



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

분산전원이 연계된 배전계통의
보호계전기 오동작 현상 분석

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

電氣工學專攻

洪 振 哲

2011



분산전원이 연계된 배전계통의 보호계전기 오동작 현상 분석

指導教授 金 世 鎬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011 年 12 月

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科 電氣工學專攻

洪 振 哲

洪振哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2011 年 12 月

審査委員長 이 개 명 
委 員 김 호 민 
委 員 김 시 호 



목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서론	1
II. 분산전원 모델 선정 및 전력측정	3
2.1 분산전원	3
2.2 분산전원 모델 선정	5
2.3 OCGR 오동작 현상	6
2.4 전력품질 측정	6
III. 보호계전기 오동작 현상 분석	11
3.1 풍력발전기와의 연관성 검토	11
3.2 영상전류의 측정 및 분석	13
3.3 고조파의 측정 및 분석	15
3.4 OCGR 오동작 해결 방안	23
IV. 결론	26
참 고 문 헌	27



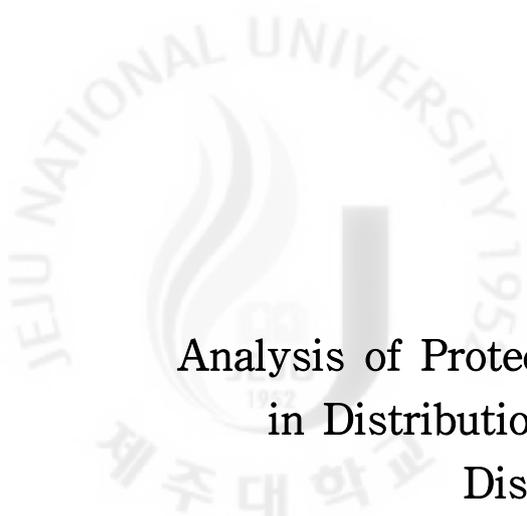
LIST OF FIGURES

그림 1 제주 월정풍력의 전력계통 구성도	5
그림 2 전압의 실효치 파형	9
그림 3 전류의 실효치 파형	9
그림 4 R상과 N상의 전류 파형	10
그림 5 풍력발전기 출력에 따른 영상전류의 측정	12
그림 6 영상전류 및 상전류 크기 비교	12
그림 7 영상전류 파형	14
그림 8 영상전류 파형 벡터해석	15
그림 9 R상 전압의 고조파 성분 파형	16
그림 10 R, S, T, N상 전류의 고조파 성분 파형	17
그림 11 N상 전류의 고조파 성분 정밀 파형	18
그림 12 변압기류 히스테리시스 특성곡선	20
그림 13 고조파(영상분)와 중성선 전류와의 관계	21
그림 14 영상전류 및 고조파의 흐름도	22
그림 15 Zig-zag 변압기의 결선과 벡터도	24
그림 16 고장 시 사고지점에 따른 동작특성	25



LIST OF TABLES

표 1 분산전원의 분류	4
표 2 전력품질 분석기의 사양	7
표 3 풍력발전기 계통 연계에 따른 영상전류 측정	11
표 4 R, S, T상 전압의 고조파 성분 측정	16
표 5 R, S, T, N상 전류의 고조파 측정	17
표 6 변압기류 여자전류에 의한 고조파의 예	20



Analysis of Protective Relay Malfunction Symptoms in Distribution System Interconnected with Distributed Generations

Jin-Cheol Hong

Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

Supervised by professor Se-ho Kim

Summary

A systemic investigation conducted through the experiment for the causes of malfunctions failure on over current ground relay of distribution system which is connected to distributed generation (wind turbines). Consequently, it was comprehended that the zero-sequence current flowing in the neutral wire induces this behavior.

Distributed generation to the distribution system that uses linked to the wiring to the transformer primary side winding

Y-Y KEPCO and neutral and ground because it uses the earthing, the zero-sequence current can be increased by an unbalance load current, harmonic current and imbalance of distribution system.

As the solutions of these problems, the setting parameters change of protective relay, installation of zero-harmonics suppressor and directional over current ground relay were suggested.



I. 서 론

우리나라는 에너지원의 97%를 수입에 의존하고 있으며, 2011년 에너지수요 전망 보고서의 통계에 따르면 올해 에너지수입액은 전년대비 34.9% 증가한 1,641억 달러로 역대 최대를 기록할 것으로 추측된다. 국제적으로는 1, 2차 오일쇼크와 1997년 교토 의정서 이후로 에너지문제와 환경문제가 심각하게 대두되고 있으며, 후쿠시마 원전사고로 인해 원자력 발전은 더 이상 화석에너지원을 대체할 자원으로 주목받지 못하는 실정이다.

이에 에너지문제와 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 방법으로 아직까지는 대체에너지밖에 없다고 결론짓고, 선진국은 물론 국내에서도 대체에너지원 개발에 전력을 다하고 있다. 우리나라 또한 스마트그리드 구축 및 개발과 관련된 국가사업이 활발히 전개되면서 풍력발전, 태양광발전, 소수력발전, 메탄가스발전 등 신재생에너지를 포함한 다양한 형태의 분산전원(Distributed Generations : DG)의 보급이 확대되고 있다.

분산전원의 특성상 독립형태보다는 계통연계 형태로 운전되어야만 더욱 효율적으로 활용할 수 있다. 또한, 대부분 소용량의 분산형태로 주로 기존의 전력계통 중에서도 배전계통에 연계되어 운전되고 있으며, 이는 곧 부하지역에 발전시스템이 위치하고 연계됨으로써 기존의 단방향성이 아닌 양방향성 전력의 흐름을 제어해야 하는 복잡한 형태의 운전 기술이 필요하다. 기존 배전계통은 전력설비보호 및 인체 안전등을 고려하여 선로 상의 고장으로 인한 과전류를 검출하여 해당 선로 상에 설치되어 있는 차단기를 개방하는 보호협조체제로 되어 있으며, 특히 배전용 변전소의 경우 동일변압기 동일모선으로부터 다수의 배전선이 각각 차단기를 통하여 인출되어 배전선마다 독립적으로 해당 선로의 사고 발생 시 고장전류를 검출하여 차단하도록 하는 보호방식이 적용되고 있다.

배전계통에 분산전원이 다수 도입되는 경우, 부하만을 고려하여 적용되고 있는 과전류방식의 보호협조체제에 여러 가지 문제점이 일어날 수 있다. 실제 분산전원을 배전계통에 연계함에 있어 분산전원용 변압기 1차 측을 Y결선으로 하여 한국전력과 중성선 및 접지방식을 동일하게 사용하게 된다. 이로 인해 분산전원이 연계된 배전계통의 타 수용가에 의한 부하 불평형 및 고조파의 발생으로 인해 설비의 열화로 인한 소손, 통신장비 파손 등의 문제가 발생되고 있다. 그리고 영상전류에 의한 지락과전류계전기(Over Current Ground Relay : OCGR) 오동작이 빈번하게 발생하여 갑작스러운 전력차단으로 인해 풍력발전 등 분산발전원의 심각한 기계적 스트레스로 파손이 우려되고 있다.

본 논문에서는 실제 분산전원이 연계된 배전계통에서의 지락과전류계전기의 오동작을 발생시키는 요소들에 대해 시험을 통해 체계적으로 분석하고 정확한 원인을 파악하여 대책을 수립함으로써 분산전원이 배전계통연계에 안정화에 기여하고자 한다.



II. 분산전원 모델 선정 및 전력 측정

2.1 분산전원

분산전원(Distributed Generations : DG)이란 원자력이나 대용량 화력 등과 같은 집중적이고 대용량이 아닌 소용량의 전력저장시스템이나 발전시스템을 일컫는 말로서 수력, 태양광, 바이오, 풍력 등의 신·재생에너지, 소용량의 열병합발전시스템, 전기 등을 이용한 전력 저장시스템을 예로 들 수 있다. 분산전원의 다양한 정의들이 현존하는데 열거하면 다음과 같다.

- 1978년 Public Utility Regulatory Policies Act(PURPA)에서 허가된 설비
- 배전계통의 설비와 연계된 발전소
- 병원이나 호텔 등의 장소에 설치된 상업용 백업 디젤발전기
- 하드웨어 스토어에서 판매하는 주거용 백업 발전기
- 전기사업자가 전압보상이나 그 외 신뢰도 향상을 위해 변전소에 설치하는 발전기
- 저압 100kW, 고압 3MW 이하의 용량을 가지는 발전소

본 논문에는 분산전원이라는 용어에 대해 "수용가 측에 위치한 소규모 발전기" 라는 일반적인 정의를 사용하였으며, 발전기의 형태, 이용형태, 소유 및 운용권한, 계통과의 연계운전, 역조류의 유무에 따라 표 1과 같이 분류될 수 있다.

