

교류 가변속 장치의 냉각팬 적용에 의한

수력 발전기 손실 저감

허 성 광 * 류 홍 우 * 박 민 호 **

*한국전력공사 기술연구원 자동제어연구실 **서울대 공대 전기공학과

Loss Cut of Air-Cooled Waterwheel Generator with AC

Variatile Speed Drive for Cooling Fan Motor(s)

Sung-Kwang Hur*, Ilng-Woo Rhew* Min-Ilo Park**

* A & C Research Center KEPCO. **Dept. of Elect. Eng. Seoul Nat'l Univ.

ABSTRACT

The air-cooled waterwheel generator has a fan connected to waterwheel shaft or motor driven fan or fans. The fans are operated at constant speed, constant input, regardless of generator loss which is varied according to generator output and coolant temperature. Energy savings may be possible if the cooling air flow is controlled according to generator output and air temperature depending on season. The simulation and experience have been done on the 22.6 KVA Waterwheel generator by using AC variable speed drive. The results gave us los cut of generator.

1. 서 론

교류 가변속 장치는 전력전자 기술의 발달에 따라 종래 정속운전 하던 유도 전동기를 손쉽게 속도제어할 수 있게 되었고, 팬이나 펌프 구동용 유도 전동기에 적용하여 유량을 제어함으로써 과거 덤퍼나 배인 등에 의한 방식에 비하여 정격 부하 이하에서 현격한 입력의 저감을 가져와 그 사용이 증대되고 있다.

이와 같은 기능을 가진 교류 가변속 장치를 발전기 냉각팬에 적용 하여 냉각 풍량을 기변하는 방안을 검토 하였다.

발전기 냉각은 수력의경우 일반적으로 공기냉각 방식을 채용하고 있으며, 공기 순환 방식에 따라 개방형과 폐쇄형으로 크게 구분된다.

냉각 공기팬의 구동은 자냉식일 경우 자축에 직접 되어 있고, 타냉식일 경우 전동기에 의한다.

이들 팬은 일정 속도로 회전하면서 냉각공기를 순환시켜 발전기 손실로 발생된 열을 냉각시키는 역할을 하며, 정격 출력에서의 발생손실을 충분히 냉각할 수 있도록 설계되어 있다. 그러나 정속으로 회전함으로써 발전기 출력이나 냉각 공기의 계절적 온도 변화에 무관하게 일정 풍량으로 운전하고 있어 냉각 동력은 거의 일정하다. 이러한 냉각팬 구동 동력을 발전기 손실에 포함시킬 경우 발전기의 효율을 떨어 뜨리게 되고, 저출력시에는 그 영향이 현저히 커진다. 이와 같이 정속 운전되는 발전기 냉각팬 구동 전동기에 교류 가변속장치를 적용하여 발전기 출력 및 냉각 공기 온도변화에 따라 구동 전동기 속도를 변화시켜 풍량을 조절할 경우 전체 발전기 손실에 어떠한 영향을 미치며, 그 추이는 어떻게 되는가를 분석하였다.

시뮬레이션 결과 발전기 출력이 낮을 때와 냉각 공기 온도가 낮을때에 손실을 저감시키는데 효과가 크다는 것을 알았다.

이에 따라 전립폐형 공기 순환 발전기 냉각 방식에 적용하여 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 알았다.

2. 발전기 손실과 냉각

2.1 발전기 손실

발전기 손실에는 발전기 출력과는 관계없이

일정한 고정손과 출력에 비례 변화하는 부하손으로 나누어진다. 고정손에는 메이팅등에서 발생하는 미찰손, 냉각공기중에서 회전자가 회전하므로써 발생하는 풍손과 칠손등이 이에 속한다. 부하손에는 전기자와 계사 권선을 흐르는 전류에 의하여 발생하는 동손이 있다. 발전기 냉각과 관련하여 일정속도로 운전되는 냉각팬일 경우는 구동 동력이 거의 일정하여 팬구동 동력을 고정손으로 처리할 수 있으나 가변속 장치를 사용하여 변속시킬 경우는 입력이 변화하므로 부하손으로 취급 된다.

