유입식 변압기의 상태진단을 통한 노후도 평가 방법

A Study on Deterioration Evaluation Method by Condition Monitoring and Diagnosis for Aging Oil-immersed Power Transformers

장 정 호* · 이 성 훈** · 이 흥 호†

(Jeong-Ho Chang · Sung-Hun Lee · Heung-Ho Lee)

Abstract - Nowadays new water supply projects have been on the decline as the water-power constructions have saturated, which means that the existing power equipment have slowly aged and they require more efforts to maintain the system performance. An effective asset management method of power equipment has become a great necessity from both economical and technical aspects. To be balanced, the asset management should look into all three parts: management, engineering, and information. The purpose of this paper is to study a Risk-Based Maintenance (RBM) matrix method through the deterioration evaluation algorithm for an efficient reliability assessment of oil-immersed power transformers by considering both asset management and technical evaluation. Make use of this result, the equipment will be decided to be replace or repair otherwise on service.

Key Words : Transformer, Deterioration, RBM, Technical evaluation, Reliability assessment

1. 서 론

전력용 유입식변압기는 절연유와 절연지와 같은 절연재료와 도전성재료, 철심재료 등으로 구성되어 있으며 장기간 사용과 운전 중 발생하는 열화현상에 의하여 전기적, 기계적 성능이 저하되고 이러한 이상 현상을 조기에 검출하여 적절한 예방조치를 취하지 않으면 대형 사고를 유발하므로 설비상태를 정확히 진단·분석하고 적절한 대책을 수립하여야 한다[1]. 기기의 절연수명은 절연재료의 품질과 밀접한 관련이 있으며 이러한 절연특성은 장기간 사용에 따른 절연재료의 노후화 진전이나 뇌서지, 개폐서지 등의 이상전압에 의한 전기적, 기계적 스트레스에 의하여 점진적으로 저하되는 경향을 나타낸다. 유입식변압기의 절연열화 특성을 분석하기 위한 효과적인 방법으로 유중가스분석법(DGA : Dissolved Gas Analysis)이 주로 사용된다. 유중가스분석법은 기기 내부에 절연과괴 현상이나 국부과열 등의 이상 현상이 생기면 열 발생을 수반하고 발열원에 접촉한 절연유, 절연지, 프레스트보드, 백크라이트 등의 절연재료가 열의 영향을 받아 분해하여 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄ 등의 탄화수소가스를 발생하여 절연유에 용해된다. 따라서 절연유의 가스를 추출하여 분석하면 가스의 양과 조성비율에 따라 내부이상의 유무 및 정도를 추정할 수 있다.

본 연구에서는 유입변압기의 노후도 정도를 평가하기 위

하여 유중가스분석 방법과 열적 열화 수명평가 방법을 조합하여 기술성 평가지수를 구하고 사용연수와 투자 및 관리비용 등 현금흐름을 바탕으로 경제성 평가지수를 산정한 후 이를 조합하여 RBM(Risk Based Maintenance) 매트릭스 평가방법[2]으로 유지관리 방안을 제시하였다. 또한 현재 수력 발전소에서 운영중인 유입변압기 (110 MVA, 14.7/154 kV)에 적용하여 평가기법을 실증하고자 한다.

2. 본 론

유입식 변압기에 대한 최적 유지관리 의사결정을 위한 노후도 평가는 기술성평가지수와 경제성평가지수를 조합하여 평가한다. 설비의 전기적, 기계적, 열적 스트레스 정도를 평가하기 위한 기술성 평가지수는 기술적 성능지수와 기술적 수명지수로 이루어지며 기술적 성능지수는 가연성가스총량 및 성분량 분석과 가스패턴분석에 의한 방법을 이용하였다.

기술적 수명지수는 열 열화수명평가 결과와 최고점 온도(Hot Spot Temperature) 계산 결과를 종합하여 잔여수명을 지수화 하여 평가한다.

경제성평가는 운영중인 설비에 대하여 경제적 수명주기를 결정하기 위한 평가기법이다. 운영기간 동안의 현금 흐름에 대한 분석방법인 연간등가분석법(EUAC : Equivalent Uniform Annual Cost Method)을 적용하여 사용 기간 동안 투자비용과 운영비용에 대한 평가를 수행하여 경제적 수명을 산정하고 실제 사용기간과 비교하여 경제적 관점에서 최적의 수명주기를 결정하기 위한 수명초과지수를 결정한다.