표 1. 분산전원의 분류

분류기준	분산전원의 형태
발전기술	가스터빈, 가스엔진, 디젤엔진, 소수력, 연료전지, 태양광, 풍력, 저장 (2차전지, Fly-wheel, 초전도)
발전설비	회전기(동기기, 유도기), 정지기
이용형태	발전전용, 열병합발전, 저장 및 발전
소유 및 운용권한	전기사업자용, 비전기사업자용
계통과의 연계운전	연계운전형, 단독운전형
역조류의 유무	역송가능형, 역송불가능형

분산전원은 기존 중앙 집중형의 단방향적인 전력 시스템이 지닌 비효율성을 극복할 수 있는 핵심 전원설비이다. 분산전원의 보급은 한전으로부터 전력을 받아 사용하기만 했던 소비에서 벗어나 이제는 직접 전기를 생산, 소비하고 남은 전력은 판매도 가능한 프로슈머(prosumer)의 개념을 등장시켰다.

최근 신재생에너지 기술이 발달함에 따라 분산전원이 곧 신재생에너지 전력망을 지칭하는 형태로 많이 이해되고 있다. 이런 현상은 소형 열병합 발전과 소형디젤 발전이 주류였던 현재까지의 분산전원에서 완전히 벗어나 신재생에너지 클러스터 중심의 새로운 미래 분산전원을 견인할 것으로 기대된다. 그러나 이러한 신재생에너지원의 경우 기존 상용 계통에 비해 전원용량이 작고 특히 기후 등의 영향으로 발전량이 불안정하기 때문에 현재로서는 100% 자립운전이 어려운 실정이다. 여기에 기존 전력 계통에 연계되면서 발생하는 전력 품질에 대한 논란도 여전하다.

2.2 분산전원 모델 선정

제주시 구좌읍 소재의 월정풍력은 1.5 MW급 풍력발전기로서 2006년 2월부터 상업운전을 개시하여 현재까지 운전되고 있으며, 전력계통 구성은 그림 1과 같다.

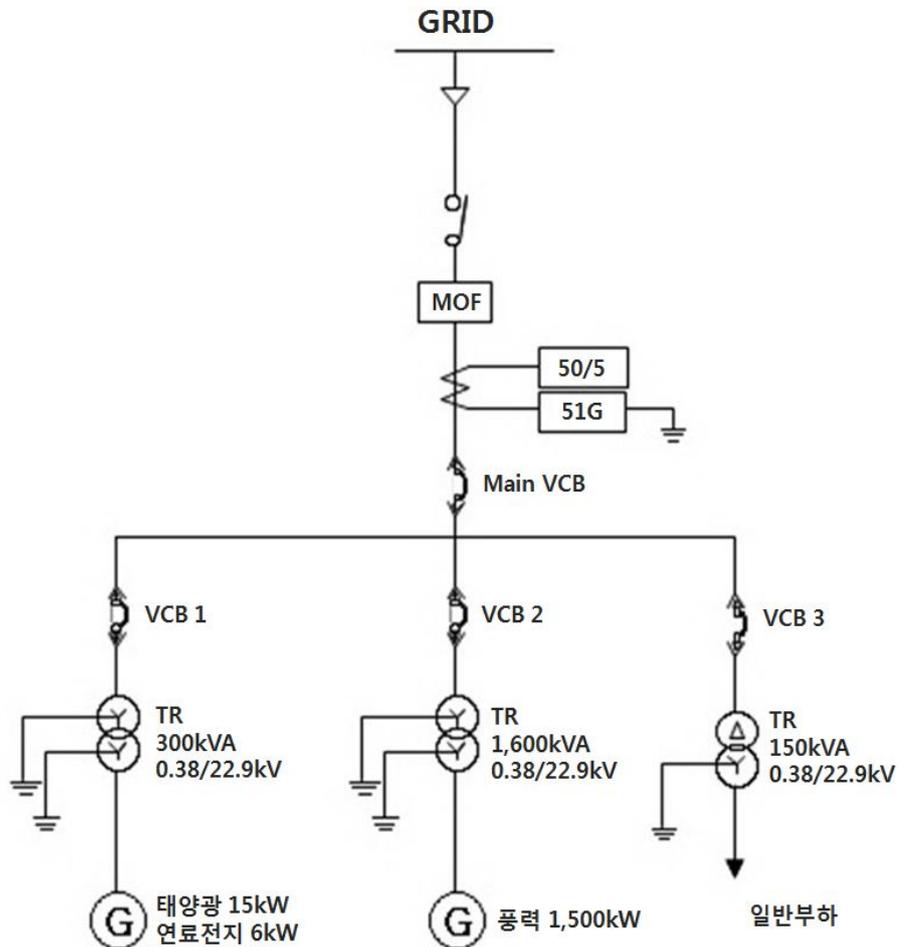


그림 1. 제주 월정풍력의 전력계통 구성도

성산 S/S로부터 약 24.478 km 떨어진 부하 말단에 1.5 MW 풍력발전기가 연결되어 있다. 또한, 성산 S/S에서는 수용가 및 제주 행원 풍력단지의 전력 연계 등 분산전원이 연계되어 계통이 운전하고 있다. 계통의 주요 부하로는 어장의 모터 전원이 주요 전원으로 분석된다. 모터 전원의 경우 기동전류가 제일 큰 것이 문제점으로 나타나고 있으며, 월정풍력의 경우 순간 정전이 자주 발생되고 있는 것도 이러한 계통의 부하가 일부 원인을 제공하는 것으로 판단된다.

2.3 OCGR 오동작 현상

제주 월정풍력에서 보호계전기 중 지락과전류계전기(OCGR)가 동작하여 Main VCB가 차단되는 현상이 수시로 발생되고, 이로 인해 정전이 하루 2~3차례 정도 발생하고 있다. 원인으로는 중성선에 과도한 영상전류가 흘러 발생되고 있으며 갑작스러운 정전으로 인해 풍력발전기 타워 및 블레이드에 Stress 증가 및 심각한 파손의 위험이 발생되고 있다. 또한, 통신설비 및 일반부하의 고장이 많고, 실험 Data 손실이 발생 되고 있다.

지락과전류계전기의 동작되는 때에 풍력발전기가 설치된 구내는 물론 22.9 kV 수전측 S/S에도 아무런 고장이 없었다.

2.4 전력품질 측정

지락과전류계기(OCGR)를 오동작 시키는 영상전류의 발생 원인을 분석하기 위하여 전력분석기 및 오실로스코프를 이용하여 전력품질을 측정하여 검토하였다.

표 2. 전력품질 분석기의 사양

SPECIFICATIONS		
Input	Voltage	Four voltage inputs, A, B, C, neutral to ground voltage
	Current	Four current inputs, phase A, B, C, and neutral current
	Circuit Type	Single phase split phase, 3-phase wye, 3-phase delta
	Impedance	5 Megaohm
	Digital	8 selectable inputs and 8 outputs through external I/O (optional)
Measurement range and capability	Voltage	5-750 VAC and 0-800 VDC
	Current	0-10,000 Amps through external current clamps (0-3 VAC input)
	Frequency	DC, 45 to 65 Hz, and 400 Hz
	Sample Rate	256 samples per cycle, (nominal 15.3 kHz @ 60 Hz, 12.8 kHz @ 50 Hz), 400 Hz mode; 32 samples per cycle (nominal 12.8 kHz)
	Peak Detector	Sampling at 4 MHz
Measurement capability	Voltage and Current	True RMS (minimum, maximum, and average), peak (high, low, abs), waveform, instantaneous
	Power	Watt, VAR, VA, power factor, phase angle, unbalance
	Energy /Demand	Watt-hours, var-hours (supplied, delivered, and total), thermal demand
	Transient	250 nanosecond / 4 MHz peak detect
	Harmonics	To 60 rd voltage, current and power, THD, meets IEC61000-4-7
Flicker	P _{st} , P _{lt} , instantaneous, meets IEC61000-4-15, IEC 868	
Measurement accuracy	Voltage, Current	±0.05% of full scale 0.1% of full scale (VA, VAR, Watt, PF)
	Energy	0.1% of full scale

(표 2 계속)

Recording and data storage continous or by exception recording rate		Adjustable from one cycle up to one week, multiple rates per measurement type
Data Storage		10 GB Hard Drive, 1.44 MB 3.5 inch Floppy, 64 MB RAM
Event triggering voltage and current		All measured or calculated values; internal and external Up to 32 triggers on any measurement, pre-trigger up to one second, post trigger unlimited
Communication s	Ethernet	TCP/IP, 10BaseT
	Modem	56 kBps, V.90 (internal)
	Serial	RS232
	Parallel	Centronics for local printer
User interface	Display	12.1 inch Active color Hibrite SVGA display with fully sealed Touchscreen
	Keyboard	84 key QWERTY, sealed, backlit
Real time clock	Internal	1 sec/day at 77°F(25°C), 4 seconds per day over temperature, keeps time on loss of power.

