

ODRŽAVANJE PLINSKIH TURBINA – UVJET DOBROG GOSPODARENJA PLINSKOTURBINSKIM POSTROJENJEM

Mr. sc. Miroslav Š a n d e r, Zagreb

UDK 621.438:621.311.23
PREGLEDNI ČLANAK

Troškovi održavanja i raspoloživost su dvije najvažnije brige svakog vlasnika opreme. Pomoću sustava upravljanja poslovima održavanja i sustavom upravljanja dokumentacijom trebalo bi i na plinskoj turbini uspostaviti program održavanja koji optimizira troškove vlasniku opreme (HEP) te ujedno maksimalizira raspoloživost opreme. Da bi program održavanja bio učinkovit, vlasnik mora razviti općenito razumijevanje odnosa između njegovih operativnih planova i prioriteta postrojenja, razinu pripremljenosti operativnog osoblja i osoblja za održavanje, te preporuka proizvođača opreme s obzirom na vrste pregleda, planiranje rezervnih dijelova kao i glavnih faktora koji utječu na vijek komponenti i odgovarajući pogon opreme. U ovom članku razmotrit će se operativna iskustva kao i praksa održavanja s naglaskom na vrste pregleda uz pogonske faktore koji utječu na planove održavanja. Dobro planirano održavanje opreme će rezultirati s maksimalnom raspoloživošću opreme te optimalnim troškovima održavanja. Održavanje prikazano u članku se bazira na iskustvu i literaturi poduzeća GE plinskih turbina za teške uvjete, ali isto tako uzima u obzir i druge proizvođače (Siemens-Westinghouse, Alstom). Za primjer u slikama je odabrana MS6001FA u vlasništvu HEP-a (fotografirao dipl. ing. D. Krilić i autor članka) i na nju se opća pravila u ovom članku mogu primjenjivati.

Ključne riječi: pregledi u pogonu, pregled sustava izgaranja, pregled vruće staze plina, glavni pregled, faktori održavanja i životni vijek, gorivo, temperatura paljenja, injektiranje vode / pare, izvrštavanje, normalna obustava, planiranje dijelova, vremenski intervali za preglede, planiranje osoblja za održavanje.

1. PRISTUP ODRŽAVANJU PLINSKIH TURBINA

Plinske turbine za teške pogonske uvjete konstrukcijski koriste rezultate najnovije tehnologije turbina za zrakoplove, a obično su koncipirane tako da pogone generator direktno ili preko reduktora koji se nalazi na kompresorskom kraju. Turbine se grade sa svim dodatnim uređajima da bi se omogućila brza i troškovno učinkovita montaža, a ujedno se time omogućuju jednostavna rješenja pri dogradnji u kombinirana postrojenja i IGCC (Integrirani sustav kombi postrojenja s rasplinjavanjem ugljena). Općenito postrojenje plinske turbine uključuje aksijalni kompresor s različitim brojem stupnjeva, određeni broj komora izgaranja te različiti broj stupnjeva same turbine. Slika 1 je prikaz turbine MS6001FA u vlasništvu HEP-a (sve slike u ovom članku fotografirali dipl. ing. D. Krilić i autor članka u TE-TO Zagreb) i na nju se opća pravila u ovom članku mogu primjenjivati.

Sustav izgaranja se sastoji od komora izgaranja obično smještenih oko oboda kućišta tlačnog kompresora. On uključuje savnice goriva, sustav paljenja sa svjećica-

ma, detektore plamena, te spojne plamene cijevi. Topli plinovi generirani pri izgaranju goriva u komorama izgaranja struje naletom kroz hladene prijelazne dijelove turbine.



Slika 1. Rastavljanje turbine za pregled sustava izgaranja u TE-TO Zagreb na turbini MS6001FA

U slučaju ugradnje reduktora, reduktor između turbine i električnog generatora se rješava sa zupčanicima koji prenose maksimalnu nazivnu snagu turbine. Izlazna snaga iz plinske turbine obično ide preko elastičnih spojki na pogonski zupčanik veće brzine vrtnje na reduktoru. U ležajno kućište reduktora se integralno ugrađuju termoparovi i osjetnici vibracija. U reduktoru je obično konstrukcijski dograđen stroj za okretanje osovine prilikom upuštanja turbine te za sporo okretanje prilikom prekida pogona. Budući da velika većina plinskih turbina služi u kombikogeneracijskim procesima, teži se da turbina prigoni na hladnom kraju što dozvoljava da se ispuh usmjerava aksijalno u kotao na ispušne plinove, zatim da pomoćni paketi postrojenja budu montirani u tvornici na odvojena postolja zbog lakše montaže i održavanja i da turbinska oplata izvan postolja same turbine osigurava prostor za održavanje i kontrolu buke.

Plinska turbina se osim glavnih sklopova još sastoji od golemog broja pumpi, kompresora, ventilatora, ventila, sabirnika, mjernih osjetila, sklopki, podsklopova, uređaja itd., o kojima možemo voditi evidenciju jedino ako svaki element ima svoje jedinstveno ime. Ime svake komponente se može sastojati od kombinacije brojeva i slova, a uvodi se u sustav označavanja termoelektrane. Europski poznat i općeprihvaćeni sustav je KKS – Kraftwerksskennzeichnungssystem (1). Jednom stvorivši sustav imenovanja i označavanja plinskoturbinskog postrojenja (zapravo cijele elektrane), s njime se koristimo u procesu vođenja pogona postrojenja, ali još i više u sustavu upravljanja poslovima odražavanja (SUPO) te u sustavu upravljanja dokumentacijom (SUDOK) termoelektrane pa time i plinskoturbinskog postrojenja.

Sustav upravljanja poslovima odražavanja (SUPO) sa sustavom upravljanja dokumentacijom (SUDOK) čini dva međusobno povezana sustava (2). Pomoću sustava upravljanja poslovima održavanja ispostavljaju se radni nalozi za preventivne korektivne poslove održavanja. S njime je moguće planirati aktivnosti održavanja, moguće je pridruživati resurse, pratiti odvijanje aktivnosti i pohranjivati završene radne naloge u arhivu termoelektrane (na diskove ili trake) radi kasnijih analiza (npr. prema vrsti rada, komponenti održavanja ili uzroku kvara). Preventivno održavanje pomoću takvog sustava omogućava planiranje svakog preventivnog zahvata održavanja kroz zadatke preventivnog održavanja za pojedine objekte održavanja na turbini. Preventivni zahvati se mogu planirati vremenski ili prema stanju sklopova ili njihovom kombinacijom. Iako je to poprilično teško, moguće je stvarati normative utroška radnog vremena i materijala te izračunavati potrebne resurse za svaki zahvat održavanja ili za buduće razdoblje čime je omogućeno planiranje troškova (budžet). Sustav može obuhvatiti podatke o objektima održavanja i njihovom stanju te omogućiti arhiviranje podataka o plinskoturbinskim objektima. On može sadržavati podatke o mjerama sigurnosti koje treba provoditi pri održavanju i o mjerama zaštite okoliša. Sustav omogućava po-

vezivanje objekata održavanja s pripadajućim rezervnim dijelovima i tehničkom dokumentacijom. Također se mogu pokretati poslovi nabave od upita za ponude preko zahtjeva za nabavu do generiranja narudžbe, odnosno ugovora s dobavljačima roba ili usluga. Ukoliko je sustav dobro razrađen i vođenje pliskoturbinskog postrojenja je stručno, nabava rezervnih dijelova koje je glavni proizvođač i isporučitelj turbine kupovao od svojih podizvođača se može obavljati direktno od tih podizvođača čime se snižuju troškovi nabave i skraćuje vrijeme nabave. SUPO omogućava više razina odobravanja uz definiranje dopuštenog iznosa na zahtjevima za nabavu kako bi naručivanje bilo pod nadzorom. Pojednostavljuje se zaprimanje i ulaz rezervnih dijelova na skladište. On upravlja detaljnim podacima o materijalima na skladištu uključujući cijene i tehničke podatke potrebne za ponovnu narudžbu. Vode se min/maks zalihe koje omogućavaju signaliziranje trenutka kada treba pokrenuti nabavu, čime je osigurana raspoloživost pričuvnih dijelova upravo kada su potrebni. Uvođenje sustava upravljanja dokumentacijom uvodi i kontrolirani pristup dokumentaciji koja je vezana uz održavanje.

2. PRIPREMA ODRŽAVANJA PLINSKIH TURBINA

Pripremanje za održavanje plinskih turbina vezano na SUPO je prvi korak dobrog gospodarenja u elektrani s plinskom turbinom, jer se time vrijeme stajanja svodi na minimum. Ispravno obavljanje planiranog održavanja također osigurava direktnu korist u smanjenju prisilnih ispada te povećanoj startnoj pouzdanosti, koja se opet vraća u smanjenju nepredviđenog stajanja zbog izvanrednih situacija. Primarni faktori koji utječu na pripremu i planiranje održavanja su: turbinske konstrukcijske osobine, režim rada, vrsta goriva, program koji preporuča proizvođač, okolina u kojoj se odvija pogon, potrebe elektroenergetskog sustava, za-



Slika 2. Rastavljena komora izgaranja sa spojnim cijevima i svjećicom za paljenje (desno gore)

htjevi na raspoloživost, rezervni dijelovi koji stoje na raspolaganju, osoblje za održavanje, raspoloživa dijagnostika i ekspertni sustavi.

