

수력발전소 큐비클 와전류에 의한 발열현상 분석

옥연호, 이은춘, 신강욱*, 홍성택
한국수자원공사

Analysis for Generation of Heat of Cubicle Eddy Current in A Hydroelectric Power Plant

Ok, Yeon-Ho, Lee, Eun-Chun, Shin, Gang-Wook, Hong, Sung-Taek
Korea Water Resources Corporation

Abstract - The hydroelectric Power plant of the KOWACO have been establishing and operating a full scale electric power facility, doing the largest generation during the flood period of the summer season. When the huge capacity generator is run like the Chung-Ju's hydroelectric Power plant, the generator current per generator flows a great current estimated at 5,900 A. The bus bar of a great current flows in cubicle, owing to the bus bar current Eddy current is created around magnetic substance and a local heating phenomenon occurs due to Joule heat finally. a local heating phenomenon still exists the danger of safety accident due to contact and accompanies losses enough to heating capacity inevitably. this study applies and examines related theory and numerical formula about the heating cause of a great current & enforces technical verification about the method of heating reduction previous managed at the site.

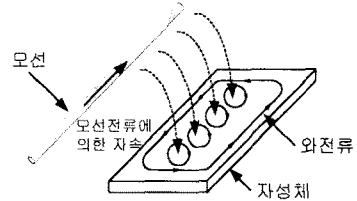


그림 1 와전류 발생

와전류가 도체내에 발생하면 정상전류 본포에 영향을 주며, 동시에 와전류에 의한 Joule열이 생겨 전력의 손실을 유발하는데, 이 손실을 와류손(Eddy Current Loss)이라고 한다. 교류전원에 의한 자속 변화로 도체내에 발생하는 와류손실 $P_e(W)$ 는 와전류 회로의 저항을 $R(\Omega)$, 와전류를 발생하게 하는 유기기전력을 $e(V)$ 라 하면 $e^2/R (W)$ 에 비례하므로,

$$P_e = A \cdot \sigma \cdot f^2 \cdot B_m^2 (W) \dots \dots \dots (식 1)$$

여기서, σ : 도체의 도전율($1/\Omega m$), f : 주파수(Hz)
 B_m : 최대 자속밀도(Wb/m^2), A : 비례상수

의 관계가 성립되며, 교류기기의 철심에서 흔히 발생하므로 철손에 해당된다.

2.2 발열 현상 분석

큐비클 발열현상은 패널 연결용 볼트 부분과 후레임을 구성하는 앵글부분에서 집중적으로 발생하였으며, 그림 2에서 보는 것과 같이 도장부분이 변색 될 정도로 심하게 나타났으며, 변색된 부분은 대부분 패널 상단이며, 국부적으로는 측면의 연결부위에서도 일어났다.



그림 2 패널 발열부분 페인트 변색 상태

충주 제1수력 발전소 발전단 큐비클에 대하여, 각 호기별로 온도상승이 심한 부분을 발전기 출력 변화에 따라 온도 상승값을 조사하였으며, 측정지점은 그림 3과 같다.

1. 서 론

한국수자원공사 충주 수력발전소의 경우 매년 여름철 홍수기에 발전단의 전류가 최대출력 110MW에서 4,950A까지 흐르고 있으며, 이와 같은 대전류로 인하여 주 모선을 보호하고 있는 큐비클에서 발열현상이 나타나 설비의 안전성과 효율 측면에서 문제점이 대두되어 '87년부터 '93년까지 장기간에 걸쳐 제작자와 합동으로 발열원인을 규명하고 대책을 제시하여 실제 현장에 적용하였다. 그러나 아직까지도 발열이 일어나고 있으며, 이에 대한 기술적 이론 정립이 명확히 되어있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수력발전소의 대전류에 의한 발열원인을 전자기 해석적으로 규명하고 대책을 제시하여, 대전력 계통에서 발열에 의한 시스템 안정화를 구축하는 데 목적이 있으며, 자체해석 수식을 이용하여 발열량을 산출하는 과정을 정리하고 수식 계산치의 검증을 위하여 컴퓨터 프로그램을 이용, 비교 분석코자 한다.

