

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의 고조파저감효과 분석

김덕기* · 윤경국**† · 김희문***

*, *** 현대중공업, ** (주)씨넷 부설연구소

An Analysis on the Effectiveness of Harmonics Reduction for Variable Frequency Drive by Reactors

Deok-Ki Kim* · Kyoung-Kuk Yoon**† · Hee-Moon Kim***

* FLNG Engineering Department, Hyundai Heavy Industries Co., LTD., Ulsan 44032, Korea

** R&D Center, Seonet Co., LTD., 542, Jeoryeong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49109, Korea

*** Sea Trial Department, Hyundai Heavy Industries Co., LTD., Ulsan 44032, Korea

요 약 : 본 논문에서는 전동기 구동장치를 선정하여 리액터 용량 및 종류, 부하의 크기에 따라 고조파 왜형률 변화추이를 검토하여 선박 및 해양플랜트에 적용 가능한 최적의 용량선정 근거를 마련하였다. AC라인 리액터와 DC링크 리액터는 가변주파수 구동장치 입력전류의 고조파를 크게 저감시키는 역할을 하며, 동일한 효과를 얻기 위한 DC링크 리액터의 인덕턴스가 AC라인 리액터 인덕턴스의 약 1.7배가 되어야 한다는 것을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 소프트웨어 PSIM을 활용하여 각 상황에 따른 전류 고조파 왜형률을 분석하였다.

핵심용어 : 가변주파수 구동장치, AC라인 리액터, DC링크 리액터, 고조파, 시뮬레이션

Abstract : Recently, due to the rapid development of Power Electronics, the usage of Non Linear Load variable frequency drives (VFDs) is increasing in the electric propulsion vessels and offshore plants. And harmonics which is generated by the variable frequency drives is an important issue should be solved. Ac line reactors and dc link reactors are widely used in variable frequency drives to improve the drive performance such as reducing input current harmonics, elevating input power factor, and protecting the drives from surges, etc. The effectiveness of both types of reactors in reducing input harmonics is affected by the loading of the drives and the system source impedance. And it considered that inductance of DC link reactors should be about 1.7 times of AC line reactors for same effect. The rules to evaluate the needs and effectiveness using ac line or dc link reactors are proposed for practical applications. In this paper, a simulation is performed to investigate of such factors using software PSIM.

Key Words : Variable frequency drives, AC line reactors, DC link reactors, Harmonics, Simulation

1. 서 론

선박이나 해양플랜트의 대부분의 장비는 전기를 사용하는 장비이다. 이러한 장비에 안정되고 좋은 품질의 전력을 공급하는 것은 승무원의 안전 및 해양환경적인 측면에서 필수적인 요건이다. 전력 공급의 불안정으로 인해 선박의 안전과 환경보존에 직결 되는 장비들이 고장을 일으킨다면 그것은 큰 위협을 초래할 수 있다.

전력의 품질을 논하는데 있어 가장 중요한 것은 발전기에서 생산된 전압과 전류의 선형성이다. 일반적으로 선박에서 사용되는 디젤 발전기가 생산하는 전류의 파형은 안정적인 정현파이다. 하지만 전기전자 장비의 비선형 부하로 인하여 고조파 전류가 유입되면 공급전원의 파형이 왜곡되게 되고, 이렇게 왜곡된 전압은 다른 전기전자 장비에 나쁜 영향을 미친다.

최근 전력용 스위칭 소자들의 비약적인 발전으로 인해 전 기추진 선박 및 해양 플랜트 등에서 가변주파수 구동장치 (VFD : Variable Frequency Drives)의 사용이 증가하고 있다. 따

* First Author : sense315@hhi.co.kr, 052-203-6230

† Corresponding Author : navy2@daum.net, 051-405-0784

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의 고조파저감효과 분석

라서 VFD에서 전력변환 시 사용되는 스위칭 소자들에 의해 발생하는 고조파는 현대 전력시스템에서 해결해야 될 중요한 문제로 대두되었다.

VFD 입력 측에 발생하는 고조파를 감소시키기 위하여 수동 LC필터, 능동필터 및 위상이동 변압기 등과 같이 다양한 고조파 저감 방법이 사용되고 있다(Akagi and Kondo, 2010). 그러나 시스템이 복잡해지고 설치비용 및 부피가 증가한다는 단점이 있다. 그리고 선박에서처럼 대 전력을 요구하는 전기전자 장비에는 사용이 어렵다.

그에 비해 AC라인이나 DC링크에 리액터를 설치하는 것은 다른 방식들에 비해 보다 쉽게 입력 측의 고조파를 줄일 수 있다(Liang et al., 1972; Villablanca and Nadal, 2007). 일반적으로 직렬 리액터를 적용하지 않는 경우 6-펄스 컨버터에서의 고조파 총 왜형률은 80[%] 이상이지만 3[%] 이상의 인덕턴스를 가진 리액터를 직렬 연결하면 왜형률은 40[%] 이하까지 감소한다. AC라인 리액터는 DC링크 리액터에 비해 효율은 높고 비용과 부피는 낮다는 장점을 가지고 있다.