Dijelovi turbine koji traže najveću pozornost su vezani uz proces izgaranja te su izloženi visokim temperaturama vrućih plinova nastalih u sustavu izgaranja. Radi se o komponentama u sustavu izgaranja i na vrućoj strujnoj stazi plina, a tu spadaju plamene cijevi, kape, sklopovi sapnica goriva, spojne plamene cijevi, prijelazni komadi, turbinske sapnice, turbinski statorski vijenci te turbinske lopatice.

Temeljna konstrukcija i preporučljivo održavanje plinskih turbina svih glavnih proizvođača za teške pogonske uvjete su orijentirani prema: vremenski što duljem pogonu između pregleda i remonta, pregledu i održavanju na licu mjesta, korištenju lokalne područne radne snage za demontažu, te montaži opreme uz stručni nadzor i vođenje od strane proizvođača.

Pored održavanja osnovnog aparata plinske turbine, periodično servisiranje također zahtijevaju upravljački uređaji, oprema za mjerenje goriva, pomoćni uređaji plinske turbine, paket reduktora i generatora te drugi pomoćni uređaji. Održavanje se dakle mora koncentrirati na sljedećih pet osnovnih sustava: upravljanje i uređaji vezani uz upravljanje, izgaranje, turbina, generator te ostali pomoćni uređaji. Neraspoloživost upravljanja i uređaja vezanih uz upravljanje se općenito sastoji od ispada kratkog trajanja, dok se kod ostala četiri sustava radi o rjeđim, ali zato duljim ispadima. Za učinkovit program održavanja s točke gledišta raspoloživosti i troškova, moraju se usuglasiti pogonski planovi te prioriteta postrojenja s preporukama proizvođača pri čemu treba uzeti u obzir; broj i vrstu pregleda turbine, planiranje rezervnih dijelova te ostale faktore koji djeluju na životni vijek opreme.

Sve plinske turbine za teške pogonske uvjete imaju revizijske otvore za vizualni pregled staze plinova pomoću optičkog boroskopa i to kod srednjih kompresor-

skih stupnjeva, a na turbini kod prvih, drugih, te prema potrebi ostalih turbinskih lopatica i dijelova sapništa. Ovi revizijski otvori koji se sastoje od radijalno pridruženih rupa kroz kompresorsko kućište, turbinsku ljusku i unutarnje statorske turbinske vijence (bandaže) su konstruirani tako da omogućuju penetraciju optičkog boroskopa u kompresorsko ili turbinsko područje strujne staze. Priprema boroskopskog pregleda i sam boroskopski pregled će dovesti do odluke da li je potrebna demontaža kućišta turbine i zamjena dijelova.

Boroskopski inspekcijski intervali se moraju bazirati na pogonskim režimima jedinice. Oni se također mogu bazirati na stručnom iskustvu o pogonskom režimu pojedinačnog stroja, gorivima koja se koriste te na rezultatima prijašnjih boroskopskih inspekcija. Primjena programa nadzora korištenjem boroskopa će omogućiti planiranje zastoja te planiranje nabave dijelova, što će omogućiti niže troškove održavanja i višu raspoloživost i pouzdanost plinske turbine.

3. PREGLEDI PRI ODRŽAVANJU PLINSKE TURBINE

Vrste pregleda pri održavanju se mogu općenito definirati kao pregledi u pogonu, pregledi pri stajanju u pričuvi, te pregledi u rastavljenom stanju. Pregledi u pogonu se obavljaju tako da se promatraju ključni parametri dok je turbina u pogonu. Pregledi pri stajanju u pričuvi se obavljaju kad to dozvoljava elektroenergetski sustav, tj. kada jedinica ne radi, a ti pregledi uključuju rutinsko servisiranje pomoćnih sustava i baždarenje. Pregledi u rastavljenom stanju traže otvaranje turbine za inspekciju unutarnjih komponenti koja se obavlja s različitim stupnjevima. Pregledi u rastavljenom stanju idu od pregleda sustava izgaranja preko inspekcije vruće staze plinova pa do glavnog pregleda.

Detalji svake inspekcije ili pregleda nakon kojeg slijedi i određeni zahvat se mogu opisati kao (3):

Pregledi u pogonu

Pregledi u pogonu se sastoje od kontinuiranih promatranja strojara u postrojenju za vrijeme rada jedinice. Sve počinje s uspostavljanjem pogonskih podataka bazne postave turbine za vrijeme početnog upuštanja nove jedinice te uspoređivanjem s baznom postavom poslije radova na demontaži, ugradnji novih dijelova i ponovnoj montaži. Baznu postavu možemo općenito definirati kao polazne montažne parametre (centriranje, zazori, tolerance, itd.) i pogonske parametre (tlakovi, temperature, protoci, itd.) koji su uspostavljeni pri prvim upuštanjima nove turbine, a isti su s nazivnim i garantnim parametrima ili su ta odstupanja gotovo zanemariva. Ta bazna postava služi kao referenca od koje se može mjeriti daljnje pogoršanje stanja jedinice. Podatke o turbini zapisujemo zato da bismo uspostavili normalne parametre upuštanja kao i ključne parametre stacionarnog stanja. Stacionarno stanje se definira kao uvjeti kod kojih se u prostoru kola ne događa promjena



Slika 3. Zaporni i regulacijski ventil tekućeg goriva s razdjelnikom (u sredini slike) prema komorama izgaranja

temperature veća od 3 °C u periodu većem od 15 minuta. Podaci se moraju uzimati u redovitim intervalima te se trebaju zapisati da bi omogućili vrednovanje turbinskih performansi (stupnja djelovanja, izlazne snage) a po njima i zahtjeva održavanja. Za buduće akcije održavanja važni su sljedeći pogonski podaci: opterećenje u odnosu na ispušnu temperaturu, vibracije, protok goriva i tlak, tlak ulja za podmazivanje, ispušne temperature plina, varijacija raspodjele ispušnih temperatura plina te vrijeme upuštanja. Tu se mogu uključiti i drugi podaci. Analiza odstupanja od standardnih vrijednosti, tj. onih koje su karakteristične za određeno postrojenje pomažu u svladavanju nadolazećih nevolja, promjenama u kalibraciji ili dijagnostici oštećenih dijelova.

Opterećenje uspoređeno s ispušnom temperaturom

Potrebno je promatrati opći odnos između opterećenja i ispušne temperature te uspoređivati s prethodnim podacima. Okolišna temperatura te atmosferski tlak će imati određeni utjecaj na apsolutnu razinu temperature. Visoka temperatura ispuha je općenito indikator pogoršanja stanja unutarnjih dijelova, prevelikih propuštanja ili zaprljanog zračnog kompresora.

Vibracijska razina

Vibracijske karakteristike jedinice se moraju promatrati te zapisivati. Za vrijeme pogona događaju se manje promjene s promjenom pogonskih uvjeta. Međutim, velike promjene ili trend kontinuiranog povećanja će biti pokazatelj potrebe za korektivnom akcijom.

Protok goriva i tlak

Sustav goriva se mora pratiti zbog odnosa između goriva i opterećenja. Treba promatrati tlak goriva kroz sustav. Promjene u tlaku goriva mogu ukazivati da su prolazi goriva začepljeni ili da su mjerni elementi oštećeni ili izvan kalibracijskog područja.

Ispušna temperatura i raspršenje vrijednosti ispušne temperature

Najvažnija upravljačka funkcija koja se mora promatrati je ispušna temperatura te sustav izvrštavanja zbog prekomjerne temperature na ispuhu. Rutinska verifikacija rada te kalibracija ovih funkcija će minimizirati istrošenje dijelova na vrućoj stazi plina. Varijacije u raspršenju temperature ispuha turbine se trebaju redovito mjeriti i nadzirati. Velike promjene ili trend kontinuiranog povećanja u raspršenju temperature ispuha turbine će biti pokazatelj pogoršanja sustava izgaranja ili problema s razdiobom goriva. U slučaju trenda povećanja u raspršenju ispušnih temperatura, životni vijek dijelova vruće staze plinova će biti skraćen.

Vrijeme upuštanja

Vrijeme upuštanja je odlična referentna vrijednost prema kojoj se mogu uspoređivati i vrednovati svi ostali pogonski parametri. Krivulja startnih parametara; br-

zine vrtnje, signala goriva, ispušne temperature te ključnih stavaka kritičnog slijeda (sekvence) u odnosu na vrijeme od početnog signala starta će biti dobar pokazatelj stanja upravljačkog sustava. Odstupanja od normalnih uvjeta zahtijevaju dijagnostiku, kalibracijske promjene i određivanje stupnja oštećenja.

