

대전력 반도체 정류기 수냉식 냉각 설비 냉매 온도 제어시스템에 관한 연구

임익현, 류호선
한국전력공사 전력연구원

The Study of Thyristor Valve Water Cooling Control Systems

Ick-Hun Lim, Ho-Seon Ryu
Korea Electric Power Research Institute

Abstract

The design and implementation of thyristor water cooling control systems is considered in this paper. Coolant water is pumped through the thyristor heat sinks where heat is transferred from the thyristor to the water. This water is then pumped through outdoor air-to-water heat exchangers where heat is transferred to the outside air. Since the water must be pure, it is filtered and de-ionized. Also the water temperature must be below dew-point temperature. Redundant pumps, outdoor heat exchangers, power supply system, controller monitoring system are provided for system reliability and availability.

I. 서론

대전력 반도체가 출현함에 따라 대용량 직류송전용 인버터 컨버터, 발전기 여자시스템 위상제어 컨버터 또는 다이오드 정류기, 기타 대용량 전동기 가변속 제어용 인버터등에 널리 사용하게 되었다. 반도체 정류기가 전류를 제어할 때 필수적으로 발생하는 열 발생 문제를 효과적으로 전달하여 반도체 접합부 온도를 적정 온도 이하로 유지시키는 일은 매우 중요한 일이다. 본 논문에서는 직류송전용 인버터/컨버터 수냉식 냉각설비를 중심으로 해서 설비의 구성, 설계 기술을 기술하고, Heat Sink의 이슬점 방지를 위한 냉매의 온도제어 알고리즘과 또한 수십만 볼트 전압에 대해서 충분히 절연 내력을 가질 수 있는 순수 제조과정 및 순환 사이클, 냉매의 온도변화에 따른 수축팽창, 그리고 부분적 누설시 이를 흡수할 수 있는 팽창 탱크, 그리고 이러한 설비의 신뢰성을 증대시키기 위해서 필수적으로 구비해야 할 기기 구성과 제어 알고리즘을 연구한 논문이다.

II. 냉각 시스템의 구성 및 설계

1. 밸브 냉각기의 일반적 고찰

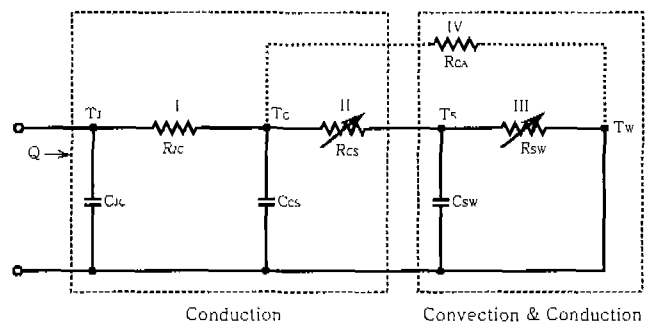


그림 1. 반도체 Heat sink 열 저항 모델링.

그림 1은 발열체와 냉각 방열판 그리고 온도사이의 열 저항 모델을 나타내고 있는 것으로서 I부분은 반도체의 접합점과 반도체 소자 외함 전기 전도체사이의 열 저항을 나타내고 있는 것이며, II는 반도체 외함 전기전도체와 방열판 사이의 열 저항 모델, III는 방열판과 냉매 온도사이의 모델, IV는 반도체 외함과 주위온도사이의 모델이다. IV부분은 실제로 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 보통 생략한다. 또한 C_{JC} 는 접합점과 반도체 외함사이의 열용량을 나타내는 파라미터이고, C_{CS} 는 반도체 외함과 방열판 사이, C_{SA} 는 방열판과 주위의 온도사이의 파라미터이다. 저항 II는 방열판과 반도체 소자를 압축해주는 압축강도와 반도체 소자 외함 반도체부분과 방열판 사이에 도포하는 표면처리제(전기전도 증강 및 열전달 증강) 또는 간극저항에 의해 변화되어 질 수 있기 때문에 가변저항으로 표현한다. 그리고 III는 방열판과 냉매 온도에 관한 열저항 모델을 나타내주는 것으로 냉매의 유속이나 흐름의 형태, 그리고 방열판의 형태등에 따라 방열효과가 결정되어 질 수 있기 때문에 가변저항으로 표현하였다.