지금까지 리액터를 이용하여 고조파를 저감시키는 방법은 널리 쓰여 왔다. 하지만 필요한 리액터의 용량과 그 효과에 대하여 정량적으로 분석된 자료는 거의 없다.

본 논문에서는 대용량 전동기 구동장치를 선정하여 리액터 용량과 부하의 크기에 따라 고조파 왜형률 변화추이를 검토하여 최적의 용량선정 근거를 마련하고자 하였다. 또한, 소프트웨어 PSIM을 활용하여 각 상황에 따른 전류 고조파 왜형률을 분석 하였다.

2. 리액터를 이용한 고조파 저감

리액터의 효과에 대해 이해하기 위해서 리액터가 가지는 특성에 대해 고찰해 볼 필요가 있다. 인덕터라고도 하는 리액터는 성층철심 주위에 권선이 감긴 코일로서 전력용 변압기와 유사하다. 철심을 성층하는 것은 와류와 소음을 감소시키기 위한 것이다. 리액터는 구조는 단순하지만 비선형부하로 인해 발생하는 고조파를 감소시키는데 효과적인 방법으로 가 변속 구동장치에 주로 사용된다. 리액터를 통과하는 전류가 변화하면 패러데이의 전자유도법칙에 의해 식(1)과 같은 전압이 유기된다. 식(1)에 의하면 만일 순간전류변화율이 일정하다면 리액터에 유기되는 전압도 일정할 것이다. 회로에 공급되는 순간전류변화율의 변동으로 인해 유기 전압의 변화를 일으키게 되면 리액터는 순간전압변화율을 제한하는 역할을 할 것이고, 전류의 순간변화율 또한 제한될 것이다.

$$E = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

단, E :유도기전력, L :인덕턴스, $\frac{di}{dt}$:순간전류변화율 즉 전압의 급격한 상승으로 인하여 회로전류가 급증하려고 할 때, 리액터는 회로의 전압상승을 제한함으로써 전류의 증가율을 감소시키는데 이러한 효과는 가변주파수 구동장치나 다른 비선형 부하에 있어 고조파 전류를 감소시켜 주는 데 유용하게 이용된다. 가변속 구동장치에는 AC리액터 또는 DC리액터가 사용되는데 AC리액터는 AC라인측에, DC리액터는 DC 링크단에 설치된다.

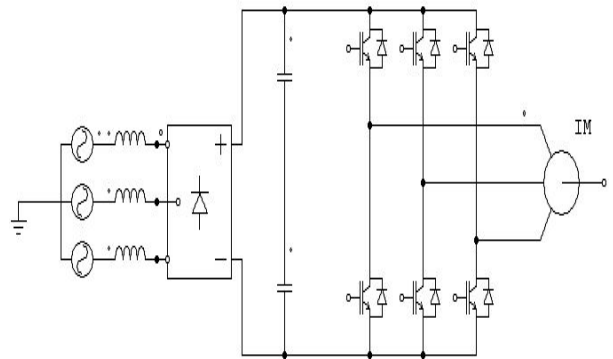


Fig. 1. VFD using AC line reactor.

Fig. 1은 AC라인에 리액터가 부착된 가변주파수 구동장치를 나타낸다. AC라인 리액터는 DC링크 리액터에 비해 보다 일반적이고 더 많이 사용된다.

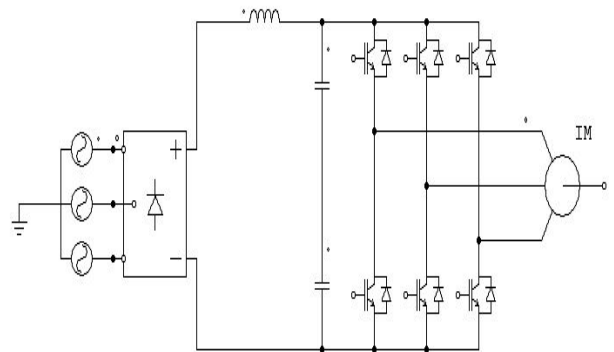


Fig. 2. VFD using DC link reactor.

AC 라인 리액터는 고조파를 감소시킬 뿐 아니라 정류단에 유기되는 돌발전압을 억제하는 역할도 한다. 단점은 리액터스에 비례하는 전압강하를 일으킨다는 점이다. 2~3[%]의 퍼센티지 리액터스를 갖는 리액터가 가장 일반적으로 사용되고 5[%]가 통상 사용되는 최대치이다.

