

염소성분에 의한 터빈 EHC계통 손상에 관한 연구

김성민* · 양천규** · 윤기남** · 정재원** · 신을령**

A Study on the Trouble of Turbine EHC System by Chloride

Seung Min Kim*, Cheon Gyu Yang**, Gi Nam Yoon**,
Jae Won Jung**, Yeul Young Shin**

Key Word : Governor(조속기), EHC System(Electro-Hydraulic Governor Control System; 전자유압식조속계통), Servo Valve(서보밸브), Control Valve(제어밸브), Erosion(침식), Corrosion(부식)

ABSTRACT

In a power plant, it is generally accepted that a turbine governor system is necessary to control amount of steam supply toward the turbine system. There are many kinds of trouble at this governor system, which is recognized one of the most sensitive systems in the power plant. Especially we have experienced the internal leakage of motorization oil of servo valve. In the study, we investigated the mechanism of an internal leakage such as erosion by foreign materials and corrosion by chemical reaction between chloric treated oil and motorization oil. A precautionary measures is also performed to help the field service engineers.

1. 서 론

터빈 조속기(Governor)는 원동기의 속도 및 출력을 부하변동에 따라 자동적으로 제어해야 하는 발전소, 운송기관, 정유공장, 자동화된 생산공장등에서 사용되고 있다. 운송기관의 경우에는 철도 기관차, 항공기, 선박, 고급 승용차등에 이용되고, 정유공장에서는 펌프의 속도제어에, 자동화된 공장에서는 생산량에 따라 각 생산기계의 속도를 자동으로 제어하기 위해 이용된다. 발전소에서는 증기터빈(steam turbine), 수차, 디젤발전기, 가스터빈(gas turbine)등 원동기의 속도 및 전기출력을 자동으로 제어하는데 이용되고 있으며, 또한 보일러 터빈형 주급수펌프(MFWP : main feed water

pump)의 속도제어에도 사용되고 있다.⁽⁸⁾

산업기술의 발달로 조속계통에 부가되는 요구사항이 다양해 짐에 따라 오늘날 우리가 취급하는 조속기는 점점 복잡해졌고 또 종류도 다양하게 개발되었다. 이런 다양한 조속기를 취급 편의상 기계식, 전기식, 전기-기계 복합식으로 나눌수 있다. 이것은 그 구성 장치중 중요한 장치가 기계장치인가 아니면 전기 장치인가에 따라 분류한 것이다. 최근 자동제어 기술의 발달에 힘입어 서보밸브(servo valve)를 장착한 전자유압식 조속기(EHC : electro-hydraulic governor control system)가 널리 쓰이고 있다. 서보밸브는 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 영구자석과 아마추어로 구성된 토크모터(torque motor)로서 제어회로의 서보증폭기(servo amplifier)의 출력신호가 토크모터 코일에 전달되어 첫 단 제트 파이프 위치를 좌, 우로 이동시키고 두 번째 단 스프링의 피드백 스프링에 의해서 복구된다.

* 정희원, 한전기공(주) 기술개발원

** 비희원, 한전기공(주) 기술개발원

2. 조속기 Trouble 현상

2.1 Trouble 발생된 시스템 구성^{(1),(3)}

한국표준형 500MW급 화력발전소의 터빈시스템 및 조속기 구성 계통도이다. 표준화력발전소의 경우는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 주증기차단밸브(MSV : Main Stop Valve) 2대, 제어밸브(CV : Control Valve) 4대, 재열증기차단밸브(RSV : Reheat Stop Valve) 2대, 그리고 중간차단밸브(IV : Intercept Valve) 2대로 구성되어 있다

