Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 12, No. 12, pp. 1207-1214, 1999.

22.9kV SF_6 가스절연 개폐장치의 전위감지 시스템

논 문
12-12-16

A Potential Detection System of 22.9kV SF_6 Gas Insulated Switchgear

최승길*, 강형부**
(Seung-Kil Choi*, Hyung-Bu Kang**)

Abstract

This paper describes the development of potential detection system of 22.9kV SF_6 gas insulated switchgear. This detection system composed with main circuit compartment and LPS(line potential signaller) can detect the source voltage by capacitive potential division which is accomplished by inserting signal electrode between main electrode and grounded metal enclosure of the switchgear. The position of signal electrode is achieved through numerical analysis on potential and electric field using two dimensional finite element method to induce appropriate signal potential. The developed potential detection system is verified by several tests such as operation test, voltage test, SWC(surge withstand capability) test and other required tests and by application at site. From the results, it is concluded that this potential detection system is very reliable to detect source potential and available to operate the switchgear with safety.

Key Words(중요용어) : Gas insulated switchgear(가스절연 개폐장치), Potential detection system(전위감지 시스템), Signal electrode(신호전극)

1. 서 론

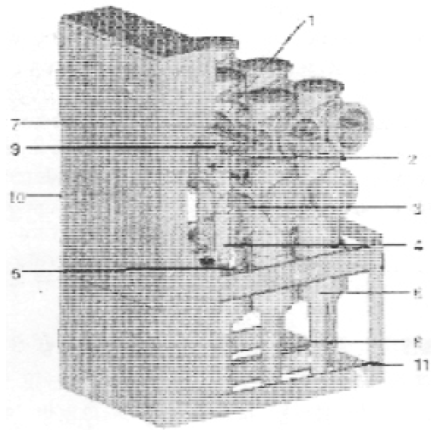
국내 전력 계통에서는 전력의 안정적 공급을 통한 신뢰성 확보와 자동화 운전을 통한 변전소의 무인화 운용을 위해 90년대 초반부터 22.9kV급 가스절연 개폐장치(gas insulated switchgear)를 적용하고 있다. 22.9kV급 가스절연 개폐장치는 전력 계통에서 계통의 원활한 운전, 계통상태의 계측과 감시, 정상 상태에서의 부하 개폐 및 지락, 단락등의 이상 상태 발생시 계통을 안전하게 차단, 분리하기 위해사용되는 첨단의 보호용 전력기기로서 주모선, 차단부, 단로기부 및 케이블 접속부를 비롯한 모든 구성 요소가 공기보다 월등히 우수한 절연성능을 갖는 SF_6가스로 충진된 금속 외함(metal enclosure)내에 수납되어 있는 구조로 되어 있다.

22.9kV 가스절연 개폐장치는 전 구성기기가 SF_6 가스로 밀봉되어 있으므로 종래의 공기절연방식의 개폐장치에 비해 열화가 없고, 제품의 고성능이 반영구적으로 보장되며 장기간 사용시에도 간단한 외부기기 점검만으로 유지보수가 가능하다. 또한 표준적인 구성단위의 기기로 조합되므로 계통기기 계획 및 제조, 설치기간의 대폭 감소가 가능하고, 활선부위가 접지금속 내부에 내장되어 있어 운전, 점검원의 절대적인 안전이 보장된다. 또한 설치면적을 결정하는 단위회로의 폭이 500/600㎜로 감소되어 설치면적의 축소효과가 큰 장점을 가진다.

이와 같은 22.9kV 가스절연 개폐장치를 적용한 변전소의 안전한 무인화 운전을 위해서는 무엇보다도 먼저 선로의 충전 여부 확인을 통한 접지 개폐기 및 차단기의 오조작 방지와 선로의 무단 재폐로 방지가 절대적으로 요구된다. 그러나 현재 가스절연 개폐장치는 선로측마다 별도의 계기용 변성기(potential transformer)를 설치하는 것이 구조적, 경제적으로 어려워 선로측의 충전 여부는 정전 분압 원리가 적용된 특수 케이블 접속재의 2차 전압을 이용한 네온 램