3. 시뮬레이션 및 검토

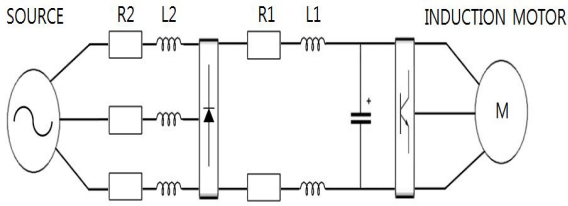


Fig. 3. VFD using AC line and DC link reactors.

Fig. 2는 DC링크 리액터가 설치된 가변주파수 구동장치이다. DC 컨버터 출구 측과 평활 커패시터 사이에 DC링크 리액터를 설치하여 입력 고조파전류 저감, 소자 보호 및 안정된 직류전압의 확보가 가능하다. 소수의 AC PWM 구동장치 제작자들은 AC라인 리액터로 인한 전압강하를 방지하기 위해 DC링크단에 리액터를 삽입하기도 한다. 이런 구동장치의 경우 정류단 입구를 서지전압으로부터 보호할 수 있는 장치뿐 아니라 DC링크 전압에 영향을 줄 수 있는 돌발 상황을 제한할 수 있는 수단이 별도로 마련되어야 한다. 대형 구동장치에는 Fig. 3과 같이 AC라인 리액터와 DC링크 리액터가 동시에 설치되기도 한다.

일반적으로 이 장치는 구동장치의 kVA 정격에 비해 단락 용량이 적거나 전원이 왜란에 대해 민감한 경우에 사용된다. DC링크 리액터의 리액턴스가 작을 경우 AC 라인 리액터의 리액턴스를 증가시키면 고조파 감소현상이 뚜렷하지만 DC링크 리액턴스가 4[%]이상이면 AC라인 리액터의 고조파 저감 효과는 미미하다.

3.1 시뮬레이션 프로그램

AC라인 리액터나 DC링크 리액터를 설치함으로써 고조파 전류를 감소시키는 방식은 폭넓게 적용되고 있지만, 그 효과가 정량적으로 분석되거나 발표된 자료는 거의 없다. 또한 부하나 리액터의 리액턴스의 크기가 어떤 영향을 끼칠 수 있는지 여부도 구체적으로 규명된 바가 없다. 본 논문에서는 각 리액터들의 영향 및 효과를 시뮬레이션을 통하여 고찰해 보고자 한다. 먼저 가장 넓게 사용되고 있는 6-펄스 전압원 인버터를 이용한 유도전동기 가변속 구동장치를 선정하였는데 이 장치는 6-펄스 정류기 및 PWM 인버터로 구성되어 있다. 전원 측에는 전원 임피던스와 저항이 있고, DC 컨버터로 들어가기 전 AC라인 리액터를 설치하여 입력 고조파전류를 감소시킬 수 있고 반도체소자들을 돌발전압으로부터 보호할 수 있다. DC 컨버터에 의해 교류전압 및 전류를 직류로 바꾼 후 6개의 IGBT의 On-off로 펄스폭을 변조하여 원하는 전압 및 주파수의 3상 교류전력을 출력한다. 리액턴스의 크기를 정의하는 %리액턴스는 식(2)와 같다. 식(2)는 인덕턴스를 구하기 위하여 식(3)과 같이 변환 될 수 있다.

시뮬레이션에서 사용한 전원 측의 임피던스는 6[%]이며, 6-펄스 정류단의 정격은 235[kVA], 480[V]이다. 따라서 전원 측 인덕턴스는 0.0033[mH], 저항은 0.01[Ω]로 가정하였다. 부하토크를 정격의 25[%], 33[%], 50[%], 75[%] 및 100[%]로 변화시키면서 입력전류의 고조파를 측정하였다.

