

Titolo "Assorbitore di calore da radiazione solare per motore Stirling"

\*\*\*\*\*

#### Campo della tecnica

La presente invenzione si riferisce ad un assorbitore ed al relativo metodo di dimensionamento per un motore Stirling, originariamente progettato per funzionare bruciando gas naturale. In particolare, l'invenzione concerne la realizzazione di un assorbitore, che, ricevendo energia solare, sia capace di accumulare e trasferire efficacemente il flusso di calore proveniente dalla radiazione solare alla testa del motore Stirling, senza l'impiego di fluidi vettori.

#### Stato della tecnica

Il motore Stirling è un motore termico a combustione esterna, a ciclo chiuso che utilizza un gas come fluido termodinamico, solitamente aria, azoto oppure elio nelle versioni ad alto rendimento: esso si dimostra molto versatile in relazione a differenti fonti di calore.

Il motore Stirling è costituito da uno o più cilindri in cui scorrono uno o più pistoni in seguito all'espansione ed alla contrazione del fluido termodinamico. Il gas scorre alternativamente da uno scambiatore caldo ed uno scambiatore freddo dopo essere passato da un rigeneratore di calore: il corrispondente movimento armonico dei pistoni può produrre, tramite un convertitore meccanico-elettrico, energia elettrica.

Il calore è generalmente fornito allo scambiatore di calore, che si trova ad un'estremità del/i cilindro/i, e provvede a riscaldare il fluido termodinamico interno che mette in moto il/i pistone/i.

Usualmente lo scambiatore di calore è formato da una pluralità di alette di materiale avente una buona conducibilità termica, oppure da una pluralità di piccoli condotti in cui scorre il fluido di lavoro.

Il rigeneratore assorbe e restituisce alternativamente calore dal/al fluido di lavoro ed aumenta l'efficienza di trasformazione. Lo scambiatore freddo, che costituisce la sorgente a bassa temperatura, è di solito uno scambiatore a flusso incrociato a

fascio tubiero in cui i tubi sono lambiti esternamente da acqua refrigerante, mentre all'interno dei tubi fluisce il fluido di lavoro.

Il fatto che il motore Stirling sia a combustione esterna è vantaggioso perché il calore può essere fornito esternamente da una vasta gamma di combustibili, anche a basso potere calorifico.

Un'applicazione molto diffusa del motore Stirling prevede di realizzare la sorgente calda bruciando gas naturale.

Un'altra applicazione prevede l'utilizzazione del motore Stirling nella produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile ed in particolare mediante la captazione e l'eventuale accumulo di calore ricavato dalle radiazioni solari allo scopo di definire detto punto caldo all'interno del motore.

In tale ambito, l'impiego dei motori Stirling si divide tra applicazioni in cui il calore è ceduto a un fluido vettore e da questo trasportato alla testa di uno o più motori Stirling ed applicazioni in cui il motore è allineato lungo un asse di focalizzazione di uno specchio riflettente, evitando l'uso di fluidi vettori esterni al motore. Esempi di questa ultima applicazione sono dati in US6735946 e US7026722.

Nell'ambito della combustione di gas naturale, WO02/14671 descrive un assorbitore formato da un anello cilindrico, da montarsi esternamente alla testa del cilindro del motore Stirling, e comprendente alette di materiale conduttore termico per captare efficacemente il calore ottenuto dalla combustione del gas naturale e trasferirlo internamente al motore attraverso uno scambiatore.

In particolare, WO2005/054654 descrive uno scambiatore di calore definito da un anello che circonda internamente un'estremità del cilindro in prossimità della testa. Tale tipo di assorbitore di calore non risulta adatto all'applicazione solare, soprattutto perché la sua capacità termica è così modesta da non garantire un funzionamento continuo del motore Stirling. D'altra parte, eliminando l'assorbitore e irradiando direttamente la testa del cilindro si rischia di danneggiare il motore.

### Sommario dell'invenzione

La presente invenzione si propone di fornire un assorbitore di calore da radiazione solare per motore Stirling, in particolare per applicazione solare, capace di captare

il calore della radiazione solare e trasferirlo efficacemente ad uno scambiatore di calore interno al motore Stirling.

La presente invenzione si propone di alimentare con una radiazione solare concentrata motori Stirling che hanno bisogno di flussi di calore inferiori a 50 Watt/cm<sup>2</sup> per funzionare.

In particolare, tali tipi di motori sono attualmente in produzione ed adattati per funzionare mediante la combustione di gas naturale, garantendo ottima efficienza, ma non sono adatti alle applicazioni solari. Un esempio di simili motori è dato dal summenzionato brevetto WO2005/054654, che è qui incorporato per riferimento.

Dunque, forma oggetto della presente invenzione un assorbitore di calore da radiazione solare per motore Stirling, conformemente alla rivendicazione 1.

