



# GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE IN BASSA TENSIONE (parte B)

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

## Cause dei cortocircuiti di statore

I cortocircuiti di statore, sia nelle macchine in BT che in quelle in MT, possono essere causati dalla combinazione di diversi stress:

**T**ermici: invecchiamento, sovraccarico, ripetuti avviamenti.

**E**lettrici: dielettrici, transitori.

**A**mbientali: umidità, chimici, abrasione, oggetti esterni.

**M**eccanici: movimento dell'avvolgimento, strisciamento di rotore, altri.

A.H. Bonnett, G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, Vol. 28(4), pp. 921-937.

2

L. Frosini

## Stress Termici: invecchiamento termico

Regola generale: per ogni 10° C di aumento di temperatura, la vita dell'isolamento è dimezzata.

L'effetto dell'invecchiamento termico è di rendere l'isolamento vulnerabile ad altri stress che producono il guasto.

Per aumentare la vita termica dell'isolante si può ridurre la temperatura di funzionamento o impiegare materiale con classe di isolamento superiore.

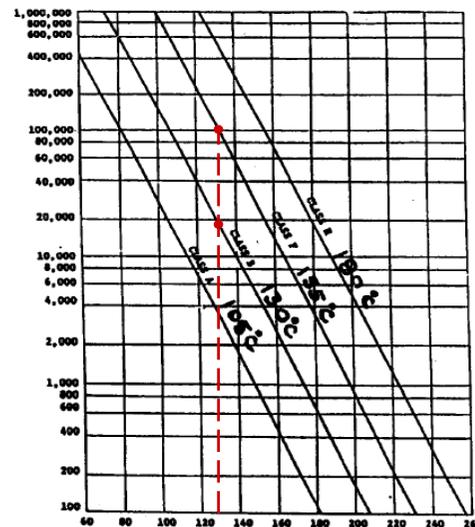


Fig. 1. Total winding temperature °C temperature versus life.

3

L. Frosini

## Stress Termici: sovraccarico termico

Il sovraccarico termico può essere provocato da:

1) Variazioni di tensione: i motori sono progettati per operare con una variazione massima di  $\pm 10\%$  della tensione nominale. Un funzionamento al di fuori di questo intervallo potrebbe ridurre significativamente la vita del motore.

2) Sbilanciamento della tensione di fase: per ogni 3,5% di sbilanciamento di tensione di fase, la temperatura dell'avvolgimento della fase con corrente più elevata aumenta del 25%. Per questo motivo, occorre cercare di mantenere il più possibile bilanciata la tensione trifase.

4

## Stress Termici: sovraccarico termico

3) Ripetuti avviamenti: durante l'avviamento, un motore asincrono è percorso da una corrente pari a 5-8 volte la normale corrente richiesta durante il funzionamento a pieno carico. Se il motore è soggetto a ripetuti avviamenti nell'ambito di un breve periodo di tempo, la temperatura dell'avvolgimento aumenterà rapidamente.

Un effetto aggiuntivo di indebolimento dovuto ai ripetuti avviamenti è di provocare l'espansione e la contrazione del sistema di isolamento. A lungo andare, i materiali isolanti tendono a diventare fragili e a creparsi.

I materiali isolanti dovrebbero essere abbastanza flessibili per resistere a questo movimento senza creparsi, ma non troppo flessibili da causare guasti dovuti alle forze elettromeccaniche.

## Stress Termici: sovraccarico termico

4) Sovraccarico: normalmente un motore è progettato per operare con un certo margine al di sotto della temperatura prevista per lo specifico sistema di isolamento o – detto in altro modo – impiega un sistema di isolamento di una classe che è ben al di sopra della normale temperatura di funzionamento.

Si può stimare che la temperatura dell'avvolgimento aumenta con il quadrato del carico.

In questo modo, utilizzando la figura vista precedentemente, è possibile stimare l'effetto del sovraccarico sulla vita dell'avvolgimento.

## Stress Termici: sovraccarico termico

5) Ventilazione ostruita: il calore generato nel rotore e nello statore è dissipato per conduzione, convezione e irraggiamento. Qualsiasi cosa ostruisca il flusso d'aria attraverso il motore o impedisca l'irraggiamento del calore, provocherà un aumento della temperatura dell'avvolgimento.

È quindi importante che il motore sia mantenuto pulito dentro e fuori per assicurare che il flusso d'aria non sia limitato.

