

부분방전 측정에 의한 저압 유도전동기의 절연진단 기술

▣ 길 경 식 / 한국해양대 전기전자공학부
 ▣ 황 돈 하, 강 동 식, 김 용 주 / 한국전기연구원

1. 서 론

절연 시스템에 사용된 절연재료의 특성이 우수하고 최적의 절연 설계가 행해졌다고 하더라도 전기설비 및 전기기기의 운전 중에 나타나는 내적·외적 요인들에 의하여 절연열화가 진행되며, 설계단계에서 고려된 기대수명을 다하지 못하고 절연파괴에 이르게 된다. 이들 기기에 절연파괴가 발생하면 기능을 상실하여 사회적·경제적으로 큰 손실을 유발하게 된다. 이러한 사고를 방지하고 최적의 유지·보수에 의한 경제적 전기설비의 운용을 위해서는 생산 초기단계부터 정확한 절연성능 평가가 이루어져야 한다.

유도전동기는 전기 에너지를 효과적으로 물리 에너지로 변환하는 장치로서 산업설비 중 동력원으로 가장 많이 사용되고 있다. 그 중에서 600V급 이하의 저압 유도전동기는 엘리베이터, 주차설비, 반도체 제조설비 및 의료기기 등 인명에 대한 절대적인 안정성과 중단없이 연속적인 공정을 통하여 제품을 생산할 수 있는 높은 신뢰성 보장이 요구되는 핵심 산업전기설비로서 매우 중요한 대상이라 할 수 있다.

현재는 마이크로프로세서와 디지털제어기법의 도

입, 전력용 반도체 소자의 진보에 따른 전력전자 기술의 발전에 힘입어 각종 산업설비에 유도전동기가 변속 제어시스템의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 그러나 유도전동기의 가변속 구동용 인버터는 FET, IGBT 등 빠른 스위칭 속도를 가진 소자를 사용함에 따라 최고 수 천V/us의 과도전압을 발생시킨다. 이러한 과도전압은 절연재료의 조기열화를 초래하고 전동기의 권선에 불규칙한 전압분포를 야기시켜 절연파괴를 발생하게 되어 사회적·경제적으로 큰 손실을 유발하게 되므로 절연파괴 사고를 방지하고, 최적의 유지·보수에 의한 경제적 전기설비의 운용을 위해서는 초기 생산단계에서부터 정확한 절연평가가 요구된다. 그러나 지금까지 유도전동기에 대한 절연열화, 평가기술 및 절연파괴에 대한 대책은 주로 고압 유도전동기를 대상으로 한 것이 대부분이며, 저압용 유도전동기의 절연파괴사고 대책으로는 절연물을 대체 보강하거나 스위칭 서지를 저감시키는 필터의 설치가 필수적으로 인식되어 왔다. 하지만 추가적인 비용이 요구되는 이러한 대책보다는 생산단계 초기에 품질관리를 강화하여 불량품의 출고를 차단하는 방식이 선호되고 있다. 그러나 품질관리 측면에서 적용되고 있는 절연파괴 시험이나, 내

전압 시험 등은 유도전동기의 절연상태에 직접적인 영향을 주어 절연성능 저하의 원인이 되므로 보다 신뢰성 있는 절연 및 수명 평가기술의 개발과 적용이 요구된다.

2. 절연열화와 시험법

2.1 절연열화기구

열적, 기계적, 전기적 각종 스트레스에 의해 절연체 중 유기질 성분의 분자구조가 변화하고 절연층 자체에 기포나 균열이 발생하여 본래의 절연성능을 저하시키는 현상이 발생하는데 이것을 “절연열화현상”이라고 한다. 유도전동기는 코일절연으로 이루어지고 복합적인 원인에 의해 열화가 진행되어 수명에 한계를 가지고 있으므로 전동기의 수명을 연장하기 위해서는 생산단계 초기에 정확한 절연평가를 통하여 초기 불량률을 낮추고, 열화상태 및 열화부위를 조기에 찾아내어 계획적으로 보수 개선해 나가야 한다. 유도전동기의 절연은 마이카, 유리 등의 무기재료와 접착제, 코팅제 등과 같이 탄소결합을 골격으로 하는 유기재료로 구성되는데 각각의 재료는 내적·외적 스트레스를 받으므로 시간의 흐름에 따라 열화현상이 발생한다.

절연열화의 진행정도는 스트레스의 종류나 사용조건 등에 따라 각각 다르게 나타나며 결과적으로 절연수명에 큰 차이를 유발한다. 슬롯 내부권선 사고의 대부분은 대지절연의 소손과 지락에 의해 발생되고, 슬롯 내부권선이나 코일 말단부에서 층간절연이 소손된다. 이어서 대지절연에 파급되어 지락사고가 발생하는 경우가 대부분이며, 예지나 코일엔드 고정재의 열화에 의해 기계적 진동을 받아 지락고장으로 이어지기도 한다.

유도전동기의 절연열화 현상은 다양하게 나타날 때 열화 요인을 분류하면 ① 열적 열화, ② 전기적 열화, ③ 기계적 열화, ④ 환경적 열화로 분류할 수 있으며, 대부분의 경우 이러한 요인이 복합적으로 작용한다.

(1) 열적 열화

운전 중 발열에 의한 산화열화 또는 열분해로 절연특성이나 절연층의 기계적 강도 등이 저하하는 현상을 “열적 열화”라 한다. 전동기의 고정자 권선에서는 온도 변화가 기계적 응력을 일으키지만, 단지 온도상승에 의한 발열만으로 절연재료에 손상을 일으키지는 않는다. 열적 열화는 유도전동기의 주요 요소인 고정자, 회전자 및 성층철심 절연재료에서 발생하며, 고정자 철심은 고정자와 회전자 권선에서 발생하는 동손에 의해 간접적으로 영향을 받을 뿐만 아니라 성층철심에서 철손에 의해서도 열적 스트레스를 받는다. 열적 열화는 층간 접촉저하, 층간박리, 공극이 생성되어 절연내력이 현저히 저하되며, 회전자에 사용되는 모든 절연 및 보강 재료는 권선에서 발생하는 열에 의해 경년 열화가 진행된다.