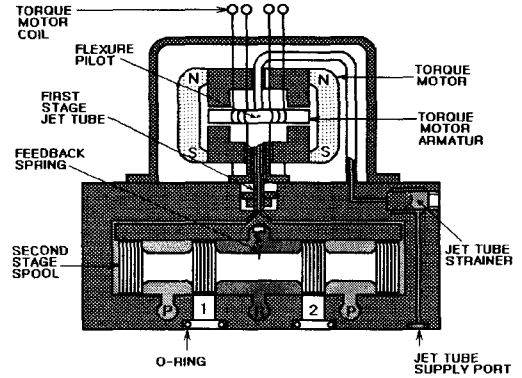


Fig. 1 Electro-Hydraulic Servo Valve

2.2 1차 Trouble 현상⁽²⁾

제어밸브(control valve)에서 공통적으로 과다내부누설이 감지되어 휴대용 초음파 유량 측정계를 사용하여 누설유량을 측정하였다. 본 연구에서는 Panametrics사의 PT868 유량측정계를 사용하였다. 유량 측정결과 내부 누설유량이 36~40 l/min으로 4대가 거의 비슷한 증상을 나타내었다. 제어밸브의 이상 누설을 재확인하기 위해서 MOOG사의 J087-119 서보밸브 테스터를 사용하여 각각의 서보밸브 건전성을 확인하였다.⁽⁹⁾ 다음의 Fig. 3은 정상적인 서보밸브의 내부누설유량 대비 모터 상전류와 내부누설과다로 인한 누설량 대비 모터 상전류의 상관관계를 보인다.

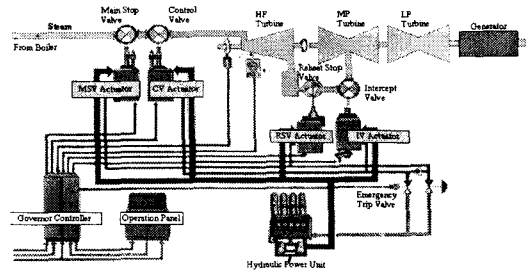


Fig. 2 Electro-Hydraulic Governor Control System

정상적인 상태의 서보밸브 내부 압력이 1600psig임에 반해 내부누설량이 증가함에 따라 밸브 내부압력은 서서히 감소한다. Fig. 3에서는 밸브 내부압력을 1536psig로 유지시킬 경우 누설유량의 증가를 나타낸다. 최초 모터 운전전류가 28A, 밸브내부 누설유량이 31.4GPM로 유지되다가 누설율이 증가하면서 모터전류는 42A, 밸브내부 누설유량은 35.1GPM이 되었다. 위의 근거를 통하여 제어밸브(control valve)의 고장은 서보밸브의 불량으로 결론짓고 밸브 4대를 전량 교체하였다. 밸브 교체후 누설량 대비 모터 상전류의 상관관계를 Fig. 4에서 보이고 있다.

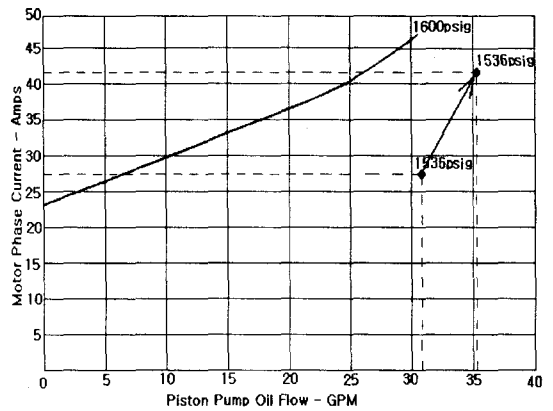


Fig. 3 Relational Diagram of Oil Current and Motor Current (Abnormal Condition)

최초 모터 운전전류가 26A, 밸브내부 누설유량이 1.32GPM로 유지되다가 모터전류는 26A, 밸브내부 누설유량은 3.6GPM이 되었다. 이 결과는 모터전류 26A 시 밸브누설유량 4.8GPM을 만족하였다. 금번 제어밸브 동작불량 사항은 서보밸브의 노후화에 의한 고장으로 결론짓고, 서보밸브 교체 조치후 작업을 종료하였다.

2.3 2차 Trouble 현상

작업종료후 약 1개월후 제어밸브 오일 과다누설징후가 포착되어 발전소 운전정지 후 재조사 작업에 착

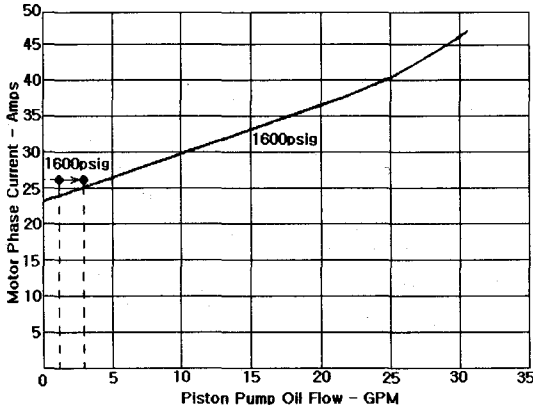


Fig. 4 Relational Diagram of Oil Current and Motor Current (Normal Condition)

수하였다.

