

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen  |
| <b>Band:</b>        | 91 (2000)   |
| <b>Heft:</b>        | 23  |
| <b>Artikel:</b>     | La manœuvre contrôlée : point de vue d'exploitants  |
| <b>Autor:</b>       | Muller, Pierre / Orzan, David   |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-855627">https://doi.org/10.5169/seals-855627</a>   |

### 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:** 15.01.2026

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

# La manœuvre contrôlée: Point de vue d'exploitants

## Utilisation du contrôleur POW (Point on the Wave)

Pour limiter la valeur des surtensions de manœuvre, les moyens conventionnels utilisés sont l'insertion de résistances en parallèle avec la chambre de coupure du disjoncteur et les parafoudres à oxyde métallique MOV (ZnO); leur fonction de limitation des surtensions peut être améliorée de même que les coûts d'installation et de maintenance peuvent être réduits en recourant à des contrôleurs électroniques de manœuvre. Ces dispositifs ont pour rôle de piloter l'instant de la manœuvre du disjoncteur, afin que la surtension ou la surintensité générées soient les plus petites possible, réduisant ainsi les contraintes électriques et mécaniques. Par rapport aux moyens conventionnels, l'application du contrôleur POW apporte des avantages essentiels: tandis que la résistance d'insertion ou le parafoudre limitent la valeur de la surtension de manœuvre, le contrôleur POW évite son apparition même.

La manœuvre des disjoncteurs peut être à l'origine de phénomènes transitoires contraignants pour le matériel haute tension. Cette situation se rencontre à l'enclenchement de lignes, de transformateurs à vide, ou de bancs de capacités, et lors du déclenchement de transformateurs ou de réactances shunt. Il en résulte des surtensions ou des surintensités qui peuvent, selon la sévérité, endommager le matériel et de toute façon réduire sa durée de vie.

Cet article décrit tout d'abord quelques caractéristiques de ces contrôleurs POW et leur principe de fonctionnement. Il fixe ensuite quelques ordres de grandeurs à connaître en présentant des simulations et des mesures provenant du poste 380 kV de Chamoson (EOS). On discute également les avantages et les limites de la manœuvre contrôlée.

### Auteurs

Pierre Muller, ing. dipl. EPFL, EOS  
1001 Lausanne, pierre.muller@eos-gd.ch  
D<sup>r</sup> David Orzan, BKW FMB Energie SA,  
3013 Bern, david.orzan@bkw-fmb.ch

Membres du Groupe de Travail Protection du Réseau (groupe de travail de la Commission du Réseau Suisse Interconnecté, CRSI ou SBDK en allemand)

### La manœuvre contrôlée ou POW

POW est la dénomination que l'on rencontre dans les revues techniques [1,2]. En fait, il s'agit d'un principe connu depuis longtemps, mais dont l'application a été reportée jusqu'à nos jours faute d'avoir pu bénéficier pour l'appareillage haute tension (HT) ou très haute tension (THT) de performances technologiques spécifiques suffisantes. La manœuvre contrôlée consiste à commander le disjoncteur au moment optimal, compte tenu des conditions électriques et physiques.

Fig. 1 Schéma de principe monophasé du contrôleur POW d'un disjoncteur HT

TI = transformateur d'intensité; TP = transformateur de potentiel

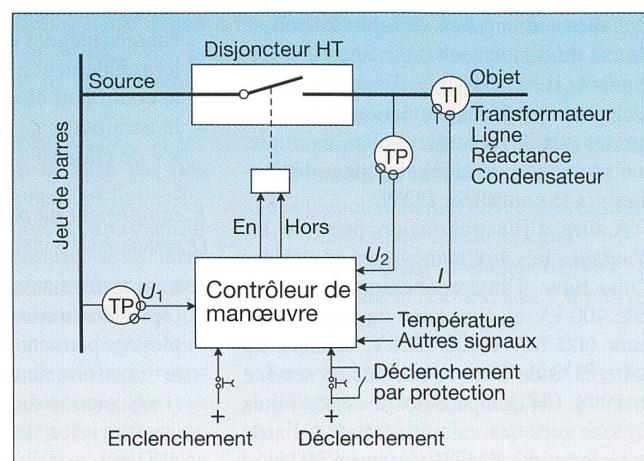
La figure 1 indique les informations utilisées pour la manœuvre contrôlée du disjoncteur HT:

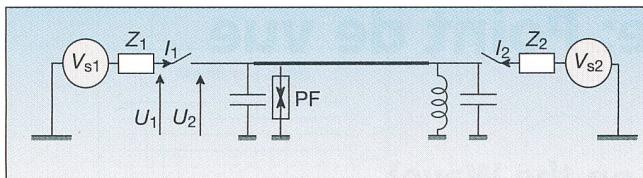
- informations électriques: courant et tensions aux deux pôles du disjoncteur (côté source et côté objet)
- informations correctives: physiques (température ambiante, état de la tension mécanique du système d'entraînement de chaque pôle du disjoncteur, etc.) ou électriques (par exemple, tension aux bornes de la bobine ou de l'électrovalve agissant sur le mécanisme d'entraînement du disjoncteur). Le nombre de ces informations correctives varie selon la sophistication du dispositif.

