

碩士學位論文

濟州翰京風力團地와 連繫된  
配電線路 電力品質 分析

The background features a large, faint watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, containing a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. Below the design, the text 'JEJU 1952' is visible. The outer ring of the watermark contains the text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' in English and '제주대학교' in Korean.

濟州大學校 大學院

電氣電子工學科

邊 君 益

2009年 12月

# 濟州翰京風力團地와 連繫된 配電線路 電力品質 分析

指導教授 金世鎬

邊君益

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

邊君益의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 左宗根

委員 金豪贊

委員 金世鎬



濟州大學校 大學院

2009年 12月

**Power Quality Analysis of the Distribution Line  
Connected with Jeju Hangung Wind Farm**

**Kun-Ik Byeon**

**(Supervised by professor Se-Ho Kim)**

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 12

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	i
LIST OF TABLES .....	ii
SUMMARY .....	iii
I. 서 론 .....	1
II. 전력품질 기준 .....	3
1. 배전선로 전압유지 범위 .....	3
2. 주파수 유지기준 .....	4
3. 역률 유지기준 .....	4
4. 전압·전류 불평형률 기준 .....	5
5. 고조파 이론 및 제한규정 .....	6
6. 플리커 유지기준 .....	10
III. 풍력발전기 계통연계로 인한 전력품질 분석 .....	13
1. 전압변동률 분석 .....	14
2. 주파수 변동 분석 .....	16
3. 역률 분석 .....	19
4. 전압·전류 불평형률 분석 .....	21

5. 고조파 분석 .....	24
6. 플리커 분석 .....	27
7. 전력품질 분석 결과 고찰 .....	30
<b>IV. 결 론</b> .....	<b>33</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>34</b>



## LIST OF FIGURES

그림 1	환경풍력2단계와 연계된 배전선로 계통도	13
그림 2	풍력발전량 및 전압변동률	15
그림 3	풍력발전량 및 주파수	18
그림 4	풍력발전량 및 역률	20
그림 5	풍력발전량 및 전압불평형률	22
그림 6	풍력발전량 및 전류불평형률	23
그림 7	풍력발전량 및 전압고조파왜형률	25
그림 8	풍력발전량 및 전류고조파왜형률	26
그림 9	풍력발전량 및 단기플리커지수	28
그림 10	풍력발전량 및 장기플리커지수	30

## LIST OF TABLES

표 1 배전선로의 송출전압유지 범위 .....	3
표 2 국내 한국전력 고조파 제한규정 .....	7
표 3 IEEE Standard 519 고조파전압왜형률 제한기준 .....	7
표 4 전압 계통에서 산업적 전압고조파 전압의 제한치 .....	8
표 5 IEEE 고조파 전류 왜곡한계(120V~69000V) .....	9
표 6 국내 플리커 관리기준 .....	12
표 7 IEC 61000-3-7 플리커 유지기준 .....	12
표 8 환경풍력단지 2단계의 개요 .....	14
표 9 단기플리커지수 위반 분석 .....	27
표 10 장기플리커지수 위반 분석 .....	29

## SUMMARY

According to an increased concern due to the environment preservation and global warming, advanced countries have been invested in alternative energy development against climatic change and exhaustive fossil fuel. The wind turbine for electricity generation has emerged as one of the most important energy resources by the end of the 1990s, with an increasing amount of world wide wind capacity.

In our country, small wind systems were within the past 10 years and were also in Jeju as well. These wind systems are increasingly growing throughout our country as well as Jeju. Power systems of Jeju are organized by HVDC(High voltage DC) transmission line, which is interconnected to the mainland, power plants and wind farms. If HVDC is disconnected and overhauled under large scale wind farms's variation output, the power quality in Jeju is adversely affected. Therefore, these utilities must ensure a reasonable quality of supply, that is, without too many sag, swells, and high harmonic voltages affecting the performance of customer equipment.

In this paper, It will be discussed the power quality of the distribution lines that are connected in the 2nd Hanguk wind farm within Jeju. This includes the voltage variation, frequency, power factor, harmonics and flicker. In addition, It will be analyzed the power quality produced by the Jeju wind farms during the HVDC overhaul last May or later. Finally, It will be provided an overall analysis on whether the power quality is being affected.



## I. 서론

최근 환경 보존과 지구 온난화에 대한 관심이 고조됨에 따라 범세계적으로 온실가스 저감대책 및 거래제도 등을 도입하고 있다. 우리나라는 OECD (Organization for Economic Cooperation and Development)가입국으로서 국제사회의 동향과 발맞추어 지구 환경 보존에 대한 일정부문의 강제부담은 물론, 온실가스 저감에 대한 의무할당 등을 부여받을 것으로 예상된다. 이에 따라 국내에서는 가장 효율적인 대처방안을 마련하기 위하여 풍력산업을 포함한 대체에너지 산업과 대체에너지원의 기술을 개발하고 보급하는 데 꾸준히 노력하고 있으며, 전 산업자원부(현 지식경제부)에서는 본격적인 지원제도를 시행하기에 이르렀다.[1]

2009년 10월 현재 제주에서의 전력공급능력은 육지계통과 연계한 HVDC(High Voltage Direct Current)와 자체발전기를 포함하여 777MW(풍력, 태양광발전과 같은 비중앙발전과 동기조상기 제외)로 운영하고 있다. 특히, 풍력발전시설은 기존 배전선로에 연계하는 소규모의 풍력발전시설과는 달리 최근 들어 더욱 대용량화되고 있는 추세이다. 한 예로 제주도 동부지역에 위치한 제주삼달풍력발전소(33MW)는 2009년 9월부터 154kV 송전선로를 통하여 성산변전소(서귀포시 성산읍 소재)의 154kV 모선과 연계하여 운영하고 있다. 최근 제주지역의 풍력발전설비는 총 79MW로 운영되고 있으며, 2010년까지 약100MW 풍력발전기가 건설될 전망이다.

풍력설비는 경제성 증진, 환경적 이익, 경쟁연료 단가 상승 등의 여러 가지 이점에도 불구하고, 전력수요의 변화에 따라 발전기 출력조정이 어렵고, 바람의 세기변화에 따라 출력이 수시로 변한다는 문제점이 있다[2]. 이와 같은 풍력설비에 대한 연구로는 증가되는 풍력발전설비에 대한 계통운영측면에서, 제주지역 여타 발전기 또는 풍력발전설비의 갑작스런 출력변동이나 계통에서 탈락, 송전선로 고장 등이 발생하였을 때 제주계통의 영향분석[3], 제주계통에서 풍력발전량이 계통에 기여하는 정도를 나타내기 위한 유효용량 분석연구[4]등이 있다. 그러나, 육지계통과 연계된 HVDC 설비가 정지되거나 고장이 발생할 때, 풍력발전설비의 출력변동으로 인한 전력품질에 대한 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구에서는 제주에서 운영하고 있는 풍력발전량에 따른 전력품질을 분석하고자 한다. 이를 위하여 제주계통에 배전선로로 공급되는 풍력발전단지 중 풍력발전설비가 가장 큰 한경풍력단지와 연결된 배전선로 한 곳을 선정하였다. 여기서 선정된 풍력발전단지 배전선로 양측에 2009년 5월 실시된 제주변환설비 정기점검기간과 그 전후기간을 합친 약 1개월 동안 제주대학교와 한국전력 전력연구원에서 보유한 전력품질 분석 장비를 설치하였다. 이 장비에서 취득한 데이터를 활용하여 풍력발전량에 따라 전압변동률, 주파수, 역률, 전압·전류 불평형률, 고조파, 플리커에 대한 전력품질을 분석하였다. 이를 통하여 풍력발전량의 크기에 따라 전력품질이 기준치에 적합한지의 여부와 제주계통에 미치는 영향을 알아보하고자 한다.

## II. 전력품질기준

### 1. 배전선로 전압유지 범위<sup>[5]</sup>

분산형전원 발전설비의 연계로 인한 특고압 계통이 상시 전압변동(10분 평균 값)은 2% 이하, 순시전압변동(2초 이하)은 2% 이하로 유지되도록 하고 있다. 일반적으로 배전변전소 송출전압은 전기공급규정에 의한 규정전압이 유지될 수 있도록 하고 있으며, 전압유지 범위는 표 1과 같다.

표 1 배전선로의 송출전압유지 범위

구 분	전압 유지 범위	비 고
배전선로에서의 유지범위	12,000V ~ 13,800V 20,800V ~ 23,800V	
주변압기(M.Tr)의 송출전압 유지범위	22.9kV +4%, ~ -1% (23,816V ~ 22,671V)	(주)
	22.7kV +3.7%, ~ -1.3% (22.9kV±2.5% )	

(주) 변전소 단위 공급선로 전체가 전압강하 5% 미만인 변전소

전력계통 운영 기준에 의하면 배전용 배전소는 배전선 인출 측의 전압을 중부하시에는 최대계통운전 전압으로 하고, 경부하시에는 배전선의 선로전압강하를 고려하여 중부하시와 경부하시의 부하비율에 따라 결정한다. 다만, 전압 조정장치 수동운전 시에는 23kV 계통에서 경부하시 22.0kV, 중부하시 22.9kV, 침두부하시 23.9kV 로 부하대별 기준전압에 따르고 있다.

## 2. 주파수 유지기준

### 1) 주파수변동 개요

대체에너지전원의 계통연계시 전원의 정격을 출력하기 위하여 기계적 토크를 증가시켰을 때 주파수 상승이 일어날 수 있다. 이 외에 계통사고로 인해 단독운전이나 부하 또는 전원의 일부가 정지하여 발전기 출력이 추종할 수 없는 경우, 부하자체의 급변, 대체에너지 전원의 출력 변동이 심한 경우에 주파수 변동이 일어나게 된다. 제주 전력계통에서, 제주계통이 육지계통으로부터 단절된다면, 제주계통은 제주도내의 발전기들로만 부하의 변동에 응답해야 한다. 특히, HVDC 점검기간은 부하량이 연중 최저가 되는 시점이다. 따라서, 발전기관성정수 또한 작게 되어 부하변동에 따른 주파수 변동을 조기에 응답할 수 없는 상황으로 전개되므로 주파수 변동이 비교적 심해질 수 있다.

### 2) 주파수 유지기준<sup>[6]</sup>

「전력계통운영기준」에 의해 전기사업자와 전력거래소는 계통주파수를 정상시  $60\pm 0.2\text{Hz}$ 의 범위 내에서 조정한다. 다만, 예외적인 상황에서  $62\text{Hz}$ 까지 오를 수 있고,  $57.5\text{Hz}$ 까지 떨어질 수 있다. 실제 발전기에서의 주파수는  $60\pm 1.5\text{Hz}$ 에서 연속운전이 가능하고, 주파수 강하로 인하여 계통주파수가  $58.5\sim 57.5\text{Hz}$  범위에서 최소한 20초 이상 운전 상태로 유지하도록 하고 있다.

## 3. 역률 유지기준

역률(pf : power factor)은 전압과 전류측정에서 얻어지며 피상전력 S, 유효전력 P, 무효전력 Q를 계산한다. 역률(pf)는 식 (1)로 구해진다.

$$\text{역률}(pf) = \frac{\text{피상전력}(S)}{\text{유효전력}(P)} \times 100 [\%] \quad (1)$$

「풍력발전 계통연계 기술기준」에 따르면 분산형 전원 발전설비의 역률은 계통 연계지점에서 90% 이상으로 유지하며, 역조류가 있는 경우, 전압상승을 방지하기 위하여 불가피한 경우 수전점 역률을 80% 까지 제어할 수 있도록 하고 있다.

#### 4. 전압·전류 불평형률 기준

##### 1) 전압·전류 불평형률 정의

전압불평형은 보통 삼상전압 또는 전류의 평균치에 대한 최대편차로 정의되며, 그 최대편차를 삼상전압 또는 전류의 평균치로 나눈 비율(%)로 나타낸다. 또한, 이 전압불평형은 대칭분요소를 사용하여 정의할 수 있는데, 정상분요소에 대한 역상분 요소 또는 영상분 요소의 비율에 의해 불평형률을 나타낼 수도 있다.

