

고압 회전기 고정자 권선의 부분방전 계측 시 주변 신호 관계를 고려한 노이즈 제거기법

(Noise Elimination Algorithm for Detecting Partial Discharge of Generator Stator Winding Considering Relation of Periphery Signals)

신희상* · 조성민 · 강 철 · 강동식 · 조국희 · 김재철**

(Hee-Sang Shin · Sung-Min Cho · Chul Kang · Dong-Sik Kang · Kuk-Hee Cho · Jae-Chul Kim)

요 약

최근에 신뢰성 있는 전력공급의 중요성이 증가하고 있다. 이에 따라 전력기기 진단의 중요성 역시 증가하고 있다. 산업설비로 많이 사용되는 고압 회전기는 장기간 사용함에 따라 고정자 권선 절연부분이 열화되어 예상치 못한 절연파괴 사고로 많은 손실을 일으킨다. 이를 진단하기 위하여 고압 회전기 고정자 권선에 접촉식 Capacitive Coupler를 설치하고 부분방전 신호를 계측하여 유지 보수하는 것이 가장 넓게 사용되고 있다. 하지만 현장에서 부분방전 계측 시 노이즈가 혼재된다면 정밀한 부분방전 신호를 계측하는 것이 불가능해진다. 본 논문에서는 국내 수력발전소 중 25년 이상 가동 중인 13[kV]급 수력발전기 고정자 권선에서 160[pF] 용량의 접촉식 Capacitive Coupler를 이용하여 취득한 계측신호를 분석하여 기존 하드웨어적으로만 노이즈를 제거하여도 잔존하는 노이즈를 제거하기 위해 소프트웨어적인 주변신호원과의 관계를 고려한 노이즈제거 기법을 제안하였다.

Abstract

Recently, the importance of supplying the reliable electric power is increasing, therefore, the importance of diagnosis of power equipments is increasing also. Breaking insulation of stator windings is major cause of faults in high voltage generators. On-line PD (Partial Discharge) detection using Capacitive Coupler at stator windings is used widely to diagnose high voltage generators. However, precise PD(Partial Discharge) detection is impossible if detected signals are mixed with PD and noise signal. In this paper, we analyze detected signals using Capacitive Coupler at 13[kV] hydroelectric generator stator winding and suggest not hardware method but noise elimination algorithm for detecting PD of generator stator winding considering relation of periphery signals.

Key Words : Partial Discharge, Noise Elimination, Stator Winding, Diagnosis

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 석사과정

** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780

E-mail : shs8828@ssu.ac.kr

접수일자 : 2008년 5월 6일

1차심사 : 2008년 5월 15일

심사완료 : 2008년 8월 4일

1. 서 론

정보통신기기의 증가와 산업 플랜트 시설의 증대에 따라 안정적이고 효율적인 전원 공급과 동력발생을 위한 고압 발전기의 신뢰성이 크게 요구되고 있는 것이 현실이다. 이에 반하는 고장원인 중에 하나는 고압 발전기의 장기간 사용에 따른 고정자 권선의 절연부분에서 열화가 진전되어 예상치 못한 절연 파괴 사고로 이어지는 것이다. 이러한 사고는 돌발적인 운전정지로 이어진다. 이에 따른 운전정지로 인한 파급효과는 더욱이 커지며, 복구 시간 역시 장기화되고, 권선의 교체 보수비용이 역시 크게 소요되기 때문에 이를 방지하기 위해 예방진단이 이루어지고 있고, 이에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 절연열화 예방진단방법은 기기를 정지하고 절연상태를 측정하는 Off-line 진단법과 현장에서 운전 중인 상태에서 절연상태를 측정하는 On-line 진단방법으로 구분할 수 있다. On-line 부분방전 진단법은 운전 중에 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점이 있어 초기 진단 개념으로 많은 연구가 수행되고 있다. 최근 선진 외국에서는 고압부에 직접 접촉시키는 접촉식 센서로 Capacitive Coupler인 Epoxy-Mica Coupler(EMC)와 비접촉식 센서인 Stator Slot Coupler(SSC), Resistance Temperature Detector(RTD) 및 Radio Frequency Current Transformer(RFCT) 등의 센서를 이용한 On-line 부분방전 측정 기술이 개발되어 일부 이용하고 있는 실정에 있다[1-4]. 국내에서도 1990년대부터 발전기 진단에 관한 연구를 수행하여 기반기술을 구축하고 있으며, 발전기의 On-line 부분방전 측정용 센서로서 현재 가장 폭넓게 사용되고 있는 Capacitive Coupler는 초기에는 cable type을 사용하였으나, 설치시 문제점 등을 보완한 접촉식 EMC가 개발되어 사용 중에 있다. 현장에서 시행되는 On-line 부분방전 데이터 취득 시 부분방전 신호와 혼재되어 계속되는 노이즈는 정밀한 진단 결과를 얻는 것에서 악화 요인으로 작용한다. 부분방전 검출신호에 혼재된 노이즈로 인해 정밀한 진단결과를 얻지 못하고 오판된 결과를 내리게 된다면 불필요한 진단 비용의 지출과 운전정지로 인한 피해로 나타나게 된다.

