

Nouvelle topologie de compensateur de déséquilibre de tension pour les sous-stations ferroviaires 25kV/50Hz

Didier FLUMIAN¹, Philippe LADOUX¹, Emmanuel SARRAUTE¹

¹Laboratoire LAPLACE

RESUME - En raison de l'augmentation du trafic ferroviaire, les sous-stations monophasées 25kV/50Hz provoquent un déséquilibre des tensions sur le réseau triphasé qui peut devenir inacceptable pour le gestionnaire du réseau de transport d'électricité. La mise en œuvre d'un compensateur de déséquilibre est alors nécessaire. Cet article propose une nouvelle topologie de compensateur basée sur un circuit de Steinmetz contrôlé par des gradateurs MLI. Dans ce cadre, une modélisation analytique de la sous-station est développée, d'abord en l'absence de dispositif de compensation, puis avec le compensateur connecté. Un outil logiciel de dimensionnement, exploitant la consommation de puissance à la sous-station, est ensuite présenté. Un cas d'étude concret illustre l'approche proposée et permet de valider l'impact de ce dispositif sur la réduction du déséquilibre des tensions du réseau.

Mots-clés—Sous-station ferroviaire, circuit de Steinmetz, compensation active, gradateur MLI.

1. INTRODUCTION

En France, 10000 km de voies ferrées sont électrifiées en 25kV/50Hz. Au cours des vingt dernières années, le nombre de passagers transportés n'a cessé d'augmenter. Pour faire face à cette situation, il a fallu augmenter le nombre de trains aux heures de pointe ou mettre en service davantage de trains à grande capacité. Dans tous les cas, cela s'est traduit par une augmentation de la puissance absorbée par les sous-stations. Ainsi, au point de raccordement de certaines sous-stations, le taux de déséquilibre de tension a donc augmenté, dépassant la limite de 1% imposée par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE). Afin de répondre aux exigences des normes de qualité de l'énergie, le système de compensation est connecté en amont de la sous-station monophasée qui est raccordée entre deux phases (Fig. 1). Il permet d'injecter dans le réseau haute tension triphasé une composante inverse de courant en opposition de celle générée par la sous-station.

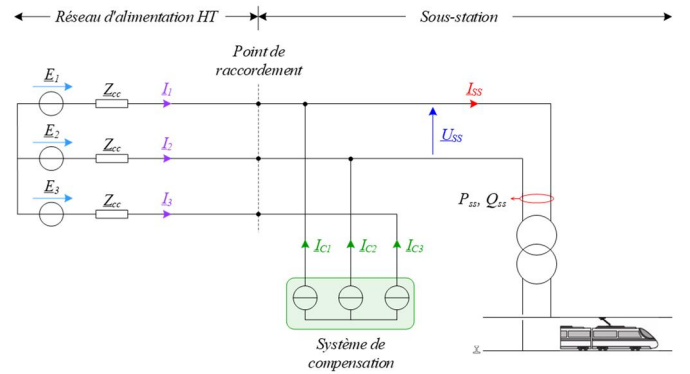


Fig. 1. Principe de la compensation de déséquilibre de tension.

Actuellement, parmi les différentes solutions de compensation existantes, le système le plus souvent utilisé est le STATCOM. Cette solution réside dans la mise en œuvre d'un onduleur de tension MLI [1]. Outre sa fonction de correction du déséquilibre de tension, il peut également être utilisé à faible charge pour compenser les harmoniques de courant. Cependant, ce dispositif présente des pertes dans les semi-conducteurs élevées ce qui dégrade le rendement global de cette structure [2], [3]. De plus, cette topologie nécessite l'utilisation de condensateurs de forte capacité sur le bus continu ce qui a un impact significatif sur le volume et la masse du système.

Dans ce contexte, afin de remédier à ces inconvénients, une solution de compensation basée sur le circuit de Steinmetz a donc été proposée [2], [4]. Son principe est décrit dans le paragraphe 2. Le paragraphe 3 propose une démarche analytique de modélisation de la sous-station, successivement sans puis avec le compensateur. Un outil logiciel destiné à dimensionner le système de compensation en fonction des puissances consommées par la sous-station est présenté au paragraphe 4. Le paragraphe 5 illustre la mise en œuvre d'une branche expérimentale du compensateur. Enfin, des conclusions sont exposées dans le paragraphe 6.