노후 전력설비의 교체 시점에 대한 정확한 예측이 가능하면 적기에 유지보수 시행으로 수명연장을 통한 효율적인 설비관리가 가능하겠지만 이러한 예측은 현실적으로 어렵기 때문에 유지관리 시점 예측을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[3]. 이러한 관점에서 본 연구에서는 기술적, 경제적 평

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Chung Nam National University, Korea
E-mail : Leehh@cnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Chung Nam National University, Korea

** Dept. of Shiwa Tidal Power Plant Office, K-water

Received : December 18, 2013; Accepted : January 21, 2014

가결과가 반영된 보다 효율적인 전력설비 유지관리 방안을 제안하고자 한다.

그림 1 유입식 변압기 노후도 평가 흐름도

Fig. 1 Assessment Flow for Aging Oil-immersed Transformer

2.1 기술적 성능평가

기술적 성능평가는 절연유에 대한 진단시험 즉, 유중가스 분석 결과와 가스패턴분석(Gas Pattern Analysis) 결과를

그림 2 기술적 성능평가 흐름도

Fig. 2 Technical performance assessment flow

조합하여 기술적 성능평가지수를 나타낼 수 있다.

2.1.1 유중가스분석

유입변압기에서 내부고장이 발생하면 열 발생이 수반되며 열원에 접촉된 절연유는 열 분해되어 수소(H_2), 메탄(CH_4), 아세틸렌(C_2H_2), 에틸렌(C_2H_4), 에탄(C_2H_6) 등의 가스가 발생된다. 그리고 셀룰로오스계 절연지에서는 메탄(CH_4), 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2) 등이 발생된다. 따라서 변압기 내부 고장형태에 따라 특정한 가스를 발생하는 패턴을 보이며 이러한 주요 가스의 크로마토그래피 분석을 통하여 고장형태를 추정 할 수 있다[4]. 본 논문에서는 IEEE Std C57.104-2008에 제시된 가연성가스총량(Total Combustible Gas) 분석 및 각 가스성분량을 기준치에 의해 Condition 1 단계에서부터 Condition 4단계까지 표 1과 같이 분류하였다. 기준 이하의 가스량은 정상적인 기기 상태를 의미하며 Condition 4단계로 갈수록 고장 발생이 증가할 수 있다는 것을 의미한다.

표 1 가연성가스총량 및 각 가스성분량 기준

Table 1 Dissolved gas concentrations(IEEE Std C57.104)

Condition	Dissolved Gas Concentration Limit(ppm)							
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2	TDCG
1	100	120	1	50	65	350	2500	720
2	101~700	121~400	2~9	51~100	66~100	351~570	2500~4000	721~1920
3	701~1800	401~1000	10~35	101~200	101~150	571~1400	4001~10000	1921~4630
4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

2.1.2 가스패턴 분석

가스패턴 분석방법은 횡축에 가연성 가스(C_2H_2 , H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6)의 성분 가스를 표시하고 종축에 각 성분 가스의 농도비(최대성분 가스량 1에 대한 각 성분 가스의 비)를 나타내서 가스패턴을 그 형상에 따라 진단하는 방법이다. 고장원인별로 가스분포패턴이 다르게 나타나므로 패턴인식으로 고장원인 추정이 가능하다[5].

가스패턴에 의한 평가기준은 고장의 종류에 따라 변압기 수명에 미치는 영향을 고려하여 설정된다. 즉, 아크 방전 및 코로나 방전에(그림 (1),(2),(3)) 의한 패턴은 변압기 수명에 가장 치명적인 단계인 a(key gas- C_2H_2, H_2)로 설정되며 과열 현상은(그림 (4),(5),(6)) 정도에 따라 b(key gas- C_2H_4, CH_4, H_2CH_4) 단계와 고장정도가 낮은(그림 (7)) c(key gas- C_2H_6) 단계로 분류되며 마지막으로 정상상태인 d단계로 설정된다[6].

