

## 심해저 환경을 고려한 장거리 케이블 및 필터 설계

권혁준<sup>1</sup>, 김병우<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>울산대학교 대학원 전기전자정보시스템공학과, <sup>2</sup>울산대학교 전기공학부

### Design of Long Distance Cable and Filter considering the Subsea Environment

Hyeok-Joon Kwon<sup>1</sup> and Byeong-Woo Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Electrical Engineering, University of Ulsan

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, University of Ulsan

**요약** 본 논문은 심해저 환경을 고려한 케이블 및 필터 설계에 관한 연구를 수행하였다. 심해저 플랜트에서 사용하고 있는 전기 아키텍처는 해상에서 고전압의 전원 공급 장치, 고용량 구동시스템, 장거리 케이블과 전동기로 구성되어있다. 전도 노이즈는 전동기 구동용 인버터의 고속 스위칭 시 발생하는 급속한 전압변화로 인해 발생하며, 케이블의 길이가 길어질수록 전동기에 심각한 과도 전압을 발생시킨다. 따라서 심해저 플랜트에 사용되는 장거리 케이블의 R, L, 선간 C, 선-접지 C를 고려한 선로를 설계하여 구동 전동기에 발생하는 과전압을 확인하였다. 또한, PWM 인버터 구동시스템의 전도 노이즈 저감을 위한 필터를 설계하여 심해저 플랜트 모델의 가이드라인을 제안하고자 한다.

**Abstract** This paper is conducted a research of the cable and filter design considering the deep sea floor environment. The electric architecture which is being used in the subsea plant is comprised of the power supply unit of the high voltage, high-capacity drive system, long cable, and electric motor in the sea area. Conducted emission is occurred by the rapid voltage change at the moment of switching at high speed of inverter for driving motors. The more the length of the cable is lengthened, the worse the motor is influenced by transient voltage. Thus, the over voltage occurred in the drive motor was confirmed by designed wire which is considered R, L, line-to-line C, line-to-gnd C of long cable used in the subsea plant. A guide line of the subsea plant model is also suggested by using a filter to reduce conducted noise of PWM inverter drive-system.

**Key Words** : Subsea, Long cable, Output filter, Transient voltage, EMI

### 1. 서론

최근 석유의 고갈로 인하여 심해저에 대한 관심이 높아지고 있으며 더불어 심해저 플랜트에 대한 기술에 많은 발전이 이루어지고 있다. 심해저 플랜트의 전기아키텍처는 해상에서 입력전원, VSD(Variable Speed Drive), 승압변압기로 구성되며, 심해저에서 2km이상의 엄빌리컬(Umbilical) 케이블, 강압변압기, 전동기로 구성된다.[1]

현재 산업 설비에서 많이 쓰이는 전동기 구동용 인버

터에서의 고속 스위칭 소자는 고속 스위칭 시 발생하는 급속한 전압변화로 인한 노이즈 발생의 문제점이 있다. 이 전도노이즈 성분은 전동기 권선과 외함 사이에 존재하는 기생 커패시터를 통하여 누설전류를 발생시키며, EMI(Electro - magnetic Interference) 문제 및 모터 베어링에 손상을 주고 또한 심한 경우 모터의 절연이 파괴된다. 이러한 전도 노이즈 성분 중 CM(Common Mode)노이즈가 고전압 입출력, 고용량 구동 시스템에 큰 영향을 미친다. 인버터와 모터 사이의 케이블이 길어질수록, CM

본 연구는 광역경제권 연계협력사업 일환으로 수행된 논문입니다.

\*Corresponding Author : Byeong-Woo Kim (University of Ulsan)

Tel: +82-10-3413-6018 email: [bywokim@ulsan.ac.kr](mailto:bywokim@ulsan.ac.kr)

Received July 24, 2013

Revised (1st September 5, 2013, 2nd September 12, 2013)

Accepted October 10, 2013

노이즈를 고려한 필터설계가 더욱 요구된다.[2]

지금까지 산업에서 사용하는 모터시스템에 대한 장거리 케이블 설계와 전도 노이즈를 억제하기 위한 필터 설계 방법에 대해서는 꾸준히 연구되었다. 케이블의 R, L, C를 고려하여 수백 미터의 장거리 케이블 모델을 설계 [2], 5m 전력 케이블의 R, L, C, G값을 고려한 케이블 모델 설계[3], 케이블의 과도 왜곡 주파수를 고려하여 케이블 모델 설계[4], FEA(Finite - Element Analysis)을 활용한 케이블 모델 설계[5] 등의 설계방법을 제시하였다. 그러나 R, L, 캐패시턴스와 선-접지 캐패시턴스를 고려한 수 km 케이블 모델링 설계에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그리고 공통모드 필터와 차동모드필터를 이용하여 노이즈 억제 방법[7], 인버터 출력필터의 설계 방법[8], 인버터 출력필터 및 모터 터미널 필터 설계[9] 등 전도노이즈의 억제 방법을 제시하였으나 심해저 플랜트에서 사용되는 2km이상의 장거리 케이블에서 발생하는 전도 노이즈 억제 필터에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

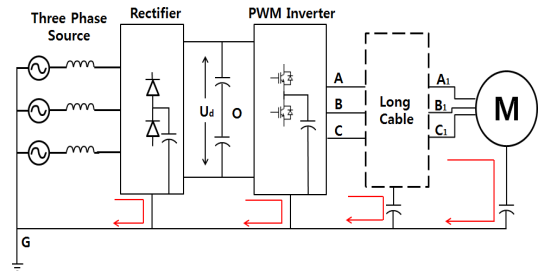
따라서 본 논문에서는 최근 심해저 플랜트의 전기 아키텍처를 가정한 VSD와 전동기를 구성하고 2km 전력 케이블과 필터를 설계하여 심해저 플랜트 모델의 가이드 라인을 제시하고자 하였다.

