



강구화 / kanggu71@kepco.co.kr

대용량 발전 터빈에서 조속기 신뢰성 확보를 위한 고압 제어유 계통 관리 방안

한양대학교 파워엔지니어링 석사
(현) 한국전력 과장

1. 서론

국내 발전설비 총 용량은 2007년 기준으로 70,384 MW로서 그 중 사업용 발전설비는 65,514 MW이며 상용 자가 설비는 4,870 MW이다. 사업용 발전설비 중 전력계통 망에 연계되어 계통안정에 기여 할수 있는 설비용량은 집단에너지, 신재생에너지 및 도서내연 전력공급을 목적으로 하는 설비용량을 제외 할 경우 63,235 MW이다. 이러한 전력계통에 실제 기여할 수 있는 발전설비 중 단위기기 용량이 500 MW 이상인 대용량 발전설비는 원자력이 17,715 MW로 28%를 차지하며, 석탄화력이 16,840 MW로 26.6%를 차지한다. 따라서, 전력계통의 안정적 운영을 위해서는 이러한 대용량 발전소들이 불시 정지되지 않고 연속적으로 운전되는 것이 무엇보다 중요하다.

원자력발전소를 제외한 대용량 발전소는 터빈 및 보일러를 핵심설비로서 중점 관리하고 있으며 이들의 고장시 원인 분석 및 복구에 상당 기간이 소요되며 복구비용 또한 상당히 소요되는 경우가 많다. 특히, 터빈은 발전기와 연결되어 기계적 에너지를 전기적에너지로 전환하는 최종 기기로 다축으로 연결된 고속 회전체여서 운전 및 관리에 특별한 주의가 요구된다.

발전소 터빈은 증기 상태 또는 전력계통의 부하 변화에 따라 회전속도가 변화될 수 있으나, 전력계통이 요구하는 주파수를 만족시키기 위해 항상

일정한 범위로 회전속도를 유지하여야 한다.

조속기(Governor)는 터빈에 들어가는 증기의 공급량을 조절하여 터빈의 회전속도를 조절하고 터빈에 직결된 발전기를 통하여 회전속도의 변화 없이 전력계통이 요구하는 부하 변화를 충족시켜 주며, 비상시 터빈 증기밸브를 차단하여 발전소 전체를 보호하는 역할을 한다.

최근 자동제어기술의 발달로 국내 500 MW 이상 석탄화력발전소는 모두 전자유압식조속기(EHC)를 사용하고 있으며, 고압 제어유와 전기적 회로에 의해 모든 것이 작동되므로 회로부분을 제외한 전체 시스템을 고압 제어유 계통이라고 한다.

고압 제어유는 발전소 운전조건에 맞게 전자유압식조속기의 주어진 역할이 가능하도록 터빈 증기밸브 작동장치와 터빈 비상정지장치 등을 순환한다. 따라서, 발전소 비상시 보호 기능과 터빈 조속기의 신뢰성 확보를 위해 고압 제어유 계통의 최적 관리는 필수라 할 수 있다. 국내 500 MW급 이상 대용량 석탄화력발전소의 터빈 조속기는 동일한 형식의 고압 제어유 계통으로 구성되어 운영되고 있어, 특정 발전소에서 발생된 문제점의 근본 원인을 고찰함으로써 유사 발전소 전체에 대해 공통적으로 적용할 수 있다. 본 연구는 삼천포화력발전소 제3호기 터빈 증기밸브의 작동 문제점을 분석하고 취득된 정보를 종합하여 고압 제어유 계통 최적 관리방안을 수립하였다.



밸브가 완전히 “Close” 되도록 한다. 그림 1은 Positioning 및 Non-positioning 작동장치에 모든 부품이 조립된 형태이며, 그림 2는 각각의 작동장치에 조립된 부품의 내부 모습과 내부에서 고압 제어유가 거동할 수 있는 형태를 보여 준다.