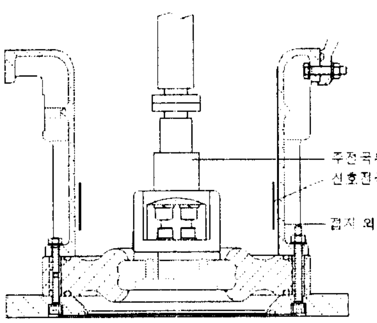
* : 한양대학교 대학원 전기공학과
(서울특별시 성동구 행당동 17, Fax : 02-2297-1569
E-mail : skc0386@hymail.hanyang.ac.kr)
** : 한양대학교 공과대학 전자전기공학부
1999년 7월 28일 접수, 1999년 11월 22일 심사완료

프의 발광에 전적으로 의존하고 있는 상태이다. 따라서 선로의 유지·보수를 위한 접지 개폐기의 조작 및 제어를 위해서는 현장에서 육안으로 램프의 발광 여부를 확인하는 것이 필요하게 되어 무인 변전소의 효율적인 운전에 지장을 주고 있으며, 차단기 및 개폐기의 오조작 사고가 일어날 가능성이 크다. 따라서 변전소의 무인화 및 개폐기기의 신뢰성 있는 운전을 위해서는 선로측의 충전 여부를 감시, 제어할 수 있는 전위 감지 시스템의 개발이 시급히 요구된다.



1. 주모선 2. 금속외함 3. 차단기부
4. 진공차단밸브 5. 신호전극 6. 변류기
7. 제어회로함 8. 케이블접속부 9. 3단개폐기
10. 조작기 11. 지지프레임

(a) 22.9kV 가스절연 개폐장치



(b) 전위감지 시스템 상세도

그림 1. 가스절연개폐장치의 전위감지 시스템
Fig. 1. Potential detection system of gas insulated switchgear

본 연구에서는 이와 같은 필요성에 따라 정전 분압을 이용하여 고전압 충전 여부를 쉽게 감지할 수 있는 주회로부와 충전 여부를 충전에 연동하는 출력 접점으로 변환시키는 LPS(line potential signaller) 장치를 연구·개발하여 적용하였다. 주회로부는 가스절연 개폐장치의 차단기부 내부에 부유 상태(floating state)의 환형 전극을 삽입하는 구조로 구성하여 별도의 설치 공간이 필요 없을 뿐만 아니라 정전용량의 확보가 용이하도록 하였다. LPS 장치는 고성능의 정류기, 전압 검출용 IC, 트랜지스터, 증폭기 및 신호 램프등으로 구성하여 주회로부에서 검출된 신호 전압의 정류 및 기준 전압과의 비교를 통해 충전 여부를 출력 접점으로 구현할 수 있도록 설계하였다. 또한 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 부유 상태의 신호 전극에 유기되는 전위 및 내부 전계를 계산하여 이를 전극 설계에 활용하였으며, 성능 실험, 현장 시험 및 적용을 통하여 연구·개발된 전위감지 시스템의 성능을 검증하였다.

2. 전위감지 시스템의 구성 및 해석 이론

2.1 전위감지 시스템의 주회로부

그림 1(a)는 22.9kV 가스절연 개폐장치의 외형으로 접지된 알루미늄 금속 외함내에 차단기, 단로기, 주모선등을 수납한 구조로 되어 있다.

전위감지 시스템의 주회로부는 정전용량 분배에 의한 전위 감지를 이용하기 위해 그림 1(b)과 같이 주전극부와 접지 외함 사이에 부유 상태의 신호전극을 삽입하는 간단한 구조로 구성하였다.

그림 2는 정전 용량에 의한 분압의 원리를 나타낸 것으로, 여기서 C_1은 주전극부와 신호전극간의 정전

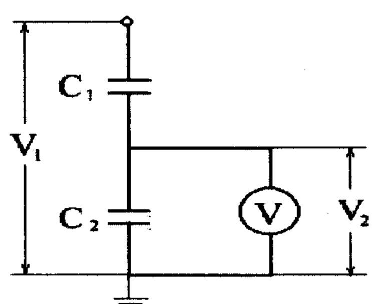


그림 2. 용량성 분압
Fig. 2. Capacitive potential division

용량이며, C_2는 신호전극과 외함간의 정전용량과 신호전극의 단자(terminal)와 LPS까지의 연결에 사용되는 동축케이블의 정전용량의 합을 나타낸다.

