

POLITECNICO DI TORINO

ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE

Prima sessione – ANNO 2009

Settore INDUSTRIALE - Classe 33/S Ingegneria Energetica e nucleare

Terza prova (prova pratica del 22-7-2009)

Una centrale termoelettrica per la produzione di energia elettrica impiega combustibili fossili ed è caratterizzata dai dati di tab. 1. Si intende migliorare il recupero dell'energia termica dai fumi con l'installazione di un preriscaldatore dell'aria (RASC) tra il recuperatore Ljungstrom e il precipitatore elettrostatico (fig. 1)

Valutare:

- il rendimento globale netto dell'impianto in assenza dello scambiatore RASC, la potenza termica nominale al focolare, la portata oraria di combustibile ;
- La portata del combustibile e la potenza termica al focolare nell'ipotesi di poter aumentare il rendimento globale netto dell'impianto di 1,2,3,4 e 5 punti percentuali rispetto al caso nominale;
- Il rendimento globale lordo della centrale nell'ipotesi di considerare costante la potenza (elettrica) assorbita dai servizi ausiliari e la potenza elettrica netta erogata nelle condizioni di rendimento netto di cui al punto precedente ;
- Il rendimento termico del generatore di vapore nell'ipotesi che la potenza termica trasferita al fluido termovettore (acqua-vapore) sia costante e si realizzino i rendimenti del secondo punto;
- la potenza termica non utilizzata (persa) dalla caldaia nelle diverse condizioni considerate;
- la potenza termica dispersa come calore sensibile dei fumi nell'ipotesi che il calore disperso dalle parete della caldaia sia costante e pari allo 0.3% della potenza termica nominale del focolare.
- Il rendimento del ciclo acqua-vapore;
- Il rapporto stechiometrico necessario per la combustione;
- Le portata oraria ed anche in kg/s di aria nelle condizioni nominali di potenza per un eccesso d'aria del 19% per le diverse ipotesi progettuali di rendimento;
- la portata dei fumi all'ingresso del Ljungstrom nelle condizioni nominali di esercizio e per le diverse ipotesi di rendimento globale dell'impianto;
- la potenza rimossa dal recuperatore di calore Ljungstrom al variare della temperatura dell'aria di alimentazione tra 15 e 160 °C nell'ipotesi di temperatura dei fumi all'ingresso costante e pari a 384 °C per portate di aria e di fumi costanti e pari a quella delle condizioni nominali;
- La temperatura dell'aria e dei fumi in uscita dal rigeneratore Ljungstrom nelle ipotesi considerate nel punto precedente di portata d'aria in caldaia pari alla portata di esercizio delle condizioni nominali in assenza del RASC e per la portata di combustibile quella corrispondente alle diverse ipotesi progettuali di rendimento;
- La potenza recuperabile dal RASC al variare della temperatura dei fumi di uscita dal Ljungstrom con l'obiettivo di aumentare di alcuni punti percentuali (da 1 a 5) il rendimento globale dell'impianto;
- un dimensionamento di massima della superficie di scambio termico del RASC;
- la composizione sia in massa che volumetrica dei fumi per un eccesso d'aria del 19%;

- la concentrazione di SO₂ ed SO₃ all'ingresso del sistema di abbattimento dello zolfo nell'ipotesi che tutto lo zolfo sia stato ossidato e che la capacità di rimozione della caldaia sia nulla;
- impostare una procedura per la verifica del progetto termofluidodinamico del RASC;
- analizzare il potenziale miglioramento di rendimento dell'impianto associato all'installazione del RASC e discutere l'opportunità o meno dell'installazione di tale componente.

E' possibile utilizzare formule, correlazioni, dati diversi da quelli riportati in allegato purchè giustificati in termini di ipotesi, intervalli di validità, fonte bibliografica.

