Mesure de l'impédance sur les lignes doubles avec le circuit parallèle en fonctionnement

Dr Simon Konzelmann, exploitant de réseaux de transport TenneT
Moritz Pikisch, OMICRON electronics

Résumé

Autrefois, la mesure de l'impédance sur les lignes doubles nécessitait toujours de couper les deux circuits. Cet état est rarement possible sur les réseaux en fonctionnement, c'est pourquoi lors de la dernière réunion des utilisateurs, une procédure a été proposée pour permettre théoriquement de réaliser une mesure en ne coupant qu'un seul circuit. La procédure de mesure a depuis été vérifiée sur site. Cet article expose les résultats de cette mesure.

Mots-clés

Ligne double, couplage mutuel, protection distance, mesure d'impédance de ligne, modèle de ligne

1 Introduction

Une procédure avait déjà été proposée lors de la réunion des utilisateurs OMICRON 2017 à Friedrichshafen, permettant de mesurer l'impédance homopolaire $\underline{Z}_0$ et l'impédance de couplage mutuellehomopolaire $\underline{Z}_{0M}$ d'une ligne double avec une seule ligne hors service, voir [1]. La vérification de cette méthode par une mesure réelle n'était pas possible avant la réunion des utilisateurs 2017 et est désormais décrite dans cet article. La connaissance de [1] est recommandée à la lecture de cet article pour une meilleure compréhension, car les principes théoriques de la nouvelle méthode ne sont pas repris en détail ici.

La vérification de la méthode nécessite une mesure de ligne double basée sur la méthode utilisée jusqu'à présent, dans laquelle les deux systèmes sont mis hors service simultanément. Ce n'est généralement possible qu'avant la mise en service d'une ligne double. Une telle possibilité s'est présentée avant la mise en service d'une ligne double de 380 kV entre Altenfeld (Thuringe) et Redwitz (Bavière). Il a été possible de prendre la mesure en premier lieu avec les deux circuits coupés simultanément afin d'avoir une base de comparaison pour la mesure utilisée dans la procédure proposée dans [1] (Chapitre 2). Ensuite, l'un des deux circuits a été mis sous tension afin d'obtenir l'influence typique d'une ligne parallèle en fonctionnement (comme dans le Chapitre 3).

Données de la ligne double :

- Niveau de tension : 380 kV
- Longueur :
  - 56,7 km au total
  - 25,7 km dans la zone exploitée par50 Hz
  - 31,0 km dans la zone exploitée par-TenneT
- Entre le poste d'Altenfeld (exploité par50 Hz) et le poste de Redwitz (exploité par TenneT)
- Désignation des deux circuits : ligne 459 et ligne 460

2 Mesure avec les deux systèmes mis hors tension simultanément

Les mesures suivantes ont été réalisées avec les deux systèmes coupés simultanément :

- Ligne 459 en totalité
- Ligne 460 en totalité
- Ligne 459 dans la zone exploitée par 50 Hz. Les deux systèmes des circuits ont été mis à la terre au niveau du dernier pôle dans la zone exploitée par 50 Hz.

Les valeurs correspondantes pour la section de ligne 459 dans la zone de TenneT ont été calculées par soustraction. Le tableau suivant récapitule les résultats de ces mesures.

Tabelle 1: Impédances basées sur la méthode de mesure conventionnelle

Ligne	Z_1 (R/X)	Z_0 (R/X)	Z_{0M} (R/X)
459 en totalité	0,858 14,1	4,98 38,8	3,94 15,4
460 en totalité	0,866 14,2	5,00 39,1	3,98 15,6
459 zone de 50 Hz	0,494 6,54	2,64 16,8	1,98 5,55
459 dans la zone de TenneT (calculée)	0,364 7,56	2,34 22,0	2,00 9,76

