

Angelo Baggini - Franco Spolaor

EVOLUZIONE DEI SISTEMI ISOLANTI nei trasformatori inglobati in resina

Estratto dalla rivista
ELETTTRIFICAZIONE
fasc. 1/1998

A. Baggini (*)
F. Spolaor (**)

EVOLUZIONE DEI SISTEMI ISOLANTI nei trasformatori inglobati in resina

La rapida diffusione nell'ambito dell'installazione industriale ed il crescente interesse di progettisti, installatori ed utilizzatori per i trasformatori inglobati in resina sono la naturale conseguenza dell'eccellente livello di affidabilità raggiunto da queste apparecchiature, grazie anche a nuove soluzioni per l'isolamento.

(*) Dott. ing. Angelo Baggini, Ph. D.
Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bergamo. Membro del CLC/SC9XC/WGC10 del CENELEC.
Sottosegretario del Consiglio Nazionale del Gruppo Specialistico MISURE ELETTRICHE dell'IAEL.
Consulente tecnico e scientifico nel settore dell'ingegneria elettrica.

(**) Sig. Franco Spolaor - Responsabile Marketing Polifibra S.p.A.
- Membro del CEI - CT 15/98 "Materiali Isolanti e sistemi d'isolamento" - SC110 A "Radiodisturbi".
- Federazione ANIE - Associazione CSI - Capo Gruppo Isolanti Elettrici.

I trasformatori con avvolgimenti inglobati in resina hanno cominciato a trovare impiego verso la fine degli anni '60 come conseguenza di una sempre più pressante necessità di limitare i rischi di incendio e d'inquinamento legati all'utilizzo dei classici trasformatori in olio.

La continua evoluzione della tecnologia e dei materiali, accompagnata da una contemporanea riduzione dei costi, ha consentito una diffusione via via crescente dei trasformatori con avvolgimenti MT/BT inglobati in resina sotto vuoto, soprattutto nelle installazioni all'interno di ambienti civili ed industriali, in cui è indispensabile ridurre al minimo i rischi in caso di funzionamenti anomali.

Queste macchine hanno ormai raggiunto un elevato grado di affidabilità con l'avvento di nuove tecnologie costruttive come gli

avvolgimenti inglobati in resina mediante colata a caldo sottovuoto in stampi di contenimento oppure l'impiego di conduttori isolati con resine ad elevata resistenza alla temperatura, nonché l'utilizzo di nuovi materiali con migliorate caratteristiche, sia dielettriche sia di tenuta, che ne hanno permesso l'impiego anche in ambienti particolarmente severi.

Per le macchine tipiche della distribuzione il tasso di guasto annuo supera oggi di poco il punto percentuale e la situazione è destinata senz'altro a migliorare con la maggiore conoscenza dei limiti di prestazione dei vari materiali, con la messa a punto di componenti specifici, quali gli isolanti flessibili interstrato, e, non ultimo, con l'applicazione razionale dei Sistemi Qualità.

Sviluppo del trasformatore a secco

Senza risalire ai tempi pionieristici dell'industria elettrica, con le presentazioni, avvenute verso la fine del secolo scorso in occasione delle esposizioni riguardanti l'elettricità, dei primi trasformatori a cura di Gaulard, Déry, Blathy e Ziperowsky, già prima della Seconda Guerra Mondiale venivano prodotti trasformatori a secco MT/BT di potenza, fino ad alcune centinaia di chilovoltampere, con avvolgimenti aperti ed isolati in carta verniciata.

Il trasformatore a secco, così come veniva realizzato, presentava però alcuni limiti, rappresentati da:

- difficoltà di asportare il calore con conseguente limitazione imposta alla densità di corrente utilizzabile;
- necessità di avere importanti distanze tra avvolgimenti e gruppi di spire per ragioni



Fig. 1 - Trasformatore inglobato in resina (Tesar s.r.l.).

di tenuta dielettrica e di facilitazione della circolazione dell'aria di raffreddamento;

- difficoltà di proteggere gli isolanti organici dagli effetti dell'umidità, della polvere e degli altri inquinanti.