2. LE CIRCUIT D'EQUILIBRAGE DE STEINMETZ

Dans le cas où une charge monophasée est connectée à un réseau triphasé, C.P. Steinmetz (1865-1923) a montré que le déséquilibre de tension causé par les courants déséquilibrés peut être éliminé en connectant judicieusement une inductance et un condensateur au circuit initial [5][6]. La figure 2 illustre ce

principe dans le cas d'une charge résistive connectée entre les phases 1 et 2 du réseau triphasé.

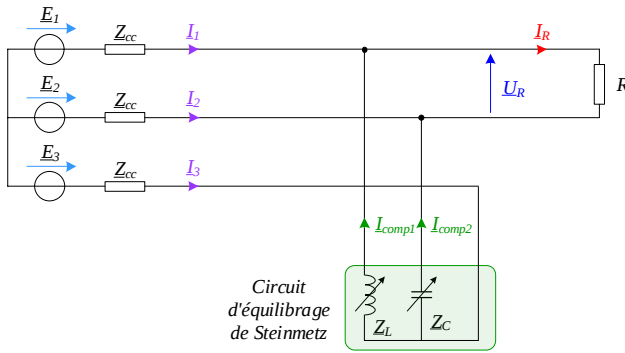


Fig. 2. Principe du circuit d'équilibrage de Steinmetz.

En considérant le circuit de la figure 2, l'ensemble des trois éléments R, L et C forment une connexion en triangle qui peut être parfaitement équilibrée en ajustant les valeurs de l'inductance et du condensateur. Chacun des courants de ligne sera donc de même amplitude et en phase avec la tension simple correspondante du réseau d'alimentation. Les grandeurs associées à ce circuit sont illustrées par le diagramme vectoriel de la figure 3.

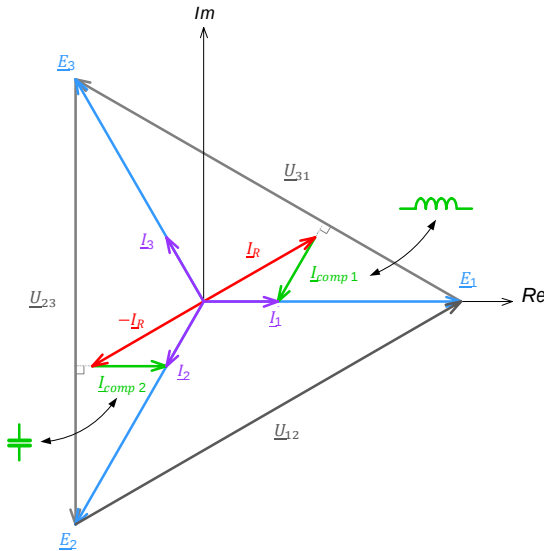


Fig. 3. Diagramme vectoriel des grandeurs tensions et courants.

La puissance mise en jeu par la sous-station étant variable, le circuit d'équilibrage de Steinmetz devra être auto-adaptatif selon une loi de commande spécifique. Dans cette optique, l'architecture proposée met en œuvre des gradateurs à découpage (MLI) connectés en série et ayant une loi de commande en boucle ouverte basée sur la mesure de la puissance active absorbée par la sous-station. Le rapport cyclique « α » qui représente la variable de réglage, est appliqué de manière identique à chacun des gradateurs constituant le compensateur (Fig. 4).

