

고압 대용량 인버터의 출력 과전압 억제를 위한 RC filter의 현장적용 시험에 관한 연구

유명호, 박영민, 이세현, 민병덕, 서광덕
현대중공업 기전연구소

Application of the RC Filter for Suppressing the Output Overvoltage of the High-voltage Large-capacity Inverter

Myung-Ho Woo, Young-Min Park, Se-Hyun Lee, Byung-Duk Min, Kwang-Duk Seo
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries

Abstract - In this paper, the RC filter for mitigating the output overvoltage of the 3-level 3300V 4MW inverter is described. The descriptions on power circuit and overvoltage phenomena are presented. The output transformer, which may be used to obtain the higher output voltage, makes the filter design difficult because the parameter measurements are not easy and the accuracy may be poor. So, this paper presents several preliminary results on the output overvoltage with or without transformer to investigate the overall system characteristics. Some experimental results are also provided when the designed filter is applied.

전압 억제 실험결과를 제시함으로써 변압기를 고려한 과전압 억제 필터에 대해 간략하게 언급하고자 한다.

2. 고압 대용량 인버터 시스템

2.1 시스템 구성

그림 1에 4500V 4000A IGCT를 사용한 3300V, 4MW급 3-level 고압 대용량 인버터 시스템의 전체 전력회로 블록 다이어그램을 나타내었다.

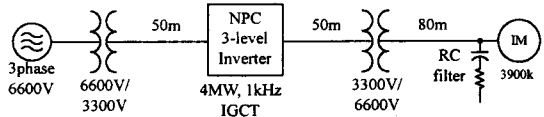


그림 1 고압 대용량 인버터 시스템

1. 서 론

최근 IGCT, IGBT 등과 같은 전력용 반도체 소자를 이용한 대용량 전동기 구동시스템에 대한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다[1]. 특히 중대용량 인버터의 토폴로지로 널리 채택되어온 전류형 인버터 대신에 제어성, 소형/경량화, 저손실등의 측면에서 우수한 고압 전압형 대용량 인버터에 대한 관심이 폭넓게 확산되고 있다.

한편 인버터/전력용 케이블/전동기의 임피던스 부정합에 의한 전동기 입력단 과전압 현상을 억제하기 위한 RC terminator [2-8] 및 LC 정현파 필터 [9,10] 등에 대한 연구/개발도 활발하게 이루어지고 있다. LC 정현파 필터는 중용량급 이상의 인버터에서 임피던스 부정합에 의한 전동기 입력 과전압을 억제하기 위한 효과적인 수단으로서 널리 채택되고 있으나 손실의 증가, 기본파 전압강하, 케이블 길이 의존성 등의 단점을 지니고 있는 것으로 보고되고 있다.

RC terminator 방식은 케이블의 특성 임피던스와 동일한 저항으로 전동기 입력단을 정합함으로써 전동기 입력단에서의 전압반사 현상을 억제하는 것으로서 간단한 구조, 인버터 용량과의 무관계등의 장점을 지니고 있다. 그러나 인버터와 전동기 사이에 출력용 변압기와 같은 장치가 설치될 경우, 변압기의 표유 커패시터 등의 파라미터로 인해 필터 설계 자체가 어려워질 수 있다. 특히, 변압기 파라미터 측정상의 어려움, 신뢰성 문제, 그리고 케이블 파라미터의 주위조건(덕트, 온도, 습기 등)에 따른 변동은 필터설계를 더욱 어렵게 하는 원인이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 3300V, 4MW급 3-level 고압 대용량 인버터 시스템의 출력 과전압을 억제하기 위한 RC 필터의 현장적용 시험을 다룬다. 이를 위해 먼저 본 연구에서는 변압기 및 케이블에 의한 출력 과전압 현상 결과를 제시함으로써 시스템의 과전압 발생 특성을 파악하고자 한다. 또한, 설계/제작된 RC 필터를 설치하였을 때의 과

그림과 같이 모선 전압과 인버터 시스템 전압이 인버터 전·후단에 강압 및 승압 변압기를 설치하여 전동기를 구동하도록 구성되어 있으며 부록의 표 1 및 2에 변압기 및 유도전동기의 사양을 각각 나타내었다. 또한 인버터-변압기간의 케이블 거리는 약 50m, 변압기-전동기간 케이블 거리는 약 80m이다.