Vantaggiosamente, l'assorbitore oggetto del presente trovato consente di assorbire una radiazione solare concentrata su un'area ben definita, ottimizzando le temperature di esercizio del motore e trasferendo l'energia assorbita alla testa del motore Stirling sotto forma di calore minimizzando le perdite per irraggiamento e convezione. Inoltre l'assorbitore presenta una capacità termica tale da mantenere il motore acceso per un predefinito intervallo di tempo anche quando la radiazione solare è inferiore ai 50Watt/cm<sup>2</sup>.

L'assorbitore, che definisce una sorta di cappello della testa del motore, funziona quindi da interfaccia tra una radiazione solare concentrata ed uno scambiatore di calore inserito nella testa di un motore Stirling.

Un altro scopo della presente invenzione è quello di fornire un sistema di conversione di energia solare basata su un motore Stirling comprendente il suddetto cappello solare.

In una variante preferita del trovato, il motore Stirling è del tipo capace di produrre sia energia elettrica a frequenza di rete, sia acqua calda.

Un ulteriore scopo della presente invenzione è quello di fornire un metodo di dimensionamento di un assorbitore di calore per un'applicazione solare di un motore Stirling comprendente uno scambiatore di calore inserito in una testa del motore.

Dunque, forma pure oggetto un metodo di dimensionamento di un assorbitore di calore di un motore Stirling, conformemente alla rivendicazione 9.

Secondo il presente trovato, una testa di un motore Stirling può essere in comune a due o più cilindri.

#### Descrizione delle figure

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione risulteranno maggiormente evidenti alla luce della descrizione dettagliata di forme di realizzazione preferite, ma non esclusive, di un assorbitore di calore da radiazione solare per motore Stirling, illustrato a titolo esemplificativo e non limitativo, con l'ausilio delle unite tavole di disegno in cui:

la figura 1 rappresenta una sezione longitudinale di un assorbitore inserito su una testa di un motore Stirling;

la figura 2 rappresenta un andamento delle temperature della sezione di figura 1 durante il funzionamento di captazione e scambio termico.

Gli stessi numeri e le stesse lettere di riferimento nelle figure identificano gli stessi elementi o componenti.

#### Descrizione di dettaglio dell'invenzione

La presente invenzione presenta un metodo di dimensionamento di un assorbitore 1 e un assorbitore (o cappello solare) ottenuto.

L'assorbitore 1 ha il compito di captare una radiazione luminosa e convogliare il calore in una zona cilindrica in corrispondenza dello scambiatore di calore 3 posto sulla testa 2 del motore.

Nella figura 1 sono riportate fessure 4, in cui si inseriscono termocoppie per il monitoraggio della temperatura all'interfaccia tra scambiatore di calore e assorbitore.

Preferibilmente, si impiegano due termocoppie poste in due parti opposte lungo la circonferenza della testa del motore. La sezione rappresentata in figura 1, rappresenta dunque una sezione assiale passante per le fessure 4 destinate ad accogliere rispettive termocoppie non rappresentate.

Per dimensionare correttamente la capacità termica del cappello solare è necessario conoscere quale sia la potenza minima necessaria per avviare il ciclo Stirling del motore e quindi anche la potenza di regime necessaria per mantenere

costante la temperatura di funzionamento del motore. L'esempio riportato di seguito si riferisce ad un motore originariamente progettato per applicazioni basate sulla combustione di gas naturale e la cui testa del cilindro non può essere illuminata direttamente con una radiazione solare concentrata senza che il motore non si danneggi.

Il presente trovato si propone di insegnare come:

- determinare la capacità termica e la massa del cappello solare necessaria per far funzionare a regime il motore Stirling,
- determinare una o più forme e/o geometrie che ottimizzano il funzionamento del cappello solare.

#### Determinazione della massa del cappello solare

Per assolvere efficacemente alla funzione di accumulo del calore proveniente dalla radiazione solare opportunamente concentrata è necessario individuare la capacità termica necessaria per mantenere il motore Stirling in funzione. Per far ciò è necessario acquisire preliminarmente i seguenti dati:

- potenza termica minima  $P_{\text{start}}$  assorbita dallo scambiatore di calore necessaria per attivare il ciclo Stirling;
- temperatura  $T_{\text{start}}$  raggiunta dallo scambiatore di calore quando la potenza assorbita è  $P_{\text{start}}$  ;
- potenza termica assorbita a regime dallo scambiatore di calore per il funzionamento a regime  $P_{\text{steady}}$  dello Stirling;
- temperatura  $T_{\text{steady}}$  raggiunta dallo scambiatore di calore quando la potenza assorbita è  $P_{\text{steady}}$  ;

Da questi parametri si calcola un intervallo di valori di capacità termica del cappello solare, da cui si ricava la sua massa, affinché possa assorbire una quantità di calore necessaria al motore Stirling per avviarsi e quindi per mantenersi in funzione a regime anche in assenza di radiazione solare per un determinato intervallo di tempo.

