고압 회전기 부분방전 신호에 혼합된 인접상 유도 잡음 제거 기법

論 文
58-2-19

A Technique for Removing Adjacent Induction Noise Mixed with Partial Discharge Signals of High Voltage Rotating Machines

尹 永 祐* · 李 相 和** · 黃 敦 夏*** · 秋 榮 培§ · 姜 東 植†
(Young-Woo Youn · Sang-Hwa Yi · Don-Ha Hwang · Young-Bae Choo · Dong-Sik Kang)

Abstract - Analysis of the partial discharge signal, a technique to diagnose the stator winding insulation is a key function for the diagnosis of high voltage rotating machines and requires high precision. To satisfy this requirement, various denoising techniques such as filtering and differential methods were proposed. However, these techniques can not eliminate a adjacent induction noise that decreases reliability of the diagnosis. A simple novel denoising algorithm, therefore, is proposed for removing the adjacent induction noise in this paper. The algorithm shows good performance in the real partial discharge signals measured by 13kV class capacitive couplers installed at hydro-generator in Dae-cheong Dam.

Key Words : High Voltage Rotating Machine, Partial Discharge, Adjacent Induction Noise, Noise Elimination

1. 서 론

최근 산업설비의 증대와 국민생활의 향상에 따른 전력수요의 급격한 증가로 인해, 전력의 안정적 공급이 심각한 어려움에 직면하고 있는 상황이다. 이에 따라 산업설비로 많이 사용되는 고압 회전기의 안전운전과 절연 진단이 매우 중요하게 인식되고 있다.

고압 회전기 절연 진단방법은 기기를 정지하고 절연상태를 측정하는 정지중(Off-line) 진단법과 현장에서 운전중인 상태에서 절연상태를 측정하는 운전중(On-line) 진단방법으로 구분할 수 있으며[1], 두 경우 모두 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 신호를 계측하여 절연을 진단하는 방법이 널리 이용되고 있다[2～4]. 운전정지가 필요하지 않고, 시험장치의 설치 및 측정이 간단하며, 다양한 종류의 방전 측정이 가능한 이유로 활발한 연구가 수행중인 운전중 고압 회전기 고정자 권선의 절연 진단법에서 가장 문제가 되고 있는 것은 운전중에 발생하는 부분방전 신호 이외에 불필요한 외부잡음 신호가 함께 측정된다는 것이다. 현재 상용화 되어 고압 회전기에 적용되고 있는 외부잡음 제거 방법인 Filtering 기법과 차동(Differential)기법은 외부잡음 신호중 저주파 외부 잡음과 전 위상에 걸쳐 비슷한 크기로 나타날 확률이 높은 백색 잡음은 효과적으로 제거하지만, 인접상에서 발생된 부분방전 신호가 유도에 의하여 특정 위상에 집중적으로 혼입된 인접상 유도 잡음을 제거하지 못하여 부분방전 신호 분석의 신뢰성을 저하하는 문제를 야기한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 논문에서는 대청댐 13[kV]급 수력발전기 고정자 권선에서 160[pF]용량의 접촉식 Capacitive Coupler를 Directional 방법으로 장착하여[5] 측정한 부분방전 신호에서 국내 최초로 발견한 인접상 유도 잡음의 특성을 분석하고, 이를 고려하여 부분방전 신호는 최대한 유지하면서 인접상 유도 잡음을 제거하는 알고리즘을 제시하였다.

* 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 電力器機硏究센터 硏究員
** 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 電力器機硏究센터 先任硏究員
*** 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 電力器機硏究센터 先任硏究員 · 工博
§ 正 會 員 : 巨濟大學 船舶技術系列 副敎授 · 工博
† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究院 電力器機硏究센터 센터장 · 工博
E-mail : dskang@keri.re.kr
接受日字 : 2008年 8月 27日
最終完了 : 2008年 12月 13日

2. 발전기 고정자 권선의 부분방전과 인접상 유도 잡음 신호의 특성

2.1 부분방전 신호의 특성

일반적으로 부분방전 펄스형태는 그림 1과 같이 전압곡선(사인파)중 상승 사이클에 반복적으로 발생한다. 구체적으로, 전력설비의 제작불량이나 시공불량에 의해 절연물 내부에 형성된 보이드에 교류전압 E_a가 인가되고, 보이드 양단에 걸리는 전압이 파괴전압 E_b에 도달하여 보이드에서 코로나가 발생하면 보이드의 전압은 대단히 짧은 시간에 잔류전압 V_r까지 저하 한다. 인가전압이 상승 중이므로 보이드에 걸리는 전압이 다시 E_b에 도달하면 다음의 코로나가 발생한다. 인가전압이 파고값을 넘어 저하되기 시작하면 보이드 양단에는 전하가 반대방향으로 충전되고 전압이 $-E_b$에 도달하면 반대방향의 코로나가 발생한다. 이와 같이 인가전

