

I SISTEMI AZIONATI DA MOTORI ELETTRICI:

RASSEGNA DELLE MISURE DI EFFICIENZA ENERGETICA

di FLAVIO CONTI

1. Introduzione

In una precedente pubblicazione si è posta l'attenzione sul vasto potenziale di risparmio energetico ottenibile dal settore dei sistemi azionati da motori elettrici, tenuto conto che essi consumano una frazione considerevole (40% circa) di tutta l'elettricità consumata e ben il 70% di quella consumata nel settore dell'industria. Anche se la tecnica di costruzione e progettazione dei motori elettrici e della componentistica ad essi associata è nota da moltissimi anni, tuttavia l'esigenza di disporre di sistemi ad alta efficienza energetica richiede oggi approcci più attenti e sofisticati, soprattutto a partire dal management e dalle modalità di controllo del funzionamento e di certificazione dell'efficienza dei sistemi stessi.

Quando sbrigativamente si parla di "motori elettrici" in realtà, ci si riferisce a "sistemi azionati da motori elettrici". Ciò che realmente interessa non è, evidentemente soltanto il rendimento del componente più importante della catena di processo, ossia il motore elettrico, ma il rendimento complessivo della catena, che è il prodotto dei singoli rendimenti.

Si è visto che il campo dei sistemi azionati da motori elettrici ha un gran potenziale di risparmio energetico che può essere sfruttato mediante l'introduzione di numerose misure di efficienza energetica. Avere una consapevolezza di quali misure possono essere introdotte, in quali contesti e con quali precauzioni è fondamentale non solo per tutti gli Energy Managers (che ovviamente già professionalmente ben le conoscono), ma anche per tutti coloro che, dovendo gestire fabbriche o grandi complessi commerciali, non sempre sono al corrente dei progressi dalla tecnica dei motori elettrici.

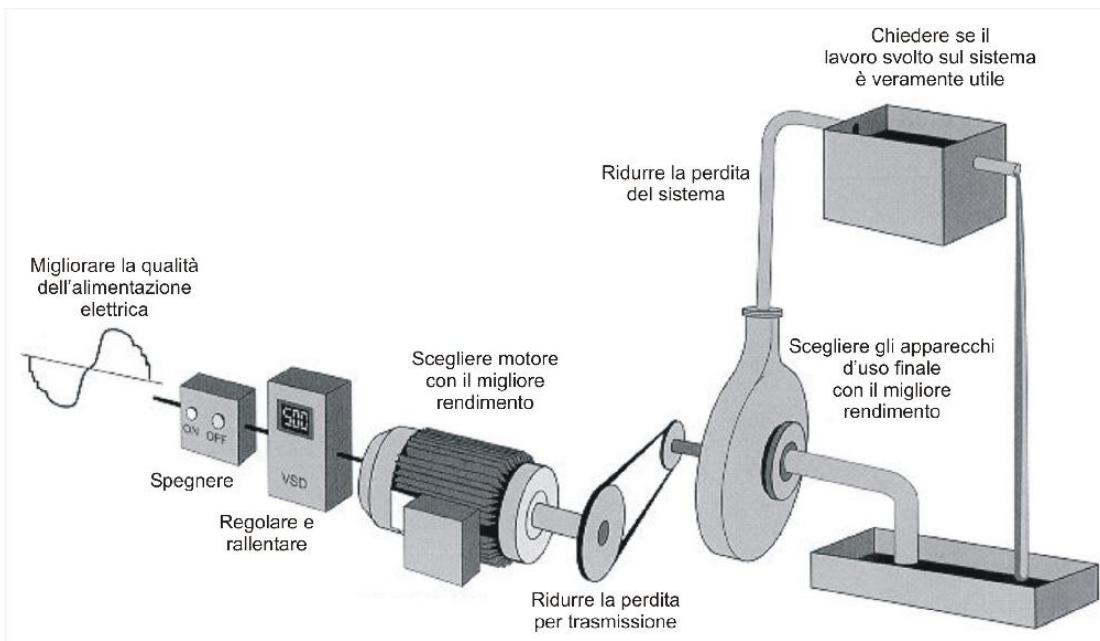


Fig. 1 Schema di un tipico sistema azionato da motore elettrico

2. Le misure d'efficienza energetica nei Sistemi Motori Elettrici.

La maggior parte delle considerazioni che saranno qui svolte concerne i motori ad induzione, che rappresentano la grandissima parte dei motori elettrici in uso, sia per la loro semplicità di costruzione, facilità d'uso, sia per il loro basso costo.