2.2 전동기 입력 과전압의 발생

전동기의 입력 과전압은 주로 인버터 출력 PWM 전압의 dv/dt , 전력용 케이블의 길이 및 케이블의 특성 임피던스 크기, 전동기의 입력 임피던스 크기 등에 좌우된다. 특히 식 (1)로 정의되는 전동기 입력단에서의 전압반사(Voltage reflection) 계수에 따라 인버터 출력전압의 최대 2배 전압이 전동기 입력단에 나타날 수 있다.

$$\Gamma_m = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \tag{1}$$

여기서 Z_m 은 전동기의 입력 임피던스를 Z_c 는 케이블의 특성 임피던스를 각각 나타낸다.

한편 케이블의 특성 임피던스 Z_c 는 단위 길이당 케이블 인덕턴스 L_0 및 단위 길이당 케이블 커패시턴스 C_0 에 의해 다음 식으로 정의된다.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \tag{2}$$

그러므로 전동기측 입력 반사 전압 V_r 은 식 (1)과 인

버터 직류전압 V_{dc} 를 사용하여 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$V_r = (1 + \Gamma_m)V_{dc} \quad (3)$$

먼저 케이블만에 의한 전동기 입력 과전압 발생 현상을 확인하기 위해 그림 1의 출력측 변압기를 bypass 시킨 후 측정한 인버터 출력 및 전동기 입력전압을 그림 2에 나타내었다. 또한 전동기 입력전압 확대 파형을 그림 3에 나타내었다. 그림 3으로부터 과도상태시 인버터 출력전압의 2배 가까운 과전압이 전동기 입력측에 발생하고 있음을 알 수 있다.

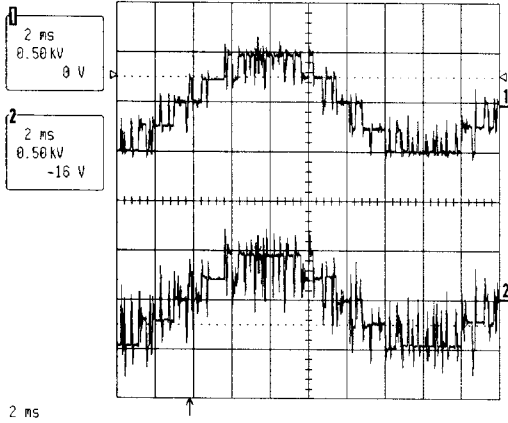


그림 2 케이블만에 의한 인버터 출력전압(상), 전동기 입력전압(하)

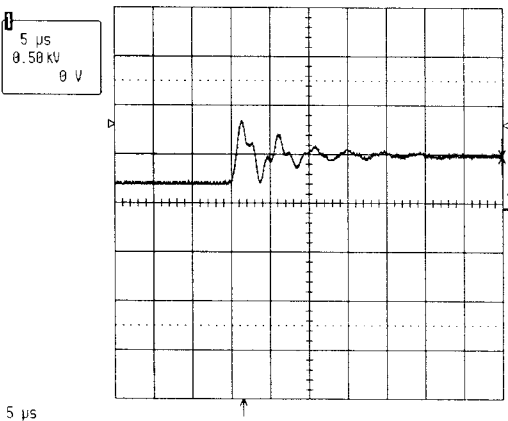


그림 3 케이블만에 의한 전동기 입력전압 확대파형

유도 전동기는 연결하지 않은 상태에서 출력 변압기를 사용할 경우의 인버터 출력전압, 변압기 출력전압, 그리고 인버터 출력전류 실험결과를 그림 4에 나타내었으며 그림 5는 변압기 2차측 전압의 확대파형을 나타낸다. 그림과 같이 승압 변압기에 의한 2배 전압 증가를 고려하더라도 약 4배 정도의 매우 큰 과전압이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인으로는 사용된 변압기의 2차측 누설 인덕턴스로 인해 출력 전압의 dv/dt 가 작아져 발생한 것으로 사료된다. 즉, 변압기 2차측 전압의 과도상태가 끝나기도 전에 인버터의 스위칭 상태가 바뀌기 때문에 4배 가까운 과전압이 변압기 2차측에 발생하는 것으로 판단된다. 이를 억제하기 위해서는 인버

터의 최소 turn on 및 turn off 시간을 증가시키는 방법을 고려할 수 있으나 본 시스템과 같이 긴 과도상태를 가질 경우 효과적인 해결 방법이라고는 할 수 없으며 시스템의 성능을 저하시킬 수도 있다.