압의 상승 사이클과 하강 사이클마다 방전구간 및 비방전구간이 반복하게 된다. 부분방전은 항상 잔류전하에 의하여 가역현상이 있게 되며 이로 인해 방전 펄스의 발생은 복잡한 양상을 나타낸다. 예를 들면, 실제적인 부분방전에서는 절연물의 누설저항, 극성효과, 보이드 내면에 대한 누설저항의 변화 등에 따라 E_b 및 V_r이 모두 일정하지는 않다. 이러한 변동 요소가 있기 때문에 방전 펄스의 주기와 크기가 현저하게 불균형이 된다[6].

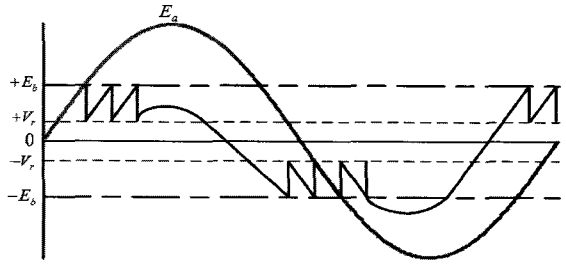


그림 1 Void의 절연 파괴 전압과 부분방전 파형

Fig. 1 Breakdown voltage of void and partial discharge waveform

2.2 인접상 유도 잡음 신호의 특성

전 위상에 걸쳐 비슷한 크기로 나타날 확률이 높은 백색 잡음과는 달리 인접상 유도 잡음은 인접한 상에서 발생된 크기가 큰 부분방전 신호가 유도에 의하여 특정 위상에 집중적으로 혼입된다. 그림 2는 A상을 기준으로 동기화한 3상 부분방전 신호의 발생을 보여준다. 각 상의 부분방전 신호는 전압곡선(사인파)의 상승부위에 집중적으로 나타나며, A상의 인접상인 B, C상의 크기가 큰 부분방전 신호가 모두 유도된다고 가정하면 그림 2에 나타낸 바와 같이 특정 위상 구간에 인접상 유도 잡음이 집중적으로 나타남을 알 수 있다.

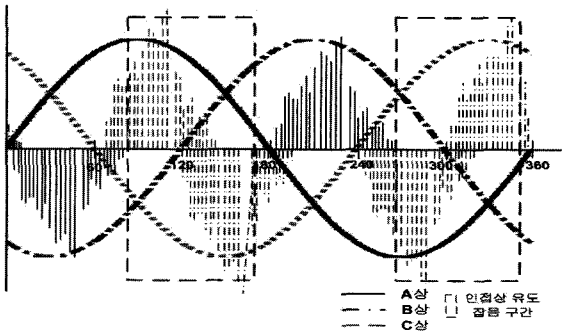


그림 2 인접상 유도잡음과 3상 부분방전 신호

Fig. 2 Adjacent induction noise and 3 phase partial discharge signals

3. 발전기 고정자 권선의 부분방전 계측 신호의 분석

신호의 계측은 25년 이상 가동 중인 대청댐 13[kV]급 수력발전기 고정자 권선에서 160[pF]용량의 접촉식 Capacitive Coupler를 그림 3과 같이 Directional 방법으로 장착[5]하여 운전 상태의 고압 회전기에서 부분방전 신호를 계측하였다. 각 신호는 부분방전 신호의 발생 주파수 대역을 고려한 3[MHz]～100[MHz] 대역의 Band-Pass Filter를 통과한 후 4중의 고속의 Peak Detector & Hold 회로에서 60[Hz] 한주기 동안 3600개의 Peak 신호만을 A/D 샘플링 하여 계측하였고 이러한 신호를 120주기 누적하여 표현하였다.

