

RAZVOJ PLINSKIH TURBIN IN ZAGOTAVLJANJE TERCIARNE REGULACIJE V EES

Josip GAŠPARINČIĆ, Aleš ŠTRICELJ

POVZETEK

Plinske turbine imajo danes velik pomen v elektroenergetiki. Leta 1905 je družba Brown Boveri postavila prvi komercialni plinski postroj za proizvodnjo električne energije. V vseh razvitih državah ter državah v razvoju so plinske turbinski postroji najbolj uporabni za pokrivanje sistemskih rezerv (terciarne regulacije).

Ob nastopu večjih motenj v EES (Elektro energetski sistem) ima pomembno vlogo terciarna regulacija, katere glavna naloga je, da pri izpadu večjih proizvodnih blokov v sistemu pomaga sekundarni regulaciji in skupaj odpravita nastalo neravnotežje delovne moči. Zato morajo biti v EES vedno na voljo proizvodne enote, ki lahko sodelujejo pri terciarni regulaciji. Rezerva celotne moči za terciarno regulacijo mora biti v polnem obsegu aktivirana v 15 minutah po podani zahtevi, kar lahko v naših razmerah nudijo le hitre plinske turbine, hidroelektrarne z akumulacijami, črpalne elektrarne in bloki v obratovanju.

ABSTRACT

Nowadays gas turbines have great significance in electro-energetics. In year 1905 the Brown Boveri company erected first commercial gas plant for production of electric energy. In all states in development gas plants are mostly used for covering system reserves.

At the greater disorders in electro – energetical system tertiary control has relevant role at the failure of larger blocks in system when it helps secondary control and together they remove incurred unbalance of active power. Therefore in electro – energetical system units that can cover tertiary control must be always available. Reserve of overall power must be activated in 15 minutes that can offer fast gas turbines, accumulated hydroelectric power plants and pumped storage power stations.

1. UVOD

V današnjih časih imajo plinske turbine velik značaj v energetiki in transportu električne energije. Čeprav se je v zgodovini pojavljalo več idej o plinskih turbinah, je njihov razvoj povezan s parnimi turbinami. Leta 1884 je Charles Parson prijavil patent za reakcijsko parno turbino. Leta 1888 je Charles de Laval na principu Brancineove ideje konstruiral impulzno parno turbino. Ta tehnologija se je v začetku 20. stoletja izkoristila pri plinskih turbinah. Leta 1903 sta Rene Armengaud in Charles Lemale izdelala in uspešno testirala plinsko turbino,

katere postroj je bil vodno hlajen. Tudi lopatice so bile konstruirane s hladilnimi kanali, skozi katere je tekla voda za hlajenje. Razvoj metalurgije v tem času ni bil razvit tako kot danes, zato sam material ni bil odporen na visoke temperature. Tovrstne težave so konstruktorje prisilile, da je imela prva plinska turbina razvit sistem hlajenja. Tako se je zmanjšal vpliv temperaturne obremenitve na vročih delih plinske turbine. Leta 1905 pa je družba Brown Boveri postavila prvi plinsko-turbinski postroj.



Slika 1: Prva komercialna plinska turbina na svetu (Brown Boveri)

Razvoj plinskih turbin je v začetku 20. stoletja bil zelo omejen, predvsem zaradi slabe odpornosti materiala na visoke temperature. Postroji so bili zelo masivni, takšna tehnologija pa ni bila uporabna v letalski industriji. Del plinsko turbinske tehnologije je leta 1921 pri razvoju turbo polnilca izkoristil Stanford Moss. Takšen turbo polnilec se je koristil pri vojaških letalih med II. svetovno vojno.

V današnjih časih napredek metalurgije omogoča višje temperature v zgorevalni komori in manjšo občutljivost vseh vročih delov. Prav tako je zelo pomemben razvoj aerodinamike ter termodinamike. Zaradi dobre računalniške tehnologije ter uporabe računalniških programov je razvita tudi simulacija turbinskih profilov, zgorevalne komore ter hlajenje turbinskih lopatic.