2. Heat Sink 설계의 수학적 배경

그림 1에서 반도체 소자의 접합온도(T_J)와 냉매 온도(T_W) 그리고 열전달량(Q)과 열저항에 관한 수식은 다음과 같다.

$$T_J - T_W = Q(\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SW}) \quad (1)$$

$$\theta_{JC} = \frac{L_1}{k_1 A_{JC}} \quad (2)$$

$$\theta_{CS} = \frac{L_2}{k_2 A_{CS}} \quad (3)$$

$$\theta_{SW} = \frac{1}{F_c A_{SW}} \quad (4)$$

여기서 A_{JC} 는 접합점에서 반도체 외함까지의 접촉면적, A_{CS} 는 반도체 외함에서 방열판까지의 접촉면적 그리고 A_{SW} 는 방열판과 냉매와의 접촉면적을 표현하고 있다. L_1 은 접합점에서부터 반도체 외함까지의 두께, L_2 는 반도체 외함에서부터 방열판까지의 접촉면적을 표현하고 있다. 또한 F_c 는 방열판과 냉매와의 전도에 의한 방열계수를 표현한 것이 k_1 은 접합점에서 반도체 외함까지의 열전도계수, k_2 는 반도체 외함에서부터 방열판까지의 열전도계수를 나타내고 있다.

3. Cooler의 설계

열교환 방식은 관에 의해 분리된 공간에 온도가 다른 2종류의 유체가 유동하고, 관을 통한 열전도 및 관 표면에서의 유체 대류에 의해 2유체간의 傳熱을 시키는 表面式 열교환기이다. 균일 두께 b 의 관을 고려해서, 그 양면온도가, t_1 , t_2 로 유지되며 정상상태에 있다고 한다면 미소면적 dA 를 흐르는 단위시간당의 전열량 dQ 는 다음의 전열속도식으로 나타난다.

$$dQ = \frac{k_w}{b} \cdot (t_1 - t_2) \cdot dA \quad (5)$$

여기서 k_w 는 열전도율이라고 하며 재질에 의한 물성식으로 온도의 함수이며 銅의 경우는 292, 알루미늄은 133~165[kcal/m·hr·°C](@20°C) 정도이다.

표면식 열교환기의 기본전열식 : 전열속도식과 유체간의 열收支式을 복합 풀이하므로써, 여러 유동형식에 대한 기본전열식을 이끌 수 있다. 식 (5)를 정리하면

$$Q = AUF_t \cdot \Delta T_{lm} \quad (6)$$

여기서 Q : 전열량(kcal/hr), A : 전열면적(m^2)
 ΔT_{lm} : 대수평균 온도차(°C), U : 총괄전열계수(kcal/

$m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$), F_t : 온도차 보정계수이다.

총괄전열계수는 평활관의 경우

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + r_o + \left(\frac{A_o}{A_m}\right) \frac{t_s}{\lambda} + r_i \left(\frac{A_o}{A_i}\right) + \frac{1}{h_i} \left(\frac{A_o}{A_i}\right) \quad (7)$$

A_o : 1(m) 마다의 관외 표면적 = $\pi D_o(m^2/m)$

A_m : 對數 평균관 표면적 = $\pi(A_o - A_i) / \ln(D_o/D_i)(m^2/m)$

A_i : 관 1m 마다의 관내 표면적 = $\pi D_i(m^2/m)$

D_o, D_i : 관외 및 내경(m)

h_o, h_i : 관외내측 경막전열계수[kcal/m²hr°C]

r_o, r_i : 관외내측 오염계수[m²hr°C/kcal]

t_s :관두께(m), λ :금속의 열전도율[kcal/mhr°C]

4. 냉매의 특성

수냉식에서 대지에 대해서 매우 높은 고전압으로 충전된 Heat Sink를 냉각시키기 위해서는 이온이 전혀 없는 순수를 제조해서 전기적으로 밸브의 안전운전을 보증해야한다. 혹독한 동절기에 냉매가 동결되지 않도록(보통 -15°C) 해야하고, 미생물의 생성을 억제해야하는 필연성 때문에 순수에 에틸렌 글리콜 혼합물을 75% : 25% 체적 비로 혼합한다. 그 특징은 분자식이 $CH_2(OH)CH_2OH$ 이고, 전도도는 3×10^{-7} $\mu s/cm$ 이하, 최대 비중 1.032 @20°C, 최소 비중 1.025 @20°C이다.

