

가스수집시간을 이용한 유중수소가스 측정감도 향상 연구

논문

58-3-16

Sensitivity Enhancement in Measurement of Hydrogen Gas Dissolved in Oil using Gas Collection Time

허종철* · 선종호* · 강동식* · 정주영** · 박정후***

(Jong-Cheol Heo · Jong-Ho Sun · Dong-Sik Kang · Joo-Young Jeong · Jung-Hoo Park)

Abstract - This paper describes the sensitivity enhancement in measurement of the hydrogen gas dissolved in oil using gas collection time. On-line gas measurement is a useful for continuous monitoring of power transformer. Recently many studies on hydrogen gas measurement, due to their simplicity and low price, have been done for transformer monitoring. In measurement of the hydrogen gas in oil, the suitable sensitivity and resolution in the desired ranges of the gas concentrations are needed for the reliable monitoring of power transformers. In this study, the sensor output trends were analyzed with the hydrogen gas collection time which means the time to collect the hydrogen gas before reaction of hydrogen gas sensor. It is indicated that the sensor outputs were increased with the increase of hydrogen gas collection times at the same hydrogen gas concentrations.

Key Words : Hydrogen Gas in Oil, Diagnosis System, Oil-immersed Transformer, Sensitivity

1. 서 론

유입식 변압기와 같은 전력기기의 내부에서 과열이나 부분방전, 아크방전과 같은 국부적인 고장이 발생하면 수소가스와 탄화수소계 가스가 발생하여 절연유속에 용해된다. 대부분의 발생 가스는 특정의 고장현상에 대해서만 주로 발생하지만 수소가스는 고온과열을 비롯한 부분방전, 아크방전과 같은 유입식 전력기기의 대부분의 주요 고장들에서 발생하기 때문에 수소가스 감시는 넓은 범위의 유입식 전력기기 고장감시를 가능하게 하다[1-3]. 또한 유중수소가스의 절연유에 대한 용해도가 발생가스 중 가장 낮기 때문에 절연유로부터의 분리가 용이한 것으로 알려져 있다[4][5]. 이러한 특성 때문에 유중수소가스 측정에 의한 유입식변압기의 진단 시스템이 다양하게 개발되어 왔다[6][7].

일반적으로 유입식 변압기의 고장예방진단에 사용되는 유중수소가스 검출은 절연유로부터 수소가스를 분리하는 기술과 분리된 가스를 센싱하는 기술로 분류할 수 있다. 수소가스분리는 절연유에 기포를 일으키는 방식, 진공을 이용하여 수소가스를 추출하는 방식, 헤드 스페이스를 이용한 방식, 멤브레인을 사용하여 분리하는 방식 등이 있으며, 수소가스 센싱에는 수소연료전지 감응방식이나 TCD, FTIR, 반

도체 가스센서 등이 사용되고 있다[7-10]. 이와 같은 수소가스 분리방식과 가스센싱방식 중 취급의 용이성과 경제성 때문에 최근 가스분리는 멤브레인을 그리고 가스센싱에는 반도체 가스센서를 이용하는 방식이 많이 연구되고 있다[8-11]. 이러한 센싱방식에서 유중에 많은 수소가스가 용해되어 있다 하더라도 유중의 수소가스중 일부의 수소가스만 멤브레인을 통과하기 때문에 투과하는 수소가스를 연속적으로 가스센서와 반응하게 하여 농도를 측정하게 되면 가스센서의 출력전압이 낮아서 반도체 가스센서로서 수소가스의 농도를 정량화시킬 수 없을 정도의 분해능을 가질 수 있거나 측정을 위해서 측정장치에 미소 신호를 증폭하기 위한 장치나 잡음제거를 위한 필터 등을 설치해야 한다. 그러므로 유중 수소가스 측정에 있어서 멤브레인을 투과하는 수소가스에 대하여 가스센서와의 반응단계에서부터 유중가스에 대한 측정 감도를 높임으로써 요구되는 수소가스 농도범위에서 어떠한 부가적인 장치 없이도 충분한 분해능을 갖도록 하는 것은 신뢰성 있는 유중수소가스측정과 감시를 통하여 유입식 전력기기의 고장을 효율적이고 경제적으로 예방하는 데 매우 필요한 기술이다.