(2) 전기적 열화

유도전동기 권선에서 절연재료의 절연내력이 정격전압 혹은 과도전압에 더 이상 견디지 못할 정도로 약화되면 권선에서 절연파괴가 일어난다. 이러한 전기적 열화에는 부분방전, 도체 표면방전, 주절연 내부방전, 슬롯방전 및 단말권선 방전 등이 있다. 절연층 내에 박리나 보이드가 존재하면 운전전압에서 부분방전이 발생하여 절연층이 침식되고, 방전발생에 따른 부산물인 열, 활성 산소, 오존 등을 생성하여 물리적 분해를 일으킨다. 부분방전에 의한 침식은 유기재료의 분해를 발생시키며 보이드를 확대하고 보이드 사이의 교락을 발생시켜 보다 큰 방전으로 진전된다. 부분방전 열화는 전계가 집중되기 쉬운 도체부근에서 시작되며 층간절연의 절연내력이 저하되어 발생하고, 오손이나 흡습이 원인이 되어 코일절연 표면에서 외부방전을 발생시키기도 한다. 이러한 방전은 절연표면에 도전로를 형성하여 최종적으로 절연파괴에 이르게 되며 이 경우는 전압과 외부 환경요인과의 복합 열화를 발생하게 된다.

가. 부분방전

부분방전은 고체 절연재료 내부에 존재하는 기체

에 의해 미소공극의 절연이 파괴되는 현상으로 주로 절연체의 전계가 집중되기 쉬운 도체 근방에서 발생하며, 열화진전이 빠른 유기물질, 결합재(폴리에틸렌, 에폭시, 아스팔트), 합성에나멜 등에서 시작하여 마이카와 석면 같은 무기재료로 진전되어 결국 절연 파괴에 이른다.

나. 표면방전

표면방전은 주절연과 소절연 사이에서 미소공극에 의해 발생하며, 주절연 내부의 방전과 주절연 내의 미소공극은 제조시 바니시나 수지의 부적절한 함침 혹은 절연층의 박리에 의해 발생된다.

다. 슬롯방전

슬롯방전은 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임에 의해 마모되어 반도체층을 손상시키면, 일부 권선의 접지상태가 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에서 방전이 발생하게 되는데, 이때의 방전현상으로 인하여 고정자 권선의 주절연을 급격히 열화시킨다.

라. 단말권선 방전

단말권선 방전은 회전기의 단말권선부 사이 또는 다른 상과의 연결지점에서 전압차로 인해 부분방전이 발생되며 단말권선이 열화된다.

(3) 기계적 열화

기계적 열화는 회전기의 과도한 진동과 기계적 스트레스에 의한 손상으로 전동기의 기동정지, 급격한 부하변동으로 인해 정상운전 혹은 과도상태에서 고정자 권선에 나타나는 전자력에 기인한다. 이와 같이 주기적인 전자력에 의해 슬롯 내에서 권선이 움직이며 굽힘과 압축에 의해 도체와 주절연에 스트레스가 가해지고 절연재료가 마모된다. 기계적 스트레스로는 시동 정지시의 전자력, 운전 중의 진동, 냉열 사이클에 의한 응력 등이 있으며, 이들의 기계적 힘은 권선단말부에 집중이 되고, 코일 단말부 절연층의 갈라짐이나 팽창현상으로 나타난다.

(4) 환경적 열화

환경적 열화는 고정자 권선 표면이 화학약품, 유독가스, 분진, 수분 및 기름 등에 의해 단말권선의 절연층 표면에 도전성 물질이 부착됨으로써 일어나며 정지 중에 수분과 먼지가 흡수되어 절연층 열화에 크게 영향을 미친다. 습기의 경우는 절연저항의 저하에 기인하여 절연내력을 약화시키고, 먼지 등은 도전성이 낮아도 흡습에 의해 절연저항이 저하되고 이음새의 막힘으로 통풍 냉각을 저하시켜 온도상승에 의한 열 열화로 이어진다.

2.2 평가기술

유도전동기의 절연은 전압 측면에서 층간절연, 상간절연, 대지절연으로 구분할 수 있으며, 구조적 측면에서 슬롯부, 코일단말부, 접속부 및 리드 절연으로 나눈다. 이들 중 어느 한부분이라도 절연 기능을 상실하면 전동기의 절연파괴 사고로 직결되므로 절연상태에 대한 정확한 평가가 요구된다.

현재까지 국내에서는 유도전동기 절연진단에 사용되는 방법은 절연저항 시험, 직류전류 시험, 교류전류 시험, 유전정점 시험, 부분방전 시험, 초음파 진단 등을 실시하고, 종합적인 분석에 의하여 절연열화 진단을 수행하고 있다. 이중에서 부분방전 시험에 의한 절연평가 방법은 비파괴 시험으로서 절연체의 미소한 보이드 및 결합 등을 검출하므로 비교적 신뢰성있는 절연평가가 가능하다.

3. 부분방전

부분방전 시험법은 방전펄스를 직접 계측하기 때문에 상세한 데이터의 정확한 측정, 국부적인 방전의 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 부분방전 기법은 외부 잡음으로 인하여 신뢰성있는 결과를 도출하는 것이 어렵고, 단순한 방전 특성량에 의하여 열화진단을 행하는 오류가 발생할 수 있다. 또한 부분방전은 매우 복잡하고 다양한 형태로 발생하므로 부분방전 발생 메커니즘 및 부분방전의 특성을 파악하고 그것을 기본으로 유도전동기에서 발생하

는 부분방전에 대하여 검토하여야 한다.

