Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 99 (2008)
Heft: 13

Artikel: Mesures d'impédances de lignes
Autor: Cottens, Eric / Grangier, André / Chamorel, Pierre-André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855867

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

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

Mesures d'impédances de lignes

Résultats et expériences

Les caractéristiques des lignes des réseaux d'Energie Ouest Suisse (EOS) et de Romande Energie (RE) sont, comme la plupart des lignes dans le monde, calculées à l'aide de programmes basés sur les grandeurs physiques et géométriques des conducteurs et des pylônes ainsi que sur la géologie du sol parcouru par la ligne. Ces caractéristiques sont notamment nécessaires au réglage des relais de protection de distance. Le but de la mesure de ces caractéristiques sur les lignes des Mosses est de vérifier les valeurs calculées et, en particulier, les valeurs des impédances homopolaires et mutuelles homopolaires.

La première partie de cet article donne un rappel théorique sur les caractéristiques longitudinales des lignes de transport

Eric Cottens, André Grangier, Pierre-André Chamorel

d'énergie électrique ainsi que sur une méthode de mesure de ces dernières relativement aisée et simple à mettre en œuvre. Le déroulement des mesures est abordé suivi de l'analyse des résultats obtenus et leur comparaison avec les valeurs calculées. Finalement, le catalogue des actions résultantes des mesures est évoqué en guise de conclusion.

Les lignes faisant l'objet des mesures sont celles dites du col des Mosses. Il s'agit des lignes EOS 220 kV Botterens–St-Triphon et Hauterive–St-Triphon. La ligne RE 65 kV Pont de la Tine–St-Triphon est en support commun avec les lignes EOS sur une partie du tracé, comme illustré sur les figures 1 et 2. Suite à diverses imprécisions constatées dans la localisation de défauts monophasés sur ces lignes, EOS a décidé de procéder à la mesure des caractéristiques des lignes 220 kV des Mosses. Après discussion avec RE, il a été décidé de profiter de la consignation et de mesurer également la ligne 65 kV en support commun.

La mesure de telles caractéristiques ayant jusqu'il y a peu nécessité des moyens de mesure relativement importants, la plupart des relais de distance installés en Suisse et ailleurs dans le monde ont été paramétrés sur la base de valeurs résultantes de programmes de calcul. Ces programmes permettent le calcul des impédances sur la base de grandeurs physiques

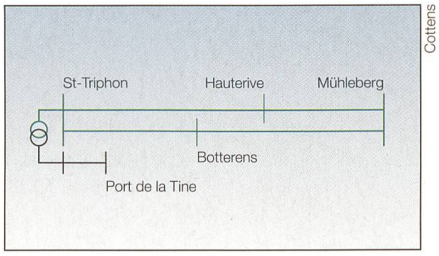

Figure 1 Schéma unifilaire.

et géométriques des conducteurs et des pylônes, de même que sur la géologie du sol parcouru.

Si le calcul des impédances directes donne en général des valeurs très proches de la réalité, ce n'est pas toujours le cas des valeurs homopolaires, y.c. pour l'impédance mutuelle homopolaire entre deux ternes, ces valeurs dépendant de la résistivité du sol. Ce paramètre peut varier considérablement d'un type de terrain à l'autre, de même qu'en fonction des conditions météorologiques précédant et lors de la mesure.

Les valeurs des impédances longitudinales des lignes servent en particulier au réglage des relais de protection de distance. La portée de la première zone de ces relais est généralement réglée à 85% de la longueur de la ligne, ceci afin de prendre en compte les imprécisions de la chaîne de mesure et ainsi éviter un déclenchement non sélectif en cas de défaut sur une ligne ou un ouvrage adjacent. La précision des impédances introduites dans les relais de distance constitue donc un critère fondamental pour obtenir un système de protection sélectif.

Rappel théorique

Lorsque deux ou plusieurs lignes aériennes empruntent un même tronçon (on dit communément qu'elles sont en parallèle), ces dernières s'influencent mutuellement. Le couplage mutuel n'est autre que la tension induite dans un conducteur alors qu'un courant parcourt un conducteur parallèle au premier.