본 논문에서는 멤브레인에 의하여 절연유로부터 분리된 유중수소가스의 수집시간을 이용하여 유중 수소가스 측정 감도를 향상시키고자 하는 연구에 대하여 논하였다. 유중가스의 분리에는 테프론계 고분자 필름이 사용되었으며, 수소가스 센싱에는 반도체 수소가스센서가 사용되었다. 광유계 절연유에 일정한 농도의 수소가스를 혼합하는 방식으로 3가지 농도의 유중수소가스를 제작하였으며 각 농도에 대하여 수소가스 수집시간에 대한 가스센서의 최대출력치 특성을 분석하였고 관련식을 도출하였다. 실험결과 15[ppm]의 유중 수소가스 농도에 대해서 수소가스 수집시간이 0일 때 비하여 180분일 때가 감도가 4.97배 향상되었고 도출된 관련식으로

† 교신저자, 정회원 : 한국전기연구원 책임기술원
부산대학교 공대 전기공학과 박사과정
E-mail : jcheo@keri.re.kr

* 정 회원 : 한국전기연구원 책임연구원 · 공박
** 정 회원 : 한국전기연구원 책임기술원
*** 펠로우회원 : 부산대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박
접수일자 : 2008년 9월 25일
최종완료 : 2009년 1월 9일

부터 가스센서의 최대출력치를 입력전압의 80[%]인 4[V]로 하였을 때 1,800[ppm]을 측정하기 위한 가스수집시간은 572분으로 나타났다.

2. 본 론

2.1 이론적 고찰

특정가스가 어떠한 공간에서 액체에 용해되어 있으면 액상에 용해되어 있는 가스와 기상에 존재하는 가스는 서로 평형상태로 유지된다. 이러한 가스의 평형은 다음과 같은 헨리의 법칙으로 설명할 수 있다.

$$P=Hx \quad (P:기상에서의 가스압력, H:헨리상수, x:액상에서의 가스농도) \quad (1)$$

헨리상수 H는 아르헨니우스 식을 따르므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H=H_0 \exp(-E/RK) \quad (H_0:상수, E:가스의 기화에너지, R:기체의 아보가드로수, K:절대온도) \quad (2)$$

만약 가스를 투과시키는 멤브레인이 가스가 용해되어 있는 액체와 접해 있으면 식 (1)과 식(2)에 따라서 평형이 유지될 때까지 가스가 투과되게 된다. 식(1)과 식(2)에서 알 수 있듯이 투과되는 가스량은 액체에 용해되어 있는 가스농도와 온도에 비례하게 된다.

액체속의 가스가 멤브레인을 통하여 투과된 후 반도체 가스센서와 접할 때 다음 식(3)의 관계에 따라서 반도체 가스센서의 저항이 감소하게 된다[9][12].

$$R=R_0 P^{-A} \quad (R_0:초기저항, P:가스압력, A:상수) \quad (3)$$

만약 액체속의 가스가 단위시간당 멤브레인을 투과한 양을 P_t 라고 하고 투과된 가스가 바로 가스센서와 접할 경우 가스센서의 저항 R_t 은 식(4)와 같이 되고 수소가스접촉에 따른 가스센서의 저항 변화 ΔR_1 은 식(5)와 나타낼 수 있다.

$$R_t=R_0 P_t^{-A} \quad (4)$$

$$\Delta R_1=R_0(1-P_t^{-A}) \quad (5)$$

그러나 멤브레인을 통과한 가스를 가스센서와 바로 접촉시키지 않고 일정공간에서 Δt 시간동안 수집하면 수집되는 가스압은 수집시간과 비례한다고 할 때 수집된 가스압은 $P_t \Delta t$ 가 되고 이 가스압이 가스센서와 접촉하게 되면 저항 R_2 의 크기는 식(6)과 같이 되고 이 때 가스센서의 저항 변화 ΔR_2 는 식(7)과 나타낼 수 있다.

$$R_2=R_0(P_t \Delta t)^{-A} \quad (6)$$

$$\Delta R_2=R_0(1-P_t \Delta t^{-A}) \quad (7)$$

그러므로 식(5)와 식(7)로부터 동일한 유중수소가스에 대하여 $\Delta R_2 > \Delta R_1$ 이므로 동일한 액체속의 가스농도에 대해서 투과된 가스에 의한 가스센서의 저항의 변화는 Δt 시간 동안 수집한 후 가스센서와 접하는 것이 더 커지고 따라서 측정감도도 향상되게 된다.

