

전력전자 System의 Cooling System (2)

김찬기, 이원교, 박종광, 류홍우
전력연구원

Cooling System of Power Electronics System (2)

Chan-Ki Kim, Won Kyo Lee, Jong Kwang Park, Hong-Woo Rhew
KEPRI

1. 서 론

전력용 반도체를 신뢰성 있는 동작 범위 내에서 동작시키려면 전력용 반도체의 표면 온도가 높아져 열 폭주(Thermal Runaway)가 일어나지 않도록 제작사에서 제시하는 온도 범위에서 상시 작동할 수 있는 열 전달 장치를 가지도록 설계되어야 한다.

그림 1은 전력 변환기의 냉각 시스템의 열 저항 모델을 나타내고 있는 것으로 발열량과 주위의 온도 사이의 열 저항 모델을 나타내고 있다.

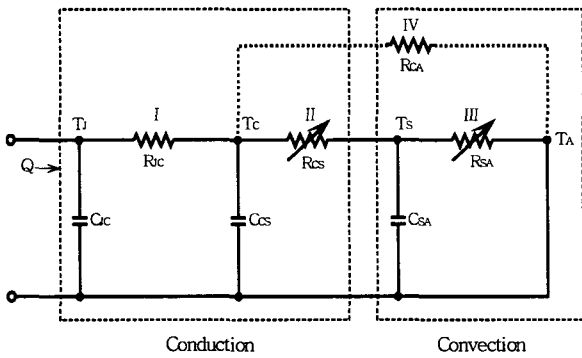


그림 1. 전력용 반도체 소자의 열 저항 모델링.

한편 수냉식에서는 전력용 소자의 열을 외부 방열판에 전달하는 냉각재의 유속과 냉각재의 열 전달을 그리고 냉각재의 열을 외부의 공기로 강제적으로 발산시키는 열 교환기의 풍속과 주위 온도가 수냉식 방열 시스템의 성능을 결정하는 주된 요소이다.

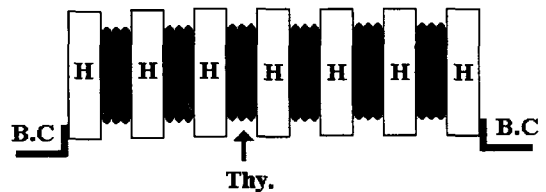
2. 수냉식 방열 시스템

수냉식 방열 시스템은 공냉식보다 더 효율이 높으며 전력 변환 시스템을 작게 만들 수 있고 열 교환기를 전

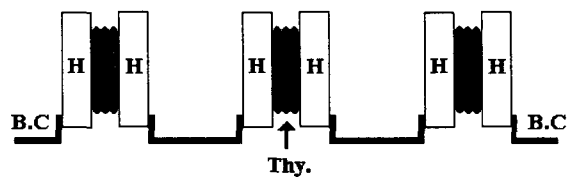
력용 반도체 소자로부터 분리 또는 멀리 설치할 수 있는 장점도 있다. 그러나 냉각재에 의한 전기적인 부식이나 응고의 문제점 그리고 주변 설비가 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 수냉식 방열 시스템의 설계는 일반적으로 다음과 같은 방법이 있다.

- 1) 파이프로 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 3가지 방식 중에서 세 번째 항은 냉각재의 재질을 물을 이용한 경우에는 사용된 적이 없고 두 번째 항은 간단하나 보수가 어렵고 냉각 효율이 떨어진다는 단점을 가지고 있기 때문에 첫 번째 항과 같은 방열 시스템이 사용되어 지고 있다.

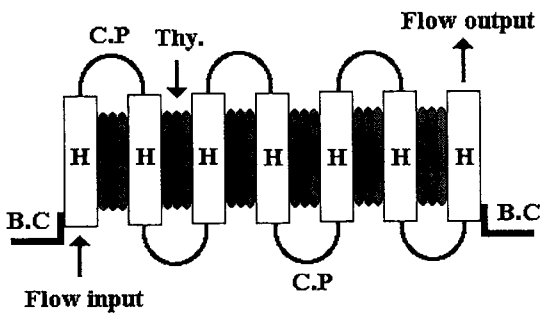


a) 스택 구조의 수냉식 방열 시스템.

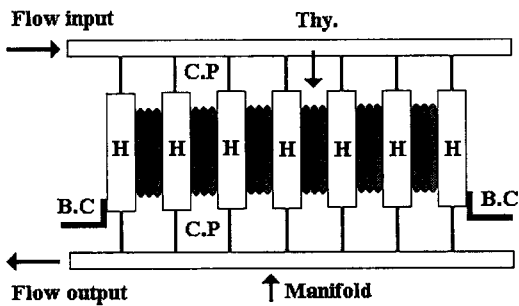


b) 개별 구조의 수냉식 방열 시스템.