3.1 부분방전의 발생

부분방전 시험법에 의한 저압 유도전동기에서 발생하는 방전발생원 추정과 열화정도를 진단하기 위해서는 정확한 부분방전 펄스를 측정하여야 한다. 실제 유도전동기에서 발생하는 부분방전은 층간절연, 상간절연, 대지절연 슬롯부 절연, 코일엔드부 절연, 접속부 및 리드절연 등에서 결함을 포함하는 부분에서 발생하게 된다.

부분방전은 절연재료 내부의 보이드, 전기트리 또는 표면에서 부분적으로 발생하는 것으로 절연물의 열화에 크게 영향을 미친다. 이러한 부분방전의 행동 특성은 그림 1의 회로를 사용하여 설명할 수 있다. 그림 1에서 영역 I 은 절연체에 결함이 존재하는 부분이며, 영역 II는 절연체의 전체부분으로 나타낼 수 있다. 결함부분에서 보이드의 정전용량은 c 로 표현되며 이것은 절연과피 통로로써 작용하게 된다. b 는 보이드와 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량이고, a 는 정상적인 부분의 정전용량 값을 나타낸다. 그림 2에는 표면방전(surface discharge)의 예를

나타낸 것으로 동일하게 표현되며, 표면에서 발생하는 방전은 전극의 정전용량 c 와 절연체를 통한 정전용량 b 로 되어있다. 그리고 절연체의 나머지 부분은 정전용량 a 로 표현된다. 그림과 같이 전극간의 절연물 중에 보이드가 존재하면, 인가전압의 상승과 더불어 보이드 양단 사이의 전압도 상승하고 보이드의 정전용량 c 에 전계가 집중적으로 가해져 공기의 절연내력 이상으로 되면 보이드에서 방전이 발생한다.

일반적으로 알려진 부분방전 펄스의 형태는 그림 3과 같이 반복적으로 발생하게 된다. 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다. 여기서 V_a 는 절연체 양단에 인가된 전압이며, V_c 는 보이드 양단의 전압이다. 보이드에서 방전은 V_c 가 절연과피 전압 U^+ 에 도달했을 때 발생하게 되고 방전은 시료 리드선에서 전류 임펄스를 초래하게 된다. 방전 발생 후 보이드의 전압은 다시 증가하게 되고, 보이드의 전압이 다시 U^+ 에 도달했을 때, 새로운 방전이 발생하게 되고 이러한 과정은 여러번 반복된다. 이러한 반복 과정에서, 새로운 방전 발생 전에 V_a 가 감소하게 되면 V_c 는 U^- 로 떨어지게 된다. 그림 3과 같은 방전 파형에서 보이드내에서 발생하는 방전전하량은 q_v 식 (1)과 같이 표현된다.

$$q_v \approx (b + c) \Delta V \quad (1)$$

여기서, $\Delta V = U - V$ 로 보이드내의 전압강하분이다.

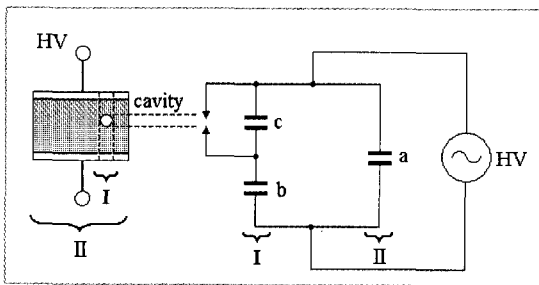


그림 1. 부분방전의 등가회로

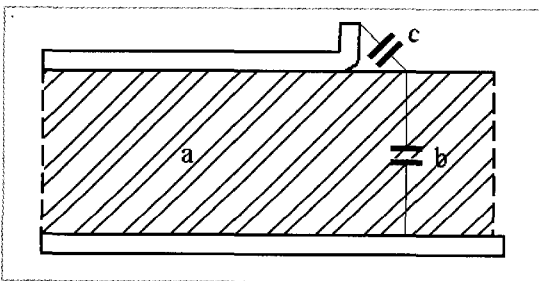


그림 2. 표면방전의 발생

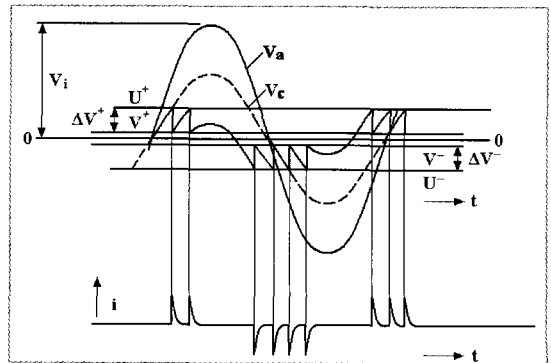


그림 3. 부분방전의 발생

그러나 q_v 은 직접 검출이 불가능한 값이므로 방전 발생시 리드선을 통해 흐르는 겉보기 전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다. 겉보기 방전전하량 q_a 는

$$q_a = b \Delta V \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다.

3.2 부분방전의 검출

부분방전 발생에 따라 펄스전류가 발생하고 이 펄스전류를 검출함으로써 부분방전의 유무를 판정할 수 있다. 부분방전 펄스를 외부에서 검출하는 기본적인 회로는 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 시료에 전원을 공급하는 전원, 부분방전 펄스전류를 펄스전압으로 변환하는 검출 임피던스, 펄스전류가 검출 임피던스에 유효하게 흐르도록 폐회로를 형성하기 위한 결합 콘덴서, 검출임피던스의 출력을 측정하는 장치로 구성된다. 일반적으로 전원과 시료 사이에는 전원에서부터의 잡음 유입이나, 부분방전 펄스전류의 전원으로 유출 방지를 위한 저항, 인덕턴스 등으로 폐회로를 구성한다. 이때 검출 임피던스의 접속위치는 시료의 고압 단자에 접속된 결합콘덴서의 접지단자와 대지사이 또는 시료의 접지단자와 대지사이에 접속하여 부분방전을 검출한다.

