

# **Nouvelle approche des mises à la terre : comportement des mises à la terre vis-à-vis des phénomènes périodiques et transitoires**

Autor(en): **Sauvain, Hubert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des  
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de  
l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des  
Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **86 (1995)**

Heft 23

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902508>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Les mises à la terre ont pour but de limiter, en cas de défaut, les tensions de pas et de toucher. Elles doivent aussi assurer une équipotentielle pour limiter les perturbations électromagnétiques. Le comportement d'une mise à la terre dépend cependant fortement de la fréquence du phénomène perturbateur. Son évolution en fonction de la fréquence est analysée dans cet article.

# Nouvelle approche des mises à la terre

## Comportement des mises à la terre vis-à-vis des phénomènes périodiques et transitoires

■ Hubert Sauvain

On définit le plus souvent les performances des mises à la terre à l'aide d'une résistance du point de vue électrique. Cette approche est justifiée dans les basses fréquences (courant continu,  $16^{2/3}$  et 50 Hz). Elle n'est par contre plus valable pour les composantes harmoniques et les régimes transitoires (manœuvres dans les postes, foudre, perturbations électromagnétiques dans les équipements auxiliaires de contrôle-commande). La présente publication s'attache à dresser l'évolution du comportement d'une mise à la terre en fonction de la fréquence. On retiendra les paramètres: résistance, effet pelliculaire, inductance, impédance, terre équipotentielle, effet d'antenne.

### Mises à la terre dans un poste à haute tension

Le principe général consiste à limiter la tension de pas et la tension de toucher pour protéger le personnel exploitant. On considère comme référence le court-circuit à la terre donnant le courant maximum de défaut. La tension maximale admissible de pas ou de toucher est inversement proportionnelle à la racine carrée du temps de défaut. On a donc intérêt à couper au plus vite le courant de défaut.

Le plus souvent on fait appel à une longue expérience pour disposer les conducteurs de mises à la terre dans le sol, sous la forme de mailles, piquets ou ceintures. On procède ensuite à la mise en service à des mesures de vérification avec injection de courant à 50 Hz. La dissociation entre la partie projet et la partie contrôle final

défavorise cette méthode, bien qu'elle ait toute sa valeur en reposant sur une longue expérience.

### Calcul d'un système généralisé de mise à la terre d'un poste à haute tension

On peut calculer des configurations très simples de mises à la terre à l'aide de relations analytiques [1]. La forme la plus simple de mise à la terre calculable est l'électrode hémisphérique. C'est une solution théorique et non utilisée dans la pratique (fig. 1). Cette électrode se calcule à l'aide de la relation analytique suivante:

$$U = I \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi r^2} dr = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (1)$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (2)$$

- $\rho$  résistivité du sol; valeur typique 100 à 1000  $\Omega\text{m}$
- $r$  distance depuis le centre de la prise de terre; valeur typique pour la tension de pas 1 m
- $r_0$  rayon de l'hémisphère
- $R$  résistance de la prise de terre générant une tension efficace  $U$  pour un courant de défaut efficace  $I$

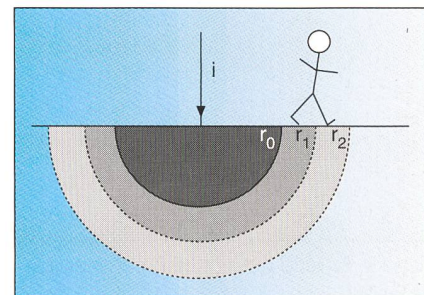


Figure 1 Prise de terre hémisphérique

#### Adresse de l'auteur:

Hubert Sauvain, ing. él. dipl. EPFL et SIA,  
EMC Fribourg SA, 1728 Rossens.