Se per qualche ragione fosse necessario operare con un motore surriscaldato, occorre considerare la possibilità di un raffreddamento addizionale aumentando l'aria al di fuori del motore, per esempio con un ventilatore.

## Stress Termici: sovraccarico termico

6) Temperatura ambiente: i motori standard sono progettati per operare con un massimo di temperatura ambiente di 40°C.

L'effetto di superare questo limite si traduce in una diminuzione della vita dell'isolamento.

Per esempio, per un motore progettato per operare a temperature in classe B, che utilizza materiali isolanti in classe F, si ha:

Ambient°C	Insulation Life-Hours
30°	250,000
40°	125,000
50°	60,000
60°	30,000

Per operare a temperature ambienti superiori a 40°C, il motore deve essere appositamente progettato.

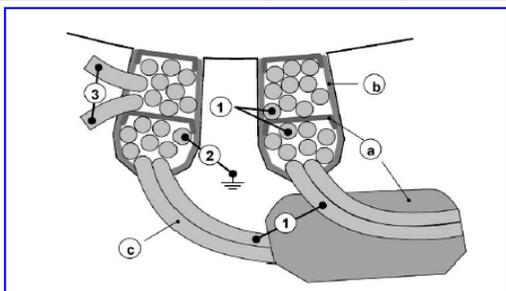
## Stress Elettrici

Gli stress elettrici nelle macchine a bassa tensione sono principalmente dovuti a:

1) Tensioni cui sono sottoposte le diverse parti dell'avvolgimento:

Type of voltage	Maximum voltage at the motor input terminals ( $V_{peak}$ )					
	Phase to ground (frame) ②	① Phase to phase	③ Turn to turn	Example for $V_{line}=400 V_{rms}$		
				② Phase to ground	① Phase to phase	③ Turn to turn
Sinusoidal voltage, $V_{line}$ ( $V_{rms}$ )	$\sqrt{2} V_{line}/\sqrt{3}$	$\sqrt{2} V_{line}$	$(\sqrt{2} V_{line}/\sqrt{3})/N$	$\pm 327$	$\pm 566$	$\pm 327/N$

$N = n^\circ$  spire per fase.



La parte più debole è l'isolamento tra spire, mentre l'isolamento fase-terra e fase-fase è generalmente sovradimensionato.

9

## Stress Elettrici

2) Transitori di tensione che si possono verificare anche come conseguenza di un'alimentazione tramite inverter.

A seconda della frequenza di impulso dell'inverter, della lunghezza del cavo tra motore e inverter e della struttura dell'avvolgimento di statore, la tensione ai terminali del motore può raggiungere valori di picco pari anche a due volte la tensione di impulso dell'inverter.

La tensione tra spire può raggiungere il 40-70% della tensione ai terminali del motore.

Approfondiremo questo discorso.

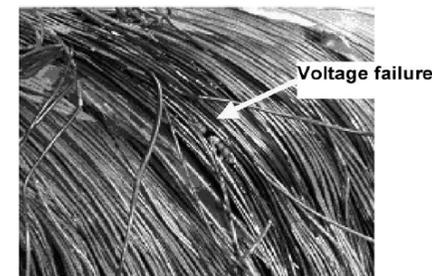


Fig. 6. Winding failure due to voltage spike.

10

## Esempi di guasti dell'avvolgimento

Corto circuito in una fase dovuto a un sovraccarico:



Corto circuito in una fase dovuto a rotore bloccato:



Corto circuito dovuto a transitori di tensione:



11

## Esempi di guasti dell'avvolgimento

Corti circuiti completi di una o più fasi possono accadere come conseguenza della perdita di una fase, che può essere causata dall'apertura di un fusibile, dal guasto di un contattore o interruttore o da un guasto nell'alimentazione.

Corto circuito in una fase dovuto alla perdita di una fase in un motore a stella:



Corto circuito in una fase dovuto alla perdita di una fase in un motore a triangolo:



12

## Esempi di guasti dell'avvolgimento

Corti circuiti in una fase possono essere dovuti a uno sbilanciamento della tensione, che a sua volta può essere causato da uno sbilanciamento di carico nella linea elettrica di alimentazione o da una cattiva connessione dei terminali del motore.



13

## Stress Ambientali

La presenza di impurità può causare:

- riduzione nello smaltimento del calore, che aumenta la temperatura complessiva della macchina, riducendo la vita dell'isolamento;
- guasti prematuri nei cuscinetti;
- corto circuiti nell'isolamento.