2.2 실험

그림 1은 실험설비의 구성을 보여주고 있다. 사용된 절연유는 광유로서 1종 2호이고 질소가스와 혼합된 농도 500[ppm], 2,000[ppm], 30,000[ppm]의 수소가스를 절연유 속에 일정유량으로 일정시간 동안 30[°C]를 유지하고 있는 챔버내에서 혼합하여 수소가스가 용해된 혼합 절연유를 제작하였다. 제작된 혼합절연유의 수소가스 농도를 가스크로마토그래피(HP 5890)와 가스추출기(HP 19395A)를 이용하여 측정한 결과 500[ppm]의 수소가스를 용해한 절연유의 유중수소가스농도는 평균 15[ppm], 2,000[ppm]의 경우는 평균 45[ppm], 30,000[ppm]의 경우는 평균 540[ppm]인 것으로 나타났다. 혼합절연유는 펌프를 통해서 절연유 용기내로 옮겨지고 용기내의 절연유는 50[°C]로 유지되며, 절연유 용기의 한쪽 면은 수소가스투과를 위하여 멤브레인이 설치되었다. 멤브레인은 두께 50[um], 면적 7[cm²]의 테프론계 고분자 필름을 사용하였다. 멤브레인을 투과한 수소가스를 수집하기 위한 적정부피의 가스수집용기가 멤브레인과 연결되어 설치되어 있으며 그 후단에 솔레노이드 밸브를 설치하여 일정시간 동안 수소가스를 용기내에서 모은 후 방출할 수 있도록 하였다. 밸브의 개방과 함께 가스수집 용기내의 수소 가스는 가스센서가 설치되어 있는 가스센서용기내로 들어와서 가스센서와 반응하게 되며, 가스센서로는 F사의 반도체 수소가스센서를 사용하였고 그림 2는 가스센서 회로결선을 보여주고 있다. 그림 2에서와 같이 입력전압은 5[V]이며 센서와 부하저항 R_L 에 인가된다. 그러므로 가스농도가 클수록 센서저항은 감소하게 되고 상대적으로 부하저항에 인가되는 전압 V_L 은 증가하게 되므로 전압 V_L 을 센서의 출력으로 사용하여 되며 출력전압은 수소농도의 크기와 비례관계를 갖게 된다. 가스수집용기내에 가스를 수집하는 수집시간은 0분, 20분, 40분, 60분, 120분, 180분으로 하였으며 3가지의 가스농도에 대해서 실시하였다. 측정실험은 온도 30[°C], 상대습도 65[%]의 항온 항습기 내부에서 수행되었으며 한 번의 실험이 끝나면 가스센서를 기중에 노출시켜 센서 감지부를 초기상태로 만들었다.

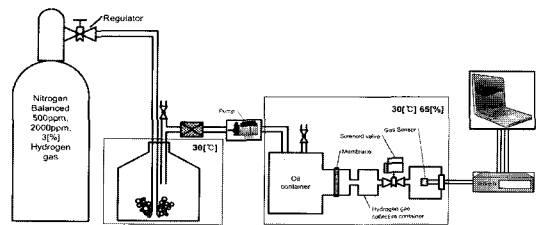


그림 1 전체실험설비
Fig. 1 Experimental setup

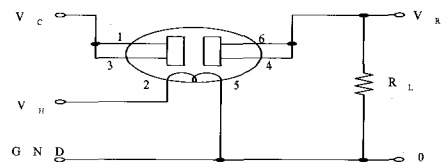


그림 2 수소가스센서 회로결선
Fig. 2 Circuit of hydrogen gas sensor

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 가스수집시간 및 유증가스 농도별 측정시간에 대한 가스센서 반응 특성을 보여주고 있다. 그림 3에서와 같이 3가지 수소가스농도 모두에서 측정시간에 대하여 가스센서의 출력은 솔레노이드 밸브의 개방과 함께 일정시간동안 급격히 증가하다가 감소한 다음 평형상태로 유지되는 특성을 보이고 있고 가스수집시간이 길수록 그리고 유증가스 농도가 높을수록 가스센서의 출력전압이 높아지는 특성을 보이고 있다. 또한 이러한 가스수집시간 및 유증수소가스농도별 측정시간에 대한 출력분포 곡선으로부터 출력차가 가장 큰 것은 최대치만을 알 수 있으며, 따라서 유증수소가스 측정에서 최대치를 사용하는 것이 동일 유증가스농도에서 가스수집시간에 대하여 주변 잡음에 대한 감도나 유증가스농도 결정의 분해능 향상 측면에서 가장 효율적임을 알 수 있다.