Une autre configuration relativement simple à calculer et très utilisée dans la pratique est le piquet de terre (fig. 2). Cette relation repose sur une intégrale définie cylindrique. Selon ANSI/IEEE Std 80-1986, la valeur limite d'intégration, soit le rayon du cylindre fictif, est basée sur la longueur du piquet:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \left[ \frac{2l}{d/2} \right] \quad (3)$$

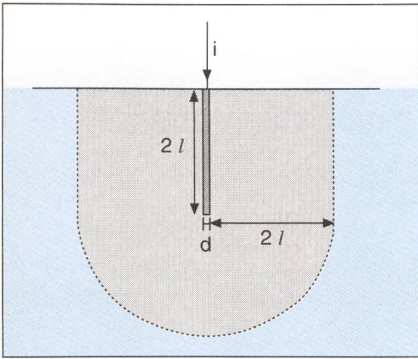


Figure 2 Piquet de terre vertical à fleur de sol

On remarque très rapidement la limite des solutions analytiques pour des configurations complexes (prises de terre sous forme de réseaux maillés, juxtaposition de mailles avec des piquets et des ceintures, utilisation de sols à plusieurs couches). On recourt dans ce cas à la méthode des éléments finis et du potentiel vecteur. On définit en  $r'$  une source de courant linéique  $j$  (partie d'un tronçon de courant) et on calcule pour un référentiel  $(x,y,z)$  donné le potentiel en un point  $r$  (fig. 3). Le potentiel vecteur  $V$  en régime statique s'obtient par la relation:

$$V = \frac{1}{4\pi\sigma} \int_c \frac{j dl}{|r - r'|} \quad (4)$$

Un programme de calcul développé pour ce genre d'applications permet de calculer des configurations complexes et mixtes,

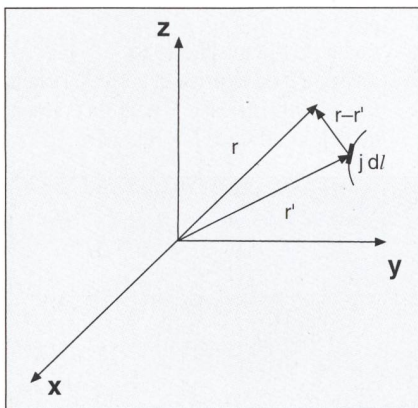


Figure 3 Potentiel vecteur produit par un tronçon de courant

Le potentiel vecteur au point  $r$  se calcule selon (4).

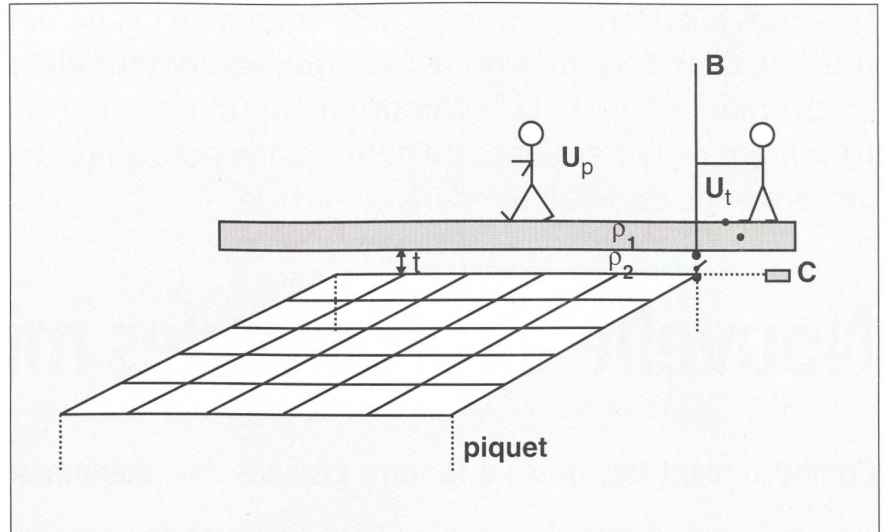


Figure 4 Réseau de mise à la terre (situation globale)

