



Received: 2019/05/15  
Revised: 2019/06/27  
Accepted: 2019/07/17  
Published: 2019/08/28

**\*Corresponding Author:**

**Gyu-Hong Kang**

Ulsan Headquarters, Korea Marine Equipment  
Research Institute, Ulsan, Republic of Korea

Tel: +82-52-280-9901

Fax: +82-52-280-9992

E-mail: kang@komeri.re.kr

# 케이블 사양에 따른 6.6kV 멀티 레벨 인버터의 출력 특성 분석

## Analysis of Output Characteristics of 6.6 kV Multi-Level Inverter According to Cable Specification

김성안, 홍경표, 이선권, 강규홍\*

(재)한국조선해양기자재연구원

Sung-An Kim, Kyung-Pyo Hong, Sun-Kwon Lee, Gyu-Hong Kang\*

Korean Marine Equipment Research Institute

**Abstract**

본 논문에서는 케이블 사양에 따른 6.6kV 멀티 레벨 인버터의 출력 특성을 분석하였다. PWM 인버터로 구동하는 유도전동기에서 발생하는 과전압 원인을 기술하였다. 인버터의 레벨에 따른 출력 특성 분석을 위해서 2레벨, 7레벨, 21레벨 인버터의 모델을 PSIM을 이용하여 구현하였다. 결과적으로 케이블의 적합한 선정을 위해 케이블 길이에 따른 선간전압과 상전류의 고조파 왜곡과 속도 및 토크의 리플률에 대한 시뮬레이션 결과를 도출하고 비교 분석하였다.

This paper analyzed output characteristics of a 6.6kV multi level inverter according to cable specifications. The cause of over voltage in induction motor driven by PWM inverter was presented. Models of the 2 level, 7 level and 21 level inverter were implemented to analyze the output characteristic of the inverter according to level using PSIM. As a result, simulation results of harmonic distortion of line voltage and phase current, ripple ratio of speed and torque according to cable length were derived and compared for proper selection of cable.

**Keywords**

Multi Level Inverter(멀티 레벨 인버터),  
Pulse Width Modulation(펄스 폭 변조),  
Over Voltage(과전압),  
Induction Motor(유도 전동기)

**Acknowledgement**

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 10106640).

### 1. 서론

최근 선박은 환경규제로 인해 전기 추진 체계에 적용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며 특히 선박의 에너지 효율을 높이는 대안으로 고전압 DC 배전 시스템 적용에 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 추진기의 전동기나 선박용 공기압축기 내 유도 전동기의 구동을 위해서는 고압 인버터가 요구되며 가변 속도 구동(VSD)을 위해서는 PWM 인버터가 사용되어야 한다. 전력용 반도체의 발달로 인해 고속 스위칭이 가능해짐에 따라 유도전동기의 고효율 운전 및 원활한 속도제어가 가능해졌다. 그러나 상용주파수 전압과 같은 저주파 운전과 달리 인버터 구동시에는 기존의 저주파 구동이 아닌 PWM 방식을 이용하여 운전 주파수의 30배(2kHz)~250배(15kHz)에 해당하는 펄스파 전압이 인가되어 유도 전동기에 발생하는 과전압 현상은 입력전압의 펄스 전압의 상승/하강 시간, 케이블과 전동기 연결에서의 임피던스 미스매칭 및 케이블 사양의 영향으로 인해 발생한다. 과전압 발생은 유도 전동기의 운전동안 지속적으로 발생하여 전동기 내부 절연에 스트레스를 주게 된다. 인버터와 전동기의 임피던스 미스매칭의 경우 고유 값으로 개선하기는 현실적으로 불가능하므로 케이블의 적합한 사양 선정으로 최소화해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 적합한 케이블 사양 선정을 위한 레벨별 인버터 모델을 구현하고 케이블 길이에 따른 인버터와 유도 전동기간의 출력 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 과전압의 발생원인

PWM 인버터의 고속 스위칭에 의해 발생하는 과전압은 진행파(Travelling Wave)로 케이블을 통해 유도전동기의 입력단자로 전달된다. PWM 인버터의 출력단과 케이블, 케이블과 유도 전동기의 입력단 사이에는 임피던스 불연속점이 존재하여 PWM 인버터의 출력 전압이 전동기 입력단에 인가되면 임피던스 불연속점에서 임피던스 미스매칭에 의한 전압의 반사가 발생한다.

