DEVELOPMENT OF ADVANCED VORTEX BOW BLADES FOR TURBINES

DEVERSHI MOURYA

Department of Mechanical Engineering

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2022

DEVELOPMENT OF ADVANCED VORTEX BOW BLADES FOR TURBINES

by

DEVERSHI MOURYA

Department of Mechanical Engineering

Submitted

In fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2022

DEDICATED TO

MY PARENTS, MY FAMILY AND

MY LAB MATES

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, **“Development of Advanced Vortex Bow Blades For Turbines”**, being submitted by **Mr. Devershi Mourya** to the Indian Institute of Technology Delhi, India, for award of degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bonafide research work carried out by him. He has worked under my guidance and supervision and has fulfilled the requirements for the submission of this thesis, which to my knowledge has reached the requisite standard.

The results contained in the thesis have not been submitted, in part or full, to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

Place: New Delhi

Prof. P.M.V. Subbarao

Professor

Department of Mechanical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016 (INDIA)

ACKNOWLEDGEMENT

In Indian spiritual-cultural beliefs the very attempt to thank may not be a good idea especially those who have a major imprint on you in shaping your life. That is done by more intense yet subtle means by carrying out what is expected of you in more meaningful contributions. Those are the ones elated on your achievements and that's what expects you work generously for the welfare of the entire creation. By acknowledging those I mean it be ingrained in my thoughts and actions forever.

I shall be wanting to remain indebted forever to my guide in this endeavor, Prof. P.M.V. Subbarao, for believing in me, for encouragement, support, and tenacity to guide me to this point of final culmination of this research work.

May I express my deep gratitude to all those who advised me overcome hurdles, helped me through difficulties and encouraged me in slowdowns.

To Prof. B Premachandran, Dr. Krishnakant Agrawal, Dept. of Mechanical Engineering, and Prof. Murali R. Cholemari, Centre for Applied Mechanics, all Members of SRC.

Prof. M.R. Ravi, Prof. P.M Pandey and Prof. Amit Gupta, Dept. of Mechanical Engineering; Prof. V.K. Vijay and Prof. Ramchandra, Centre for Rural Development and Technology (CRDT).

Fellow researchers, Dr. Chinmay Mishra, Dept. of Mechanical Engg.; and Dr. Vandit Vijay, Cenre for Rural Development and Technology.

Mr. Hariom Singh, Mr. Thochi Seb Rengma, Mr. Shubham, and all my lab mates. Mr Abhinav Chatterjee, Mr Jaswant, Dept. of Mech. Engg. For their support.

Mr. Amresh Kumar who shared tenacious moments while experimenting, Mr. Jitendra Prasad, Mr. Rajender, all of Dept. of Mech Engineering and Mr. SK Sharma CRDT.

The Department of Mechanical Engg, Indian institute of Technology Delhi. I apologies for any order that has crept in my going down the memory lane and it does not make any instance less important than the other.

My colleagues, friends and my family who are always there behind me even without naming them; and to the Divine Nature.

ABSTRACT

Steam and gas turbines comprise a major part of power generation which influence human energy requirements. Thus, the performance of the turbine is critical to enhance the overall efficiency of power-generation plants and propulsion devices. With advancement, there is consensus that a reduction in the number of blades is an effective way of reducing the weight of the turbine to improve its thrust-to-weight ratio. However, the reduction in the number of blades leads to reduction of performance of the turbine due to high blade loading. Geometrical modification of turbine blade design is one of the ways to reduce the weight of the turbine and improve its efficiency. To achieve the same performance with reduced weight, a high-loaded blade can fulfil this, but this leads to an increase in end wall flow. Two efficient methods to reduce enwall loss is sweeping and bowing. In this work, a combined experimental and computational analysis has been developed to understand the clues to reduce the generation of end wall loss in front of the leading edge by using a modified sweep blade. The modified sweep profile has been incorporated at the junction of the leading-edge and hub end wall. To obtain a modified sweep profile six different sweep curves which were created by varying the control points of the Bezier curve are used to fabricate the blades. Thereafter, these blade designs were compared for finding lower end wall losses using total pressure loss, vorticity magnitude and turbulent kinetic energy at the leading edge using computational fluid dynamics analysis. The results suggest that the size of the horseshoe vortex and corner vortex are reduced, which leads to the overall reduction of the vortex-affected region at the leading edge of a second order sweep blade. The reduction of the vortex-affected region further resulted in the disappearance of the secondary and tertiary vortices. The optimized sweep blade profile with the lowest values for all three parameters has been chosen for fabrication using the 3D printing technique. The