Come indicato nella fig. 1, un generico sistema azionato da un motore elettrico comprende almeno 4 sottosistemi principali, ossia:

1. **L'alimentazione elettrica**, che include gli aspetti di qualità dell'elettricità, tensioni e sovratensioni, armoniche, cablaggio, trasformatori, distribuzione.
2. **Il motore elettrico ed il suo sistema di controllo**: la scelta del tipo di motore, del suo dimensionamento, dell'alternativa fra sostituzione o riparazione, del tipo di controllo e regolazione.
3. **La trasmissione meccanica**: a seconda del tipo di accoppiamento e della accuratezza delle verifiche e delle manutenzioni varia il rendimento.
4. **Il carico**: il rendimento di processo è importantissimo per la determinazione del rendimento globale. Se per assurdo, (ma non troppo!), si fa funzionare un sistema azionato da motori elettrici d'altissima efficienza quando non è richiesta forza motrice (accade spesso che in molti periodi di tempo i motori girino a vuoto) il rendimento globale del sistema in quei momenti è in effetti, zero. Ma anche in situazioni in cui il carico non è nullo, una pompa o un compressore mal scelto rispetto al carico richiesto compromettono la bontà di un motore ad alta efficienza che lo aziona.

Prima di inoltrarci in una forzatamente rapida descrizione delle varie tecniche di risparmio energetico nei 4 sottosistemi ricordati, va riaffermata come approccio prioritario al problema dell'efficienza, la necessità di una **corretta ed attenta gestione della fabbrica o dell'edificio**: infatti, solo una chiara e consapevole strategia di management per gli acquisti, per la manutenzione ordinaria e straordinaria di tutti i sistemi a motore elettrico dell'industria o dell'ente consente di migliorare in modo permanente i consumi d'elettricità senza ricadute d'efficienza nel tempo. Non si sottolinea mai abbastanza che ogni strategia di efficienza energetica non porta a successi rimarcabili e durevoli se il top management non è più che convinto e coinvolto direttamente nel fornire un indirizzo aziendale mirato e sostenerne le azioni richieste.

Passiamo ora in rapida rassegna le principali misure di miglioramento dell'efficienza energetica nei vari sottosectori di un sistema azionato da motore elettrico.

3.1 Alimentazione elettrica.

Un motore elettrico ad induzione richiede un'alimentazione trifase di perfetta forma sinusoidale con tensione stabile. Scostamenti da quest'alimentazione generano perdite di rendimento:

- **Squilibri di tensione fra le fasi**: uno squilibrio del 2% della tensione fra le fasi può fare aumentare le perdite proprie del motore fino al 25%. Sui lunghi periodi il motore può subire danni e ridurre la coppia. L'eccesso di calore che si sviluppa in un motore funzionante con solo il 2% di sbilanciamento della tensione può accorciare la durata di vita dell'isolamento di circa 8 volte! Per evitare questi inconvenienti le tensioni d'alimentazione vanno regolarmente monitorate e lo sbilanciamento eliminato.
- **Fluttuazioni di tensione** che superano il 10% riducono il rendimento e peggiorano il fattore di carico e la durata del motore.
- **La distorsione della forma sinusoidale dovuta alle armoniche** fa aumentare il rumore e le perdite del motore, causa oscillazioni del valore della coppia e provoca surriscaldamenti. Le armoniche vanno ridotte a livelli accettabili (meno del 5% della corrente fondamentale nei

sistemi a medio voltaggio). Poiché le armoniche sono spesso generate dai variatori di velocità inseriti nel controllo dei motori, è assolutamente necessario installare filtri e shunt nel circuito per eliminarle e migliorare anche il fattore di potenza (Cosfi).