Vrijeme zaustavljanja

Vrijeme zaustavljanja je odličan pokazatelj centričnosti ležaja i stanja ležajeva. Vrijeme od trenutka kad je gorivo obustavljeno pri normalnoj obustavi pogona sve do trenutka kad je rotor došao u stanje mirovanja se uspoređuje i vrednuje. Pomno promatranje i nadziranje ovih pogonskih parametara će poslužiti kao baza za efektivno planiranje rada na održavanju i zahtjevima za potrebnim dijelovima pri održavanju.

Pregledi pri stajanju u pričuvi

Pregledi pri stajanju u pričuvi se obavljaju na svim plinskim turbinama, ali se osobito tiču plinskih turbina za vršna opterećenja te povremena opterećenja, gdje je startna pouzdanost od primarne važnosti. Ovaj pregled uključuje rutinsko servisiranje sustava akumulatora istosmjernje struje za havarijsku pumpu, promjenu filtara, provjeru razina ulja i vode, čišćenje releja te provjeru kalibracije uređaja. Servisiranje se može obaviti za vrijeme kad nije potrebno pokrivati vršno opterećenje, a bez prekidanja raspoloživosti turbine. Periodičko testiranje upuštanja (starta) je bitan dio pregleda pri stajanju. U dokumente kojima se služimo za vrijeme pregleda kada je turbina u stajanju i u pričuvi spadaju svaka sheme upravljanja / regulacije, tehnološke sheme toka medija te električke jednogpolne sheme. Ti nacrti bi kod svih turbinskih proizvođača trebali davati vrijednosti za kalibriranje, pogonska ograničenja, pogonske karakteristike te sljedni red svih upravljačkih uređaja. Pogonsko osoblje kao i osoblje za održavanje bi trebalo redovito koristiti te informacije.



Slika 4. Pregled pri stajanju u pričuvi uključuje promjenu filtra, provjeru razine ulja, kalibraciju, provjeru elektronskih sustava, provjeru stanja akumulatorske baterije itd.

Pažljivo pridržavanje osnovnim zahtjevima održavanja ima značajni učinak na smanjenje ukupnih troškova održavanja te očuvanju visoke pouzdanosti turbine. Vrlo je bitno čuvati sve zapise o pregledima koji su napravljani te zapise o radovima na održavanju čime se stvara arhiva iz koje možemo izvući “povijest bolesti” pojedinog sustava.

Pregled sustava izgaranja

Inspekcija sustava izgaranja je relativno kratka obustava od oko tjedan dana po turbini s rastavljanjem te pregledom sapnica goriva, plamenih cijevi, prijelaznog komada, spojnih cijevi paljenja i držača, sklopa svjećica, detektora plamena, te protočnih rukavca izgaranja (3). Ovaj pregled se koncentrira na plamene cijevi izgaranja, prijelazne komade, sapnice goriva te poklopce komora za koje je općenito poznato da su među prvima koji traže zamjenu i popravak. Točni pregled, održavanje i popravak ovih stavaka će pridonijeti dužem životnom vijeku dijelova kao što su turbinska sapništa i lopatice. Plamene cijevi, prijelazni komadi te sapnice goriva bi se morale skinuti te zamijeniti s novim ili popravljenim komponentama da bi se vrijeme stajanja svelo na minimum. Demontirane plamene cijevi, prijelazni komadi te sapnice goriva se mogu poslati proizvođaču na popravak nakon što se jedinica vratila u normalni pogon pa će stajati na raspolaganju za sljedeći pregled i zamjenu. Tipični zahtjevi pri inspekciji izgaranja su: pregledati i identificirati komponente komore izgaranja, pregledati i identificirati svaku spojnu cijev za paljenje, držače i plamene cijevi, pregledati da li se u unutrašnjosti komore izgaranja nalaze krhotine te strani objekti, pregledati da li zavari košuljice komore izgaranja imaju pukotine, pregledati da li su sapnice goriva začepljene na vrhovima, pogledati eroziju vršnih rupa te sigurnosne rupe vrhova, pregledati prolaze svih fluida, zraka, tekućina, plina u sklopu sapnica u smislu začepljenja, erozije, izgaranja itd., pregledati da li se sklop svjećica slobodno giba, provjeriti stanje elektroda i izolatora, zamijeniti sve potrošne dijelove te dijelove koji su



Slika 5. Pregled sustava izgaranja – komore su rastavljene, pregled sapnica

izloženi habanju kao što su brtve, podložne pločice, matice, vijke, brtvila itd. Obaviti vizualnu inspekciju sapništa prvog stupnja turbine te boroskopsku inspekciju turbinskih lopatica da bismo vidjeli napredovanje istrošenja te pogoršanja stanja dijelova.

Pored toga obaviti boroskopsku inspekciju kompresora, u omotaču izgaranja promotriti stanje lopatičja na stražnjem kraju aksijalnog kompresora s boroskopom, vizualno pregledati kompresorski ulaz te turbinsko ispušno područje, provjeriti stanje ulaznih privodnih lopatica (IGV), IGV puškica, lopatica zadnjeg stupnja te komponenata ispušnog sustava. Provjeriti ispravni rad propuhivanja sapnica komora izgaranja te provjeriti ventile za propuhivanje. Potvrditi ispravno namještanje te kalibraciju upravljanja izgaranjem.



Slika 6. Pregled plinskog zapornog i regulacijskih ventila



Slika 7. Pregled ventila propuhivanja sapnica komora izgaranja u plinskom odjeljku (u pozadini regulacijski i zaporni ventil)

Nakon što je pregled sustava izgaranja završen, a jedinica je vraćena u pogon sa zamijenjenim novim dijelovima, mogu se demontirati, tj. skinuti dijelovi kao plamene cijevi te prijelazni komadi temeljito pregleda-

Tablica 1. Pregled vruće staze plina – ključni elementi

Pregled vruće staze plina		
Ključni dijelovi	Pregled u svrhu	Mogući zahvati
SAPNIŠTE	1. Oštećenje od stranog tijela 2. Oksidacija/erozija/korozija 3. Pukotine 4. Začepljenje rupa za hlađenje 5. Ostati vijek prevlake 6. Izobličenje sapništa 7. Abnormalno izobličenje 8. Abnormalno istrošenje 9. Nedostaci 10. Granice zazora	SAPNIŠTE
LOPATIČJE		Popravak zavara / obnova, Zamjena položaja, Nova navlaka
ULAZNE PRIVODNE LOPATICE (IGV) & PUŠKICE		LOPATIČJE
KOMPRESORSKO LOPATIČJE (BOROSKOP)		Skidanje i nova prevlaka
		Popravak zavara
		Granica zamora
		Progib bandaže
Raspoloživost na licu mjesta rezervnih dijelova je ključ za minimiziranje stajanja		
KRITERIJI	INSPEKCIJSKE METODE	
Pogonske upute	Vizualna	
Tehnička dokumentacija	Boroskop	
Terenski inženjer	Ostale metode	

ti i popraviti ako je nužno od strane osoblja termoelektrane uz stručni nadzor proizvođača na licu mjesta, ili direktno kod proizvođača. Demontirane sapnice gori-va se mogu očistiti na licu mjesta te protok isto tako provjeriti u vlastitoj radionici, ako postoji oprema za ispitivanje.

Pregled vruće staze plina

Svrha pregleda vruće staze plina je ispitati dijelove na koje nastrujava vrući plin i koji su izloženi visokim temperaturama od vrućih plinova nastalih procesom izgaranja pri čemu se pregledava i kompresor. Na zadnjim stupnjevima aksijalnog kompresora stlačeni zrak ima visoku temperaturu i taj dio je pod neposrednim utjecajem turbinskog sustava izgaranja pa se pregled kompresora obavlja kao pregled vruće staze plina. Pregled dijelova vruće staze plina kako je prikazan u tablici 1. uključuje puni opseg pregleda od sustava izgaranja te



Slika 8. U sredini prijelazni kanali vrućeg plina koji spajaju komore izgaranja (na desnoj strani) prema sapništu i lopatičju prvog turbinskog kola (na lijevoj strani)

dotatno detaljni pregled turbinskih sapništa, statorskih vijenaca i turbinskih lopatica. Za obavljanje ove inspekcije mora se odmaknuti gornja polovina turbinskog kućišta. Prije odmicanja kućišta, nužno je osigurati odgovarajuće nosače za održavanje simetrale turbine, što se čini mehaničkim ili hidrauličkim dizačima kojima ćemo održati centričnost rotora prema statoru, dobiti točne zazore između polovica kućišta te spriječiti uvijanje statorskog kućišta.



