



HYDROMATTERS 4.0

IDROELETTRICO IN ITALIA – CONFERENCE & PRODUCT EXPO

Sig. Renato Franco
19 Settembre 2017 - Padova


**La misura SFRA
per la diagnosi dei trasformatori di potenza**

TRANSFORMING THE FUTURE




IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with various droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura SFRA**
 - **Fondamenti di analisi della risposta in frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with various droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura SFRA**
 - **Fondamenti di analisi della risposta in frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

SEA SPA

STORIA

Da più di cinquant'anni SEA si dedica all'energia elettrica, un successo iniziato nel 1959 come piccolo laboratorio artigiano e consolidandosi negli anni in una industria leader nel settore dell'elettromeccanica.

Trasformatori monofasi, trifasi e speciali, reattori e bobine, isolati in olio, resina o aria con una vasta possibilità di configurazione sia per potenze che per tensioni.



SEA SPA

HYDROPOWER: ALCUNI PROGETTI REALIZZATI NEL 2017

Centrale a Curon Venosta

22 MVA – 132 kV



Centrale in Guatemala

19 MVA – Single phase



Centrale in Ecuador

27 MVA – ONAF cooling



Centrale in Angola

1100 kVA

Static Excitation




Centrale in Islanda

500kVA – AN Cooling

IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with various droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura SFRA**
 - **Fondamenti di analisi della risposta in frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

La deregolamentazione del mercato dell'energia elettrica induce un più attento controllo economico atto alla riduzione dei costi di servizio e di manutenzione delle apparecchiature elettriche.

D'altra parte, affrontiamo l'età e l'invecchiamento dei trasformatori soggetti a sempre maggiori carichi in tutto il mondo.

La diagnosi di queste apparecchiature diventa in generale molto rilevante e strategicamente importante relativamente ai trasformatori di particolare uso.

Negli ultimi anni un veloce ritmo riguardante i vari aspetti delle misure, dell'acquisizione dei dati e analisi ha preso piede in tutte le parti del mondo.



INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

La Centrali idroelettriche possono essere locate in siti raggiungibili in maniera non sempre semplice, fatto che potrebbe causare durante la fase di trasporto e posizionamento alcune problematiche relative alla integrità del trasformatore stesso.



INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

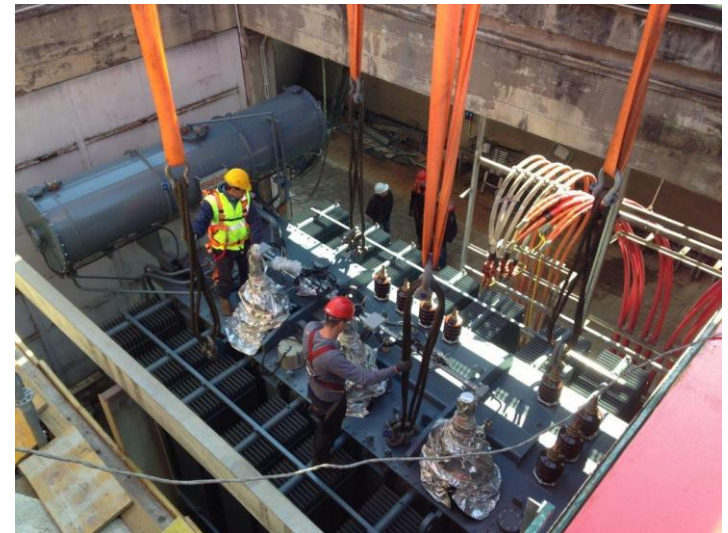
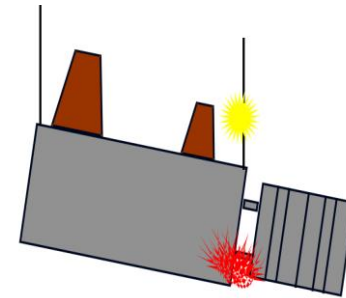
Alcuni esempi di criticità durante il trasporto



INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

Alcuni esempi di criticità durante il posizionamento



INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

Alcuni esempi di deformazione del nucleo causato da problematiche di trasporto



INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

Valutazione dell'integrità meccanico/elettrica del trasformatore.