Plinske turbine so najbolj razširjene v elektroenergetiki. V mnogih državah se zaradi visoke cene energentov plinske turbine (plinske elektrarne) uporabljajo za zagotavljanje terciarne regulacije ter kot napajanje nujne lastne rabe jedrskih elektrarn. Plinske elektrarne so najbolj uporabne pri zagonu iz teme ob sesutju elektroenergetskega sistema. Ker danes cena energentov predstavlja velik problem, je pri plinskih postrojih najbolje izkoristiti čim več generirane toplote. Proizvodnja nekaterih plinskih elektrarn bi glede na inštalirano moč lahko bila precej višja, vendar je njihova vloga zagotavljanje terciarne rezerve v elektroenergetskem sistemu. Glede na uporabo in pomembnost plinskih elektrarn v elektroenergetskem sistemu se

za pogon generatorjev koristijo industrijske plinske turbine ter aeroderivatne plinske turbine katere so izvedene iz letalskih motorjev.

2. TEHNIČNO TEHNOLOŠKI BAT ZA PLINSKE TURBINE

BAT ("best available techniques") je nivo, ki zagotavlja okoljsko sprejemljivost ob stroškovni primernosti ne pa tehnologije, ki naj bi bila zagotovljena v trenutnih okoliščinah. Zelo pomembna je definicija izkoristka ter pod kakšnimi pogoji je definiran. Neto električni izkoristek enote predstavlja osnovno kategorijo in je definiran kot proizvedena moč na pragu, glede na toplotno vhodno moč goriva pri spodnji kurilnosti. Pri zgorevanju plina kot primarnega energenta je aplikacija plinsko parnega postroja v so-proizvodnem načinu delovanja opredeljena kot BAT, samo v primeru, ko je toplotni odjem dovolj visok za njeno realizacijo.

Za ostale tehnologije uporabe zemeljskega plina kot primarnega energenta, med drugim tudi za plinske turbine v odprtem procesu ("open cycle gas turbine – OCGT"), je BAT naveden v tabeli 1.

Tabela 1: Izkoristki tehnologij zgorevanja zemeljskega plina pri ISO pogojih

TIP ENOTE	ELEKTRIČNI IZKORISTEK (%)	
	NOVA ENOTA	OBSTOJEČA ENOTA
PLINSKA TURBINA	36 - 40	32 – 35
PLINSKI MOTOR	38 – 45	
KOTEL NA PLIN	40 – 42	38 – 40
PLINSKO PARNA ELEKTRARNA	54 – 58	50 – 54

BAT pri plinskih turbinah na tekoča goriva je določen le za tehnološke postopke v okvirih zadovoljevanja okoljskih zahtev. Zahtev in ustreznosti po vprašanju izkoristkov pri plinskih turbinah na tekoče gorivo ni specificiranih.

3. TEHNOLOGIJA PLINSKIH TURBIN

V tehnološkem smislu sta na trgu dve vrsti plinskih turbin, to sta:

- Plinske turbine izvedene iz letalskih motorjev ("aeroderivative gas turbine") ter
- Industrijske ("Heavy duty") izvedbe plinskih turbin.

T.i. "aeroderivative" plinske turbine predstavljajo danes "state-of-the art" tehnologijo in so omejene z velikostjo enote (≤ 100 MW), kar je nasprotje t.i. industrijskim plinskim turbinam, katere dosegajo moči preko 300 MW po enoti. "Aeroderivativna" plinska turbina, je izvedena iz letalskega motorja in jo odraža preizkušena kvaliteta, zanesljivost ter razpoložljivost. Zaradi modelske zasnove so danes najpogostejše ravno v rangi med 20 in 60 MW, medtem ko ima najnovejša tovrstna turbina inštalirano moč ~ 100 MW (47% neto izkoristek), kar kaže tudi na intenzivni razvoj te tehnologije. Za "aeroderivativne" plinske turbine je med zagonom značilna izredno visoka zanesljivost, razpoložljivost in zanesljivost med obratovanjem, hitri zagoni in izredna zmogljivost med t.i. cikličnim obratovanjem, ter primernost za različne vrste aplikacij v elektroenergetiki.