Les contrôleurs POW sont recommandés en haute et tout particulièrement en très haute tension, où les surtensions de manœuvre peuvent être plus sévères que celles dues à la foudre (cas de la très haute tension). Parmi les applications typiques en haute tension, on trouve:

- la mise sous tension d'une ligne à vide et le réenclenchement rapide suite à un défaut (ligne compensée ou non)
- la mise sous tension ou hors tension d'un transformateur à vide
- la mise sous tension de bancs de condensateurs
- le déclenchement de bobines de compensation

Cependant les applications se multiplient également en moyenne tension, par exemple pour l'enclenchement de transformateurs protégés par des systèmes





**Fig. 2 Schéma électrique de la ligne:**  $V_{s1}$  = tension au poste de Chamoson (CH) et  $V_{s2}$  = tension au poste de Bois-Tollot (F). PF = parafoudre

simples (relais à maximum de courant ou fusibles) [3].

On trouve sur le marché différents types de contrôleurs POW plus ou moins sophistiqués. Le modèle le plus simple introduit un retard préétabli référencé à la sinusoïde de tension de la phase concernée. D'autres modèles plus élaborés calculent en temps réel le retard à introduire pour assurer la manœuvre optimale [4] et tiennent compte :

- de la durée de cycle de calcul nécessité par le contrôleur
- du temps de déplacement des contacts du disjoncteur, à la fermeture respectivement à l'ouverture
- du temps d'arc à l'ouverture, ou de préarc à la fermeture

En exploitation, on constate également que le succès de la manœuvre contrôlée dépend beaucoup des qualités des disjoncteurs : elles doivent rester stables dans les trois phases au cours du temps et vis-à-vis des variations des conditions ambiantes. Certains contrôleurs utilisent aussi des algorithmes élaborés qui permettent de prendre en compte «l'histoire vécue» du disjoncteur et de corriger des dérives éventuelles des caractéristiques, notamment la vitesse de fonctionnement influencée par des variations de la température ambiante ou de l'usure des contacts. On peut parler alors d'un contrôleur POW «intelligent» [4].

En principe, le contrôleur n'est utilisé pour la manœuvre du disjoncteur qu'en régime non perturbé. En cas de court-circuit nécessitant le déclenchement instantané par protection, le contrôleur n'intervient pas et l'ordre provenant du relais arrive directement sans délai à la bobine «hors» du disjoncteur (voir figure 1). Cependant, il est possible d'acheminer les déclenchements des protections les moins rapides via le contrôleur. Par exemple, une protection de surcharge peut déclencher via le contrôleur POW.

A titre d'illustration, on présente les avantages liés aux manœuvres contrôlées d'une ligne d'interconnexion internationale 400 kV et d'un banc de transformateurs 600 MVA 400/220 kV, réalisés au poste EOS de Chamoson, mis en service en 1998. On compare des mesures faites sur site avec des calculs réalisés à l'aide du programme EMTP, version ATP [5].

### Ligne 400 kV

L'enclenchement optimal d'une ligne a lieu au moment où la tension entre les contacts du disjoncteur se trouve au voisinage de zéro. On considère ici la ligne d'interconnexion du réseau UCTPE 400 kV Chamoson–Bois Tollot, reliant la Suisse et la France. Cette ligne étant relativement longue (154 km), il faut s'attendre à des surtensions de manœuvre. Nous présentons ci-après les résultats de simulations et de mesures afin de souligner l'importance de l'utilisation des contrôleurs d'enclenchement associés à des parafoudres. On considère deux modes usuels d'enclenchement, à savoir la mise en service de la ligne et le réenclenchement automatique rapide monophasé consécutif à un défaut.

### Configuration

La configuration étudiée est représentée sur la figure 2. Lors des simulations, on utilise pour la ligne 400 kV le modèle proposé par J. Marti [5]. Il prend en compte la dépendance fréquentielle des paramètres et l'asymétrie de la ligne résultant de la non-transposition régulière des conducteurs de phase le long du tracé de l'ouvrage. Ce modèle convient particulièrement bien au cas de l'enclenchement phase après phase, où la dépendance fréquentielle de l'impédance homopolaire est à prendre en compte [6].

