

## Applicazioni con inverter

### 1. Introduzione

In qualità di grande consumatore di energia elettrica all'interno dei sistemi di raffreddamento, il compressore è da sempre il target principale di tutti gli OEM in termini di riduzione dei consumi energetici. A tale scopo, Frascold ha da sempre tentato di estrarre più resa possibile dai propri compressori, incrementando la resa dei motori, migliorando il comportamento delle valvole, ecc. ma per migliorare l'efficienza in maniera più drastica, occorre esplorare nuovi territori.

La variazione di velocità dei compressori è da sempre l'idea in cima alla lista. La ragione principale risiede nel fatto che i sistemi di refrigerazione richiedono la massima potenza solo per brevi periodi, ed è quindi possibile ridurre i consumi quando i carichi sono inferiori.

Oltre a risparmiare energia, la variazione di resa incrementa anche il controllo sulla temperatura. Allontanandoci da un sistema puramente on/off ad uno modulante, gli sbalzi di temperatura ed il rumore si riducono.

Frascold è molto sensibile agli argomenti che coinvolgono la conservazione dell'ambiente. In qualità di leader di mercato, Frascold desidera guidare i suoi clienti nell'effettuare le migliori scelte e informarli delle più recenti tecnologie.

### 2. Precauzioni

I compressori alternativi hanno il vantaggio, rispetto ad altre tipologie, di gestire meglio la variazione di carico, a fronte di pressioni di mandata elevate. Tuttavia, se un sistema non è adeguatamente progettato, installato e gestito, il compressore alternativo è destinato a guastarsi a causa degli elevati livelli di stress elettrico e meccanico.

Come è ovvio, i guasti riducono l'affidabilità e la disponibilità della macchina, e possono rappresentare enormi perdite di denaro, oltre che di fermi produzione (e relative perdite economiche).

Sebbene l'efficienza volumetrica sia attesa aumentare con il diminuire della velocità di rotazione, va notato che i compressori Frascold, come tutti i compressori analizzati dalla moderna letteratura scientifica<sup>1</sup> sono progettati per la massima efficienza volumetrica alla velocità di progetto. Va altresì notato che la riduzione di velocità aumenta il surriscaldamento all'aspirazione che a sua volta aumenta la temperatura di mandata e riduce

## Frequency converter applications

### 1. Introduction

As the greatest consumer of energy in a cooling system, the compressor is frequently the first target for OEMs looking to trim power consumption in their products. To that end, Frascold has been squeezing more performance out of its units by boosting the motor efficiency, optimizing valves, etc. But to achieve more than incremental gains in efficiency, fundamental changes in compressor operation can be explored.

Varying compressor speed often tops the list of ideas. The reason for this is that a cooling system typically needs to operate at maximum capacity only for short periods during high loads, and that efficiencies can be gained by running the system at lower capacities when loads are lower.

In addition to saving energy, varying compressor capacity also increases temperature control. That's because moving away from a strict on/off mode to a more continuous mode of operation reduces temperature swings and lowers sound levels.

Frascold is very sensitive to environmental issues. As a market leader, Frascold couldn't refrain from guiding its customers in making the best choices and pass the most up-to-date information for the latest technology.

### 2. Caveats

Reciprocating compressors have the advantage over other types of compressors when it comes to handling wide capacity swings and generating high head. However, if the system is not properly designed, installed, and operated, the reciprocating compressor is prone to failures, due to high dynamic and electrical stress levels.

Failures reduce equipment reliability and availability, and can result in enormous downtime-related losses, and loss of both valuable raw materials and products (an economic loss).

Although volumetric efficiency is expected to rise at low rotational speeds, note that Frascold compressors, as most compressors analyzed by modern literature<sup>1</sup> are designed for maximum volumetric efficiency at design speed. Also note that the reduction of speed increases the suction superheat which in turn leads to a higher discharge superheat and lower isentropic efficiency. The user must be aware that an increase of 15K or more of discharge temperature is expected when

l'efficienza isoentropica. L'utente deve essere al corrente che un aumento di temperatura di 15K o più della temperatura di mandata è del tutto normale se la frequenza viene ridotta da 50 a 25Hz. Questo aspetto deve essere attentamente considerato quando si è in dubbio se installare o meno l'iniezione di liquido o un raffreddatore d'olio.

### 3. Cos'è un inverter?

I controllori di pilotaggio a frequenza variabile sono dispositivi elettronici di conversione di potenza a stato solido. Un primo stadio di solito converte la corrente alternata in potenza intermedia a corrente continua, grazie ad un ponte raddrizzatore. Un circuito di commutazione converte poi la corrente continua in corrente quasi sinusoidale.

Dal momento che la corrente è prima convertita in continua, è anche possibile alimentare un carico trifase, a partire da una alimentazione monofase.