Dans le cas de deux lignes, appelées I et II, les matrices des tensions, des impédances et des courants sont liées entre elles par la loi d'Ohm et forment les équations de la matrice (1).

Toutes les équations qui suivent sont exprimées en grandeurs complexes. Lorsque les ternes I et II sont parfaitement symétriques, on peut écrire:

$$\begin{aligned} Z_{RI} &= Z_{SI} = Z_{TI} = Z_a \\ Z_{RII} &= Z_{SII} = Z_{TII} = Z_c \\ Z_{RI-SI} &= Z_{RI-TI} = Z_{SI-TI} = Z_b \\ Z_{RII-SII} &= Z_{RII-TII} = Z_{SII-TII} = Z_d \end{aligned} \qquad (2)$$

de plus, si l'on tient compte du fait que la distance séparant les ternes I et II est beaucoup plus grande que celle séparant les conducteurs d'un même terne entre eux, on peut alors admettre que:

$$Z_{RI-RII} = Z_{RI-SII} = Z_{RI-TII} = Z_M \qquad (3)$$

En tenant compte de ce qui précède, on obtient la matrice simplifiée (4).

$$\begin{pmatrix} U_{RI} \\ U_{SI} \\ U_{TI} \\ U_{RII} \\ U_{SII} \\ U_{TII} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{RI} & Z_{RI-SI} & Z_{RI-TI} & Z_{RI-RII} & Z_{RI-SII} & Z_{RI-TII} \\ Z_{SI-RI} & Z_{SI} & Z_{SI-TI} & Z_{SI-RII} & Z_{SI-SII} & Z_{SI-TII} \\ Z_{TI-RI} & Z_{TI-SI} & Z_{TI} & Z_{TI-RII} & Z_{TI-SII} & Z_{TI-TII} \\ Z_{RII-RI} & Z_{RII-SI} & Z_{RII-TI} & Z_{RII} & Z_{RII-SII} & Z_{RII-TII} \\ Z_{SII-RI} & Z_{SII-SI} & Z_{SII-TI} & Z_{SII-RII} & Z_{SII} & Z_{SII-TII} \\ Z_{TII-RI} & Z_{TII-SI} & Z_{TII-TI} & Z_{TII-RII} & Z_{TII-SII} & Z_{TII} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{RI} \\ I_{SI} \\ I_{TI} \\ I_{RII} \\ I_{SII} \\ I_{TII} \end{pmatrix} \qquad (1)$$

$$\begin{pmatrix} U_{RI} \\ U_{SI} \\ U_{TI} \\ U_{RII} \\ U_{SII} \\ U_{TII} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_a & Z_b & Z_b & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_b & Z_a & Z_b & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_b & Z_b & Z_a & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_c & Z_d & Z_d \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_d & Z_c & Z_d \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_d & Z_d & Z_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{RI} \\ I_{SI} \\ I_{TI} \\ I_{RII} \\ I_{SII} \\ I_{TII} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Les principes de mesure des impédances directes et homopolaires ont déjà été décrits de manière détaillée dans divers publications et notamment dans [1]. Nous nous intéresserons ici à la mesure de l'impédance mutuelle homopolaire, en particulier lorsque les lignes en support commun sont de nature différente. L'impédance mutuelle homopolaire est définie par la relation existante entre un courant I_0 circulant dans chaque phase du terne I et la tension induite mesurée entre les trois phases du terne II et la terre, de telle manière que:

$$U_{0II} = 3 \cdot I_{0I} \cdot Z_M \quad (5)$$

Outre la méthode classique qui consiste à mesurer la tension U_{0II} du 2e terne en parallèle, ce qui en pratique ne s'avère pas chose aisée, une méthode appelée courant-courant plus simple à mettre en œuvre dans la pratique a été décrite dans un numéro précédent [2]. La différence dans le cas de la présente mesure par rapport à [2] réside dans le fait que les trois ternes que l'on désire mesurer sont de nature et de longueur différentes. Une mesure (identifiée avec l'indice 1 dans les équations 6 à 12) de la tension homopolaire U_{0I} et du courant homopolaire I_{0I} du terne I est effectuée lorsque les 3 phases du terne en parallèle sont mises à terre aux deux extrémités de la ligne. Dans ce cas, la tension homopolaire du terne II U_{0II} est nulle.