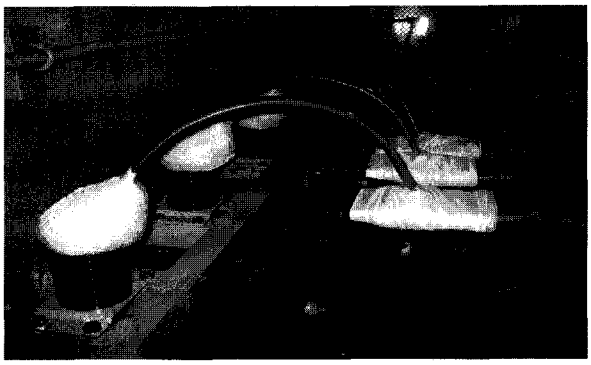
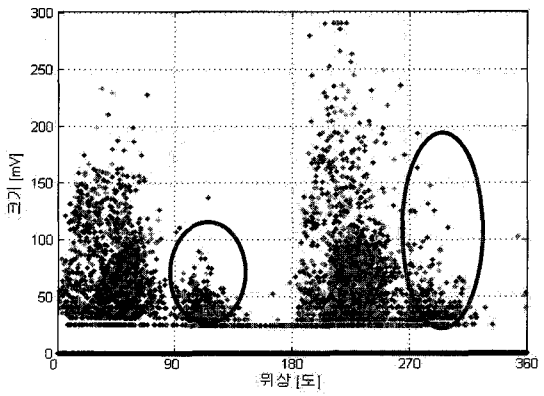


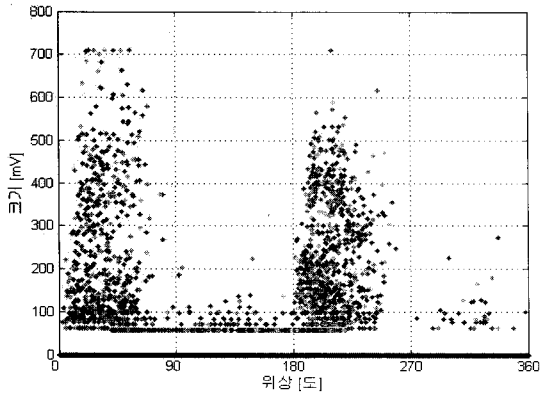
그림 3 고정자 권선 출력단 Capacitive Coupler 설치

Fig. 3 Capacitive Coupler installation at the stator winding output

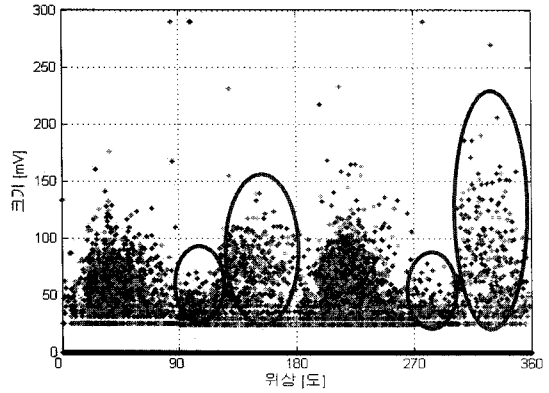
그림 4의 (a), (b), (c)는 각 상을 기준으로 동기화한 운전 중 대청댐 수력발전기 3상(A, B, C) 부분방전 신호의 위상 대 크기 분포를 점으로 표현한 예이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실제 현장에서 계측된 신호는 Band-Pass Filter를 통과하더라도 부분방전 신호뿐만 아니라 부분방전 신호와 같은 주파수 대역에서 발생한 외부 잡음이 함께 측정됨을 알 수 있다. 구체적으로, 다른 상에 비해 부분방전 신호의 크기가 큰 B상은 부분방전 신호와 외부 잡음 중 전 위상에 걸쳐 비슷한 크기로 나타날 확률이 높은 백색 잡음이 관찰되는 반면, A상과 C상의 경우에는 부분방전 신호와 백색잡음 뿐만 아니라 각각 B상 A, B상으로 추정되는 인접상에서 발생된 크기가 큰 부분방전 신호가 유도에 의하여 혼입된 인접상 유도 잡음이 특정 위상에 집중적으로 나타남을 알 수 있다.



(a) A상 신호의 위상 크기 표현



(b) B상 신호의 위상 크기 표현



(c) C상 신호의 위상 크기 표현

그림 4 3상 신호의 위상 크기 표현
Fig. 4 Phase Magnitude expression of 3 phase signals

4. 기존의 고주파 Filtering 기법 및 차동(Differential) 기법의 한계

회전기 고정자 권선의 운전중 부분방전 측정에서 주로 사용하는 하드웨어적 외부 잡음 제거 기법으로는 Filtering 기법과 차동 기법이 있다. Filtering 기법은 부분방전 신호 대역인 수 MHz에서 수십 MHz 이상만을 통과 시키는 고주파 필터를 이용하는 방식으로, 그림 4에서 볼 수 있듯이 저주파 외부 잡음 제거에는 효과적이나, 부분방전 신호와 비슷한 대역을 가지는 고주파 외부 잡음을 제거하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 개발 및 Filtering 기법 적용후에 적용되는 차동기법은 그림 5에 나타낸 것과 같이 각 상에 2개의 센서를 설치하여 부분방전 신호의 시간 지연을 발생시켜 부분방전 신호와 비슷한 대역의 외부 잡음을 제거한다. 구체적으로, 서로 다른 위치에 2개의 접촉식 부분방전 센서를 설치하고, 두 센서 간의 거리 L1은 부분방전 신호와 외부 잡음의 신호 지연을 고려하여 결정하고, 센서의 출력 라인 길이 L2는 L1의 길이에 의해 발생하는 외부 잡음의 시간 지연을 보상할 수 있는 길이를 고려하여 결정한다.