fabricated 3D printed blade with the modified sweep profile was tested experimentally in an in-house fabricated wind tunnel. During experiments, the distribution of static pressure was measured around the blade surface near the end wall and total pressure was measured downstream of the cascade at 50% of the axial cord from the trailing edge. The experimental and computational results are found to be in close agreement. It is observed that the simulation can predict the real field performance with an acceptable accuracy. Similar investigations were performed on optimized bow blades for reduction of endwall flow loss within the cascade channel using the same methodology. For optimized bow blade design, bowing improved the static pressure loading locally, which helps to transfer low momentum fluid of endwall towards midspan which leads to cross-flow movement case. Due to this, an improved fluid flow behaviour is observed at the pressure side only. Whereas, on the suction side, due to the increase of low momentum fluid from midspan to endwall, there is an increase in the end wall loss. Therefore, an overall reduction in loss is found to be minimal for bow blades. Finally, an advanced blade profile is obtained by combining both optimized sweep and optimized bow profile to harness the advantages of both designs to obtain improved performance. The advanced turbine blade is tested using the previous methodology for its performance characteristics. It was observed that a high static pressure zone generates between LE & hub endwall. This accelerates the fluid upward and creates faded curls such as HSV and CV after that weak HSV separates out into two components. When the pressure side component of HSV reached inside the cascade passage due to the unavailability of cross-flow, it does not convert into PV and fails to travel inside the passage significantly. Also, the component of HSV on the suction side was weaker thus would travel a shorter distance and being difficult to detect. This advanced blade showed a reduction of ~16 % in total pressure loss coefficient and ~16 % in the vorticity magnitude due to the combination of the optimal shape of a bow with a sweep profile in the blade cascade. Throughout the investigations, the CFD analysis helped to develop an understanding of the generation and location of vortices, their turbulent kinetic energy value and the distribution of streamline in the fluid. Simulations trajectories were beneficial to gaining insights into complex 3-D flow and the dependence of end wall losses on different parameters including blade design. Overall, the results of this investigation showed that the developed methodology was able to capture the flow behaviour and study the phenomenon of loss generation in front of the leading-edge and inside the cascade near the hub endwall of turbines. It was also found that modification between the junction of leading-edge and endwall able to reduce the generation of vortices in front of leading-edge and also reduce the generation of the cross and down flow, pitch-wise when the spanwise profile of the blade is improved within the cascade channel. the use of simulation data is to capture the generated secondary vortex at the leading edge and within the cascade and after the trailing edge the magnitude of formed vortices and secondary kinetic energy was captured.