A partir de cette mesure, on obtient les équations (6) et (8):

$$\begin{aligned} 0 &= (Z_c + 2Z_d) \cdot I_{0II} + 3Z_M \cdot I_{0I} \\ &= Z_{0II} \cdot I_{0II} + 3Z_M \cdot I_{0I} \end{aligned} \quad (6)$$

d'où l'on tire:

$$I_{0II} = -\frac{3Z_M \cdot I_{0I}}{Z_{0II}} \quad (7)$$

$$U_{0I} = (Z_a + 2Z_b) \cdot I_{0I} + 3Z_M \cdot I_{0II} \quad (8)$$

En remplaçant (7) dans (8), on obtient:

$$U_{01} = (Z_a + 2Z_b) \cdot I_{0I} - \frac{9Z_M^2}{Z_{0II}} \cdot I_{0I} = Z_{0I} \cdot I_{0I} - \frac{9Z_M^2}{Z_{0II}} \cdot I_{0I} \quad (9)$$

ce qui donne:

$$Z_{01} = \frac{U_{01}}{I_{0I}} = Z_{0I} - \frac{9Z_M^2}{Z_{0II}} \quad (10)$$

d'où:

$$Z_M = \frac{1}{3}\sqrt{Z_{0II}(Z_{0I} - Z_{01})} \quad (11)$$

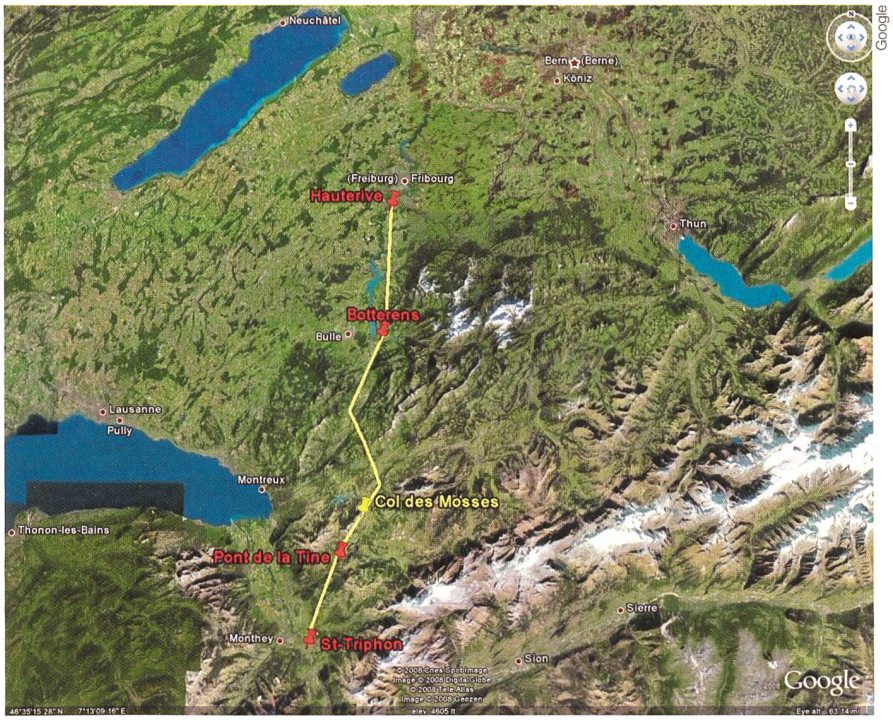

Figure 2 Tracé des lignes des Mosses.

et finalement:

$$Z_{0M} = 3Z_M = \sqrt{(Z_{0II}(Z_{0I} - Z_{01})} \quad (12)$$

A noter que les valeurs des impédances homopolaires propres des ternes I et II, Z_{0I} et Z_{0II}, doivent être rapportées à la température de la mesure de Z_{01} de l'équation (12), ceci afin de disposer de la même référence de température.

