

水力発電所の運転遮断時に測定した水圧鉄管の振動特性

電源開発(株) 茅ヶ崎研究センター 正会員 溝上 健・栗津 誠
電源開発(株) 建設部設計室 芳賀 馨

1. はじめに

水圧鉄管の設計において考慮すべき設計水圧は、通産省令「発電所用水力設備に関する技術基準」に定められているとおり、静水圧・サージング水圧・水撃圧である。現状では、これらの荷重に対して短期・長期の荷重区分はなく、全てを長期荷重として設計を行っている。筆者らは、このような設計水圧の設定方法は、常時の使用状態を勘案すると、やや過大な設計水圧を与えている可能性もあると考え、運転遮断時の鉄管水圧の時刻歴に見られる比較的周波数の高い水圧脈動（高周波脈動）を短期荷重として設計水圧から除外する可能性について検討し、水圧鉄管設計の合理化を図る研究を実施している。

本稿は、上記研究のために、電源開発(株)の4発電所（足寄・下郷・沼原・長野）において、有水試験時の水圧鉄管の振動測定を行い、高周波脈動の発生状況について検討したうち、主として栃木県に位置する沼原発電所を例に、高周波脈動の発生が顕著であった負荷遮断試験について報告するものである。

2. 測定箇所及び測定方法

沼原発電所は、出力67.5万kW、有効落差480m、使用水量172.5m³/秒の純揚水式発電所である。沼原発電所の水路系は、取水口、延長約1,430mの圧力導水路1条を経て、調圧水槽において3条の水圧鉄管（延長約800m/条）に分岐し、3基の水車に至るものである。図-1に沼原発電所の水路系の断面図を示す。

測定は、水車入口、鉄管搬入路(下段)及び鉄管搬入路(上段)の3箇所において実施した。水車入口では、鉄管水圧、鉄管ひずみ(円周方向)について測定した。鉄管水圧は1点、鉄管ひずみ(円周方向)は水圧鉄管同一断面上を8等分する8点において測定した。鉄管搬入路(下段)及び鉄管搬入路(上段)においては、水圧鉄管が露出している84°及び96°を4等分する3点において、鉄管ひずみ(円周方向)を測定した。

なお、負荷遮断試験は3号機において実施し、他の発電機は停止していた。

3. 測定結果及び考察

3.1 鉄管水圧の時刻歴波形

図-2に、最大出力に対する負荷遮断試験(4/4)における鉄管水圧及びGVサーボモータストローク等の時刻歴を示す。高周波脈動は遮断約3秒後から発生し、10秒程度継続した。他の発電所においても、高周波脈動は遮断2～4秒後に発生し、10～17秒程度継続した。