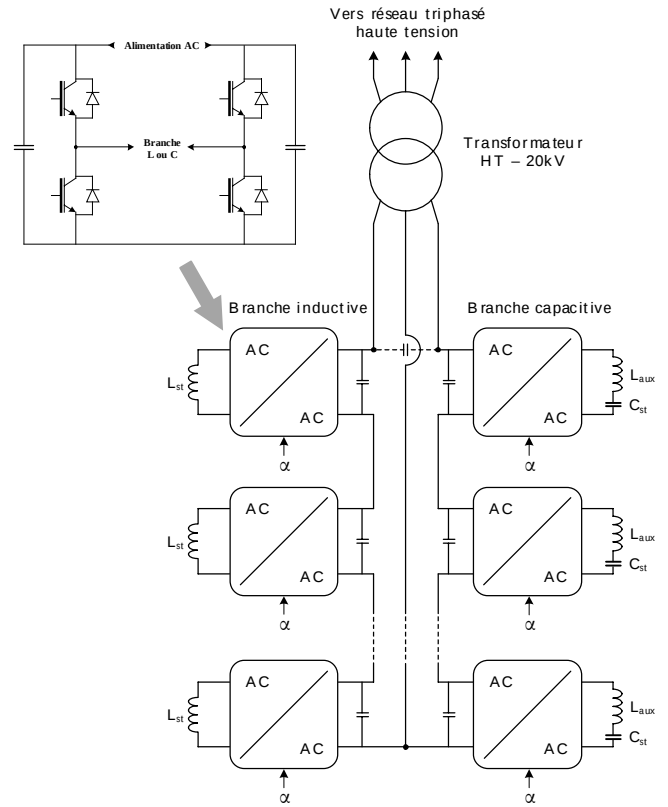


Fig. 4. Architecture du compensateur actif de Steinmetz.

3. DIMENSIONNEMENT DU COMPENSATEUR DE DESEQUILIBRE

L'objectif de cette démarche est de quantifier précisément le taux de déséquilibre de tension, en exploitant les mesures de puissances active et réactive moyennées sur dix minutes réalisées à la sous-station. Cette étape est déterminante puisqu'elle va permettre de déterminer les spécifications nécessaires pour le dimensionnement du système de compensation et d'évaluer ainsi son impact sur le taux de déséquilibre de tension au point de raccordement de la sous-station

3.1. Modélisation de la sous-station sans compensation

Le schéma équivalent d'une sous-station 25kV, connectée au réseau public est présenté à la figure 5. Les tensions et les courants y sont supposés sinusoïdaux à la fréquence de 50Hz.

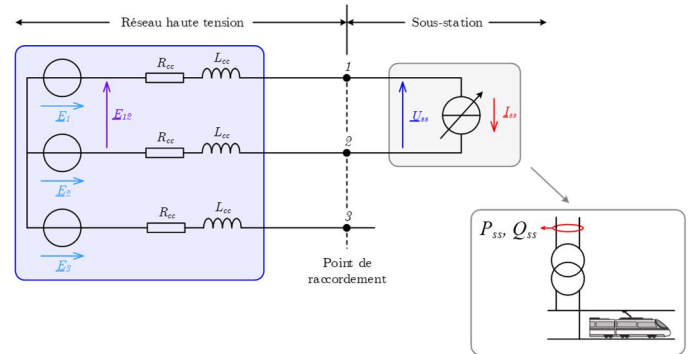


Fig. 5. Schéma équivalent d'une sous-station 25kV/50Hz.

Dans cette configuration, le réseau de transport d'électricité est modélisé par une source de tension triphasée idéale de séquence directe, associée à une impédance série formée par le circuit R_{cc} et L_{cc} correspondant à l'impédance de court-circuit de la ligne. Les paramètres de cette impédance sont déterminés à partir de la puissance de court-circuit au point de raccordement de la sous-station, généralement fournie par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité. La sous-station impose un courant I_{ss} d'amplitude et de phase variables en fonction des puissances active et réactive absorbées et respectivement notées P_{ss} et Q_{ss} . En se basant sur la méthode des composantes symétriques, également connue sous le nom de méthode de Fortescue [7]–[9], l'expression du courant de séquence directe est la suivante :

$$I_d = \frac{1}{3} I_{ss} (1 - a) \quad (1)$$

De même, l'expression du courant de séquence inverse est :

$$I_i = \frac{1}{3} I_{ss} (1 - a^2) \quad (2)$$

A partir de ces deux relations, la composante directe de tension peut s'écrire :

$$V_d = E_1 - Z_{cc} \times \frac{1}{3} I_{ss} (1 - a) \quad (3)$$

En multipliant cette expression par $(1 - a^2)$, cela conduit à :

$$U_d = E_{12} - Z_{cc} I_{ss} \quad (4)$$

De même, la composante inverse de tension s'écrit :

$$V_i = E_1 - Z_{cc} \times \frac{1}{3} I_{ss} (1 - a) \quad (5)$$

En multipliant cette expression par $(1 - a)$, cette relation devient :

$$U_i = -Z_{cc} I_{ss} \quad (6)$$

Avec :

$$Z_d = Z_i = Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \quad (7)$$

Le diagramme vectoriel de la figure 6 illustre les différentes grandeurs électriques des expressions précédentes :