케이블은 누설 인덕턴스와 커플링 커패시턴스를 가지므로 케이블과 전동기의 임피던스 미스매칭 연결은 전동기 단자에서 댄핑된 고주파수 링잉을 결정하므로 케이블 길이에 따라 진폭이 다른 과전압이 발생하며 공진 주파수가 존재하게 된다. 이 공진 주파수는 케이블 길이에 따라 달라지며 상승시간과 케이블 길이의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t_r/l_c > 12.5 \text{ ns/m} &\implies V_p < 2V_m \\ t_r/l_c \leq 12.5 \text{ ns/m} &\implies V_p \approx 2V_m \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $t_r$ 은 상승시간,  $l_c$ 는 케이블 길이,  $V_p$ 는 피크전압,  $V_m$ 은 DC 링크 전압을 나타낸다. 공진 주파수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f = \frac{v}{4l_c} = \frac{40}{l_c} \tag{2}$$

여기서  $v$ 는 파 전파 속도,  $V_p/V_m$ 은 과전압 비율을 나타낸다. 임피던스 미스매칭으로 인해 전압의 반사가 발생하며 이 반사 전압은 케이블의 길이가 길 경우 케이블 및 전동기 고정자 권선에 전압분포의 불평형을 유발하고 특히 전동기 입력단자에서의 입사전압과 반사전압의 중첩은 전동기 권선의 손상을 발생시킨다. 인버터, 케이블 및 전동기를 임피던스로 나타내면 Fig. 1과 같다.

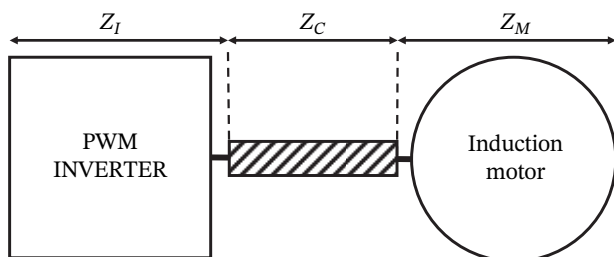


Fig. 1. Impedance of inverter, cable and motor

전동기의 입력단자에서의 반사전압과 투과전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} E_i \\ E_t &= \frac{2Z_M}{Z_M + Z_C} E_i \end{aligned} \tag{3}$$

여기서  $Z_m$ 은 전동기의 특성 임피던스,  $Z_c$ 는 케이블의 특성임피던스,  $E_i$ 는 인버터의 출력전압을 나타낸다. 전동기 입력단의 전압반사계수  $\beta_r$ 과 전압투과계수  $\beta_t$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta_r &= \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} \\ \beta_t &= \frac{2Z_M}{Z_M + Z_C} \end{aligned} \tag{4}$$

일반적으로 전력 케이블의 특성 임피던스는 50~200Ω, 전동기의 특성 임피던스는 수~수 십 kΩ, 인버터의 출력단자의 임피던스는 케이블이나 전동기에 비해 특히 작으므로 관계를 가지며 전동기의 특성 임피던스는 케이블보다 매우 크므로 반사계수가  $\beta_r \approx 1$ 이며 투과계수는  $\beta_t \approx 2$ 가 되어 전동기 입력단자의 접속점에서 투과 전압이  $2E_i$ 가 되어 전동기의 절연에 영향을 미치게 된다.