이들의 손실을 식으로 나타내면 식(1) 과 같다.

$$W = W_f + W_s + W_R + W_m [KW] \dots\dots\dots (1)$$

여기서 W : 총손실[KW] W_s : 전기자 동손[KW]

W_f: 전기자손[KW] W_R : 계기동손[KW]

W_m: 냉각팬 구동 전동기 입력[KW]

동손은 전류의 2 승에 그리고 권선 온도에 비례하여 변화 한다.

$$W_c = W_o (1/I_o) ((25 + \theta_c)/310) [KW].. (2)$$

여기서 θ_c : 권선온도 (°C)

W_o : 권선온도 75(°C) 때 동손 [KW]

I_o : 정격 전류 (A)

I : 운전 전류 (A)

발전기 냉각팬의 입력은 정속도일 경우 거의 일정 하지만 가변속일 경우는 운전조건에 따라 식(3) 과 같이 변화한다.

$$W_m = W_{mo} \times N^m [KW] \dots\dots\dots (3)$$

여기서 W_{mo} : 정격시 냉각팬 전동기 입력 (KW)

N : 운전속도 (RPM)

m : 3

2.2 발전기의 열이동

발전기의 냉각 모델을 생각해 보면 그림 1 과 같으며 방열체, 절연물 그리고 케이스로 구성 된다. 방열체에서의 총발생 손실을 W (KW), 절연물의 온도를 θ_c (°C), 유효열방산 면적을 A (m²), 방열 계수를 h (W/m², °C) 라고 하면 열평형식은 다음과 같다.

$$W = Ah (\theta_c - \theta_A) \times 10^3 [KW] \dots\dots\dots (4)$$

식 (4) 에서 θ_A 는 주로 냉각 절연물의 온도와

냉각공기 출구와의 온도차를 $\Delta\theta_R$ 이라고 하면 식(5) 와 같이 쓸 수 있다.

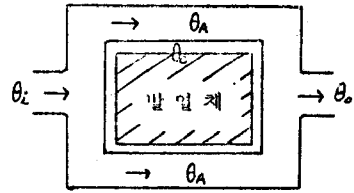


그림 1. 냉각 모델

이리하고 하면 식(5) 의 같다.

$$\Delta\theta_R = (\theta_c - \theta_o) = W \times 10^3 / (Ah) [°C] \dots\dots\dots (5)$$

방열계수 h 는 냉각풍속의 0.6 ~ 0.75 승에

비례하는데 면적이 일정할때는 풍량 Q의 0.6 ~

0.75승에 비례하게 되어 식 (6)의 관계가 있으며

이를 식(5) 에 대입하여 식(7) 을 얻는다.

$$h = KV^\alpha = K (Q/A)^\alpha = K' Q^\alpha \dots\dots\dots (6)$$

α : 0.6 ~ 0.75

$$\Delta\theta_R = W \times 10^3 / (K' A I^\alpha) = K'' W \times 10^3 / Q^\alpha \dots\dots\dots (7)$$

식(7) 에서 알 수 있는바와 같이 $\Delta\theta_R$ 은 손실에 비례하고 풍량의 1/승에 반비례한다.

그림 1 의 냉각 모델에서 열평형 상태에 있을때 냉각공기에 전달되는 열량과 발생 총손실은 같으므로 식(8) 과 같이 된다.

$$W = (\theta_o - \theta_c) C_p \gamma (Q \times 10^3) [KW] \dots\dots\dots (8)$$

여기서 C_p : 공기 정열비열 (W/kg, °C)

γ : 1 기입에서 공기밀도 (kg/m³)

Q : 냉각풍량 (m³/S)

P : 질대 입력

입의의 발전기 출력 또는 냉각공기 입구 온도에 대하여 열평형 조건인 상태 상태에서 절연물의 온도 θ_c 는 다음과 같이 결정된다.

참치 θ_o 는 정격조건에서의 값이다.

$$\Delta\theta_{R0} = (\theta_{c0} - \theta_{o0}) = k W_o \times 10^3 / Q_o^\alpha \dots\dots\dots (9)$$

식 (7)과 (9) 식으로부터

$$\Delta\theta_R = (Q_o/Q)^\alpha \times (\theta_{c0} - \theta_{o0}) (W/W_o) \dots\dots\dots (10)$$

입의의 발전기 출력 또는 냉각공기 입구온도에

대한 집연물의 온도 θ_c 는 식(11)로 얻는다.

$$\begin{aligned} \theta_c &= \Delta\theta R + (\theta_0 - \theta_i) + \theta_i \\ &= (Q_0/Q)^\alpha (W/W_0) (\theta_{c0} - \theta_{00}) + W \times 10^3 (PC_p \gamma Q) \\ &\quad + Q_i \text{ [}^\circ\text{C]} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

즉, 집연물의 온도는 크게 냉각공량, 발생손실 그리고 냉각공기 입구온도에 대한 함수로 나타낸다.