### L'équipement au poste de Chamoson (Suisse, EOS) comprend :

- le transformateur de tension capacitif (cas défavorable du point de vue des surtensions de manœuvre, puisque les charges piégées ne peuvent pas s'écouler rapidement à la terre)
- le contrôleur électronique POW
- le parafoudre de tension nominale 360 kV de classe 5

### L'équipement au poste de Bois Tollot (France, EDF) comprend :

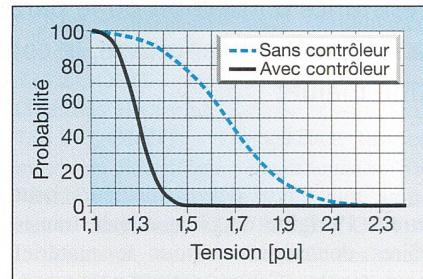
- le transformateur de tension inductif (après saturation du TP, les charges piégées peuvent s'écouler à la terre)
- le transformateur de tension capacitif (l'association des deux types de TP est usuelle selon la norme d'installation d'EDF)

### Mise sous tension

#### Simulations EMTP

La figure 3 montre la probabilité de la surtension de manœuvre au poste de Bois Tollot («poste récepteur») suite à une mise sous tension effectuée depuis le poste de Chamoson («poste émetteur» équipé du contrôleur POW). On compare statistiquement la manœuvre contrôlée et la manœuvre non contrôlée sur la base de 100 mises sous tension.

Manifestement, le contrôleur POW évite l'apparition de surtensions de manœuvre élevées dans le poste «recevant» la tension. La figure 3 montre que la surtension de manœuvre peut, dans le pire des cas, atteindre 1,5 pu<sup>1</sup> (probabilité 0,5%), mais que dans 50% des cas elle reste inférieure à 1,3 pu. Sans contrôleur POW, la surtension est avec une probabilité de 50 % seulement inférieure à 1,65 pu. Le contrôleur POW réduit donc la valeur moyenne de la surtension et contribue à un «resserrement» autour de cette valeur moyenne (en terme statistique, on parle d'une réduction de la variance).



**Fig. 3 Probabilité de surtensions de manœuvre avec et sans contrôleur**

Avec un contrôleur et un disjoncteur parfaits, la surtension engendrée par la mise en service contrôlée serait pour cette ligne toujours de 1,1 pu en raison de l'effet Ferranti et des réflexions. La valeur moyenne de la surtension obtenue par la simulation est supérieure (1,3 pu), car on a tenu compte [1,2] :

- d'une certaine dispersion du temps d'enclenchement du disjoncteur, représentée par dT sur les figures 4a et b (jeu mécanique, état des contacts, température...). On suppose ainsi qu'il y ait dans cette simulation une variation du temps d'enclenchement du disjoncteur de valeur moyenne 1 ms et de variance 0,35 ms;
- de la vitesse de déplacement des contacts. Dans cette étude, on est parti d'un taux de variation de la rigidité diélectrique de 2,0 pu (voir fig. 4a et b);

<sup>1</sup> 1 pu correspond à la valeur crête de la tension phase-terre.

– du couplage capacitif provenant de la phase en service sur les phases qui doivent être enclenchées. Des études ont montré que ce phénomène pouvait cependant être toléré [4].

Le fait que le disjoncteur ne passe pas instantanément de l'état «isolant» à l'état «conducteur» a une incidence importante sur le réglage du contrôleur POW, en particulier quand il s'agit d'enclencher au zéro de la tension comme c'est le cas pour la ligne. La figure 4a montre en effet que si on réglait l'enclenchement exactement au zéro de la tension, on aurait une probabilité importante d'enclencher sur des tensions trop élevées pour assurer une efficacité optimale. C'est pourquoi on doit commander l'enclenchement avec un léger retard (typiquement de 1,2 ms pour une variation du temps d'enclenchement  $dT$  de  $+/- 1$  ms [1,2]), comme le montre la figure 4b.

Les figures 4a et b illustrent également que les exigences de précision et de constance pour le disjoncteur sont moins sévères pour l'enclenchement au maximum de la tension que pour celui au zéro de la tension.

#### Comparaison entre calculs et mesures

Après ces considérations statistiques, comparons les résultats de la mesure et de la simulation pour un enclenchement contrôlé et non-contrôlé.

Les figures 5 et 6 montrent une bonne concordance entre les mesures et les simulations EMTP, comme le confirment d'ailleurs d'autres études réalisées en utilisant les mêmes modèles [6].

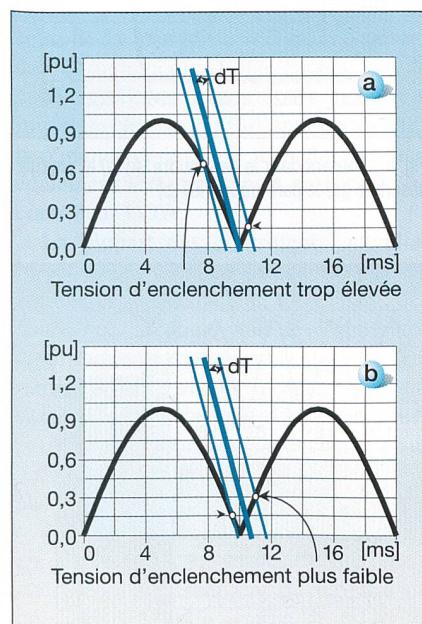


Fig. 4 Enclenchement exactement au zéro de la tension (a) et enclenchement légèrement retardé par rapport au zéro de la tension (b)

