특집

초고압 GIS의 절연진단 기술

정 상 진*, 이 형 호**
(*한전, 송변전건설처 부장, **전기연구소 고전압연구 팀장)

1. 서 론

최근 문명의 발전은 인구의 도시집중과 도시기능의 고도화가 수반되어 특정의 좁은 지역에서 대용량의 전력이 사용되고 있다. 그러나 전원및 전력수송설비의 대도시근교로의 입지는 제한되어 발,변전소용 부지의 효율적 사용및 환경조화를 위해 설비의 축소화, 밀폐화가 불가피하므로 개스절연방식의 compact한 초고압·대용량 전력기기의 사용이 확대되고 있다.

이들 기기는 종래의 대기 절연방식에서 탈피하여 절연성능이 우수하고 불활성을 갖고 안정한 SF_6가스를 절연매체로 하여, 활선부를 밀폐하여 외기및 환경에 영향을 받지 않도록 함으로서 높은 신뢰성과 compact한 구조로 사용하고 있다. 그 대표적 전력기기인 가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS로 略稱)는 40여년 전부터 상업화가 시작된 이래 22kV급에서 765kV급까지 광범위하게 사용되고 있다[1-6].

GIS의 절연구조는 SF_6가스갭, 스페사의 내부및 연변, 스페사와 전극및 가스와의 三重點등으로 되어 있으며, 초고압변전소의 경우 그 크기가 종래의 약 1/20까지 축소됨으로써, 설계전계치가 크게되어 미소결함이 존재 할 경우 코로나및 부분방전등 고전압 특유의 현상이 나타난다. GIS의 설계시에는 1)절연성능, 2)통전성능, 3)tank성능, 4)접지방식과 개폐써어지, 5)자연환경에 대한 배려, 6)절연진단법등 고려해야 할 사항이 많다[7-10].

초고압GIS에 대한 실용화연구는 신뢰성향상과 경제성추구라는 두가지 측면에서 진행되어, 신뢰성향상에 관해서는 전계해석기술의 고도화및 절연성능진단법의 확립, 경제성에 관해서는 소형축소화를 기본으로하는 기기구성의 간소화가 요구된다. 특히, 현대는 한정된 자원과 인력을 효율적으로 사용하여 생산을 극대화시키는 것이 경쟁력의 근본이다. 따라서 설비보수의 빈도를 줄이는 방안과 아울러 무정전의 높은 신뢰성 확보는 극히 중요하다[11].

변전소는 전력유통설비로써 정지가 곤란하여, GIS의 점검작업을 위한 운전정지는 극히 제한적이다. 한편 만일의 사고가 발생하면 기간계통의 변전소일수록 그 영향은 크다. 국내에서 GIS가 도입된것이 1980년대초로서 초기 설치된 GIS는 15년을 상회하고 있으므로 이 시점에서 정확하고 고도의 진단기술로 뒷받침되는 실용적 방법에 의한 열화판정기술의 확립이 필요한 시점이다. 이같은 관점에서 本稿에서는 전력에너지의 안정적 공급과 신뢰성을 확보하기 위하여 GIS의 절연진단기술에 대해서 기술하고자 한다.

2. GIS의 예방보전활동에 대한 필요성

변전기기는 발전소용 기기에 비하면 설비전체의 정기점검 기회가 적고, 근접설비가 활선상태에서의 부분적인 점검의 경우가 많다. 또 전력계통의 정지가 어려운 것으로부터 정지가 야간및 공휴일로 한정되는 것 등 조건이 나쁜 경우가 많다. 한편, 기술의 진보와 경제성, 축소화추구의 결과, 변전기기의 종류와 구조는 변천이 많고 다양하며, 보수의 관점으로 보면 숙련된 엑스퍼트는 사용자, 제조회사 모두에게 확보하기 어려운 문제이다.