저압용 유도전동기의 생산단계에서 품질관리를 목적으로 절연평가를 수행하고 있는데, 주로 비파괴 내전압 시험이나 절연과피 시험으로 피시험 기기의 절연에 악영향을 줄 수도 있다. 이러한 시험방법 대신 낮은 전압에서 부분방전 펄스를 검출하는 것보다 정확한 절연상태의 평가가 가능하며, 일부에서

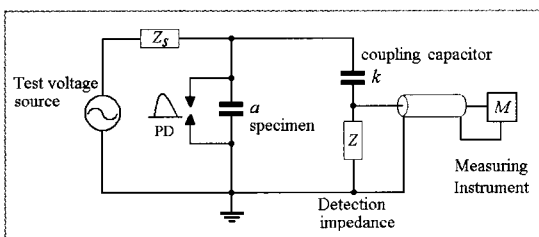


그림 4. 부분방전 검출 회로의 예

부분방전 시험법을 적용하여 품질관리에 적용하는 연구가 진행되고 있다.

부분방전 측정시스템의 개략적인 구성은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 부분방전 측정시스템은 시험전압 인가를 위한 전원공급부, 고주파 대역의 부분방전 펄스 검출을 위한 결합콘덴서 및 결합회로망, 미소 부분방전 펄스 증폭을 위한 저잡음 고감도 증폭회로 등으로 구성된다. 또한 부분방전 펄스는 대단히 작은 크기이므로 외부 잡음이 존재하면 검출 특성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 외부 잡음을 적절히 차단하기 위한 필터, 차폐, 접지에 대한 대책이 필요하다.

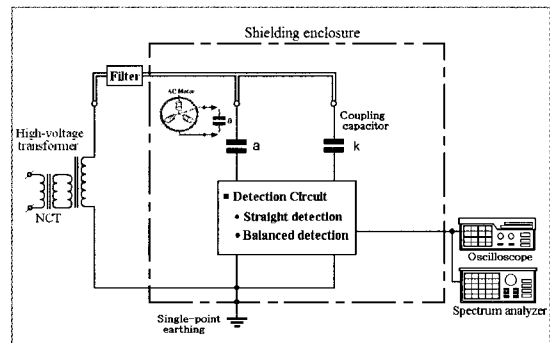


그림 5. 부분방전 측정시스템의 개략도

3.3 잡음 대책

저압 유도전동기에서의 부분방전 펄스는 방전의 크기가 미소하게 나타나므로 외부 잡음에 대한 영향을 받기 쉬우며, 정확한 부분방전 펄스 검출을 위해서는 잡음에 대한 영향을 평가하여 적절히 잡음을 억제하고, 억제되지 않는 잡음에 대해서는 검출회로의 주파수 대역을 조절하는 등의 기법을 적용하여 부분방전 펄스와 잡음의 분리가 가능해야 한다.

부분방전 측정시 외부 잡음은 전원에서부터 유입되는 전도 잡음, 외부로부터의 방사 잡음, 접지측으로부터 유입되는 접지 잡음의 3가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 부분방전 측정을 위해 외부로부터 공급되는 입력전원에 의한 잡음으로 수십 ~ 수백kHz 주파수 대역의 전도성 잡음이다. 입력전원에 의한

잡음은 전력계통의 차단기 등에 의한 서지와 전력용 반도체 응용기기에서 발생하는 고주파 잡음 및 전원 공급용 변압기 자체에서 발생하는 부분방전 등으로 구분할 수 있다. 전도성 외부 잡음을 차단하기 위해서는 전원공급 및 부분방전 검출에 사용되는 기기 및 소자는 시험전압 범위에서 방전이 발생하지 않는 안정적인 것을 사용하고, 서지 및 고주파 잡음에 대해서는 보호회로의 구성과 직렬 필터회로의 설치에 의해 충분히 차단될 수 있다.

두 번째로 방송국 등에서 송신되는 수십MHz 대역의 고주파 통신신호, 외부 전기기기로부터 발생하는 방사성분의 잡음이 있다. 이러한 방사잡음은 차폐기법 등을 적용하여 차단할 수 있다. 차폐함의 차폐효과는 금속재질의 재료적인 특성에 큰 영향을 받기 때문에 가능한 도전율이 낮은 재질을 사용해야 한다. 차폐함의 구조를 그림 6과 같이 이중 차폐구조로 구성하고, 외부에는 투자율이 높은 재질을 사용하고 내부 차폐는 도전율이 낮은 재료를 사용함으로써 차폐효과를 극대화 한다. 이중 차폐구조에서 외부 차폐와 내부 차폐에 재질을 달리하고 일정 공간을 제공하여 자기장에 대한 임피던스 변곡점을 만들어줌으로써 전기장에 대한 영향뿐만 아니라 자기장에 대한 차폐도 효과적으로 이루어질 수 있다.