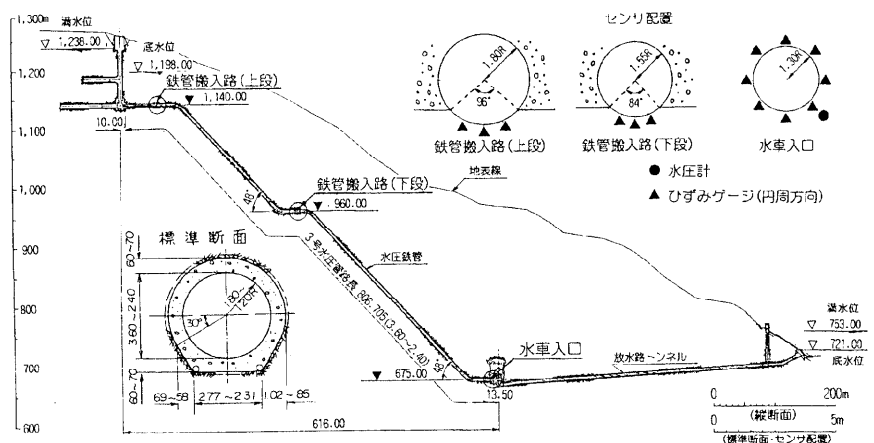


図-1 沼原発電所 水路系の断面図

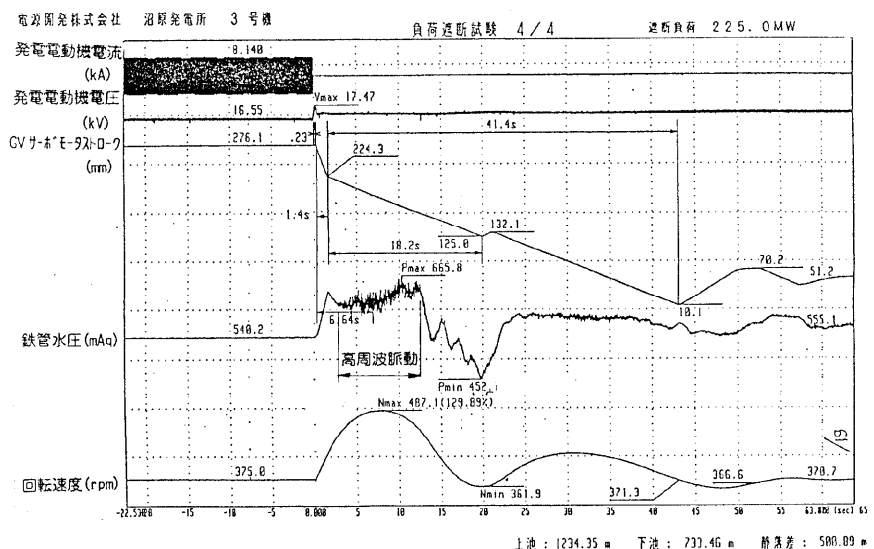


図-2 負荷遮断試験(4/4)の水車入口における鉄管水圧、GVサーボモータストローク等の時刻歴

キーワード：水圧鉄管、設計水圧、高周波脈動、負荷遮断試験

〒253-0041 茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88 電源開発(株) 茅ヶ崎研究センター 電話：0467-87-1211 FAX：0467-87-7319

3.2 全水圧に占める高周波脈動の割合

図-3 に、最大出力の 1/4～4/4 の発電運転に対する負荷遮断試験 (1/4～4/4) における最大水圧発生時の鉄管水圧の内訳を示す。鉄管水圧の内訳は、遮断前の定常運転時の鉄管水圧(P0)、遮断後の鉄管水圧の上昇分(ΔP)に分け、更に遮断後の鉄管水圧の上昇分(ΔP)を、1Hz 以下の周波数領域による上昇水圧(ΔP1)と 1Hz 以上の周波数領域(高周波脈動)による上昇水圧(ΔP2)に分けた。

最大水圧は、負荷遮断試験(4/4)において発生し、この時の高周波脈動による上昇水圧(ΔP2)の全水圧に占める構成比は、3.6%であった。また、他の発電所の最大水圧発生時における、高周波脈動による上昇水圧(ΔP2)の全水圧に占める構成比は、2～5%程度であった。

3.3 鉄管ひずみ(円周方向)の鉄管水圧に対する追従性

図-4 に、水車入口における鉄管ひずみ(円周方向)と鉄管水圧の位相差を示す。鉄管ひずみ(円周方向)と鉄管水圧の位相は、一部の周波数域を除き概ね一致し、鉄管ひずみ(円周方向)は鉄管水圧の振動に良く追従して振動したと考えられる。また、他の発電所においても、同様の傾向が認められた。

3.4 高周波脈動の卓越周波数

図-5 に、負荷遮断試験(4/4)において鉄管水圧の高周波脈動の発生が顕著な 4 秒間の振幅フーリエスペクトルを示す。なお、図-5 の m=1,2,3 の表記は、次式に示す水車羽根枚数と水車回転数の関係から発生する周波数を示している。

$$F_m = (Z_n \times N / 60) \times m \dots \dots \dots (\text{式-1})$$

F_m : 水車羽根枚数と水車回転数の関係から発生する周波数(Hz)

Z_n : 水車回転数(rpm)、N: 水車羽根枚数(枚)、m: 自然数

高周波脈動の周波数は、10Hz 程度以下が卓越している他、25Hz 近傍にも副次的な卓越周波数が認められた。また、水車羽根枚数と水車回転数の関係から発生する周波数は、m=1 で若干認められたが、高周波脈動への影響は小さいと考えられる。他の発電所においても、高周波脈動の卓越周波数は 10Hz 程度以下であり、水車羽根枚数と水車回転数の関係から発生する周波数の影響は小さかった。