- |                  |                                       |       |                                 |
|------------------|---------------------------------------|-------|---------------------------------|
| B                | barrière pouvant être mise à la terre | t     | profondeur de la prise de terre |
| C                | ceinture                              | $U_p$ | tension de pas                  |
| $\rho_1, \rho_2$ | résistivités du sol                   | $U_t$ | tension de toucher              |

intégrant différentes prises de terre (mailles, piquets, ceintures) dans les trois dimensions, avec deux couches différentes de sol, représentant par exemple le terrain standard et un lit de cailloux au-dessus ou une couche d'asphalte. Les résultats comprennent les tensions de pas et de toucher en valeur relative ou absolue et la résistance globale de la prise de terre. L'exemple d'application ci-après présente le système de mise à la terre d'un poste de dimensions  $50 \times 50$  m avec des mailles de  $10 \times 10$  m et une profondeur de  $t = 0,5$  m dans le sol à une couche où  $\rho_1 = \rho_2$  et sans piquets ni

ceinture C (fig. 4). Les résultats (fig. 5) présentent la tension de pas  $U_p$  (10,8% de la tension de la prise de terre lors du défaut) et la tension de toucher  $U_t$  au point  $a$  auprès d'une barrière B pouvant être mise à la terre (17,6% de la tension de la prise de terre lors du défaut) ou laissée flottante.

Cette méthode de calcul, bien que limitée au régime statique permet de définir à l'avance lors du projet les performances d'une prise de terre de configuration complexe. Elle présente l'avantage de renforcer la qualité du dossier de mise à l'enquête et d'éviter une mise à la terre trop ou pas

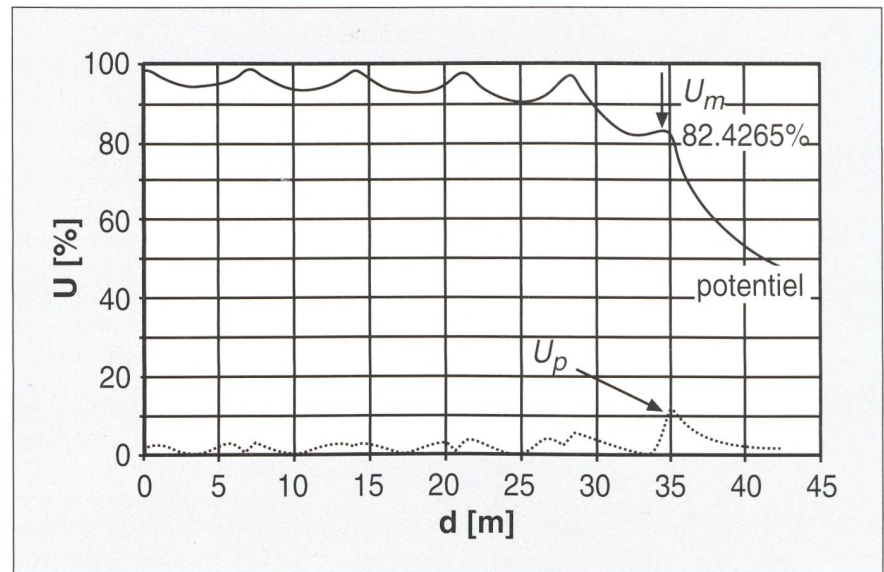


Figure 5 Performances d'un réseau de mise à la terre

Elles sont déterminées à l'aide d'un calcul par éléments finis pour une situation sans piquets et une couche, pour une grille  $50 \times 50$  m à une profondeur de 0,5 m.

- |     |   |       |                             |
|-----|---|-------|-----------------------------|
| $U$ | tension en % de la tension de grille    | $U_m$ | tension de maille (= 17,6%) |
| d   | distance le long de la ligne considérée | $U_p$ | tension de pas (= 10,8%)    |

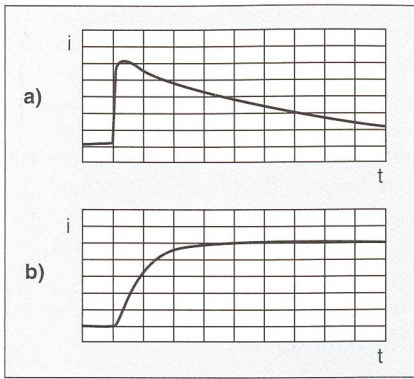


Figure 6 Impulsion de courant de foudre (cas à haute impédance)

$i(t)$  courant en fonction du temps  
 a échelle du temps: 10 µs/div  
 b échelle du temps: 0,5 µs/div (loupe)

assez élaborée. Elle a été appliquée à ce jour à plusieurs postes à haute tension en campagne ou en ville, à une ou deux couches de terrain, avec des configurations relativement compliquées.

