

Convertitori di frequenza (CF)

Cinque istruzioni importanti che riguardano l'uso dei convertitori di frequenza:

1. Per un'applicazione che **richiede spesso potenze diverse**: valutare l'impiego del CF.
2. Utilizzare i CF solo per **azionamenti correttamente dimensionati**; un CF non è una misura correttiva per un sistema sovradimensionato.
3. Regolare la velocità secondo **chiari criteri di necessità** con sensori appropriati per la pressione, la temperatura, la portata, il volume, ecc.
4. **I motori più vecchi** che non sono stati fabbricati per funzionare con un convertitore di frequenza, non sono particolarmente adatti, poiché si possono presentare problemi di isolamento.
5. **Attenta impostazione dei parametri** in base alle effettive necessità.

La scheda tematica n. 25 è un valido supporto per decidere se l'installazione di un convertitore di frequenza, per sistemi d'azionamento con carichi variabili, sia adeguata, economica e a basso consumo energetico e per capire di cosa tener conto nella pianificazione e nel funzionamento dei CF. Un CF causa sempre perdite di energia e riduce l'efficienza del motore. L'uso di un convertitore di frequenza deve essere analizzato e pianificato attentamente in modo tale da ridurre il consumo totale di energia del sistema d'azionamento e ottimizzare i costi.



Figura 1: Convertitori di frequenza

Il sistema d'azionamento elettrico

Il convertitore di frequenza è un elemento del sistema d'azionamento elettrico utilizzato per il controllo elettronico della velocità. Grazie alla regolazione della velocità in rapporto al valore del carico richiesto e la conseguente riduzione del fabbisogno di potenza elettrica si ottiene un risparmio di energia.

In generale, un convertitore può essere applicato a qualsiasi nuovo motore per ottimizzarne il funzionamento e risparmiare energia, ma ci sono anche casi in cui l'uso non è utile.

■ Quando è richiesto **solo l'avviamento graduale** e il motore può funzionare con la frequenza di rete di 50 Hz, l'alternativa più economica ed efficiente è un avviatore statico. Per alcune applicazioni, è richiesto un avviamento pesante quindi è necessario l'uso di un CF solo per la fase di avvio: per migliorare l'efficienza, in questi casi è possibile utilizzare un circuito per bypassare il CF dopo la sincronizzazione con la rete.

■ Se i **motori più vecchi**, che non sono progettati per il funzionamento con i CF, vengono alimentati con un CF, i fianchi di commutazione della tensione possono danneggiare l'isolamento degli avvolgimenti dello statore in breve tempo. La velocità superiore è limitata. A velocità inferiori può essere necessario un raffreddamento aggiuntivo. Se tali motori sono dotati di convertitori di frequenza e filtri sinusoidali, il risparmio energetico può essere vanificato dalle ulteriori perdite causate dal filtro sinusoidale. Inoltre, l'efficienza dei motori più vecchi è generalmente inferiore. Un nuovo motore IE3 è spesso

la soluzione migliore. Per questo motivo, di solito non è consigliabile installare un convertitore di frequenza sui motori più vecchi.

■ **Le velocità costanti fisse** al di sotto (o talvolta al di sopra) della frequenza di rete si possono ottenere con un convertitore di frequenza, ma si possono ottenere in modo più efficiente ed economico con una cinghia di trasmissione o un riduttore.

■ **Due velocità costanti fisse** (ad es. notte/giorno): in passato, a tale scopo venivano utilizzate strozzature spesso inefficienti o motori a poli commutabili. Oggi è molto più funzionale un controllo del carico variabile mediante convertitori di frequenza in funzione della pressione, della temperatura, della qualità dell'aria ed eventualmente del programma di produzione giornaliera, ecc.

■ **Sovradimensionamento:** I sistemi d'azionamento che al carico massimo non raggiungono mai più del 75% della potenza nominale del motore e dell'applicazione e che non richiedono mai più del 120% di potenza anche durante il breve periodo dell'avviamento, sono sovradimensionati e hanno un basso rendimento. Un CF non pone rimedio alla situazione. L'azionamento e l'applicazione devono essere correttamente dimensionati in modo che il sistema d'azionamento operi nel punto di funzionamento ottimale.

■ **Sostituzione del motore:** i motori efficienti hanno una velocità leggermente superiore rispetto ai motori meno efficienti a parità di poli. Un nuovo motore IE3 ha meno slittamento e gira (senza CF) da 1% a 3% più velocemente rispetto ai vecchi motori meno efficienti. Per un ventilatore o una pompa, ad esempio, ciò si traduce in

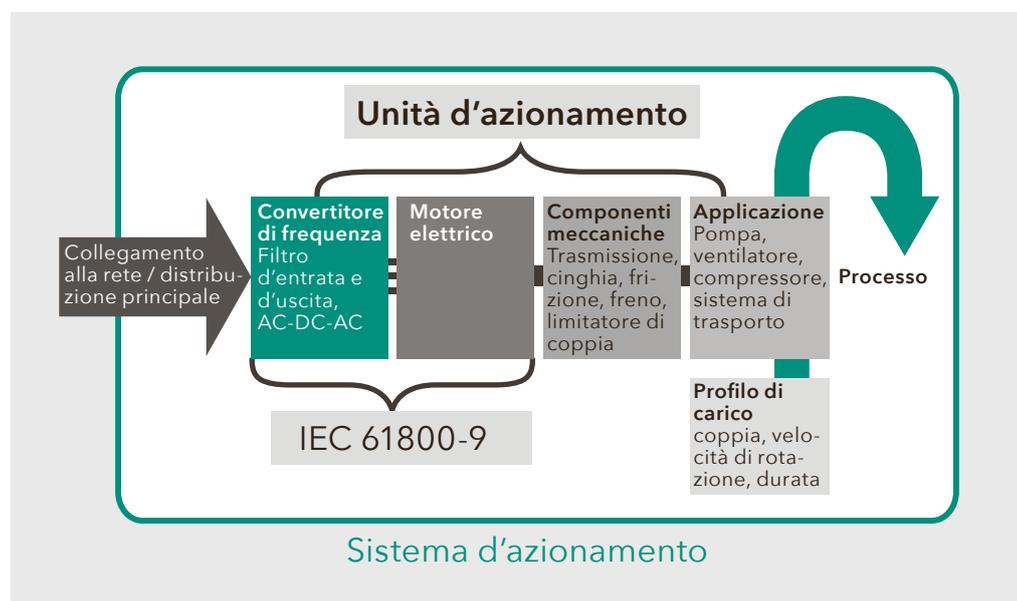


Figura 2: Sistema d'azionamento elettrico. Nella norma IEC 61800-9 sono definiti il metodo di prova e le classi di efficienza dei motori con i CF.

una portata volumetrica e ad un'erogazione troppo elevata e, quindi, in un consumo energetico indesiderato. Questo deve essere tenuto in considerazione quando si opera senza CF, in quanto la potenza assorbita aumenta con la terza potenza del numero di giri per carichi con curve caratteristiche quadratiche (ad es. pompe, ventilatori). Ciò si può evitare regolando o riprogettando la trasmissione. Senza adattamento della trasmissione o senza utilizzo di un convertitore di frequenza, il risparmio energetico può essere vanificato dalla maggiore velocità. Non ha senso utilizzare un CF solo per ridurre costantemente la velocità.

■ **Applicazioni parallele** (ad es. controllo della sequenza di inserimento delle pompe negli impianti di trattamento delle acque reflue con notte/giorno 1:10; ridondanza): per l'ottimizzazione è necessaria un'analisi del sistema da parte di specialisti. Di solito, solo una delle pompe in parallelo deve essere controllata in funzione del carico con un CF; le altre pompe vengono accese in base alle necessità a potenza costante.

Introduzione

Cos'è un convertitore di frequenza?

Un **convertitore di frequenza** (CF) consente il controllo della velocità negli azionamenti elettrici generando una tensione alternata con frequenza e ampiezza variabili per alimentare i motori elettrici partendo dalla tensione alternata della rete (ad es. 400 V) e dalla frequenza di rete (50 Hz). Ciò consente di configurare un sistema di controllo con sensori di pressione, temperatura, ecc. che permetta di fornire la potenza richiesta (e solo quella richiesta) al momento giusto e in rapporto alla portata volumetrica della pompa, del ventilatore, ecc. Questa scheda tematica si concentra sul controllo elettronico della velocità mediante convertitori di frequenza nei sistemi d'azionamento elettrici nell'industria, nelle infrastrutture e nei grandi edifici. La presente scheda non riguarda le seguenti

applicazioni: l'impiego di motori come generatori, motori a corrente continua, adattamento del carico con riduttori meccanici, motori a poli commutabili, avviatori statici e sistemi d'azionamento nei veicoli elettrici. La scheda tematica è un supporto alla riduzione dei consumi elettrici nei sistemi d'azionamento mediante l'installazione di convertitori di frequenza adatti. L'ottimizzazione dell'intero sistema d'azionamento composto da motore, riduttore, trasmissione, applicazione e convertitore di frequenza deve essere adattato esattamente alle esigenze meccaniche e ai tempi di utilizzo previsti.

Pubblico destinatario

La scheda tematica si rivolge principalmente ai gestori e a costruttori di impianti, a progettisti, tecnici e ingegneri del settore industriale, dell'edilizia e dell'impiantistica. È rivolta anche ai committenti degli impianti, i quali devono avere competenze di coordinamento e conoscenze tecniche minime per poter pianificare, ordinare, implementare, modernizzare, ottimizzare e far funzionare sistemi d'azionamento efficienti per le varie applicazioni (pompe, ventilazioni, compressori per aria compressa e per la refrigerazione, impianti di trasporto e di processo - figura 3).

Nozioni sui convertitori di frequenza

Dall'invenzione dei transistor nel 1948, lo sviluppo dei tiristori nel 1958 e la loro introduzione nei regolatori di carico prodotti in serie 50 anni fa, il controllo elettronico del carico nei sistemi d'azionamento con convertitori di frequenza ha acquisito grande importanza e ampia applica-

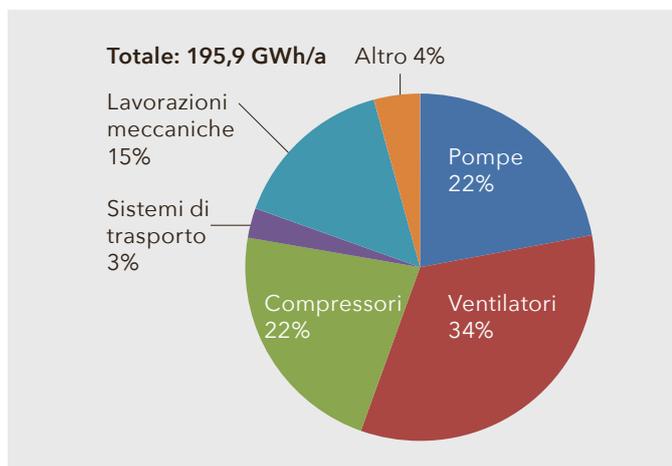


Figura 3: Quote di consumo energetico delle varie applicazioni in 18 grandi aziende industriali.

