

가스분석기법을 이용한 전력용 변압기 내부 이상진단을 위한 진단 알고리즘 및 전문가시스템 개발

(Development of Diagnostic Algorithm and Expert System to diagnose Power Transformers by the methods of Gas Analysis)

최인혁* · 정길조** · 권동진* · 신명철***

(In-Hyuk Choi · Gil-Jo Jung · Dong-Jin Kveon · Myong-Chul Shin)

요 약

본 논문에서는 전력용 변압기 내부의 이상원인을 규명하는 방법중 가장 신뢰성이 우수한 가스분석기법에 대한 새로운 알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘은 한전 유증가스 분석법을 포함한 국제적으로 공인된 IEC법, Dornenburg법, 가스 Pattern법 등을 통합하여 적용함으로써 진단의 효율성을 높였으며, 미국 Neuron DATA사에서 개발한 Element Expert Tool로 작성되었다. 또한, 실제 이상이 발생된 전력용 변압기의 유증가스치를 제안된 알고리즘에 적용하여 신뢰성을 입증하였다.

Abstract

This paper describes the new algorithm method for detecting abnormal causes within power transformers. Generally, the gas analysis has been proved the most confident method of many transformer diagnostics. The proposed algorithm is adapted to the international codes of IEC, Dornenburg, Gas Pattern including the KEPCO's gas analysis method for the improvement of diagnostic efficiency. Specially, this algorithm is programmed by the tool of Element Expert developed Neuron DATA Inc. in USA. Also, it was confirmed that the developed algorithm is proved the confidence by the use of real data in faulty power transformers.

1. 서 론

산업의 발달에 따라 전력수요는 증가하는 추세에 있으며, 수요자의 안정된 전력공급 욕구도 커져가고

있다. 이를 충족시키기 위해 변전기기중 전력용 변압기는 전력계통상에서 가장 중요한 기기중 하나이다. 전력용 변압기의 고장은 정전 및 값비싼 보수 비용을 수반하게 되므로 막대한 경제적 손실을 불러오게 한다. 그러므로, 이러한 손실을 최소화하기 위해 가능한한 빠른 초기고장의 검출이 필요하다. 현재까지 국내외적으로 개발된 변압기 예방진단 방법으로는 유증가스진단, 부분방전진단, 온도진단, OLTC 진단, 탭 및 펌프의 동작진단 등이 있다 [1]-[2]. 이중 가스분석을 통한 이상원인 검출 기술

* 정회원 : 전력연구원 선임연구원
E-mail : idhyuk@kepri.re.kr
** 정회원 : 전력연구원 책임연구원
*** 정회원 : 성균관대학교 공과대학 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수
접수일자 : 2001년 8월 17일
최종완료 : 2001년 9월 17일

은 변압기 진단 기술중 가장 오래되고 신뢰성이 입증된 기술이다. 정확한 내부 이상원인을 규명하기 위해서는 검출되는 가스의 수가 많을수록 정확하지만, 이에 따른 장치의 경제적 부담도 크다 하겠다.

본 연구에서는 전력용 변압기의 고장원인 분석을 위해 한전에서 운용하고 있는 변압기를 대상으로 고장원인 분석을 실시한 결과, 1991~2000년 까지 157건의 사고중 절연사고가 차지하는 비중이 전체 사고의 36[%]를 차지함을 알 수 있었다. 변압기의 절연사고 유형은 부분방전, 과열 및 아크등으로 구분될 수 있다. 이러한 사고가 발생하게 되면, 절연유나 절연지 등의 절연물은 열에 의해 열화분해가 이루어지며, 이때 발생하는 가스의 종류와 검출가스의 양으로 변압기내의 이상현상을 추정할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 변압기에서 발생하는 7가지의 유증가스를 분석한후, 이상이 발생하는 경우 변압기 내부의 상태를 진단하기 위해 국내 최초로 복합 유증가스 진단 알고리즘 및 전문가시스템을 구축하였다. 또한, 이상이 발견된 실 변압기에서 취득된 데이터를 이용하여 본 알고리즘의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서 적용된 판정기준은 한전 적용치를 1차로 적용한 후, 이상이 발생하는 경우 세부 이상원인을 파악하기 위하여 국제적으로 공인된 IEC Code, Dornenburg & Roger법, 가스 Pattern법 등을 순차적으로 적용하였다. 전문가시스템은 Neuron DATA사에서 개발한 Element Expert를 이용하였다[3].