본 논문에서는 데이터를 취득하기 위하여 국내 수력발전소 중 25년 이상 가동 중인 13[kV]급 수력발전기 고정자 권선에서 160[pF] 용량의 접촉식 Capacitive Coupler를 이용하여 수행하였다. 계속된 On-line 부분방전 데이터를 이용하여 실제 발전소에서 발생하는 노이즈 특성을 분석하고, 고려하여 노이즈제거 기법을 연구하였다.

2. 발전기 고정자 권선의 부분방전

2.1 발전기 고정자 권선의 부분방전 특징

전력설비의 절연물 내부에 제작불량이나 시공불량에 의해 Void가 형성되어 있는 상태에서 교류전압이 인가되고, Void 양단에 걸리는 전압이 파괴전압 E_b 에 도달하여 Void에서 코로나가 발생하면 Void에 걸리는 전압은 대단히 짧은 시간에 잔류전압 V_r 까지 저하하게 되고 반대방향 펄스전류의 방전을 일으킨다. 이와 같은 현상이 상승 사이클과 하강 사이클마다 방전구간 및 비방전구간이 반복하게 된다. 부분방전은 항상 잔류전하에 의하여 가역 현상이 있게 되며 이로 인해 방전 펄스의 발생은 복잡한 양상을 나타낸다. 현장에서 발생하는 부분방전에서는 극성효과, 절연물의 누설저항, Void 내면에 대한 누설저항의 변화 등에 따라 E_b 및 V_r 이 모두 일정하지는 않다. 위에서 언급한 다양한 변동요소로 인해 방전 펄스의 주기와 크기가 현저하게 불균형이 된다[3, 7].

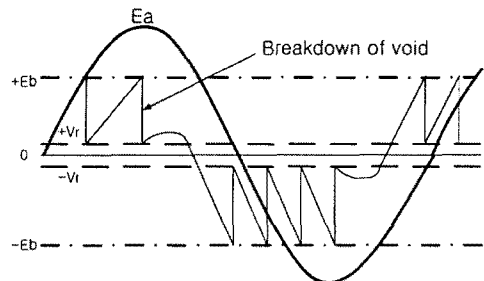


그림 1. Void의 절연 파괴 전압과 부분방전 파형
Fig. 1. Partial Discharge signal and breakdown voltage of void