2. 본 론

2.1 와(渦)전류

도체를 관통하는 자속이 변하던가 자속과 도체가 대칭적으로 운동하여 도체내의 자속이 시간적 변화를 일으키면 이 변화를 막기 위하여 도체내에 국부적으로 형성되는 임의의 폐회로를 따라 전류가 유기되는데, 이 전류를 와전류(Eddy Current)라 한다. 이 전류의 크기 및 흐르는 모양은 그림 1과 같이 도체의 형상, 크기, 도전율 및 자속의 시간적 변화 양상에 따라서 정해지는 매우 복잡한 모양을 갖는다.

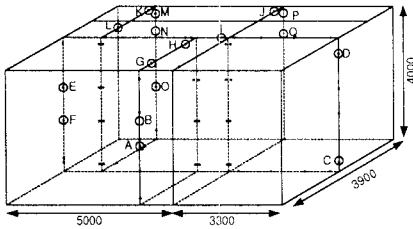


그림 3 온도측정 지점 표시도

2.2.1 제1호기 큐비클 온도상승 현황

온도 측정기기는 일본 HIOKI사의 Temp' Hi - Tester 3412이며, 측정범위는 -50 ~999℃까지이다. 총주 제1수력 1호기 출력별 온도상승 현황을 보면, 그림 4와 같다. 측정계절은 실내온도가 30℃를 넘는 여름철을 택하였으며, 상승온도 측정시의 출력은 최대출력과 50% 출력 두 종류로 하여 비교하였다. 측정결과를 보면 50% 출력시 온도상승치가 안정적인 형태를 유지하고 있으나, 최대출력시는 국부적 발열현상이 약 3개소에 나타났으며, 발열지점은 G, J, K 지점으로 모선 BUS의 불평형 구간과 자성체와 비자성체가 접하는 부분임을 알 수 있다.

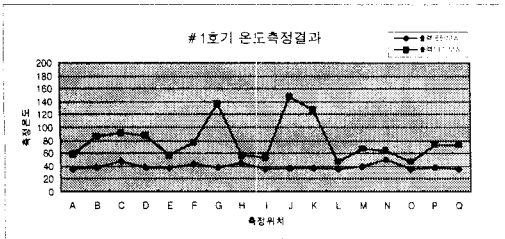


그림 4 총주 제1수력 1호기 온도측정 결과

2.2.2 각 호기별 측정결과 분석

제1수력 4대의 발전기 출력별 온도상승치를 측정한 결과 출력이 약 70~80% 정도에서는 100℃ 이하에 비교적 안정적으로 운영되고 있었다. 그러나 홍수기의 최대출력 운전시에는 각 호기에서 100℃를 상회하는 국부적 발열현상이 일어나고 있었으며, 그 발열지점을 호기별로 나타내면 표 1과 같다.

표 1 호기별 발열지점 비교

| 일차 | 출력 (MW) | 100℃ 이상 발열 지점 | | | | | | | | | | | | | | 최고 온도 | | |
|-----|---------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | | O | P |
| 1호기 | 110 | | | | | | | ● | | | ● | ● | | | | | | |
| 2호기 | 110 | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | | ● | | |
| 3호기 | 110 | | | | ● | ● | | ● | | | ● | ● | ● | | | | | |
| 4호기 | 110 | ● | | | | | | | | | ● | | | | | | | |

발열지점을 종합해 보면 자성체와 비자성체의 근접구간이며, 큐비클내 모선배열이 복잡한 부분에서 온도상승이 일어남을 알 수 있다. 그리고 외함의 중간지점보다는 가장자리 부근에서 심하며, 또한 패널과 패널의 연결부분이 높은 것으로 나타났다.

상기 지점 외에서도 국부적으로 발열이 일어나지만 그 정도가 약 60~80℃정도로 심한 편은 아니나, 특이한 점은 발열지점이 옮겨진다는 것이다. 즉 큐비클 체결볼트를 재 조임 한다든지 편조동선(Flexible Wire)등으로 Jumping을 하면 국부발열 개소가 다른 곳으로 전이되는 현상들이 일어났다. 이와 같은 현상은 구조물 변경에 의한 자로(磁路)의 변경에 기인된 것이라고 판단된다.

2.3 발열 원인

총주 제1수력의 발전단 큐비클 외함의 발열현황을 보면 저출력에서는 그 정도가 약하게 나타나지만, 최대출력에서는 국부적으로 100~300℃정도까지 상승하였다. 발열이 일어나는 원인은 모선 BUS에 대전류가 흘러 주변에 강자계를 형성하고, 강자계의 자속이 외함 철판과 쇠교함으로 외함표면에 와전류가 흐르게 된다. 형성된 자로를 통하여 와전류가 순회하면서 저항에 의한 주열이 발생하는 것으로 판단된다.