(1) arcing type I (C_2H_2) (2) arcing type II (H_2) (3) PD type (H_2) (4) overhear type I (C_2H_4) (5) overhear type II (CH_4) (6) overhear type III (H_2, CH_4) (7) overhear type IV (C_2H_6)

그림 3 가스패턴분석에 의한 고장형태 분류

Fig. 3 Failure mode classification by gas pattern analysis

2.1.3 기술적 성능지수 결정

기술적 성능지수 결정을 위하여 가연성 가스 총량과 성분량에 의한 진단결과와 가스패턴에 의한 진단결과를 위험 정도에 따라 매트릭스 가로축과 세로축으로 배열하여 평가하는 방법[7]으로 기술적 성능지수를 결정하였다. 진단 지수에 따라 설비 위험도 정도를 판단할 수 있다. 성능지수가 낮은 단계는 양호한 설비 상태를 나타내며 지수가 높은 단계는 설비 위험도가 높은 상태임을 나타낸다.

표 2 기술적 성능지수

Table 2 Technical performance assessment index

구 분		DGA condition			
		1	2	3	4
Gas Pattern type	a	index3	index3	index4	index4
	b	index2	index3	index3	index4
	c	index2	index2	index3	index3
	d	index1	index1	index1	index1

여기서, Index 1 : low risk → Index 4 : high risk

Index 1 : 설비 기능 유지가 가능한 상태

Index 2 : 유증가스 분석주기 단축

Index 3 : 유지보수계획 수립 및 보수

Index 4 : 즉각적인 보수

2.2 기술적 수명평가

변압기의 수명은 정격부하에서 30년으로 되어 있으며 운전 온도에 따라 그 수명이 가감된다. 열적 스트레스를 가장 많이 받는 부분은 권선 상부로서 이 지점의 최고점 온도(Hot Spot Temperature)와 운전시간을 이용하여 변압기의 열화 정도를 판단할 수 있으며 잔여 수명 예측이 가능하다.

2.2.1 열 열화를 이용한 수명평가

일반적으로 사용기간에 따른 변압기의 수명은 열 열화와 직접 관계가 있다. 변압기의 과부하운전이나 비정현파 부하, 높은 주위 온도 등에 의한 비정상적인 운전 조건으로 최고점 온도는 증가하게 되고 이것은 결국 변압기 수명을 단축시키는 원인이 된다. 최고점 온도는 절연수명에 영향을 미치며[8,9,10] "IEC 60076-7 Table B.2 Temperatures at the end of each load step"을 이용하여 계산할 수 있다.

표 3 부하율에 따른 상부유온

Table 3 Temperatures at the end of each load step

Time(min) /load factor	Top-oil Temperature(℃)		Hot-spot temperature(℃)	
	측정값	계산값	측정값	계산값
190/1.0	61.8	58.8	83.8	82.2
365/0.6	44.4	47.8	54.9	58.6
500/1.5	89.7	80.8	127.5	119.2
710/0.3	35.3	46.8	39.5	49.8
735/2.1	67.0	65.8	138.2	140.7
750/0.0	59.5	68.2	59.5	82.4

$$\text{최고점온도} = \text{상부유온} \times (0.86 \times 0.57 \times \text{load factor}) \quad (1)$$

그림 4 부하율에 따른 최고점 온도와 상부유온 비

Fig. 4 The relation of top oil temperature vs HST relevant to load factor using least square method

최고점 온도 계산 결과가 상부유온(Top Oil Temperature)보다 작을 경우 최고점 온도는 상부유온과 동일하게 처리한다.

2.2.2 열 열화 수명평가 계산

절연물은 열 이외의 모든 영향을 제외하여도 화학적 특성상 열화가 진행되고 누적되어 최종에는 절연특성의 범위를 벗어나게 된다. 화학적 반응속도에 관한 법칙인 Arrhenius 법칙을 이용하여 필요한 특성의 범위를 벗어나는 순간까지의 시간을 수명으로 나타낼 수 있다.

$$\text{수명손실율 } V = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_{HST}+273}\right)} \quad (2)$$

열적으로 향상되지 않은 절연지를 사용하는 변압기는

$$\text{수명손실율 } V = 2^{(\theta_{HST}-98)/6} \quad (3)$$

누적 손실수명계산은

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{or} \quad L \approx \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \quad (4)$$

여기서 n : 온도 측정횟수

t_n : 온도 측정간격

N : 총 온도 측정횟수

V_n : n까지의 누적손실수명

여기서, 최고점 온도가 110 ℃나 98 ℃ 보다 낮을 때는 운전온도가 낮아도 전력설비는 사용기간과 외부환경에 의해 지속적으로 열화가 진행된다는 개념에서 수명손실율은 1, 즉 손실수명은 사용기간으로 처리한다.