일반적인 용량성 분압의 경우 C_1이 작을 경우에는 표류 정전용량의 영향이 커져 주변의 도체류에 의한 영향에 의해 변압비가 변화하여 일정한 2차 전압 V_2를 얻기가 쉽지 않다. 그러나 가스 절연 개폐장치의 경우에는 접지 상태의 외함에 의해 C_1이 정전적으로 차폐되어 있으므로 C_1의 크기의 대소에 상관없이 정확한 변압비를 얻는 것이 가능하다[1]. 따라서 가스 절연 개폐장치에 적용된 정전용량 분압 원리를 간단한 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1 \tag{1}$$

식 (1)에서 C_2의 값중 2차 유기 전압에 큰 영향을 미치는 것은 신호 전극에서 LPS의 단자까지 연결되어 있는 동축 케이블의 정전 용량으로서 C_2는 케이블의 길이를 변화시킴으로서 조정 가능하다.

2.2 신호 전극의 전위 해석 이론

본 전위감지 시스템의 신호 전극에 유기되는 2차 전위 해석을 위한 지배 방정식은 Maxwell 방정식 및 보조 방정식으로부터 식 (2)와 같이 유도된다.

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = 0 \tag{2}$$

식 (2)에 시험 함수를 사용하여 유한요소 정식화 과정을 적용하면 식 (3)과 같은 전위 ϕ에 대한 대칭 행렬 방정식을 얻을 수 있다[2, 3, 4].

$$[K]\{\phi\} = \{0\} \tag{3}$$

여기서 [K]는 시스템 계수 행렬이다.

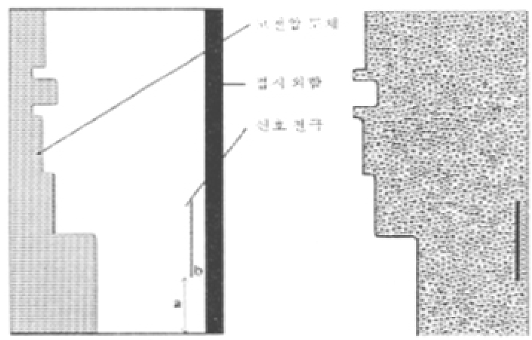
전계의 지배방정식의 해를 구하기 위한 해석 영역의 경계조건은 일반적으로 아래와 같이 식 (4) 및 식 (5)의 고정 및 자연 경계조건으로 주어지며, 전위감지 시스템의 신호전극과 같이 접지되어 있지 않거나 전원과 연결되어 있지 않은 도체는 등전위이기는 하지만 그 값이 얼마인지는 주어지지 않는다. 따라서 이와 같이 동일한 전위값을 갖지만 어떤 값인지를 알 수 없을 경우에는 식(6)과 같은 등전위 경계 조건을 적용하여야 한다[7].

$$\phi = \phi_i \tag{4}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{5}$$

$$\phi_f = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \cdots\cdots = \phi_k \tag{6}$$

여기서 ϕ_i는 전원 또는 접지 전위를 갖는 기지의 값, ϕ_f는 신호전극의 전위로 미지값이며, $\phi_1 \sim \phi_k$는 신호전극에 위치한 유한요소 절점의 전위값이다. 즉 도체계 내부에 전기적으로 부유 상태(floating state)인 도체가 있는 경우에는 이 도체에 위치한 미지 절점은 k개 존재하지만 동일한 전위값을 가지므로 미지의 값은 하나만 존재하게 된다. 따라서 유한요소 해석시 계 방정식의 해를 계산할 때 신호전극에 위치하는 k개의 절점에 대해서는 모두 동일한 하나의 값을 갖도록 경계 조건을 부여하여야 한다.