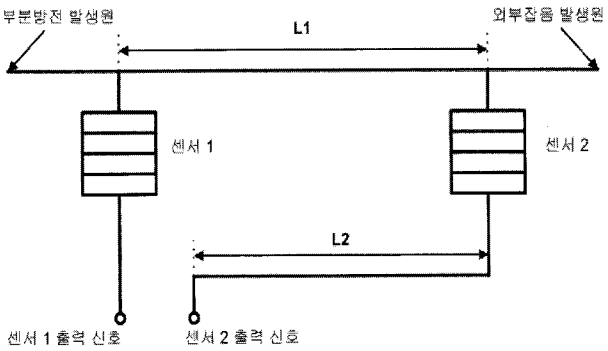
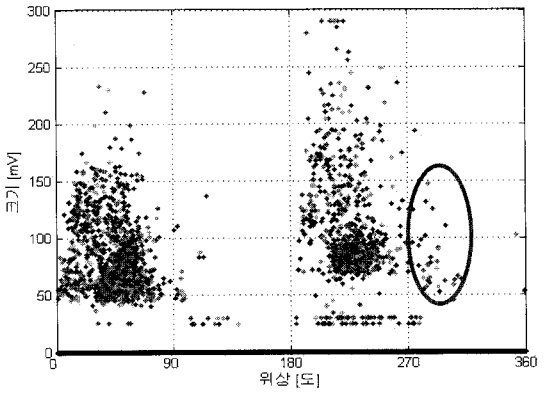
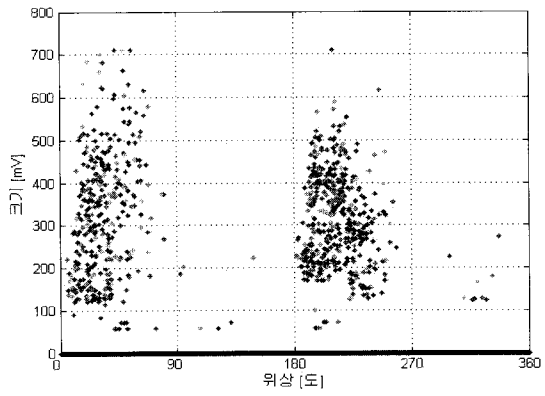


그림 5 차동 기법 도면
Fig. 5 Schematic of the differential method

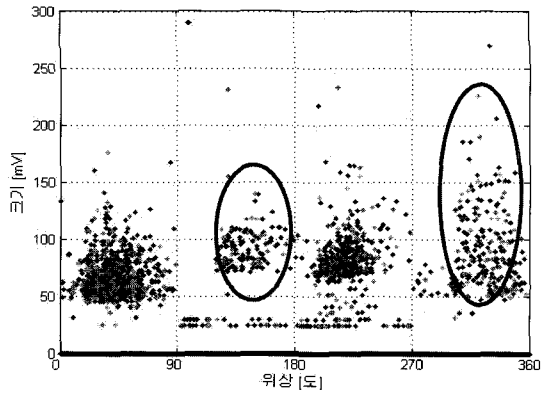
상기 차동 기법의 성능을 평가하기 위해 그림 4의 신호에 적용하였다. 그 결과 그림 6에 도시된 바와 같이, 차동 기법은 백색 잡음 제거에는 효과적이지만, 인접한 상의 크기가 큰 부분방전 신호가 유도되어 혼입된 A, C상, 특히 C상에 대해서는 인접상 유도 잡음을 제거하지 못함을 알 수 있다. 따라서 보편적으로 이용되고 있는 기존의 하드웨어적 잡음 제거 기법들은 인접상 유도 잡음이 발생할 시에 이를 제거하지 못함으로써 부분방전 신호 분석의 신뢰성을 저하시킴을 알 수 있다.



