



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

HVDC 고장감소 및 정비시간 단축을
위한 전력변환 밸브 냉각시스템 개선방안

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

宋 京 修

2015年 6月

碩士學位論文

HVDC 고장감소 및 정비시간 단축을
위한 전력변환 밸브 냉각시스템 개선방안

指導教授 金 鎬 民

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

宋 京 修

2015年 6月

HVDC 고장감소 및 정비시간 단축을 위한 전력변환 밸브 냉각시스템 개선방안

指導教授 金 鎬 民

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 6 月 日




濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

宋 京 修

宋京修의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2015 年 6 月 日

委員長 金 豪 贊 
委 員 吳 性 完 
委 員 金 鎬 民 

목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
II. HVDC 설비구성 및 냉각시스템 개요	3
2.1. HVDC 설비구성	3
2.2. HVDC 냉각시스템	7
III. 냉각시스템 고장원인 및 정비작업 공정 분석	14
3.1. 냉각시스템 고장원인 분석	14
3.2. 냉각시스템 정비작업 공정 분석 및 벨로우즈 성능 점검	17
IV. 냉각시스템 개선을 위한 잠재요인 분석	21
4.1. 벨브수량과 위치에 따른 점검시간 영향 분석	22
4.2. 냉각수 압력변동과 벨로우즈 불량발생 영향 분석	24

V. 냉각시스템 개선 및 검증	25
5.1. 개선안 도출 실험	25
5.2. 개선안 적용 및 검증	26
VI. 결과 및 고찰	30
VII. 결 론	34
참 고 문 헌	35

그림 목 차

그림 1	직류송전 계통의 구성	3
그림 2	제주-해남 180 kV HVDC 단선결선도	4
그림 3	변환기 싸이리스터 밸브	5
그림 4	수냉식 방열 시스템	8
그림 5	스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결	9
그림 6	수냉식 방열 시스템 구조도	10
그림 7	싸이리스터 밸브의 수냉식 배관 연결도	12
그림 8	열 교환기의 외관도	12
그림 9	제주-해남 HVDC 냉각시스템 배관 계통도	13
그림 10	연도별 냉각시스템 고장발생 건수	14
그림 11	연도별 냉각시스템 복구 정비작업 소요시간	15
그림 12	불량원인별 정비작업건수 및 복구작업 소요시간	16
그림 13	냉각수 누수 주요원인 및 벨로우즈 파열사진	16
그림 14	냉각시스템 정비작업 공정별 평균 작업 소요시간	17
그림 15	냉각시스템 정비작업 정규성 검정 및 공정능력 추정	18
그림 16	압력변동 시 벨로우즈 수축률 정규성 검정 및 공정능력 추정	20
그림 17	냉각시스템 복구시간 과다소요 요인도출 분석	21
그림 18	밸브수량 대 점검시간 및 회수시간 상관관계 분석	22
그림 19	밸브위치 대 점검시간 및 회수시간 상관관계 분석	23
그림 20	냉각수 압력변동에 따른 벨로우즈 성능저하 상관관계 분석	24
그림 21	냉각밸브 및 진동방지축 추가 설치	26
그림 22	성능개선 적용 벨로우즈 도면 및 설치사진	27

그림 23	개선 전·후 냉각시스템 정비시간 공정능력 비교	28
그림 24	개선 전·후 벨로우즈 성능 공정능력 비교	29
그림 25	개선 전·후 냉각시스템 고장건수 비교	30

표 목 차

표 1	HVDC 시스템 파라미터 정격	6
표 2	제주-해남 HVDC 냉각시스템 데이터	19
표 3	최적조건 도출 실험계획 조건	25
표 4	최적조건 도출 실험결과	25
표 5	벨로우즈 진동에 따른 수축률 측정값	31

Improvement of Converter Valve Cooling System for Reducing Fault and Maintenance Time of HVDC

Kyoung Soo Song

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

Supervised by professor Ho Min Kim

Summary

This dissertation presents the improvement of HVDC thyristor valve cooling system to reduce HVDC fault and its maintenance time. The actual HVDC system is linked between Jeju island and mainland electricity system. In case of either HVDC system failure or delay of repair time, power outage brings out not only enormously economic loss but also the significant decrease of the power system stability. Since HVDC convertor valve cooling system is located in confined

space, the inspection of cooling system is visually impossible. Therefore, it is important to prevent the failure of valve in advance. In this study, first of all, the failure factors and recovery time in each failure point were analyzed by investigating operation-case of Jeju - Haenam HVDC which has been operating since 1998. Then, the improvement of maintenance for HVDC convertor valve cooling system was proposed by applying the six-sigma technique which currently is a highly recommended quality improvement tool in the industrial sites. Priority, bellows material which is the most frequently defected was improved in order to reduce the failure rate. And then, additional stop valves were placed in the proper position to shorten the maintenance time of failures. Moreover, a demonstration was performed to validate the effectiveness of the proposed improvements. The demonstration proved the significant improvement. It is concluded that the proposed improvements with some modifications possibly apply to cooling system for AD-DC convertor, and it can surely contribute to reliability improvement of HVDC system which is currently installed.

I. 서 론

전력반도체 기술발전으로 1954년 스웨덴 본토와 Gotland 전력계통을 연계한 100 kV 20 MW 급 HVDC (High Voltage Direct Current) 설비를 최초로 운영한 이후 수많은 AC/DC 전력변환장치들이 전 세계적으로 건설되어 운영되고 있다. HVDC 전력전송 기술은 송전손실 감소, 전력계통 분리를 통한 고장 전류 제한, 신속한 반응으로 순시 유·무효력 제어를 통한 전력계통 안정화 등의 장점으로 향후 더 많은 설비들이 전력계통에 도입되고 있는 추세이다 [1].

우리나라에서도 1998년 제주전력계통에 제주-해남간 180 kV 300 MW 급 HVDC 건설을 시초로 2011년 신제주, 한라 50 MVar 급 STATCOM (Static Compensator) 및 2014년 제주-진도간 250 kV 400 MW 급 HVDC 설비를 도입하였고 향후 제주 제3 HVDC 및 육지전력계통에 북당진-고덕간 500 kV 3 GW 급 HVDC 설비도입 등 많은 AC/DC 전력변환 설비들이 건설될 계획이다.

한국전력을 비롯한 국내 중전기 제작업체에서도 직류송전기술을 확보하기 위해 상당한 노력을 기울이고 있으며, 실제로 한국전력은 2012년 제주 HVDC 실증단지를 건설하여 80 kV 60 MW 급 HVDC 송전기술을 확보하였으며, 또한 외국제작사와의 기술제휴를 통해 향후 추진되는 북당진-고덕간 500 kV 3 GW 급 HVDC 설비를 국내 기술을 통해 건설할 예정이다 [2].

그러나 아직까지는 직류송전기술의 국내 기술은 미흡한 실정으로 전력계통에 병입되어 운전되고 있는 설비들에서 발생하는 문제점을 완전히 해결하지 못하고 있으며 이러한 문제점들은 설비운전에 제약요인으로 작용하여 설비신뢰도를 저하시키고 있다.

1998년 운전을 개시한 제주-해남 HVDC 설비 고장사례를 분석해 보면 제어기 불량에 의한 고장이 40%이상으로 가장 많았다. 이러한 고장은 설비운전 초기 제어기 및 보호협조 오류에 기인한 것으로 제어기 보완 및 보호협조 정정으로 상당부분 문제점을 해소할수 있었다. 두 번째로 많은 설비고장은 냉각시스템 불량에 의한 고장으로 전체 고장의 30%이상을 차지하고 있다 [3].

교류/직류 변환장치는 AC/DC 전력변환을 위한 핵심설비로 싸이리스터 등의 전력반도체 소자로 구성된 밸브를 사용하게 되는데 전력반도체 소자 운전 중 발생하는 열을 냉각하기 위한 냉각시스템 운전이 필수적이다. 냉각시스템 고장은 외부와 차단된 밀폐된 공간에서 발생하는 경우가 대부분이라서 고장발생 이전 이상 징후 발견이 힘든 실정이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 1998년 이후 운전 중인 제주-해남간 HVDC 설비 운영사례들을 분석하고 전력변환 밸브의 냉각시스템 불량률 최소화하고 정비시간을 단축시킬 수 있는 개선방안을 제시하고자 한다.

II. HVDC 설비구성 및 냉각시스템 개요

2.1. HVDC 설비구성

직류송전 계통은 그림 1과 같이 2개의 교류/직류 변환장치와 이를 연결하는 직류선로로 이루어 진다. 2개의 교직 변환장치 가운데 1개는 교류를 직류로 변환하는 순변환기로 운전하며, 다른 하나는 역변환기 운전을 행하여 직류를 교류로 변환한다.

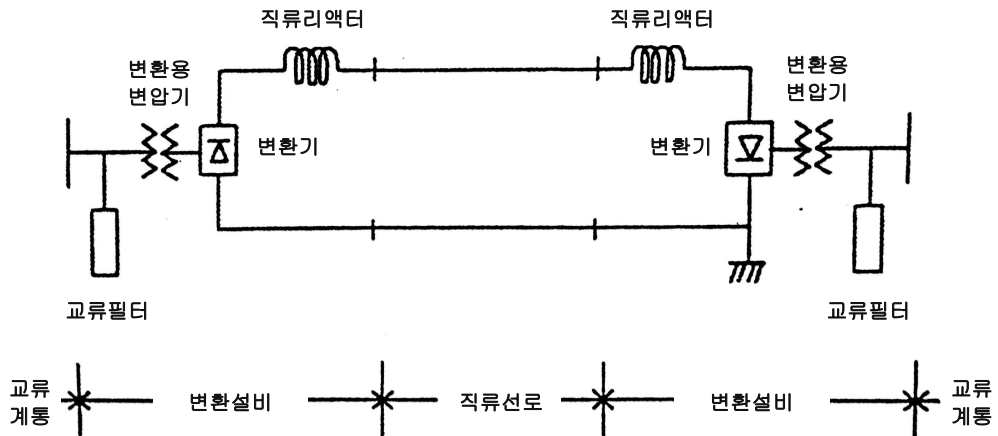


그림 1 직류송전 계통의 구성

그림1은 직류송전 계통의 설비 구성을 나타내며 주요기기는 다음과 같다.

- ① 변환기(Converter) : 직류송전의 핵심기기로서 제어에 의해 교류로부터 직류로 전력을 변환하는 순변환장치로도, 그 역으로 변환하는 역변환장치로도 동작한다.
- ② 변환용변압기(Converter Transformer) : 교직변환기를 교류계통으로부터 절연한다. 일반 변압기에 비해 권선에 고조파를 많이 포함한 전류가 흐르고, 밸브의 사고, 전류실패 시에 과도한 전류가 흐르므로 이에 대한 충분한 여유를 갖도록 설계한다.

- ③ 교류필터(AC Filter) : 교직변환기에서 발생하는 고조파를 흡수하기도 하며, 교류/직류 변환 시 필요한 무효전력을 공급한다.
- ④ 조상설비 : 교류필터와 더불어 교직변환에 필요한 무효전력을 공급한다.
- ⑤ 직류리액터(Smoothing Reactor) : 교류/직류 변환시 발생하는 직류측 맥동전압을 평활화하며, 직류 계통내의 고장전류를 억제한다 [4].

그림 2는 실제 전력계통에 연계되어 운전되고 있는 제주-해남 HVDC 시스템의 단선결선도와 주요 설비를 나타내고 있다.