우선 월정풍력의 전원 품질을 분석하기 위하여 전원계통의 전압을 분석하고 또한 풍력발전 시스템이 동작했을 때와 정지하고 있을 때의 전류 파형을 분석하였다.

그림 2는 풍력발전 시스템이 정상적으로 운전 될 때 그림 1에서 풍력발전용 VCB 1 앞에 있는 PT에서 측정한 3상 상전압과 선간전압의 10분 평균 실효치를 나타내고 있다. 이 전압의 파형을 보면 최대 선간전압은 22.9 kV, 최소전압은 22.47 kV를 나타내고 있고, 이 전압의 공칭 전압은 22.9kV이다. 따라서 최대 공칭 전압변동률은 약 2.2% 정도이어서 한전계통에서 공급되는 전원은 큰 문제가 없는 것으로 볼 수 있다

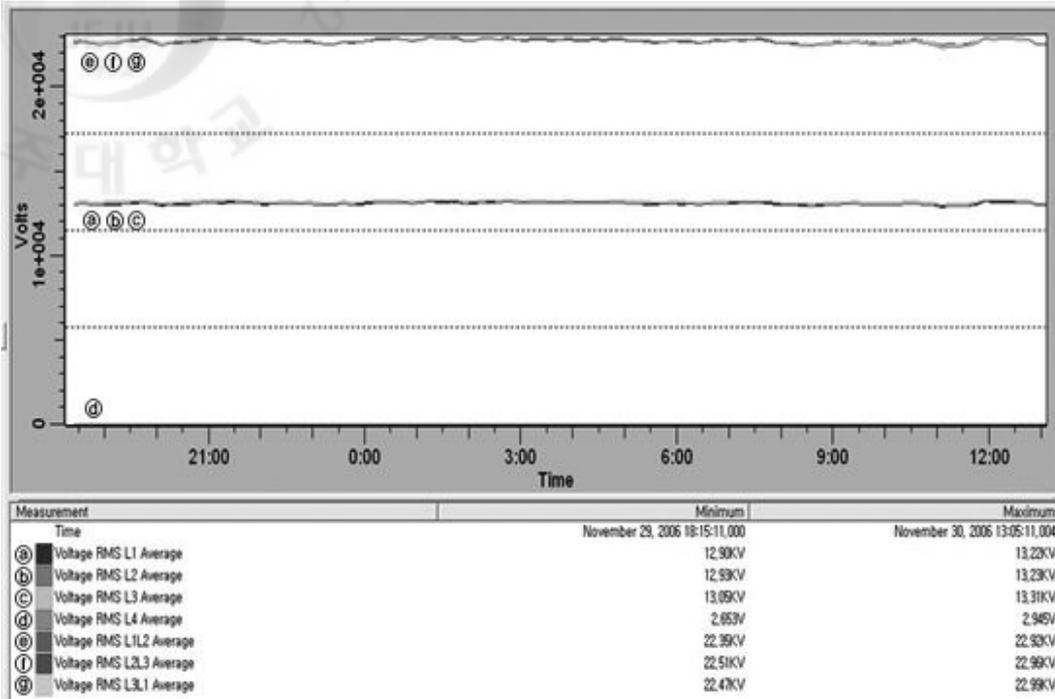


그림 2. 전압의 실효치 파형

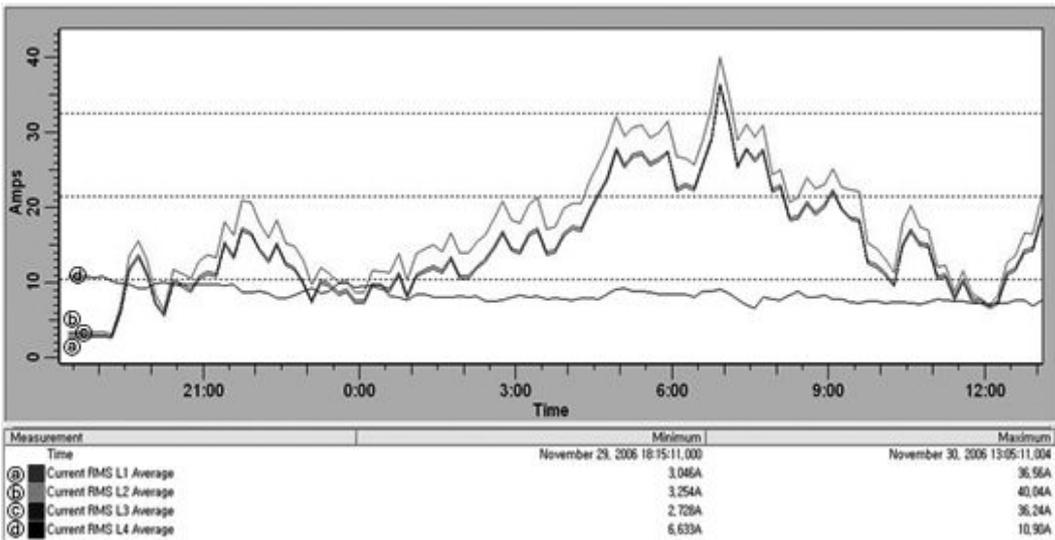


그림 3. 전류의 실효치 파형

그림 3은 그림 2와 같은 운전조건하에서 전류 실효치의 변화를 나타내고 있다. 이 파형에서 보면 R상, S상, T상 인 L1, L2, L3는 정지 상태일 때 약 3 A에서 부터 약 37 A 까지 변화하고 있다. 그러나 중성선 L4에 흐르는 전류는 약 6.6 A에서 최대 10.9 A까지 나타나고 있어 과도한 영상전류가 흐른다고 볼 수 있다.

영상전류가 과도하게 흐르는 원인을 분석하기 위해 풍력발전기가 정상적으로 동작할 때 오실로스코프로 R상과 중성선 N상의 전류를 측정하여 그림 4와 같이 나타내었다. 이 결과에서 보면 R상의 전류가 약 26 A 일 때 N상에는 약 7 A 정도의 과도한 영상전류가 흐르고 있다. 또한, N상의 파형 모양을 보면 정현파가 왜곡되어 나타나고 있어 많은 고조파가 함유됨을 알 수 있다.

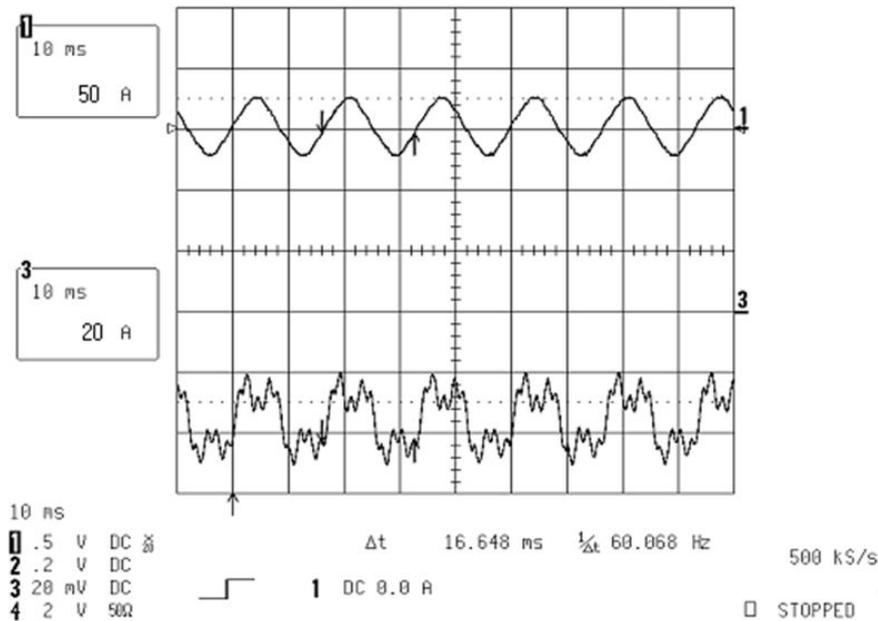


그림 4. R상과 N상의 전류 파형

Ⅲ. 보호계전기 오동작 현상 분석

3.1 풍력발전기와의 연관성 검토

지락과전류계기를 오동작 시키는 영상전류의 발생 원인을 구체적으로 확인하기 위하여 풍력발전기기가 가동할 때, 정지할 때, 계통에서 분리되었을 때의 영상전류의 변화를 검토하기 위하여 발전기 출력과 영상전류 파형을 측정하여 표 3 및 그림 5와 같이 나타내었다.

