

PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH DÒNG CHẢY TRONG ỐNG HÚT CỦA TUABIN FRANCIS DƯỚI CÁC ĐỘ MỞ CÁNH HƯỚNG KHÁC NHAU

ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS IN THE DRAFT TUBE OF FRANCIS TURBINE WITH DIFFERENT GUIDE VANE OPENING

TRẦN CÔNG TRIỆU

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

Email liên hệ: trieutc@huce.edu.vn

Tóm tắt

Dòng chảy không ổn định do dải xoáy trong ống hút tuabin Francis gây ra sẽ ảnh hưởng đến hoạt động an toàn của tổ máy phát điện. Để tiến hành nghiên cứu chuyên sâu về đặc tính dòng chảy trong ống hút, tuabin Francis của Trạm thủy điện Bản Cốc được lấy làm đối tượng nghiên cứu và dựa trên mô hình nhiễu loạn SST $k-\epsilon$, mô phỏng số kênh toàn dòng chảy được thực hiện trong các điều kiện làm việc khác nhau để phân tích đặc tính dòng chảy bên trong ống hút. Kết quả nghiên cứu cho thấy: khi mở cánh hướng ở độ mở thiết kế, áp suất phân bố đều và không có vùng áp suất thấp ở đầu vào ống hút; khi độ mở cánh hướng lớn nhất cho lưu lượng Q_{max} thì vùng áp suất thấp tăng dần và có dạng hình cột trụ; khi mở một phần độ mở cánh hướng (Q_{min}) xuất hiện sự phân bố xoắn ốc vùng áp suất thấp, tức là hình thành dải xoáy bọt ở vùng này. Hiện tượng này sẽ gây ra độ rung lớn hơn ở tổ máy phát điện.

Từ khóa: Tính toán động lực học chất lỏng, đặc tính dòng chảy, ổn định vận hành, xoáy xâm thực, ống hút, tuabin tâm trục.

Abstract

The unstable flow caused by the vortex rope in the Francis turbine draft tube has impacted the safe operation of hydraulic turbines. The Francis turbine of Ban Coc Hydropower Station was taken as the research object to conduct an in-depth study of the flow characteristics in the draft tube. Based on the SST $k-\epsilon$ turbulence model, numerical simulation of the full-flow channel was performed under different working conditions to analyze the flow characteristics in the Francis turbine draft tube. The results show that when the guide vane is opened at the design opening, the pressure is symmetrical distributed, and there is no low-pressure zone at the draft tube inlet; when the guide vane opening is the largest for the flow rate

Q_{max} , the low-pressure zone increases and has a columnar shape vortex rope; when the guide vane opening is partially opened (Q_{min}), a spiral distribution of the low-pressure zone appears, that is, a spiral cavitation vortex rope is formed in this area. This phenomenon will cause greater vibration in the hydraulic turbines.

Keywords: Computational fluid dynamics, flow characteristics, operating stability, vortex cavitation, draft tube, francis turbine.

1. Giới thiệu

Thủy điện là một nguồn năng lượng có khả năng điều chỉnh công suất linh hoạt, giữ vai trò quan trọng trong sự ổn định của hệ thống điện quốc gia. Trong những năm gần đây, do nhu cầu thay đổi liên tục với biên độ công suất lớn của lưới, đặt ra yêu cầu các trạm thủy điện phải làm việc với sự điều chỉnh công suất phát ở ngoài điều kiện thiết kế. Điều này dẫn đến các tổ máy thủy điện hoạt động không ổn định, hiện tượng trạm thủy điện không phát điện hết tải ngày càng ảnh hưởng đến hoạt động bình thường của trạm điện. Trong số đó, có hiện tượng hình thành dải xoáy trong ống hút tác động đáng kể đến sự mất ổn định của tổ máy. Nhiều nhà nghiên cứu đã có nghiên cứu về vấn đề này và đạt được những kết quả nhất định. Đinh Minh Hải [1] đã tiến hành mô phỏng số của toàn bộ phần dẫn dòng chảy của tuabin Francis hai dãy cánh, và dựa trên đó, đã phân tích các đặc tính năng lượng và phân bố vận tốc, áp suất trong tuabin. Kết quả nghiên cứu của họ cho thấy trong điều kiện lưu lượng lớn và nhỏ hơn thiết kế, sẽ xuất hiện các vùng xoáy trong ống hút. Jing Y. và cộng sự [2] đã tiến mô phỏng dòng không ổn định về các điều kiện của tuabin Francis trong nhà máy thủy điện ở hai điều kiện làm việc điển hình. Kết quả cho thấy ở điều kiện phụ tải thấp trong ống hút có sự hình thành dải xoáy xoắn ốc, và ở điều kiện phụ tải lớn sẽ hình ảnh dải xoáy cột trụ. Iliescu và cộng sự [3] đã sử dụng công nghệ PIV để nghiên cứu cấu trúc dòng xoáy và đặc tính dòng chảy trong ống hút. Kết quả cho thấy sự dao động áp suất

