

SURTENSIONS TRANSITOIRES SUR ENROULEMENTS SECONDAIRES DE TRANSFORMATEURS MT/BT DUES À L'ENCLICHÉMENT DE CONDENSATEURS ; CORRÉLATION ENTRE VALEURS CALCULÉES ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

Philippe FERRACCI
Groupe Schneider
Centre de recherches
7, rue Volta
F-38050 Grenoble cedex 9
Tél : 33 (0)476579451
Fax : 33 (0)476579860
philippe_ferracci@mail.schneider.fr

Didier FULCHIRON
Groupe Schneider
Domaine d'activités stratégiques MT
ZAC Champ Saint Ange
F-38760 Varcès
Tél : 33(0)476398184
Fax : 33(0)476398742
didier_fulchiron@mail.schneider.fr

Michel SACOTTE Jacques WILD
Groupe Schneider
France Transfo
Voie Romaine
F-57281 Maizières les Metz
Tél : 33(0)387705757
Fax :33(0)387511009
michel_sacotte@mail.schneider.fr
jacques_wild@mail.schneider.fr

RESUME

Des investigations ont été réalisées dans des conditions où des condensateurs Basse Tension, pour correction du facteur de puissance, sont installés très près d'un transformateur MT/BT. Du fait de la basse impédance des courtes barres impliquées dans le circuit entre le transformateur et la batterie de condensateurs, des transitoires élevés se produisent dans le circuit Basse Tension avec des courants crête allant jusqu'à 35 fois le courant normal des condensateurs et des tensions crête allant jusqu'à pratiquement 2 p.u. Des calculs avec EMTP ont déjà été réalisés à partir d'essais à pleine puissance dans un laboratoire. Les résultats montrent une très bonne corrélation entre les valeurs calculées et mesurées. Par conséquent, un modèle de calcul peut être utilisé pour optimiser la valeur de la résistance de limitation d'une installation donnée, en considérant les paramètres réels des circuits MT et BT. Une valeur optimale de la résistance de pré-insertion permet de minimiser les surtensions transitoires pendant l'alimentation des batteries de condensateurs et ainsi réduit les contraintes diélectriques. Ceci augmente la durée de vie de l'installation et améliore la qualité de fourniture délivrée aux utilisateurs.

INTRODUCTION

Généralement toutes manoeuvres, apparition de défaut, coupure, etc. dans une installation électrique provoquent des phénomènes transitoires qui peuvent conduire à des surtensions. Les manoeuvres de condensateurs qui sont une des plus fréquentes opérations de manoeuvre sont une importante source de surtensions de manoeuvre.

Les besoins de réduction de la consommation énergétique et les pénalités sur le facteur de puissance ont accru l'utilisation des bancs de condensateurs à la fois par les distributeurs d'énergie et par les clients pour la correction du facteur de puissance, la réduction des pertes, le contrôle de la tension ou pour accroître l'énergie disponible.

La mise sous tension de batteries de condensateurs conduit à des surtensions à proximité ou même loin de l'installation. Ces surtensions peuvent même être amplifiées à d'autres endroits de l'installation.

L'amplitude des surtensions transitoires n'est pas sévère pour les réseaux de transport et de distribution mais peut être un problème selon le type d'équipements installé chez le client.

Du fait de l'amélioration de l'efficacité et de la flexibilité qu'elles procurent, les charges telles que les ordinateurs, des variateurs de vitesse, des équipements de communications ou médicaux sont de plus en plus utilisées par les clients.

Ce type de charges sont des exemples typiques d'équipements qui peuvent être sensibles aux surtensions transitoires provoquées par l'enclenchement de condensateurs; déclenchements intempestifs de variateurs de vitesse, problème d'ordinateurs (pertes de données ...) et autres dégradations ou destructions d'équipements. De nombreuses et fréquentes opérations de manoeuvre de banc de condensateurs (par exemple pour la compensation d'énergie réactive de charge fréquemment variables) peut augmenter l'impact (à court ou long terme) sur les équipements.

La combinaison de l'augmentation du nombre de charges sensibles et des bancs de condensateurs explique l'augmentation de problèmes de qualité d'énergie ressentis par la clientèle mais aussi pourquoi il est important de réduire l'amplitude des surtensions transitoires à l'enclenchement de condensateurs.

Le moyen le plus couramment utilisé et efficace pour réduire les transitoires provoqués par l'enclenchement de condensateurs est la résistance de pré-insertion.