대칭좌표법을 이용한 전압불평형률은 식 (2)와 같다.

$$\text{전압불평형률}(\tau_V) = \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad [\%] \quad (2)$$

$$\text{여기서, } k = \sqrt{3 - \frac{6(V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4)}{(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2)^2}}$$

전류불평형률은 중성선을 제외한 각상의 전류 실효치로 계산된다. 전류불평형 식은 전압불평형식과 유사한데, 전류불평형률은 식 (3)과 같다.

$$\text{전류불평형률}(\tau_I) = \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad [\%] \quad (3)$$

$$\text{여기서, } k = \sqrt{3 - \frac{6(I_1^4 + I_2^4 + I_3^4)}{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2)^2}}$$

## 2) 전압·전류 불평형률 유지기준

현재 분산형 연계기준에는 전류불평형률에 대한 유지기준이 전무한 상태이다. 다만, 전기설비기준에 의하면 설비불평형률 유지범위로는 저압수전의 단상 3선식인 경우 40% 이하, 저압에서 특별고압수전의 3상 3선식 또는 3상 4선식인 경우 30% 이하로 유지되도록 하고 있다. 또한, 전기설비기술기준에 의하면 「송전용 전기설비에서의 전압불평형률은 3% 이내로 유지하여야 한다. 다만, 송전용 전기설비의 비상상황 또는 송전용전기설비의 개폐시에는 전압불평형률이 이 범위를 초과할 수 있다.」라고 규정하고 있다.

## 5. 고조파 이론 및 제한규정

### 1) 고조파 이론[기

공급계통의 정현파 전압을 비선형부하에 인가하면 비정현파의 부하전류가 계통내로 흐르게 되고, 이 전류는 전원임피던스에 의해 전압강하를 발생하게 된다. 이와 같은 전압강하에 의해 정현파의 전원전압은 왜곡된 파형을 갖게 된다. 이러한 주기성을 갖는 왜형파는 Fourier 급수로 전개하여 기본주파수와 정수배의 주파수 성분으로 분해하여 해석할 수 있으며, 이 정수배 성분을 고조파라고 한다.

주기가 T인 왜형파의 시간함수를 f(t)라 하면,

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos 1 \frac{2\pi}{T} t + a_2 \cos 2 \frac{2\pi}{T} t + \dots + b_1 \sin 1 \frac{2\pi}{T} t + b_2 \sin 2 \frac{2\pi}{T} t + \dots \quad (4)$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n \frac{2\pi}{T} t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n \frac{2\pi}{T} t$$

와 같이 Fourier 급수로 전개된다.

즉 고조파는 공급계통의 기본주파수(정현파 60Hz)의 정수배의 주파수를 가지는 사인파의 전압 또는 전류를 말하며, 왜곡된 파형은 기본파와 고조파의 합으로 분리할 수 있다. 고조파는 주로 전력 변환장치, 정류기, 전자파, 가전기기 등에서 발생하며, 고조파왜형의 정도를 나타내는 것으로서 종합왜형(THD, Total

Harmonic Distortion)이라는 단위가 사용되고 있다. 전압고조파왜형률은 식 (5)와 같다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (5)$$

$V_h$  : 각 차수의 고조파 전압 크기,  $h$  : 고조파 차수

2) 전압고조파 제한규정

국내 및 국외의 고조파 제한규정으로는 표 2, 표 3, 표 4와 같다.

표 2 국내 한국전력 고조파 제한규정

기준 전압	구 분			
	지중선로 있는 변전소에서 공급		가공선로만 있는 변전소에서 공급	
	전압왜형률 (%)	등가방해전류 주) (A)	전압왜형률 (%)	등가방해전류 (A)
66kV 이하	3.0	-	3.0	-
154kV 이하	1.5	3.8	1.5	-

주) 등가방해전류 : 전력계통에서 발생한 고조파는 인접해 있는 통신선에 영향을 주며 통신선에 영향을 주는 고조파 전류의 한계를 등가방해전류(EDC : Equivalent Disturbing Current)로 규제하고 있다.

표 3 IEEE Standard 519 고조파전압왜형률 제한기준

회로전압	개별전압왜형률 (%)	최대종합왜형률 (%)	비 고
69kV 이하	3.0	5.0	
69kV~161kV	1.5	2.5	
161kV 이상	1.0	1.5	



표 4 IEC Standard 61000 전압 계통에서 산업적 전압고조파 전압의 제한치

3의 배수가 아닌 홀수 고조파		3의 배수인 홀수 고조파		짝수 고조파	
고조파 차수	고조파 전압 (%)	고조파 차수	고조파 전압 (%)	고조파 차수	고조파 전압 (%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3.0	21	0.2	8	0.5
17	2.0	21초과	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			12초과	0.2
25	1.5				
25초과	0.2+0.5×25/n				

### 3) 전류고조파 제한기준

전류고조파왜형의 정도를 나타내기 위하여 기준으로는 국내기준은 국제기준인 IEEE Standard 519-1992(표 5)에 따르고 있으며, 이 기준에서는 TDD(Total Demand Distortion)를 사용하고 있다. 분산전원이 도입됨에 따라 THD(Total Harmonic Distortion)로는 분산전원측의 고조파 발출량을 정확히 판단하기 어려워 TDD라는 개념을 도입하였다.

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} \times 100[\%] \quad (6)$$

여기서  $I_{TDD}$  : 전류고조파왜형률[%],

$I_h$  : 각 차수의 고조파 전류 크기[A]

$h$  : 고조파 차수,  $I_L$  : 최대 정격 전류[A]

여기서, 표5 기준에 의해서 한계용력단지와 연계되는 배전선로의 전류고조파왜형률( $I_{TDD}$ )기준치를 설정하기 위하여 단락전류( $I_{sc}$ )와 최대정격전류( $I_L$ )는 식



(7), (8)에 의해서 계산하게 되면  $I_{SC}/I_L$  는 쉽게 구할 수 있다.

$$I_{SC} = \frac{P \times 100}{\sqrt{3} \times V \times \%Z} [A] \quad (7)$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} [A] \quad (8)$$

여기서  $I_{SC}$  : 단락전류 [A],  $I_L$  = 최대정격전류

P : 변압기 용량 [kW], 3,000kW×5기 = 15,000kW

V : 배전선로측 전압 [kV], 22.9kV

%Z : 백분율 임피던스[%], 9.5%

식 (7)과 (8)에서 단락전류( $I_{SC}$ )와 최대정격전류( $I_L$ )는 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{단락전류}(I_{SC}) = \frac{15,000 \times 100}{\sqrt{3} \times 22.9 \times 9.5} = 3,980 [A]$$

$$\text{최대정격전류}(I_L) = \frac{15,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 378 [A]$$

따라서, 환경풍력단지와 연계되는 배전선로의  $I_{SC}/I_L$  계산치는 10.53 (3,980/378)이므로 표 5에서 IEEE 고조파 전류 왜곡한계는  $I_{SC}/I_L$  20이하로 적용하게 되면 전류고조파왜형률( $I_{TDD}$ ) 기준치를 5% 이하로 적용하였다.

표 5 IEEE 고조파 전류 왜곡한계(120V~69000V)

$I_{SC}/I_L$	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
20이하	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
1000이상	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

※ 짝수 고조파는 홀수 고조파 제한값의 25%로 제한

## 6. 플리커 유지기준

### 1) 플리커 개요<sup>[8]</sup>

무효전력의 소비가 크고, 부하전류의 크기가 연속적이며, 빠르게 변동하는 부하가 있을 경우, 전원계통에 전압변동을 일으킨다. 교류식 전기철도 부하와 같이 몇 분에서 수 십분 정도의 전압변동은 전동기, 정류기 및 자동제어시스템 등에 영향을 주고, 변전소의 전압조정장치의 동작빈도를 증가시킨다. 또한 아크로 부하등과 같은 몇 초정도 이하 주기의 전압변동은 앞서 언급한 영향 외에 전기조명기의 깜박임과 TV화면의 동요를 발생시킨다. 전압변동은 일련의 랜덤한 전압변화를 말하여, 그 크기는 보통 ANSI(American National Standard Institute, 미국 국가 규격 협회) 규정에서 0.9~1.1p.u(per unit)를 벗어나지 않는다.

플리커라는 말은 램프의 전압변동에 의하여 인간의 눈에 플리커로서 인지되는 것으로부터 유래되었으며, 전압변동과 플리커는 표준규격에서 종종 혼용되고 있다. 이러한 전압변동을 나타내기 위하여 전압플리커라는 말을 일반적인 어휘로 사용하고 있다.

### 2) 플리커 평가방법

<sup>[9]</sup>플리커의 평가는 Flicker meter에 의해 측정되는 플리커지수(P)를 통하여 이루어지며, 인간의 눈이 Flicker에 민감한 정도를 나타낸다. 플리커지수는 관찰시간에 따라서  $P_{st}$ (단기 플리커지수)와  $P_{tt}$ (장기 플리커지수)로 나누어진다. 일반적으로 관찰시간은 단기 플리커지수는 10분, 장기 플리커지수는 120분(2시간)이다. 관찰시간 10분은 단시간 동작하는 개별적 전압변동원의 관찰에 적당하고, 관찰시간 120분은 간헐적으로 부하가 변동되거나, 몇 개의 부하가 집합적으로 변동되는 경우를 관찰하는 경우에 적당하다. 이러한 관찰시간의 선택에 의하여 고려되어야 할 전압변동의 가장 낮은 빈도 또는 반복률로 정의되고, 이것들이 수치화되어 멀티포인트 알고리즘(Multipoint Algorithm)에 의하여 계수들이 정의된다.

인지의 한계값을  $P_{st}=1$ 로 정의하며, 이 조건은 60W 백열등 아래에서 독서를

하는 기준 관찰조건하에서 독서를 하는 사람의 50%가 인지할 수 있다는 것을 이야기 한다. 일반적으로  $P_{st} < 1$ 인 경우에는 플리커를 인지할 수 없다고 보며,  $P_{st} > 1$ 인 경우에는 플리커를 인지할 수 있는 것으로 정의한다.

[10]  $P_{st}$ 의 계산에는 주기적으로 측정된 플리커 지수(최소한 초당 50개)의 값에 대한 통계데이터로부터 IEC 61000-4-15(2003)의 기준인 IEC flicker meter를 사용하여 결정된다. 여기서 단기플리커지수에 대한 수식은 식 (9)와 같다.

$$P_{st} = \sqrt{(0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})} \quad (9)$$

장기 플리커지수( $P_{lt}$ )의 계산은 Cubic 평활화법이 사용되어 식 (10)으로 나타내며, 120분의 경우 N=12가 된다.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N P_{st,i}^3 \right)} \quad (10)$$

### 3) 플리커 유지기준

현재 국내 플리커관리기준은 표 6과 같으며, 플리커 가혹도 지수는 특고압 계통 연계지점에서 단시간플리커지수( $E_{psti}$ , 10분)는 0.35이하로, 장시간플리커지수( $E_{plti}$ , 2시간)는 0.25이하로 제한하도록 되어있다. 이때  $E_{psti}$ ,  $E_{plti}$ 는 분산형전원에서 방출한다는 의미에서 계통의 플리커 지수인  $P_{st}$ ,  $P_{lt}$ 에 Emission을 추가한 것이다[11]. 플리커 방해지수  $\Delta V_{10}$ 은 일본 전력 중앙연구소에서 개발한 것으로 일본에서조차  $\Delta V_{10}$ 을 사용하지 않고 국제화 시대에 맞도록 IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기표준회의)규격에서 정한 플리커 가혹도 지수 단기플리커지수( $P_{st}$ )와 장기플리커지수( $P_{lt}$ )를 채택할 움직임을 보이고 있으며, 한국 산업자원부 기술표준위원회에서도 IEC 규격을 국내 규격화 하고자 작업 중이다.

국제기준(IEC61000-3-7)으로는 전력계통 측면에서 지켜져야 할 플리커 기준을

제안하고 있다. 기본적으로 플리커를 조정하거나 제한하는 데 중점을 두고 있으며, 그 기준은 표 7과 같다.

표 6 국내 플리커 관리기준

구 분	허용 기준치	비 고
예측계산시	2.5%	최대전압변동률로 표시
실 측 시	0.45%V	$\Delta V_{10}$ 으로 표시하며 1시간 평균치

※ 전압플리커 허용기준치로써 예측 계산할 때는 최대전압변동률로 표시하여 2.5%로 하고, 실측할 때는  $\Delta V_{10}$ 으로 표시하여 0.45(%V)(1시간 평균치)이하로 하고 있다.