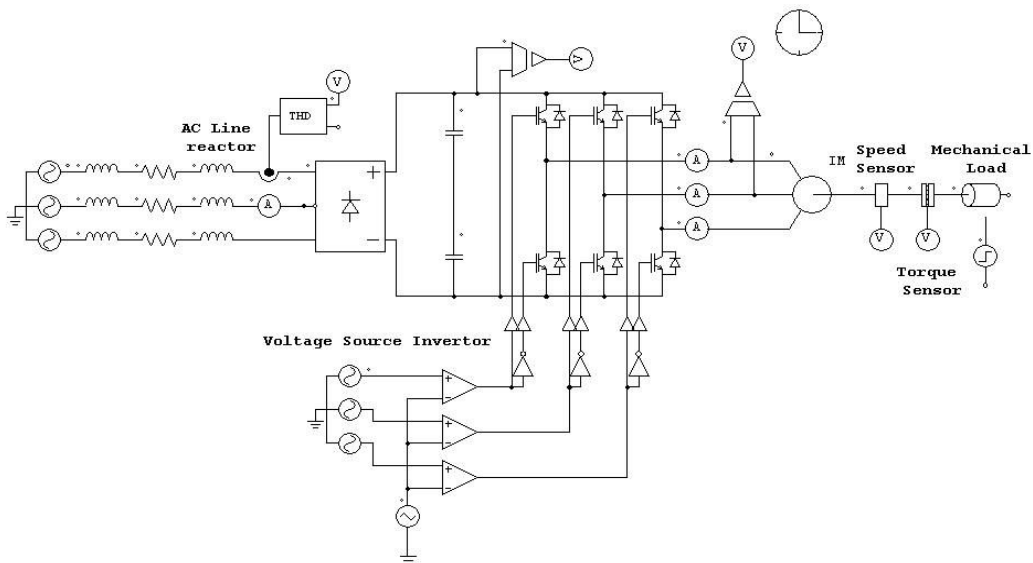


Fig. 4. PSIM simulation program of VFD using AC line reactor.

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의 고조파저감효과 분석

$$\%X = \frac{2\pi f L I_{AC} \times 100}{V_{AC} / \sqrt{3}} \quad (2)$$

$$L = \frac{\%X \cdot V_{AC} / \sqrt{3}}{2\pi f I_{AC} \times 100} \quad (3)$$

단, f : 주파수, I_{AC} : 전류, V_{AC} : 전압, $\%X$: 퍼센트 리액턴스
 Fig. 4는 AC라인에 리액터를 설치한 경우의 VFD를 소프트웨어 PSIM을 사용하여 작성한 프로그램이다. Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 DC링크단에 리액터를 삽입한 경우의 VFD를 소프트웨어 PSIM을 사용하여 작성한 프로그램이다.

3.2 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 부하토크의 크기 및 AC라인 리액터의 리액턴스 크기에 따른 입력 전류의 고조파 총 왜형을 변화시키려고 시도하고 있다. 리액터가 없는 경우 25[%]의 부하에서 VFD 입력 측의 THD_I 가 110[%]에 달하지만 100[%]의 부하에서는 77[%]까지 감소한다. 즉, 부하의 크기가 VFD 입력 측 총 고조파 왜형률에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 여기에 3[%]의 AC라인 리액터를 설치할 경우 25[%]의 부하에서 THD_I 는 83[%], 100[%] 부하에서는 41[%]로 줄어든다. Fig. 7~Fig. 10은 위의 각 경우에 대한 입력 전류 파형이다. Fig. 11은 위와 동일한 조건에서 부하토크의 크기 및 DC링크단 리액터의 리액턴스 크기에

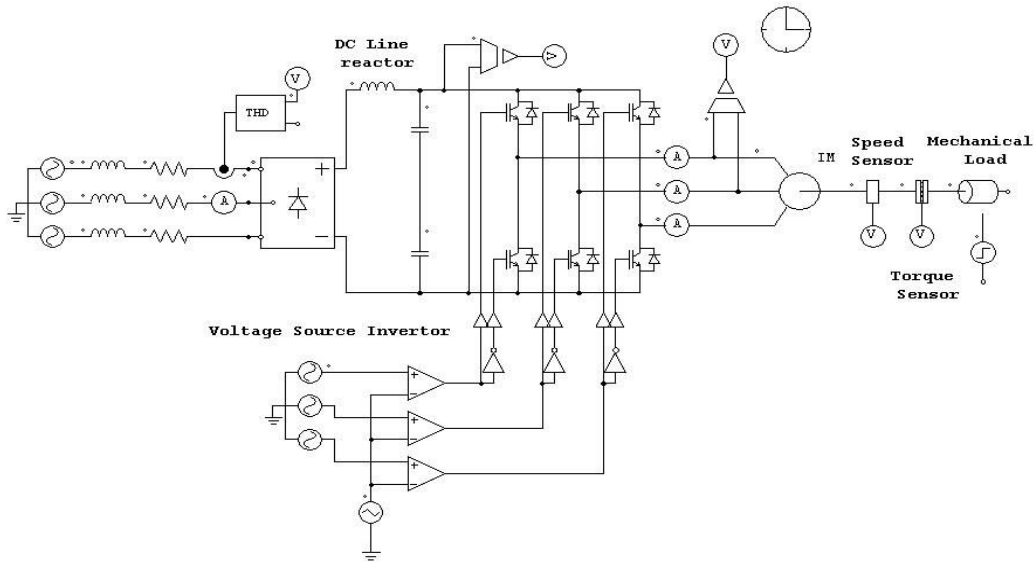


Fig. 5. PSIM simulation program of VFD using DC link reactor.

