

원자력발전소 터빈밸브 시험주기 연장시 신뢰도평가

임혁순⁺, 이은찬*, 이근성*, 황석원*, 성기열*

The Reliability Evaluation of TBN Valve Testing Extension in NPP

Hyuk-Soon Lim, Eun-Chan Lee, Keun-Sung Lee, Seok-Won Hwang, Ki-Yeoul Seong

Key Words: Turbine(터빈), TBN V/V Testing(터빈밸브 시험), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

Abstract

Recently, nuclear power plant companies have been extending the turbine valve test interval to reduce the potential of the reactor trip accompanied with a turbine valve test and to improve the NPP's economy through the reduction of unexpected plant trip or decreased operation. In these regards, the extension of the test interval for turbine valves was reviewed in detail. The effect on the destructive overspeed probability due to the test interval change of turbine valves is evaluated by Fault Tree Analysis(FTA) method. Even though the test interval of turbine valves is changed from 1 month to 3 months, the analysis result shows that the reliability of turbine over speed protection system meets acceptance criteria of $1.0E-4/yr$. This result will be used as the technical basis on the extension of the test interval for turbine valves. In this paper, the propriety of the turbine valve test interval extension is explained through the review on the turbine valve test interval status of turbine overspeed protection system, the analysis on the annual turbine missle frequency and the probability evaluation of the destructive overspeed due to the test interval extension.

1. 서론

원자력발전소의 터빈은 증기발생기에서 공급되는 고온 및 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환하는 장치이며, 그 에너지로 터빈을 회전시켜 전기를 만든다. 터빈에서의 에너지 변화는 증기가 가지고 있는 열에너지가 운동에너지, 즉 기계적 에너지로 변화하는데 증기가 터빈을 통과하여 지나갈 때 증기의 압력은 떨어지고 체적과 속도는 증가하게 된다. 이 고속의 증기는 많은 양의 운동에너지를 갖게 되며 터빈 회전자의 날개에 에너지를 전달하여 기계적 에너지인 회전력으로 변화된다. 따라서, 이 고속 증기를 제어하기 위해 터빈의 속도 및 부하제어는 터빈 증

기밸브의 개도를 조절하여 터빈에 유입되는 증기 유량을 제어함으로써 이루어진다. 만약 발전소 운전 중 터빈과속도 신호가 발생할 경우 신속히 터빈발전기를 정지시켜 터빈발전기 설비의 손상을 방지한다. 원자력 발전소 정상 운전 중 터빈밸브의 건전성을 확인하기 위해 터빈과속도 보호를 위하여 터빈밸브에 대한 시험을 수행하는데 중수로원전의 터빈 밸브시험을 1개월에서 3개월로 연장시 신뢰도 평가를 수행하였다. 본 논문에서는 국내·외 원자력발전소 터빈 과속도 보호계통의 터빈밸브 시험주기 현황, 터빈 비산물 방출빈도 검토, 시험주기 연장에 따른 파괴과속도 발생 확률을 평가하여 터빈밸브 주기연장에 대한 타당성을 기술하였다.

2. 국내외 터빈밸브 시험주기 연장현황

2.1 주기 연장배경 (NUREG-1366)

초기 화력발전소나 원자력발전소의 2차계통

+ 한국수력원자력 주식회사(KHNP)

E-mail : lhs6169@khnp.co.kr

TEL:(042)870-5542 FAX:(042)870-5559

* 한국수력원자력 주식회사(KHNP)

수질처리방법은 인산염을 사용함에 따라 인산염 침적물에 의한 터빈 증기밸브 고착으로 터빈 과속도를 수 회 경험하였다. '70년대 중반이후 대부분 발전소가 수질처리방법을 전회발성처리법(AVT : All Volatile Treatment)으로 변경하여 침적물 발생가능성이 현저히 감소하였다. 또한, 관련 산업의 발전으로 터빈밸브의 신뢰성이 증대되어 NUREG-1366 (TBN Overspeed Protection System Testing) 5.13항에 따라 터빈제작자가 동의한다면 터빈 과속도 보호시스템의 터빈밸브에 대한 시험주기를 1개월에서 3개월로 연장을 권고하고 있다. 현재 짧은 터빈밸브 시험주기로 인하여 다음과 같은 문제점이 발생하였다.[1] [2]