Fig. 5는 서보밸브 분해후 각 부속품들을 검사한 결과이다. (a)는 유체와 접촉되는 서보밸브의 스템(stem) 원주방향에 걸쳐 심각한 손상(scratch)을 입은 것을 보이고 있으며, (b)는 서보밸브 밀봉을 위한 스템 디스크의 면이 손상을 입은 것을 보이고 있다. 또한 (c)에서는 밸브 시트가 심각하게 마모된 것을 나타내고 (d)는 (b)그림을 확대하여 탈락된 면의 경계를 보여주고 있다.

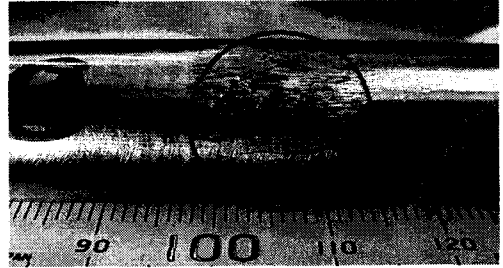
이상의 결과와 같이 서보밸브는 어떤 요인에 의해 심각한 손상을 입은 후 유체를 과다 누설하게 된 것으로 판명되었다.

2.3.1 침식(Erosion)

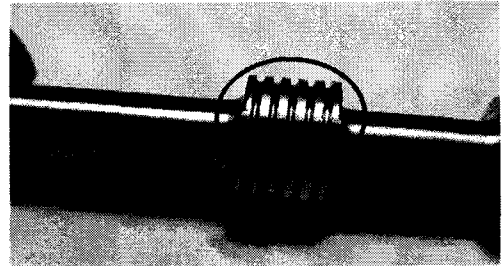
침식에 의한 고장은 스푼(spool)과 슬리브(sleeve)의 입자에 의한 직접적인 충격이나 입자의 기계 가공적 영향으로 손상된다. 이와 같은 영향으로 스푼과 슬리브 표면보다 단단한 고형입자에 의해 발생한다.⁽⁶⁾ 고형브의 접촉부위가 침식되어 압력감소와 중립점에서의 누유증가, 히스테리시스증가 등으로 이어져 정상적인 밸브의 작동이 어렵게 된다. Fig. 6에서는 침식마모 고장의 실례를 보이고 있다.

2.3.2 실팅(Silting)

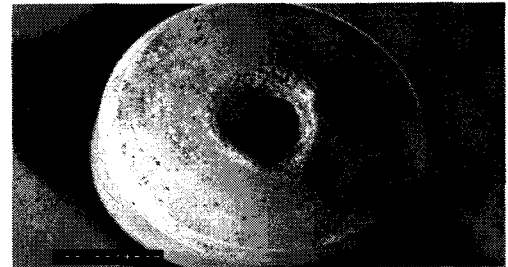
스풀과 슬리브 사이의 실팅은 밸브가 정지되었거나 압력을 받았을 때 발생한다. 동적간극보다 큰 입자는 고리형 간극공간(Annular Clearance Space)에 의해 걸



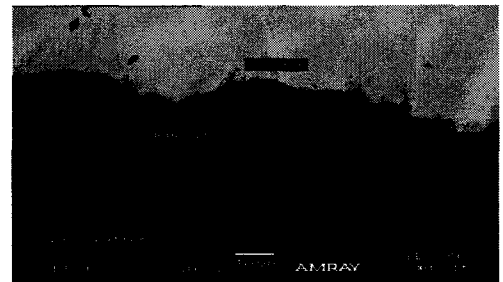
(a) Stem Load



(b) Spool Edge



(c) Orifice Nozzle



(d) Enlarged spool edge

Fig. 5 Damaged Appurtenance of Servo Valve

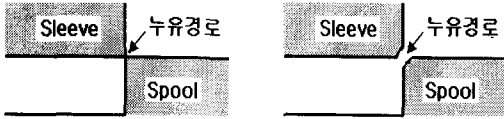


Fig. 6 Spool Damage by the Erosion

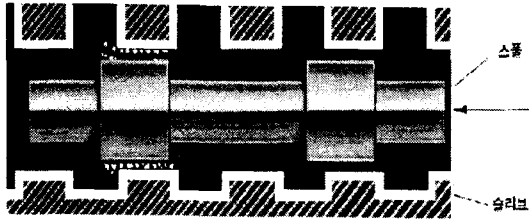


Fig. 7 Leakage of Oil by Stiction

려진다.^{(6),(7)} 오염물들이 집적되면서 마찰과 고착에 의한 고장 원인이 증가한다. 밸브의 응답이 길어지게 되면 히스테리시스가 커져서 점차 불안정하게 되고 심한 경우 밸브를 교체해야 한다.