(a) 해석모델 (b) 유한요소분할도 (a=35㎜, b=5㎜)

그림 3. 전위 해석 모델 및 요소분할도
Fig. 3. Model and elements discretization

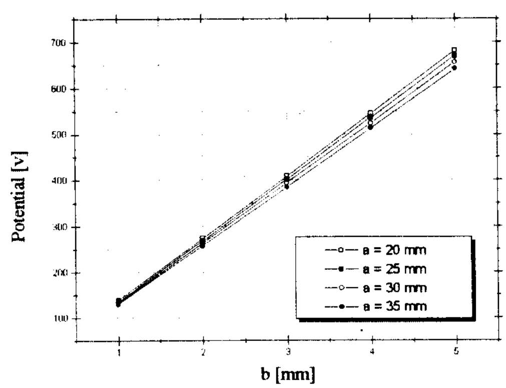


그림 4. 신호 전극의 유기 전위
Fig. 4. Induced potential of signal electrode

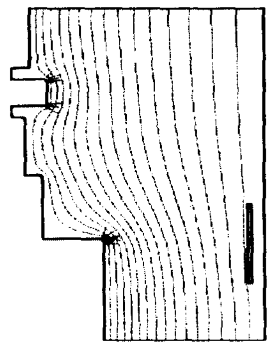
3. 전위감지 시스템의 설계 및 시험

3.1 신호전극의 전위 및 주회로부 전계 해석

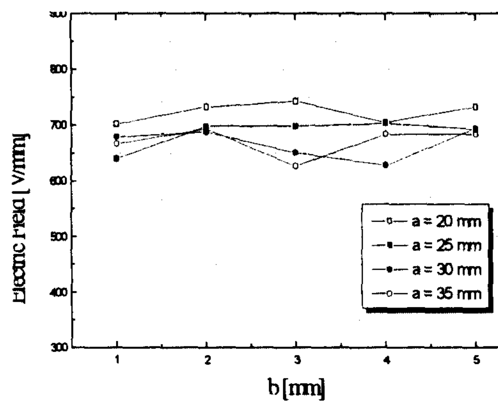
그림 3(a)는 전위 감지 시스템의 유기 전위 및 주회로부의 전계를 해석하기 위한 모델로 고전압측인 주도체, 접지 외함 및 신호전극으로 구성되어 있다. 신호전극의 위치에 따른 유기 전위를 해석하기 위해 고전압측에 $22900/\sqrt{3}$V를 인가하고, 금속 외함은 접지 상태로 경계 조건을 부여하였다. 신호전극은 폭 48㎜, 두께 1.6㎜를 기준으로 하여, 신호 전극의 위치 a를 20㎜에서 35㎜까지 5㎜ 단위로, b를 1㎜에서 5㎜까지 1㎜ 단위로 변화시키면서 정전용량의 분배에 의해 신호전극에 유기되는 2차 전위값을 해석하였다. 그림 3(b)는 a=35㎜, b=5㎜일 때의 모델의 요소분할도로서, 요소망은 8,613개의 삼각 요소(triangle element)와 4,483개의 절점(node)으로 구성되어 있다.

그림 4는 각각 신호전극의 위치 a, b를 변화 시켰을 때 신호전극에 유기되는 전위를 나타낸 것으로 신호 전극에는 a, b의 길이에 따라 130V에서 680V 정도의 전위가 유기됨을 알 수 있다. 이는 부유 상태(floating state)의 신호전극이 제 3의 전극(third electrode)으로 작용하여 a, b의 길이가 변화할 때 주전극부와 신호전극, 신호전극과 접지외함사이의 정전용량(capacitance)의 분배에 따른 분압 효과에 의해 신호전극에 일정한 전위가 유기되기 때문이다.

그림 5(a)는 a=25㎜, b=5㎜일 때의 등전위 분포 및 전계를 나타낸 것으로 전체 해석영역에서 최대전계값은 692.8 V/㎜이며, 그림에는 최대 전계값의 70% 즉 485.0 V/㎜이상의 값을 갖는 전계 집중부만을 표시하였다. 그림을 보면 본 해석 모델에서는 전극의 모서리부분에 전계가 집중함을 알 수 있으며, 특히 신호전극과 마주보는 주전극부의 모서리부분의 전계 집중이 심함을 알 수 있어 신호전극의 유기전위가 내부의 전계 분포에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 신호전극의 위치 a, b를 변화시켰을 때의 최대 전계값을 나타낸 것으로 최대 전계값은 전극의 위치에 따라 650~750 V/㎜ 정도로 SF_6가스에 의해 쉽게 절연 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 실제의 경우에 있어 신호전압은 신호전극과 접지 외함간의 정전용량과 동축케이블의 정전용량의 병렬 연결에 의해 저감됨을 감안하고, 신호전극 단자의 구조적 위치에 따른 외부 인출 구조의 편의를 위해 본 연구에서는 약 400V의 2차 유기 신호 전압을 얻을 수 있는 a = 25㎜, b = 3㎜의 위치를 기준으로 전위감지 시스템의 주회로부를 구성하였다.