Na drugi strani so industrijske plinske turbine široko uporabljene tako v odprtem kot tudi v kombiniranem plinsko parnem procesu proizvodnje električne energije. Kompresor in turbina sta na skupni gredi ter se vrtita s konstantno hitrostjo. Zato so industrijske turbine nekoliko večjih dimenzij na enoto moči kot izvedenke letalskih motorjev, a zato omogočajo cenejše in lažje vzdrževanje. Pokrivajo zelo širok spekter moči. Največje enote na trgu dosegajo 375 MW v odprtem procesu. Za industrijske izvedbe plinskih turbin je značilna visoka zagonska zanesljivost in obratovalna razpoložljivost, zanesljiva in preizkušena tehnologija, primernost tako za obratovanje v odprtem, kot tudi v kombiniranem procesu, primernost za rezervni – vršni vir energije, kot tudi za obratovanje v pasu in trapezu, nekoliko večjih dimenzije in večje teža pri enaki moči.

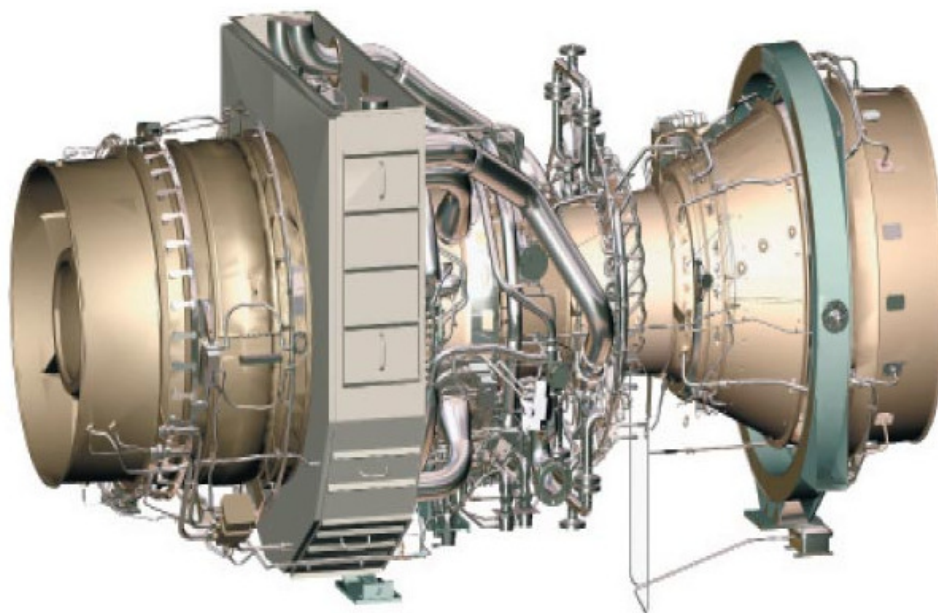
"Aeroderivativne" plinske turbine slovijo kot naprednejše od industrijskih plinskih turbin, predvsem zaradi manjše mase. To jim omogoča hitrejši zagon ter zaustavitev. Kjerkoli je to pomembno, je "aeroderivativna" turbina v tem primeru najboljša rešitev. Zaradi visokih standardov, ki jih predpisuje letalska industrija, morajo biti letalski motorji zelo zanesljivi ter delovati morajo brez napak. Tako so proizvajalci z leti vlagali več znanja v razvoj "aeroderivativnih" turbin. Sama razlika med turbino in letalskim motorjem se je z leti zmanjšala. Pri manjših izvedbah "aeroderivativnih" turbin se uporabljajo kotalni ležaji medtem, ko so pri industrijskih turbinah uporabljeni izključno drsni ležaji. To je predvsem zaradi manjše mase rotorja pri "aeroderivativnih" turbinah ter zaradi dinamičnih karakteristik rotorja. Rotor "aeroderivativne" turbine ima maso okoli 7 ton, medtem ko rotor industrijske turbine lahko tehta tudi 10 $\times$ več, saj se uporabljajo večje in težje komponente. Potrebno je omeniti, da sta zagonski čas ter učinkovitost podobna med enotami v istem razredu.