표 3. 풍력발전기 계통 연계에 따른 영상전류 측정

항 목 시 간	전압 [kV] RMS			전류 [A] RMS			
	R상	S상	T상	R상	S상	T상	N상
14:47	13.06	13.07	13.15	40.94	45.02	46.36	8.61
14:50	13.03	12.99	13.14	2.35	1.76	2.40	0
16:47	13.01	13.04	13.15	3.799	3.026	2.916	9.438
18:47	13.22	13.16	13.29	31.11	37.12	38.58	13.35
20:47	13.14	13.15	13.26	8.259	13.46	14.36	11.75
22:47	13.04	12.99	13.16	4.492	3.711	3.875	11.92
00:47	13.11	13.03	13.18	4.101	3.710	3.446	11.13
02:47	13.13	13.07	13.25	4.408	3.693	3.580	11.55
04:47	13.03	13.00	13.14	4.135	3.565	3.559	11.13
06:47	13.03	12.99	13.17	4.338	3.682	3.628	11.69
08:47	13.02	13.05	13.24	6.725	9.644	12.18	9.592
10:47	13.00	12.95	13.10	3.395	2.983	2.684	8.869
12:47	13.18	13.19	13.25	33.35	37.42	38.32	8.556

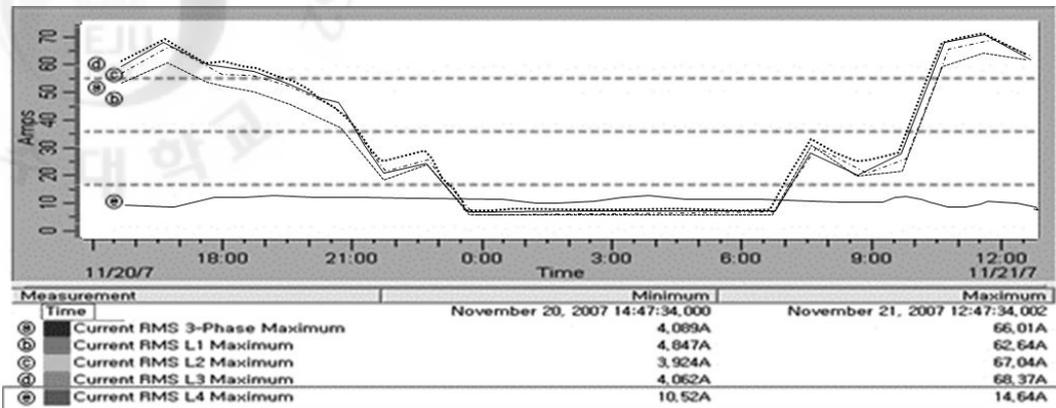


그림 5. 풍력발전기 출력에 따른 영상전류의 측정

표 3에서 14:47분에 상전류가 40 A 이상으로 측정되어 풍력발전기가 동작되어 발전하고 있을 때 영상전류는 8.61 A가 흐르고, 14:50분에는 풍력발전기를 정지시키고 변압기를 계통에서 분리하였을 때 상전류는 3 A 이하이고 영상전류가 0 A로 완전히 사라졌다. 그림 5에서 역시 풍력발전기의 가동 여부에 따라 출력이 변화하고 있으나 영상전류는 일정하게 10 A 이상 일정하게 흐르고 있음을 알 수 있다.

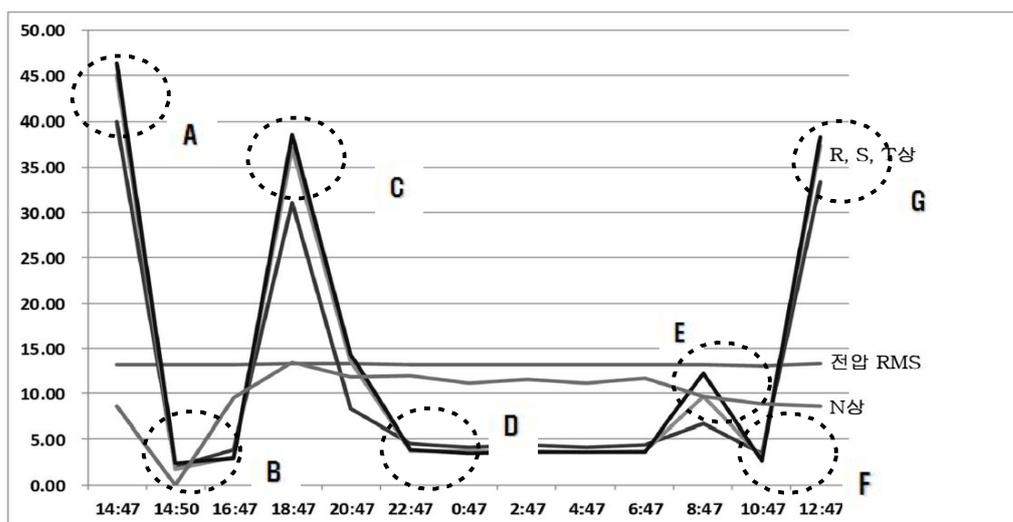


그림 6. 상전류 및 영상전류 크기 비교

검토결과 그림 6과 같이 풍력발전기가 가동되는 A, C, E, G 지점에서 영상 전류가 발생되고 있고, 발전기가 정지한 D, F 지점에서도 영상전류가 발생하고 있다. 변압기가 계통에서 분리된 B 지점에서만 영상전류가 전혀 흐르지 않고 있어 영상전류의 발생은 풍력발전기의 발전과는 무관하고 변압기의 1차 측이 Y결선 형태로 중성점이 접지되어 있어 발생하는 현상임을 알 수 있다.

또한, 영상전류의 크기는 오후 16:00시부터 다음날 오전 09:00시까지 9 A 이상으로 야간 및 새벽 시간에 크게 발생함을 알 수 있다.

3.2 영상전류의 측정 및 분석

전력분석기를 통 측정결과 위에서 확인했듯이 N상의 파형이 상당히 왜곡되고, 특정시간에 반복적으로 영상전류가 크게 발생하는 것으로 보아 영상전류의 발생 원인의 일부로 배전계통의 부하 및 선로 임피던스의 불평형으로 인한 한전 22.9 kV 계통의 전압 불평형이 발생되고, 이에 의한 영상전압은 계통의 임피던스에 의해서 영상전류로 흐르는 요인의 일부인 것으로 확인되었다.

이렇게 3상 전압이 불평형 되어 $V_a=7.3\angle 12.5^\circ$, $V_b=0.4\angle -100^\circ$, $V_c=4.4\angle -154^\circ$ 일때 영상(V_0), 정상(V_1), 역상(V_2) 전압을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ &= \frac{1}{3}(7.3\angle 12.5^\circ + 0.4\angle -100^\circ + 4.4\angle 154^\circ) \\ &= 1.47\angle 45.1^\circ \text{ [V]} \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\
 &= \frac{1}{3}(7.3 \angle 12.5^\circ + (1 \angle 120^\circ)(0.4 \angle -100^\circ) + (1 \angle 240^\circ)(4.4 \angle 154^\circ)) \\
 &= 3.97 \angle 20.5^\circ \text{ [V]} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \\
 &= \frac{1}{3}(7.3 \angle 12.5^\circ + (1 \angle 240^\circ)(0.4 \angle -100^\circ) + (1 \angle 120^\circ)(4.4 \angle 154^\circ)) \\
 &= 2.52 \angle -19.7^\circ \text{ [V]} \quad (3)
 \end{aligned}$$