3.5 高周波脈動の伝播

図-6 に、水車入口における鉄管水圧及び鉄管ひずみ(円周方向)、鉄管搬入路(下段)及び鉄管搬入路(上段)における鉄管ひずみ(円周方向)の高周波脈動発生時の振幅フーリエスペクトルを示す。水車入口の鉄管水圧においてピーク値をとる周波数が、鉄管搬入路(下段)及び鉄管搬入路(上段)においてもピーク値をとることから、高周波脈動は、水圧鉄管中の水を介して伝播すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、4 つの水力発電所の負荷遮断試験時における高周波脈動の発生状況を測定し、以下のことを示した。

- (1)高周波脈動の継続時間は、10～17 秒程度である。
- (2)全水圧に占める高周波脈動の割合は 2～5%程度である。
- (3)水圧鉄管は、内圧の振動に良く追従して振動している。
- (4)高周波脈動の卓越周波数は、10Hz 程度以下である。
- (5)水車の羽根枚数及び回転数の関係から発生する周波数の、高周波脈動に対する影響は小さい。
- (6)高周波脈動は、水圧鉄管内の水を介して伝播する。

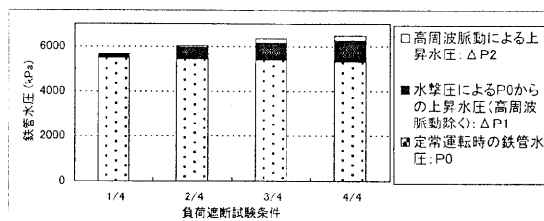


図-3 負荷遮断試験(1/4～4/4)の最大水圧発生時における水圧の内訳

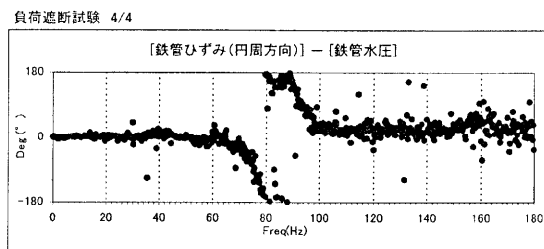


図-4 水車入口における鉄管ひずみと鉄管水圧の位相差

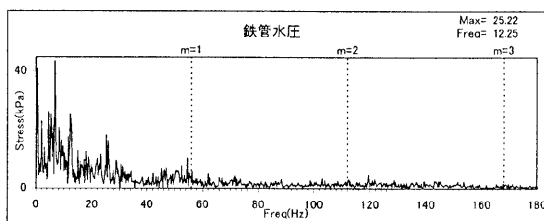


図-5 水車入口における高周波脈動発生時の鉄管水圧の振幅フーリエスペクトル

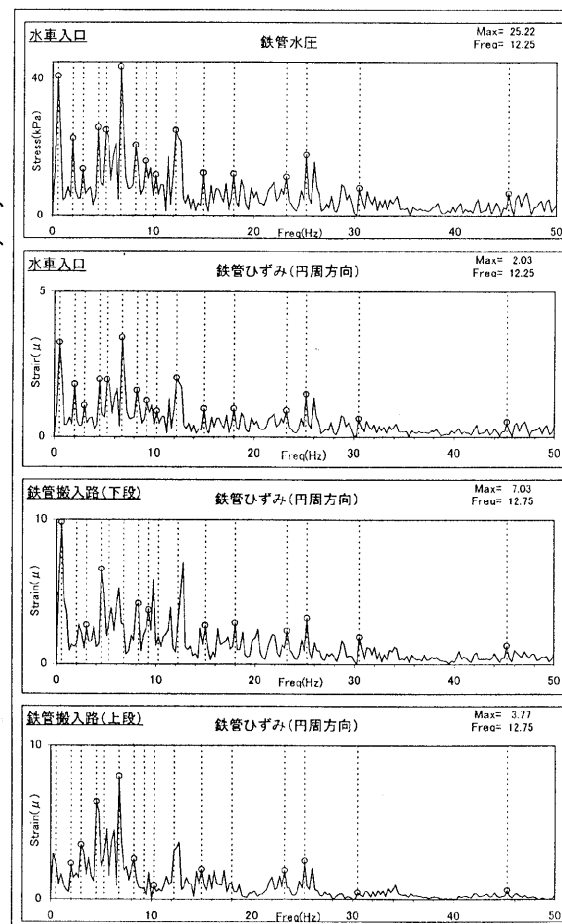


図-6 高周波脈動発生時における主な測定器の振幅フーリエスペクトル