Al momento, la commutazione negli inverter viene per lo più eseguita utilizzando transistor bipolari a gate isolato (IGBT).

### 4. Motori AC

Le caratteristiche proprie dei motori AC richiedono che la tensione applicata sia regolata proporzionalmente alla frequenza, così da poter erogare la coppia richiesta. Per esempio se un motore è progettato per lavorare a 400V e 50Hz, la tensione deve essere ridotta a 200V perché il motore possa lavorare a 25Hz. Quindi, il rapporto V/f deve essere costante ( $400/50 = 8\text{V/Hz}$  in questo caso). Potrebbe essere necessario regolare ulteriormente la tensione per una performance ottimale, ma in genere la regola del V/f è quasi sempre valida.

È possibile operare anche a velocità superiori a quelle di sincronia, ma la condizione limite è che il motore non richieda più potenza rispetto a quella di targa. Ci si riferisce a questo limite in termini di "indebolimento di campo" e, per i motori AC, corrisponde ad un campo di V/f inferiore al nominale per velocità superiori a quelle di sincronia. Per esempio un motore da 100hp, 400V, 50Hz, 1480rpm (4 poli) alimentato a 400V, 60Hz (6.66 V/f), sarà limitato a fornire  $50/60=83\%$  della coppia al 120% della velocità (1780rpm).  $120\% \times 83\% = 100\%$  della potenza.

### 5. Guasti meccanici

Una delle cause di guasto più frequenti sono le eccessive vibrazioni risultanti dalle pulsazioni nelle tubazioni. I guasti a fatica sono spesso l'esito di condizioni di risonanza meccanica. Le pulsazioni nel gas sono il risultato della discontinuità di flusso generate dall'apertura e chiusura delle valvole. La frequenza delle pulsazioni è legata alla velocità di rotazione del compressore.

Le pulsazioni generano forze dinamiche tipicamente nei gomiti, curve e nelle estremità tappate dei collettori, e in generale dove vi è un cambio di geometria (come nelle riduzioni). Un'eccessiva pulsazione può produrre forze rilevanti, se non è opportunamente controllata.

the speed is reduced between 50Hz to 25Hz. The above must be carefully noted when in doubt whether to install a oil cooler and liquid injection or not.

### 3. What is an inverter?

Variable frequency drive controllers are solid state electronic power conversion devices. The usual design first converts AC input power to DC intermediate power using a rectifier bridge. The DC intermediate power is then converted to quasi-sinusoidal AC power using an inverter switching circuit. The rectifier is usually a three-phase diode bridge, but controlled rectifier circuits are also used. Since incoming power is converted to DC, many units will accept single-phase as well as three-phase input power (acting as a phase converter as well as a speed controller).

Currently, insulated gate bipolar transistors (IGBTs) are used in most VFD inverter circuits.

### 4. AC motors

AC motor characteristics require the applied voltage to be proportionally adjusted whenever the frequency is changed in order to deliver the rated torque. For example, if a motor is designed to operate at 460 volts at 60 Hz, the applied voltage must be reduced to 230 volts when the frequency is reduced to 30 Hz. Thus the ratio of volts per hertz must be regulated to a constant value ( $460/60 = 7.67\text{ V/Hz}$  in this case). For optimum performance, some further voltage adjustment may be necessary, but nominally constant volts per hertz is the general rule. This ratio can be changed in order to change the torque delivered by the motor.

Operation at above synchronous speed is possible, but is limited to conditions that do not require more power than nameplate rating of the motor. This is sometimes called "field weakening" and, for AC motors, is operating at less than rated volts/hertz and above synchronous speed. Example, a 100 Hp, 460V, 60Hz, 1775 rpm (4 pole) motor supplied with 460V, 75Hz (6.134 V/Hz), would be limited to  $60/75 = 80\%$  torque at 125% speed ( $2218.75\text{ rpm} = 100\%$  power).

### 5. Mechanical failures

One of the most frequent causes of failures is excessive vibration that results from high-level pulsation within the piping system. Fatigue failures are caused by a mechanical resonance condition. Pulsating flow results from flow discontinuities caused by valve opening and closing. The frequencies of the pressure pulsation are related to compressor speed.

Pressure pulsations produce dynamic forces in the piping system at locations where there is a change in flow direction (such as elbows and capped ends), and where there is a change in geometry (such as at reducers and expanders). Excessive pressure-pulsation levels may produce large shaking forces if the piping layout is such that the forces are not properly balanced. These large shaking forces in turn cause high levels of forced vibration.

## 6. Guasti elettrici

I più recenti inverter a frequenza variabile (AFD) con IGBT producono fronti d'onda velocissimi, risultato di frequenze portanti sempre più alte, che possono raggiungere anche i 20kHz. I motori in bassa tensione e corrente sinusoidale riescono ad operare in maniera più silenziosa e più efficiente all'aumentare della frequenza della portante.