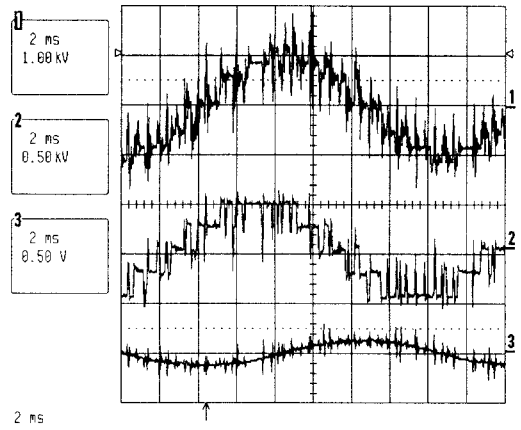


그림 4 변압기가 있을 경우의 변압기 출력전압(상), 인버터 출력전압(중), 인버터 출력전류(하)

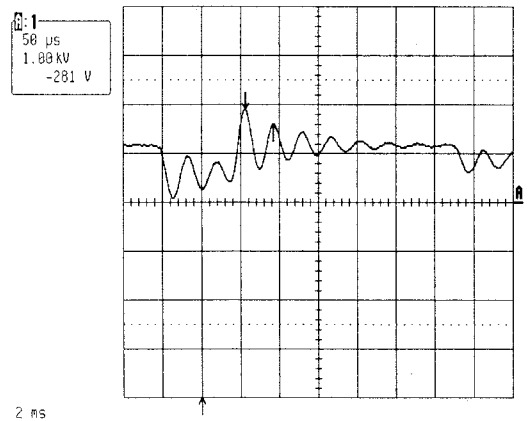


그림 5 변압기가 있을 경우의 변압기 출력전압 확대 파형

3. RC 필터에 의한 과전압 억제

그림 4와 5에서 알 수 있는 것처럼 본 시스템의 경우 변압기의 누설 인덕턴스에 의해 과전압의 크기가 거의 전적으로 결정됨을 알 수 있다. 따라서 기존의 전력 케이블 특성인덕턴스에 정합된 RC 필터 설계 방법은 본 시스템의 과전압 억제방법으로 적당하지 않으며 별도의 설계방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 이를 위해 전동기 입력단자가 아닌 변압기 출력단에 RC 필터를 설치하였다. 이 경우 변압기의 누설 인덕턴스와 RC 필터가 L-R-C필터 구조를 형성함을 알 수 있다.

RC필터의 파라미터는 그림 5의 약 25kHz 과도상태 리플전압의 주파수 성분을 제거하기 위하여 4.7 kHz의 차단 주파수를 가지도록 설계하였으며 제작된 RC필터의 파라미터는 $R = 100\Omega$, $C = 0.2\mu F$ 이다. 그림 6과 7에 RC 필터 설치 전 및 후의 변압기 2차측 전압 실험 파형을 각각 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있는 것처럼 RC 필터를 통해 과전압 발생을 효과적으로 저감할 수 있음

을 확인할 수 있다.

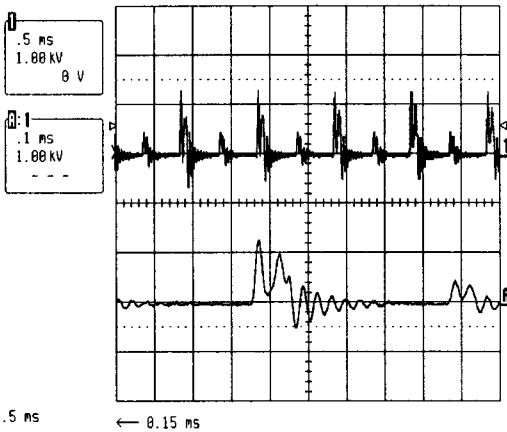


그림 6 RC 필터 설치전의 변압기 출력전압(상) 및 출력전압의 확대 파형(하)