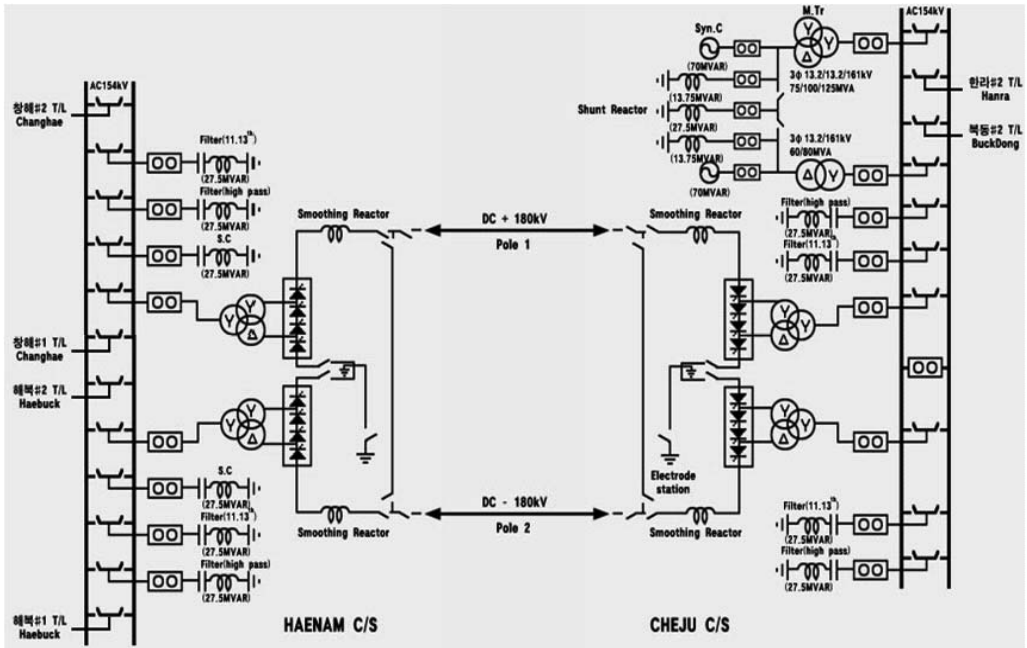


그림 2 제주-해남 180 kV HVDC 단선결선도

육지계통의 154 kV 교류전력은 576개의 싸이리스터 소자로 구성된 변환기를 통해 180 kV 직류전력으로 변환되어 해저케이블을 통해 제주로 송전된다. 제주변환소에서는 다시 변환기를 거치면서 직류전력은 154 kV 교류전력으로 변환되어 진다. 제주와 해남변환소에는 이러한 변환기가 각 2개씩 설치되어 있고 각 변환기당 150 MW의 전력을 변환시킬 수 있다.

직류와 교류 변환과정에는 고조파가 발생하게 되는데 이러한 고조파는 154 kV 모선에 설치된 교류필터에 의해 제거되어진다. 또한 교류필터는 직류/교류 변환에 필요한 무효전력을 공급할수 있도록 각 필터의 캐패시터 용량은 27.5 MVar로 설계되었다.

변환용변압기는 변환기에 12펄스 파형의 전압을 공급하기 위해 1차전압 154 kV, 2차전압 79.2 kV 188.2 MVA 삼권선변압기(Y/Y/Δ)를 사용하였다. 직류 선로 측에는 직류전압에 포함된 맥동전압을 평활하게 하기위해 60 mH 직류리액터를 설치하였다.

그림 3은 제주변환소에 설치된 변환기 싸이리스터 밸브로 상별로 구성된 쿼드리 밸브 모습이다. 변환소의 각 변환기에는 이러한 쿼드리 밸브가 3개씩 설치되어 변환용변압기 A, B, C 3상과 각각 연결되어 있다.



그림 3 변환기 싸이리스터 밸브

표 1은 제주-해남 HVDC 시스템에 적용된 파라미터 정격이다. 제주-해남 HVDC 시스템은 정격전압 180 kV, 정격전류 840A로 각 변환기의 정격용량은 150 MW이다. 변환기 밸브 구성에 사용되는 싸이리스터의 정격은 최대 순방향 내력 전압 5200 V, 역방향 내력 전압 6000 V로 설계되었다 [5].

표 1 HVDC 시스템 파라미터 정격

Idc	840 [A}	Vdc	180 [kV]	VL	154 [kV]
n	48 [개]	μ	17°	α	19°
f	60 [Hz]	Vt	1 [V]	Qr	3000 [mQ]
di/dt	10 [A/ms]	M	6 [kg]		
ksr	0.2 [J/kg]	R	0.588 [m Ω]		
Rdc	125 [k Ω]	Rac1	88 [Ω]		
Rac2	22 [Ω]	C1, C2	0.75 [μ F]		
nsr	15 [개]	Won	20 [W]		
싸이리스터 최대 순방향 내력 전압				5200 [V]	
싸이리스터 역방향 내력 전압				6000 [V]	
싸이리스터 평균 On-State 전류				3600 [V]	

2.2. HVDC 냉각시스템

싸이리스터 및 이와 관련된 컨버터 밸브 구성소자들은 운전 시 열이 발생하는데 이러한 전력반도체 소자들은 열에 매우 민감하게 반응하므로 적절한 냉각장치를 필요로 하게 된다. 제주-해남 HVDC 설비는 총 2개 변환기(Pole)로 구성되어 있으며, 각 변환기 당 3개의 쿼드리 밸브에 192개의 싸이리스터가 설치되어 있다. 냉각시스템(Cooling system)은 각 Pole 별로 두 개의 주 예비펌프가 설치되어 24시간 운전하며 각각 개별 싸이리스터에 연결된 파이프라인을 통하여 냉각수를 흘러보내 싸이리스터의 온도를 일정 이하로 유지시키고 있다.

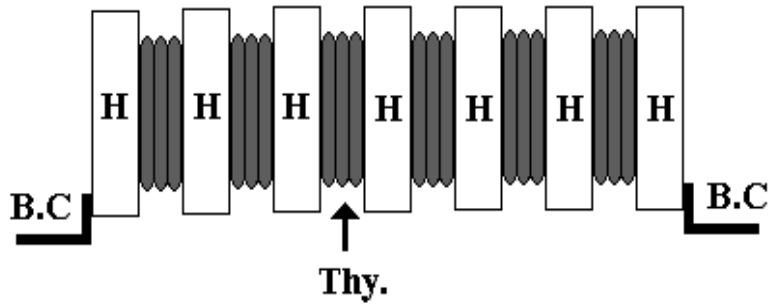
1) 수냉식 방열 시스템

수냉식 방열 시스템은 공랭식보다 더 효율이 높으며 전력 변환 시스템을 작게 만들 수 있고 열 교환기를 전력용 반도체 소자로부터 분리 또는 멀리 설치할 수 있는 장점도 있다. 그러나 냉각재에 의한 전기적인 부식이나 응고의 문제점 그리고 주변 설비가 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 수냉식 방열 시스템의 설계는 일반적으로 다음과 같은 방법이 있다.

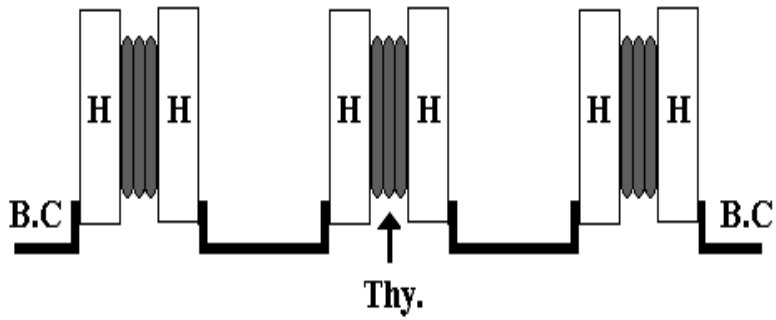
- (1) 파이프를 서로 연결된 수냉식 방열판에 전력용 소자를 부착하는 방식
- (2) 수냉식 방열판에 여러 개의 전력용 소자를 부착하는 방식
- (3) 냉각재에 직접적으로 전력용 소자를 담가 버리는 방식

이러한 3가지의 방식 중에서 세 번째 항은 냉각재의 재질을 물을 이용한 경우에는 사용된 적이 없고 두 번째 항은 간단하나 보수가 어렵고 냉각 효율이 떨어진다. 단점을 가지고 있기 때문에 첫 번째 항과 같은 방열 시스템이 사용되고 있다.

그림 4는 싸이리스터 수냉식 방열 시스템의 구조이다. 전력용 소자는 냉각의 최적화를 위하여 양면 냉각 소자를 사용하는 것이 유리하기 때문에 그림 4 a)와 같은 스택 구조의 방열 시스템을 사용하거나 그림 4 b)와 같은 개별적인 구조로 만들고 있다.

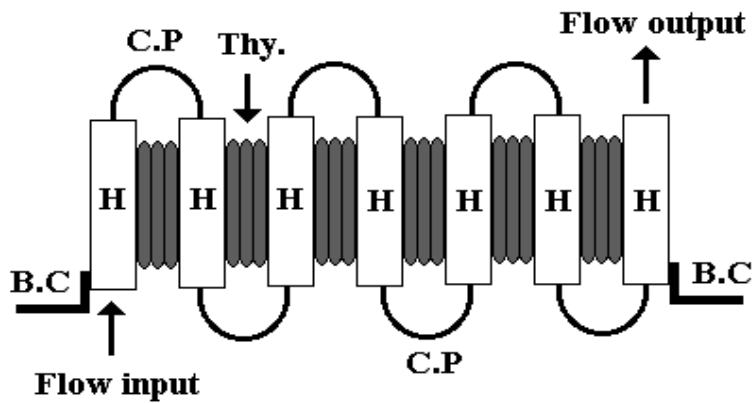


a) 스택 구조의 수냉식 방열 시스템

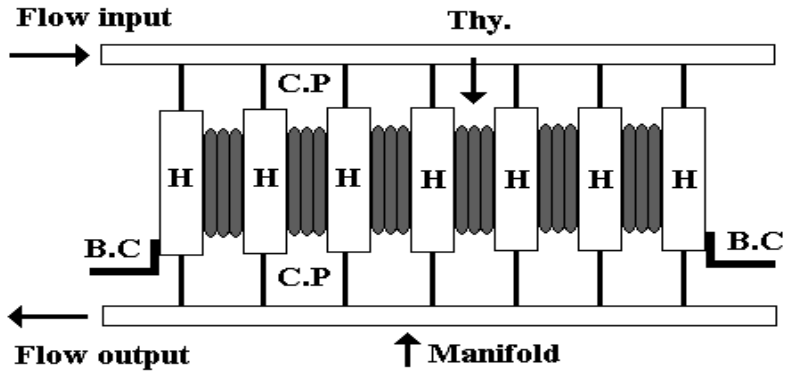


b) 개별 구조의 수냉식 방열 시스템

그림 4 수냉식 방열 시스템 (B.C : 부스바 연결부위, H : 방열판)



a) 스택 구조형 냉각 회로 파이프 연결-직렬



b) 스택 구조형 냉각 회로 파이프 연결-병렬

그림 5 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결

또한 그림 5는 방열판 사이에 연결된 파이프 형태에 따른 방열 시스템의 구조로써 그림 5 a)와 같은 직렬 방식이 있고 그림 5 b)와 같은 병렬 구조가 있다. 그림 5에서 직렬 방식은 냉각재의 온도가 방열판 사이를 통과할 때마다 증가하기 때문에 최종단에 있는 방열판의 냉각 효율이 떨어진다는 단점을 가지고 있으나 냉각재에 불순물이 존재하여 냉각 연결 파이프의 구멍을 막아 고장을 일으키는 경우에는 고장 부위를 쉽게 찾을 수 있다는 장점이 있다. 반면에 그림 5의 b)의 경우는 방열판의 냉각은 균일하게 되는 장점을 가지고 있으나 냉각 파이프가 막히면 막히는 부위를 찾기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 수백개의 전력용 소자를 가지고 있는 대용량 시스템에서는 파이프의 굽기가 큰 부분은 병렬 구조로 만들고 전력용 소자에 분배되어 들어가는 부분에서는 직렬 구조로 병행하여 사용하는 것이 일반적이다 [6].

2) 수냉식 방열 시스템의 설비 구성

그림 6은 수냉식 방열 시스템의 구조도로 각 구성설비별 역할은 아래와 같다.