과거 수십년간의 연구에 의하여 GIS본체의 크기가 전반이하로 감소되어 동작원리, 소호원리 등도 대폭으로 변하고, 또한 점검보수항목이 많은 조작기기부가 가스조작방식으로부터 공기조작방식, 유압조작방식으로 변천하여오고 있다. 시스템적으로는 차단기의 극간에 콘덴서가 있는것과 없는 것으로 나누어져 있으며, 유도전압의 유무 등의 현상면으로 차이가 있다.

이들 다양한 부품이 고유의 기능을 유지하고 사고의 미연방지, 예방보전을 위하여 사용자의 요구로서 아래와 같은 항목이 고려되어 진다.

기기상태감시

(1) 기기상태의 이상여부를 진단한다.
(2) 이상으로 진단된 경우에 긴급성을 진단한다.
(3) 기기를 정지시키지 않고 운전상태에서 기기감시진단을 가능하게 한다.

(4) 1차적인 성능감시작업은 기기로 행하고 이상시 대응이후를 인간계로 행한다.

잔존수명진단

(1) 기기의 기본특성에 관한 열화도에 맞추어 잔존수명이 어느정도인가를 진단한다.

(2) 수명이 다될 경우 우선 어떠한 고장양상, 어느정도의 치명도에 이를것인가의 가이드를 제시한다.

갱신작업

(1) 갱신범위로서 부분적 갱신인가, 전면적 갱신인가의 가이드를 제시한다.

(2) 갱신공사기간을 단축한다.

(3) 갱신공사시에 작업정지범위를 축소화 한다.

이상과 같이 기기상태감시에 대해서는 변전기기의 자동감시시스템이 최근 활발하게 검토되고 있다. 최근의 변전기기에는 각종의 센서가 구비되어 그 정보를 마이크로프로세서로 가공처리하여 각종의 진단을 내는 시스템이 검토·채용되기 시작하고 있다. 한편, 운전중인 경년기기에 부착되는 센서도 개발연구가 진행되고 있으나, 기기본체구조의 개선을 요한다든지 센서 배선문제, 내노이즈성 등 극복해야할 조건이 많아 실용화되어 있는 것은 종류가 제한되어 있다. 간편하고 감도가 좋은 센서 혹은 한 개의 센서로서 여러개의 현상을 감시할 수 있는 다기능 센서의 개발이 금후의 과제이다.

또한 계통전체에서의 치명도라는 점에서는 고전압대용량 기기가 사고시의 영향이 클것으로 생각되지만, 설비수, 보수업무량의 절감 측면에서는 저전압기기의 성우도 센서의 도입효과가 클 것으로 생각된다. 저전압기기용으로 가격이 싼 것도 있으며, 센서자신의 가격과 취부를 위한 공사비용이 비싼 것 등이 현시점에서 해결해야 할 과제이다.

3. 절연진단의 요소기술

기기의 신뢰성은 종래, 제조단계에 있어서 품질관리및 정기점검에 있어서 보수점검에 의해서 유지되어 왔다. 그러나 최근에는 이러한 것과 더불어 기기의 운전중에 있어서도 상시감시를 하므로써 좋지 않은 상태를 미연에 방지하고자하는 예측보전의 개념이 보급되고 있다. 각종 진단 항목중에서 절연파괴와 관계가 깊은 부분방전의 검출은 그 유효성이 일찌기 인정되어 여러가지의 검출, 진단기술이 개발되어왔으며 이는 고체절연물중이나 고체절연물 표면및 전극 돌출부에서 발생하는 부분방전을 평형검출회로등을 이용하여 검출하는 것으로써 절연파괴의 발단이 되는 절연의 좋지않은 상태를 미연에 판정하는 것이다. 그러나 이러한 기술은 공장시험을 전제로 개발되어왔기 때문에 외부 noise가 많은 field에 적용하는 것은 기술적으로 어려움이 따른다. 즉 부분방전은 현상이 복잡하고 다양하며, 발생한 신호는 반사 투과 공진등 으로 전