## 2. 심해저 동력 시스템 모델링

### 2.1 VSD와 전동기 모델

VSD와 전동기 모델은 PSIM(Power SIM)을 이용하여 모델링하였다. PSIM은 전력전자회로, 모터제어 그리고 제어시스템 설계용으로 개발된 시뮬레이션 소프트웨어이다. 회로 CAD, 시뮬레이션 솔버 및 파형 분석기로 구성되어있으며, 전력전자회로 해석을 위한 기본적인 라이브러리와 C 컴파일러/스크립트 에디터 등도 함께 제공되기 때문에 본 연구에 적합하다.

본 연구 대상인 심해저 동력 시스템 모델은 3상 입력 단과 LISN(Line Impedance Stabilization Network), 컨버터와 PWM(Pulse width modulation) 인버터, 그리고 케이블과 전동기로 구성된다. PWM 인버터는 6개의 IGBT(Insulated Gate Biolar Transistor) 모듈을 사용하여 구성하였으며, 전동기는 심해저에서 주로 사용하는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 모델을 이용하였다.



[Fig. 1] AC motor dirve system

## 2.2 전력 케이블 모델

### 2.2.1 과도 왜곡 주파수

심해저용 장거리 케이블은 전압-소스 PWM 인버터와 전동기를 연결하기 위해 사용하였을 때 케이블은 분포상 수회로로 작용한다. 케이블이 30 ~ 70Ω에서 특성 임피던스를 가지는 반면 인버터는 매우 작은 내부 임피던스에 의해 전압원으로 간주될 수 있다. 이런 이유로 임피던스 부정합은 인버터 터미널에서 발생한다. 게다가 임피던스 부정합은 전동기가 높은 임피던스를 보이기 때문에 모터 터미널에서 발생한다. 임피던스 부정합의 원인이 되는 반사현상은 모터 터미널에 과전압을 야기하며, 이 과전압은 케이블의 공진 주파수 때문에 특정 주파수에서 과도 왜곡 또는 진동 전압을 동반한다. 과도 왜곡 주파수는 케이블 길이와 케이블 내의 입사파와 반사파의 속력에 의해 결정된다. 과도 왜곡 주파수는 케이블 길이에 반비례하는 것으로 알려져 있다. 과도 왜곡 주파수  $f_{ringing}$  과  $l$ 의 관계는 식 (1)과 같다.[4]

$$f_{ringing} \cong \frac{3.0 \times 10^7}{l} \quad (1)$$

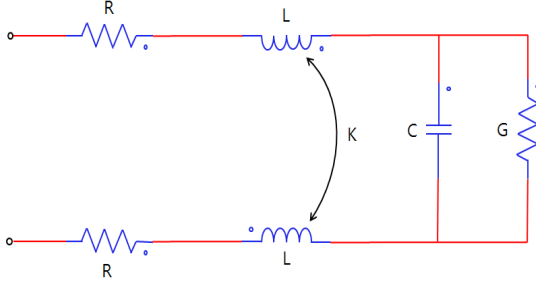
식 (1)을 통하여 100m 케이블과 2km 케이블의 과도 왜곡 주파수는 각각 300kHz, 15kHz로 구할 수 있다.

본 연구에서는 2km 케이블의 해석이 목적이지만 공간적인 제약으로 인하여 현실적으로 운영하기 어렵다. 그리고 2km 케이블을 20단계로 나누었을 때 1단계의 길이가 100m이기 때문에 100m 케이블 대상을 실험 및 검증을 실시한다. 그리고 검증된 모델을 통하여 케이블 2km 시스템에 대한 시뮬레이션을 실시한다.

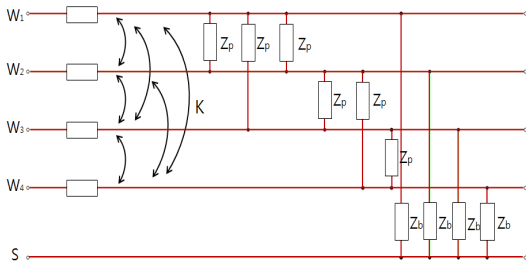
### 2.2.2 케이블 파라미터 측정

케이블의 구조는 대칭이며, 차폐는 이상적인 상태를 가정하였다. 일반적인 전송선로의 모델은 Fig. 2와 같이 구성된다.

4선 케이블 모델은 Fig. 3과 같이 구성된다. 직렬 임피던스  $Z_a$ 는 각 선마다 R과 L로 구성 되고, 병렬 임피던스  $Z_p$ 는 각 선사이마다 C와 G로 구성된다. 그리고 병렬 임피던스  $Z_b$ 는 선과 외부 하우징 사이마다 C와 G로 구성된다.



[Fig. 2] Transmission line model

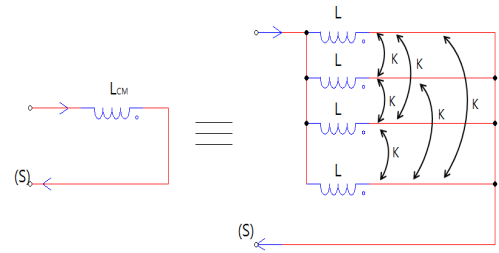


[Fig. 3] 4-wire cable model

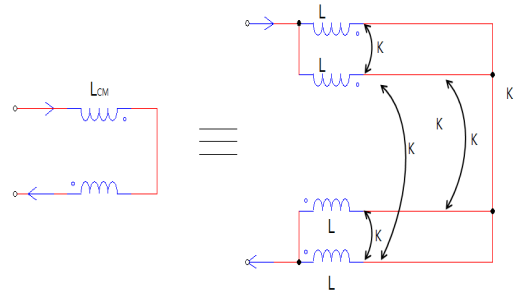
Fig. 3의 등가모델을 공통모드와 차동모드로 전력선을 구성한다. 공통모드 파라미터 값은 모든 선과 실드 사이를 LCR 미터로 측정하여  $R_{CM}$ ,  $L_{CM}$ ,  $C_{CM}$ ,  $G_{CM}$  값을 얻을 수 있고, 차동모드 파라미터 값은 연결한 각 2선 사이를 LCR 미터로 측정하여  $R_{DM}$ ,  $L_{DM}$ ,  $C_{DM}$ ,  $G_{DM}$  값을 얻을 수 있다. 공통모드와 차동모드에서 타당한 모델을 가지기 위해서는 4가지 인덕턴스 사이의 결합 계수 K를 구할 수 있어야 한다. 공통모드와 차동모드에서 측정된 인덕턴스는 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$L_{CM} = \frac{L}{4}(1 + 3K) \quad (2)$$