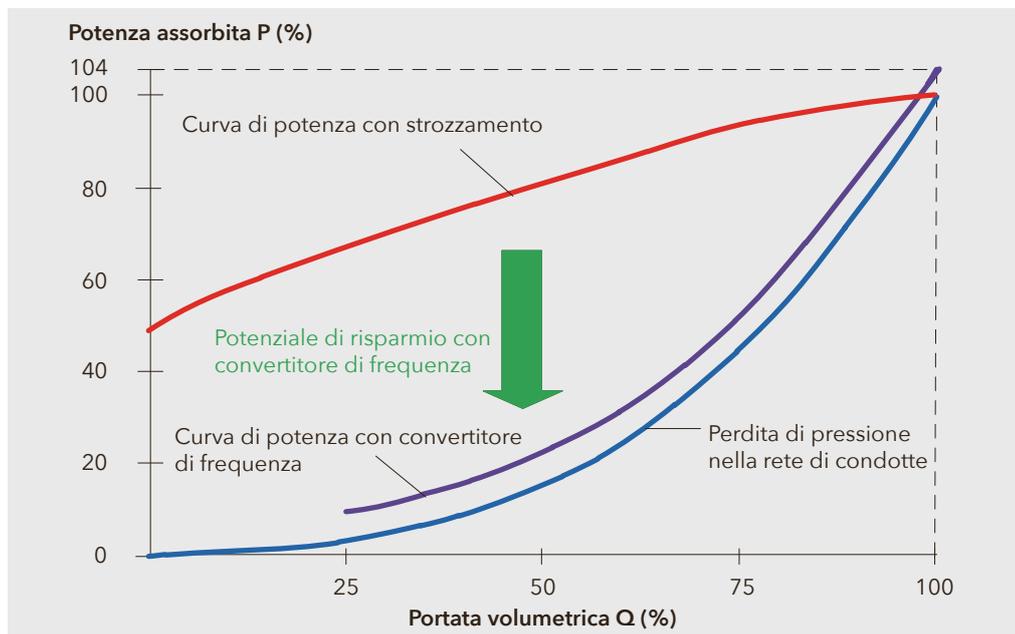


Figura 4: Potenziale di risparmio con CF nei processi di pompaggio (fonte: Topmotors, scheda tematica - Pompe 2012)

zione col crescere dei carichi richiesti. Nelle ferrovie, negli ascensori e nelle macchine industriali, il controllo della velocità a variazione continua ha raggiunto rapidamente alti livelli di sviluppo e ha relegato in secondo piano le tecnologie precedenti (ad es. motori a corrente continua con raddrizzatori a tiristori o riduttori meccanici). Per ottenere risparmi energetici, i convertitori di frequenza sono oggi indispensabili per molte applicazioni di piccole e grandi dimensioni perché consentono un avvio graduale con coppie elevate, un'accelerazione regolare e continua e un controllo in funzione del carico.

I convertitori di frequenza hanno un grande potenziale di efficienza nei sistemi con curva di coppia quadratica: pompe a circuito chiuso, convogliatori d'aria, ecc.

I CF sono importanti anche negli impianti per la produzione di energia elettrica (idroelettrica, eolica) e come inverter negli impianti fotovoltaici, dove l'elettricità deve essere convertita in modo ottimale in corrente alternata per essere immessa nella rete (non sono trattati in questa scheda). Possono essere utilizzati anche in applicazioni industriali - previa una progettazione adeguata - quali sistemi frenanti a recupero di energia (rigenerazione attiva).

Compiti degli interessati

L'elenco seguente mostra una possibile suddivisione dei lavori, una volta deciso di utilizzare un CF. Una persona o un'azienda può ricoprire diversi ambiti lavorativi.

■ **Proprietario dell'impianto:** Definisce le condizioni di utilizzo (avvio, tempo di funzionamento, fabbisogno di carico e curva di carico), nonché le condizioni di manutenzione e revisione.

■ **Gestore dell'impianto:** Quando si utilizzano impianti già esistenti, il gestore misura il fabbisogno di potenza elettrica in funzione del carico richiesto, definisce i profili di carico tipici all'avviamento e nel funzionamento continuo e definisce i criteri di controllo.

■ **Ingegnere progettista:** Definisce la potenza massima della macchina, il tipo e la potenza per motore e CF, sviluppa e controlla i costi sul ciclo di vita delle varianti proposte - con e senza CF - prepara i capitolati, confronta le offerte, controlla la messa in funzione.

■ **Produttore dell'impianto:** Installa e integra il convertitore di frequenza, il motore (compresa la trasmissione) e il concetto di controllo nel sistema, supporta la programmazione del carico e i test per il collaudo, ottimizza il sistema per quanto riguarda l'efficienza energetica e la protezione dei materiali; è anche responsabile della qualità del prodotto.

■ **Fornitore del motore:** Fornisce un motore adatto a funzionare con un CF, verifica il campo di applicazione e di funzionamento, supporta la progettazione e fornisce i dati sull'efficienza.

■ **Fornitore del convertitore di frequenza:** Assicura la combinazione ottimale di CF e motore, supporta la programmazione in rapporto ai parametri di regolazione definiti, aiuta nella regolazione, nella parametrizzazione e ottimizzazione delle variabili regolate, fornisce dati sull'efficienza dei CF.

Quando una persona o un'azienda ricopre il maggior numero possibile di punti elencati, questo semplifica l'interazione, l'ottimizzazione dell'impianto e le eventuali questioni relative alle garanzie.

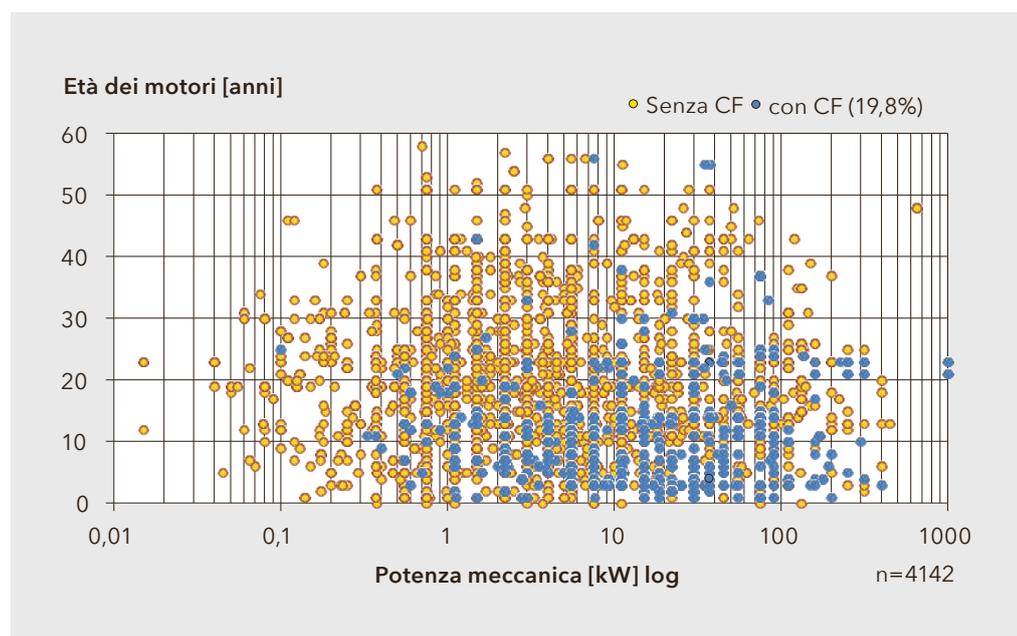


Figura 5: L'analisi di 4142 sistemi d'azionamento ha dimostrato che oggi solo il 19,8% funziona con un convertitore di frequenza (fonte: Easy 2013).

Concetti fondamentali

Elementi di base

Un convertitore di frequenza è costituito da tre gruppi principali: un convertitore lato motore (CC), un convertitore lato rete e un circuito intermedio (CI). Il circuito intermedio è costituito essenzialmente da un condensatore che attenua la tensione del circuito intermedio e disaccoppia il lato motore dal lato di rete. Il convertitore dal lato motore è un inverter. Converte la tensione CC del circuito intermedio in una tensione CA trifase con ampiezza e frequenza regolabili in base alla velocità desiderata del motore. Il convertitore lato rete ha il compito di trasformare la tensione alternata monofase o trifase della rete di alimentazione in tensione continua del circuito intermedio. A tale scopo vengono utilizzate varie tecnologie.

La scelta della tecnologia del convertitore lato rete determina essenzialmente il comportamento del CF per quanto riguarda le distorsioni della rete (armonico, $\cos \varphi$) e le possibili applicazioni (come la capacità rigenerativa). Le diverse tecnologie sono descritte e confrontate qui di seguito. Per quanto riguarda il confronto, gli aspetti più importanti sono: la capacità rigenerativa, ossia il rinvio della corrente alla rete, le armoniche e il fattore di potenza ovvero $\cos \varphi$.

Sono disponibili anche convertitori con circuito a corrente intermedio e convertitori diretti. Poiché entrambi sono rari, questo articolo si concentra sul convertitore di gran lunga il più utilizzato, quello con circuito a tensione intermedio.

Capacità rigenerativa

Un motore elettrico può fondamentalmente ruotare in entrambe le direzioni e funzionare anche come motore o generatore. Ciò significa che un carico può essere azionato e frenato. L'inverter sul lato motore può trasportare energia anche in entrambe le direzioni. La possibilità di operare la frenatura con un CF dipende dalla progettazione del convertitore lato rete: esso determina se l'energia di frenatura può essere reintrodotta in rete, se può essere dispersa in una resistenza o se la frenatura elettrica non è possibile con un CF.

La rigenerazione è chiamata anche recupero. Il funzionamento a quattro quadranti (figura 7) significa che il motore può essere azionato e frenato in entrambi i sensi di rotazione.

L'alimentazione rigenerativa è particolarmente utile quando grandi energie cinetiche devono essere frenate frequentemente. Questo è il caso, tra l'altro, di:

- Gru (abbassamento del carico)
- Sistemi di trasporto verticali, inclinati e orizzontali
- Centrifughe che vengono rallentate rapidamente
- Banchi di prova (macchina a carico frenante)
- Veicoli e funivie (non affrontate in questa scheda)

La rigenerazione aumenta l'efficienza complessiva e durante la frenata non si genera calore che, altrimenti, deve essere dissipato. Poiché gli inverter che possono immettere nuovamente in rete hanno perdite leggermente superiori e causano costi più elevati, la capacità rigenerativa non è sempre vantaggiosa. Nel caso dei ventilatori, ad esempio, che vengono frenati elettricamente solo durante un arresto di emergenza, l'investimento non vale la pena dal punto di vista finanziario o energetico.