"Aeroderivativne" turbine (letalski motorji) in industrijske plinske turbine so dizajnirane za različne obratovalne parametre, kar prinaša svoje prednosti in slabosti. Aero turbine so konstruirane za hitri zagon ter hitro zaustavitev, medtem ko pri industrijskih turbinah to predstavlja slabost. Prednost industrijske turbine je v tem, da lahko na polni moči obratuje veliko časa, letalski motor pa polno moč uporablja samo pri vzletu letala. Vredno je omeniti tudi to, da se je uporaba računalniške dinamike tekočin za oblikovanje komponent začela uporabljati v letalski industriji že pred uporabi pri proizvodnji industrijskih turbin.

Različni obratovalni režimi tudi zahtevajo razliko med zgorevalnim komorami in izvedbo hladilnega sistema turbine. Pri industrijski plinski turbini je zgorevalna komora lahko izvedena kot silos ali po obodu turbine. Silos izvedenka ima prednost v tem, da je ogenj usmerjen v smeri delovanja sile teže. Prav tako je pomembno omeniti, da so zgornje usmerjevalne lopatice na zgornjem delu bolj izpostavljene ognju kot pa na spodnjem delu. Pri "aeroderivativnih" turbinah, kjer so gorilniki postavljeni po obodu turbine, je težava v tem, da ogenj ni usmerjen v smeri sile teže. Prednost pri taki postavitvi gorilnikov je v tem, da so vse vodilne lopatice enakomerno izpostavljene ognju.

Zaradi višanja cene goriva in zaradi višjih okoljskih standardov, so proizvajalci obeh tipov turbin prisiljeni pridobiti čim večji izkoristek. Nekatere tehnologije na bazi "aeroderivativnih" turbin so se uveljavile tudi pri industrijskih turbinah. Lopatice industrijskih turbin so večje ter imajo narejene serpentinaste kanale za hlajenje. Zaradi teh kanalov je površina izmenjevalca toplote večja, kar pomeni, da se tako lahko odstrani več toplote naenkrat. Vse turbine imajo enake komponente v jedrni zasnovi. To pomeni, da imajo osnovne tehnologije veliko skupnega. Tehnologijo lažje komponente ter višje temperature pri gorenju so začeli uporabljati pri industrijskih turbinah.