2.2.3 기술적 수명지수 결정

기술적 수명지수는 열 열화를 이용한 수명평가 결과를 이용하였으며 유입변압기의 평균수명은 30년을 기준으로 평가하였다[6]. 평가기준은 잔여수명이 평균수명의 50%를 초과할 경우 열화가 진전되지 않은 상태로 판단한다.

표 4 기술적 수명지수

Table 4 Technical life time excess index

Status	(평균수명 30년기준)	평가지수
잔여수명 > 평균수명의 50%		X
잔여수명 = 평균수명의 50%미만에서 10% 사이		Y
잔여수명 < 평균수명의 10% 이하		Z

2.3 기술성 평가지수 결정

유입변압기에 대한 기술적 성능지수(2.1.3절)와 기술적 수명지수(2.2.3절)를 이용하여 위험도 기반의 평가지수를 결정할 수 있다. 표 5에서 가로축은 기술적 성능지수를 나타내고 세로축은 기술적 수명지수를 나타낸다. 두 지수의 교차지점을 숫자로 표현하여 유입변압기의 기술성 평가지수를 결정할 수 있다.

표 5 기술성 평가지수

Table 5 Technical performance assessment index

Status		기술적 성능지수			
		Index1	Index2	Index3	Index4
기술적 수명지수	Z	II	III	III	IV
	Y	I	II	III	IV
	X	I	II	II	III

Index I : low risk → Index IV : high risk

2.4 경제적 수명평가

전력설비는 시간이 경과할수록 노후화되어 초기의 성능을 유지하기 어렵기 때문에 최적 성능을 유지하기 위하여 관리비용은 점차 증가하게 된다. 따라서 어느 시점에 설비를 교체하는 것이 가장 경제적인가를 판단할 필요가 있다. 이러한 관점에서 변압기에 대하여 자본회수비용과 유지보수비용의 합계가 최소가 되는 시점 즉, 경제적 수명을 결정하기 위하여 연간등가비용계산법[11,12]을 이용하여 경제적 수명평가를 시행하였다.

2.4.1 경제적 수명 결정

연간등가분석(EUAC)은 분석 대상 기간에 발생하는 모든 현금흐름 즉, 투자비용(Capital Cost)과 운영비용(Operating Cost)에 이자율을 반영하여 경제적 사용수명을 결정하는 방법으로 연간등가비용(AEC)이 최소화되는 기간(N)을 산정하여 경제적 사용수명으로 정의한다.

$$\min AEC(i) = CR(i) + OC(i) \quad (5)$$

여기서, $CR(N)$: 투자비용(Capital Cost)

$OC(N)$: 운영비용(Operating Cost)

그림 5 경제적 수명평가를 위한 연간등가분석

Fig. 5 EUAC for economical lifetime assessment

투자비용($CR(i)$)은 일반적으로 초기구입비용(I)과 자산의 처분가치(S_N)로 구성되며 기간 'N'이 증가될수록 감소하는 체감함수가 된다.

$$CR(i) = I(A/P, i, N) - S_N(A/F, i, N) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } (A/P, i, N) = \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right]$$

$$(A/F, i, N) = F \left[\frac{i}{(1+i)^N - 1} \right]$$

I : 초기구매비용, i : 이자율

운영비용은 운영 및 유지보수비용, 인건비용, 자재비용으로 구성되며 운영비용은 매년 증가된다고 가정하여 자산보유기간 N 이 증가하면 자산의 운영비용은 시간에 따라 증가하는 N 에 관한 체증함수가 된다.

$$OC(i) = \left(\sum_{n=1}^N OC_n(P/F, i, n) \right) (A/P, i, N) \quad (7)$$

$$\text{여기서, } (P/F, i, n) = F(1+i)^{-n}$$

$$(A/P, i, N) = P \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right]$$

따라서, 연간등가비용은 Fig. 5와 같이 유일한 최소점을 갖는 'N'에 관한 convex function이 되며 그 지점을 경제적 수명이 된다[13].