그림 2. 수냉식 방열 시스템(B.C : 부스바 연결 부위, H : 방열판, Thy. : 전력용 소자).



a) 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결-직결



b) 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결-병렬

그림 3. 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결
(C.P : 연결 파이프, Thy. : 전력용 소자,
B.C : 부스바 연결 부위, H : 방열판)

전력용 소자는 냉각의 최적화를 위하여 양면 냉각 소자를 사용하는 것이 유리하기 때문에 그림 2와 같은 개별적인 또는 스택으로 만들고 있다. 또한 그림 3는 방열판 사이에 연결된 파이프 형태에 따른 방열 시스템의 구조로서 그림 3 a)와 같은 직결 방식이 있고 그림 3 b)와 같은 병렬 구조가 있다. 그림 3에서 직결 방식은 냉각재의 온도가 방열판 사이를 통과할 때마다 증가하기 때문에 최종 단계에 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 3의 b)의 경우는 방열판의 냉각은 균일하게 되는 장점을 가지고 있으나 냉각 파이프가 막히면 막히는 부위를 찾기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 수백 개의 전력용 소자를 가지고 있는 대용량 시스템에서는 파이프의 굵기가 큰 부분은 병렬 구조로 만들고 전력용 소자에 분배되어 들어가는 부분에서는 직결 구조로 병행하여 사용하는 것이 일반적이다.

3. 수냉식 방열 시스템의 주변 장치

대용량 수냉식 시스템은 그림 4에 보는 바와 같

이 구성되어 있다. 각 구성에 대하여 알아보면 다음과 같다.

- 1) 익스팬션 탱크(Expansion Tank)
- 2) 메인 펌프(Main Pump)
- 3) 열 교환기(Heat Exchanger)
- 4) 전력용 반도체 소자 냉각용 방열판
- 5) 탈 이온화 장치(Deionizer)
- 6) 메인 필터(Main Filter)

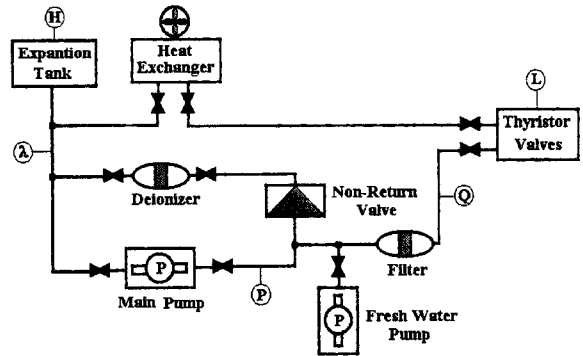


그림 4. 단일 수냉식 방열 시스템의 구조도

3.1. 수냉식 방열 시스템의 제어

수냉식 방열 시스템은 전력 변환 시스템의 자체 온도와 주위 공기 중의 상대 습도에 의해서 전력 시스템에 이슬이 생겨 전력 변환 시스템의 절연 파괴를 가져올 수 있기 때문에 이슬점 온도를 계산하여 전력 변환 시스템에 절연이 파괴되는 것을 막아야 한다. 식 20은 이슬점 온도(T_d)를 구하는 식을 보여 주고 있다.

$$T_d = \frac{K}{(1/X - 1)}$$

$$X = \frac{\log(RH/100)}{17.27} + \frac{T_a}{T_a + K} \quad (1)$$

여기서, $K = 238.3$, RH 는 상대 습도, T_a 는 공기 온도를 말한다.

3.2. 냉각재의 비교

물은 유속이 빠르기 때문에 냉각 효과가 높다. 그러나 전해질에 의한 부식, 그리고 결빙의 문제가 있고 전해질은 대부분의 회로에서 전력용 소자가 다른 전위를 가지고 물을 통하여 전류의 흐름이 일어날 수 있기 때문에 발생되어진다. 따라서 증류되고 탈 이온화된 물이 사용되어야 하고 수냉식 방열판은 구리나 청동과 같은 금속으로 제작되어야 한다. 결빙의 위험은 글리코질과 같은 성분을 물에 합성하여 냉각재로 이용하면 결빙점이 내려가기 때문에 많이 사용하는 방법이다. 반면에 기름은 물보다는 안전하지만 물보다 점성 계수(Viscous Factor)가

높기 때문에 냉각 효과가 떨어진다. 전해질에 의한 전류가 흐름이 발생하지 않고 결빙의 문제가 없다. 그러나 가연성이 있기 때문에 사용에 주의해야 하며 비가연성 기름은 높은 독성을 가진다. 식 21과 22는 발열량과 냉각재의 유속에 따른 온도 변화 수식을 나타내고 있다.