표 7 IEC 61000-3-7 플리커 유지기준

구 분	단기플리커지수 (10분)	장기플리커지수 (2시간)
저전압, 중전압 계통의 플리커 가혹도 지수 (양립성 기준)	1이하	0.8이하
중전압 계통의 플리커 가혹도 지수 (계획 기준)	0.9이하	0.7이하
고전압, 초고압 계통의 플리커 가혹도 지수 (계획 기준)	0.8이하	0.6이하

※ 저전압 : 0~1kV, 중전압 : 1~35kV, 고전압 : 35~230kV, 초고압 : 230kV이상

### III. 풍력발전기 계통연계로 인한 전력품질 분석

본 연구에서는 풍력발전량에 따른 배전선로 전력품질을 분석하기 위하여 제주도내 풍력발전기와 연계된 배전선로 중 가장 큰 풍력발전기로 이루어진 한경풍력단지 2단계와 연결된 22.9kV-y 한풍#2D/L(D/L : Distribution Line) 한 곳을 선정하였다. 측정은 2009년도 5월 실시된 제주~해남 간 변환설비 정비기간과 그 전후기간을 합친 약 1개월 동안 이루어졌다. 측정된 결과를 바탕으로 풍력발전량의 크기에 따라 전력품질이 기준치에 적합한지의 여부와 제주계통에 미치는 영향을 분석하였다.

한경풍력단지2단계와 연계된 배전선로 구성은 그림 1과 같이 전용 배전선로로 연계되어 있으며, 풍력발전설비 현황은 표 8과 같다. 전력품질 분석을 위한 측정장비는 한림발전소와 한경풍력단지 인출 측에 각각 설치하였다. 한림발전소 한풍#2배전선로 인출 측의 측정장비는 제주대학교에서 보유하고 있는 Meridian ULTRA 600, 풍력단지 측의 측정장비는 한국전력 전력연구원의 PNA-560을 각각 1대씩 설치하였다. 전력품질 분석을 위한 데이터들은 각각 3초당 1개의 Sample로 저장되며, 측정기간은 약 30일 간이다.

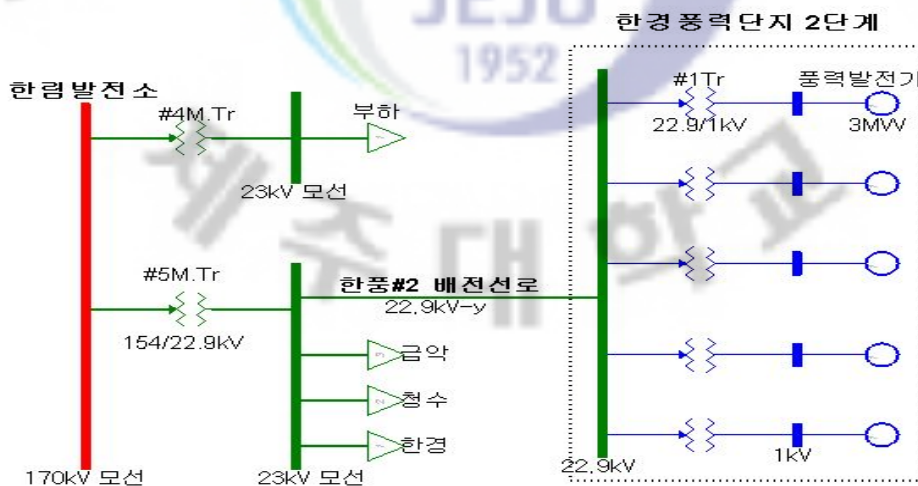


그림 1 한경풍력2단계와 연계된 배전선로 계통도

표 8 한경풍력단지 2단계의 개요

구 분	내 용	비 고
정격발전용량	3,000kW × 5기	
발전기 종류	이중여자유도발전기(DFIG)	
정격풍속	16m/s	
회전자 직경 및 타워높이	90m / 80m	
운전풍속 범위	4~35m/s	
제어방식	Pitch control	

### 1. 전압변동을 분석

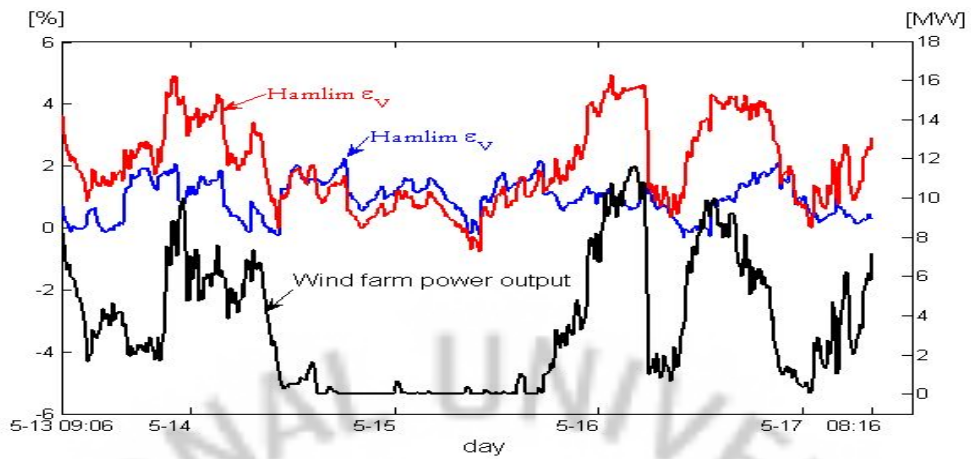
전압변동을 분석하기 위하여 풍력발전량과 동일하게 전체 측정기간 10분 평균치를 적용하였으며, 풍력발전량에 따른 전압변동이 연계기준에 적정한지의 여부를 그림 2와 같이 나타내었다. 여기서 측정전압은 각 선간전압의 평균치로 계산하였으며, 전압변동률은 식 (11)과 같이 적용하였다.

$$\text{전압변동률}(\epsilon_T) = \frac{\text{측정전압} - \text{기준전압}}{\text{기준전압}} \times 100 [\%] \quad (11)$$

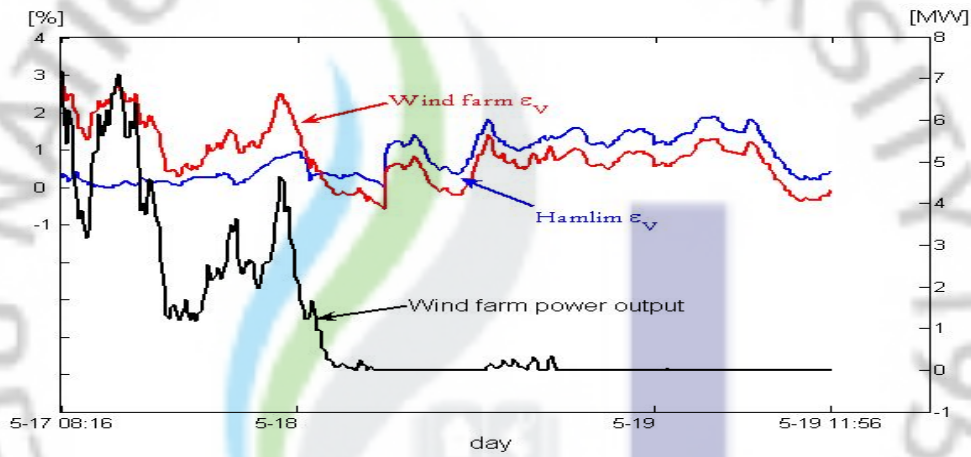
여기서 기준전압은 22.9kV로 선정하였다.

그림 2에서 보는 바와 같이 한림C/C측 23kV모선에서의 전압변동은 규정치 (22.9kV -1%~+4%) 이내로 안정적으로 운전되고 있으나, 풍력단지 측의 모선전압은 풍력발전량이 10MW이상으로 증가할수록 전압변동률도 4% 이상으로 증가하여 규정전압범위를 초과하고 있다. 한림C/C 측과 풍력단지 측의 측정전압이 차이가 나타나는 원인은 한풍#2D/L 송전단(풍력단지)과 수전단(한림C/C)의 배전선로 임피던스에 의한 전압강하의 영향으로 판단된다. 여기서 수전단인 한림C/C #5M.Tr측 모선전압은 한풍#2D/L 외에 금악, 한경, 청수D/L로 모두 4개의 선로의 모선P.T(P.T, Potential transformer)단자를 공용하고 있어 동일하다.

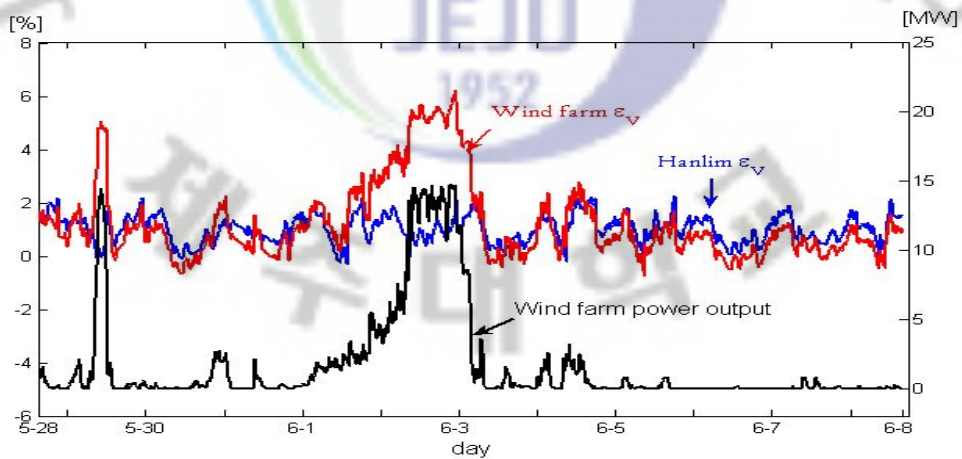




(a) HVDC #1pole 점검기간 중



(b) HVDC #1,2pole 점검기간 중



(c) HVDC 점검기간 후

그림 2 풍력발전량 및 전압변동률( $\epsilon_V$ )

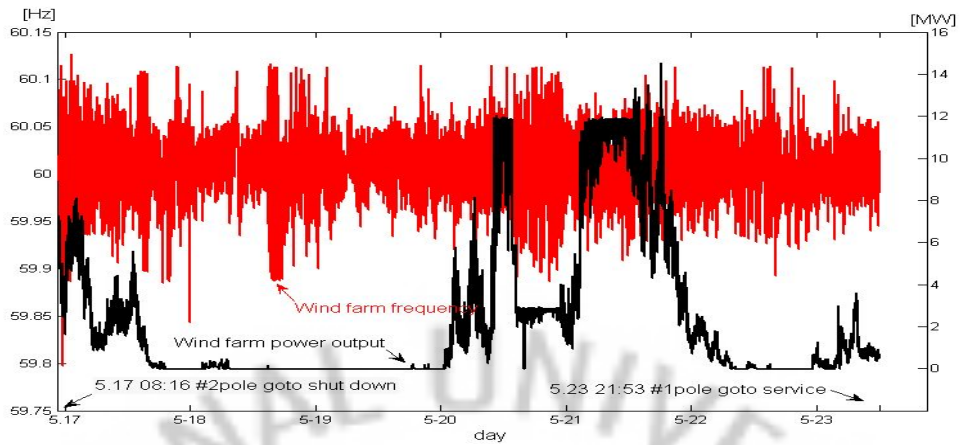
## 2. 주파수 변동 분석

풍력발전량에 따른 주파수의 변화를 분석하기 위하여 전체 측정기간 중 각각 3초 당 1개 Sample 취득한 데이터 값을 이용하였으며, 풍력발전량과 주파수 변화 상태를 그림 6과 같이 그래프로 나타내었다.

