

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 98 (2007)
Heft: 22-23

Artikel: Mesure et contrôle de la mise à terre des pylônes et mâts conducteurs équipés d'un câble de garde
Autor: Joye, Patrick / Orzan, David / Zimmermann, Markus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857503>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mesure et contrôle de la mise à terre des pylônes et mâts conducteurs équipés d'un câble de garde

Méthode de mesure et de calcul des tensions de terre en cas de court-circuit à la terre

Les pylônes ou les mâts des lignes aériennes à haute tension peuvent être amenés à conduire du courant vers la terre lors d'un défaut d'isolation. Les tensions de terre qui en résultent peuvent alors représenter une source de danger pour les personnes. Parmi les situations qui engendrent un risque mortel potentiel, on peut citer les tensions de contact. Pour minimiser ces risques, des normes sont définies dans l'Ordonnance sur les installations électriques à courant fort [1]. Cette ordonnance, ainsi que les règles de l'ASE [2] fixent une limite pour l'amplitude des tensions de contact en fonction du temps d'élimination du défaut. La probabilité qu'une personne se trouve à proximité d'un pylône ou d'un mât en défaut est également prise en compte et est définie en trois zones distinctes. Suivant la zone et le temps de déclenchement du défaut pour une situation donnée, l'évaluation du danger pour les personnes nécessite une mesure et une analyse de la tension de terre et des différentes tensions de contact et de pas dans la zone d'influence du pylône.

Le câble de garde a pour fonction première de protéger les conducteurs de phase des lignes aériennes contre les coups de foudre directs. Outre cette fonction très importante, il influence de manière

Patrick Joye, David Orzan,
Markus Zimmermann

significative la tension de terre d'un pylône lors d'un court-circuit à la terre. Cette influence se résume à deux phénomènes bien distincts. D'une part la mise en parallèle des installations de terre des pylônes

voisins et d'autre part la diminution de l'amplitude du courant de court-circuit circulant dans le sol. Ce dernier étant uniquement valable pour les réseaux avec le point neutre mis à terre rigidement ou par une faible impédance. Pour ces deux contributions, la section et la matière du conducteur de garde jouent un rôle prépondérant.

Mise en parallèle des installations de terre des pylônes voisins

De par la liaison galvanique du câble de garde entre les différents pylônes (Z'), la résistance de terre de chaque mât (R_A) est mise en parallèle à celle du mât concerné par le court-circuit comme représenté dans la figure 1. Le câble de garde n'étant pas parfaitement conducteur, la zone d'influence où les installations de terre voisines contribuent à diminuer l'impédance de terre générale du pylône n'est pas infinie. L'impédance équivalente des mâts (Z_K) permet de modéliser ce phénomène.

En général, une impédance équivalente des mâts peut être représentée en parallèle à la résistance de terre de part et d'autre du

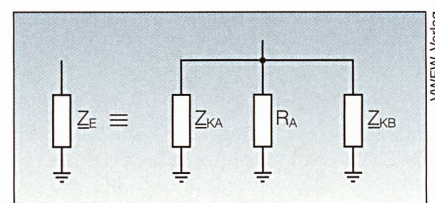


Figure 2 Schéma équivalent de l'impédance de terre générale d'un pylône.

pylône concerné par le défaut et former ainsi l'impédance de terre générale du pylône (Z_E). Le schéma équivalent de la figure 2 représente ces différentes impédances pour un pylône situé dans la partie centrale d'une longue ligne aérienne.

La matière et la section du conducteur de garde ainsi que la résistance de terre de chaque mât est déterminante pour l'amplitude et la phase de l'impédance équivalente des mâts. L'exemple suivant le démontre (figure 3):

Les figures 4a, b et 4e, f représentent l'amplitude de l'impédance équivalente des mâts de part et d'autre du pylône considéré (Z_{KA} en direction du poste A et Z_{KB} en direction du poste B). Les figures 4c, d et 4g, h représentent respectivement l'amplitude et la phase de la mise en parallèle des deux impédances équivalentes des mâts.

Pour ces deux exemples et en tenant compte de la résistance de terre du mât, l'impédance de terre générale du mât passe de 10 Ω à une valeur d'environ 1,5 Ω avec le câble de garde en acier et environ 0,75 Ω avec celui en aldre.

Il est également possible de déterminer la distance de la zone d'influence des installations de terre des postes voisins à l'aide de la figure 4. Cette distance est d'environ 2,5 km pour le câble de garde en acier et environ 5 km pour celui en aldre. Au-delà de ces distances, les postes n'influencent pratiquement plus l'impédance de terre générale du pylône.