Slika 9. Lopatičje sapništa i prvog turbinskog kola rotora

Za pregled vruće staze plina, svi prijelazni komadi te sklopovi sapništa prvog stupnja se moraju demontirati. O odmicanju sklopova segmenata sapništa drugog, trećeg i viših stupnjeva se odlučuje na licu mjesta, ovisno o rezultatima vizualnog promatranja te mjerenjima zazora. Lopatice se obično mogu pregledati na licu mjesta. Također se pregledavaju pomoću fluorescentnog penetranta lopatice radi detektiranja pukotina (4). Pored toga moraju se izmjeriti unutarnje radijalne i aksijalne zračnosti turbine (otvorene i zatvorene) prilikom

pregleda vruće staze plina. Tipični zahtjevi prilikom pregleda vruće staze plina su (3):

- Pregled i zapisivanje stanja lopatica svih turbinskih stupnjeva. U slučaju da je utvrđeno da turbinske lopatice treba skinuti to treba učiniti prema uputama proizvođača. Zaštitna navlaka prvog stupnja lopatica treba ići na procjenu ostatnog trajanja te navlake.
- Pregled i zapisivanje stanja sapništa svih turbinskih stupnjeva (koliko stupnjeva turbina ima).
- Pregled i zapisivanje stanja brtvi dijafragmi zadnjih sapništa. Provjeriti jesu li brtve istrošene te je li pogoršano stanje zazora.
- Zapisati zapore na vrhovima lopatica. Pregledati zapore, istrošenje te pogoršanje stanja. Provjeriti da li ima struganja i naslaga, zatim provjeriti pukotine, eroziju, oksidaciju, na statorskim turbinskim vijencima.
- Provjeriti te zamijeniti pokvarene termoparove u prostoru turbinskog kola.
- U ulaznom sabirnom prostoru kompresora promatrati stanje prednjeg dijela kompresora. Posebnu pozornost posvetiti ulaznim privodnim lopaticama pri čemu treba vidjeti je li se pojavila korozija, postoji li istrošenje puškice koje se očituje u velikom zazoru te pucketanju privodnih lopatica.
- U ovojnoj oplati izgaranja s boroskopom ispitati stanje zadnjeg lopatičja aksijalnog kompresora.
- Vizualno ispitati turbinski ispušni prostor i vidjeti javljaju li se znakovi pukotina ili istrošenja.

Sklop sapništa prvog stupnja je izložen direktno vrućem plinu nastalom u procesu izgaranja te je izložen najvišim temperaturama u turbinskom odjeljku. Takvi uvjeti često uzrokuju oksidaciju i pukotine u sapništu što se zapravo i očekuje. Sapništa drugog, trećeg i daljnjih stupnjeva su izložena visokim opterećenjima savijanja, koja u kombinaciji s pogonskim temperaturama mogu dovesti do progiba te zatvaranja kritičnih aksijalnih zračnosti. Nepredviđena naprezanja sapništa se mogu do određenog stupnja tolerirati te su ustanovljeni kriteriji za određivanja vremena kad je potreban popravak. Može se uzeti kao opće pravilo da sapništa prvog stupnja traže određene zahvate (popravak) kod pregleda vruće staze plinova. Sapništa drugog i trećeg stupnja mogu zahtijevati obnovu da bi se uspostavili odgovarajući aksijalni zazor. Normalno se turbinska sapništa mogu popravljati nekoliko puta da bi se produžio njihov životni vijek pri čemu usporedba troškova popravka s troškovima zamjene diktira odluku o zamjeni. Navlake (premazi) igraju kritičnu ulogu u zaštiti lopatica prvog stupnja, tj. navlake osiguravaju da će se visoka čvrstoća održati te da životni vijek lopatica glede loma zadovoljava projektne kriterije. To je osobito važno kod konstrukcija hlađenih lopatica koje rade na temperaturama paljenja iznad 1080 °C. Znatna izloženost osnovnog metala nepovoljnim pogonskim uvjetima će ubrzati brzinu zamora što će dovesti do

prerane zamjene kroz interakciju povećane temperature i naprezanja te smanjenja čvrstoće materijala. Ovaj proces degradacije se razvija zbog oksidacije i nezaštićene osnovne legure.

Čak i najbolje prevlake koje stoje na raspolaganju imaju konačni životni vijek, a stanje prevlake će igrati glavnu ulogu određivanju životnog vijeka i zamjeni lopatice (5). Obnova lopatice kroz ogoljenje površine lopatice te nanošenja nove prevlake je mogućnost za produljenje životnog vijeka lopatice, ali ako je odabrano nanošenje nove prevlake ono se mora učiniti prije nego što je stara prevlaka probijena, tj. prije nego je osnovni metal izložen. Obično se nanošenja nove prevlake obavlja pri pregledu vruće staze plinova. U slučaju da nanošenje nove prevlake nije napravljeno za vrijeme inspekcije vruće staze plinova, može se pretpostaviti da će one trajati do glavne inspekcije (pregleda) kada će se lopatice morati zamijeniti. Za F klasu plinskih turbina nanošenje nove prevlake lopatica prvog stupnja se preporuča kod svakog pregleda (inspekcije) vruće staze plinova. Ekonomija nanošenja nove prevlake mora gledati na troškove nanošenja prevlake nasuprot troškova zamjene lopatica u učestalijim intervalima. Vizualna i boroskopska ispitivanja dijelova vruće staze plina za vrijeme inspekcije izgaranja, kao i mjerenja progiba sapništa će omogućiti vlasniku da nadzire stanja izobličeni naprezanja kao i njihovo napredovanje. Predviđanja o životnom vijeku će time biti točnija, a omogućit će korisniku odgovarajuće vrijeme za planiranje zamjene ili obnove u vrijeme pregleda vruće staze plina. Važno je shvatiti da želimo li izbjeći produženje pregleda vruće staze plinova, nužno je da rezervni dijelovi budu pravodobno na radilištu prije obustave pogona zbog pregleda

Glavni pregled

Svrha glavnog pregleda je ispitivanje unutarnjih rotirajućih i statorskih komponenata od usisa stroja do ispušnog dijela stroja. Glavni pregled bi se trebao planirati u skladu s preporukama priručnika za održavanje ili pod stručnim vodstvom isporučitelja plinskoturbinskog postrojenja. Pregled uključuje sve glavne komponente od kompresora do same turbine koje su podložne pogoršanju stanja za vrijeme normalnog turbinskog pogona. Ova inspekcija uključuje prijašnje elemente pregleda izgaranja i vruće staze plina pored otvaranja kompletne plinske turbine na horizontalnim spojevima te preglede pojedinačnih komponenti (3).

Prije odmicanja kućišta jedinica se mora odgovarajuće poduprijeti. Odgovarajuća podupora simetrale korištenjem mehaničkih dizača uz postupak dizanja te podupore su nužni da bi osigurali točnu centričnost rotora prema statoru te da bi spriječili uvijanja.

Zahtjevi glavnog pregleda za sve strojeve su:

- Sve radialne i aksijalne zračnosti se provjeravaju u odnosu na njihove originalne vrijednosti (otvorene i zatvorene).

- Kućišta i difuzori se pregledavaju radi mogućih pukotina i erozije.
- Pregledava se zaprljanost, erozija, korozija te puštanje kompresorskog ulaza i kompresorske strujne staze. Pregledavaju se ulazne privodne lopatice pri čemu se ispituje korozija, istrošenje puškica te lomovi na lopaticama.
- Provjeravaju se zazori na vrhovima rotorskih i statorskih kompresorskih lopatica, udarna oštećenja, korozijski piting, savijanje i pukotine.
- Turbinski vijenci statora se provjeravaju na zračnosti, eroziju, struganje, pukotine, te na nagomilavanje.
- Brtve i kuke za namještanje turbinskih sapnica te dijafragme pregledavaju se na struganje, eroziju, zajed, toplinsko pogoršanje stanja.
- Turbinske lopatice se demontiraju te se obavlja nerazarujuće ispitivanje lopatica i korijena lopatica (Navlaka na lopaticama prvog stupnja se mora vrednovati radi ostatnog vijeka navlake). Lopatice prvog stupnja na koje nisu navučene navlake pri pregledu vruće staze plina se moraju zamijeniti.
- Mora se obaviti pregled rotora.
- Ležajevi i brtve se pregledavaju na zračnosti i istrošenje.
- Ulazni sustavi se pregledavaju radi korozije, napuknutih prigušivača i olabavljenih dijelova.
- Ispušni sustavi se pregledavaju radi pukotina, napuknutih prigušnih panela te izolacijskih panela.
- Provjera centričnosti – plinska turbina prema generatoru / plinska turbina prema reduktoru.

4. FAKTORI ODRŽAVANJA I ŽIVOTNI VIJEK

Svi faktori koji imaju utjecaj na životni vijek opreme korisnik mora uzeti u obzir pri planiranju održavanja (6). Ciklusi startanja ili drugim riječima učinci cikličkog pogona, temperatura paljenja (izgaranja), gorivo te razina injektiranja vode ili pare su ključni faktori u određivanju zahtjeva na interval održavanja, budući da ti faktori direktno utječu na životni vijek kritičnih dijelova plinske turbine. Uzroci gubitka funkcionalnosti turbinskih komponenata na vrućoj stazi plina pri kontinuiranom pogonu su lomovi, puzajući progib, visoko-ciklički zamor (7), korozija, oksidacija, erozija, trenje / trošenje, oštećenja od stranog tijela. Uzroci gubitka funkcionalnosti turbinskih komponenata na vrućoj stazi plina pri vršnom opterećivanju su; toplinski mehanički zamor, visoko-ciklički zamor, trenje / trošenje, oštećenje od vanjskog tijela.