Per il motore Stirling a gas della Microgen™ si sono ottenuti sperimentalmente i seguenti dati:

- $P_{\text{start}} = 2.5 \text{ KW};$
- $T_{\text{start}} = 200 \text{ }^\circ\text{C};$

- $P_{\text{steady}} = 4.5 \text{ KW};$
- $T_{\text{steady}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}.$

Si suppone, per esempio, di utilizzare il rame come materiale per realizzare il cappello solare, avente calore specifico  $c_{\text{rame}} = 380 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}.$

Allora, si calcola la quantità di energia che il cappello solare deve assorbire per mantenere in funzione il motore Stirling per un determinato intervallo di tempo  $\delta t$  senza che la testa venga irradiata, cioè mediante il solo calore accumulato dall'assorbitore. Ad esempio si suppone che detto intervallo è  $\delta t = 5$  minuti. Dunque, l'energia minima e di regime sono rispettivamente

- $Q_{\text{min}} = P_{\text{start}} \times \delta t \approx 0,22 \text{ KWh}$
- $Q_{\text{max}} = P_{\text{steady}} \times \delta t \approx 0,38 \text{ KWh}$

Da detti valori di energia si calcola la massa minima  $m_{\text{min}}$  e quindi anche la massa massima  $m_{\text{max}}$  che il cappello solare deve avere per assolvere ai suddetti scopi:

$Q_{\text{min}} = m_{\text{min}} \times c_{\text{rame}} \times (T_{\text{steady}} - T_{\text{start}}) \Rightarrow 0,22 \text{ [KWh]} = m_{\text{min}} \times 0,036 \text{ [KWh/Kg]}$  allora la massa minima  $m_{\text{min}} \approx 6 \text{ Kg}.$

Seguendo lo stesso procedimento per  $Q_{\text{max}}$  si ottiene la massa massima  $m_{\text{max}} \approx 11 \text{ Kg}$  del cappello solare.

#### Determinazione della forma e/o della geometria del cappello solare

Allo scopo di determinare una forma ottimale dell'assorbitore, si sono scelti i seguenti obiettivi:

- ottimizzare l'assorbimento della radiazione concentrato su una o più superfici dell'assorbitore;
- trasferire l'energia assorbita, sotto forma di calore, dalle zone esposte alla radiazione solare verso le superfici a contatto diretto con lo scambiatore di calore, che ha una forma di anello;
- minimizzare le perdite per irraggiamento e/o per convezione.

A partire dai suddetti obiettivi risulta evidentemente vantaggioso rendere l'area di captazione della radiazione solare uguale alle dimensioni dell'aria di focalizzazione e ridurre al minimo le superfici non direttamente esposte alla radiazione solare e coinvolte nel trasferimento di calore verso lo scambiatore di calore.

D'altra parte è necessario garantire un sufficiente spessore del materiale dell'assorbitore per consentire una sufficiente trasmissione di calore dalla superficie captante  $S$  alla superficie di cessione del calore allo scambiatore, affinché il motore Stirling possa funzionare correttamente. Inoltre, la superficie di passaggio del calore è fortemente vincolata dall'ampiezza del diametro esterno della testa dello Stirling, per cui non è possibile ridurre a piacere le parti del cappello non direttamente irradiate allo scopo di minimizzare le perdite, poiché si corre il rischio di non riuscire a trasmettere allo scambiatore di calore l'energia necessaria al funzionamento del motore.

Tale dimensionamento è ulteriormente vincolato dalla massa dell'assorbitore, che può variare nell'intervallo definito precedentemente tra  $m_{\min}$  e  $m_{\max}$ .

Secondo il presente trovato si impiega l'equazione generale della conduzione termica (Legge di Fourier) per calcolare il diametro esterno  $d_e$  della parte di cappello che deve innestarsi sulla testata di un motore Stirling. In particolare, si scelgono accuratamente i parametri da sostituirsi in detta equazione così come mostrato di seguito:

$$W = \lambda \times \frac{(T_{\text{irr}} - T_{\text{int}})}{L} \times S \text{ (Legge di Fourier)}$$

in cui:

- $W$  si sceglie essere la potenza trasmessa dalla zona esposta alla radiazione solare alla zona a diretto contatto con lo scambiatore di calore dello Stirling
  - $\lambda$  è la conducibilità termica del materiale del cappello solare
  - $T_{\text{irr}}$  si sceglie essere la temperatura media della superficie esposta alla radiazione solare
  - $T_{\text{int}}$  si sceglie essere la temperatura media dell'interfaccia con lo scambiatore di calore
  - $S$  si sceglie essere la superficie di captazione della radiazione solare, e se lo specchio riflettente è una porzione di sfera, allora  $S$  ha una forma circolare minore o uguale all'area di focalizzazione con un diametro  $d_{e-\max}$
  - $L$  è lo spessore medio del cappello solare
- In particolare, si sceglie di imporre:
- $L$  è almeno pari all'altezza del cilindro del pistone,

- $T_{int}$  pari a  $T_{steady}$ ,
- $\lambda$  dipende dal materiale dell'assorbitore, per esempio rame, ed è nota
- $T_{irr}$  si impone pari a  $T_{max}$  che è la massima temperatura che il materiale prescelto, per esempio il rame, può sopportare senza danneggiarsi.

