

# 전동기 구동 시스템에서 전압 반사에 의한 전동기의 과전압 분석

김성오\*, 최혜원\*, 이교범\*  
아주대학교

## Analysis of Motor Overvoltage in Motor Drive Systems by Voltage Reflection

Sung-Oh Kim\*, Hye-Won Choi\*, and Kyo-Beum Lee\*  
Ajou university

### ABSTRACT

본 논문에서는 전동기 구동 시스템에서 전압 반사에 의한 전동기의 과전압을 분석한다. 인버터와 전동기를 연결하는 선로의 특성 임피던스를 설명하고 전송선로가 상대적으로 긴 경우에 발생할 수 있는 전압 반사 효과를 분석한다. 지령 전압의 크기에 따른 선간 전압의 과전압을 파악한다. 전압 반사로 인한 과전압과 선로 특성과의 관계를 설명한다. 과전압을 발생시키는 전압 반사에 대해 분석하고 과전압에 취약한 구간을 파악한다. 전압 반사에 의하여 발생하는 전동기의 과전압은 시뮬레이션을 통해 분석하고 검증한다.

### 1. 서론

전동기 구동 시스템은 인버터, 전동기, 선로로 구성되며, 선로의 길이에 따라 선로의 특성 임피던스가 결정된다. 전동기 구동 시스템에서는 전송선로와 전동기 사이의 임피던스 차이로 인하여 전압 반사가 발생한다<sup>[1]-[4]</sup>. 전송선로의 길이와 파라미터에 따라 전파 시간이 결정되고, 전파 시간에 비해 작은 스위칭 시간을 가진 전력반도체 소자를 사용할 경우 전동기의 입력 측에 과전압과 전압 맥동이 발생한다. 특정 조건에서 입력 전압 크기의 2배를 넘는 과전압이 발생되는데, 이러한 현상은 전압 반사로 인하여 발생한 전압 맥동이 다음 펄스까지 유지되는 경우에서 나타난다<sup>[1]</sup>. 이 때 전동기 입력 측의 과전압은 전동기 권선의 절연 파괴 문제를 야기한다.

전동기 입력 측의 과전압을 억제하기 위하여 다양한 수동 소자 필터가 연구되고 있다<sup>[1]-[4]</sup>. 수동 소자 필터는 L, RC, RLC, LR 등이 사용되는데, 이는 손실을 유발한다<sup>[1]</sup>. 수동 소자로 인한 손실을 줄이기 위하여 저손실 필터인 RL-plus-C 필터를 사용한다<sup>[2]</sup>. 스위칭 소자와 인버터 출력 단자 간의 거리가 있는 경우에 발생하는 기생 인덕턴스를 사용하여 RC-Link만을 적용한 LCR 필터로 dv/dt를 저감하는 방법이 있다<sup>[3]</sup>. 임피던스 매칭 필터는 인버터 출력 측의 반사 계수를 0으로 설정하는 필터를 설계하여 전압 반사를 발생시키지 않아 전동기 입력 측의 과전압을 억제한다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서 전압 반사에 의하여 발생하는 과전압과 전압 맥동이 전동기 입력 측에 미치는 영향을 분석한다. 전압 반사를 설명하고, 과전압의 발생 원리를 분석하기 위하여 지령 전압의 크기에 따른 선간 전압의 과전압을 분석한다. 과전압에 취약한 구간을 파악하고 전압 반사에 의하여 발생하는 전동기 입력 측의 과전압을 시뮬레이션을 통해 분석하고 검증한다.

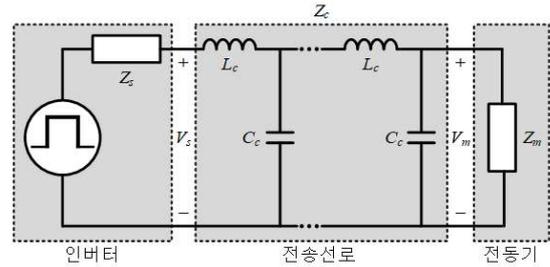


그림1 손실이 없는 전동기 구동 시스템의 전송선로 모델  
Fig.1 Lossless transmission line model in motor drive systems

### 2. 전동기 구동 시스템에서의 과전압

전동기 구동 시스템에서 각 단자의 임피던스 불일치로 인하여 발생하는 전압 반사를 분석하고 과전압의 원리를 설명한다.