(a) 차동 기법이 적용된 A상 신호의 위상 크기 표현



(b) 차동 기법이 적용된 B상 신호의 위상 크기 표현



(c) 차동 기법이 적용된 A상 신호의 위상 크기 표현

그림 6 차동 기법이 적용된 3상 신호의 위상 크기 표현

Fig. 6 Phase Magnitude expression of 3 phase signals applied with differential method

5. 제안 기법

5.1 인접상 유도 잡음 제거 알고리즘

본 논문에서는 종래의 하드웨어적 잡음제거 기법에서 해결하지 못한 고압 회전기에서 발생되는 부분방전 신호에 유입된 인접상 유도 잡음을 제거하기 위하여 신호의 위상 대 크기 분포 정보를 이용한 잡음제거 알고리즘을 제안하고 그 순서도를 그림 7에 나타내었다.

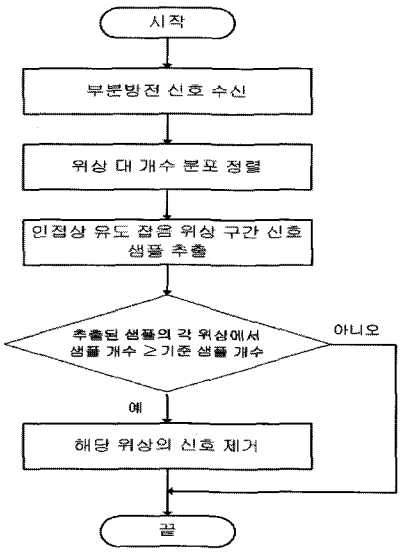


그림 7 인접상 유도 잡음 제거 알고리즘 순서도

Fig. 7 Flowchart of adjacent induction noise elimination algorithm

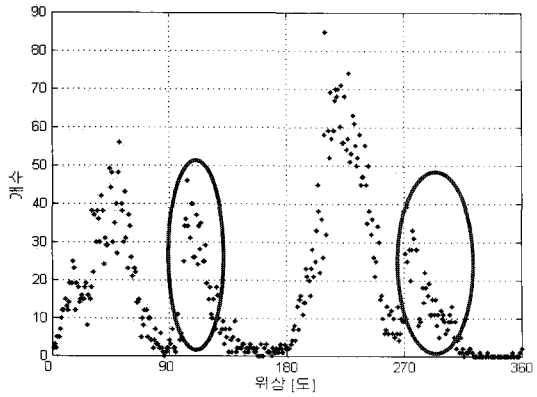
제안 알고리즘의 구성은 다음과 같이 4단계로 이루어진다. i) 모든 상의 부분방전 신호를 수신하는 단계, ii) 상기 수신된 부분방전 신호들을 위상 대 개수 분포로 정렬하는 단계, iii) 인접상 유도 잡음 위상 영역에 해당하는 신호 샘플을 추출하는 단계, iv) 상기의 각 위상에 해당하는 샘플 개수와 기준 샘플 개수를 비교하여 인접상 유도 잡음이라 판단되는 신호를 제거하는 단계를 포함하여 구성된다.

i) 단계인 부분방전 신호를 수신하는 단계에서는 그림 4와 같이 각 상을 기준으로 동기화된 모든 상의 부분방전 원신호들을 동시에 수신한다. 이후 수신된 부분방전 신호들을 ii) 단계에서 위상 대 개수 분포로 정렬하며, 그림 4의 신호에 적용한 결과를 점으로 표기한 예가 그림 8이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이, 인접한 상의 영향을 거의 받지 않은 B상의 경우에는 부분방전 신호와 백색잡음만 존재하여 전압곡선(사인파)중 상승부위에 신호가 집중되어 있지만, 각각 B상 A, B상으로 추정되는 인접상에서 발생된 크기가 큰 부분방전 신호가 유도에 의하여 혼입된 인접상 유도 잡음이 나타나는 A상과 C상은 전압곡선(사인파)중 상승부위 위상 뿐만 아니라 특정 위상 구역에도 신호가 집중되어 해당 위상 구역의 샘플 개수가 커짐을 알 수 있다. 이때의 특정 위상 구역을 인접상 유도 잡음 위상 구간으로 정하고 해당된 위상 구간 신호의 샘플 추출을 iii) 단계에서 수행한다. 상기 인접상 유도 잡음 위상 구간은 현장 상황에 따라 다양하게 변동 가능하며, 본 실시예와 같이 각 상을 기준으로 정확하게 동기화 되었을 경우에는 90～175도, 270～355도로 선정할 수 있다. 마지막 단계인 iv) 단계에서는 인접상 유도 잡음으로 판단된 신호를 제거하기 위하여 상기 iii) 단계에서 추출한 인접상 유도 잡음 위상 구간 신호의 각 위상에서 샘플 개수와 인접상 유도 잡음의 판단 기준이 되는 기준 샘플 개수를 비교하여 샘플의 개수가 기준 샘플 개수 이상이면 해당 샘플을 인접상 유도 잡음이라 판단하여 제거한다. 이는 인접상 유도 잡음의 특성인 특정 위상에 집중적으로 발생하여 해당 위상의 샘플 개수를 증가시키는 특성을 이용한 것이다. i상의 기준 샘플 개수는 식(1)과 같이 i상의 신호가 존재하는 인접상 유도 잡음 위상 구간 내의 평균 샘플 개수에 인접상의 영향을 고려한 가중치(Gain, G_i)를 곱하여 구한다.