2.2 부분방전의 물리적 특징에 따른 검출방법

부분방전의 검출방법은 방전 중에 발생하는 물리적 특징에 근거하고 있다. 이러한 물리적 특징으로는 전기적 임펄스 전류, 유전 손실, 빛, 소리, 주변기체의 압력 증가, 화학적 반응 등이 있다. 이와 같은 물리적 특징 중에서 어떠한 특징을 검출 하느냐에 따라 부분방전 검출법을 선택하게 된다[4, 6]. 유전 손실, 빛, 소리, 주변기체의 압력 증가, 화학적 반응 등의 기법은 운전 정지를 한 후 실시해야 하기 때문에 운전 중 진단법으로는 맞지 않다. 이러한 이유로 현재 가장 널리 사용되는 검출방법은 전기적 신호 검출법이다. 본 논문에서 계속시에 사용된 방법은 전기적 검출법을 사용하였다. 이는 부분방전과 연관된 펄스전류 신호를 검출하는 방법이다. 전기적인 부분방전 검출 방법을 통해 절연물질 내부의 결함에 서 발생하는 부분방전은 크기를 정확히 측정할 수 없다. 하지만 부분방전의 정도는 전극 단자에 유기되는 전하량 측정을 통해 이루어진다. 플랜트 시설 현장에서의 전기적 측정방법의 회로도도 그림 2와 같이 나타 낼 수 있다. 각 상 별로 Capacitive Coupler를 설치하여 발전기 쪽에서 발생하는 부분방전 신호와 다른 쪽에서 오는 전기적 노이즈 신호를 분류하여 계속한다[1].

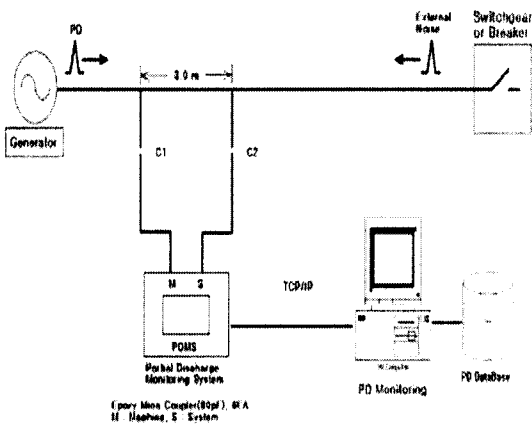


그림 2. 발전 시설의 Capacitive Coupler 회로도
Fig. 2. Capacitive coupler circuit diagram of power station

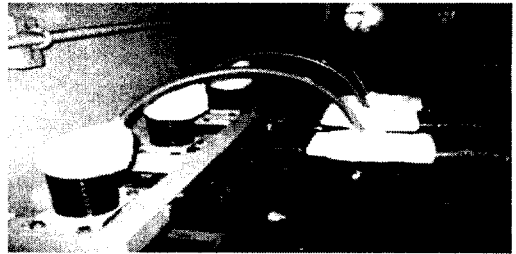


그림 3. 발전시설에 Capacitive Coupler 설치 사진
Fig. 3. Capacitive coupler circuit photograph of power station

3. 부분방전 계측신호의 분석

3.1 계측신호의 위상 주기 크기 표현

13[kV]급 고압 수력발전기는 정지기(변압기, GIS 등)와 달리 운전 중 1,000[pC]이상 상시 발생하는 것이 일반적인 특징이다. 본 논문에서는 특정 위상구간에서 집중성을 가지고 발생하는 신호원을 부분방전으로 정의하였다. 데이터 계측은 국내 수력발전소 중 25년 이상 가동 중인 13[kV]급 수력발전기 고정자 권선에서 160[pF] 용량의 접촉식 Capacitive Coupler를 그림 2와 같은 Directional 방법으로 장착하여 고압 수력 발전기를 off 상태에서 순수 노이즈 신호와 고압 수력 발전기를 on 상태에서 노이즈와 혼재된 부분방전 신호를 계속하였다. 계속된 신호의 표현은 X축은 주기를 나타내며, Y축은 위상, Z축은 크기를 나타내었다. 60[Hz] 상용 주파수를 기본 주파수로 정하고 주기 당 3,600개의 신호를 계속하였고 이러한 신호를 120주기를 연속으로 계속 하여 표현 하였다. 샘플링 주파수는 216[kHz]이다.