2. 전력용 변압기 고장원인 분석

전력용 변압기의 고장원인을 세부적으로 분석하기 위하여, 1991년부터 2000년까지 10여년간 고장이 발생한 국내의 전력용 변압기를 대상으로 조사를 실시한 결과, 그림 1에서와 같이 절연이상, OLTC 이상, 접촉불량, 오동작, 온도상승, 누유, 기타등으로 분류된다. 여기서 절연이상은 고·저압권선, 안정권선의 층간단락, 권선과 탭크 혹은 철심과 같은 접지측과의 단락과 같은 절연이상에 의한 단락고장이며, OLTC 이상은 OLTC 부에서 발생한 접점이상에 의한 아크방전, 접점의 소손 및 OLTC의 부동작을 뜻한다. 접촉불량은 고압 및 저압권선의 인출선과 붓싱과의 접

촉불량을 의미한다. 오동작은 보호계전기의 오동작에 의한 변압기의 고장이며, 온도상승은 축온저항기의 이상을 의미하며, 누유는 변압기 방압면에서 누유가 있는 경우를 의미한다. 그림 1과 같이 주변압기의 전체 고장중 절연이상이 차지하는 비율이 36.7[%]로 가장 높으며, 절연이상 사고를 변압기 부위별로 나타내면 그림 2와 같다.

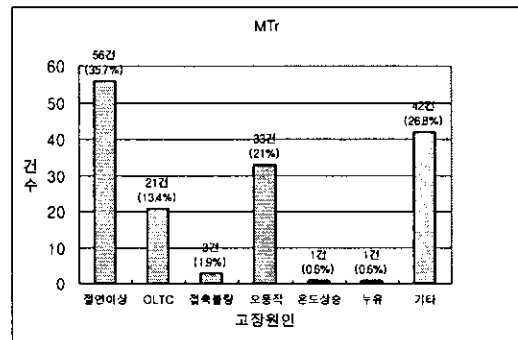


그림 1. MTr 고장분석 결과
Fig. 1. Result of MTr fault analysis

분석된 변압기는 345[KV]가 26대(17[%])이고, 154[KV]는 131대(83[%])이다.

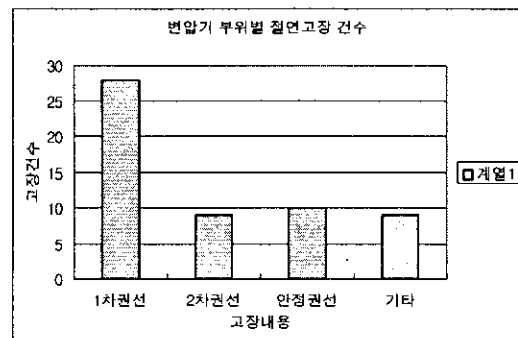


그림 2. MTr 부위별 절연고장 건수
Fig. 2. Insulation fault numbers of main parts for MTr

이와 같이 변압기에서 절연고장은 고장건수도 많을 뿐만 아니라 다른 고장에 비하여 복구하는데 장시간을 요하고 많은 경비가 소요되기 때문에 절연사고의 초기 진단은 계통안정도 및 경제적 측면에서 중요하다. 본 연구에서 제시한 전문가시스템 유증가스 진단법은 이러한 절연고장시 발생하는

가스분석기법을 이용한 전력용 변압기 내부 이상진단을 위한 진단 알고리즘 및 전문가시스템 개발

유중가스를 분석하므로써, 절연사고를 예측하는데 목적이 있다.