Kod plinskih turbina dolazi do istrošenja i gubitka funkcije pojedine komponente na različite načine pri različitim pogonskim uvjetima. Toplinski mehanički zamor je dominantno ograničenje životnog vijeka za strojeve koji rade vršno, dok su puzanje, oksidacija, te korozija dominantna ograničenja životnog vijeka za strojeve s kon-

Tablica 2. Troškovi održavanja i životni vijek opreme su pod utjecajem ključnih faktora pogona (prema GE)

- Učinci cikličkog pogona
- Temperatura paljenja (izgaranja)
- Gorivo
- Injektiranje pare/vode

tinuiranim baznim pogonom. Interakcije između ovih mehanizama se intenzivno istražuju te primjenjuju u konstrukcijskim kriterijima velikih proizvođača. Poduzeće GE (većina turbina u Hrvatskoj) bazira zahtjeve za održavanje plinskih turbina na nezavisnom brojenju startova i sati. Onaj kriterij ograničenja koji je prvi postignut će određivati interval održavanja.

Alternativa GE pristupu, koji se nekad upotrebljava kod drugih proizvođača, zamjenjuje svaki startni ciklus u ekvivalentni broj operativnih sati (EOH = Equivalent operating hours) s inspekcijskim intervalima baziranim na brojenju ekvivalentnih sati. Može se reći da se GE kao veliki isporučitelj općenito ne slaže s tim pristupom. Naime on smatra da ta logika može stvoriti dojam duljih intervala održavanja, dok su u stvarnosti potrebni češći pregledi (inspekcije) održavanja.

Učinci cikličkog pogona

Uz satno bazirani kriterij održavanja podosta vlasnika turbina i proizvođača svoje odluke donosi na startno baziranom kriteriju održavanja. Za startno bazirani kriterij održavanja, moraju se razmotriti pogonski faktori vezani uz cikličke efekte generirane za vrijeme upuštanja, pogona i obustave turbine. Pogonski uvjeti drugačiji od standardnog slijeda upuštanja (starta) te obustave mogu potencijalno smanjiti životni vijek komponenata vruće staze plinova i rotora, te ako se takvo ne-standardno upuštanje i obustava često ponavljaju, zahtijevat će češće održavanje i obnovu dijelova ili zamjenu.

Ciklički učinci na dijelove vruće staze plinova

Ubrzavanje, opterećivanje, rasterećivanje te obustava generiraju promjene u temperaturi plina, a one opet izazivaju promjene u temperaturi metala. Kod brzih promjena u temperaturi plina, rubovi lopatice ili sapništa imaju bržu promjenu od debljih dijelova presjeka lopatice. Ti gradijenti proizvode toplinska naprezanja, koja, ako se učestalo ponavljaju mogu dovesti do pucanja. Ubrzavanje proizvodi prijelazna tlačna naprezanja u lopatici budući da se vodeći rub zagrijava puno brže od debljeg glavnog presjeka aerodinamičkog profila (4). Pri uvjetima punog opterećenja lopatica postiže maksimalnu temperaturu metala te maksimalna tlačna naprezanja, a njima su uzrok temperaturni gradijenti normalnih stacionarnih stanja u ohlađenom dijelu lopatice. U obustavi, uvjeti se obrću pri čemu se rubovi lopatica hlade brže od glavnog presjeka što dovodi do vlačnog naprezanja na vodećem rubu.

Svaka pogonska situacija, koji značajno povećava raspon deformacija i maksimalnu temperaturu metala iznad uvjeta normalnog pogona, će djelovati tako da će smanjiti životni vijek zbog zamora te će povećati faktor održavanja baziran na broju upuštanja (startova).

Značajno povećanje u rasponu deformacija za pogone u kojima je bilo puno izvrštavanja rezultira sa znatno skraćenim životnim vijekom. Izvrštavanje turbine je u svakom pogledu veliki šok za turbinu. Jedno izvrštavanje turbine iz punog opterećenja se po iskustvu velikih proizvođača (3) izjednačava sa osam normalnih obustava turbine. Izvrštavanja iz djelomičnog opterećenja će imati smanjeni utjecaj zbog nižih temperatura metala pri započinjanju događaja izvrštavanja.

1 IZVRŠTAVANJE = 8 NORMALNIH OBUSTAVA

Slično izvrštavanjima iz djelomičnog opterećenja, izvanredni startovi te brzo opterećivanje će utjecati na intervale održavanja koji se baziraju na startovima. Radi se o povećanom rasponu deformacija koje su vezane uz startove (ili upuštanja), a posebno brza upuštanja. Izvanredni startovi u kojima jedinice kreću od stanja mirovanja do punog opterećenja u manje od pet minuta se mogu izjednačiti efektivno s životnim trajanjem dijelova od 20 normalnih startnih ciklusa. Normalni start s brzim opterećivanjem, tj. bržim od dozvoljenog se može izjednačiti efektivno s životnim trajanjem dijelova od dva normalna upuštanja (starta). Dok opisani faktori skraćuju interval održavanja baziran na startovima, pogonski ciklusi s djelomičnim opterećenjem bi dozvoljavali određeno produženje intervala održavanja. Dozvoljavamo da postoje razilaženja između glavnih svjetskih proizvođača kao i između vodećih stručnjaka, ali ona nisu tako velika da se u prvoj aproksimaciji ne bi mogli prihvatiti opisani odnosi.

Ciklički učinci na dijelove rotora

Pored komponenata vruće staze plina, zahtjevi na održavanje i obnavljanje konstrukcije rotora su također pod utjecajem cikličkih učinaka vezanih uz upuštanje, pogon i obustavu. Faktori održavanja specifični za određeni pogon (vršni, bazni) i rotorsku konstrukciju se moraju odrediti i inkorporirati u pogonsko planiranje održavanja. Kada akumulirani rotorski startovi dosegnu granicu za pregled (inspekciju) potrebno je rastavljanje te inspekcija svih rotorskih komponenti. Kod rotora su toplinski uvjeti pri započinjanju slijeda starta glavni faktor u određivanju intervala održavanja rotora te u pojedinačnom životnom vijeku rotora. Rotori koji su hladni kada započinje upuštanje razvijaju prijelazna toplinska naprezanja kako se turbina vodi na mrežu. Veliki rotor s dužim toplinskim vremenskim konstantama razvijaju veća toplinska naprezanja od manjih rotora, prolazeći kroz isti vremenski slijed upuštanja. Viša toplinska naprezanja će skratiti intervale održavanja te životni vijek zbog toplinsko mehaničkog zamora. U periodu od 1950. do 1970. kada je rast energetskog

tržišta vodio ka sve većim parnim turbinama koje rade na sve višim temperaturama u izgradnji parnih turbina je prepoznata potreba za prilagodbom vremena upuštanja. Slično kao što su se rotor parnih turbina povećavali u vremenu od 1950-tih do 1960., rotor plinskih turbina su doživljavali trend rasta u periodu od 1980. do 2000., tj. kako je tehnologija napredovala da bi zadovoljila potražnju za kombiniranim procesima i većim toplinskim stupnjem djelovanja. Sa sve većim rotorima, lekcije naučene iz parnoturbinskog iskustva, a nedavno iz plinskoturbinskog iskustva se ugrađuju u upravljanje upuštanjem (startom) za plinske turbine.



Slika 10. Rotor plinske turbine (1., 2., 3. stupanj turbinskih lopatica)



Slika 11. Turbinski rotor s prvim, drugim i trećim kolom lopatica i sa statorskim sapništima prvog, drugog i trećeg stupnja

Faktor održavanja rotora za upuštanje (start) je funkcija stajanja koje je slijedilo prethodni period pogona. Kako se vrijeme stajanja povećava, temperatura metala rotora se približava okolišnim uvjetima te se time povećava utjecaj toplinskog zamora za vrijeme startova koji će slijediti. Hladni startovi nisu jedini pogonski faktor koji utječe na intervale održavanja rotora i ži-

votni vijek rotora. Brzi startovi te brzo opterećivanje kada se turbina brzo diže na puno ili djelomično opterećenje generiraju nepovoljne toplinske gradijente te za sam rotor znače puno teže pogonske uvjete od onih kada se turbina upušta unutar zadanih i normalnih startnih vremena. Izvrštavanja sa opterećenja, a osobito izvrštavanja iza kojih slijede brzi ponovni startovi skraćuju interval održavanja rotora isto kao i vruće ponovno startanje unutar prvog sata obustave.