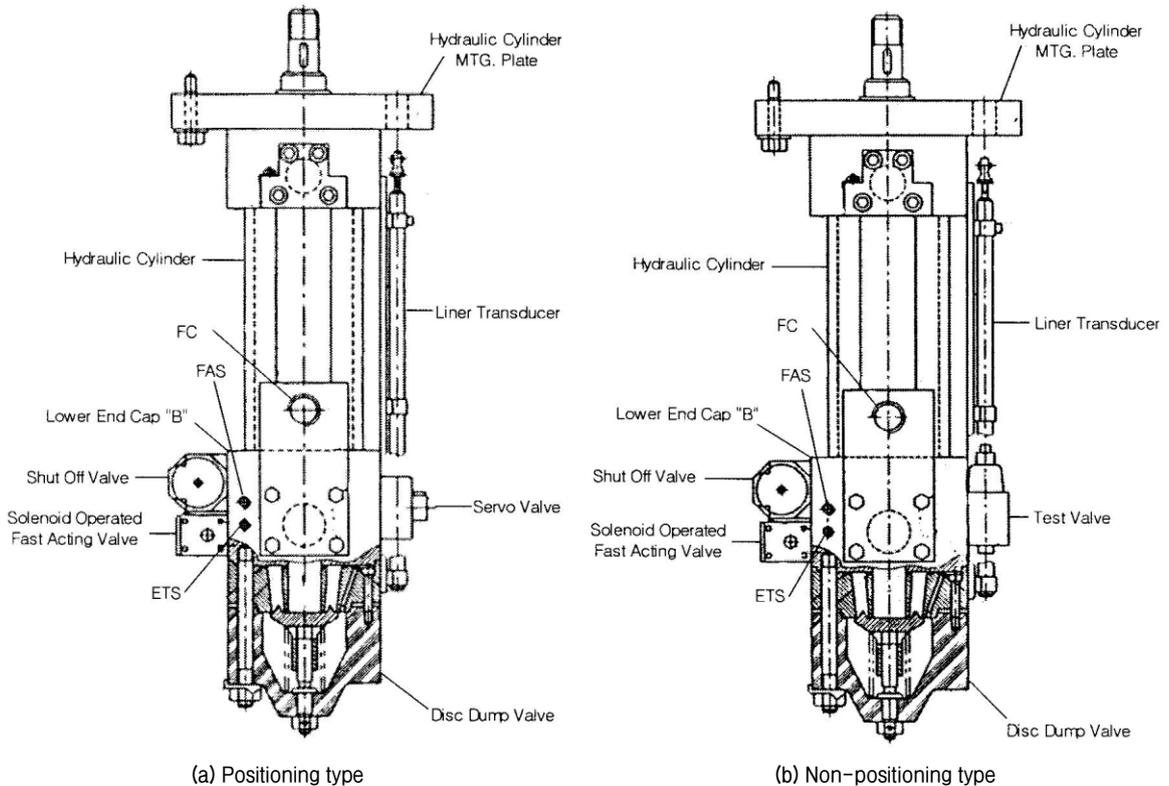
3. 고압 제어유 계통 문제점 분석 및 검증

삼천포화력발전소 제3호기의 터빈 증기밸브가 상업운전 2년 후부터 작동 문제점이 장기간 발생되었으나 정확한 원인규명이 이루어지지 않은 채 수차례 유사 문제점이 발생됨에 따라 현황 및 조치내용을 파악하여 고압 제어유 계통이 증기밸브 작동 신뢰성에 미치는 영향을 분석하였다. 문제점 발생 후 터빈 증기밸브 전반에 대한 점검 결과 유

