



Rivelatore a distanza del campo elettrico di una linea di trazione a 3 kVcc: studio preliminare

Remote detector of electric field of a 3kV DC traction line: a preliminary study

Paolo DI BARBA^(*)

Ciro IANNIELLO^(*)

Sandro MUCCIFUORI^(**)

Giovanni FRANCONI^(**)

Maria Evelina MOGNASCHI^(*)

Luca CANEVARI^(*)

Maurizio MALIORE^(**)

Francesco PETITO^(**)

Sommario - Nell'articolo si prende in esame il problema di accertare la toltà tensione per linee di trazione a 3kVcc mediante un dispositivo in grado di rivelare il campo elettrostatico di una linea aerea, nell'ambito di una campagna per la sicurezza, promossa da Rete Ferroviaria Italiana RFI SpA all'interno dell'intera rete italiana.

Vengono passati in rassegna i principali metodi di rivelazione del campo alcuni comunemente utilizzati, altri ancora in fase di studio e i relativi dispositivi che li implementano. Per ciascun dispositivo si evidenziano pregi e limiti, ricavando un'indicazione in vista di uno studio finalizzato alla progettazione e realizzazione di un nuovo ausilio per il personale di RFI che opera sulle linee di trazione.

1. Introduzione

Le operazioni di manutenzione della linea elettrificata ferroviaria prevedono misure di prevenzione che non possono prescindere dal togliere la tensione alle linee di trazione.

In questo studio, come punto di partenza, si prende in esame la procedura per l'effettuazione della toltà tensione di impianti di trazione che insistono sull'esercizio ferroviario italiano.

In proposito, le norme CEI, per le linee alimentate a 3kVcc (corrente continua) prevedono la fase di verifica preliminare dell'avvenuta toltà tensione.

Summary - The paper tackles the problem of ascertaining the 3kV_{DC} voltage disconnection of traction lines by means of a device capable of detecting the electrostatic field of an overhead cable, as a part of a safety campaign promoted by the Italian railway network RFI SpA within the entire network.

The main methods of field detection are reviewed, some of which are commonly used, others are still under study. For each considered device we highlight advantages and limits, obtaining criteria in view of the design and implementation of a new aid for RFI personnel, responsible of the traction line maintenances.

1. Introduction

The maintenance operations of the electrified railway line must take into account the de-energization of the traction lines.

In this study, as a starting point, we examine the procedure of de-energization of traction plants of the Italian railway.

In this respect, IEC standards require a preliminary assessment of the de-energization state of the lines.

In particular, the IEC Standards [11-27] setup five phases for the procedure of de-energization:

- disconnect the relevant part of the plant;
- adopt countermeasures against the untimely reclosing of the disconnecting switches;

^(*) Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Università di Pavia.

^(**) Rete Ferroviaria Italiana, Direzione Produzione, Sicurezza Produzione.

^(*) Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Università di Pavia.

^(**) Rete Ferroviaria Italiana, Direzione Produzione, Sicurezza Produzione.

In particolare, le Norme CEI [11-27] prevedono cinque fasi per la procedura di messa fuori tensione:

- sezionare la parte di impianto interessata al lavoro;
- prendere provvedimenti contro la richiusura intempestiva dei dispositivi di sezionamento;
- verificare che l'impianto sia fuori tensione;
- eseguire la messa a terra e in cortocircuito delle parti sezionate in AT e in MT e, ove richiesta, anche in BT;
- provvedere alla protezione verso le eventuali parti attive adiacenti.

La verifica preliminare dell'avvenuta toltà tensione deve essere svolta prima dell'installazione dei dispositivi di corto circuito i quali soli garantiscono:

- la messa in sicurezza della zona elettrica oggetto d'intervento;
- la protezione da potenziali rialimentazioni.

RFI prevede la verifica strumentale preliminare, con l'ausilio di un dispositivo di rilevamento della presenza di tensione con modalità non a contatto, per gli impianti a 25kVca (corrente alternata).

Ad oggi l'industria di settore non mette a disposizione, per analoga verifica strumentale preliminare su linee a 3kVcc, l'utilizzo di un rilevatore di tensione non a contatto.

Per questa ragione, RFI ha promosso e attivato uno studio finalizzato alla progettazione e realizzazione di un dispositivo di rilevamento della presenza di tensione a distanza di sicurezza, che fra gli utilizzi possibili è anche adeguato a verificare l'assenza di tensione in tutte le configurazioni d'impianto in ambiente ferroviario con alimentazione a 3kVcc.

Tale dispositivo dovrà rivelare in modo selettivo per la linea o ente oggetto di lavorazione, in modo tale che lo strumento possa essere utilizzato indipendentemente dal fatto che nelle vicinanze sia presente una seconda linea di contatto (in seguito LdC) o ente alimentato. L'utilizzo dello strumento deve essere possibile, oltre che per le configurazioni impiantistiche più semplici, come ad esempio una catenaria di piena linea, anche per tutte le configurazioni d'impianto, normalmente presenti in ambiente ferroviario.