Analoghi problemi possono essere causati dalla presenza di umidità.

Per questi motivi è necessario mantenere la macchina pulita e asciutta sia internamente che esternamente.

Questa condizione, oltre che tramite una opportuna manutenzione, può essere assicurata scegliendo una macchina con un sistema di isolamento e un telaio in grado di assicurare protezione nei confronti di questi contaminanti (il grado di protezione di una macchina è identificato con il codice IP).

14

## Stress Meccanici

### 1) Movimento delle bobine.

Sappiamo che sugli avvolgimenti di statore agisce una forza elettromagnetica dovuta alla corrente che circola in essi.

Questa forza è proporzionale al quadrato della corrente e quindi è massima durante l'avviamento.

Essa fa vibrare le bobine a una frequenza doppia rispetto a quella di alimentazione, con un movimento in direzione sia radiale che tangenziale.

Questo movimento può provocare danni all'isolamento delle bobine, perdita delle biette e danni ai conduttori di rame.

Questo problema è maggiormente sofferto da macchine di elevata potenza, elevata velocità, con bobine di dimensioni maggiori, con frequenti avviamenti e con tempi di accelerazione più lunghi.

15

## Stress Meccanici

### 2) Strisciamento del rotore sullo statore.

Il rotore può strisciare sullo statore a causa di diverse ragioni:

- guasti nei cuscinetti,
- flessione dell'albero,
- disallineamento tra rotore e statore.

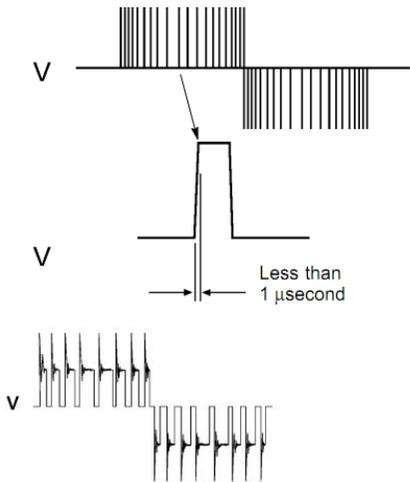
Il contatto tra rotore e statore può accadere solo all'avviamento, provocando una foratura dell'isolamento di una bobina e quindi un corto circuito della bobina stessa. Talvolta i motori possono operare per anni in questa condizione.

Se invece il rotore striscia sullo statore quando il motore funziona a piena velocità, il risultato è un prematuro corto circuito della bobina nella cava di statore, causato da un eccessivo calore generato nel punto di contatto.

16

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Per i motori alimentati da inverter, i problemi aggiuntivi oltre a quelli comuni ai motori alimentati da rete sono principalmente legati a:



### High Frequency Switching

Pulse Width Modulation attempts to simulate a sine wave by firing many full voltage pulses in rapid succession. To minimize noise, the frequency can sometimes be raised to 20,000 pulses per second.

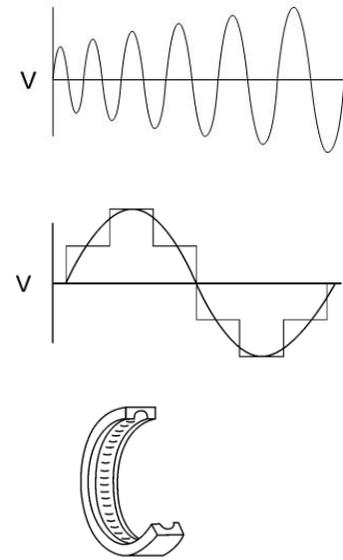
### Short Rise Time

To get higher modulation frequency, each pulse must be very short and the inverter output goes from 0 volts to 650 volts DC in one-millionth of a second. This can seriously stress the motor's insulation system.

### Transient Voltage Spikes

This is what the motor sees as the voltage pulse from a PWM output enters the motor windings. Each rectangular pulse begins with a spike of overvoltage nearly twice the DC bus voltage and then settles down to the bus volts. This "High Potting" can cause pin holes in the motor's insulation turn to turn or phase to phase.