**Besoin d'une caractérisation des paramètres des prises de terre en fonction de la fréquence**

On considère par exemple un piquet de terre de 2 m de long et de 1 cm de diamètre, planté verticalement dans un sol de résistivité 1000 Ωm. Sa résistance est de 476 Ω et son inductance est estimée à 2 µH. Le courant injecté a successivement une fréquence correspondante de 0 Hz (courant continu), 50 Hz (fréquence fondamentale), 150 Hz (harmonique 3), 30 kHz (fréquence supérieure du spectre d'une source de courant provenant d'une manœuvre de sectionneur ou disjoncteur), 365 kHz (fréquence supérieure du spectre d'une source de courant provenant de la foudre [fig. 6]), 50 MHz (fréquence supérieure du spectre d'une source de courant provenant d'une manœuvre de sectionneur ou disjoncteur

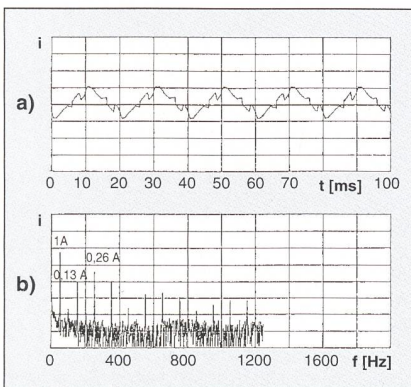


Figure 7 Courant tronqué injecté dans une prise de terre d'un poste en ville

a courant  $i$  en fonction du temps  $t$ ; échelle du courant: 2 A/div.  
 b spectre de  $i(t)$

	c. c.	fréq. fond.	harm. 3	manœuvre	foudre	SF <sub>6</sub>
fréquence	0 Hz	50 Hz	150 Hz	30 kHz	365 kHz	50 MHz
pénétration	∞	10 mm	5,8 mm	0,4 mm	0,12 mm	0,01mm
X	0	0,63 mΩ	1,9 mΩ	0,38 Ω	4,6 Ω	628 Ω
dt	-	-	-	10 µs	1,2 µs	6,3 ns
L·di/dt	-	-	-	0,2 V	1,7 V	317 V

Tableau I Valeurs caractéristiques pour un piquet de terre

Pour les paramètres utilisés: voir texte.  
 X réactance pour un régime sinusoïdal  
 dt temps de montée d'une source de courant transitoire;  
 L·di/dt pour un courant crête de 1 A

dans un poste isolé au gaz SF<sub>6</sub>). Le tableau I présente:

- la profondeur de pénétration du courant dans le piquet en fonction de la fréquence, pénétration freinée par l'effet pelliculaire [2];
- la réactance X pour un régime sinusoïdal et en admettant une inductance constante de 2 µH;
- le temps de montée dt d'une source de courant transitoire;
- la composante L·di/dt pour une variation de courant di/dt (pour un courant crête de 1 A).

On remarque pour le cas du piquet de terre:

- La profondeur de pénétration a des conséquences importantes pour les phénomènes transitoires. Mais ce frein est diminué par la diffusion du courant dans

le sol. L'inductance diminue également avec l'effet pelliculaire.

- La réactance n'est pas importante, sauf dans le cas d'une manœuvre dans le poste SF<sub>6</sub>. La réactance deviendrait importante pour une autre configuration qu'un piquet où la résistance de 476 Ω diminuerait (ceinture, grille).
- La variation de tension due à la partie inductive n'est pas importante, sauf dans le cas d'une manœuvre dans le poste SF<sub>6</sub>.