$$L_{DM} = L(1 - K) \quad (3)$$



[Fig. 4] Common mode inductance



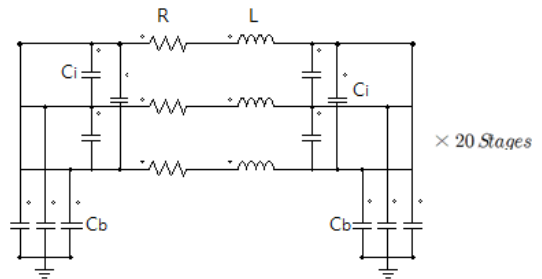
[Fig. 5] Differential mode inductance

식 (2)와 (3)을 연립하여 L값과 K값을 구할 수 있으며, 같은 방법으로 Table. 1과 같이 정리 할 수 있다.

[Table 1] Cable parameter formulas

Cable parameter	Conductor resistance	Capacity $C_b$ (Between line and ground )	Capacity $C_i$ (Between line and line)
formulas	$R = 4R_{CM}$	$C_b = \frac{C_{CM}}{4}$	$C_i = \frac{C_{DM} - C_b}{4}$

모델 파라미터의 값들 단위미터 당 값으로 나타내며, 100m, 2km 케이블은 20단계로 구성하여 각 단계의 R, L,  $C_b$ ,  $C_i$  값을 구하였다.[3]



[Fig. 6] Twenty-stage serial-connected three-phase circuit of power cable model

Fig. 1처럼 장거리 케이블에 대한 모터 공통모드 전압은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다

$$V_{CM} = \frac{V_{A1G} + V_{B1G} + V_{C1G}}{3} \quad (4)$$

$$= \frac{2(V_{A1O} + V_{B1O} + V_{C1O})}{3} + V_{OG}$$

모터 터미널 전압은 전압 반사에 의한 장거리 케이블 때문에 거의 2배가 된다.

$$V_{CM} = \frac{V_{A1O} + V_{B1O} + V_{C1O}}{3} + V_{OG} \quad (5)$$

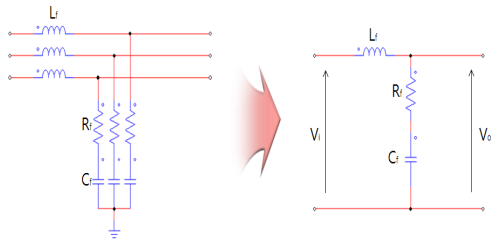
$$= \frac{2(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO})}{3} + V_{OG}$$

$$= 2V'_{CM} + V_{OG} = \begin{cases} \pm U_d + V_{OG} \\ \pm \frac{U_d}{3} + V_{OG} \end{cases}$$

공통모드 전압을 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4),(5)를 비교함으로써, 장거리 케이블에 대한 모터 터미널에서 공통모드 전압은 2배정도인 것으로 나타났다. 따라서 장거리 케이블을 사용할 때 공통모드 전압을 억제하는 것은 매우 중요하다.[7]

### 2.3 출력필터 파라미터 설계

전동기 케이블 길이가 10m이고, 모델링한 케이블로 과전압 20%이하가 되는 조건에서 스위칭 상승시간  $t_r$ 을 구하고 여기서 차단주파수  $f_c$ 를 계산한다.



[Fig. 7] circuit model of Output filter

우선 여기서 3dB 감쇠비를 갖는 차단주파수  $f_c$ 는 과전압 20%이하가 되는 조건에서 식 (6)과 같다.

$$f_c = \frac{1}{2t_r} \quad (6)$$

여기서,  $\frac{3 \cdot l_c \cdot \Gamma_L}{V \cdot t_r} \leq 0.2$  (과전압 20%이하)의 조

건에 만족하도록 상승 시간  $t_r$ 를 구하고 이때  $\Gamma_L$ 는 부하 반송비로 20HP이하의 전동기에서는 보통 0.9로 놓는다.  $l_c$ 는 터미널 케이블의 길이,  $t_r$  펄스 상승시간을 나타낸다. 또한  $V$ 는 펄스 속도( $V = \frac{1}{\sqrt{C_f L}}$ )이다.

$$t_r \approx \frac{3 \times 100(m) \times 0.9}{V \cdot 0.2} \quad (7)$$

$$\approx \frac{3 \times 100(m) \times 0.9}{160 \cdot 0.2} = 8.44\mu s$$

이러한 펄스 상승 제한 속도  $t_r$ 에 의한 필터의 차단 주파수를 구하면

$$f_c = 59.24KHz (\because f_c = \frac{1}{2t_r}) \quad (8)$$

식 (8)과 같으며,  $R_f$ 는 케이블의 라인 임피던스이다. 그리고 필터의 전달함수는 식 (9)와 같다.

$$H = \frac{1 + jwR_fC_f}{1 - w^2L_fC_f + jwR_fC_f} \quad (9)$$

여기서 위의 전달함수에서의 감쇠비 A는 식 (10) 과 같으며

$$A = 20 \log \left| \frac{1}{H} \right| \quad (10)$$

$$= 20 \log \left| \frac{1 - w^2L_fC_f + jwR_fC_f}{1 + jwR_fC_f} \right|$$

$$R_f \geq \sqrt{\frac{4L_f}{C_f}} \quad (R_f \approx 2\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \approx \sqrt{\frac{4L_f}{C_f}}) \quad (11)$$

식 (9), (10), (11)에서 필터 파라미터를 구할 수 있다. 식 (10)에서 3dB 감쇠비를 갖는 차단주파수  $f_c$ 를 구하고 이를 조건식 (9), (10), (11)에 대입하여 필터 파라미터를 구하면 다음과 같다.

