

ĐÁNH GIÁ HIỆN TƯỢNG KHÍ THỰC VÀ DAO ĐỘNG ÁP SUẤT TRONG PHẦN CÔN ỐNG HÚT TUABIN FRANCIS THÔNG QUA MÔ PHỎNG CFD

EVALUATION OF CAVITATION PHENOMENA AND PRESSURE PULSATIONS IN FRANCIS TURBINE DRAFT TUBE CONES VIA CFD SIMULATION

TRẦN CÔNG TRIỆU

Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email liên hệ: trieutc@huce.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.863>

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu hiện tượng khí thực và dao động áp suất trong phần côn ống hút tuabin Francis cột nước cao bằng mô phỏng số hai pha CFD. Mô hình sử dụng phương trình Rayleigh-Plesset và được xác thực với dữ liệu thực nghiệm tại Đại học Khoa học và Công nghệ Na Uy (NTNU). Kết quả cho thấy, dòng xoáy khí thực hình thành rõ rệt khi hệ số khí thực giảm, dẫn đến dao động áp suất mạnh với các đỉnh phổ tại 0,2 và 0,7 lần tần số quay, có nguy cơ gây cộng hưởng thủy âm. Hiện tượng này làm giảm hiệu suất tổ máy, đồng thời gây ăn mòn và nứt cánh bánh công tác (BXCT). Nghiên cứu khẳng định hiệu quả của CFD hai pha trong phân tích thủy lực và đề xuất một số giải pháp kỹ thuật nhằm giảm dao động, nâng cao độ ổn định và tuổi thọ tuabin trong điều kiện vận hành phức tạp.

Từ khóa: Tuabin Francis, CFD, khí thực, dao động áp suất, số Thoma, mòn cánh bánh công tác.

Abstract

This paper investigates cavitation phenomena and pressure pulsations in the draft tube cone of a high-head Francis turbine using two-phase CFD simulations. The numerical model employs the Rayleigh-Plesset equation and is validated against experimental data from the Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Cavitation vortices emerge at low Thoma numbers, producing pressure fluctuations with spectral peaks at 0.2 and 0.7 runner frequency, implying possible hydro-acoustic resonance. This phenomenon reduces turbine efficiency and may cause erosion and cracking of the runner blades. The study confirms the effectiveness of two-phase CFD in hydraulic analysis and proposes technical solutions to mitigate pressure pulsations, enhance

operational stability, and extend the turbine's service life under complex operating conditions.

Keywords: Francis turbine, CFD, cavitation, pressure pulsation, Thoma number, runner blade erosion.

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng tái tạo ngày càng tăng, nhằm giảm thiểu phát thải các bon và nâng cao tính bền vững trong hệ thống điện quốc gia, thủy điện tiếp tục đóng vai trò then chốt trong việc cung cấp nguồn điện ổn định và điều chỉnh công suất linh hoạt. Trong số các loại tuabin thủy lực, tuabin Francis được sử dụng rộng rãi trong các nhà máy thủy điện với ưu điểm nổi bật là hiệu suất cao, khả năng thích nghi với dải cột nước rộng và cấu trúc vận hành ổn định. Tuy nhiên, khi tổ máy vận hành ngoài điều kiện thiết kế – đặc biệt là trong các chế độ phụ tải thấp hoặc cao hiện tượng dao động áp suất trong ống hút do dòng chảy xoáy hình thành có thể dẫn đến rung động thủy lực nghiêm trọng, gây ảnh hưởng đến độ ổn định và tuổi thọ của thiết bị [1-4].