I metodi tradizionali di prove elettriche effettuate su trasformatori quali:

- **misura della capacità degli avvolgimenti**
- **corrente di eccitazione**
- **misure della reattanza di dispersione di fase**

hanno dimostrato di non essere particolarmente sensibili a rilevare lo spostamento di un avvolgimento.

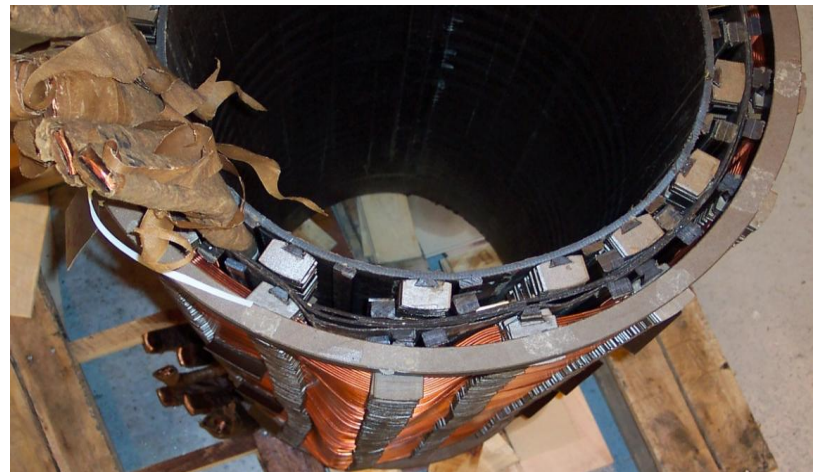
INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

Le deformazioni degli avvolgimenti e lo spostamento del nucleo se non rilevati tempestivamente si manifesteranno tipicamente in un guasto dielettrico o termico anche di grave entità tale da porre fuori servizio il trasformatore.

È pertanto indispensabile verificare l'integrità sia meccanica che elettrica dei trasformatori durante la normale fase di vita, dopo un evento di corto circuito e anche dopo il normale trasporto.

Una tecnica di rilevazione anticipata di un tale fenomeno è **essenziale.**



INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

STATO DELL'ARTE

L'Analisi della risposta in frequenza è riconosciuta come lo strumento diagnostico più sensibile per rilevare qualsiasi deformazione meccanico/elettrica all'interno dei trasformatori anche se di modeste entità.



**LA SCATOLA NERA CORRISPONDE
AD UNA IMPRONTA DEFINITA**

L'Analisi SFRA permette di valutare:

- il movimento/integrità del nucleo magnetico;
- la deformazione e lo spostamento dell'avvolgimento;
- i difetti nella messa a terra del nucleo;
- il parziale collasso di un avvolgimento;
- la deformazione della cassa;
- lo stato delle strutture di bloccaggio (rottura o allentamento);
- i corto circuiti di spire e/o avvolgimenti interrotti.

INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

ORIGINI

L'analisi di risposta in frequenza è stata sviluppata nel corso degli anni ed è stata introdotta già a partire dal **1960**.

Inizialmente ha utilizzato la tecnica di misurazione dell'impulso e il software è stato utilizzato per trasformare i risultati dal dominio temporale al dominio di frequenza.

Negli **anni '70** la Società **Ontario Hydro** ha pensato di utilizzare il dominio in frequenza iniettando un segnale sinusoidale in tensione su un terminale di un avvolgimento e misurando direttamente la risposta in frequenza data dall'avvolgimento su un altro terminale.

Si può già trovare un **articolo del 1978** in cui i due **Ing. E.P. Dick e C. Erven** svilupparono un approfondito studio sul metodo di misura dello SFRA.

Nel **1980 la National Grid Company (UK)** ha raffinato la tecnica usando il metodo della spazzolata di frequenza in quanto rilevatosi molto più efficace e precisa.

Gli **anni '90** hanno visto l'introduzione dei **primi strumenti commerciali portatili** costruiti anche per essere utilizzati in sito.

INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

ORIGINI

SFRA



**SWEEP FREQUENCY RESPONSE
ANALYSIS**

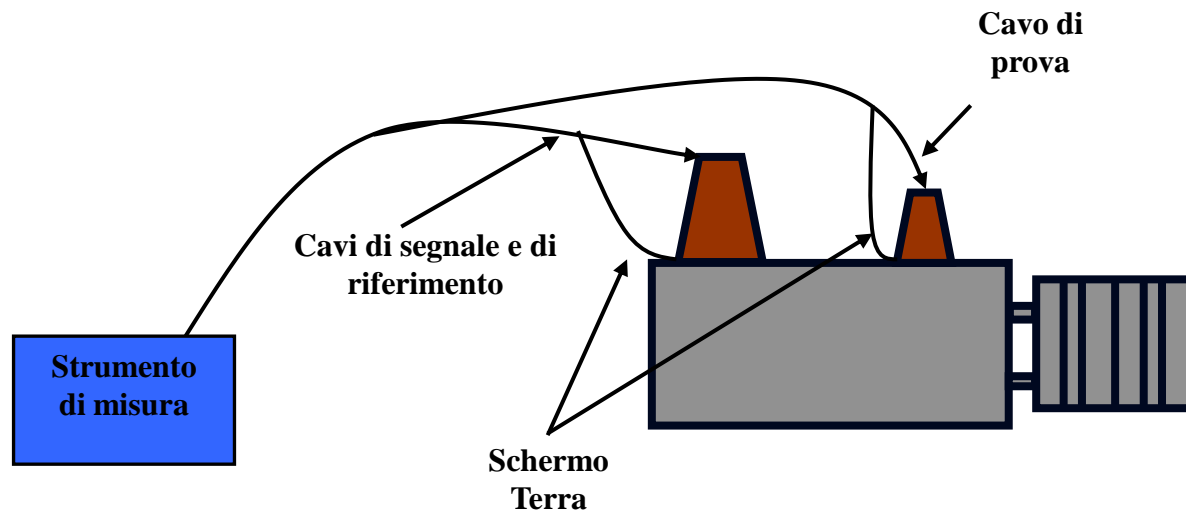
**ANALISI DELLA RISPOSTA
A UNA SPAZZOLATA
DI FREQUENZA**

Ovvero come risponde un avvolgimento sottoposto ad una tensione sinusoidale costante ma di frequenza diversa.

INTRODUZIONE ALLA MISURA SFRA

ORIGINI


Generalmente la tensione applicata dipende dallo strumento in uso ma varia da 0.2 a circa 20 V peak to peak e quindi una tensione rms massima di circa 7 V. La frequenza viene variata da 0.2 Hz fino a 20 MHz (in funzione dello strumento utilizzato).



Il rapporto tra il segnale di tensione in uscita e il segnale di tensione in entrata fornisce quella che viene chiamata **“funzione di trasferimento del trasformatore”**.

IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with several droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura SFRA**
 - **Fondamenti di analisi di risposta in frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

FONDAMENTI DI ANALISI DI RISPOSTA IN FREQUENZA

TRASFORMATORE COME RETE RLC

Il trasformatore è considerato una rete complessa di componenti RLC.

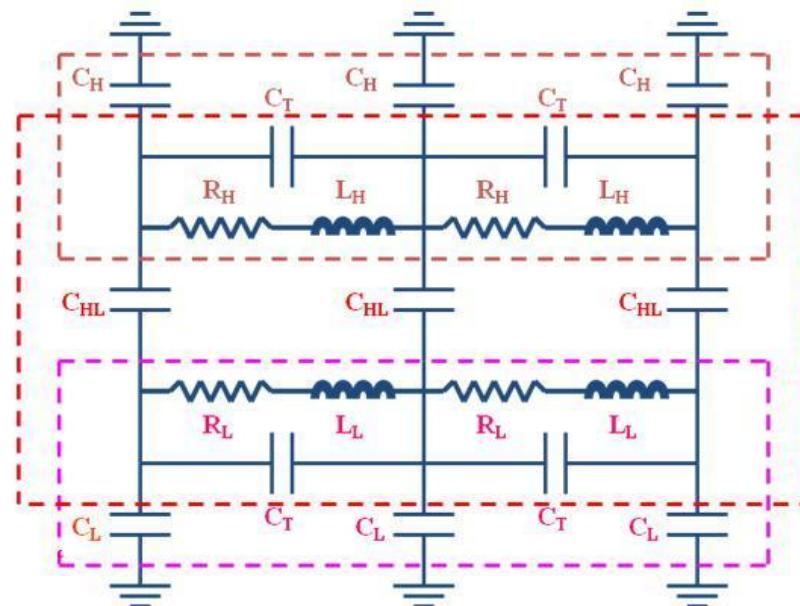
I contributi a questo complesso circuito RLC sono dati da:

- resistenza dell'avvolgimento
- induttanza delle bobine degli avvolgimenti
- capacità fra i vari livelli di isolamento tra le bobine, tra avvolgimenti, tra avvolgimento e nucleo/cassa, etc.

Circuito equivalente semplificato con componenti RLC

Avvolgimento **AT**

Avvolgimento **BT**

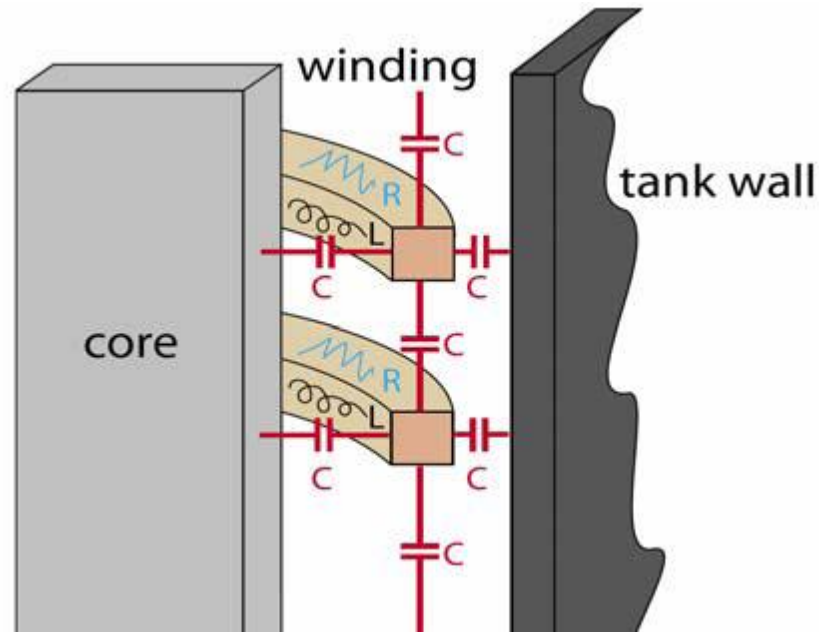


Ogni LC
fornisce un punto di
risonanza

Inter-Avvolgimento

FONDAMENTI DI ANALISI DI RISPOSTA IN FREQUENZA

TRASFORMATORE COME RETE RLC



Qualsiasi forma di danno fisico al trasformatore determina i cambiamenti di questa rete RLC.

Questi cambiamenti sono ciò che attraverso la misura SFRA viene evidenziato.

La risposta in frequenza viene eseguita applicando un **segnale di bassa tensione a frequenza variabile** agli avvolgimenti del trasformatore e misurando sia il segnale di ingresso sia quello in uscita.

FONDAMENTI DI ANALISI DI RISPOSTA IN FREQUENZA

TRASFORMATORE COME RETE RLC

Il rapporto tra questi due segnali fornisce la risposta richiesta.