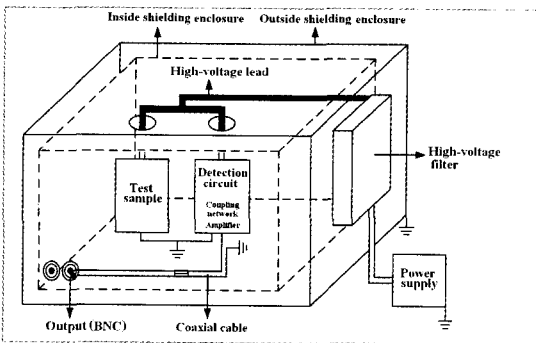
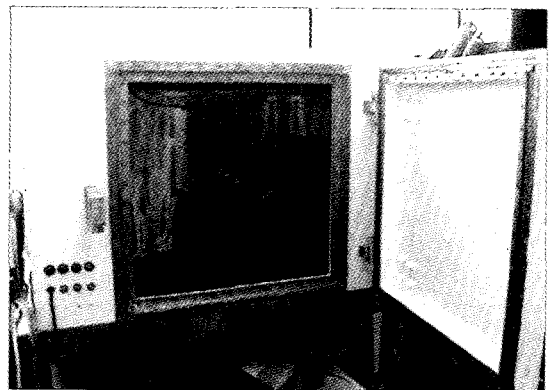


그림 6. 차폐함의 개략도

세 번째 잡음은 접지시스템의 불안정에 의해 발생하는 접지잡음으로 주로 생산 공정과 같이 각종의 전기기기를 사용할 때 발생하는 고주파 잡음이 대부분이며, 낙뢰 또는 전력계통의 지락사고 등에 의해

대지전위가 상승함에 따라 발생하기도 한다. 일반적으로 접지잡음은 고주파 대역인 수~수십kHz 대역에서 발생하는데 이를 위한 대책으로는 단일접지 방식의 적용이나 접지필터를 설치하는 것이 일반적이다.

저압용 유도전동기를 포함하는 전기전자 기기에 사용되는 부분방전 측정시스템은 그림 7과 같다. 이들 시스템은 시험전압 공급부, 결합회로망, 증폭회로 및 오실로스코프 등의 측정장치로 구성되는데, 외부잡음에 대한 대책으로 차폐함 내부에 설치된다.



(a) 차폐함과 유도전동기

(b) 전원장치

그림 7. 부분방전 측정시스템

4. 부분방전 시험의 적용

저압용 유도전동기의 경우 생산단계나 출고시 품질관리 면에서 시행하는 것은 비파괴 내전압 시험으로 1[kV] 이상의 비교적 높은 전압을 인가하므로 절연물의 성능저하를 초래하는 요인이 되기도 한다. 실제로 유도전동기의 내전압 시험에 사용되는 전압

은 3상 4선식 220[V]의 정격을 갖는 경우 내전압 시험전압은 약 2,000[V_{peak}]에서 1분간 평가하는 것으로 규정하고 있다. 따라서 품질관리 시험도중 절연이 손상되기도 하므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 낮은 전압에서 미소 부분방전의 검출로 유도전동기의 절연성능을 평가하는 것이 필요하다.

정확한 부분방전 측정을 위해서는 이미 알고 있는 크기의 방전전하량을 이용하여 측정시스템의 교정 평가를 수행하는 것이 필요하다. 특히 동일한 측정 시스템에서 시험대상 시료가 변경될 경우, 시료의 정전용량의 변화에 의해 검출회로에서 검출되는 부분방전의 크기도 달라지기 때문에 시험대상을 변경하는 경우에는 필수적으로 교정평가가 먼저 이루어져야 한다.

부분방전 검출회로의 교정에는 직각과 발생장치, 외부 교정기, 칩전극 설치에 의한 임의 방전파형 발생 및 인공의 보이드를 생성시켜 주기적인 방전펄스를 이용하는 방법 등이 있다. 일반적으로 사용되는 외부 교정기의 펄스 신호는 수MHz의 주파수 특성을 가지므로 진행파로 작용하여 선로의 길이에 따라 펄스의 형태가 달라진다. 뿐만 아니라 교정기의 설치 위치 및 시료의 특성, 검출시스템의 구성 등에 따라 교정값이 달라질 수 있으므로 앞서 언급한 구성요소 중 어느 하나가 변한다면 다시 교정을 해야 한다.

측정시스템의 교정은 그림 8과 같이 시료측에 교정기를 접속한 상태에서 수행한다.

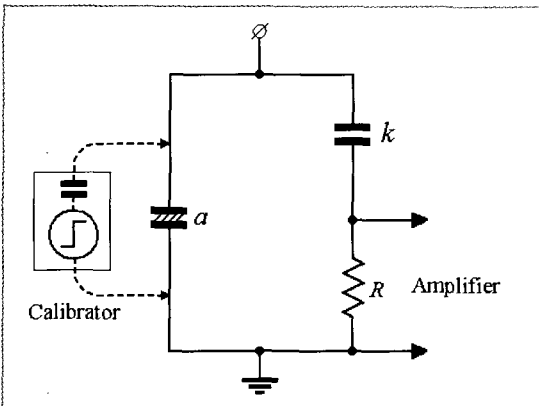


그림 8. 부분방전 측정시스템의 교정

그림 9는 1[pC]의 교정펄스 주입시 검출 파형의 예를 나타낸 것이다. 정·부극성 표준 교정펄스 입력에 대한 응답특성으로 감도를 산출하여 실제 측정값과 비교하여 방전의 크기를 추정할 수 있다.