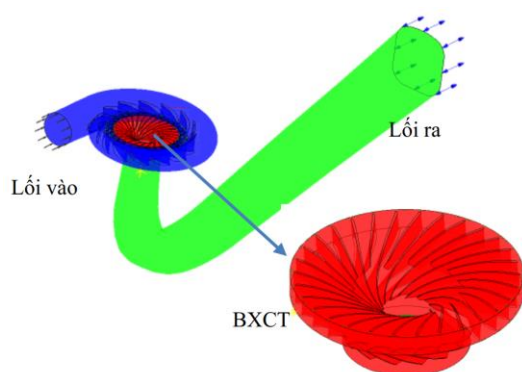
Một trong những hiện tượng thủy lực đặc trưng là sự xuất hiện của “dây xoáy khí thực” (cavitation vortex rope) trong ống hút dưới điều kiện vận hành không tối ưu. Cấu trúc xoáy này là nguồn phát sinh các dao động áp suất tần số thấp có khả năng lan truyền và khuếch đại trong hệ thống, gây cộng hưởng với các thành phần kết cấu hoặc hệ thống thủy lực dẫn đến rung động mạnh. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy rằng hình dạng và đặc tính của dây xoáy khí thực phụ thuộc đáng kể vào lưu lượng, biên dạng tuabin và điều kiện vận hành. Bên cạnh đó, các công trình thực nghiệm và mô phỏng số gần đây cũng chỉ ra rằng việc tối ưu hóa hình học bánh công tác (BXCT), cải tiến chế độ cấp khí hoặc điều chỉnh cấu hình ống hút có thể làm giảm biên độ dao động áp suất, qua đó cải thiện độ ổn định vận hành của tổ máy [5-9].

Tại Việt Nam, nhiều nhà máy thủy điện sử dụng tuabin Francis có cột nước làm việc cao. Thực tiễn vận hành đã ghi nhận hiện tượng tăng đột ngột xung áp suất trong ống hút tại các điều kiện tải ngoài thiết kế, đặc biệt là khi tổ máy vận hành ở mực nước hồ chứa thấp hoặc tải trọng cao [9]. Những xung động này làm tăng dao động vành trên tuabin, trục máy phát và các bộ phận cơ khí, dẫn đến nguy cơ hư hỏng và giảm hiệu quả phát điện. Trong khi các nghiên cứu quốc tế đã có nhiều đóng góp quan trọng, thì tại Việt Nam các nghiên cứu chuyên sâu về cơ chế hình thành và đặc điểm dao động áp suất vùng xoáy trong ống hút tuabin Francis cột nước cao còn tương đối hạn chế.

Trong bối cảnh đó, bài báo này tập trung nghiên cứu dao động áp suất vùng xoáy trong ống hút của tuabin Francis có cột nước cao bằng phương pháp mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán (CFD). Nghiên cứu sử dụng mô hình số ba chiều để phân tích sự hình thành, phát triển của dòng xoáy khí thực và ảnh hưởng của nó đến dao động áp suất trong ống hút. Mục tiêu của nghiên cứu nhằm làm rõ cơ chế dao động áp suất trong vùng xoáy, từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm hạn chế rung động thủy lực, nâng cao độ an toàn và ổn định cho tổ máy trong quá trình vận hành thực tế.

2. Mô hình thủy lực và chia lưới

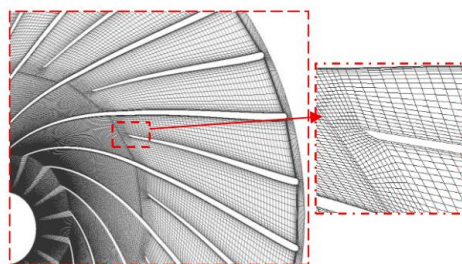
Mô hình thủy lực ba chiều của tổ hợp tuabin Francis trong nghiên cứu được xây dựng đầy đủ bao gồm: buồng xoắn, hệ thống cánh hướng dòng, BXCT và ống hút. Hệ thống dẫn dòng sử dụng 14 cánh cố định bố trí trong buồng xoắn, 28 cánh hướng dòng điều chỉnh lưu lượng và BXCT gồm 30 cánh (15 cánh dài, 15 cánh ngắn), kèm theo một ống hút hình nón chuyển tiếp sang khuỷu cong (Hình 1).