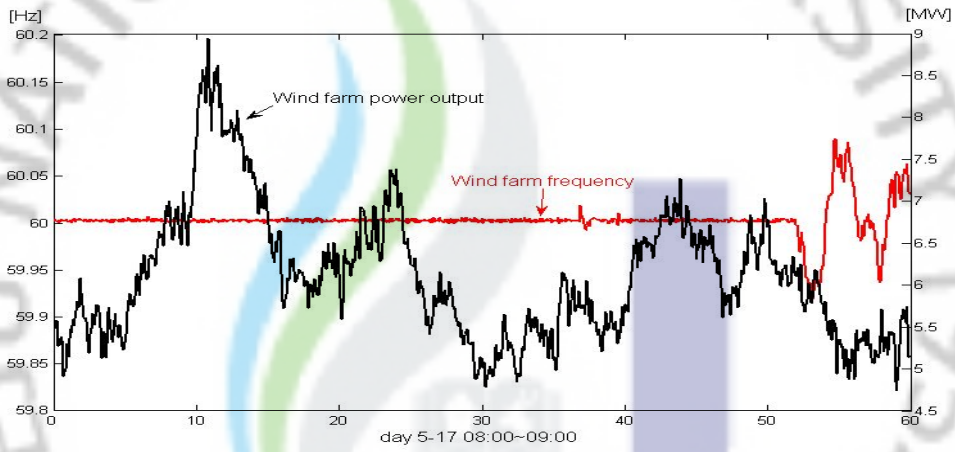
그림 (a)에서 보는 바와 같이 HVDC #1, 2pole 점검기간 동안 제주계통의 주파수변동이 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 (b)는 HVDC 2회선 중 #1pole이 정지된 후 #2pole이 정지되는 시간대의 주파수변동 상태 그래프이다. 이 그래프에서 보는바와 같이 HVDC가 #2pole만으로 운전할 때, 연계선이 주파수제어로 운전 중에는 주파수변동이 거의 없지만 주파수제어(Frequency Control)에서 정전력제어(Power Control)로 전환되는 시점에서 제주계통주파수는 크게 변동하는 것을 알 수 있다. 그림 (c)는 풍력발전량 변동이 심했던 5월 20일 22:00~23:00 동안 주파수변동 상태를 그래프를 정밀하게 나타내었다. 그림 (c)에서 보는 바와 같이 풍력발전량이 급격히 떨어질 때 그에 따른 계통주파수도 다소 떨어지는 것을 그래프로 나타내었다.

그림 (d)와 (e)는 HVDC 점검이 종료된 후의 주파수변동 그래프이며 그림 (e)는 주파수변동이 심한 특정시간을 나타낸 그래프이다. 그림 (e)에서 보는 바와 같이 5월 28일 02:03~04:29 HVDC 전극선로 정비를 위해 변환설비를 심야 휴전 작업을 시행한 기간의 주파수는 풍력발전의 출력이 증가할수록 주파수도 동시에 증가하는 현상을 알 수 있다. 그러나 HVDC가 정상운전이 되면서 풍력발전기 출력 변동에 의한 주파수 영향은 거의 없다. 이러한 원인으로서는 HVDC 정상운전 기간에는 주파수제어로 운전하게 되므로 계통부하의 일정량에 대한 출력변동이 있어도 변환설비에서 실시간으로 받는 역할을 하게 되기 때문에 주파수 변화폭이 작은 것으로 판단된다.

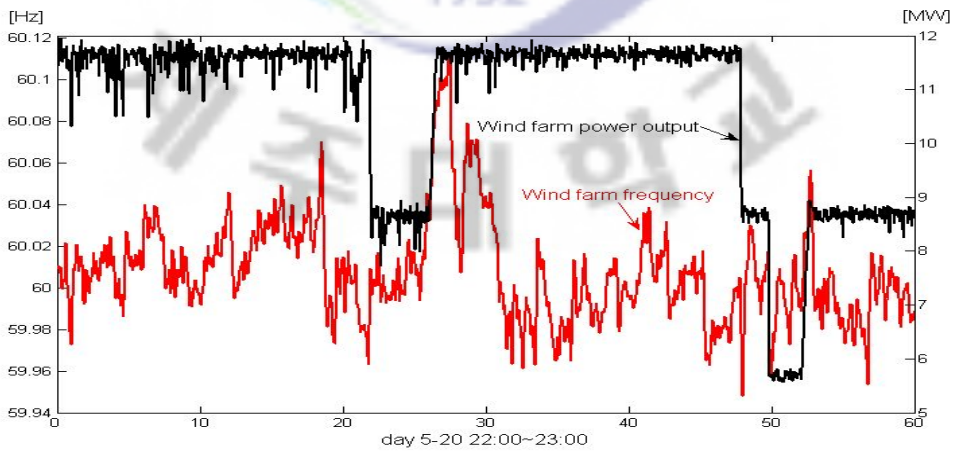




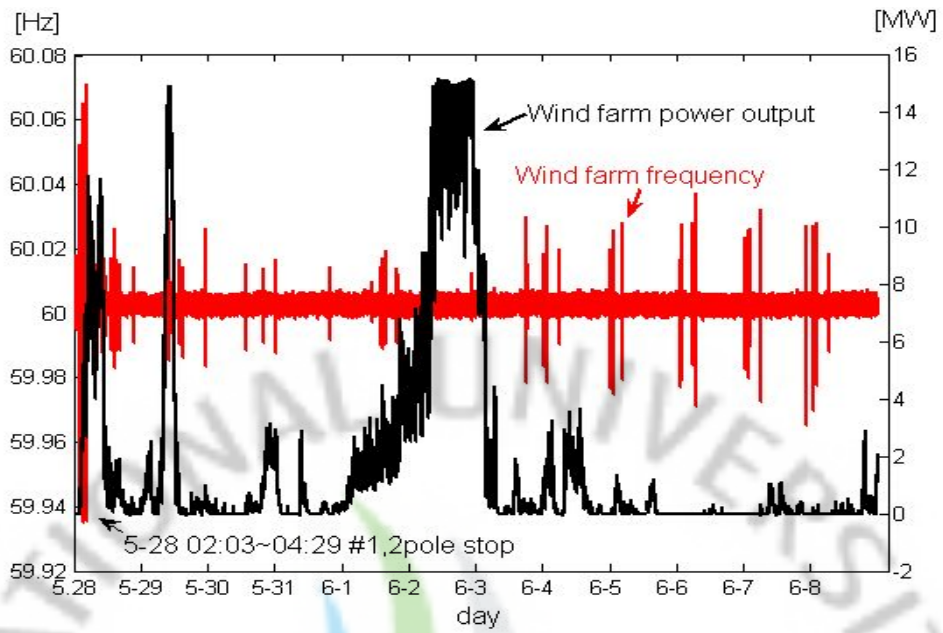
(a) #1, 2Pole 점검기간 중(day 5. 17 ~5. 23)



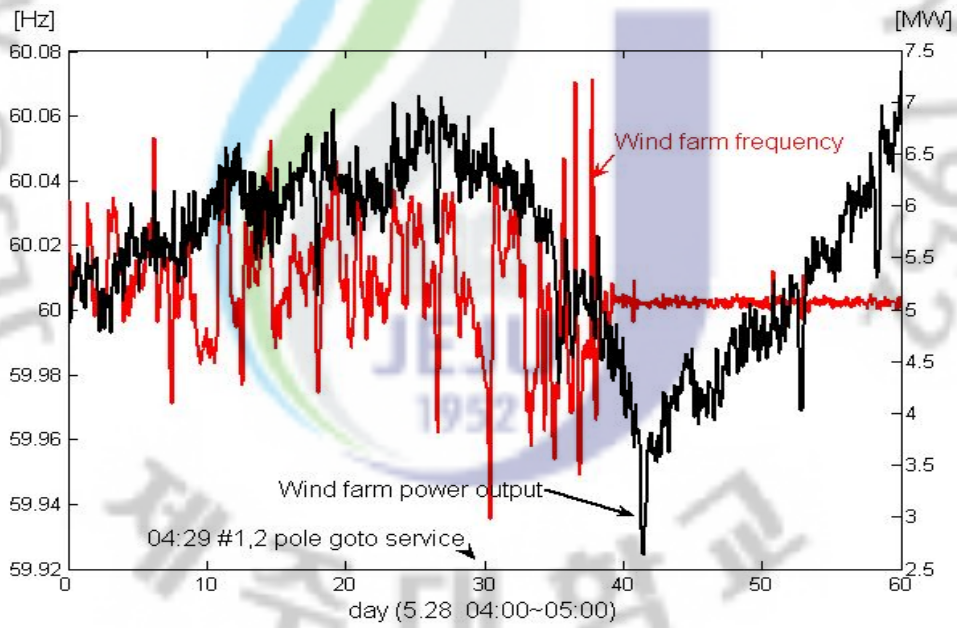
(b) #1, 2Pole 점검기간 중(day 5.17)



(c) #1, 2Pole 점검기간 중(day 5.20)



(d) #1, 2Pole 점검기간 후(day 5.28~6.8)



(e) HVDC 점검기간후 휴전작업 전후(day 5.28)

그림 3 풍력발전량 및 주파수

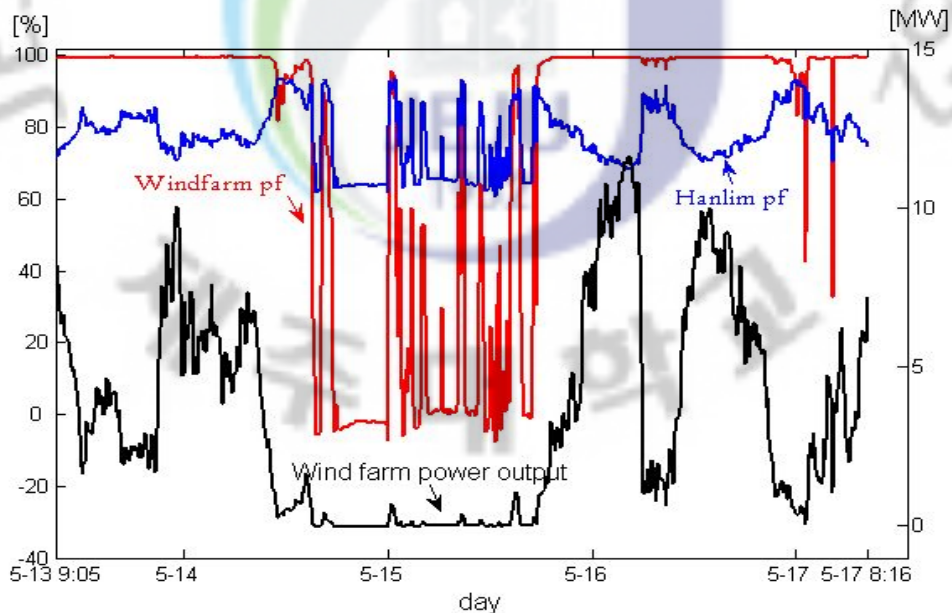
### 3. 역률 분석

역률(pf : power factor)을 분석하기 위해 풍력발전량과 동일하게 전체측정기간 10분 평균치를 적용하였으며 HVDC 점검기간과 정상운전기간별로 분석한 결과를 그림 4와 같이 연계기준에 적합한지 그래프로 나타내었다.

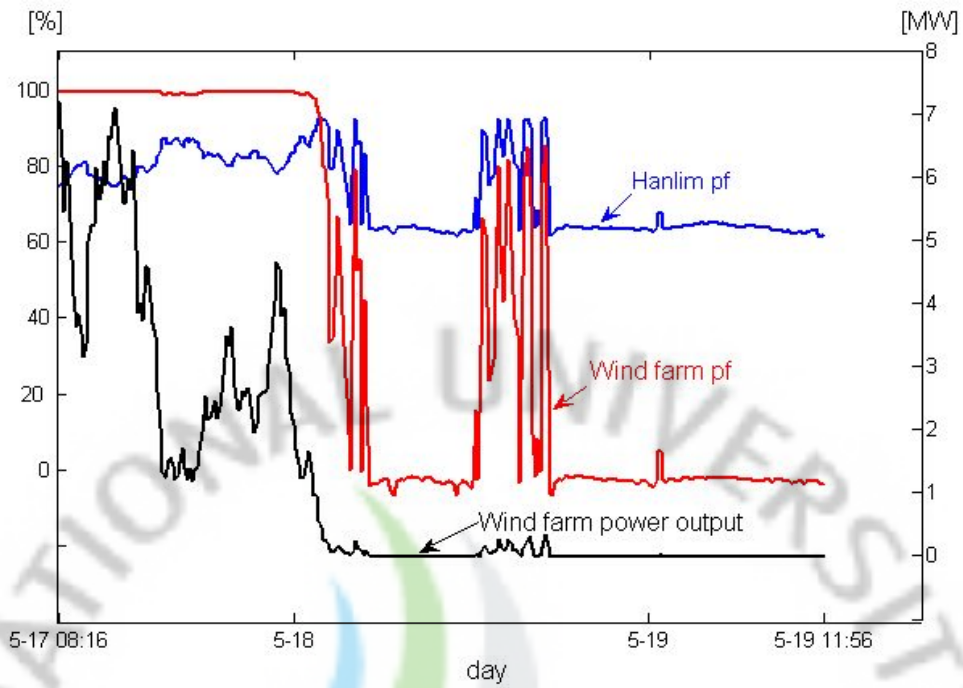
그림 4에서 보는바와 같이 풍력단지측 역률은 풍력발전기 출력이 일정출력 이상에서는 90% 이상 유지하고 있으나, 유효전력이 거의 발생하지 않은 기간에서의 평균역률은 최저 0%로 급격히 떨어지고 변동 폭 또한 크게 나타나고 있다.