Con l'aumento delle potenze, tutti questi inconvenienti portarono ad una crescita delle dimensioni e, di conseguenza, del costo dei trasformatori. L'utilizzo del sistema isolante carta-olio avviava, invece, ai suddetti inconvenienti grazie ad un'elevata capacità termica, associata ad un'ottima tenuta dielettrica. Il fatto che fosse necessaria una cassa di contenimento, ben sposava la necessità di difesa dalle condizioni ambientali avverse. Tutto ciò spiega il grande impulso che ebbe la tecnologia dell'olio nel campo dei trasformatori di potenza a media ed alta tensione.

L'olio, e soprattutto i suoi vapori, sono però, in determinate condizioni, infiammabili e perciò non possono essere utilizzati in ambienti chiusi o pericolosi. Inoltre, il liquido non può essere disperso nell'ambiente: ciò richiede la realizzazione di vasche di contenimento che complicano le strutture da realizzare per l'installazione del trasformatore.

Il problema fu successivamente risolto ricorrendo ai policloruribifenili (PCB) prodotti molto stabili ed, allo stato liquido, non infiammabili, che utilizzati al posto dell'olio consentirono di sostituire i trasformatori a secco in tutti i casi in cui si rendeva necessario limitare i rischi d'incendio. Il basso costo dei PCB e la possibilità di ridurre le dimensioni delle macchine, conseguenza della facilità di smaltimento delle perdite, furono alla base della larga applicazione di questi liquidi isolanti.

Un paio di decenni fa si è notato però che la stabilità dei PCB ne impediva la biodegradabilità, con conseguente accumulo ed indistruttibilità delle scorie, e cosa assai più grave, che ad alte temperature erano soggetti a pirolisi, con produzione anche di diossina. L'uso di questi prodotti è stato perciò prima sconsigliato ed infine messo al bando da una Direttiva della Comunità Europea, recepita anche dalla legislazione italiana.

Nel frattempo il settore degli isolanti solidi faceva enormi progressi, sia fornendo materiali inorganici adatti ad alte temperature per gli isolanti dei trasformatori di tipo aperto tradizionali, sia realizzando resine adatte ad inglobare gli avvolgimenti, au-

Tesar sceglie Polifibra Group

Tesar, società del Gruppo Tamini, è stata costituita nel 1980 con l'obiettivo di porsi all'avanguardia in Italia nella produzione di trasformatori in resina. L'attuale attività produttiva di Tesar prevede la realizzazione di:

- trasformatori di potenza inglobati in resina con potenze comprese fra 100 e 10 000 kVA, destinati a reti di media tensione con tensione massima del sistema $U_m \leq 36$ kV;

- trasformatori di tensione e corrente inglobati in resina, per misura o protezione.

Il Sistema di Qualità aziendale della Tesar è attualmente certificato UNI EN ISO 9001 presso il CSQ.

Tra le prime importanti realizzazioni si segnalano già nel 1983 la fornitura di macchine da 7 500 kVA per la Soc. Turbotecnica di Firenze, nel 1984 gli ordini da parte dell'Enel per i trasformatori dell'impianto termoelettrico di Brindisi e per 2 macchine da 5 000 kVA, nel 1985 la fornitura della macchina da 3 250 kVA per la Metropolitana Milanese e quella da 3 000 kVA per la piattaforma Vega.

La Tesar produce anche trasformatori di misura per media tensione, per i quali ha ottenuto l'omologazione Enel.

L'affidabilità dimostrata ha garantito in seguito altre prestigiose realizzazioni: 2 macchine da 7 500 kVA per l'Agip di Trecate, gli equipaggiamenti per le metropolitane di Genova, Napoli e Roma, un trasformatore da 9 000 kVA per Techint, ecc.

Per la fabbricazione dei trasformatori di potenza e misura, la Tesar utilizza accoppiati prodotti da Polifibra.

mentando le classi di temperatura degli avvolgimenti.