5. 냉각 본체에 설치된 기기

주순환 펌프 : 보통 두 대의 펌프가 구비되어 한 대는 운전이고 한 대는 예비용이다. 운전중인 펌프가 고장이 발생하거나, 유량이 규정치 이하로 내려가거나 하면 자동으로 예비 기기로 절체된다. 또한 운전중인 펌프가 정해진 운전시간이상 운전시에도 예비 기기로 절체된다.

3-Way Valve(삼로 밸브) : 삼로 밸브는 냉각회로의 냉매를 방열기 회로에서 우회 회로로 변경시켜 흐르게 함으로써 저전력 변환이나 대기온도가 낮은 상태에서 사이리스터 밸브를 저온의 냉각수로부터 보호한다.

냉각수 보충장치 : 냉매의 순환은 폐쇄 밀폐형으로 미량의 누설이나 증발로 인한 부족분을 보충해주는 설비가 있다. 순수와 에틸렌 글리콜을 규정 혼합 비율로 혼합하여 보충하며 낮은 전도도를 유지할 때까지 이온제거기를 통과시켜야 한다.

압력보정 및 제어설비(팽창탱크 및 주변장치) : 순환계통에 병렬로 연결된 팽창탱크는 냉매 유출로 인

한 손실 분의 순시 보충이 이루어지며 온도변화에 따른 체적변화로 순환계통의 압력을 일정하게 유지시켜 주는 역할을 수행한다. 팽창 탱크의 상부에는 고압의 질소탱크를 압력 조절장치를 통해 연결하여 압력을 보정해주고 공기와의 접촉을 막아서 공기중의 이온물질이 냉매 속에 용해되는 것을 방지한다.

이온제거기와 부대설비 : 이온 제거기는 두 세트가 설치되는데 제1 세트는 주순환 펌프가 운전 중에 냉매의 일부를 이온제거기에 순환 통과시켜 냉매의 전도도가 규정값 이하로 되도록 하며, 제2 세트는 냉매 보충 탱크 출구단에 위치해서 보충탱크의 냉매의 순도를 유지하는 것이다.

방열기 : 순환펌프 출구 쪽에 방열기가 설치되는데 발전소는 보조냉각수가 풍부하므로 수냉식을 주로 사용하는데 반해서 직류송전설비, 무정전 전원 공급기, 가변속 인버터는 공냉식이 주로 사용된다. 전자는 보조냉각수의 유량으로 온도제어를 수행하고, 후자는 여러 대의 방열기를 설치하여 송풍기로 불어내는 Air Blast Cooling 방식인데 송풍기 운전대수를 제어해서 온도제어를 수행한다. 공냉식 방열기의 용량은 대기의 온도가 최고점에 도달하는 상황에서 인버터/컨버터가 전 부하 출력시 발생하는 열량을 충분히 냉각시킬 수 있는 전열면적과 풍량이 되어야 한다.

감시용 스위치 및 전송기 : 냉각 시스템의 계측 시스템은 Heat sink 입구측 냉매 온도 감지기, 주순환 냉매 및 보충수 전도도 감지기, 냉매 유량측정기, 순환 펌프 입구측 여과기 전후의 차압스위치, 변환기 설치실의 온도 및 상대습도 감지기, 방열기 전후의 온도 감지기, 팽창 탱크내의 냉매 압력 및 질소압력 검출용 압력 및 스위치, 보충탱크 및 팽창 탱크 액위 레벨 스위치, 삼로변 개도 위치표시 전송기등이 있다.

III. 제어 시스템

1. 이슬점 온도 제어

수냉식 설비에서 중요한 제어항목의 하나는 냉매의 온도가 Heat Sink의 이슬점온도 이하로 절대 내려가지 않아야 한다는 점이다. 이슬점이란 대기 속의 수증기가 점점 차져서 포화상태에 다다르면 이슬이 맺히는데 그 때의 온도를 이슬점 온도라고한다. Heat Sink가 설치된 공간의 공기온도와 상대습도를 측정하여 이슬점을 계산한다. Heat Sink 및 판로 주위의 이슬점 온도보다 냉매의 온도가 낮을 경우 이슬이 발생하게 된다. 이 온도는 아래의 식을 이용해서 계산하게 된다.

$$k = 238.3$$

$$x = \text{LOG}(\text{rh}/100)/17.27 + \text{ta}/(\text{ta}+k) \quad (8)$$

$$\text{td} = k/[(1/x)-1]$$

여기서, rh는 주위공기 상대습도(%), ta는 주위공기 온도(°C), td는 계산된 이슬점 온도이다.