Temperatura paljenja (izgaranja)

Izraziti pogon u vršnom opterećenju, zbog visokih pogonskih temperatura će zahtijevati češće održavanje i zamjenu komponenata vruće staze plinova. Više temperature skraćuju životni vijek dijelova na vrućoj stazi plinova, dok niže temperature produžuju životni vijek dijelova. Time se dobiva mogućnost za izjednačavanje negativnog učinaka pogona s vršnim opterećenjem u periodima rada s djelomičnim opterećenjem. Međutim, važno je primijetiti da izjednačavanje vršnog i djelomičnog opterećenja neće dovesti do jednostavnog poravnjanja efekata. Također je važno znati da smanjenje opterećenja ne znači uvijek i smanjenje temperature. Kod primjena s kotlom na ispušne plinove, gdje generiranje pare ima utjecaja za ukupni stupanj djelovanja postrojenja, opterećenje se prvo smanjuje tako da se smanjuje količina goriva, a potom zatvaraju ulazne privodne lopatice da bi se smanjio ulazni protok zraka te istodobno održala maksimalna ispušna temperatura. Za primjenu kod kombiniranih procesa, temperatura paljenja se ne smanjuje sve dok opterećenje nije smanjeno na ispod približno 80% od nazivnog opterećenja. Obrnuto, turbina koja vozi u otvorenom procesu zadržava potpuno otvorene ulazne privodne lopatice za vrijeme smanjenja opterećenja na 80% od nazivnog opterećenja, te će doživjeti smanjenje od 111 °C u temperaturi paljenja na ovoj izlaznoj razini. Učinci na životni vijek dijelova na vrućoj stazi plinova za ove različite režime su, jasno, potpuno različiti. Učinci temperature paljenja na održavanje dijelova na vrućoj stazi plinova, kako je opisano odnose se na spaljivanje čistih goriva kao što su zemni plin i ekstra lako lož ulje, pri čemu je puzajući lom komponenata na vrućoj stazi plinova primarno ograničenje životnog vijeka te je ujedno mehanizam koji određuje utjecaj intervala održavanja vruće staze plinova. Kod teških loživih ulja s pepelom, korozija i naslage su primarni utjecaji te se javljaju različiti odnosi s temperaturom paljenja.

Gorivo

Goriva koja se spaljuju u plinskim turbinama su u rasponu od čistog prirodnog plina do ostatnih lož ulja pa itekako utječu na održavanje. Teža ugljikovodikova goriva imaju viši faktor održavanja. Teža ugljikovodikova goriva obično oslobađaju veću količinu toplinske energije zračenjem, što dovodi do smanjenja životnog vijeka komponenti u sustavu izgaranja, a često sadrže korozijske elemente kao što su natrij, kalij, vanadij i

olovo koji mogu dovesti do ubrzane vruće korozije turbinskog sapništa i lopatičja. Dodatno neki elementi u ovim gorivima mogu prouzročiti naslage, bilo direktno, ili preko spojeva koji se formiraju s inhibitorima upotrebljenim da bi se spriječila korozija. Te naslage imaju utjecaj na stupanj djelovanja te mogu voditi ka učestalijim zahvatima održavanja. Laka loživa ulja općenito ne sadrže velike količine korozivnih elemenata, ali štetni zagađivači mogu biti prisutni u gorivu nakon što je već isporučeno korisniku. Dva učestala načina zagađivanja lakog loživog ulja su: ostaci slane vode koja se miješa s teretom za vrijeme morskog transporta, te zagađivanje za vrijeme transporta u tankerima do mjesta potrošnje, a isto tako u kamionima ili cjevovodima koji su prethodno korišteni za transport zagađenog goriva, kemikalija ili benzina s olovom.

Pošiljka zagađenog goriva može prouzročiti znatne štete komponentama vruće staze plinova u plinskoj turbini. Potencijalno visoki troškovi održavanja te gubitak raspoloživosti se može smanjiti ili eliminirati:

- Dostavljanjem točne specifikacije goriva isporučitelju goriva. Za tekuća goriva, svaka pošiljka treba uključivati izvješće kojim se identificira gustoća, plamište, viskozitet, sadržaj sumpora, točka skrućivanja te sadržaj pepela u gorivu.
- Redovitim uzimanjem uzoraka goriva za analizu kvalitete goriva. Kao dio programa uzimanja uzoraka preporuča se nadzor količine vode u tekućem gorivu za vrijeme pogona pomoću prenosivog analizatora koji još uz to može očitavati vanadij, olovo, natrij, kalij, kalcij i magnezij.
- Osiguranjem odgovarajućeg održavanja sustava pripreme goriva pri izgaranju težih loživih ulja te ugradnjom opreme za pročišćavanje pri izgaranju goriva kod kojih postoji potencijalna opasnost od zagađivanja.

Pored njihove prisutnosti u gorivu, zagađivači mogu također ući u turbinu preko usisanog zraka te iz pare ili vode injektirane da bi se upravljalo NOx emisijom ili jednostavno zbog izvanrednog povećanja snage turbine. Prijenos iz isparnih hladnjaka je drugi izvor zagađivanja. U nekim slučajevima je otkriveno da ovi izvori zagađivanja uzrokuju degradaciju vruće staze plinova jednaku onoj koja se javlja sa zagađivačima u gorivu. Specifikacije proizvođača definiraju granice za maksimalnu koncentraciju zagađivača u gorivu, zraku, te vodi ili pari.

Injektiranje pare / vode

Injektiranje vode (ili pare) radi kontrole emisije ili povećanja snage može utjecati na životni vijek dijelova kao i na intervale održavanja čak i kad voda i para zadovoljavaju specifikacije proizvođača. Dodana voda utječe na fizikalna (transportna) svojstva vrućeg plina (8). Posebice viša toplinska vodljivost povećava prijelaz topline na lopatice i sapnište te može voditi ka višim temperaturama metala, a manjem životnom vijeku kako je to prikazano u tablici 3 (prema GE).

Tablica 3. Injektiranje pare / vode i životni vijek lopatica / sapnica

Injektiranje pare / vode povećava temperaturu metala dijelova na vrućoj stazi plinova
<ul style="list-style-type: none"> • Voda utječe na transportna svojstva plina k - Toplinska vodljivost C_p - Specifična toplina μ - Viskozitet • To povećava koeficijente prijelaza topline • Što povećava temperaturu metala te smanjuje životni vijek lopatica
Primjer (MS7001EA Lopatica prvog stupnja) : 3% pare (25 ppm NOx) $H = +4\%$ (koeficijent prijelaza topline) $T_{\text{metala}} = + 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\text{Životni vijek} = - 33\%$
ZA KONSTANTNU TEMPERATURU PALJENJA (prema GE)

Utjecaj na životni vijek dijelova zbog injektiranja pare i vode je funkcija načina upravljanja turbinom. Upravljački sustav na najvećem broju primjena s baznim opterećenjem smanjuje temperaturu paljenja pri injektiranju vode ili pare. To stvara protutežu učinku višeg prijelaza topline na plinskoj strani pa rezultira smanjenim utjecajem na životni vijek lopatica. Međutim, na nekim postrojenjima je upravljački sustav projektiran tako da zadrži temperaturu paljenja (izgaranja) konstantnom s razinom injektiranja vode. To rezultira dodatnom snagom jedinice, ali smanjuje životni vijek dijelova. Jedinice upravljane na ovaj način se općenito primjenjuju za vršna opterećenja gdje je broj pogonskih sati godišnje nizak te gdje su vlasnici odredili da je smanjeni životni vijek dijelova opravdan s obzirom na povećanje snage.

Dodatni faktor povezan s injektiranjem vode ili pare stoji u odnosu s višim aerodinamičkim opterećenjem turbine koje je posljedica toga što injektirana voda po-

većava kompresijski (tlačni) omjer procesa (P). To dodatno aerodinamičko opterećenje može povećati brzinu progiba drugog i trećeg stupnja sapništa, što će skratiti interval popravljivanja za ove komponente. Međutim, uvođenjem legura s visokom čvrstoćom puzanja za drugi i treći stupanj sapništa, ovaj faktor se može smanjiti.

Kakvoća zraka

Troškovi održavanja i pogonski troškovi su također pod utjecajem kakvoće zraka kojeg turbina usisava. Pored pogubnih učinaka zagađivača u zraku na komponente vruće staze plina, zagađivači kao što su prašina, sol i ulje mogu prouzročiti eroziju lopatica kompresora, koroziju i zaprljanje (9). Čestice od dvadeset mikrona koje ulaze u kompresor mogu uzrokovati značajnu eroziju lopatica (4). Zaprljanje može biti prouzročeno od pod-mikronskih čestica prljavštine koje ulaze u kompresor kao i od usisavanja uljnih para, dima, morske soli te industrijskih para.