Une valeur optimale de la résistance de pré-insertion permet de minimiser les surtensions transitoires à la mise sous tension de batteries de condensateurs et ainsi de réduire les contraintes diélectriques.

Ce qui augmente la durée de vie de l'installation et améliore la qualité de l'énergie délivrée aux utilisateurs qui sont de plus en plus sensibles aux perturbations électriques.

LES TRANSITOIRES DE MISE SOUS TENSION DE CONDENSATEURS

Les manoeuvres de condensateurs sont des événements normaux sur les réseaux des distributeurs et des clients.

Comme la tension ne peut varier de façon instantanée aux bornes d'un condensateur, la mise sous tension d'un condensateur dont la tension résiduelle (tension initiale) est égale à zéro, provoque une court-circuit instantanée (si aucune inductance est en série avec le condensateur) ou un creux de tension sur le jeu de barres ou est installée le condensateur. Du fait que l'énergie oscille entre le condensateur et l'inductance, l'effondrement de la tension est suivi d'une surtension transitoire oscillatoire superposée à la composante fondamentale.

Du fait des pertes joules et des charges du système (éléments résistifs) du réseau, la composante oscillatoire est amortie en moins d'une demi période du fondamental.

Les fréquences d'oscillation sont déterminées par les fréquences naturelles du circuit. La surintensité à travers le condensateur est déterminée par les impédances du réseau et est à la même fréquence que la surtension.

La valeur crête de la tension et du courant dépend de l'instant d'enclenchement par rapport à l'onde de tension.

Surtension maximale :

L'amplitude maximale de la première crête des surtensions est de l'ordre de deux fois l'amplitude crête de la tension (nominale) du réseau et apparaît à l'enclenchement de la première batterie de condensateurs (avec tension résiduelle égale à zéro) à un maximum de tension et sans batteries en parallèle déjà sous tension. En cas de tension résiduelle différente de zéro, des surtensions supérieures peuvent être atteintes ; par exemple lorsqu'un condensateur est chargé à la pleine tension au moment de sa mise sous tension (du fait du déphasage entre tension et courant lorsqu'un interrupteur interrompt le courant lors de son passage par zéro, la tension est maximale. Le condensateur est isolé de la source et en l'absence de dispositif de décharge reste chargé) la surtension crête peut approcher trois fois l'amplitude crête de la tension du réseau.

Surintensité maximale \hat{I} et fréquence dominante f_S des oscillations :

Mise sous tension du premier condensateur :

Lors de l'enclenchement de la première batterie de condensateurs la valeur crête et la fréquence de la surintensité transitoire sont calculées ci dessous (On suppose les résistances négligeables, les tensions résiduelles des condensateurs égales à zéro et les trois phases enclenchées simultanément) :

$$\hat{I} \approx I_N \sqrt{\frac{2S}{Q}} = \frac{V_N \sqrt{2}}{Z} \quad (1)$$

$$f_S = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2)$$

Ou:

I_N est le courant (r.m.s.) assigné du condensateur (A);

S est la puissance de court-circuit (VA) à l'endroit ou est installé le condensateur ;

Q est la puissance assignée du condensateur (VAR) ;

V_N est la tension (r.m.s.) nominale simple (entre phase et neutre) du réseau (V);

Z ($= \sqrt{L/C}$) est l'impédance caractéristique du circuit (Ω) ;

C est la capacité étoile équivalente (F) ;

L est l'inductance équivalente à la puissance de court-circuit S (H) ($L = 3V_N^2 / \omega S$).

La fréquence f_S varie entre quelques centaines de Hertz et quelques kilohertz.

Mise sous tension d'un condensateur en parallèle avec un/des condensateur(s) sous tension :

Lors de l'enclenchement de condensateurs en parallèle avec un ou des condensateur(s) déjà sous tension, la valeur crête et la fréquence de la surintensité transitoire traversant le contacteur manoeuvré sont calculées ci dessous (On suppose les résistances négligeables, les trois phases enclenchées simultanément, les batteries de condensateurs de capacités égales et les inductances en série avec les condensateurs égales) :

$$\hat{I} \approx \frac{n}{n+1} V_N \sqrt{2} \sqrt{\frac{C}{L'}} \quad (3)$$

$$f_S = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L'C}} \quad (4)$$

Ou :

n est le nombre de condensateur(s) déjà sous tension lors de l'enclenchement du n+1^{ième} condensateur ;

L' est l'inductance en série avec chaque condensateur (H).