**Méthodologies de mesures**

Les méthodes de mesure au pont de résistivité du sol et de la résistance de la prise de terre par 4 et 3 électrodes sont connues. La méthode d'injection d'un courant à 50 Hz présente des inconvénients, bien qu'elle soit la plus réaliste:

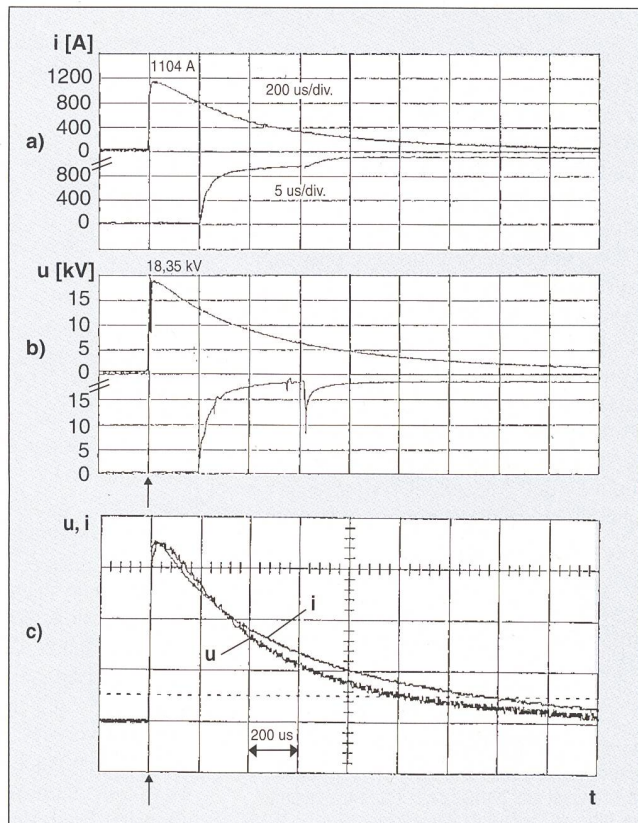


Figure 8 Réponses à une impulsion de courant injectée dans une mise à la terre d'un mât d'antenne, constituée de piquets

- a courant en valeurs absolues
- b tension en valeurs absolues
- c valeurs relatives comparées du courant et de la tension pour une autre impulsion (dans ce cas on remarque le comportement résistif de la mise à la terre)

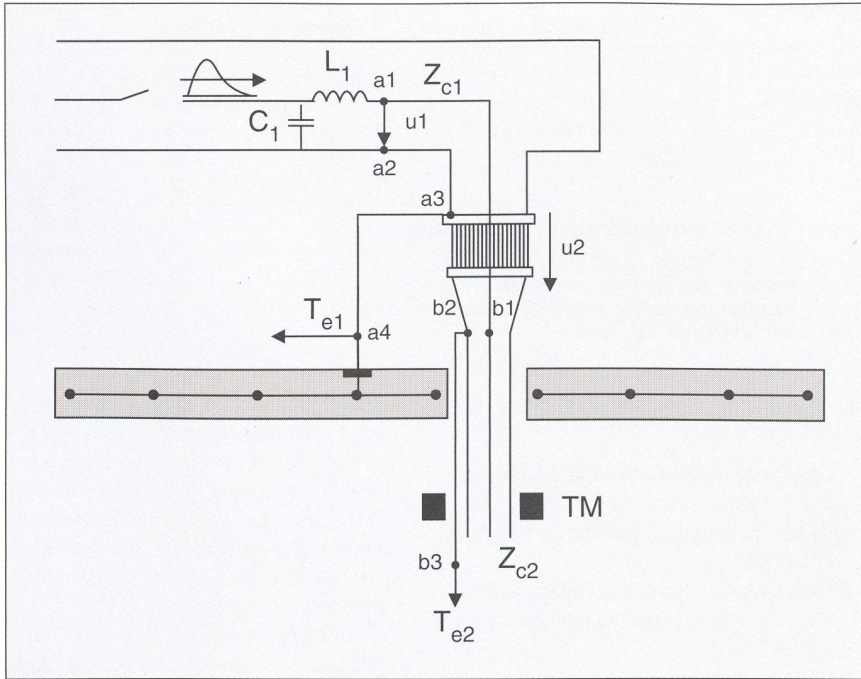


Figure 9 Surtension  $u_2$  apparaissant aux bornes de la couronne isolante des têtes de câbles (schéma équivalent)