## Avvolgimenti alimentati da inverter



### Reflected Wave Voltage

Also known as standing wave and voltage ring-up. Some of the inverter output is reflected from the motor, back up the line toward the inverter. If the distance and switching frequency are right, a standing wave forms. Voltage from the inverter pulse and the reflected wave add together increasing voltage to the motor. At long distances a 460V RMS output can exceed 2000 volts at the motor terminals.

### Additional Heat

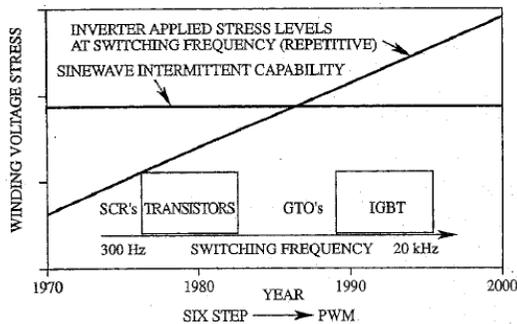
Basically, any portion of the waveform that is not a sine wave is converted to heat in the windings. This is more prevalent on the older 6 step inverters but still can overheat or burn out some motors even on PWM inverters.

### Bearing Currents

The high frequencies in the switching and transient spikes are also induced into the rotor and build up a voltage potential between the rotor and stator. This voltage is dissipated by arcing through the ball bearings. This continuous lightning storm will ruin the finish in the bearing races and cause premature failure.

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Per prima cosa osserviamo che, a partire dai primi inverter, si è passati dall'utilizzo degli SCR, ai GTO e quindi agli IGBT, che offrono vantaggi da tutti i punti di vista, ma presentano una frequenza di *switching* molto elevata (nell'ordine dei 20 kHz) e di conseguenza un tempo di salita dell'impulso (*risetime*) molto basso (dai 50 ai 400 ns).



Si noti che lo stress dell'isolamento degli avvolgimenti aumenta con l'aumentare della frequenza di *switching*.

A.H. Bonnett, Analysis of the impact pulse-width modulated inverter voltage waveform on AC induction motors, IEEE Trans. Ind. Appl., 1996.

Fig. 1. Winding dielectric stress versus the development of transistors.

## Avvolgimenti alimentati da inverter

In figura sono rappresentati tre esempi di singolo impulso di una tipica forma d'onda in uscita all'inverter PWM.

All'inizio dell'impulso, la tensione sale rapidamente da zero fino a un picco (*overshoot*) e quindi torna alla normale altezza dell'impulso, che è pari alla tensione raddrizzata  $E_{DC} = V_{bus}$ .

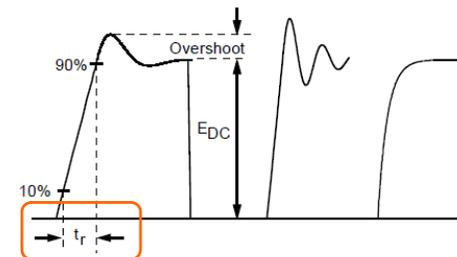


Figure 8 Typical PWM Output Pulse Shapes

Si noti che può esserci o meno un *overshoot* e che la tensione potrebbe oscillare prima di tornare alla normale altezza dell'impulso.

$t_r$  = tempo di salita (*rise time*)

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Il tempo di salita (*rise time*)  $t_r$  è usualmente definito come il tempo richiesto alla tensione per salire dal 10% al 90% del valore di picco della tensione  $V_{peak}$  in uscita dall'inverter.

Il  $dv/dt$  rappresenta invece la pendenza della salita della tensione, si misura usualmente in [V/ $\mu$ s] e può essere approssimato come:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0,8 \cdot V_{peak}}{t_r}$$

I seguenti parametri influenzano lo stress a cui è sottoposto l'isolamento dell'avvolgimento di un motore:

- tempo di salita  $t_r$
- $dv/dt$
- valore di picco della tensione  $V_{peak}$  (incluso l'eventuale *overshoot*)

21

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Questi impulsi di tensione sono trasmessi ai terminali del motore attraverso il cavo che collega l'inverter al motore stesso.

L'altezza normale dell'impulso (escluso l'*overshoot*) in uscita all'inverter è pari a  $V_{busr}$ , mentre l'altezza dell'impulso ai terminali del motore non è necessariamente uguale a  $V_{busr}$ , ma è dipendente dalla dinamica del circuito costituito da inverter, cavo e motore e quindi da:

- tempo di salita in uscita all'inverter (il *risetime* appena definito),
- caratteristiche della linea di trasmissione costituita dal cavo,
- lunghezza del cavo,
- impedenza del motore rispetto all'impulso della tensione.