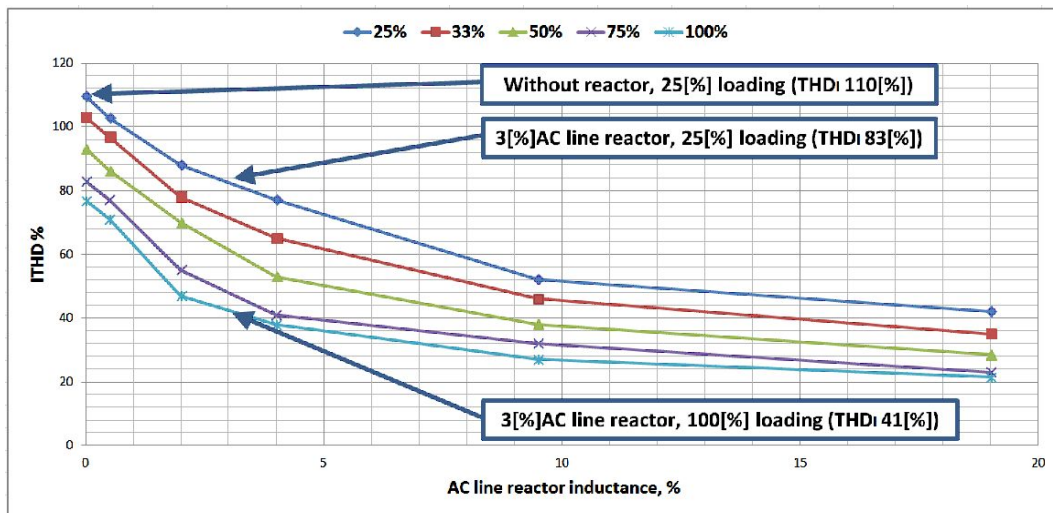


Fig. 6. Simulated THD_I (ITHD%) at the VFD input versus the inductance of AC line reactors for various drive loading (from 25[%] to 100[%]).

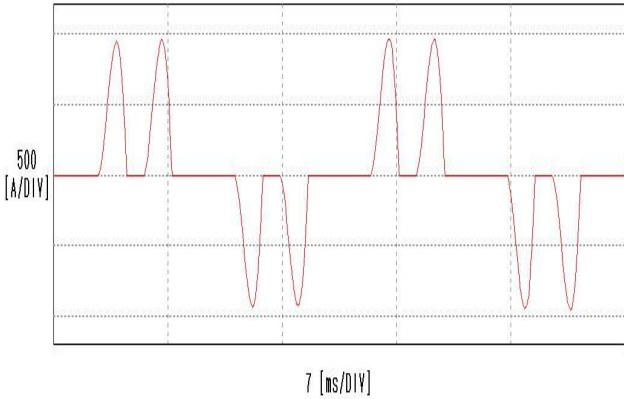


Fig. 7. Simulated input currents at the VFD without reactor under 25[%] loading (THD_I 110[%]).

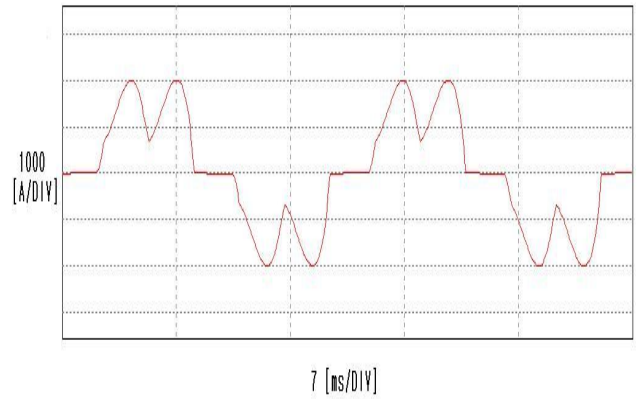


Fig. 10. Simulated input currents at the VFD with 3[%]AC line reactor under 100[%] loading (THD_I 41[%]).

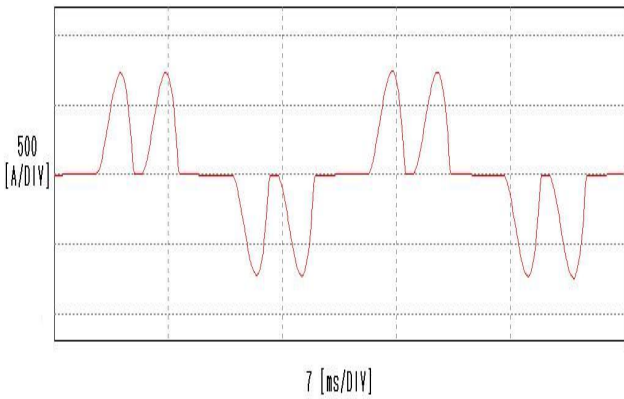


Fig. 8. Simulated input currents at the VFD with 3[%] AC line reactor under 25[%] loading (THD_I 83[%]).