$C_1, L_1$  paramètres qui déterminent l'impédance  $Z_{c1}$  du tube  $SF_6$   
 $Z_{c2}$  impédance du câble  
 $TM$  transformateur de mesure de courant  
 $T_{e1}, T_{e2}$  points différents de mise à terre

- nécessite une source de courant importante;
- risque de confusion entre les tensions générées par la source auxiliaire et les tensions déjà présentes;
- ne donne pas l'influence de la fréquence.

On peut pallier cet inconvénient en injectant un courant tronqué (fig. 7) qui génère un spectre dans le domaine des premiers harmoniques (typiquement 50 à 1000 Hz). Un corollaire consiste à utiliser une fréquence différente de la fréquence fondamentale 50 Hz.

On peut également injecter une impulsion de courant et déterminer par traitement de signal les parties résistance et réactance de la prise de terre (fig. 8). On utilise à ce propos un générateur de choc à haute tension de plus ou moins grande énergie. On trouve alors le comportement de la prise de terre en régime transitoire pour une gamme de fréquences déterminée en fonction du générateur choisi, par exemple

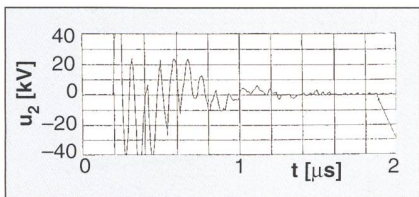


Figure 10 Résultats de mesure de la surtension  $u_2$  apparaissant aux bornes de la couronne isolante des têtes de câbles lors d'une manœuvre

le domaine de la foudre. Un autre avantage est la possibilité d'analyser plus profondément des électrodes partiellement rongées par la corrosion.

Ces deux méthodes nécessitent cependant une attention particulière pour éviter les tensions induites parasites dans les circuits de mesure.

### Mises à la terre des postes isolés au gaz $SF_6$

Pour un poste isolé au gaz  $SF_6$ , il faut non seulement assurer l'écoulement du courant de défaut par les méthodes expliquées précédemment, mais aussi obtenir une équipotentielle entre les différents systèmes [3]. Cette deuxième partie s'applique avant tout pour la protection électromagnétique des équipements de contrôle-commande. En effet, les tensions transitoires sont moins dangereuses pour le personnel exploitant, sauf bien sûr le cas de la foudre.

Lors d'une manœuvre d'un sectionneur ou d'un disjoncteur dans le gaz  $SF_6$ , une onde se propage dans le tube et réfléchit à chaque endroit où l'impédance caractéristique  $Z = \sqrt{L/C}$  change. C'est le cas spécialement vers les têtes de câbles (fig. 9). On mesure typiquement des tensions entre deux points de terre allant jusqu'à 50% de la tension fondamentale (fig. 10). On peut

alors voir apparaître des effluves. Elles témoignent de ces surtensions à hautes fréquences. Les conducteurs de terre  $a_3-a_4$  et  $b_2-b_3$  ont en effet des composantes  $Ri$  et  $L \cdot di/dt$  très importantes, si bien que l'on obtient plusieurs dizaines de kilovolts entre deux points. Il est alors important de réaliser une terre équipotentielle, par exemple en utilisant les fers à béton [3].