là nguyên nhân chính hình thành dòng xoáy. Dựa trên tính toán của PIV và sử dụng phần mềm Fluent, Zeng và cộng sự [4] đã tiến hành mô phỏng số không ổn định ống hút của tuabin Francis. Mô phỏng cho thấy không có xoáy bên trong ống hút trong các điều kiện thiết kế. Trieu T.C. và cộng sự [5] đã sử dụng phần mềm ANSYS CFX để tiến hành mô phỏng số về trạng thái dòng xoáy không ổn định trong ống hút tuabin Francis. Minakov và cộng sự [6] đã sử dụng mô phỏng số để nghiên cứu dao động áp suất trong ống hút. Kết quả nghiên cứu cho thấy dải xoáy trong ống hút là nguyên nhân chính gây ra tần số thấp và áp suất mạch động trong tuabin. Dựa trên phương pháp dòng chảy hai pha của động lực học bong bóng, Allign và cộng sự [7] đã tiến hành phân tích dòng chảy xâm thực không ổn định trên một tuabin mô hình Francis nhất định và nhận thấy rằng với sự phát triển của hiện tượng xâm thực, xoáy trong khoang ống hút có tác động đáng kể đến sự không ổn định tổ máy. Đồng thời, các học giả cũng tiến hành nghiên cứu về việc cải thiện vùng xoáy trong ống hút. A. Yu và cộng sự [8] đã thiết lập mô hình toán phần dẫn dòng tuabin tâm trục cho trường hợp bổ sung khí vào ống hút để cải thiện vùng xoáy. Kết quả cho thấy vùng xoáy giảm về độ lớn, độ xoáy từ đó giảm áp suất mạch động. Ngoài các tài liệu nêu trên, một số lượng lớn các học giả cũng đã tiến hành các nghiên cứu ở mức độ khác nhau về đặc tính dòng chảy trong ống hút của tuabin thủy lực và đã đạt được một số kết quả có giá trị [9-11]. Từ các tài liệu trên có thể thấy rằng ở nước ngoài có rất nhiều nghiên cứu về đặc tính dòng chảy trong ống hút tuabin, tuy nhiên chưa có nghiên cứu nào áp dụng cho các trạm thủy điện ở Việt Nam nơi có hệ thống điện kém ổn định hơn, dao động công suất lớn hơn.

Do đặc thù địa hình nên ở Việt Nam, số lượng trạm thủy điện sử dụng tuabin Francis chiếm tỷ lệ rất cao. Để đáp ứng nhu cầu thay đổi liên tục của phụ tải, công suất phát của tuabin phải thay đổi. Với tuabin Francis việc thay đổi công suất phát cũng chính là thay đổi độ mở cánh hướng. Do đó cần thêm những nghiên cứu về đặc trưng dòng chảy trong phần dẫn dòng tuabin Francis khi độ mở cánh hướng thay đổi. Bài viết này sẽ bắt đầu từ những vấn đề kỹ thuật thực tế về dao động thủy lực trong ống hút tuabin Francis của Trạm thủy điện Bản Cốc và phân tích vấn đề nguyên nhân gây ra rung động thủy lực tổ máy. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp tài liệu tham khảo hữu ích cho quá trình vận hành trạm thủy điện tại Việt Nam.