Tuttavia, nell'installazione di un tale inverter, bisogna tenere in considerazione la condizione del motore che andrà ad alimentare. Infatti, la sopravvivenza dell'isolamento del motore è direttamente dipendente dai picchi di tensioni prodotti, dalla frequenza portante e dalle caratteristiche del fronte d'onda dell'inverter. Il materiale dell'isolamento del motore, la forma dell'avvolgimento del motore impiegato, le temperature operative e eventuali contaminanti aggressivi hanno un forte impatto.

Con l'avanzare della tecnologia, i motori rispondono meglio a frequenze di commutazione più elevate, e la tendenza al riscaldamento, il rumore e l'assorbimento di potenza stanno diminuendo. Gli IGBT producono treni di onde costituiti da molti fronti ripidissimi. Sebbene il rumore del motore e l'efficienza di lavoro aumentano con l'aumentare degli impulsi al secondo, l'isolamento ne è più severamente stressato. Infatti, un avvolgimento di un motore che vede 100 fronti d'onda al secondo su potenza sinusoidale, sarà invece costretto a subire migliaia di impulsi da un inverter.

L'uscita del convertitore di frequenza è tutt'altro che una sinusoide ideale. Gli impulsi in onda quadra di un tipico inverter hanno una ripidezza tipica tra 5 e 10kV/μs, e ciò genera correnti ad alta frequenza nei conduttori del motore. Anche la tensione tra fase e terra mostra una ripidezza del tutto analoga, a causa di capacità parassite. La magnitudo e il numero di questi picchi ad alta tensione possono causare scariche voltaiche nell'isolamento, perforarlo, e anche danneggiarlo irrimediabilmente.

## 7. Frascold e gli inverter

I motori dei compressori alternativi della Frascold sono progettati per funzionare con onde sinusoidali. Tutti i motori, sia a 2 che 4 poli sono in classe di isolamento B. Al cliente si chiede che richieda il prezzo e la disponibilità per motori con classe di isolamento F o H ogniqualvolta sia necessario installare un inverter.<sup>1</sup>

Si raccomanda di installare filtri anti interferenza elettromagnetica e filtri passa basso LC, in osservanza delle leggi in vigore in merito alla massima emissioni di disturbi EMI. La frequenza della portante deve essere impostata al minimo valore possibile, compatibilmente con le normative in vigore, rumore e vibrazioni.

Nel caso di applicazioni sino a 30Hz o meno, si raccomanda di rimuovere il dispositivo deltaP e sostituirlo con un pressostato differenziale meccanico, non ritardato, con seta a 1.5 bar. Il range di applicabilità dei semiermetici Frascold, forniti con il motore opzionale in classe F, va dal 60 al 120% della frequenza di targa, per inverter dotato di coppia variabile, in quadrante 1 solamente, non rigenerativo, senza frenatura.

Se si prevede di far funzionare il compressore al 120% di 50Hz

<sup>1</sup> Eccezionalmente si possono usare inverter con frequenza portante di 2 o 4kHz e bassa distorsione armonica anche con i motori standard in classe B.

## 6. Electrical failures

The latest family of insulated gate bipolar transistor (IGBT)-type adjustable frequency drives (AFD) produces voltage wave fronts that are extremely fast as a result of increasing carrier frequency. The frequency may be as high as 20 kHz. Motors designed for low voltage, sinusoidal power, run more efficiently and quietly under this condition.

When installing an IGBT drive, consideration must be given to the condition of the motor that it will power. The question of the insulation system surviving the installation of an IGBT drive is dependent on the voltage spikes produced, carrier frequency and wave front characteristics of the drive. Insulation materials used in the motor, motor coil winding patterns employed, operating temperature and contaminants exposure have significant impact on the motor winding's chance of survival.

As faster switching motor are being developed, motor responses with regard to winding heating, noise, and power consumption are improving. IGBT drives produce output waves that are made up of many steep wave fronts. Although motor noise and running efficiency improve as the number of pulses increase, the insulation is more severely stressed by the repetition and the steep nature of the pulse wave front. A motor winding that sees 120 wave fronts/second on sinusoidal power will experience thousands of pulses from an inverter drive.

The converter output is very far from having an ideal sinusoidal shape. The square-wave pulses of typical converter output voltages have an edge steepness of between 5 and 10 kV/μs that causes high frequency currents in the motor cable. The phase-to-ground voltage shows a similarly high edge steepness due to parasitic capacitances. The magnitude and number of these high voltage peaks may cause partial discharge to occur in the winding, resulting in serious damage to insulation materials.