La fréquence f_S est de l'ordre de quelques dizaines de kilohertz.

MODELISATION

Des investigations ont été réalisées dans des conditions où des condensateurs Basse Tension, pour correction du facteur de puissance, sont installés très près d'un transformateur MT / BT. Des calculs avec EMTP ont déjà été réalisés à partir d'essais à pleine puissance dans un laboratoire.

Le schéma unifilaire du modèle utilisé dans EMTP (dans le domaine fréquentiel de la fréquence dominante du transitoire) est tracé Figure 1.

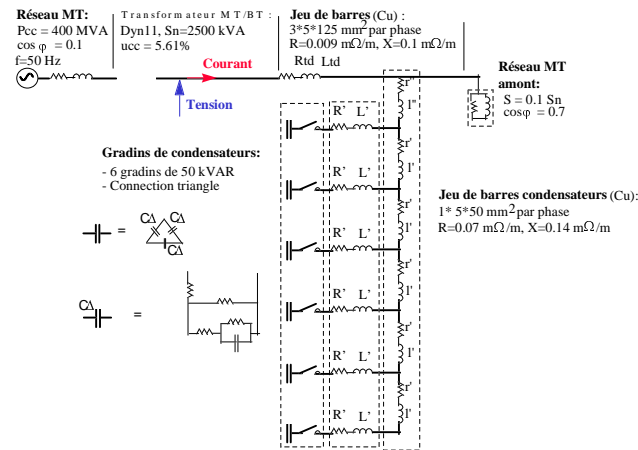


Figure 1 : Modèle EMTP pour l'enclenchement de banc de condensateurs

Le réseau MT est modélisé par une impédance R,L série calculée à partir de la puissance de court-circuit et d'une source de tension triphasée parfaite.

Le transformateur MT/BT (Dyn 2500 kVA) est simulé par trois transformateurs monophasés linéaires (non saturés).

Les jeux de barres sont pris en compte par leurs impédances de mode direct modélisées par des circuits R,L série non couplées calculées à partir de la géométrie des jeux de barres.

Les batteries de condensateurs sont modélisés en prenant en compte les pertes des diélectriques, fusibles internes, connexions et résistances de décharge.

Les contacteurs sont modélisés par trois interrupteurs parfaits fermés simultanément.

VALIDATION DU MODELE

Essais à pleine puissance :

Des essais à pleine puissance dont le schéma unifilaire est décrit Figure 2 ont été réalisés aux laboratoires d'essais des Renardières d'EdF.

Ces essais prennent en compte les variations dues:

- à l'instant d'enclenchement du contacteur,
- à l'utilisation, ou non, d'une résistance de limitation d'enclenchement sur ce contacteur,
- et au nombre de condensateurs sous tension.

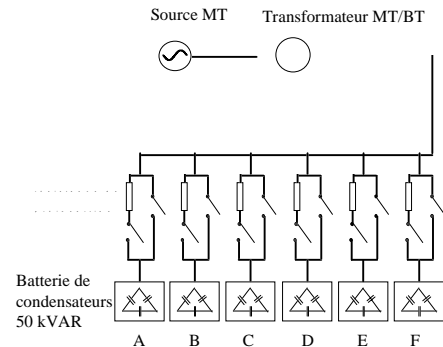


Figure 2 : Schéma unifilaire du circuit d'essais

Validation de la modélisation EMTP :

Les résultats de simulations réalisées grâce à EMTP (Electromagnetic Transients Program) montrent une très bonne corrélation entre les valeurs calculées et mesurées. Des exemples de comparaisons pour les tensions aux bornes des enroulements basse tension (tensions entre phase et neutre) et les courants secondaires du transformateur sont tracés Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 6.

Du fait de la basse impédance des courtes barres impliquées dans le circuit entre le transformateur et la batterie de condensateurs, des transitoires élevés se produisent dans le circuit Basse Tension avec des courants crête allant jusqu'à 35 fois le courant normal des condensateurs, donc supérieur à 2,4 kA (Figure 3c,d), et des tensions crêtes entre phases et neutre BT du transformateur MT/BT, allant jusqu'à pratiquement 2 p.u. (C'est à dire deux fois la tension nominale phase neutre du réseau) (Figure 3a,b).