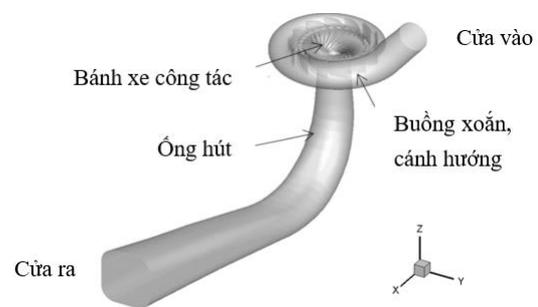
2. Tuabin thủy lực và các thông số

Đối tượng nghiên cứu trong bài viết này là tuabin

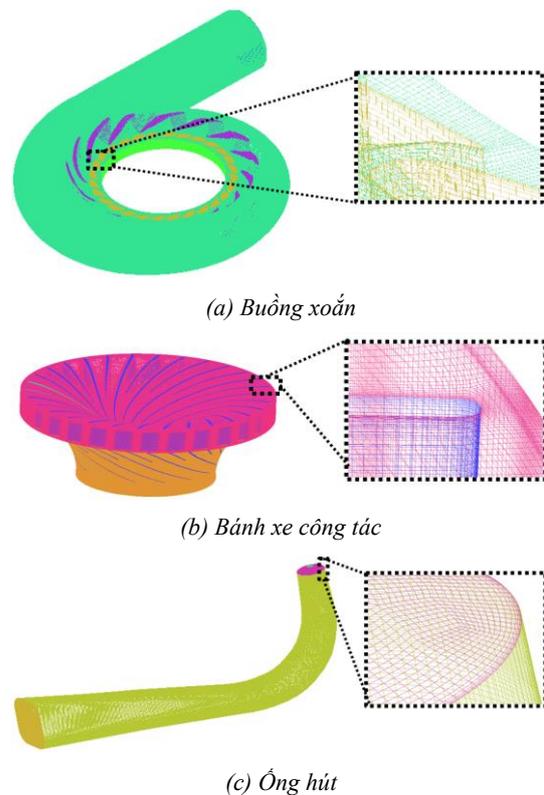
Francis của nhà máy thủy điện Bản Cốc nằm trên dòng sông Nậm Giải thuộc huyện Quế Phong, tỉnh Nghệ An, với tổng công suất lắp đặt là 18MW. Thông số cơ bản của tổ máy thủy điện Bản Cốc như sau: model tuabin là HL100A-35.18; công suất định mức là 6,289MW; cột nước tính toán là 187m; lưu lượng định mức là 3,71m³/s; tốc độ định mức là 750 vòng/phút, đường kính bánh xe công tác 1,21m.

3. Mô hình thủy lực và chia lưới

Mô hình thủy lực của các bộ phận dẫn dòng của tuabin Francis bao gồm các phần: buồng xoắn, cánh hướng, bánh xe công tác và ống hút. Hình 1 thể hiện mô hình thủy lực ba chiều toàn phần dẫn dòng tuabin.



Hình 1. Mô hình tuabin tâm trục



Hình 2. Chia lưới phần dẫn dòng tuabin

Việc chia lưới đóng vai trò quan trọng trong tính chính xác của mô phỏng, vì vậy chất lượng của lưới rất quan trọng. Cấu trúc các bộ phận dẫn dòng tuabin thủy lực rất phức tạp, các cánh bánh xe công tác là bề mặt xoắn ba chiều có hình dạng không đều. Việc chia lưới đòi hỏi nhiều thời gian. Kiểu lưới phi cấu trúc (loại Hexahedral) đã được chọn để chia lưới. Tại các khu vực giáp lớp biên, bánh xe công tác được tăng mật độ lưới cục bộ giúp thời gian tính toán số được giảm xuống và độ chính xác của phép tính cũng có thể được đảm bảo. Thông qua kiểm tra tính độc lập của các lưới, phương án lưới có tổng số 20,7 triệu nút lưới đã được chọn. Việc chia lưới được hiển thị trong Hình 2.