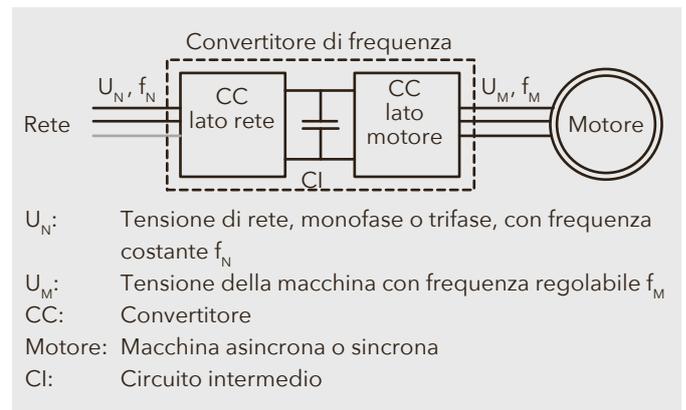


Figura 6: Convertitore di frequenza con circuito intermedio a tensione e motore

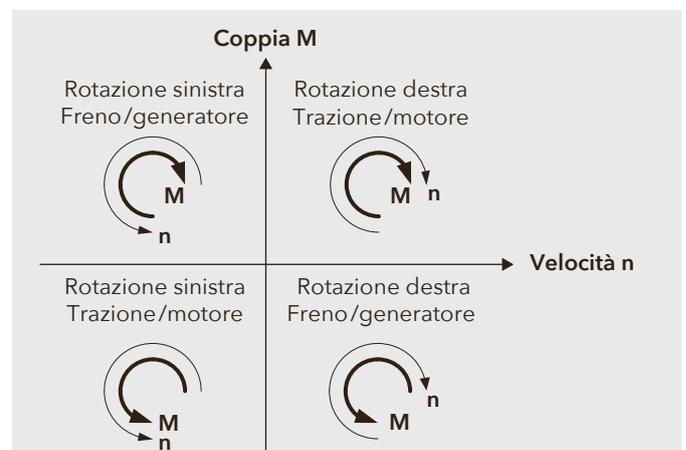


Figura 7: Funzionamento a quattro quadranti di una macchina elettrica

Armoniche

Nella corrente in ingresso e in uscita di un convertitore di frequenza, oltre all'oscillazione fondamentale desiderata, agiscono anche le armoniche, poiché i rispettivi convertitori eseguono operazioni di commutazione (ad alta frequenza). Le armoniche sono spesso indicate come correnti o tensioni sinusoidali. Un'armonica è un'oscillazione sinusoidale con una frequenza corrispondente ad un multiplo della frequenza di oscillazione fondamentale.

Filtri sinusoidali

I motori più vecchi costruiti per l'utilizzo di rete a tensione sinusoidale sono spesso soggetti a problemi d'isolamento quando sono alimentati da convertitori di frequenza. Per questo motivo, esistono anche CF con i cosiddetti filtri sinusoidali. Questi ultimi filtrano le armoniche e trasformano la tensione frammentata mostrata nella figura 9 in una tensione quasi sinusoidale. Tuttavia, anche questi filtri hanno le loro perdite e causano costi aggiuntivi.

D'altra parte, le perdite nel motore sono sostanzialmente ridotte dall'assenza di armoniche.

Filtro EMC

EMC (Electro Magnetic Compatibility) significa che i dispositivi elettrici non interferiscono tra loro a causa di effetti elettromagnetici. Da un lato, non devono emettere interferenze magnetiche inammissibili e, dall'altro, non devono essere disturbati dalle proprie onde elettromagnetiche o

da quelle causate da altre apparecchiature. Per ridurre l'emissione di onde elettromagnetiche, vengono spesso utilizzati i cosiddetti filtri EMC all'ingresso e/o all'uscita del CF. Questi sono molto più piccoli dei filtri sinusoidali e causano perdite e costi inferiori rispetto a questi ultimi.

Filtro du/dt

Un filtro du/dt limita la pendenza dei fianchi di tensione all'uscita dal convertitore.

Fattore di potenza e $\cos \varphi$

Il fattore di potenza descrive il rapporto tra potenza attiva e apparente. Può assumere qualsiasi valore compreso tra 0 e 1. Quando è uguale a 1, vuol dire che la rete non è caricata con potenza reattiva (situazione ideale), quindi, dovrebbe essere il più possibile vicino a 1.

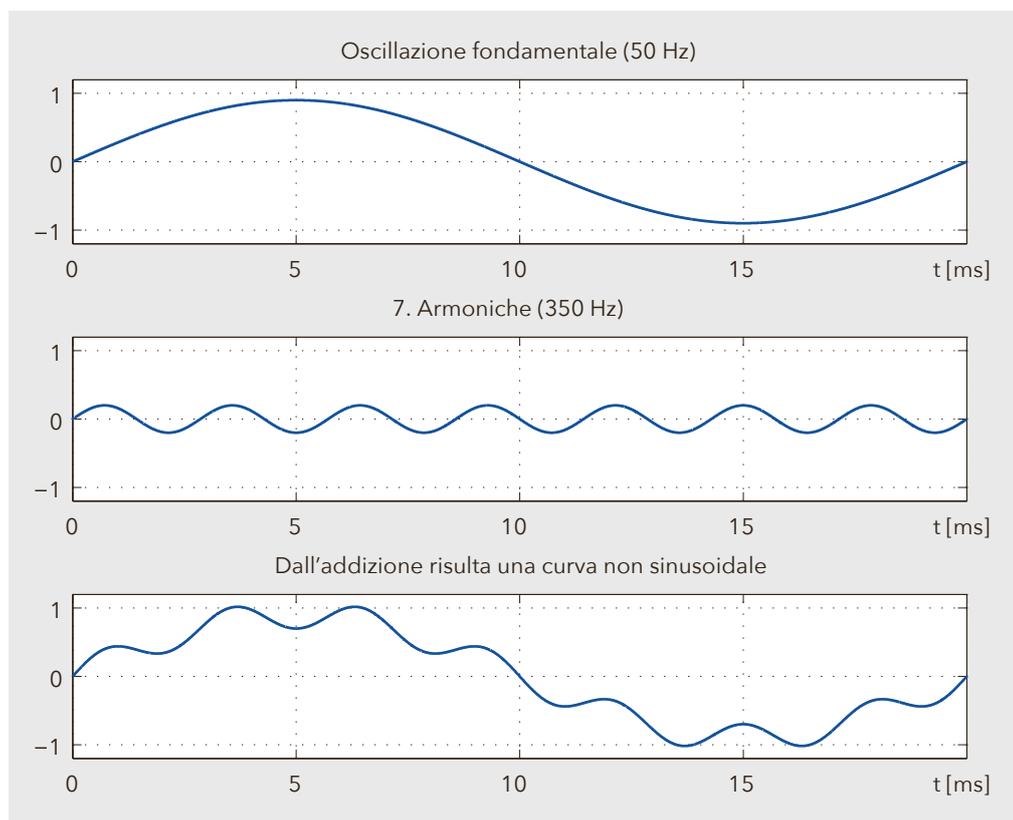


Figura 8: Illustrazione di un segnale (sotto) composto da un'oscillazione fondamentale (sopra) e una settima armonica (al centro).

Il $\cos \varphi$ descrive il rapporto tra potenza attiva e apparente per le curve sinusoidali di tensione e corrente. Se non ci sono armoniche in gioco, il fattore di potenza e $\cos \varphi$ sono uguali. Con le armoniche, il fattore di potenza è inferiore al $\cos \varphi$. Di solito viene indicato solo il $\cos \varphi$. Le armoniche vengono considerate separatamente.

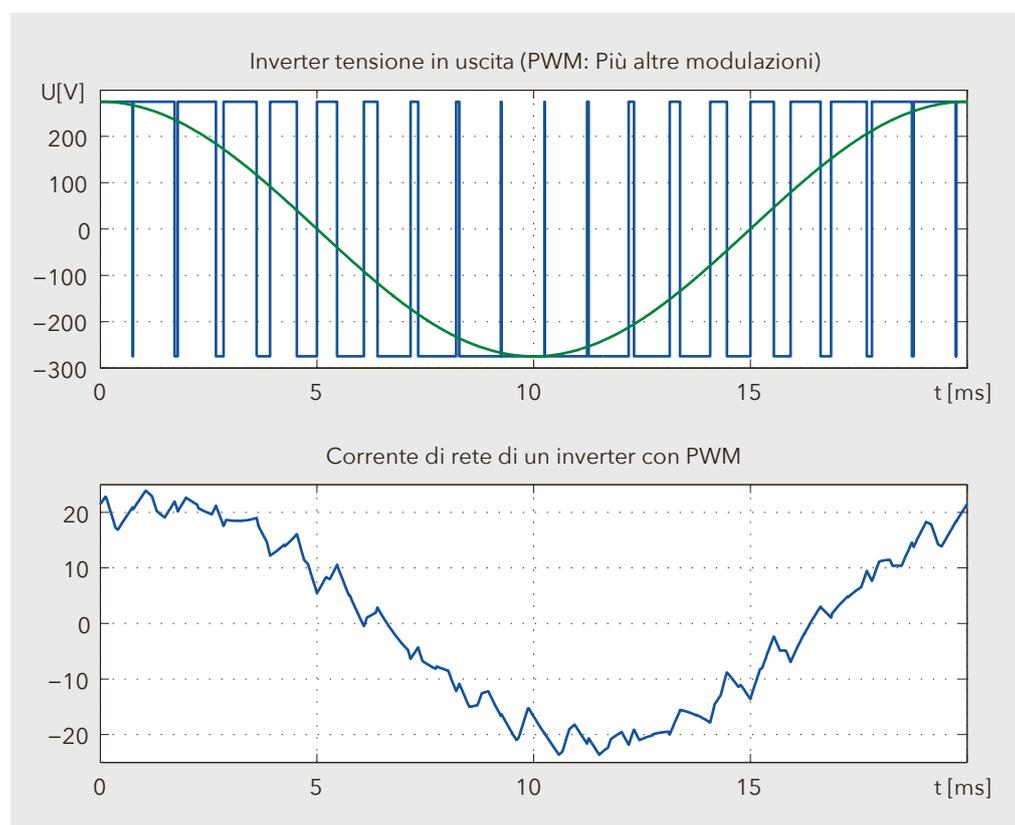


Figura 9: Corso temporale della tensione di uscita dell'inverter di una fase (blu). Modificando l'ampiezza dell'impulso (PWM: modulazione dell'ampiezza dell'impulso) viene simulata nel miglior modo possibile l'oscillazione fondamentale desiderata (verde). Poiché l'inverter può commutare solo avanti e indietro, oltre all'oscillazione fondamentale desiderata si creano delle armoniche. La corrente di fase mostrata nel grafico inferiore è molto più sinusoidale della tensione, ma ha ancora delle armoniche. La frequenza di commutazione in questo esempio è relativamente bassa, 1000 Hz.

Convertitori con circuito intermedio

Confronto tra i tipi di CF

La figura 10 mostra una panoramica riassuntiva dei vari CF con circuito intermedio a tensione. Il confronto si riferisce al lato rete del convertitore e vale a prescindere dal fatto che si utilizzi un motore sincrono o asincrono. Le varianti di CF elencate nella figura 10 e il loro comportamento sono descritte più dettagliatamente di seguito.

CF con raddrizzatore a diodi lato rete

Il lato rete di un CF può essere realizzato con un raddrizzatore a diodi. Il vantaggio di questa soluzione è rappresentato dal fatto che è semplice, robusto, efficiente e conveniente. Non è però possibile immettere nuovamente l'energia di frenatura del motore nella rete.

Per potenze inferiori a 2 kW, il ponte a diodi è spesso monofase, per potenze superiori è trifase.

Le armoniche

Il raddrizzatore a diodi mostra una forma caratteristica di corrente con armoniche tipiche. Con il ponte monofase, si verificano nella corrente di rete tutte le armoniche dispari. Anche sul ponte trifase sono dispari, mancano però le multiple di 3. Un raddrizzatore a diodi trifase, oltre all'oscillazione fondamentale, ha quindi le armoniche 5°, 7°, 11°, 13°, 17°, ecc. nella corrente di rete. L'ampiezza delle singole armoniche diminuisce con l'aumentare del numero. Nei sistemi a impulsi più elevati, le singole armoniche vengono eliminate.