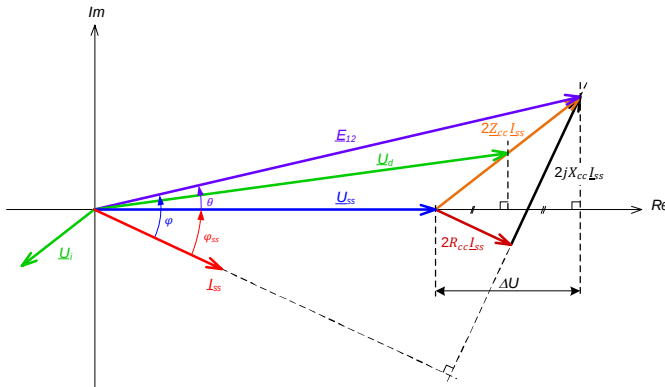


Fig. 6. Diagramme vectoriel des grandeurs relatives à la modélisation du circuit d'alimentation d'une sous-station 25kV.

Le triangle formé par $2R_{cc}I_{ss}$, $2X_{cc}I_{ss}$ et $2Z_{cc}I_{ss}$ est en réalité très petit devant les modules des vecteurs E_{12} et U_{ss} . Dans

ces conditions, la chute de tension ΔU peut être calculée en considérant la projection orthogonale du vecteur E_{12} sur l'axe réel (Hypothèse de Kapp) :

$$E_{12} = U_{ss} + \Delta U \quad (8)$$

Avec :

$$\Delta U = 2R_{cc}I_{ss}\cos\varphi_{ss} + 2X_{cc}I_{ss}\sin\varphi_{ss} \quad (9)$$

Les données fournies par SNCF Réseau étant les puissances active et réactive (P_{ss} , Q_{ss}) mesurées côté primaire du transformateur de la sous-station, il faut tout d'abord déterminer la chute de tension ΔU à partir de ces informations. Les relations qui définissent les puissances et l'expression (9) conduisent à une équation du second degré où la tension U_{ss} représente la seule inconnue :

$$U_{ss}^2 - E_{12}U_{ss} + (2R_{cc}P_{ss} + 2X_{cc}Q_{ss}) = 0 \quad (10)$$

La solution de cette équation permet ainsi de calculer le courant absorbé par la sous-station, ce qui donne :

$$I_{ss} = \frac{\sqrt{P_{ss}^2 + Q_{ss}^2}}{U_{ss}} \quad (11)$$

Considérant l'hypothèse de Kapp, la composante directe de tension devient :

$$U_d = \frac{E_{12} + U_{ss}}{2} \quad (12)$$

Par conséquent, le taux de déséquilibre de tension τ_V sera défini par la relation suivante :

$$\tau_V = \frac{U_i}{U_d} = \frac{2Z_{cc}I_{ss}}{E_{12} + U_{ss}} \quad (13)$$

3.2. Modélisation de la sous-station associée au compensateur actif de Steinmetz

Le compensateur actif de Steinmetz est intégré au circuit initial. Conformément à la figure 4, les branches inductive et capacitive de ce dernier sont représentées par des impédances équivalentes Z_L et Z_C ramenées au primaire du transformateur. Ces impédances tiennent compte de l'impédance série du transformateur et des condensateurs de filtrage en entrée des gradateurs. En pratique, les valeurs de ces éléments sont variables et dépendent du rapport cyclique appliqué aux gradateurs. Le schéma équivalent de la figure 7 illustre cette configuration.

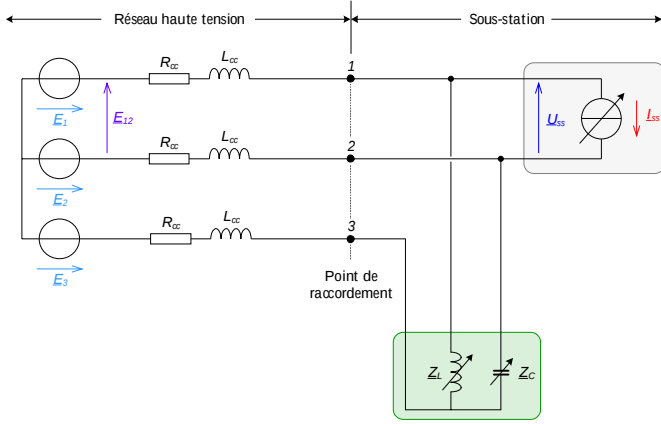


Fig. 7. Schéma équivalent d'une sous-station classique 25kV associée au compensateur de Steinmetz.