3.2 순수 노이즈신호의 계속

그림 4와 그림 5는 13[kV]급 수력발전기를 off 상태에서 고정자 권선에서 계속된 데이터이다. 고압 회전기 고정자 권선의 주절연 재료로는 에폭시 마이카로 이루어져 있다. 수력 발전기의 권선은 Multi-turn coil로 설치되었다. 위와 같은 조건에서 계속된 신호를 분석하였을 경우 신호원의 집중성 없

고압 외전기 고장파 권선의 부분방전 계속 시 주변 신호 관계를 고려한 노이즈 제거기법

이 전위상과 전주기에 존재하며 크기성분은 대략 15~131[mV]와 40~190[mV] 크기가 분포된 것으로 나타났다. 이는 신호를 계측하였을 때 특정한 형태의 위상, 주기, 크기를 나타내고 있지 않고 연속적으로 계측되는 외부잡음이 백색 잡음의 형태를 띠고 있다. 노이즈 신호의 총 측정 횟수는 1,320주기이고 120주기씩 연속 저장하였다. 샘플링 주파수는 216 [kHz]이고, 1320주기의 총 계측시간은 22[s]이다. 대부분의 노이즈신호가 위와 같은 특징을 나타내었다.

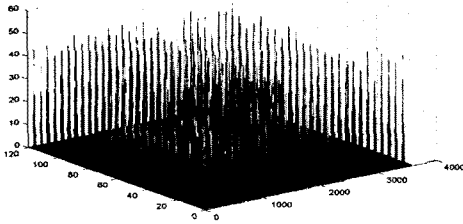


그림 4. 노이즈 신호의 위상 주기 크기 표현 1
Fig. 4. Phase Cycle Magnitude expression of noise signal 1

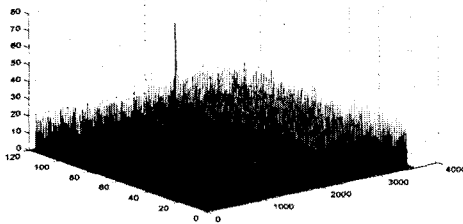


그림 5. 노이즈 신호의 위상 주기 크기 표현 2
Fig. 5. Phase Cycle Magnitude expression of noise signal 2

3.3 노이즈가 혼재된 부분방전 신호의 계측

13[kV]급 수력 발전기를 On 상태에서 샘플링 주파수를 216[kHz]로 설정하고 Directional 방법을 적용하여 총 4,440주기를 계측하였고 120주기를 연속으로 저장하였다.

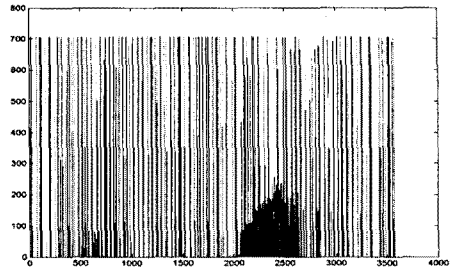


그림 6. 노이즈가 혼재된 부분방전 신호 1의 위상 크기 표현
Fig. 6. Phase Magnitude expression of signal 1 mixed partial discharge and noise

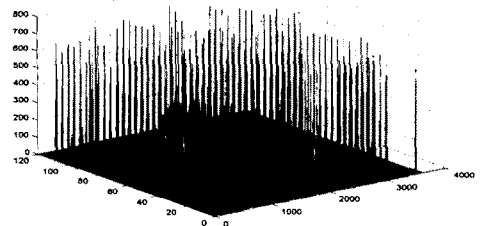


그림 7. 노이즈가 혼재된 부분방전 신호 1의 위상 주기 크기 표현
Fig. 7. Phase Cycle Magnitude expression of signal 1 mixed partial discharge and noise

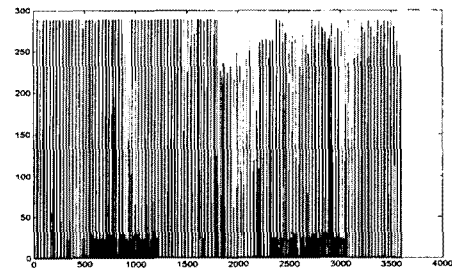


그림 8. 노이즈가 혼재된 부분방전 신호2의 위상 크기 표현
Fig. 8. Phase Magnitude expression of signal 2 mixed partial discharge and noise