2.3.1 자계의 세기 및 자속밀도

총주 제1수력의 발전기 최대출력 운전시 BUS에 흐르는 대전류에 의한 자계의 세기를 구해보면 다음과 같다. 최대출력시 모선 전류는

$$P = \sqrt{3} VI \cos\phi (kW) \dots\dots\dots (식 2)$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos\phi} (A)$$

$$= \frac{110,000(kW)}{\sqrt{3} \cdot 13.8(kV) \cdot 0.95} (A)$$

$$= 4,850 (A)$$

직선도체에 의한 큐비클 외함 임의의 한점에 대한 자계의 세기는 비오-사바르 법칙에 의한 식에 의하여,

$$H = \frac{I}{2\pi R} (AT/m) \dots\dots\dots (식 3)$$

여기서, I : 직선도선전류 (3상×4,850A=14,550A)
R : 직선도선과 외함간의 평균거리 (1m)

따라서,

$$H = \frac{14,550}{2\pi \cdot 1} (AT/m)$$

$$= 2,317 (AT/m)$$

자계의 세기에 의한 자속밀도는 식 4에 의하여

$$B = \mu H \dots\dots\dots (식 4)$$

여기서, B : 자속밀도 (Wb/m²)
μ : 투자율 (4π×10⁻⁷)
H : 자계의 세기 (AT/m)

따라서,

$$B = \mu_0 \times \mu_s \times H$$

$$= 4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 2,317$$

$$= 0.0029 (Wb/m^2)$$

∴ 1(Wb/m²) = 10⁴ (gauss) 이므로,

$$B = 0.0029 \times 10^4 (gauss)$$

$$= 29 (gauss)$$

위와 같이 발전기 출력단 큐비클 외함의 평균 자계의 세기는 2,317(AT/m)이고, 이로 인한 외함 표면의 자속밀도는 29(gauss)정도로 나타났다.

대전류의 영향으로 자계의 세기 및 자속밀도의 크기가 대단히 크게 나타나 모선 근처에 접할수록 자계의 영향은 더욱 클 것으로 판단된다.

2.3.2 발열원인 분석

대전류가 흐르는 도체 주변에는 강력한 자계가 형성되며, 그 크기는 도체로부터의 거리에 반비례하고 전류의 크기에 비례한다. 총주 수력발전소 발전단 큐비클의 발

열 현상도 이와 같이 해석하여 유추해 볼 수 있다. 자계의 영향으로 파라데이(Faraday)법칙에 의하여 주변 자성체에 기전력이 유기됨과 동시에 자화된 자성체에는 와전류가 생성하여 흐르게 된다. 생성된 와전류는 유기기전력의 차이에 의하여 어떤 순환 회로를 만들고, 그 회로를 따라 흐르는 전류와 저항에 의하여 주울(Joule)의 법칙에 의한 주울열이 발생하게 된다. 여기에서 생성된 주울열이 바로 큐비클에서 국부적으로 일어나는 발열현상이다.

2.4 자계해석 컴퓨터 시뮬레이션

큐비클 외함에 형성되는 자계 분포를 해석하기 위하여 Biot-Savart 공식을 기초로 하여 MathWork사에서 개발한 수치 해석 프로그램 툴인 Matlab을 이용하여 스크립트(script) 파일로 큐비클 외함 패널에 형성되는 자계해석용 프로그램을 개발하였다.

자계해석을 수행하기 위하여 자계해석 영역을 큐비클 내 도선의 놓여진 위치에 따라 A영역에서 G영역까지의 7개의 영역으로 구분한 후, 각 영역에서 가장 가까운 패널 즉, 수직으로 만나는 패널중에서 도체와 평행선상에 놓여진 선상에 대한 자계해석을 실시하였으며, 이 때 구하고자 하는 패널의 지점에서 형성되는 자계는 주요 영역에 대해서만 고려하였으며, 기타 영역이 미치는 자계요인은 무시하였다.

프로그램은 7개의 영역에 대해 각각 다르게 구성되며, 전체적으로는 두 종류로 구분하였다. 첫째는 모든 지점(point)의 위치에 따라 자계의 크기를 비교하여 한꺼번에 나타내도록 작성하였으며, 둘째는 프로그램 운영자가 관심을 갖는 임의의 지점에 대해서만 자계 곡선과 자계 밀도 곡선을 나타낼 수 있도록 프로그램화하였다.