Les lois Kirchhoff relatives à ce circuit peuvent être exprimées sous forme de matrice comme suit :

$$\left[\frac{1}{Z}\right] \times [V_k] = -\frac{1}{Z_{cc}} [E_k] + [I] \quad (14)$$

Avec $1 \leq k \leq 3$ et $\left[\frac{1}{Z}\right]$ représentant la matrice admittance telle que :

$$\left[\frac{1}{Z}\right] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{Z_{cc}} + \frac{1}{Z_L}\right) & 0 & \frac{1}{Z_L} \\ 0 & -\left(\frac{1}{Z_{cc}} + \frac{1}{Z_C}\right) & \frac{1}{Z_C} \\ \frac{1}{Z_L} & \frac{1}{Z_C} & -\left(\frac{1}{Z_{cc}} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_L}\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

La résolution matricielle de ce système permet de déterminer le vecteur colonne $[V_k]$ puis de calculer le taux de déséquilibre de tension lorsque le compensateur de Steinmetz est connecté. Sous forme matricielle, l'expression de la solution est la suivante :

$$[V_k] = \left[\frac{1}{Z}\right]^{-1} \times \left(-\frac{1}{Z_{cc}}\right) [E_k] + \left[\frac{1}{Z}\right]^{-1} \times [I] \quad (16)$$

Il est cependant nécessaire de calculer le vecteur courant $[I]$. L'ensemble réseau haute tension et compensateur de Steinmetz est modélisé par un générateur de Thévenin composé d'une source de tension E_{th} en série avec une impédance équivalente de Thévenin notée Z_{th} (Fig. 8). Cette méthode permet pour un point de fonctionnement donné (P_{ss} , Q_{ss}), de calculer les valeurs efficaces de la tension U_{ss} aux bornes de la sous-station et du courant absorbé par la sous-station I_{ss} .

En appliquant le théorème de Kennely, l'impédance de Thévenin est définie telle que :

$$Z_{th} = \frac{Z \times 3Z_{cc}}{Z + 3Z_{cc}} \quad (17)$$

Avec :

$$Z = \frac{Z_L}{1 + \frac{Z_L}{3Z_{cc}}} + \frac{Z_C}{1 + \frac{Z_C}{3Z_{cc}}} \quad (18)$$

La détermination de la force électromotrice du générateur de Thévenin E_{th} est faite grâce à la résolution du système matriciel (16) en donnant une valeur nulle au courant I_{ss} . La valeur de la force électromotrice sera alors égale à la différence ($V_1 - V_2$).

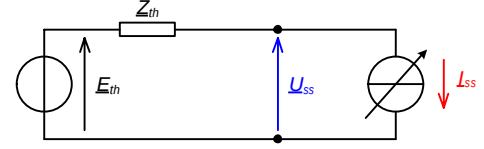


Fig. 8. Schéma équivalent final de la sous-station connectée au réseau haute tension.

Le diagramme vectoriel correspondant à ce circuit est le suivant :

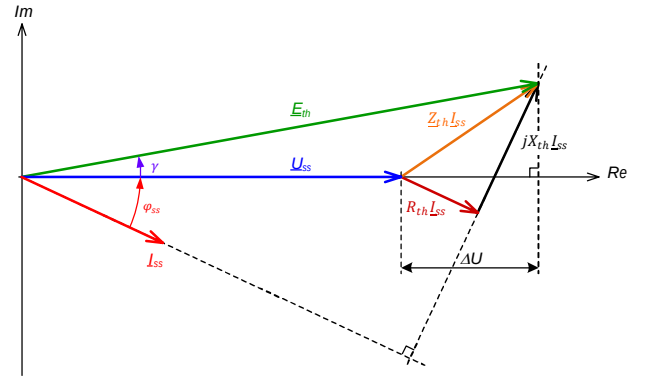


Fig. 9. Diagramme vectoriel correspondant au schéma équivalent final.