## 3. 멀티 인버터의 모델 구현

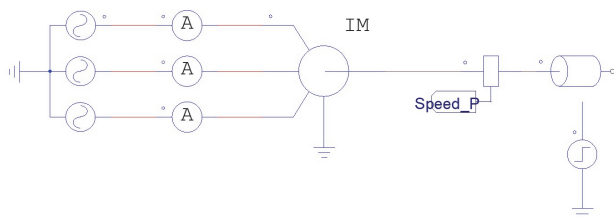
Table 1은 1050kW, 6.6kV 유도 전동기와 고압 인버터의 사양을 나타낸다. Table 2는 전동기, 인버터, 케이블의 파라미터를 나타낸다. Fig. 2는 이상적인 상용전원을 이용한 시뮬레이션 회로를 나타낸다.

Table 1. Specifications of motor and inverter

	Item	Value
Motor	Input voltage	6600 V
	Rated power	1050 kW
	No. of poles	2
Inverter	Input voltage	3상 6600 V
	Rated power	1500 KVA (132 A)
	Control method	V/F control
	Output frequency	0~120 Hz

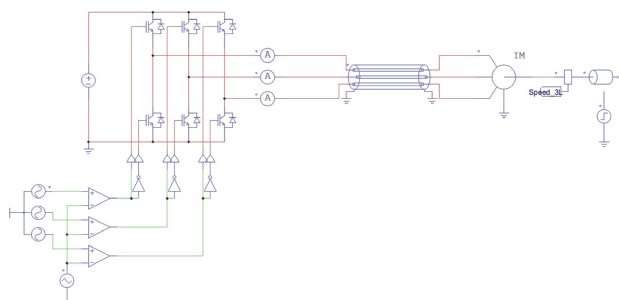
**Table 2.** Parameters of motor, inverter and cable

	Item	Value
Motor	Resistance of stator	0.1611 Ω
	Leakage inductance of stator	1.53 mH
	Resistance of rotor	0.1181 Ω
	Leakage inductance of rotor	10.61 mH
	Magnetizing inductance	267.47 mH
Inverter	Moment of inertia	78.5 kg·m <sup>2</sup>
	Control method	V/F control
	Switching frequency	2.5 kHz
	Output frequency	60 Hz
	Output voltage	6560 V (6600 V × 0.994)
Cable	PWM method	SPWM
	Operating frequency	50 Hz
	Resistance Rd	0.496 Ω/km
	Reactance Xd	0.104 Ω/km
	Capacitance Cd	0.311 uF/km
	Resistance Ro	1.48 Ω/km
	Reactance Xo	0.0454 Ω/km
Capacitance Co	0.1555 uF/km	

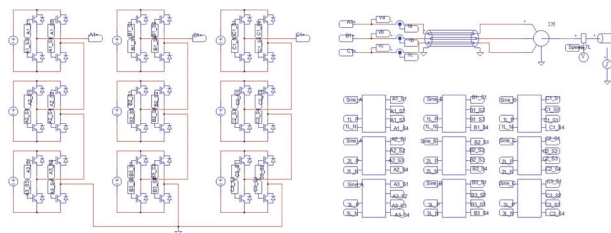


**Fig. 2.** Ideal simulation circuit

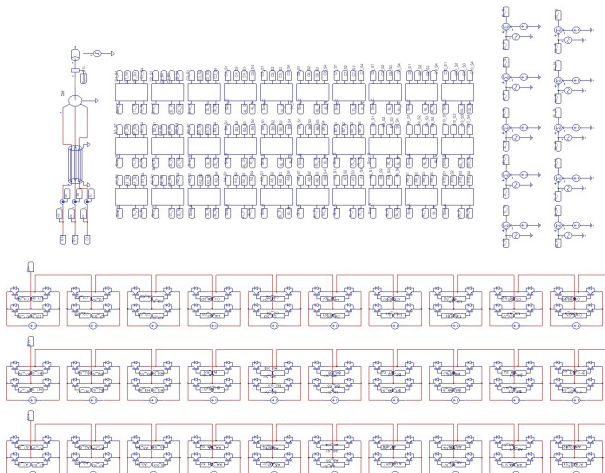
Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5는 PSIM을 이용한 케이블 파라미터를 고려한 2 레벨, 7 레벨 및 21 레벨 인버터의 시뮬레이션 회로를 나타낸다. 케이블 길이를 변경하면 파라미터가 변동 되도록 모델링을 구성하였다.