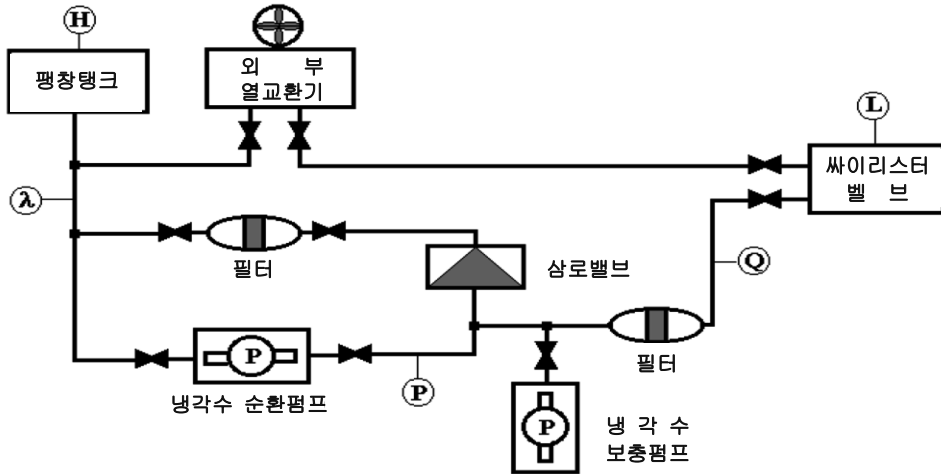


그림 6 수냉식 방열 시스템 구조도

(1) 냉각수 순환펌프

Main Pump는 1개의 Pole에 2개가 병렬로 연결되어 있어 상시 한 대의 펌프가 운전되며 다른 하나는 예비용으로 사용된다.

(2) 외부 열교환기

싸이리스터 밸브에서 나온 온수는 순환펌프에 의하여 열교환기(Heat Exchanger)로 보내지며 각 변환기에는 6개의 열교환기가 설치되어 열을 외부로 방출한다.

(3) 삼로 밸브

차가운 외부공기에 의하여 냉각된 냉각수는 싸이리스터 밸브에 악영향을 줄 수 있어 냉각수의 온도에 따라 냉각계통의 회로를 적정하게 자동으로 삼로 밸브(Non-Return Valve or Three-Way Valve)를 변경시킴으로써 싸이리스터 밸브의 최적온도를 유지시킨다.

(4) 필터

매질이 냉각계를 순환하는 중 함유된 불순물을 걸러내는 역할을 한다.

(5) 팽창탱크

온도에 의한 냉각수의 팽창 및 수축을 팽창탱크(Expansion Tank)에서 흡수하여 냉각계의 압력을 일정하게 유지한다.

(6) 냉각수 보충 시스템

보충수를 새로 공급하기 위한 설비로 탱크, 펌프(Fresh Water Pump) 및 이온 제거기로 구성된다.

(7) 냉각시스템 제어 및 보호장치

그 외 냉각시스템 제어장치와 온도, 도전을, 유량 및 유속을 감시하는 보호 장치들로 구성되어 있다 [4].

3) 제주-해남 HVDC 의 냉각시스템

그림 7은 HVDC 시스템 밸브를 계층 구조로 구성하여 쿼드리 밸브로 만든 경우의 수냉식 회로를 보여주고 있다. 각 변환기에는 이러한 쿼드리 밸브가 3개씩 설치되어 변환용 변압기의 3상 회로와 연결되어 있다. 또한, 그림 8은 싸이리스터의 더워진 냉각수를 강제 팬을 이용하여 대기로 냉각시키는 열 교환기로 제주-해남 HVDC 시스템에는 변환기당 6개의 열 교환기가 설치되어 있다. 또한 열 교환기의 팬 설계는 여유율을 고려하여 전체 냉각량의 50%를 감당하는 팬 2개와 50%의 냉각 능력을 가진 보조 팬 1개로 구성하던가 아니면 전체 냉각량의 33%를 감당하는 팬 3개와 33%의 냉각능력을 가진 보조팬 1개로 구성하는 것이 일반적인 구성이며 본 시스템에서는 여유분을 고려한 N+1($50\% \times 2 + 50\%$) 시스템 설계 개념을 가지고 있다 [7].

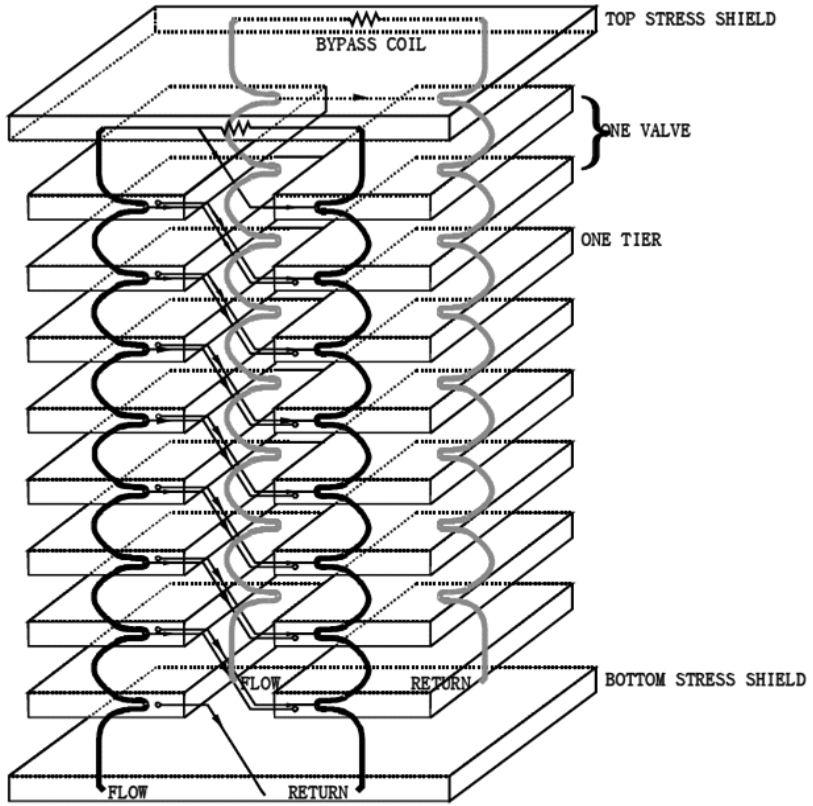


그림 7 싸이리스터 밸브의 수냉식 배관 연결도

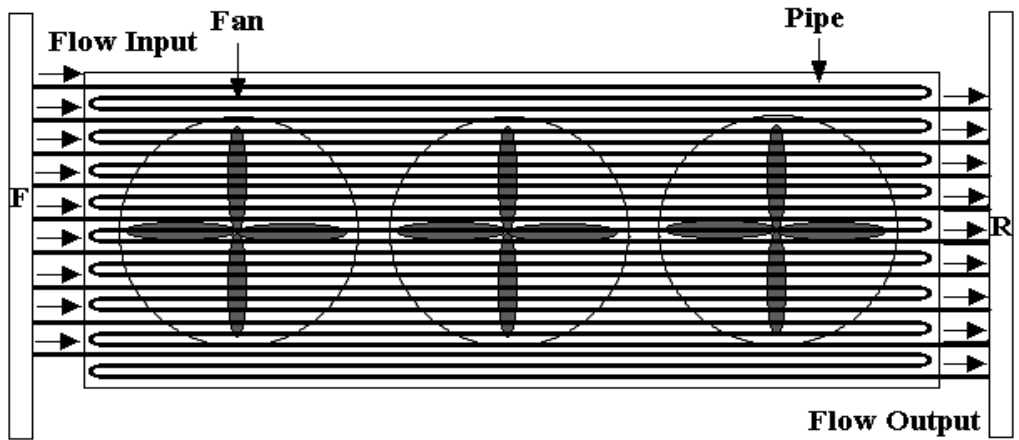


그림 8 열 교환기의 외관도

그림 9는 제주-해남 HVDC 냉각시스템의 전체적인 배관 계통도이다. 순환펌프에서 일정한 압력으로 냉각수를 전력변환 밸브로 지속적으로 흘려 보내주며 전력변환 밸브를 거치며 더워진 냉각수는 외부의 열교환기로 순환하며 대기로 온도를 방출하게 된다. 냉각수에 포함된 불순물은 필터에 의해 제거되어 상시 일정량 이하의 도전율을 띠게 한다. 또한 냉각수 온도에 따라 자동으로 냉각수의 순환로를 변경시키는 삼로밸브의 기능으로 냉각수 온도 또한 일정하게 유지될 수 있게 된다. 냉각수 압력은 팽창탱크와 질소로 일정하게 유지되며 만일 누수 발생으로 냉각수가 부족할 경우 보충펌프를 가동시켜 냉각수 유량을 보충하게 된다.

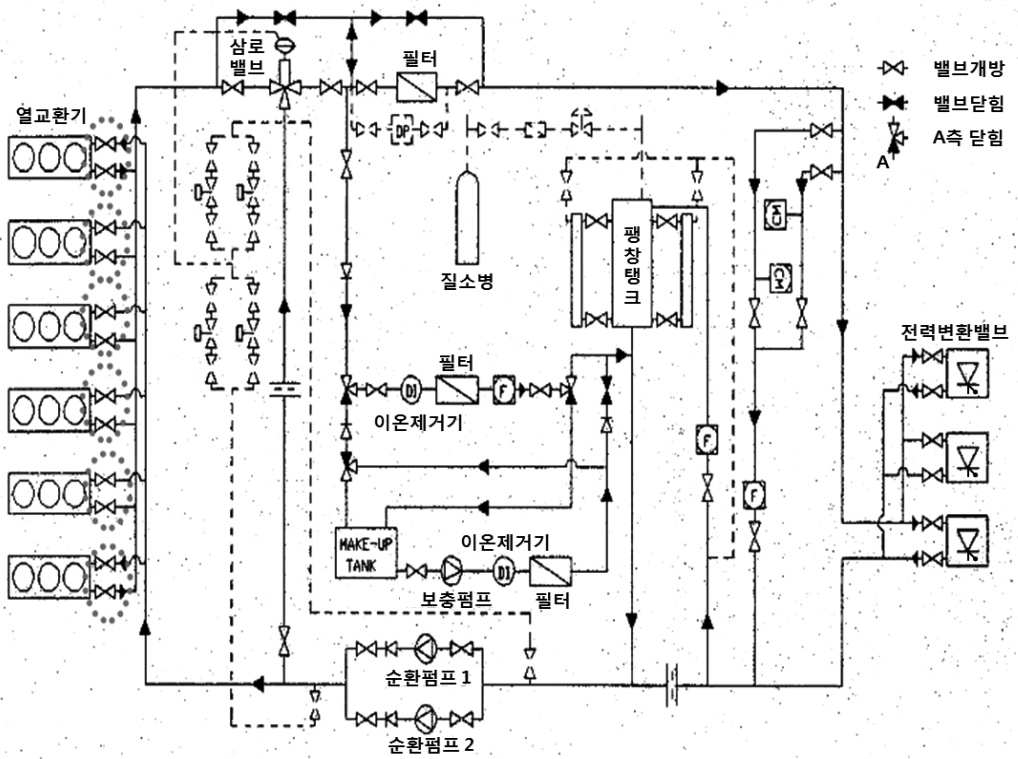


그림 9 제주-해남 HVDC 냉각시스템 배관 계통도

Ⅲ. 냉각시스템 고장원인 및 정비작업 공정 분석

3.1. 냉각시스템 고장원인 분석

냉각시스템 고장발생 감소와 정비시간 단축을 위한 방안을 검토하기 위해 과거 고장사례 중 초기고장을 제외한 2003년부터 2009년까지 7년간 제주-해남 HVDC 냉각시스템 고장에 따른 휴전작업 사례를 조사하였다(운전초기에는 열화 진행에 따른 냉각수 누수고장이 없었음).