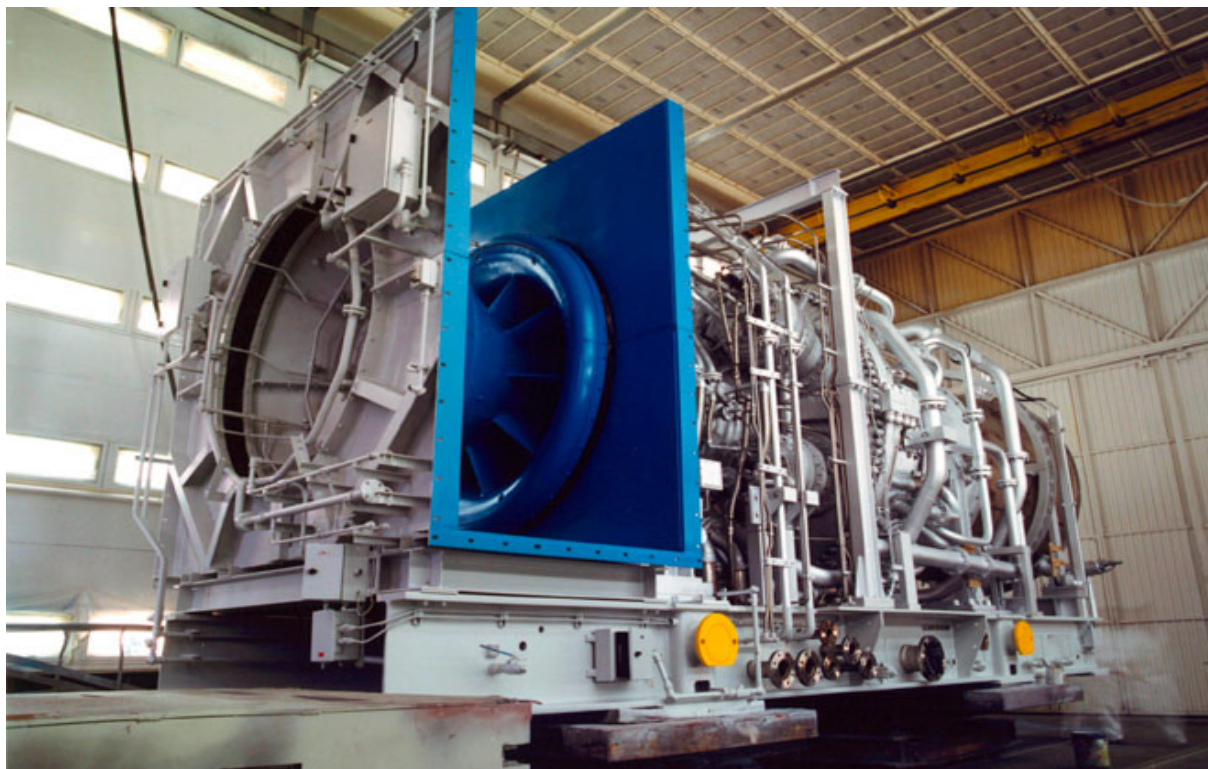
Zaradi nizkih emisij je nastala potreba po alternativnih gorivih, kot so mešanice rastlinskih olj in metiletenov. Veliko dela, raziskav ter tudi testiranje je bilo storjenih z različnimi gorivi v namen, da bi se emisije še bolj zmanjšale. Kot je že omenjeno, vsi proizvajalci uporabljajo tehnologijo "aeroderivativnih" turbin na industrijskih turbinah. Seveda vsak proizvajalec to dela na svoj način, saj nekateri proizvajajo samo industrijske turbine in tu ni tako velikega vpliva tehnologije na "aeroderivativne" turbine. Na splošno z razvojem turbin se je povečala tudi uporaba legirnih elementov, ki so odporni na visoke temperature. Pri letalskih motorjih je še posebej potrebno paziti na maso komponent, medtem ko pri industrijskih turbinah to ni problem. Je pa smotrno pri industrijskih turbinah paziti na maso gibajočih se delov. Potrebno je omeniti da nekatera podjetja proizvajajo turbine po licenčni pogodbi z drugimi podjetji. Cilj združitve tehnologije v tem, da bi se dobili čim višja kompresorska razmerja, višja temperatura zgorevanja, večji izkoristek ter manjše emisije.



Slika 2: Rolls-Royce Trent 60 WLE

Tabela 2: Primerjava AERO in HD plinskih turbin

	"Aeroderivativne" turbine	Industrijske turbine
Karakteristike	Do 100 MW (<i>GE LMS100</i>) Izkoristek: preko 40 % Manj odpadne toplote.	375 MW (<i>Siemens SGT5-8000H</i>) Izkoristek: 35 ~ 40 % Več odpadne toplote. Večje enote z višjo temperaturi dimnih plinov so primernejše za uporabo skupaj z parno turbino (kombi – proces)
Gorivo	Zemeljski plin ter ekstra lahko kurilno olje. Potreben višji tlak plina na vstopu v zgorevalno komoro.	Zemeljski plin, mazut, ekstra lahko kurilno olje. Ni potreben višji tlak plina na vstopu v zgorevalno komoro.
Zagon	Hitro: 5 – 20 min, odvisno o moči. Največkrat se koristijo elektromotorji za zagon	Največkrat: 20 – 50 min. Uporablja se močni dizel agregati ali pa tudi generator kot asinhroni motor
Obremenitev	Hitra obremenitev 10 ~ 25 %/min	Počasna obremenitev 1 ~ 10 %/min
Zaustavljanje	Večje enote zahtevajo krajše hlajenje po zaustavljanju ali ob izpadu	Mnoge enote zahtevajo daljši čas hlajenja. Večje enote imajo sistem za vrtenje rotorja v mirovanju