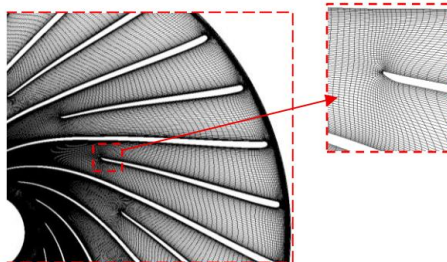
Hình 1. Mô hình 3D tuabin Francis

Toàn bộ mô hình thủy lực được chia lưới sử dụng phần mềm ICEM CFD với kiểu lưới có cấu trúc

(structured mesh), tập trung mật độ lưới tại các vùng biên lớp rối, mép cánh và đầu ra BXCT - nơi xuất hiện xoáy mạnh. Việc chia lưới được thực hiện cẩn trọng nhằm đảm bảo đủ độ mịn để bắt được các chi tiết dòng chảy như dây xoáy khí thực mà không làm tăng chi phí tính toán (Hình 2). Tổng số phần tử lưới sử dụng trong mô hình vào khoảng 10,94 triệu, bao gồm: Buồng xoắn và vùng cánh hướng dòng 3,25 triệu phần tử; BXCT 4,04 triệu phần tử; và ống hút 3,65 triệu phần tử.



a) Lưới thô (4,7 triệu phần tử)



b) Lưới mịn (10,94 triệu phần tử)

Hình 2. Chia lưới phần dẫn dòng tuabin

Để đảm bảo tính độc lập của lưới, nghiên cứu đã thực hiện xác minh bằng phương pháp chỉ số hội tụ lưới (GCI - Grid Convergence Index). Bảy phương án lưới khác nhau đã được so sánh thông qua hai đại lượng đầu ra là hiệu suất thủy lực và lưu lượng dòng qua tuabin. Kết quả cho thấy khi số phần tử vượt ngưỡng 10,94 triệu, sai số giữa các phương án lưới giảm dưới 0,03%, xác nhận kết quả mô phỏng không còn phụ thuộc vào mật độ lưới.

Mật độ lưới tại các vùng có gradient vận tốc và áp suất cao được tinh chỉnh để đạt giá trị $y^+ < 65$ phù hợp cho mô hình rối SST $k-\omega$ (< 100), đảm bảo tính chính xác trong mô phỏng trường dòng chảy rối và hiện tượng khí thực phát sinh tại vùng áp suất thấp trong ống hút.

3. Mô hình khí thực và điều kiện biên

Hiện tượng khí thực trong ống hút của tuabin Francis, đặc biệt dưới điều kiện vận hành ngoài thiết kế, là nguyên nhân chính dẫn đến sự hình thành dây

xoáy và dao động áp suất tần số thấp [10]. Để mô phỏng hiện tượng này một cách chính xác, mô hình hai pha nước-hơi đã được sử dụng, với phương pháp tạo bọt dựa trên phương trình Rayleigh-Plesset [11]. Mô hình cho phép tính toán thể tích hơi sinh ra tại các vùng áp suất thấp khi áp suất tĩnh của dòng chảy tiệm cận hoặc nhỏ hơn áp suất hơi bão hòa của nước.

Trong nghiên cứu, thể tích hơi được biểu diễn thông qua mặt đẳng hướng 10% (vapor volume fraction = 0,1), cho phép theo dõi trực quan hình thái dây xoáy khí thực.

Trong đó, σ là số Thoma - chỉ số đặc trưng cho khả năng xuất hiện khí thực, được tính theo tiêu chuẩn IEC 60193.

$$\sigma = \frac{1}{H} \left(\frac{p_{out}}{\rho g} - h_z - \frac{p_v}{\rho g} \right) \quad (1)$$

Trong đó: p_{out} là áp suất tại đầu ra ống hút; $p_v=3170$ Pa là áp suất hơi bão hòa ở 20°C, H là cột nước của tuabin; h_z là chiều cao hút tuabin.