- 터빈 제어밸브의 닫힘/개방 동작시 순간적으로 원자로냉각재 계통의 압력과 온도 변화발생
- 터빈 밸브시험시 짧은 시간동안 출력 및 운전 변수가 변동함으로써 제어시스템의 난조를 유발하여 주급수 제어밸브 요동에 따라 S/G 수위가 급격히 변하여 원자로 정지가능성 내포
- 빈번한 시험으로 인한 기기 마모와 계통변동
- 시험 수행요원의 심적 부담으로 인한 인적실수 유발 가능성 상존

Table 1 Present TBN Valve Test Extension

발전소명	시험주기	주기연장	터빈 제작사
영광 1,2	3M	1M→3M	WH
영광 5,6	3M	1M→3M	두중
울진 5,6	3M	1M→3M	두중
Surry 1,2	3M	1M→3M	WH
Lasalle County2	S.V:1W C.V:3M	1M→3M	GE
Consolidated Edison	3M	1M→3M	GE
Kewanee	3M	1M→3M	WH
Diablo Canyon1,2	3M	1W→3M	WH
North Anna 1,2	3M	1W→3M	영광1,2 호기와 동일형태 터빈
Waterford 3	3M	1W→3M	
St. Luice 2	3M	1W→3M	
Calvert Cliffs 2	3M	1W→3M	
Braidwood 1,2	3M	1M→3M	

3. 터빈밸브 시험주기 연장시 신뢰도평가

3.1 터빈계통

미국의 GE사에서 제작한 터빈으로 고압터빈 1대, 저압터빈 3대로 구성되어 있으며 증기발생기

에서 생성된 증기는 증기실(Steam Chest)에 있는 4개의 고압터빈정지밸브(MSV:Main Stop Valve)와 4개의 고압조절밸브(CV:Control Valve)를 통하여 고압터빈을 통과하고 습분분리기를 거쳐 저압터빈으로 증기 유로가 형성되며 터빈계통의 단순 배치도는 다음과 같다.[3]

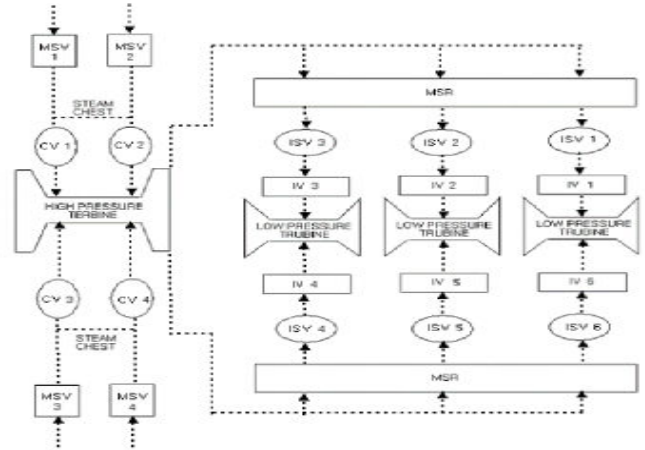


Fig. 1 General Arrangement of Turbine Valves

3.2 터빈 비산물 방출빈도

3.2.1 터빈 비산물

터빈발전기를 포함하여 터빈은 큰 회전운동 에너지를 가지는 터빈, 디스크 및 날개 등 고속 회전체로 구성되어 있다. 만일 회전체에 기계적 고장이 발생할 경우, 터빈 날개 등 비산물은 높은 운동에너지를 가지고 있으므로 주변의 고장부위 및 터빈케이싱을 손상 시킬 수 있다. 이때 주변의 고장부위 및 터빈 케이싱이 이러한 에너지를 흡수할 수 있는 충분한 능력이 없어 비산물이 외부로 방출 되면 안전성 관련 기기 또는 이를 수용하고 있는 발전소 구조물에 손상을 주게 된다.

3.2.2 터빈 비산물 방출빈도

터빈 회전기기들의 가동중 검사와 터빈 제어 시스템 및 과속도 보호시스템의 적절한 시험을 통하여 터빈 비산물 방출빈도는 허용치 이내로 유지되어야 한다. 미국원자력위원회(NRC)는 발전소 원자로가 터빈의 회전축과 동축선상에 따라 불리한 방향(Unfavorable to Safe)의 발전소일 경우 고에너지 비산물의 발전소에 대한 터빈 비산물 발생빈도 허용기준치는 1.0E-5/yr이며, 유리한 방향(Favorable to Safe)의 터빈 비산물 발생빈도 허용기준치는 1.0E-4/yr으로 규정하고 있다.