그림 10은 연도별 냉각시스템 고장발생 건수를 나타내고 있다. 상업운전 초기 고장은 냉각시스템 제어기 불량에 의해 주로 발생되었으나 이는 회로보완을 통하여 해결할 수 있었다. 2003년부터 부품열화에 의한 고장이 지속적으로 발생하여 설비 신뢰도를 저하시키는 요인이 되어 이에 대한 개선대책이 절실히 필요하게 되었다. 특히 냉각수 누수가 동반된 고장은 사전 인지할 수 없어서 급작스런 HVDC 시스템 고장으로 이어져 정전을 야기시키는 등 문제가 심각하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 제시한 개선방안을 적용하고 2010년부터 2014년까지 5년간 설비운영 모니터링 한 결과 냉각수 누수고장이 한건도 발생하지 않아 고장예방에 상당한 기여를 한 것으로 나타난다.

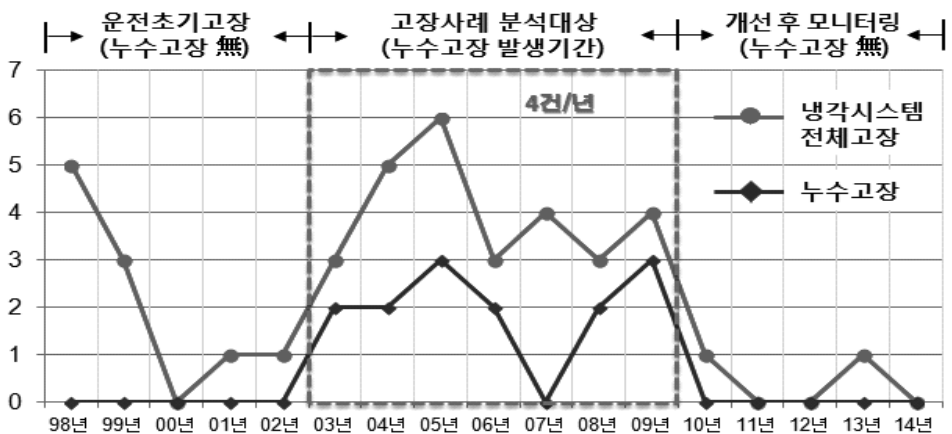


그림 10 연도별 냉각시스템 고장발생 건수

그림 11는 연도별 냉각시스템 복구 정비작업 소요시간을 나타내고 있다. 냉각수 누수고장 발생한 2003년 이후 작업 소요시간이 급증하고 있으며 연간 평균 26.9시간이 냉각시스템 복구작업에 소요되어 HVDC 시스템 정지시간이 과다함을 알 수 있었다.

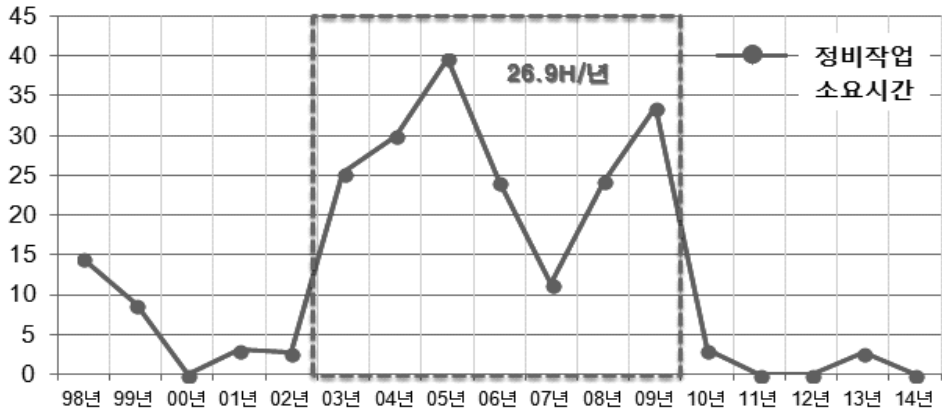
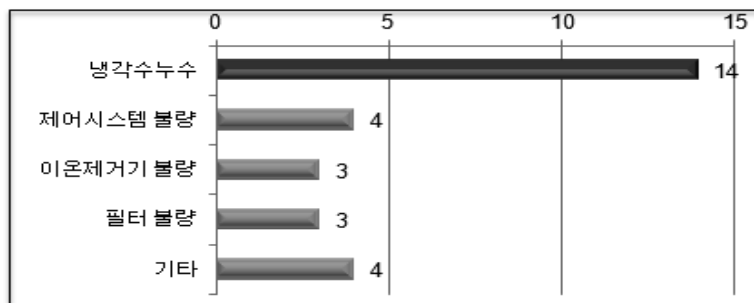
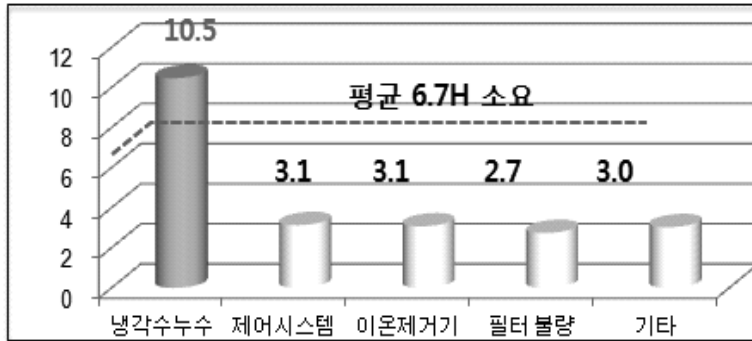


그림 11 연도별 냉각시스템 복구 정비작업 소요시간

냉각시스템 복구 정비작업 소요시간 증가 원인을 분석하기 위해 우선 냉각시스템의 불량원인별 정비작업 내용과 소요시간을 조사하였다. 그림 12는 정비작업 소요시간이 급증한 2003년부터 2009년 동안 발생한 냉각시스템 고장에 대한 원인과 각 원인별 복구작업 소요시간을 나타내고 있다. 그림 12 a)에서 보듯이 냉각수 누수고장이 14건으로 50%를 차지하고 있었으며 다음으로는 제어시스템 불량 4건, 이온제거기 불량 3건, 필터 불량 3건, 기타 순으로 조사되었다.



a) 냉각시스템 불량원인별 정비작업 건수



b) 냉각시스템 불량원인별 복구작업 소요시간

그림 12 불량원인별 정비작업건수 및 복구작업 소요시간

또한 그림 12 b)에서 보듯이 냉각수 누수고장은 복구 정비작업 소요시간이 평균 10.5시간으로 다른 고장에 비해 3배 이상이 소요되어 이에 대한 개선이 필요한 실정임을 알 수 있었다.

냉각수 누수 발생 원인 분석 결과 그림 13에서 보듯이 전체 고장의 93%가 냉각수 파이프 라인 계통의 진동충격 방지용 이음 부품인 벨로우즈 파열에 의한 것으로 조사되었다. 그러나 벨로우즈는 고압전류가 흐르는 밸브홀실 내부에 설치되어 평상시 순시점검에 의한 열화정도를 파악할 수 없어 고장 시 바로 HVDC 시스템 정지로 정전을 야기시킬 수도 있어 문제가 심각한 상황으로 나타났다.

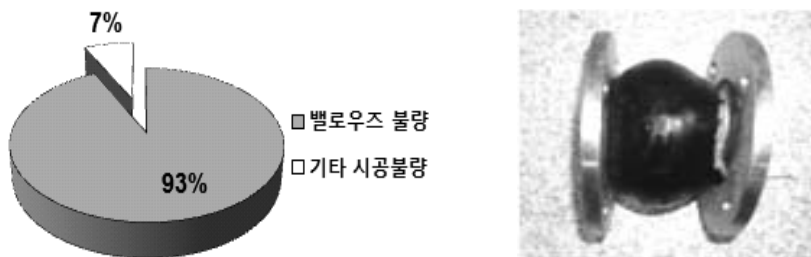


그림 13 냉각수 누수 주요원인 및 벨로우즈 파열사진

3.2. 냉각시스템 정비작업 공정 분석 및 벨로우즈 성능 점검

1) 냉각시스템 정비작업 공정 분석

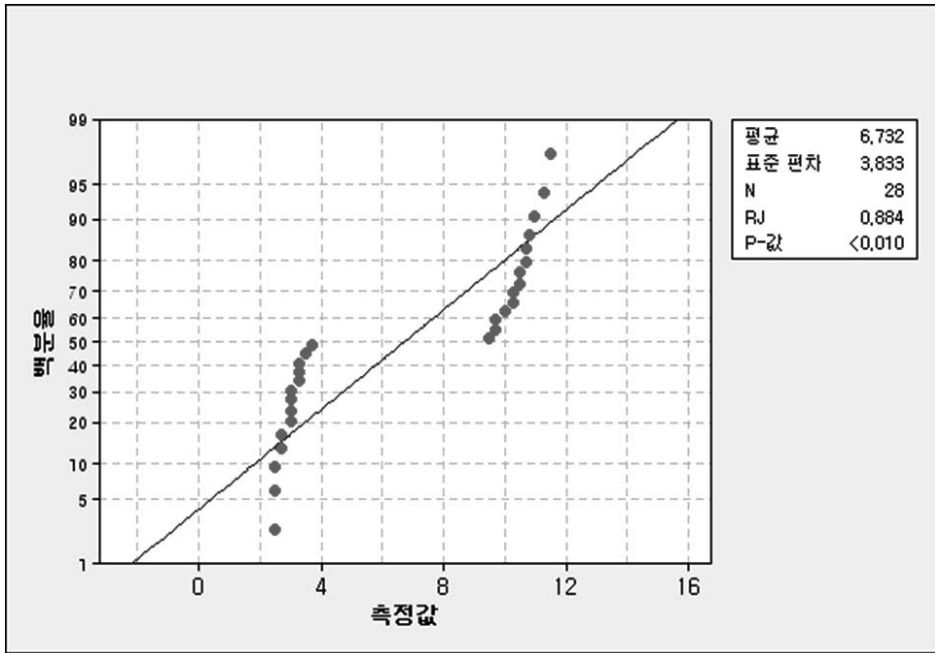
누수고장에 의한 냉각시스템 고장시 정비작업 소요시간이 다른 고장에 비해 3배에 달하고 있어 정비작업 공정 중 시간을 감축시킬수 있는 개선사항을 찾기 위해 공정에 대한 세부분석 및 실제 작업 시간을 측정해 보았다.

그림 14는 냉각시스템 정비작업 공정 및 소요시간을 분석한 결과이다. 그림14에서 보듯이 전체 정비작업 소요시간 10.5시간 중 냉각수 회수작업 2시간, 냉각수 충수작업 2.5시간, 공기 배출작업 2.5시간으로 총 7시간이 소요되어 실제 고장정비에 소요되는 작업시간 2.5시간에 비해 과다하게 소요되고 있어 개선이 요구됨을 알 수 있었다. 또한 고장개소 위치에 따라 정비작업을 위해 사전조작이 필요한 차단밸브의 위치 및 수량과 냉각수 회수량이 냉각수 충수 및 공기배출 작업시간에 영향을 미치고 있고 전체적인 작업시간 과다소요의 원인이 되고 있었다.