Diminution du courant de court-circuit circulant dans le sol

Le courant de court-circuit homopolaire circulant dans le conducteur de phase induit un courant de sens opposé à ce der-

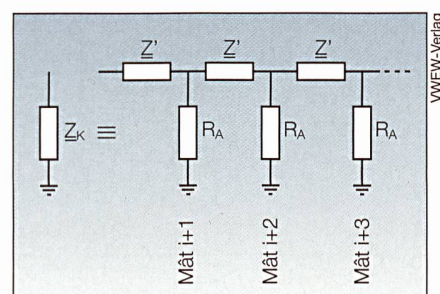


Figure 1 Impédance équivalente des mâts.

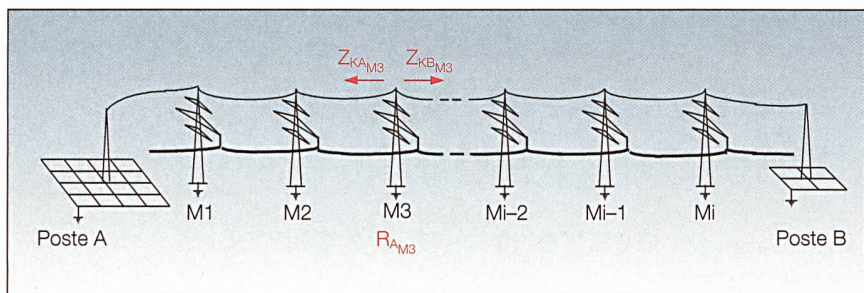


Figure 3 Situation de la ligne pour le calcul de l'impédance équivalente des mâts.

Fréquence du système: 50 Hz; longueur: 15 km; nombre de pylône: 59; distance entre les pylônes: 250 m; résistivité du sol: 200 Ω m; résistance de terre des mâts: 10 Ω ; résistance de terre du poste A: 0,1 Ω ; résistance de terre du poste B: 1,0 Ω .

nier dans le conducteur de garde (I_{ES} , figure 5). Ce courant ne circule pas dans le sol et ne produit par conséquent aucune tension de terre. On appelle le facteur de réduction r_E d'un câble de garde le rapport entre la partie du courant circulant dans le sol (I_{EKS}) et le courant de court-circuit homopolaire dans le conducteur de phase (I_{KS}).

$$r_E = \frac{I_{EKS}}{I_{KS}} = 1 - \frac{I_{ES}}{I_{KS}} \quad (1)$$

La matière et la section du conducteur de garde, la disposition des conducteurs de phases et de garde déterminent le facteur de réduction et donc l'amplitude du courant induit dans le câble de garde. La partie imaginaire du facteur de réduction peut généralement être négligée. Quelques exemples sont donnés dans le tableau pour une disposition des conducteurs de phase et de garde standard [3].

Nombre de conducteurs	Matière/section	Facteur de réduction r_E
1 cg ¹	Fe 50, 70, 95	0,98
1 cg ¹	Al/Fe 50/30	0,78
1 cg ¹	Al/Fe 120/20, 70	0,70
1 cg ¹	Al/Fe 240/40	0,65
1 cg ¹	Al/Fe 120/70 et 1 corde de terre dans le sol 120 mm ² Cu	0,52
2 cg ¹	Al/Fe 95/55	0,50

¹ conducteur de garde

Tableau Facteur de réduction de différents conducteurs de garde pour une ligne aérienne. Ligne aérienne: distance conducteur de garde – conducteur de phase environ 15 m.

Effets cumulés de la mise en parallèle des impédances et du couplage inductif

En tenant compte des deux différentes influences du câble de garde, l'installation de terre d'un mât en cas de court-circuit monophasé à la terre peut être représentée par le schéma équivalent de la figure 5. La

tension de terre U_E est donc influencée par les impédances de mise en parallèle des pylônes voisins, par la résistance de terre du pylône ainsi que par le couplage inductif entre le câble de garde et le conducteur de phase.