## 7. Frascold and inverters

Frascold reciprocating compressors motors are only designed to accept a sinusoidal wave. All 2-poles and 4-poles motors are in class-B insulation. The customer is required to ask for pricing and availability of insulation class-F or -H motors any time the compressor is required to be operating with a frequency inverter.<sup>1</sup>

Electro-magnetic interference filters and LC low-pass filters are recommended, in observance with law in force in your country for maximum EMI emission and radiation. Carrier frequency must be kept at the lowest setting, compatibly with EMI regulation in force, noise and vibration.

In case of design frequency range down to 30Hz or less, it is recommended to remove the on-board deltaP oil differential pressure switch and install a standard mechanical, zero delay, manual reset, oil diff. p. switch, adjusted or rated at 1.5 bar. The allowed range of applicability for Frascold semi hermetic reciprocating compressors, supplied with optional class-F motor, is from 60% to 120% of rated frequency, with variable torque, quadrant 1 only, non regenerative, non braking frequency inverter.

<sup>1</sup> Exceptionally, inverters with very low carrier frequency of 2 or 4kHz, and low harmonic distortion can be used with standard class B motors.

per più del 20% del tempo totale, si raccomanda di acquistare un motore a 60Hz nativo. Al 120% di velocità, la pressione di evaporazione deve essere ridotta al 75/85% del valore di design, allo scopo di contenere la potenza al 100%.

Se si prevede di far funzionare il compressore al 60% o meno per più del 20% del tempo, si raccomanda di introdurre cicli di 1 minuto a pieno carico ogni 5 minuti di funzionamento, allo scopo di migliorare il ritorno d'olio e la lubrificazione.

Le accelerazioni e le decelerazioni non devono eccedere i 10Hz al minuto, così da evitare stress non necessario a cuscinetti, albero e bielle.

L'inverter non può essere utilizzato come soft starter: le rampe di avviamento e spegnimento devono limitarsi a massimo 1 secondo.

### 8. Performance attese

Può essere dimostrato che un funzionamento a pressione di condensazione costante diminuisce il COP proporzionalmente alla diminuzione della velocità del compressore. Questo è causato dalla riduzione dell'efficienza volumetrica del compressore alle basse velocità, e all'aumento del consumo elettrico specifico. Infatti, l'effetto di una minore lubrificazione assieme ad un'efficienza ridotta del motore risultano in un consumo elettrico superiore.

Tuttavia, per pressioni di condensazione flottanti, il COP aumenta se la riduzione della velocità del compressore è accompagnata da una riduzione di pressione. L'aumento di COP è proporzionale alla riduzione della pressione di condensazione, anche se in questo conteggio va considerato il calore dissipato dall'inverter.

Dunque si raccomanda fortemente di non installare controlli di condensazione quando vi è un inverter che modula la velocità del compressore.

Per maggiori informazioni contattate il vostro rappresentante o Alessandro Mandelli alla divisione customer care di Frascold: [alessandro.mandelli@frascold.it](mailto:alessandro.mandelli@frascold.it)

If operation at 120% on a 50Hz motor for more than 20% of the total running time is expected, it is then recommended to buy a native 60Hz motor. At 120% speed, the evaporating pressure must be reduced to 75/85% of design value, to maintain power at 100%.

If operation at 60% for more than 20% of the total running time is expected, it is then recommended to introduce 1 minute at full speed every 5 minute at lowest speed, to ensure proper oil return and lubrication.

Acceleration and deceleration rate shall not exceed 10Hz per minute, in order to avoid unnecessary stress on bearings, crankshaft and rods.

The frequency inverter can't be used to soft-start the motor: the ramp-up and ramp-down time must be limited to no more than 1 second.

### 8. Expected performance.

It can be seen that for constant head-pressure-control the COP decreases with a reduction in the compressor speed. This is caused by the reduction in the volumetric efficiency of the compressor at low speeds and the increase in specific power consumption. In fact, the effect of reduced lubrication and reduced motor efficiency at low speeds result in higher total power consumption.

For floating head-pressure COP increases when speed reduction is accompanied by a reduction in the head pressure. The increase in the COP is greatly proportional to the reduction of condensing pressure, although power losses of the inverter drive, in terms of heat dissipated, must be considered.

Therefore it is highly recommend to not install a head pressure control when an inverter drive is used for modulating the compressor capacity.

For more information contact your local rep. or Alessandro Mandelli at Frascold customer care division: [alessandro.mandelli@frascold.it](mailto:alessandro.mandelli@frascold.it)

<sup>1</sup>Comparative performance evaluation of positive displacement compressors in variable-speed refrigeration applications, S. A. Tassou and T. Q. Qureshi, in Int. J. Refrig. Vol. 21. No. 1, pp. 29-41. © 1998 Elsevier Science Ltd and IIR.