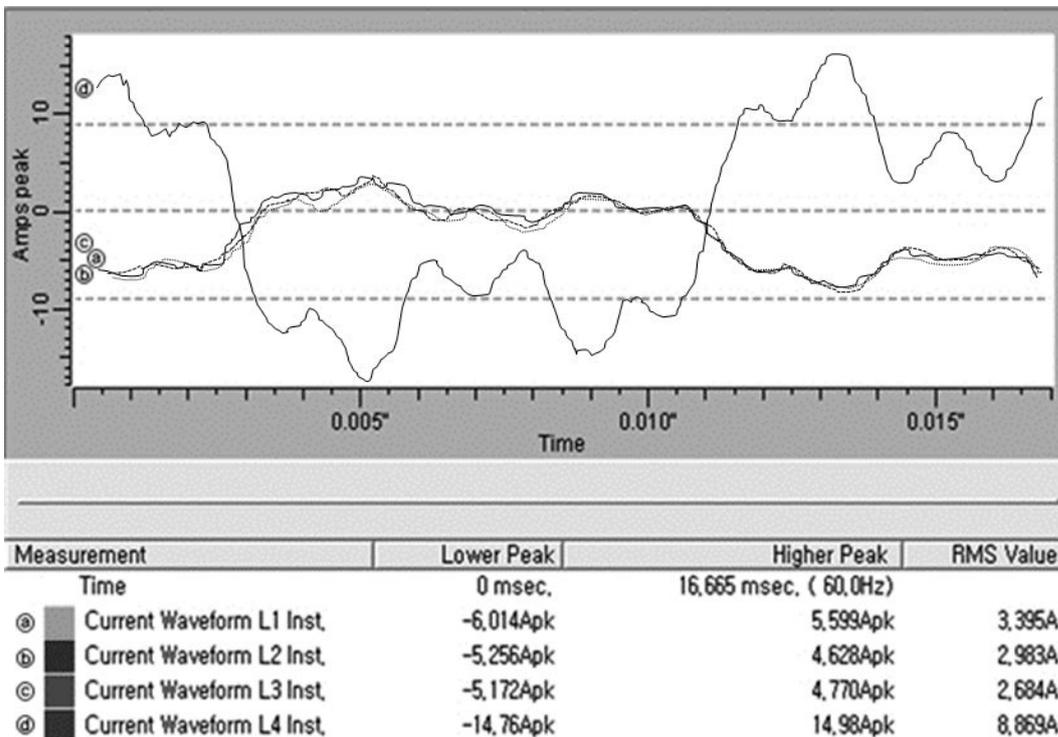


그림 7. 영상전류 파형

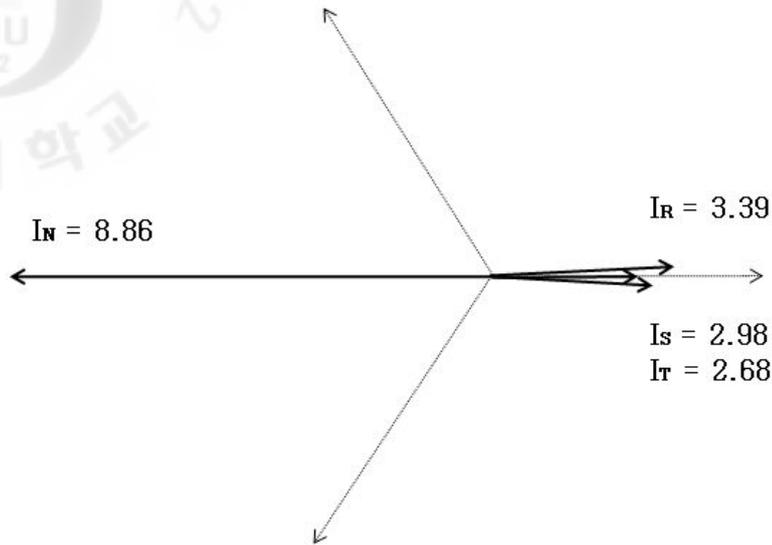


그림 8. 영상전류 파형 벡터해석

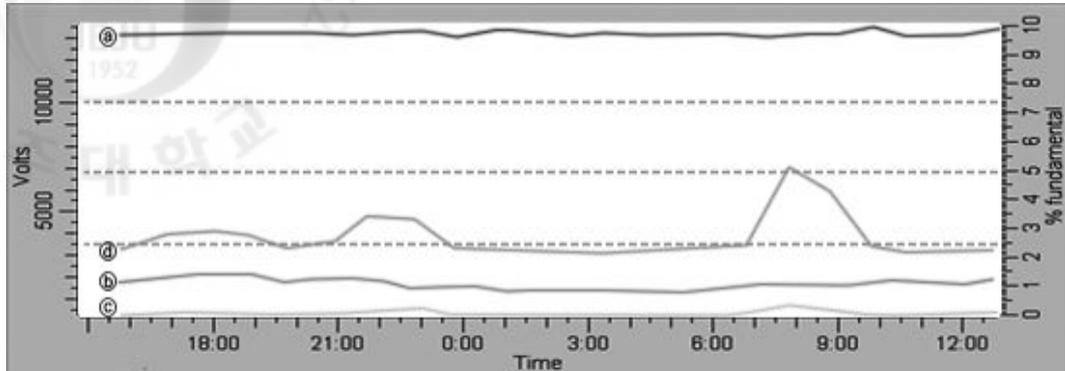
그림 7에서 측정 전류는 $I_R=3.39$ A, $I_S=2.98$ A, $I_T=2.68$ A, 그리고 $I_N=8.86$ A이었다. 역시 영상전류의 파형이 상당히 왜곡되어 있어, 고조파에 의한 현상임을 알 수 있으며, 배전계통의 3상 기본파 전류가 동상이 되어 흐르고 있음을 확인할 수 있다. 이로 인해 3상 기본파 전류가 N상에서 3배의 전류로 합산되어 흐르게 됨을 알 수 있고, 이것을 벡터적으로 해석하면 그림 8과 같다.

3.3 고조파의 측정 및 분석

전력분석기로 전압 및 전류에 대한 고조파를 분석하였다.

3.3.1 전압분석

계통의 각상 및 중성선의 전압에 대한 고조파 분석을 실행한 결과 그림 9와 같이 각상의 측정값을 정리하여 표 4와 같이 나타내었다.



Measurement	Minimum	Maximum
Time	November 20, 2007 14:47:34,000	November 21, 2007 12:47:34,002
(a) Voltage,Harmonics RMS 1st L1 Maximum	13,16KV	13,51KV
(b) Voltage,Harmonics %Fundamental 3rd L1 Maximum	0,812%	1,414%
(c) Voltage,Harmonics THD RMS L1 Maximum	288,3V	650,2V
(d) Voltage,Harmonics THD %Fundamental L1 Maximum	2,216%	5,112%

그림 9. R상 전압의 고조파 성분 파형

표 4. R, S, T상 전압의 고조파 성분 측정

구분 \ 항목	RMS [V]		THD [V]		THD [%]		3 rd harmonic [%]	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
R상	13.16	13.51	288.3	650.2	0.812	1.414	2.216	5.112
S상	13.10	13.43	282.9	468.7	0.896	2.412	2.161	3.674
T상	13.24	13.58	281.6	556.6	0.979	1.422	2.133	4.348

전압의 고조파성분 측정 및 분석결과 IEEE 기준 고조파율(Total Harmonic Distortion : THD) 33 kV 이하 3% 이내로 양호하게 나타났다.

3.3.2 전류분석

계통의 각상 및 중성선의 전류에 대한 고조파 분석을 실행한 결과 그림 10

과 같고 측정값을 정리하여 표 5와 같이 나타내었다.

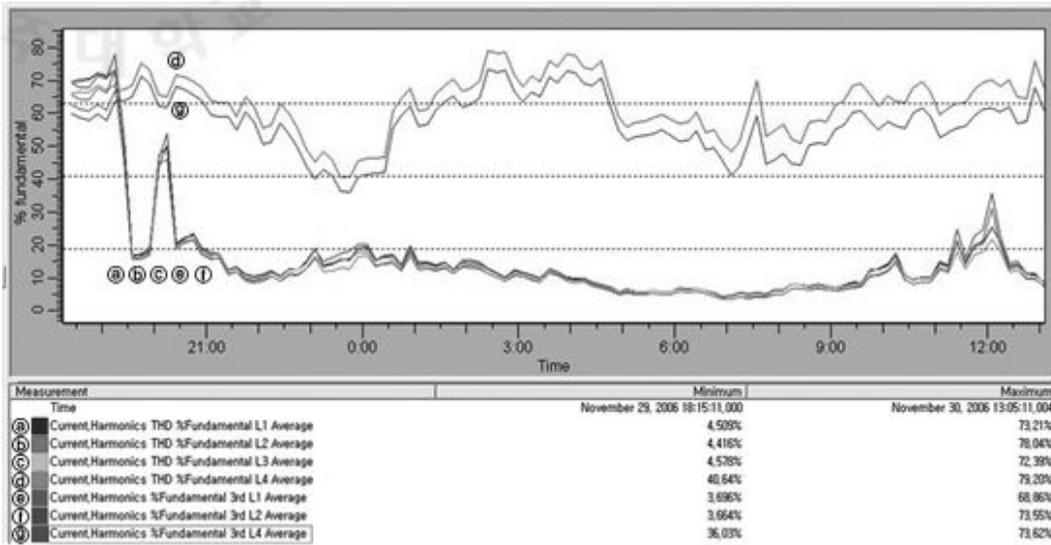


그림 10. R, S, T, N상 전류의 고조파 성분 파형

표 5. R, S, T, N상 전류의 고조파 측정

구 분	항 목	RMS [A]		THD [A]		THD [%]		3 rd harmonic [%]	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
	R상	4.302	62.19	1.653	7.963	29.59	73.90	28.08	69.24
	S상	3.455	66.65	1.661	7.883	18.96	231.2	20.23	259.0
	T상	3.591	67.85	1.681	6.915	13.95	106.4	16.13	120.8
	N상	8.968	12.80	4.921	7.471	45.63	91.69	49.72	96.70