그러나, 한림발전소 측의 역률은 평균 80%정도로 나타내고 있으며, 발전량이 거의 없는 경우에도 약 60% 이상을 유지하고 있다.

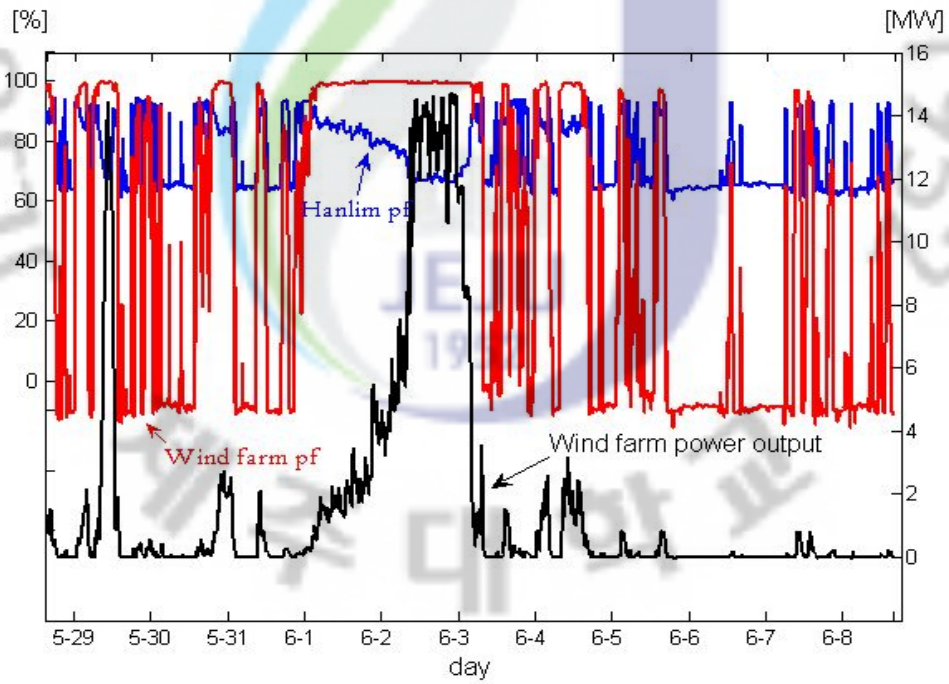
적정역률을 유지하기 위해서는 풍력발전단지 측에서는 일정출력 외에 저출력 이거나 출력이 거의 없는 경우에도 적정역률 유지를 위한 설비개선이 필요하며, 특히 연계점과 근접한 한림발전소 측에서 지상무효전력을 보상하기위한 설비가 요구된다.



(a) #1Pole 점검기간 중



(b) #1, 2Pole 점검기간 중



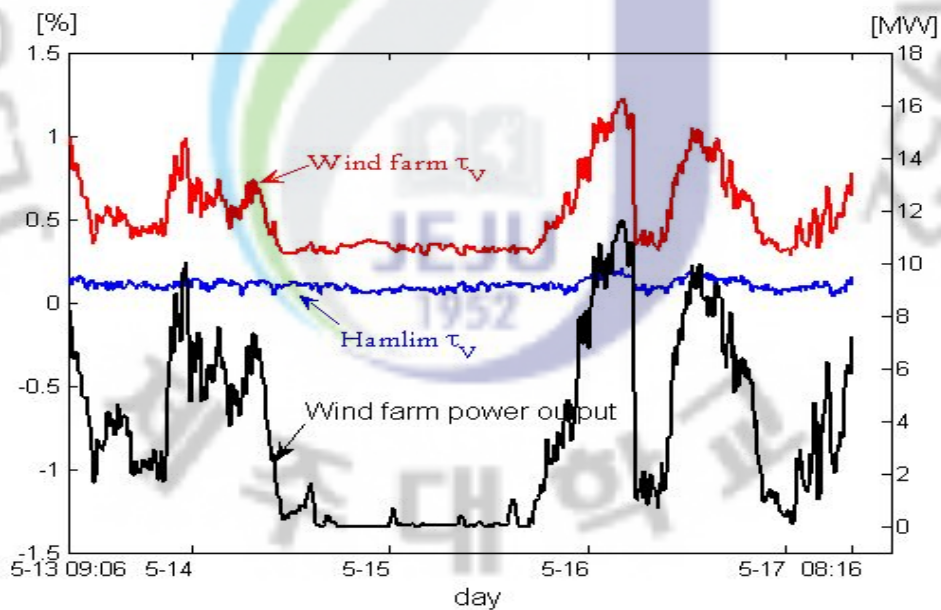
(c) HVDC 점검기간 후

그림 4 풍력발전량 및 역률(pf)

#### 4. 전압·전류 불평형률 분석

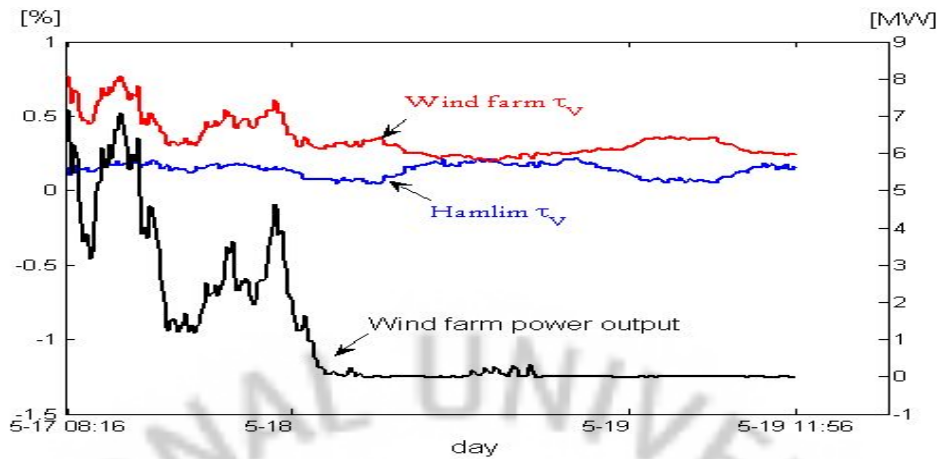
##### 1) 전압불평형률

풍력발전량에 따른 전압불평형률을 분석하기 위하여, 한경풍력발전단지 측에서 측정된 풍력발전량과 해당공급 배전선로 양측에서 측정된 전압불평형률을 각각 측정기간 동안 10분 평균치를 적용하여 그림 6과 같이 그래프로 나타내었다. 그림 6에서 보는바와 같이 전체적으로 전압불평형률은 평균 2% 이하(전기설비기술 기준치 3%)로 양호한 편이다. 특히 그림 (a), (c)에서 풍력발전기 발전량변동이 클수록 풍력발전단지 측의 전압불평형률도 1% 이상 크게 나타나고 있는 반면에 한림C/C 측에서의 전압불평형률은 0.5% 이하로 나타내고 있다. 그림 5의 그래프로 미루어 보아 풍력발전량 변동이 심할 때의 전압불평형률이 1% 정도이므로 그 영향은 전기설비기술 기준치에 비해 아주 미미하다고 볼 수 있다.

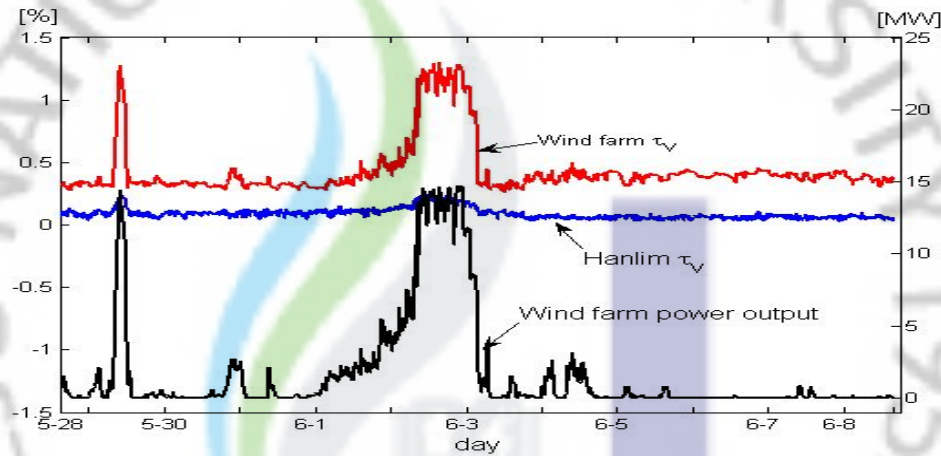


(a) HVDC #1pole 점검기간 중





(b) HVDC #1, 2pole 점검기간 중

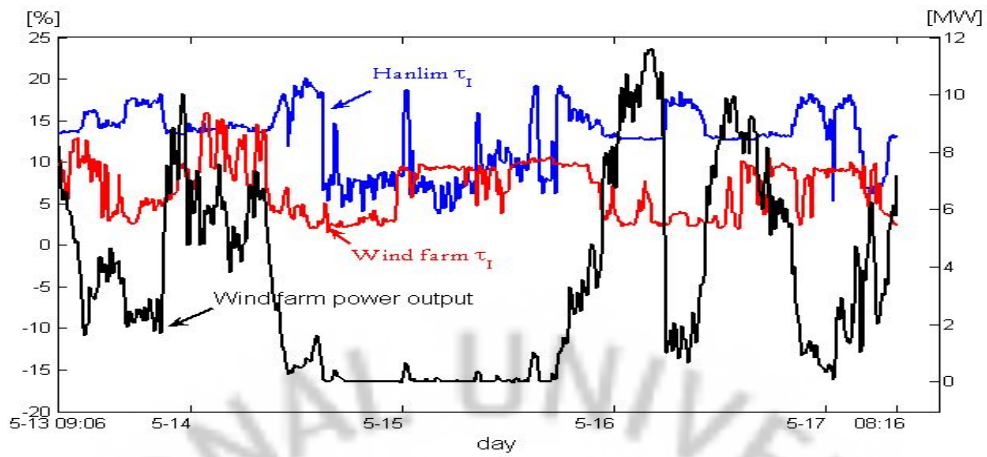


(c) HVDC 점검기간 후

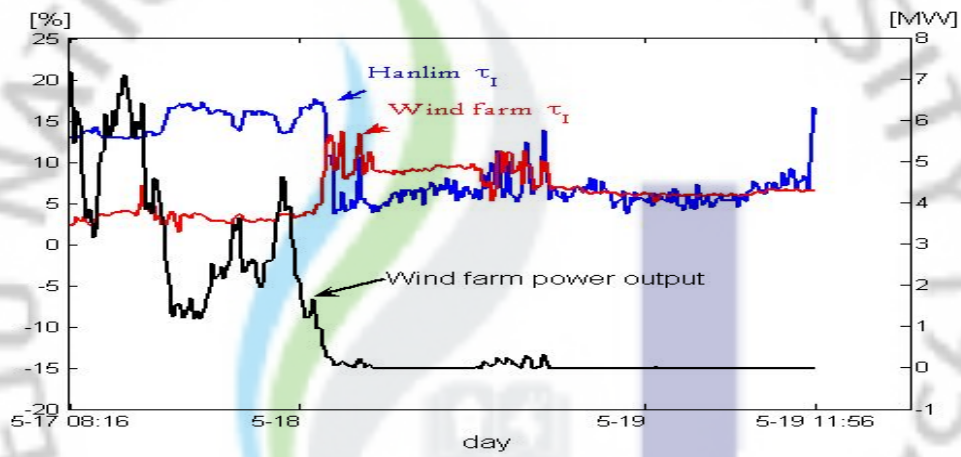
그림 5 풍력발전량 및 전압불평형률( $\tau_V$ )

## 2) 전류불평형률

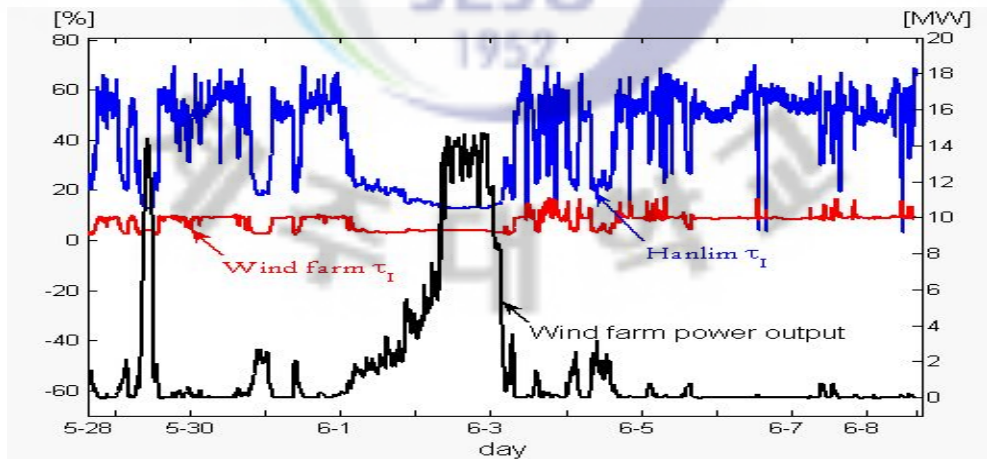
전류불평형률을 분석하기 위해 풍력발전량과 동일하게 전체 측정기간 10분 평균치를 적용하여 분석한 결과를 그림 6과 같이 그래프로 나타내었다. 풍력발전단지에서의 전류불평형률은 20% 이하로 나타나고 있는 반면에, 그림 (c)에서 한림 C/C 측에서의 전류불평형률은 풍력발전량이 일정 출력이상(2MW)으로 운전 중에는 전류불평형률이 20% 이하로 나타나고 있으나, 출력이 거의 없는 경우에는 전류불평형률이 한림C/C 측에서 60% 이상으로 높게 나타나고 있다.