Fig. 5 Tension côté ligne ( $U_L$ ) lors d'un test d'enclenchement réalisé au maximum de la tension (cas le plus défavorable)

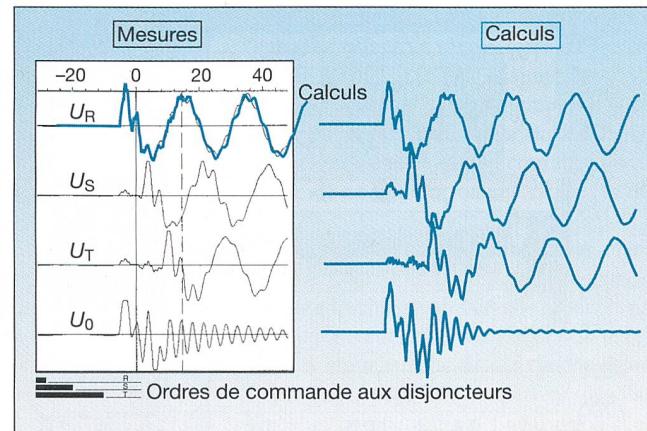
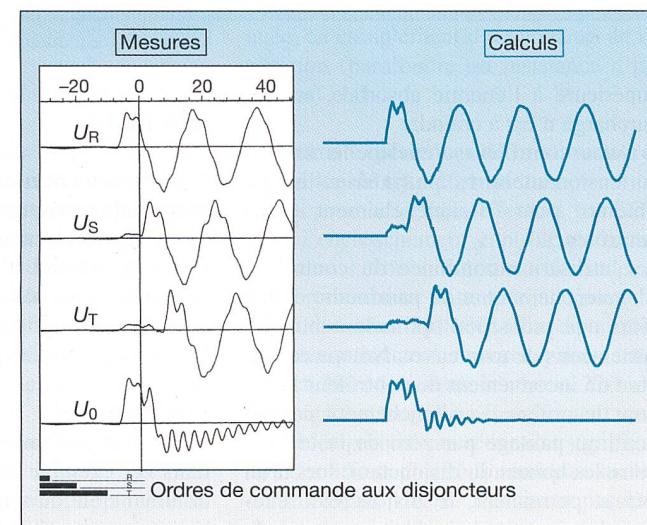


Fig. 6 Tension côté ligne ( $U_L$ ) lors d'un enclenchement réalisé au minimum de la tension (enclenchement contrôlé)



#### Réenclenchement rapide monophasé

Statistiquement, la plupart des défauts étant monophasés, ce mode de réenclenchement revêt une importance particulière. Les avantages du réenclenchement rapide monophasé sont bien connus, en particulier pour la qualité du service et le maintien du synchronisme. Cependant, il peut causer des surtensions de manœuvre importantes, car la tension apparaissant entre les pôles du disjoncteur peut être plus élevée que dans le cas d'une mise sous tension de la ligne en raison de:

- la tension induite par les deux autres phases demeurées en service sur la phase où s'effectue le réenclenchement monophasé;
- la présence de charges piégées. Si les lignes sont reliées à la terre par des transformateurs de potentiel inductifs, ces derniers constituent un chemin d'écoulement préférentiel à la terre pour les charges après saturation des noyaux magnétiques. La constante de temps des transformateurs de potentiel inductifs et le temps de pause du réenclenchement rapide sont tels que ces conditions sont assurées la plupart du temps. La situation diffère dans le cas

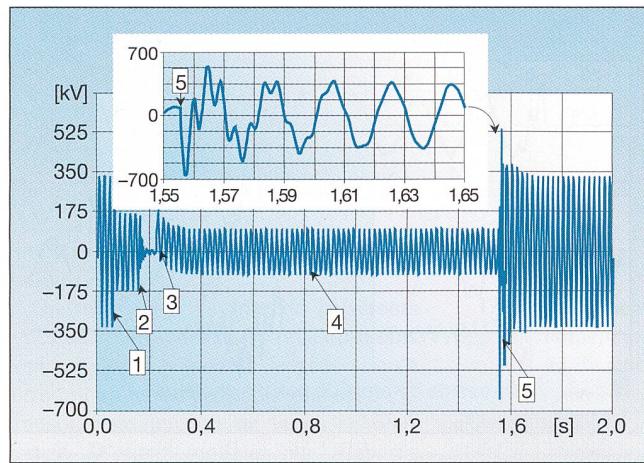
d'une ligne équipée de transformateurs de potentiel capacitifs aux deux extrémités, ne permettant pas l'écoulement des charges à la terre.