(a) 등전위 분포도



(b) 전극위치에 대한 최대 전계

그림 5. 등전위 분포 및 최대전계
Fig. 5. Potential distribution and max. electric field

3.2 LPS(Line Potential Signaller)의 설계

그림 6과 그림 7은 각각 전위감지 시스템의 원리 및 LPS의 내부 회로도를 나타낸 것이다. 전위감지 시스템의 신호전극으로부터 LPS로 유입되는 전류는 수 ㎂정도로 미소하므로 OP-Amp에 전달하기 위해서는 무엇보다도 먼저 고저항을 통한 정합(matching)을 알맞게 시키는 것이 요구된다.

정합용 저항으로는 30~35 MΩ의 가변저항을 이용함으로써 입력 전압의 값을 조정할 수 있도록 하였다.

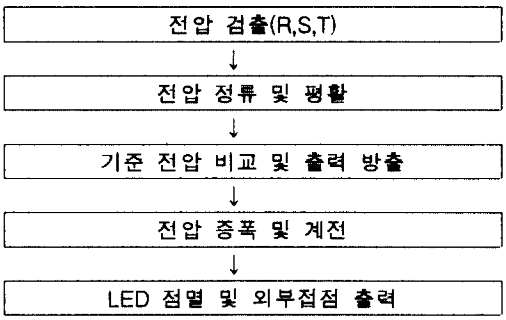


그림 6. 전위감지 시스템의 원리
Fig. 6. Principle of potential detection system

이와 같이 가변저항을 사용하는 것은 검출된 2차 유기 전위를 보정하기 위한 것이다. 왜냐하면 LPS를 국내의 모든 22.9kV 가스절연 개폐장치에 적용시키기 위해서는 각 제작회사별로 상이한 기기 구조 및 동축케이블 길이 등의 차이에 의해 발생하는 입력 전위값의 보정이 필요하기 때문이다. 또한 입력단에는 서지에 의한 LPS 내부 회로의 보호를 위하여 산화아연 바리스터의 일종인 TNR을 사용하였다. 실제로 LPS의 단자에 입력되는 전압은 약 100V 정도인 점을 고려하여 TNR은 동작 전압이 400V의 제품을 선정하였다. 또한 3상 정류보다는 각상을 클램핑(clamping) 정류하는 것이 각상의 미소전류를 최대한 이용할 수 있으므로 LPS의 입력단으로 단상 회로를 선정, 적용하였다[6].

검출된 신호전압은 다이오드 및 콘덴서에 의해 정류 및 평활 과정을 거쳐 직류 전압으로 변환되며, 변환된 전압은 다시 한번 평활 과정을 거쳐 OP-Amp의 입력단으로 들어간다. 제너 다이오드(zener diode)는 OP-Amp의 보호를 위해 병렬 연결되며, 입력전압이 15V 이상이 되면 접지로 방출된다. OP-Amp의 기준전압은 2.8V이며, LPS의 전원의 공급이 중단되었을 때 콘덴서의 충전 전압을 보다 빨리 방출하기 위해 speed diode를 사용하였다. OP-Amp는 입력된 전압과 기준 전압을 비교하여 입력전압이 OP-Amp의 기준 전압보다 클 경우 OP-Amp의 동작에 의해 출력 전압이 방출되며, OP-Amp의 출력은 트랜지스터(transistor)를 구동(turn-on)하여 LPS 내부의 보조 계전기(aux. relay)를 여자시켜 출력 접점이 동작한다. LPS의 보조 계전기의 접점중 1개는 LPS장치 자체의 LED를 점등시켜 선로가 충전 상태임을 표시하는데 사용