© **OMICRON** electronics GmbH 2018 – Réunion des utilisateurs

3 Vérification de la méthode alternative

La méthode vérifiée dans cet article a besoin des mesures suivantes pour déterminer $\underline{Z}_0$ et $\underline{Z}_{0M}$:

- Mesure de l'impédance $Z_{ABC-G,Operation}$ de la boucle ABC-G avec le circuit parallèle en fonctionnement.
- Détermination du facteur entre le courant injecté dans la boucle ABC-G et le courant résultant dans le circuit parallèle. Ce facteur est appelé $\underline{k}$ dans [1], Équation 5, mais pour des raisons pratiques, nous l'appellerons $\underline{fcp}$ (facteur du courant dans le système parallèle) par la suite.

L'équipement de test CPC 100 avec le CP CU1 a été connecté à la ligne 460 à cette fin. Au moment de la mesure, la ligne 459 était en fonctionnement et en charge, avec un courant nominal compris entre 1 000 A et 1 100 A. En raison de la forte charge et de la longueur de la ligne, une tension induite de plus de 500 V se serait produite à l'extrémité ouverte de la ligne, supérieure à la tension admissible du module de couplage CP CU1. Des limiteurs de tension spéciaux ont été utilisés pour abaisser la tension sous 500 V et permettre la mesure en dépit de ces circonstances.

En outre, l'impédance auxiliaire $\underline{Z}_{ABC[I-II]}$ devait être estimée.

Les chapitres suivants expliquent comment le facteur $\underline{fsp}$ a été mesuré et $\underline{Z}_{ABC[I-II]}$ estimé, en prenant la mesure sur site comme base et en la comparant aux résultats du Chapitre 2.

4 Détermination du facteur de courant

Un courant $\underline{I}_m$ a été appliqué à la boule ABC-G du circuit 460 afin de déterminer le facteur $\underline{fsp}$. Le système 459 était alors en fonctionnement. Le courant $\underline{I}_p$ dans le système 459 a été mesuré simultanément. La mesure a été prise sur le conducteur neutre de l'enroulement mesure du TC afin de déterminer les courants totaux dans les trois conducteurs de phase générés par le couplage avec le circuit parallèle. Le courant dans le conducteur neutre a été mesuré à l'aide d'une pince de courant Chauvin Arnoux modèle K2, voir [1].

Le facteur a ici l'indice *dir*, car c'est un facteur *directement déterminé* depuis une mesure de courant.

$$\underline{fcp}_{dir} = \frac{\underline{I}_p}{\underline{I}_m} \qquad \text{Éq. 1}$$

Pour disposer d'une valeur basée sur la mesure de l'impédance du Chapitre 2 à titre de comparaison, le facteur indirect $\underline{fcp}_{ind}$ est calculé à l'aide de l'équation suivante (voir [1], équations 8 et 9) :

$$\underline{fcp}_{ind} = \frac{\underline{Z}_0 - 3 * \underline{Z}_{ABC-G,Operation}}{\underline{Z}_{0M}} \qquad \text{Éq. 2}$$

Les deux facteurs $\underline{fcp}_{dir}$ et $\underline{fcp}_{ind}$ ont ensuite été déterminés à trois reprises, et les résultats figurent dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Résultats des mesures du facteur de courant

	fcp_{dir}	fcp_{ind}	$\varepsilon = \frac{fcp_{dir}}{fcp_{ind}}$
Mesure 1	0,243 (-7,10°)	0,214 (-10,93°)	+13 % (3,38°)
Mesure 2	0,235 (-8,01°)	0,240 (-10,37°)	-2 % (2,36°)
Mesure 3	0,237 (-9,22°)	0,24 (-9,82°)	-1 % (0,6°)

Explication des trois mesures :