2.3 발전기 냉각

발전기 냉각에 있어서 지금까지 사용하던 일정공량 제어에서는 발전기의 손실과 냉각공기 입구 온도에 의하여 집연물의 온도가 결정되었다. 발전기 출력이 증가하여 손실이 증가되거나 계절에 따라 냉각 공기의 입구온도가 변화하면 이에 따라 냉각공기의 입구온도가 변화하면 권선 집연물의 온도도 변화하였다. 그러나 교류 기변속 장치를 사용할 경우 기변 풍량이 가능해지므로써 발전기 손실 및 냉각 공기 입구 온도의 변화에 따라 풍량을 적절히 조절하여 제어할 수 있다. 실제로는 정태 상태와 과도상태에 대하여 해석해야 하나 여기서는 정태상태만을 다루었다.

(i) 일정온도 제어

식(11)에서 손실과 냉각공기 입구 온도가 변화할 때 냉각 공기량을 조절함으로써 집연물의 온도를 일정히 유지할 수 있다.

냉각 공기의 풍량을 조절하게 되면 진동기 입력이 변화하고 온도가 변화하여 공기밀도, 동손이 변화하여 간단히 일정온도 유지를 위한 소요 풍량을 계산하기는 힘들다. 식(1) ~ (3), (8) ~ (11)을 이용하여 손실 및 입구온도 변화에 대하여 풍량을 변화시키면서 일정온도를 얻는 풍량을 찾는다. 이때 일정 풍량 운전과 비교하여 손실의 증감현상을 파악 한다.

(ii) 손실 최소 운전

고정손을 제외한 부하손에서 냉각공량을 감소시키면 동손은 증가하고 팬구동 진동기 입력은 감소한다. 이들의 비교량은 식(12)와 같다.

$$\Delta W = \Delta W_m + \Delta W_c \dots\dots\dots(12)$$

이때 풍량의 변화에 따라 발생하는 진동기 입력의 변화량과 동손의 변화분이 동일할때 즉, ΔW 가 영이 될때 총손실 최소가 얻어진다. 다빈 권선 집연물의 온도는 운전허용 범위 이내여야 한다.

이러한 조건을 반복하는 풍량을 얻으면 된다

3. 시뮬레이션과 시험

3.1 대상 발전기

시뮬레이션을 위한 대상 발전기 수차로는 저속저 대수轮到 사용하는 Bulb 형으로 발전기는 회전계지형이며, 용량 22600 KVA B중 집연으로 되어 있다.

고정손은 제지자에 의하여 주어진 값을 사용하였으며, 부하손은 동손으로 진기자와 계지전류를 기준으로 계산하였다.

계지전류는 발전기 제지 및 시험자료를 이용하여 단지 전압 6000V, 역률 0.95 를 기준으로 Polier Diagram 으로부터 얻었다. 정적조건에서의 총손실은 843 KW 이다.

3.2 냉각 계통

발전기 냉각방식은 전립배 공기순환형이고, 내부 냉각 공기압은 2.5 Bar 로 운전하고 있다. 냉각 공기는 그림 2와 같이 팬에 의하여 발전기를 냉각시키면서 기열된후 냉각기에서 냉기되어 다시 발전기로 들어가는 방법으로 순환을 반복한다. 냉각기에서는 기열된 공기를 냉각하며 냉각매체는 고정자 캐이싱의 외부를 지니 수차로 들어가는 강물이다. 이때 냉각기 출구공기 온도의 계산은 Mac Adams 와 Ricard 의 공식을 이용하여 얻어진다.

Mac Adams 와 Ricard는 두종류의 유체가 열교환기를 중심으로 나란히 움직이고 있을때 열교환기내에서의 열평형 관계식은 식(13)과 같이 표현된다고 하였고, 이때 두 유체중 한 유체의 온도는 일정한 조건이다.