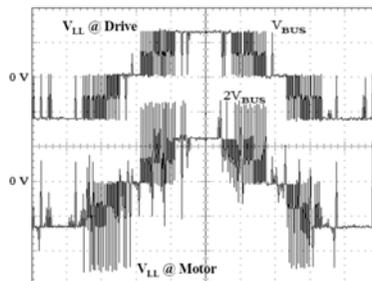
22

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Per particolari combinazioni di questi parametri si può avere il fenomeno della "onda riflessa". Partendo da una tensione di linea  $V_{line} = 400$  V, si ha:

$$V_{bus} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{line} \cong 1,35 \cdot 400 = 540 \text{ V}$$

e, nei casi più sfortunati, si può avere una tensione di picco ai terminali del motore pari al doppio di  $V_{bus}$ :



23

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Si definisce *overshoot factor* (da non confondere con l'*overshoot* in uscita all'inverter) il **rapporto tra la tensione di picco ai terminali del motore e la  $V_{bus}$** . Questo fattore è utilizzato in una recente specifica tecnica IEC per definire la categoria di stress a cui sono sottoposti gli isolamenti dei motore in bassa tensione alimentati da inverter.

È possibile valutare preliminarmente questo fattore sulla base di alcuni parametri.

Innanzitutto questo fattore dipende dal **coefficiente di riflessione**, il quale a sua volta dipende dall'impedenza rispetto all'impulso (*surge impedance*) del cavo  $Z_{cable}$  e dall'impedenza rispetto all'impulso del motore  $Z_{motor}$ .

L'impedenza del cavo è misurabile ed è nell'ordine di grandezza tra 80 e 180  $\Omega$ . L'impedenza del motore non è facilmente misurabile e può andare dai 2000÷5000  $\Omega$  per piccoli motori a 400  $\Omega$  per motori di grande potenza.

24

## Avvolgimenti alimentati da inverter

L'ampiezza della tensione ricevuta ai terminali del motore è data dall'ampiezza della tensione inviata dall'inverter ( $V_{bus}$ ) moltiplicata per  $(1+\Gamma)$ , dove  $\Gamma$  è il **coefficiente di riflessione** definito come:

$$\Gamma = \frac{Z_{motor} - Z_{cable}}{Z_{motor} + Z_{cable}}$$

Si può verificare che il fattore moltiplicativo  $(1+\Gamma)$  va da 1,95 per piccoli motori a 1,6 per motori di più elevata potenza, come ordine di grandezza. Quindi, in generale, questo fattore è più critico per i motori più piccoli.

Spesso però per il collegamento degli inverter ai motori di elevata potenza si utilizzano cavi in parallelo, con i quali si riduce l'impedenza complessiva del cavo, per cui aumenta il coefficiente di riflessione  $\Gamma$  e, di conseguenza, il fattore moltiplicativo  $(1+\Gamma)$ .

25

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Un altro parametro che influenza l'*overshoot factor* è la cosiddetta **lunghezza critica del cavo**  $l_c$ , la quale a sua volta è principalmente determinata dal tempo di salita dell'impulso di tensione in uscita all'inverter (*risetime*).

Una volta determinata questa lunghezza critica, è possibile verificare che:

- Se la lunghezza del cavo è  $< l_c$ , l'overshoot factor sarà inferiore al fattore moltiplicativo  $(1+\Gamma)$ ;
- Se la lunghezza del cavo è  $> l_c$ , l'overshoot factor sarà almeno uguale (ma anche superiore) al fattore moltiplicativo  $(1+\Gamma)$ .

In pratica, **la lunghezza critica  $l_c$  diminuisce al diminuire del *risetime*.**

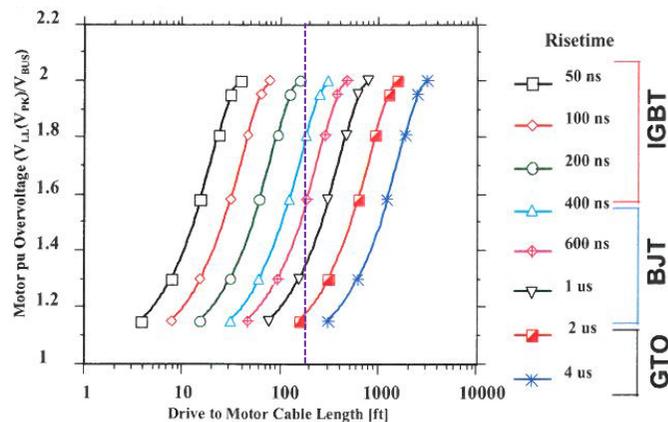
Pertanto, mentre per un inverter a GTO questa lunghezza sarà talmente elevata da non essere normalmente raggiunta nei casi reali, per un inverter a IGBT questa lunghezza critica potrà talvolta essere raggiunta nei casi reali.