(a) HVDC #1pole 점검기간 중



(b) HVDC #1, 2pole 점검기간 중



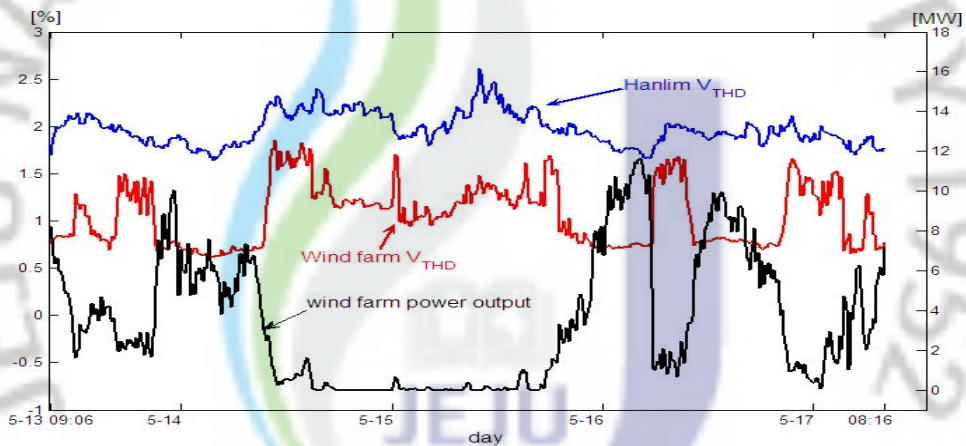
(c) HVDC 점검기간 후

그림 6 풍력발전량 및 전류불평형률( $\tau_I$ )

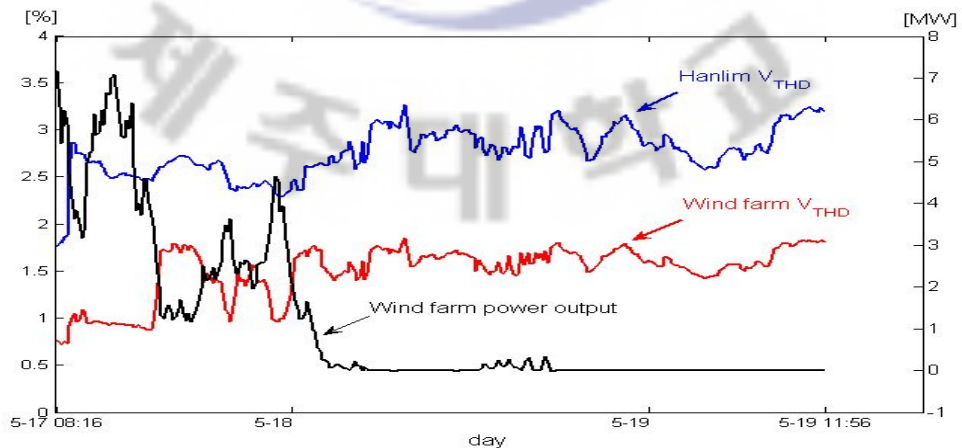
## 5. 고조파 분석

### 1) 전압고조파왜형률

그림 7은 전체 측정시간 10분 평균치의 풍력발전량과 전압총합왜형률의 상관 그래프를 나타내었다. 풍력발전단지 측에서의 전압왜형률은 2% 내외로 유지되고 있으며, 측정기간 동안의 전압고조파왜형률은 국내기준(3% 이하)과 국제기준(5% 이하)내에서 유지되고 있다. 특히 고출력(5월 16일과 17일, 6월 2일)에서의 왜형률은 감소하는 반면에, 발전량이 비교적 적거나 변동이 심한 구간에서 전압파형을 왜곡시키는 것으로 판단된다.

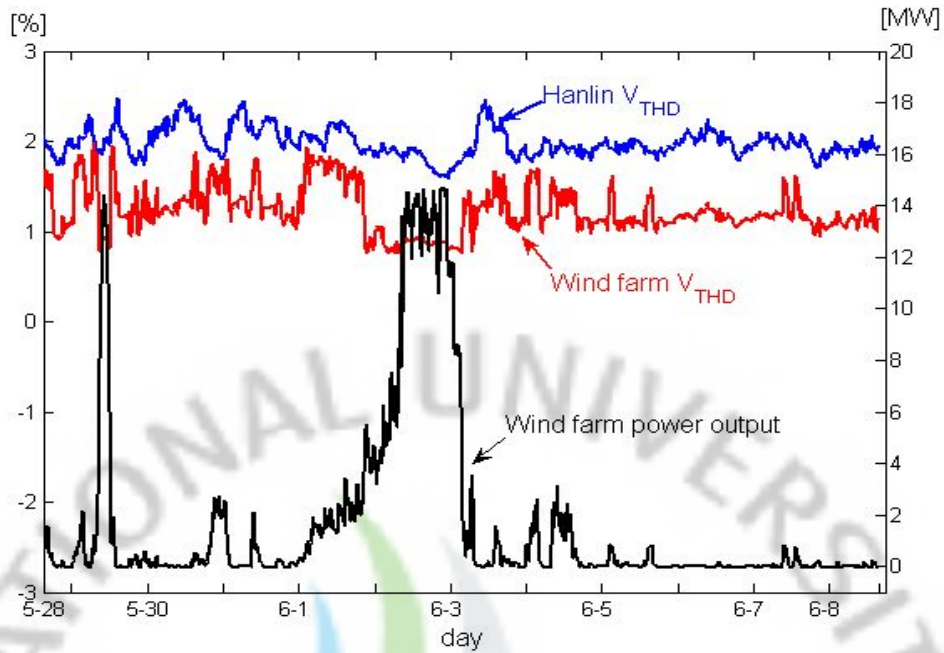


(a) HVDC #1pole 점검기간 중



(b) HVDC #1, 2pole 점검기간 중



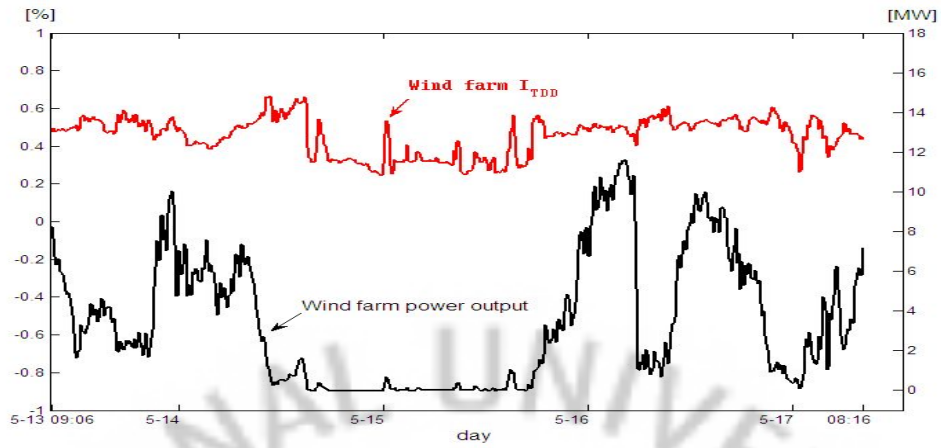


(c) HVDC 점검기간 후

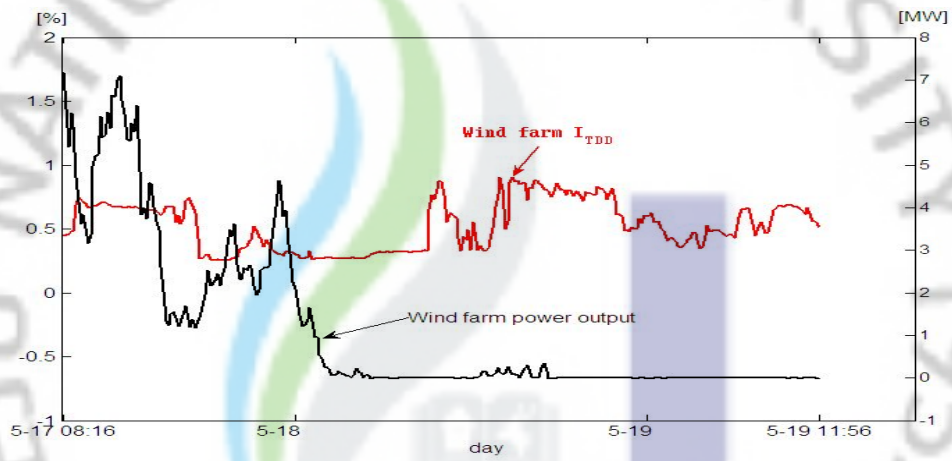
그림 7 풍력발전량 및 전압고조파왜형률( $V_{THD}$ )

## 2) 전류고조파왜형률

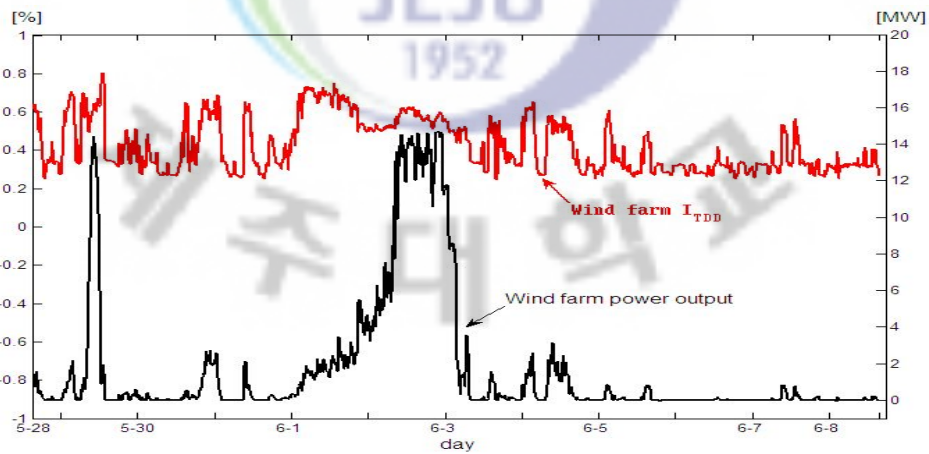
그림 8은 풍력단지측의 10분 평균 풍력발전량과 종합전류왜형률의 상관그래프를 나타내었다. 분산전원 배전계통 연계 기술기준에 명시한 전류의 왜곡정도를 평가하기 위해서는 전류고조파 수요왜형률(ITDD : Current Total Demand Harmonic Distortion)을 사용하는데, 한경풍력 2단계인 경우 총발전용량이 15MW 이므로 최대정격전류는 378A로 가정하였다. 계산과정과 전류고조파 왜곡 판단기준은 2장 5절에서 정리하였다. 그림 8에서 전류고조파왜형률은 발전량이 높은 5월 16일과 6월 2일의 경우, 풍력발전량 변동이 심했음에도 불구하고 전류고조파 왜형률은 0.6% 이하로 유지되고 있으며, 전체 측정기간 동안 전류고조파왜형률은 1% 이하 이내로 유지되고 있어 IEEE 국제기준치(5% 이하)내에서 유지되고 있다. 따라서, 풍력발전으로 인한 전류고조파 왜곡정도는 매우 미미하다고 판단된다.