2.3.3 고착(Stiction)

고착(stiction)은 밸브의 불균형이 심할 때 발생한다. 측면 하중은 스톱과 슬리브의 금속 접촉면 사이에 미시적인 점착(microscopic adhesion)을 일으킨다.⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾ 심한 측면하중은 주로 원통 간극에 생긴 불균일한 실링으로부터 유래한다. 가벼운 고착(mild stiction)은 밸브 초기 개시력(break-out force)을 증가시키며 심한 고착은 어떤 밸브에 있어서 잼밍(jamming)을 일으킨다. 다음의 Fig. 7에는 접촉부 이물질 고착에 의한 내부 작동유 누설을 나타낸다.

2.3.4 부식(Corrosion)

스톱과 슬리브의 접촉부위의 부식은 작동유의 수분과 염소계 세척제(chlorinated solvent)에 의해 발생한다.⁽⁵⁾ 부식에 의한 밸브의 고장은 침식에 의한 밸브의 고장형태와 유사하다.

3. 고장원인 분석

3.1 부식(Corrosion)에 의한 고장

기기 정비 작업중 또는 기타의 사항으로 기기의 부품을 세척시 사용하는 세척제에 의하여 기기의 표면에 남아 있는 잔류염소성분(free chlorine(Cl-))이 작동유에 포함된 용해수분 또는 자유수분과 접촉 반응하여 강산(HCl)으로 변하여 마모현상이 발생한다. Table. 1에서는 현재 현장에서 광범위하게 사용되고 있는 세척제의 종류 및 성분에 대해 표시해 놓았다.

Table. 1의 세척제중 염소계열 세척제를 사용할 경우 문제가 발생할 수 있다. 주로 사용되고 있는 것은 모노, 디인산에스테르 및 아인산에스테르이다. 오일에 대한 용해도를 생각하면 디에스테르가 적합하지만 모노에스테르의 혼합을 어느정도 피할수 없는 실정이다.

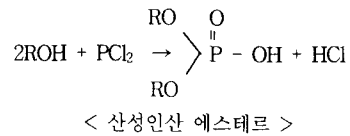
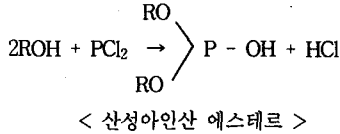
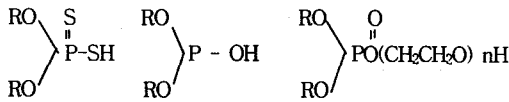


Table. 1 Several Kinds of Solvent

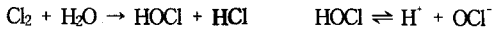
세척제의 종류	주성분	함량 (%)	비고
MC-2	Trichlorethane	65	정비시 대부분 사용됨. 불연성 염소계열.
	Paraffinic hydrocarbons	30	
	Additive(stabilizer)	5	
DC-3000	Trichloro trifluoro ethane	96	마무리 작업시 사용됨. 물연성. 염소계열.
	Carbon dioxide	4	
NABASOLVE 103F	Trichloro trifluoro ethane	95	불연성 염소계열.
	Additives	5	
MC -CLEANER	Trichlorethane	90	불연성 염소계열.
	Methylene chloride	9.5	
	Additives	0.5	
Solvent	톨루엔		Cl 성분 없음. 인화성
아세톤	톨루엔		Cl 성분 없음. 인화성



이외에 디알킬술폰산, 아이머산과 인산에스테르의 반응물등이 있다. 이러한 산성 에스테르는 부식성을 나타내는 것이 있지만 아민염으로 하면 부식성이 저하된다. 아민염에 대한 특허는 매우 많으나 최근 에틸렌옥시드나 프로필렌옥시드의 부가물이 출현되기도 하였다.



작동유중에 포함된 용해수분과 자유수분이 염소(Chlorine) 성분과 결합 되면



의 결과를 발생시켜 결국 부품의 부식을 촉진시키게 된다.