3. 유중가스 진단 알고리즘

본 연구에서 제시한 진단 알고리즘은 전력용 변압

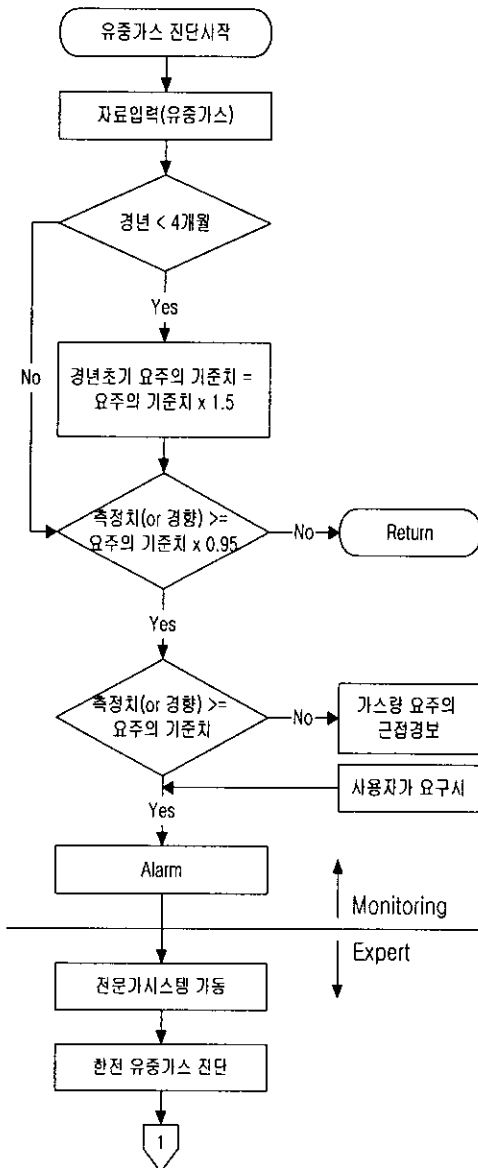


그림 3. 유중가스 이상진단 흐름도 (I)
Fig. 3. Flow chart of abnormal condition with oil immersed gas (I)

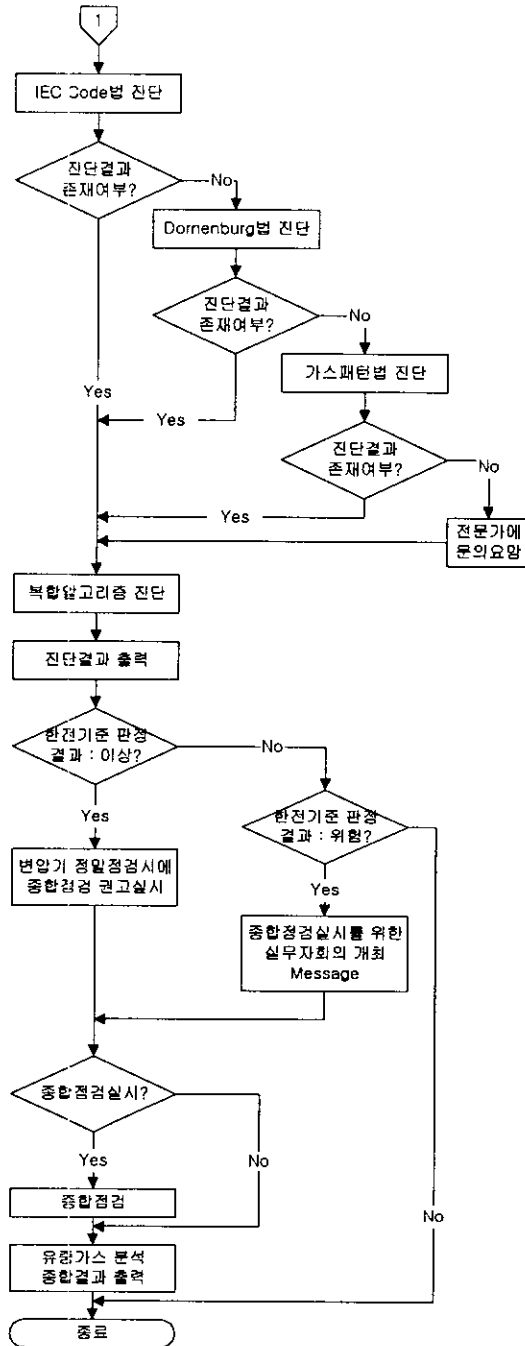


그림 4. 유중가스 이상진단 흐름도 (II)
Fig. 4. Flow chart of abnormal condition with oil immersed gas (II)