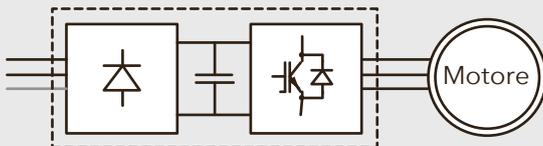
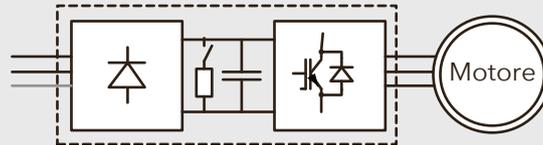
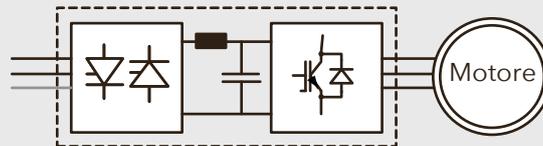
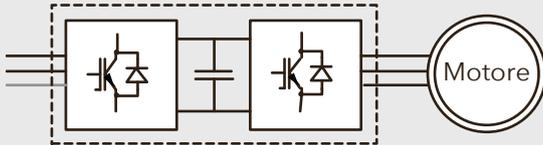
CF con	Freno elettrico	cos φ	Armoniche nella corrente di rete
Raddrizzatore a diodi 	No	Ottimo	Tutte dispari. Con la corrente a trifase, mancano le armoniche multiple di tre.
Raddrizzatore a diodi con chopper di frenatura 	Sì, l'energia frenante viene dispersa nella resistenza di frenatura del chopper di frenatura.	Ottimo	Come raddrizzatore a diodi senza chopper di frenatura.
Raddrizzatore invertitore 	Sì, con recupero dell'energia di frenatura in rete.	Buono	Come per i raddrizzatori a diodi. A causa dell'induttanza di attenuazione nel circuito intermedio leggermente inferiore.
Lato rete attivo con inverter 	Sì, con recupero dell'energia di frenatura in rete.	Ottimo, regolabile, possibile una compensazione	Tanto più bassa quanto più alta è la frequenza di commutazione.
Spiegazione dei simboli  Diodo. Esso rappresenta il raddrizzatore a diodi monofase o trifase.  Tiristore. I due tiristori antiparallelo simboleggiano qui i raddrizzatori invertitori con tiristori che possono trasportare energia in entrambe le direzioni.		 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) con diodi antiparalleli. L'IGBT è un semiconduttore di potenza commutabile. Con sei IGBT e il relativo diodo è possibile configurare un inverter trifase.  Collegamento alla rete mono o trifase	

Figura 10: Confronto tra i diversi CF in relazione al loro comportamento di rete

La distorsione totale della corrente dei raddrizzatori a diodi, nota anche come THDI (Total Harmonic Distortion of Current), è superiore al 30%. Ne consegue una distorsione della tensione fino al 3%; non sono ammessi valori superiori. L'esperienza pratica dimostra che un'eccessiva distorsione della corrente provoca un'eccessiva distorsione della tensione, influenza altri componenti elettronici e sistemi sulla rete e porta ad un aumento delle perdite nella rete e nei trasformatori. Quali armoniche si trovano nella corrente di rete di un CF dipende principalmente dal tipo di raddrizzatore in ingresso utilizzato nel convertitore.

Per ridurre le armoniche possono essere utilizzati i filtri. Quando si collega alla rete un CF oppure un CF con più convertitori d'ingresso tramite trasformatori con tensioni secondarie sfasate sul lato rete, si creano circuiti a 6, 12 o 18 impulsi. Con questa tecnologia le singole armoniche possono essere eliminate o almeno ridotte.

Valori THDI tipici per raddrizzatori:

- Raddrizzatore a 6 impulsi: corrente fortemente distorta, THDI > 30%
- Raddrizzatore a 12 impulsi: corrente distorta, THDI > 12%
- Raddrizzatore a 18 impulsi: buona forma d'onda della corrente, THDI > 6%

Fattore di potenza, $\cos \varphi$

Con il raddrizzatore a diodi, il $\cos \varphi$ è praticamente 1. Negli impianti molto grandi può essere inferiore di qualche punto percentuale, poiché la commutazione provoca un piccolo spostamento di fase tra le oscillazioni fondamentali di corrente e la tensione.

CF con raddrizzatore a diodi e chopper di frenatura con resistenza di frenatura

Poiché il ponte di diodi non è rigenerativo, spesso viene installato un chopper di frenatura supplementare con resistenza di frenatura. In questo modo il motore può essere frenato elettricamente. L'energia prodotta viene convertita in calore nella resistenza di frenatura. Le armoniche e $\cos \varphi$ sono le stesse del raddrizzatore a diodi senza chopper di frenatura.

CF con raddrizzatore con inversione lato rete

Un raddrizzatore con inversione è costituito da due ponti a tiristori. Un ponte è attivo quando l'energia fluisce dalla rete al circuito intermedio, il secondo ponte consente di invertire la direzione dell'energia. Con questa configurazione è possibile il funzionamento di frenatura con retroazione nella rete elettrica.

Armoniche

Le armoniche della corrente di rete di un raddrizzatore invertitore sono molto simili a quelle di un raddrizzatore a diodi. Poiché tra il raddrizzatore e il condensatore deve essere installata una bobina di attenuazione, la corrente di rete diventa più rettangolare e l'ampiezza delle armoniche x-esimo è di circa $1/x$. La quinta armonica della corrente di rete (250 Hz nella rete a 50 Hz) ha quindi un'ampiezza di circa $1/5 = 20\%$ della corrente di oscillazione fondamentale, la settima circa $1/7 = 14\%$.

CF con inverter lato rete e lato motore

È possibile utilizzare un inverter sul lato rete del CF. Viene indicato anche come «active front end», raddrizzatore attivo o alimentazione attiva. Tecnicamente, si tratta di un inverter in quanto è utilizzato normalmente sul lato motore. Può trasportare energia in entrambe le direzioni. In questo modo è possibile un funzionamento di frenatura con ritorno di energia nella rete

Le armoniche

Le armoniche che un inverter immette in rete sono influenzate dalla frequenza di commutazione e dal processo di modulazione. La frequenza di commutazione indica la frequenza di accensione e spegnimento dei singoli semiconduttori. Alle alte frequenze di clock, le armoniche della corrente di rete hanno una frequenza più alta e le loro ampiezze sono minori. Di conseguenza, le perdite di commutazione nell'inverter aumentano. La procedura di modulazione descrive come vengono generati i comandi di commutazione per i singoli semiconduttori. Con la modulazione di larghezza d'impulso (PWM) più frequentemente utilizzata, oltre all'oscillazione fondamentale, si verificano armoniche nell'intervallo della frequenza di clock e dei suoi multipli.

Fattore di potenza, $\cos \varphi$

Con gli inverter, oltre alla potenza reattiva può essere impostata anche la potenza attiva. Di solito è impostata a zero in modo che il $\cos \varphi$ sia 1. Tuttavia, è anche possibile ottenere potenza reattiva o potenza reattiva in uscita, cioè la compensazione.

Controllo e regolazione

Regolazione lato rete

Per i convertitori con circuito intermedio a tensione, la regolazione lato rete ha il compito di mantenere il circuito intermedio a tensione al valore desiderato. Per i raddrizzatori a diodi, la tensione del circuito intermedio è proporzionale alla tensione di rete e non deve essere regolata. Solo all'accensione una logica di carica con resistenza impedisce eccessive correnti di spunto. Il raddrizzatore invertitore deve essere regolato. Esso regola la tensione del circuito intermedio al valore desiderato impostando gli impulsi di accensione per il corretto inserimento dei tiristori nel tempo.

Quando si utilizza un convertitore attivo, è necessario un sistema di regolazione che regoli la tensione del circuito intermedio al valore desiderato tramite la potenza attiva assorbita o in uscita. Inoltre, il sistema di controllo può anche regolare il consumo o l'uscita di potenza reattiva a un valore desiderato, solitamente pari a zero. La potenza è regolata tramite la corrente di rete. Il controllo e la modulazione determinano quindi i comandi di commutazione per i semiconduttori di potenza in modo tale da ottenere la corrente e quindi la potenza desiderata.

Controllo vettoriale

Il controllo vettoriale è solitamente utilizzato per la regolazione della corrente. Con questo concetto si intende che la corrente trifase misurata viene convertita in una freccia (vettore). Il regolatore di corrente determina il valore nominale della tensione di uscita dell'inverter e lo invia al cosiddetto modulatore. Quest'ultimo genera i comandi di com-

mutazione per i semiconduttori di potenza. Un PLL (phase locked loop) sincronizza l'inverter con la tensione di rete.

Controllo lato motore

Sul lato motore vengono utilizzati diversi metodi di regolazione a seconda del campo di applicazione.

Metodo della curva caratteristica V/f

In questa procedura, la frequenza di uscita dell'inverter viene selezionata in base alla velocità desiderata del motore. La tensione di uscita dell'inverter viene impostata tramite una curva caratteristica (figura 11).

Poiché la magnetizzazione del motore è determinata dal rapporto di tensione e frequenza, la tensione in uscita dell'inverter deve essere regolata proporzionalmente alla frequenza. In questo modo si garantisce che il motore funzioni con il flusso magnetico nominale sull'intero campo di velocità (da 0 a velocità nominale). Se la frequenza viene aumentata oltre la frequenza nominale, la tensione non deve o non può essere aumentata ulteriormente. Si verifica un indebolimento del campo. Ciò significa che il campo magnetico o il flusso magnetico è ridotto.

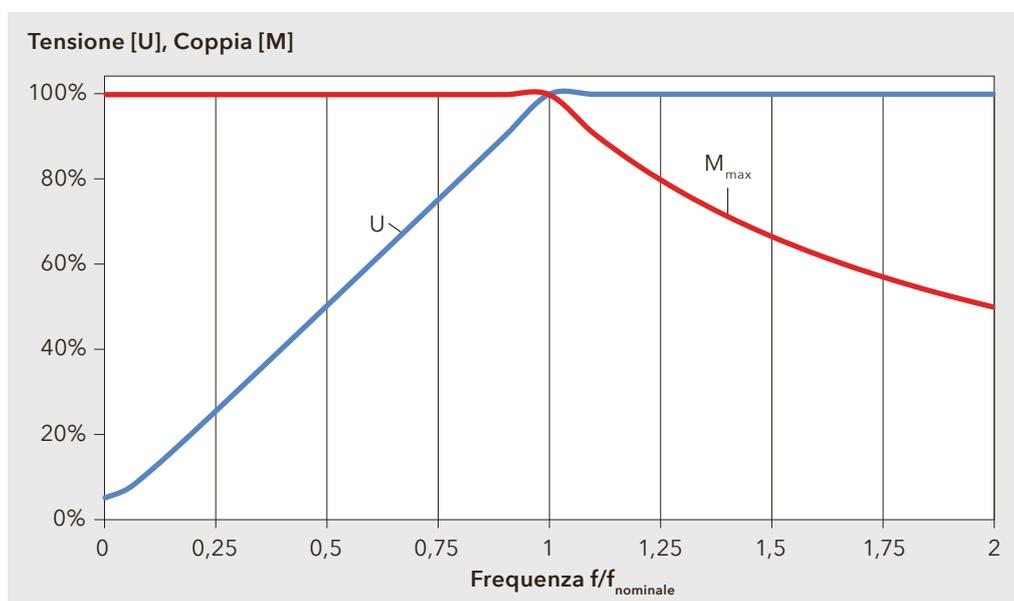


Figura 11: Esempio di curva caratteristica V/f e coppia nominale M

Vita utile

Poiché la tensione in uscita dell'inverter viene impostata in funzione della frequenza di uscita desiderata (lineare fino alla frequenza nominale e alla tensione nominale), si parla di metodo della curva caratteristica V/f . La figura 11 mostra la curva della tensione in funzione della frequenza. È rappresentata anche la coppia che può essere raggiunta alla corrente nominale. Al di sopra della frequenza nominale questa diminuisce con $1/f$, perché il campo magnetico diminuisce con $1/f$.