Nel paragrafo 2 vengono descritti i principali metodi di rivelazione del campo elettrico statico, tra cui il principio dell'elettroscopio elettronico, in vista di un dispositivo di piccolo ingombro, facilmente trasportabile e con una buona sensibilità al campo elettrico.

Nel paragrafo 3 viene proposta un'analisi comparativa, mettendo in luce pregi e limiti dei dispositivi che implementano i metodi di rivelazione considerati.

- *check if the system is de-energized;*
- *ground and short-circuit the sections in HV and in MV and, where required, also in LV;*
- *provide protection against any neighboring parts subject to voltage.*

The preliminary assessment of the de-energization must be done before the installation of the short-circuit devices, which, by themselves, guarantee:

- *the securing of the electrical zone under maintenance;*
- *protection against possible re-energization.*

RFI prescribes the preliminary instrumental verification, with the aid of a contactless device for detecting the electric field, for 25 kV_{AC} systems.

Up to now, a contactless device for similar preliminary verification on 3kV_{DC} lines is not available on the market.

On the other hand, the devices available on the market need a contact with the traction line and therefore they are not suitable for this purpose.

For this reason, RFI has promoted a study aimed at the design and implementation of a device (sensor) for detecting the electric field of a overhead cable at a safe distance; the same device is also adequate to verify that any electric system with 3kV_{DC} power supply in the railway environment is not energized.

This sensor will have to selectively detect a line or a system, even if another contact line or device is located in the neighboring. The use of the sensor must be possible, as well as for simple plant configurations, even for all system configurations, normally placed in the railway environment at 3 kV_{DC}.

In paragraph 2 the main methods of detection of the static electric field are described, including the principle of the electronic electroscopes, in view of a small-sized device, easily transportable and with a good sensitivity to the electric field.

In paragraph 3 a comparative analysis is proposed, highlighting the strengths and limitations of the devices that implement the detection methods considered.

2. Detection principles of the static electric field

The classical and one of the oldest principle used for detecting a static electric field is the electrostatic induction; the most common instrument used is the leaf electroscope [1].

The electroscope is made of two aluminum (or gold) leaves, shown schematically in Fig. 1, and a cylindrical metal cage (Z) closed by two flat circular slabs made of glass. A thin wire mesh is applied on the two glass slabs, in case the shield of the cylindrical cage is not sufficient.

The leaves are glued on rod A₁ A₂ and a scale (G) is engraved on one of the two glasses, which allows to read the divergence angle of leaves F₁ F₂.

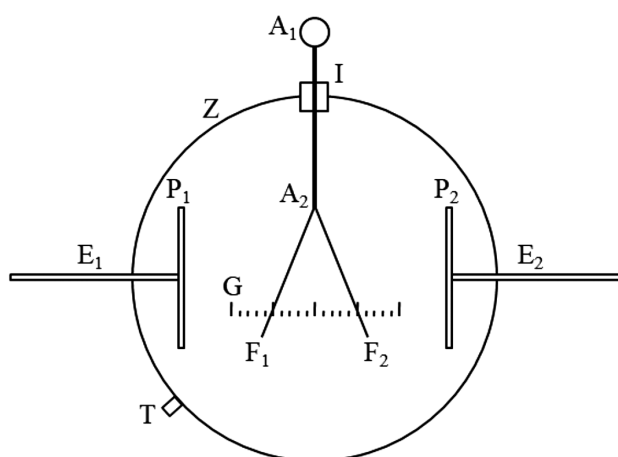


Fig. 1 - Elettroscopio a foglie, i simboli sono spiegati nel testo.

Fig. 1 - Leaf electroscope, symbols explained in the text.

2. Principi di rivelazione del campo elettrico

Il principio classico, già utilizzato agli albori dell'elettrostatica, è quello basato sull'induzione elettrostatica; lo strumento storicamente più utilizzato è stato l'elettroscopio a foglie [1].

L'elettroscopio a foglie di alluminio (o oro), rappresentato schematicamente in Fig. 1, è costituito da una gabbia metallica di forma cilindrica (Z) chiusa da due facce piane di vetro su cui viene applicata un'eventuale rete metallica di filo sottile nel caso in cui la schermatura della gabbia cilindrica non sia sufficiente.

Le foglie vengono incollate sull'asta A_1 A_2 e su uno dei due vetri viene incisa una scala (G) che consente di leggere la divergenza delle foglie F_1 F_2 .

A_1 è il pomo dell'elettroscopio mentre I è un tappo costituito da un ottimo materiale isolante.

T è un morsetto che consente di collegare a terra la gabbia.

P_1 e P_2 sono due piatti metallici, la cui distanza può essere regolata tramite le due guide E_1 ed E_2 , questi vengono avvicinati fino ad imprigionare le sottilissime foglie per evitare danni provocati da vibrazioni durante il trasporto dello strumento mentre restano distanti durante l'utilizzo. Svolgono però anche la funzione di scaricare l'elettroscopio quando viene sottoposto ad una carica eccessiva che potrebbe portare le foglie a contatto con la gabbia, creando un cortocircuito che può determinare la fusione delle foglie se l'energia fornita è sufficientemente elevata.