26

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Il grafico seguente mostra come, a parità di lunghezza di cavo (es. 200 ft  $\cong$  70 m), un inverter a GTO produce un *overshoot factor* molto basso e inferiore rispetto ad un inverter a BJT, il quale a sua volta determina un *overshoot factor* decisamente inferiore ad un inverter ad IGBT.

Quest'ultimo può anche raggiungere un *overshoot factor* pari a 2.



27

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Quindi, per i motori alimentati da inverter, i problemi aggiuntivi che possono aumentare il tasso di guasto dell'isolamento degli avvolgimenti sono principalmente legati all'elevata pendenza dei fronti di salita della forma d'onda di tensione in uscita dall'inverter ( $dv/dt$ ).

Infatti, per particolari lunghezze del cavo di alimentazione ( $> l_c$ ), i fronti di salita della tensione provocano il fenomeno della "onda riflessa".

Questo fenomeno consiste in una sovratensione che si sviluppa lungo la linea fino ai terminali del motore, inducendo uno stress continuo sugli isolamenti.

Recenti esperienze suggeriscono anche che questi fronti ripidi della forma d'onda di tensione potrebbero alimentare la cosiddetta "tensione d'albero" sul motore e portare al fenomeno delle correnti di cuscinetto riconosciute come causa del "fluting" o elettroerosione.

28

## Avvolgimenti alimentati da inverter

In tutto questo, il cavo di collegamento tra inverter e motore assume una fondamentale importanza, in quanto questi fenomeni si sviluppano o vengono smorzati molto spesso in base alla sua costituzione e al modo in cui viene connesso ai vari elementi dell'impianto.

Il fenomeno parte dal fatto che un inverter PWM non genera un'onda d'uscita di forma sinusoidale, bensì un continuo treno di impulsi, il cui massimo valore di tensione è pari al valore del DC-Bus ( $V_{bus}$ ).

La stessa sequenza di impulsi ai terminali del motore non ha più ampiezza pari a  $V_{bus}$ , ma mostra dei picchi di tensione a ogni commutazione che possono anche raggiungere il doppio del suo valore.

Questo fenomeno di sovratensione, conosciuto come "onda riflessa" o "effetto della linea di trasmissione", potrebbe stressare in maniera particolare l'isolamento del motore, portando a un guasto dello stesso.

29

## Avvolgimenti alimentati da inverter

Il fenomeno è legato alla dinamica generale del sistema inverter-cavo-motore, dipendente dall'ampiezza dell'onda di tensione in uscita all'inverter, dal fronte di salita degli impulsi da esso generati e dalla loro frequenza, dalle impedenze caratteristiche del cavo e del motore e dalla lunghezza del collegamento.

Un'onda di tensione che transita lungo una linea è riflessa principalmente a causa del disaccoppiamento tra l'impedenza caratteristica del cavo e del carico.

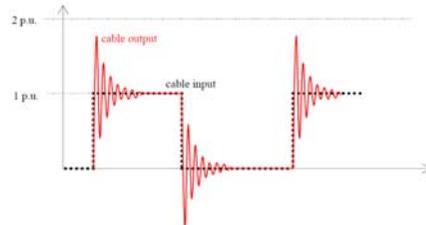
Se l'impedenza del carico è equivalente a quella caratteristica del cavo, non esiste l'onda riflessa e non si riscontra alcun problema di sovratensione.

Se invece c'è una rilevante differenza tra i valori delle impedenze del cavo e del carico (motore), l'ampiezza dell'onda riflessa sarà pari a quella dell'onda incidente, in quanto il coefficiente di riflessione  $\Gamma$  si avvicina all'unità.

30

## Avvolgimenti alimentati da inverter

In figura è mostrato come il fenomeno della riflessione si presenta ai morsetti del motore. Si hanno sovratensioni più frequenti all'aumentare della frequenza portante con cui vengono generati gli impulsi.