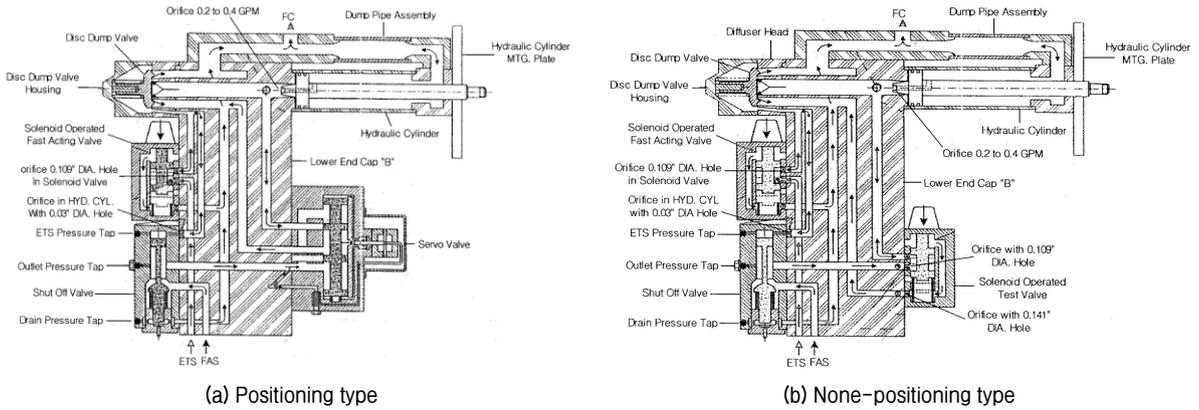
사 문제점이 발생되었으나, 본 연구에서는 주증기 조절밸브-제1번에 특히 초점을 맞추어 심층 분석하였다.

3.1 1차 문제점 발생 및 조치

삼천포화력발전소는 1993년 4월에 준공되었으며, 준공후 약 2년 경과시점인 1995년 1월에 출력 480 MW에서 주증기 조절밸브-제1번 차단시험을 실시하던 중 주증기 조절밸브 “Close” 후 “Reopen” 시간이 지연되어 발전소가 정지되었다. 준공 이후 최초로 이러한 현상이 발생됨에 따라 조속기의 복잡성 및 전기·기계·제어적 측면이 혼재되어 있어 정확한 원인 규명을 할 수 없어 관련된 발전소 정지 제어로직을 단순 개선하는 것으로 조치하였다.



[그림 2] team valve control package



[그림 3] Fluid flow in control package

3.2 2차 문제점 발생 및 조치

최초 문제점이 발생된 이후로부터 4년이 지난 1999년 5월 출력 450 MW에서 주증기 조절밸브-제1번 차단시험 중 고압 제어유 압력 저하로 발전소가 정지되었다.

Fast acting solenoid valve를 차단시험 전에 신 품으로 교체하였으나 차단시험 중 문제가 발생됨 에 따라 차단시험 후 신품으로 재교체하고, Shut off valve를 교체하였으며, Servo valve의 필터 를 교체하고, Disc dump valve의 이상 유무를 확 인하기 위해 분해 점검 하였다.

조치 후 발전소 출력 160 MW 및 500 MW에서 차단시험 결과 양호 하였다.

3.3 3차 문제점 발생 및 조치

1999년 5월에 문제점이 발생되어 조치한 후 1 개월이 지난 1999년 6월 출력 480 MW에서 주 증기 조절밸브-제1번 차단시험 중 고압 제어유 압력 저하로 발전소가 또 다시 정지되었다.

Fast acting solenoid valve, Shut off valve 및 Servo valve의 상태 확인을 위하여 전량 취외하 여 점검하였으며, Disc dump valve의 이상 유무 를 확인하기 위해 분해 점검 하고, 유압 발생장치 출구의 5 μ m 필터를 교체하였다.

조치 후 발전소 출력 420 MW에서 실제 고압 제 어유의 유량을 변화시키거나 차단하지 않고 전기 적 신호를 통한 Simulation을 통하여 시험한 결과 양호 하였다.

3.4 4차 문제점 발생 및 조치

3차례에 걸쳐 문제점이 발생함에 따라 2000년 10월 계획예방정비공사 중에 원인 조사를 위해 주증기 조절밸브-제1번 작동장치 및 관련 정밀 부품에 대하여 정밀 점검 및 정비를 실시하였다.