Déroulement des mesures

Les mesures ont été effectuées au poste de St-Triphon les 10 et 11 mars 2008, sur la base de séquences de mesures établies au préalable et numérotées de manière à faciliter la coordination entre les postes. En effet, même si les mesures en elles-mêmes sont rapides, elles nécessitent un nombre de manœuvres important dans les postes. A cet effet, une séance de présentation des essais a été organisée avec les agents chargés des manœuvres locales dans les postes de St-Triphon, Botterens, Hauterive et Pont de la Tine.

Pour la mesure, l'appareil d'injection primaire Omicron CPC100 et l'unité de couplage CP CU1, de même qu'un boîtier de mise à terre muni de parafoudres ont été utilisés, comme le montre la figure 3. Pour chaque mesure, les valeurs des courants et tensions ont été relevées pour des fréquences allant de 30 à 130 Hz, avec notamment deux mesures à 30 et deux mesures à 70 Hz permettant de déterminer les valeurs moyennes à 50 Hz, sans la présence de signaux perturbateurs provenant d'éléments en service lors de la mesure.

Les valeurs des courants et tensions mesurées et enregistrées par l'appareil CPC 100 ont ensuite été transférées dans des modèles de fichiers Excel mis à disposition par Omicron et modifiés selon l'équation (12) pour la mesure de l'impédance mutuelle homopolaire. Lors de chaque mesure, la température et le degré d'humidité ont été relevés au poste de St-Triphon. Se basant sur une différence de température de –0,5 °C/100 m en fonction de l'altitude, la température des conducteurs a été calculée pour quelques points situés sur le tracé des lignes, à partir de la température mesurée au poste de St-Triphon. Finalement, une température moyenne des conducteurs pour chaque mesure a été déterminée.

Analyse des résultats

Les résultats obtenus pour les réactances directes concordent parfaitement avec les calculs puisque l'on dénote une différence maximale de 2,3% sur la ligne Pont de la Tine–St-Triphon.

Quant aux résistances, on observe que les valeurs mesurées et rapportées à 20 °C sont toutes inférieures de 5 à 12% par rapport aux valeurs calculées. Cette différence peut s'expliquer d'une part par la méthode simpliste de détermination de la température moyenne des conducteurs décrite précédemment. En effet, il est fort probable que la température moyenne des conduc-

teurs au moment des mesures était inférieure à la valeur déterminée. D'autre part, la précision de mesure de l'angle de déphasage courant-tension est de l'ordre de 0,5 à 1,5 degrés suivant le calibre de courant injecté, ce qui implique une erreur de quelques % sur la résistance.

L'impédance homopolaire dépend fortement de la nature du sol sur le tracé de la ligne et des conditions météorologiques avant et pendant la mesure. Les lignes des Mosses empruntant un tracé de montagne, les calculs des impédances homopolaires avaient été effectués avec une résistivité du sol de ρ_{sol} = 500 Ωm, correspondant à un sol rocailleux. Les résultats de mesure ont fait apparaître une différence notoire entre calcul et mesure allant de 10 à 15% sur l'impédance homopolaire Z_0. Après discussion avec EOS, du fait de la nature du terrain plutôt forestier, les valeurs des impédances homopolaires ont été à nouveau calculées avec cette fois une résistivité du sol de ρ_{sol} = 100 Ωm. Le nouvel écart entre calcul et mesure varie cette fois entre 2 et 8%. Cette différence restante s'explique entre autres par le fait que le modèle de calcul est basé sur l'hypothèse que le conducteur de garde est mis à la terre aux deux extrémités avec une résistance proche de zéro, comme mesurée dans les postes. Cette hypothèse n'est pas vérifiée au Pont de la Tine où le conducteur de garde n'est pas directement relié au poste.

Ces résultats ont naturellement une influence sur le réglage du facteur k_0 des relais de distance, facteur qui permet de déterminer la valeur de l'impédance vue du relais. Le facteur k_0 est déterminé de la manière suivante:

$$k_0 = \frac{1}{3}\left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}\right) \qquad (13)$$

Les relais de protection de distance sont actuellement réglés avec des facteurs k_0 basés sur le calcul avec ρ_{sol} = 500 Ωm, ce qui implique que les portées réelles de 1re zone sont modifiées selon les valeurs du tableau I pour des défauts phase-terre. A noter que l'erreur de portée indiquée dans ce tableau ne tient pas compte de l'erreur due à l'impédance mutuelle homopolaire abordée plus loin.