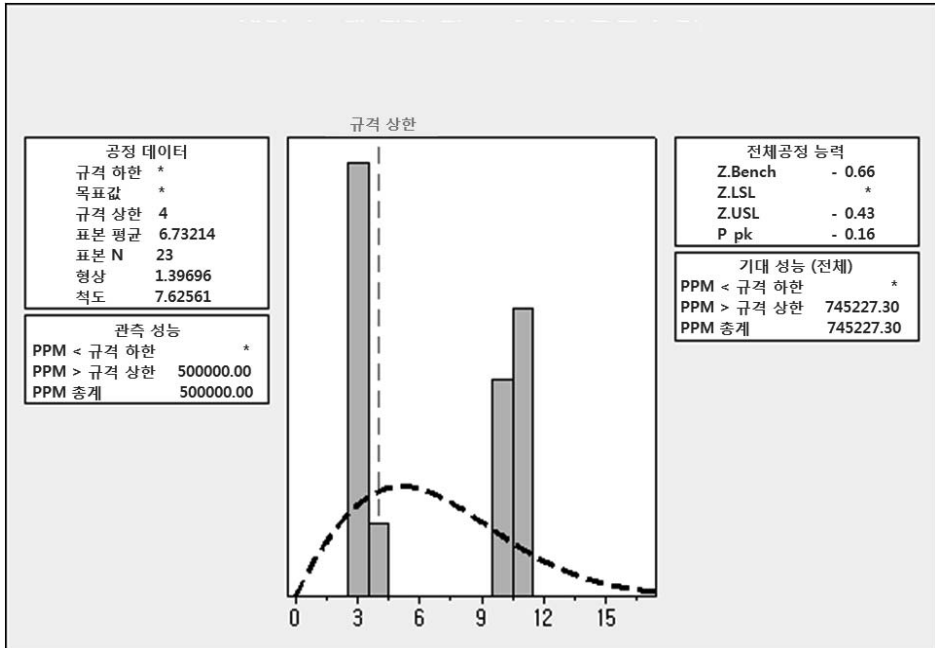


그림 14 냉각시스템 정비작업 공정별 평균 작업 소요시간

그림 15는 현재 냉각시스템 정비작업에 대한 공정능력을 나타내고 있다. 그림 15 a)는 작업시간이 고장원인 별로 상이해 비정규 분포를 띠고 있음을 나타내고 있고, 그림 15 b)는 정비작업 소요시간이 규격상한을 벗어나서 분포하고 있어 표준편차를 줄이고 전체적으로 작업시간을 단축시키는 평균이동 개선이 요구됨을 보여주고 있다.



a) 냉각시스템 정비 작업시간 정규성 검정



b) 냉각시스템 정비 작업 공정능력 측정

그림 15 냉각시스템 정비작업 정규성 검정 및 공정능력 측정

2) 벨로우즈 성능 점검

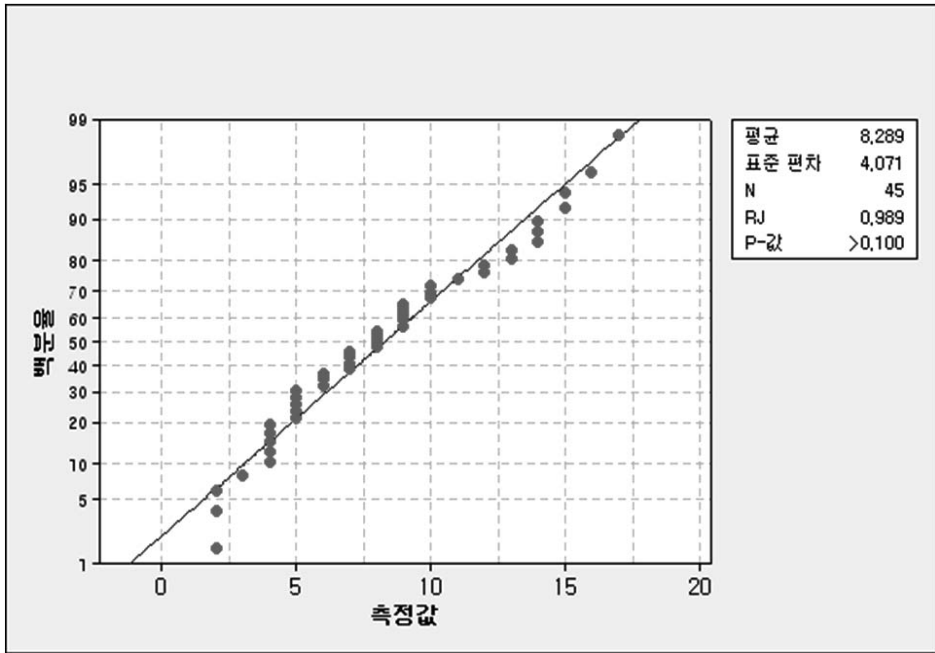
대부분의 냉각수 누수고장을 일으키고 있는 벨로우즈의 파열은 자체 제작 불량, 제품의 규격미달, 설치조건 및 운전환경 열악 등 여러 가지 원인이 복합적으로 작용해서 발생할 수 있는 현상이다. 우선 현재 사용되고 있는 1 Mpa 벨로우즈의 제원을 조사하였는데 최고 사용 압력은 10 kgf/cm^2 이고 최고 사용온도는 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 표 2의 냉각시스템 데이터에 의하면 정상 냉각수 유속압력은 540 kPa 로 약 5.5 kgf/cm^2 이므로 정상 범위 내에 있었다. 또 최대 대기 온도는 $37.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 냉각수 온도는 상시 $5\sim 46 \text{ }^\circ\text{C}$ 범위를 유지시키기 때문에 온도 조건 또한 정상적인 범위 이내라고 보여진다.

표 2 제주-해남 HVDC 냉각시스템 데이터

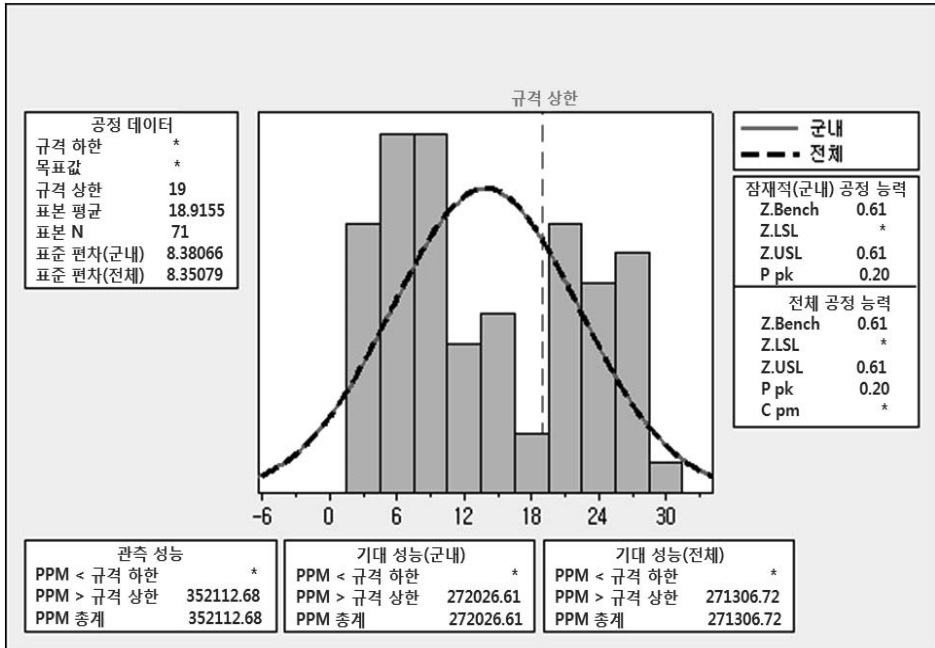
항 목	정 격
싸이리스터로 흐르는 총 유량	2200 ℓ /min
정격 유속 압력	540 kPa
정격 냉각 용량	750 kW
최대 대기 온도	37.5 $^\circ\text{C}$
시스템의 총 냉각수량	5700 ℓ
냉각수 팽창 탱크 용량	540 ℓ
냉각수 보충 탱크 용량	350 ℓ

그러나 냉각수 펌프 기동 시에는 냉각수 압력이 증가할 수 있다는 점에 착안하여 기동 시 압력을 측정해 보니 15 kgf/cm^2 로 나타났으며, 이는 현재 벨로우즈 최고 사용 압력을 초과하는 값이었다. 비록 일시적인 초과 압력이지만 수년간 이러한 압력이 지속적으로 벨로우즈에 가해져 피로누적에 의한 열화를 진행시킨 것으로 판단된다.

그림 16 a)는 냉각수 압력변동에 따라 벨로우즈의 수축율이 변동되는 정규 분포를 띠고 있음을 나타내고 있고, 그림 15 b)는 벨로우즈 수축율이 규격상한을 벗어나서 분포하고 있어 전체적인 산포축소를 통한 성능개선이 요구됨을 보여주고 있다.



a) 압력변동 시 벨로우즈 수축률 정규성 검정



b) 압력변동 시 벨로우즈 수축률 공정능력 측정

그림 16 압력변동 시 벨로우즈 수축률 정규성 검정 및 공정능력 측정

IV. 냉각시스템 개선을 위한 잠재요인 분석

냉각시스템 고장에 의한 변환설비 휴전 복구시간 과다 소요 원인에 대해 작업자, 기계설비, 작업환경, 작업절차, 설치환경, 운전조건, 시공측면 등 여러 요인별로 잠재인자를 도출하기 위한 논리구조 분석(Logic Tree 분석)을 시행하였다. 논리구조 분석은 맥킨지 컨설팅회사에서 창안한 기법으로 문제해결시 MECE(Mutually Exclusive Collectively Exhaustive : 상호 독립적이며 누락이 없음) 조건에 맞추어 점차적으로 범위를 좁혀나가 문제발생의 최종 세부 원인을 찾아내는 방법이다.

그림 17은 냉각시스템 복구시간 과다소요 요인도출을 위한 논리구조 분석 결과이다. 냉각시스템 주요구획 밸브의 수량이나 위치 부적절함에 따른 냉각수 회수시간이 과다하다는 사실과 냉각펌프 상시 운전에 따라 운전중 발생하는 압력변화 및 진동에 의한 벨로우즈의 피로누적이 고장으로 진전됨을 알 수 있었다. 따라서 냉각라인 밸브수량과 위치, 냉각수 압력변동이라는 두가지 요인을 잠재인자로 도출하였다.

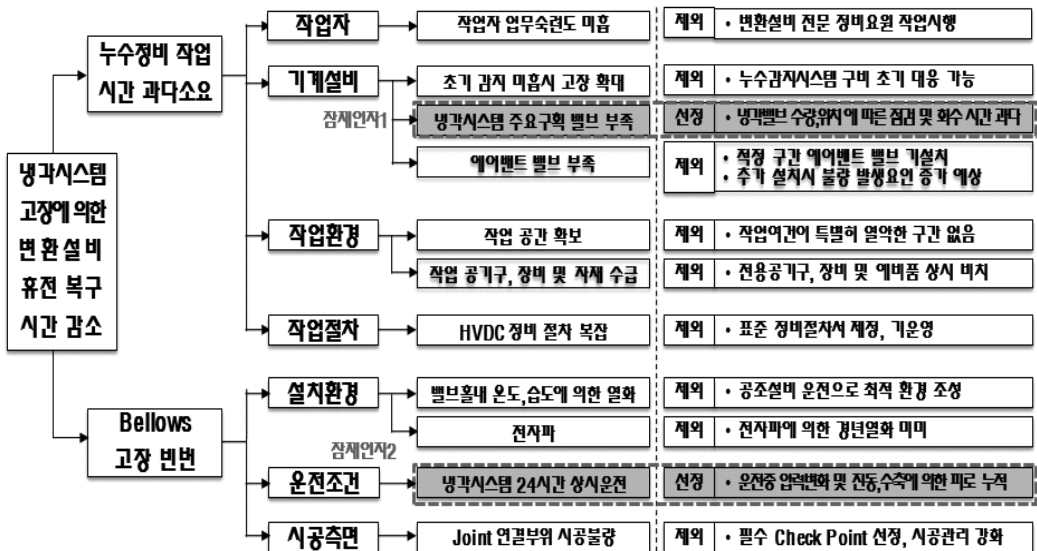
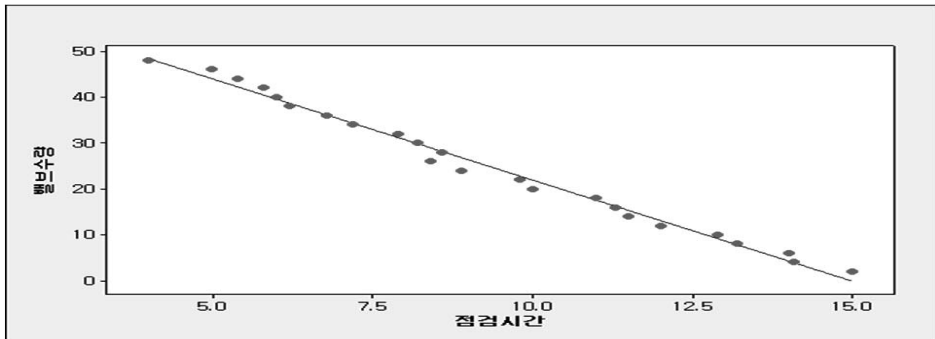