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO



Magnitudine

Impedenza

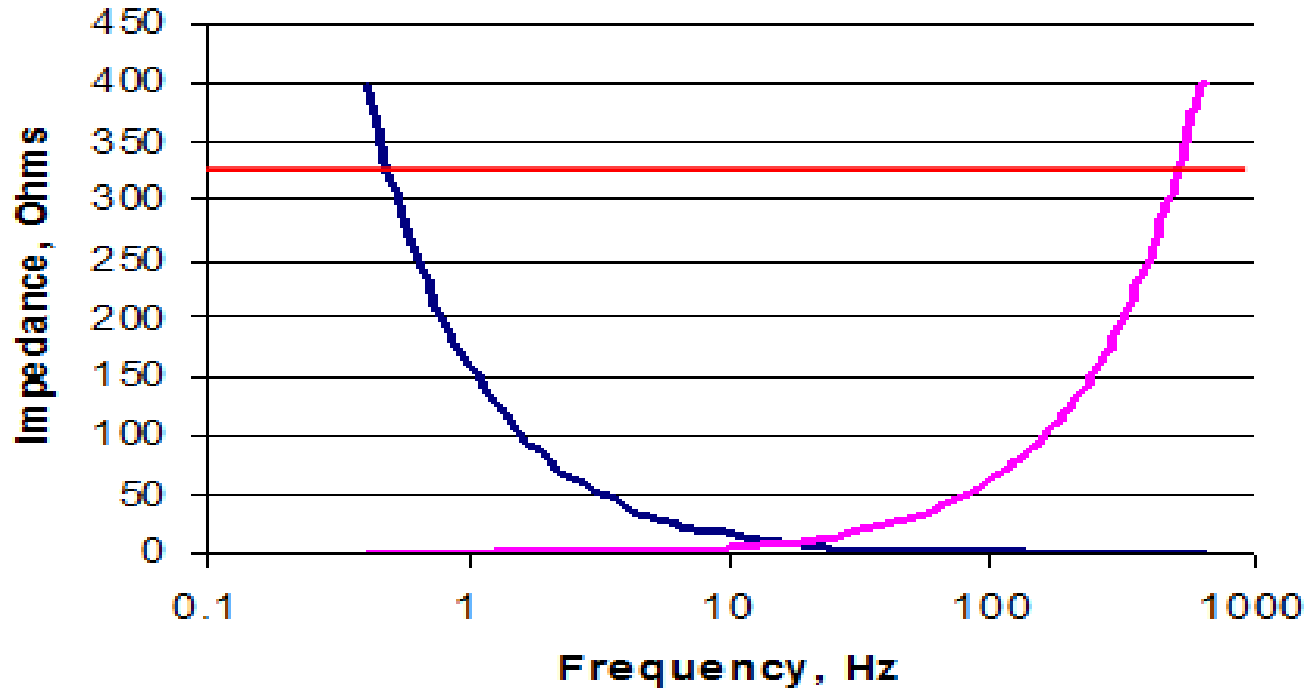
Fase

Per diverse frequenze la rete RLC offre diversi percorsi di impedenza. Quindi, la funzione di trasferimento ad ogni frequenza è una misura della effettiva impedenza della rete RLC del trasformatore.

Qualsiasi deformazione geometrica modifica la rete RLC che, a sua volta, cambia la funzione di trasferimento a diverse frequenze e quindi evidenzia l'area di analisi.

FONDAMENTI DI ANALISI DI RISPOSTA IN FREQUENZA

TRASFORMATORE COME RETE RLC



RESISTENZA ———

INDUTTANZA ———

CAPACITA' ———

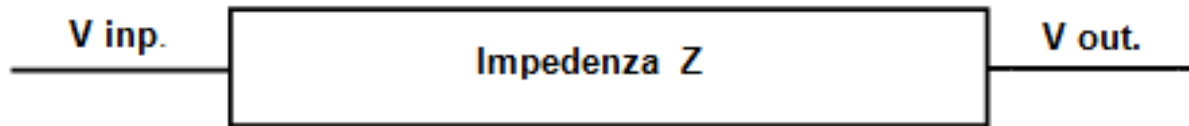
RISPOSTA PIATTA

L'IMPEDENZA AUMENTA CON LA FREQUENZA; ALLE BASSE FREQUENZE E' UN CIRCUITO APERTO
 $X_L = \omega \times L$

ALL'AUMENTARE DELLA FREQUENZA L'IMPEDENZA SI RIDUCE, ALLE BASSE FREQUENZE E' UN CIRCUITO APERTO
 $X_C = 1/(\omega \times L)$

FONDAMENTI DI ANALISI DI RISPOSTA IN FREQUENZA

TRASFORMATORE COME RETE RLC




Dalle esperienze e dagli studi fatti si è rilevato più opportuno rappresentare il rapporto tra la V_{out} e la V_{inp} in scala logaritmica e cioè tra le potenze che le tensioni svilupperebbero se applicate alla medesima impedenza (Impedenza tipica 50 ohm).

$$\begin{aligned} \text{Rapp. di pot. (db)} &= 10 \log_{10} (W_{out} / W_{inp})^2 \\ &= 20 \times \log_{10} (V_{out} / V_{inp}) \end{aligned}$$

IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with various droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura SFRA**
 - **Fondamenti di analisi della risposta in frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

INTERPRETAZIONE DEI DATI

NORMATIVE VIGENTI

L'interpretazione della misura SFRA richiede una buona conoscenza della misura e una lunga e accurata conoscenza di casi esaminati.