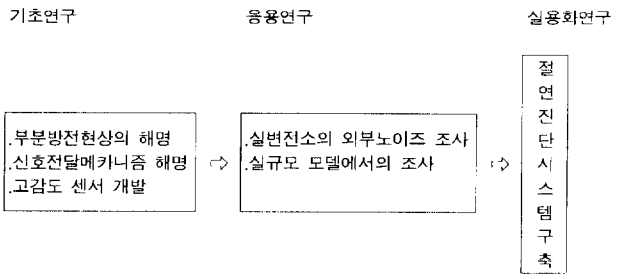

그림 1. 절연진단시스템의 개발단계

달경로가 복잡하기 때문에 field에서는 특히 외부 noise와의 구별이 어렵다는 문제점이 있다.

그림 1은 field에서 절연진단 시스템 구축을 위한 개발단계에 필요한 조사 검토 항목을 종합한 것이다.

절연진단 시스템 구축에는 부분방전 현상의 해명, 부분방전 신호의 전달 메카니즘의 해명, 고감도 센서의 개발등 기초특성을 조사하고 실변전소에서 외부 noise 조사와 실규모 모델에서 조사하는 응용연구가 필요하다고 생각된다. 아래에 부분방전신호의 전파와 실측된 파형및 센서에 대해 그 원리를 소개한다.

3.1 부분방전 신호와 전파

SF_6 가스중의 부분방전은 방전의 형성시간이 nS order로 대단히 짧기때문에 부분방전 신호에는 1GHz를 초과하는 여러가지 주파수 성분이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 신호는 level이 낮지만 전달경로에 따라서 여러가지의 공진모드를 일으키면서 전자파로서 GIS내부에 전파된다고 생각된다.

여기서 GIS를 동축원통으로 생각하여 GIS내부에서 발생한 부분방전 신호의 전달경로에 대해서 생각해 본다. 이러한 경우 부분방전 신호는 다음의 Maxwell방정식에 따라서 전자파로서 전달된다.

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon E = 0$$
$$\nabla^2 H + \omega^2 \mu \varepsilon H = 0$$

Maxwell방정식의 해는 잘 알려진 바와 같이 TEM파(Transverse Electric and Magnetic mode), TE파, TM파의 3가지 모드가 존재한다. 그런데 주요모드는 TEM파이며, 그림 2에

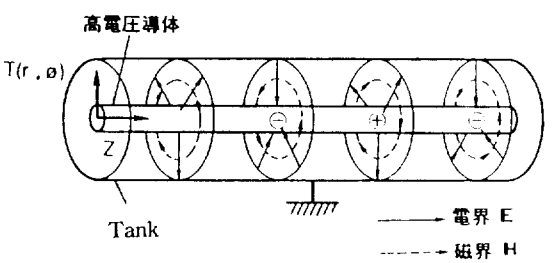

그림 2. 동축선내의 電界와 磁界(TEM파)

나타낸 바와 같이 전계는 반경 방향으로 전달하고, 자계는 원주방향에 존재하는 전자파로서 전달한다. z방향에서 정현파상으로 변화하고 있다. 이러한 모드는 Laplace 방정식을 만족하고, 그 분포는 정전계, 정자계와 동일하며 직류에서부터 고주파까지 존재가능한 모드로 알려져 있다. GIS의경우 주파수가 수백MHz를 초과하면 TE파와 TM파도 존재가능하다. 그러므로 부분방전의 신호는 대단히 복잡한 모드를 가지고 전달된다는 것을 알 수 있다. 이러한 전자파를 센서에 의해서 검출하므로서 부분방전의 검출이 가능해 진다. CIGRE에서 이현상을 이용한 방법을 UHF법으로 정의하고 현장적용성이 좋은 방법으로 추천하였다[13].