I suddetti parametri hanno i seguenti valori, con riferimento al motore della Microgen™:

$W = 4500$  Watt, cioè pari alla potenza di regime  $P_{steady}$

$\lambda = 400$  W/m\*K

$L = 80$  mm,

$T_{int} = 823$  °K (550 °C)

$T_{max}$  del rame è 1100 °K (1373 °C) e

$S = \left( \frac{d_e^2 - d_i^2}{4} \right) \times \pi$  è la superficie di scambio,  $d_i$  cui il diametro interno pari al

di diametro esterno del cilindro del motore è pari a  $d_i = 116$  mm.

Dalla suddetta equazione si calcola, sostituendo i suddetti parametri, il diametro esterno minimo  $d_{e-min}$  dell'anello necessario per trasmettere la potenza di regime  $P_{steady}$ :

$$d_{e-min} = 2 \times \sqrt{\frac{W \times L}{\lambda (T_{max} - T_{int}) \times \pi} + \frac{d_i^2}{4}} \approx 130 \text{ mm}$$

Nella figura 2, l'andamento delle temperature è mostrato tramite una mappatura di colore che va dal bianco ( $T = 720$  °C) al nero ( $T = 590$  °C).

Dunque, conformemente con il presente trovato, individuati i parametri  $P_{start}$ ,  $T_{start}$ ,  $P_{steady}$ ,  $T_{steady}$ ,  $L$ ,  $T_{int}$  di un motore Stirling, noti inoltre la dimensione dell'area di focalizzazione  $S$  e il relativo diametro  $d_{e-max}$ , si sceglie un materiale con cui realizzare l'assorbitore e si determina  $T_{irr}$  (pari a  $T_{max}$ ) e  $\lambda$ , poi si calcola  $d_{e-min}$  mediante la seguente formula

$$d_{e-min} = 2 \times \sqrt{\frac{W \times L}{\lambda (T_{max} - T_{int}) \times \pi} + \frac{d_i^2}{4}}$$

quindi si calcola  $Q_{min} = P_{start} \times \delta t$  e  $Q_{max} = P_{steady} \times \delta t$  da cui si calcolano  $m_{min}$  e  $m_{max}$  mediante la seguente formula



$$m = \frac{Q}{c} \frac{1}{(T_{\text{steady}} - T_{\text{start}})}$$

in cui  $c$  è il calore specifico del materiale dell'assorbitore. Per cui, scelta una massa dell'assorbitore, si raccorda la superficie  $S$  di captazione che definisce una base maggiore con una base minore  $SM$  definita da detto diametro  $d_{e\text{-min}}$ , ottenendo un solido a simmetria cilindrica rastremato verso la base minore, cioè la parte di innesto sulla testa del motore Stirling, in cui la cavità di innesto è formata a partire dalla base minore e concentrica con essa.

Secondo una sezione assiale dell'assorbitore, detto assorbitore può dunque presentare superfici laterali 11 rettilinee, concave o convesse in relazione alla suddetta operazione di raccordo.

Sono chiari i vantaggi derivanti dall'applicazione della presente invenzione:

- mediante il presente trovato si rende possibile adattare un motore Stirling, originariamente progettato per essere alimentato da gas, a funzionare mediante radiazione solare, ottimizzando il funzionamento del motore con questo tipo di sorgente di calore,
- l'assorbitore protegge la testa del cilindro garantendo di mantenere la temperatura della testa entro i limiti di funzionamento del motore,
- l'assorbitore capta una radiazione solare e ottimizza il trasferimento di calore verso lo scambiatore di calore inserito nella testa del motore,
- essendo detto motore già ottimizzato per produrre energia elettrica a frequenza di rete e per produrre acqua calda, non risulta necessario impiegare ulteriori dispositivi di conversione dell'energia per rendere operativo un sistema solare basato sul suddetto motore e comprendente l'assorbitore su descritto,
- viene presentato un metodo analitico di dimensionamento di assorbitori ed un esempio concreto di applicazione del metodo.

Gli elementi e le caratteristiche illustrate nelle diverse forme di realizzazione preferite possono essere combinate tra loro senza peraltro uscire dall'ambito di protezione della presente domanda.