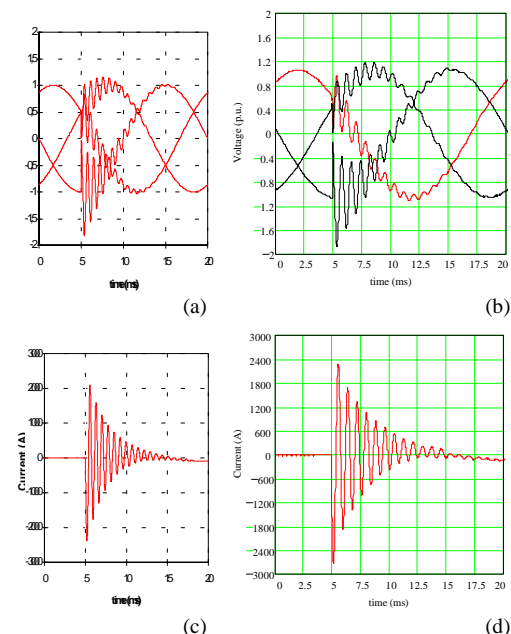


Figure 3 : Mise sous tension de la batterie de condensateurs A sans résistance de pré-insertion : comparaison entre simulations (tension (a) et courant (c)) et mesures (tension (b) et courant (d)).

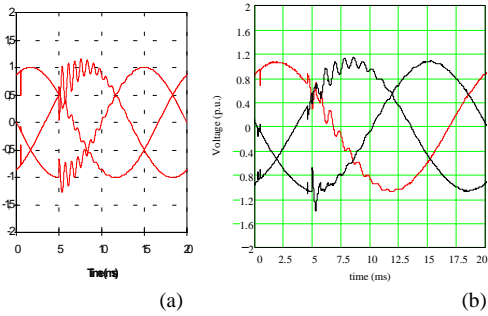


Figure 4 : Mise sous tension de la batterie de condensateurs A avec résistance de pré-insertion : comparaison entre simulations (tension (a)) et mesures (tension (b)).

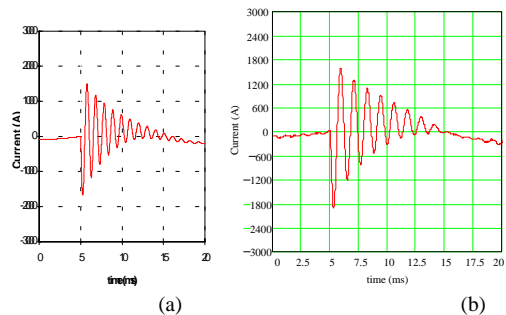
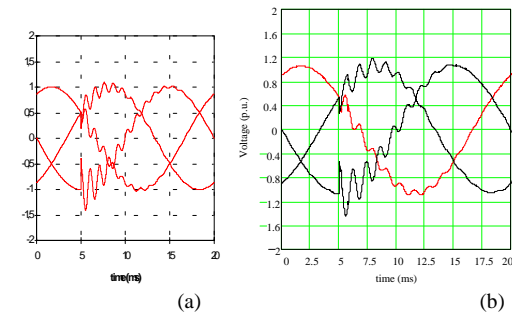


Figure 5 : Mise sous tension de la batterie de condensateurs A en parallèle avec la batterie de condensateurs B, sans résistance de pré-insertion : comparaison entre simulations (tension (a) et courant (c)) et mesures (tension (b) et courant (d)).

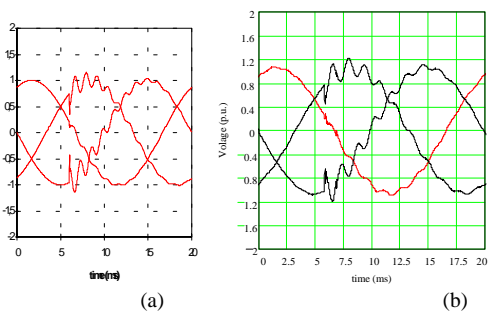


Fig.6 : Mise sous tension de la batterie de condensateurs A en parallèle avec les batteries de condensateurs B et C, sans résistance de pré-insertion : comparaison entre simulations (tension (a) et courant (c)) et mesures (tension (b) et courant (d)).