(a) HVDC #1pole 점검기간 중



(b) HVDC #1, 2pole overhaul 기간 중



(c) HVDC overhaul 기간 후

그림 8 풍력발전량 및 전류고조파왜형률( $I_{TDD}$ )

## 6. 플리커 분석

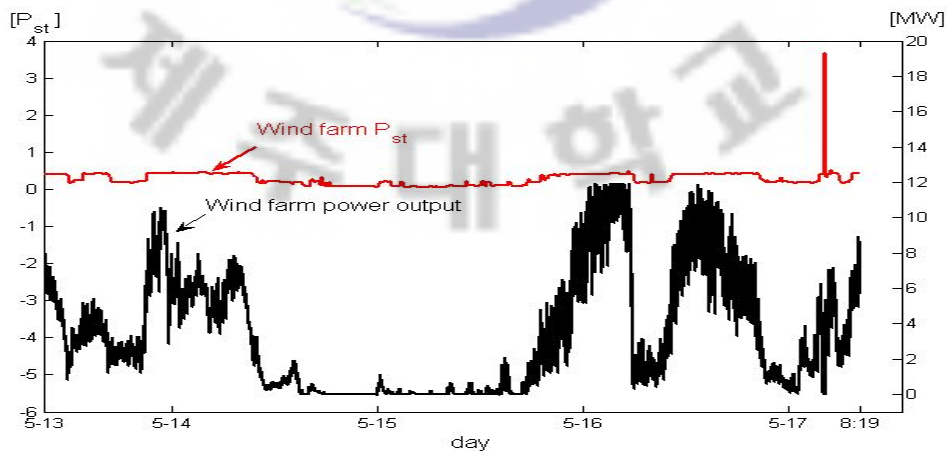
### 1) 단기 플리커지수( $P_{st}$ )

그림 9는 한경풍력단지측에서 측정한 풍력발전량과 단기 플리커지수의 상관 그래프이며, 표 9는 전체측정기간중 플리커지수 기준치를 위반한 사례를 정리하였다. 표 9에서 3회의 플리커지수 기준치를 초과하여 나타나는 경우가 있으나, 전체적으로 단기 플리커지수는 0.5이하로 형성되고 있어 IEC기준치(0.9이하) 이내에 유지되고 있다. 특히 그림 (c)에서 풍력발전량이 크거나 변동이 심한 경우(6월 2일에서 6월 3일) 플리커지수가 0.5이상으로 높게 형성되고 있으며, 특히 고장파급에 의한 단기 플리커지수가 높게 나타나고 있다.

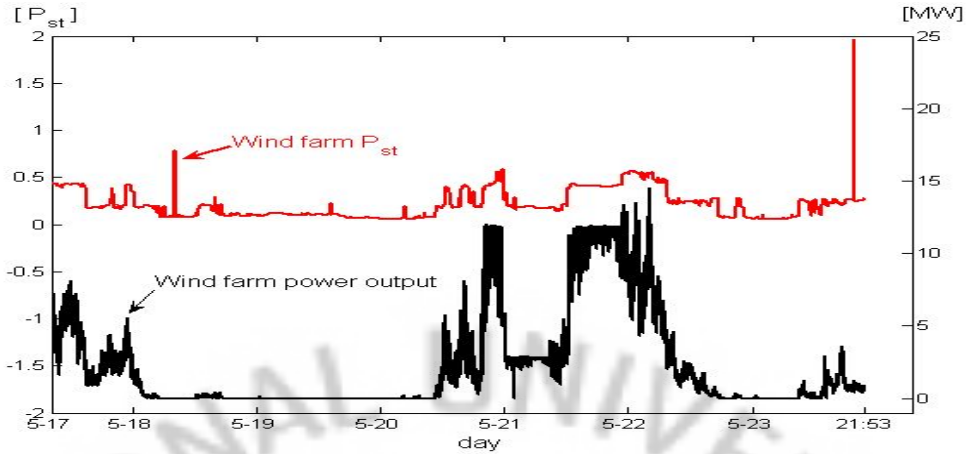
표 9 단기플리커지수( $P_{st}$ ) 위반 분석

일 자	풍력발전량[MW] (10M평균)	단기플리커지수	HVDC 운전상태	비고
5월 17일 04:07~04:17	1.274	3.6718	#1pole overhaul	한경#2 OCR동작 차단기 자동투입1회
5월 23일 19:47~19:57	1.013	1.9682	#1,2pole overhaul	제주GT#1 Trip
6월 2일 20:47~20:57	13.010	1.1916	HVDC 정상운전	-

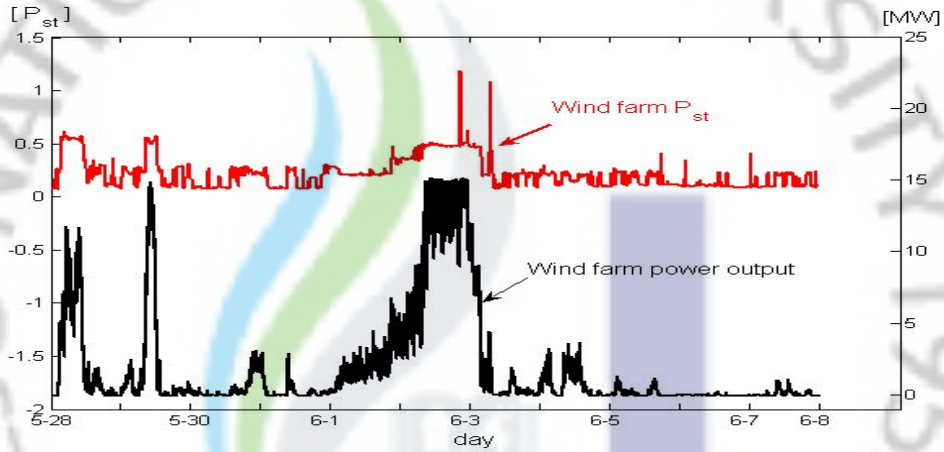
※ 중전압(1kV~35kV) 계통의 플리커 가혹도 지수(계획기준) 기준치 : 0.9이하



(a) HVDC #1pole overhaul 기간 중



(b) HVDC #1, 2pole overhaul 기간 중



(c) HVDC overhaul 기간 후

그림 9 풍력발전량 및 단기 플리커지수( $P_{st}$ )

## 2) 장기 플리커지수( $P_{lt}$ )

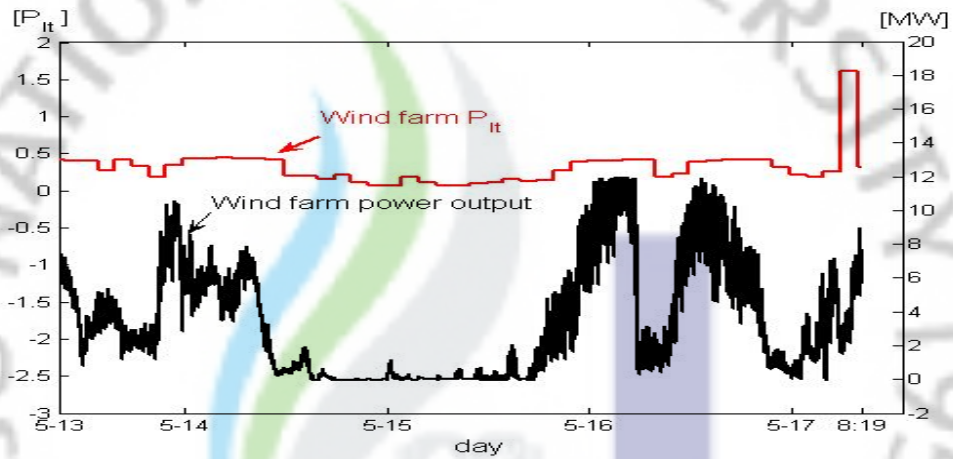
그림 10은 한경풍력단지 측에서 측정된 풍력발전량과 장기 플리커지수( $P_{lt}$ )의 상관 그래프이며, 표 10은 전체 측정기간 중 플리커지수 기준치를 위반한 사례를 정리하였다. 측정기간 동안 2회의 장기 플리커지수 기준치를 초과하여 나타나는 경우가 있으나, 전체적으로 장기 플리커지수는 0.5이하로 형성되고 있어, IEC기준치(0.7이하)이내에서 유지되고 있다. 특히 풍력발전량이 크거나 변동이 심한 경우(5월 22일, 6월 2일, 6월 3일) 장기 플리커지수가 0.5이상으로 높게 형성되고 있으며, 표 10에서와 같이 계통의 고장파급에 의한 저출력에서도 플리커지수가

높게 형성되고 있다.

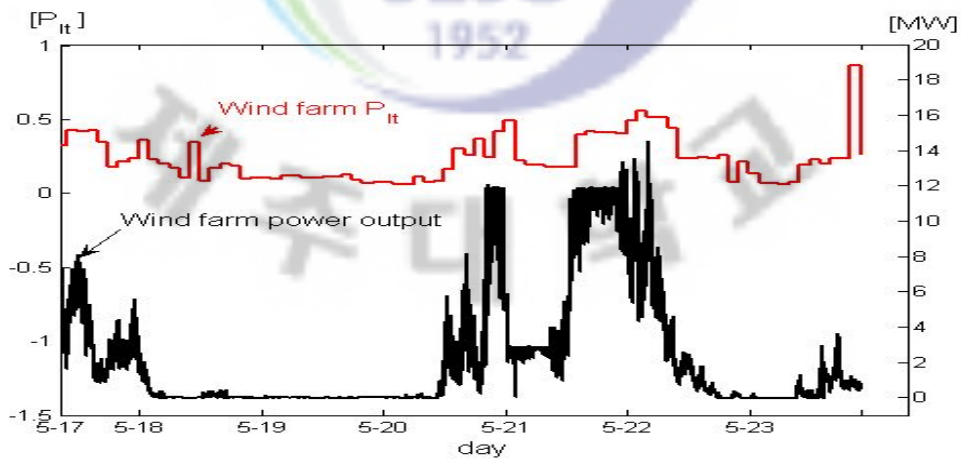
표 10 장기 플리커지수( $P_{it}$ ) 위반 분석

일 자	풍력발전량[MW] (2시간평균)	장기플리커지수	HVDC 운전상태	비고
5월 17일 05:44~07:44	3.74	1.6179	#1pole overhaul	한경#2 OCR동작 차단기 자동투입1회
5월 23일 19:45~21:45	0.75	0.8675	#1, 2pole overhaul	제주#1GT Trip

※ 중전압(1kV~35kV) 계통의 플리커 가혹도 지수(계획기준) 기준치 : 0.7이하

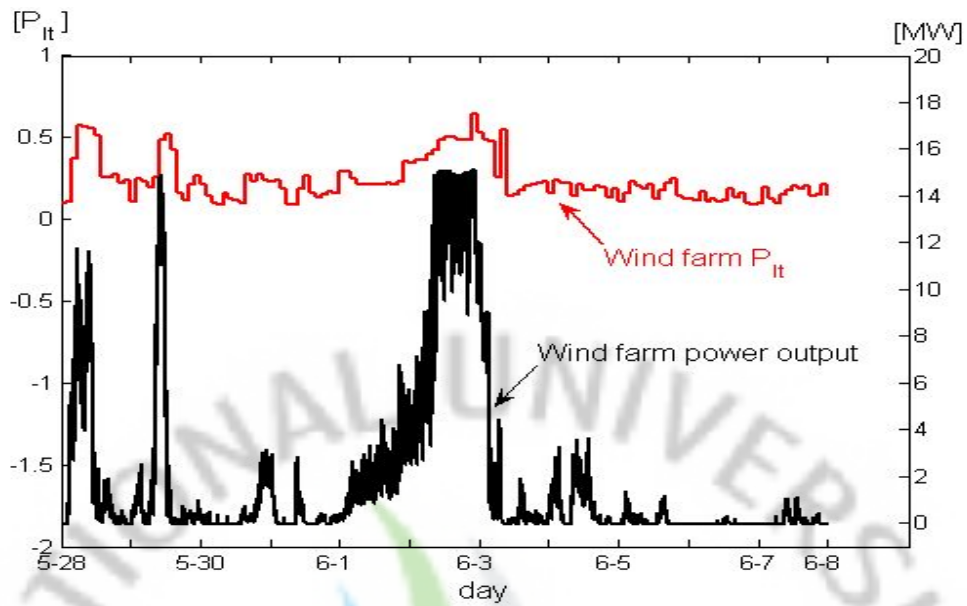


(a) HVDC #1pole 점검기간 중



(b) HVDC #1, 2pole 점검기간 중





(c) HVDC 점검기간 후

그림 10 풍력발전량 및 장기 플리커지수( $P_{it}$ )

## 7. 전력품질 분석 결과 고찰

한경풍력발전단지 풍력발전량에 따른 배전선로의 전력품질 분석 결과와 전력 품질기준치 내에서 운전되는지에 대한 적합여부를 살펴보면 다음과 같다.