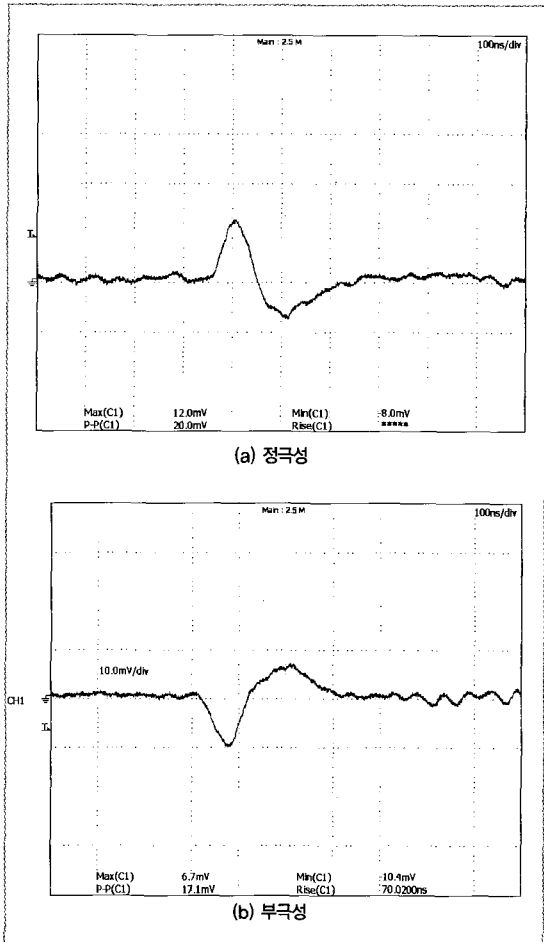


그림 9. 교정펄스에 대한 응답 파형

교정실험에서 감도를 산출(11.4mV/pC)한 후, 이를 기준으로 유도전동기에 시험전압을 서서히 증가시키면서 부분방전 펄스를 검출한다. 본 시험에서는 664[V_{peak}] 정도에서 약 0.72[pC]의 크기를 갖는 부극성의 부분방전 펄스가 검출되었다. 이후 1,100[V] 이내의 범위까지는 부극성의 부분방전 펄스만이 나타났으며, 이때의 파형 예를 그림 10에 나타내었다.

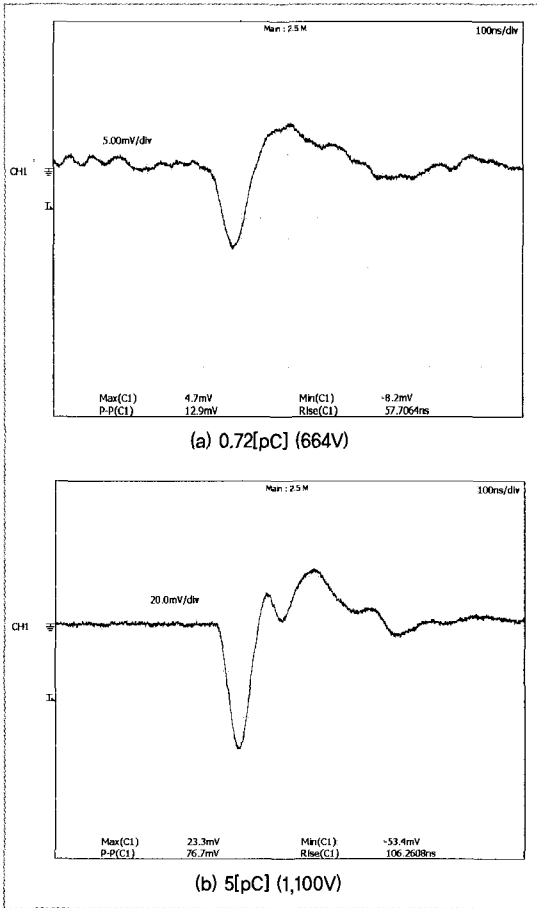


그림 10. 부극성 방전 펄스

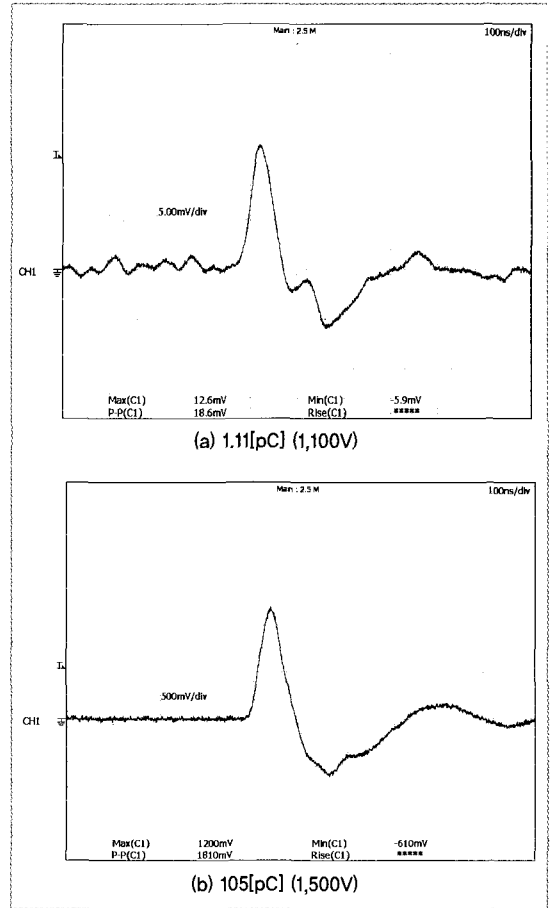


그림 11. 정극성 방전 펄스

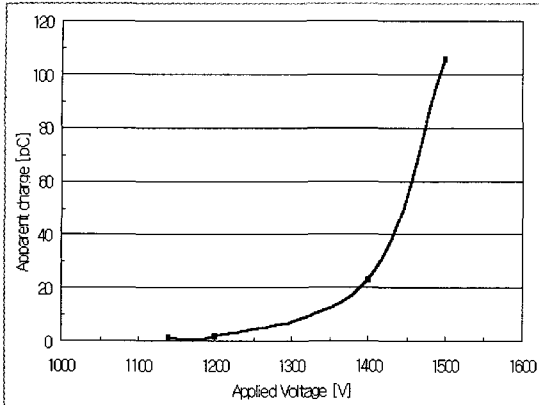
부극성 파형이 먼저 검출되는 것은 고정자권선과 외함 사이의 표면 구조에 기인한 공간전하 효과에 의한 것으로 추정한다. 결국 권선 내에서 미소한 결함이 존재하여 부분방전이 발생하게 되던 단시간 내에 절연과피에 도달할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