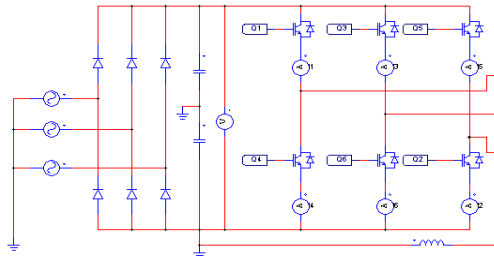
$$\left| \frac{1 + jwRC}{1 - w^2LC + jwRC} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} (\approx 0.707) \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)에서 출력필터 파라미터 값을 구할 수 있다.[6]

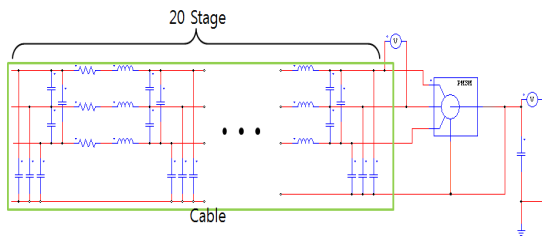
### 3. 시뮬레이션 및 FFT분석

#### 3.1 시뮬레이션

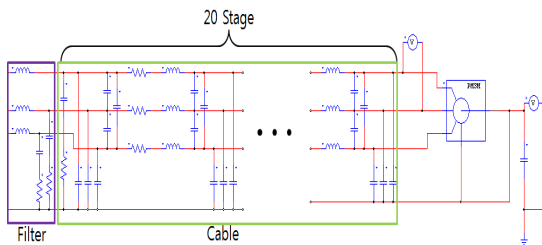
Fig. 8, 9, 10은 전력전자 시뮬레이션 툴인 PSIM을 사용하여 100m, 2km케이블과 출력필터의 모델링을 포함한 PWM 인버터 시스템 시뮬레이션 회로도이다. 전체 시스템은 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 모듈을 사용한 인버터, DC LINK, 정류기를 포함한 VSD 모델과 3상 입력단, 출력필터, 전동기로 구성되며, 시간은 100 $\mu$ s/div이다.



[Fig. 8] The simulation schematic of the inverter model and 3 phase power supply.



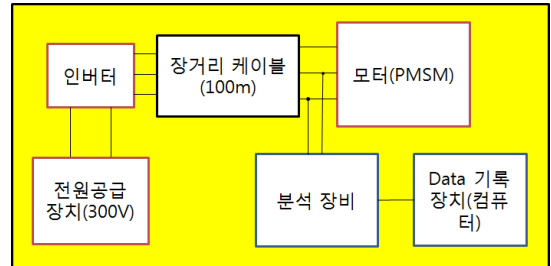
[Fig. 9] The simulation schematic of the PWM inverter system without filter



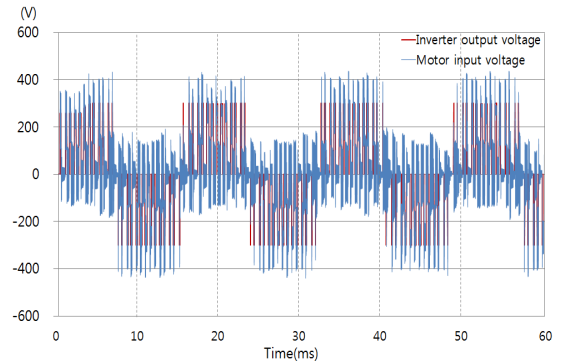
[Fig. 10] The simulation schematic of the PWM inverter system with filter.

#### 3.1.1 케이블 모델(100m) 분석 및 검증

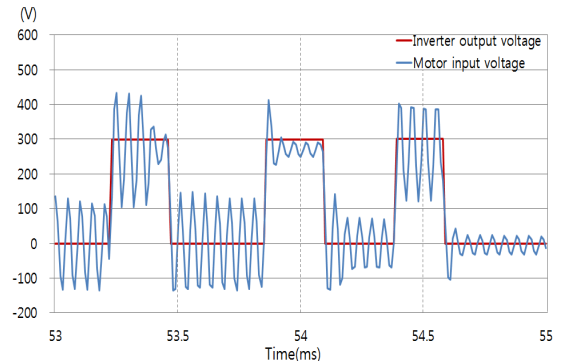
앞서 설계한 100m 케이블을 이용하여 PWM 인버터 시스템을 구성하였다. 인가전원은 300V이며, 인버터 출력 터미널에서 발생한 PWM 신호가 케이블을 통과하여 모터로 인가되게 된다.



[Fig. 11] The block diagram of experiments.



(a) Time 0ms to 60ms



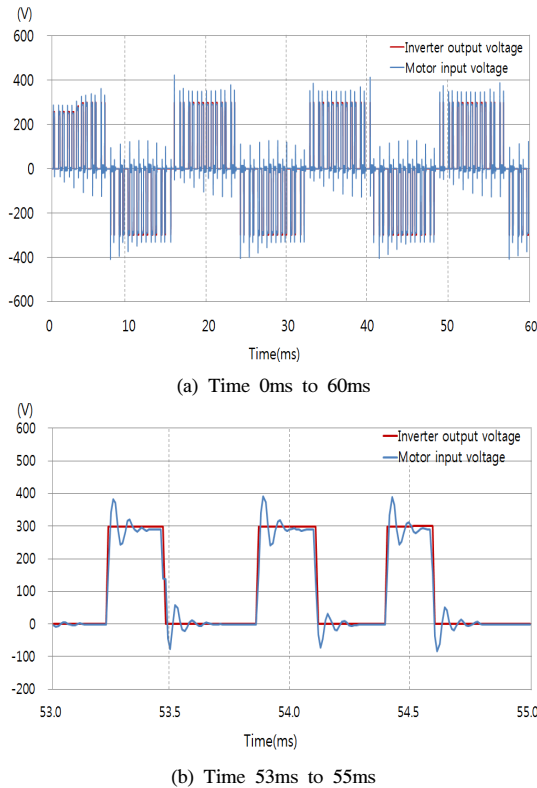
(b) Time 53ms to 55ms

[Fig. 12] The simulation results of 100m cable model system without filter.

