

NÍZKOTLAKÉ ČÁSTI PARNÍCH TURBÍN PŘI NEUSTÁLENÝCH PODMÍNKÁCH V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČR

LP PARTS OF STEAM TURBINES AT NONSTEADY CONDITIONS IN CZECH ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEMS

Miroslav J. Černý

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 16608 Praha 6

Abstrakt

Příspěvek se zabývá stavem v nízkotlaké části parní turbíny při neustálených podmínkách v přenosové soustavě ČR a jeho vlivem na životnost parních turbín.

Abstract

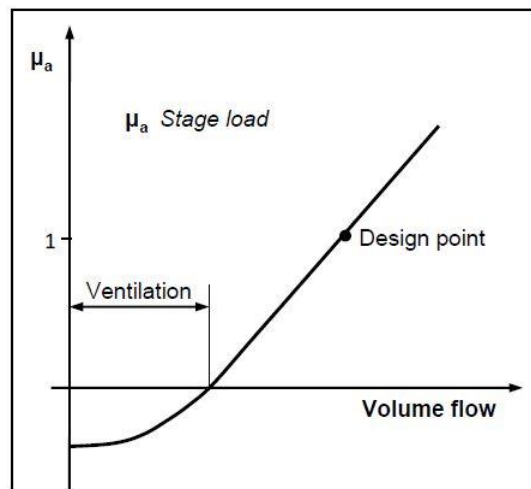
Paper deals with LP parts of steam turbines at nonsteady conditions in power transmission systems and the influence on the lifetime of steam turbines blades.

Úvod

Požadavky na provoz elektráren jsou do velké míry ovlivněny rychle vzrůstajícím podílem obnovitelných zdrojů, které jsou ze své podstaty nestabilní. To klade nové požadavky na provoz klasických zdrojů s parní turbínou, které se stále využívají i u obnovitelných zdrojů. To vede k situaci, kdy parní turbíny mohou pracovat s velmi nízkými objemovými průtoky po delší dobu. Za provozních podmínek, kdy objem průtoku v poslední fázi nízkotlaké části (LP) parní turbíny je pod určitou hranicí, energie se vrací do pracovního média. Tento proces způsobuje asynchronní aerodynamické excitace, které vedou k vysokému dynamickému zatížení lopatek. Tento proces se někdy nazývá ventilace, protože lopatky víří v globálně pomalém pohybu média s malými tlakovými rozdíly. Tento fenomén se také nazývá nízkobjemový průtok (LVF).

Kritickou složkou parní turbíny z hlediska pružného provozu jsou zejména lopatky LSMB (Last Stage Moving Blades) v nízkotlaké části. Operační režim LSMB je charakterizován objemovým průtokem opouštějícím část turbíny.

Průtok se potom liší v důsledku snížení vstupní hmotnosti do LP (low pressure) stupně – části parní turbíny za nízkých zátěžových podmínek elektrárny. Také špatný kondenzační tlak vede ke snížení objemového průtoku.



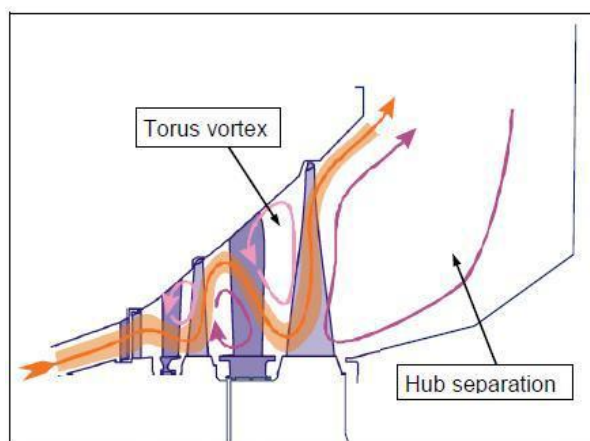
Obr. 1: Obecná charakteristika LP turbíny při změně objemového průtoku

Zatížení LP stupně (obr. 1) je bezrozměrný výstupní výkon turbínového stupně. Se snížením objemového průtoku se snižuje pracovní výkon a následně i výstupní výkon. V závislosti na skutečné geometrii turbíny již stupeň neprodukuje výkon obvykle kolem 20 % až 30 % toku výpočtového objemu. Další snížení objemového průtoku vede k energetické spotřebě stupně, kdy se energie vrací do pracovního média, nastává jev „ventilace“.

Objemové tokové pole uvnitř LP stupně

Bylo zjištěno, že struktura toku páry se mění se snížením objemového toku. Rozpětí variace reakce je 15 % u kořene lopatky a 65 % u špičky v poslední části parní turbíny. Vzhledem k tomu, že u kořene je úsek s nízkou reakcí, je ovlivněn nízkým objemovým tokem. Protože pára již nemůže projít zónou blízko kořene, je přeměrována směrem ke špičce lopatky a tím se za rotorovou lopatkou rozvíjí separační oblast.