Attualmente i trasformatori con avvolgimenti inglobati in resina vengono di norma costruiti per tensioni nominali comprese fra 3 e 24 kV e per potenze da 100 a 10 000 kVA, ad uno o due avvolgimenti secondari.

Quale materiale conduttore viene normalmente utilizzato l'alluminio anziché il rame, esclusivamente per motivi tecnici e non per il suo minor costo. È necessario, infatti, che durante il funzionamento la resina, l'isolante interstrato ed il conduttore si espandano uniformemente per non causare tensioni meccaniche interne.

I valori simili del coefficiente di dilatazione termica della resina e dell'alluminio garantiscono l'assenza di sollecitazioni al variare della temperatura ed i tre componenti formano in tal modo un sistema omogeneo con dilatazione uniforme.

Il ricorso all'attuale tecnica d'inglobamento sotto vuoto permette alla resina di penetrare più facilmente, andando ad occupare gli spazi vuoti e riducendo la formazione di indesiderati strati d'aria all'interno dell'isolante (fig. 2).

Anche la scelta di utilizzare il nastro al posto della piattina o del filo deriva da considerazioni tecnico/economiche.

L'uso del nastro, assai diffuso negli anni passati, è attualmente limitato alle macchine di potenza più elevata (al di sopra di 1 250 kVA).

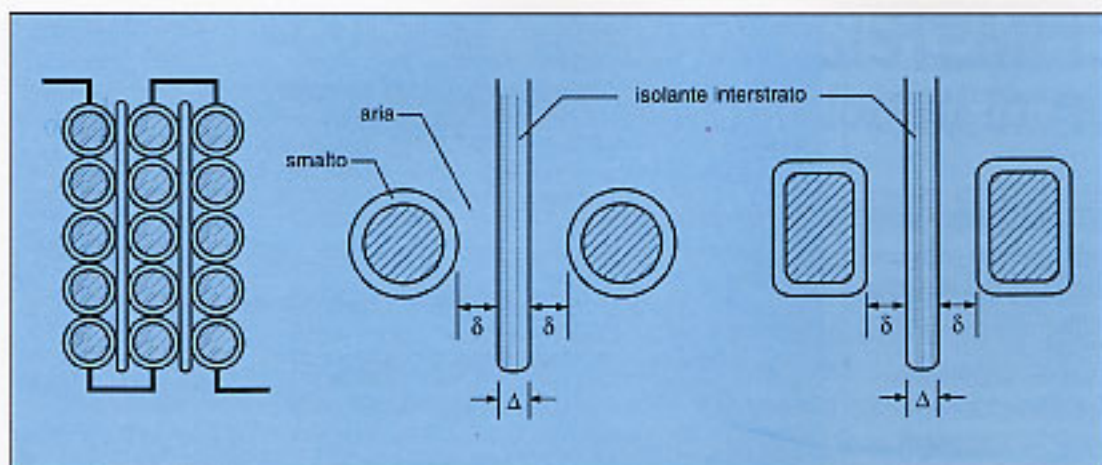


Fig. 2 - Sezione conduttori e isolante interstrato non "pre-preg".

L'impiego per l'impregnazione di un composto epossidico con elevata percentuale di silice e triidrato di allumina conferisce infine all'isolante caratteristiche di ininfiammabilità. Le prove svolte mettono in evidenza la bassa nocività dei fumi prodotti da sistemi epossidici, che, d'altra parte, presentano bassi rischi d'accensione e buona proprietà d'autoestinguenza.

Per limitare gli effetti degli shock termici, particolare attenzione deve essere posta nella scelta della temperatura di transizione vetrosa (T_g).

Quando il luogo d'installazione può raggiungere temperature al di sotto dello zero o sono previste possibilità di stoccaggio o fuori servizio in ambienti con temperature basse, l'impiego di resine con T_g diversi consente di poter arrivare senza inconvenienti elettrici o meccanici sino a temperature di -25/-30 °C.