Mô phỏng số CFD được thiết lập với các điều kiện biên sau đây để đảm bảo phản ánh chính xác môi trường thủy lực thực tế. Tại cửa vào, áp suất toàn phần (Total Pressure) được thiết lập tại cửa vào buồng xoắn, tương ứng với cột nước trong các chế độ vận hành một phần phụ tải (PL). Áp suất tĩnh (Static Pressure) được duy trì không đổi tại cửa ra ống hút. Áp suất tham chiếu được đặt bằng 0Pa, tương ứng với mặt thoáng khí quyển tại mực nước hạ lưu. Phần tiếp giáp giữa miền quay (BXCT) và miền tĩnh (ống hút, buồng xoắn, cánh hướng dòng) được xử lý bằng phương pháp Frozen Rotor trong mô phỏng ổn định và Transient Rotor-Stator trong mô phỏng không ổn định, đảm bảo tính liên tục trường dòng chảy. Tổng thời gian mô phỏng là 15 vòng quay (tương đương 2,7s), đảm bảo ghi nhận đầy đủ quá trình hình thành, phát triển của dây xoáy khí thực trong một chu kỳ dao động đầy đủ. Tất cả các trường thông số được yêu cầu hội tụ với sai số tương đối nhỏ hơn 10^{-5} trong mỗi bước thời gian.

4. Kết quả tính toán và phân tích

4.1. Kiểm chứng mô hình

Để đánh giá độ tin cậy của mô hình mô phỏng CFD, kết quả tính toán hiệu suất thủy lực của tuabin được so sánh với dữ liệu thực nghiệm thu thập tại phòng thí nghiệm Đại học Khoa học và Công nghệ Na Uy (NTNU). Mô hình tuabin có công suất định mức 22kW, cột nước thiết kế 12m, lưu lượng định mức 0,2m³/s, tốc độ quay định mức 335 vòng/phút và đường kính BXCT là 0,349m. Thông số chính được sử dụng để xác thực là hiệu suất thủy lực của tuabin

tại các điều kiện lưu lượng khác nhau so với điểm tính toán Q_{It} , bao gồm 0,75 Q_{It} , Q_{It} và 1,1 Q_{It} [7, 12].

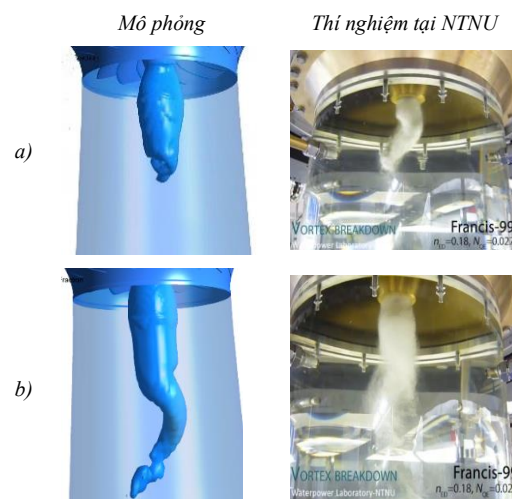
Bảng 1 cho thấy, sai số cực đại giữa mô phỏng và thực nghiệm không vượt quá 9%, với mức chênh lệch lớn nhất là 9% tại 0,75 Q_{It} . Điều này chứng tỏ mô hình số có khả năng phản ánh tốt năng lượng của tuabin ở cả chế độ vận hành tối ưu và ngoài thiết kế. Tổng thể, sai số nằm trong phạm vi cho phép theo khuyến nghị của IEC 60193, cho thấy mô hình CFD đủ tin cậy để tiếp tục phân tích dao động áp suất và khí thực trong các điều kiện phi tuyến.

Bảng 1. Độ lệch giá trị mô men xoắn BCXT giữa tính toán và thí nghiệm (Nm)/%

	0,75 Q_{It}	Q_{It}	1,1 Q_{It}
Mô phỏng	465 (9%)	706 (4%)	820 (7%)
Thí nghiệm	421(0%)	677(0%)	762(0%)

4.2. Cấu trúc dòng xoáy và sự phát triển của xoáy khí thực

Kết quả mô phỏng dòng chảy hai pha trong ống hút tuabin Francis cho thấy sự hình thành và phát triển rõ rệt của các dây xoáy khí thực dưới điều kiện vận hành ngoài thiết kế. Dây xoáy được đặc trưng bởi thể tích hơi tập trung dọc trục, hình thành từ vùng tâm ống hút và có xu hướng tiến động theo chiều quay bánh công tác trong chế độ phụ tải thấp (PL). Điều này phù hợp với các mô tả hình thái học trước đó trong nghiên cứu của Alligné [2] và Favrel [6].