Il funzionamento si basa sulla forza che si genera tra due cariche con segno uguale. Quando il pomo viene sottoposto ad un campo elettrostatico, le foglie si caricano dello stesso segno e pertanto sono sottoposte ad una forza di repulsione che divarica le foglie stesse.

A_1 is the knob of the electroscope while I is a cap made of an insulating material.

T is a clamp that allows the cage to be grounded.

P_1 and P_2 are two metal plates, which distance can be adjusted through the two guides E_1 and E_2 , these are approached until the thin leaves are trapped to avoid damage caused by vibrations during the transport of the instrument while they remain distant during the use. However, they also have the function of discharging the electroscope when it is subject to an excess charge that could bring the leaves in contact with the cage, so creating a short circuit that can cause the fusion of the leaves.

The operation is based on the force that is generated between two like charges. When the knob is subject to an electrostatic field, the leaves are charged with the same sign and are therefore subject to a repulsion force which makes the leaves diverge.

However, the leaf electroscope is a rather delicate and generally bulky instrument and therefore is not suitable for portable use. Furthermore, it is mainly sensitive to strong static fields.

On the other hand, the most exploitable technologies are sensitive to a time-varying electric field, so there is the need to make the static field variable in time in order to be sensed. This is achieved by periodically screening or modulating it in time.

The available devices that allow to sense the static electric field are the following:

- the field-mill;
- the electric field sensor based on MEMS technology;
- the electro-optical electric field sensor;
- the electronic electroscope.

The first three devices exploit a variable electric field, unlike the last one that is based on the principle of electrostatic induction.

The following paragraphs will explain the operating principles of the aforementioned devices.

2.1. Field-mill

The field-mill [2] is mainly composed of two flat circular electrodes, coaxially located and mutually insulated. Both electrodes are divided in drilled sectors.

The upper electrode, called shielding electrode, is grounded and it is connected to a shaft, driven by a small motor, an integral part of the sensor itself.

The lower fixed electrode, called detection electrode, is connected to the measurement circuit (Fig. 2).

When the device is exposed to an electric field E , considering that the shielding electrode turns by means of the motor, it turns out to be that the detection electrode is periodically exposed to the field and a charge is thus induced on

Tuttavia, l'elettroscopio a foglie è uno strumento piuttosto delicato e generalmente ingombrante e per questo mal si presta al suo utilizzo in esercizio. Inoltre, è sensibile a campi statici di elevata entità.

Per contro, gran parte delle tecnologie sfruttabili sono accomunate dalla necessità di rendere in qualche modo variabile il campo elettrico. Ciò si ottiene schermandolo periodicamente o modulandolo in modo da renderlo variabile.

I dispositivi attualmente disponibili che consentono di rivelare il campo elettrico statico sono:

- il mulinello elettrostatico;
- il sensore di campo elettrico basato su tecnologia MEMS;
- il sensore elettro-ottico di campo elettrico;
- l'elettroscopio elettronico

Di questi, i primi tre sfruttano un campo elettrico variabile, al contrario dell'ultimo che riprende il principio dell'induzione elettrostatica.

Nei successivi paragrafi verranno illustrati i principi di funzionamento dei suddetti dispositivi.

2.1. Mulinello elettrostatico (field-mill)

Il mulinello elettrostatico [2] è composto principalmente da due elettrodi piatti di forma circolare, disposti in direzione coassiale e isolati tra loro. Entrambi gli elettrodi sono divisi nello stesso modo in settori forati.

L'elettrodo superiore, detto di *schermatura*, viene collegato a terra ed è calettato ad un albero, trascinato da un piccolo motore, parte integrante del sensore stesso.

L'elettrodo inferiore, fisso, detto di *rilevazione*, viene collegato al circuito di misura (Fig. 2).

Quando il dispositivo viene esposto ad un campo elettrico E , considerando che l'elettrodo di schermatura gira per mezzo del motore, si ottiene che l'elettrodo di rilevazione viene esposto periodicamente al campo e si induce così una carica sulla superficie che è proporzionale alla parte esposta della superficie stessa.