### 1) 전압변동률

풍력발전단지 측의 전압변동률은 고출력일 때 전압변동률이 규정범위(22.9kV -1%~+4%)를 초과하여 나타나고 있다. 반면에 한림C/C 측에서의 전압변동률에 영향을 끼치지 않았다. 이러한 영향은 한림C/C 측의 배전용 변압기 OLTC(ON Load Tap Changer)에 의해 전압조정과 동시에 타배전선로의 부하 및 선로의 영향으로 판단된다.

## 2) 주파수

풍력발전량에 따른 주파수 특성으로는 HVDC 점검기간 중에 풍력발전량이 급변동할 때와 제주변환설비가 가압되는 시점에서 제주계통주파수는 규정치에 만족하는 수치이지만 불안정하였다. 반면에 제주변환설비가 주파수 제어운전을 하고 있을 때는 그 영향이 크지 않았다.

제주변환설비가 정지중일 때 제주의 대규모 풍력발전설비가 연계되는 경우, 풍력발전량이 갑작스런 출력변동이나 계통에서 탈락 시에 보다 큰 주파수변동이 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 주파수 유지에 대한 문제도 고려해야 할 것으로 판단된다.

## 3) 역률

풍력단지 측에서의 역률은 풍력발전기 출력이 일정 이상에서는 99% 이상 유지하고 있는 반면, 한림C/C 배전선로 인출지점에서는 풍력발전량의 변화량과 상관없이 저역률로 유지하고 있다. 따라서, 적정 역률을 유지하기 위하여 풍력발전설비 측에서는 저출력에서 적정역률유지를 위한 설비개선이 필요하다. 한림발전소 측에서는 풍력발전단지 연계선로가 연계점에 근접하기 때문에 지상무효전력 보상설비가 설치되면 연계기준에 적합하게 유지될 것으로 판단된다.

## 4) 전압, 전류불평형률

전압불평형률은 측정기간 동안 평균 2% 이하로 유지되고 있으며, 기준치(전기설비기술기준치 3% 이하) 이하로 유지하고 있다. 풍력발전량 변동이 심할 때 전압불평형률이 1% 정도여서 풍력발전량에 따른 전압불평형률에 대한 영향은 아주 작았다.

전류불평형률은 풍력발전량이 일정출력이상(2MW)으로 운전 중에는 전류불평형률이 20% 이하로 나타나고 있으나, 출력이 거의 없는 경우에는 전류불평형률이 한림C/C 측에서 60% 이상으로 높게 나타나고 있다. 그러나, 풍력발전량이 거의 없고, 전용선로로 구성되어 있어 그 영향은 미미하다고 판단된다.

#### 5) 전압, 전류고조파왜형률

전압고조파왜형률은 고출력에서는 감소하는 반면, 저출력이거나 변동이 심한 구간에서는 전압파형을 왜곡시키고 있으며, 측정기간 동안 전압왜형률은 2% 이내로 유지되고 있다. 국내기준(3% 이하)과 국제기준(5% 이하) 이내에서 유지되고 있다. 전류고조파왜형률은 1% 이하 이내에 나타나고 있어, IEEE 국제기준치(5% 이하)이내에서 유지되고 있으므로 풍력발전으로 인한 전압 및 전류고조파 왜곡 정도는 미미하다고 판단된다.

#### 6) 플리커

측정기간 동안 단기·장기 플리커지수는 0.5 이하로 형성되고 있다. 풍력발전량이 크게 변동할 때보다 전력계통에서 고장파급에 의한 플리커 지수가 높게 나타나고 있다. 그러나, 풍력발전량이 크거나 변동이 심한 경우 단기 플리커지수가 0.5 이상으로 높게 형성되고 있으며, IEC기준치(단기 플리커지수 : 0.9 이하, 장기 플리커지수 : 0.7 이하)이내로 유지되고 있다. 반면, 국내기준치(단기 플리커지수 : 0.35 이하, 장기 플리커지수 : 0.25 이하)보다는 높게 나타나고 있다. 따라서, 현행 국내의 플리커 기준치가 국제기준치보다 가혹하게 운영되고 있는 것으로 보여 플리커 기준 개정이 필요하다고 본다.



## IV. 결 론

본 연구는 2009년도 해남~제주 간 HVDC 점검기간을 전후하여 이루어졌다. 한경풍력발전단지 2단계와 연계한 배전선로에 전력품질 분석 측정장비를 설치하여 취득한 데이터를 통하여 풍력발전량에 따른 전력품질을 분석하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

첫째, HVDC 점검기간 중 한경풍력발전량이 급격히 변동할 때, 제주계통의 주파수가 규정치를 만족하지는 하지만, 연계선이 정상운전 할 때 보다 주파수 변동이 심하게 나타났다. 연계선이 정지중일 때 제주의 대단위 풍력발전설비가 연계되면 풍력발전출력이 급변동하거나 계통에서 탈락할 수 있으며, 이에 따라 주파수 변동도 비례하여 나타날 것으로 예상되므로 주파수 유지를 위한 대책이 필요하다.

둘째, 풍력발전량이 일정출력 이상일 때에는 전력품질이 연계기준치 이내에서 운전되고 있는 반면, 저출력이거나, 발전량이 크게 변동할 때 또는 제주계통의 고장 등 이상 현상이 발생할 때에는 전압변동, 역률, 플리커 등에서 전력품질 기준치를 벗어나고 있다. 그러나, 한림발전소에 무효전력보상설비가 설치되면 보다 낮은 전력품질이 유지될 것으로 기대된다. 또한, 향후 제주의 대규모 풍력발전설비가 연계될 전망임을 감안할 때, 안정적 전력품질유지를 위한 적절한 보호협조, 설비개선, 연구 등이 지속적으로 필요하다.

이와 같이 제주계통의 전력설비가 공급의 안정성을 확보하고, 경제성을 조화롭게 추구하면서, 신뢰도 높은 전기품질을 유지하기 위해서는 전력품질에 대한 지속적인 연구와 함께 관련회사들과 긴밀한 협조를 유지하는 것이 무엇보다 필요하다고 하겠다.

## 참 고 문 헌

- [1] 한국전력거래소 제주지사, 제주지역 비중양급전 발전기 품질측정 및 계통영향 분석연구, p2, 2005. 4.
- [2] Richard Piwko, Dale Osborn, Robert Gramlich, Garry Jordan, David Hawkins, and Kevin Porter, Wind Energy Delivery Issues : Transmission Planning and Competitive Electricity Market Operation, 2005.
- [3] 고성민, 풍력발전시스템 증가에 따른 제주 전력계통 특성해석, 석사학위논문, 2006. 12.
- [4] Young-Hwan Kim, The Capacity Credit of Wind Power in Korea-Jeju, IEEE T&D 2009 IEEE Transmission&Distribution Conference in Asia 2009, PO3-4, October 2009.
- [5] 한국전력공사 배전처, 분산형 전원 배전계통 연계기술, p7, 2007. 4.
- [6] 한국전력 중앙교육원, 전력계통운영기준II, p13, 2008. 6.
- [7] 한국전력거래소 제주지사, 제주지역 비중양급전 발전기 품질측정 및 계통영향 분석연구, p52, 2005. 4.
- [8] 한국전력공사 전력연구원, HVDC overhaul 및 풍력발전을 고려한 제주계통 전력 품질분석, p5, 2008. 7.
- [9] Woo-Kyu Chae, Gi-Gab Yoon, Jae-Eon Kim, Ji-Hon Han, Power Quality Analysis of Jeju System Considering HVDC Overhaul and Wind Turbines, Journal of the Korean Institute of Illumination and Engineers Vol. 22, No.1, pp. 132~140, January 2008.
- [10] R. Sastry Vedam Mulukutla, S. Sarma, Power Quality VAR Compensation in Power System, pp. 180~184, 2009.
- [11] 한국전력공사 배전처, 분산형전원 배전계통 연계기술 해설서, p7, 2006.

## 감사의 글

대학원을 마치게 된 지금까지 4년의 시간을 돌아보면 긴 시간인 것 같기도 하지만, 한편으로는 배움의 과정에서 참으로 값진 추억을 무수히 경험하였기에 짧은 시간으로 느껴지기도 합니다. 제가 연구하면서 얻은 지식과 이 논문이 여러 가지로 부족함이 많으나, 제가 몸담고 있는 한국전력공사와 제주대학교 및 제주도의 발전을 위하여 활용될 수 있기를 기대해 봅니다.

그 동안 여러 가지로 부족한 저를 아낌없는 격려와 가르침으로 지도하시느라 애쓰신 김세호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 다양한 전공분야와 그 외에도 많은 가르침을 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님께도 감사드립니다.

대학원 수강을 배려하고 이해하여 주신 박갑호 송변전팀장님, 한경남 전력소장님, 고승선 전 변환소장님, 진운림 변전팀장님과 아무 불편 없이 대학원 생활을 협조해 준 변환소와 급전분소 직장 선·후배님들에게도 감사의 마음을 전합니다.

본 논문의 자료를 제공해 주신 전력연구원 채우규 차장님, 바쁘신 가운데에도 프로그램 사용에 도움을 주신 부창진 박사님, 많은 조언과 격려를 해 주신 전력계통연구실 선배님이신 김태익 전력공급팀장님, 고석범 차장님, 김영환 과장님께 감사드립니다. 자료정리에 힘써 준 같은 연구실에 있는 지윤, 영준이에게도 고마운 마음을 전하며, 졸업 후 원하는 직장을 구하길 바랍니다. 그 외 대학원 선배 여러분에게도 감사드리며, 평생 인연이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

늦깎이로 대학원을 다닌다며 항상 뒤에서 격려해 주시고 헌신적인 사랑으로 지켜봐 주신 부모님, 언제나 정신적으로 든든한 후견인이 되어 주신 형님·형수님들의 묵묵한 관심이 제게 큰 힘이 되었습니다. 이젠 모두 가정을 이룬 동생들에게도 격려해 주어 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

장인·장모님께는 죄송하다는 말씀과 감사하다는 말씀을 동시에 드리려 합니다. 추운 겨울 갓 태어난 쌍둥이 아들의 육아를 부탁드려 고단하게 해 드린 점 송구스럽게 생각하며, 사랑으로 아이들을 돌보아 주셔서 아이들이 밝게 자라게

해 주신 점 감사드립니다. 항상 자기 일처럼 도와주고 화목한 가정을 유지할 수 있도록 해 주신 처남·처형내외분들께도 감사한 마음을 전합니다.

끝으로 결혼 후 셀 수조차 없는 긴 시간 동안 학업에 매달리느라 집을 비웠어도 묵묵히 내조해주고, 어린 자식들을 건강하게 잘 키워온 사랑하는 아내 문희에게 이 작은 기쁨을 바칩니다. 그 동안 아빠와 함께할 시간을 빼앗겨 온 정환이와 재환이 쌍둥이 형제! 예쁜 딸 지윤이! 너무도 미안하고, 건강하고 밝게 자라주어 고맙다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들의 도움이 참으로 많지만 하나하나를 되새기지 못하여 죄송합니다. 그분들의 기대에 어긋나지 않도록 최선을 다하는 삶을 살도록 노력하겠습니다.

길의 끝은 언제나 또 다른 길의 시작을 의미하듯이, 대학원 과정이 배움의 끝이 아니라 한걸음 더 나아가기 위한 새로운 시작이라 생각하며, 내일은 또다시 새로운 길을 찾아서 시작하겠습니다.

2009년 12월  
변균익 배상