Il problema relativo alla perdita di massa della resina nel periodo di vita della macchina è stato ampiamente risolto ed oggi, sulla base dell'esperienza delle prove effettuate presso il CESI di Milano, questa è valutata inferiore all'1% in 20 anni. Tale valore lascia inalterata la rigidità dielettrica del materiale che comincia a presentare fenomeni di invecchiamento solo se la perdita in peso supera il 4%.

Evoluzione normativa

L'accreciuta diffusione del tipo di macchine in oggetto ha avuto un riscontro anche in campo normativo, prima a livello internazionale e, poi, nazionale. La prima Norma sui trasformatori a secco è stata, infatti, la Pubblicazione IEC 726 del 1982; tuttavia, alcune lacune in questo originario do-

cumento e la necessità di avere riferimenti comuni a livello europeo per gli appalti degli Enti di pubblico servizio hanno portato il CENELEC a sviluppare due serie di Norme: la HD 464, che integra la corrispondente normativa IEC con importanti aspetti legati alle condizioni di impiego di queste

macchine, e la HD 538, che contiene i parametri di unificazione per i trasformatori a secco prodotti in grande serie.

Il Comitato Elettrotecnico Italiano ha poi recepito questi filoni con le Norme CEI 14-8 e CEI 14-12.

La relativa novità della materia e la necessità di acquisire esperienze di comportamento e prova fanno sì, tuttavia, che il lavoro normativo sia in fase di continuo perfezionamento ed approfondimento.

Ruolo dell'isolante flessibile

Le parti attive dei trasformatori, avvolgimenti e nucleo magnetico, costituiscono, come noto, sorgenti di calore in quanto sedi di perdite. La trasmissione del calore prodotto all'ambiente esterno avviene secondo leggi complesse per cui lo studio del comportamento termico del trasformatore risulta difficile, anche limitatamente alle condizioni di regime termico.

Se si esamina il reale comportamento di un trasformatore funzionante a perdite costanti, si può rilevare che la distribuzione delle temperature all'interno degli avvolgimenti è funzione della loro struttura e delle modalità di dissipazione del calore.

La distribuzione radiale delle temperature, che a regime può essere considerata multi-sponenziale, dipende in modo rilevante dalla presenza dell'isolamento tra le spire e tra gli strati.

Un ruolo fondamentale in questi fenomeni è giocato dai materiali isolanti che circondano i conduttori negli avvolgimenti; questi materiali, infatti, oltre alle desiderate funzioni di isolamento elettrico, costituiscono una barriera alla dissipazione del calore.

Recenti studi hanno, in particolare, dimostrato l'importanza dell'isolante flessibile interstrato.

L'imperfetto accoppiamento di tali isolanti al conduttore può infatti peggiorare notevolmente le condizioni di raffreddamento e di tenuta dielettrica, sostanzialmente a causa degli strati d'aria che inevitabilmente si formano tra i due materiali. Le condizioni di accoppiamento ai conduttori dell'isolante flessibile interstrato risultano importanti anche per ridurre, od evitare del tutto, le conseguenze delle sollecitazioni elettrodinamiche sugli avvolgimenti.

Nel caso di trasformatori a secco inglobati in resina, il ricorso ad isolanti caratterizzati da buona proprietà di adesione ai conduttori ed in grado di migliorare le caratteristiche di resistenza meccanica degli avvolgimenti, è senz'altro positivo.

Isolamento pre-preg

Quando un prodotto come carta, tessuto o feltro è impregnato per fusione o per soluzione con una resina termoindurente e, quindi, sottoposto ad opportuno trattamento termico, si ottiene un isolante denominato "pre-preg". Il processo di trattamento termico di cui sopra è noto come "raggiungimento dello stadio B" (B-stage): una situazione intermedia tra la semplice impregnazione con resina (stadio A) e la definitiva polimerizzazione (stadio C). La resina del pre-preg si trova ad un grado di parziale polimerizzazione con peso molecolare e viscosità superiori ai valori originali; ne consegue che il supporto risulta completamente impregnato senza che vi sia fuoriuscita o separazione della resina dallo stesso.