Fig. 12는 케이블 100m 모델이며, 선간 전압 파형에서 인버터 출력 터미널의 전압이 -300 ~ 300V 인 것에 비해 전동기 입력 터미널의 전압은 -442 ~ 462V인 것을 알 수

있다. 인버터의 IGBT 소자가 스위칭 할 때, 전도 노이즈가 케이블의 R, L, C 성분에 의해 증가하여 약 54%의 과전압이 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 필터를 적용한 케이블 100m 모델이며, 인버터 출력전압은 -300 ~ 300V이고, 전동기 입력 전압은 -401 ~ 412V인 것을 알 수 있다. 이것은 인버터 출력전압에 비해 모터 입력전압의 전압이 약 37% 상승한 것이다. 케이블 100m 모델은 필터를 설치한 모델이 없는 모델보다 50V 감소하였고, 이는 출력필터가 인버터 전압 상승시간을 증가시킴으로써 전동기 입력 전압을 제한하기 때문으로 보인다.

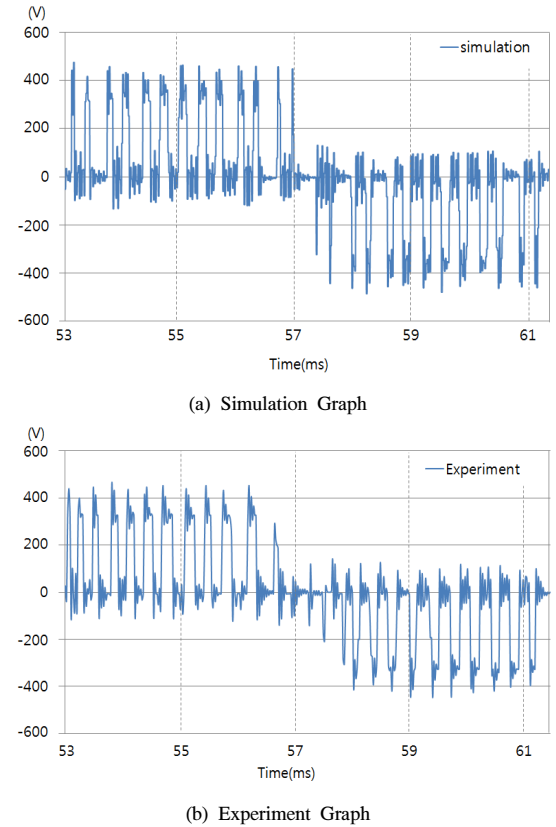


[Fig. 13] The simulation results of 100m cable model system with filter.

Fig. 14은 실험한 케이블 100m 모델과 시뮬레이션 한 케이블 100m 모델을 비교한 것이다. 케이블 100m 모델의 실험의 3상 PWM 인버터는 IGBT를 이용하였으며, 시간은 250μs/div이다. 시뮬레이션의 순간 전압 측정값 역시 실험값과 동일하게 IGBT를 이용하여 3상 PWM 신호를 만들었으며, 시간을 250μs/div로 조정하였다. 실험값과 시뮬레이션 값을 비교한 결과 서로 유사한 것을 알 수

있었다. 또한 식 (5)의 최대값은 450V이므로 실험값의 최대값과 유사함을 알 수 있다.

이를 통해 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하였고, 2km 케이블을 모델링하기 위한 기반 검증을 확보하였다.



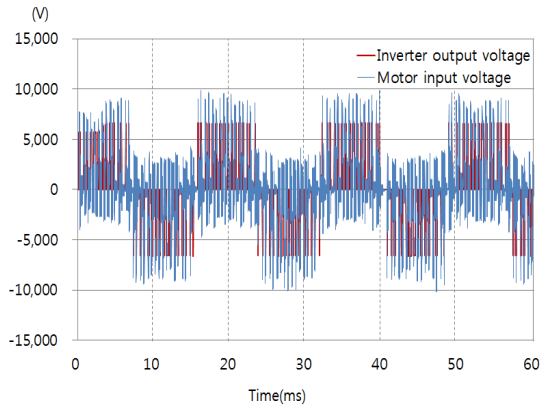
[Fig. 14] The compare of real 100m cable model and simulation model

### 3.1.2 케이블 모델(2km) 분석

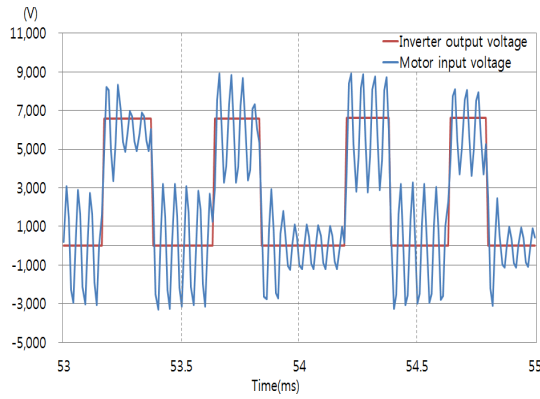
케이블 2km 모델은 Fig. 8과 같이 모델을 구성하였으며, Table. 1의 식을 통해 얻은 2km 케이블의 파라미터 값을 입력하였다. 인가전원은 심해저용 전동기와 같은 6.6kV를 인가하였으며, 인버터 출력 터미널에서 발생하는 PWM 신호가 케이블을 통과하여 전동기로 입력 되도록 구성하였다.