Dalla regione della traccia dove la differenza si manifesta è possibile individuare la zona di origine del problema.

Le differenti bande di frequenza hanno diverse sensibilità in base al tipo di problema.

L'**impedenza** a diverse frequenze è relativa alla resistenza, alla capacità e alla induttanza di un trasformatore.

La **resistenza** è legata alla costruzione fisica dell'avvolgimento (cortocircuito, circuito aperto, ecc.) e si traduce in uno spostamento verticale (asse dB) della risposta.

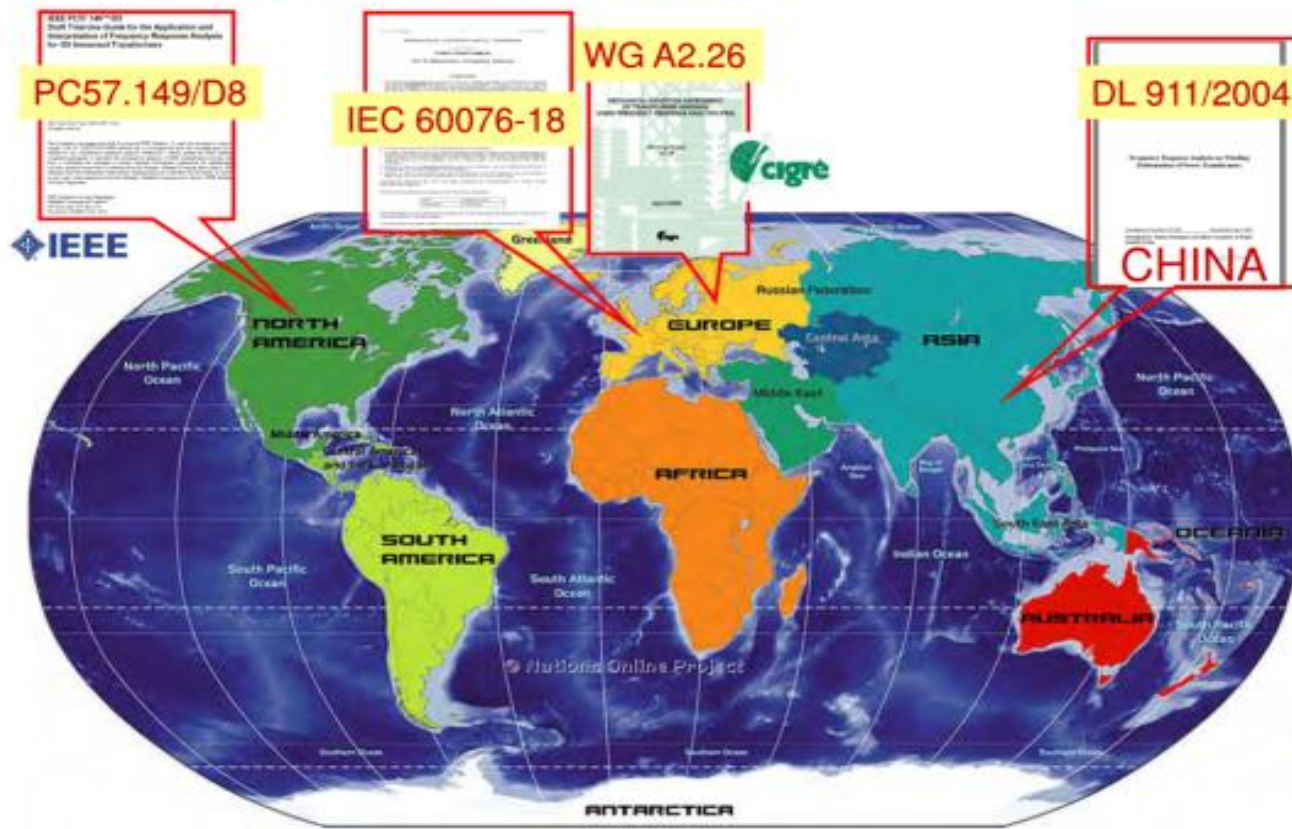
La capacità e l'induttanza sono legati alla geometria dell'avvolgimento (deformazione) e provoca uno spostamento orizzontale o uno spostamento di frequenza.