**Fig. 3.** Simulation circuit of 2 level inverter



**Fig. 4.** Simulation circuit of 7 level inverter

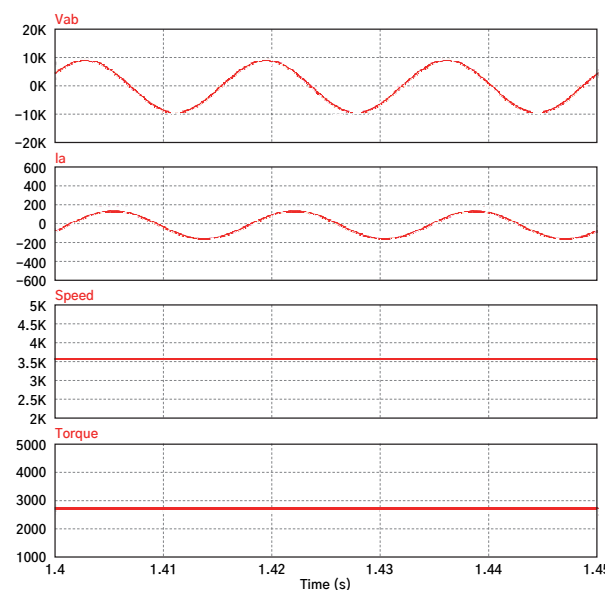


**Fig. 5.** Simulation circuit of 21 level inverter

## 4. 시뮬레이션 결과

### 4.1. 이상적인 전원 공급에서의 특성 분석

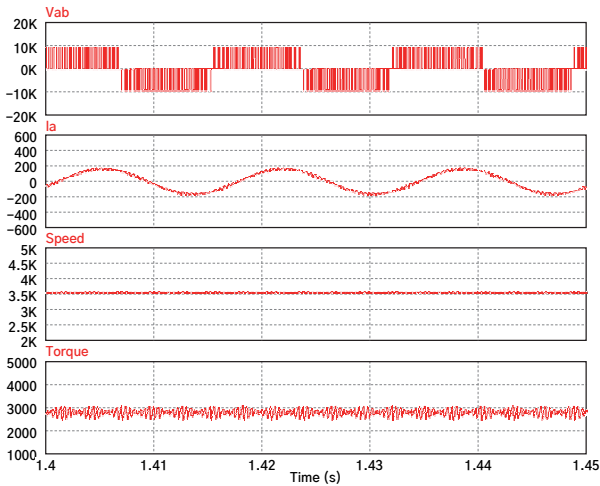
Fig. 6은 이상적인 전원공급에서의 특성으로 선간전압의 피크값은 9277.8V이며 상전류, 속도, 토크에 리플이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.



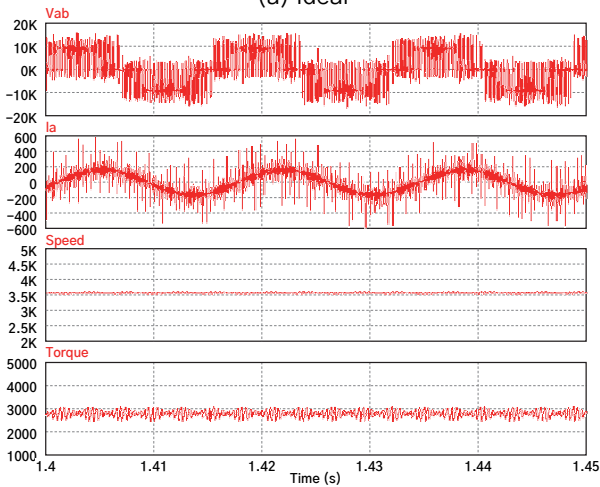
**Fig. 6.** Characteristics of ideal condition

4.2. 2 레벨 인버터에서의 특성 분석

Fig. 7와 Table 3은 이상적인 경우와 케이블 길이에 따른 2 레벨 인버터의 특성으로 케이블 길이가 30m 이상에서 선간 전압과 상전류의 THD의 증가폭이 커지며 속도 및 토크의 리플율은 큰 변화가 없음을 확인하였다.