정극성 방전펄스는 인가전압이 1,100[V_{peak}] 정도가 될 때 나타나며, 최소 검출된 크기는 그림 11에 나타난 바와 같이 약 1.11[pC]이었다. 정극성 방전펄스는 1,400[V_{peak}] 정도에서 급격히 증가하며, 1,500[V_{peak}]에서 105[pC]으로 측정되었다. 정극성 신호의 경우에는 부분방전 펄스가 검출된 이후 인가전압을 조금만 증가시켜도 방전전하량은 급격히 증가되는 경향을 나타내고 있다.

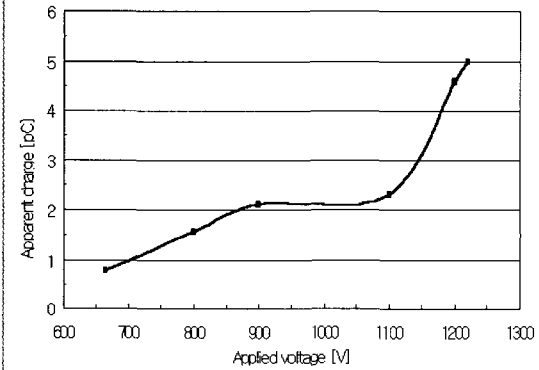
또한, 저압용 유도전동기에서 검출되는 정·부극

성의 부분방전 전하량은 인가되는 시험전압에 따라 달라지며, 변화되는 경향은 그림 12와 같다. 부분방전이 발생하는 방전개시전압은 발생하는 부분방전 펄스의 극성에 따라 달라지는데 부극성 신호가 발생하는 방전개시전압은 664[V_{peak}]이었으며, 정극성의 부분방전 개시전압은 1,140[V_{peak}]이었다.

이와 더불어 일단 방전이 발생하면 전압 증가에 따라 급격히 방전전하량 및 발생빈도가 증가되는데, 이는 사소한 결함이 유도전동기의 고정자 권선내에 존재할 경우, 결함 내에서 부분방전이 발생하면 급격히 절연과피에 도달할 가능성이 높은 것으로 보인다. 인가전압을 감소시켜 갈 때, 방전소멸전압은 정극성에서 1,080[V_{peak}], 부극성에서 640[V_{peak}]로 방전개시전압보다 다소 낮게 측정되었다.



(a) 정극성

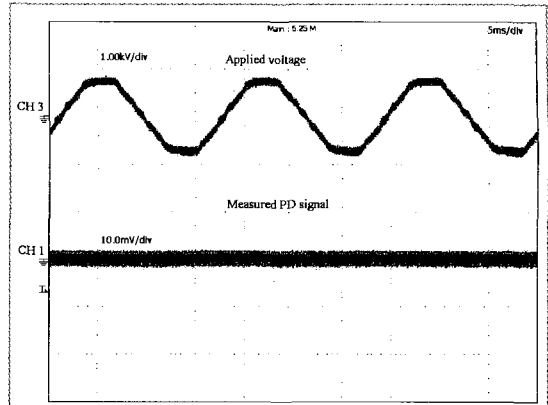


(b) 부극성

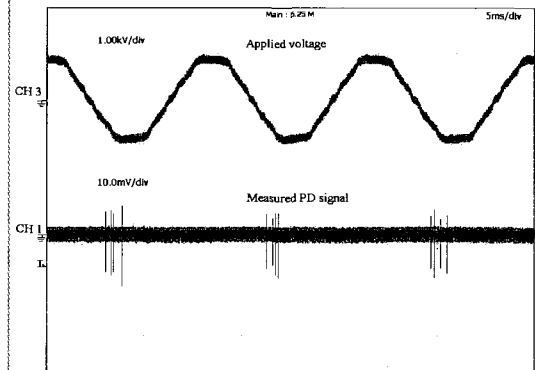
그림 12. 인가전압에 따른 전하량 변화

전압위상에 대한 부분방전 펄스 검출특성은 그림 13과 같이 나타나는데 인가전압의 정극성 상승 부분에서 부극성의 부분방전 펄스가 검출된다. 시료에서 발생한 부분방전 펄스가 결합콘덴서를 통해 검출되므로 신호의 극성이 반전되기 때문이다. 측정과형에서도 확인할 수 있는 바와 같이 700[V_{peak}]에서는 간헐적인 부분방전이 발생하지만, 인가전압이 증가함에 따라 발생빈도도 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

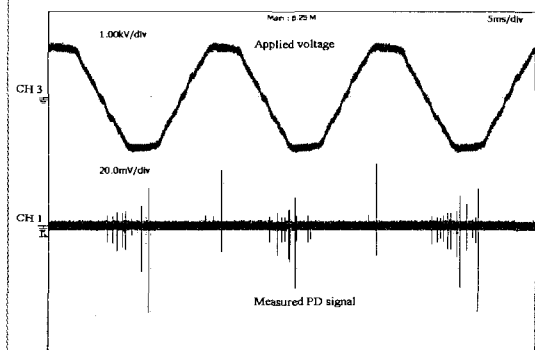
또한, 앞서 언급한 실험결과에서와 마찬가지로 방전전하량은 인가전압의 상승에 따라 커지는 경향을 나타낸다. 특히, 인가전압 1,500[V_{peak}]에서는 부극성의 신호뿐만 아니라 정극성의 부분방전 펄스도 검출되며, 발생빈도는 부극성 신호에 비해 현저히 작게



(a) 700[V_{peak}]



(c) 1,200[V_{peak}]



(d) 1,500[V_{peak}]

그림 13. 전압에 따른 방전펄스의 위상분포

나타남을 알 수 있다. 이는 절연체 내부에서 정극성 코로나의 발생에 따른 공간전하효과에 의한 것으로 추정된다.