4. Điều kiện biên

Phần mềm thương mại ANSYS CFX được sử dụng để mô phỏng số toàn bộ phần dẫn dòng tuabin tâm trục. Giữa phần quay và phần không quay được đặt giao thức kết nối (interface model) là Transient Rotor Stator. Điều kiện biên đầu vào của buồng xoắn được đặt là áp suất tổng, đầu ra ống hút đặt là áp suất tĩnh, bề mặt tường không trơn trượt và nhẵn, môi trường làm việc là nước và áp suất tham chiếu bằng 0. Thông số mô hình được thể hiện trong Bảng 1. Trong quá trình vận hành tổ máy, để thay đổi công suất phát tuabin Francis thường điều chỉnh độ mở cánh hướng để tăng giảm lưu lượng nước vào tuabin. Đối với tuabin Francis phạm vi điều chỉnh lưu lượng cho phép có thể từ 60% đến 110% lưu lượng tính toán. Nghiên cứu này phân tích đặc tính dòng chảy trong ống hút khi cánh hướng mở ở ba độ mở khác nhau. Trường hợp 1 (TH1) là cánh hướng mở 100% độ mở điểm tính toán, ứng với lưu lượng tính toán Q_{tt} . Trường hợp 2 (TH2), cánh hướng mở với 110% độ mở tính toán, ứng với lưu lượng lớn nhất $Q_{max}=1,1Q_{tt}$. Trường hợp 3 (TH3), cánh hướng mở 60% độ mở tính toán, ứng với lưu lượng tối thiểu $Q_{min}=60\%Q_{tt}$ (xem Hình 3).

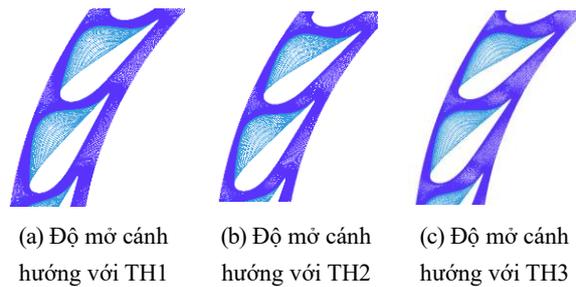
Bảng 1. Thông số mô hình

Cột nước	$H(m)$	12
Lưu lượng tính toán	$Q(m^3/s)$	0.2
Đường kính BXCT	$D(m)$	0.349
Tốc độ quay	$n(rpm)$	735

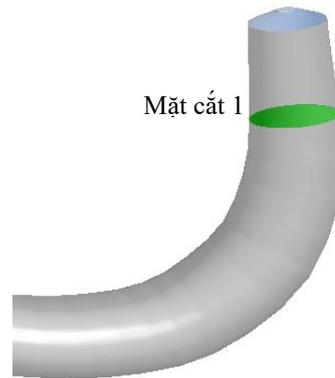
5. Kết quả tính toán và phân tích

5.1. Phân bố áp suất trên tiết diện ống hút

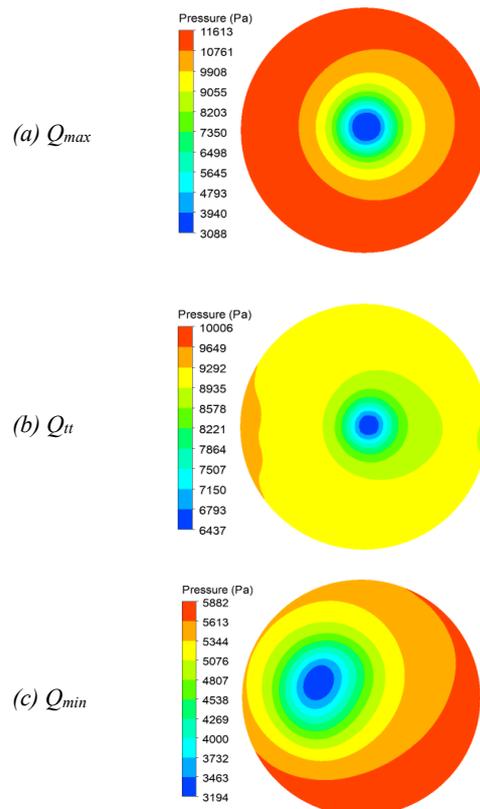
Với các điều kiện làm việc khác nhau trong cùng điều kiện cột nước, dòng chảy trong ống hút được chọn để phân tích. Vị trí mặt cắt ngang điển hình ống hút sử dụng để nghiên cứu được thể hiện trên Hình 4.