Slika 3: GE PG6111 (FA)

Tabela 3: Tehnične karakteristike plinskih turbin letalskega tipa

PROIZVAJALEC	MODEL	INŠTALIRANA MOČ SETA (MW)	IZKORISTEK NA GENERATORJU (%)	TLAČNO RAZMERJE	MASNI PRETOK (KG/S)	ŠTEVILO OBRATOV (MIN ⁻¹)	TEMPERATURA IZPUŠNIH PLINOV (°C)
GE ENERGY	LM2500PR	29,9	37,2	19,4	88,6	3000	528
GE ENERGY	LM6000PF SPRINT	48	41,7	32,1	133,3	3000	449
ROLLS-ROYCE	RB211- GT61	32,1	39,3	21,5	94,4	4850	503
ROLLS ROYCE	TRENT 60 WLE	64	41,1	38,5	165,7	3000	408
PRATT & WHITNEY	SWIFT PAC 30	30,9	36,8	20,2	91,9	3000	478
PRATT & WHITNEY	SWIFT PAC 60	62	37	20,2	183,9	3000	478

Tabela 4: Tehnične karakteristike plinskih turbin industrijskega tipa

PROIZVAJALEC	MODEL	INŠTALIRANA MOČ SETA (MW)	IZKORISTEK NA GENERATORJU (%)	TLAČNO RAZMERJE	MASNI PRETOK (KG/S)	ŠTEVILO OBRATOV (MIN ⁻¹)	TEMPERATURA IZPUŠNIH PLINOV (°C)
GE ENERGY	PG6111 (FA)	77,1	35,5	15,6	212	5231	603
SIEMENS	SGT – 700	29,1	36	18	91,3	6500	518
SIEMENS	SGT – 800	47	37,5	20	131,6	6608	544
ALSTOM	GT8C2	56,3	33,9	17,6	197	6219	508

4. REŠITEV REZERVNIH IN VRŠNIH ZMOGLJIVOSTI NA OSNOVI PLINSKIH TURBIN

V zadnjih nekaj letih je na področju novih naprav pri proizvodnji električne energije prevladovalo izkoriščanje obnovljivih virov, kot so vetrne elektrarne. Glavno vodilo ekonomske privlačnosti za izgradnjo tovrstnih zmogljivosti so bile uspešno definirane odkupne tarife v posameznih državah.

Na področju izgradnje velikih naprav so se izvedli premiki v smeri bolj uravnoveženega deleža med klasičnimi parnimi ter plinsko parnimi elektrarnami.

Na področju vršnih in rezervnih zmogljivosti konkurenco plinskim turbinam v odprtem procesu predstavljajo črpalne elektrarne. Alternativno temu predstavljajo obstoječe akumulacijske elektrarne, ki omogočajo dogradnjo črpalnih agregatov in tako uspešno nadgradijo obstoječe zmogljivosti. V ostalih primerih je za postavitev dodatnih ali zamenjavo obstoječih vršno rezervnih zmogljivosti ekonomsko najprimernejša plinska tehnologija.