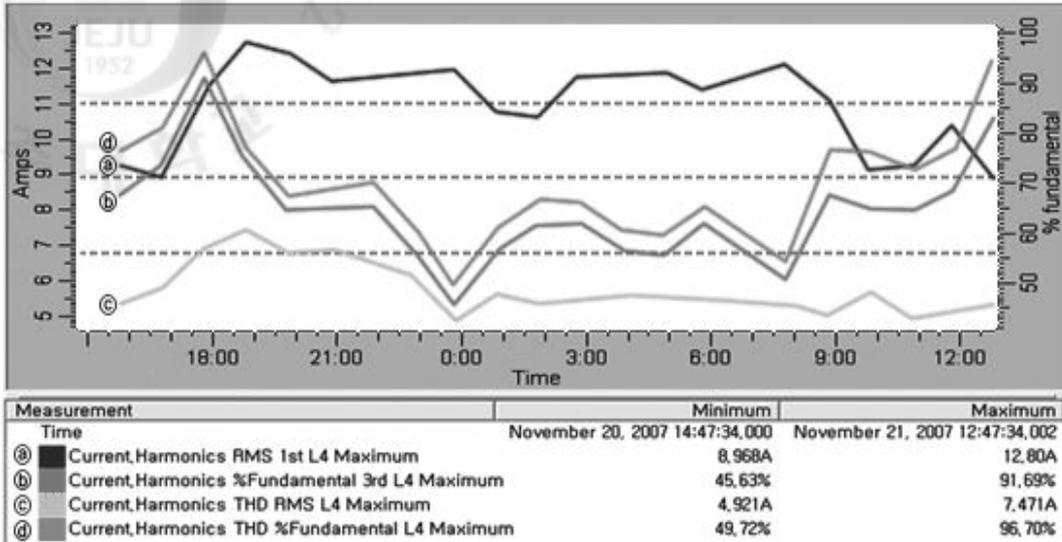


그림 11. N상 전류의 고조파 성분 정밀 파형

그림 10에서 보면 전류의 전체 고조파율[THD]은 50% 이상으로 나타나고 있다. 이는 각상의 전류에 고조파가 많이 함유되고 있음을 나타내고 있으며, 풍력발전 시스템이 정상적으로 가동되었을 때는 약 20% 이내에서 운전되고 있음을 알 수 있다.

그림 11에서 N상에 흐르는 영상전류를 좀 더 자세히 분석해보면 N상의 전체 고조파율(④)과 제 3 고조파율(②)을 전 구간에서 살펴 보면 40% ~ 96%로 아주 크게 나타나고 있으며, 이것 또한 풍력발전기 가동과 상관없이 영상전류가 크게 나타나고 있음을 나타내는 것이다.

그림 10 및 표 8에서 보면 변압기 과도한 제3 고조파가 발생되고 있음을 알 수 있으며, 이것은 풍력발전용 22.9 kV/600 V 변압기에서 유출된다고 볼 수 있다.

왜냐하면, 변압기에 유기되는 여자전류는 기본파와 모든 홀수파의 고조파를 포함하는데 특히 3차 고조파가 가장 우세하게 포함되기 때문이다. 변압기의 자화특성은 직선적이 아니고 히스테리시스 현상이 있기 때문에 변압기에 정현

과교류전압을 인가하는 여자전류는 많은 기수고조파를 함유한 왜곡 파형이 된다. 기수고조파 중에 특히 영상분인 제3 고조파가 가장 크게 발생하고, 부하특성에 따라서 고조파가 발생한다. 특·고압을 사용하는 경우 주변압기결선은 Δ -Y를 사용하므로 제 3 고조파 전류는 Δ 권선 내를 순환하기 때문에 제 3 고조파 전류는 흡수된다.

그러나 분산전원의 경우 변압기권선이 Y-Y결선이므로 제 3 고조파는 흡수되지 못하고 계통과 중성선을 통해서 순환하게 되며, 변압기 및 단상정류장치에 의해서 발생한 영상고조파는 계통의 각상을 통해서 흐르고 스칼라 합이 되어 중성선으로 흐르게 된다.

3.3.3 변압기류의 제 3 고조파 발생

변압기류(Tr, PT, GPT등)의 자화특성은 직선적이 아니고 또한 히스테리시스특성이 있기 때문에 변압기에 정현과교류전압을 인가하는 여자전류는 많은 기수고조파를 함유한 왜곡파형이 된다.

그림 12의 (a)와 같은 정현파의 자속을 만들어내는 여자전류는 (c)와 같은 기수고조파를 포함한 대칭 왜형파 전류가 된다. 또한, 여자전류는 이 기수 고조파 중에서도 저차의 제 3 고조파 성분의 비율이 크다. 정현파의 전압을 유지하기 위해서는 자속이 정현파가 될 필요가 있으므로 (c)와 같은 제 3 고조파를 포함한 여자전류가 필요해진다.

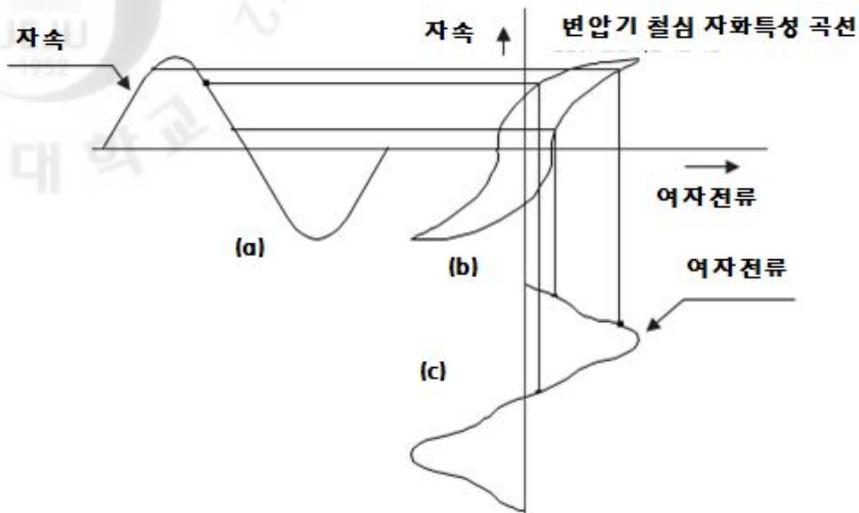


그림 12. 변압기류 히스테리시스 특성곡선

변압기류에 의해 발생된 각 고조파의 크기는 철심의 재질과 자속밀도에 따라 다르지만 보통의 사용 상태에서 대략 표 6과 같이 된다.

표 6. 변압기류 여자전류에 의한 고조파의 예

[단위:%]

고 조 파	열간압연 규소강판	냉간압연규소강판
기본파	1	1
제3조파	0.15~0.55	0.4~0.5
제5조파	0.03~0.25	0.10~0.25
제7조파	0.02~0.10	0.05~0.10
제9조파	0.005~0.02	0.03~0.06
제11조파	0.1 이하	0.01~0.03

위 표 6 에서 제 3 고조파 성분이 많다는 것을 알 수 있다.

3.3.4 제 3 고조파(영상분)와 중성선 전류와의 관계

*balanced fundamental currents sum to 0,
but balanced third-harmonic currents coincide*

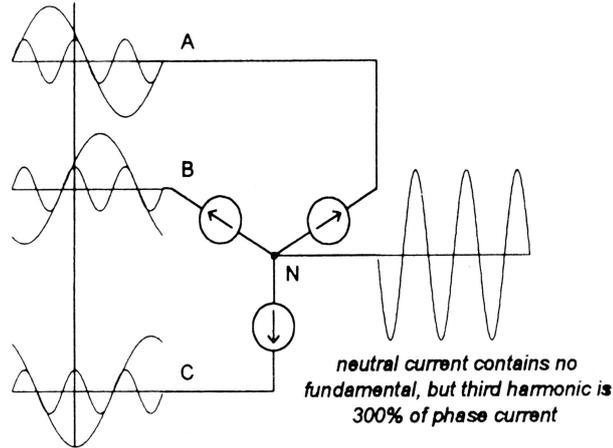


그림 13. 제 3 고조파(영상분)와 중성선 전류와의 관계

선형부하가 평형상태로 운전 시 중성선에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{N1} &= \dot{I}_{R1} + \dot{I}_{S1} + \dot{I}_{T1} \\
 &= I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

비선형부하의 제 3 고조파가 중성선에 흐르면 중성선 전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{N3} &= \dot{I}_{R3} + \dot{I}_{S3} + \dot{I}_{T3} \\
 &= I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin 3(\omega t - 240^\circ) \\
 &= 3 \times I_m \sin 3\omega t
 \end{aligned} \tag{5}$$

위와 같이 제3 고조파(영상분)는 평형부하와 무관하게 중성선에서 스칼라 합이 된다.