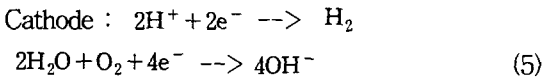
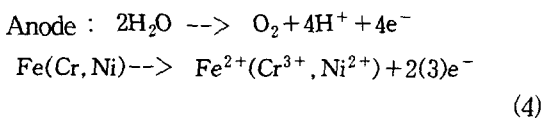
$$\text{물 (K}^\circ\text{C)} = \frac{\text{Watts}}{70 \times \text{litres/min. flow}} \quad (2)$$

$$\text{기름 (K}^\circ\text{C)} = \frac{\text{Watts}}{28.6 \times \text{litres/min. flow}} \quad (3)$$

대용량 수냉식 방열 시스템에서 순수한 물을 냉각재를 사용하는 경우보다 글리코겔과 같은 부동액을 순수한 물에 혼합하여 냉각재로 이용하면 순수한 물보다 냉각점이 낮아지고 냉각재에 이물질이 생기지 않는 특징이 있다.

3.3. 수냉식 시스템에서 전해질의 영향

다른 부도체와 다르게 물은 전해질에 의한 도체이다. 이것은 물에 전기가 흐를 때 화학적인 반응이 생긴다는 사실을 의미하며 수냉식 시스템에서는 이러한 전기 화학적인 문제를 고려해야 한다. 물에서 전기의 흐름에 도움을 주는 전하는 H⁺이온과 OH⁻이온이다. 또한 물에 다른 물질이 녹아 있으면 물은 용매로 작용한다. 그림 3에서 본 바와 같이 스택 구조형으로 수냉식 방열 시스템을 만들 경우 싸이리스터 양쪽 냉각 파이프에는 누설 전류가 금속 커플링을 통하여 흐른다. 이러한 전류는 금속 표면에 화학적인 부식을 가져온다, 이러한 작용은 애노드 방향과 캐소드 방향에 식 23과 식 24와 같은 화학 반응식이 성립한다.



따라서 주기적으로 탈 이온화 장치를 가동하여야 한다.

4. HVDC 송전 시스템의 수냉식 냉각 시스템

4.1. 대용량 컨버터의 열 손실

대용량 컨버터 시스템의 싸이리스터 밸브는 단순히 싸이리스터만을 냉각시키는 것이 아니라 싸이리스터의 보호 회로에서 발생하는 손실도 냉각해야 하고 전력 변환 시스템도 작게 만들 필요가 있기

때문에 싸이리스터 스택의 손실을 구할 경우에는 이러한 요소가 포함되어야 한다.

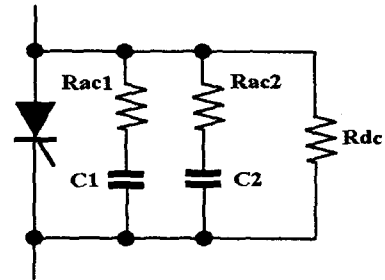


그림 5. HVDC 시스템의 밸브 구성

그림 5은 HVDC 시스템의 싸이리스터 밸브 구성을 보여주고 있으며 싸이리스터 밸브의 손실은 다음과 같이 구해진다.

- 1) 싸이리스터 도통 손실 (W_{TH})

$$W_{TH} = \frac{nI}{3} [V_t + RI(\frac{2\pi - \mu}{2\pi})] \quad (6)$$

- 2) 싸이리스터 턴-온 손실 (W_{ON})

$$W_{ON} = F_{GVI} \times f \quad (7)$$

여기서 F_{GVI}는 순방향 게이트 전류와 순방향 게이트 전류에 대한 계수를 표현하고 있다. 보통 싸이리스터의 턴-온 손실은 싸이리스터 도통 손실량의 10%미만으로 추정되며 보다 정확한 값은 시스템의 동작 상태에 따른

4.2. 싸이리스터 스택의 구성

그림 6은 HVDC 시스템 밸브를 계층 구조로 구성하여 Quardrive로 만든 경우의 수냉식 회로를 보여 주고 있다. 또한, 그림 7은 싸이리스터의 더워진 냉각재를 강제 팬을 이용하여 대기로 냉각시키는 열 교환기를 보여 주고 있다. 그림 7은 싸이리스터에서 발생하는 열량을 대기 중으로 발산시키는 열 교환기를 보여주고 있는 것으로써 HVDC 시스템에는 Pole 당 6개의 열 교환기가 설치되어 있으며 하나의 열 교환기가 담당하는 열량은 HVDC 시스템의 하나의 Pole에서 발생하는 열량의 1/6이다. 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 냉각 능력을 가진 보조 팬 1개로 구성하는 것이 일반적인 구성이며 본 시스템에서는 여유분을 고려한 N+1(50% x 2 + 50%) 시스템 설계 개념을 가지고 있다.