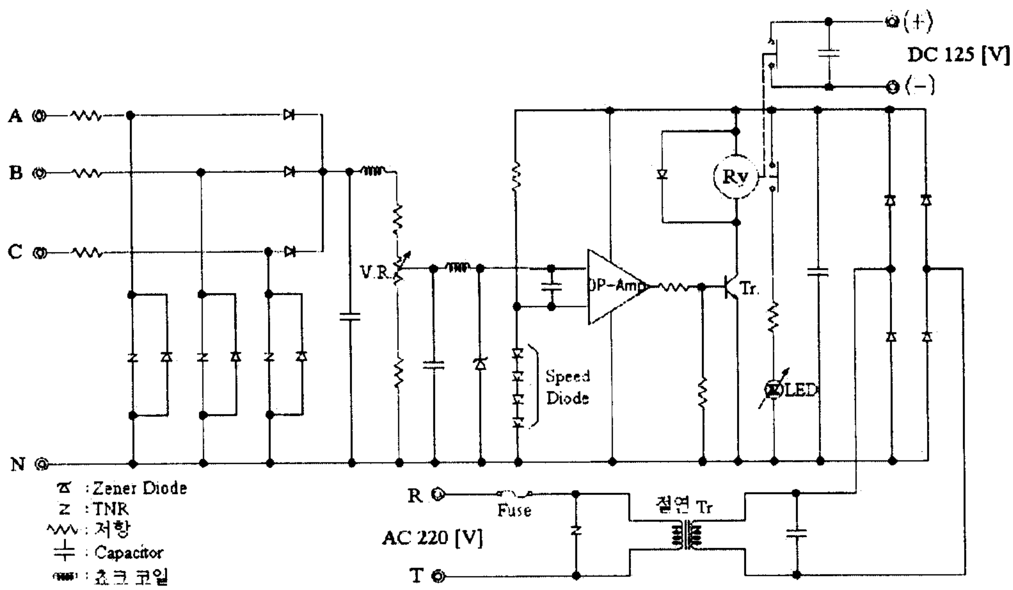


그림 7. Line Potential Signaller의 내부회로도
Fig. 7. Circuit diagram of Line Potential Signaller

되며, 또 다른 한 개의 접점은 차단기 및 단로기의 제어, 차단기의 재폐로 동작 연동조건 등으로 활용하기 위한 외부 계전기 구동용으로 사용된다.

기존에 사용되던 네온 램프는 무전원인 반면, 본 LPS는 외부에 증폭된 신호를 전달하기 위해 외부 전원의 공급이 필요하다. 한국전력에서 운용하는 변전소와 발전소의 경우 직류 및 교류 제어 전원이 모두 공급되고 있으나 일반 대형 빌딩 및 플랜트에서는 교류만을 제어전원으로 사용하는 경우가 많아 본 장치에서는 모든 설치 환경에 대해 적용이 가능하도록 하기 위해 제어전원으로 일반적인 교류 220V를 사용하였다. 또한 외부 교류 전원은 각 변전소마다 접지방식의 차이에 의해 중성점 전위가 접지 전위와 차이가 발생하는 경우가 있으므로 본 장치에서는 전원의 접지 여부와 관계없이 일정한 전압이 LPS의 내부 회로에 입력될 수 있도록 절연변압기를 사용하여 LPS회로와 외부 회로가 절연되도록 함으로써 접지를 LPS의 기준 전압으로 설정할 수 있도록 하였다.

3.3 시험 및 고찰

전위 감지 시스템의 성능 검증을 위하여 동작 시험, 내전압 시험, 임펄스 내전압 시험, SWC 시험(surge withstand capability test) 등을 실시하였다. 22.9kV 가스절연 개폐장치에 시뮬레이션을 통해 결정한 a=25㎜, b=3㎜의 신호전극을 설치한 후 전극에 유기되는 전압을 측정한 결과값은 383V 정도로서 시뮬레이션에 의한 결과인 401.9V와 약 5% 정도의 차이를 보였다. 이와 같이 측정값과 계산값이 다소 차이가 나는 이유는 2차원 해석의 경우 축대칭을 가정하여 해석함으로서 정확한 전극 구조가 반영되지 않아 반경 방향의 전위 변화가 해석에 고려되지 않았기 때문으로 생각된다. 내전압 시험기를 이용하여 전압을 상승 또는 하강시키면서 각각 10회 측정한 결과, 본 연구를 통해 개발한 전위감지 시스템의 동작 전압은 주회로 전압의 약 60%인 8kV정도로서 선로의 충전 여부를 효과적으로 감지할 수 있음을 확인하였다.