Pour un court-circuit sur un mât relativement éloigné des postes haute tension, l'amplitude du courant circulant vers sol dans les pylônes voisins diminue en s'éloignant du lieu du défaut jusqu'à devenir nul (figure 6a, entre le pylône 7 et le pylône 40). Le courant qui reste alors dans le conducteur de garde est du uniquement au cou-

plage inductif décrit auparavant (figure 6b, entre les pylônes 30 et 45). Le courant total circulant dans le sol I_{EKS} peut alors être déterminé à l'aide du facteur de réduction du câble de garde. La tension de terre, pour autant que l'impédance de terre générale Z_E soit connue, peut ainsi être aisément calculée par la formule 2.

$$U_E = Z_E \cdot I_{EKS} \text{ avec } I_{EKS} = \sum_{i=1}^n r_{Ei} \cdot I_{KS} \quad (2)$$

Le paramètre n indique le nombre de conducteurs de phase qui alimente le défaut (en principe $n = 2$).

Lors d'un court-circuit sur un mât proche d'un poste haute tension, la tension de terre du pylône est plus difficile à déterminer. En effet, la partie du courant dans le câble de garde due au couplage magnétique et celle due aux pylônes ou installations de terre voisines n'est plus très évidente à distinguer (figures 6a et 6b, entre le poste A et le pylône 7). L'amplitude et la provenance des courants de court-circuit homopolaire, les conducteurs de garde des différentes lignes, la présence de transformateurs et le type de mise à terre du point neutre ainsi que l'impédance de terre du poste haute tension situé à proximité influencent de manière significative la ten-

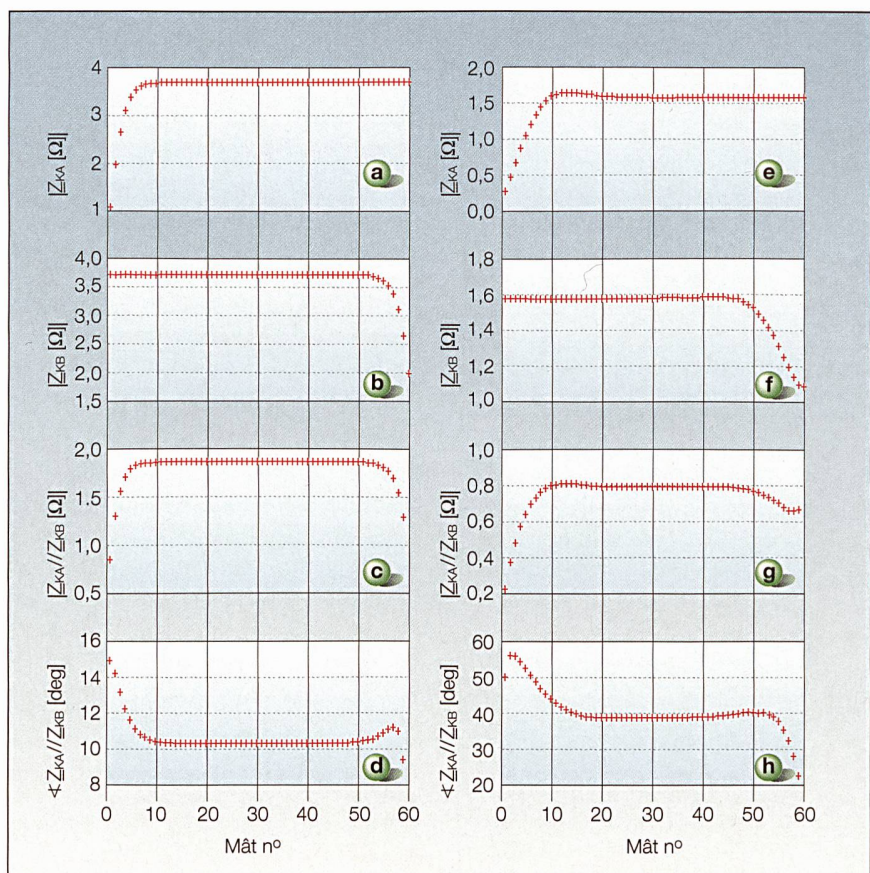


Figure 4 Impédance équivalente des mâts en fonction du type de câble de garde.

Colonne à gauche: câble de garde 1x70 mm² acier; colonne à droite: câble de garde 1x160 mm² aldrej; mât n° 1 est le premier mât coté poste A.