- Vecchi **trasformatori** con valori di rendimento inferiori al 95% spesso alimentano sistemi motori e contribuiscono a ridurre il rendimento complessivo.
- La **distribuzione elettrica** è fatta con **cablaggi** dimensionati secondo norme che assicurano la sicurezza rispetto ai surriscaldamenti e alle correnti di start, ma non secondo criteri di convenienza ed economicità sul Ciclo di Vita (LCC). Le perdite nei cavi sono proporzionali al quadrato della corrente ed alla resistenza elettrica (I^2R). Cavi con maggior diametro hanno minori perdite d'energia e minor caduta di tensione fra il trasformatore ed il motore. Nei casi in cui il motore debba funzionare a pieno carico per un alto numero di ore/anno, è sempre conveniente nei nuovi impianti maggiorare il diametro del cablaggio.
- Un basso **Fattore di Potenza** (cosfi) sull'alimentazione richiede maggiori dimensionamenti, protezioni e maggiori dispersioni e cadute di tensione. Di solito, nei piccoli motori il cosfi decresce rapidamente al decrescere del carico, per cui la compensazione del fattore di carico è essenziale in molte fabbriche per evitare forti penali per la potenza reattiva.

3.2 Il motore elettrico ed il suo controllo.

3.2.1 Il motore elettrico

Come noto, esistono varie tipologie di motori elettrici, con diverse caratteristiche a seconda del tipo di applicazione richiesta. I motori più diffusi per la loro semplicità ed economicità sono i motori asincroni ad induzione che coprono circa il 90% del mercato. Vi sono poi i motori sincroni, i motori a c.c., con Magneti Permanenti (PM) e a Riluttanza. Cercheremo qui di descrivere brevemente le possibili misure di miglioramento dell'efficienza cui un gestore di sistemi motore può adottare.

Il progresso tecnologico ha migliorato continuamente non solo i motori elettrici prodotti, ma anche i processi industriali con cui si realizzano i motori. Un motore da 0,75 kW nel 1910 pesava oltre 40 kg mentre oggi pesa poco meno di 10 kg. Il rendimento di motori ad induzione è migliorato di 4 - 5 punti percentuali negli ultimi 60 anni del XX secolo. Questi miglioramenti nel prodotto e nei processi hanno consentito di disporre di motori sempre più efficienti contenendo i costi dei miglioramenti. Sul mercato europeo esistono oggi motori di 3 classi di rendimento: Classe I (migliore), II e III. Un'azione di sostituzione di un motore di classe III con un altro di classe II o I è possibile se la valutazione di convenienza economica, che ha come parametri fondamentali il tempo di funzionamento annuo del motore ed il sovracosto del motore a più alta efficienza, è positiva.

La seguente tabella indica la convenienza economica di motori ad alto rendimento (classe II o I) rispetto ad un motore standard (classe III) da 75 kW – 1800 giri/min, funzionante 8000 h/a con fattore di carico 80%, ovvero rispetto allo stesso motore standard riparato con riavvolgimento.

Tabella 1 Calcolo di convenienza di sostituzione di un motore elettrico (@ 6,0 c€/kWh)

	Rif.1	Motore eff vs. std.		Rif.2	Motore Eff vs. riparazione	
Scelta del motore	Eff3	Eff2	Eff1	Riavvolgim.	Eff2	Eff1
Rendimento	92	94	96	90,5	94	96
Prezzo d'acquisto/riparazione	3000	3300	3600	1300	3300	3300
Prezzo Relativo	1	1,10	1,25	0,43	1,10	1,25
Energia consumata	391304	382979	375000	397790	382979	375000
Costo energia per anno	23478	22979	22500	23867	22979	22500
Costo energia in 10 anni	234783	229787	225000	238674	229787	225000
Sovracosto Investimento	-	300	600	-1700	1600	1600
Risparmio annuo (€/a)	-	500	978	- 389	889	1367

Tempo di ripagamento (mesi)	-	7,2	7,4	52,4	21,6	14,0
Risparmio su 10 anni (€/a)	-	4995	9783	3891	8887	13674

Il sovracosto dei motori ad alta efficienza, che mediamente si aggira su circa il 15-20% di maggiorazione, ma la continua ricerca per produrre motori ad alto rendimento ha permesso a diversi produttori di offrire già oggi motori di classe I o II con sovracosto limitatissimi o nulli.