또한 5kV, 1.2×50μsec의 파형의 임펄스 전압을 LPS 장치에 정극성 및 부극성으로 각각 15회 인가, 시험하여 임펄스 전압에 대한 장치의 내구성을 확인하였으며 서지 특성을 검증하고자 SWC 시험을 실시하였다. SWC 시험은 ANSI C37.90.1 규격에 준하여 5kV의 시험 전압의 초과도시험(fast transient test)과 1MHz, ±2.5kV의 진동 전압을 1초간 연속해서 인가하는 진동서지 시험(oscillation surge test)을 수행하여 LPS가 충분한 내서지 능력을 가짐을 확인하였다. 그림 8과 그림 9는 각각 본 연구에서 수행한 초과도 SWC 시험과 진동서지 시험 파형이다.

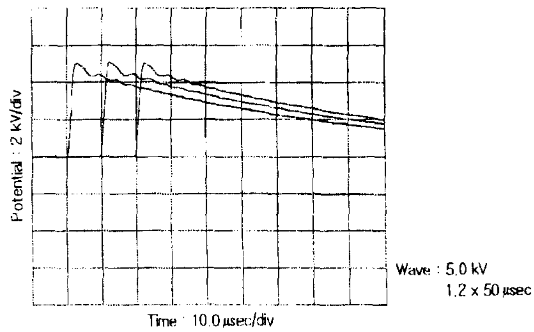


그림 8. SWC 초과도 시험 파형
Fig. 8. Wave shape of SWC fast transient test

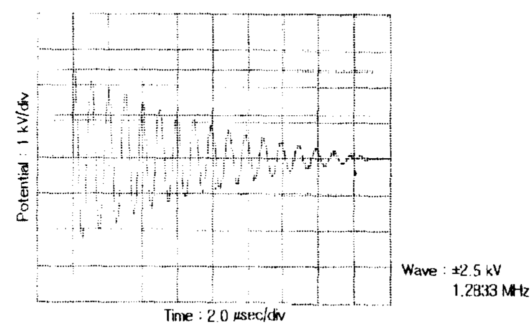
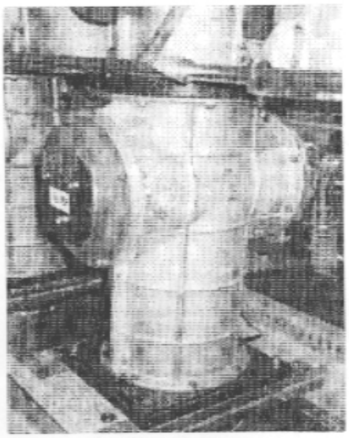


그림 9. SWC 진동서지 시험 파형
Fig. 9. Wave shape of SWC oscillation surge test

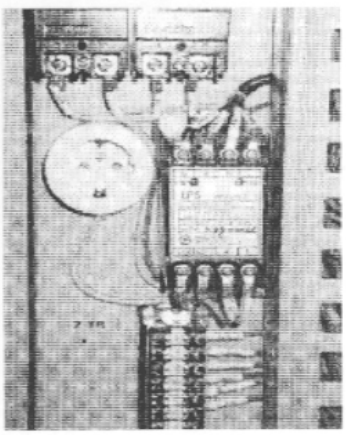
LPS의 단자간에는 개폐장치 제어회로의 시험 규격에 근거하여 2kV/1분의 보조회로 내전압 시험을 실시하여 시험 실시후 LPS의 내부 회로 성능에 이상이 없음을 확인하였다.

그림 10(a)는 본 연구에서 개발한 전위감지 시스템 주회로부의 신호전극과 LPS간의 연결을 위한 외부 단자 및 동축케이블을 배선한 전경으로 단자의 접속부는 고형 절연물에 의해 접지 외함과 절연되어 있음을 알 수 있다. 또한 그림 10(b)는 가스절연 개폐장치의 제어회로함 내부에 설치된 LPS의 모습으로

장치 외면에 충전 표시등과 입·출력을 위한 단자가 구비되어 있음을 보여준다.