주증기 조절밸브-제1번 작동장치의 실린더, 피 스톤, 피스톤 로드 가이드 부싱의 마모가 발견되 어 교체하였으며, Disc dump valve의 Disc와 Seat 접촉상태가 불량하여 접촉면 연마를 시행하 여 접촉상태를 정상화 시켰다.

또한, Shut off valve 내부의 미세 이물질이 발 견되어 제거하고 Spool의 접촉면이 불량하여 연 마를 시행하였다. 만일 이 Spool의 접촉상태가 불 량 할 경우 고압 제어유의 공급 유로를 차단하더 라도 누설로 인하여 Servo valve로 고압 제어유 가 공급될 수도 있다. 그러나, Servo valve의 신 뢰성이 보장되어 내부적으로 누설 또는 오동작이 없다면 주증기 조절밸브 차단시험에 크게 영향은 미치지 않을 것이다. 차단시험 중 불확실성 요인



을 없애기 위해 최종적으로는 Shut off valve를 교체하였다. Servo valve 또한 미세 이물질에 대한 우려대문에 Servo valve spool 동작을 위한 Fluid jet supply 유로에 설치된 75 μ m 필터를 세척하였으며, Spool의 좌우 움직임이 원활하지 못하여 내부를 세척하여 해소하였다. Fast acting solenoid valve의 Spool 또한 좌우 움직임이 원활하지 못하여 내부를 세척하여 해소하였다. 조치 후 발전소 출력 0 MW에서 Simulation 차단시험으로 시험한 결과 양호 하였다.

3.5 문제점 분석, 고압 제어유 계통 세정 및 검증

4차 조치시 작동장치에서 많은 문제점이 발견됨에 따라 근본 원인을 조사하고자 2001년 12월부터 2002년 1월까지 시행된 계획예방정비공사 중에 표 1과 같이 제작사 자문을 받았으며, 이와 함께 제작사 매뉴얼 등을 토대로 자체 검토한 결과 고압 제어유 계통에 존재하는 미세 이물질에 의해 모든 문제가 발생하는 것으로 추정하여 발전소 건설시 내부 이물질 제거를 위해 시행하는 고압 제어유 계통 전체 세정을 시행하였다.

또한, 주증기 정지밸브와 조절밸브-제2번 및 4번의 작동장치를 분해정비하였으며, 증기밸브 작동장치에 설치된 Shut off valve 및 Servo valve 필터를 전량 교체하였으며, 주증기 조절밸브-제1번을 포함하여 대부분의 Fast acting solenoid valve를 교체하였다. 그리고, 고압 제어유 펌프 출구 Relief 밸브의 누설 현상이 발견되어 교체하

였다.

증기밸브 작동장치에 대한 모든 정비가 완료된 후 고압 제어유 계통 세정을 위해 세정절차서를 작성하고 125시간에 걸쳐 세정을 시행하였으며 세정 후 고압 제어유 계통 각 공급배관의 유량을 측정하여 이상 유무를 검증하였다.

4. 고압 제어유 계통 관리방안

발전소 전자유압식조속기에 발생하는 문제점의 80 ~ 90%가 고압 제어유 오염원 관리 부적절 및 정비주기 경과로 전문가들은 추정하고 있으며, 일반적으로 유압장치 고장의 85%가 작동유 문제로 인한 것으로 보고되고 있다.

증기밸브 작동장치의 각종 정밀부품은 적절한 관리가 이루어지지 않을 경우 유로 막힘 및 마모 등의 문제점이 발생된다. 초기 제작 불량 및 정비 후 조립 불량이 없다고 가정할 경우 이러한 문제점의 근본 원인은 고압 제어유 계통 내부에 존재하는 이물질에 의한 것으로 추정할 수 있다.

따라서, 전자유압식조속기의 신뢰성 확보를 위해서는 고압 제어유 계통 내부의 이물질 발생원인을 근본적으로 차단하여야 하며 주기적으로 신뢰성 검증 시험을 시행하는 한편 이상 징후 발생 시 적절한 정비 또는 조치가 이루어져야 한다.