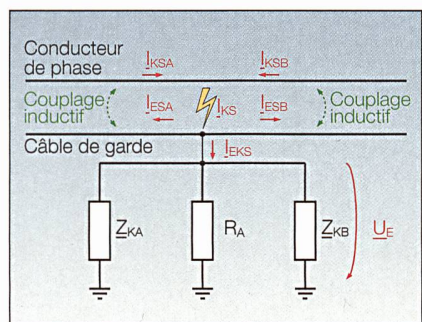


Figure 5 Schéma équivalent des impédances de terre et répartition du courant de court-circuit monophasé.

sion de terre du pylône. Seule une étude détaillée permet alors d'analyser et de calculer l'impédance de terre générale, la tension de terre ainsi que les tensions de contact.

Le pylône 7 de l'exemple de la figure 3 est situé proche du poste A et éloigné du poste B. La figure 6a représente le courant circulant dans la résistance de terre des pylônes lors d'un court-circuit à la terre au pylône 7. Le courant dans le conducteur de garde en acier de $1 \times 70 \text{ mm}^2$ est représenté dans la figure 6b. Le facteur de réduction est calculé et vaut 0,94. Pour cet exemple, il faut préciser que le courant de court-circuit dans le conducteur de phase entre le poste haute tension A et le pylône n° 7 est environ 3 fois plus élevé que celui depuis le poste haute tension B.

Pour le calcul du courant total circulant dans le sol, la formule 3 peut être appliquée.

$$I_{EKS} = \sum_{i=1}^n r_{Ei} \cdot I_{KSi} \approx (1 - 0,40) \cdot I_{KSA} + (1 - 0,06) \cdot I_{KSB} \quad (3)$$

$$\text{avec } r_E = 1 - \frac{I_{ES}}{I_{KS}}$$

Mesure de l'installation de terre

Il existe plusieurs méthodes pour la mesure d'une impédance de terre. Des appareils de mesure de terre compacts permettent une mesure relativement rapide et simple. Cependant, la présence d'un câble de garde et le type de construction du pylône limitent parfois l'application de ces méthodes: on ne peut mesurer que l'impédance de terre générale et la tension de contact du pylône. Si des informations supplémentaires telles que la résistance de terre du mât, l'impédance équivalente des installations de terre voisines ainsi que des tensions de contact dans un périmètre de quelques dizaines de mètres aux alentours du pylône sont nécessaires, alors une autre méthode de mesure plus élaborée doit être utilisée.

Mesure par la méthode de l'injection de courant

Une méthode plus fiable qui peut être utilisée est identique à celle pour la mesure de terre des postes haute tension: la méthode par injection d'un courant relativement important dans l'installation de terre du pylône (10–30A). Le schéma de principe de cette mesure est représenté dans la figure 7. Une électrode de terre provisoire située à une distance supérieure à environ 100 m assure le retour du courant de mesure. La boucle nécessaire pour le courant de mesure est donc indépendante des lignes.

La résistance de l'électrode de terre provisoire doit être relativement basse afin de garantir un courant suffisant pour une bonne précision de mesure. Le courant de mesure injecté par la source (I_{mes}) et la partie de ce courant circulant dans le conduc-

teur de garde vers les installations de terre voisines (I_{es}) peuvent être mesurés vectoriellement. Une mesure du profil de la tension de terre dans plusieurs directions peut également être effectuée vectoriellement afin de déterminer l'amplitude de la tension de terre et des tensions de pas. Les différentes tensions de contact avec le pylône ainsi que dans les environs du pylône peuvent aisément être mesurées. Le facteur de réduction du câble de garde ne peut cependant pas être mesuré par cette méthode. Le calcul théorique de ce facteur est nécessaire.

Calcul de l'impédance de terre et des tensions de terre

A l'aide des différentes mesures effectuées selon le principe de l'injection de courant, l'impédance de terre générale,