संक्षेप

भाप और गैस टर्बाइन बिजली उत्पादन का एक बड़ा हिस्सा होते हैं जो मानव ऊर्जा आवश्यकताओं को प्रभावित करते हैं। इस प्रकार, बिजली पैदा करने वाले उपकरणों की समग्र दक्षता बढ़ाने के लिए टरबाइन का प्रदर्शन महत्वपूर्ण है। प्रगति के साथ, आम सहमति है कि ब्लेड की संख्या में कमी टरबाइन के वजन को कम करने का एक प्रभावी तरीका है ताकि इसके जोर-से-भार अनुपात में सुधार हो सके। हालांकि ब्लेड की संख्या में कमी के साथ टरबाइन का प्रदर्शन कम हो जाता है। और ब्लेड डिजाइन को संशोधित करना टरबाइन के वजन को कम करने और इसकी दक्षता में सुधार करने के तरीकों में से एक है। कम वजन के साथ समान प्रदर्शन प्राप्त करने के लिए, एक उच्च भार वाला ब्लेड इसे पूरा कर सकता है, लेकिन इससे अंत दीवार प्रवाह में वृद्धि होती है। दीवार के नुकसान को कम करने के लिए दो प्रभावी तरीके व्यापक और झुकना है। इस काम में, एक संशोधित स्वीप ब्लेड का उपयोग करके अग्रणी किनारे के सामने अंत दीवार के नुकसान की पीढ़ी को कम करने के लिए एक संयुक्त प्रयोगात्मक और कम्प्यूटेशनल पद्धति विकसित की गई है। संशोधित स्वीप प्रोफाइल को लीडिंग-एज और हब एंड वॉल के जंक्शन पर शामिल किया गया है। एक संशोधित स्वीप प्रोफ़ाइल प्राप्त करने के लिए छह अलग-अलग स्वीप वक्र जो बेज़ियर वक्र के नियंत्रण बिंदुओं को बदलकर बनाए गए थे, ब्लेड बनाने के लिए उपयोग किए जाते हैं। इसके बाद, इन ब्लेड डिजाइनों की तुलना कम्प्यूटेशनल तरल गतिकी विश्लेषण का उपयोग करते हुए कुल दबाव हानि, भ्रमिलता परिमाण और अग्रणी किनारे पर अशांत गतिज ऊर्जा का उपयोग करके अंत दीवार के नुकसान के लिए की गई थी। परिणाम बताते हैं कि घोड़े की नाल के भंवर और कोने के भंवर का आकार कम हो जाता है, जिससे ब्लेड के अग्रणी किनारे पर भंवर प्रभावित क्षेत्र की समग्र कमी हो जाती है। भंवर प्रभावित क्षेत्र में कमी के परिणामस्वरूप द्वितीयक और तृतीयक भंवर गायब हो गए। सभी तीन मापदंडों के लिए न्यूनतम मूल्यों के साथ अनुकूलित स्वीप ब्लेड प्रोफाइल को 3डी प्रिंटिंग तकनीक का उपयोग करके निर्माण के लिए चुना गया है। संशोधित स्वीप प्रोफाइल के साथ निर्मित 3डी प्रिंटेड ब्लेड का प्रयोगात्मक रूप से इन-हाउस निर्मित पवन सुरंग में परीक्षण किया गया था। प्रयोगों के दौरान, स्थिर दबाव के वितरण को अंतिम दीवार के पास ब्लेड की सतह के आसपास मापा गया था और कुल दबाव को कैस्केड के अनुप्रवाह किनारे से अक्षीय कॉर्ड के 50% पर मापा गया था। प्रयोगात्मक और कम्प्यूटेशनल परिणाम निकट समझौते में पाए जाते हैं। यह देखा गया है कि सिमुलेशन स्वीकार्य विचलन के साथ वास्तविक क्षेत्र के प्रदर्शन की भविष्यवाणी कर सकता है। विकसित संयुक्त पद्धति का उपयोग करके कैस्केड चैनल के भीतर एंडवॉल प्रवाह हानि को कम करने के लिए अनुकूलित धनुष ब्लेड पर इसी तरह की जांच की गई थी। अनुकूलित धनुष ब्लेड डिजाइन के लिए, झुकने से स्थानीय स्तर पर स्थिर दबाव लोडिंग में सुधार हुआ, जो एंडवॉल के कम गति वाले द्रव को मिडस्पैन की ओर स्थानांतरित करने में मदद करता है जिससे क्रॉस-फ्लो मूवमेंट केस होता है। इसके कारण बेहतर द्रव प्रवाह व्यवहार केवल दाब पक्ष पर देखा जाता है। जबकि, सक्शन की तरफ, मिडस्पैन से एंडवॉल तक

