

가변속 풍력발전시스템의 인버터-발전기간 케이블 길이에 따른 풍력발전기 dv/dt 전압 모델링 및 저감대책

박찬솔*, 함도현*, 송승호†, 권오정**, 강신일**

*광운대학교 ** (주)플라스포

Modeling and Filtering of dv/dt Voltage Stress at Generator Terminal Due to Long Cable Between Inverter and Generator in Variable Speed Wind Energy Conversion System

Chan-sol Park*, Do-Hyun Ham*, Seung-Ho Song†, Oh jung Kwon**, Shin il Kang**

*Kwangwoon University **PLASPO Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문에서는 인버터 스위치의 PWM 펄스 전압에 의해 발생하는 발전기 단자의 과전압 현상을 해석하기 위해, 전력 케이블과 발전기의 고주파 모델링을 제시하고, 이에 의한 과전압 현상을 해석한다. 또한, 이 과전압 현상을 억제하기 위한 적절한 형태의 인버터 출력단 dv/dt 필터를 설계하고, 선정된 dv/dt 필터 토폴로지의 필터 파라미터의 범위를 제시한다.

1. 서론

인버터의 스위칭 시 발생하는 PWM 펄스형 전압은 매우 높은 고조파 성분을 포함하고 있으며, 스위칭 소자의 발달로 전압상승률이 6000V/usec 를 넘는 경우가 많다. 이러한 구형파 펄스전압이 장거리 케이블을 거쳐 전동기 (혹은 발전기)에 직접 전달될 경우 케이블과 발전기의 임피던스 특성 차이로 인해 반사파가 발생하며 전동기 입력단에 dc전압에 약 2배에 해당하는 과전압을 일으킬 수 있다. 특히 풍력발전시스템과 같이 밀폐된 공간에 다양한 기기가 집적되어있는 경우 이러한 영향은 더욱 커질 수 있다. 또한 이 과전압은 인버터 PWM전압의 Rising time 뿐만 아니라 케이블의 특성 임피던스와 길이에도 영향을 받는다. 이 과전압은 모터에 스트레스로 작용하여 Bearing Current, Shaft Voltage, 전동기의 절연파괴를 야기하여 전동기의 수명을 단축시킨다.

이 논문에서는 이 과전압 현상을 해석하기 위한 케이블과 발전기의 고주파 모델링을 제시하고, 제시된 모델을 이용하여 풍력발전시스템에서 적절한 필터를 설계한다. 이 설계된 필터의 성능을 시뮬레이션과 실험으로 검증하고, 필터 소자의 파라미터의 범위를 수식과 함께 제시한다.^{[4][5]}

2. 케이블과 발전기의 고주파 모델링

풍력 케이블의 길이에 따라 나타나는 과도상태 전압의 특성을 해석하기 위해 분포정수회로를 대신하여 단위 길이당 lumped parameter 임피던스 모델을 세우고 이것이 필요한 길이만큼 직렬로 연결된 회로로 모델링 하였다. Fig. 1과 2는 단위 길이당 케이블의 고주파 특성을 나타내는 임피던스 모델과 전동기의 고주파 모델이며, 수백 Hz에서 수 MHz까지의 넓은 범위의 주파수 특성과 유사하도록 모델링 한 것이다.^{[1][2][3]}

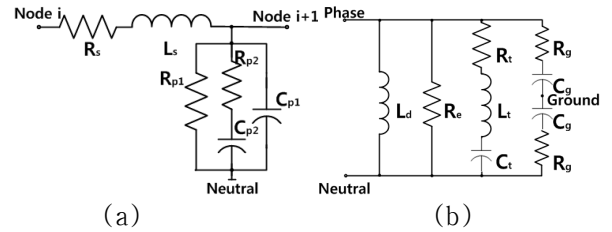


Fig. 1 High frequency model of cable and machine.
(a) Per-phase high frequency model of cable per-unit length.
(b) High frequency model of generator.

3. 전동기 입력 단 dv/dt 필터 설계

발전기 입력단에 인가되는 전압 스트레스를 억제하기 위한 dv/dt 필터의 구조는 다양하고, 필터의 설치 위치도 인버터 출력단에 설치하는 경우와 발전기 단자에 설치하는 경우로 구분된다. 본 논문에서는 다양한 dv/dt 필터 토폴로지 중에서 필터를 너셀에 설치하는 것은 물리적으로 어렵기 때문에 인버터 출력단에 위치하는 필터로 결정하였고, 크기대비 dv/dt 감쇄효과가 우수한 L-RC 필터를 선정하였다. 선정한 필터는 Fig. 2와 같다.

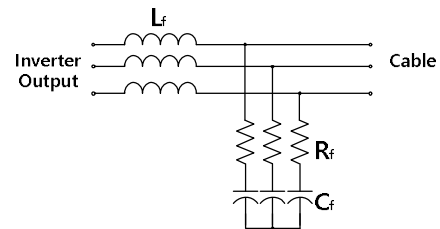


Fig. 2 L-RC Filter at the inverter output.

선정된 dv/dt 필터의 파라미터를 설계하기 위해서는 먼저 발전기 단자에서 허용되는 전압 오버슈트의 크기 혹은 전압 상승시간을 결정해야 한다. 식 (1)과 (2)는 피크전압과 dc-link 전압의 관계식과 이로 인한 오버슈트와 전압 상승시간의 상관관계식이다.^[6]

$$\frac{V_{LLP}}{V_{dc}} = \frac{3 \times I_c \times \Gamma_L}{v \times t_r} + 1 \quad (1)$$

$$O.S = \frac{3 \times l_c \times \Gamma_L}{v \times t_r} \quad (2)$$

여기서 l_c : 케이블의 길이, Γ_L : 반사계수, v : Pulse Velocity, t_r : Pulse의 상승시간이다.