Heat Sink로 들어가는 냉매의 온도는 상기의 이슬점 온도에다 적정의 여유(5°C)를 두고서 제어한다. 또한 동절기에 옥외에 설치된 열 교환기에서 이슬점온도 이하의 냉매가 유입되지 않아야 하는데, 이는 온도차 어용 삼로변을 이용하여 규정 이슬점 온도 이하 일 때는 옥외 방열기(Air Blast Cooler)쪽 흐름을 차단하고, 우회관로로만 순환이 이루어 지도록 한다. 냉매의 온도제어는 동력절감을 위해 일차적으로 방열기 송풍

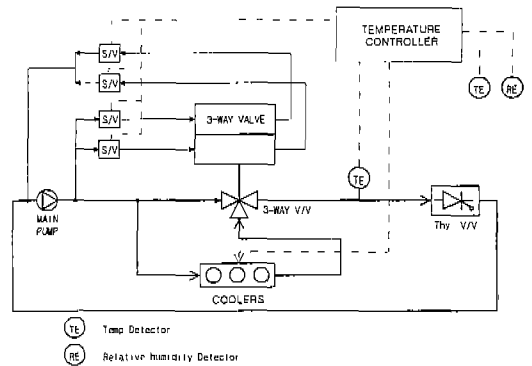


그림 2 : 삼로 밸브 동작 시스템

기의 운전대수를 제어하고, 이차적으로는 냉매를 방열기에서 우회시키느냐 아니면 통과시키느냐를 제어한다. 유량과 유로의 제어는 그림 2 에서 나타낸 바와 같이 삼로 밸브로 한다. 전력용 반도체가 견딜 수 있는 Critical Junction Temperature(120°C - 150°C)나 안전한 온도는 90°C 이하) 보다는 훨씬 낮은 온도를 유지해야한다. 디지털 제어기의 발달로 현대제이론 실증적용이 일부 발표되고는 있으나 아직까지는 고전적인 비례, 적분, 미분 동작을 수행하는 폐루프 제환제어가 주류를 이루고 있다.

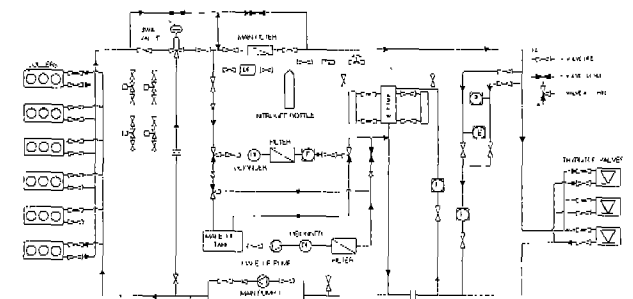


그림3 : 해남-제주 직류송전설비 냉각 플랜트 개요

2. 시스템 신뢰도 및 가동률 향상 대책

대용량 발전소의 발전기 여자시스템, 무정전 전원 공급장치, 가변속 속도제어장치와 직류송전용 인버터/컨버터의 운전 신뢰성은 매우 중요하다. 즉 냉각설비의 고장은 곧바로 전체 발전소 및 직류송전 시스템의 비상정지를 수반하며 더 나아가서는 전력계통의 불안정까지 초래한다. 시스템의 제어 및 동력전원, 제어기, 검출기, 조작기구의 신뢰성 있는 운전을 위한 조치가 강구되어야 하는데 그 방안은 다음과 같다. 직류송전 변환기의 경우 제어기의 가동률 목표치는 99.98%, 신뢰도 목표치는 연간 0.25 고장건/1년, M.T.T.R은 7 시간을 목표로 설계한다.