3.2 부분방전의 주파수 스펙트럼

실제로 GIS내부에서 부분방전을 발생시킨 경우의 주파수 성분을 파악하는 것은 절연진단 시스템 개발을 하는 데 있어서 상당히 중요하다. 그림 3은 고전압도체에 침전극을 취부하여 인위적으로 부분방전을 발생시켜, 절연스페이서로 사용하고 있는 내부 shield 전극을 센서로 이용하여 부분방전의 주파수 스펙트럼을 측정하기 위한 것이다. 그림에서 주파수대역은 50MHz부터 70MHz이며 이 주파수대역에 부분방전에 의한 주파수성분이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이 주파수 영역은 VHF대에 속하고 종래 사용하고 있는 100MHz대의 주파수 영역에 비해서 신호자체의 에너지가 큰것이 특징이다.

한편, field에서 부분방전을 측정하는 경우 외부노이즈가 문

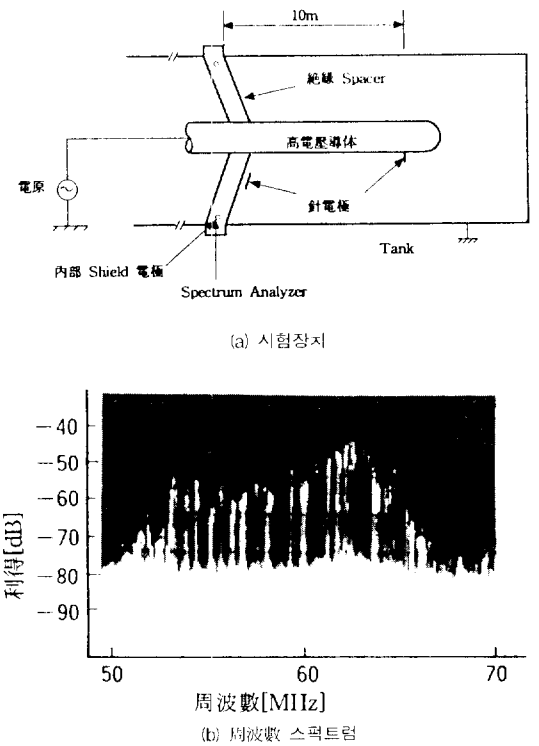

그림 3. 부분방전의 주파수 스펙트럼

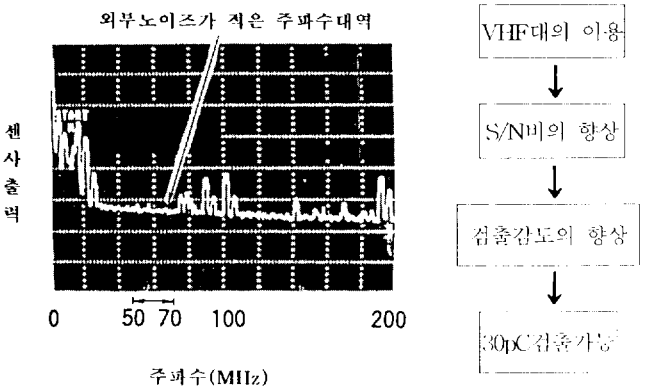

그림 4. 실변전소에 있어서 외부잡음의 주파수 SPECTRUM

제가 된다. 즉 측정감도를 좋게 하기위해선 외부노이즈를 억제하는 것이 중요하다. 그림 4는 실변전소에서 절연스페이서를 센서로써 이용하여 외부noise의 주파수 분석을 한 결과를 나타내고 있다. 이것에 의하면 50MHz에서 70MHz대에 대해서는 외부노이즈가 적은 주파수대역임이 확인되었다. 이것은 기중 절연측에서 발생한 외부노이즈가 GIS에 침입할 때 기중측 임피던스와 GIS측 임피던스의 부정합에 의해서 고주파성분이 감쇄하기 때문이라고 생각된다. 즉, 이 주파수대역을 부분방전검출 입력신호로 하므로써 S/N비의 개선을 도모하는 것이 가능하고, 이것에 의해서 고감도인 부분방전 검출기를 개발하는 것이 가능하다. 구체적으로는 센서부분에서부터 약 10m 떨어진 위치에 약 30pC의 부분방전 발생이 있는 경우, shield에서 이것을 검출하는 것이 가능하다.