Le diagramme de la figure 9 permet d'écrire l'expression suivante :

$$E_{th} = U_{ss} + (R_{th} + jX_{th})I_{ss} \quad (19)$$

La projection des différentes grandeurs sur les axes réel et imaginaire nous permet d'établir la relation suivante :

$$E_{th}^2 = (U_{ss} + R_{th}I_{ss} \cos \varphi + X_{th}I_{ss} \sin \varphi)^2 + (X_{th}I_{ss} \cos \varphi - R_{th}I_{ss} \sin \varphi)^2 \quad (20)$$

En considérant les puissances active et réactive, l'expression (20) peut s'écrire :

$$U_{ss}^4 + U_{ss}^2 (2 \times (R_{th}P_{ss} + X_{th}Q_{ss}) - E_{th}^2) + (R_{th}^2 + X_{th}^2)(P_{ss}^2 + Q_{ss}^2) = 0 \quad (21)$$

En effectuant le changement de variable $X = U_{ss}^2$, l'expression (21) s'écrit sous la forme d'une équation du second degré dont une seule solution est valide. Connaissant la valeur de U_{ss} , la valeur efficace du courant I_{ss} absorbé par la sous-station est calculé avec la relation (11).

Le calcul du taux de déséquilibre de tension nécessite de connaître le courant I_{ss} en amplitude et en phase. Il convient donc de définir les angles φ_{ss} et γ . L'angle φ_{ss} est défini à partir des valeurs des puissances pour un point de fonctionnement par la relation :

$$\varphi_{ss} = \tan^{-1} \frac{Q_{ss}}{P_{ss}} \quad (22)$$

Le théorème d'Al-Kashi établit une relation entre les longueurs des trois côtés d'un triangle et l'un de ses angles. Ainsi, connaissant le module des grandeurs U_{ss} , I_{ss} , Z_{th} et E_{th} , ce théorème permet alors de déterminer l'angle γ tel que :

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{E_{th}^2 + U_{ss}^2 - (Z_{th} I_{ss})^2}{2 E_{th} U_{ss}} \right) \quad (23)$$

Pour chaque point de fonctionnement (c'est-à-dire $[P_{ss}, Q_{ss}]$), la valeur complexe du courant I_{ss} est désormais définie, par conséquent, le vecteur de tension $[V_k]$ est entièrement connu.

4. OUTIL DE DIMENSIONNEMENT DU COMPENSATEUR

Dans le but de dimensionner le compensateur, un outil logiciel a été développé. A partir des caractéristiques du réseau de transport d'électricité et des mesures des puissances absorbées par la sous-station, la mise en équation du circuit permet de déterminer les tensions composées au point de raccordement de la sous-station. Ensuite, le taux de déséquilibre de tension est déterminé à l'aide de la méthode des composantes symétriques. Cette même démarche est ensuite appliquée au circuit avec le compensateur connecté afin d'observer l'apport de celui-ci. Il convient dans ce cas de configurer les paramètres inhérents au compensateur. Ce modèle et la prise en compte de toutes les données ont été codés avec le logiciel Matlab. Pour rendre son utilisation plus conviviale et interactive pour l'utilisateur, une interface a été créée à l'aide du logiciel App Designer. Afin d'illustrer l'approche analytique présentée au paragraphe 3, l'étude d'un cas concret portant sur une sous-station identifiée comme critique est proposé sur une période d'une année. Les paramètres au point de raccordement de la sous-station sont synthétisés dans le tableau 1.

Tableau 1. Données sous-station.

Paramètres	Valeurs
Tension réseau haute tension (kV)	90
Puissance de court-circuit (MVA)	795
Argument de l'impédance de court-circuit (°)	80
Puissance de la sous-station (MVA)	10
Puissance du compensateur (MVA)	$2 \times 3,3$
Nombre de compensateurs installés	1

L'application doit être préalablement configurée, puis les relevés de puissance doivent être importés (moyennés sur une période de dix minutes). Une fois ces étapes réalisées, l'analyse peut être lancée. L'outil de dimensionnement fournit alors un ensemble de résultats permettant de quantifier l'effet du compensateur. Les résultats générés par l'application sont organisés en plusieurs onglets. Le premier onglet permet de visualiser le taux de déséquilibre sans et avec compensation (Fig. 10).