Quest'ultima, in tale stadio, risulta molto vicina al punto di gel, sistema semisolido in cui la resina è insolubile, ma ancora fusibile. Per modificarne definitivamente le caratteristiche fisiche, il prodotto deve subire ancora una trasformazione che avviene per reazione chimica dovuta a calore od a catalizzatore, singolarmente oppure in combi-

nazione, con o senza pressione, nella fase d'impiego dell'isolante (fig. 3).

A questo punto il prodotto ha raggiunto lo stadio finale C e risulta permanentemente insolubile ed infusibile.

Gli elementi caratteristici di un pre-preg sono rappresentati dal peso del supporto base, dalle proprietà di impregnazione e di scorrimento della resina ed, in alcuni casi, dalla percentuale di sostanze volatili.

L'indice di impregnazione della resina varia, secondo i campi d'applicazione del prodotto, tra il 10 ed il 300%: un'impregnazione leggera ha il solo scopo di legare i filamenti del supporto e di favorire i successivi trattamenti in quanto il tessuto è ancora permeabile alla resina; un'impregnazione pesante consente di ottenere, nella fase applicativa, un'adeguata saturazione delle sacche d'aria

TABELLA 1 - Caratteristiche dell'isolante Therm-H

Parametri	Unità di misura	Tipo						
		D50	D75	D100	D125	D190	D250	D350
Stratigrafia	µm	65/50/65	65/75/65	65/100/65	65/125/65	65/190/65	65/250/65	65/350/65
Spessore totale nominale	µm	195	220	245	270	335	395	495
Grammatura nominale	g/m ²	190	225	260	295	386	470	610
Resa	m ² /kg	5,25	4,45	3,85	3,40	2,60	2,10	1,65
Rigidità dielettrica tal quale	kV	8	9	11	12	15	17	20
dopo piegatura a 180°	kV	7	8	10	11	14	16	19
Resistenza alla trazione MD	Kg/cm	11	14	16	20	30	35	40
Resistenza alla trazione TD	Kg/cm	9	11	12	15	20	30	35
Allungamento a rottura	%				20			
Punto di fusione	°C				260			
Ritiro a 150 °C	%				< 2			
Altezza rotoli standard	mm				1 000			
Diametri int. x est. rotoli standard	mm				76x330			

Fig. 3 - Parametri di tempo, Temperatura per la polimerizzazione.

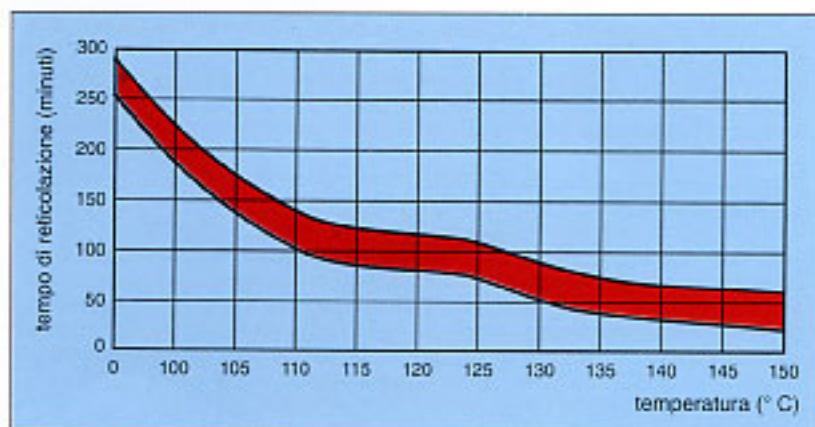


Fig. 4 - Isolante pre-preg Therm-H prodotto da Polifibra.



presenti nella struttura elettrica della macchina, con una perfetta adesione tra i diversi materiali.