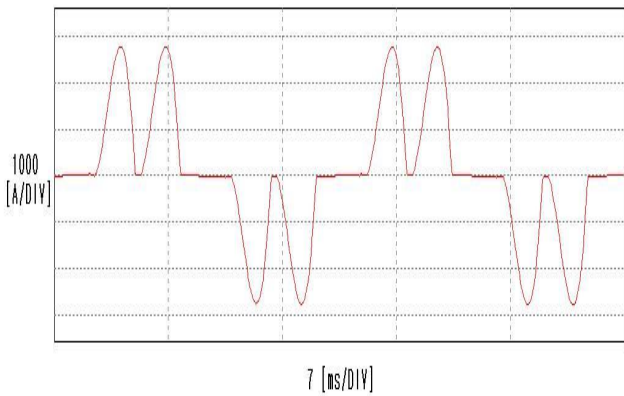


Fig. 9. Simulated input currents at the VFD without reactor under 100[%] loading (THD_I 77[%]).

따른 입력 전류의 고조파 총 왜형률 변화를 나타내고 있다. 3[%]의 DC링크 리액터를 삽입한 경우 부하토크의 크기가 25[%]라면 THD_I 는 92[%], 100[%]라면 48[%]정도이다.

Fig. 12~Fig. 13은 위의 각 경우에 대한 입력 전류 파형이다. AC라인 리액터와 DC링크 리액터 모두 효과적이지만, 동일한 용량의 인덕턴스를 사용하면 DC링크 리액터로 사용할 경우 THD_I 가 AC라인 리액터로 사용했을 때보다 더 높아질 효과적이라 할 수 있다. AC라인 리액터와 DC링크 리액터 모두 동일 부하에서 리액터의 용량이 클수록 THD_I 가 감소되고 있다. 하지만 용량이 커질수록 THD_I 가 감소되는 기울기는 완만해지고 있다. 특히 약 10[%] 이상의 인덕턴스가 부과되면 THD_I 의 감소는 거의 없어짐을 알 수 있다. 일정 부하상태에서 THD_I 감소율(ITHD reduction rate)을 식(4)과 같이 산출할 수 있다.

Fig. 14는 3[%] 인덕턴스를 가진 리액터를 AC라인과 DC링크단에 사용할 때 THD_I 감소율이 부하에 따라 어떻게 변화하는지를 도시하고 있다. 부하가 증가할수록 THD_I 감소율이 상승한다는 것을 알 수 있다. 즉, 리액터는 경부하 시 보다는 중부하 시 훨씬 효과적이다. 또한 동일 부하에서 같은 용량을 설치할 때 THD_I 감소율은 AC라인 리액터가 DC링크 리액터보다 높다. 하지만 그 차이는 부하가 달라지더라도 비슷하다.

Fig. 11에 의하면 25[%] 부하에서 5[%] DC링크 리액터를 사용했을 경우 THD_I 는 84[%]이고, 이것은 3[%]의 AC라인 리액터를 사용했을 경우와 비슷한 수치이다. 시뮬레이션을 한 부하에 대해, 3[%] 및 5[%]의 AC라인 리액터와 DC링크 리액터의 THD_I 값을 요약하면 Table 1과 같다. Fig. 15는

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의 고조파저감효과 분석

$$ITHD_{reduction\ rate} = \frac{ITHD_{without\ reactors} - ITHD_{with\ AC\ or\ DC\ reactors}}{ITHD_{without\ reactors}} \times 100 \quad (4)$$

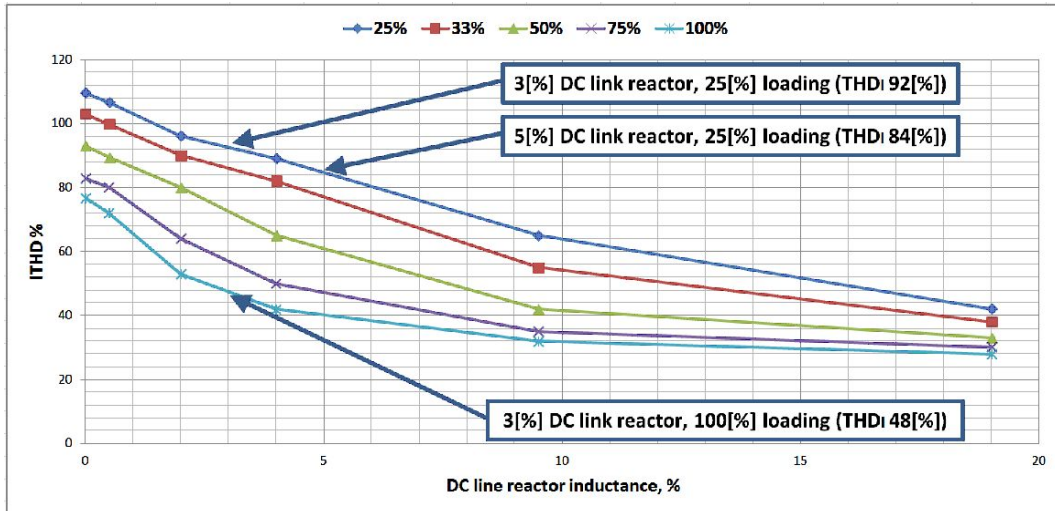


Fig. 11. Simulated THD_I at the VFD input versus the inductance of DC link reactors for various drive loading (from 25[%] to 100[%]).