कम गति वाले तरल पदार्थ की वृद्धि के कारण, अंत की दीवार के नुकसान में वृद्धि होती है। इसलिए, धनुष ब्लेड के लिए नुकसान में समग्र कमी न्यूनतम पाई गई है। अंत में, बेहतर प्रदर्शन प्राप्त करने के लिए दोनों डिज़ाइनों के लाभों का उपयोग करने के लिए अनुकूलित स्वीप और अनुकूलित धनुष प्रोफ़ाइल दोनों को मिलाकर एक उन्नत ब्लेड प्रोफ़ाइल प्राप्त की जाती है। उन्नत टरबाइन ब्लेड का परीक्षण इसकी प्रदर्शन विशेषताओं के लिए पिछली पद्धति का उपयोग करके किया जाता है। यह देखा गया कि एलई और हब एंडवॉल के बीच एक उच्च स्थैतिक दबाव क्षेत्र उत्पन्न होता है। यह द्रव को ऊपर की ओर तेज करता है और एचएसवी और सीवी जैसे फीका कर्ल बनाता है जिसके बाद कमजोर एचएसवी दो घटकों में अलग हो जाता है। जब क्रॉस-फ्लो की अनुपलब्धता के कारण एचएसवी का दबाव पक्ष घटक कैस्केड मार्ग के अंदर पहुंच जाता है, तो यह पीवी में परिवर्तित नहीं होता है और मार्ग के अंदर महत्वपूर्ण रूप से यात्रा करने में विफल रहता है। इसके अलावा, चूषण पक्ष पर एचएसवी का घटक कमजोर था इसलिए कम दूरी की यात्रा करेगा और पता लगाना मुश्किल होगा। ब्लेड कैस्केड में स्वीप प्रोफाइल के साथ धनुष के इष्टतम आकार के संयोजन के कारण इस उन्नत ब्लेड ने कुल दबाव हानि गुणांक में ~ 16% और भंवर परिमाण में ~ 16% की कमी दिखाई। जांच के दौरान, सीएफडी विश्लेषण ने भंवरों की पीढ़ी और स्थान, उनके अशांत गतिज ऊर्जा मूल्य और द्रव में सुव्यवस्थित के वितरण की समझ विकसित करने में मदद की। सिमुलेशन प्रक्षेपवक्र जटिल 3-डी प्रवाह में अंतर्दृष्टि प्राप्त करने और ब्लेड डिजाइन सहित विभिन्न मापदंडों पर अंत दीवार के नुकसान की निर्भरता के लिए फायदेमंद थे। कुल मिलाकर, इस जांच के परिणामों से पता चला कि विकसित कार्यप्रणाली प्रवाह व्यवहार को पकड़ने और टर्बाइनों के हब एंडवॉल के पास कैस्केड के अंदर और अग्रणी किनारे के सामने हानि उत्पादन की घटना का अध्ययन करने में सक्षम थी। यह भी पाया गया कि अग्रणी-किनारे और एंडवॉल के जंक्शन के बीच संशोधन अग्रणी-किनारे के सामने भंवरों की पीढ़ी को कम करने में सक्षम है और क्रॉस और डाउन फ्लो की पीढ़ी को भी कम करता है, जब ब्लेड की स्पैनवाइज प्रोफाइल पिच-वार होती है कैस्केड चैनल के भीतर सुधार हुआ है। सिमुलेशन डेटा का उपयोग उत्पन्न माध्यमिक भंवर को अग्रणी किनारे पर और कैस्केड के भीतर कैप्चर करना है और अनुगामी किनारे के बाद गठित भंवरों और माध्यमिक गतिज ऊर्जा के परिमाण पर कब्जा कर लिया गया था।

CONTENTS

References

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

NOMENCLATURES

Abbreviation

LEF	Leading Edge sweep
EW	Endwall
HSV	Horseshoe Vortex
LEHSV	Leading Edge Horseshoe Vortex
SSHSV	Suction Side Horseshoe Vortex
PSHSV	Pressure Side Horseshoe Vortex
CFD	Computational Fluid Dynamics
FVM	Finite Volume Method
TM	Turbulence Modelling
EWT	Endwall Treatment
REW	Realizable Endwall
Uref	Reference Free velocity
To,in	Reference Pressure
Pt,ref	Reference Stagnation Pressure
Cpt	Coefficient of total pressure
Pt	Stagnation Pressure

Cpt,	Total pressure loss coefficient
BL	Boundary Layer
AWA	Area weighted averaged
u,v,w	Mean local velocity in the local coordinate system
Cf	Skin friction Coefficient

Greek Symbols

A	Blade angle
P	Density
τ_{ω}	Wall shear stress (WSS)