4.1 이물질 발생

(1) 오염 발생 징후

〈표 1〉 Supervisor's recommendation for solving the trouble

Parts	Recommendation
Disc dump valve	Change with another
Fast acting solenoid valve	Alternately energizing and de-energizing
Orifice(fast acting solenoid valve, shut off valve)	Check on plugging with particle
Servo valve	Replace inlet filter
Shut off valve	Check on sticking of spool
Hydraulic power unit	Check on differential pressure of filter



1) Servo valve의 압력제어 불감대 증가

오일 속에 떠다니는 자화된 철분 입자는 주로 미세필터로 여과시키도록 되어 있으나 여과되지 않은 철 성분 입자는 정밀기기 Spool의 가장자리 및 압력이 높은 노즐 선단부를 짧은 시간에 손상시켜 압력제어의 불감대가 커진다.

2) 수분 증가

고압 제어유 계통에는 수분함량을 최소화하기 위해 구조토로 된 수분제거 필터가 설치되어 보통 1 갤런의 수분을 흡수하는데 수분제거 필터에 함유수분이 포화되면 더 이상 수분을 제거할 능력이 없어지게 되어 수분함량이 증가하게 된다. 특별한 경우 수분제거 필터의 알갱이 등이 분리되어 정밀부품들을 마모시키는 경우도 있으므로 주의하여야 한다.

3) KOH (전산가) 증가

일반적으로 염소계의 세척제(염소계 솔벤트)를 사용한 후 배출처리 및 세정과정을 거치지 않을 경우 급속한 산가가 발생되어 수분과 반응하여 염산(HCl)이 형성된다.

(2) 이물질 발생 원인

내부 이물질 발생 원인은 크게 몇가지 요인으로 볼수 있다. 펌프, 필터, 밸브, 솔레노이드 등의 침식 및 부식으로 인하여 내부 부품이 마모되는 경우와 통기구(Air breather)계통 정비나 점검 중 저장조 내로 외기의 이물질이 유입되는 경우를 들 수 있다. 산가를 함유한 고압 제어유가 변질될 경우 각종 부품의 도료 및 착색이 박리되어 이물질이 발생하기도 한다. 또한, 작동유의 변질 또는 장기사용으로 인하여 오일 자체에서 스스로 미립자를 생성하는 경우도 있다. 습분제거 필터 또는 미세필터의 손상, 불량 및 교체주기 경과로 여과능력이 저하되어 미립자를 포집하지 못하는 경우도 있다.

4.2 고압 제어유 계통 관리방안

(1) 기기 조립시 청결 유지

기계 설치 또는 공사시 배관을 청결하게 세정하고, 배관 연결시 이물질이 유입되지 않도록 하며, 분해 및 세정된 기계부품이 조립시까지 녹슬지 않고 먼지 등 이물질에 오염되지 않도록 보관한다.

(2) 청결한 고압 제어유 사용

- ① 거품이나 공기의 흡수성이 적을 것
- ② 정상 운전온도 범위 안에서 점도가 100 ~ 300 SUS 일 것
- ③ 고점도를 가질 것 즉, 정상운전중의 온도변화 범위에 걸쳐 점도 변화가 작을 것
- ④ 이물질 형성이 없을 것
- ⑤ 수지 용해성이 없을 것
- ⑥ 설계 최고운전온도에서 파괴저항이 클 것
- ⑦ 기계 부품을 부식시키지 않을 것
- ⑧ 유동점이 낮을 것
- ⑨ 패킹류(Oil seal)나 도료에 손상을 주지 않을 것
- ⑩ 조달이 용이할 것

(3) 수분 최소화 및 비염소계 세척제 사용

발전용 대용량 터빈에서 사용하는 고압 제어유는 합성 인산에스테르계 불연성 오일로 일반 석유계의 윤활제가 아니다.