2.4.1 자계 평형 구간 시뮬레이션

자계의 평형구간인 A부분의 시뮬레이션 결과를 보면 그림 5 및 6과 같다.

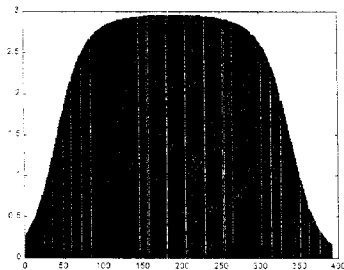


그림 5 A영역의 지점 별 자계 분포 결과

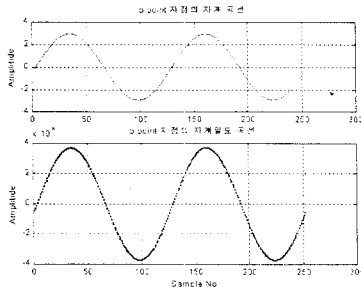


그림 6 A영역 196 지점에서의 자계 곡선과 자계 밀도 곡선

2.4.2 자계 불평형 구간 시뮬레이션

자계의 불평형 구간인 G영역의 시뮬레이션 결과를 보면 그림 7 및 8과 같다.

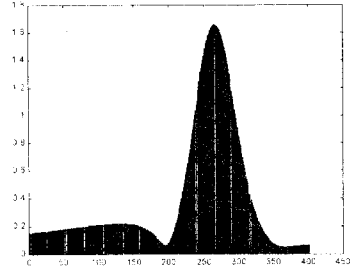


그림 7 G영역의 지점 별 자계 분포 결과

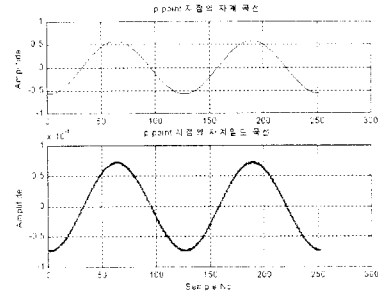


그림 8 G영역의 201번째 지점에서의 자계 곡선과 자계 밀도 곡선

3. 결 론

충주 수력의 경우 '87년 여름 4대의 발전기를 정격출력으로 운전하던중 발열현상을 발견하였으며, 대전력 계통에서 발생할 수 있는 국부적 발열현상은 파라데이 전자유도 법칙과 비오사바르 법칙에 의하여 자계의 세기에 의한 와전류로 밝혀졌으며, 대전력 계통의 큐비클에서 발열이 일어나는 원인은 대전류 모선주변에 강자계 형성, 자성체에 유기기전력 생성, 와전류 순회, 순환 회로에 주울열 발생, 국부적 발열 발생 등이다.

이와 같은 국부적 발열현상을 방지하기 위해서는 대전류에 의한 자계형성이 이루어지지 못하도록 외함 재질을 비자성체 사용하는 방법과 대전류 모선으로부터 패널 외함간의 거리를 무한 이격시키는 방법이 있으나, 경제성과 공간확보 측면에서 시행하기가 근본적으로 어려움이 있다. 따라서, 충주댐의 경우와 같이 현장에서 조치할 수 있는 방안은 발생된 와전류 회로를 차단하거나 와전류 분산 및 자기차폐 방법이 가장 유용하며, 이 3가지 방법을 충주수력 13.8kV 큐비클에 적용한 결과 강자계로 인하여 생성된 와전류를 적절히 차단 및 분산을 시킴으로써 국부적으로 370℃까지 상승되던 온도를 허용 규정치인 110℃이하에서 비교적 안정되게 운영되고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 高電壓大電流工學, 청문각, 1995
- [2] 電氣磁器學 演習, 文運堂, 1982
- [3] 電氣磁器學, 教材編纂委員會, 1982
- [4] 電氣磁器學, 文運堂, 1989
- [5] 電氣工學大事典, 技多利, 1993
- [6] 電氣·電子計測, 文運堂, 1982
- [7] 3차원 자계해석을 통한 GIS모선의 와전류에 의한 온도 상승, 전기학회, 1999
- [8] 전국의 송전선로 전자기 측정치와 계산치와의 비교분석, 전기학회, 1999
- [9] 한국산업규격(KSC 4057-1982)
- [10] 일본전기공업회규격(JEM 1153-1974)
- [11] 국제전기협의회(IEC694-1980)