Korozija kompresorskog lopatičja uzrokuje piting površina lopatica koji dodatno povećava hrapavost površine, a također služi kao potencijalno mjesto za početak loma od zamora. Hrapavost površine i promjena aerodinamičkog profila lopaticice će smanjiti protok kroz kompresor i stupanj djelovanja kompresora što smanjuje izlaznu snagu plinske turbine te ukupni toplinski stupanj djelovanja. Praksa govori da je pogoršavanje stanja aksijalnog kompresora glavni uzrok gubitku snage plinske turbine te smanjenju stupnja djelovanja. Na svu sreću puno se može učiniti kroz odgovarajući pogon i postupke održavanja radi smanjenja povratljivih gubitaka zbog zaprljanja. Na raspolaganju stoje uređaji za pranje kompresora (10). Pranje kompresora za vrijeme pogona se koristi da bismo održali stupanj djelovanja kompresora pranjem kompresora dok je pod opterećenjem, i to prije nego nastupi značajno zaprljanje kompresora. Pranje kompresora izvan pogona se koristi kad je kompresor plinske turbine toliko onečišćen da je



Slika 12. Održavanje pomoćnog sustava vode za injektiranje ako se radi s tekućim gorivom može biti itekako važno

nužno obustaviti pogon te ga pomoću detergenta oprati. Drugi postupci uključuju sustav filtriranja ulaza zraka te pranje kompresorskog lopatičja suhim ledom.

Također postoje nepovratljivi gubici. U kompresoru oni su obično prouzrokovani hrapavošću površine koja nije vezana uz naslage na površini, nego uz eroziju te trošenje vrhova lopatica. U turbini se mijenja površina grla sapništa, povećava se zazor vrha lopatice, a sa zazorom i propuštanjem. Određeni stupanj degradacije stupnja djelovanja se može očekivati i na dobro održanim turbinama. Pogoršanje rada kompresora se mora dijagnosticirati u pogonu i redovitim nadzoru i to kroz zapisivanje parametara performansi kompresora ili bolje rečeno praćenjem podataka na zaslonu računalnog sustava koji vodi turbinu.

5. PLANIRANJE DIJELOVA ZA PLINSKU TURBINU I VREMENSKI INTERVALI ZA PREGLEDE

Nedostatak odgovarajućih dijelova u termoelektrani može imati bitni utjecaj na raspoloživost postrojenja; stoga prije određenog pregleda s planiranim rastavljanjem, odgovarajući dijelovi uz pomoć SUPO-a moraju pravodobno biti pohranjeni u skladištu. Planirano stajanje pri pregledu sustava izgaranja koje bi trebalo trajati samo tjedan dana, može potrajati tjednima ukoliko nema dijelova. Svaki proizvođač daje preporuke koje se tiču tipova i količina rezervnih dijelova; međutim ovisi o vlasniku kada će kupovati rezervne dijelove uzimajući u obzir odgovarajuća vremena od narudžbe do isporuke. Pravodobna briga o rezervnim dijelovima osigurava njihovu raspoloživost upravo u vrijeme kada se obavljaju planirani pregledi. Dobro je pripremiti listu zamjenjivosti za više jedinica. Elektroprivredna poduzeća nastoje posjedovati plinske turbine istog tipa upravo zbog međusobne zamjenjivosti dijelova. Proizvođači turbina mogu pomoći termoelektranama u određivanju odgovarajućih intervala održavanja za njihovu pojedinačnu primjenu. Razvijene su jednadžbe koje se mogu upotrijebiti da bi se odredili specifični intervali pregleda vruće staze plina te glavnog pregleda. Kriterij baziran na satima za vruću stazu plina se određuje iz izraza što slijedi prema GE (3):

Interval održavanja (u satima) = $24000 / \text{Faktor održavanja}$ (1)

pri čemu je Faktor održavanja u funkciji (G = Godišnji pogonski sati baznog opterećenja na plinsko gorivo, D = Godišnji pogonski sati baznog opterećenja na tekuće gorivo, H = Godišnji pogonski sati teškog loživog ulja, P = Godišnji pogonski sati vršnog opterećenja, I = Postotak injektiranja vode / pare u odnosu na ulazni zračni protok, te nekih drugih varijabli o čemu se detaljnije može naći u citiranoj literaturi. S tom jednadžbom, faktor održavanja se određuje iz omjera faktoriziranih pogonskih sati i stvarnih pogonskih sati.

Faktorizirani sati uzimaju u obzir specifičnosti pogonskog ciklusa, a odnose se na tip goriva, postavno opterećenje te injektiranje pare ili vode. Faktori održavanja veći od jedan smanjuju interval pregleda vruće staze plina idealnog slučaja od 24000 sati za kontinuirano bazno opterećenje, a manji od jedan povećavaju interval pregleda.

Interval održavanja se može bazirati na osnovi broja upuštanja (startova). Tada je izraz za interval održavanja;

Interval održavanja (startovi) = $S / \text{Faktor održavanja}$

pri čemu je S = broj startova, a Faktor održavanja = Faktorizirani startovi / stvarni startovi, a stvarni startovi su funkcija godišnjeg broja startova/obustava s djelomičnim opterećenjem (<60% opterećenja), s normalnim baznim opterećenjem, s vršnim opterećenjem i još nekih drugih empirijskih faktora.

Interval održavanja rotora se obično bazira na startovima, a za njega postoje različiti izrazi koje daju pojedini proizvođači. U proračunu intervala održavanja rotora baziranog na startovima određuju se ekvivalentni startovi za hladne, tople i vruće startove preko definiranog perioda vremena tako da se množi odgovarajući hladni, topli, vrući pogonski faktor s brojem hladnih, toplih i vrućih startova. U ovom proračunu mora se uzeti u obzir vrsta starta (ili upuštanja). Pored toga se moraju pribrojiti ekvivalentni startovi za izvrštavanje iz opterećenja.

Učestalost osnovnih tipova pregleda te veličina stajanja varira unutar skupine plinskih turbina zbog različitih pogonskih ciklusa te ekonomskih potreba da jedinica bude u stanju pogonske pripravnosti. Ovisno o opsegu radova koji se moraju napraviti za vrijeme svakog zadatka održavanja, može biti potreban period hlađenja do 24 sata pa i više. To vrijeme se može produktivno koristiti za pripremu posla, ispravno obilježavanje te blokiranje opreme koja će ostati izvan pogona, te za općenite pripreme radove. Pri završetku radova održavanja te sistemskim provjerama, mora se uzeti u obzir potrebno vrijeme rada stroja za okretanje prije startanja jedinice.

6. PLANIRANJE OSOBLJA ZA ODRŽAVANJE

Vrlo je važno planirati osoblje za održavanje prije same obustave. U Hrvatskoj postoji golem potencijal tehničara i inženjera koji mogu raditi na poslovima održavanja, ali bilo bi iluzorno njih angažirati bez stručnog vodstva proizvođača turbine i bez preuzimanja odgovornosti za vođenje reparatura od strane glavnog isporučitelja plinskoturbinskog postrojenja. Jasno je da globalno postoji mogućnost angažiranja vrlo specijaliziranih poduzeća za stručno vođenje poslova održavanja plinskoturbinskog postrojenja neovisno o glavnom isporučitelju, ali to nosi određene opasnosti čak ako je cijenom povoljno, jer će se u slučaju većih

problema na postrojenju opet morati konzultirati ili tražiti usluge glavnog isporučitelja. Glavni isporučitelj će uvijek tražiti usluge domaće stručne radne snage ako ona nije preskupa. Dobro rješenje za vlasnika (HEP) je korištenje svojih radnika iz održavanja, ako ih ima dovoljno, i ako su oni kvalificirani za planirane poslove, jer će tada isti ljudi biti anagažirani na sličnim poslovima održavanja plinske turbine pa će s vremenom učiti i stjecati iskustvo. Psihološki su ti ljudi više vezani uz stroj, pa će imati i jače motive, naravno uz adekvatnu nagradu. Vlasnik treba napraviti procjenu potrebnih čovjek - sati pri pregledu i zahvatima održavanja koji bi mogli slijediti uz pretpostavku korištenja prosječne grupe radnika s određenom vještinom u Hrvatskoj (s iskustvom na plinskim ili parnim turbinama) a uz nadzor isporučitelja turbine. Uz ljude planirati potrebne alate te dijelove za zamjenu. Teško je predvidjeti koji zahvati slijede iza pregleda jer se uvijek može pojaviti nešto nenadano, ali prosječno zdravo iskustvo može pomoći u ocjeni zahvata na turbini po pojedinim pregledima. Opseg radova treba uključiti upravljanje, pomoćne uređaje i generator. Pored radne snage, potrebno je planirati posebne alate koji se koriste samo pri demontaži i montaži turbine, te vrijeme za mobilizaciju radne snage na radilištu kao i demobilizaciju sa radilišta.