3.2.3 시험주기 연장에 따른 NRC 허용기준

터빈 비산물 발생빈도가 1.0E-4/yr(Favorable to Safe) 미만으로 유지될 수 있으면 허용 가능하다.

3.3 시험주기 연장에 따른 신뢰도 분석

3.3.1 터빈 파괴 과속도 발생확률

원자력발전소에서 터빈밸브의 정기적 시험과 저압터빈 회전체에 대한 정기적 검사는 터빈 비산물 방출 위험도를 제어하고 다루는 효과적인 방법이다. 터빈 비산물 방출은 정격속도나 저-과속도(Low Overspeed)에서 응력부식균열에 의한 취성 파괴가 발생하고, 고속도(High Overspeed)에서는 원심력에 의한 연성파괴가 발생한다. 본 분석에서는 터빈 과속도와 같은 조건에서의 터빈 비산물 방출빈도를 계산하여 신뢰도를 평가 하였다. 터빈 과속도는 계통이 분리된 후 터빈쪽으로 가는 증기 유동의 격리실패로 발생하므로 터빈밸브의 시험주기에 직접적 영향을 받는다. 이에 대하여 계통고장수목을 구성하여 터빈밸브 시험주기(1개월, 3개월)에 대하여 터빈 파괴과속도 비산물 발생확률을 분석하였다. 연간 터빈 비산물 방출빈도 계산은 다음과 같으며 터빈 파괴 과속도는 부하탈락이나 계통분리가 발생하였을 때 일어난다고 가정하였으며 계통분리 빈도는 보수적으로 0.4회/yr의 값을 적용하였다. (고에너지 비산물 발생 허용마진 확률 : 1.0E-6) [4] [5]

$$\text{터빈 비산물 방출빈도} = \text{계통분리횟수/yr} \times [\text{허용마진 확률} + \text{파괴과속도 발생확률}] > 1.0E-4/\text{yr}$$

Table 2 The Annual Frequency Results of Missile Ejection

구 분	터빈밸브 시험주기	
	1개월	3개월
파괴과속도 발생확률	5.78E-7	5.20E-6
연간 터빈 비산물 방출발생빈도	6.31E-7/yr	2.48E-06/yr

3.3.2 분석결과

터빈계통은 원자력발전소의 안전계통 또는 안전계통의 후비(Back-up) 계통으로 사용하지 않는다. 즉 터빈계통의 신뢰도는 직접적으로 발전소 안전성에 영향을 주지 않는다. 확률론적 안전성평가(PSA)에서 빈번한 터빈밸브 시험은 오히려

발전소 과도상태를 유발시키고 불시정지를 유발할 수 있어 부정적 효과를 야기시킬 수 있으며, 오히려 점검주기를 연장하는 것이 안전성 측면에서 긍정적인 효과를 주는 것으로 분석되었다. 따라서 원전의 터빈밸브 시험주기를 1개월에서 3개월로 연장시 관련 안전기준치가 충분히 만족되며, 오히려 잦은 터빈밸브 시험이 인적실수 증가 가능성을 높여 안전성을 저해시키는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

- 국내·외 터빈밸브 시험주기 연장 사례 검토결과 터빈밸브시험은 발전소 과도상태 유발 및 원자로정지의 주요한 원인으로 발전소 안전성을 저해하는 요소가 되고 있으며, NUREG-1366에서도 터빈제작자의 동의가 있을 경우 기존의 1주 또는 1개월에서 3개월로 주기 연장을 권고하고 있다.
- 터빈밸브 시험주기를 1개월에서 3개월로 연장시 터빈 비산물 방출빈도는 6.31E-7/yr에서 2.48E-6/yr 증가하였지만 미국원자력위원회(NRC) 허용기준인 1.0E-4/yr를 충분히 만족하였다.
- 따라서, 터빈밸브 시험주기를 연장하여도 급격한 밸브 고장률의 증가를 야기하지 않으며 중수로원전의 터빈밸브 시험주기를 1개월에서 3개월로 연장하여도 충분한 신뢰성이 확보되는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] NUREG-1366, 5.13, Turbine Overspeed Protection System Testing.
- [2] Westinghouse, 1997. "Probabilistic Evaluation of Reduction in Turbine Valve Test Frequency" Wolsung 2,3&4"
- [3] KHNP, "P&ID for Wolsung 2,3&4"
- [4] KHNP, 1996, "Final Safety Analysis Report of Wolsung 2,3&4"
- [5] KHNP, 2007. "Safety Assessment Report for Wolsung 2,3&4"