DFIG 풍력발전기가 연계된 배전선로의 고조파 공진 특성에 관한 연구

A Study on Harmonic Resonance in a DFIG Wind Turbine-generator Connected to a Distribution Power Line

최 형 주* · 이 흥 호*
 (Hyung-Joo Choi · Heung-Ho Lee)

Abstract - There were telecommunication noise and malfunctions of the electronic devices occurred over a wide area due to the high harmonic voltage and/or current levels of the Back-to-back converter in the DFIG wind power system even though the magnitude of all harmonics is within the international standards. The triangular carrier signals of the PWM used in the power converter system is related to the telecommunication noise because they are in the range of audible frequencies and amplified by a variety of the standing waves that were excited by harmonic voltage sources in the weak grid system such as a long distance distribution transmission lines. This paper describes the characteristics of the harmonics in the wind turbine-generator, numerical analysis and simulation of the harmonics resonance phenomena in the distribution lines as well as measuring induced voltage of the telecommunication lines in parallel with power lines in order to verify the root cause of the telecommunication noise. These noise problems can occur in a wind turbine power system with a non-linear converter at any time, as well as photovoltaic power system. So, the preliminary review of suitable filter devices and switching frequencies of the PWM have to be required by considering the stability of the controller at the design stage but as part of the measures the effect of the telecommunication cable shields was analyzed by comparing the measured data between multi-conductor with/without shields so as to attenuate the sources of the harmonics voltage induced into the telecommunication lines and to apply the most cost-effective measures in the field.

Key Words : DFIG wind power, Telecommunication noise, Harmonic resonance, Transmission line standing wave

1. 서 론

최근 풍력이나 태양열을 이용한 분산전원 설비가 배전선로에 연계되는 추세가 증가되고 있으며, 전력변환을 위해 대부분 비선형 전력전자소자가 사용되므로 전력계통에서 고조파의 발생은 불가피한 상황이다. 고조파를 억제하기 위한 다양한 기술의 적용이나 필터를 설치하여 고조파를 국제 기준치 이내로 유지하고는 있지만 전력선과 통신선의 설치 여건이나, 필터의 경년 열화에 의한 성능 저하로 인해 고조파가 전력계통에 유입되어 수용가의 전자제어설비가 오동작하거나 통신외란에 의한 문제는 항상 잠재하고 있다.

우리나라 강원도 양양에 설치된 1.5MW급 DFIG (Double Fed Induction Generator) 풍력발전기 2기가 풍속 3m/s 이상에서 운전을 시작하여 풍량에 따라 기동과 정지를 반복하게 되므로 그림 1과 같이 발전기 출력이 매우 심하게 변동하고, 그림 2에 표시된 광범위한 지역에 걸쳐 약 1만 가구에서 출력에 비례하여 통신잡음이 증가하는 피해가 경험되었다.

그림 1 DFIG 풍력발전기 출력 기록

Fig. 1 Trend of the DFIG Wind turbine-generator output

DFIG 풍력발전기의 전력변환 설비는 24개의 전력전자소자 (IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용한 펄스폭 변환방식(PWM: Pulse Width Modulator)으로 회전자와 계통측의 캐리어(Carrier) 주파수는 각각 2.5kHz와 5kHz가 사용되고 있다. 고조파 제거를 위한 수동필터(LCL Passive Filter)는 그림 3과 같이 인버터(Inverter)와 소내변압기 사이에 설치되어 있으나, 수용가에서 통신잡음은 발생하였다.

* Korea Midland Power CO. Ltd.

Dept. Eng., Chung-Nam National University, Korea

† Corresponding Author : Dept. Eng., Chung-Nam National University, Korea

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

Received : November 4, 2012; Accepted : September 24, 2013

그림 2 통신장애 피해지역

Fig. 2 Affected areas of telecommunication disturbance

그림 3 DFIG 풍력발전기 계통도

Fig. 3 Schematic of the DFIG Wind Turbine-Generator

본 논문에서 DFIG 풍력발전기에서 발생하는 고조파의 특성과 통신잡음 사례를 고찰하고, 배전선로의 고조파 공진특성에 대한 수치해석, 모의시험과 실측된 자료를 비교하여 통신잡음의 발생 원인을 분석하고, 대책의 일환으로 통신선의 차폐 효과에 대한 실증시험 결과를 기술하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전기 고조파 발생 특성

DFIG 풍력발전기가 운전될 때 발전기 출력 전압과 전류의 파형은 그림 4와 같이 왜곡되고, 그림 5,6과 같이 저 차수 고조파 이외의 40차수대 고차 고조파가 함유되어 있다.