그림 3에서와 같이 유증가스 농도 및 가스수집시간에 비례하여 가스센서의 출력이 증가 함을 알 수 있었으며, 그림 4를 통하여 유증가스 농도가 가스수집시간과 어떠한 비례관계가 있는가를 고찰하여 보았다. 그림 4는 가스수집시간에 따른 유증가스 농도별 가스센서 최대출력치 특성을 보여주고 있다. 이 그림에서와 같이 가스수집시간이 길수록 동일 유증가스농도에서 가스센서의 최대 출력치는 일정비율로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 가스수집시간과 최대 출력치의 증가는 어떠한 여러 가지 유증가스농도에 대하여 어떠한 정량적 관계가 있는 가를 고찰하기 위하여 다음의 분석과정을 실시하였다. 먼저 그림 4의 각 유증가스 농도에서 가스수집시간에 대한 최대 출력치의 증가는 선형적이라고 가정할 때 두 특성치의 관계는 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고 각 유증가스농도에 대한 식(8)의 관계가 그림 4에 표시되어 있다. 그림 4에서 각 유증가스농도의 추세선으로부터 각 농도에 대한 식 (8)의 상수 A와 B를 구하고 A, B와 유증가스농도와와의 관계를 구하면 그림 5와 같이 된다. 그림 5에서와 같이 상수 A와 B는 식(9)와 같이 지수함수형태로 표현할 수 있으며, 유증가스농도와 상수 A, B에 대한 관계식이 그림 5에 표시되어 있다. 그러므로 식 (8)과 식(9)를 이용하면 최대출력치를 가스수집시간과 유증가스농도를 이용한 하나의 식으로 표현할 수 있게 된다.

$$V=A+B*t \tag{8}$$

V: 최대출력치[V], t: 가스수집시간, A, B: 상수

$$A, B = d_1-d_2*exp(-d_3/C) \tag{9}$$

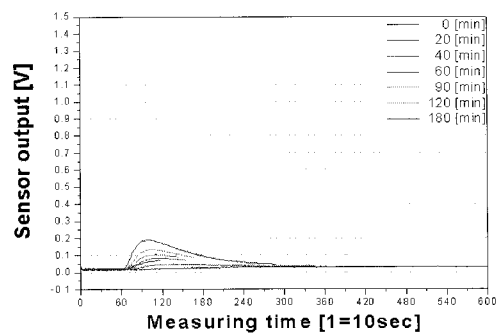
d₁, d₂, d₃:상수, C:유증가스농도[ppm]

실험에서 사용된 각 유증가스농도와 가스수집시간에 대한 최대출력치의 실험 값과 식(8)에 의한 계산 값의 차이를 비교한 결과 실험 값 기준으로 두 값의 편차는 평균 -5[%]이었고 이 때 표준편차는 8[%]정도로써 계산치와 측정치는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

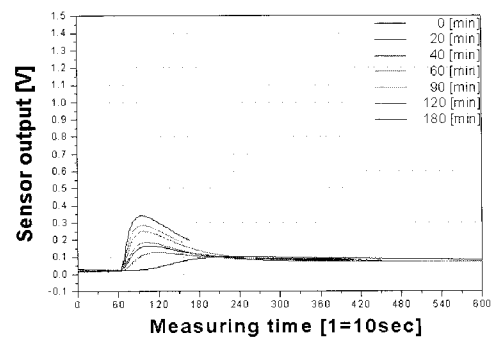
한편 유증가스 분석에 의한 유입식 변압기 국내의 판정규격에서 가장 위험한 고장으로 판정되는 수소가스 농도 기준은 최대 1,800[ppm] 정도인 것으로 알려져 있다[4][13]. 따라

서 유증수소가스 시스템은 이 범위 이상의 수소가스농도측정이 가능해야 이상의 정도를 판정할 수 있다. 그림 2의 5[V] 입력전압 중 유증수소가스 농도 증가에 따라서 비례하는 최대 출력 범위가 4[V]정도라고 하였을 때 식 (8)에 따르면 유증수소가스농도 1,800[ppm]에 대한 가스수집시간은 572분으로 계산된다. 따라서 572분 이상의 유증가스수집시간은 수집시간 연장에 따른 측정 감도 향상을 기대할 수 없으며, 1,800[ppm]이상의 유증수소가스 측정을 위해서는 가스수집 시간을 572분 이내로 설정해야 한다. 또한 유증수소가스 측정주기를 572분 이하로 해야 될 경우도 가스수집시간을 572분 이하로 해야 한다. 이상과 같이 감도향상을 위하여 가스수집시간을 무한정 길게 할 수는 없으며 유증가스농도 측정범위와 측정주기가 고려되어 결정되어야 한다.