전원설비의 이중화 : 순환펌프와 옥외 냉각기는 동력전원 상실을 감한 해서 별개의 독립적인 소내 보조전원을 사용해서 병렬운전중인 전동기의 전원상실로부터 시스템이 정지되지 않도록 설계한다. 신호검출 전송기, 변환기 그리고 제어기의 전원은 주로 직류전원을 사용하는데 직류/직류, 교류/직류 전원공급장치를 병렬로 연결하여 이중화한다.

신호의 다중화 : 온도, 유량, 전도도등 제어량을 검출하고 변환하는 아날로그 및 디지털 신호는 계측기를 3 세트 또는 2 세트를 설치하여 운전하는데 디지털 입력의 경우는 "2 out of 3 Logic"등을 사용하고, 아날로그 신호는 중간값 선택기 또는 편차과다 발생시 경보 취명 로직등을 통해서 신뢰도를 증대시킨다. 2 Out of 3 Logic은 3 개의 디지털 입력신호중 2개 이상이 정상인 경우 비정상 상태라는 신호를 발생시킨다.

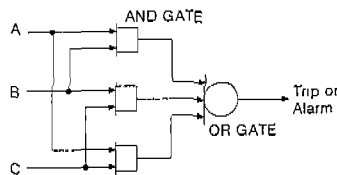


그림 4 : 2 Out of 3 Logic

중간값 선택기는 3 개의 아날로그 입력신호중 중간값을 선택하는 기능으로 어느 한 개가 비정상적으로 높든지 낮은 값이라도 중간의 신호를 취해서 제어 입력으로 사용하는 것이다.

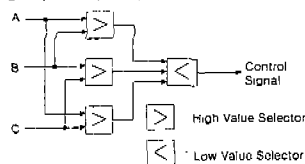


그림 5 : 중간값 선택기

연산 및 순차제어의 다중화 경우 아날로그 연산회

로에서는 이중화 실현이 다소 복잡하지만 디지털 기술의 발달로 시스템의 이중화와 삼중화가 거의 보편적인 실용화에 이르렀다. 직류송전 인버터/컨버터의 경우 하이브리드형 프로그래머블 로직 컨트롤러 (Programmable Logic Controller : PLC)를 사용해서 아날로그한 냉매 온도 연산제어와 펌프 기동정지 및 보호제한의 디지털 순차제어를 수행하고 있는데 PLC를 이중화(Master/Slave Controller 운전 방식)해서 Master의 자체 진단과정에서 고장이라고 판명되면 Slave Controller가 Hot Standby 형태로 시스템의 정지 없이 운전을 계속한다. 운전원이 직접판단해서 조작 운전하는 수동방식까지도 사용한다.

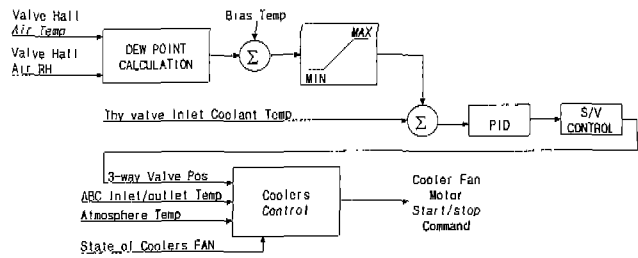


그림 6 : 삼로 밸브 및 방열기 대수 제어 블록도

표 1 : 경보 및 트립 신호 설정값

경보 및 트립 종류	설정값
정상 운전중 정류기 입구측	46℃
냉매 최대운전 온도	
입구측 냉매 과승 온도 경보치	48℃
입구측 냉매 과승 온도 트립치	50℃
입구측 냉매 과냉 온도 경보치	10℃
입구측 냉매 과냉 온도 트립치	5℃
냉매 유량 저하 경보치	0.92 P. U.
냉매 유량 저하 경보치	0.825 P.U.
냉매 전도도 과승 경보치	0.5μs/cm
냉매 전도도 과승 트립치	1.0μs/cm

참고 문헌

[1] J. Arrillaga MSc. Tech., Ph. D., D. Sc., C. Eng., F. I. E. E., "High voltage direct current transmission", IEE Power Engineering Series 6, PP.134,1988

[2] Baumann, H.; Heinemeyer, P., "Optimized Cooling Systems for Semiconductor Devices", Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, PP. 2336-2341, 1998

[3] GEC ALSTHOM Power Electronics International Ltd, "300MW HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT LINK", Operations Maintenance & Instruction Manual Volume 11, 1994.9