그림 17 냉각시스템 복구시간 과다소요 요인도출 분석

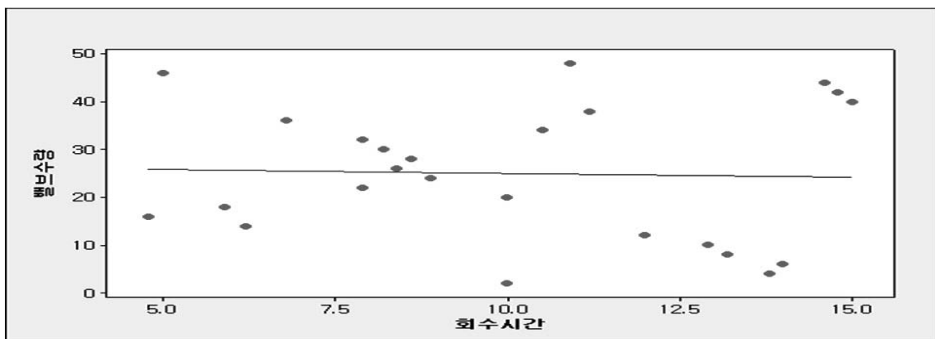
4.1. 밸브수량과 위치에 따른 점검시간 영향 분석

우선 첫 번째 인자로 도출된 밸브수량과 위치에 대한 분석을 시행하였다. 밸브수량의 점검시간 및 냉각수 회수시간과 상관관계를 분석하기 위해 산점도 분석을 시행하였다. 그림 18 a)의 산점도 분석결과를 보면 밸브수량은 점검시간과 정규성을 띠고 있으면 상관계수 또한 0.995로 강한 상관성이 있어 점검시간 단축을 위해 밸브수량을 조정시킬 필요성이 있음을 알 수 있다.

반면 그림 18 b)의 그래프를 보면 밸브수량은 냉각수 회수시간과의 산점도 분석결과는 정규성을 띠지 않고 있으며 상관계수 또한 0.038로 매우 낮아 밸브수량 조정 만으로는 냉각수 회수에 따른 소요시간 단축효과가 없어 별도 추가 개선작업이 필요함을 알 수 있다.



a) 밸브수량 대 점검시간 산점도

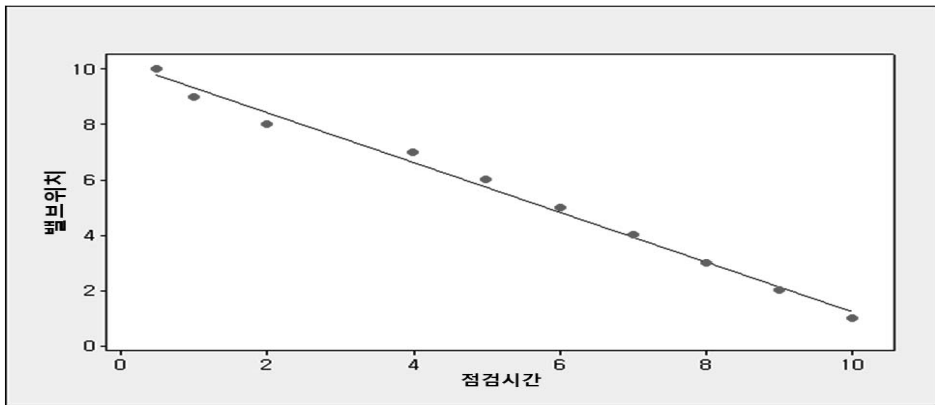


b) 밸브수량 대 회수시간 산점도

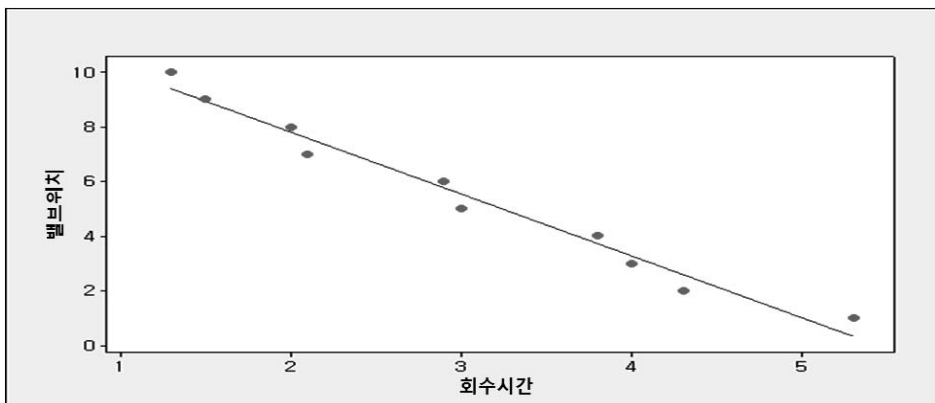
그림 18 밸브수량 대 점검시간 및 회수시간 상관관계 분석

그림 19 a)는 밸브위치와 점검시간 상관관계에 대한 산점도 분석결과 그래프로 밸브의 위치는 점검시간과 정규성을 띠고 있으면 상관계수 또한 0.996으로 강한 상관성이 있어 점검시간을 단축을 위해 밸브의 위치를 조정시킬 필요성이 있음을 알 수 있다.

또한 그림 19 b)의 그래프를 보면 밸브의 위치는 냉각수 회수시간과도 정규성을 띠고 있으며 상관계수 0.988로 강한 상관성을 가지고 있어 밸브의 위치 조정은 점검시간 단축뿐만 아니라 냉각수 회수시간 단축에도 상당한 효과가 있을 것이라는 사실을 예측할 수 있다.



a) 밸브위치 대 점검시간 산점도



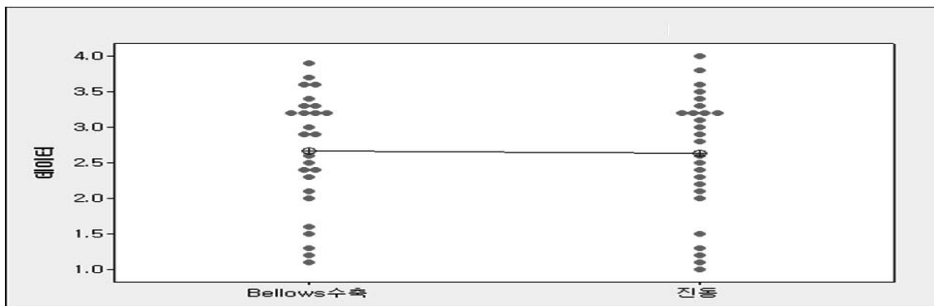
b) 밸브위치 대 회수시간 산점도

그림 19 밸브위치 대 점검시간 및 회수시간 상관관계 분석

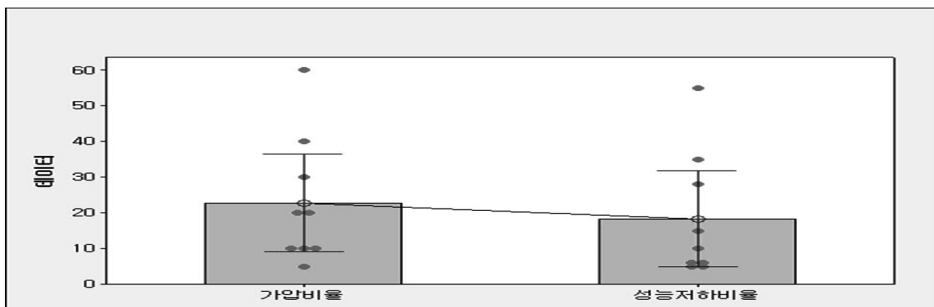
4.2. 냉각수 압력변동과 벨로우즈 불량발생 영향 분석

다음으로는 두 번째 인자인 냉각수 압력변동과 벨로우즈의 불량발생에 대한 영향분석을 시행하였다. 그림 20 a)는 벨로우즈의 수축과 진동의 상관관계를 분석한 그래프로 상관계수 0.996의 강한 상관성을 띠고 있다. 냉각수 압력변동에 의한 진동으로 벨로우즈의 수축이 반복적으로 발생할 경우 열화가 진행될 수 있음을 암시한다. 그림 20 b)는 펌프기동과 벨로우즈 성능저하와의 상관관계를 분석한 결과이다. 상관계수 0.989의 강한 상관성이 있었고 이는 펌프기동 및 절체에 의한 피로누적이 벨로우즈 성능저하에 영향을 미치고 있음을 의미한다.

평상시와 펌프기동 시 벨로우즈 압력변화 및 수축률 변동량을 조사한 결과 압력변화는 5.6 kgf/cm^2 에서 15 kgf/cm^2 로 변동되었고 수축 및 이완길이 변화는 $\pm 2 \text{ mm}$ 에서 8 mm 로 증가하였다. 이는 벨로우즈 최고 사용압력인 10 kgf/cm^2 을 초과하는 값으로 개선이 필요함을 알 수 있었다.



a) 벨로우즈 수축과 진동 상관관계 분석



b) 펌프기동과 벨로우즈 성능저하 상관관계 분석

그림 20 냉각수 압력변동에 따른 벨로우즈 성능저하 상관관계 분석

V. 냉각시스템 개선 및 검증

5.1. 개선안 도출 실험

냉각시스템 정비시간과 밸로우즈 손상에 영향을 미치는 밸브위치, 수량, 냉각수 압력변화에 대하여 분석결과를 바탕으로 최적의 조건을 도출하기 위해서 표3의 실험계획 조건을 구상하고 각 조건에 따라 8회의 시험을 시행하였다.

표 3 최적조건 도출 실험계획 조건

인자(Factor)	수준(Level)	
밸브위치	-1 (외부)	1 (내부)
밸브수량	-1 (24개 이하)	1 (24개 이상)
냉각수 압력	-1 (10 kgf/cm ² 이하)	1 (10 kgf/cm ² 이상)

표 4은 실험결과로 정비작업 소요시간이 가장 적고 밸로우즈 손상을 발생시키지 않는 최적조건은 밸브 홀 내부에 24개의 냉각밸브를 설치하고 냉각수 압력을 10 kgf/cm² 이하로 운전하는 조건으로 나타났다.

표 4 최적조건 도출 실험결과

밸브위치	밸브수량	압 력	점검시간
-1	-1	-1	15
1	-1	-1	10
-1	1	-1	11
1	1	-1	4
-1	-1	1	21
1	-1	1	18
-1	1	1	18
1	1	1	12

5.2. 개선안 적용 및 검증

도출된 개선안을 적용하고 신뢰도 검증을 위해 실증시험을 시행하였다. 밸브수량 부족 및 위치 부적정에 따른 냉각수 회수시간을 절감하기 위해 도출된 최적 조건에 따라 선정된 위치에 차단밸브를 추가로 설치하였다. 그림 21은 냉각밸브 및 진동방지축을 추가로 설치한 도면과 사진이다. 각 변환기의 밸브홀 실 퀴드리 밸브 전단과 후단에 2개씩 총 12개의 차단밸브를 추가로 설치하여 냉각수 회수 및 충수에 소요되는 시간을 절감 시키는 효과를 얻고자 하였다.

또한 냉각펌프 기동정지에 따른 15 kgf/cm^2 압력에 의한 충격진동이 벨로우즈에 전달되는 것을 방지하기 위한 진동방지축을 벨로우즈 전단에 설치하여 진동 범위를 2 mm 이내로 유지시킬 수 있었다.