L'ottimizzazione della progettazione può portare alla realizzazione di significative riduzioni dei costi operativi dei motori (da circa 36% per motori da 1,5 kW a 19% per motori da 18,5 kW) [2].

In Italia, secondo stime ENEL del 1995, il consumo dovuto ai motori elettrici è stato stimato circa 105 TWh/a. [3]. Tra le misure-obiettivo per il miglioramento dei sistemi motore sono state menzionate le seguenti:

- **Utilizzo di motori a più elevato rendimento:** questo è raccomandabile quando il motore funziona per più di 2000 - 3000 ore/anno. Questa scelta è sempre economicamente valida quando il vecchio motore si rompe e deve essere rimpiazzato, mentre va valutata nelle altre situazioni.
- **Adozione di una strategia d'acquisto, manutenzione programmata e installazione - sostituzione di motori ad alta efficienza a livello aziendale:** le decisioni d'acquisto vengono spesso lasciate al responsabile della manutenzione senza alcuna analisi energetica-ingegneristica. Se i motori si lasciano funzionare sino alla loro rottura, accade che l'urgenza di non interrompere il servizio porti alla loro semplice sostituzione con il primo motore disponibile, dello stesso tipo e marca, che si riesce a trovare. Si perdono così numerosissime opportunità di risparmio energetico.
- **Migliorare le tecniche di riavvolgimento:** il riavvolgimento di un motore costa circa il 65% del motore nuovo, ma il motore così riparato funziona con rendimenti inferiori di circa 2-3%. La scelta di riparare il vecchio motore anziché sostituirlo con una ad alta efficienza non è conveniente per i piccoli motori, mentre può valerne la pena per motori di potenza maggiore di 35 - 40 kW, a patto che il riavvolgimento sia eseguito presso operatori che garantiscano una elevata qualità dell'intervento e riduzioni di rendimento del motore non superiori all'1%.
- **Verificare ed adattare il dimensionamento dei motori rispetto al carico:** varie inchieste in diversi settori industriali [4], hanno dimostrato che il fattore di carico medio si aggira intorno al 41% per motori inferiori ai 5 kW per salire sino al 51% per motori fino a 50 kW. In particolare per nastri trasportatori ed altri usi vari il Fattore di Potenza scende ben al di sotto del 40%, specie per motori di bassa potenza. Il funzionamento a valori così bassi di carico comporta perdite di rendimento e notevoli sprechi d'energia. Inoltre, motori sovradimensionati richiedono più alte correnti alla partenza e funzionano con cosfi più bassi cosicché le maggiori potenze reattive si traducono in maggiori perdite nell'alimentazione. In tutti questi casi è necessario e conveniente la sostituzione dei motori esistenti con altri a più bassa potenza nominale e, possibilmente, a più alta classe d'efficienza. Ovviamente, per ridurre la potenza ed adattarla al carico esistono diverse soluzioni, oltre a quella di cambiare il motore. **Alimentare il motore a tensione ridotta, Passare da un cablaggio a delta ad uno a stella, Utilizzare un motore più lento, Installare degli ottimizzatori,** sono tutte tecniche d'adattamento al carico.

3.2.2. Il controllo del motore

E' però nel campo dei sistemi di controllo che si possono ottenere i maggiori risparmi d'energia ed, in particolare, nelle applicazioni concernenti la movimentazione di fluidi con portata variabile nel tempo (pompe, compressori, ventilatori). Anche altre applicazioni, quali i nastri trasportatori, ascensori, centrifughe, possono beneficiare dei sistemi di controllo della velocità (Variable Speed Drives = VSD). Ma, mentre i sistemi di controllo delle variazioni di velocità-coppia sono molto diffusi nei processi industriali, il controllo della velocità dei fluidi stranamente stenta a diffondersi, nonostante le potenzialità di risparmio.

Esistono da tempo vari tipi di Controlli di Velocità (meccanici, idraulici, eddy current drives), ma la tecnologia che ha fatto più progressi fino a diventare la predominante è quella dei VSD

elettronici accoppiati a motori trifase o monofase a c.a. (ad induzione o sincroni). Rispetto ai sistemi di controllo convenzionali (meccanici) i VSD possono ridurre il consumo d'energia del 20-70% e operano con rendimenti di circa il 96%.