La sovratensione iniziale dovuta alla riflessione d'onda non compromette il funzionamento del motore e le sue prestazioni di coppia e potenza, ma ha un effetto dannoso sugli isolamenti.

Infatti, l'ampiezza e l'elevato  $dv/dt$  delle sovratensioni incidono sulla vita e sulle prestazioni dell'isolamento.

I principali problemi che si possono ritrovare sono le scariche parziali e il presentarsi dell'effetto corona.

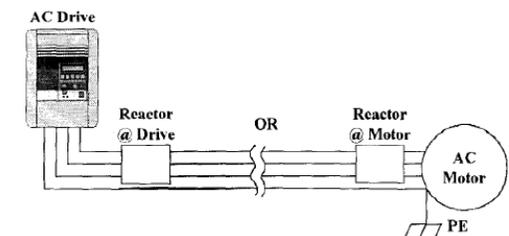
31

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

Le tecniche per ridurre le sovratensioni sul motore sono di vario tipo:

- 1) Scegliere un sistema di alimentazione a minore tensione, quando possibile;
- 2) Richiedere un isolamento opportuno per alimentazione con IGBT;
- 3) Ridurre, se possibile, la lunghezza del cavo tra inverter e motore;
- 4) Introdurre dispositivi aggiuntivi come:

- Reattanze in uscita all'inverter,
- Reattanze al motore,
- Filtri  $dv/dt$  e filtri sinusoidali in uscita all'inverter,
- Reti di terminazione di linea, che effettuano l'adattamento di impedenza.



32

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

La prima soluzione, se tecnicamente accettabile, prevede un sistema di alimentazione con tensione efficace pari a 230 V.

In questo modo la  $V_{bus}$  sarà circa pari a 300 V e, anche con un *overshoot factor* pari a 2, si otterrà sul motore una sovratensione intorno ai 600 V, che è normalmente sopportata dagli attuali sistemi di isolamento.

Tuttavia, la sollecitazione proveniente da un inverter a IGBT ha un *risetime* nell'ordine di 100 ns e quindi stressa in ogni caso maggiormente l'isolamento rispetto ad un'alimentazione sinusoidale di pari valore efficace.

In generale, per tensioni nominali  $< 400$  V, si ritiene che la maggior parte dei motori standard sia in grado di sopportare gli stress aggiuntivi dovuti all'alimentazione da inverter, tuttavia in alcuni casi il picco di tensione può superare il doppio della  $V_{bus}$  e quindi 1000 V, che spesso rappresenta il limite di tensione al di sopra del quale possono innerscarsi scariche parziali.

33

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

La seconda soluzione prevede un sistema di isolamento appositamente progettato e costruito per sopportare i maggiori stress derivanti dall'alimentazione da inverter.

Questo tipo di isolamento dovrà soddisfare i test di qualificazione e i test di controllo qualità previsti dalla Norma IEC 60034-18-41 "*Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests*" (2014).

I sistemi di isolamento di Tipo I sono a tensione nominale  $< 700$  V: in condizioni di alimentazione sinusoidale, non sono soggetti a scariche parziali.

Esiste anche la specifica tecnica IEC/TS 60034-18-42 "*Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters*" (2008) per sistemi di isolamento di Tipo II (tensione nominale  $\geq 700$  V).

34

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

La terza soluzione prevede, se possibile, la minimizzazione della lunghezza del cavo tra inverter e motore.

In tutti i casi in cui le prime tre soluzioni non siano realizzabili oppure nei casi di installazioni esistenti in cui sostituire il motore o spostare l'inverter non sia fattibile, è possibile intervenire aggiungendo dei dispositivi opportuni.

Una reattanza in uscita all'inverter migliora la forma dell'onda riflessa, rallentandone il tempo di salita e riducendone l'ampiezza: quindi essa riduce lo stress dielettrico sull'avvolgimento del motore.

Lo svantaggio di questa soluzione è che può introdurre una caduta di tensione alla frequenza fondamentale, che riduce la capacità del motore a produrre la coppia nominale.

35

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

Una reattanza al motore migliora la forma dell'onda riflessa, riducendone l'ampiezza, ma rallentandone solo leggermente il tempo di salita. In ogni caso, lo stress dielettrico sull'avvolgimento del motore risulta ridotto.