Stejně jako separační oblast u náboje za rotorovou lopatkou se jiná separační zóna tvoří při ještě nižších objemových tocích blízkých prostoru v axiální mezeře mezi statorem a rotorovou lopatkou. Tento torusový vír se pohybuje obvodovým směrem se značnou rychlostí, která se blíží rotační rychlosti rotorové lopatky. Obě separační zóny a odstředivá síla usměrňují průtok u rotorové lopatky do diagonálního směru s hlavní radiální rychlostní složkou, jak je znázorněno na obr. 2. Nejvyšší teploty jsou měřeny na špičkách lopatek u vstupu k poslední řadě lopatek.



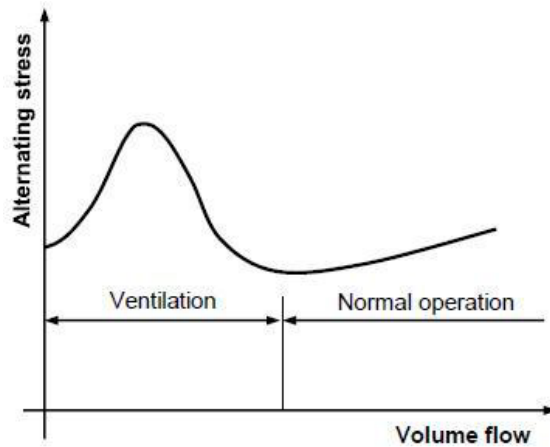
Obr. 2: Charakteristické proudění v LP stupni turbíny při nízkém objemovém plnění

Buzení lopatek

Proudění páry v separačních oblastech má za následek zvýšené dynamické zatížení lopatek v LP stupni parní turbíny při „ventilaci“. Reverzní přechodové toky vedou k přídavným dynamickým zatížením při ventilaci, což může vést až k porušení lopatek. Při provedených zkouškách byly lopatky v LP stupni monitorovány pomocí tenzometrů. Při provozu s nízkým objemovým tokem se napětí v lopatkách prudce zvyšovalo s hodnotami 2krát až 3krát vyššími, než jsou dynamická napětí za běžných podmínek (obr. 3).

V recenzované literatuře se objevují rozdílné výroky o provozních podmínkách s nejvyšším dynamickým zatížením lopatek.

Pokud je objemový průtok snižován, dynamické napětí neustále stoupá až do dosažení maxima téměř při nulovém průtoku (obr. 3). Buzení je popsáno jako náhodné, buzení v různých vibračních módech. Mechanismus způsobující buzení je však nejasný. Někteří autoři považují buzení lopatek LSMB za náhodné, obsahující všechny vlastní frekvence. Zdá se, že zdrojem buzení by mohla být separační zóna u kořene lopatek nebo zóna u pláště mezi statorem a rotorem.

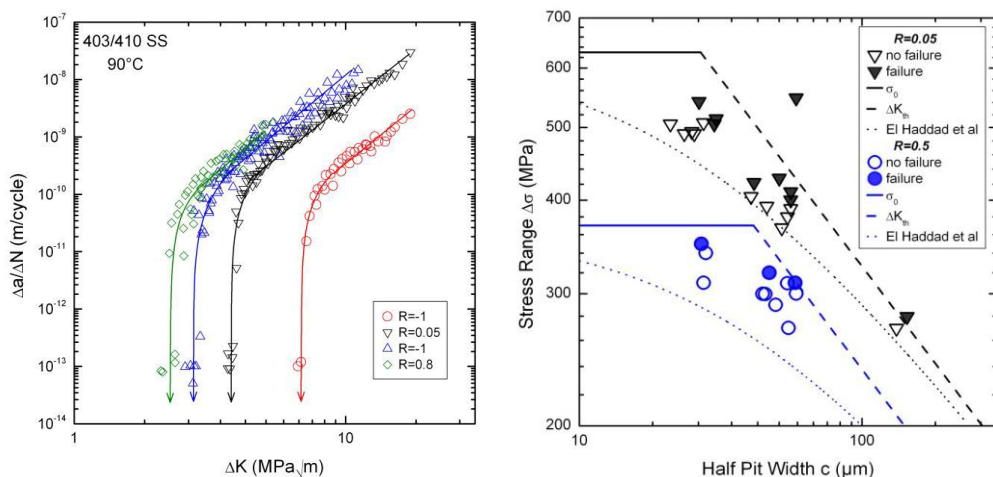


Obr. 3: Schéma alternujícího napětí na lopatce vs. objemový průtok páry

Jako nejpravděpodobnější příčiny jsou zmíněny nejisté podmínky zpětného toku. Druhou možností je buzení známé jako kompresní interakce mezní vrstvy. Třetí možnou příčinou je efekt, který je známým fenoménem u kompresorů, vyskytující se krátce před limitním tlakem. I když špičkový úsek LSB funguje jako kompresor při ventilaci, uvádí se, že průtok rotorovými lopatkami je příliš radiální a má malou axiální složku.