(a) 주회로부



(b) LPS 설치 전경

그림 10. 전위감지 시스템의 전경 사진
Fig. 10. Pictures of the potential detection system

LPS는 국내 변전소에 설치된 3개사의 22.9kV 가스절연 개폐장치에 대해 수 개월간 현장 적용을 거쳐 장치의 동작 신뢰성 및 안전성을 검증받아 현재 수 개의 변전소에 설치되어 활용되고 있으며, 또한 한전의 방침에 따라 향후 국내의 모든 가스절연 개폐장치에 확대 적용될 예정으로 있다.

3.3 기존 기술과의 비교

본 연구를 통해 개발한 전위감지 시스템을 개폐장치에 적용하면 선로측의 충전 여부에 대한 연속적인 감시 및 제어가 가능하여 변전소의 무인화 및 개폐기기 조작 및 제어의 신뢰성 향상에 일조할 수 있을 것으로 기대되며, 본 시스템의 주요한 기능을 기존에 사용되던 램프 발광식 표시장치와 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 전위감지 시스템의 주요 기능 비교
Table 1. Principal functions comparison

기 능	램프식 표시장치	전위감지 시스템
접지스위치의 무단 조작 방지	기능 없음	선로측이 무전압 상태일때만 조작 가능
선로의 무단 재폐로 방지	기능 없음	선로측이 무전압 상태일때만 조작 가능
차단기 제어	기능 없음	필요시 적용가능
선로 충전 표시	네온 램프	pilot lamp
선로 충전 상태 원격 감시	기능 없음	가능(Scada/remote)

4. 결 론

본 연구에서는 정전 분압의 원리를 이용하여 주회로부와 LPS로 구성된 전위감지 시스템을 연구·개발하여, 고전압 감지용 시스템으로서의 적용 가능성 및 성능을 확인하였다.

주회로부의 신호전극은 정전적으로 차폐된 접지 외함 내부에 환형 전극을 삽입하는 간단한 구조로 구성하여 별도의 외부 장치 없이 신뢰성 있는 전위 감지를 가능하도록 하였으며, LPS는 선로의 충전을 감지하여 충전에 연동하는 접점을 출력함으로써 변전용 개폐기기의 오조작 방지 및 신뢰성 있는 변전소의 무인화 운전을 위한 토대를 마련하였다. 시험 및 현장 적용을 통해 전위감지 시스템의 성능을 검증하였으며, 본 시스템의 외부 출력 접점을 이용하면 아래와 같이 다양하게 활용될 수 있을 것으로 사료되며 향후 초고압 개폐장치 및 유사 개폐기류로의 확대 적용이 가능할 것으로 기대된다.

1) 선로측의 역가압시 차단기의 조작을 방지하여 전력 계통의 안정운전 도모

2) 열병합 발전소등과 연계된 선로의 계통 제어에 이용
3) 차단기, 개폐기, 재폐로계전기등의 제어접점으로 활용
4) 무인 변전소의 원격 감시
5) 원격에서 접지개폐기의 안전한 조작
6) 선로측 PT의 대체에 따른 경제적 효과

참 고 문 헌

[1] 林泉, "高電壓プラズマ工學", *Izumi Hayashi*, pp. 171-176, 1996.

[2] N. O. Sadiku, "Numerical techniques in electromagnetics", *CRC Press*, pp. 407-428, 1992.

[3] 임달호, "전기계의 유한요소법", *동명사*, pp. 175-179, 1986.

[4] J. JIN, "The finite element method in electromagnetics", *JOHN WILLEY & SONS*, pp. 72-135, 1993.

[5] 최승길, 강형부, "진공 인터럽터의 차폐판이 전계 분포에 미치는 영향의 유한요소해석", *전기전자재료학회논문지*, 제12권, 제2호, pp. 182-187, 1999.

[6] David. a. Bell, "Solid State Pulse Circuits", *RESTON*, pp. 5.7-1∼5-18, 1992.