Fig. 15는 케이블 2km 모델이며, 인버터 출력 터미널의 순간 전압은 -6.6 ~ 6.6kV고, 모터 입력 터미널의 순간 전압은 -11.025 ~ 11.077kV인 것을 알 수 있다. 인버터의 순간 전압변화로 인한 노이즈가 케이블의 R, L, C 성분에 의해 증가하여 약 67.8%의 과전압을 발생한 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 식 (5)에 대입한 최대값

은 9.9kV이므로 시뮬레이션의 최대값과 유사함을 알 수 있다.

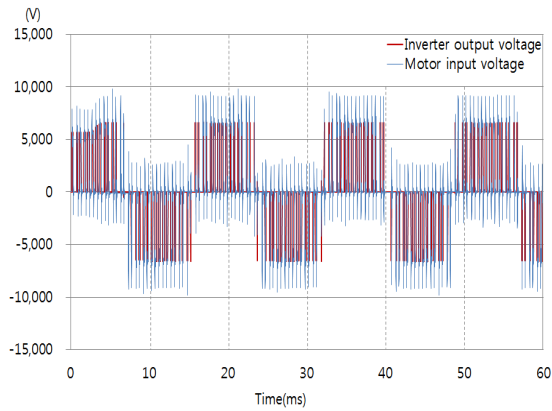


(a) Time 0ms to 60ms

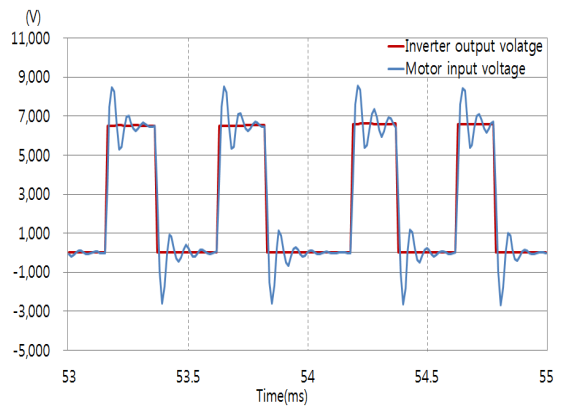


(b) Time 53ms to 55ms

[Fig. 15] The simulation results of 2km cable model system without filter.

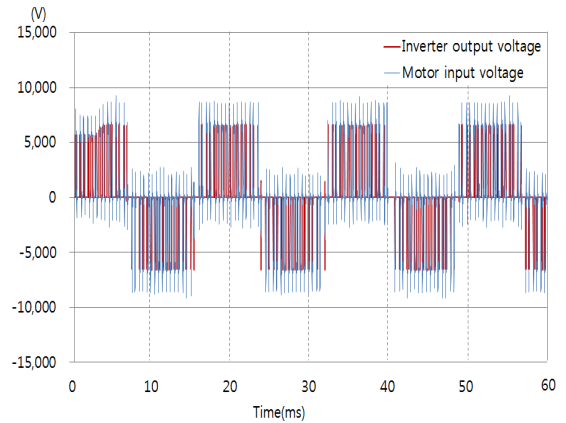


(a) Time 0ms to 60ms

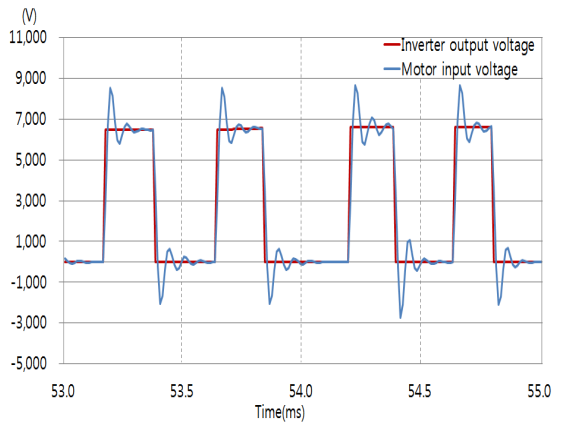


(b) Time 53ms to 55ms

[Fig. 16] The simulation results of 2km cable model system with low pass filter.



(a) Time 0ms to 60ms



(b) Time 53ms to 55ms

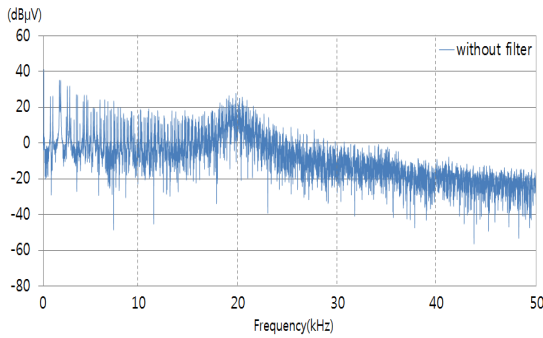
[Fig. 17] The simulation results of 2km cable model system with output filter.



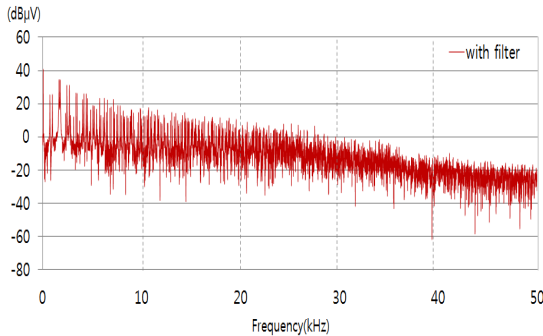
Fig. 16은 일반적인 저역 통과 필터인 RC 필터를 적용한 케이블 2km 모델이다. 인버터 출력 터미널의 선간 전압은  $-6.6 \sim 6.6\text{kV}$ 고, 모터 입력 터미널의 선간 전압은  $-9.835 \sim 9.932\text{kV}$ 다. 인버터의 전도 노이즈가 케이블에 의해 증가하여 약 50.5%의 과전압을 발생한 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 케이블 2km 모델에서 필터를 설치한 모델이 설치하지 않은 모델 보다 1.145kV 감소하였다.