- **Mesure 1 :** $\underline{Z}_{ABC-G,Operation}$ (la base pour $\underline{fcp}_{ind}$) a été mesurée près d'une demi-heure avant la mesure de $\underline{fcp}_{dir}$. Les impédances de terminaison $\underline{Z}_{T1}$ et $\underline{Z}_{T2}$ de la ligne 459 en fonctionnement ne peuvent clairement pas être présumées constantes au fil du temps. Ce résultat s'illustre par les différences entre les valeurs respectives de $\underline{fcp}_{dir}$ et $\underline{fcp}_{ind}$, voir [1], Figure 2.
- **Mesure 2 :** Nous avons essayé de prendre les deux mesures successivement le plus rapidement possible, ce qui a produit un écart considérablement moins important.
- **Mesure 3 :** Le CPC 100 ne permet actuellement pas de déterminer simultanément $\underline{Z}_{ABC-G,Operation}$ et $\underline{fcp}_{dir}$. Il faudrait pour cela prendre les mesures à l'aide des trois canaux IAC, V1AC et V2AC simultanément. Le DANEO 400 a donc été utilisé afin d'enregistrer simultanément $\underline{I}_m$, $\underline{V}_m$ et $\underline{I}_p$. Avec un écart d'amplitude d'à peine 1 % et un déphasage de 0,6°, on peut considérer que la mesure est très précise. Il convient de noter à cet effet que le transformateur de courant de la ligne 459 et la pince de

courant contiennent tous deux une erreur qui, malgré tout, reste négligeable.

5 Estimation de l'impédance auxiliaire

Tout comme l'impédance $Z_{ABC-G,Operation}$ et le facteur de courant $\underline{fcp}$, l'impédance auxiliaire $\underline{Z}_{ABC[I-II]}$ doit être déterminée (voir [1]). Cette impédance ne peut pas être mesurée car cela impliquerait de mettre les deux circuits de la ligne double hors service simultanément. Comme cette impédance concerne les 6 connecteurs de phase des deux circuits électriques et est indépendante du chemin de terre, elle peut néanmoins être déterminée avec une grande précision à partir de la géométrie des conducteurs.

Il existe trois façons possibles de calculer l'impédance auxiliaire :

- **Option 1 :** Calcul de l'impédance de boucle des 15 paires de conducteurs, puis résolution de la matrice en conséquence. La solution de la matrice n'est pas décrite plus en détail ici pour des raisons de complexité. OMICRON a cependant déjà préparé un modèle non officiel à cette fin.
- **Option 2 :** Mesure des trois impédances de boucle respectives dans les circuits I et II. La mesure des boucles L-L n'est pas affectée par les circuits parallèles encore en fonctionnement. À partir des six impédances de boucle mesurées, les neuf autres impédances peuvent être calculées. Cette méthode est particulièrement recommandée en cas d'écarts significatifs entre l'impédance du système direct mesurée et calculée $\underline{Z}_1$.
- **Option 3 :** Utilisation de $\underline{Z}_0$ et $\underline{Z}_{0M}$ pour le logiciel d'analyse du réseau électrique. L'impédance auxiliaire peut ensuite être calculée à partir de $\underline{Z}_0$ et $\underline{Z}_{0M}$ comme suit. La précision de l'impédance auxiliaire est comparable à celle de l'impédance du système direct, car seule la géométrie du conducteur de phase est pertinente ici.

$$\underline{Z}_{L1L2L3[I-II]} = \frac{2}{3} * \underline{Z}_0 - \underline{Z}_{0M} \qquad \text{Éq. 3}$$

La section de la ligne dans la zone de TenneT a été utilisée pour évaluer l'impédance auxiliaire. Cette section présente les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 31 km
- Diamètre de conducteur : 3,285 cm
- Distance entre les conducteurs dans la solution : 40 cm
- Nombre de conducteurs dans la solution : 4