2.4.2 경제적 수명지수 결정

경제적 수명지수(P_E)는 연간등가분석법에 의하여 결정된 경제적 사용수명과 실제 운영기간의 비율을 기준으로 결정한다.

$$P_E = (\text{Operating years} / \text{Economical lifetime}) \times 100[\%] \quad (8)$$

표 6 경제적 수명지수

Table 6 Economical life time index

Status	Index
Over 90% of economical life time	a
Between 80~90% of economical life time	b
Between 70~80% of economical life time	c
Under 70% of economical life time	d

2.5 위험도 기반의 종합상태평가

유입변압기에 대한 종합상태평가는 RBM(Risk Based Maintenance) 매트릭스 기법으로 평가하였다.

기술성평가지수	IV	High Risk			
	III	B	A	A	A
	II	C	B	B	<u>A</u>
	I	C	C	C	B
		D	D	D	C
		Low Risk			
		d	c	b	a
		경제성 수명지수			

그림 6 위험도기반의 평가 매트릭스

Fig. 6 Risk based assessment matrix

가로축과 세로축에 각각 경제적 수명지수(a~d)와 기술성 평가지수(I ~ VI)를 배치하여 교차지점의 등급으로 설비 유지 관리 방안을 선정하였다. 각 단계별 유지관리 방안은 다음과 같이 제시할 수 있다.

- A : 즉각적인 유지보수 계획수립 및 개체체 시행
- B : 변압기 정밀점검 및 이상개소 적절한 수선유지
- C : 변압기 점검 주기 조정 및 주의 관찰
- D : 지속적인 운전 가능

2.5 사례 연구

수력발전소에서 운용중인 송전용 유입변압기에 대하여 본 논문에서 제시하는 평가 알고리즘을 적용하여 분석한 결과는 다음과 같다.

2.5.1 기술성 평가

소양강수력발전소의 송전용 주변압기(#1)에 대한 3년간('08~'10)의 유중가스분석(DGA) 결과를 가연성가스총량(TCG) 및 가스성분량 기준으로 평가하면 ethane(C_2H_6)이 정상 기준치를 초과하여 'condition 3' 단계로 평가되었고 gas pattern에 의한 진단결과 ethane(C_2H_6) 주도형(Overheat type IV)으로 분석되어 gas pattern type 'c' 단계로 평가되었다. 따라서 표 2를 이용하여 분석하면 기술적 성능지수는 'Index 3'으로 결정된다.

표 7 진단대상 설비사항

Table 7 Transformer specifications

항 목	규 격	항 목	규 격
정격용량	110 MVA	결선방식	Y- Δ
정격전압	154/14.7 kV	권선상승온도	50 $^{\circ}C$
제 작 사	MEIDENSA	제작년도	1971년 12월
냉각방식	OFAF	설치년도	1972년 5월

표 8 변압기 가스분석 결과 ('08~'10)

Table 8 Dissolved gas analysis results

구분 (ppm)		C_2H_2	H_2	C_2H_4	CH_4	C_2H_6	CO	CO ₂	TCG
'10	R	0	0	5	30	109	128	7828	273
	S	2	0	5	27	116	134	7925	296
	T	2	0	5	26	113	129	7337	276
'10	R	0	0	2	28	134	73	6385	237
	S	0	0	4	36	144	107	6481	291
	T	0	0	2	30	136	99	6046	267
'10	R	0	0	0	15	67	33	847	115
	S	0	0	2	18	65	45	919	130
	T	0	0	0	15	51	51	443	117
'09	R	0	0	0	23	62	58	819	143
	S	0	0	1	21	56	51	1030	129
	T	0	0	0	20	59	53	806	132
'08	R	0	0	0	21	60	62	1173	143
	S	0	0	2	18	60	59	1115	139
	T	0	0	0	19	61	66	1085	146

그림 7 변압기 가스패턴분석

Fig. 7 Gas pattern analysis of main transformer(#1)

기술적 수명지수를 결정하기 위하여 진단대상 변압기에 대한 운전온도 분석결과 최고점온도(HST)가 110 $^{\circ}C$ 를 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 열 열화율은 1로 계산되며, 이에 대한 누적 손실수명은 해당 변압기의 운영기간인 38년으로 볼 수 있으며 변압기 평균수명 30년을 기준으로 평가하면 잔여수명은 '0'으로 계산된다. 따라서 기술적 수명지수는 표 4에서 'Z'로 결정된다. 위 두 결과를 표 5를 이용하여 RBM분석을 시행하면 기술성 평가지수는 'III' 단계로 평가된다.