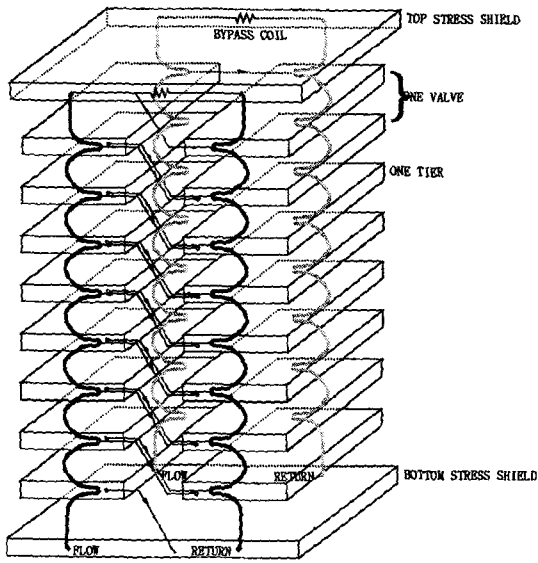


그림 6. 싸이리스터 밸브의 수냉식 시스템.

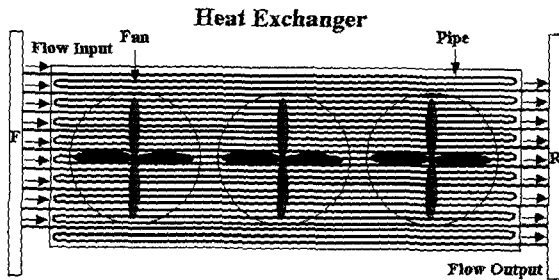


그림 7. 열 교환기의 외관도

5. HVDC 시스템 평가

싸이리스터의 온도 레벨은 그림 8과 같이 싸이리스터 온도 레벨로 표현할 수 있다. 그림 9는 열교환기의 냉각특성을 수식화 한 것이다. 그림 9에서 T_m 은 물의 평균 온도, U_m 은 물의 평균 유속, D 는 열 교환기의 직경, T_A 는 공기의 대기 온도 그리고 U_A 는 공기의 유속을 표현하고 있다.

물의 Reynolds 수는 식 8과 같이 구해 질 수 있다.

$$Re_w = \frac{U_m D}{\nu_w} \quad (8)$$

Nusselt(열 전도율과 열 전달 율의 비율) 수는 식 34와 같이 구해 질 수 있다.

$$Nu_w = 0.023 Re_w^{0.8} Pr_w^{0.3} \quad (9)$$

$$h_w = \frac{k_w Nu_w}{D} \quad (10)$$

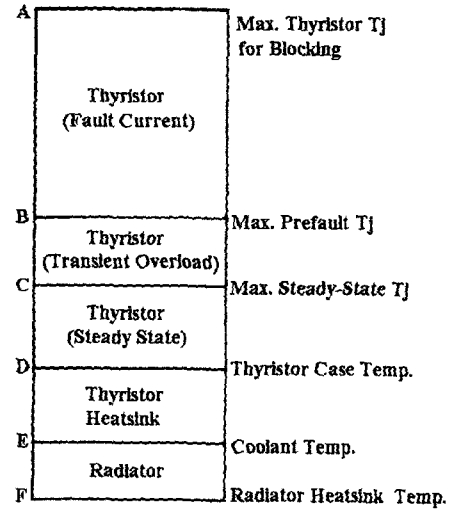


그림 8. 싸이리스터의 온도 레벨

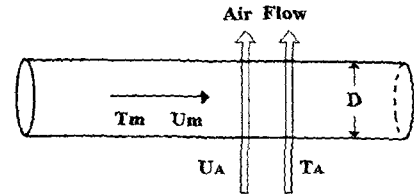


그림 9. 열 교환기의 강제 공냉식

마찬가지로 공기의 Reynolds 수는 식 11과 같이 구해 질 수 있고,

$$Re_A = \frac{U_A D}{\nu} \quad (11)$$

Nusselt 수는 식 13과 같이 구해 질 수 있다.

$$Nu_A = (0.4 Re_A^{0.5} + 0.06 Re_A^{2/3}) Pr^{0.4} \quad (12)$$

$$h_A = \frac{k Nu_A}{D} \quad (13)$$

결론적으로 열 저항 R_w 는 식 14와 같이 구해 질 수 있으며 열 교환기의 냉각 능력은 식 16으로부터 추론할 수 있다.

$$R_w = \frac{1}{1/h_w + 1/h_A} \quad (14)$$

$$Q = AR_w \Delta T = \pi DR_w (T_m - T_A) \quad (15)$$

$$T_m = \frac{Q}{\pi DR_w} + T_A \quad (16)$$