L'impédance homopolaire a également été mesurée avec les lignes en support commun en service. Les résultats de mesure de l'impédance homopolaire diffèrent considérablement de ceux obtenus lors de la mesure normale. Cette pratique, bien que comportant l'avantage de ne pas nécessiter la coupure du ou des ternes en parallèle, est donc à déconseiller et ceci pour les raisons suivantes:

Cottens

Figure 3 Infrastructure de mesure.

- la valeur mesurée dépend de la charge momentanée du ou des ternes en parallèle,
- la valeur mesurée ne correspond pas à la définition de l'impédance homopolaire.

Pour chaque paire de ternes, les impédances mutuelles homopolaires Z_{0M} ont été mesurées deux fois, soit en injectant un courant sur l'un, puis sur l'autre terne. Cette méthode permet notamment de valider les valeurs obtenues, celles-ci devant être égales selon le principe de réciprocité. Les résultats obtenus par les deux mesures concordent pratiquement parfaitement, ce qui permet de les valider et permet par la même occasion de vérifier le principe de réciprocité entre les ternes. Dans le détail, la valeur de Z_{0M} mesurée entre les deux ternes 220 kV est inférieure de 6% par rapport à la valeur calculée, tandis que cet écart est de 18% entre le terne 65 kV et les ternes 220 kV. Comme dans le cas des impédances homopolaires, les hypothèses utilisées pour le calcul et non vérifiées peuvent en partie expliquer ces différences.

L'impédance mutuelle homopolaire influence de manière significative la mesure d'un relais de distance lors de défauts à la terre. Bien que les relais de distance modernes permettent la compensation de l'impédance mutuelle homopolaire par la mesure du courant I_0 du terne en parallèle, cette opération n'est généralement pas mise en œuvre dans la pratique en raison des complications de câblage engendrées. L'influence dépend cependant de la topologie du réseau aux environs des ternes en parallèle et notamment des impédances de sources. Des calculs de défauts monophasés en plusieurs endroits des lignes considérées ont donc été effectués par EOS à l'aide du programme Neplan afin de déterminer les impédances réelles vues par les relais de distance.

Conclusions

La méthode de mesure d'une ligne à l'aide de l'appareil Omicron CPC 100 est

Ligne	*k_0 calculé avec ρ_{sol} = 500 Ωm*	*k_0 réglé sur le relais de distance*	*k_0 mesuré*	*Erreur de mesure de Z de la prot. Z< (défaut PH-E)*
220 kV Botterens–St-Triphon	0,81	0,90	0,70	12 %
220 kV Hauterive–St-Triphon	0,83	0,90	0,70	12 %
65 kV Pont de la Tine–St-Triphon	0,77	0,77	0,64	8,2 %

Tableau I Erreur de portée de la zone 1 des relais de protection.

relativement aisée et rapide. Il faut malgré tout relever l'importance de la préparation détaillée des essais qui a permis de gagner du temps lors des mesures.

Conformément aux prévisions, les valeurs des impédances directes calculées correspondent parfaitement aux valeurs réelles. Ce n'est par contre pas le cas pour les impédances homopolaires ni pour les mutuelles homopolaires qui dépendent entre autres fortement de la nature du sol. Suite à ces mesures, la valeur de la résistivité de sol ρ_{sol} pour les lignes des Mosses a d'ailleurs été réduite de 500 à 100 Ωm dans le programme de calcul.

Lorsque les deux ternes 220 kV sont en service, on constate que la portée réelle des relais de distance est modifiée en raison de l'influence de l'impédance mutuelle homopolaire. Dans le cas où l'impédance mutuelle homopolaire a tendance à raccourcir la portée du relais de distance par augmentation de l'impédance résultante, il est important de disposer d'un système de téléprotection, de manière à éliminer tous les défauts sur la ligne sans temporisation.