기에 적용되므로, 먼저 한국전력에서 사용하고 있는 유중가스 분석 진단기준에 의하여 분석가스의 이상

유무를 확인하도록 하였다. 한전 기준에 의해 이상이 판정되며, 측정 가스의 농도 및 구성비에 따라 변압기 내부의 이상원인을 검출하기 위하여 순차적으로 IEC Code법, Dornenburg법, 가스 Pattern법등을 적용하였다[4]-[7]. 따라서, 제시된 알고리즘은 전력용 변압기 유증가스 분석을 위해 현재 사용되고 있는 독립된 분석법을 통합함으로써, 변압기 내부의 이상원인 규명이 용이하도록 개발되었다.

본 연구에서 제시하는 유증가스에 대한 이상진단 흐름도는 그림 3 및 그림 4와 같다. 흐름도에서와 같이, 진단 결과가 한전 기준치의 이상레벨 이상일 때에는 변압기 정밀점검시에 종합시험을 실시하도록 하였다. 종합점검 항목으로는 유증가스에 영향을 미칠 수 있는 권선저항, 권선비, 여자전류, 절연유 분석시험으로 하였으며, 종합점검결과가 변압기의 정지상태에서 측정되어, 시험결과를 수동으로 입력되면 종합점검 항목의 진단 알고리즘을 적용하여 이상원인을 분석하도록 설계하였다.

적용 방법은 현재 한전에서 적용하고 있는 유증가스 이상진단 기준을 적용하되, 운전개시가 4개월 미만인 신설변압기인 경우에는 요주의 관리기준치의 50[%]를 넘는 경우 요주의로 판정한다. 한전 기준치는 측정가스에 의하여 정상, 요주의, 이상 및 위험의 4가지 등급으로만 판정할 수 있도록 되어있다. 세부적인 이상원인에 대한 규정은 정의되어 있지 않으므로, 이를 분석하기 위해서는 다른 기준을 적용할 필요가 있다.

4. 전문가시스템의 구성

전문가시스템을 이용한 기기의 상태 진단을 위해서는, 측정기기인 전력용 변압기에 측정하고자 하는 다중가스센서를 취부하고, 모니터링 제어 시스템(Monitoring Control System)에 의하여 데이터를 주기적으로 측정할 수 있는 시스템을 구축한다. 모니터링을 위한 주요 설비로는 데이터 취득장치(Data Acquisition System), 통신 제어장치(Communication Control Unit), Sever 및 각종 출력용 프린터등이 필요하다.

온라인 상태에서 절연유의 가스 농도에 따라 이상원인을 규명하기 위해서는 IEC Code법에서 필요로 하는 최소 5가지 가스(H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6)에 대한 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 IEC Code법

의 적용뿐만 아니라, Dornenburg & Roger법 및 가스 Pattern법을 적용시켜 추론 결과의 신뢰성을 증대하기 위해 7가지 가스(H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6)를 적용하였다.

측정된 데이터는 지금까지 보고된 연구결과 및 관련 전문가의 조언을 참고하여, 컴퓨터에 적용할 수 있는 체계적인 룰(Rule)을 만든후 이를 프로그램화하였다.

본 연구에서 적용한 전문가시스템 툴(Tool)은 한국 Element Expert Ver. 4.1.1을 사용하였다. 본 툴을 이용하여 프로그램화하기 하기 위해서 작성된 프로그램의 흐름도(Flow Chart)를 고려하여, 클래스(Class), 객체(Object), 및 속성(Property)등으로 데이터베이스의 관계를 정립하였다.