합성 인산에스테르계 오일에 함유된 수분은 오일을 가수 분해시켜 산성의 인산염을 생성시키며 이 산성 인산염(Phosphates)은 각종 부품을 부식 및 침식시키고 이로 인한 이물질 발생을 유발하여 고압 제어유 계통 유로의 막힘 및 누설 현상을 발생시킨다. 만일, 오일내에 산성 인산염이 제거되지 않는다면 비록 수분 유입이 멈추더라도 자체 촉매작용에 의해 산성화는 더욱 가속되므로 고압 제어유 내에 함유되는 수분은 철저히 제거되어야 한다.

증기밸브 작동장치 정비작업 또는 기타 부품 세



척시 염소(Cl-)성분의 세척제를 사용할 경우 기기 표면에 잔류한 염소성분이 고압 제어유 내에 포함된 용해수분 또는 자유수분과 접촉 반응하여 염산으로 변하여 각종 부품의 부식을 촉진시킨다. 따라서, 합성 인산테스테르계 오일을 사용하는 고압 제어유 계통 기기 세척에는 염소성분 세척제의 사용을 절대 금하고 있으며 만일 부득이 하게 사용할 경우 반드시 물로 세척하여야 하며 수분을 제거해야 한다. 세척제로는 주로 광물성 석유 솔벤트를 권장하고 있으며 이는 저 독성이나 인 화점이 약 43.3℃ 이상인 것이 많으므로 자연 발 화 등에 주의하여야 한다.

(4) 고압 제어유 여과 및 교환

이물질 혼입이 가장 심하게 일어나는 때는 터빈 및 주변장치 점검정비 시기이므로 정비 완료 후에는 반드시 고압 제어유의 여과작업을 수행하여야 한다. 여과작업은 반드시 수분이 분리·제거되는 과정을 포함하여야 하며 주기에 관계없이 자동화시스템을 통해 항상 여과될 수 있도록 하여야 한다.

고압 제어유의 교환은 물리적 특성이나 화학적 성분 및 성질이 허용치를 초과하기 전에 해야하며, 물리적·화학적 변화는 터빈 및 주변장치의

운전조건과 주위환경에 따라 다르기 때문에 작동유를 교환해야 하는 주기를 일률적으로 적용하기는 어렵다. 따라서, 주기적으로 작동유의 물리적, 화학적 특성과 성분을 시험·분석하여 적기에 교환하여야 한다. 표 2는 오일 제작사, 터빈 제작사가 제시하는 고압 제어유 관리 기준을 명기하였으며, 삼천포화력발전소는 자체적으로 터빈 제작사가 제시하는 기준치보다 좀더 엄격하게 관리하고 있음을 보여 준다.

(5) 증기밸브 작동장치 신뢰성 시험 및 정비

터빈 조속기 및 증기밸브 작동장치는 제작사 권고에 따라 매주 1회 “Close” 시험을 실시하여 비상시를 대비한 발전소 보호장치 신뢰성 시험을 반드시 시행하여야 하며 이때 고압 제어유 계통 각종 정밀부품의 건전성 또한 확인할 수 있다. 작동장치 “Close” 시험시 실린더, Disc dump valve 및 각종 유압배관에 고압유가 와류를 형성하면서 일시에 배출되므로 각종 정밀부품 내부에 잔류하는 이물질이 저장조 내로 배출되는 효과도 상당히 기대할 수 있다.

터빈 조속기 및 증기밸브 작동장치는 제작사의 관리 추천방안을 준수할 경우 문제점이 거의 발

<표 2> Standard of managing the electro-hydraulic control oil

Managing criteria	Oil supplier	Equipment manufacturer		Samchonpo thermal power plant	
		New	Used		
Acids (mg KOH/g)	0.03	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.2	
Viscosity (SUS 100°F)	219.7	200 - 230	200 - 230	42 + 10 (cst 40°C)	
Moisture (% max)	0.03	≤ 0.1	≤ 0.2	≥ 1000 (ppm)	
Chlorine (ppm)	25	≤ 100	≤ 100	Not measurable	
Ratio of resistance (GOhm · cm)	10.4	> 5	> 5	Not measurable	
Contaminant	5 - 10 μm	5,881	128,000	24,000	16,000
	10 - 25 μm	2,354	42,000	5,360	2,850
	25 - 50 μm	123	6,500	780	506
	50 - 100 μm	10	1,000	110	45
	> 100 μm	< 1	92	11	8
Grade (NAS)		7		6	



생되지 않는다.