전압의 전고조파 왜곡(THD: Total Harmonic distortion)은 기본파 성분과 대한 잔류 고조파의 실효치 비율로 식(1)과 같이 계산되며, IEEE 519에서 제시하는 기준치 이내로 확인된다[1].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^2}}{U_1} \quad (1)$$

그림 4 풍력발전기의 출력 전압과 전류 파형

Fig. 4 Voltage and current waveform of the WT

그림 5 풍력발전기의 전압 고조파

Fig. 5 Voltage harmonic of the WT

그림 6 풍력발전기의 전류 고조파

Fig. 6 Current harmonic of the WT

표 1 전압 고조파 왜형률

Table 1 Total harmonic distortion of the voltages

구분	U_1	$\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^2}$	THD (%)	IEEE 519 (한전 기준)
U_a	109.30	2.060	2.312	전압왜형률 5% (3%) 각 고조파 왜형률 3%
U_b	109.58	2.901	2.647	
U_c	110.31	2.550	2.312	

풍력발전기의 정격전압과 전류는 12kV, 72.3A이고, 변류비 150/5A를 고려하면 2차 정격전류는 2.41A로 환산된다. 전류에 대한 총수요왜곡(TDD: Total demand distortion)은 식(2)로 계산되며[1], 전 차수 고조파는 기준치 이내로 확인된다. 가장 높게 측정된 3,5차수 고조파와 통신잡음과 관계된 39(영상분), 40(정상분)과, 41차(역상분)의 고조파 또한 표 2와 같이 기준치 이내로 양호하다.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_{rated}} \quad (2)$$

표 2 전류 고조파 총수요 왜형률

Table 2 Total demand distortion of the currents

구분		A상		B상		C상	
		측정치	TDD (%)	측정치	TDD (%)	측정치	TDD (%)
전차수	I_n	0.0530	2.193	0.0580	2.394	0.0520	2.141
3차수	I_3	0.0404	1.676	0.0467	1.938	0.0392	1.627
5차수	I_5	0.0284	1.178	0.0270	1.120	0.0294	1.220
39차수	I_{39}	0.0017	0.071	0.0025	0.104	0.0015	0.062
40차수	I_{40}	0.0008	0.033	0.0012	0.050	0.0005	0.021
41차수	I_{41}	0.0024	0.100	0.0042	0.174	0.0023	0.095

 $I_{sc}/I_L < 20$ 기준, 각차 고조파 (IEEE 519)

<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

2.2 고조파에 의한 통신잡음 사례 고찰

통신선에서 실측된 전압에서도 저 차수 고조파는 평상시 존재하고 있기는 하지만, 풍력발전기가 운전될 때 37~40 차수대 고조파가 그림 7과 같이 높게 측정되었다.

그림 7 통신선의 전압 고조파

Fig. 7 Voltage harmonics of the telecommunication line

통신잡음이 발생하는 지역을 4개 구역으로 나누어 통신선에 유도전압을 측정할 결과 모든 구역에서 유도 종전압 실효치는 그림 8과 같이 기준치 15.0V 이내이지만, 선대지간 종잡음 전압은 그림 9와 같이 기준치 775mV(90dBmC)를 간헐적으로 초과하면서 통화 명료도는 극히 불량하고, 통신선을 사용하는 신용카드 단말기에서도 오동작하는 문제가 나타났다.

그림 8 통신선의 유도 종 전압

Fig. 8 Induced voltages of the telecommunication line end

그림 9 통신선의 선대지간 종 잡음전압

Fig. 9 Noise voltages of the line-to-ground

2.3 배전선로 고조파 공진특성

(1) 수치해석 결과

22.9kV 가공 배전선로는 3상 4선식 다중접지 방식으로 약 40km 구간의 중거리 선로 단말에 풍력발전기가 접속되어 있으며, 통신선로는 약 33km 구간에서 전력선과 병행하여 가설되어 있다.