Per la legge di Gauss sappiamo che il flusso dielettrico uscente da una qualsiasi superficie chiusa è uguale alla carica elettrica q contenuta in essa. Considerando, per esempio, una superficie cilindrica chiusa A_{tot} , coassiale con l'albero del mulinello e contenente l'elettrodo di rilevazione, si ricava che

$$q = \int_{A_{tot}} \epsilon \bar{E} \cdot d\bar{A} \quad (1)$$

dove ϵ è la permittività dielettrica del mezzo. Anche nel caso di campi non uniformi, è possibile, in prima approssimazione, supporre che il campo elettrico incident-

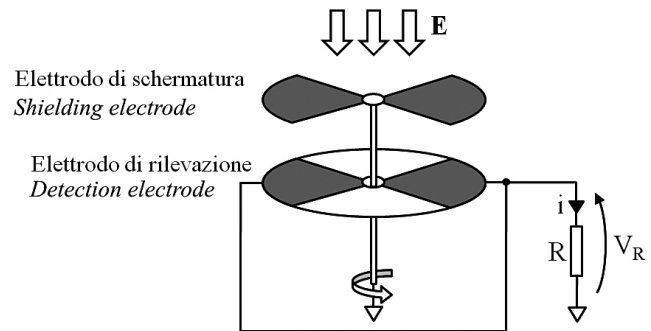


Fig. 2 - Mulinello elettrostatico (field-mill).

Fig. 2 - Field-mill.

the surface; this induced charge is proportional to the exposed part of the surface.

By the Gauss law, we know that the dielectric flux leaving a closed surface is equal to the electric charge enclosed in it. Considering, for example, a closed cylindrical surface A_{tot} , coaxially located to the shaft and enclosing the detection electrode, one has

$$q = \int_{A_{tot}} \epsilon \bar{E} \cdot d\bar{A} \quad (1)$$

where ϵ is the dielectric permittivity of the medium. Even in the case of non-uniform fields, at a first glance, it is possible to suppose that, if the electrode surface is sufficiently small, the electric field incident on the detection electrode is uniform. Then the equation can be rewritten as

$$q = \epsilon E A_{tot} \quad (2)$$

It is possible to obtain the magnitude of the electric field starting from the induced charge, by measuring the voltage v_R (Fig. 2) across the resistor R . For which, knowing that

$$\frac{dq}{dt} = i = \frac{v_R}{R} \quad (3)$$

the field can be obtained from the following formula:

$$E = \left[\epsilon R \frac{dA(t)}{dt} \right]^{-1} v_R \quad (4)$$

2.2. Electrostatic field sensor based on MEMS

The electric field sensor based on MEMS ("Micro Electro-Mechanical System") is based on the principle of the induced charge [3]. Grounded shielding electrodes, fabricated via MEMS technology, are used to modulate the electric field incident on the surface of the N detection electrodes,

te sull'elettrodo di rivelazione sia uniforme se la superficie dell'elettrodo sia sufficientemente piccola. Allora l'equazione può essere riscritta come

$$q = \epsilon E A_{\text{tot}} \quad (2)$$

È possibile ricavare l'intensità del campo elettrico a partire dalla carica indotta, misurando la tensione v_R (Fig. 2) ai capi del resistore di misura di resistenza R . Per cui, sapendo che

$$\frac{dq}{dt} = i = \frac{v_R}{R} \quad (3)$$

si può ricavare il campo dalla seguente formula:

$$E = \left[\epsilon R \frac{dA(t)}{dt} \right]^{-1} v_R \quad (4)$$

2.2. Sensore di campo elettrostatico basato sui MEMS

Il sensore di campo elettrico basato sui MEMS ("Micro Electro-Mechanical System") si fonda sul principio della carica di induzione [3]. Vengono usati degli elettrodi di schermatura collegati a terra, costruiti con la tecnologia MEMS, per modulare il campo elettrico sulla superficie degli N elettrodi di rivelazione in modo da variare periodicamente il valore della carica indotta su di essi (Fig. 3).

Lo schermo è sottoposto ad un moto alternativo $\pm x$ nella direzione che provoca una modulazione dell'area di sovrapposizione tra gli elettrodi di rivelazione e la superficie su cui si vuole misurare il campo.

Si genera così una corrente alternata il cui valore di picco varia con l'intensità del campo elettrico. La corrente può essere amplificata e filtrata; infine, misurando la tensione V_{out} di uscita del circuito di misura si ricava il valore del campo elettrico.

Si suppone che una tensione costante nota sia applicata in modo da generare un campo elettrostatico E .

Dal momento che la capacità di rivelazione è proporzionale all'area sovrapposta, l'oscillazione dell'elettrodo di schermatura provoca una modulazione delle capacità di rivelazione. Questa capacità è data dall'equazione:

$$C = C_0 + C_m \sin(\omega_{\text{ris}} t) \quad (5)$$

dove ω_{ris} è la pulsazione di risonanza della struttura MEMS, C_0 è la capacità della struttura quando gli elettrodi di schermatura sono alla mezz'aria degli elettrodi di rivelazione (come in Fig. 3) e C_m è la capacità massima che si ottiene con uno spostamento x .

in order to periodically vary the value of the induced charge on them (Fig. 3).

The screen is subject to an alternate motion in the x -direction which causes a modulation of the overlap area between the detection and shielding electrodes.

As a result, an alternating current, which peak value varies with the magnitude of the electric field, is generated. The current can be amplified and filtered; finally, by measuring the output voltage v_{out} of the measuring circuit, the value of the electric field is obtained.