I Variatori elettronici di Velocità (detti anche Inverter) consistono in circuiti elettronici che trasformano dapprima la c.a in c.c. che viene filtrata e poi ritrasformata in c.a. dell'ampiezza e della frequenza desiderata, in funzione del carico. In questo modo la velocità del motore è proporzionale alla frequenza generata dal VSD. Esistono diversi tipi di tecnologia di base per gli Inverter (Voltage Source Inverters – VSI; gli Inverter a Modulazione d'Ampiezza- PWM; Current Source Inverters - CSI) ognuno dei quali ha poi ulteriori varianti.

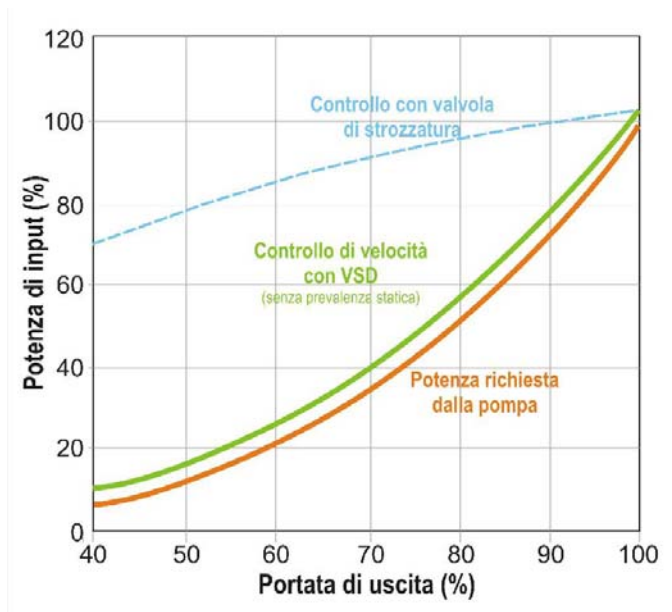


Fig. 2a

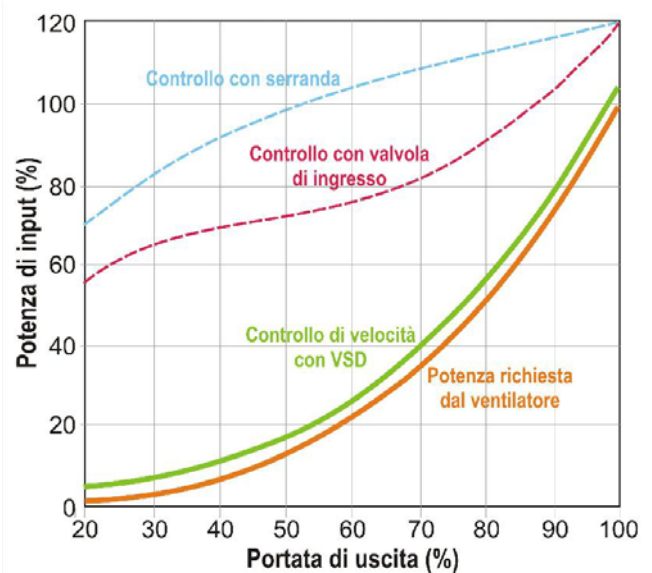


Fig. 2b

Più della metà delle applicazioni dei sistemi azionati da motori elettrici nei settori industriale, residenziale e terziario riguardano la movimentazione di fluidi (acqua, aria) mediante uso di pompe, compressori, ventilatori di varia grandezza. La principale caratteristica di questi apparecchi è che la potenza elettrica assorbita è funzione del cubo della portata ovvero della velocità del fluido. Nella maggior parte dei casi la richiesta di fluido è variabile nel tempo ed il controllo avviene in modo inefficiente. Molto diffuso è il controllo delle portate mediante valvole di strozzamento e serrande regolabili. Come si può osservare dal grafico di fig. 2a e 2b il controllo con VSD consente di massimizzare il risparmio energetico, mentre lo strozzamento del fluido è il modo più semplice ed economico, ma certamente di maggior spreco energetico.