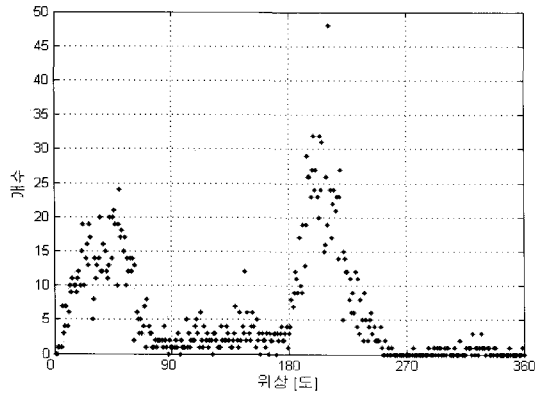
$$i\text{상의 기준 샘플 개수} = M_i G_i = \frac{\sum_{k \in AP_i} N_i(k)}{K_i} G_i \tag{1}$$

여기서, AP_i는 i상의 인접상 유도 잡음 위상 구간, K_i는 i상의 신호가 존재하는 인접상 유도 잡음 위상 구간의 크기, k는 신호의 위상, $N_i(k)$는 i상의 해당 위상 샘플의 개수, G_i는 i상에서 0이상 1이하의 값을 갖는 가중치, M_i는 i상의 신호가 존재하는 인접상 유도 잡음 구간의 평균 샘플 개수를 나타낸다. 인접상 유도 잡음 구간의 평균 샘플 개수(M_i)는 부분방전 신호에 혼입된 인접상 유도 잡음의 정도를 나타내며 이 값이 클수록 인접상 유도 잡음이 많이 혼입된 것이다. 가중치(G_i)는 인접상의 영향을 고려한 값으로서 n상이 존재한다고 가정할 때 식(2)와 같이 모든 상중 신호가 존재하는 인접상 유도잡음 구간의 최소 평균 샘플 개수에 해당 상의 신호가 존재하는 인접상 유도잡음 구간의 평균 샘플 개수를 나누어 구한다. 이는 인접상 유도 잡음의 영향이 클수록 0의 값에 가까운 값을 갖도록 설정하여 기준 샘플 개수가 작게 설정되도록 한다.

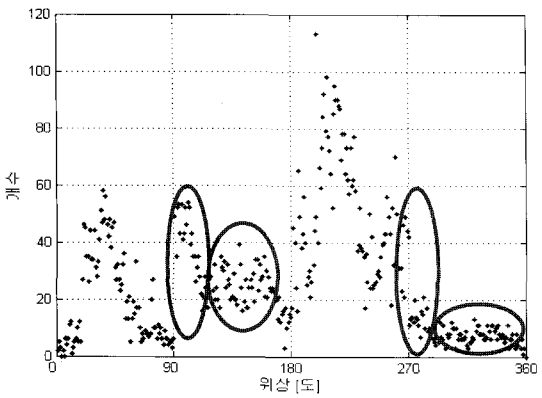
$$G_i = \frac{\min\{M_1, M_2, \ldots M_{n-1}, M_n\}}{M_i} \tag{2}$$