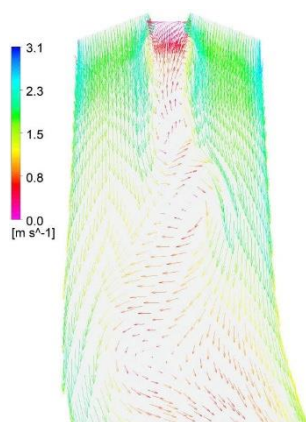
Hình 3. Dây xoáy khí thực trong ống hút cho trường hợp bắt đầu khí thực và khí thực mạnh a) $\sigma=0,033$ $\alpha=10\%$; b) $\sigma=0,01$ $\alpha=10\%$

Hơn nữa, phân tích ảnh hưởng của số Thoma (σ) cho thấy khí thực tăng đáng kể khi σ giảm xuống dưới

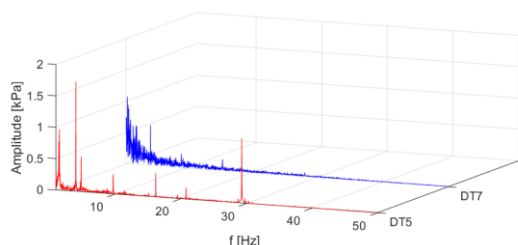
0,01, dẫn đến sự gia tăng thể tích hơi và chiều dài dây xoáy (Hình 3). Cơ chế này phản ánh đúng bản chất vật lý của hiện tượng khí thực do áp suất tĩnh nhỏ hơn áp suất hơi bão hòa của nước, như được giải thích bởi phương trình Rayleigh-Plesset trong các mô hình khí thực cổ điển. Do đó, số Thoma càng nhỏ chứng tỏ nguy cơ khí thực càng lớn, và vùng khí thực càng phát triển mạnh, dẫn đến dao động áp suất lớn hơn và nguy cơ mất ổn định thủy lực cao hơn.

4.3. Dao động áp suất và phổ tần số

Hai điểm đo DT5 và DT7 được bố trí trên phần côn của ống hút để giám sát áp suất cục bộ trong hệ thống (Hình 4). Phổ tần số được phân tích bằng phương pháp biến đổi nhanh Fourier (FFT). Hình 5 cho thấy, tại điểm DT5 chịu sự ảnh hưởng của BXCT, các đỉnh dao động áp suất xuất hiện tại 29,55Hz, tương ứng với ảnh hưởng của số lượng cánh BXCT (30 cánh). Hình 5 còn cho thấy các thành phần dao động trong khoảng 6Hz đến 20Hz, tương ứng với 0,2fn đến 0,7fn (fn là tần số quay BXCT), đây được xác định là kết quả của chuyển động tiến động không ổn định của dây xoáy khí thực [8]. Tại điểm quan sát DT7, chỉ xuất hiện các dao động áp suất tần số thấp và không có sự ảnh hưởng của BXCT.



Hình 4. Phân bố véc tơ vận tốc trên mặt cắt qua tâm ống hút



Hình 5. Tần số dao động áp suất cho điều kiện PL ($\sigma=0,01$) tại điểm DT5 và DT7 trên vỏ phần côn ống hút

Kết quả này phù hợp với mô tả của Alligné [2],

trong đó mô hình SIMSEN cho thấy dao động áp suất mạnh xuất hiện tại tần số khoảng $(0,25 \div 0,3)fn$, đi kèm với hiện tượng tự dao động trong hệ thống thủy lực. Đồng thời, nghiên cứu thực nghiệm bằng PIV của Favrel [6] cũng ghi nhận phổ dao động áp suất tại $(0,26 \div 0,35)fn$, với biên độ dao động đạt $\pm 50Pa$ tại khu vực tương ứng trong ống hút. Thể tích khí thực trong mô phỏng CFD của nghiên cứu này đạt giá trị cực đại chiếm khoảng $12\% \div 15\%$ thể tích vùng côn ống hút - tương đương với vùng xoáy được nhận diện qua kỹ thuật dòng chảy rối PIV trong [6].