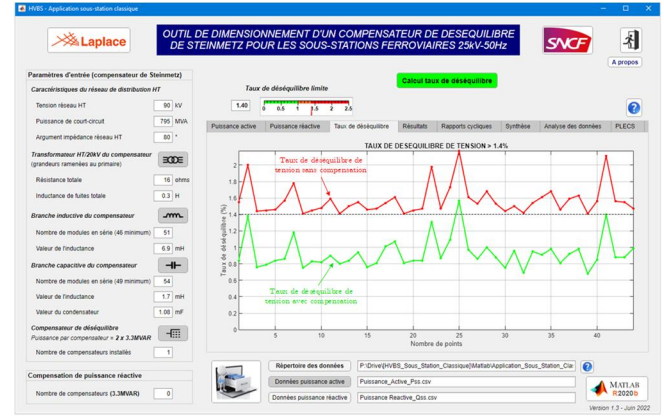


Fig. 10. Résultats du taux de déséquilibre de tension sans et avec compensation.

Pour tous les points qui sont au-delà de la limite fixée, nous disposons des informations suivantes :

- Date et heure de l'occurrence
- Puissances active et réactive consommées
- Taux de déséquilibre de tension sans et avec compensateur

Ces informations peuvent être téléchargées au format Excel et permettent de faire du post-traitement. L'application extrait également des indicateurs statistiques (moyenne, médiane et écart-type) des résultats obtenus et offre ainsi une vue d'ensemble des tendances et des performances du système étudié (Fig. 11 et Fig. 12).

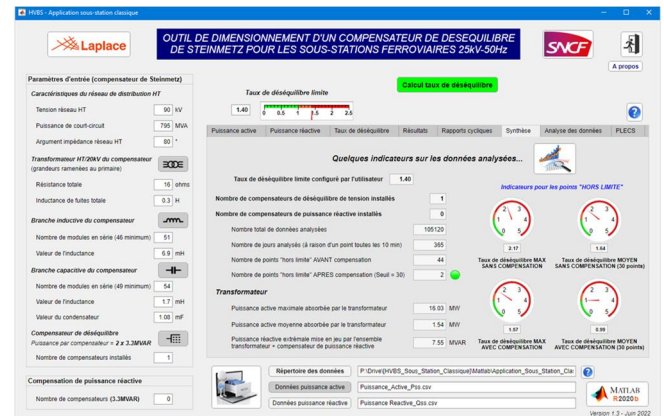


Fig. 11. Présentation synthétique de l'analyse.

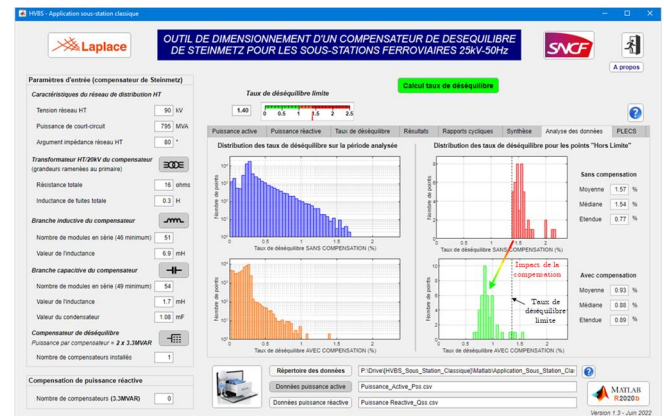


Fig. 12. Résultats statistiques.

Cet outil logiciel offre la possibilité de configurer automatiquement le logiciel de simulation PLECS et de simuler l'ensemble des points « hors limite » afin de visualiser le comportement du système dans sa globalité (taux de déséquilibre, puissances mises en jeu, tensions et courants). Cette validation par simulation permet de garantir la conformité des calculs analytiques obtenus.

5. MISE EN ŒUVRE D'UNE BRANCHE EXPERIMENTALE CAPACITIVE D'UNE PUISSANCE DE 3,3 MVAR

Afin de valider le principe d'association série de gradateurs MLI, une branche capacitive d'une puissance de 3,3MVAR connectée à un réseau d'alimentation 20kV/50Hz a été conçue afin de valider expérimentalement les performances du système. Cette branche est constituée de gradateurs connectés en série, permettant un contrôle précis de la puissance réactive injectée. Afin de s'assurer du bon fonctionnement du système, des mesures de tension et de courant ont été réalisées sur un des gradateurs (Fig. 13). Compte tenu du niveau de tension, l'oscilloscope ainsi que les sondes de mesures sont alimentés par batterie et placés sur un tabouret isolant haute tension.