Les courbes suivantes montrent les surtensions apparaissant côté ligne à la suite du réenclenchement monophasé non-contrôlé (fig. 7) et contrôlé (fig. 9). On distingue les différentes séquences de la manœuvre:

- 1 = court-circuit à la terre
- 2 = déclenchement
- 3 = disparition du défaut, suivie de la décharge de la ligne: composante asymétrique durant environ 0,2 s
- 4 = tension induite par couplage essentiellement capacitif sur la phase coupée par les deux autres phases restées en service
- 5 = réenclenchement avec succès et remise en service de la ligne

Sans contrôleur d'enclenchement, la surtension atteint 650 kV, soit 2,0 pu (sur la base de  $400 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$  kV).

Le courant dans le parafoudre (fig. 8a) et l'énergie absorbée (fig. 8b) peuvent aussi être calculés. La capacité énergétique de ce parafoudre de classe 5 étant



**Fig. 7 Tension phase-terre ( $U_2$  sur la figure 2) pour un réenclenchement monophasé non-contrôlé [kV]**

- avec des transformateurs de puissance plus petite, les courants d'enclenchement sont plus élevés

La modélisation des six transformateurs se fait à partir des protocoles d'essais et exige un soin particulier dans la représentation du circuit magnétique. Pour cette étude, chaque noyau a été représenté par un seul élément non-linéaire doté d'hystérèse. Pour le calcul du déclenchement, les capacités par rapport à la terre des enroulements et des différents éléments (câble, jeux de barres) doivent également être modélisées.

### Enclenchement contrôlé du banc de transformateurs

En supposant que le flux rémanent soit suffisamment faible, l'enclenchement de la première phase doit se faire au maximum de la tension, contrairement au cas de la ligne vu au paragraphe précédent. L'enclenchement des deux autres phases a lieu simultanément au zéro de la tension et doit tenir compte de la tension induite

supérieure à l'énergie absorbée, aucune surcharge n'est à craindre.

Avec contrôleur d'enclenchement, la surtension atteint 1,2 pu (inférieur à 2 pu obtenu pour l'enclenchement sans contrôleur).

L'utilisation combinée du contrôleur d'enclenchement et du parafoudre donne alors une protection optimale contre les surtensions de manœuvre. Notons cependant un inconvénient du contrôleur POW dont le critère d'enclenchement correspond au passage par zéro de la tension entre les bornes du disjoncteur: lors d'un défaut permanent, le disjoncteur réenclenche sur un court-circuit au zéro de la tension ce qui produit le courant asymétrique le plus élevé. En conséquence, l'installation de tels contrôleurs suppose que l'appareillage puisse maîtriser de telles contraintes asymétriques avec une marge de sécurité suffisante.

niers permettant le réglage «diagonal» (voir fig. 10).

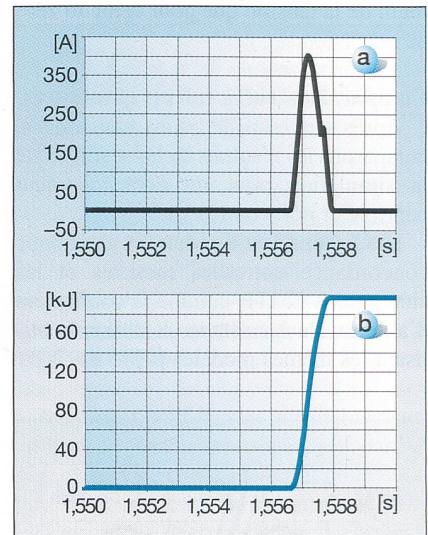
### Enclenchement non-contrôlé du banc de transformateurs

La figure 11 montre un exemple typique de courant d'enclenchement non-contrôlé. Les 3 pôles du disjoncteur sont enclenchés simultanément, la phase R l'étant au minimum de la tension, ce qui correspond au cas le plus défavorable pour cette phase.

Le courant d'enclenchement à vide est dans cet exemple de l'ordre du courant nominal crête du transformateur (0,8 pu) mais pourrait atteindre des valeurs supérieures si du flux rémanent était présent dans le circuit magnétique du transformateur. A titre d'exemple, le même calcul effectué avec un flux rémanent égal à 70% du flux nominal implique un courant d'enclenchement de 1,9 pu.

Ces résultats de 1 à 2 pu peuvent paraître modestes et pourraient inciter à sous-estimer les conséquences des courants d'enclenchement. Rappelons que:

- les forces sont proportionnelles au carré de la valeur instantanée du courant



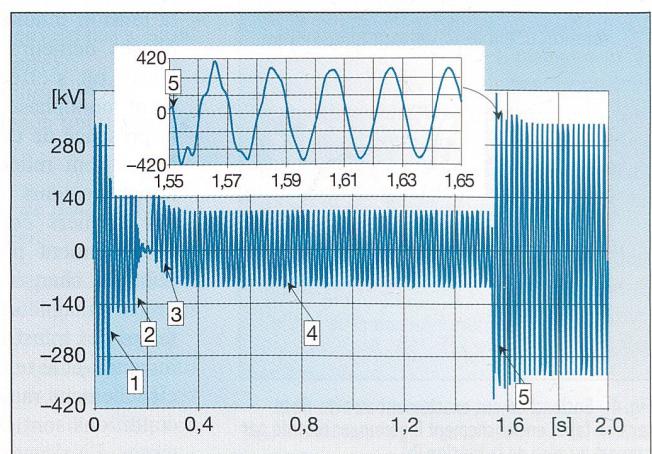
**Fig. 8 Courant dans le parafoudre [A] (a) et énergie absorbée par le parafoudre [kJ] (b)**