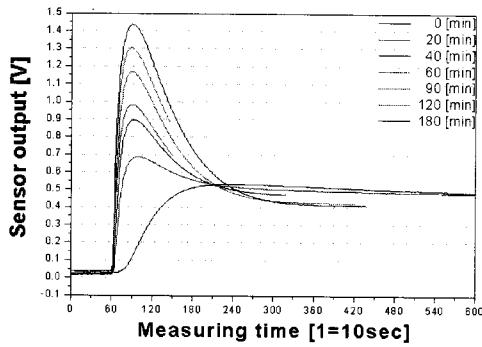
또한 고농도와 저농도의 유증수소가스 중 어느 영역에서 가스수집시간에 의한 감도향상이 우수한지 고찰하여 보았다. 표 1은 그림 4로부터 구한 가스수집시간 0의 최대출력에 대한 각 가스수집시간의 최대출력비를 보여주고 있다. 표 1에 따르면 유증가스농도가 15[ppm]일 때의 가스수집시간 0분에 대한 180분의 최대출력값의 비는 4.97이고 540[ppm]일 때는 2.74로서 농도가 높을수록 가스수집시간에 따른 센서출력의 증가율이 낮아지는 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 특성으로부터 가스수집시간에 따른 감도향상 특성은 출력값이 높은 농도영역보다는 출력값이 작아서 상대적으로 잡음에 대한 감도나 분해능이 좋지 않은 낮은 농도영역에서 더 우수한 것으로 나타났으며 이는 유증 수소가스 농도가 작은 유입식 변압기의 초기 고장을 더욱 효과적으로 발견하여 큰 고장으로의 진전을 예방할 수 있게 한다.



a) 유증가스 15[ppm]



b) 유증가스 45[ppm]



c) 유중가스 540[ppm]

그림 3 가스수집시간별 유중가스 농도에 따른 가스센서 출력 특성

Fig. 3 Output trends of gas sensor with gas concentrations at each gas collection time

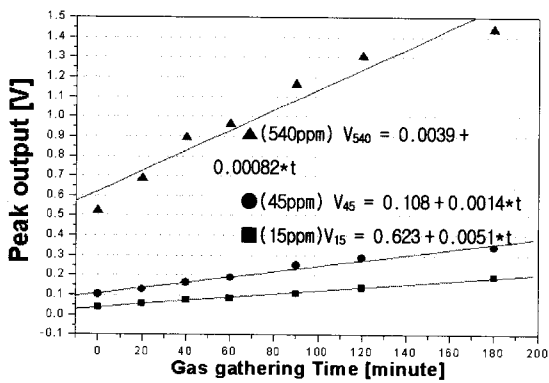


그림 4 가스수집시간에 따른 유중가스 농도별 가스센서 최대치 특성

Fig. 4 Peak outputs with gas collection times at each gas concentration

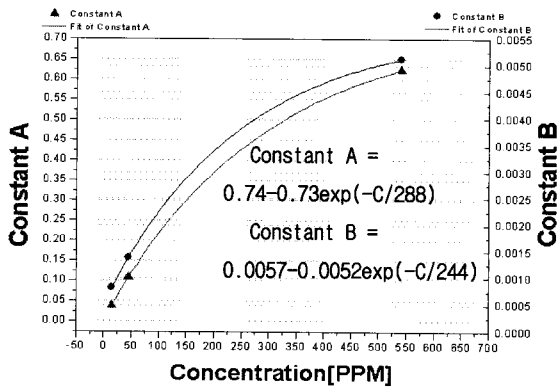


그림 5 상수 A, B와 유중수소가스농도

Fig. 5 Constants A and B vs hydrogen gas concentrations in oil

표 1 동일유중가스농도에서 가스수집시간 0에 대한 각 가스수집시간의 최대출력비

Table 1 The ratios of peak outputs to collection time 0 at the same gas concentrations

유중 수소가스 농도[ppm]	가스 수집 시간(분)						
	0	20	40	60	90	120	180
15	1	1.53	2.03	2.24	2.82	3.61	4.97
45	1	1.25	1.57	1.83	2.44	2.80	3.30
540	1	1.31	1.70	1.84	2.22	2.49	2.74

4. 결 론

가스수집시간을 이용한 유중 수소가스 측정 감도 향상에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가스수집시간 및 유중수소가스농도에 따른 측정시간에 대한 출력전압의 분포는 최대치를 나타내는 특성을 보여주었으며, 최대치를 사용하는 것이 가스수집시간 사용에 의한 유중가스 농도 결정의 감도향상 측면에서 효율적인 것으로 나타났다.