Fig. 17은 출력필터를 적용한 케이블 2km 모델이다. 인버터 출력 터미널의 선간 전압은  $-6.6 \sim 6.6\text{kV}$ 고, 모터 입력 터미널의 선간 전압은  $-9.164 \sim 9.283\text{kV}$ 다. 인버터의 전도 노이즈가 케이블에 의해 증가하여 약 40.7%의 과전압을 발생한 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 케이블 2km 모델에서 필터를 설치한 모델이 설치하지 않은 모델 보다 1.794kV 감소하였고, RC 필터를 설치한 모델 보다 649V 감소하였다. 이는 필터가 인버터 전압 상승시간을 증가시킴으로써 모터 입력 전압을 제한하기 때문이며, 이를 통해 출력필터가 2km의 장거리 케이블에서도 유사하게 동작하는 것으로 판단된다.

### 3.2 FFT분석

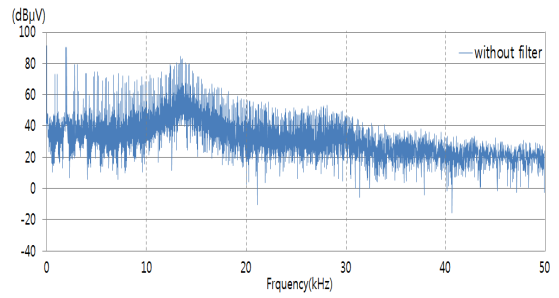


(a) Without filter

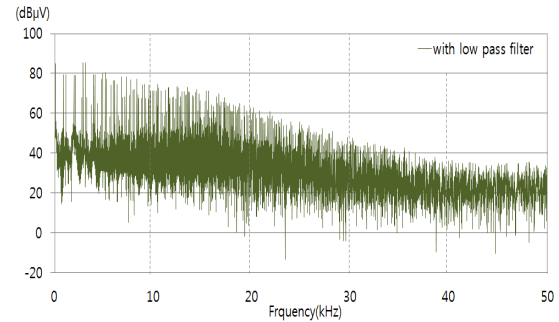


(b) With output filter

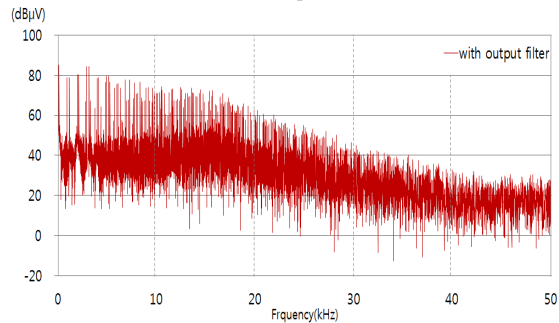
[Fig. 18] The FFT analysis results of 100m cable model system.



(a) Without filter



(b) With low pass filter



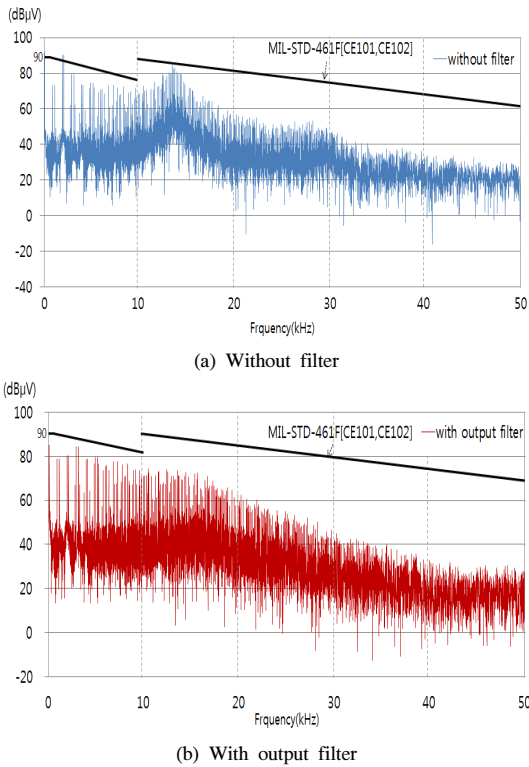
(c) With output filter

[Fig. 19] The FFT analysis results of 2km cable model system.

Fig. 18과 Fig. 19는 케이블 시스템의 FFT를 분석한 그래프이다. 주파수 범위는 2Hz ~ 50kHz이며 필터가 없는 시스템과 필터가 있는 시스템을 비교하였다.

Fig. 18은 케이블 100m 시스템의 FFT결과이다. 필터를 갖지 않은 경우의 FFT 결과는 2Hz에서 약  $40[\text{dB}\mu\text{V}]$ 의 크기를 가지며 50kHz대에서는 약  $-18[\text{dB}\mu\text{V}]$ 의 크기를 가짐을 볼 수 있다. 그리고 출력필터를 갖은 경우의 FFT 결과는 2Hz ~ 50 kHz대에서 전도 노이즈 크기를  $38[\text{dB}\mu\text{V}]$  이하로 억제하고 있다. 그리고 20kHz대에서 필터를 갖지 않은 경우에 약  $30[\text{dB}\mu\text{V}]$ 대의 크기를 가지지만 필터를 갖은 경우 약  $10[\text{dB}\mu\text{V}]$ 대의 크기를 가지고 있다.





[Fig. 20] Limits of MIL-STD-461F/CE101, CE102]

Fig. 19는 2km 케이블 시스템의 FFT 결과이다. 필터를 갖지 않은 경우(a)의 FFT 결과는 2Hz에서 약 91 [dBμV]의 크기를 가지며 50kHz대에서는 약 20 [dBμV]의 크기를 가짐을 알 수 있다. 그리고 13kHz대에서 약 90 [dBμV]의 크기를 가진다.