### Autotransformateur et transformateur de réglage diagonal 600 MVA

Les phénomènes apparaissant lors des manœuvres de transformateurs sont également bien connus. Dans certains cas défavorables, le courant d'enclenchement d'un transformateur 3\*200 MVA peut atteindre 1 à 2 pu [7,8]. Ce courant d'enclenchement fortement asymétrique engendre des forces axiales et radiales considérables, qui peuvent endommager de façon irréversible les enroulements. On comprend tout l'intérêt de procéder à un enclenchement contrôlé, en particulier pour un transformateur mis en service fréquemment.

Le transformateur considéré ici se compose de trois autotransformateurs à trois enroulements à rapports fixes installés en trois cuves séparées, dont le tertiaire couplé en triangle alimente trois transformateurs monophasés, ces der-

**Fig. 9 Tension phase-terre ( $U_2$  sur la figure 2) pour un réenclenchement monophasé contrôlé [kV]**



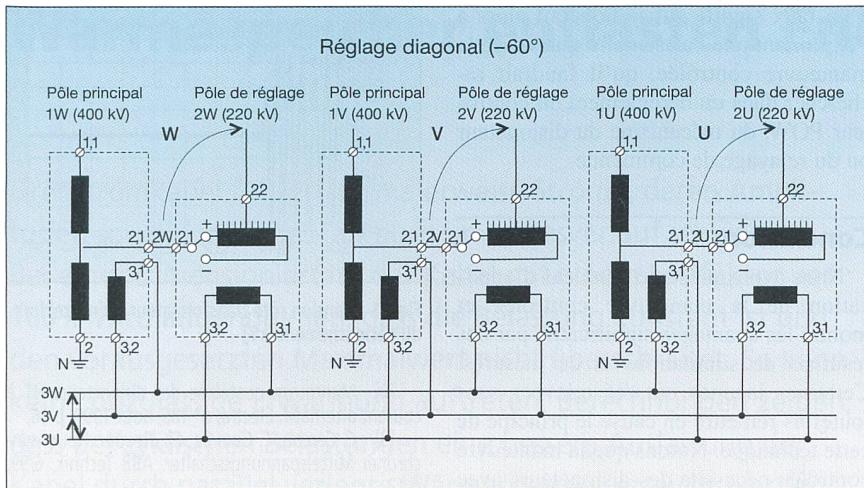


Fig. 10 Autotransformateurs et transformateurs à réglage diagonal

«en retour» par les enroulements tertiaires couplés en triangle (voir fig. 12).

- 1 = enclenchement de la phase R au maximum de la tension
- 2 = effet de l'enroulement tertiaire qui induit «en retour» une tension égale à la moitié de la tension de la phase déjà enclenchée, (en opposition de phase)
- 3 = mise en service simultanée des deux autres phases

La figure 13 montre un courant d'enclenchement considérablement inférieur (2000 fois!) à celui de l'enclenchement non-contrôlé (fig. 11). Rappelons que le flux rémanent a été supposé nul. Dans le cas contraire, le courant d'enclenchement contrôlé du transformateur peut atteindre des valeurs de l'ordre de 0,6 pu. La pointe de courant au début de l'onde résulte de la charge de la capacité propre des enroulements. L'enclenchement de cette capacité au maximum de la tension implique le courant d'appel capacitif maximum, comme on a pu le constater également lors de la mise en service du contrôleur POW.

La plupart des contrôleurs actuellement en service ne prennent pas en compte le flux rémanent. Cependant, des études sont en cours pour développer des algorithmes qui déduisent le signe du flux rémanent à partir des mesures des tensions au déclenchement. Ces contrôleurs permettraient alors un enclenchement sur l'alternance de la tension qui ne sature pas le circuit magnétique.

Les deux graphiques suivants illustrent les phénomènes en termes de flux et de courant magnétisant (vu du tertiaire du pôle principal). La courbe de la figure 14a montre clairement la saturation due à l'enclenchement non-contrôlé. Celle de droite met en évidence la quasi-linéarité

du flux non-saturé par rapport au faible courant magnétisant.

La pente de la courbe de la figure 14b donnant une inductance à vide d'environ 150 H (côté tertiaire et entre phases), l'arrachement du courant magnétisant pourrait provoquer des surtensions élevées. Le paragraphe suivant montre que cela n'est pas le cas.

