

概要

再生可能エネルギーの導入量増加に伴う系統の不安定化に対する調整電源としての役割がより重要視される近年の水力発電において、起動過程で水車ランナに生じる過大応力の評価は非常に重要なテーマである。

一方、起動過程に発生する過大応力は調和的振動ではなくランダム振動と捉えられており、発生メカニズムについては明らかにされていないことから、問題が生じた案件毎に対処療法的に対応している。本論文では高落差フランシス水車を対象として、起動過程で発生する過大応力の発生メカニズムを説明することを目的として研究を行った。

第 1 章では、本研究の背景と目的、研究対象とするフランシス水車について述べた。

第 2 章では、実物水車の実働応力測定により起動過程において過大な動的歪みがランナに発生していることを確認した。測定結果の分析により、起動過程で発生する過大な歪みは散発的な衝撃荷重によるものであることがわかった。この起動過程においてランナ羽根が散発的な衝撃荷重を受け叩かれるという特異な現象をドラムスティックで短時間にランダムに叩かれるドラムに例え、「ハイドロドラム(Hydro Drum)」と命名した。

また、起動モードが歪みに与える影響を調査した。バブルチャートを用いて定量化した結果を評価すると、研究対象としたフランシス水車においてハイドロドラムは定格回転数 N の 35% ($35\%N$) 以下の限られた範囲で発生していた。また、この時の歪みの大きさはガイドベーン開度に依存することがわかった。

さらに、歪み波形の詳細な分析を実施した。流体的な衝撃荷重がランナ羽根間の出口端付近で生じ、その衝撃荷重が羽根を負圧面側へと瞬時に変形させていた。衝撃荷重が取り除かれた後、羽根は水中固有振動数で数回自由振動しながら減衰していた。

第 3 章では、実物水車の相似模型による模型試験を用いて過大応力発生要因を調査した。模型試験の結果、キャビテーションに関連する衝撃的な水圧荷重が捉えられた。実物水車で測定した傾向と定性的に一致しており、実物水車の起動時に発生するハイドロドラム現象を模型試験で再現できていることを確認した。また、キャビテーションモデルを導入した CFD の実施により、キャビテーションクラウドの連鎖的崩壊現象によって衝撃的な水圧上昇が生じていることを確認した。

第 4 章では、ハイドロドラムの一般的な強度指標を検討した。起動過程の動的歪みはランナ羽根入口における無次元絶対速度の周方向速度成分に対して相関を持つことを確認した。起動過程における有効落差は静落差に近いことを考慮すると、ハイドロドラムの潜在的なリスクは静落差が高いほど高くなることを示唆している。また、実設計において重要な回転数上昇による影響も考慮した代替の強度指数として、羽根の入口における無次元相対速度の周方向速度成分を提案した。

第 5 章は本研究で得られた成果を総括している。

Abstract

Study of generation of the dynamic extraordinary stress in a hydraulic turbine during start-up is very important topic for hydropower in recent years as it plays an increasingly important role as a regulating source of renewable energy. The extraordinary stress generated during start-up is considered to be stochastic and random different from the harmonic vibration during normal operation, and the generation mechanism of this kind of dynamic stress has not been clarified. In this paper, the study was carried out to reveal the mechanism of extraordinary stress on runner blade during start-up at high head Francis turbine.

In chapter 1, the background and purpose of this study, specification of the turbine used for this study was described.

In chapter 2, dynamic stress of the prototype turbine was measured, and it was appeared that the extraordinary dynamic strain was generated during start-up. As a result of the investigation, the dynamic strain can be considered close to random in statistical theory. This unique phenomenon that runner blades are struck by impulsive load during start-up is compared to a drum beaten by drumsticks randomly in short time, and we named the unique phenomenon “Hydro Drum”.

Start-up mode survey was also conducted. It was found that “Hydro Drum” occur at limited low rotation speed below 35% of the rated, and the magnitude of the strain is dominated by the opening of the guide vane.

Detailed investigation of the waveform was performed. It was shown that the hydraulic impact load was generated near runner blade trailing edge in blade channel and the load acted on the pressure surface of the blade and deformed the blade to suction side direction instantaneously. Blade vibrated freely in its natural vibration mode with dumping.

In chapter 3, hydraulic load causing the extraordinary stress was investigated by the model test. The results shows that it was clear that the “Hydro Drum” is related to water vapor. The trend of intensity of the “Hydro Drum” is qualitatively consistent with the trend measured in the prototype, as indicates that it is possible to reproduce the “Hydro Drum” phenomenon that occurs during the start-up of the prototype in the model test. Further study by CFD shows that the chain-reaction of cavitation clouds causes extraordinary impulsive loads on the blade.

In chapter 4, intensity index for “Hydro Drum” was investigated. It was found that strong correlation between the dynamic strain by “Hydro Drum” and absolute circumferential velocity at leading edge of runner blade. Considering that the net head during start-up is closer to the static head, it can be concluded that the potential risk of “Hydro Drum” increases as the static head of the turbine becomes higher. Relative circumferential velocity coefficient at leading edge of runner blade was proposed as an intensity index that also takes into account the effect of increase of rotation speed which is important at a design stage.

Chapter 5 summarized the findings of this study.