Il motore si comporta come un motore sulla rete, solo che in questo caso la velocità può essere regolata per mezzo della frequenza variabile. La procedura è in realtà un controllo. Può essere integrato con un sistema di regolazione della velocità per garantire il preciso mantenimento della velocità desiderata. Questo semplice metodo è adatto per applicazioni non altamente dinamiche come ventilatori o pompe. È molto robusto e funziona anche se i parametri del motore non si conoscono con precisione.

Controllo orientato al campo (controllo vettoriale)

Per requisiti dinamici più elevati, viene spesso utilizzato un controllo vettoriale (Vector Control). Se il sistema di coordinate con le frecce è allineato con il campo magnetico rotante del motore, si parla di controllo orientato al campo. Tramite la corrente viene regolato il flusso e la coppia del motore. Con un regolatore di velocità sovrapposto alla coppia, il numero di giri può essere controllato esattamente al valore desiderato. Ci sono procedure per questo con o senza sensori per la misurazione dei giri.

Affinché questo tipo di controllo funzioni correttamente, i parametri del motore devono essere noti. Questo è valido a maggior ragione per il funzionamento senza sensori. Tuttavia, molti moderni inverter sono in grado di misurare automaticamente i motori durante la messa in servizio.

Regolazione diretta della coppia

Un altro metodo è la regolazione diretta della coppia. In questo caso, la regolazione determina direttamente i segnali di commutazione per l'inverter a partire dagli scostamenti tra valore nominale e reale. Regolazione e modulatore sono combinati. In termini di dinamica, armoniche e $\cos \varphi$, questa procedura mostra un comportamento paragonabile al controllo orientato al campo con PWM.

Gli attuali convertitori compatti sono molto affidabili e, con una manutenzione adeguata, sono progettati per una durata di 12 a 20 anni, a seconda della potenza nominale. I componenti da sottoporre a manutenzione sono i ventilatori di raffreddamento, i condensatori del circuito intermedio e le schede dei circuiti stampati. (Durata motori: da 10 a 20 anni circa, ma in realtà quasi il doppio; ventilatore principale da 4 a 6 anni). Fattori critici per la durata: condensatori (a secco). Carico («il calore fa invecchiare»): ore di funzionamento elevate, cicli veloci, ecc. incidono negativamente. Sostituzione dei condensatori per CF più grandi (oltre 7,5 kW): devono essere smontati da specialisti. Informazioni sui tempi di funzionamento: da rilevare tramite la funzione di manutenzione. Elettronica: i nuovi dispositivi sono più potenti, più piccoli, più intelligenti, più efficienti, più economici («Demodation»).

L'aumento della temperatura di esercizio dovuto all'aumento della temperatura ambiente, la quantità di sporcizia presente, l'altezza di installazione (s.l.m.) e anche il carico, soprattutto se ciclico, hanno un effetto sulla riduzione della vita utile.

Tre effetti sono considerati la causa più frequente di guasti; essi devono essere tenuti in particolare considerazione per consentire lunghi tempi di funzionamento.

- Sporcizia dovuta al mancato rispetto della corrispondente classe di protezione.
- Insufficiente ciclo di pulizia dei tappeti filtranti del quadro elettrico.
- Aumento delle temperature dell'aria di raffreddamento oltre i 40 °C a causa delle alte temperature ambientali o della forte circolazione dell'aria all'interno dell'armadio elettrico.

Efficienza

Rendimento del CF alla potenza nominale

L'efficienza dei convertitori di frequenza e dei motori elettrici è relativamente elevata al funzionamento nominale al 100% di coppia e al 100% di velocità. La figura 12 mostra un confronto tra l'efficienza a carico nominale di un motore IE2 nel funzionamento di rete e nel funzionamento con CF, di un CF (classe di efficienza 1) e dell'intero sistema d'azionamento in funzione della potenza nominale del motore.

Gli esatti valori numerici dell'efficienza di un CF dipendono dalla sua struttura. In generale si può dire che un CF con raddrizzatore a diodi sul lato rete ha perdite minori e quindi una migliore efficienza rispetto ad un analogo CF con un inverter sul lato rete. La differenza nel funzionamento nominale è tipicamente di uno o due punti percentuali. Un CF con raddrizzatore invertitore è nel mezzo in termini di efficienza.

Influenza della frequenza di commutazione

Anche la frequenza di commutazione, ovvero la frequenza alla quale vengono commutati i semiconduttori di un inverter, influisce sull'efficienza.

Maggiore è la frequenza dell'inverter sul lato motore,
■ maggiori sono le perdite di commutazione nei semiconduttori.

■ più piccole sono le armoniche nella corrente del motore.

■ minori sono le perdite dovute alle armoniche nel motore.

Maggiore è la frequenza dell'inverter di rete, se utilizzato,
■ maggiori sono le perdite di commutazione nei semiconduttori.

■ più piccole sono le armoniche della corrente di rete.

■ minori sono le perdite nel trasformatore e nella rete elettrica.

La scelta della frequenza di commutazione è quindi un compromesso tra le perdite nel CF e le perdite in rete e nel motore causate dalle armoniche. Di norma, una frequenza adeguata è specificata dal produttore del CF. In alcuni CF può essere impostata, con le conseguenze sopra descritte, utilizzando un parametro. A causa delle perdite di commutazione massime ammesse, la frequenza è limitata verso l'alto.

La frequenza di commutazione è anche decisiva per lo sviluppo del rumore di un motore. Per gli azionamenti nella gamma di alcuni kW, vengono quindi utilizzate frequenze comprese tra 4 kHz e 16 kHz, in modo che i rumori causati dalle armoniche della corrente siano il più possibile elevate al di sopra del campo di frequenze udibile. Maggiore è la potenza di un CF, minore frequenza possibile. CF con potenze di circa 1 MW lavorano a 2 kHz, CF per diversi MW a poche centinaia di Hertz.

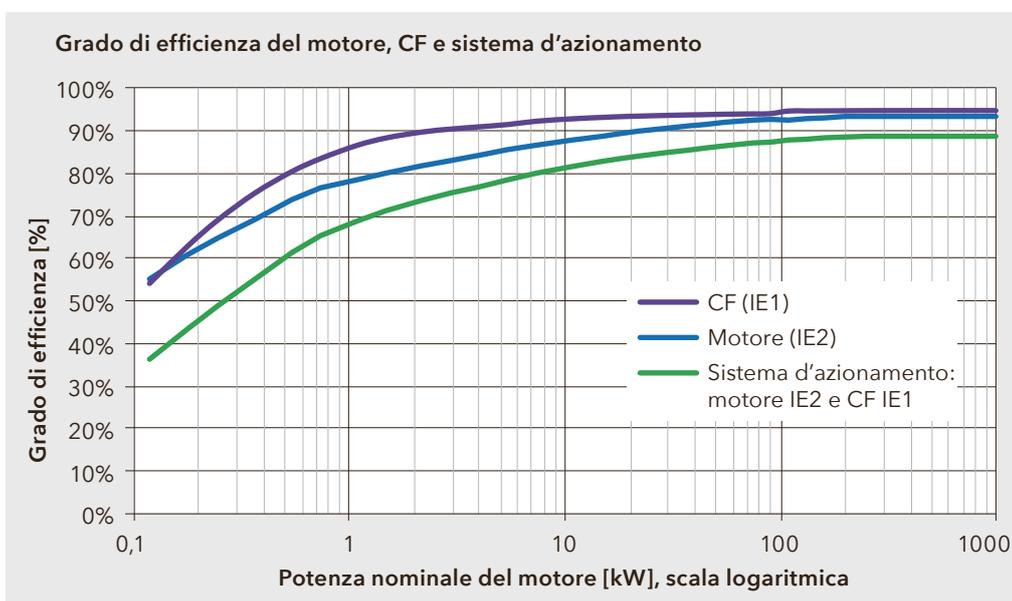


Figura 12: Efficienza del motore, del CF e del sistema di azionamento alla potenza nominale (fonte: IEC 61800-9-2, ed.1, 2017).

Perdite del CF a carico parziale

Se la potenza scende molto al di sotto del punto di funzionamento nominale (<30%), il rendimento diminuisce notevolmente. È quindi importante assicurarsi che la potenza nominale del convertitore di frequenza e del motore sia correttamente adattata alla potenza di azionamento richiesta. La figura 13 mostra la curva di rendimento tipica dei convertitori di frequenza da 0,12 a 1000 kW in funzione della coppia M (Newton metri, Nm) e della velocità (giri al minuto, giri/m) sull'albero motore. 100% corrisponde alla coppia o al numero di giri nominale.

La figura 13 mostra che l'efficienza a carico parziale del CF è fortemente dipendente dalla potenza in uscita: sotto i 10 kW il rendimento a carico parziale, ad es. 50% di velocità e 50% di coppia (corrispondente al 25% di carico parziale) è già fortemente ridotto. La figura mostra la curva di rendimento per cinque diversi casi di carico tra la potenza nominale (100% di carico) al 100% di velocità e 100% di coppia, e il 12,5% della potenza nominale al 50% di velocità e 25% di coppia.

Efficienza del sistema d'azionamento

Un CF ha delle perdite anche alla potenza nominale per cui il motore azionato funziona con un rendimento leggermente inferiore. Le perdite del CF sono dello stesso ordine di grandezza di quelle del motore. In molti casi un CF può migliorare significativamente l'efficienza complessiva di un sistema (CF, motore, processo) perché può dosare meglio la potenza netta cambiando la velocità. Un buon dimensionamento del CF è importante, poiché la sua efficienza a carico parziale diminuisce. Se si considera l'efficienza complessiva del sistema d'azionamento, è

necessario tenere conto anche delle perdite di tutti i componenti del filtro del CF. Inoltre, si deve considerare l'energia supplementare per il raffreddamento del CF.

A seconda dell'applicazione, l'efficienza energetica di un sistema di azionamento dipende dalla possibilità di immettere o meno energia nella rete durante la frenatura (vedere la pagina 6): capacità rigenerativa.

I motori con avviamento frequente, che sono collegati direttamente alla rete, subiscono perdite maggiori durante l'avviamento rispetto a quando la velocità viene aumentata in modo graduale con un CF.