INTERPRETAZIONE DEI DATI

NORMATIVE VIGENTI


Le norme danno valide indicazioni sulla interpretazione della misura.

Standardization in the World



IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with various droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura dello SFRA**
 - **Fondamenti di analisi della risposta in frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

ALCUNI CASI STUDIO

ESEMPI PRATICI

SEA SpA ha condotto diversi studi sul comportamento della risposta in frequenza per comprovare quanto già riportato in letteratura e nelle norme.

Tali studi ci permettono di avere una conoscenza approfondita e ampia sulla interpretazione della analisi SFRA come misura diagnostica e preventiva da eseguire in impianto.


Seguono alcuni casi studio applicabili anche al settore idroelettrico:

- 1 - Effetti della presenza di olio nel trasformatore**
- 2 - Spostamento del canale di raffreddamento**
- 3 - Mancanza del canale di raffreddamento**
- 4 - Guasto per corto circuito di spire**
- 5 - Mancanza del collegamento di terra del nucleo**



IDROELETTRICO IN ITALIA

ARGOMENTI DI DISCUSSIONE

- 
- A vertical graphic on the left side of the slide showing a dynamic splash of water with various droplets and bubbles, rendered in shades of light blue and white.
- **SEA SPA**
 - **Introduzione alla misura dello SFRA**
 - **Fondamenti di analisi della risposta della frequenza**
 - **Interpretazione dei dati**
 - **Alcuni casi studio**
 - **Conclusioni**

CONCLUSIONI

UNA VISIONE DI INSIEME

L'analisi SFRA può essere eseguita:

- per ottenere "l'impronta digitale" iniziale della risposta in frequenza del trasformatore come record per il futuro riferimento /confronto;
- immediatamente dopo un cortocircuito esterno, specialmente per guasti elettricamente più vicini al trasformatore;
- come misura dopo un trasporto o ricollocazione del trasformatore;
- come controllo di pre-commissioning;
- come misura periodica da eseguirsi una volta ogni due anni (controllo di manutenzione);
- in caso di terremoti.



CONCLUSIONI

UNA VISIONE DI INSIEME

- La misura della risposta in frequenza sui trasformatori è un metodo di prova molto completo ed efficace e la sua applicazione diventa interessante e indispensabile sia per i costruttori che per gli utilizzatori dei trasformatori. Dal punto di vista della prevenzione nel lungo termine, il metodo SFRA è molto utile e lo stesso fornisce importanti informazioni sullo stato del trasformatore stesso rispetto allo stato del collaudo in fabbrica.
- SFRA è un potente strumento per la rilevazione del movimento degli avvolgimenti e altri guasti che influenzano l'impedenza del trasformatore. Esso copre anche basse frequenze e in questo modo può rilevare guasti al nucleo, cortocircuiti o circuiti aperti.



CONCLUSIONI

UNA VISIONE DI INSIEME

- SFRA misura direttamente nel dominio di frequenza, quindi non è necessaria un'ulteriore gestione matematica dei dati.
- SFRA, se utilizzato in congiunzione con altri strumenti diagnostici, può fornire una valutazione completa sulla condizione del trasformatore.
- SFRA è un test non distruttivo e può essere eseguito off-line su qualsiasi trasformatore di potenza indipendentemente dal suo valore di tensione nominale.
- I risultati ottenuti sono affidabili, ripetibili e non influenzati dalla posizione di prova, dal tempo e dalle interferenze dell'elettromagnetismo. Il test è facile da eseguire e funzionante, tuttavia le misure devono essere fatte con attenzione e da personale qualificato per assicurare una diagnosi affidabile e significativa.





Thank you!



HYDROMATTERS 4.0
IDROELETTRICO IN ITALIA – CONFERENCE & PRODUCT EXPO

TRANSFORMING THE FUTURE