Ob nastopu večjih motenj v elektroenergetskem sistemu (EES) ima pomembno vlogo terciarna regulacija, katere glavna naloga je, da pri izpadu večjih proizvodnih blokov v sistemu pomaga sekundarni regulaciji odpraviti nastalo neravnotežje delovne moči. Zato morajo biti v EES vedno na voljo proizvodne enote, ki lahko sodelujejo pri terciarni regulaciji. Rezerva celotne moči za terciarno regulacijo mora biti v polnem obsegu aktivirana v 15 minutah po podani zahtevi. Rezervne in vršne naloge lahko znotraj sistema nudijo le tehnološko usposobljene naprave. To so:

- plinske turbine v odprtem procesu,
- črpalne elektrarne z razpoložljivo in rezervirano akumulacijo,
- hidroelektrarne z večjo akumulacijo,
- trajno obratujoče pasovne elektrarne z nepolnim tržnim angažmajem.

Pri določanju minimalnih zahtev za terciarno rezervo delovne moči se pri definiciji produktov upošteva:

- Povprečna realizacija aktivacij v preteklosti, pri čemer se upošteva tudi varnostni faktor. To pomeni, da se določi minimalno pričakovano število aktivacij v odvisnosti od moči.
- Omejitev, da mora biti v obstoječem EES minimalno 134 MW terciarne rezerve delovne moči zagotovljene znotraj regulacijskega območja Slovenije (RO SI).
- Zahteve po kakovosti glede na število zahtevanih aktivacij.

Tabela 5: Karakteristike produktov terciarne rezerve delovne moči

	PRODUKT A	PRODUKT B	PRODUKT C
KOLIČINA (MW)	134 MW	66 MW	148 MW
IZVOR REZERVE	RO SI	UCTE	UCTE
ČAS AKTIVACIJE	≤ 15 MIN	≤ 15 MIN	≤ 15 MIN
ČAS NAJAVE SPREMEMBE AKTIVACIJE	≤ 15 MIN	≤ 60 MIN	≤ 120 MIN
ŠTEVILO AKTIVACIJ	≥ 50	≥ 25	≥ 15
ČAS MED DVEMA AKTIVACIJAMA	= 0 H	≤ 12 H	≤ 24 H
TRAJANJE ENE AKTIVACIJE	≥ 16 H	≥ 16 H	≥ 16 H

Najstrožji pogoji so zahtevani za produkt A, ki je namenjen predvsem sproščanju sekundarne rezerve. Produkt A lahko zagotovi samo plinska elektrarna in mora biti razpoložljiv brez prekinitve in zagotavljati vsaj 50 aktivacij na leto.

Tehnični pogoji za produkt B so manj zahtevni. Zagotoviti pa mora vsaj 25 aktivacij na leto ter ga lahko zagotovi plinska elektrarna in črpalna hidroelektrarna.

Za zagotavljanje produkta C so tehnične zahteve najnižje. Produkt mora biti na razpolago vsaj 15 krat na leto.

Pri primerjavi plinskih elektrarn in črpalnih hidroelektrarn je pomembno poudariti naslednje faktorje:

- Gradnja plinskih elektrarn je cenejša, kot pa gradnja črpalnih elektrarn.

- Plinske elektrarne so za okolje manj obremenjujoče, še zlasti, če se nove plinske enote postavljajo na mesta, kjer plinske turbine že obratujejo.
- Iz vidika koristi in obratovalnih stroškov v celotni življenjski dobi naprave pa so ugodnejše črpalne hidroelektrarne.