#### Déclenchement du banc de transformateurs

Des surtensions peuvent apparaître au déclenchement de transformateurs à vide [9,10]. Deux situations peuvent se présenter:

- le déclenchement du transformateur à vide en régime normal non-perturbé
- le déclenchement du transformateur lors d'un défaut. Ce cas n'est pas considéré ici, car le contrôleur n'intervient pas quand il s'agit d'éliminer un défaut le plus rapidement possible (le contrôleur introduirait alors un retard non souhaitable).

Le déclenchement en régime établi d'un transformateur moderne ( tôles magnétiques en acier au silicium laminé à

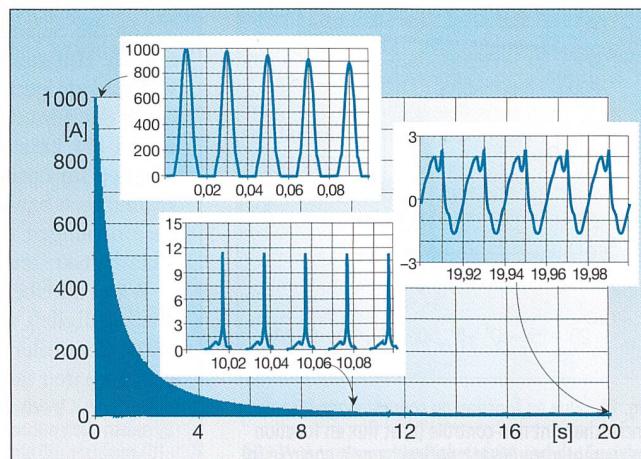
froid à grains orientés) et haute tension (capacité effective phase-terre de l'ordre de 10–20 nF) par des disjoncteurs SF<sub>6</sub> (faibles courants d'arrachements) n'entraîne pas de surtensions critiques [9,10]. Rappelons en effet que le courant effectif à vide de ce transformateur est de l'ordre de 0,2%.

Le contrôleur ne présente pas d'intérêt notable pour le déclenchement de transformateurs haute tension puissants par des disjoncteurs SF<sub>6</sub>, dans le cas où le tertiaire n'alimente pas de réactances shunt. Cependant, pour la manœuvre des bobines de compensation, l'utilisation d'un contrôleur reste particulièrement indiquée, en complément d'un appareil de limitation (parafoudre ou résistance d'insertion) [11].

#### Retour d'expériences de la manœuvre contrôlée de transformateurs

Les premiers essais effectués par EOS pour l'enclenchement contrôlé de transformateurs ou d'autotransformateurs d'interconnexion datent déjà d'une dizaine d'années. Installées sur des unités dont les puissances sont comprises entre 100 et 250 MVA dans le réseau 220 kV, ces «gâchettes» d'enclenchement ont d'emblée permis une réduction significative des efforts électrodynamiques sur les enroulements HT, se traduisant par une diminution notable du bruit typique d'enclenchement. L'observation sur site des 3 ampèremètres de phase et de l'ampèremètre installé dans le point neutre du côté HT ont confirmé de façon simple et irréfutable la qualité de la manœuvre par la disparition effective de la pointe de courant d'enclenchement. L'incidence favorable sur les protections a également été perçue très positivement: stabilité de la protection différentielle, des protections à courant homopolaire ou à courant de phase, respectivement de déséquilibre. L'utilisation de perturbographes performants sur les grosses unités de transfor-

Fig. 11 Courant d'enclenchement de transformateur sans contrôleur vu côté HT [A]



## Manœuvre contrôlée

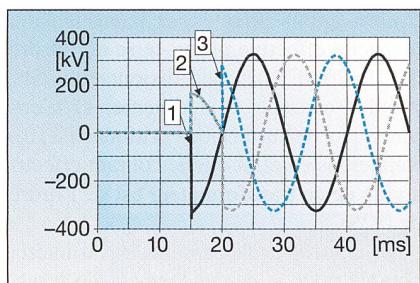


Fig. 12 Tension phase-terre aux bornes HT du transformateur [kV]

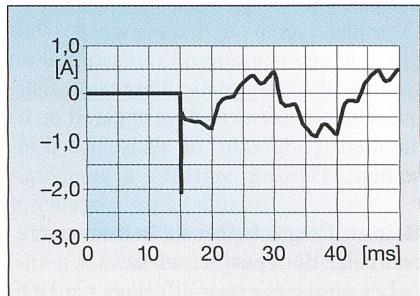


Fig. 13 Courant d'enclenchement côté 400 kV du transformateur avec contrôleur [A]

mation de 600 et 800 MVA du réseau 400 kV récemment mises en service a confirmé et illustré ces bons résultats.

Il convient de préciser que toutes ces unités de transformation importantes du réseau 220 et 400 kV sont réglables en charge. Ainsi, en augmentant le nombre de spires côté HT, on peut diminuer le flux et donc le courant d'appel. Cette procédure peut faire l'objet d'un automatisme.