이 방법과 유사한 방법으로 접지선전류 감시센서를 사용한 방법을 CIGRE에서 HF법으로 소개 추천하고 있다. 이와같이 부분방전의 주파수 스펙트럼에 착안한 현상해석에 의해서 고감도인 절연진단 기술이 시도되고 있다.

3.3 CIGRE의 열화진단검출방안 평가[13]

1992년 WG.15-03에서 발표된 내용은 여러가지 열화진단방안에 대한 평가가 이루어졌다. 이는 6m 길이의 420kV급 GIS의 모선에서 3종류의 결함, 즉 이동가능한 금속입자 존재시, 스페이사 표면에 입자 부착시, 그리고 모선 혹은 탱크벽면에 corona침을 인위적으로 설치하고 전압을 0-510 kV 까지 상승시키면서 각각의 방법에 대한 감도, 적용성, 결과의 신뢰성등을 평가하였다.

3.3.1 IEC 270 추천법

실험에서 주로 사용되는 IEC 추천법은 1MHz 주파수 대역을 사용한 표준검출기 혹은 PRPDA(Phase Resolved PD Analysing system, PD발생위상분석에 의한 진단) 검출기에 의한 방법으로 감도는 우수하였으나 coupling capacitor가 필요하며 이를 연결하기 위한 정전이 수반되어 운전중인 설비 적용은 불가능하다.

3.3.2 HF 법

고주파 특성이 양호한 Rogowski 코일을 접지회로에 삽입, 50-70MHz 범위의 펄스전류를 검출하여 진단하는 방법으로 일본에서 주로 개발 현장적용되고 있다. 잡음전류는 20MHz 이상의 성분은 극히 작으므로 SN비를 줄일 수 있다. 이 방법은 설함과 센서의 위치에 따라 감도가 최대인 공진주파수가 달라지는 약점이 있다. 따라서 정확한 진단을 위해선 많은 수의 센서가 설치되어야 한다. 현장에서 100pC정도의 부분방전이 검출가능하나 다음의 UHF법이 이점이 많아 자주 사용된다.

3.3.3 1500MHz 의 UHF Coupler법

부분방전 펄스가 아주 작은 갭에서 발생하므로 외함과 1GHz이상의 주파수범위까지의 공진을 일으킨다. 이는 결함부위에서 발생된 방전신호가 수 m를 전파하기 전 수nano Second에 공진상태가 이루어지므로 GIS의 다른부분과 독립적으로 검출될 수 있으며 따라서 변전소 정전용량과 무관하다. 그러므로 실험실에서 제한된 GIS모선에서 측정한 감도를 현장에서 그대로 유지할 수 있다.

그림 5에 표시된 Disc형태의 Coupler를 제작하여 GIS외함에 해치(hatch)를 부착 약 20m 간격으로 GIS내부에 설치하여 8 bay의 변전소인 경우 25-30 개의 3상 Coupler가 소요되었다. 영국에서 약 12년 정도의 연구를 통해 개발된 제품은 향후 신규로 건설되는 모든 420kV급 GIS에 설치예정으로 있다[14]. 일본에서도 대장전극법으로 500kV급 이상 GIS에 대해 실용화되고 있다.

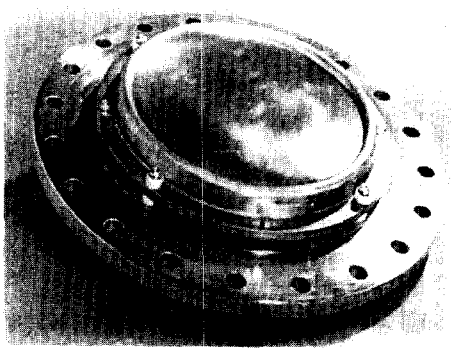

그림 5. UHF Coupler

3.3.4 초음파 센서법

GIS내부에 침입한 금속이물은 부분방전 발생에 의한 전기신호 이외에도 탱크와의 충돌등에 의해 진동및 음향신호를 발생한다. 부분방전은 전술한 바와 같이 전기적 수법에 의해서 검출이 가능하지만, 진동을 가속도계로 직접 측정하거나 음향적방법을 병용하므로써 금속이물의 검출이 가능하다. 초음파센서 자체의 감도 향상에 의해서 2mm정도의 미소금속이물의 검출이 가능한 것으로 알려지고 있다.