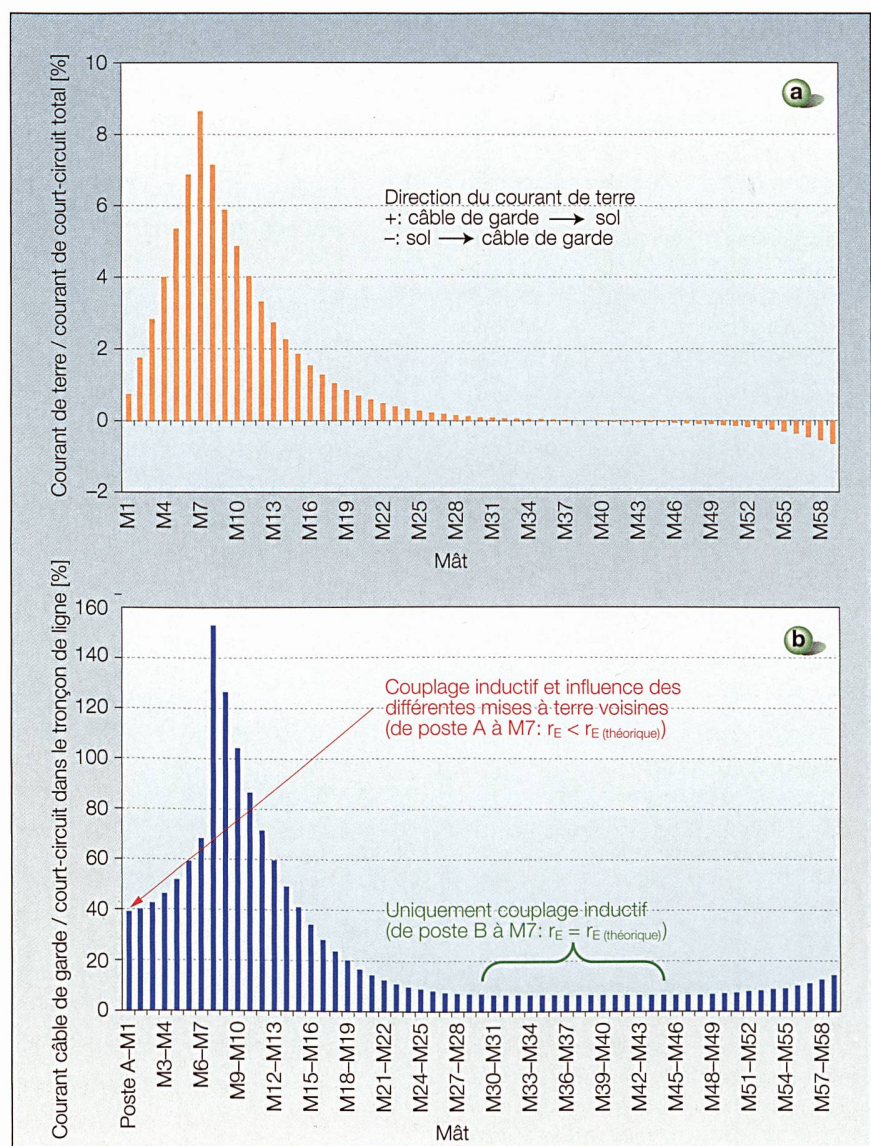


Figure 6 Répartition du courant de court-circuit dans le sol et le câble de garde.

Figure 6a: Courant dans la résistance de terre des mâts.

Figure 6b: Courant dans le conducteur de garde entre les mâts.

l'impédance équivalente des installations de terre voisines et la résistance de terre du pylône peuvent être calculées. Une extrapolation linéaire pour le courant de court-circuit à la terre réel permet d'obtenir la tension de terre, les tensions de pas et de contact. Un facteur de correction tenant compte de l'état du sol lors des mesures (humidité, température) peut également être pris en considération afin de déterminer la situation la plus critique.

Exemple d'une mesure dans le domaine skiable de Sörenberg

Nous avons procédé à la mesure de terre du pylône n° 173 de la ligne aérienne 220 kV Bickigen–Innertkirchen dans la région du domaine skiable de Sörenberg selon le principe de l'injection de courant. Cette mesure a été souhaitée afin de contrôler les tensions de contact attendues sur un mât d'un nouveau télésiège dans les environs directs du pylône de la ligne 220 kV.

Le pylône n° 173 est distant de 49,5 km du poste de Bickigen (70% de la longueur de la ligne) et de 21,2 km de celui d'Innertkirchen (30% de la longueur de la ligne). Le câble de garde est en acier de $1 \times 70 \text{ mm}^2$. La distance entre le mât du télésiège et le pylône 220 kV est d'environ 25 m.

Les valeurs suivantes ont été mesurées lors des mesures sur site:

- Courant de mesure total: 16,0 A, $\varphi = 0^\circ$
- Courant circulant vers le conducteur de garde: 13,5 A, $\varphi = -2^\circ$
- Tension de terre: 19,3 V, $\varphi = 11^\circ$
- Tensions de contact: pylône n° 173 côté grange 2,80 V; pylône n° 173 côté télésiège 4,38 V; mât n° 7 du télésiège 0,80 V

Calcul des Impédances de terre sur la base des mesures et de l'état du sol:

- Facteur de correction de l'état du sol: $K_J = 1,20$
- Impédance de terre générale: $Z_E = 1,44 \Omega$, $\varphi = 10,4^\circ$
- Résistance de terre du pylône: $R_A = 8,9 \Omega$
- Impédance équivalente des mâts: $Z_{KA}/Z_{KB} = 1,72 \Omega$, $\varphi = 12,3^\circ$

Afin d'obtenir une estimation de la tension de terre, des tensions de contact et de pas dans la région du pylône, nous avons déterminé le courant circulant effectivement à la terre lors du défaut. Pour cela, le courant de court-circuit monophasé est calculé à l'aide d'un programme d'analyse de réseau en tenant compte de l'impédance de terre générale du pylône.