Hình 3. Độ mở cánh hướng



Hình 4. Mặt cắt ống hút và độ mở cánh hướng



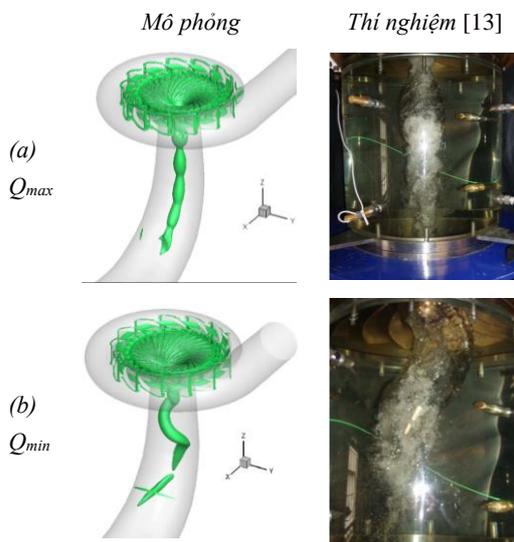
Hình 5. Phân bố áp suất ở ống xả trong các chế độ lưu lượng khác nhau

Hình 5 cho thấy sự phân bố áp suất tại mặt cắt 1 trong ống hút ở các độ mở cánh hướng khác nhau. Có thể thấy trong Hình 5, dưới các điều kiện làm việc khác nhau, áp suất tại cửa vào ống hút là áp suất thấp, chênh lệch áp suất tối đa và tối thiểu là lớn. Ở ngoài điều kiện thiết kế, xuất hiện vùng áp suất thấp bằng áp suất hóa hơi. Hơn nữa, khi lưu lượng giảm, vùng áp suất thấp này dần dần di chuyển lệch ra khỏi tâm ống hút. Do sự phân bố áp suất rõ ràng là không đồng đều nên có thể dễ dàng dẫn đến các xung áp suất nghiêm trọng trong ống hút, tức là rung động thủy lực, có thể dẫn đến rung động tổ máy.

Cũng có thể thấy trên Hình 5 rằng khi lưu lượng ở ngoài giá trị tính toán thì áp suất trên mặt cắt ngang giảm dần, đặc biệt ở phần gần tâm ống hút. Khi độ mở cánh hướng nhỏ, vùng tâm áp suất thấp bị lệch, cho thấy dễ dàng hình thành vùng xoáy bọt khí thực (vortex cavitation) trong điều kiện làm việc này, điều này sẽ ảnh hưởng lớn hơn đến hoạt động an toàn và ổn định của các bộ phận tuabin thủy lực.

5.2. Vùng xoáy bọt khí thực trong ống hút

Để nghiên cứu vùng xoáy trong dòng chảy có nhiều phương pháp đã được sử dụng, trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng phương pháp Omega-Liutex. Phương pháp này đã được chứng minh tính đơn giản và hiệu quả cao trong xác định dải xoáy bọt khí thực qua nhiều công bố [11, 12].

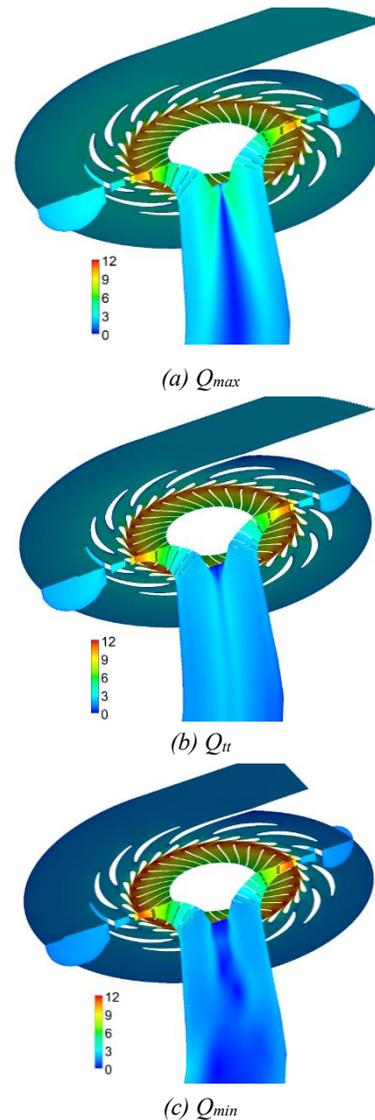


Hình 6. Xoáy bọt hình thành trong ống hút tuabin

Hình 6 cho thấy có sự hình thành dải xoáy bọt khí thực trong ống hút dưới các điều kiện làm việc khác nhau. Có thể thấy trên Hình 6 rằng dưới lưu lượng thấp, có một dải xoáy xoắn ốc rõ ràng ở khu vực đầu ống hút. Khi lưu lượng tăng lên đến lưu lượng lớn nhất,