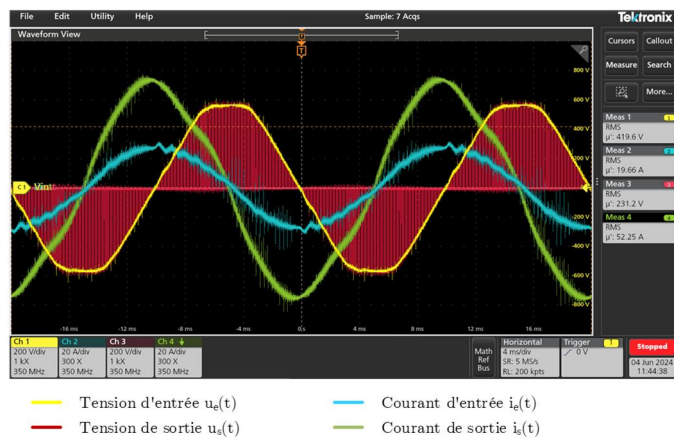


Fig. 13. Formes d'ondes de tension et de courant en entrée et en sortie d'un gradateur pour un rapport cyclique de 30%.

Par ailleurs, un essai d'une durée de 1 h 37 a été réalisé en appliquant un profil de puissance représentatif de la consommation typique d'une sous-station. Au cours de cet essai, une attention particulière a été portée à l'observation du comportement de la branche capacitive, notamment pour évaluer sa réponse aux variations de puissance. Les résultats obtenus ont permis de valider le bon fonctionnement de la branche capacitive

dans des conditions réalistes, confirmant ainsi la capacité du système à répondre dynamiquement aux fluctuations de charge imposées par la consommation de la sous-station.

6. CONCLUSIONS

Cet article a présenté une nouvelle topologie pour compenser le déséquilibre de tension provoqué sur le RTE par le raccordement entre deux phases des sous-stations ferroviaires 25kV/50Hz. L'architecture proposée offre une alternative intéressante et pertinente aux solutions actuellement utilisées en raison de sa modularité, de la simplicité de sa commande et de sa tolérance aux défauts. L'outil logiciel développé permet de calculer le taux de déséquilibre de tension initial puis de dimensionner le compensateur. Il est indispensable dans l'étude des sous-stations considérées comme critiques.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet HVBS (High Voltage Balancing System), financé par le gouvernement au titre du Programme d'investissements d'avenir, intégré à France 2030, et opéré par l'ADEME.

8. REFERENCES

- [1] A. P. Martins, V. A. Morais, and C. J. Ramos, "Analysis of the STATCOM/Balancer Robustness in Railway Applications," *Proc. - 2020 IEEE 14th Int. Conf. Compat. Power Electron. Power Eng. CPE-POWERENG 2020*, pp. 69–75, 2020.
- [2] P. Ladoux, J. Fabre, and H. Caron, "Power-Quality Improvement in ac Railway Substations," *IEEE Electr. Mag.*, no. september, pp. 6–15, 2014.
- [3] D. Flumian, P. Ladoux, and J. Fabre, "Comparison of Two Cascaded Converter Topologies for Voltage Balancing in AC Railway Substations," *6th Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. ESARS 2023 - Venice, Italy, 28-31 March 2023*, 2023.
- [4] P. Ladoux, G. Raimondo, H. Caron, and P. Marino, "Chopper-controlled steinmetz circuit for voltage balancing in railway substations," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5813–5822, 2013.
- [5] C. P. Steinmetz, *Theory and Calculation of Electric Circuit*. 1917.
- [6] D. Flumian, P. Ladoux, and E. Sarraute, "Calculation of the Voltage Unbalance Factor for 25kV- 50Hz Railway Substations," *20th Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP 2022 - Naples, Italy, May 29th - June 1st 2022*, 2022.
- [7] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 37, pp. 1027–1140, 1918.
- [8] G. Chicco and A. Mazza, "100 Years of Symmetrical Components," *Energies*, vol. 12, no. 3, pp. 1–20, 2019.
- [9] G. Manesse, "Transformateurs statiques," *Techniques de l'Ingénieur - Traité de Génie Electrique*. Techniques de l'ingénieur, pp. 1–48, 2000.