(a) Ideal



(b) 100 m

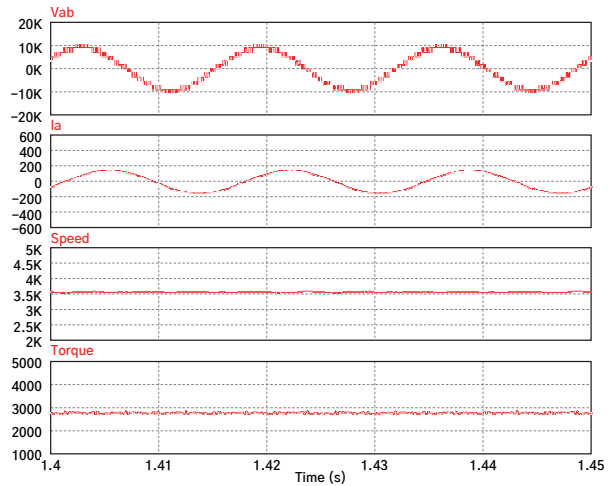
Fig. 7. Characteristics of 2 level inverter

Table 3. Characteristic comparison of 2 level inverter according to cable length

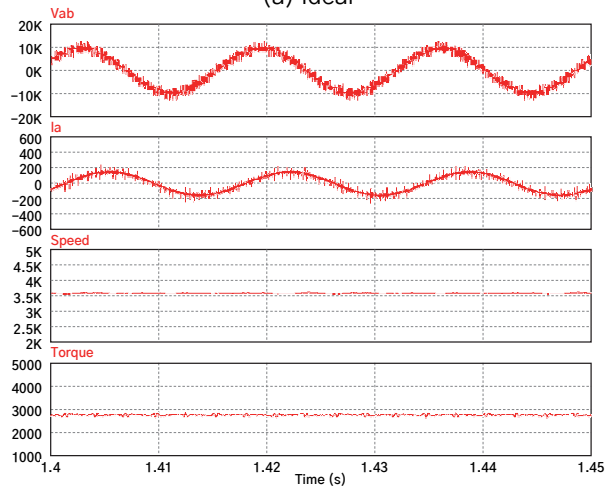
L (m)	$V_{ll}$ THD (%)	$I_a$ THD (%)	$n$ ripple (%)	$T$ ripple (%)
0	69.27	7.01	1.21	23.78
5	69.27	7.06	1.31	23.85
10	69.27	7.47	1.64	24.21
25	69.30	9.90	1.32	23.80
30	69.40	10.91	1.52	24.05
50	70.40	15.48	1.46	24.00
70	72.63	20.90	1.75	24.46
100	76.47	27.87	1.56	24.33

4.3. 7 레벨 인버터에서의 특성 분석

Fig. 8과 Table 4는 이상적인 경우와 케이블 길이에 따른 7 레벨 인버터의 특성으로 케이블 길이가 30m 이상에서 THD의 증가폭이 커지만 2 레벨 인버터에 비해 증가폭이 작으며 속도 및 토크는 큰 변화가 없음을 확인하였다.