### Effet d'antenne

Dans les réseaux à très haute tension, les équipements peuvent être élevés. Les disjoncteurs à chambre  $SF_6$  pour postes à l'air libre ou les disjoncteurs sous enveloppe  $SF_6$  pour postes blindés ont des performances de coupure de plus en plus élevées. Le temps d'établissement de la tension peut être inférieur à 5 ns [4]. On arrive donc à des situations où une longueur de conducteur de terre est un multiple du quart d'onde ( $n\lambda/4$ ) de la perturbation selon la relation:

$$f = \frac{1}{\pi\tau} = \frac{1}{5\pi \cdot 10^{-9}} = 63 \text{ MHz} \quad (5)$$

$$\lambda / 4 = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 63 \cdot 10^6} \text{ m} = 1,2 \text{ m} \quad (6)$$

Le conducteur de terre ne peut plus être simulé par une résistance, ni par une

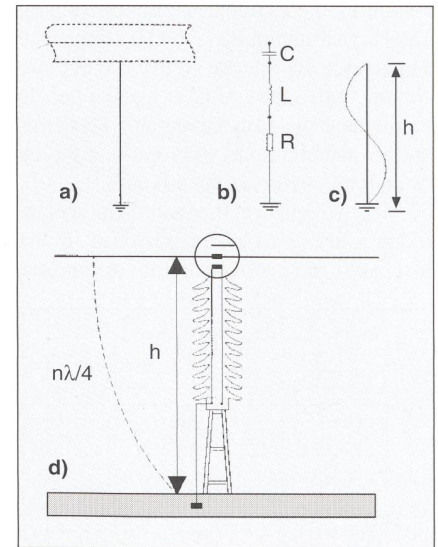


Figure 11 Schéma équivalent d'un conducteur de mise à la terre en fonction de la fréquence du courant

- a-b-c évolution du schéma équivalent
- a mise à la terre de l'enveloppe  $SF_6$  par un conducteur de cuivre
- b schéma équivalent RLC de la mise à la terre selon a
- c effet d'antenne:  $\lambda = h$
- d cas simplifié d'un transformateur de courant

impédance ( $R, L, C$ ), mais doit être considéré comme une antenne (fig. 11). Cela signifie:

- Le courant (respectivement la tension) a des nœuds et des ventres le long du conducteur.
- Le courant instantané (respectivement la tension) n'est pas constant sur la longueur du conducteur. Le point de mesure doit être défini. Un point à tension nulle à une extrémité du conducteur ne correspond pas nécessairement à une tension nulle à l'autre extrémité.

En cas de mesures d'investigation sur un équipement on doit faire appel à des couplages par structure coaxiale ou à l'aide de cellules TEM (Transfer Electromagnetic Mode). Les liaisons entre les points de mesure doivent en partie être exécutées à l'aide de fibres optiques pour ne pas modifier les couplages induits et rayonnés [5].

## Conclusions

- Le concept d'une mise à la terre doit tenir compte absolument des sollicitations auxquelles la mise à la terre est soumise. Un conducteur de terre traditionnel jaune-vert devient un circuit ouvert à haute fréquence. Il peut également agir comme une antenne d'émission et générer des perturbations sur un appareil de contrôle-commande situé à quelques mètres.
- Le principe de la terre équipotentielle permet de répondre à la plupart des problèmes.
- Les méthodes de calcul par éléments finis donnent une solution optimale pour la protection des personnes à la fréquence fondamentale.

## Remerciements

Nous remercions M. *Sergueï Tkatchenko* (RDI Moscou) et MM. les Prof. *Georges Costache* (Université d'Ottawa) et *Michel Ianoz* (EPFL) pour leur contribution au projet «mises à la terre» d'EMC Fribourg SA.

## Littérature

[1] M. Aguet et M. Ianovici: Compatibilité électromagnétique. Chap. 8: Perturbations électromagnétiques de manœuvre et de foudre. Presses polytechniques romandes, 1983.

[2] M. Aguet et J.-J. Morf: Energie Electrique. Traité d'Electricité, Volume XII, publié sous la direction de Jacques Neiryck, Edition Georgi, 1981.

[3] F. Chevalley et H. Sauvain: Protection des micro-calculateurs de contrôle-commande distribués dans les postes blindés SF<sub>6</sub> contre les perturbations électromagnétiques. Cigré 1988.

[4] U. Marti, H. Sauvain et H. Baumgartner: Mesure des transitoires rapides dans un poste 110/16 kV. Cigré 1993.