Pour les lignes considérées, le facteur k_0 des relais de protection sera modifié selon le résultat des mesures. Pour les autres lignes, la résistivité du sol utilisée pour le calcul du facteur k_0 sera vérifiée. Au besoin, d'autres lignes seront mesurées.

Références

[1] L. Fickert: Bestimmung von Selbst- und Koppelimpedanzen, Omicron-Anwendertagung, Friedrichshafen, 2003.

[2] I. Klapper, K. Koreman: Mutuelle Kopplung entzaubert, Bulletin SEV/VSE 17/2007.

Informations sur les auteurs

Eric Cottens est ingénieur dipl. ETS/HES en électrotechnique. De 1991 à 2000, il occupe divers postes dans le domaine des protections au sein d'ABB à Baden. En 2000, il rejoint le département Infrastructures d'EOS à Lausanne où il s'occupe tant de l'exploitation que de travaux de rénovation des ouvrages. En 2007, il fonde la société Cottens Energie Services SA (CESSA).
Cottens Energie Services SA, 1429 Giez, eric.cottens@cessa.ch

André Grangier est ingénieur HES en énergie électrique. De 2004 à 2007, il occupe la fonction de dispatcher chez EOS. A fin 2007, il rejoint le département Infrastructures d'EOS où il s'occupe de la maintenance et divers projets.
EOS Réseau SA, 1001 Lausanne, andre.grangier@eos.ch

Pierre-André Chamorel est ingénieur-électricien SIA et Dr ès sciences techniques de l'EPFL. Depuis 1986, il est ingénieur-conseil indépendant dans le domaine de l'Energie électrique en Suisse et à l'étranger. En 1993, il rejoint à temps partiel EOS à Lausanne en qualité d'ingénieur expert pour les études de réseau.
EOS Réseau SA, 1001 Lausanne, pierre-andre.chamorel@eos.ch

Zusammenfassung

Impedanzmessungen an Leitungen

Ergebnisse und Erfahrungen. Die Daten der Leitungen von Energie Ouest Suisse (EOS) und Romande Energie (RE) werden – wie weltweit üblich – aufgrund von Programmen berechnet, die auf physikalisch-geometrischen Grössen der Leiter und Leitungsmasten sowie auf der Geologie der darunterliegenden Böden basieren. Diese Daten dienen namentlich der richtigen Einstellung der Leitungsdistanzschutzrelais. Ziel der Messung dieser Daten bei den Leitungen von Les Mosses ist es, die so ermittelten Werte und insbesondere diejenigen der Null- und Querimpedanzen zu überprüfen.

Robotron Schweiz GmbH – Industriestrasse 4, 9552 Bronschhofen – Telefon: 071 914 36 00 – www.robotron.ch

robotron Schweiz

ebIX – Komplexe Prozesse.
Einfach gelöst – *robotron*ebIX-Manager.*

- ideales Werkzeug zum Betrachten, Erzeugen und Konvertieren von ebIX
- komfortables Umwandeln von CSV- in ebIX-Dateien und umgekehrt
- kostenloser Download der Testversion: **www.robotron.ch/robotron-ebix-manager/**

ORACLE CERTIFIED PARTNER

Infotag ebIX

02.09.08, 10 – 17:00 Uhr in Zürich

Was ist ebIX?

Anforderungen für den Datenaustausch (SDAT) im liberalisierten Schweizer Markt

Umgang mit Bewegungsdaten

Kundenwechselprozesse

Melden Sie sich gleich an! Weitere Informationen finden Sie auf unserer Website.

Software mit Energie.

GWF

Kommunikation, die zählt – Strom, Gas und Wasser mit einer ZFA-Infrastruktur

Mit der GWFcoder®-Technologie nutzen Sie Ihre ZFA-Infrastruktur jetzt spartenübergreifend auch für die Auslesung von Gas- und Wasserzählern.

Technologie, die begeistert. Auslesung, die überzeugt.

GWF MessSysteme AG | CH-6002 Luzern | 041 319 50 50 | info@gwf.ch | www.gwf.ch