고조파 전압의 정재파(Standing Wave)는 선로의 거리(x)에 따라 식(3),(4)와 같이 계산된다. 여기서 전파정수(γ)는 $j\omega\sqrt{LC}$ 이다[2].

그림 10 풍력발전기가 접속된 배전선로
Fig. 10 Wind turbine-generator in the distribution line

$$V(x) = Ae^{-\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (3)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z}(Ae^{-\gamma x} + Be^{-\gamma x}) \quad (4)$$

송신측과 수신측의 종단 조건을 알 때 상수 A, B는 식 (5),(6)과 같이 계산된다. 수전단의 임피던스가 특성 임피던스의 역수이면 $K_v = 1/Z$ 이 되므로 정재파는 발생하지 않는다. 그러나 개방 상태($K_v = 0$) 또는 단락 상태($K_v = \infty$) 어느 경우에서도 고조파의 특성에 따라 정재파는 발생할 수 있다[2].

$$A = \frac{(\cosh \gamma \ell + \sinh \gamma \ell)(K_v Z + 1)}{2(\cosh \gamma \ell + K_v Z \sinh \gamma \ell)} V_h \quad (5)$$

$$B = \frac{(\sinh \gamma \ell - \cosh \gamma \ell)(K_v Z - 1)}{2(\cosh \gamma \ell + K_v Z \sinh \gamma \ell)} V_h \quad (6)$$

A, B 상수를 식(3)에 대입하여 정리하면 식(7)이 유도된다 [2].

$$V(x) = \frac{\cosh \gamma(\ell - x) + K_v Z \sinh \gamma(\ell - x)}{\cosh \gamma \ell + K_v Z \sinh \gamma \ell} V_h \quad (7)$$

1차 변전소의 변압기 2차 측 퍼센트 임피던스(%Z)는 30MVA 기준 6.7%, 특성임피던스($\sqrt{L/C}$)는 4.5Ω으로 계산되므로 반사계수 $\left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}\right)$ 는 58.5%가 되고 상수인 $K_v Z$ 는 3.1로 계산된다. 이를 식(7)에 대입하고 정리하면 통신잡음과 관계되는 영상분 39차수, 정상분 40차수 고조파의 전압 정재파는 그림

그림 11 고조파 전압 정재파
Fig. 11 Harmonic voltage standing waves

11과 같이 풍력발전소가 설치된 장소를 기준하여 1차 변전소가 위치한 송전선로의 거리에 따라 다양한 크기로 고조파가 증폭되는 것으로 해석된다.

(2) 모의시험 결과

22.9kV 가공 배전선로의 선종은 ACSR-AWOC 95mm² 규격으로 동일한 크기의 가공지선이 시설되어 있는 중거리 선로이므로 그림 12와 같이 직렬 임피던스와 병렬 어드미턴스로 구성된 π형 등가회로를 구성하고 PSCAD V4.1 소프트웨어를 사용하여 모의시험을 시행하였다[3].

그림 12 풍력발전소와 변전소간 송전선로 모델
Fig. 12 Transmission line model between WT and S/S

송전선의 선로정수는 “배전용 케이블의 종류와 형상에 따른 선로정수 모의 계산 자료”를 참조하였으며, 한전에서 제시하는 선로정수와 비슷한 수치이다[4].

표 3 송전선의 선로정수

Table 3 Transmission Line constants

구 분	단 위	선로정수
Line Voltage	kV	22.9
Line Frequency	Hz	60
Line Lengths	km	38.456
+Ve Sequence Resistance	Ω/m	0.301271E-3
+Ve Sequence Inductive Reactance	Ω/m	0.414355E-3
+Ve Sequence Capacitive Reactance	Ω*m	55.0E-6
Zero Sequence Resistance	Ω/m	0.623891E-3
Zero Sequence Inductive Reactance	Ω/m	1.022360E-3
Zero Sequence Capacitive Reactance	Ω*m	72.0E-6

모의시험 결과 그림 13과 같이 배전선로의 공진주파수는 1kHz 이상에서 나타나고 있으며, 1.3kHz, 2.5kHz, 3.7kHz, 4.9kHz, 6.2kHz 7.3kHz, 9.5kHz로 분석된다.