It is assumed that a known constant voltage V_k is applied in order to generate an electrostatic field E .

Since the capacitance is proportional to the superimposed area, the oscillation of the shielding electrode causes a modulation of the detection capacitance, which is given by the equation:

$$C = C_0 + C_m \sin(\omega_{\text{ris}} t) \quad (5)$$

where ω_{ris} is the angular frequency under resonance condition of the MEMS structure, C_0 is the capacitance of the structure when the shielding electrodes are aligned to the detection electrodes (as in Fig. 3) and C_m is the maximum capacitance obtained with a displacement x .

The current i_R is given by:

$$i_R = N V_k \frac{dC}{dt} = N E d C_m \omega_{\text{ris}} \cos(\omega_{\text{ris}} t) \quad (6)$$

where d is the distance between the shielding and the detection electrode. Thus, the time-varying field is given by:

$$E(t) = [R N d C_m \omega_{\text{ris}} \cos(\omega_{\text{ris}} t)]^{-1} V_{\text{out}} \quad (7)$$

Depending on the system used to generate the force required to move the shielding electrodes, the MEMS-based electric field sensors can be further classified into two

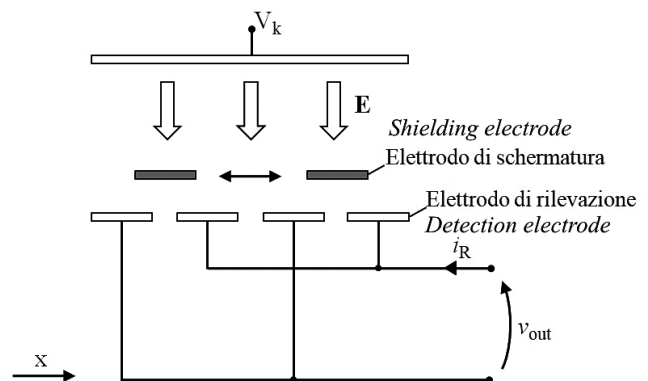


Fig. 3 - Principio di funzionamento del sensore basato sui MEMS.

Fig. 3 - Basic principle of the sensor based on MEMS.

La corrente i_R che si genera è data da:

$$i_R = NV_k \frac{dC}{dt} = NEdC_m \omega_{ris} \cos(\omega_{ris} t) \quad (6)$$

dove d è la distanza tra l'elettrodo di schermatura e l'elettrodo di rivelazione. Quindi, il campo tempo variante, è dato da:

$$E(t) = [RNdC_m \omega_{ris} \cos(\omega_{ris} t)]^{-1} V_{out} \quad (7)$$

A seconda del sistema usato per generare la forza necessaria a muovere gli elettrodi di schermatura, i sensori di campo elettrico basati sui MEMS possono essere ulteriormente classificati in due tipologie: struttura con pilotaggio elettrostatico e struttura con pilotaggio termico. Nel primo caso un elettrodo di pilotaggio esterno (non mostrato in Fig. 3) viene mosso grazie a delle forze elettrostatiche, nel secondo caso, invece, degli opportuni gradienti di temperatura inducono delle deformazioni della struttura e quindi permettono il movimento dell'elettrodo di pilotaggio.

2.3. Sensore elettro-ottico di campo elettrico

Il sensore elettro-ottico di campo elettrico è sostanzialmente un controllore di polarizzazione che sfrutta l'effetto elettro-ottico lineare (effetto Pockels) di alcuni cristalli per misurare il campo elettrico [3]. Quando questi particolari cristalli sono sottoposti ad un campo elettrico, la direzione di propagazione della luce cambia.

L'effetto di birifrangenza artificiale indotto sul cristallo da un campo elettrico applicato in direzione perpendicolare a quella di propagazione della luce produce una differenza di fase tra i due modi normali di propagazione nel mezzo. Questo porta ad un cambiamento di stato della polarizzazione all'uscita, in seguito un analizzatore converte questo cambiamento di stato in una corrispondente variazione dell'ampiezza del segnale. La luce modulata in ampiezza può essere trasmessa attraverso la fibra ottica e infine è possibile ricavare il valore del campo elettrico applicato utilizzando una unità di conversione optoelettronica.

Questi dispositivi elettroottici sono ancora materia di studio; per spiegare il funzionamento di questo principio si consideri il seguente dispositivo: il sensore è formato da una guida ottica ottenuta per diffusione di titanio (Ti) in direzione z fabbricata usando un substrato in niobato di litio ($LiNbO_3$) (Fig. 4). L'indice di rifra-

types: electrostatically driven structure and thermally driven structure. In the former case, an external driving electrode (not shown in Fig. 3) is moved thanks to electrostatic forces, while in the latter case, a temperature gradient induces deformations of the structure and therefore allow the movement of the driving electrode.

2.3. Electro-optical sensor

The electro-optical sensor is a polarization controller which, in order to measure the electric field, exploits the linear electro-optical effect (Pockels effect) of some crystals [3]. When these crystals are subject to an electric field, the direction of light propagation changes.