2.5.2 경제성 평가

경제성평가는 변압기의 최초 투자비용과 연도별 점검정비비용을 대상으로 평가하였다. 점검정비비용은 최근 몇 년간의 데이터만 확보가 가능하여 이를 근거로 과거 데이터를 추정하여 입력변수로 활용하였다. 이자율은 보수적으로 5%를 적용하였으며 점검정비비용의 연간 증가율은 2.83%로 추정된다.

표 9 비용분석

Table 9 Capital analysis data

Classification			Cost(\$)
Capital cost($CR(i)$)			102,484
Operating Cost($OC(i)$)	year	2002	13,321
		2003	19,905
		2004	19,907
		2005	22,473
		2006	22,210
		2007	22,290
		2008	22,442
		2009	22,821

연간등가분석에 의한 교체주기를 산정한 결과 변압기의 경제적 수명은 29년으로 분석되었으며 이미 경제적 수명을 초과하고 있어 표 6에 의하면 Index a로 평가된다.

그림 8 연간등가분석에 의한 경제적 수명 분석

Fig. 8 EUAC result : optimal replace cycle - 29year

2.5.3 종합상태평가

변압기의 종합상태평가 결과는 기술성평가(Index III)와 경제성평가(Index a)에 따라 A등급(즉각적 교체계획 수립 및 개대체 시행)으로 평가된다.

2.5.4 변압기 Off-line 진단 결과

분석대상 유입변압기에 대한 Off-line 진단으로 권선의 절연저항, 권선비를 측정하였으며 Overhaul 공사 시 내부 육안점검을 시행하였다.

고압 및 저압측 변압기 권선에 대한 절연저항측정 결과는 표10과 같이 양호한 상태를 확인할 수 있다.

표 10 변압기 권선 절연저항측정 결과

Table 10 winding Insulation resistance test results

40℃환산(MΩ)		측정치(1분)(MΩ)		환산계수		권선 온도(℃)	습도(%)
HV	LV	HV	LV	HV	LV		
430	600	1,720	2,400	0.25	0.25	20	65.9

변압기 권선의 턴간 및 Section간의 층간단락 유무를 파악하기 위한 권선비 시험에서도 편차는 기준치 0.5% 이하를 나타내고 있어 단락이나 Tab Changer 배열상에 대한 문제를 발견할 수 없었다.

표 11 변압기 권선비 시험 결과

Table 11 Turn ratio test

계산치(HV/LV)	U-V/u-v(R)		V-W/v-w(S)		W-U/w-u(T)	
	측정치	편차(%)	측정치	편차(%)	측정치	편차(%)
(154/√3)/(14.7)(6.0484)	6.0590	0.17	6.0590	0.17	6.0590	0.17

(1) 절연저항시험

(2) 권선비 시험

(3) 아크 흔적

(4) 관통볼트 절연지 손상

그림 9 진단시험 및 상세육안 점검

Fig. 9 Off-line test and detailed visual inspection

변압기는 내부에 다양한 구조물로 구성되어 있으며 절연 저항이나 권선비 측정을 통하여 발견할 수 없는 상세한 설비 상태를 평가하기 위하여 Overhaul 점검을 시행하였다. 점검결과 winding pressure ring bolt가 이완된 상태임을 확인하였으며 이는 장시간 방치하고 운전할 경우 권선 단락사고로 진행될 우려가 있는 부분이다. 또한 철심의 받침 너트에서 아크 발생 흔적을 발견할 수 있었으며 철심 고정용 관통볼트의 절연지가 철심의 진동 등에 의한 원인으로 추정되는 스트레스에 의하여 파손되어 철심과 프레임 사이에 순환 전류로 인한 국부과열현상이 우려되고 있었다. 이와 같이 정밀분해점검 결과 여러 문제점이 도출되었으며 앞서 시행한 위험도 평가결과와 같이 즉각적인 유지보수가 필요한 상태로 조사되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 유입변압기의 노후도 평가 및 유지관리 의사결정을 위하여 기술성 평가와 경제성 평가를 시행한 후 이를 종합한 위험도 평가기반의 노후도 평가 알고리즘을 제시하였다. 기술성 평가는 수명평가 방법으로 비교적 많이 알려진 유중가스분석을 이용한 가스패턴분석 방법을 사용하였고, 잔여수명 예측을 위하여 열 열화 수명평가 방법을 이용하여 평가하였다.