Non c'è qui la possibilità di entrare nel dettaglio troppo specialistico, sia di descrizione che di elencazione dei vari pro e contro. Resta da ricordare che l'applicazione di Variatori di Velocità è una delle misure d'efficienza energetica più importante e conveniente in moltissime situazioni. Sicuramente è da considerare con la massima priorità in tutti i casi di carico variabile.

La seguente fig. 3 confronta la domanda di energia di un sistema di pompaggio con controllo a strozzamento e controllo con VSD: La potenza utile della pompa è fatta eguale al 100% in entrambi i casi. Nel caso di controllo con valvola di strozzamento si deve fornire 2,85 volte l'energia utilizzata, mentre con controllo con inverter solo 1,60 volte. Le perdite sono quindi ridotte di circa il 44% [= (285-160)/285]

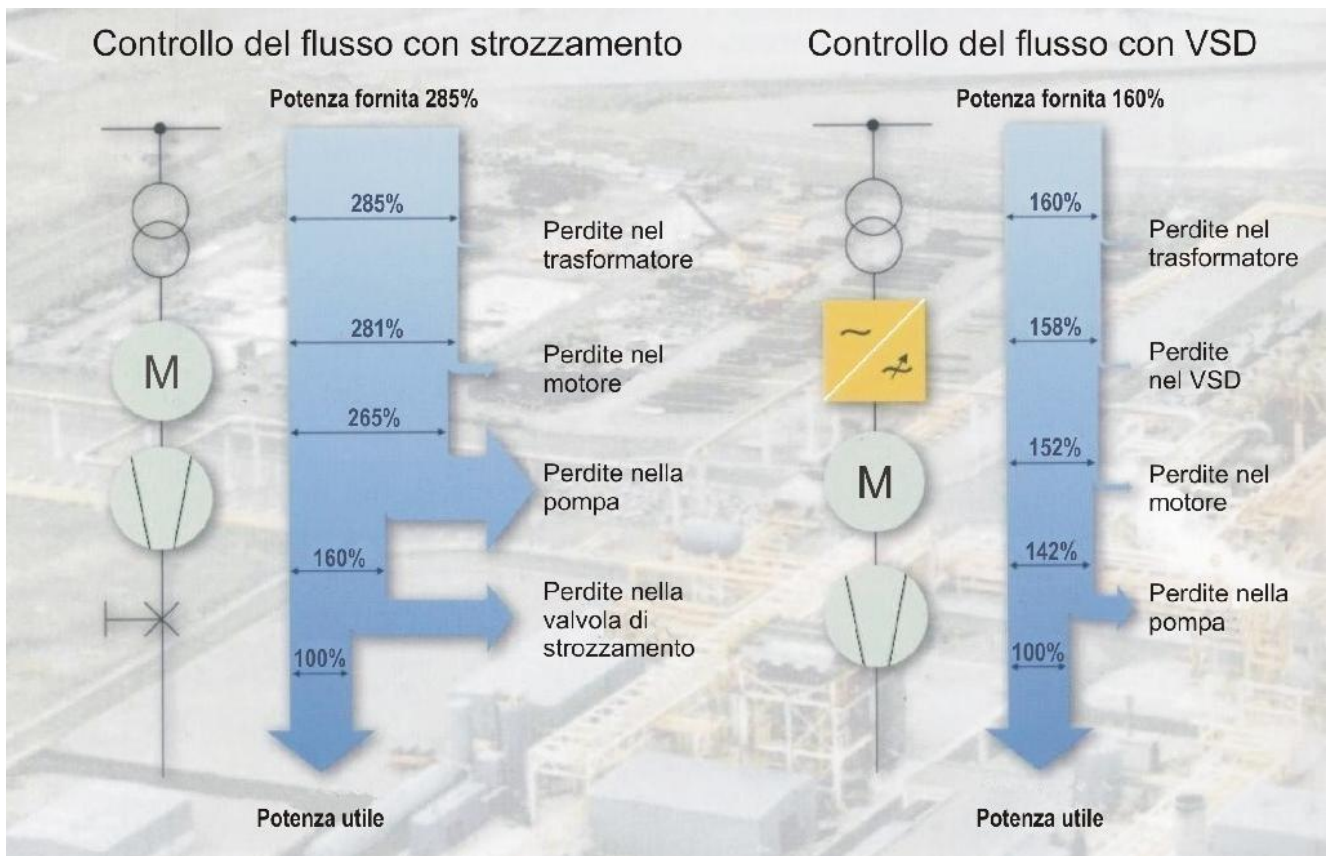





Fig. 3

3.3 Sottosistema meccanico di Trasmissione.

I motori elettrici trasmettono l'energia meccanica prodotta agli apparecchi d'uso finale o mediante accoppiamento diretto (casi più frequenti (30-50%)) ovvero mediante sistemi di trasmissione (ingranaggi, cinghie, catene), necessari per adattare il trasferimento dell'energia meccanica nel modo richiesto dai processi. Il rendimento della trasmissione dal motore all'applicazione finale può variare dal 50 – 98 % [5] (fig. 4). Pertanto, questa parte del sistema motore richiede pure una notevole attenzione per l'ottimizzazione del rendimento complessivo. Risparmi del 3-10% agendo solo sulla trasmissione si sono verificati in numerosissimi casi.

Verificare e correggere l'allineamento dell'accoppiamento: L'accoppiamento diretto fatto con allineamenti non perfetti, non solo genera perdite di rendimento ma accelera il consumo dei cuscinetti.