Le caratteristiche meccaniche del pre-preg sono largamente determinate dal tipo di supporto (feltro, tela, vetro, film-cartta, ecc.), mentre quelle elettriche e termiche sono condizionate dal tipo di resina. Le proprietà finali del pre-preg possono ulteriormente migliorare con successive ricotture dopo l'indurimento della resina, una volta posto in opera.

La scelta dei supporti e delle resine è dettata dalle esigenze applicative del pre-preg; per ottenere alta resistenza meccanica si im-

piegano feltri rinforzati con filamenti continui, mentre se è richiesta, ad esempio, una particolare flessibilità si aggiungeranno alla resina adatti plastificanti.

Conclusioni

I nastri preimpregnati trovano impiego in tutti i settori delle costruzioni elettriche e consentono, nella maggior parte dei casi, di evitare ulteriori impregnazioni dell'unità trattata. Questo si verifica soprattutto quando si esegue la nastratura a caldo con il conseguente incapsulaggio dei conduttori nella resina. In particolare i pre-preg si utilizzano (secondo le diverse classi termiche, le diverse esigenze meccaniche e dielettriche) per l'isolamento di conduttori, bobine e matasse, per la protezione delle testate degli avvolgimenti, per il rivestimento di cave e canali, per l'isolamento interstrato di macchine AT, per l'assiemaggio e l'incollaggio di lamierini, per la nastratura di rotori e nuclei e, più in generale, ovunque si voglia ottenere un efficiente isolamento, robustamente ancorato, di parti rotanti e statiche di apparecchiature ad alta tensione.

I preimpregnati a base di carta e resina epossidica sono spesso usati anche come pellicola adesiva e facilitano i processi produttivi come quando, ad esempio, si devono assiemare i nuclei dei trasformatori od i pannelli di schermatura.

Bibliografia

[1] G. Redaelli: "La situazione normativa dei trasformatori di potenza a secco" Giornata di studio "Trasformatori di potenza a secco" AEI, IEEE, Milano Cesi, 22/6/1995.

[2] A. Baggini, C. Ferradini, C. Nadalini: "A new generation of cast-resin dry-type transformers"; "Distribution transformer - Failures and new development", Seminar of Lucknow India - 6/7 febbraio 1997.

[3] Centro studi Polifibra Group
Data sheet Polifibra S.p.A.

Polifibra: Isolamento ed affidabilità

Polifibra, azienda specializzata nella produzione e trasformazione di materiali flessibili per usi tecnici, ha messo a punto e produce Therm-H, un accoppiato flessibile per isolamento a tre strati (tessuto-non-tessuto poliestere, film poliestere, tessuto-non-tessuto poliestere), pre-saturato con resina termoindurente di tipo EP di classe F allo stato B (solido).

La resina di impregnazione di Therm-H, opportunamente riscaldata secondo predefiniti cicli termici, reticola, passando dallo stato-B allo stato-C (polimerizzata), ancorandosi saldamente al supporto e formando un unico blocco monolitico.

Dopo la polimerizzazione, la resina di saturazione di Therm-H è classificata in classe F secondo IEC draft 464-3.2 type 155.

Gli accoppiati flessibili sono largamente usati dai costruttori di trasformatori.

"Il principale vantaggio che si ottiene con l'utilizzo di questi nuovi prodotti" ci conferma Massimo Marracchini, Direttore di stabilimento della Tesar "è costituito dal fatto che, una volta eseguito l'avvolgimento e polimerizzata la resina, non vi è più la necessità di ulteriori lavorazioni. Il maggior grado di coesione che si ottiene grazie all'impiego di certi pre-preg assicura, inoltre, una migliore resistenza degli avvolgimenti alle sollecitazioni meccaniche causate dalle sovracorrenti. Infine, la buona adesione dell'isolante ai conduttori facilita, eliminando la possibilità di formazione di bolle gassose, un'ottimale condizione per la dissipazione del calore verso l'ambiente esterno, accrescendo in tal modo l'affidabilità delle macchine".