그림 6과 그림 7은 같은 계측 신호이지만 그림 6은 위상과 크기로 표현하였고, 그림 7은 위상 주기 크기 성분으로 표현하였다. 위에 나타낸 그림 6부터 그림

9까지의 계측 신호는 현장에서 계측된 신호 중 가장 많은 유형을 차지하는 대표적 유형이다. 그림 7의 계측 신호는 부극성 부분방전이 정극성 부분방전보다 크기가 큰 형태의 부분방전형태이고 그림 9는 정극성 부분방전과 부극성 부분방전의 크기가 비슷한 특성을 나타내는 부분방전의 형태이다.

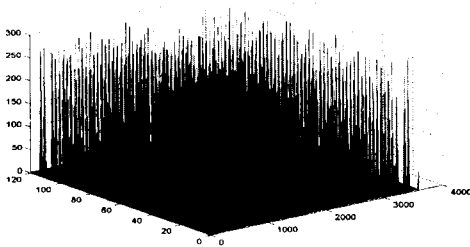


그림 9. 노이즈가 혼재된 부분방전 신호 2의 위상 주기 표현
Fig. 9. Phase Cycle Magnitude expression of signal 2 mixed partial discharge and noise

3.4 노이즈신호의 특징 추출

노이즈가 혼재된 부분방전 신호에서 노이즈를 제거하기 위하여 노이즈 신호의 특징을 추출하였다. 우선 계측된 노이즈 신호의 특징은 아래와 같다. 일정 위상부분에서 신호의 개수가 적게 나타나고, 신호의 크기가 임펄스적인 특징을 갖는 노이즈가 있고, 전 위상에 걸쳐 비슷한 크기가 반복적으로 나타나는 백색잡음의 특징을 갖는 노이즈가 있다. 이와 달리 위상과 크기의 특징을 추출할 수 없는 불규칙한 특징을 갖는 노이즈로 분류할 수 있다. 임펄스와 같은 특징을 갖는 노이즈는 위상과 주기에서 집중적으로 발생하지 않고 일정부분에서만 신호가 나타나는 간헐적인 특징을 나타낸다. 수력 발전소 현장에서 계측된 백색잡음 형태의 노이즈의 특징은 일전구간에서 나타난 신호가 전 위상과 전 주기에 반복적으로 나타나는 특징을 나타내었다. 불규칙 특성을 갖는 노이즈는 임펄스적인 특징과 백색잡음의 특징을 혼합하여 가지고 있다.

4. 제안 알고리즘

4.1 주변 신호원과의 관계에 따른 노이즈 제거 알고리즘

본 논문에서는 고압 발전기에서 고경자 권선의 부분방전 계측시 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 주변 신호원과의 관계에 따른 노이즈 제거 알고리즘을 그림 10에 나타내었다. 그림 11은 알고리즘을 적용하기 위한 순서도이다.