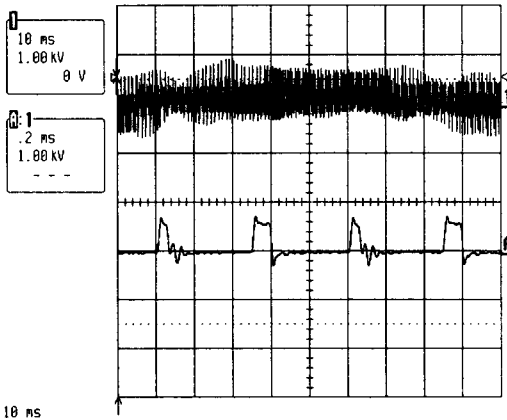


그림 7 RC 필터 설치후의 변압기 출력전압(상) 및 출력전압의 확대 파형(하)

4. 결 론

본 연구에서는 4MW급 3-level 고압 대용량 인버터 시스템의 전동기 입력측 과전압 발생 현상을 분석하고 변압기, 특히 고누설 변압기가 인버터와 전동기 사이에 설치되어 있을 경우 전동기 입력단에 매우 큰 과전압이 발생함을 확인하였다. 또한 변압기에 의한 과전압 현상을 제거하기 위해서는 기존의 전동기 입력단에 설치하는 RC terminator가 아닌 변압기의 누설 임덕턴스를 이용한 변압기 출력측의 L-R-C 필터가 매우 효과적임을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Steffen Bernet, "Recent Developments of High Converters for Industry and Traction Applications," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.15, no. 6, p. 2~1117, November 2000.
- [2] Annette von Jouanne, Dubi A. Rendusara, Pra Enjeti, and James Will Gray, "Filtering Techniq

Minimize the Effect of Long Motor Leads on P Inverter-Fed AC Motor Drive Systems," *IEEE T Ind. Applicat.* vol.32, no. 4, pp. 919~926, July/August 1996.

- [3] Christopher J. Melhorn and Le Tang, "Transient of PWM Drives on Induction Motors," *IEEE T Ind. Applicat.* vol.33, no. 4, pp. 1065~1072, Jul 1996.
- [4] G. Skibinski, "Design Methodology of a Terminator to Reduce Reflected Voltage on AC M" in *Proc. IEEE/IAS Conf.*, pp. 153~161, 1996.
- [5] Annette von Jouanne and Prasad N. Enjeti, "Considerations for an Inverter Output Filter to Minimize the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications," *IEEE Trans. Ind. Applicat.* vol.33, no. 5, pp. 1145, September/October 1997.
- [6] Lawrence A. Saunders, Gary L. Skibinski, St Evon, and David L. Kempkes, "Riding the Re Wave - IGBT Drive Technology Demands New M and Cable Considerations," in *Petroleum and Chemical Industry Conference*, pp. 75~84, 1996.
- [7] Russel J. Kerkman, David Leggate, and Ga Skibinski, "Interaction of Drive Modulation and Parameters on AC Motor Transients," *IEEE T Ind. Applicat.* vol.33, no. 3, pp. 722~730, M 1997.
- [8] Paul T. Finlayson, "Output Filters for PWM with Induction Motors," in *IEEE Industry Applic Magazine*, Vol. 4, pp. 46~52, Jan.-Feb. 1998.
- [9] P. K. Steimer, J.K. Steinke, and H. E. Grun reliable, interface-friendly Medium Voltage Drive on the robust IGCT and DTC techniques," in *IEEE/IAS Conf.*, 1999, pp. 1505~1512.
- [10] Juergen K. Steinke, Christian A Stulz, and Pohjalainen, "Use of LC Filter to Achieve a friendly Performance of the PWM Voltage Source Inverter," in *Electric Machines and Drives Conference Record*, pp. TA2/4.1~TA2/4.3, 1997.

부 록

표 1 전동기 파라미터

용량	3900 kW
정격전압	6600 Vac
정격전류	418 A
극수	12
정격속도	592 rpm
1차측 동손	0.0580 Ω
2차측 동손	0.0486 Ω
1차측 누설 리액턴스	1.2517 Ω
2차측 누설 리액턴스	1.1804 Ω
자화 리액턴스	31.4738 Ω

표 2 변압기 파라미터

결선 방식	Δ-Y
용량	6.5 MVA
% 임피던스	12 %
2차측 누설 인덕턴스	4.2 mH
2차측 동손	0.1398 Ω