Tabella 1: Dati di riferimento

Grandezza	Simbolo	valore	Unità di misura
Potenza elettrica netta	P _{el}	340	MW
Combustibile:		carbone	
Potere calorifico inferiore del combustibile (pci)	H _i	7830	kcal/kg
Eccesso d'aria utilizzato nel processo di combustione	e%	19	%
Consumo specifico dell'impianto	C _s	2296	kcal/kWh
Potenza termica rimossa dal circuito acqua-vapore (ECO;EVA;SH,RH)	P _{ECO,EVA,SH,RH}	756	MW
Potenza (elettrica) assorbita dagli ausiliari	Pa	32.6	MW
Perdite per irraggiamento dalle pareti della caldaia (frazione della potenza termica al focolare)	fp	0.3	%
Composizione del combustibile			
Carbonio: % in peso	C	80.31	%
Zolfo, % in peso	S	1.54	%
Idrogeno, % in peso	H ₂	4.47	%
Acqua, % in peso	H ₂ O	2.90	%
Azoto, % in peso	N ₂	1.38	%
Ossigeno, % in peso	O ₂	2.85	%
Ceneri, % in peso	A	6.55	%
Temperatura dei fumi all'ingresso del recuperatore Ljungstrom	T _{f,in,L}	384	°C
Temperatura dell'aria ambiente	T _a	10	°C
Temperatura dell'aria alla mandata del ventilatore	T _{a,v}	15	°C
Rientrate d'aria nei fumi (bypass) uscita Ljungstrom: % percentuale in peso dell'aria stechiometrica	B%	10%	
Frazione di zolfo convertita in SO ₃ (condizioni nominali di esercizio senza RASC)	F%	5	%
Coefficiente globale di scambio termico Riscaldatore aria/fumi (Ljungstrom) UA	(UA) _{Lj}	2*446	(kW/°C)
Coefficiente globale di scambio termico Riscaldatore aria/aria (GGH)	(UA) _{GGH}	2*246.6	(kW/°C)
Calore specifico medio di riferimento per i fumi a valle dell'ecomizzatore	cp _f	1.13	kJ/(kg°C)

Descrizione dell'impianto:

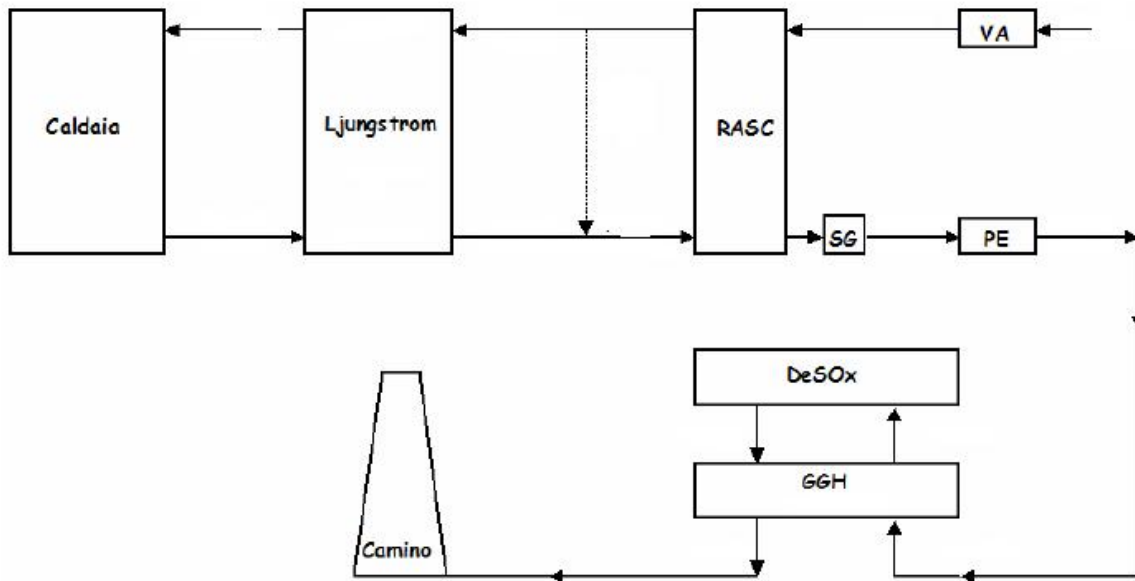


Fig. 1: Schema di riferimento per l'impianto.

La centrale è dotata di una unità di desolfurazione ad umido DeSOx con uno scambiatore di calore rigenerativo GGH.

Il desolforatore funziona in modo adeguato nell'intervallo di temperatura dei fumi 75 – 95 °C ; il camino presenta un adeguato tiraggio per temperature dei fumi maggiori di 80 °C. Valori di riferimento per le temperature di ingresso ed uscita del DeSOx sono: $T_{i,DeSOx}=92\text{ °C}$, $T_{out,DeSOx}=50\text{ °C}$.

Lo scopo del RASC è quello di recuperare calore dai fumi anche a bassa temperatura evitando o meglio minimizzando i potenziali fenomeni di condensa acida. Si tratta di uno scambiatore di calore fumi –aria del tipo compatto a piastre non alettate (Larghezza 10 m; altezza 5 m) con coefficiente globale di scambio termico tra canale caldo e freddo pari a circa 50 W/(m²*K). La diluizione dei fumi con aria all'ingresso del RASC è dovuto alle rientrate d'aria nei fumi concentrate per semplicità all'uscita del Ljungstrom.

All'uscita del RASC lato fumi sono installati un separatore di condensa, il precipitatore elettrostatico (PE) seguito da un impianto di desolfurazione ad umido e dal camino . L'ingresso del RASC è alimentato dalla mandata dei ventilatori di aria ambiente VA. SG è un separatore gocce di condensa a lamelle.