De ce calcul, le courant de court-circuit monophasé au lieu du défaut vaut 10,70 kA, $\varphi = -81^\circ$, dont 3,60 kA ($\varphi = -80^\circ$) en provenance du poste de Bickigen et 7,10 kA ($\varphi = -81^\circ$) en provenance de celui d'Innertkirchen.

Le calcul du facteur de réduction r_E du câble de garde à 50 Hz pour les tronçons de ligne entre les postes de Bickigen et d'Innertkirchen et le pylône n° 173 donne 0,98. Le courant circulant effectivement dans le sol est déterminé par la formule 4.

$$I_{EKS} = \sum_{i=1}^n r_{E_i} \cdot I_{KS_i} = 10,50 \text{ kA } \varphi = -81^\circ \quad (4)$$

Ainsi par extrapolation, nous obtenons les valeurs suivantes:

- Tension de terre: $U_E = 15,2 \text{ kV}$
- Tension de pas maximale: $U_S = 3800 \text{ V/m}$
- Tensions de contact: pylône n° 173 côté grange 2430 V; pylône n° 173 côté télésiège 3790 V; mât n° 7 du télésiège 690 V

Un des profils de la tension de terre mesuré est représenté dans la figure 8 pour le cas d'un court-circuit monophasé à la terre réel.

Informations sur le dispositif de mesure

Le dispositif de mesure est mobile et d'un poids total d'environ 800 kg. L'alimentation est assurée par un groupe électrogène et ne nécessite ainsi aucune connexion au réseau basse ou moyenne tension.

La mesure peut-être effectuée sans déclenchement des lignes. Les mesures de

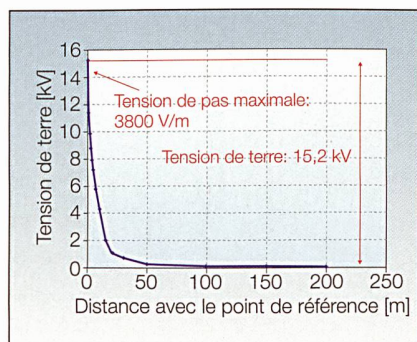


Figure 8 Profil de la tension de terre du pylône, représenté pour un courant de court-circuit monophasé réel.

Point de référence: électrode de terre mât n° 173.

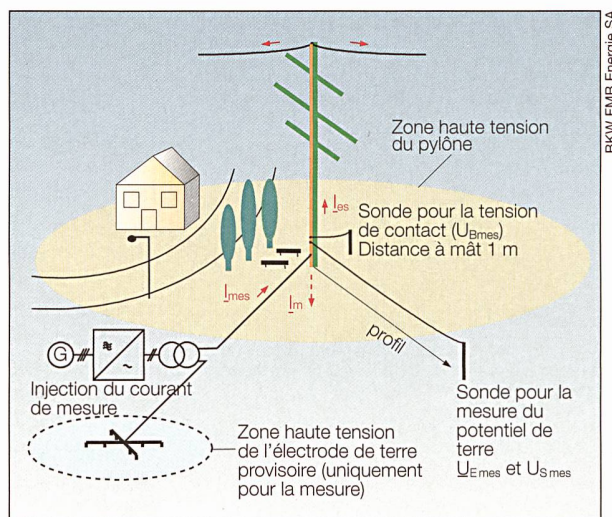


Figure 7 Schéma de principe de la mesure par injection de courant.

sécurité adéquates sont toutefois observées par les spécialistes de mesure. La suppression des perturbations provenant de l'exploitation normale de la ligne est assurée par un choix judicieux de la fréquence du courant injecté et par des mesures sélectives en fréquence. Les installations de terre des pylônes de ligne aérienne avec un câble de garde, les puits de manchon des câbles ainsi que les installations de moyenne tension comme les stations de transformation et de couplage ainsi que les industries peuvent être mesurées par ce dispositif de mesure

Références

- [1] Ordonnance du 30 mars 1994 sur les installations électriques à courant fort (Ordonnance sur le courant fort), RO 1994 1199.
- [2] Règles de l'ASE: Mise à la terre comme mesure de protection dans les installations électriques à courant fort. SEV/ASE 3755: 1999.
- [3] VWEV-Verlag: Erdungen in Starkstromnetzen. 1992.