The effect of artificial birefringence, induced on the crystal by an electric field which is applied in a direction perpendicular to that of light, produces a phase difference between the two normal modes of propagation in the medium. This leads to a change of state of the bias at the output; then an analyzer converts this change of state to a corresponding variation in the amplitude of the signal. The amplitude-modulated light can be transmitted through the optical fiber and finally it is possible to derive the value of the electric field applied using an optoelectronic conversion unit.

These electro optical devices are still under study; to explain the operation of this principle let us consider the following device: the sensor is composed of an optical guide obtained by the diffusion of titanium (Ti) in the z -direction laid on a lithium niobate substrate ($LiNbO_3$) (Fig. 4). The refractive index of the $LiNbO_3$ crystal is anisotropic; in the z -direction it has an extraordinary index n_e while in the x - and y -directions an ordinary index n_o . The light propagates in the z -direction while the electric field E_y to be measured

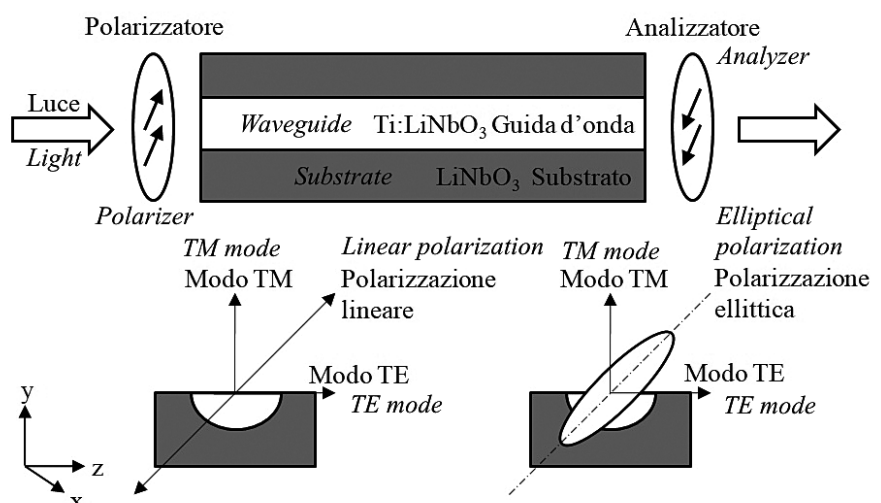


Fig. 4 - Principio di funzionamento di un sensore di campo elettrico usando una guida ottica in niobato di litio (sinistra).

Fig. 4 - Operating principle of an electric field sensor using a lithium niobate optical guide.

zione del cristallo di LiNbO_3 è anisotropo; in direzione z presenta un indice straordinario n_e mentre nelle direzioni x e y un indice ordinario n_o . La luce si propaga in direzione z mentre il campo elettrico E_y da misurare è applicato in direzione y . Quando un fascio di luce linearmente polarizzato con un angolo di 45° rispetto all'asse x entra nel cristallo, esso viene separato in due modi normali:

- modo trasversale elettrico (TE), polarizzato in direzione x ;
- modo trasversale magnetico (TM), polarizzato in direzione y .

I due campi ottici si propagano nel cristallo in direzione z poi vengono uniti nuovamente in un unico fascio di luce. Infine, questo fascio di luce attraversa un analizzatore che ha un angolo di -45° e viene convertito in un segnale elettrico da un foto-rivelatore (photo detector). L'ampiezza del segnale risulta linearmente proporzionale al campo elettrico da misurare.

Tuttavia, si deve evidenziare che, sotto l'effetto del campo elettrico, le cariche libere nel cristallo tendono ad accumularsi agli estremi del cristallo, schermando il campo elettrico da rivelare. Così il sensore elettro-ottico non può essere usato per misurare un campo elettrico prodotto da una tensione continua. Però se viene messo in movimento, l'effetto delle cariche accumulate ai bordi può essere trascurato; in particolare, se il sensore viene fatto ruotare, il campo incidente viene convertito da stazionario ad alternato con frequenza uguale a quella di rotazione.

2.4. Elettroscopio elettronico

Utilizzando dispositivi elettronici è possibile realizzare un elettroscopio molto sensibile e non eccessivamente complesso dal punto di vista costruttivo, basato sul principio dell'induzione elettrostatica [4].

Nella sua forma più semplice, il dispositivo è composto essenzialmente da un FET (transistor ad effetto di campo), da una batteria V_{cc} dell'ordine di qualche volt e da un LED luminoso collegati come in Fig. 5 [5].

Nella Fig. 5 è possibile notare un resistore R_1 collegato in serie all'elettrodo di gate del FET; questo resistore costituisce una protezione per il transistor, limitando le correnti di gate.