3.2 침식(Erosion)에 의한 고장

3.2.1 유입된 이물질(Foreign Material)에 의한 침식

설비의 부식방지 또는 기계가공면 보호를 위하여 종종 도장작업을 실시하는 경우가 있다. 때때로 도장 표면 박리등의 현상이 나타나게 되고 이것들이 작동유에 혼입되는 사례가 보고되기도 하였다.⁽⁴⁾

또한 설비 주기점검중 주변환경 청정도가 보장되지 못하여 이물질이 유입되는 사례가 발생하기도 한다.^{(1),(2),(8)}

어떠한 연유에서건 작동유에 포함된 이물질들은 작동유를 따라 순환을 되풀이 하면서 서보밸브의 부품들을 마모시키게 된다. 이 경우 이물질의 입자가 크면 클수록 높은 에너지 준위를 가지게 되어 부품의 기계적 손상을 촉진시키게 된다.

3.2.1 부식 미립자에 의한 침식

세척제에 의하여 기기 표면에 남아있는 자유염소성분(free chlorine)과 작동유에 포함된 용해수분과의 반응에 의해 발생된 강산(HCl)은 금속면을 화학적으로 마모시키고, 여기서 떨어져 나온 미립입자는 압력강하가 심한곳에서 집중적으로 기계적 마모를 발생시킨다.

4. Troubleshooting

서보밸브 내부누설 원인은 크게 화학적 작용인 부식(corrosion)현상과 물리적 작용인 침식(erosion)현상으로 구분할 수 있다. 본 장에서는 이러한 문제 발생 원인을 제거함으로써 서보밸브 내부누설을 저감시킬 수 있는 방안을 제시한다.

4.1 부식(Corrosion) 저감대책

4.1.1 서보밸브 전류값 조절

서보 증폭기를 통하여 전류값이 서보밸브에 가해지는데 이 전류값이 충분히 증폭되지 않게 되면 서보밸브의 스플 열림량이 작아 관로저항이 극심해 진다.⁽⁴⁾ 작동유가 염소계열 성분을 다량 내포하면 산화작용과 침식작용이 가속화되어 단시간 내에 스플의 에지가 망실되고 내부 누유량이 증가하여 부하에 작용하는 유량과 압력이 감소하게 된다. 전류의 증폭값을 적절히 하여 부식 및 침식의 가속화를 막아주는 방법이 있다. 이러한 예는 여러설비에서 많이 보고된 사례로 적절한 증폭값으로 설정한 이후 서보밸브의 수명이 대폭 연장된 경우가 대단히 많다.⁽²⁾

4.1.2 서보밸브 스플 재질선정

세척제에 의하여 기기표면에 남아 있는 염소 성분이 작동유에 포함된 용해수분 또는 자유수분과 결합시 염화수산으로 화학반응을 일으켜 니켈-크롬 합금강(스테인레스 계열)이나 황동계열의 금속에는 치명적인 화학침식을 유발시킨다. 서보밸브의 스플은 내 마모성과 내식성의 정도가 높은 고강도 특수 니켈-크롬 합금강 사용한다.

4.2 침식(Erosion) 저감대책

Fig. 5의 (c)그림과 같이 서보밸브 TMA(torque motor assemble) 노즐(nozzle) 선단부 이상마모나 스

플 에지부분의 이상마모는 일반적으로 아주 드문 현상이다.

오일속에 떠다니는 자화된 철분 입자는 주로 어스 필터(earth filter)로 여과시켜 주게 되어 있으나 서보 밸브의 전류값이 증폭되지 않게 되면서 출구측(discharge) 어스필터에 걸리지 않게 된다. 걸리지 않은 철 성분 입자는 스펀의 에지부분과 고압 노즐부분을 짧은 시간내에 망실시킨다.

이를 해결하는 방법은 효율이 높은 오프라인 필터(purifier)로 청정도를 유지하는 방법이 있을수 있다.

4.2.1 시스템 점검주기 설정

조속기 액츄에이터 관련계통의 소모성자재(seal, solenoid valve, servo valve류 등)는 공급사에 의하면 5년 이상 유지 할 수 있다고⁽⁸⁾ 하나 자재의 건전성이나 운전 조건 등 제반 사항을 감안하여 4~5년 정기적인 주기로 교체 및 점검을 시행한다.^{(1),(2)}

4.2.2 작동유 관리

오일 플러싱(oil flushing)은 정비 완료 후 2개의 그룹으로 나누어 1개 그룹당 24시간이상 실시하되 필터는 플러싱 전용 인 저압필터(low pressure filter)를 사용하여야 하며 차압이 100psi 이상발생하면 즉각 교체한다.⁽⁸⁾ 이때 플러싱용 필터는 대부분 1~3 μ m까지(β =1000이상) 여과할 수 있는 높은 포집 용량의 필터로 플러싱을 실시한다. Fig. 8에서는 베타율(β ratio)이 플러싱 시간에 미치는 영향을 나타내고 있다.