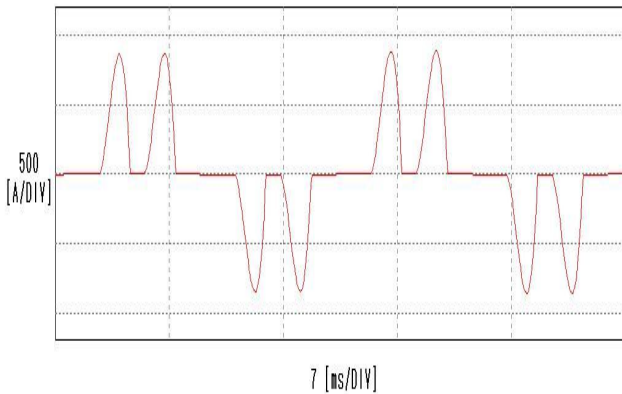


Fig. 12. Simulated input currents at the VFD with 3[%] DC link reactor under 25[%] loading (THD_I 92[%]).

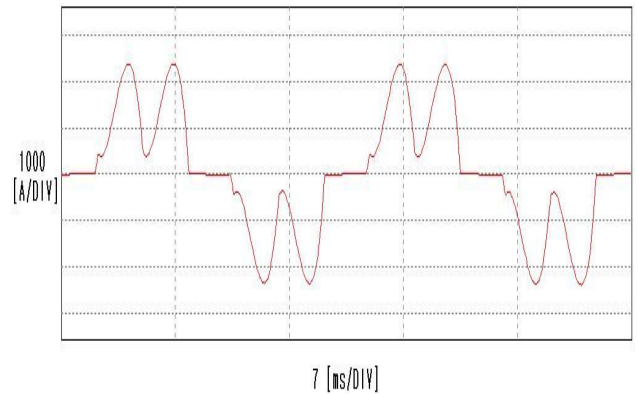


Fig. 13. Simulated input currents at the VFD with 3[%] DC link reactor under 100[%] loading (THD_I 48[%]).

25[%] 및 100[%] 두 부하에서 AC라인 리액터와 DC링크 리액터 사용 시 THD_I 의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 15에서 알 수 있듯이 VFD의 각 부하에서, 3[%]의 AC라인 리액터와 5[%] DC 링크 리액터는 비슷한 고조파 저감 효과가 있다. 예를 들어, 2[%]의 AC라인 리액터는 3.4[%] DC 링크 리액터에 해당하는 고조파 저감효과를 지닌다. 따라서 DC 링크 리액터의 인덕턴스가 VFD 입력에서 비슷한 고조파 저감 효과를 얻기 위해서는 AC 라인 리액터의 1.7배의 인덕턴스를 가져야한다는 결론을 낼 수 있다.

4. 결론

AC라인 리액터나 DC링크 리액터를 설치함으로써 입력전류의 고조파 왜형률을 감소시키는 방식은 폭넓게 적용되고 있지만, 그 효과가 정량적으로 분석되거나 발표된 자료는 거의 없다. 또한 부하나 리액터의 리액턴스의 크기가 어떤 영향을 끼칠 수 있는지 여부도 구체적으로 규명된 바가 없다.

본 논문에서는 부하의 크기에 따라 각 리액터들의 영향 및 효과를 시뮬레이션을 통하여 고찰해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