여기서는 수직로 들어가는 더량의 강물이 열교환기를 지나므로 강물의 온도변화는 일정하다고 가정 하였다.

$$\Delta t = \Delta \theta / (\text{EXP} (\text{Ah} \Delta \theta / W) - 1) \text{ [} ^\circ \text{C] } \dots \dots \dots (13)$$

강물

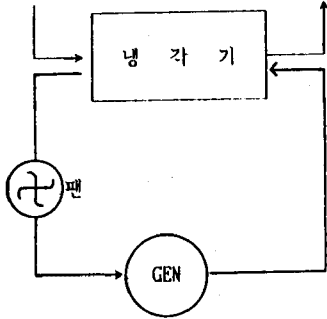


그림 2. 발전기 냉각 계통

이때 열평형 상태에서 강물에 방열되는 열량

$$W = \text{Ah} \cdot \Delta \theta_w \text{ 이므로 } \Delta \theta_w = W / (\text{Ah}) \text{ 로 된다.}$$

식(13)은 식(14)와 같이 되고, 발전기 입구 냉각 공기 온도는 식(15)와 같이 된다.

$$\Delta t = \Delta \theta / (\text{Exp} (\Delta \theta / \Delta \theta_w) - 1) \text{ (} ^\circ \text{C) } \dots \dots (14)$$

$$\theta_i = \theta_w + \Delta t \dots \dots \dots (15)$$

θ_w 는 강물 온도이고 $\Delta \theta_w$ 는 Ah가 일정하므로 W에 비례하여 변화한다.

발전기 냉각 계통이 진밀때 공기 순환형식인 대상 발전기의 권선 접연물 온도는 식 (16)과 같이 된다.

$$\theta_c = \Delta \theta_R + \Delta \theta + \theta_w + \theta_i \text{ (} ^\circ \text{C) } \dots \dots \dots (16)$$

3.3 시뮬레이션과 시험

기존의 일정풍량 냉각방식과 가변풍량 냉각 방식에 대하여 시뮬레이션을 행하였다.

가변풍량의 경우는 일정 온도 제어와 손실 최소 운전을 위한 풍량 계산은 허용 운전온도 범위내에서 동일한 결과를 가져 왔다. 즉, 최대 허용 운전 온도에서 최소손실을 얻었다. 표 1은 일정 온도 제어시의 냉각 풍량을 보이고 표 2와 3은 일정풍량시와 일정온도 제어시의 총손실을 보인다

표 1 일정온도 제어시 냉각 풍량

강물온도 KVA	단위 m^3/S					
	0	5	10	15	20	25
21.5	4.0	4.5	5.1	5.9	7.2	9.7
20.5	3.4	3.8	4.3	4.9	5.7	7.0
15.3	2.5	2.7	3.0	3.4	3.8	4.3
11.2	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3

* 권선온도 : 93 $^\circ \text{C}$ 일정조건

표 2 정풍량시 총손실

강물온도 KVA	단위 KW					
	0	5	10	15	20	25
21.5	805	812	820	828	835	843
20.5	742	748	757	761	767	774
15.3	619	623	625	629	633	637
11.2	547	550	552	554	557	559

표 3 일정온도 제어시 총손실

강물온도 KVA	단위 KW					
	0	5	10	15	20	25
21.5	721	726	733	745	769	843
20.5	655	658	662	668	679	703
15.3	519	521	522	524	527	532
11.2	440	440	441	442	444	446

풍량을 제어하여 발전기를 냉각 할 경우에 손실 처감효과가 있어 4 대의 발전기에 적용결과를 표 4와 같다. 시뮬레이션에서는 93 $^\circ \text{C}$ 로 일정온도 제어였지만 실제풍 운전에서는 약 70~ 80 $^\circ \text{C}$ 로 운전하여 저감손실량이 줄어든 것으로 생각된다.

표 4 손실저감 효과(1986)

총운전 시 간	평균발전 전력	Simulation 절 감	적용결과 절감
27.209	13690 KW	2939 Mwh	2104 Mwh

참고문헌

1.Refrigeration De L'alternateur

(발전기 냉각 제작자료, 프랑스 슈몽슈니이드사

2.Paidang Unit 2 - Test Report, 21 June 73

SOPRELEC Consulting engineers,Paris.