3.3.5 영상전류 및 고조파의 흐름도

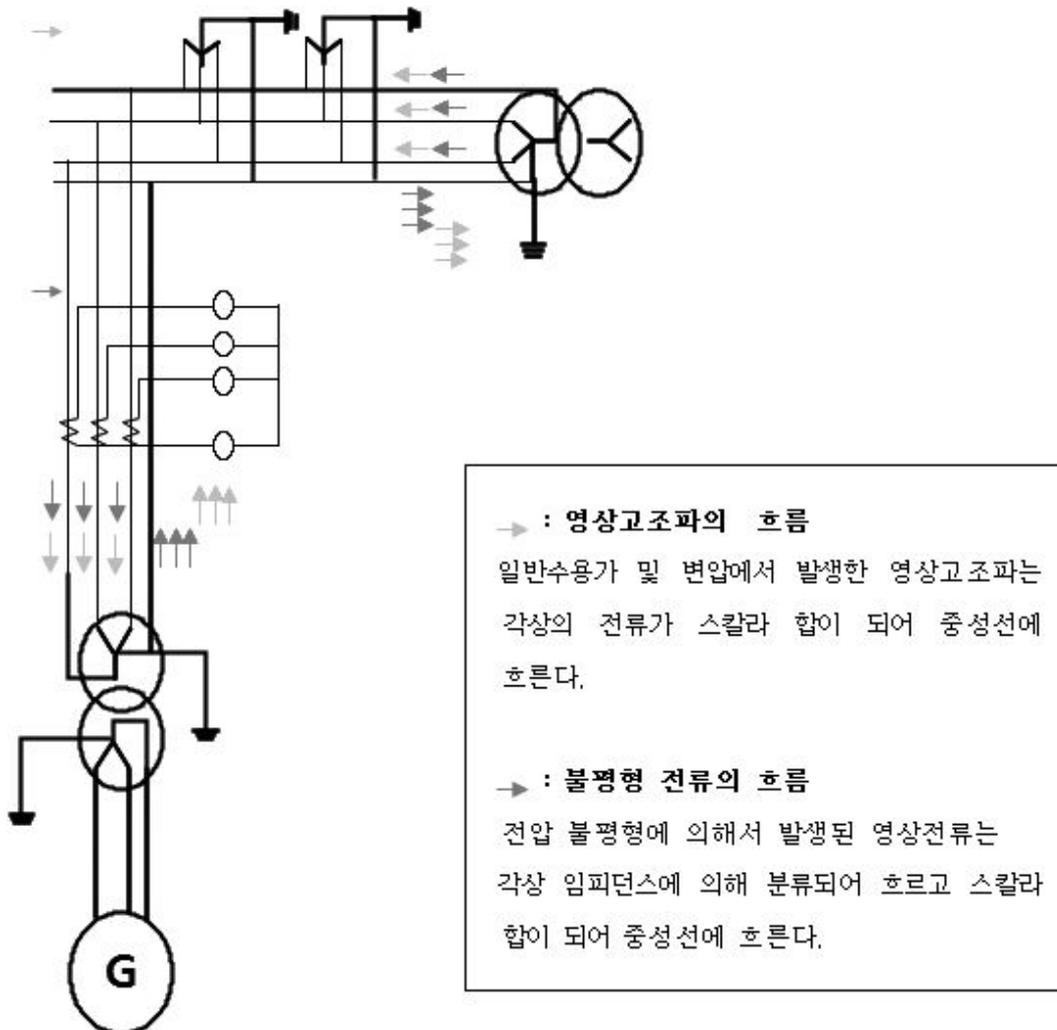


그림 14. 영상전류 및 고조파의 흐름도

3.4 OCGR 오동작 해결 방안

현재 가동되고 있는 풍력발전용 변압기에서 과도한 영상전류가 발생하고 있는데 특히 제 3 고조파가 아주 심각한 상태로 나타나고 있다. 이 영상전류에 의한 오동작 현상을 방지하기 위하여 다음과 같은 방안을 제시하고자 한다.

3.4.1 보호계전기의 설정 값 변경

지락계전기의 설정 값 정정은 정격전류의 30%로 하여 계산하면 다음과 같다.

$$1,500 \div \sqrt{3} \div 22.9 \div \frac{5}{50} \times 0.3 = 1.13 \quad (6)$$

현재 지락보호계전기는 지락전류만 검출하여 설정 값 이상 흐르게 되면 동작하게 된다. 중성선에서 측정된 1차 전류가 8~14 A이므로 보호계전기를 1 A로 정정하게 1차 전류가 10 A가 되어 계전기는 동작할 가능성이 충분하다. 중성선에 흐르는 전류는 거의 일정하게 8~14 A가 흐르므로 지락과전류계전기(OCGR)의 정정 값을 1 A-click → 2 A-click으로 변경한다. 이때, 한전 선로의 지락사고 시 TR측 보호계전기의 동작은 피할 수 없다.

3.4.2 영상분 고조파 억제장치(Neutral Current Eliminator : NCE)

영상분 고조파 억제장치(NCE)는 같은 철심에 다중의 권선이 감겨져 있으며 2개 이상 서로 반대로 결선되어 있다. 영상분 자속은 상쇄되고 정상 및 역상분 자속은 상쇄되지 않는 구조로 되어 있다. 즉, 영상분 임피던스가 낮은 일종의

Zig-zag 결선이며, 전통적으로 배전계통에서 중성선에 흐르는 3배수 고조파 성분을 제거하는 데 사용하고 있다.

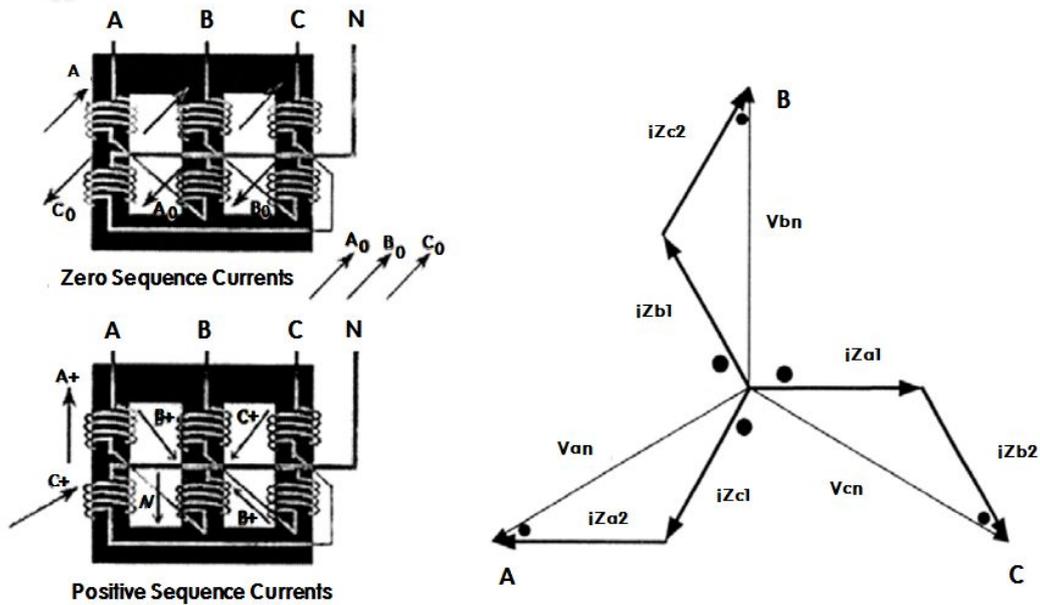


그림 15. Zig-zag 변압기의 결선과 벡터도

4.3.3 방향성 지락보호 계전기의 채용

영상전류에 의한 보호계전기 오동작을 없애고 분산전원을 배전계통에 연계하기 위한 가장 현실적인 방법이다. 그림 16은 방향성 지락보호 계전기가 채용된 분산전원 연계 수용가의 예이며, 고장 시 사고지점에 따른 동작특성은 아래와 같다.

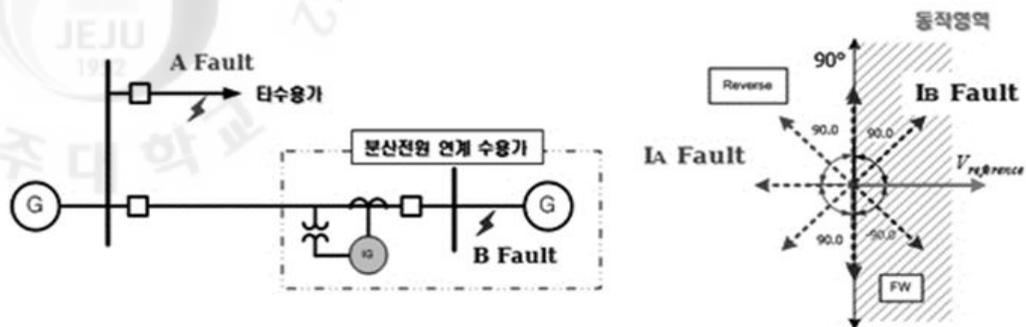


그림 16. 고장 시 사고지점에 따른 동작특성

- 가. A Fault - 지락전류는 한전으로 유출되고 영상전압은 거의 없는 상태이므로 계전기가 동작하지 않는 영역이다.
- 나. B Fault - 분산전원 측에서 지락사고가 발생할 경우 지락전류는 한전에서 부하 측으로 유입되고 영상전압이 검출되며 계전기가 동작하는 영역이 되어 보호계전기의 동작에 의한 지락보호가 가능하게 된다.