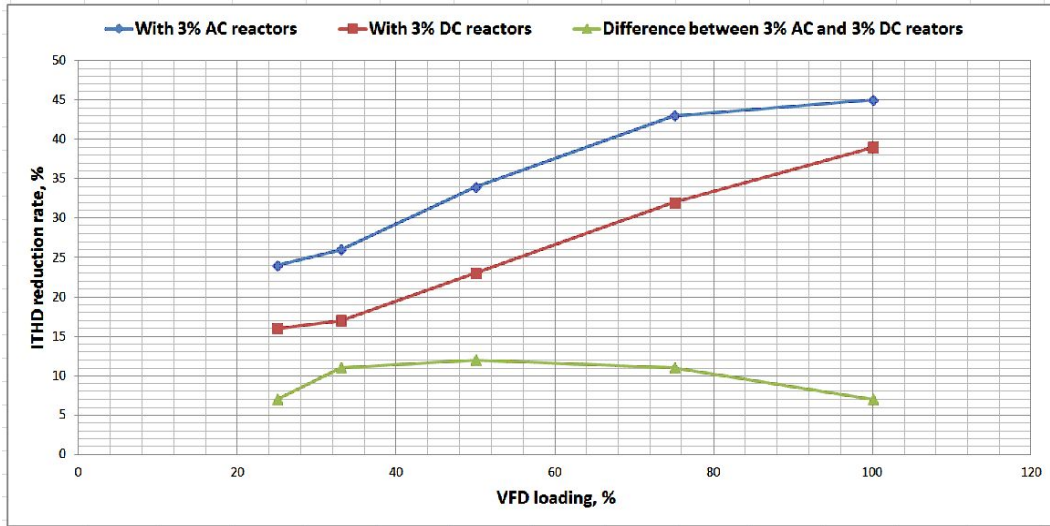


Fig. 14. ITHD reduction rate at the drive input versus VFD loading using a 3[%] AC line reactor and a 3[%] DC link reactor.

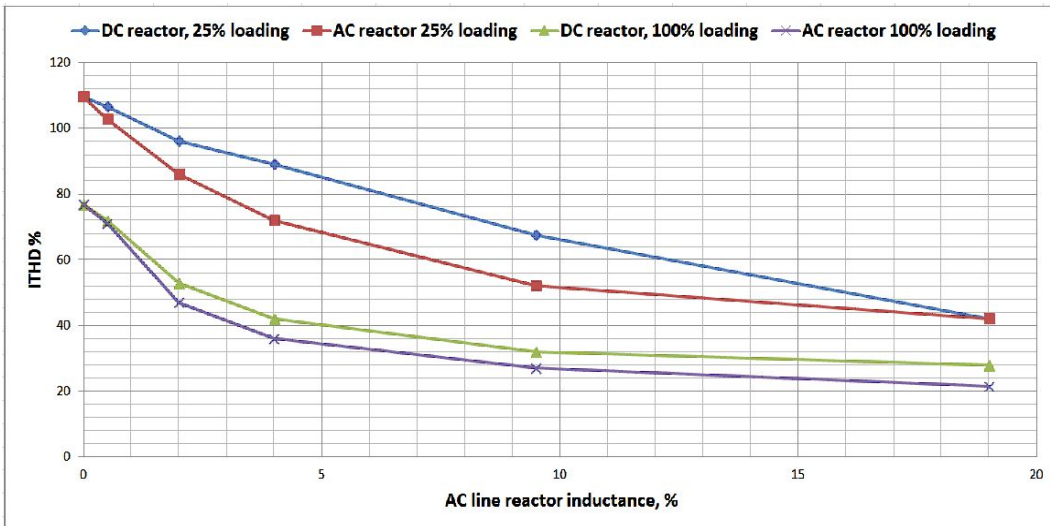


Fig. 15. Comparison of THD_1 (ITHD%) at the VFD input using AC line or DC link reactors for 25[%] and 100[%] drive loading.

Table. 1 Simulated THD_1 versus drive loading using 3[%] and 5[%] AC line and DC link reactors

VFD loading	THD_1 at the VFD input, [%]			
	3[%] AC line reactor	3[%] DC link reactor	5[%] AC line reactor	5[%] DC link reactor
25%	83	92	72	84
33%	74	85	63	76
50%	60	72	51	61
75%	48	56	40	47
100%	41	48	36	40

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의 고조파저감효과 분석

- 1) AC라인 리액터와 DC링크 리액터는 6-펄스 가변주파수 구동장치 입력전류의 고조파를 크게 저감시키는 역할을 한다.
- 2) 입력전류 총 고조파 왜형률은 VFD의 입력전원 측 임피던스와 부하의 크기에 상당한 영향을 받는다.
- 3) AC라인 리액터와 DC링크 리액터 모두 탁월한 고조파 저감 성능을 가지고 있지만, 동일한 효과를 얻기 위해서는 DC링크 리액터의 인덕턴스는 AC라인 리액터의 약 1.7배가 되어야한다.
- 4) 10[%]이상의 인덕턴스를 가지는 리액터는 추가적인 고조파 저감 효과를 크게 가져오지 않는다. 특히 리액터로 인해 가장 큰 개선 효과를 얻을 수 있는 범위는 0~5[%] 정도의 인덕턴스 값이다.

References

- [1] Akagi, H. and R. Kondo(2010), A Transformerless Hybrid Active Filter Using a Three-Level Pulse Width Modulation (PWM) Converters for Medium-Voltage Motor Drive, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, pp. 1365-1374.
- [2] Liang, X., O. Ilochonwu and J. Lim(1972), Influence of Reactors on Input Harmonics of Variable Frequency Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, pp. 2195-2203.
- [3] Villablanca, M. E. and J. I. Nadal(2007), An Efficient Current Distortion Suppression Method for Six-Pulse Bridge Rectifiers, IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 54, pp. 2532-2538.

Received : 2015. 11. 12.

Revised : 2015. 12. 16. (1st)

: 2015. 12. 23. (2nd)

Accepted : 2015. 12. 28.