RC 필터를 갖는 경우(b)의 FFT 결과는 2Hz ~ 50kHz 대에서 전도 노이즈 크기를 85 [dBμV] 이하로 억제하고 있고, 40kHz대 이상에서 약 37 [dBμV] 이하의 크기를 가지며 억제됨을 알 수 있다. 출력필터를 갖은 경우(c)의 FFT 결과도 2Hz ~ 50kHz 대에서 전도 노이즈 크기를 85 [dBμV] 이하로 억제하고 있다. 특히 40kHz대 이상에서 약 30 [dBμV] 이하의 크기를 가지며 억제됨을 알 수 있다. 필터가 진행파로 인한 전압증가에 반하여 모터 터미널을 보호하기 때문에 전체적인 노이즈가 감소하였으며, 출력필터가 40kHz이상에서 더 낮은 주파수를 가지므로 RC 필터에 비해 더 효율적임을 알 수 있다. 또한 이 결과를 통해 2km 케이블 시스템에서도 출력필터에 의해 전도 노이즈가 감쇠되었음을 나타낸다.

Fig. 20은 MIL-STD-461F CE701,CE102 규제 제한치인 30Hz~10MHz대까지의 전도노이즈 크기를 85 [dBμV]

이하로 만족함을 볼 수 있다. MIL-STD -461F은 미국 국방부가 제정한 군용규격이며, 잠수함에서 전송선의 30Hz~10MHz대까지 전도 노이즈 규격이 CE101, CE102이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 심해저 플랜트에서 많이 사용되는 펌프의 모터를 가정하여 2km 케이블과 PWM 인버터에 의한 전동기 구동 시 발생하는 전도 노이즈 감쇠용 출력필터에 대한 모델을 제안하였다. 2km 케이블을 현실적으로 운영하기 어렵기 때문에 100m 케이블을 대상으로 케이블 모델의 실험 및 검증은 실시하였고, 검증된 모델을 바탕으로 2km 케이블의 시뮬레이션 분석을 실시하였다.

케이블 2km 시스템의 분석 결과, 필터가 없는 경우에는 선간 전압 파형의 과전압이 67.8%로 상당히 높게 나타나며 전도 노이즈의 크기가 약 91 [dBμV] 이하로 크게 발생하는 것을 확인하였다. RC 필터와 출력필터를 갖는 경우 모터 터미널의 과전압을 40.7%까지 저감이 가능하였고, 전도 노이즈 또한 85 [dBμV]이하의 값으로 MIL-STD-461F를 만족하였다. 그리고 출력필터의 전도 노이즈는 40kHz이상에서 RC 필터보다 더 낮게 억제하였다. 이를 통해 필터를 갖는 경우에는 스위칭에 따른 선간 전압 파형에서 과도 왜곡 주파수에 의한 과전압은 필터가 없는 경우보다 크게 감쇠되었고, 출력필터가 RC 필터보다 장거리 케이블에 적합함을 확인하였다.

본 연구에서는 심해저 플랜트 환경을 고려한 장거리 케이블 모델과 전도노이즈 저감에 적합한 필터의 정량적 설계 가이드라인을 제시할 수 있었다.

#### References

- [1] Thibaut E., Meyer E., Bibet P.-J., "Use of liquid filled motor for subsea pump applications", IEEE PCIC Europe 2010 Conference Record, pp.1-8, June 2010.
- [2] A.K. abdel salam, M.I. Masoud, S.J. Finney, B.W. Williams, "Vector control PWM-VSI induction motor drive with a long motor feeder: performance analysis of line filter networks", IEEE IET Electr. Power Appl., Vol. 5, Iss. 5, pp.443-456, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa.2010.0040>
- [3] Y.Weens, N.Idir, J.J.Franchaud, R.Bausiere, "High Frequency model of a shielded 4-wire energy cable",

IEEE Power Electronics and Applications, pp.1-p.10, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EPE.2005.219644>

- [4] fumi Akagi, Itaru Matsumura, "Overvoltage Mitigation of Inverter-Driven Motors With Long Cables of Different Lengths", IEEE ECCE pp.862-869, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2010.5617903>
- [5] Gary Skibinski, Rangarajan Tallanm, Robert Reese, Brian Buchholz and Richard Lukaszewski, "Commen Mode and Differential Mode Analysis of Three Phase cables for PWM AC Drives", IEEE **Systems and Control in Aerospace and Astronautics**, pp.880-888, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2006.256629>
- [6] Lee-Hun Kim, Hwan-Kyun Yun, Chung-Yuen Won, Young-Real Kim, Gi-Su Choi, "Output filter design for conducted EMI reduction of PWM Inverter - fed Induction Motor System", IEEE **Power Electronics and Drive Systems**, vol. 1, pp. 252 - 258, 2001.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PEDS.2001.975321>
- [7] Abdolreza Esmaeli, Baojun Jiang, Li Sun, "Modeling and Suppression of PWM Inverter's Adverse Effects", IEEE **Systems and Control in Aerospace and Astronautics**, pp.1450-1454, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISSCAA.2006.1627510>
- [8] Department of defense interface standard, "MIL-STD-461-F", 2007.

**김 병 우**(Byeong-woo Kim)

[정회원]



- 1987년 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1990sus 2월 : 한양대학교 정밀 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과(공학박사)
- 1989년 4월 : 일본 KOSAKA연구소 초빙연구원
- 1994년 1월 ~ 2006년 2월 : 자동차부품연구원 전장기술연구센터장
- 2006년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수

<관심분야>

조선IT융합, subsea 전장 기술, subsea 제어기술

**권 혁 준**(hyeok-joon Kwon)

[정회원]



- 2012년 2월 : 울산대학교 전기공학부. (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과. (공학석사)

<관심분야>

전자제어