5. 결 론

저압용 전기전자 기기에 대한 새로운 비파괴 절연 평가 기술로 부분방전 시험에 관한 연구가 활발하다. 현재 절연평가법으로 사용되는 내전압 시험은 정격전압보다 수 배 이상의 높은 전압을 일정시간동안 인가하는 것으로 시험중 피시험체의 절연열화를 촉진시킬 수 있으며, 일정전압에서 절연내력을 평가하기 때문에 절연에 관한 충분한 정보를 제공하지 못한다.

그러나 부분방전 시험법은 측정시스템의 감도를 충분히 높게 하여 1pC 이하의 방전 펄스검출이 가능하다면, 내전압 시험법에 사용되는 전압보다 훨씬 낮은 영역에서 평가가 가능하다. 또한 부분방전의 크기와 위상분포, 방전 패턴으로부터 기기에 적용할 절연재료의 선정, 구조 및 제조시 결함의 종류 등에 대해서도 분석이 가능하므로 품질관리 시에는 물론 제품 개발과정에서도 유용한 절연 평가기술로 그 이용이 활발해질 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] J. C. Fothergill, L. A. Dissado and P. J. J. Sweeney, "A Discharge Avalanche Theory for the Propagation of Electrical Tree", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, pp.474-486, 1994.
- [2] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insolation, Vol. E I-12, No. 1, pp.2-18, 1976.
- [3] E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-13, No. 4, 1978.
- [4] A. Kelen and M. G. Danikas, "Evidence and Presumption in PD Diagnostics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.780-795, 1994.
- [5] T. Okamoto and T. Tanaka, "Auto- correlation Function of PD Pulses under Electrical Treeing Degradation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.857-874, 1995.
- [6] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Butterworth, pp.129-152, 1989.
- [7] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.822-837, 1995.
- [8] G. Stone, "Importance of Bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.6-11, 2000.
- [9] A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.796-821, 1995.
- [10] IEC Publication 60664-1, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1 : Principles, requirements and tests, 2002.
- [11] IEC Publication 60884-1, Plugs and socket-outlets for household and similar purpose, 2002
- [12] IEC Publication 61558-1, Safety of power transformers, power supplies, reactors, and similar products, 2005
- [13] M Kaufhold, "Failure Mechanism of the Interturn Insulation of low Voltage Electric Machines Fed by Pulse- Controlled Inverters" Vol.12. No.5, pp.9-16, 1996.
- [14] Christopher J Melhorn and Le Tang, "Transient Effect of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.33, No.4, pp.1065-1072, 1997.

- [15] A. Mbaye, F. Grigorescu, T. Lebey and Bui Ai, "Existence of Partial Discharges in Low-voltage Induction Machines Supplied by PWM Drives" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.31 No.4, pp.554-560, 1996.
- [16] C. J. Melhorn and L. Tang, "Effects of PWM ASD's on standard squirrel cage induction motors", PCIM Conf., Dallas, TX, pp.356-364, 1994.
- [17] J. A. Oliver, G.C. Stone, "Implications for the Application of Adjustable Speed Drive Electronics to Motor Stator Winding Insulation," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 4, pp. 32-36, 1995.
- [18] S. A. Boggs, "Partial Discharge - Part II : Detection Sensitivity", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.6, No.5, pp.35-42, 1990.
- [19] A. Lapp and H. G. Kranz, "The Use of CIGRE Data Form at for PD Diagnosis Application", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp. 102-112, 2000.
- [20] B. Fruth and L. Niemeyer, "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, pp.59-70, 2000.
- [21] R. Gutfleisch and L. Niemeyer, "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.729-743, 1995.
- [22] L. Niemeyer, "A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.510-528, 1995.
- [23] Wolfgang Pfeiffer, "Partial-discharge Testing of Components for Low-voltage Equipment", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.31 No.4, pp.247-257, 1991.
- [24] T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement System", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.21, pp. 1015-1019, 1986.
- [25] E. Gulski, H. P. Burger, G. H. Vaillancourt and R. Brooks, "PD Pattern Analysis During Induced Test of Large Power Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, pp.95-101, 2000.
- [26] U. Bammert and M. Beyer, "Partial Discharges Measured with an Automated System in Epoxy Resin and Polyethylene", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, pp. 215-225, 2000.
- [27] A. Krivda, E. Gulski, L. Satish and W. S. Zaengl, "The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.889-892, 1995.
- [28] 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, pp.838-856, 1995.
- [29] E. Gulski, H. P. Burger, G. H. Vaillancourt and R. Brooks, "PD Pattern Analysis During Induced Test of Large Power Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.95-101, 2000.
- [30] S. A. Boggs, "Partial Discharge - Part III : Cavity-Induced PD in Solid Dielectric", IEEE

- Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, No. 6, pp.11-20, 1990.
- [31] E. A. Cherney, "Partial Discharge - Part V : PD in Polymer-type Line Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 2, pp.28-32, 1991.
- [32] G. C. Stone, "Partial Discharge - Part VII : Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 4, pp.9-19, 1991.
- [33] C. Laurent, C. Mayoux, "Partial Discharge - Part ? : Limitations to PD as Diagnostics for Deterioration and Remaining Life", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 2, pp.14-17, 1992.
- [34] W. Hutter, "Partial Discharge - Part ? : Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp.25-31, 1992.
- [35] G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. McDermid, "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.567-577, 1995.
- [36] IEC Publication 60034-1, Rotating electrical machines- Part 1: Rating and performance, 2002.