2. 가스수집시간이 길수록 유중가스농도가 높을 수록 가스센서의 최대 출력치는 증가하였으며, 실험결과로부터 가스수집시간과 유중가스농도에 대한 최대출력치와의 관계식을 도출하였고 실험 값 기준으로 실험과 계산에 의한 최대출력치의 편차는 평균 -5[%]이었고 이 때 표준편차는 8[%]정도로 계산되었다.

3. 유중수소가스 농도 증가에 따라서 비례하는 최대 출력 범위가 4[V]정도라고 하였을 때 유중수소가스농도 1,800[ppm]에 대한 가스수집시간은 572분으로 계산되었으며, 가스수집시간은 가스센서 출력특성과 유중가스농도 측정범위 그리고 측정주기가 고려되어 결정되어야 한다.

4. 유중가스농도가 15[ppm]일 때의 가스수집시간 0분에 대한 180분의 최대출력값의 비는 4.97이고 540[ppm]일 때는 2.74로서 유중가스농도가 높을수록 가스수집시간에 따른 센서 출력의 증가율이 낮아지는 것으로 나타났으며, 이와 같은 특성으로부터 가스수집시간에 따른 감도향상은 출력값이 큰 농도영역보다는 낮은 농도영역에서 더 효과적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] E. Dornenburg et al., "Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis", Brown-Boveri Rev. 61, pp. 238-247, May 1974.
 [2] R. R. Rogers, "UK Experience in the Interpretation of Incipient Faults in Power Transformers By Dissolved Gas-in-Oil Chromatographic Analysis", Doble Client Conference 1975 Paper 42 AIC 75
 [3] Y. Inoue et al., "Development of oil dissolved hydrogen gas detector for diagnosis of transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 232-236 January 1990.

- [4] IEEE Std C57.104-1991, IEEE Guide for the interpretation of Gases Generation in Oil-Immersed Transformers
- [5] Joseph J. Kelly, "Transformer fault diagnosis by dissolved gas analysis", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol 16, No. 6, pp. 777-782 11-12 1980.
- [6] R. Qin, "An Oil/Gas Separation Membrane and Its Use in Gas Sensor for On Line Incipient Fault Monitoring of Transformer, Proceedings of the 12th ACED, November 2004.
- [7] A. Varl, "On-Line Diagnostics of Oil Filled Transformers", Proceedings of ICDL-2002, July 7-12, 2002.
- [8] C. Weigen et.al., "Study on Intelligent Sensor Used in Transformer On Line Monitoring", Proceedings of 12th AECD, November 2004.
- [9] S. Birlasekaran and G. Ledwich, "Use of FFT and ANN Techniques in Monitoring of Transformer Fault Gases, Proceedings of 1998 ISEIM, Toyohashi Japan, Sept 27-30, 1998.
- [10] Xiao Dengming et. al., "New Apparatus for Detecting Transformer Faults Online", Proceedings of The 6th ICPADM, June 21-26, 2000.
- [11] Y. Inoue et.al., "Development of Oil-Dissolved Hydrogen Gas and Detector for Diagnosis of Transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990.
- [12] 김영해, "가스센서와 그 응용", 기전연구사 pp. 35-44, 1999.
- [13] 한국전력공사 유입식 변압기 유증가스 진단기준

저 자 소 개



허종철 (許宗喆)
 1961년 1월 11일생. 1989년 경남대 공대 전기공학과 졸업, 1998 창원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 부산대 전기공학과 박사과정, 1989년 ~ 현재 한국전기연구원 고전압평가실 책임기술원
 Tel : 055-280-1518
 Fax : 055-280-1512
 E-mail : jcheo@keri.re.kr



선종호 (宣宗鎬)
 1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989년 ~ 현재 한국전기연구원 전력기기연구센터 책임연구원
 Tel : 055-280-1578
 Fax : 055-280-1547
 E-mail : jhsun@keri.re.kr



강동식 (姜東植)
 1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 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



정주영 (鄭周榮)
 1962년 11월 26일생. 1986년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 부산대 전기공학과 박사과정, 현재 한국전기연구원 고전압평가실 실장
 Tel : 055-280-1526
 Fax : 055-280-1512
 E-mail : jyjeong@keri.re.kr



박정후 (朴正后)
 1945년 4월 8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업 (공학박). 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.
 Tel : 051-510-2369
 Fax : 051-513-0212
 E-mail : parkch@pusan.ac.kr