이 방법은 간단하고 별도의 장치가 필요없고 운전중 GIS에도 측정가능하므로 설치후 현장준공시험에 많이 활용된다. 한국전력공사에서도 1996년도에 2대를 도입 활용예정으로 있다.

약 5kHz이상의 주파수 대역을 활용하여 전자파노이즈의 영향은 적으나 악천후 시 corona등으로 측정이 부정확하게 된다.

3.3.5 화학적 검출법

부분방전에 의하여 발생한 분해가스를 가스분석에 의하여 검출하는 방법이다. 검출법으로써는 발色반응을 이용한 가스체크법, 부분방전에 의한 절연저하를 이용한 가스tester등이 있으나 금속 이물의 검출에 이용하는 데는 검출감도를 올릴 필요가 있다. 변압기 유중개스 분석법과 유사하게 분해생성개스 분석에의해 방전형태의 추정, 즉 arc, corona, spark등의 구별도 가능한 것으로 알려져 있다. 주기적인 방법으로 적합하다.

3.3.6 광학적 검출법

부분방전에 의한 발광을 광전자증배관등에 의하여 검출하는 방법이다. 외부 노이즈의 영향은 거의 없지만 고압의 SF6 개스가 빛을 쉽게 흡수하므로 미소방전의 검출은 곤란하게된다. 검출소자 또는 창을 미리 탱크에 취부해둘 필요가 있다. 주로 현장 준공시험중의 내부섬락, spark등의 식별이 가능하다.

4. 절연진단 Data의 해석

결함의 존재를 일단 검출한 후 최종문제는 운전정지를 하고 즉시 수리를 할 것인 가 아니면 계속 운전이 가능한 가를 판단하는 것이 중요한 문제로 남는다. 최근의 측정기의 감도가 점차 좋아지고 있으므로 웬만한 결함의 발견은 어렵지 않다. 단순한 결함을 발견하였다는 사실에 근거하여 정상운전이 가능시되는 전전기기를 불합격 처리하거나 수리하는 실수를 범하지 않는것이 중요하다. 그림 6에 그 판단절차가 예시되었다.

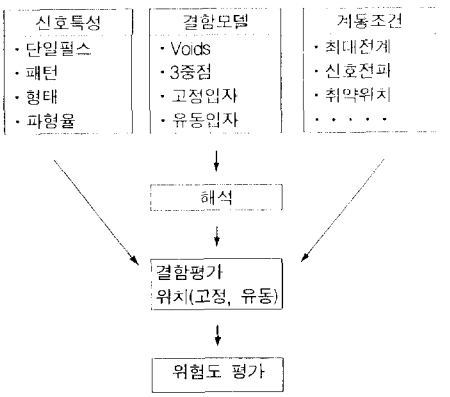

그림 6. 절연진단 Data의 해석

최종결론은 역시 과거 운전경험이나 실험적 연구결과, 기기이력, 변화추세분석등을 종합적으로 고려해 결정되어야 할 것이다. 현재 국제적으로 제시된 기준은 IEC517로서 IEC270 측정법에 의해 측정한 경우 10 pC이상의 부분방전 level은 불합격이다. 그러나 이는 대형의 시험장비(상용주파전원및 coupling

capacitor)와 차폐설비를 필요로 함에 따라 170kV급이하에서만 시험항목으로 추천되고 있다. 물론 운전전압이 높을 수록, 입자가 tank벽보다는 고전압도체에 부착된 경우, 짧은 것 보다 긴 경우, 고정된(trapped) 경우보다는 유동하는(free) 입자가 위험하다 할 것이다.