À partir de ces données et de la disposition des conducteurs de la ligne double, les valeurs suivantes ont été obtenues :

$$X_1 = 7{,}8\Omega \qquad \text{Éq. 4}$$

$$X_{ABC[I-II]} = 8{,}1\Omega \qquad \text{Éq. 5}$$

La mesure des boucles L-L donne l'impédance de système direct suivante :

$$\underline{Z}_1 = 0{,}364 + j7{,}563 \qquad \text{Éq. 6}$$

La valeur correcte de la réactance auxiliaire peut désormais être calculée à partir de la valeur mesurée et calculée de la réactance du système direct :

$$X_{ABC[I-II],corr} = 7{,}85\Omega \qquad \text{Éq. 7}$$

La valeur R de l'impédance auxiliaire est calculée en multipliant la valeur R de l'impédance du système direct par ⅔. Ce simple calcul est possible car la valeur R ne dépend pas de la distance entre les conducteurs de phase.

$$R_{ABC[I-II]} = 0{,}243\Omega \qquad \text{Éq. 8}$$

La valeur comparative de l'impédance auxiliaire peut désormais être calculée à l'aide de l'équation 3, à partir de la mesure du Chapitre 2. Cela fonctionne comme suit :

$$R_{ABC[I-II]} = 0{,}226\Omega \qquad \text{Éq. 9}$$

$$X_{ABC[I-II]} = 8{,}16\Omega \qquad \text{Éq. 10}$$

Les valeurs R de l'impédance auxiliaire des équations 8 et 9 ne diffèrent que très légèrement. La valeur X de l'équation 7 ne diffère que de 4 % de la valeur de référence de l'équation 10. Cela indique que l'impédance auxiliaire peut être déterminée avec une grande précision à partir de la géométrie et de la mesure de l'impédance du système direct, et que $\underline{Z}_0$ et $\underline{Z}_{0M}$ peuvent, par conséquent, aussi être déterminées avec une grande précision.

6 Commentaires sur l'application pratique de la méthode

6.1 Mesure de l'impédance

Le modèle pour une ligne simple a été utilisé ici. Les mesures de boucles pour A-G, B-G et C-G peuvent néanmoins être ignorées. Les quatre mesures A-B, B-C, A-C et ABC-G suffisent pour calculer les impédances de boucle à la fréquence du réseau. L'impédance du système direct calculée dans le modèle est correcte, car les systèmes parallèles n'ont aucun effet notable sur l'impédance du système direct. La valeur pour l'impédance homopolaire est (probablement) trop petite, selon l'influence de la ligne parallèle sous tension.

6.2 Estimation de l'influence de la ligne parallèle sous tension

Pendant l'application d'un courant dans la boucle ABC-G, le courant a été mesuré avec une pince de courant Chauvin Arnoux modèle K2 au niveau du conducteur neutre du transformateur de courant de la ligne parallèle en fonctionnement. Un câble à paires torsadées est utilisé pour détecter le déphasage. Néanmoins, pour une estimation initiale, l'amplitude du courant peut être mesurée sans câble à paires torsadées à l'aide du testeur de mise à la terre portatif HGT1 et de la pince de courant. L'expérience a démontré que des câbles à paires torsadées ne sont généralement pas disponibles. En outre, selon l'emplacement de la mesure du courant, les exigences en matière de longueur de fil de test peuvent dépasser la longueur des fils disponibles.

L'amplitude du facteur de courant $\left|\underline{fcp}\right|$ est alors déterminé comme suit :

$$\left|\underline{fcp}\right| = CTRatio * \frac{\left|\underline{I_{p,sec}}\right|}{\left|\underline{I_m}\right|} \qquad \text{Éq. 11}$$

- CTRatio : rapport du transformateur de courant
- $I_{p,sec}$: courant mesuré avec la pince de courant
- I_m : courant appliqué

En outre, l'impédance auxiliaire doit être estimée. Néanmoins, ce calcul peut être simplifié pour une estimation grossière initiale en présumant que l'impédance auxiliaire représente ⅔ de l'impédance du système direct.