필터를 설계하기 위한 절차로 먼저 앞에서 제시된 케이블의 특성 임피던스와 같은 크기의 R_f 를 선정한다. 그 다음 제시된 L-RC 필터의 전달함수는 식 (3)과 같으며 $\omega = 2\pi(1/2t_r)$ 일 때 $|H(j\omega)| = 0.707$ 이 되도록 한다. 이 전달함수의 특성 방정식을 이용하면 식 (4)와 같은 조건을 만족시켜야 감쇠계수 ζ 가 1 이상이 되어 해당 주파수에서 안정적인 것을 알 수 있으므로 이 범위 내에서 L_f 와 C_f 를 결정할 수 있다.

$$H(s) = \frac{1 + j\omega R_f C_f}{1 - \omega^2 L_f C_f + j\omega R_f C_f} \quad (3)$$

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

4. 시뮬레이션 및 실험

이 필터의 성능을 검증하기 위해 0.6usec의 t_r 을 가지는 dv/dt 필터를 설계하여 시뮬레이션과 실험을 비교하였다.

Fig. 3은 설계된 필터를 인버터의 출력단에 설치하기 전과 후에 측정한 실험과 시뮬레이션 결과와 비교한 파형이다. 실험 결과가 시뮬레이션과 일치하는 것을 볼 수 있다.

앞의 식 (2)에서 전동기 입력 단 펄스전압의 오버슈트는 전압 상승시간과 반비례 관계에 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 4와 5는 검증된 시뮬레이션 모델을 통해 각각의 전압 상승시간에 따라 달라지는 오버슈트에 대한 그래프와 시뮬레이션 및 실험파형이다.

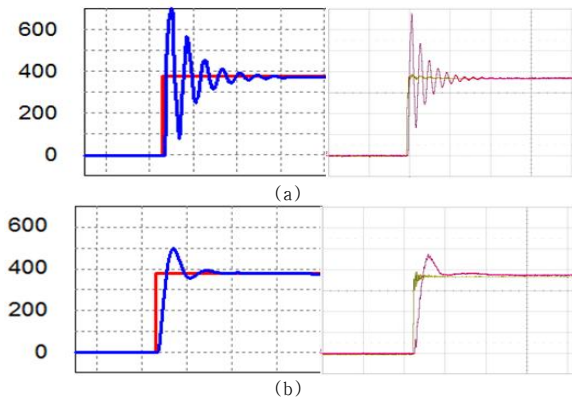


Fig. 3 Simulation(Left) and experimental(Right) results at motor terminal (2usec/div)

- (a) Without dv/dt filter
- (b) With dv/dt filter

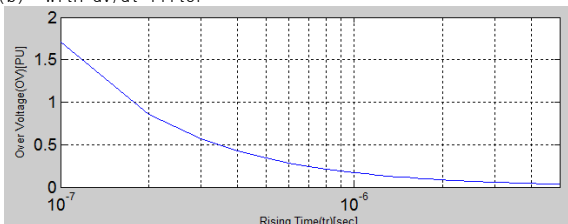


Fig. 4 Voltage over shoot vs Voltage Rising time

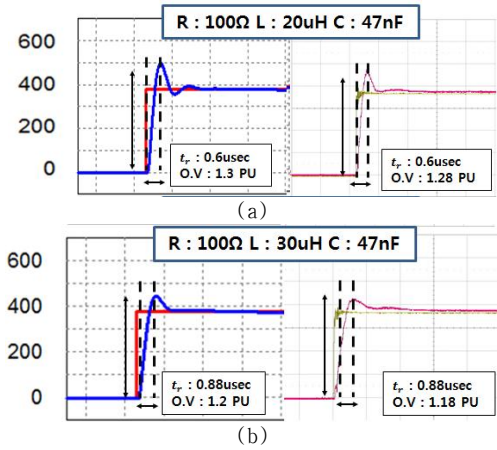


Fig. 5 Simulation and experimental result of voltage rising time (2usec/div)

5. 결론

본 논문에서는 케이블 및 발전기의 고주파 모델링을 제시하고 이를 이용하여 발전기의 입력 단자 전압의 과도상태 진동 특성을 모델링 하였다. 또, 인버터 출력 단에서 적절한 dv/dt 필터를 설계하여 모델링 및 필터의 성능을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 필터의 Trade-Off 관계에 있는 오버슈트와 상승시간과의 관계를 보였다.

본 연구는 2014년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 2012T100100064)

참고 문헌

- [1] Alessandro F. Moreira, Thomas A. Lipo, Giri Venkataramanan, and Steffen Bernet, "High Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Over-voltage Studies in Long Cable Drives", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, pp.1297-1306, VOL. 38, NO. 5, 2002.
- [2] A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", IEEE Industry Applications Conference, pp.1551-1558, 1999.
- [3] G. Grandi, D. Casadei, A. Massarini, "High Frequency Lumped Parameter Model For AC Motor Windings", EPE Conference Proceedings, 1997.
- [4] A. F. Moreira, T. A. Lipo, G. Venkataramanan, and S. Bernet, "Modeling and evaluation of dv/dt filters for AC drives with high switching speed," in Proc. 9th European Conf. Power Electronics and Applications (EPE'01), Graz, Austria, Aug. 27-29, 2001, CD-ROM.
- [5] A. von Jouanne, D. Rendusara, and P. N. Enjeti, "Filtering techniques to minimize the effect of long motor leads on PWM inverter-fed AC motor drive systems," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 32, pp. 919-926, July/Aug. 1996.
- [6] S. Evon, D. Kempke, L. Saunders, and G. Skibinski, "IGBT drive technology demands new motor and cable considerations", IEEE Petroleum and Chemical Industry Tech. Conf., 1996