EXEMPLE D'APPLICATION : OPTIMISATION DE LA VALEUR DE LA RESISTANCE MOYENNE TENSION

Le moyen le plus souvent utilisé et efficace pour réduire l'amplitude des surtensions transitoires provoquées par l'enclenchement de condensateurs est la résistance de pré-insertion. Les contacteurs conçus pour manoeuvrer les condensateurs sont équipés de contacts secondaires et de résistances de limitation.

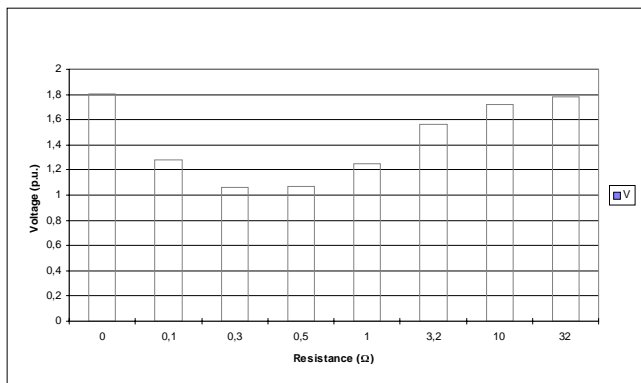
Les résistances qui limitent l'amplitude du transitoire initial sont ensuite court-circuitées en produisant un second transitoire (Figure 4). Une résistance bien calculée permet de réduire de façon efficace l'amplitude des surtensions de manoeuvre bien en dessous de 2 p.u.

Une valeur optimale de la résistance de pré-insertion permet de minimiser les surtensions transitoires pendant l'alimentation des batteries de condensateurs et ainsi réduit les contraintes diélectriques. Ceci augmente la durée de vie la fiabilité et la disponibilité de l'installation, diminue les coûts d'exploitation et de maintenance et améliore la qualité de fourniture délivrée aux utilisateurs, qui sont de plus en plus sensibles aux perturbations électriques.

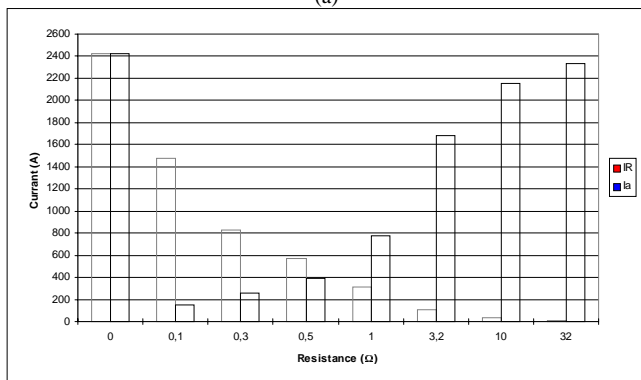
L'efficacité de la méthode de contrôle par résistance de pré-insertion dépend des paramètres du circuit. Le modèle de calcul validé par comparaison avec des mesures peut être utilisé pour optimiser la valeur de la résistance de limitation ainsi que sa tenue thermique pour une installation donnée, en considérant les paramètres réels des circuits MT et BT.

Dans le cas de l'installation décrite Figure 2, l'influence de la valeur de la résistance de pré-insertion sur la valeur crête du courant transitoire, l'amplitude de la surtension transitoire et de l'énergie dissipée dans la résistance de pré-insertion est étudié dans le cas de l'enclenchement de la première batterie de condensateurs (sans aucune autre batterie déjà sous tension) à un maximum de tension sur une phase. La valeur optimale de la résistance de pré-insertion est de l'ordre de $0,6 \Omega$ et minimise à la fois l'amplitude des surtensions transitoires d'enclenchement de gradins de condensateurs de 1,8 p.u. (sans résistance de pré-insertion) à 1,1 p.u. (Figure 7a) et des surintensités de 2,4 kA (sans résistance de pré-insertion) à 400 A (Figure 7b).

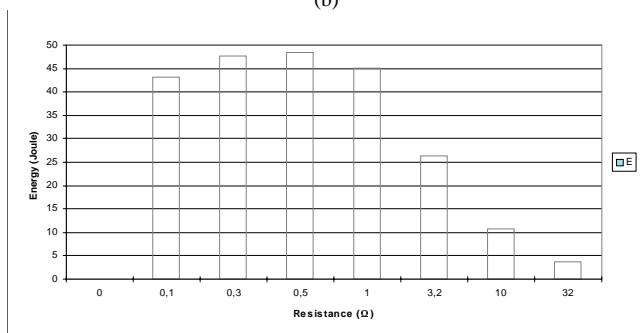
Le dimensionnement thermique de la résistance de pré-insertion dépend du temps de pré-insertion et de la fréquence des manoeuvres.