#### 2.1 전압 반사

전송선로가 있는 전동기 구동 시스템을 해석하기 위하여 전송선 이론을 바탕으로 전송선 선로의 모델을 나타내면 그림 1과 같다. 전송선 선로의 모델은 전류가 도통하면서 발생하는 자기장에 의한  $L_c$ 와 전기장에 의한  $C_c$ 로 전송선로를 모델링하며 특성 임피던스  $Z_c$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} \quad (1)$$

인버터에서 발생한 전압 펄스가 전동기의 입력 측까지 도달하는 시간인 전파시간  $t_p$ 는 식 (2)와 같다.

$$t_p = l_c \sqrt{L_c C_c} \quad (2)$$

여기서  $l_c$ 는 전송선로의 길이를 나타낸다. 인버터에서 발생한 전압 펄스가 전동기의 입력 측까지 도달하는 과정에서 임피던스의 차이로 인하여 전압 반사가 발생한다. 인버터 출력 측에서의 전압 반사 계수  $\Gamma_s$ 는 식 (3)과 같고, 전동기 측에서의 전압 반사 계수  $\Gamma_m$ 는 식 (4)와 같다.

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \quad (3)$$

$$\Gamma_m = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \quad (4)$$

여기서  $Z_m$ ,  $Z_c$ 는 전동기의 임피던스와 인버터의 임피던스를 나타낸다.

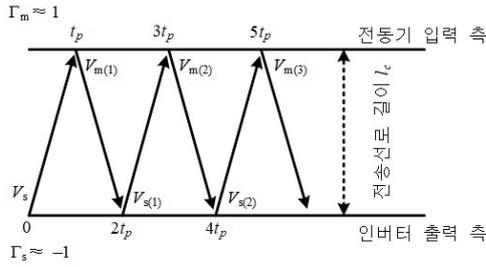


그림2 전파 시간에 따른 전압 반사  
Fig.2 Voltage reflection with propagation time

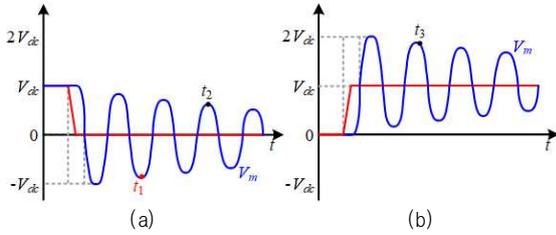


그림3 전동기 입력 측의 과전압 진동 (a) 하강 펄스  
(b) 상승 펄스  
Fig.3 Motor side overvoltage oscillation (a) falling pulse  
and (b) rising pulse

그림 2는 인버터와 전동기 사이에서 전파 시간에 따른 전압 반사를 나타낸다. 전동기의 입력 측에서 반사된 전압파는 전파 시간  $t_p$  후에 인버터의 출력 측으로 이동한다. 전압 반사로 인한 최대 전압의 크기는 식 (5)와 같다.

$$V_m(1) = (1 + \Gamma_m) V_s \quad (5)$$

$3t_p$  일 때, 전동기 입력 측의 전압은 최소 전압으로 감소하게 되고, 전압의 크기는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$V_m(2) = (1 - \Gamma_m^2 \Gamma_s) V_s \quad (6)$$

전동기 입력 측의 전압은 전압 반사로 인하여 전압 맥동이 발생하고 식 (7)과 같이 과전압이 맥동하는 주파수  $f_{osc}$ 를 나타낼 수 있다.

$$f_{osc} = \frac{1}{4t_p} \quad (7)$$

## 2.2 과전압의 원리

전압 반사로 인하여 다음 펄스까지 전압 맥동이 유지되면 펄스가 중첩되어 더 높은 과전압 맥동이 발생하게 되는데 이 현상을 Double Pulsing 현상이라고 한다. 그림 3(a)에서  $t_2$ 는 전압 맥동이 하강하는 시점이므로 상승 펄스가 인가되더라도 서로 상쇄되어 선간 전압 맥동의 크기가 작다.  $t_1$ 에서 상승 펄스가 발생될 경우에는 펄스가 중첩되어 전동기 입력 측의 선간 전압이  $V_{dc}$ 의 2배 이상으로 커지게 된다. 그림 3(b)의  $t_3$  시점에서 하강 펄스가 인가되는 경우에는 중첩이 발생하더라도 전압의 크기는  $2V_{dc}$ 를 넘지 않는다.