Điều này xác nhận rằng dây xoáy khí thực đóng vai trò là nguồn kích thích thủy lực trong hệ thống, dẫn đến sự lan truyền sóng áp suất. Hình 4 thể hiện phân bố véc tơ vận tốc trong phần côn ống hút cũng khớp với các dao động thu được. Trường hợp đặc biệt khi tần số tiến động trùng khớp với tần số riêng của hệ thống có thể gây ra hiện tượng cộng hưởng thủy âm mạnh mẽ, ảnh hưởng nghiêm trọng đến hiệu quả phát điện và tuổi thọ thiết bị. Điều này đã được nhấn mạnh trong các nghiên cứu bởi Širok [4] và Nishi & Liu [8].

4.4. Ảnh hưởng của khí thực đến độ bền bánh xe công tác

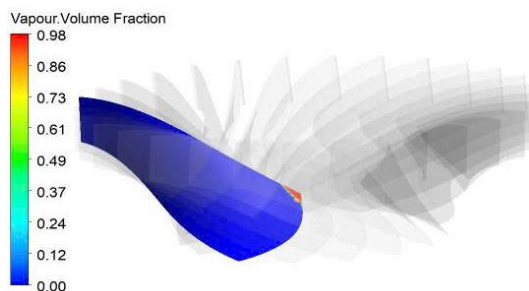
Bên cạnh những tác động rõ rệt đến dao động áp suất và ổn định vận hành, hiện tượng khí thực còn gây ra các hư hỏng nghiêm trọng về mặt cơ học đối với BXCT. Dưới tác động của dòng xoáy khí thực mạnh trong ống hút, đặc biệt tại vùng sau mép ra cánh, các bọt khí hình thành và sụp đổ liên tục đã tạo nên xung áp suất cục bộ lớn.

Khi các bong bóng khí thực sụp đổ gần bề mặt cánh, chúng sinh ra các vi chấn áp lực lên đến hàng trăm MPa, vượt quá giới hạn mỏi cục bộ của vật liệu. Quá trình này lặp đi lặp lại theo chu kỳ hoạt động của tuabin, tạo nên các vết nứt tại vùng mép ra và mặt hút của cánh BXCT.

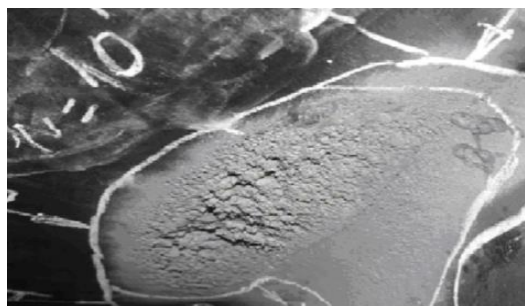
Theo thời gian, các điểm mỏi tập trung phát triển thành vết nứt bề mặt và nứt xuyên chiều dày, đặc biệt tại các cánh dài - nơi chịu tải thủy lực lớn hơn. Các vết nứt này không chỉ làm giảm đáng kể tuổi thọ kết cấu của BXCT mà còn là nguồn khởi phát cho hiện tượng gãy cánh đột ngột khi tuabin vận hành ở điều kiện tải cao hoặc bị cộng hưởng dao động.

Mô phỏng dòng chảy kết hợp với dữ liệu thực nghiệm cho thấy khu vực có tỷ lệ thể tích hơi cao nhất (vapor volume fraction $>10\%$) thường trùng với vị trí có mật độ hư hỏng cao nhất trên các tổ máy vận hành lâu năm. Điều này cho thấy sự cần thiết phải kiểm soát khí thực không chỉ để giảm dao động áp suất mà còn

để đảm bảo độ bền cơ học và an toàn dài hạn của tổ máy. Các nghiên cứu gần đây của Celebioglu [3] và Muller [13] cũng đều khẳng định rằng khí thực không chỉ ảnh hưởng đến dao động thủy lực mà còn là yếu tố then chốt gây ra hư hỏng kết cấu trong BXCT, đặc biệt khi vận hành ở điều kiện ngoài thiết kế.