(a)



(b)



(c)

Figure 7 : Exemple d'application de la modélisation : optimisation de la valeur de la résistance de pré-insertion : (a) amplitude des surtensions transitoires en fonction de la résistance, (b) courant crête du contact de pré-insertion en fonction de la résistance, (c) énergie dissipée par la résistance de pré-insertion en fonction de la résistance.

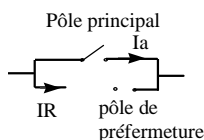


Figure 8 : Courant des pôles principaux et de préfermeture

Si la valeur crête des courant I_R et I_a (Figure 7b et Figure 8) ne sont pas compatibles avec la tenue des pôles principaux et de préfermeture, deux contacteurs peuvent être utilisés. De façon à éviter une destruction thermique de la résistance de pré-insertion en cas de non fermeture du contacteur qui court-circuite la résistance, la résistance de pré-insertion doit être dimensionnée ou protégée correctement.

CONCLUSION

Les besoins de réduction de la consommation énergétique et les pénalités sur le facteur de puissance ont accru l'utilisation des bancs de condensateurs à la fois par les distributeurs d'énergie et par les clients pour la correction du facteur de puissance, la réduction des pertes, le contrôle de la tension ou pour accroître l'énergie disponible.

La combinaison de l'augmentation du nombre de charges sensibles (tel que les variateurs de vitesse) et de batteries de condensateurs explique l'augmentation de problèmes de qualité d'énergie ressentis par la clientèle mais aussi pourquoi il est important de réduire l'amplitude des surtensions transitoires à l'enclenchement de condensateurs. Le moyen le plus couramment utilisé et efficace pour réduire les transitoires provoqués par l'enclenchement de condensateurs est la résistance de pré-insertion.

Des investigations ont été réalisées dans des conditions où des condensateurs Basse Tension, pour correction du facteur de puissance, sont installés très près d'un transformateur MT/BT.

Du fait de la basse impédance des courtes barres impliquées dans le circuit entre le transformateur et la batterie de condensateurs, des transitoires élevés se produisent dans le circuit Basse Tension avec des courants crête allant jusqu'à 35 fois le courant normal des condensateurs, donc supérieur à 2,4 kA, et des tensions crête allant jusqu'à pratiquement 2 p.u. (C'est à dire deux fois la tension nominale phase neutre du réseau).

Un nombre important de manoeuvres (par exemple pour la compensation d'énergie réactive de charges fréquemment variables) peut augmenter l'impact (à court ou long terme) sur l'équipement.

Les contacteurs conçus pour manoeuvrer les condensateurs sont équipés de contacts secondaires et de résistances de limitation.

Le dimensionnement thermique de la résistance de pré-insertion dépend du temps de pré-insertion et de la fréquence des manoeuvres.

En cas d'incompatibilité entre la valeur crête des courant transitoires obtenues avec la valeur de résistance qui minimise l'amplitude des surtensions transitoires et la tenue des pôles principaux et de préfermeture, deux contacteurs peuvent être utilisés. De façon à éviter une destruction thermique de la résistance de pré-insertion en cas de non fermeture du contacteur qui court-circuite la résistance, la résistance de pré-insertion doit être dimensionnée ou protégée correctement.

Des calculs avec EMTP ont déjà été réalisés à partir d'essais à pleine puissance dans un laboratoire.

Les résultats montrent une très bonne corrélation entre les valeurs calculées et mesurées, en tenant compte des variations dues à l'instant initial du contacteur et à l'utilisation, ou non, d'une résistance de limitation d'enclenchement sur ce contacteur. Par conséquent, un modèle de calcul peut être utilisé pour optimiser la valeur

de la résistance de limitation d'une installation donnée, en considérant les paramètres réels des circuits MT et BT.

Une valeur optimale de la résistance de pré-insertion permet de minimiser les surtensions transitoires d'enclenchement des batteries de condensateurs et ainsi réduit les contraintes diélectriques. Ceci augmente la durée de vie, la fiabilité et la disponibilité de l'installation, diminue les coûts d'exploitation et de maintenance et améliore la qualité de fourniture délivrée aux utilisateurs.