(a) Ideal



(b) 100 m

Fig. 8. Characteristics of 7 level inverter

Table 4. Characteristic comparison of 7 level inverter according to cable length

L (m)	$V_{ll}$ THD (%)	$I_a$ THD (%)	$n$ ripple (%)	$T$ ripple (%)
0	10.80	1.47	1.60	6.70
5	10.80	1.49	1.59	6.67
10	10.79	1.58	1.58	6.67
25	10.79	2.14	1.59	6.67
30	10.81	2.40	1.59	6.69
50	11.20	3.81	1.56	6.64
70	12.06	5.64	1.58	6.66
100	13.90	7.89	1.60	6.69

4.4. 21 레벨 인버터에서의 특성 분석

Fig. 9와 Table 5는 이상적인 경우와 케이블 길이에 따른 21 레벨 인버터의 특성으로 케이블 길이가 50m 이상에서 THD의 증가폭이 커지만 7 레벨 인버터에 비해 증가폭이 작으며 속도 및 토크는 큰 변화가 없음을 확인하였다.

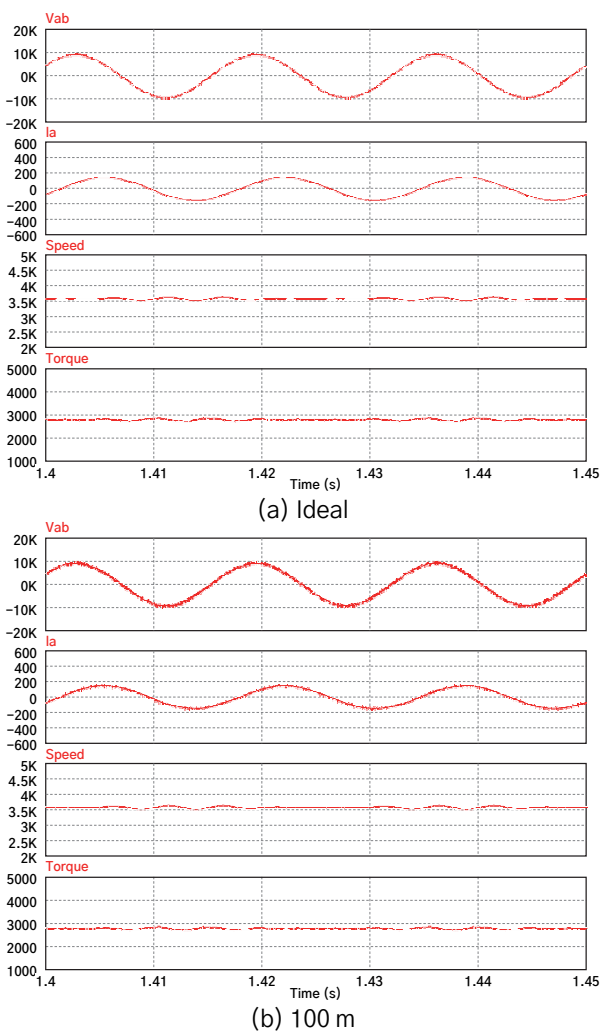


Fig. 9. Characteristics of 21 level inverter

Table 5. Characteristic comparison of 21 level inverter according to cable length

L (m)	$V_L$ THD (%)	$I_a$ THD (%)	$n$ ripple (%)	$T$ ripple (%)
0	10.80	1.84	3.84	5.97
5	10.80	1.84	3.85	5.98
10	10.79	1.85	3.85	5.98
25	10.79	1.91	3.85	5.99
30	10.81	1.94	3.85	6.00
50	11.20	2.16	3.86	6.02
70	12.06	2.54	3.86	6.03
100	13.90	3.21	3.88	6.08

5. 특성 비교 분석

Fig. 10은 인버터 레벨별 특성 분석 비교결과를 나타낸다. 선간전압의 피크값은 2 레벨 인버터의 증가폭이 가장 크며 21 레벨 인버터는 레벨 수의 증가로 인해  $dv/dt$ 의 값이 작아져서 케이블 길이에 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다. 선간전압과 상전류의 THD의 경우도 21 레벨 인버터의 증가폭이 가장 작으며 속도 리플율은 2 레벨 인버터가 가장 작고 토크 리플율은 21 레벨 인버터가 가장 작으며 케이블 길이에 따른 영향이 없음을 확인할 수 있다.