a) Vị trí khí thực trên lá cánh mô hình



b) Vị trí khí thực lá cánh giáp vành trên BXCT tuabin

Hình 6. Khí thực trên lá cánh tuabin

Từ các phân tích số học và đặc điểm thủy lực thu được, nhóm tác giả đề xuất một số định hướng áp dụng như sau:

Tích hợp phân tích CFD trong giai đoạn thiết kế và vận hành tuabin mới. Các nhà sản xuất tuabin nên tích hợp mô phỏng CFD từ giai đoạn thiết kế để đánh giá trước các chế độ dòng xoáy trong ống hút, từ đó tối ưu hóa hình học bánh công tác và đường hút nhằm hạn chế nguy cơ xuất hiện dây xoáy khí thực và cộng hưởng thủy lực.

Thiết lập vùng vận hành an toàn trong thực tế vận hành nhà máy. Kết hợp kết quả mô phỏng với dữ liệu vận hành thực tế để xác định và giới hạn vùng công suất vận hành tương ứng với độ mở cánh hướng dòng nhằm tránh các điều kiện dễ phát sinh dao động tần số thấp. Việc cài đặt “biểu đồ vận hành tối ưu” theo từng mực nước hồ chứa là cần thiết để giảm thiểu rung động. Đây là bước đi thiết yếu, đặc biệt trong các nhà máy có hồ chứa lớn với biến động mực nước theo mùa, như đã được chứng minh trong thực tiễn vận hành tại Việt Nam.

Triển khai hệ thống giám sát thời gian thực dao

động áp suất và khí thực. Việc thiết lập các điểm đo dao động áp suất tại ống hút (như vị trí DT5 trong nghiên cứu) và phân tích tín hiệu theo thời gian thực sẽ cho phép cảnh báo sớm các điều kiện bất thường liên quan đến khí thực hoặc mất ổn định thủy lực, từ đó hỗ trợ bảo trì dự đoán và vận hành linh hoạt hơn.

Xem xét cải tiến cấu trúc ống hút và biện pháp bổ sung khí. Trong trường hợp các tổ máy hiện hữu có biểu hiện dao động bất thường, cần tiến hành đánh giá khả năng cải tiến cấu hình ống hút hoặc áp dụng các biện pháp bổ sung khí cưỡng bức tại vị trí hợp lý để giảm biên độ dao động áp suất. Tuy nhiên, các cải tiến này cần được kiểm định bằng cả mô phỏng và thử nghiệm mô hình trước khi triển khai trên thực tế.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp mô phỏng số CFD để phân tích đặc điểm dòng chảy, dao động áp suất và hiện tượng khí thực trong ống hút của tuabin Francis cột nước cao dưới các chế độ vận hành ngoài thiết kế. Mô hình số được thiết lập dựa trên cấu hình thực tế và đã được xác thực thông qua so sánh với dữ liệu thực nghiệm từ phòng thí nghiệm NTNU. Kết quả chính của nghiên cứu có thể được tổng kết như sau:

Mô hình hai pha cho thấy thể tích vùng khí thực tăng đáng kể khi số Thoma giảm. Với $\sigma = 0,01$, khí thực diễn ra mạnh và lan rộng trong ống hút, làm gia tăng dao động và nguy cơ cộng hưởng. Điều này khẳng định số Thoma là thông số then chốt trong đánh giá mức độ khí thực.

Phân tích phổ tần số tại điểm giám sát cho thấy các đỉnh dao động xuất hiện tại 0,2 và 0,7 lần tần số quay, trùng với tần số tiến động của dây xoáy. Hiện tượng này có thể gây cộng hưởng thủy âm khi trùng với tần số riêng của hệ thống, dẫn đến mất ổn định áp suất và công suất đầu ra.

Về mặt cơ học, hiện tượng khí thực tạo ra các xung lực cục bộ cao gây nứt mỏi và ăn mòn cánh BXCT, đặc biệt tại mép ra cánh và vùng mặt hút. Đây là nguyên nhân chính dẫn đến gãy cánh trong các tổ máy vận hành lâu năm.