5. 결 론

부분방전측정에 의한 GIS진단기술은 결함의 형태가 다양하고 위험 또한 판단하기 어려움으로 새로 설치되는 기기에서는 고전압 절연내력시험에 추가하여 절연성능을 점검하는 수단으로 바람직하다. 그러나 상기간의 사용에 의한 열화된 GIS의 경우 과거의 축성 Data가 있으므로 그 변화추세에서 이상이 발견될 경우, 보수, 정밀점검및 교체시기의 결정의 기준이 될 것이다.

향후 과제는 검출감도및 정도의 향상, 노이즈및 외부영향에서 격리 절연, 소형 경량화, 장수명, 보수불요, 가격절감및 다기능화등이 전망된다. 한국전력공사에서도 장차 도입될 765kV급 GIS에서 진단 system의 신뢰성, 사용의 편이성등을 고려 열화상태를 상시감시할 수 있는 장치를 도입할 예정으로 있다.

참 고 문 헌

[1] H.J.Lingal, A.P.Strom and T.E.Browne, "An investigation of the arc quenching behaviour of sulphur hexafluoride", AIEE Trans, Vol. PAS-72, Part 3, pp. 242-246, 1953

[2] R.E.Friedrich an R.N.Yeckley, "A new concept in power circuit breaker design utilizing SF_6", AIEE Trans, Vol. PAS-78, part 3-a, pp. 695-706, 1959

[3] A.H.Cookson, "Gas Insulated Cable", IEEE-EI, Vol. 20, No. 5, 859, 1985

[4] S.A.Boggs, F.Y.Chu and N.Fujimoto, "Gas Insulated Substations", Pergamon Press, 1985

[5] 일본전기협동연구, "절연설계의 합리화", 전기협동연구, 제44권, 제3호, 1988

[6] H.Toda et al, "Development of 800kV Gas Insulated Swichgear", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, 1992

[7] 일본전기협동연구, "가스절연변전기술", 전기협동연구, 제36권 제3호, 1980

[8] 일본전기협동연구, "가스절연기기의 신뢰성 향상책", 전기협동연구 제44권 제2호, 1988

[9] W.Boeck, W.Taschner, J.Gorablenkow, G.F.Luxa and L.Menten, "Insulating Behavior of SF_6 with and without Solid Insulation in Case of Fast Transients", CIGRE Paper, No. 15-07, 1986

[10] 일본전기학회 가스절연개폐장치기술조사전문위원회, "GIS 성능에 배려되고 있는 재문제", 기술보고서 II부 163호, 1984

[11] 일본 東芝(주) 전원개발기기연구회보고서, "새로운 문제를 맞이한 변전기술", 1991.

[12] B.F.Hampton, R.J. Meats, "Diagnositic Measurements at UHF in Gas Insulated Substation", IEE Proceedings, Vol. 135, March 1988, pp. 137-144.

[13] CIGRE WG. 15.03, "Diagnositic Methods for GIS Insulating Systems, 30 Aug.-5 Sept., 1992, Session Paper No. 15/23-01, pp 1-19.

[14] J.S.Pearson et al. "Partial Discharge Diagnostics for Gas Insulated Substations", IEEE Trans. on Dielectrics and Electric Insulation, Vol. 2, No. 5, Oct. 1995, pp 893-905.

저 자 소 개

정상진(丁尙鎭)

1949년 11월 8일생. 1972년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 영국 맨체스타 대학원 졸업(석사). 1987년 동 대학원 졸업(공박). 1976년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 송변전건설처 송전전압격상추진반 변전담당 부장. 당 학회 조사위원.

이형호(李亨浩)

1953년 3월 16일생. 1976년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 2월 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 3월 일본 구주대 전기공학과 졸업(공박). 1980년 2월~현재 한국전기연구소 고전압연구팀장. IEEE 회원, 일본전기학회 회원.