 가정하기 위해 부하가 VFD 부하만으로 구성된다고 가정하였고, 그림 2에서 NO.1, NO.3 냉장 컨테이너의 부하율은 100[%], NO.2, NO.4 냉장 컨테이너의 부하율은 100[%], 50[%], 30[%], 10[%]로 측정하였다. 표 5,6은 위상 치환을 하기 전과 후의 전압 THD이다.

표 5 기존 시스템의 전력 불평형 시 전압 THD
Table 5 Voltage THD during Power Imbalance in the Existing System

부하율 (No.1,3 : NO.2,4)	전압 THD	전압 5 고조파	전압 7 고조파
100:100[%]	12.19[%]	9.76[%]	4.37[%]
100:50[%]	8.59[%]	7.13[%]	3.25[%]
100:30[%]	6.9[%]	5.69[%]	2.62[%]
100:10[%]	5.33[%]	4.26[%]	1.87[%]

표 6 제안한 시스템의 전력 불평형 시 전압 THD
Table 6 Voltage THD during Power Imbalance in the Proposed System

부하율 (No.1,3 : NO.2,4)	전압 THD	전압 5 고조파	전압 7 고조파
100:100[%]	7.52[%]	3.61[%]	1.66[%]
100:50[%]	5.56[%]	1.94[%]	1.12[%]
100:30[%]	4.97[%]	2.66[%]	1.49[%]
100:10[%]	4.73[%]	3.5[%]	1.82[%]

표 5에 정리된 바와 같이, 부하율이 100:100[%]일 때 기존 시스템의 전압 THD는 12.19%로 가장 높은 수치를 기록하였다. 부하율이 감소함에 따라 THD는 점차 감소하여 100:10[%]

비율에서는 5.33%로 나타났다. 전체적으로 기존 시스템의 THD 수치는 선급 규정인 8%를 초과하여 불만족한 상태였다.

반면, 제안한 시스템의 경우, THD 수치는 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 부하율이 100:100[%]일 때 THD는 7.52%로, 기존 시스템을 사용하는 경우보다 낮은 수치를 기록하였다. 부하율이 감소함에 따라 THD는 계속해서 감소하여 100:10[%] 비율에서 4.73%로 나타났다. 제안한 시스템의 THD 수치는 선급 규정인 8% 이하로 만족하는 상태이다.

각 부하 비율에서 기존 시스템 대비 제안한 시스템의 THD가 얼마나 감소했는지를 퍼센트로 나타내면, 부하율이 100:100[%]일 때 THD는 38.9% 감소하였다. 100:50[%] 비율에서는 약 35.4% 감소하였다. 100:30[%] 비율에서는 약 28.0% 감소하였다. 마지막으로, 100:10[%] 비율에서는 약 11.3% 감소하였다.

결론적으로, 전력 불평형 상황에서 R-L 부하와 VFD 부하의 비율 변화에 따른 THD 분석 결과, 제안한 시스템을 사용한 경우가 기존 시스템보다 고조파 저감에 더 효과적임을 확인하였다. 기존 시스템에서는 선급 규정에 불만족하며, 이에 따라 전력 품질 저하가 우려된다. 반면, 제안한 시스템에서는 규정을 만족하는 THD 수치를 기록하였다. 전체적으로 전력 불평형 상황에서도 R-L 부하와 VFD 부하의 비율 변화에 따라 전압 THD가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 전력 시스템의 품질을 개선하는 데 중요한 요소로 작용할 수 있다. 특히, 다양한 운영 조건에서도 Y-결선 변압기를 사용하여 위상 치환을 하는 것이 유리하다는 결과는 향후 리퍼션의 전력 시스템 설계 및 운영에 있어 주요한 고조파 저감 방법이 될 것으로 예상된다.

3. 결 론

리퍼션에서 냉장 컨테이너의 부하를 VFD로 구동할 경우, VFD 부하는 다이오드 정류기를 통해 계통으로 연결된다. 이에 따라 계통 측에 전압 5차, 7차 고조파 등 전압 고조파가 발생하게 된다. 이러한 고조파는 전력 품질 저하를 초래하며, 선급 및 강선 규격을 위반할 수 있기 때문에 고조파 저감 대책이 필요하다. 본 논문에서는 리퍼션의 계통에서 냉장 컨테이너 측으로 향하는 변압기의 위상을 조정하여 전압 5차 고조파와 전압 7차 고조파를 상쇄함으로써 계통의 전압 THD를 감소시키는 방법을 제시하였다. 최악의 고조파를 만들어내는 부하 조건으로 냉장 컨테이너 부하 100%가 VFD 부하일 때 기존 시스템에서는 12.19%로 선급 고조파 규정을 만족하지 못하였으나, 제안한 변압기 구성을 사용할 경우 THD가 38.9% 감소한 7.52%로 측정되어 선급 고조파 규정을 만족하는 효과를 확인할 수 있었다. 또한, 전력 불평형 상황에서도 Y-결선 변압기를 통해 위상 치환을 하는 것이 유리하다는 결과를 검증하였다.

이 논문은 HD현대중공업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[1] Kuituniemi, Santtu."INSTALLATION, COMMISSIONING AND TROUBLE SHOOTING OF VARIABLE FREQUENCY DRIVE." (2013).