여기서, 객체는 데이터 구조와 함수를 가진 하나의 소프트웨어 모듈이며, 각 객체가 데이터 구조를 가지고 있는 것은 각 객체는 어떤 상태(State)를 가지고 있다는 것을 의미한다. 클래스는 객체들중에서 서로 공통의 의미와 속성을 거쳐 동일한 종류 혹은 부류로 나눌 수 있는 집합을 말하며, 속성은 상위 클래스를 기반으로 자신에게 추가되는 사항만을 첨가함으로써 원하는 클래스를 만들기 위한 것이다. 구축된 변압기의 감시진단 시스템의 구성도는 그림 5와 같다.

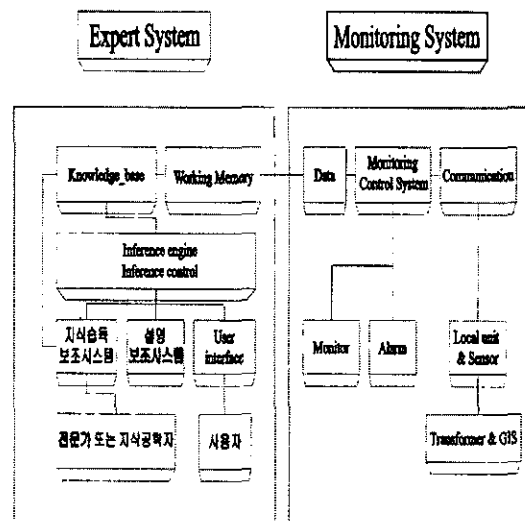


그림 5. 변전설비의 감시진단 시스템의 구성도
Fig. 5. System Diagram of Diagnostic Monitoring for Substation Equipments

또한, 프로그래밍하기 위한 전문가시스템 툴의 주요 부분으로는 Class Editor, Rule Editor 및 Object Editor 등이 있다. 이를 통해 프로그램을 작성한후, 얻어지는 결과는 2진법을 통한 각 Property의 진위로만 표시되므로, 이를 비전문가가 진단결과를 한눈에 파악하기는 쉽지 않다. 따라서, 얻어진 결과를 쉽게 이해할 수 있도록 전문가 시스템의 입출력 관계를 MMI(Man Machine Interface) Program화할 필요가 있다.

5. 전문가시스템을 이용한 유증가스 이상진단

본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하여 구축된 전문가시스템의 신뢰성을 평가하기 위하여 실제 절연유 분석치를 적용하였다. 사용된 분석치는 한전에서 운영하고 있는 발전소 및 변전소에 설치되어, 주기적으로 분석된 변압기중 이상이 발생한 변압기의 절연유를 이용하였다. 적용 전문가시스템은 Neuron DATA사에서 개발한 Element Expert로써, MS SQL Server를 사용하며 자체 데이터베이스 드라이브를 가지고 있어서 데이터베이스와는 Data Access 프로그램을 이용하여 자체적으로 정보교환이 가능하다. 또한, 별도의 Data Access 프로그램 지원없이 사용이 가능한 Spreadsheet 형태의 NXP 형식도 적용 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 NXP 형태의 입출력을 통하여 전문가시스템을 이용한 유증가스 분석치의 신뢰성을 검증하였다.

NXP 형식을 갖는 분석가스의 입력 데이터 형식은 그림 6과 같다.

gasdata	h2	co	c2h2	ch4	c2h6	c2h4	co2	tcg znc_tcg
가스량	17	109	0	137	331	61	2169	685

그림 6. NXP 형식을 이용한 입력 데이터
Fig. 6. Input data with NXP format

그림 6의 입력 데이터를 이용하여 전문가시스템을 추론한후, 이 결과를 다시 NXP 형태로 Display 되도록

록 하기 위한 Rule Editor 형태는 그림 7과 같다.