방향성 지락보호계전기 채용 후 계전기의 설정 값 정정 기준은 다음과 같다.

가. 3상 전류에서 계산된 영상분 정격전류의 30%로 하여 계산하면 다음과 같고, 이에 따라 설정 톨을 1.2 A로 정정한다.

$$1,500 \div 22.9 \times 0.3 = 1.13 \quad (7)$$

나. 3상 전압에서 계산된 영상분 최대영상전압의 30%로 하여 계산하면 다음과 같고, 이에 따라 설정 톨을 50V로 정정한다.

$$190 \times 0.3 = 57 \quad (8)$$

다. 직접접지 계통의 영상전압 기준영상전류는 60° 지상으로 설정한다.



IV. 결 론

본 논문에서는 배전계통에 연계된 분산전원의 실제적인 사례연구를 하였으며, 그 모델을 제주 월정풍력발전소(1.5 MW)로 하였다. 분산전원이 연계된 배전계통에서의 보호계전설비 중 지락과전류계전기(OCGR)의 오동작 현상에 대한 사례를 설명하였고, 전력분석기를 이용하여 전력품질 측정 및 고조파측정을 통해 원인을 분석하였다. 분석결과 그 원인으로 계통의 중성선에 흐르는 영상전류에 의한 현상임을 확인하였다. 분산전원의 경우 대부분 배전계통 말단에 설치되어 부하의 불평형이 크고, 제 3 고조파 전류가 다소 포함되어 있다. 분산전원의 용량 또한 3 MW 이하로 작은 편 이어서 지락과전류계전기(OCGR)의 동작 전류 값을 작게 설정하게 되며 이에 따라 지락과전류계전기(OCGR)의 오동작 현상은 빈번하게 발생되고 있다. 이런 영상전류는 풍력발전기를 계통에 연계할때 변압기는 Y-Y결선으로 구성되며 변압기의 1차 측이 한전과 중성선 및 접지방식을 동일하게 사용하기 때문으로 분석된다.

평상시 Y결선 변압기의 중성점 접지선에는 전류가 흐르지 않는 것이 일반적이거나 실제로는 계통의 선로정수 불평형, 부하전류 불평형, 고조파전류 등에 의한 전류가 약간 발생하는 것이 일반적이거나 배전 계통에 따라 중성선의 영상전류가 커질 수 있다.

앞으로 배전계통과 분산전원의 연계는 지속적으로 증가할 것이기 때문에 논문에서 제시한 지락과전류계전기(OCGR)의 오동작 현상 분석 및 대안은 분산전원의 효율 향상과 발전 수익의 증대, 배전계통으로의 안정적인 연계에 많은 효과가 있을 것으로 기대된다.



참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, “분산전원 배전계통 연계 기술기준,” 2010
- [2] 김재언 등, “분산전원이 도입된 배전계통의 보호협조 해석방법,” 한국산학기술학회 논문지, 제12권, 제5호, pp. 2279~2284, 2011
- [3] 김지원, “대용량 분산전원의 출력특성을 고려한 적응형 과전류 보호계전 알고리즘 개발,” 2004
- [4] 김세동, “국내외 고조파 관리기준 현황 분석,” 조명·전기설비학회 논문지, 제20권, 제4호, pp. 18~27, 2006
- [5] 이희태 등, “소형 열병합 발전소의 계통연계 시 방향성 과전류 및 지락과전류 계전기의 적용 검증 연구,” 전기학회 논문지, 제57권, 제6호, pp. 944~950, 2008
- [6] 노대석, “신에너지전원이 연계된 배전계통의 양방향 보호협조 방안에 관한 연구,” 2009
- [7] 박재균 등, “분산전원의 배전계통 연계 시 발생하는 고조파에 관한 연구,” 한국산학기술학회 논문지, 제11권, 제1호, pp. 73~78, 2010
- [8] 정승복 등, “배전계통에 분산전원 연계 시 기존 배전 계통측의 효과적인 리클로저 보호협조 연구,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2002
- [9] 이상호 등, “양방향 분산전원 보호협조 운영방안 연구,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 145~146, 2009
- [10] 윤기갑 등, “분산전원이 연계된 배전계통의 양방향 구간개폐기의 동작 알고리즘에 관한 연구,” 한국산학기술학회 논문지, 제10권, 제8호, pp. 1802~1809, 2009
- [11] 정현준, “배전계통에 분산전원 연계 시 보호협조측면에서 적정 용량 검토,” 2006

- [12] 세빛주식회사, “고조파 제거 및 절전기 개발(최종보고서),” 2003
- [13] 신동열 등, “배전계통에서 변압기 결선에 의한 역 조류현상에 관한 연구,” 조명·전기학 논문지, 제22권, 제9호, pp. 111~119, 2008
- [14] 김상진 등, “풍력발전기의 계통연계 운전 시 출력변동에 따른 PCC 전압 변동 예측모델,” 전력전자학회 학술대회 논문집, 2008
- [15] 명재형, “분산전원의 전력계통 연계에 관한 연구,” 2010
- [16] 최홍열, “지락보호계전기 오동작 원인 규명 및 대책,” 2008
- [17] 윤기갑 외, “저압배전선로에 연계된 분산전원의 과도특성 해석에 관한 연구,” 한국산학기술학회 논문지, 제11권, 제10호, pp. 3898~3904, 2010
- [18] 김소희 외, “분산전원이 연계된 배전계통의 보호기기 부동작 평가 알고리즘,” 대한전기학회 하계학술대회, 2011
- [19] 노대석, “분산전원이 연계된 배전계통의 보호협조기기의 문제점에 대한 해석 및 대책에 관한 연구,” 조명·전기설비학회 논문지, 제23권, 제2호, pp. 52~60, 2009
- [20] 정원욱 외, “분산전원이 연계된 배전계통의 고장특성을 고려한 방향성 보호계전 방식 적용 연구,” 조명·전기설비학회 논문지, 제24권, 제9호, pp. 97~107, 2010
- [21] 신동열, “분산전원 연계선로의 역조류 현상 해석 및 대책,” 2009
- [22] 문원식 외, “분산전원이 연계된 배전계통의 불평형 전류를 고려한 분산전원 보호기기 오동작 분석,” 대한전기학회 제41회 하계학술대회, 2010
- [23] 신동열 외, “분산전원 연계선로에서 지락고장시 중성선의 과전류 해석 및 보호계전기의 새로운 알고리즘,” 전기학회 논문지, 제58권, 제10호, pp. 1916~1922, 2009
- [24] 이재열 외, “인접선 고장에 대한 분산전원 연계선 보호계전기의 오동작 분석,” 대한전기학회 제40회 하계학술대회, 2009



감사의 글

본 논문이 결실을 보기까지 여러모로 부족한 저를 위해 세심한 지도와 가르침을 주신 김세호 교수님께 머리 숙여 존경과 깊은 감사를 드립니다.

그리고 계통연구실 대학원생 후배들의 도움에 감사의 뜻을 표합니다.

사고쟁이 막둥이가 뒤늦은 학업을 한다고 힘들 때마다 위로와 아낌없는 지원을 해주시고, 학업을 끝마칠 수 있도록 힘이 되어준, 나를 존재케 하는 의미가 되는 아버지, 어머니, 형님, 누나, 매형, 조카들, 언제나 사랑하고 감사하며 이 성취감을 함께 나누고 싶습니다.

대학원 진학 이후 활동에 너무나 소홀했지만 싫은 소리 없이 믿고 기다려준 두루나눔 식구들에게 감사를 드립니다.

인생의 희로애락을 함께 겪으며, 20년이 넘는 시간 동안 곁에서 끝없이 도움만 주는 언제나 나의 든든한 후원인 이자 나의 영원한 벗인 중훈에게 감사드립니다.

언제나 곁에서 나를 위한 쓴소리와 맹목적인 후원을 아낌없이 주시는 우리 Number 형님들, 이름을 거론하기를 꺼리는지라 호명할 수는 없지만, 항상 감사한 마음을 전합니다.

대학원 생활기간 묵묵히 지켜봐 주고 언제나 힘이 되어주었던 나의 인생의 반려자가 되어주길 간절히 바라는 사랑하는 진아씨 감사합니다.

제가 이 자리에 있기까지 물심양면으로 지원을 아끼지 않으셨던 풍력연구센터 박사님들 형님들 모든 분께 감사를 드립니다.

이외에도 언급하진 못한 분들이 너무나도 많습니다. 그분들의 이름을 하나 하나 다 되새기지 못하여 죄송스럽게 생각하고, 앞으로 제가 더욱 발전할 수 있도록 지켜봐 주시는 모든 분에게 기대에 어긋나지 않도록 온 힘을 다해 노력하겠습니다.

감사합니다.