Il sensore di campo (antenna collegata al gate tramite il resistore R_1), elettricamente neutro, nel momento in cui viene sottoposto ad un campo elettrico, è sede di una ridistribuzione di cariche che pone il transistor in stato di conduzione. In particolare, l'effetto del campo esterno è quello di aumentare la tensione v_{GD} tra gate G e drain D , mettendo in conduzione il percorso source-drain S - D . Di conseguenza, il circuito è chiuso e la batteria causa un passaggio di corrente che accende il LED.

L'elettroscopio è molto sensibile e quindi risulta molto suscettibile ai disturbi esterni. Inoltre, si noti che questo

is applied in the y -direction. When a linearly polarized light beam with an angle of 45° to the x -axis enters the crystal, it is separated in two normal ways:

- electric transverse mode (TE), polarized in the x -direction;
- magnetic transverse mode (TM), polarized in the y -direction.

The two optical fields propagate in the crystal in the z -direction and are then joined again into a single beam of light. Finally, this beam of light passes through an analyzer that has an angle of -45° and it is converted into an electrical signal by a photo detector. The signal amplitude is linearly proportional to the electric field to be measured.

However, it must be pointed out that, under the effect of the electric field, the free charges in the crystal tend to accumulate at the ends of the crystal, shielding the electric field to be detected. Thus, the electro-optical sensor cannot be used to measure an electric field produced by a direct voltage. Nevertheless, if it is moved, the effect of the charges accumulated at the edges can be neglected; in particular, if the sensor is rotated, the incident field is converted from stationary to alternating with a frequency equal to that of rotation.

2.4. Electronic electroscope

Using electronic devices, it is possible to create a very sensitive electroscope, which is not excessively complex from the constructive point of view, based on the principle of electrostatic induction [4].

In its simplest form, the device is basically composed of a FET (field effect transistor), a V_{cc} battery (few volts) and a luminous LED "Light Emitting Diode" connected as in Fig. 5 [5].

In the Fig. 5 it is possible to notice a resistor R_1 connected in series to the gate electrode of the FET; this resistor protects the transistor, limiting the gate currents.

The field sensor (i.e. antenna connected to the gate through the resistor R_1), electrically neutral, when it is sub-

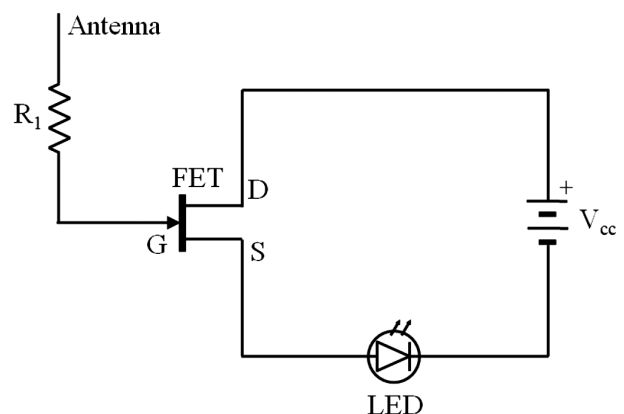
















Fig. 5 - Circuito basilare di un elettroscopio elettronico.
Fig. 5 - Basic circuit of an electronic electroscope.

Tabella 1 – Table 1

Confronto tra le tecnologie di sensore considerate
Comparison among the sensor technologies

	Sensibilità al campo elettrico <i>Sensitivity to electric field</i>	Complessità <i>Complexity</i>	Immunità ai disturbi <i>Noise immunity</i>	Portabilità <i>Portability</i>	Elementi in movimento <i>Movable components</i>
Elettroscopio a foglie <i>Leaf electroscope</i>	Bassa <i>Low</i> 	Basso <i>Low</i>	Bassa <i>Low</i> 	Bassa <i>Low</i> 	NO
Mulinello elettrostatico <i>Field-mill</i>	Bassa <i>Low</i> 	Basso <i>Low</i>	Bassa <i>Low</i> 	Alta <i>High</i>	SI <i>YES</i> 
Sensore basato su MEMS <i>MEMS-based sensor</i>	Media <i>Medium</i> 	Medio <i>Medium</i> 	Alta <i>High</i>	Media <i>Medium</i> 	SI <i>YES</i> 
Sensore elettro-ottico <i>Electro-optic sensor</i>	Alta <i>High</i>	Alto <i>High</i> 	Alta <i>High</i>	Media <i>Medium</i> 	SI <i>YES</i> 
Elettroscopio elettronico <i>Electronic electroscope</i>	Alta <i>High</i>	Basso <i>Low</i>	Bassa <i>Low</i> 	Alta <i>High</i>	NO

dispositivo è in grado di rivelare la presenza di tensione ma non di misurare il valore del campo come invece possono fare i dispositivi precedentemente illustrati.

Si noti, infine, che sarà necessario dotare l'elettroscopio elettronico di un circuito che permetta di provare l'efficienza del dispositivo, al fine di garantire la sicurezza dell'operatore in modo continuativo.