Gli svantaggi di questa soluzione sono simili a quelli della soluzione precedente.

Un'altra soluzione consiste nell'installazione di filtri  $dv/dt$  o di filtri sinusoidali (*sine wave filter*) in uscita all'inverter:

- ✓ i filtri  $dv/dt$  sono costituiti da un'appropriata combinazione di componenti R-L-C che consente di ottenere filtri passa basso;
- ✓ i filtri sinusoidali convertono il segnale di tensione PWM in una forma sinusoidale, eliminando virtualmente gli impulsi del segnale portante.

36

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

Tuttavia, sebbene la forma della tensione ottenuta sia sinusoidale, si può verificare che la tensione del neutro dello statore rispetto a terra superi la  $V_{bus}$ , perché l'elevata induttanza usata per il filtro risuona con la capacità del cavo verso terra. Di conseguenza, l'isolamento di fase del motore verso terra può risultare ugualmente sottoposto a stress dielettrico e inoltre si possono avere gli effetti nocivi legati alle correnti nei cuscinetti e alle interferenze elettromagnetiche.

Un filtro sinusoidale appositamente progettato per un'installazione già esistente può essere molto costoso e ingombrante: è la soluzione più costosa per risolvere questo problema.

I filtri R-L-C commercialmente disponibili sono meno costosi, ma permettono di ottenere una tensione ai terminali del motore simile a quella che si ottiene con una reattanza in uscita all'inverter.

37

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

Un metodo più efficace economicamente consiste in reti di terminazione (*termination network*) che si installano ai terminali del motore.

Questi dispositivi sono di piccole dimensioni, dissipano una potenza minima, costano il 10% delle precedenti soluzioni di filtraggio (ad eccezione di quelli per piccoli motori) e possono essere facilmente configurati sia per installazioni con un solo motore che per installazioni con più motori.

Essi vengono installati in parallelo col motore e quindi non causano una caduta di tensione nel circuito.

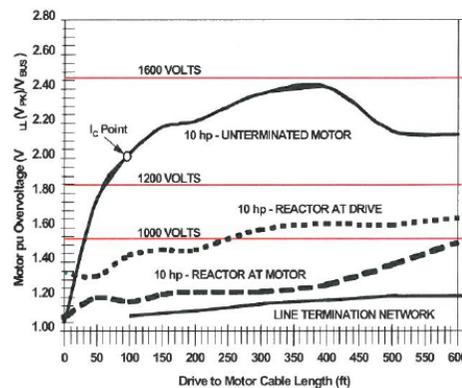
Il loro funzionamento è basato sul fatto che, se una linea termina su un carico la cui impedenza è uguale a quella del cavo, il coefficiente di riflessione si annulla. Quindi si fa in modo che questo dispositivo inserisca un'impedenza uguale a quella del cavo e così si elimina il fenomeno dell'onda riflessa.

38

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

Con questa soluzione, la tensione ai terminali del motore raggiunge tipicamente la  $V_{bus}$  ma non supera mai 1,2 volte la  $V_{bus}$ .

La figura seguente mostra che questa soluzione permette di ottenere una maggiore riduzione della tensione ai terminali del motore, a parità di lunghezza del cavo.



L.A. Saunders et al., Riding the reflected wave – IGBT drive technology demands new motor and cable considerations, IEEE IAS Petroleum & Chemical Industry Conference, 1996.

39

## Soluzioni per ridurre il fenomeno dell'onda riflessa

Di seguito si riporta una tabella con i costi indicativi (in percentuale rispetto al costo del motore) per le soluzioni precedentemente descritte:

Typical relative costs – Drives and preventative measures (Motor = 100%)					
Rating	Drive	Preventative Measure			
		Output inductor	Output du/dt filter	Sinusoidal filter	Motor termination unit
2.2kW 400V	125%	50%	100%	150%	150%
75kW 400V	100%	30%	40%	45%	10%
250kW 400V	90%	10%	15%	30%	3%
160kW 690V	100%	10%	20%	35%	4%
250kW 690V	70%	10%	15%	25%	2%
500kW 690V	60%	10%	15%	20%	1%

Si osserva che la variabilità dei costi delle diverse soluzioni, in percentuale rispetto al costo del motore, è strettamente legata alla sua potenza.

"Motor insulation voltage stresses under PWM inverter operation", Gambica/Rema Technical Guide, 2008.

40