Từ các kết quả trên, có thể khẳng định rằng mô hình CFD kết hợp với mô hình khí thực hai pha là công cụ hiệu quả để phân tích các hiện tượng thủy lực phức tạp trong tuabin Francis. Nghiên cứu này không chỉ góp phần hiểu rõ hơn về cơ chế dao động áp suất và khí thực mà còn mở ra hướng ứng dụng mô phỏng trong thiết kế, tối ưu vận hành và bảo trì dự đoán cho các tổ máy thủy điện hiện đại.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả dự kiến: Kết hợp dữ liệu vận hành thực tế và đo đạc tại

hiện trường (dao động áp suất, tình trạng hư hỏng cánh) để hiệu chỉnh mô hình và làm rõ hiệu quả các giải pháp kỹ thuật; Mở rộng phân tích sang các điều kiện vận hành quá tải, mực nước thay đổi nhanh và tình huống bất thường tại các nhà máy cụ thể; Đánh giá chi phí - hiệu quả các giải pháp kiểm soát dao động (như bổ sung khí cưỡng bức) đã được áp dụng sơ bộ tại một số tổ máy ở Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu đã sử dụng kết quả thí nghiệm mô hình của phòng thí nghiệm thủy lực Trường Đại học NTNU, Na Uy.

Mô phỏng số được thực hiện tại trung tâm siêu máy tính của trường đại học Vũ Hán, Trung Quốc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] William J. Rheingans (1940), *Power swings in hydroelectric power plants*. Transactions of the ASME, Vol.62, pp.171-184.
- [2] Sébastien Alligne, et al. (2014), *Cavitation surge modelling in Francis turbine draft tube*. Journal of Hydraulic Research, Vol.52(3), pp.399-411.
- [3] Celebioglu K., et al. (2017), *Numerical research of cavitation on Francis turbine runners*. International Journal of Hydrogen Energy, Vol.42(28), pp.17771-17781.
- [4] Širok B., et al. (2003), *Simultaneous study of pressure pulsation and structural fluctuations of a cavitated vortex core in the draft tube of a Francis turbine*. Journal of Hydraulic Research, Vol.41(5), pp.541-548.
- [5] Tran C. Trieu., Long X. Ping, JiBin (2019), *Vortical structures in the cavitating flow in the Francis-99 draft tube cone under off-design conditions with the new omega vortex identification method*. Journal of Physics: Conference Series, Vol.1296: p.012011.
- [6] Favrel A., Müller A., et al.(2015), *Study of the vortex-induced pressure excitation source in a Francis turbine draft tube by particle image velocimetry*. Experiments in Fluids, Vol.56(12), p.215.
- [7] Chirag Trivedi, Michel J. Cervantes, et al.(2013), *Experimental and Numerical Studies for a High Head Francis Turbine at Several Operating Points*. Journal of Fluids Engineering, Vol.135(11).
- [8] Nishi M. and S. Liu (2013), *An Outlook on the Draft-Tube-Surge Study*. International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.6(1), pp.33-48.
- [9] Triệu, T.C. (2024), *Phân tích đặc tính dòng chảy trong ống hút của tuabin francis dưới các độ mở cánh hướng khác nhau*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 80, tr.24-29.
- [10] Yang, J., L.J. Zhou and Z.W. Wang (2015), *The numerical research of runner cavitation effects on spiral vortex rope in draft tube of Francis turbine*. Journal of Physics: Conference Series, Vol.656, p.012076.
- [11] Zwart, P.J., G.G. Andrew and B. Thabet (2004). *A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics*. In: *Fifth International Conference on Multiphase Flow*. Yokohama, Japan.
- [12] Michel J. Cervantes, Chirag Trivedi, et al.(2015), *Francis-99 Workshop I: steady operation of Francis turbines*. Journal of Physics: Conference Series, Vol.579, p.011001.
- [13] Müller A., Favrel A., Landry C., Avellan F. (2017), *Fluid structure interaction mechanisms leading to dangerous power swings in Francis turbines at full load*. Journal of Fluids and Structures, Vol.69, pp. 56-71.

Ngày nhận bài:	19/06/2025
Ngày nhận bản sửa 1:	16/07/2025
Ngày nhận bản sửa 2:	01/08/2025
Ngày duyệt đăng:	02/08/2025