Allegati: Dati di riferimento e potenziali ipotesi semplificative

Pesi molecolari di riferimento:

specie chimica	valore	Unità di misura
C	12.01	Kg/kmole
S	32.06	Kg/kmole
H ₂	2.016	Kg/kmole
O ₂	32	Kg/kmole
N ₂	28.013	Kg/kmole

Temperatura di rugiada acida:

E' espressa in °C in funzione del tenore di zolfo (S%) e dell'ossigeno residuo nei fumi (O₂%) come in tabella:

S%\O ₂ %	0.2	1	2	3	4
1.3	50	90	110	120	122
2.4	50	115	135	145	148
3.2	60	120	140	150	160

Densità dell'aria in condizioni normali: $\rho_a = 1.293 \text{ kg/m}^3$

calore specifico dell'aria:

Calore specifico dell'aria tra 0°C e 300 °C in J/(kg °C), temperatura t in °C

$$c_a = 1003.8 + 53 \frac{t}{1000} + 308,9 \left(\frac{t}{1000} \right)^2$$

Calore specifico per i prodotti di combustione:

Media pesata sulla composizione ponderale dei fumi del calore specifico per ogni singola specie. La struttura della correlazione generale è del tipo:

$$c = a + b \left(\frac{t}{100} \right) + d \left(\frac{t}{1000} \right)^2$$

t in °C ed i coefficienti a,b,d dati in tabella, c_p in kJ/kg.

specie chimica	a	b	d
aria	1003.8	165.6	15.7
CO ₂	813.2	938.2	-465.8
H ₂ O	1853.9	421.7	182.5
O ₂	914.1	301.6	-93.8

Conducibilità termica in W/(m*°C)

Media pesata sulla composizione volumetrica

$$\lambda = a + b\left(\frac{t}{100}\right) + d\left(\frac{t}{1000}\right)^2$$

specie chimica	a	b	d
aria	0.0233	0.0700	-0.0153
CO ₂	0.0140	0.0870	-0.0208
H ₂ O	0.0150	0.0864	0.0173
O ₂	0.0233	0.0780	-0.0164

Viscosità:Per ogni componente in 10⁻⁶*kg/(ms):

media ponderata sulle composizioni volumetriche.

$$\mu = a + b\left(\frac{t}{100}\right) + d\left(\frac{t}{1000}\right)^2$$

specie chimica	a	b	d
aria	17.064	44.277	-12.012
CO ₂	13.926	46.306	-12.178
H ₂ O	8.924	38.758	-5.314
O ₂	17	44	-12

Coefficienti di scambio termico (adduttanze) di riferimento:

lato gas di combustione $\alpha=50 \text{ W}/(\text{m}^2*\text{°C})$ lato aria $\alpha=25 \text{ W}/(\text{m}^2*\text{°C})$ **Altre potenziali correlazioni (approssimate) per le proprietà dei fumi:****calore specifico dei fumi in J/((kg*°C)**

$$c_g = 972.7 + 10.76 * u + (332.62 - 6.5u) \frac{t}{1000} - (83.93 - 7.33u) \left(\frac{t}{1000}\right)^2$$

conducibilità termica dei fumi in W/(m*°C)

$$\lambda_g = 0.001 * \left[21.27 + 72.53 \frac{t}{1000} - 11.13 \left(\frac{t}{1000}\right)^2 \right]$$

dove:

u è l'umidità percentuale massica nei fumi

t temperatura in °C ;

viscosità per i prodotti di combustione

$$\mu_g = 10^{-6} * \left[15.63 + 43.67 \frac{t}{1000} - 11.1 \left(\frac{t}{1000} \right)^2 \right]$$

in kg/(m*s) e t in °C

Scambiatore calore rigenerativo tipo Ljungstrom

E' modellizzato con l'ausilio del metodo ϵ -NTU (metodo Kays – London)

Definite:

Pedici

h lato fumi (hot)
m metallo lamierini
c lato aria (cold)

Capacità termiche:

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

$$C_m^* = \frac{C_m}{C_{\min}} \quad \text{valore generalmente } \gg 1$$

efficienza:

$$\epsilon = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{C_h (T_2 - T_1)}{C_{\min} (T_1 - t_1)}$$

T_1, T_2 temperature ingresso-uscita lato caldo

t_1, t_2 temperature ingresso uscita lato freddo

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}}$$

$$\epsilon_{cf} \approx \frac{NTU}{1 + NTU} \quad \text{per } C^*=1;$$

$$\epsilon_{cf} = \frac{1 - \exp(-NTU * (1 - C^*))}{1 - C^* \exp(-NTU * (1 - C^*))} \quad \text{per } C^*<1$$

$$\epsilon = \epsilon_{cf} \left[1 - \frac{1}{9(C_m^*)^{1.93}} \right]$$