Informations sur les auteurs

Patrick Joye est depuis 2000 en tant que spécialiste de diagnostic chez BKW FMB Energie SA au département de l'Ingénierie Réseaux. patrick.joye@bkw-fmb.ch

Dr. David Orzan est depuis 1998 chez BKW FMB Energie SA. Jusqu'en 2004 il a dirigé le groupe Protection et Diagnostic. Depuis, il dirige le département de l'Ingénierie Réseaux. david.orzan@bkw-fmb.ch

Markus Zimmermann est depuis 2006 en tant que spécialiste de protection chez BKW FMB Energie SA au département de l'Ingénierie Réseaux. markus.zimmermann@bkw-fmb.ch

BKW FMB Energie SA, Bahnhofstrasse 20, 3072 Ostermundigen

Die deutsche Version dieses Artikels finden Sie auf Seite 21 dieser Ausgabe.

Zu den schönsten Aspekten unserer Tätigkeit gehört das Wissen, an beständigen Werten zu arbeiten.

An Energie, anstelle von Strohfeuern
an Leistung, anstelle von Hektik
an Rendite, anstelle von Raubbau.

Unsere Partner im Energie-Markt pflegen dies seit vielen Jahrzehnten. Unser Bestreben ist es, sie für weitere zu unterstützen.

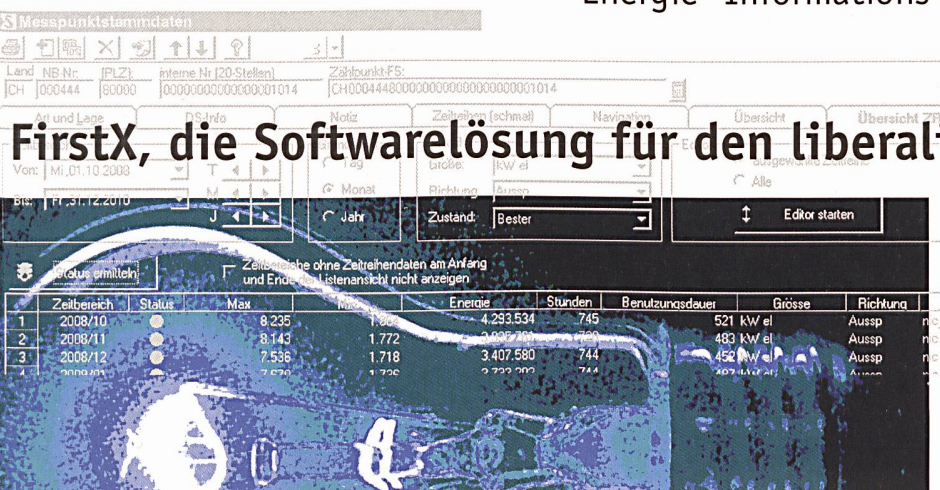
Beständigkeit hat Zukunft.



Energiesysteme und
Anlagentechnik AG
www.esatec.ch

Klafka & Hinz

Energie- Informations- Systeme GmbH



FirstX, die Softwarelösung für den liberalisierten Strommarkt.

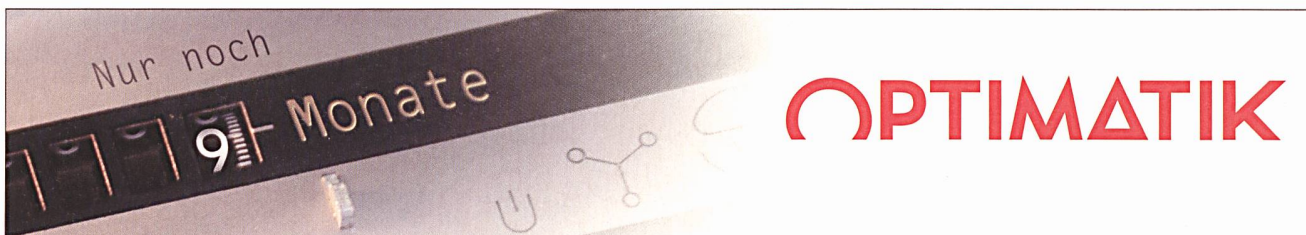
Klafka & Hinz steht für hoch entwickelte EDM-Software mit Modulen für Netzbetreiber, Vertrieb und Beschaffung.