Les calculs nécessaires peuvent être réalisés sous EXCEL, par exemple. La figure ci-dessous illustre le modèle non officiel préparé par OMICRON :

	Re	Im	Abs	φ in °
Z_ABC-G,Operation in Ω	1.128	11.776	11.83	84.53
Current Factor fcp	0.235	0.000	0.235	0.00
Auxiliary Impedance in Ω	0.57733	9.4	9.42	86.49
Z_0,apparent in Ω	3.38	35.33	35.49	84.53
Z_0,corrected in Ω	4.16	41.85	42.06	84.33
Error Z_0,apparent	-18.61%	-15.58%	-15.61%	0.20
Z_0M in Ω:	3.29	27.75	27.94	83.24

Figure 1 : Exemple d'outil de calcul sous EXCEL

Remarques relatives à la figure 1 :

- Les champs de saisie sont bleus.
- L'impédance homopolaire apparente est égale à trois fois l'impédance $Z_{ABC-G,Operation}$, comparable à une mesure de ligne simple.
- L'impédance homopolaire corrigée est calculée selon [1], équation 8.
- L'erreur de l'impédance homopolaire apparente correspond à l'impédance homopolaire corrigée.
- L'impédance de couplage est calculée selon [1], équation 9.

La figure 1 illustre une estimation grossière initiale pour la mesure 2 du tableau 2. $Z_{ABC-G,Operation}$ a été directement tiré du modèle EXCEL de mesures sur les lignes simples. Un angle de 0° a été saisi pour le facteur de courant, car l'angle est généralement compris entre -20° et +20°. Des essais à différents angles de cette plage ont indiqué que l'erreur ne changeait pas beaucoup. L'impédance auxiliaire a été présumée aux ⅔ de l'impédance du système direct de la ligne 460.

Des erreurs dans la plage à deux chiffres inférieure ont été estimées pour R et X de l'impédance homopolaire. L'erreur réelle sera inférieure car l'impédance auxiliaire a été estimée de manière simplifiée (à savoir : plus petite) de sorte que l'erreur était une estimation conservatoire. Il est raisonnable dans le cas d'une telle erreur estimée importante de corriger l'impédance homopolaire en déterminant précisément le facteur de courant et l'impédance auxiliaire.

	Re	Im	Abs	φ in °
Z_ABC-G,Operation in Ω	1.128	11.776	11.83	84.53
Current Factor fcp	0.233	-0.033	0.235	-8.01
Auxiliary Impedance in Ω	0.57733	15.6	15.61	87.88
Z_0,apparent in Ω	3.38	35.33	35.49	84.53
Z_0,corrected in Ω	4.80	38.78	39.07	82.94
Error Z_0,apparent	-29.56%	-8.90%	-9.17%	1.59
Z_0M in Ω:	3.94	15.38	15.87	75.64

Figure 2 : Détermination des impédances finales avec l'outil de calcul

Remarques relatives à la figure 2 : La détermination du facteur de courant par une mesure donne un angle de -8,01°. La valeur R de l'impédance auxiliaire correspond aux ⅔ de l'impédance du système direct. La valeur X de l'impédance auxiliaire doit être estimée à partir de la géométrie de la ligne. La valeur X de l'impédance auxiliaire est déterminée ici à partir de $\underline{Z}_0$ et $\underline{Z}_{0M}$ depuis les mesures du Chapitre 2. Les résultats pour $\underline{Z}_0$ et $\underline{Z}_{0M}$ de la figure 2 correspondent parfaitement aux résultats du Chapitre 2. Cela souligne, une fois encore, la capacité de cette méthode à supprimer l'influence des lignes parallèles en fonctionnement.