풍력발전기가 위치한 곳에서 단위 크기의 가변 주파수를 50kHz 까지 변화시켜 시험한 결과 그림 14와 같이 배전선로 구간내 통신국사와 단말인 1차 변전소에서 특정 고조파의 증폭 현상이 확인된다.

그림 13 송전선의 공진특성

Fig. 13 Resonance of the transmission line

그림 14 단위 입력에 대한 고조파 공진특성

Fig. 14 Harmonic resonance for the unit size of the input signal

풍력발전기의 출력 전압에서 실측된 전 차수의 고조파를 적용하여 모의시험한 결과에서도 가변 주파수 변화시험과 같이 파형 왜곡이 심하게 나타나고 통신잡음과 관련된 고조파가 확인된다.

그림 15 실측된 고조파 적용시 전압 파형 왜곡

Fig. 15 Voltage distortion when applied to measured data

(3) 배전선로 고조파 실측

풍력발전기로부터 5km에 위치한 통신국사에서 실측한 결과, 통신선의 전압 파형은 매우 왜곡되어 있으며, 풍력발전기의 전력변환기에서 사용하는 캐리어 주파수와 동일한 2.5kHz, 5kHz 고조파 성분이 그림 18과 같이 확인되어 통신잡음을 유발하는 요인으로 확인되었다.

그림 16 실측된 고조파 적용시 전류 파형 왜곡

Fig. 16 Current distortion when applied to measured data

그림 17 실측된 고조파 적용시 고조파 공진특성

Fig. 17 Harmonic resonance when applied to measured data

그림 18 통신선의 전압 고조파

Fig. 18 Voltage harmonics of the telecommunication lines

풍력발전기, 통신국사와 배전선로 단말에 위치한 1차 변전소에서 전압과 전류를 측정한 결과 수치해석이나 모의시험 결과와 동일한 고조파 성분이 나타나고, 배전선로 중간지점에서 고조파의 증폭 현상이 확인되었다.

그림 19 실측된 전압 고조파의 비교

Fig. 19 Comparison of the measured voltage harmonics

그림 20 실측된 전류 고조파의 비교

Fig. 20 Comparison of the measured current harmonics

2.4 케이블 차폐 특성

통신선의 전자 유도전압(V)은 송전선이 완전 연가된 경우 식(8)과 같이 계산된다[5]. 따라서 유도 장애 저감을 위해서는 근본적으로 각 계수와 관련된 특성을 저감하거나 유도 장애를 받는 시간을 줄여야 한다.

$$V = -j\omega M(3I_0)V \quad (8)$$

여기서 M : 상호 인덕턴스 (H/km)

ℓ : 병행 거리 (km)

I_0 : 전력선의 영상전류

전력선과 병행으로 가설된 통신선은 비차폐 케이블 규격으로 시설되어 있으므로 유도전압 경감 대책으로 차폐 특성에 대한 시험이 필요하다. 유도전압의 차폐(Shield) 효과는 식(9)와 같이 차폐선이 없을 때 유기된 전압($Z_{12}I_1$)과 차폐선에 의해 감소되는 전압($Z_s I_1$)의 합으로 계산된다[5].

$$E_M = -Z_{12}I_1 + Z_s \frac{Z_{1s}I_1}{Z_s} = -Z_{12}I_1 \times \left(1 - \frac{Z_{1s}Z_{2s}}{Z_s Z_{12}}\right) \quad (9)$$

그림 21 케이블 차폐 등가회로

Fig. 21 Equivalent circuit of cable shield

여기서 유도전압을 감소시키는 차폐계수인 $\left(1 - \frac{Z_{1s}Z_{2s}}{Z_s Z_{12}}\right)$ 는 차폐된 통신선일 때를 고려하면 $Z_s \approx Z_{12}$ 가 되고 차폐계수는 $\left(1 - \frac{Z_{2s}}{Z_s}\right)$ 가 된다. 따라서 차폐선의 자기 임피던스(Z_s)가 작을수록 차폐 효과는 크게 된다. 통신선 차폐 효과는 표 4와 같이 비차폐 대비 유도전압이 1/2로 감소되고, 그림 23과 같이 전압 파형의 개선이 확인 되었다.