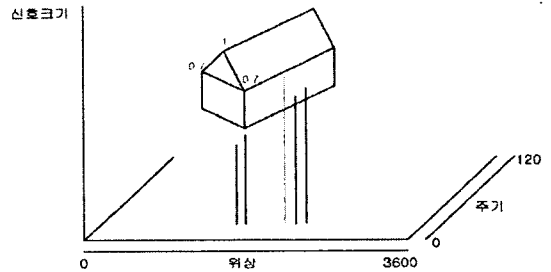


그림 10. 주변 신호원의 관계에 따른 노이즈 제거 알고리즘 개념

Fig. 10. Noise elimination algorithm considering relation of periphery signals

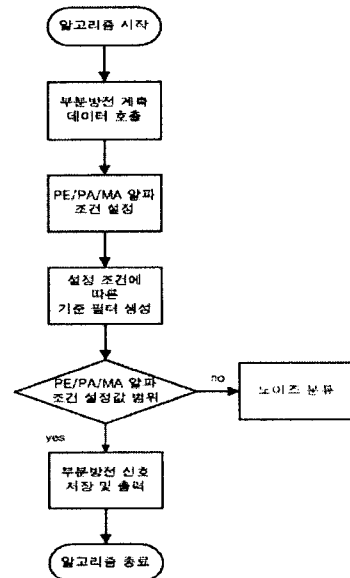


그림 11. 노이즈 제거 알고리즘 순서도

Fig. 11. Flowchart of noise elimination algorithm

식 (1)

$$P(f(s), f(y)) = \begin{cases} 1, & f(s) - \frac{MA}{2} \leq f(y) \leq (f(s) + \frac{MA}{2}) \\ -(\frac{MA}{PA} \times |s - y|) \\ 0, & f(s) - \frac{MA}{2} > f(y) \end{cases}$$

식 (2)

$$T(s) = \sum_{q=-\frac{PE}{2}}^{\frac{PE}{2}} \sum_{x=-\frac{PA}{2}}^{\frac{PA}{2}} P(f(s), f(s + (q \times 3600) + x))$$

식 (3)

$$f(s)' = \begin{cases} f(s), & T(s) > Alpha \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

위에 나타낸 주변 신호원과의 관계에 따른 노이즈 제거 알고리즘 개념도는 신호원 S를 X축과 Y축의 함수로 나타내면 f(s)와 f(y)와 같이 나타낼 수 있다. f(s)는 신호를 나타내고 f(y)는 신호의 크기 성분만을 나타낸다. 임의의 위상과 주기의 신호의 노이즈 판단은 인접해 있는 신호에 따라 다르게 판단하였다. 설정하는 변수 PA(위상), PE(주기), MA(크기), Alpha(알파수준)에 따라 능동적으로 고려되는 범위와 기준은 변경되며 범위는 $\theta - \frac{PA}{2} \sim \theta + \frac{PA}{2}$ 의 위상안에 신호와 $T - \frac{PE}{2} \sim T + \frac{PE}{2}$ 의 주기내의 신호이다.

식 (1)은 판정기준을 나타내었다. 판정기준은 주변신호의 크기가 $f(s) - \frac{MA}{2} \sim f(s) + \frac{MA}{2}$ 내에 존재하지 않거나 평가 신호원의 위상에서 얼마만큼 떨어져 있는가를 구분하여 주변 신호에 멤버십을 부여한 후 주변 신호의 멤버십을 합하여 알파수준 이하이면 평가 대상 신호원은 노이즈로 간주하여 제거하였다. 식 (2)는 알파수준을 적용하기 위하여 설정된 위상과 주기안에 신호원의 멤버십을 합산하기 위한 식이다. 여기서 T(s)는 설정된 위상과 주기안에 발생된 신호원의 멤버십의 합을 나타낸다. 식 (3)은 설정된 알파수준과 비교하여 신호원과 잡음을 판정하는 관계식을 나타낸다. 그림 11에 나타낸 전반적인

순서도에 대한 설명은 아래 과정과 같다.

Step 1) 고압발전기 고정자 권선에서 접촉식 Capacitive Coupler를 이용하여 계속된 부분방전 데이터를 샘플링 주파수 216[kHz]로 120주기씩 연속하여 저장한다.

Step 2) 주변신호에 관계 따라 노이즈를 제거하기 위하여 PE(주기), PA(위상), MA(크기), Alaph(알파수준)을 설정하였다. PE와 PA는 주변신호 관계 필터가 적용되는 구간의 설정을 의미하며, MA와 Alaph는 노이즈 판정 기준의 설정을 의미한다.

Step 3) 부분방전신호의 손실이 없는 최적 조건을 설정하게 되면 설정 조건에 따른 필터가 생성된다.

Step 4) 생성된 필터는 첫 주기의 첫 신호원부터 적용되며 120주기 마지막 신호원까지 이동하면서 노이즈에 대한 판별을 하게 된다.