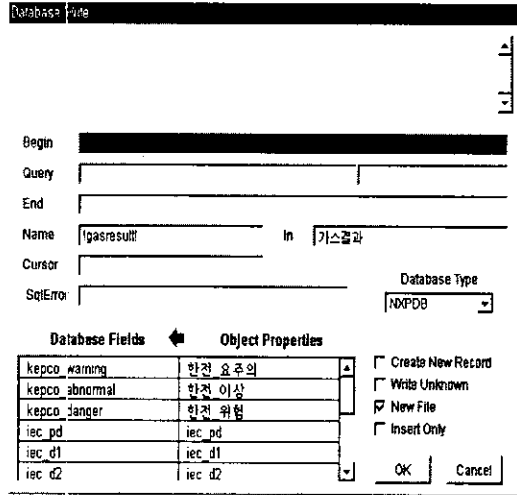


그림 7. 추론결과를 위한 데이터베이스 Type
Fig. 7. Database type for interface results

또한, NXP의 데이터를 이용하여 유증가스진단 전문가시스템을 구동시킨 결과가 그림 8과 같이 Object Network에 표시된다.

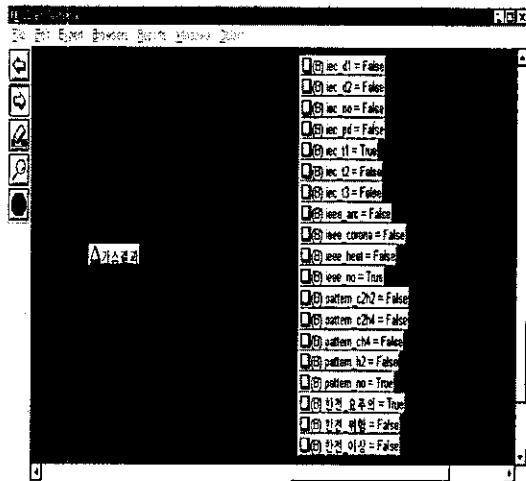


그림 8. NXP 데이터를 이용한 유증가스진단 추론 결과
Fig. 8. Inference results of gas diagnosis used NXP data

이를 통한 최종적인 출력데이터는 그림 9와 같이 NXP 형태로 표시되도록 하였다.

gasresult	kepcn_warning	kepcn_abnormal	kepcn_danger	iec_d1	iec_d2	iec_t1	iec_t2	iec_t3
가스결과	True	False	False	False	False	False	True	False

그림 9. 유증가스진단 추론 결과의 NXP 파일 형식
Fig. 9. NXP file type for inference result of gas diagnosis

따라서, 본 예시의 가스분석 결과 한전 기준치에 의하여 요주의이며, 세부적인 변압기 내부의 이상원인은 IEC 코드법 기준에 의한 저온과열로 판정된다.

앞서와 같은 방법으로 이상이 발생된 변압기 절연유를 분석한 예시는 다음과 같다.

· 예시 1

분석하고자 하는 절연유 가스의 입력 NXP 파일 형태는 그림 10과 같다. 여기서, tcg는 total combustible gas이고, inc_tcg는 tcg의 증가치를 나타내며, tcg 증가치는 한달을 기준으로 증가하는 증가치를 의미한다.

gasdata	h2	co	c2h2	ch4	c2h6	c2h4	co2	tcg	inc_tcg
가스량	550	41	540	220	167	294	2031	1040	191

그림 10. NXP 형식을 이용한 입력 데이터
Fig. 10. Input data with NXP format

유증가스 진단알고리즘을 통하여 추론된 추론 결과는 “한전_위험 = True”, “iec_d1 = True”가 됨을 알 수 있다. 즉, 1차 진단에 의하여 한전유증가스 기준치가 위험이 되며, 세부적인 이상원인 진단은 IEC 코드법에 의하여 저에너지 방전으로 판정된다. 이 경우에는 부유전극이나 실드링의 어긋남, 절연도체의 아크방전, 권선 스페이스의 트래킹 등이 고장 원인으로 추정될 수 있다.