일반적으로 충분한 플러싱을 하면 시스템에 별다른 문제가 발생하지 않을 것으로 생각하기 쉬운데 서보밸브의 스펀과 슬리브의 간극(clearance)이 1~4 μ m임을 감안한다면 실제로 서보밸브에 마모 및 오동작등의 문제를 유발시키는 요인은 미세한 고형입자(1~5 μ m)이고 이것들의 수를 감소시키는 것이 매우 중요한 문제이다.

작동유를 교환하거나 보충하는 경우라도 필히 마이크로 백업필터(micron back-up filter)를 통하여 저장조에 보충하여야 한다.

금속표면으로부터 고형 이물질을 분리하고 하류층으로 고형 이물질을 이송시키는 유체의 힘은 유체와 부품사이 접촉영역에서 공유면적에 사용 가능한 에너지의 양에 비례한다. 층류는 설비표면 바로 옆에 위치하는 정체된 오일 흐름으로써 표면에 가해지는 에너지는 무시할 수 있다. 그렇기 때문에 난류형성이 모든 플러싱 절차에서 꼭 필요하다. 이상적인 난류의 기준

100개입자/ml > 5 μ m에 이룰 수 있는 청정도화율

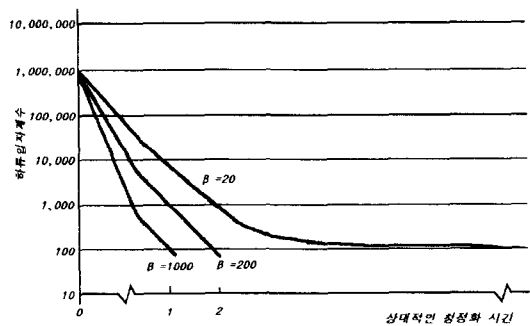


Fig. 8 Effect of β ratio in flushing time.

은 설비 사용중에 발생한 난류보다 크거나 같아야 한다. 유체의 에너지 레벨은 배관의 진동과 굴곡에 의한 기계적 에너지에 의해 지원을 받는다. 난류형성은 오일 통과 경로의 레이놀즈수(Reynold's number)를 계산하여 결정한다.

난류형성은 레이놀즈수가 4,000 이상이어야 한다.

5. 결 론

발전소 현장에서 운전되고 있는 대부분의 조속기는 장기간에 걸쳐 작동유의 청정도를 유지시킬 수 있는 능력이 없다. 현재 500MW급 한국표준형 화력발전소의 경우 각각 1대씩의 서보밸브를 장착한 4대의 제어밸브를 가지는 시스템인데, 주기적인 보수점검 후 내부 작동유가 누설되는 경우가 많았다. 이에 대한 원인분석 단계에서 현장 작업자의 실수로 결론짓는 경우가 대부분이었고 정확한 고장원인에 대한 분석이나 진단은 이루어지지 않은 실정이다.

본 연구에서는 그동안 다빈도로 발생되어 오던 조속기 서보밸브의 고장 메커니즘을 규명하고 차후 이를 예방할 수 있는 방안을 제시하였다. 차후 본 연구결과에서 제시하는 방법에 의거 주기 점검을 실시한다면 발전소 이용을 향상으로 인해서 상당한 경제적인 이익이 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) 한전기공(주), 1999, "조속기 과정(I)", 한전기공(주) 수화력기술연수원 교재.
- (2) 한전기공(주), 2000, "한국형 표준화력발전소 터빈 조속기 제어밸브 손상원인 분석", 한전기공(주) 보고서.
- (3) 한전기공(주), 1997, "증기터빈 이해를 위한 강좌".
- (4) Cotton K.C., 1998, "Evaluating and Improving Steam Turbine Performance", Second Edition pp129~145.
- (5) Drew Chemical Corporation, 1990, "Principles of Industrial Water Treatment", pp. 99~104.
- (6) Farris J.A., 1983, "The Importance of Silt Removal Filtration in Mobile Vehicle Hydraulic Systems", SAE Paper No. 690606.
- (7) Harwick W.E, Meyers C.A., 1985, "Keeping Tabs on Hydraulic Fluid Cleanliness", Machine Design pp. 103~104.
- (8) GE ,1988, "Governor Maintenance Manual".
- (9) MOOG Inc., 1998, "Servo Valve Analyser Operating Manual".