Step 5) 위의 과정에서 거치면서 남겨진 신호들은 부분방전 신호원으로 판정하여 출력 및 저장한다.

4.2 노이즈 제거 알고리즘에 대한 평가 결과

본 논문에서 제시한 노이즈제거 알고리즘을 앞서 나타낸 그림 7, 그림 9에 적용하여 아래 나타내었다. 주기 위상 크기 알파수준은 3 30 20 6으로 적용하였다. 이는 신호원을 중심으로 3주기 구간과 6도의 위상구간에서 신호원에 비해 ±10의 크기 차이가 나고 신호의 멤버십 합이 6이하이면 잡음으로 분류하는 의미를 갖는다.

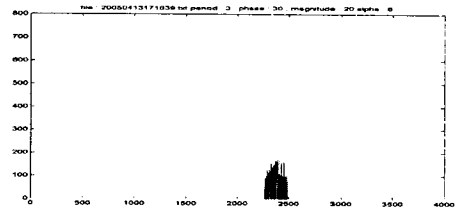


그림 12. 노이즈 제거 알고리즘이 적용된 계속신호 1의 위상 크기 표현

Fig. 12. Phase Magnitude expression of detection signal 1 applied noise elimination algorithm

5에 적용하여 그림 16, 그림 17에 나타내었다. 위상 주기 크기 알파수준은 3 30 20 6으로 적용하였다.

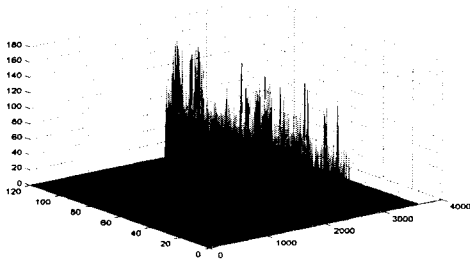


그림 13. 노이즈 제거 알고리즘이 적용된 계측신호 1의 위상 주기 크기 표현
Fig. 13. Phase Cycle Magnitude expression of detection signal 1 applied noise elimination algorithm

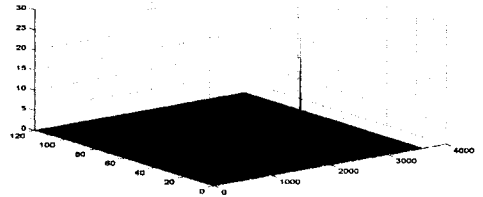


그림 16. 노이즈 제거 알고리즘이 적용된 노이즈 신호 1의 위상 주기 크기 표현
Fig. 16. Phase Cycle Magnitude expression of noise signal 1 applied noise elimination algorithm

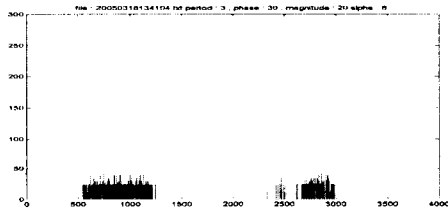


그림 14. 노이즈 제거 알고리즘이 적용된 계측신호 2의 위상 크기 표현
Fig. 14. Phase Magnitude expression of detection signal 2 applied noise elimination algorithm

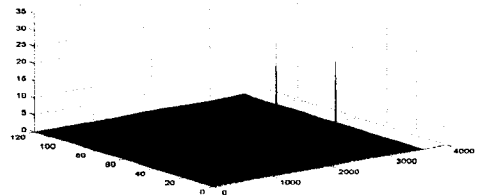


그림 17. 노이즈 제거 알고리즘이 적용된 노이즈 신호 2의 위상 주기 크기 표현
Fig. 17. Phase Cycle Magnitude expression of noise signal 2 applied noise elimination algorithm