Norme per i convertitori di frequenza

Esiste una norma internazionale per misurare il rendimento e determinare la classe di efficienza dei convertitori di frequenza a pieno carico e a carico parziale. La norma IEC 61800-9-2 definisce le perdite di riferimento e una classe di efficienza IE1. Rispetto agli attuali prodotti industriali, le perdite di riferimento di questa classe di efficienza 1 sono troppo elevate.

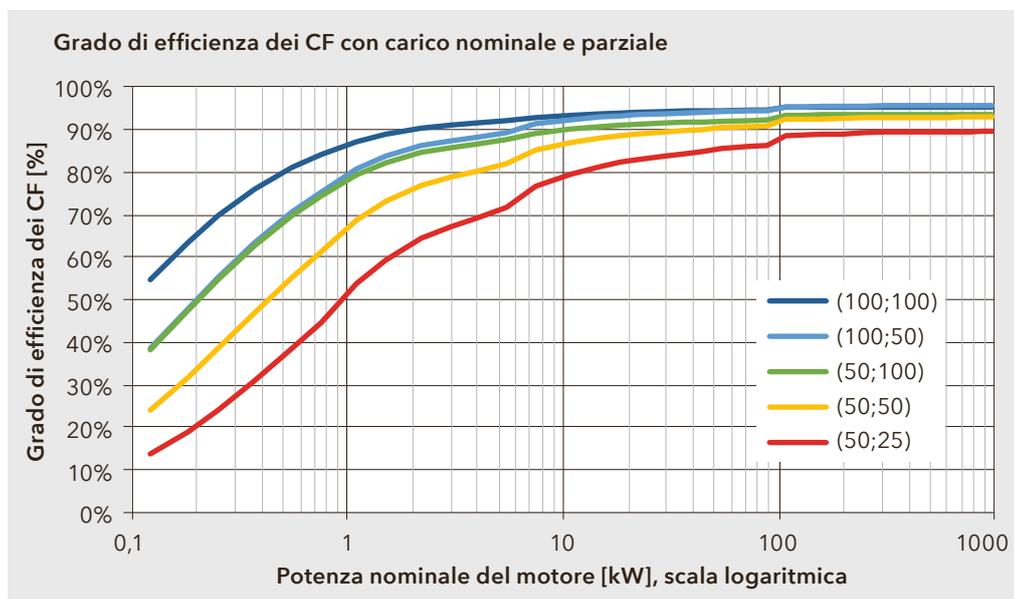


Figura 13: Efficienza del CF in funzione delle dimensioni del motore e del CF con cinque carichi diversi. La figura mostra che a bassa velocità o a bassa coppia, un CF subisce un calo significativo dell'efficienza rispetto all'efficienza alla potenza nominale (fonte: IEC 61800-9-2, ed.1, 2017).

Condizioni ambientali

Classe di protezione

In generale, i convertitori di frequenza sono dotati della classe di protezione IP 21 e sono destinati all'installazione negli armadi elettrici. I tappetini filtranti sulle porte dell'armadio elettrico non sono previsti, ma sono comunque raccomandati poiché, a causa del forte flusso d'aria di raffreddamento, è possibile che si aspiri molta sporcizia all'interno dell'armadio elettrico. Un requisito frequente è l'installazione decentrata del CF sulla parete accanto al motore. Sono disponibili anche dispositivi compatti per applicazioni ad alta potenza con grado di protezione fino a IP54. Per esigenze particolari, in alcuni casi sono disponibili anche classi di protezione più elevate.

Aria di raffreddamento

Con un rendimento fino al 98%, i CF hanno una potenza dissipata simile a quella del motore. I dispositivi compatti, che sono installati all'interno dell'armadio elettrico, richiedono quindi un volume sufficiente nell'armadio elettrico e un flusso d'aria sufficiente. Per evitare turbolenze all'interno dell'armadio è necessario prevedere una certa conduzione dell'aria attraverso la suddivisione degli spazi. È necessario considerare le perdite per un ventilatore più grande o uno supplementare per la ventilazione dell'armadio.

Temperatura

I dati di potenza di un CF sono di solito forniti per una temperatura ambiente di 40°C. Con temperatura ambiente superiore a 40°C, come di consueto, deve essere prevista una riduzione della potenza, che può ammontare a circa 1% per ogni grado. Le temperature ambiente massime consentite sono normalmente comprese tra 50°C e 55°C. A temperature ambiente inferiori a 40°C, c'è una piccola riserva di potenza, in quanto i semiconduttori di potenza possono condurre più corrente fino al raggiungimento della temperatura critica.

Altitudine di installazione s.l.m

Lo stesso vale per l'altitudine di installazione. I dati di potenza sono progettati per un'altitudine di installazione di 1000 m, per cui è possibile raggiungere altitudini di installazione fino a 4000 m con una riduzione standard (al di sopra dei 1000m: per 100 m 1% di riduzione di potenza). A causa dell'aria rarefatta, il raffreddamento è meno efficiente.

Pianificazione e installazione

Integrazione nel flusso di processo

Il CF viene utilizzato per controllare la velocità e quindi la portata e nella maggior parte dei casi ha anche il compito di risparmiare energia. Questo è possibile grazie alla possibilità di regolazione continua della velocità e alla conseguente riduzione temporanea del numero di giri. La regolazione della velocità offre ulteriori vantaggi, come l'avviamento e l'arresto graduale, il controllo dinamico della velocità per il processo e il funzionamento del sistema in punti operativi ottimizzati.

Il CF deve quindi essere integrato nella sequenza di processo, quando viene installato successivamente. Il controllo on/off del motore (in precedenza mediante contattori) deve essere integrato almeno al valore nominale della velocità. È necessario ricercare e impostare un valore di processo correlato in modo significativo al valore nominale della velocità (temperatura, pressione, peso, carico, velocità). Il valore nominale della velocità viene quindi determinato dai valori di processo.

Raccomandazioni per l'installazione

Quando si utilizza un convertitore, oltre alle condizioni ambientali già menzionate, è necessario osservare una serie di punti per garantire un funzionamento senza problemi dell'impianto.

■ **Lunghezza del cavo:** Tra l'azionamento e il motore devono essere utilizzati cavi simmetrici e schermati per evitare interferenze. I costi sono leggermente superiori a quelli dei cavi ordinari. Anche il cavo stesso causa perdite e non dovrebbe quindi essere inutilmente lungo. Fondamentalmente, è possibile installare il CF direttamente sul motore. Tuttavia, occorre sempre tenere conto delle condizioni ambientali (temperatura, umidità, ecc.), nonché delle vibrazioni e degli urti. Tutti questi fattori possono avere un impatto negativo sulla durata di vita del CF. In molti casi si sceglie un'installazione centrale del CF in un locale più protetto lontano dal motore, in cui le condizioni ambientali possono essere meglio influenzate. In questo caso, la lunghezza del cavo tra azionamento e motore non deve superare i 100 m, altrimenti spesso è necessario utilizzare misure aggiuntive come i filtri di uscita.

- In caso di montaggio a parete, usare protezione IP54
- Filtro-EMC 1: Ambiente (rete pubblica) o 2: Ambiente (rete industriale). Vedere pagina 8: Filtro EMC.
- Cavo schermato simmetrico a 3 fili
- Predisporre l'ingresso cavi EMC per il motore
- Cablaggio conforme alle norme EMC sul CF
- Cavo di segnale schermato e un cavo di controllo separato per ogni livello di tensione e tipo (analogico/digitale)
- Posare separatamente il cavo di comando e il cavo del motore.

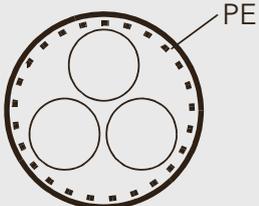
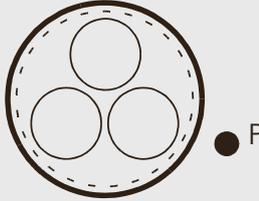
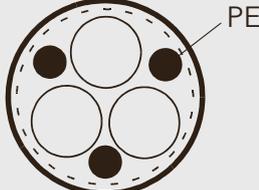
	Cavo simmetricamente schermato con conduttori trifase e un conduttore PE concentrico come schermo. Lo schermo deve soddisfare i requisiti della norma IEC 61439-1. Si prega di informarsi sulle norme elettriche applicabili.
	Cavo simmetricamente schermato con conduttori trifase e un conduttore PE concentrico come schermo. Se lo schermo non soddisfa i requisiti della norma IEC 61439-1, è necessario un conduttore PE separato.
	Cavo simmetrico schermato con conduttori trifase, conduttore PE simmetrico e uno schermo. Il conduttore PE deve soddisfare i requisiti della norma IEC 61439-1.

Figura 14: Tipi di cavo di alimentazione consigliati (fonte: ABB, 2014)

Segnale analogico per il valore nominale, segnale digitale per i comandi di abilitazione all'avvio/arresto, field bus per il controllo dei programmi memorizzati, fusibili secondo le specifiche del produttore, interruttori automatici di classe B o C oppure interruttori salvamotore di classe 10 secondo le specifiche del produttore.

3	Domanda	Pagina
1	È necessario un CF?	2, 4
2	È necessario un freno elettrico?	6
	Ha senso il recupero dell'energia frenante nella rete?	Prestazioni di recupero frequenti e di grandi dimensioni 6
3	Quale tipo di CF è necessario?	9
	Applicazioni	Spesso per pompe e ventilatori 3
	Raffreddamento CF	Per quelli di potenza > 0,75 kW provare un raffreddamento supplementare nel quadro elettrico con ventilatore 15
	Frequenza di commutazione	Spesso 4 kHz. Considerare lo sviluppo di rumore 13
	Recupero dell'energia	Alimentazione attiva rispetto al circuito ponte a 6 impulsi 6, 9 sgg
4	Come dimensionare il CF?	2
	Uscita CF	Deve garantire l'assorbimento di energia elettrica del motore. Nei rari casi in cui il CF è coinvolto solo nella messa in moto, in particolari condizioni il CF può essere dimensionato più grande del motore. 5
5	Dove è posizionato il CF?	15, 16
	Nel quadro elettrico	Per la protezione (garantire il raffreddamento) 16
	Sul motore	Collegamento meccanico (evitare le vibrazioni) 16
	Nel mezzo	Vicino al motore, alla parete ecc 16
6	Quali sono le condizioni ambientali?	16
	Temperatura ambiente	Minima e massima 15
	Classe di protezione	Classe di protezione IP (ad es. IP54) 15
	Vibrazioni	Montaggio diretto fino a 7,5 kW 16
7	Manutenzione e aspettativa di vita	Come un motore o meno 12

Esempio di risparmio energetico

Con il CF, il funzionamento di un sistema di ventilazione può essere adattato ai requisiti variabili effettivamente necessari. Allo stesso tempo, il CF causa investimenti aggiuntivi e perdite di energia. L'economicità dell'utilizzo di un CF dipende dalle condizioni di funzionamento. In alcuni casi, il CF viene utilizzato solo per avviare il sistema. Questo argomento non viene trattato in questa scheda tematica. Qui si confronta un impianto di ventilazione esistente, sovradimensionato e senza CF, con un impianto con CF in rapporto al fabbisogno di energia elettrica.