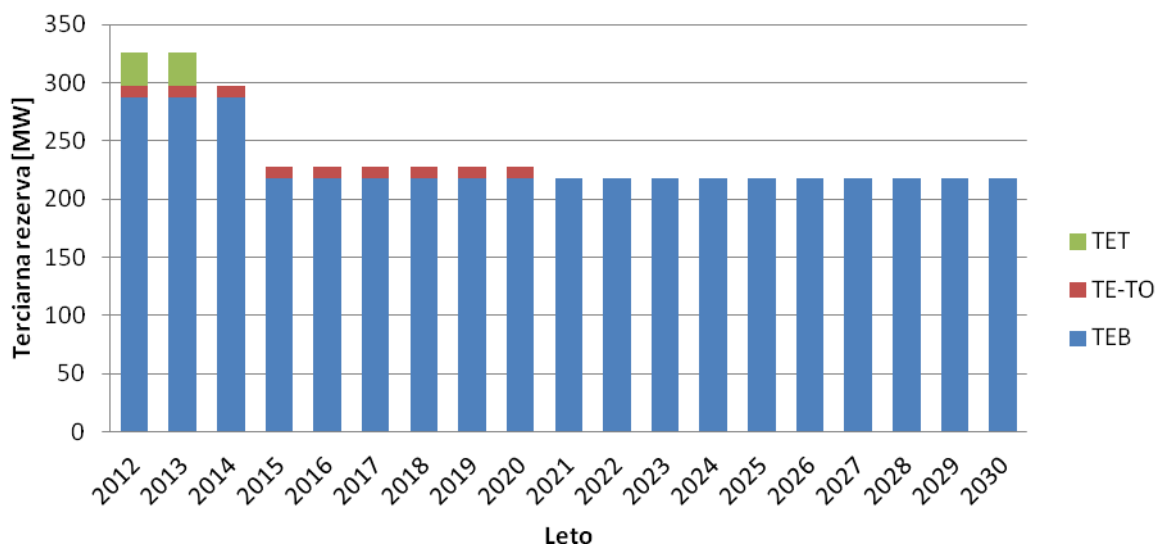
V prihodnosti lahko zaradi izgradnje večjih proizvodnih enot v slovenskem EES pričakujemo, da se bo potreba po rezervi delovne moči za terciarno regulacijo povečevala. Poleg tega se bo obstoječim napravam, ki ponujajo storitev zagotavljanja sistemske rezerve v RS, iztekla življenjska doba.

Trenutno znotraj slovenskega EES zagotavljajo terciarno rezervo:

- TEB v višini 287 MW (pet plinskih turbin),
- TET v višini 29 MW in
- TE-TOL do 10 MW (na parnem kondenzacijskem bloku – B1).

Za oceno stanja v prihajajočih letih je upoštevano, da se bodo nekatere zmogljivosti zaustavile zaradi izteka življenjske dobe in zaostrovanja okoljskih omejitev. V oceni je predpostavljeno naslednje:

- zaustavitev plinskih blokov (PB1–3) v TEB leta 2014,
- zaustavitev plinskih blokov v TET v letu 2013
- zaustavitev razpoložljivosti TE-TOL zaradi okoljskih omejitev po letu 2020.



Slika 4: Obstoječi viri terciarne rezerve v elektrarnah do leta 2030

Za potrebe terciarne regulacije je potrebnih 348 MW moči, kolikor proizvede trenutno največja proizvodna enota v RS. Do leta 2030 je predvidena izgradnja in puščanje v pogon dveh večjih proizvodnih enot. To sta šesti blok Termoelektrarne Šoštanj (TEŠ 6) in drugi blok

jedrske elektrarne Krško (JEK 2). Zato se bodo potrebe po terciarni regulaciji v prihodnje samo še povečevale.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] T. Giampaolo, "Gas turbine handbook – Principle and practice"
- [2] Z. Košnjek, M. Bugeza, A Kragelj, D. Kopše, J. Verdnik, "Novelacija in dopolnitve idejnih zasnov nadgradnje koničnih in rezervnih virov v TE Brestanica"
- [3] Z. Košnjek, D. Kopše, "Analiza potreb RS po terciarni regulaciji do 2030"
- [4] P. Pišek, "Analiza potreb nujne lastne rabe NE Krško"
- [5] A. Predin, P. Virtič, J. Voršič, J. Pihler, J. Avsec, B. Horvat, G. Hren, J. Usenik, "Analiza ustreznosti zagotavljanja terciarne regulacije med plinskimi turbinami in črpalnimi hidroelektrarnami"
- [6] Turbomachinery magazine, July-August 2010