(a) A상 신호의 위상 개수 표현



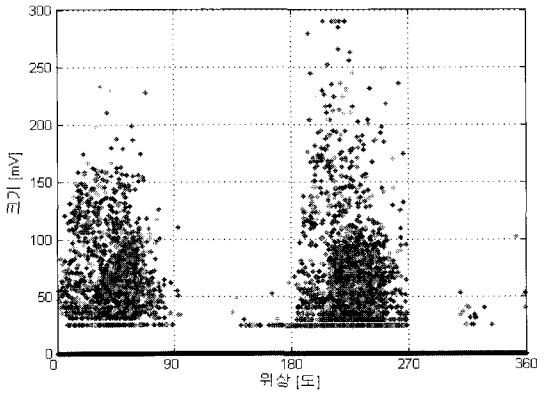
(b) B상 신호의 위상 개수 표현



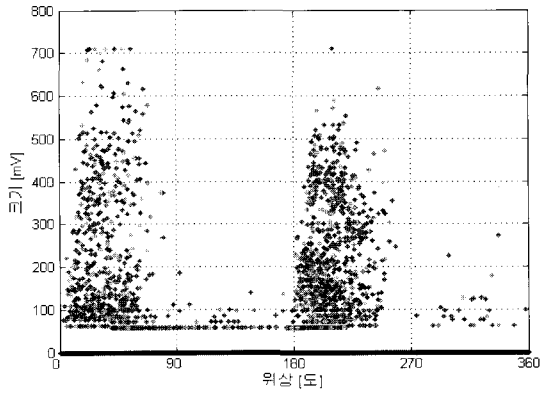
(c) C상 신호의 위상 개수 표현

그림 8 3상 신호의 위상 개수 표현

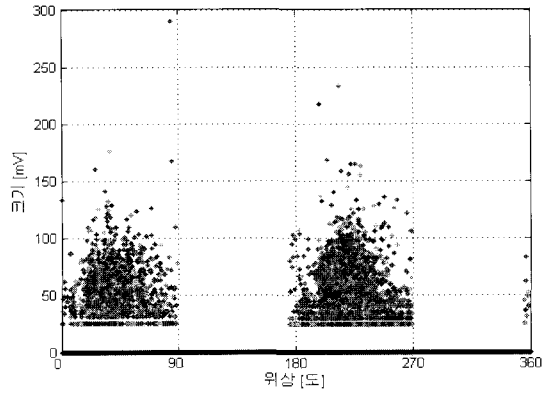
Fig. 8 Phase Count expression of 3 phase signals



(a) 제안 알고리즘이 적용된 A상 신호의 위상 크기 표현



(b) 제안 알고리즘이 적용된 B상 신호의 위상 크기 표현



(c) 제안 알고리즘이 적용된 C상 신호의 위상 크기 표현

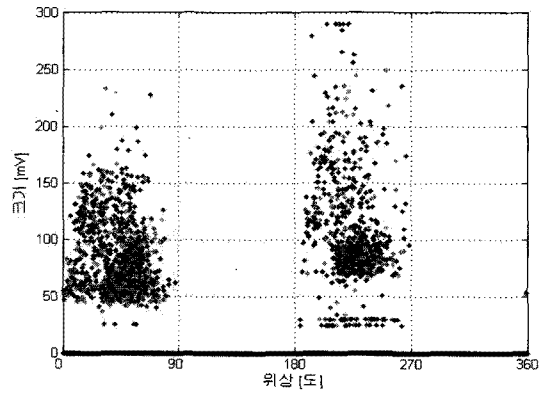
그림 9 제안 알고리즘이 적용된 3상 신호의 위상 크기 표현

Fig. 9 Phase Magnitude expression of 3 phase signals applied with proposed algorithm

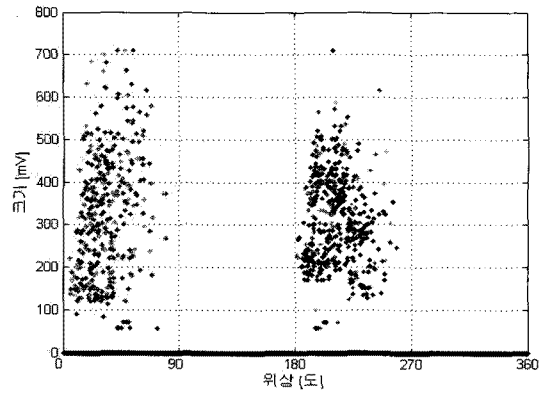
5.2 인접상 유도 잡음 제거 결과 및 도찰

그림 9는 그림 4의 신호에 인접상 유도 잡음 위상 구간을 90～175도, 270～355도로 설정한 제안 알고리즘을 적용한 결과이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 인접상 유도 잡음 제거 알고리즘은 종래의 하드웨어적 잡음 제거 기법으로는 해결할 수 없었던 문제인 인접상 유도 잡음을 효과적으로 제거함을 알 수 있다.

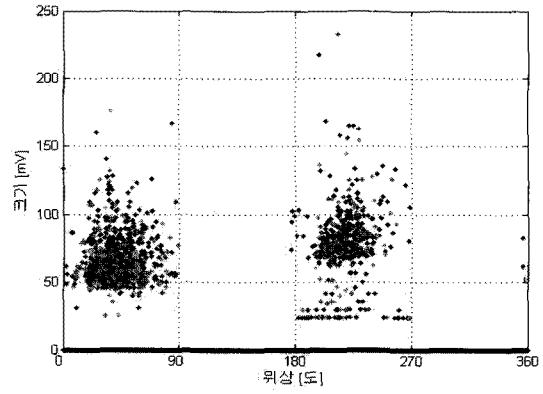
또한 제안 알고리즘을 기존의 하드웨어적 잡음제거 기법인 차동(Differential)기법과 결합하여 그림 4의 신호에 적용한 결과인 그림 10에서 볼 수 있듯이 본 논문의 제안 기법은 종래 기술과의 연동이 쉬울 뿐만 아니라 종래 기술과의 결합을 통해 부분방전 신호에 혼입된 외부잡음인 백색 잡음과 인접상 유도 잡음을 보다 효과적으로 동시에 제거함을 알 수 있다.