## 3. Double Pulsing 현상에 따른 선간 전압

Double Pulsing 현상에 취약한 구간을 파악하기 위하여 지령 전압의 크기에 따라 선간 전압의 과전압을 분석한다. 그림 4는 a상의 지령 전압이 가장 큰 구간과 가장 작은 구간에서 a상과

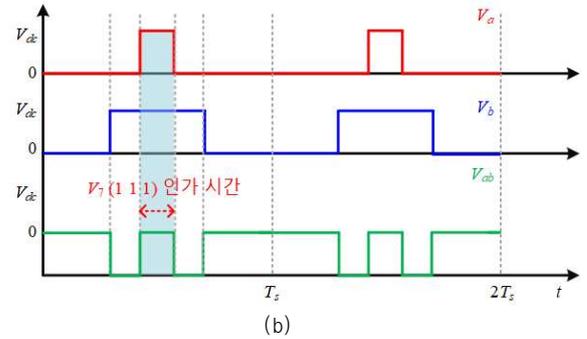
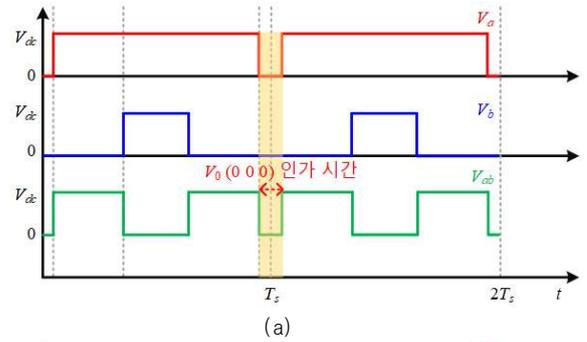


그림4 전동기 입력 측의 선간 전압  $V_{ab}$  (a) a상 지령 전압이 큰 경우 (b) a상 지령 전압이 작은 경우  
Fig.4 Line-to-line voltage  $V_{ab}$  at motor side (a) high reference voltage on phase a and (b) low reference voltage on phase a

b상의 전압  $V_a, V_b$  및 a, b상의 선간 전압  $V_{ab}$ 을 나타낸다. 영벡터  $V_0(000)$ 의 인가시간에 따라 Double Pulsing 현상이 발생하는 정도가 상이하다. 그림 4(a)와 같이 전압 변조 지수(Modulation Index, MI)의 크기가 커질수록 영벡터  $V_0(000)$ 의 인가시간이 감소한다. 영벡터  $V_7(111)$ 의 인가시간에 따른 Double Pulsing 현상의 취약구간은 그림 4(b)와 같으며, MI가 커질수록 영벡터  $V_7(111)$ 의 인가시간이 감소한다. 지령 전압의 크기가 큰 영역 및 MI가 큰 영역에서는 영벡터  $V_0(000), V_7(111)$ 의 인가시간이 짧아 Double Pulsing 현상에 취약하다. 이 때 a상의 지령 전압이 Double Pulsing 현상에 취약한 구간에 있을 경우 a상과 b상의 선간 전압인  $V_{ab}$ 과 c상과 a상의 선간 전압인  $V_{ca}$ 에 Double Pulsing 현상이 발생한다.

## 4. 시뮬레이션

본 논문에서 전송선로의 특성에 따라  $2V_{dc}$  이상의 높은 과전압을 발생시키는 Double Pulsing 현상을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 부하는 11kW급의 IPMSM을 적용하였으며, 시뮬레이션의 파라미터는 표 1과 같다. 그림 5는  $l_c$ 에 따른 a상과 b상의 선간 전압인  $V_{ab}$ 를 나타낸다. 그림 5(a)는  $l_c$ 를 400 [m]로 모의하였고, 그림 5(b)는 100 [m]로 모의하였다. 그림 5(b)에서 보면  $l_c$ 가 작아서 다음 펄스가 인가되기 전까지 전압 맥동의 폭이 줄어들기 때문에 과전압의 맥동은  $2V_{dc}$ 를 넘지 않는다. 그림 6은  $l_c$ 를 400 [m]로 모의하고 MI가 0.9인 경우에 전동기 입력 측의 선간 전압을 나타낸다. a상의 지령 전압이 큰 경우에는 상승 펄스가 중첩되어 Double Pulsing 현상이 발생한다. 그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 하강하는 전압 맥동이 다음에 인가되는 상승 펄스와 중첩되는 것을 나타낸다. 두 펄스의 전압 맥동은 서로 상쇄되어 Double Pulsing 현상이

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters

입력 전압	600 [V]	지령 전류	20 [A <sub>peak</sub> ]
정격 전력	11 [kW]	고정자 저항	0.349 [Ω]
d축 인덕턴스	13.17 [mH]	q축 인덕턴스	15.6 [mH]
극수	6	$R_c$	2.4 [mΩ/m]
$L_c$	2.15 [μH/m]	$C_c$	177.8 [pF/m]