그러나, 발전소 터빈 조속기는 기계, 전기 및 제어적인 요소가 복합되어 있어 관리의 사각(死角) 지대가 발생할 수 있다. 조속기 시험중 문제점이 발생될 경우 고압 제어유 계통 도면 확인 및 각 배관의 유량을 측정하여 원인을 분석하고 문제가 발생된 부품을 예비품으로 조속히 교체하여야 한다. 그러나, 원인 규명이 어려울 경우 발전소 일시 정지 기간을 이용하여 Servo valve, Fast acting solenoid valve 및 Disc dump valve를 신속히 분해점검하고, 근본 원인 규명을 위해서는 전문가로 하여금 계획예방정비공사 기간동안 문제가 발생된 증기밸브 작동장치를 점검토록 하는 것이 바람직하다. 특히, Servo valve의 Fluid jet supply 유로에 설치된 75 μm 필터는 계획예방정비시 가능하면 교체토록 한다.

또한, 주기적으로 예방정비를 시행하여야 하며 그 주기는 운전조건과 주위환경에 따라 좌우되며 일반적으로 제작사 측으로부터 제시되는 경우가 많다. 그러나 전문가들은 아무리 양호한 주위환경과 발전소 이용율이 낮더라도 최소한 5년 이내에 한번은 분해점검을 시행하는 것이 바람직하다고 권고하고 있다.

5. 결론

고압 제어유 계통은 정밀부품들과 복잡한 유체 흐름의 조합에 의해 운전되며 자체 및 주변이 고온·고압의 환경에 노출되어 문제점 발생시 조치가 어려우며 원인규명도 쉽지 않다. 특정 발전소에서 다년간 발생한 문제점을 고찰함으로써 대용

량 발전 터빈의 조속기 신뢰성 확보를 위해 고압 제어유 계통 관리 방안에 관한 연구를 수행후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고압 제어유 계통의 오염 징후는 Servo valve의 압력제어 불감대 증가, 오일 내의 수분 함량 증가 및 KOH (전산가) 증가 현상으로 알 수 있다.

(2) 이물질 발생 원인은 내부 부품의 침식 및 부식으로 미립자가 발생하는 경우, 통기구 및 정비시 저장조 내로 외기의 이물질이 유입되는 경우, 오일 자체가 변질되어 스스로 미립자를 생성하는 경우, 각종 정밀 필터의 교체주기 경과로 여과능력이 저하되는 경우가 대표적이다.

(3) 고압 제어유 계통은 오일관리, 설비정비 및 운전 측면을 종합적으로 고려하여 관리되어야 한다. 사용되는 오일이 합성 인산에스테르계이므로 정밀부품의 침식 및 부식을 방지하기 위해 수분은 약 1,000 ppm 이하로 관리되어야 하고 정비작업 또는 부품 세척시 염소(Cl⁻)성분의 세척제는 사용을 금지하며, 고압 제어유 펌프 출구의 5 μm 필터 및 자체 순환 필터링장치에 설치된 습분제거 필터는 각각 매 6개월 및 3개월 마다 교체하며 규정된 필터 차압이 초과될 경우에도 교체한다. 터빈 조속기는 제작사 권고에 따라 매주 1회 증기밸브 차단시험을 실시하며 매 계획예방정비공사시 Servo valve 유입구의 75 μm 필터를 교체토록 한다. 만일 고압 제어유 계통에 문제점이 장기간 지속될 경우 관련 정밀부품 및 기기들을 분해정비하고 전체 계통을 세정하는 것이 근본적인 문제 해결방안으로 추천된다. (KIPEC)