경제성 평가는 설비를 운영하면서 현재의 경영수준을 유지한 상태로 교체를 계획할 경우에 많이 사용되고 있는 연간등가분석법을 이용한 대체분석 결과를 활용하였다.

사례연구에서 노후도 평가결과는 즉각적인 유지보수계획 수립 등 사고 예방조치가 필요한 것으로 나타났으나, 오프라인 진단방법인 절연저항 시험과 권선비 측정시험에서는 특별한 문제점이 없는 것으로 나타났다. 제안하는 노후도 평가결과를 바탕으로 실시한 분해점검에서는 오프라인 진단결과에서 나타나지 않았던 변압기 구성 부속의 아크발생 흔적 및 절연지 파손 등의 문제점이 발견되었다. 이러한 결과는 제안하는 노후도 평가방법에서 사용한 유중가스분석의 가스패턴분석과 열 열화 수명평가 방법이 오프라인 진단방법에 비하여 정확한 상태진단 및 평가가 가능함을 보여주었다. 따라서 유입변압기 노후도 평가를 위하여 본문에서 제시한 기술적 평가 결과와 경제적 평가 결과를 조합한 상태평가 방법이 합리적인 방법임을 확인할 수 있었다.

향후 평가방법의 신뢰성향상을 위하여 다양한 현장 데이터의 분석 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] IEEE std. C57.104, IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers, 1998.
- [2] David Hughes, Tracy Pears and Yuan Tian, "Linking Engineering Knowledge and Practical Experience to Investment Planning by Means of condition based Risk Management", 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, pp. 191-199, 1996.
- [3] Innocent E. Davison, "Utility Asset Management in the Electrical Power Distribution Sector", Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa Durban, South Africa, 1-15 July 2005
- [4] Ahmed E.B. Abu-Elanien, M.M.A. Salama "Asset management techniques for transformers", Electric power systems research 80, 2010Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface", IEEE Transl. J. Magn. Jpn., Vol. 2, pp. 740-741, 1987 [Dig. 9th Annual Conf. Magn. Jpn., p. 301, 1982].
- [5] J.H.Sun, K.H.Kim "Characteristic of Distribution of Dissolved gases in oil for Domestic Oil Immersed Transformer". 2004.
- [6] JH.Chang, HI, Kim, S.H.Lee, "Development of the standardization of management technology and reliability evaluation algorithm for electric power equipment", K-water, 2009.
- [7] IEC 60812 'Analysis techniques for system reliability procedure for failure mode and effect analysis (FMEA)' 2006-1
- [8] M. Arshad, S. Islam, A novel fuzzy logic technique for power transformer asset management, in: Proc. 41st IAS Annual Meet. Ind. Appl. Conf., October 2006.
- [9] J.P. Van Bolhuis, E. Gulski, J.J. Smit, Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation, IEEE Trans. Power Deliv. 17 (2002) 528 - 536.
- [10] S. Yakov, M. Nigris, P.G. Antonoli, Study of the life consumption of distribution transformers and assessment of end-of-life criteria, in: Proc. 12th Int. Conf. on Electr. Distrib., CIRED, Birmingham, UK, May, 1993.
- [11] E.P. Degarmo, W.G. Sullivan, J.A. Bontadelli, Engineering Economy, Macmillan publishers, 1993.
- [12] P.E.M. Kurtz, Handbook of Engineering Economics, McGraw-Hill, 1984.
- [13] SH, Lee, JH, Chang, JO, Kim, HH, Lee, 'Analysis of Economic Life Cycle for Hydro-Generator Based on Annual Equivalent Cost Method, KIEE60-11-1, 2011.11

저 자 소 개

장 정 호 (張 晶 皓)

1972년 2월 25일생. 1998년 2월 건국대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 충남대학교 전기공학과 수료(박사). 현재 K-water 재직중

E-mail : chany@kwater.or.kr

이 성 훈 (李 晟 薰)

1978년 2월 25일생. 2004년 2월 인천대학교 전기공학과 졸업. 2007년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2013년 8월 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 K-water 재직중

E-mail : shlee@kwater.or.kr

이 흥 호 (李 興 浩)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업, 1977년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

E-mail : leehh@cnu.ac.kr