Für die nahtlose Integration in Ihr Unternehmen stehen Standardschnittstellen zu allen gängigen Abrechnungs- und Zählerdatenerfassungssystemen zur Verfügung. Der Nachrichtenaustausch mit Ihren Geschäftspartnern erfolgt konform zur Regulierung im Schweizer Strommarkt.

Für Informationen über Referenzen wenden Sie sich an:

www.klafka-hinz.de





OPTIMATIK

Energiedaten erfassen, aufbereiten, bereitstellen, liefern...

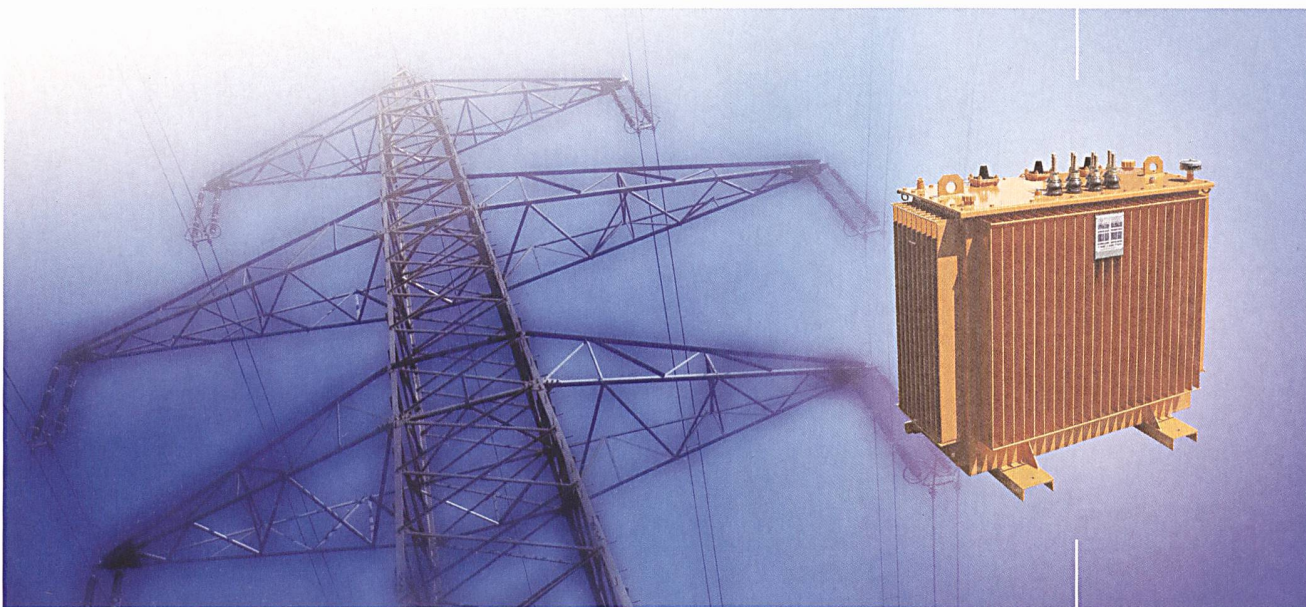
Als Netzbetreiber benötigen Sie ab 1. Oktober 2008 für die Messdatenbereitstellung zuverlässige Systeme.

Wir bieten die umfassende Lösung – von der mobilen Zählerdatenerfassung, dem Zählerfernauslese-System über das Energiedatenmanagement bis zur Internet-Visualisierung.

MOBILE ZÄHLERDATENERFASSUNG
ZÄHLERFERNAUSLESUNG
ENERGIEDATENMANAGEMENT

Optimatik AG
Gewerbezentrum Strahlholz
CH-9056 Gais
T +41 71 791 91 00
F +41 71 791 91 10
info@optimatik.ch

www.optimatik.ch



Die einfache Lösung für Ihr NISV-Problem
– wir reduzieren die Felder an der Quelle
auf ein Minimum.

**RAUSCHER
STOECKLIN**

Rauscher & Stoecklin AG
Reuslistrasse 32, CH-4450 Sissach
T +41 61 976 34 66, F +41 61 976 34 22
info@raustoc.ch, www.raustoc.ch