7. ZAKLJUČNO O ODRŽAVANJU TURBINE

U zadnjih nekoliko godina dogodila se značajna reorganizacija velikih igrača na tržištu plinskih turbina. Siemens je preuzeo Westinghousa, svoga neposrednog konkurenta. Mitsubishi, do tada partner Westinghousa je uspješno nastavio isporučivati plinske turbine za tržišta s mrežama od 50 i 60 Hz. ABB je prodao svoj dio kolača, tj. proizvodnju turbina Alstomu pa je time definitivno nestao s tog tržišta. Istodobno su Alstomove prijašnje aktivnosti sa velikim plinskim turbinama prenesene natrag na originalnog vlasnika licence GE. Preuzimajući nekoliko svojih dugogodišnjih korisnika licence poput Alstoma, EGT-a, Nuovo Pignonea ili S&S, GE je napravio golem iskorak ispred ostalih proizvođača plinskih turbina. Na taj način je GE sa svojim licencionarima preuzeo približno 40-50 % svjetskog tržišta novoinstaliranih plinskih turbina po godini, dok ostali proizvođači dijele ostatak. Može se govoriti o velikim školama pristupu izgradnji turbina, a onda i održavanju; GE, Alstom (ABB), Siemens, Westinghouse (11). No, neki opći principi se mogu podjednako primjenjivati kod svih turbina i proizvođača. Ovdje smo nastojali eksplicirati te opće principe, ali smo se praktično držali uz GE i to ne iz razloga što je najveći i najjači nego jednostavno što je većina turbina u Hrvatskoj i HEP-u od tog proizvođača. Stoga je većina citirane literature od autora koji pripadaju tom proizvođaču. Pri stručnoj obradi problema održavanja turbina je nemoguće govoriti o bezimenu i apstraktnom proizvođaču pa su

nažalost (jer se spominjanje imena proizvođača može shvatiti kao reklama) imena proizvođača bila nužna.

Plinske turbine za teške pogonske uvjete su konstruirane za visoku raspoloživost. Da bi se postigla maksimalna turbinska raspoloživost, vlasnik mora tehnički poznavati turbinu kao i faktore koji utječu na njen rad. Vlasnik bi trebao nastojati dati što bolju obuku svom pogonskom osoblju i osoblju za održavanje sljedeći pri tome preporuke proizvođača. Vlasnik postrojenja je taj od kojeg dolazi inicijativa za određeni sustav upravljanja poslovima održavanja, a preko takvog razrađenog sustava on inicira redovite periodičke preglede, nabavu te skladištenje rezervnih dijelova. Zapisivanje pogonskih podataka te analiza tih podataka su bitni za preventivu te planirano održavanje. To znači da dobro održavanje počinje dobrim vođenjem pogona plinske turbine i neprekidnom povezanošću ljudi iz pogona s ljudima iz održavanja. Posada koja vodi plinsku turbinu će prenositi sve uočene nedostatke ekipi za održavanje tako da se pri pregledu i nakon toga određenom zahvatu ti nedostaci uklone. Ključni faktor u postizanju ovog cilja je angažman vlasnika u osiguravanju efektivnog gospodarenja zastojeima te u punom iskorištavanju tiskanih uputa i raspoložive podrške servisnih podružnica isporučitelja njegove turbine. Jasno je da vlasnik može sklopiti s proizvođačem ugovor o cjelokupnom održavanju, ali tada bi opet trebao tražiti sudjelovanje i obuku svojih ljudi jer bi mu se inače mogla dogoditi potpuna ovisnost o proizvođaču i to za najmanje kvarove i zahvate koje je mogao sam obaviti. Intervali pregleda za optimalnu službu turbine nisu fiksirani za svako postrojenje nego se razvijaju kroz interaktivni proces kod svakog korisnika, bazirajući se na prošlim iskustvima i trendovima koji su došli do izražaja s ključnim turbinskim faktorima. Razina i kvaliteta strogog programa održavanja imaju direktni utjecaj na pouzdanost i raspoloživost. Stoga je strogi program održavanja, koji optimira troškove održavanja te raspoloživost, od vitalne važnosti za korisnika. Strogi program održavanja će minimizirati ukupne troškove, držati vrijeme stajanja na minimumu, poboljšati upuštanje (start) te pogonsku pouzdanost i dati povećanu raspoloživost, a time mogućnost povećanje profita za korisnike plinskih turbina.

LITERATURA

- [1] "KKS – Kraftwerk – kennzeichnungssystem, Richtlinien zur Anwendung und Schlüsselteil" VGB-KRAFTWERKSTECHNIK GMBH, Essen, 1983.
- [2] V. BRADAČ, H. ŠTINGL "Uvođenje sustava upravljanja poslovima održavanja i dokumentacijom - pristup suvremenom vođenju pogona EL-TO", EGE, 05. 02. 1999.
- [3] R. HOEFT i E. GEBHARDT "Heavy-duty gas turbine operating and maintenance considerations" GE Energy services, General Electric Company, 1996.
- [4] K. J. PALLOS "Gas Turbine Repair Technology" General Electric Energy Services Technology, Atlanta, GA, April, 2001.

- [5] P. W. SCHILKE “Advanced gas turbine materials and coatings” – GER-3569F, General Electric Power Systems, Schenectady, NY, 1996.
- [6] H. COHEN, H.I.H. Saravanamuttoo “Gas Turbine Theory” Prentice Hall, N.Y.2001.
- [7] D. BAZJANAC “Nauka o čvrstoći” Tehnička knjiga, Zagreb, Prosinac, 1966.
- [8] A. F. MILLS “Basic heat and mass transfer” Irwin, Chicago, October, 1995.
- [9] R. L. LOUD, A. A. Siaterpryce “Gas turbine Inlet Air Treatment”, General Electric Power Generation, GER 3419A, April 1991.
- [10] GEK 103623B “Gas Turbine Compressor Washing – Liquid Washing Recommendations for DLN Gas turbines”, General Electric Company, Schenectady, NY, May, 1996.
- [11] D. J. FRANUS “The gas turbine powered electrical power generation market 2001-2010”, COSPP, July – August 2001.

GAS TURBINE MAINTENANCE - CONDITION FOR GOOD MANAGEMENT OF GAS TURBINE PLANT

Costs of maintenance and availability are the two most important concerns to every equipment owner. With the help of Turbine Maintenance Management System and Turbine Documentation Management System a maintenance program should be realised that optimizes the owner's (HEP) costs and maximizes equipment availability. For the maintenance program to be effective, the owner must develop a general understanding of the relationship between operating plans and priorities for the plant, the skill level of operating and maintenance personnel, and the manufacturers' recommendations regarding the types of inspections, spare part planning, and the major factors affecting component life and proper operation of the equipment. In this paper, operating and maintenance practices will be presented, with emphasis placed on types of inspections plus operating factors that influence maintenance schedules. Maintenance shown in the paper is based mainly on experience and literature of General Electric technical documentation for heavy-duty gas turbine but takes into account other companies like Siemens-Westinghouse and Alstom. All photographs (by dipl. ing. D. Krilić and M. Šander) show MS6001FA gas turbine in ownership of HEP in CCCPP TE-TO ZAGREB. General rules in this paper can be applied on MS6001FA gas turbine.

INSTANDHALTUNG DER GASTURBINEN - BEDINGUNG FÜR DAS GUTE WIRTSCHAFTEN MIT EINER GASTURBINENANLAGE

Instandhaltungskosten und Verfügbarkeit sind die wichtigsten Sorgen jedes Anlagebesitzers. Zum Zweck der Erzielung günstigster Inhaberkosten sowie der größtmöglichen Verfügbarkeit sollte auch für den Fall einer Gasturbine, mittels bestehender Anleitungen für Instandhaltungstätigkeiten und einer entsprechender Unterlagenverwaltung, ein Instandhaltungsprogramm erschaffen werden.

Um die Wirksamkeit des Instandhaltungsprogrammes zu sichern muss der Inhaber im allgemeinen die Wechselbeziehungen seiner Tätigkeitspläne und der technischen Vorrangsbedingungen der Anlage in Einklang bringen. Er soll auch den Stand der Ausbildung seiner operativen Belegschaft und seines Instandhaltungspersonals, Hinweise des Turbinenerzeugers im Bezug auf Überprüfungen, Ersatzteilplanung, Umstände vom wesentlichen Einfluss auf Nutzungsdauer der Bestandteile und einen der Anlage angemessenen Betrieb, beachten. In diesem Artikel werden Betriebserfahrungen und Instandsetzungsarbeiten, mit Betonung auf Prüfungen der Betriebsumstände beeinflussenden Instandhaltungspläne, in Betracht gezogen. Ein gut vorausgeplantes Instandhalten der Ausrüstung wird die größtmögliche Verfügbarkeit und günstigste Betriebskosten ergeben. Hier dargestellte Instandhaltung stützt sich auf eigene Erfahrung und auf die Schriften des Gasturbinenunternehmens „GE“ für Gasturbinen in schweren Arbeitsbedingungen; es werden jedoch auch andere Erzeuger (Siemens-Westinghouse, Alstom) berücksichtigt. Als Beispiel ist die MS6001FA-Turbine des Inhabers „HEP“ (Kroatische Elektrizitätswirtschaft) gewählt worden. (dargestellt in Bildern im Artikel - aufgenommen von dipl. ing. D. Krilić und dem Verfasser). Allgemeine Regeln aus diesem Artikel können im Falle dieser Turbine befolgt werden.

Naslov pisca:

**Mr. sc. Miroslav Šander
ELEKTROPROJEKT
Alexandera von Humboldta 4
10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:
2004 – 05 – 19.