Problémy životnosti lopatek parních turbín

U parních turbín je požadován kvalitní servis, přesná diagnóza, načasování oprav a zlepšování materiálů a provozu parních turbín. To vede k systematickému výzkumu iniciace a šíření trhlin, porušení a odhadu životnosti částí turbín, včetně lopatek za normálních podmínek a za resonance. Koncové lopatky LSB turbíny přenášejí vysoké alternující napětí, expozici při zvýšených teplotách a mechanické síly při opakovaných poměrných deformacích cyklického zatížení. Lopatky také přenášejí obvodové (centrifugální) síly, které jsou v kombinaci s alternujícím napětím odpovědné za únavové poškození. Životnost nejvíce exponovaných (posledních L-1) lopatek je dána kombinací účinků sil, působících na lopatky parní turbíny a vlastností materiálu při daných korozních podmínkách.



Obr. 4: FCGR a Kitagawa-Takahashi Diagram

Korozní mechanismy, působící v parních turbínách je korozní únava (corrosion fatigue – CF), korozní praskání (stress corrosion cracking, SCC), důlková koroze (pitting) a eroze-koroze (erosion-corrosion) [1].

Důlková koroze a korozní únava lopatek turbín a koroze pod napětím (korozní praskání) jsou v současné době nejdůležitější problémy [2], [3].

SCC a CF poškození se inicializuje v nízkotlaké části parní turbíny ve vysoce lokalizovaných oblastech, obvykle v důlcích koroze jako koncentrátorech napětí. Stádia jsou: akumulované poškození metastabilních důlků na stabilní důlky, růst stabilních důlků, přechod důlků na trhliny, růst subkritických trhlin, a nakonec nestabilní porušení [4], [5], [6].

Kitagawa-Takahashi (K-T) diagram a FCGR (obr. 4) se obvykle používá pro odhad únavové meze a životnosti korodovaných částí lopatek parních turbín pro danou legovanou ocel, prostředí (pára, teplota) a způsob zatěžování. K-T diagram koreluje velikost korozního důlku s únavovou trhlinou [7], [8]. V poslední době byla též publikována teorie pravděpodobnostního K-T diagramu pro vyjádření vlivu geometrie koroze na únavu [9].

Příspěvek byl vytvořen v rámci grantového projektu TN01000007 Národní centrum pro energetiku.

Literatura

- [1] Černý, M. (2014): *Damage and Localized Corrosion in Steam Turbines*. Proceedings of 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis 2014, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Mariánské Lázně, CD-ROM. ISBN 978-80-231-0377-6
- [2] Černý, M. (2014): *Korozní poškození legovaných ocelí v parních turbínách*. Sborník 9. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 177-180. ISBN 978-80-261-406-3
- [3] Černý, M. (2015): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Proceedings of 53rd International Conference on Experimental Stress Analysis, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Český Krumlov, CD-ROM. ISBN 978-80-01-05735-1
- [4] Černý, M. (2016): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Applied Mechanics and Materials, Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II, Vol. 827, pp. 177-180, 2016. ISSN 1662-7482
- [5] Černý, M. (2016): *Modeling of Corrosion Fatigue Crack Initiation in Steel Alloy for Steam Turbines*. Proceedings of 54th International Conference Experimental Stress Analysis 2016, Czech Society for Mechanics, Srní, CD-ROM. ISBN 978-1-5108-2670-0
- [6] Černý, M. J. (2017): *Evaluation of the Influence of Corrosion Fatigue on Steel Alloy for Steam Turbines*. Proceedings of 55th International Conference Experimental Stress Analysis, Technical University of Kosice, Nový Smokovec (Slovakia), CD-ROM. ISBN 978-80-553-3166-9
- [7] Černý, M. (2017): *Posouzení korozní odolnosti dílů parních turbín s využitím lomové mechaniky*. Sborník 12. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 149-150. ISBN 978-80-261-0741-5
- [8] Černý, M. J. (2018): *Životnost lopatek parních turbín*. Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 159-162. ISBN 978-80-261-0794-1
- [9] Černý, M. (2019): *Modelling of corrosion fatigue for steam turbines by probabilistic Kitagawa-Takahashi diagram*. Proceedings of 57th International Conference Experimental Stress Analysis, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Luhačovice, CD-ROM. ISBN 978-80-214-5753-9