[5] F. Gassmann, A.K. Skrivervik et D.D. Hall: Photonic field sensor for simultaneous and fully passive isotropic electric and magnetic field measurements up to 1 GHz. EMC Zurich 1995.

# Neue Gesichtspunkte bei Erdungsanlagen

## Das Verhalten von Erdungen bei periodischen und transitorischen Vorgängen

Die Erdung wird in einem elektrischen Ersatzschaltbild meist als Widerstand dargestellt. Dies ist für niedere Frequenzen (Gleichstrom, 16<sup>2/3</sup> Hz und 50 Hz) zulässig. Im Bereich der Oberwellen und von transienten Vorgängen (Schaltvorgängen, Blitzen, hochfrequenten Störungen) ist diese Vereinfachung jedoch nicht mehr erlaubt. Im vorliegenden Artikel wird daher speziell auf die Frequenzabhängigkeit des Verhaltens der Erdverbindungen eingegangen. Verschiedene Parameter spielen dabei eine massgebende Rolle. Bei Berechnungen müssen nebst dem ohmschen Widerstand insbesondere der Skinneffekt, der induktive und kapazitive Blindwiderstand, Ausgleichsvorgänge sowie bei sehr hohen Frequenzen die Antennenwirkung berücksichtigt werden.

Im Artikel werden vorerst verschiedene Erdungskonzepte vorgestellt, und es wird gezeigt, wie ihre Eigenschaften (näherungsweise) berechnet werden können (Bilder 1 bis 4). Man stellt fest, dass man bei komplexeren Konfigurationen mit analytischen Methoden schnell an Grenzen stösst und numerische Methoden einsetzen muss. Detaillierte Berechnungen sind heute mit der Finite-Elemente-Methode möglich. Die Resultate für konkrete Fälle werden gezeigt und mit Messungen in Beziehung gebracht (Bilder 5–8, Tab. I). Speziell wird schliesslich hingewiesen auf die Gefahren von transitorischen Überspannungen in SF<sub>6</sub>-Anlagen (Bilder 9 und 11).

ANSON liefert



### ANSON-Rippenrohr-Heizkörper

für Garagen, öffentl. Bauten, Barackencontainer, Industrie etc. Robust. In vielen Längen und Leistungsstufen. 230 und 400 V. Verlangen Sie Beratung vom Spezialisten:



### ANSON-Infrarotstrahler für Badezimmer/WC

für wohlige Sofortwärme. Sparsam, weil Zentralheizung später ein- und früher ausgeschaltet werden kann. Einfach einzubauen. 220 V 2000 W. — Für Ihr Wohlbefinden von ANSON:

ANSON liefert



### ANSON kleine Elektro-Heizkonvektoren

mit 100%iger Energienutzung. Für Büros, Ferienwohnungen, Werkstätten die energiesparende Übergangs- und Zusatzheizung. 220 V, 500–2200 W. Einfach anzuschliessen. — Von:

ANSON liefert



### ANSON El. Heizgeräte für festen Einbau

Wirtschaftlich für nicht dauernd belegte Räume, Hallen, Keller, Lager, Saalbauten usw. 400 V 3–50 kW. Verlangen Sie Beratung und Offerte von:

ANSON liefert



### ANSON kleine Warmluft-Heizgeräte

zum Trocknen, Wärmen, Heizen überall in Wohnhaus, Gewerbe, Industrie. Robust. Energiesparend. Eingebauter Timer. 230 V, 400 V 2–9 kW. Preisgünstige Lieferung vom Spezialisten:

ANSON liefert



### ANSON grosse FRICO Warmluft-Heizgeräte

Transportabel. Als Zusatzheizung. Zum Austrocknen im Bau. Billig in Anschaffung und Betrieb. 400 V 6–30 kW. Preisgünstig ab Lager von:

**ANSON AG 01/4611111**

8055 Zürich  
Friesenbergstr. 108  
Fax 01/463 09 26

**... für energiesparende Heizgeräte!**