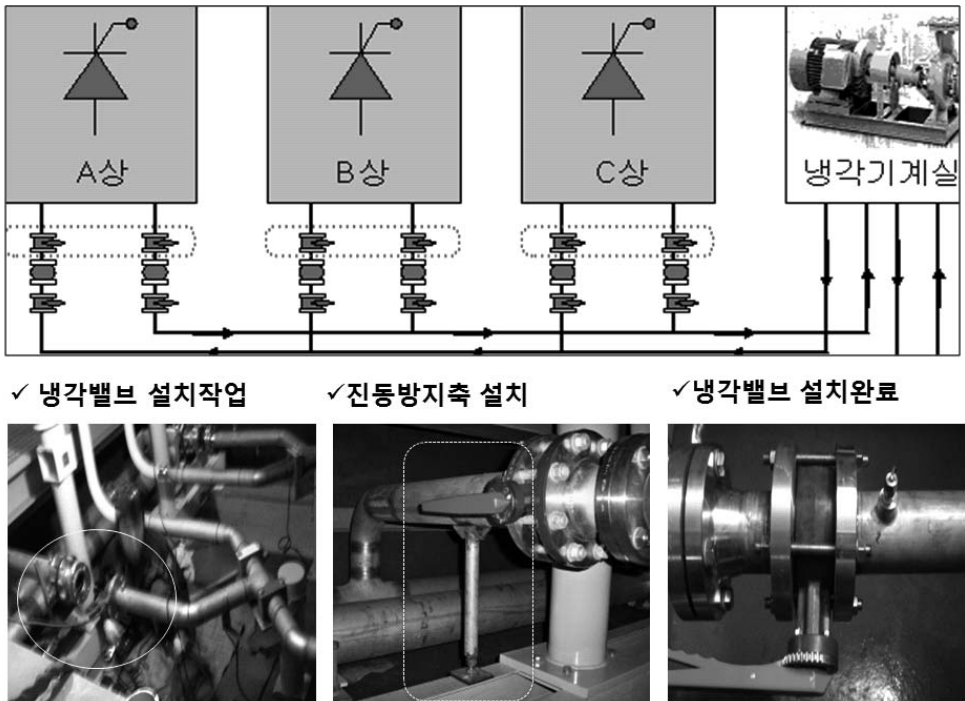
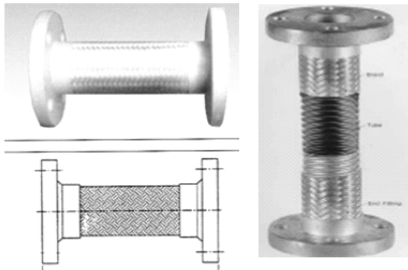


그림 21 냉각밸브 및 진동방지축 추가 설치

고무재질의 기존 벨로우즈는 진동흡수를 위한 탄성은 유지시키되 내구성이 우수한 플렉시블 스테인레스 재질의 벨로우즈를 설치하여 벨로우즈 피로누적에 의한 파열을 방지하였다. 그림 22는 성능개선된 벨로우즈 도면과 설치 모습이다. 기존 제품의 최고사용압력은 10 kgf/cm² 이었으나 개선된 벨로우즈는 20 kgf/cm² 이상에서도 운전 가능한 내구성이 향상된 제품을 사용하였다. 벨로우즈 교체를 위해 우선 냉각밸브 설치위치 배관을 냉각밸브와 새로운 벨로우즈 규격에 맞게 절단하고 냉각밸브와 벨로우즈를 설치하였다.

신뢰도 검증을 위한 실증시험은 냉각계통 10개소를 임의로 고장 산정하여 시행하였다. 각 개소의 정비시간을 측정한 결과 모든 개소에서 5시간 이내로 50% 이상 크게 감소되었으며 또한 교체 설치된 벨로우즈에 대한 압력변화 시 진동 측정 결과 평균 진동이 0.53 mm로 나타났으며 벨로우즈 수축 비율은 기존 8 mm에서 2 mm로 대폭 축소되어 성능이 크게 향상되었음을 알 수 있었다.

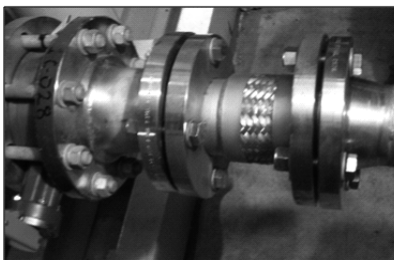
✓ 개선된 Bellows 도면



✓ 냉각밸브 설치위치 배관절단



✓ 설치완료 (Flexible 스테인레스)



✓ 개선된 Bellows 설치

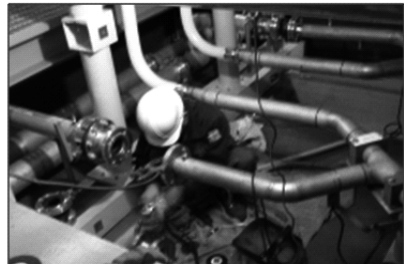
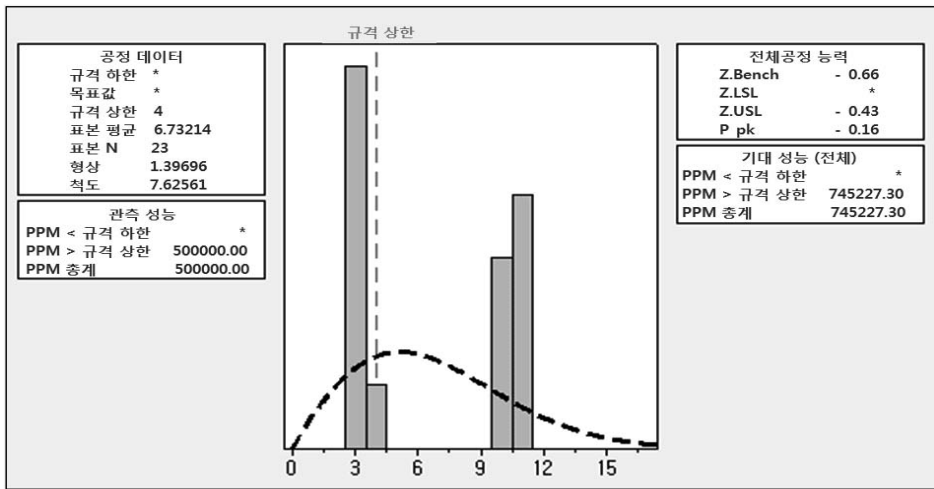
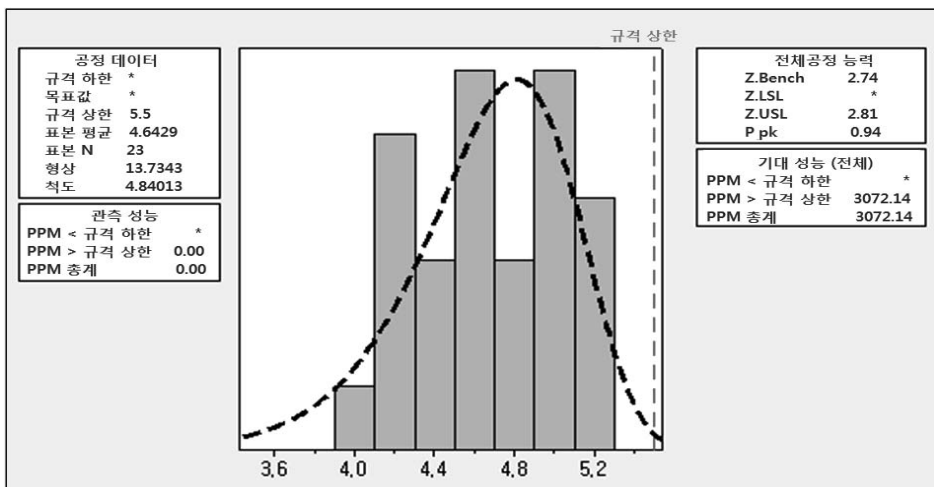


그림 22 성능개선 적용 벨로우즈 도면 및 설치사진

개선안 적용 이후 시행한 실증시험의 데이터로 개선 전과 후의 공정능력을 비교하였다. 그림 23은 정비시간 공정능력을 비교한 결과이다. 그림 23 a)는 개선 이전 데이터로 정비작업 소요시간이 규격상한을 벗어나서 분포하고 있으나, 그림 23 b)의 개선 이후 실증시험 데이터는 모두 규격상한 이내로 이동되어 있고 정규분포를 띠고 있어 개선이 잘 되었음을 알 수 있다.



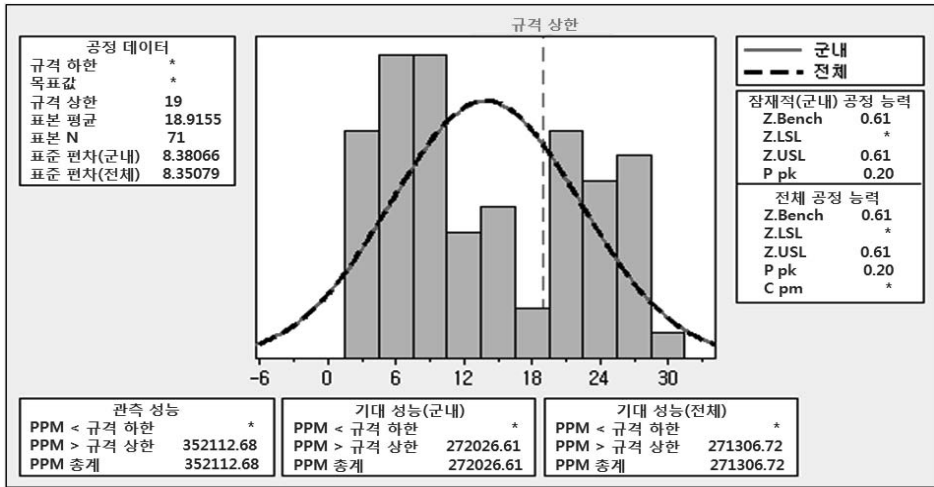
a) 개선 전 냉각시스템 정비시간 공정능력



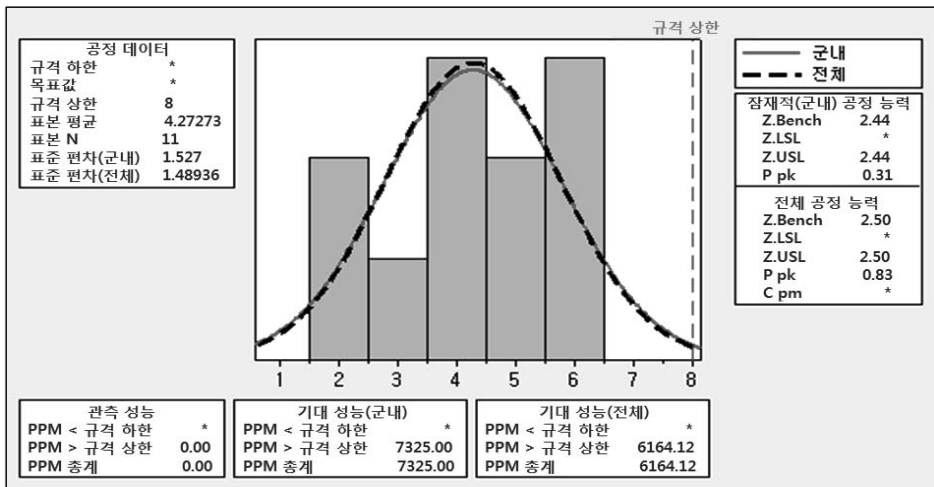
b) 개선 후 냉각시스템 정비시간 공정능력

그림 23 개선 전·후 냉각시스템 정비시간 공정능력 비교

그림 24는 냉각수 압력변동에 따른 벨로우즈의 진동(수축률)에 대한 개선 전과 후의 공정능력을 비교한 결과이다. 그림 24 a)는 개선 이전으로 일부가 규격상한을 벗어나서 분포하고 있으나, 그림 23 b)의 개선 이후 실증시험 데이터는 모두 규격상한 이내로 이동되어 있고 정규분포를 띠고 있어 이 또한 역시 개선효과가 크다는 사실을 시사하고 있다.



a) 개선 전 벨로우즈 성능 공정능력



b) 개선 후 벨로우즈 성능 공정능력

그림 24 개선 전·후 벨로우즈 성능 공정능력 비교

VI. 결과 및 고찰

냉각시스템 개선사항에 대해 신뢰도 검증을 위한 실증시험을 통해 개선효과가 입증되었지만, 장기적인 관점에서 지속적으로 개선효과를 모니터링 할 필요가 있었다. 2010년부터 2014년까지 5년간 설비운영 결과를 추적 분석한 결과 냉각시스템 전체적인 고장은 감소하였으며 특히 누수고장의 경우는 한건도 발생하지 않아 개선안이 매우 우수함을 알 수 있었다. 그림 25는 개선 전·후 냉각시스템 고장 건수를 비교한 도표이다. 개선 이전 연평균 4건정도 발생하던 누수고장은 모니터링 기간 동안 한건도 발생하지 않았으며 냉각시스템 전체 고장도 2010년과 2013년 각 1건 발생으로 크게 감소되었음을 알 수 있다.