dải xoáy bọt khí dần chuyển từ xoắn ốc sang dải xoáy hình cột trụ. Dải xoáy xoắn ốc xuất hiện trong vùng áp suất thấp, cho thấy vùng này hình thành dải xoáy bọt khí thực. Điều này sẽ gây ảnh hưởng lớn đến hoạt động an toàn và ổn định của tổ máy. Kết quả mô phỏng cũng phù hợp với những quan sát trong thí nghiệm của nhiều nhóm tác giả.

5.3. Phân bố vận tốc trong ống hút



Hình 7. Phân bố vận tốc dòng chảy trong phần dẫn dòng tuabin

Hình 7 cho thấy phân bố vận tốc của phần dẫn dòng tuabin dưới các cột nước khác nhau. Có thể thấy trong các trường hợp, dòng chảy trong khu vực bánh xe công tác có vận tốc cao nhất và giảm dần khi xuống ống hút. Hình 7(a) với độ mở cánh hướng lớn, lưu lượng lớn, dòng chảy trong ống hút khá đều, tại phần tâm ống hút xuất hiện vùng có vận tốc hướng trục thấp

gần với 0. Điều này cho thấy tại tâm ống hút xuất hiện vùng xoáy bọt khí chuyển động dừng. Hình 7(b) dưới lưu lượng định mức, dòng chảy trong ống hút rất đều và ổn định. Có thể nói tại điểm tính toán dòng chảy trong ống hút tuabin gần như không xuất hiện xoáy, không xuất hiện vùng xoáy bọt khí thực. Đây là lý do tuabin hoạt động ở chế độ thiết kế sẽ ổn định và cho hiệu suất cao nhất. Khi độ mở cánh hướng tiếp tục giảm, lưu lượng giảm, có thể thấy trên Hình 7(c) một dòng xoáy luân phiên rất rõ ràng xuất hiện ở phần đầu vào của ống hút. Vùng vận tốc thấp xuất hiện có dạng xoắn ốc. Đây chính là vùng xoáy bọt chuyển động xoắn ốc xuống hạ lưu. Tình trạng này dễ khiến rung động thủy lực trong ống hút tăng cường; đồng thời, sự xuất hiện của các xoáy lớn hơn cũng dễ gây ra tổn thất thủy lực lớn hơn trong ống hút.

Kết hợp các kết quả phân bố áp suất trên, có thể thấy trong điều kiện làm việc này xuất hiện các dải xoáy bọt khí rõ ràng sẽ gây ra độ rung lớn hơn trong tổ máy tuabin. Vì vậy, có thể xác định một trong những nguyên nhân chính gây ra độ rung lớn của tổ máy thủy điện của nhà máy thủy điện này là do hình thành các dải xoáy bọt khí nghiêm trọng trong ống hút, làm tăng thêm tác động của rung động thủy lực đến độ rung của tổ máy.

Để giảm rung động tổ máy cần giảm sự xuất hiện các bọt xoáy khí thực trong ống hút tuabin. Bọt xoáy xuất hiện ở khu vực áp suất thấp (áp suất bốc hơi bão hòa), vì vậy cần không để xuất hiện vùng áp suất thấp trong phần dẫn dòng tuabin. Do đó ngay trong giai đoạn thiết kế cần chọn tuabin mẫu có khả năng chống xâm thực tốt. Đối với tuabin cột nước cao có thể sử dụng tuabin hai dãy cánh (như tuabin của thủy điện Bản Cốc). Thêm vào đó cần chọn cao trình đặt tuabin phù hợp với chiều cao hút yêu cầu. Về biện pháp kỹ thuật, cần bố trí bộ phận bù khí cửa ra BXCT, bộ phận này có thể đặt ngay thân trục chính hoặc bố trí các ống cấp khí từ thành ống hút.