(a) 결합 기법이 적용된 A상 신호의 위상 크기 표현



(b) 결합 기법이 적용된 B상 신호의 위상 크기 표현



(C) 결합 기법이 적용된 C상 신호의 위상 크기 표현

그림 10 결합 기법이 적용된 3상 신호의 위상 크기 표현

Fig. 10 Phase Magnitude expression of 3 phase signals applied with combined scheme

6. 결 론

본 논문에서는 운전중 고압 회전기 고정자 권선의 부분방전 신호에서 국내 최초로 발견한 인접상 유도 잡음을 제거하기 위하여 계측 신호의 위상 대 개수 분포 정보를 이용하여 인접상 유도 잡음을 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 검증을 위하여 부분방전 측정 시스템을[5] 통해 측정한 대청댐 13[kV]급 수력 발전기 고정자 권선의 부분방전 신호에 제안 알고리즘을 적용하였다. 그 결과 종래의 하드웨어적 잡음제거 기법인 Filtering 기법 및 차동기법으로는 제거하지 못한 인접상 유도잡음을 부분방전 신호는 최대한 유지하면서 제거함을 확인 할 수 있었다. 또한 제안 알고리즘은 기존의 차동 기법과 연동이 용이하여 인접상 유도 잡음이 존재하는 부분방전 신호일 경우에도 기존 기법의 성능을 유지시킬 수 있는 장점을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 제안한 인접상 유도잡음 제거 알고리즘은 고압 회전기기 절연상태 진단의 신뢰성을 크게 향상시킴과 함께 상당한 상업적 · 경제적 효과가 기대되리라 판단된다.

참 고 문 헌

[1] 강동식 외, "고압 회전기 On-line 부분방전 측정용 Ceramic Coupler 특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 51C, No. 5, pp. 205～212, 2002.

[2] Wilfried Hutter, "Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 3, pp. 21～32, May/June 1992.

[3] A. Wilson, R.J. Jackson, "Discharge Detection Techniques for Stator Windings", IEE Proceedings, Vol. 132, Part B, No. 5, pp. 234～244, September 1985.

[4] I. M. Culbert, H. Dhirani and G. C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines", EPRI Publication EL-5036, Vol. 16, June 1989.

[5] 강동식 외, "13 kV급 수력발전기 고정자 권선용 On-line 부분방전 측정 시스템 개발 및 현장적용 평가", 대한전기학회 논문지, Vol. 55, No. 4, pp 189～198, 2006.

[6] R. E. James and B. T. Phung, "Development of Computer-based Measurements and their Application to PD Pattern Analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, October 1995.

저 자 소 개

윤 영 우 (尹 永 祐)

2005년 한국정보통신대 공학부 졸업. 2007년 동 대학원 정보통신공학과 졸업(석사). 2007년~현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 전력기기연구센터 연구원.
Tel : 055-280-1454, Fax : 055-280-1547
E-mail : ywyoun@keri.re.kr

이 상 화 (李 相 和)

2001년 고려대학교 전기전자전파 공학부 졸업. 2003년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 전력기기연구센터 선임연구원.
Tel : 055-280-1556, Fax : 055-280-1547
E-mail : shyi@keri.re.kr

황 돈 하 (黃 敦 夏)

1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 전력기기연구센터 선임연구원.
Tel : 055-280-1544, Fax : 055-280-1547
E-mail : dhhwang@keri.re.kr

추 영 배 (秋 榮 培)

1982년 부산대 공대 전기기계공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박) 1984년~1985년 (주)효성중공업 근무. 1986년~1991년 한국전기연구원 근무. 현재 거제대학 선박기술계열 부교수
Tel : 055-680-1606, Fax: 055-680-1517
E-mail: ybchoo@koje.ac.kr

강 동 식 (姜 東 植)

1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 책임연구원, 2005년 7월~2008년 11월 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹 그룹장. 2008년 12월~현재 한국전기연구원 전력기기연구센터 센터장.
Tel : 055-280-1573, Fax : 055-280-1547
E-mail : dskang@keri.re.kr