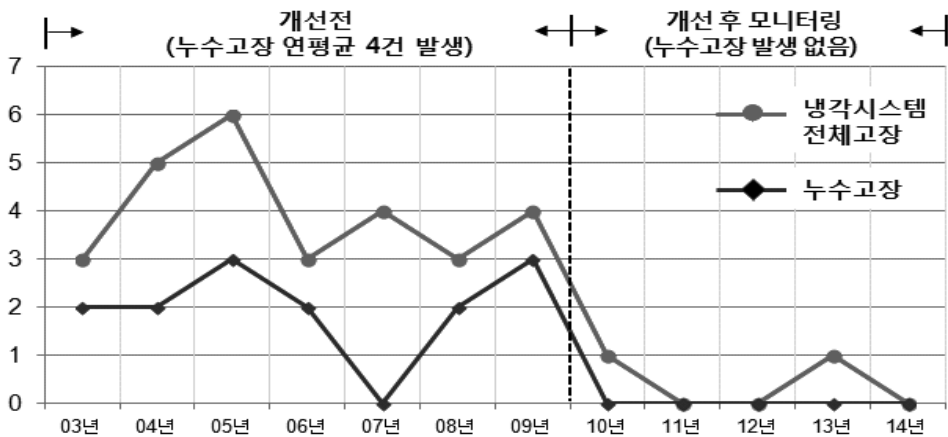


그림 25 개선 전·후 냉각시스템 고장건수 비교 (연평균 4건 → 0건 감소)

또한 모니터링 기간동안 매년 계획예방정비(Overhaul) 휴전작업 시 개선사항에 대한 변동치를 조사하기 위해 냉각밸브와 벨로우즈의 열화진행 상태를 점검하고 펌프 기동 시 벨로우즈 진동에 따른 수축률을 측정을 시행하였다. 표 5는 2010년부터 2014년까지 5년간 벨로우즈의 각 부위에서 측정된 수축률 값으로 가장 값이 큰 축 방향 전단부 진동값이 1550~1950 μm 으로 측정되었으며 이 값은 성능개선 초기 실증시험값과 차이가 없어 장기간 개선 효과가 지속되고 있다는 사실을 알 수 있었다.

표 5 벨로우즈 진동에 따른 수축률 측정값

a) 2010년 벨로우즈 수축률 데이터

(단위 : μm)

구 분		Vertical	Horizontal	Axial	
				전단	후단
변환기 1	벨로우즈 1	369	272	1958	47
	벨로우즈 2	372	262	1843	40
	벨로우즈 3	348	226	1545	38
	벨로우즈 4	362	248	1702	37
	벨로우즈 5	365	235	1645	34
	벨로우즈 6	342	242	1701	41
변환기 2	벨로우즈 1	350	238	1671	36
	벨로우즈 2	367	225	1638	35
	벨로우즈 3	381	239	1716	34
	벨로우즈 4	368	237	1647	36
	벨로우즈 5	368	248	1834	37
	벨로우즈 6	342	261	1701	38

b) 2011년 벨로우즈 수축률 데이터

(단위 : μm)

구 분		Vertical	Horizontal	Axial	
				전단	후단
변환기 1	벨로우즈 1	368	259	1915	42
	벨로우즈 2	354	258	1845	40
	벨로우즈 3	342	228	1597	37
	벨로우즈 4	368	245	1712	38
	벨로우즈 5	349	218	1597	38
	벨로우즈 6	358	229	1689	47
변환기 2	벨로우즈 1	357	226	1625	39
	벨로우즈 2	359	204	1613	34
	벨로우즈 3	368	258	1704	38
	벨로우즈 4	357	219	1674	35
	벨로우즈 5	365	259	1803	36
	벨로우즈 6	359	249	1749	39

c) 2012년 벨로우즈 수축률 데이터

(단위 : μm)

구 분		Vertical	Horizontal	Axial	
				전단	후단
변환기 1	벨로우즈 1	364	258	1874	44
	벨로우즈 2	371	245	1856	42
	벨로우즈 3	365	227	1597	38
	벨로우즈 4	369	246	1704	37
	벨로우즈 5	358	217	1624	36
	벨로우즈 6	348	257	1706	43
변환기 2	벨로우즈 1	357	226	1657	39
	벨로우즈 2	369	237	1637	34
	벨로우즈 3	379	226	1707	36
	벨로우즈 4	374	218	1639	31
	벨로우즈 5	359	247	1854	38
	벨로우즈 6	348	256	1717	36

d) 2013년 벨로우즈 수축률 데이터

(단위 : μm)

구 분		Vertical	Horizontal	Axial	
				전단	후단
변환기 1	벨로우즈 1	367	259	1846	49
	벨로우즈 2	354	247	1853	45
	벨로우즈 3	347	227	1597	38
	벨로우즈 4	362	247	1705	34
	벨로우즈 5	343	237	1646	34
	벨로우즈 6	357	224	1727	46
변환기 2	벨로우즈 1	359	226	1662	39
	벨로우즈 2	357	227	1638	38
	벨로우즈 3	363	246	1746	35
	벨로우즈 4	347	237	1651	37
	벨로우즈 5	362	246	1846	37
	벨로우즈 6	344	248	1738	41

e) 2014년 벨로우즈 수축률 데이터

(단위 : μm)

구 분		Vertical	Horizontal	Axial	
				전단	후단
변환기 1	벨로우즈 1	365	257	1894	44
	벨로우즈 2	347	243	1857	43
	벨로우즈 3	358	217	1598	36
	벨로우즈 4	386	259	1703	42
	벨로우즈 5	374	237	1664	38
	벨로우즈 6	354	242	1717	42
변환기 2	벨로우즈 1	337	237	1623	38
	벨로우즈 2	347	224	1634	36
	벨로우즈 3	384	257	1715	35
	벨로우즈 4	343	239	1697	33
	벨로우즈 5	362	242	1834	32
	벨로우즈 6	369	247	1723	35

VII. 결 론

본 논문에서는 HVDC 고장감소 및 정비시간 단축을 위한 냉각시스템 개선 방안에 관한 연구를 수행하였다. 냉각시스템 고장 중 가장 빈도가 높은 냉각수 누수 고장에 대해 고장원인을 분석하여 사전에 고장을 예방할 수 있도록 설비를 개선시키는 방안을 검토하였고 냉각시스템 고장발생 시에도 복구작업에 소요되는 시간을 최소화시킬 수 있는 방안을 도출하여 실증시험 및 5년간 설비운전 모니터링을 통해 신뢰성을 검증하였다. 본 연구를 통해 제시된 개선 방안과 개선이후 모니터링 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 제주-해남 HVDC 변환설비 냉각시스템의 주 고장원인은 냉각계통의 진동저감을 위해 설치된 벨로우즈 불량으로 나타났으며 벨로우즈 교체시 소요되는 냉각수 회수량을 적게 하는 것이 정비시간을 단축시킬수 있는 최적방안임을 알 수 있었다.
2. 냉각수 순환펌프에 의한 상시진동 및 기동시 충격진동에 의한 벨로우즈 파열은 성능개선 된 스테인레스 재질의 벨로우즈 방식으로 제작 설치하였고, 냉각수 회수량을 최소화할 수 있도록 차단밸브의 수량 및 위치에 대한 최적조건을 산출하고 추가로 설치하여 정비시간을 단축시킬 수 있었다.
3. 실증시험을 통해 새롭게 설치된 벨로우즈 및 냉각수 차단 밸브 등의 실효성을 입증하였으며, 개선이후 5년간 모니터링을 통해 단 한건의 고장 발생 없이 운전되고 있어 개선내용이 상당히 우수함을 알 수 있다.

이상과 같은 연구결과로 HVDC 시스템의 고장 및 정비시간이 크게 감소되어 전력구입비 절감이라는 경제적인 이득은 물론 전력계통 안정화에 크게 기여할 수 있었다. 또한 본 논문에서 제시된 연구결과를 바탕으로 향후 계획되고 있는 AC/DC 변환설비의 냉각시스템에 확대 적용할 경우 설비 이용률 및 신뢰도 향상이라는 유무형의 효과를 동시에 기대할 수 있을 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] KEPRI, A Basic Technology Development of HVDC Transmission System 최종보고서, pp. 3~4, 2001.

- [2] KEPCO, 장기 송변전 설비계획(2013~2027), pp. 37~50, 2013.

- [3] KEPCO, 180 kV 해남-제주 HVDC 변환설비 고장사례집, pp. 1~9, 2009.

- [4] KEPCO, 180 kV 해남-제주 HVDC 운전·정비 절차서, pp. 261~288, 2002.

- [5] GEC ALSTOM, Cheju- Haenam HVDC Operation & Maintenance Manual, Volume 1, Section 2, pp. 4~36, 1993.

- [6] 김찬기, “HVDC 시스템의 수냉식 냉각 시스템”, 전력전자학회 논문지 제4권, 제3호, pp. 357~267, 1999.

- [7] 김찬기, 이원교, 박종광, 류홍우, “전력전자 System의 Cooling System”, 전력 전자학회 2004년도 추계학술논문집, pp. 120~123, 2004.

감사의 글

논문을 마무리 하고 ‘감사의 글’을 쓰려고 하니 지난 대학원 생활이 주마등처럼 스쳐 지나갑니다. 직장생활과 학업을 병행하는 것이 결코 쉽지는 않았지만 주변 지인 분들의 많은 지지와 격려 덕분에 여기까지 올 수 있었던 것 같습니다. 논문 준비를 하면서 바쁘다는 핑계로 주위 분들에게 소홀하지는 않았으나 하는 격정도 있어 감사와 동시에 미안한 마음도 모든 분들에게 전합니다.

우선 논문을 마치는 마지막 순간까지 항상 학문적인 지식뿐만 아니라 친형님 같은 다정함으로 조언을 해주셨던 김호민 지도교수님께 깊이 감사를 드립니다. 아울러 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡아 많은 관심과 지도를 주신 오성보 교수님, 김호찬 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님께 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 또 지난 2년 동안 동거동락 하면서 대학원 생활을 같이 보낸 동기들에게도 고마움을 전합니다.

그리고 직장생활하면서 학업에 전념할 수 있도록 격려와 후원을 아끼지 않으신 존경하는 문성창 제주전력지사장님과 여러 팀장님들께도 깊은 감사와 고마움을 드립니다. 특히 논문 쓰느라 제대로 업무를 챙기지 못하고 있을 때에도 뒤에서 든든히 팀을 지탱해 주었던 우리 변환팀 직원들... 정말 고맙고 감사합니다.

항상 곁에서 힘과 용기가 되어준 사랑하는 나의 아내 고지은 여사님, 요즘 부쩍 자라 제법 사내 티도 나고 더 믿음직스러워진 큰아들 지원, 막대라고 아직까지도 어리광 피우는 귀여운 둘째 지환, 그리고 언제나 변함없는 사랑과 헌신으로 보살펴 주시는 존경하는 부모님과 장인, 장모님. 이번 기회를 빌어 진심으로 고맙고 감사하다는 말씀을 드립니다.

마지막으로 한정된 지면으로 여기에서 일일이 열거하지는 못했지만 저에게 많은 관심과 도움을 주신 고마운 모든 분들께 진심으로 감사드립니다.