4. Kết luận

Bài viết đã phân tích đặc tính dòng chảy trong ống hút tuabin Francis với các độ mở cánh hướng khác nhau. Khi cánh hướng mở 100%, lưu lượng tại điểm tính toán, có một vùng áp suất thấp ở phần đầu vào của ống hút. Khi độ mở cánh hướng tăng lên, vùng áp suất thấp tăng dần, và vùng này vẫn tập trung ở tâm ống hút. Khi độ mở cánh hướng giảm xuống điểm lưu lượng nhỏ nhất, vùng áp suất thấp xuất hiện lệch tâm tạo thành hình xoắn ốc. Tính đối xứng của sự phân bố áp suất trong ống hút giảm dần khi lưu lượng giảm đi.

Dưới độ mở cánh hướng với Q_n , dòng chảy trong

ống hút rất ổn định và các dòng phân bố đều; dưới độ mở ở lưu lượng lớn Q_{max} , dòng chảy trong phần đầu vào của ống hút trở nên hỗn loạn, đồng thời luân phiên các xoáy phân tán xuất hiện ở phần đầu vào của ống hút; Khi độ mở cánh hướng giảm cho Q_{min} , một dòng xoáy ly tâm rất rõ ràng xuất hiện ở ống hút. Kết hợp với kết quả phân bố áp suất, có thể thấy rằng trong điều kiện làm việc này, các dải xoáy bọt khí thực xuất hiện rõ ràng. Sự xuất hiện của các dải xoáy bọt khí thực sẽ gây ra độ rung lớn hơn trong bộ phận tuabin. Vì vậy, một trong những nguyên nhân chính gây ra độ rung lớn của tổ máy thủy tuabin thủy lực này là sự hình thành các dải xoáy tạo bọt nghiêm trọng trong ống hút. Điều này làm tăng thêm tác động của rung động thủy lực đến độ rung của tổ máy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đinh, M.H.(2014), *Nghiên cứu đặc tính năng lượng của tuabin tâm trục với bánh công tác có dãy cánh ngắn*. Luận án Tiến sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [2] 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.
- [3] Iliescu, M.S., G.D. Ciocan and F. Avellan (2008), *Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine Using Particle Image Velocimetry Measurements in Two-Phase Flow*. Journal of Fluids Engineering, Vol. 130, No. 2.
- [4] Zeng, Y., X. Liu and H. Wang (2012), *Prediction and experimental verification of vortex flow in draft tube of Francis turbine based on CFD*. Procedia Engineering, Vol.31, pp.196-205.
- [5] Tran C. T., L.X.P.J. (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] Minakov, A.V., et al. (2015), *The numerical simulation of low frequency pressure pulsations in the high-head Francis turbine*. Computers & Fluids, Vol. 111, pp.197-205.
- [7] Allign E, S. (2011), *Forced and Self Oscillations of Hydraulic Systems Induced by Cavitation Vortex Rope of Francis Turbines*. Ph.D Thesis, 'Ecole Poly technique F'ed'erale de Lausanne.
- [8] Yu, A., X.W. Luo and B. Ji (2015), *Numerical*

- simulation and analysis of the internal flow in a Francis turbine with air admission*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.72(4), p.042047.
- [9] 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.
- [10] Sundstrom, L.R.J., et al. (2014), *LDA measurements in the Francis-99 draft tube cone*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol.22(2): p. 22012.
- [11] Tran, C.T., et al. (2020), *Prediction of the precessing vortex core in the Francis-99 draft tube under off-design conditions by using Liutex/Rortex method*. Journal of Hydrodynamics, Vol.32(3), pp.623-628.
- [12] Liu, C., et al. (2019), *Third generation of vortex identification methods: Omega and Liutex/Rortex based systems*. Journal of Hydrodynamics, Vol.31(2), pp.205-223.
- [13] Kobro, E. (2010), *Measurement of Pressure Pulsations in Francis Turbines*, Ph.D Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU): Trondheim, Norway.

Ngày nhận bài:	14/10/2024
Ngày nhận bản sửa:	28/10/2024
Ngày duyệt đăng:	04/11/2024