

# Dinamične in fazno-frekvenčne lastnosti nestabilnosti rotorja zaradi vibracij na tesnilu, vzbujenih s tokom pare

Dacai Li <sup>1,\*</sup> – Changhong Lv <sup>1</sup> – Zhenhai Bu <sup>1</sup> – Xuming Yan <sup>1</sup> – Zili Lan <sup>1</sup> – Lihua Cao <sup>2</sup> – Heyong Si <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Guangdong Datang International Leizhou Power Generation Co., Kitajska

<sup>2</sup> Severovzhodna univerza za elektroenergetiko, Šola za energetiko in elektroenergetiko, Kitajska

Vibracije, ki jih vzbujata tok pare na tesnilih, močno vplivajo na stabilnost rotorjev. Zlasti pri nadkritičnih parnih turbinah ustvarjajo večji premeri rotorjev in manjše radialne zračnosti tesnil ugodne pogoje za vzbujanje vibracij tesnil s tokom pare. Vpliv omenjenega vzbujanja na stabilnost je mogoče opredeliti z analizo vzbujalnih sil in dinamičnih koeficientov tesnil. Mehanizmi pojava nestabilnosti rotorjev zaradi vzbujalnih sil ter odvisnosti med omenjenimi silami in gibanjem rotorja pa še niso bili pojasnjeni, da bi bilo mogoče omejiti vzbujanje.

Za preučitev dinamike in fazno-frekvenčnih lastnosti nestabilnosti rotorja zaradi vibracij na tesnilu, vzbujenih s tokom pare, je bil postavljen model labirintnega tesnila za celoten cikel za drugostopenjsko pregrado v supervisokotlačnem okrovu parne turbine z močjo 1000 MW. Večfrekvenčno vrtnično gibanje rotorjev velikega premera je bilo opisano z uporabniško določenima funkcijama (UDF) DEFINE\_CG\_MOTION in DEFINE\_PROFILE. Deformacije v mejni domeni so bile v izogib elementom z negativnim volumnom in za izboljšanje učinkovitosti izračunov prilagojene z deformacijo mreže. Zanesljivost simulacijskega modela je bila eksperimentalno preverjena. Preizkusi vzbujanja vibracij s tokom pare v merilu 1:2 so potrdili model turbulenc in ustrezne robne pogoje. Stopnja je sestavljena iz 45 rotorskih in 45 statorskih lopatic. Stabilnost tesnila je bila analizirana na podlagi povprečnega efektivnega dušenja in delovne sposobnosti tekočine.

Izkazalo se je, da navzkrižni togosti  $k_{zy}$ ,  $k_{yz}$  in neposredna togost  $k_{zz}$  nihajo v razponu med 5 Hz in 50 Hz. Neposredna togost  $k_{yy}$  ima širok razpon. Neposredno dušenje  $c_{zz}$  se zmanjšuje s porastom frekvence, dušenje  $c_{yy}$  pa se najprej zmanjša, nato stabilizira in končno raste nad 55 Hz. Navzkrižno dušenje se najprej zmanjšuje in nato povečuje, končno pa se stabilizira nad 15 Hz. Efektivno dušenje se postopno zmanjšuje z višanjem frekvence, stabilnost tesnila pada. Povprečno efektivno dušenje in delo fluida nihata okrog 12 Hz in 24 Hz ter imata trend rasti nad 55 Hz. Negativno delo se zmanjšuje, stabilnost tesnila pa je slaba. Večja kot je začetna ekscentričnost, več negativnega dela opravi tekočina. Vzbujalna sila  $F_y$  deluje v smeri naprej s pomikoma  $y$  in  $z$ , sila  $F_z$  pa deluje v nasprotni smeri s pomikoma  $y$  in  $z$ . Vzbujalna sila  $F_y$  opravlja na rotorju pretežno pozitivno delo, sila  $F_z$  pa pretežno negativno delo. Fazni razliki  $\Delta\phi_{yy}$  in  $\Delta\phi_{zy}$  se postopoma povečujeta s porastom frekvence, vedno pa sta med  $0^\circ$  in  $90^\circ$ . Fazna razlika  $\Delta\phi_{zz}$  se najprej zmanjša in nato poveča. Fazni razliki  $\Delta\phi_{zz}$  in  $\Delta\phi_{yz}$  nihata pri 12 Hz in 24 Hz, območje razlike pa se lahko poveča do  $20^\circ$  in zmanjšuje stabilnost tesnila.

Iz zgornjih rezultatov je mogoče izpeljati mehanizem dinamičnih in fazno-frekvenčnih lastnosti. Stabilnost tesnila se zmanjšuje z višanjem frekvence. Povprečno efektivno dušenje zajema vpliv veličin  $c_{zz}$ ,  $k_{zy}$  in  $c_{yy}$ ,  $k_{yz}$  ter omogoča celovitejše napovedovanje stabilnosti tesnila. Glavni vzrok za nestabilnost rotorja zaradi vibracij, ki jih vzbujata tok pare na tesnilu, je hitra sprememba fazne razlike med vzbujalnimi silami in pomiki.

V članku je opisana raziskava dinamičnih in fazno-frekvenčnih lastnosti ultranadkritične enote z močjo 1000 MW. Omejitev je v nizki delovni hitrosti enote parne turbine, analiza vrtnične frekvence in fazno-frekvenčnih lastnosti pa ne presega 65 Hz. Za rotacijske stroje kot so letalski motorji, ki se vrtijo z visoko frekvenco, bo treba v prihodnjih raziskavah povečati frekvenčni razpon večfrekvenčnega vrtničnega modela. Predstavljeni rezultati pa so univerzalno uporabni za parne turbine. Mehanizem nestabilnosti tesnil zaradi vibracij, ki jih vzbujata tok pare, je bil razkrit s pomočjo fazno-frekvenčnih lastnosti vzbujalnih sil in pomikov. Omenjeni mehanizem predstavlja teoretično izhodišče za varno obratovanje ultranadkritičnih parnih turbin.

**Ključne besede:** ultranadkritična enota, labirintno tesnilo, vibracije, vzbujene s tokom pare, dinamične lastnosti, fazno-frekvenčna analiza