Fabbisogno di potenza per convogliare l'aria

La portata d'aria dipende dalla velocità del ventilatore. Il fabbisogno di potenza elettrica per convogliare l'aria varia con la terza potenza della portata volumetrica. Poiché l'efficienza del motore elettrico è inferiore nel funzionamento a carico parziale, la riduzione della potenza elettrica consumata dal motore è leggermente inferiore. Se non sono disponibili informazioni, SIA 382/1 raccomanda l'uso della potenza 2,5. I rendimenti a carico parziale utilizzati in questo esempio corrispondono ad una potenza di 2,8.

Negli impianti con componenti a perdita di carico costante (ad es. regolatori di portata volumetrica), i risparmi nel funzionamento a carico parziale si riducono ulteriormente. La norma SIA 382/1 menziona una potenza di 1,5 per stime di tali casi. In questo esempio, nella variante con CF si assume una perdita di carico costante di 50 Pa. Insieme con le altre condizioni degli esempi, risulta una potenza di 2,3.

Profili di fabbisogno

Secondo la scheda tecnica SIA 2024, il fabbisogno energetico e di potenza può essere stimato in base ai diversi tipi di edificio e alle condizioni tipiche di utilizzo dei locali. L'esempio si basa sull'andamento giornaliero dell'occupazione di persone in uffici individuali e di gruppo, come mostrato nella figura 15. Ciò corrisponde a 7,2 ore di funzionamento completo per giornata lavorativa nel singolo ufficio. Nella variante con convertitore di frequenza, il fattore di simultaneità di 0,8 documentato nella scheda tecnica SIA 2024 viene utilizzato anche per l'intero sistema. Il risultato è di 1500 ore a pieno carico all'anno, tenendo conto dei fine settimana.

Efficienza del convertitore di frequenza

Per l'esempio con un motore da 11 kW e un'applicazione con una curva di coppia quadratica (sistema di ventilazione), i rendimenti del CF sono all'incirca come mostrato nella figura 16.

Efficienza del ventilatore e del motore

I requisiti di rendimento per i ventilatori con potenza elettrica di ingresso dei motori da 125 W a 500 kW sono stati definiti dall'UE sulla base della Direttiva 2009/125/CE del 21 ottobre 2009 e nel Regolamento (UE) n. 327/2011 del 30 marzo 2011. Viene fatta una distinzione tra due fasi. Per i sistemi che rientrano nel campo di applicazione della SIA 382/1:2014, i requisiti di efficienza della seconda direttiva si applicheranno a partire dal 2015. Livello da soddisfare (figura 17).

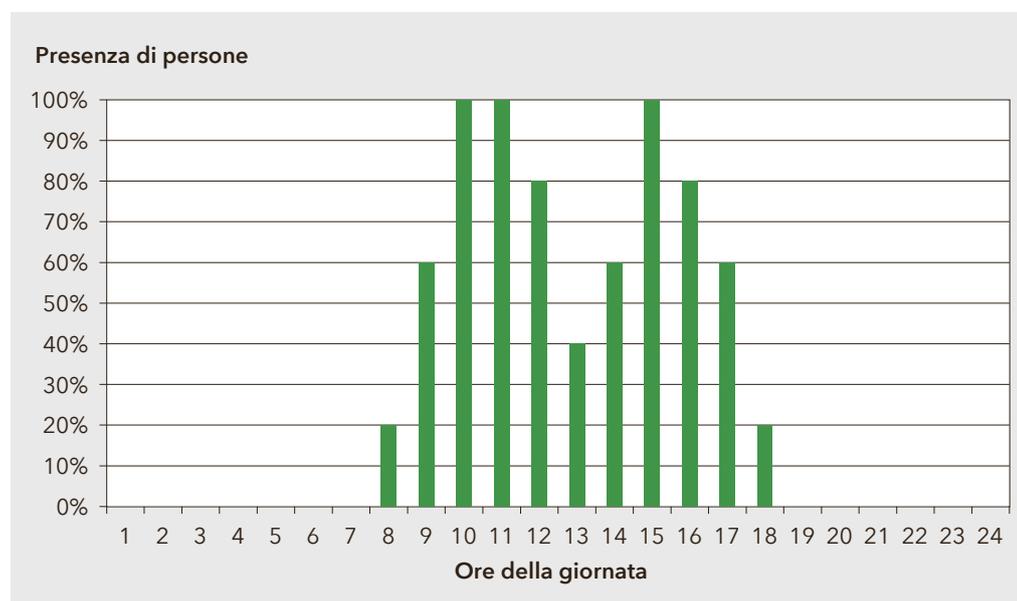


Figura 15: Ciclo giornaliero di presenze negli uffici individuali e di gruppo secondo la scheda tecnica SIA 2024

Il requisito UE si applica all'intero sistema di ventilatore e motore (senza CF) nel punto migliore del ventilatore. Ad esempio, si presume che un ventilatore abbia un rendimento del 65% nel punto migliore (rendimento complessivo del ventilatore e del motore). Questo è composto dal rendimento del ventilatore del 72% e dal rendimento del motore IE2 del 90%.

I ventilatori sono descritti da un diagramma caratteristico in cui è documentata l'efficienza in una determinata condizione operativa con la corrispondente pressione o portata volumetrica.

Il compito del progettista è quello di selezionare un ventilatore che sia stabile su tutto il campo di funzionamento e che funzioni con la massima efficienza possibile.

Per l'esempio si presume che, nelle condizioni operative concrete dell'impianto con una velocità del 100%, si raggiunga un rendimento complessivo del ventilatore e del motore del 55%. Il deterioramento dell'efficienza nel funzionamento a carico parziale è dovuto al fattore di cui alla figura 18.

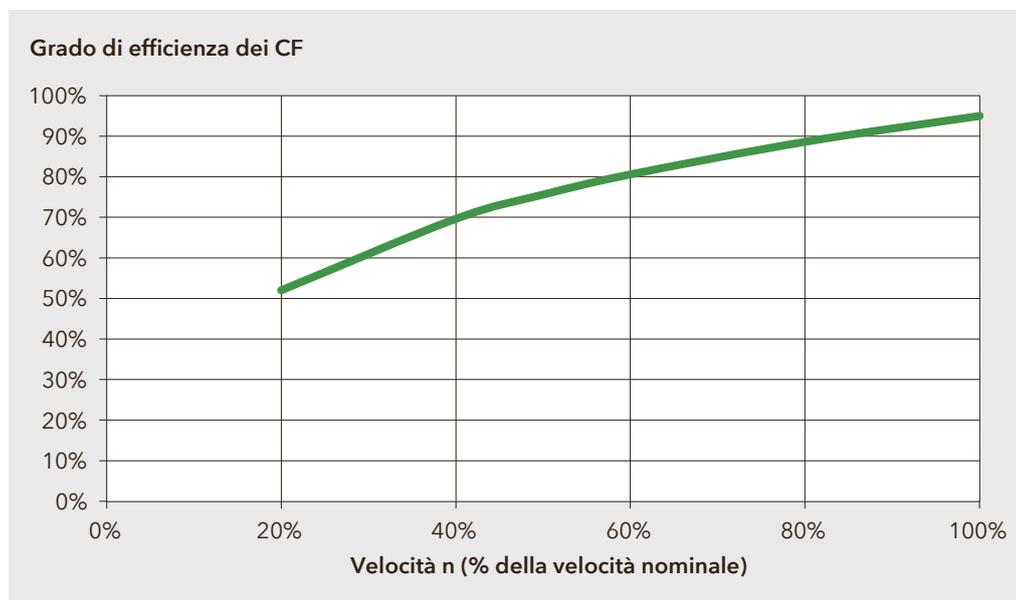


Figura 16: Efficienza del CF per applicazioni con curva di coppia quadratica. Esempio con motore da 11 kW.

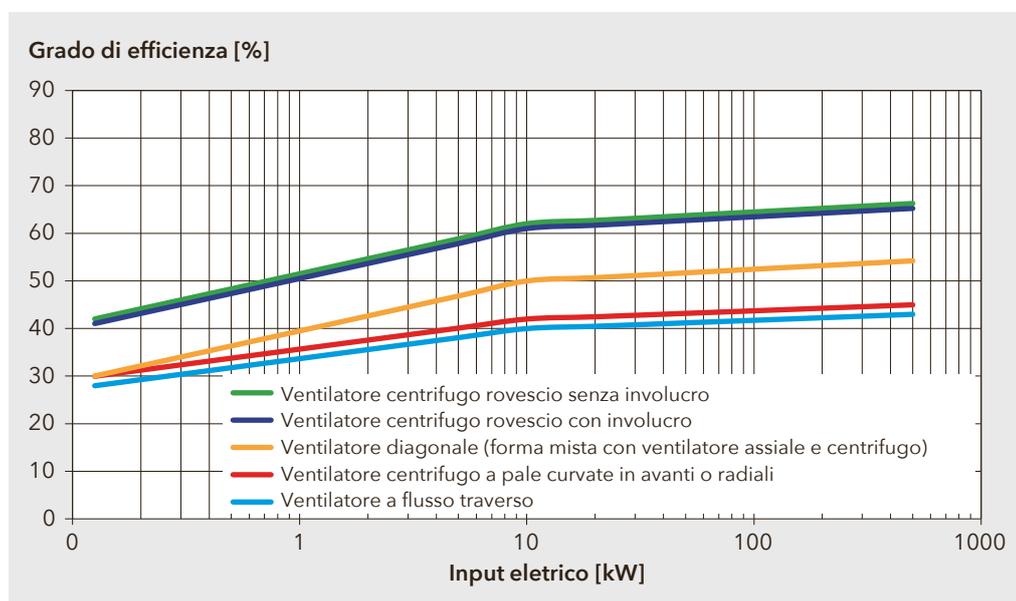


Figura 17: Requisiti di efficienza UE per diversi tipi di ventilatori (2ª fase), rendimento complessivo compreso il motore. Le curve si basano sulla combinazione del ventilatore con un motore IE2.

Per l'esempio secondo la scheda tecnica SIA 2024 si assume una simultaneità di 80% per la ventilazione dei singoli locali. In questo modo si riduce di conseguenza il fabbisogno massimo di potenza elettrica (vedere pagina 20).

Esempio

Le caratteristiche tecniche del sistema di ventilazione

■ Portata d'aria massima V_{max}	27 000 m ³ /h
■ Differenza di pressione a V_{max} senza CF	800 Pa
■ Differenza di pressione a V_{max} con CF	850 Pa
(di cui 50 Pa come componente a perdita di carico costante)	
■ Efficienza ventilatore + motore a V_{max}	55%
Riduzione a carico parziale	
■ Efficienza CF a V_{max}	95%

Riduzione a carico parziale (secondo la figura 16)

■ Potenza assorbita motore IE2 a V_{max} senza CF	10,9 kW
■ Potenza assorbita motore IE2 a V_{max} con CF	11,6 kW
■ Potenza assorbita CF a V_{max}	12,2 kW
■ Potenza assorbita CF (tenendo conto di una simultaneità di 80%)	6,4 kW

Nel caso senza CF, la ventilazione deve sempre funzionare con la massima portata d'aria, indipendentemente dal grado di occupazione. Con un convertitore di frequenza, regolatori di portata e la relativa regolazione, il funzionamento può essere adattato in continuo alle mutevoli esigenze.