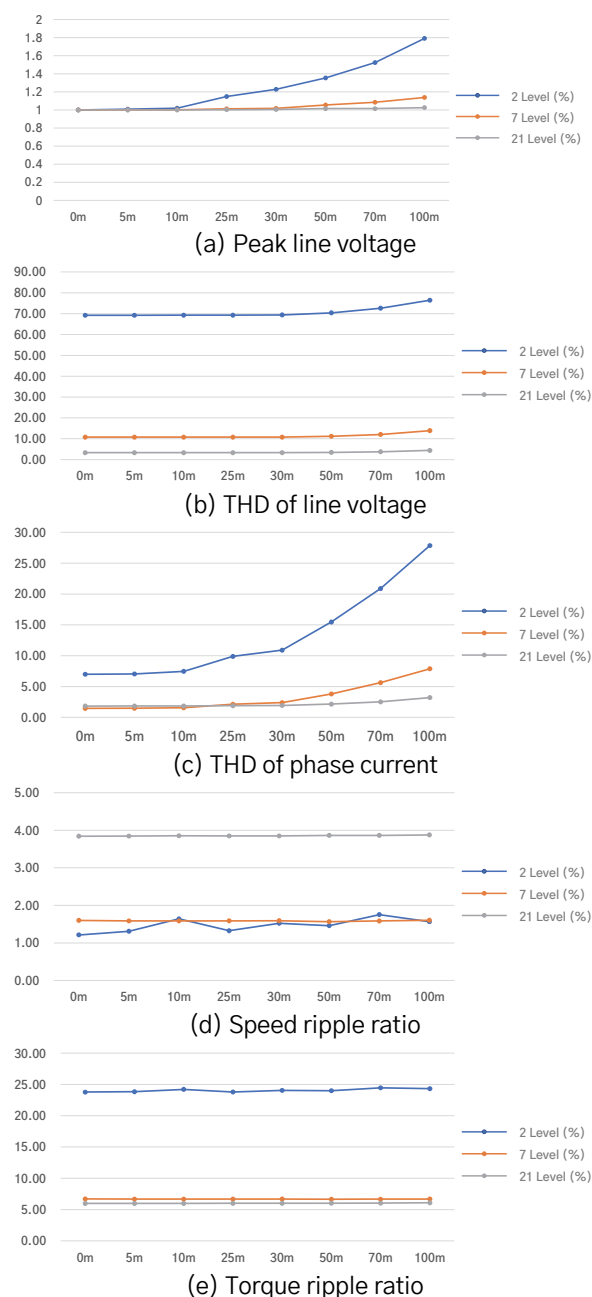


Fig. 10. Characteristics comparison

## 6. 결론

본 논문에서는 케이블 사양에 따른 6.6kV 멀티 레벨 인버터의 출력 특성을 분석하였다. 2레벨, 7 레벨 및 21 레벨 인버터의 모델을 각각 구현하여 선간전압과 상전류의 고조파 왜곡과 속도와 토크의 리플율을 도출하고 비교 분석하였다. 결과적으로 레벨이 증가할수록 과전압 비율이 감소하며 케이블 길이는 50m 이하에서 사용되어야 유도전동기에 과전압으로 인한 지속적인 스트레스를 방지할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Sung-Dong Kim, Tea-O Kim and Gyu-Hong Kang, "A study of functional safety-based reliability analysis of PMS of DC grid ships," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 42, No.1, pp. 58-63, 2018.
- [2] G. Skibinski, "Design Methodology of a Cable Terminator to Reduce Reflected Voltage on AC Motors," Proc. 31st, IEEE-IAS Annual Meeting, Vol.1, pp.153-161, 1996.
- [3] Kil, G. S., Rhyu, K. S., Park, D. W., Cho, Y. J., Cheon, S. G., and Choi, S. Y., "Measurement and analysis of transient voltage for an inverter-fed induction motor," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 10, No.6, pp. 650-654, 2007.