· 예시 2

적용되는 절연유 가스의 입력 NXP 파일 형태는 그림 11과 같다.

gasdata	h2	co	c2h2	ch4	c2h6	c2h4	co2	tcg	inc_tcg
가스량	16	31	2	116	80	83	819	570	24

그림 11. NXP 형식을 이용한 입력 데이터
Fig. 11. Input data with NXP format

유증가스 진단알고리즘을 통하여 추론된 추론 결과는 “한전_이상 = True”, “iec_t3 = True”가 됨을 알 수 있다. 즉, 1차 진단에 의하여 한전유증가스 기준치가 이상이 되며, 세부적인 이상원인 진단은 IEC 코드법에 의하여 고온과열로 판정된다. 이 경우에는 탱크철심의 대순환전류, 규소강판에서의 페루프 및 권선의 국부과열을 의심할 수 있다.

6. 결 론

이상과 같이 가스분석 기법을 이용하여 전력용 변압기 내부 이상진단 적용 결과에 대한 결론은 다음과 같다.

가. 전력용 변압기의 유증가스 감시 및 진단에 관한 전문가 시스템 알고리즘을 개발하였다.

나. 현재 사용되고 있는 유증가스 분석방법은 한전 절연유분석법을 통하여 변압기의 이상 유무를 확인한후, 세부적인 변압기 내부의 이상원인은 IEC 코드법을 적용하도록 되어있다. 따라서, 본 연구에서는 변압기 내부의 이상원인 진단의 신뢰성을 높이기 위하여 IEC 코드법, Domenburg법, 가스 Pattern법을 적용한 통합 알고리즘을 개발하였다.

다. 국내 전력용 변압기의 고장원인 분석결과, 절연사고가 차지하는 비중이 35.7%로 전체 고장중 가장 높았다. 따라서, 본 연구에서 제시한 알고리즘에 의하여 유증가스를 초기 진단하므로써, 절연사고의 발생을 최소화할 수 있다.

라. 본 연구에서 제시한 알고리즘에 실제 이상이 발생한 전력용 변압기의 유증가스치를 적용한 결과, 신뢰성이 우수함을 증명하였다.

향후, 전문가시스템을 이용하여 변압기 예방진단 방법인 초음파, 누설전류, 온도, OLTC 등을 종합화하여 상호 측정치를 비교할 수 있도록 하므로써 신

가스분석기법을 이용한 전력용 변압기 내부 이상진단을 위한 진단 알고리즘 및 전문가시스템 개발

뢰성을 높이도록 하겠다.

참 고 문 헌

- (1) 한국전력, "765kV 변전기기 예방진단 시스템개발 1차년도 보고서", 1999. 11.
- (2) 한국전력, "765kV 변전기기 예방진단 시스템개발 2차년도 보고서", 2000. 11.
- (3) 한국엑스퍼트(주), "Expert Elements 정기교육자료", 1996.
- (4) IEC 354, "Loading Guide for Oil-immersed Power Transformers", 1991-09.
- (5) ANSI/IEEE C57.92-1981, "Guide for Loading Mineral-oil-immersed Power Transformers".
- (6) IEEE : IEEE Guide for the Interpretation of Gases generated in Oil-immersed Transformers IEEE Std C57.104, 1991.
- (7) 電氣協同研究會, "油入變壓器の 保守管理", 電氣協 同研究, 第54卷, 第5号, 1999.
- (8) E. H. Shrliffe, "Computer Based Medical Consultation : MYCIN", Artificial Intelligence Series 2, Elsevier, 1976.
- (9) T. Sakaguchi, K. Matsumoto, "Development of a Knowledge based system for power system restoration", IEEE Trans Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No. 2 pp. 320-329.
- (10) 김화수 외 2인, "전문가시스템", 집문당, 1998. 8.

◇ 저자소개 ◇

최 인 혁 (崔仁赫)

1963년 4월 13일생. 1986년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

정 길 조 (鄭吉朝)

1949년 8월 16일생. 1983년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전력연구원 송변전기술그룹장.

권 동 진 (權東震)

1963년 1월 20일생. 1986년 서울 산업대 전기공학과 졸업. 1992년 2월 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

신 명 철 (申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 연세대 대학원 전기공학과(박사). 1982~1983년 미국 코넬대 전기공학과 교환교수, 2000~2001년 미국 펜실바니아 주립대 전기공학과 교환교수. 1978~현재 성균관대 공대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수.