Ingranaggi : Gli ingranaggi, usati di solito per ridurre velocità dell'albero motore superiori a 3600 giri/minuto, sono di vario tipo ed tutti hanno rendimenti prossimi al 98%. Solo gli ingranaggi a vite senza fine hanno rendimento minore, il cui valore diminuisce drammaticamente al crescere del rapporto di riduzione. Infatti, quando tale rapporto aumenta, aumentano pure le perdite per frizione nell'ingranaggio. Gli ingranaggi a vite senza fine sono più convenienti sotto i 7 kW mentre al di sopra è meglio usare ingranaggi elicoidali. Per ottimizzare il rendimento bisogna non solo **utilizzare gli ingranaggi più adatti allo scopo**, ma anche **verificare il carico rispetto al valore nominale**. Infatti, come per i motori, il rendimento degli ingranaggi al di sotto del 40% del carico nominale crolla. **Rispettare i tempi minimi di manutenzione, assicurare il miglior lubrificante e migliorare la qualità dei cuscinetti** sono altre misure ovvie per migliorare il rendimento degli ingranaggi.

CARATTERISTICHE			
Tipo di ingranaggio	ad assi paralleli	a coppia conica	Vite senza fine
Riduzione massima	Circa 7 volte	Circa 5 volte	Circa 50 volte
Rendimento η (%)	Circa 98%	Circa 98%	Tra 50 e 96%





CARATTERISTICHE				
Sistema	Cinghia piatta	Cinghia a "V"	Cinghia dentata	Catena
Riduzione massima	5 volte	8 volte	8 volte	6 volte
Rendimento η (%)	Tra 96 e 98%	Tra 92 e 94%	Tra 96 e 98%	Tra 96 e 98%

Fig. 4 Vari tipi di trasmissione meccanica esistenti

Cinghie di trasmissione: Circa il 30% dei motori usa questo tipo di trasmissione del moto. Vi sono differenti tipi di cinghie: cinghie a V, a V dentate, sincrone e piatte. Le cinghie a V semplici sono le più economiche e più usate, ma gli altri tipi hanno un maggiore rendimento.

Poiché le cinghie devono flettersi 4 volte ogni ciclo, sono soggette a perdite per flessione e slittamento. Con l'usura si allungano e hanno meno presa sulla puleggia, è quindi necessario **riadeguare la tensione periodicamente o sostituirle**. Una tensione al 50% del normale implica una perdita di potenza del 20%. Anche **l'allineamento fra le pulegge va attentamente verificato**: un errore angolare di 1,65 implica una perdita di potenza del 60%!