표 4 통신케이블 차폐 효과

Table 4 Effect of the telecommunication cable shield

구분	유도전압[mV]		선대지간 잡음전압[dBmC]	
	비차폐	차폐	비차폐	차폐
정지중	4.5	2.3	85	73
운전중	5.6	1.9	95	77

그림 22 비차폐 통신선의 유기전압

Fig. 22 Induced voltage of the non-shields cable

풍력발전기 2기가 운전될 때 차폐 통신선과 비차폐 통신선에 유기되는 전압을 비교한 결과 그림 24와 같이 저차 고조파를 포함하여 통신잡음과 관계된 특정 고차 고조파 모두 크게 감쇄되는 효과가 검증되었다. 통신선에 중화코일을 설

그림 23 차폐 통신선의 유기전압

Fig. 23 Induced voltage of the shields cable

치하거나, 접지설비의 보강, 통신선의 여유 심선으로 차폐 기능 활용, 배전선로의 연가 등 다양한 방법으로 유도전압의 감쇄를 시도하였으나, 통신 케이블의 직접적인 차폐 조치가 통신잡음을 해소하는데 가장 효과적인 방안으로 확인되었다.

그림 24 전압 고조파 비교

Fig. 24 Comparison of the voltage harmonic magnitude

3. 결 론

에너지 다원화 정책과 청정에너지의 활용 측면에서 다양한 분산전원의 설치에 매우 긍정적이다. 그러나 출력 변동이 심하고 계통기여도가 낮은 발전설비의 증가는 계통안정도의 저하, 주파수 예비력의 감소 등 전력계통의 운영 측면에서나 통신설비와 같은 전자제어설비가 오동작하는 문제는 대체에너지의 설치에 부담으로 작용하는 것이 현실이다.

DFIG 풍력발전기에서 측정된 고조파는 국제 기준치 이내에 있지만 풍력발전기가 연계된 22.9kV 배전선로가 가설된 전 지역에 걸쳐 통신잡음 피해가 경험되었다. 이러한 현상은 전력변환 설비를 사용한 발전설비에서 재현될 수 있고 예상치 못한 경제적 손실이 수반될 수 있다. 금번 풍력발전기에 의한 통신잡음 피해사례의 특이 현상을 고찰하고, 배전선로의 고조파 공진특성에 대한 수치해석과 모의시험을 수행하였으며, 각 지역에서 실측된 자료와 비교하여 배전선로에서 고조파의 공진특성을 분석하였다. 또한 통신선의 차폐 효과를 실증시험을 통해 검증하고, 유도장해 방지대책으로 조치가 시행되어 모든 구간에서 통신잡음이 해소되었다.

비선형 설비인 전력변환 장치를 사용하는 풍력발전 설비 이외에도 태양열 시스템의 개발이 증가 추세에 있어 통신잡음으로 인한 피해는 언제든 발생 할 수 있다. 따라서 전력계통과 연계되는 분산전원 설비는 설계 단계에서 면밀한 분석이 필요하다. 전력변환기의 캐리어 주파수는 발전기의 절연내력과 열적 용량의 한계로 인한 제약 특성을 고려하여야 하고, 제어시스템의 성능을 감안하여 보다 진보된 필터의 튜닝 기술이나 제어변수의 최적 조정에 관한 전력변환기 설계 기술에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [2] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", pp. 168-173, Wiley, 2007.
- [3] Manitoba-HVDC Research Centre, EMTP/DC, PSCAD, "User's Guide Manual"
- [4] J.S. Kwak, J.W. Woo, "Calculation of line constants for distribution power cables according to its shapes and geometrical arrangements", KIEE Summer Conference, pp. 18-20, 2005. 7.
- [5] K.Y. Song "Engineering of Transmission and Distribution 5th edition" pp. 262-270, Dong-il, 2008. 7.

저 자 소 개

최형주 (崔亨柱)

1967년 9월 15일생. 1999년 청운대 전자계산학과 졸업. 2010년 충남대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대 전기공학과 박사과정, 한국중부발전(주) 선임전문원

E-mail : nimble@komipo.co.kr

이흥호 (李興浩)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수

E-mail : leehh@cnu.ac.kr