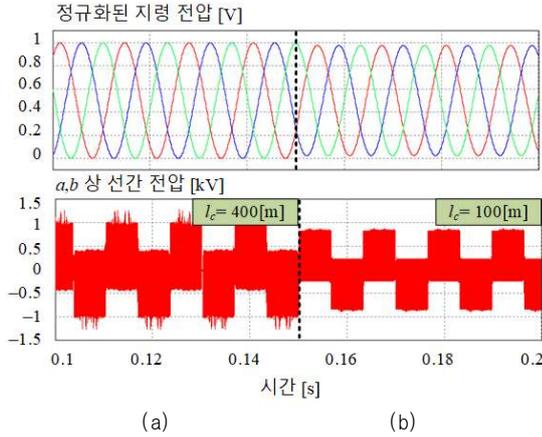


그림5 전송선로 길이에 따른 지령 전압 및 선간 전압 (a) 400 [m] (b) 100 [m]  
Fig.5 Reference voltages and line-to-line voltages with the length of transmission line (a) 400 [m] and (b) 100 [m]

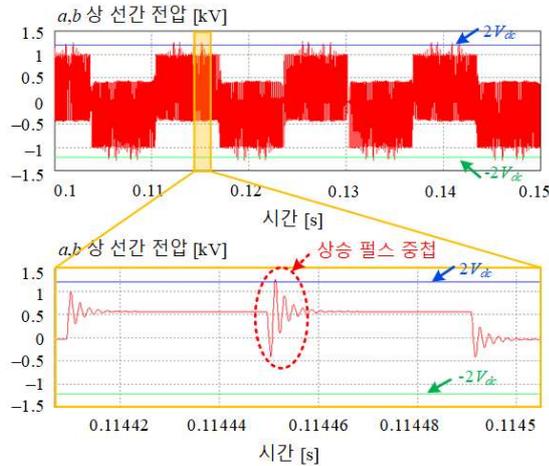


그림6 전동기 입력 측의 Double Pulsing 현상  
Fig.6 Double Pulsing phenomenon at motor side

발생하지 않는다. 그림 6의 시뮬레이션 결과 파형을 보면, 지령 전압의 크기가 큰 구간에서 Double Pulsing 현상에 의하여 전동기의 선간 전압 맥동이  $2V_{dc}$ 보다 크다. 이에 따라 실제 전동기 구동 시스템에서는 Double Pulsing 현상을 억제하는 대책이 요구된다.

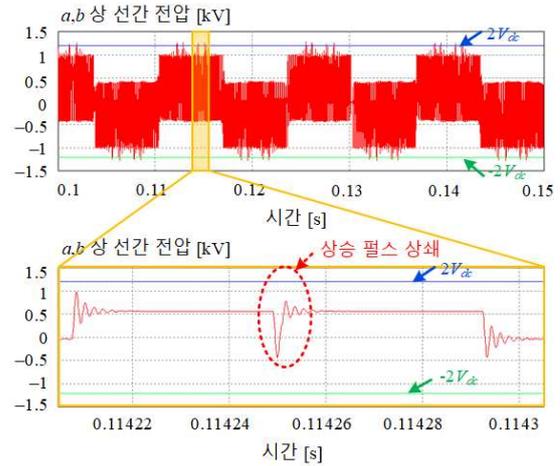


그림7 전동기 입력 측의 펄스 상쇄 현상  
Fig.7 Neutralization phenomenon at motor side

## 5. 결론

본 논문에서는 전동기 구동 시스템에서 전압 반사에 의한 전동기 입력 측의 과전압을 분석하였다. 전송선로의 길이에 따라 전압 반사에 의한 과전압의 크기는 달라진다. 전압 반사에 의하여 발생하는 전압 맥동이 다음 펄스까지 유지되면 더 높은 과전압이 전동기의 입력 측에 발생한다. 과전압 발생 취약 구간은 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 향후 전동기 구동 시스템의 과전압 현상을 억제하는 연구에 활용될 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] B. Narayanasamy, A. S. Sathyanarayanan, F. Luo, and C. Chen, "Reflected Wave Phenomenon in SiC Motor Drives: Consequences, Boundaries, and Mitigation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 10, pp. 10629–10642, Oct. 2020.
- [2] Y. Jiang, W. Wu, Y. He, H. S. Chung and F. Blaabjerg, "New Passive Filter Design Method for Overvoltage Suppression and Bearing Current Mitigation in a Long Cable Based PWM Inverter-Fed Motor Drive System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 10, pp. 7882–7893, Oct. 2017.
- [3] E. Velander, A. Sandberg, T. Wiik, F. Botling, M. Lindahl, G. Zanuso, and H. Nee, "An Ultralow Loss Inductorless dv/dt Filter Concept for Medium-Power Voltage Source Motor Drive Converters with SiC Devices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 00, pp. 6072–6081, Jul. 2018.
- [4] R. Ruffo, P. Guglielmi, and E. Armando, "Inverter Side RL Filter Precise Design for Motor Overvoltage Mitigation in SiC-Based Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 2, pp. 863–873, Feb. 2020.