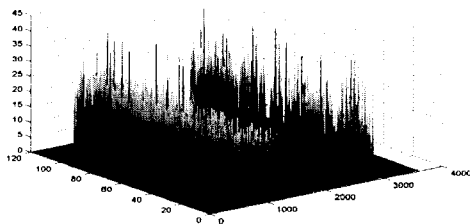


그림 15. 노이즈 제거 알고리즘이 적용된 계측신호 2의 위상 주기 크기 표현
Fig. 15. Phase Cycle Magnitude expression of detection signal 2 applied noise elimination algorithm

4.3 순수 노이즈에 노이즈 제거 알고리즘 적용

노이즈제거 알고리즘을 앞서 나타낸 그림 4, 그림

5. 결 론

본 논문에서는 고압 발전기에서 고정자 권선의 부분방전 계측 시 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 주변 신호원과의 관계에 따른 노이즈 제거 알고리즘을 제안하였다. 국내 13[kV]급 수력 발전기의 고정자 권선에 데이터를 취득하여 제안한 알고리즘을 적용하였다. 그 결과 노이즈가 혼재된 부분방전 신호에서 노이즈가 제거됨을 확인할 수 있었다. 또한 검증을 위하여 취득된 노이즈 신호에 적용하였을 시 신호의 대부분이 제거됨을 확인할 수 있었다. 하지만 노이즈가 혼재된 부분방전 신호에서 위상 주기 크기 알파수준 선정 시 너무 크거나 작은 값을 선정

하게 되면 부분 방전 신호의 손실 또는 노이즈가 제거 되지 않음도 확인할 수 있었다. 추후 연구 과제로는 위상 주기 크기 알파수준의 선정 시 부분방전 신호의 손실이 없고 노이즈가 최대한 제거 되는 값의 선정에 대한 연구를 진행할 계획이다. 또한 본 논문에서 제시한 알고리즘은 Multi-turn에서 종합하여 계측한다면 정확성이 떨어지는 것 또한 확인할 수 있었다. 위와 같은 문제를 해결하기 위해 추후에는 Multi-turn에서의 잡음특성을 추출하여 개선된 알고리즘을 구현할 계획이다. 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통하여 추후 연구에 대한 결과를 정확하게 출한다면 고압 회전기 고정자 권선에서 나타나는 부분방전을 정밀하게 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 지식 경제부의 지원에 의하여 한국 전기연구원 주관으로 수행된 연구임.

References

- [1] 강동식 외, “고압 회전기 On-line 부분방전 측정용 Ceramic Coupler 특성”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51C No.5, pp. 205-212, 2002.
- [2] K. Kimura, Y. Kaneda, K. Itch, T. Kogi, K. Motooka, M. Takashima, “On-line condition monitoring of winding insulation in turbine generators”, proc. Of conference, CIGRE, 2000.
- [3] 박영훈, “부분방전 신호 중 노이즈 제거에 관한 연구”, 포항공대 철강대학원 석사 학위논문, 2006.
- [4] G. C. Stone and J.F. Kapler, “Stator winding monitoring”, IEEE IA Magazine, Vol. 4, No. 5, pp. 15~20, 1998.
- [5] B.A. Lloyd, S.R. Campbell, G.C. Stone, “Continuous on-line PD monitoring of generator stator windings”, IEEE Trans EC, Dec. 1999, pp 1131-1137.
- [6] W. McDermid, J.C. Bromley, “Experience with directional couplers for partial discharge measurements on rotating machines in operation”, IEEE Trans. EC, June 1999, pp175-184.
- [7] R.E.James and B.T.Phung, “Development of computer-based measurements and their application to PD pattern analysis”, IEEE Trans. Die. and Elect. Insul Vol. 7, No. 1, pp.57-63. 1997.

◇ 저자소개 ◇

신희상 (申熙尙)

1980년 9월 18일생. 2007년 숭실대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

조성민 (尹尙濶)

1980년 10월 3일생. 2003년 숭실대 전기공학과 졸업. 2008년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

강 철 (姜 鐵)

1980년 3월 11일생. 2007년 숭실대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

강동식 (姜東植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기 물리 연구그룹 책임연구원 그룹장.

조국희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기 물리 연구그룹 책임연구원 수직 연구팀장.

김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.