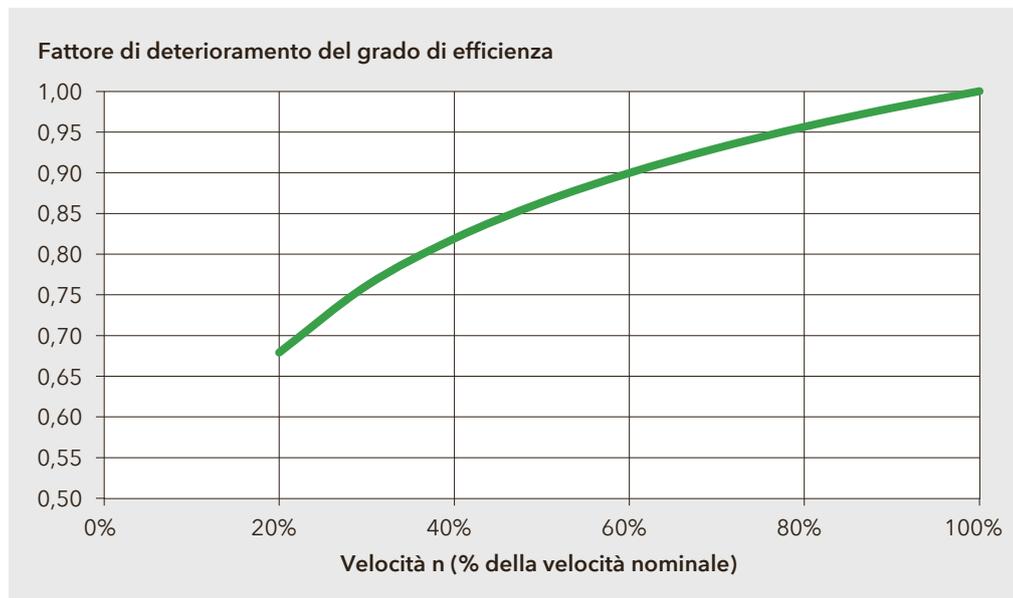


Figura 18: Fattore di deterioramento dell'efficienza del ventilatore e del motore nel funzionamento a carico parziale

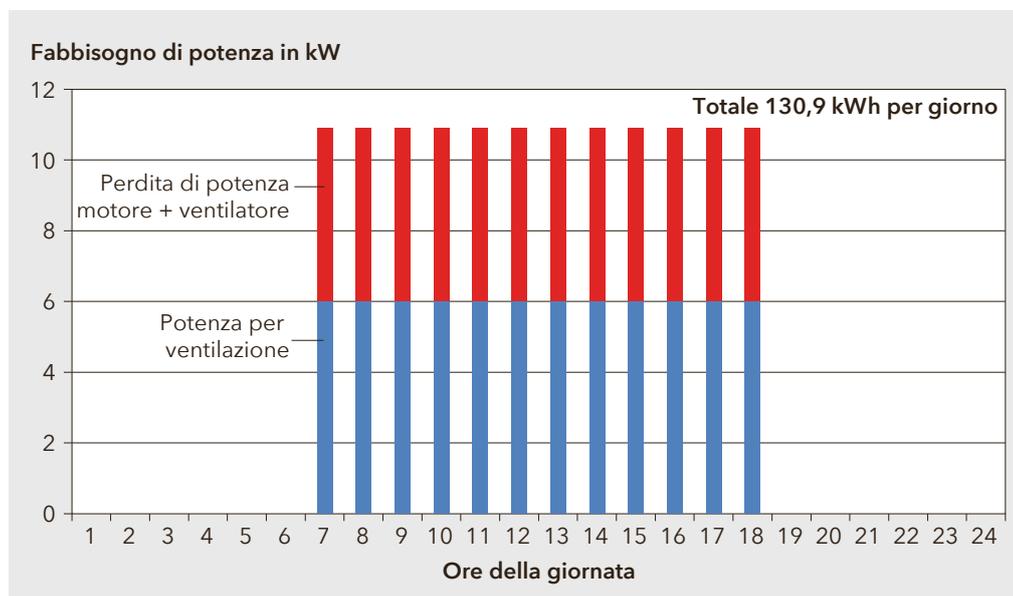


Figura 19: Fabbisogno di potenza elettrica con funzionamento costante senza CF. Totale per l'intera giornata lavorativa = 130,9 kWh (100%)

La figura 19 mostra il fabbisogno di potenza elettrica per convogliare l'aria nella variante senza CF, cioè con il funzionamento costante dell'impianto. La figura 20 si applica alla variante con CF e un funzionamento adeguato al fabbisogno. In entrambe le varianti, la pre-ventilazione viene attivata per 1 ora con il 100% o 2 ore con il 40% della portata d'aria massima prima di iniziare a lavorare.

Grazie alla curva della coppia quadratica durante l'erogazione dell'aria, la variante con convertitore di frequenza consente di risparmiare notevolmente energia. Con il CF, il consumo energetico per convogliare l'aria è solo un terzo del valore senza il CF. Inoltre, la riduzione dei flussi d'aria comporta anche minori spese per il trattamento dell'aria (filtraggio, raffreddamento, riscaldamento, umidificazione e deumidificazione, ecc.). Le perdite aggiuntive del CF e le ridotte efficienze del ventilatore e del motore nel funzionamento a carico parziale devono essere sempre prese in considerazione. Tuttavia, questi effetti sono di secondaria importanza rispetto ai risparmi.

L'esempio presuppone una pre-ventilazione prima dell'inizio del lavoro (2 ore al 40%). Ciò significa che la ventilazione può essere disattivata immediatamente dopo il completamento del lavoro e che la buona qualità dell'aria è ancora garantita quando le persone arrivano il mattino seguente. Senza il CF la pre-ventilazione deve essere effettuata con la massima portata d'aria. Con il CF la pre-ventilazione può funzionare ad es. a 80% del valore massimo, riducendo così il fabbisogno energetico per convogliare l'aria al 66%. Un'ulteriore riduzione si può ottenere se la stessa portata d'aria viene convogliata per un periodo di tempo più lungo. Con 2 ore di pre-ventilazione al 40% della portata massima, il fabbisogno energetico diminuisce al 31% (o 47% con 1 ora con 80% del valore massimo) rispetto al funzionamento originale senza CF (durante un'ora con 100%).

Se il lavoro può essere suddiviso su un periodo di tempo più lungo in applicazioni con curva di coppia quadratica, questo è generalmente vantaggioso in termini di energia.

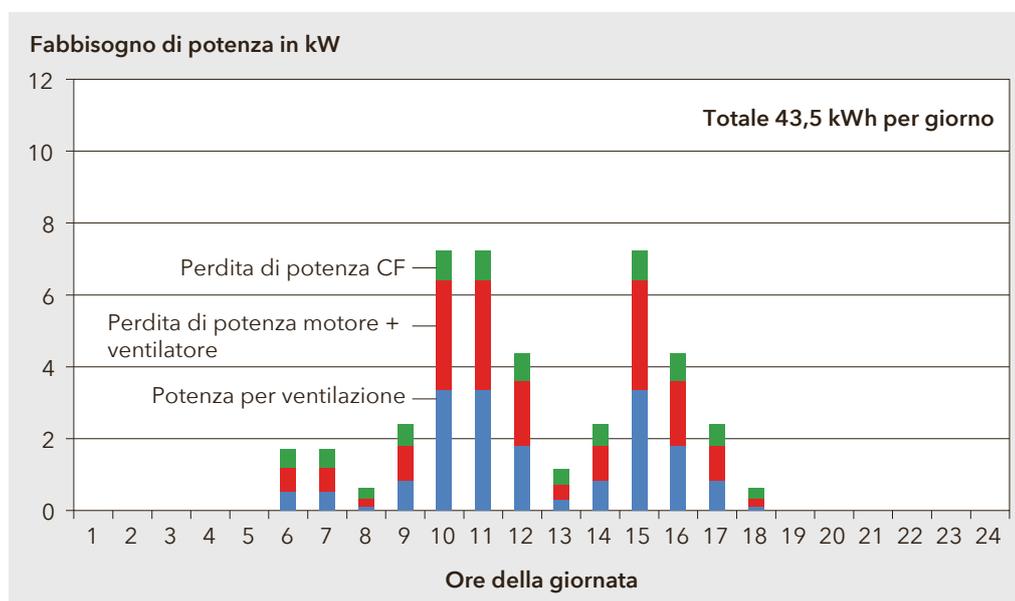


Figura 20: Potenza elettrica richiesta con funzionamento in base al fabbisogno con CF. Totale per l'intera giornata lavorativa = 43,5 kWh (33 %)

Maggiori informazioni

Concetti e unità di misura

Descrizione	Simboli	Unità	Indici e specifiche
Coseno φ	$\cos \varphi$	-	
Coppia	M	Nm	
Velocità	n	1/min	
Convertitore di frequenza	CF	-	
Classe di protezione	IP	-	
Potenza	P	W	Idrraulica meccanica o elettrica
Modulazione larghezza di impulso	PWM		
Tensione	U	V	
Frequenza di commutazione	f	Hz	
Controllo vettoriale			Vector control
Grado di efficienza	η	%	Entrata uscita

Norme, leggi e fonti

Norme in Svizzera

- SIA 380/4:2006: energia elettrica nell'edilizia
- SIA 382/1, impianti di ventilazione e climatizzazione: 2014
- Scheda tecnica SIA 2024, condizioni standard di utilizzo dell'energia e delle tecnologie per l'edilizia, 2006

Norme internazionali

- IEC 60034-2-3: 2013: Macchine elettriche rotanti - Parte 2-3: Metodi di prova specifici per determinare le perdite e l'efficienza dei motori a induzione a corrente alternata alimentati tramite CF
- IEC 61800-9-2, ed.1, 2017: Azionamenti elettrici a velocità variabile - Parte 9-2: Progettazione ecocompatibile per sistemi di azionamento, avviatori, elettronica di potenza e relative applicazioni - Indicatori di efficienza energetica per sistemi di azionamento di potenza e avviatori di motori

Requisiti legali in Svizzera

Regolamento sull'efficienza energetica (revisione 2017):

- Allegato 2.7: Esigenze per l'efficienza energetica, la commercializzazione e la cessione di motori elettrici normalizzati con raccordo alla rete da 0,75 kW fino a 375 kW
- Allegato 2.8: Esigenze per l'efficienza energetica, la commercializzazione e la cessione di circolatori senza premistoppa con raccordo alla rete da 1 fino a 2500 Watt.

Requisiti legislativi in Europa

Direttiva sulla progettazione ecocompatibile:

- n. 640/2009: Motori elettrici da 0,75 kW - 375 kW
- n. 641/2009: Circolatori indipendenti senza premi-stoppa da 1 a 2500 Watt
- n. 327/2011: Ventilatori azionati da motori con potenza elettrica di ingresso compresa tra 125 W e 500 kW
- n. 547/2012: Pompe per acqua

Nota editoriale

La scheda tematica che riguarda i convertitori di frequenza è stata redatta come parte del programma di implementazione per i sistemi di azionamento efficienti di Topmotors.

È stata elaborata da di Conrad U. Brunner e Rolf Tieben, Topmotors, Prof. Dott. Adrian Omlin, HSLU, Uwe Przywecki, ABB, con la collaborazione di Jürg Nipkow, S.A.F.E. e Urs Steinemann, Ingenieurbüro US.

Redazione e realizzazione grafica: Faktor Journalisten, Zurigo

La scheda tematica è disponibile all'indirizzo www.topmotors.ch anche in tedesco e francese.

Topmotors è supportata da SvizzeraEnergia.