3. Conclusione: analisi comparativa

Il confronto tra le diverse tipologie di sensore finora descritte è riassunto nella Tabella 1 sulla base di alcuni criteri: sensibilità al campo, complessità, immunità ai disturbi, portabilità, presenza di elementi in movimento [3]. In tabella vengono rappresentate le condizioni favorevoli con il colore verde, mentre il colore rosso indica condizioni sfavorevoli:

Dal confronto emergono pregi e limitazioni di ogni tecnologia.

- L'elettroscopio a foglie presenta un basso costo di produzione, però risulta poco sensibile, rivelando solamente campi di elevate entità. Risulta inoltre difficilmente trasportabile a causa delle dimensioni e della fragilità delle foglie, nonché poco stabile nella misura.
- Il mulinello elettrostatico presenta una sensibilità e una stabilità bassa, risulta però relativamente poco complesso nella produzione e di facile trasportabilità.
- Il sensore basato sui MEMS ha una buona sensibilità ed una alta immunità ai disturbi a fronte di una complessità contenuta. La sua portabilità è buona, ma non risulta particolarmente robusto.
- Il sensore elettro-ottico, pur essendo ancora in fase di studio, sembra essere sensibile nella misura, ma di realizzazione complessa; la trasportabilità è buona

ject to an electric field, experiences a redistribution of charges which places the transistor in a conductive state. In particular, the effect of the external field is to increase the voltage v_{GD} between gate G and drain D, this way the source-drain path S-D becomes conductive. As a result, the circuit is closed and the battery causes a current flow that turns the LED on.

The electroscope is very sensitive and therefore it is not immune to external noise. Moreover, it should be noted that this device is able to detect the electric field but not to measure the magnitude of the field as the previously illustrated devices can do.

However, it is necessary to equip the electroscope with a circuit that allows to test the functioning of the device, in order to continuously guarantee the safety of the operator.

3. Conclusion: comparative analysis

The comparison between the different sensors described so far is summarized in the Table 1. This is based on some criteria: field sensitivity, complexity, noise immunity, portability, presence of moving components [3]. The table shows the desirable conditions with green color, while the red color indicates undesirable conditions:

The comparison shows the advantages and limitations of each technology.

The leaf electroscope has a low production cost, but it is not very sensitive, sensing only strong fields. It is also difficult to transport due to the size and fragility of the leaves, as well as being unstable in measurements.

The field-mill has a low sensitivity and stability, but it is relatively simple in production and easy to transport.

The sensor based on MEMS has a good sensitivity, a high immunity to noise and a limited complexity. Its portability is good, but it is not particularly robust.

ma compromessa dalla necessità di una fonte di luce esterna.

- L'elettroscopio elettronico è costruito con pochi componenti tutti di facile reperibilità. La sua sensibilità risulta alta, tanto da risentire anche di piccole variazioni del campo circostante a meno di non adottare delle misure correttive in fase di progettazione.

Sulla scorta dell'analisi comparativa svolta, per il proseguimento dell'attività di progettazione e sperimentazione, si è scelto di basarsi sul principio dell'induzione elettrostatica. In particolare, l'oggetto dello studio sarà la progettazione di un elettroscopio elettronico idoneo per applicazioni ferroviarie, con particolare attenzione alla progettazione del circuito, in modo da garantire una bassa sensibilità ai disturbi ma al tempo stesso una buona sensibilità al campo da rivelare.

The electro-optic sensor, although still under study, seems to be sensitive to the measurement, but of complex realization; portability is good but compromised by the need for an external light source.

The electronic electroscopie is built with just a few components that are easy to find. Its sensitivity is high, so it can be affected by small variations in the surrounding field unless corrective measures during the design are taken.

On the basis of the comparative analysis carried out, we decided to choose the principle of electrostatic induction for the design and implementation of the sensor. In particular, the subject under study will be the design of an electronic electroscopie suitable for railway applications, with particular attention to the design of the circuit, in order to guarantee a low sensitivity to noise but at the same time a high sensitivity to the field to be detected.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] E. PERUCCA, "Guida Pratica per Esperienze Didattiche di Fisica Sperimentale", Nicola ZANICHELLI Editore, 1937, pp. 100-103.
- [2] P. TANT, B. BOLSENS, T. SELS, D. VAN DOMMELEN, J. DRIESEN, R. BELMANS, "Design and application of a field mill as a high-voltage DC meter", Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, Vol. 56, 2007, pp. 1459-1464.
- [3] Z. GAO, Z. YU, R. ZENG, F. TIAN, J. YU, M. DAI, B. NIU, M. LI, L. LIU, R. LI, Y. LIAO, "Research on Measuring Methods and Sensors of High Voltage DC Electric Field", Vol. 2, 2014, pp. 850-854.
- [4] S. MUCCIFUORI, "Rilevatore di presenza/assenza di tensione per linee ferroviarie tradizionali", Ingegneria Ferroviaria, vol. 3, 2010, pp. 241-258.
- [5] A.S. SEDRA, K.C. SMITH, "Microelectronic circuits", Vol. 1. New York: Oxford University Press, 1998.