Le cinghie a V dentate costano circa il 20-30% di più ma hanno un maggior rendimento di 1 - 4 punti percentuali. Ciò consente di recuperare il costo addizionale in poche migliaia d'ore di funzionamento. Le trasmissioni sincrone hanno denti sia sulla cinghia che sulla puleggia. Questo impedisce lo slittamento e non si hanno perdite di flessione. Il loro funzionamento non si basa sull'attrito fra cinghia e puleggia per trasmettere la coppia, come nelle cinghie a V. Per questo funzionano con alta precisione e con il minimo attrito ed hanno i più alti rendimenti di trasmissione (oltre il 98%). Un intervento di sostituzione di cinghie a V con una sincrona richiede anche la sostituzione della puleggia con una dentata, che costa assai più della cinghia. In questi casi la soluzione più conveniente è installare una cinghia a V dentata, se ciò è possibile. L'installazione di cinghie sincrone può anche essere un'alternativa efficiente rispetto alle catene, che sono anche assai rumorose.

Nei retrofit dei sistemi di trasmissione va comunque fatta molta attenzione a mantenere le stesse condizioni di velocità pre-esistenti, specie quando si hanno carichi la cui potenza varia con il cubo della velocità. Infatti, basta un piccolo incremento della velocità per avere un notevole aumento della potenza richiesta che può annullare i benefici di maggior rendimento.

3.4 Apparecchi d'uso finale

Negli utilizzi finali sembrerebbe ovvio **spegnere l'alimentazione dei motori quando non richiesta**. Ciò non sempre avviene: fra diverse fase di processi industriali i motori sono lasciati correre a vuoto. L'installazione di apparecchi che rilevano quando non è necessaria la potenza e conseguentemente spengono e riaccendono i motori sono una delle più convenienti misure di risparmio d'energia.

Inoltre, gli apparecchi d'uso finale, analogamente ai motori, o non sono intrinsecamente efficienti, perché di vecchia concezione o spesso non vengono fatti lavorare nelle condizioni di massima efficienza. In sistemi senza carichi statici, le curve quadratiche di resistenza del sistema coincidono con quelle ad efficienza costante della pompa. Un controllo diverso da quelli dei VSD sposta il punto di lavoro su curve diverse da quella della massima efficienza. Ne consegue che spessissimo non è sufficiente avere degli apparecchi d'uso finale efficientissimi, se poi il loro punto di funzionamento si scosta da quello di massima efficienza.

4. Conclusioni

Da quanto esposto il lettore avrà già compreso che se da un lato le misure di efficienza energetica nel campo dei motori elettrici sono numerosissime, d'altro lato non è sufficiente acquisire i componenti più efficienti del momento. Essi vanno inseriti correttamente e con gran professionalità, onde evitare di ottenere risultati inferiori alle attese.

Il risparmio d'energia in questo settore è considerevole ma gli interventi da adottare debbono essere studiati e progettati considerando l'intera catena del sistema. La fig. 6 mostra un esempio di due sistemi di pompaggio, uno convenzionale e l'altro che utilizza le migliori tecnologie. Il miglioramento di rendimento possibile risulta superiore al 50%.

Il conseguimento di minori consumi energetici è possibile se il management, divenuto consapevole dei vantaggi dell'efficienza energetica, sarà in grado di adottare politiche aziendali a supporto di questa strategia.

Referenze

- [1] S. Sjöberg, “*Motor development and Energy Efficiency*”, Proc. of “Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and drives”, Lisboa 1966, Pag. 102, ISBN 3-540-63068-6 Springer Verlag.
- [2] E. Chiricozzi, F. Parasiliti, M. Villani, “*Experience in design optimisation of High efficiency induction motors*”, Proc. of “Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and drives”, Lisboa 1966, Pag. 102, ISBN 3-540-63068-6 Springer Verlag.
- [3] D. Carrà, G. Pacati, “*Efficient Use of Electricity in motors and drives*”, Proc. of “Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and drives”, Lisboa 1966, Pag. 102, ISBN 3-540-63068-6 Springer Verlag
- [4] H.H. Hansen, “*A Survey of the stock of electric motors within the food, beverage and tobacco industries*”, DEFU Technical report 411, E November 1998.
- [5] S. Nadel, et al. , “*Energy Efficient Motor Systems Handbook*”, ACE³, 1992, ISBN 0-918249-10-4