	Re	Im	Abs	φ in °
Z_ABC-G,Operation in Ω	0.3	2.64	2.66	83.52
Current Factor fcp	0.007	0.000	0.007	0.00
Auxiliary Impedance in Ω	0.139	2.304	2.31	86.55
Z_0,apparent in Ω	0.90	7.92	7.97	83.52
Z_0,corrected in Ω	0.90	7.95	8.00	83.51
Error Z_0,apparent	-0.54%	-0.40%	-0.40%	0.01
Z_0M in Ω:	0.70	4.50	4.55	81.19

Figure 3 : Exemple d'influence négligeable d'une ligne parallèle

La figure 3 illustre un exemple de mesure avec l'influence négligeable d'une ligne parallèle. L'estimation repose ici encore sur l'amplitude du facteur de courant et la supposition que l'impédance auxiliaire correspond aux ⅔ de l'impédance du système direct. L'erreur de l'impédance homopolaire est estimée ici à moins de 0,5 %. Cela signifie qu'une détermination précise du facteur de courant n'est pas nécessaire. Cependant, l'impédance auxiliaire doit être estimée le plus précisément possible afin d'obtenir la détermination la plus précise possible de l'impédance de couplage. La valeur de $\underline{Z}_{0M}$ à la figure 3 est, par conséquent, incorrecte.

7 Résumé

La mesure décrite dans cet article a établi la valeur de la méthode décrite dans [1]. Elle a été réalisée en comparant une mesure conventionnelle de ligne double, dans laquelle les deux circuits électriques devaient être mis hors service simultanément, à la mesure proposée dans [1]. Résultat, les lignes doubles peuvent désormais être correctement mesurées après la mise en service, lorsque la coupure des deux circuits est nettement plus difficile qu'avant.

Références

[1] Pikisch, M. : La signification du couplage mutuel dans le modèle de ligne. Congrès des utilisateurs OMICRON 2017, Friedrichshafen

À propos des auteurs

Dr Simon Konzelmann a étudié le génie électrique à l'Université de la Ruhr à Bochum, de 1999 à 2004. De 2005 à 2009, il a fait partie de l'équipe de scientifiques de l'Institut de technologie haute tension et CEM de l'Université technique de Dortmund. De 2009 à 2011, il a travaillé chez EnBW Regional AG (aujourd'hui Netze BW) en tant qu'ingénieur en équipement électrique, responsable des transformateurs de puissance et des équipements 110 kV standard. En 2011, il est parti chez TenneT TSO Gmbh à Bayreuth, où il a occupé divers postes avant de devenir chef d'équipe des groupes de maintenance et d'entretien TenneT en 2017, en charge de l'exploitation des postes de TenneT en Bavière et Hesse.

Moritz Pikisch a étudié le génie électrique à l'Institut de technologie de Karlsruhe. Après avoir travaillé dans la formation chez OMICRON entre 2010 et 2013, il est passé à la gestion de produits en 2014. Il était alors responsable du CPC 100 et CP CU1, et plus particulièrement de la mesure de l'impédance de ligne et des tests des systèmes de mise à la terre. Depuis mars 2018, il travaille comme ingénieur applications pour OMICRON USA. Il y reste le principal contact au sein de la société pour les mesures d'impédance de ligne et des systèmes de mise à la terre.

OMICRON est une société internationale qui développe et commercialise des solutions innovantes de test et de diagnostic pour l'industrie électrique. Les produits OMICRON offrent aux utilisateurs une fiabilité extrême dans l'évaluation de leurs équipements primaires et secondaires. Des services dans le domaine du conseil, de la mise en service, du test, du diagnostic et de la formation viennent compléter l'offre OMICRON.

Des clients dans plus de 160 pays bénéficient déjà de la capacité d'OMICRON à mettre en œuvre les technologies les plus innovantes dans des produits d'une qualité irréprochable. Les centres de support implantés sur tous les continents leur offrent en outre une expertise et une assistance de tout premier plan. Tout ceci, associé à un réseau solide de partenaires commerciaux a contribué à faire de notre société un leader sur son marché dans l'industrie électrique.

Pour un complément d'information, une documentation supplémentaire et les coordonnées précises de nos agences dans le monde entier, veuillez visiter notre site Internet.

www.omicronenergy.com

© OMICRON