Pour l'exploitant, il serait souhaitable que les contrôleurs POW soient équipés d'un dispositif de surveillance, mesurant les harmoniques 2, 3, 5 ou 7. Le dépassement

d'un taux significatif indiquerait alors à l'exploitant une baisse de la qualité de la manœuvre contrôlée, qu'il faudrait rechercher dans un dérèglement du contrôleur POW, du mécanisme du disjoncteur ou du relais de commande.

## Conclusion

Nous avons présenté deux cas d'application de la manœuvre contrôlée et montré les avantages significatifs par des résultats de simulations et de mesures. Certaines lacunes ont été relevées sans toutefois remettre en cause le principe de cette technique. Notons que la manœuvre contrôlée nécessite des disjoncteurs avec une faible dispersion du temps de fonctionnement, condition remplie par la plupart des disjoncteurs modernes.

L'exploitant devrait considérer la manœuvre contrôlée comme un investissement placé dans le long terme permettant un allongement de la durée de vie du matériel et donc une réduction des coûts. Pour s'en convaincre, il suffit de se rappeler que le report d'un an de la révision générale d'un transformateur de puissance représente une économie largement supérieure au prix capitalisé d'un contrôleur POW. La manœuvre contrôlée améliore également la qualité de service, car elle évite les déclenchements intempestifs des protections et les mauvais fonctionnements dus aux phénomènes transitoires. Il en résulte une exploitation sûre et des économies évidentes.

## Références

[1] Manœuvre contrôlée des disjoncteurs HT à courant alternatif. Electra, n° 185, août 1999, p 36.

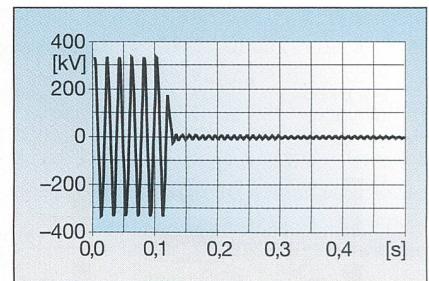


Fig. 15 Tension côté transformateur ( primaire) lors du déclenchement [kV]

[2] Manœuvre contrôlée des disjoncteurs HT à courant alternatif. Electra, n° 185, août 1999, p 36.

[3] C. Cereda, C. Gemme, Ch. Reuber: Neuer synchroner Mittelspannungsschalter. ABB Technik, 6/99, p 13.

[4] K. Froelich, C. Hoelzl, M. Stanek, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, P. Hoegg, B. L. Avent, D. F. Peelo, J. H. Sawada: Controlled closing on shunt reactor compensated transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, N° 2, avril 1997.

[5] H. W. Dommel: EMTP theory book. Bonneville Power Administration.

[6] K. H. Lee, J. M. Schneider: Rockport transient voltage monitoring system: Analysis and simulation of recorded waveforms. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, n° 3, July 1989, pp. 1794.

[7] H. Happoldt, D. Oeding: Elektrische Kraftwerke und Netze, p 181. Springer-Verlag.

[8] Ph. Barret: Machines électriques statiques. Ecole Supérieure d'Electricité.

[9] Manœuvre de coupure de transformateurs à vide. Electra, n° 133, avril 1991, p 78.

[10] Manœuvre de coupure de transformateurs à vide. Electra, n° 134, novembre 1991, p 22.

[11] A. Jeunehomme, G. Seyrling, Th. Tricot, F. Gallon: Surtensions à la coupure d'une bobine shunt: La contribution d'une bonne modélisation. RGE n° 3, mars 1995, p. 43.

[12] H. Klepp, K. Borromäus, K. Schon, R. Marx: Messung transienter Schaltüberspannungen im 380-kV-Netz mit verschiedenen Hochspannungsmesssystemen und digitalen Recordern. Elektrizitätswirtschaft, n° 22, octobre 1987.

[13] Revue Brown Boveri, n° 4, avril 1979.

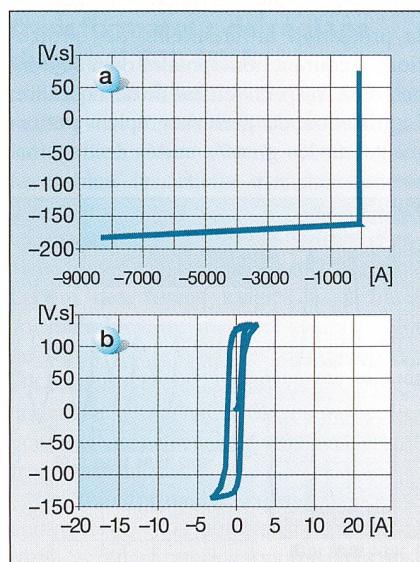


Fig. 14 Flux en fonction du courant magnétisant: enclenchement non-contrôlé (a) et flux en fonction du courant magnétisant: enclenchement contrôlé (b)

## Kontrolliertes Schalten aus der Sicht des Betreibers

### Verwendung der POW(Point on the Wave)-Controller

Um die Schaltüberspannungen zu begrenzen, werden in der Regel konventionelle Hilfsmittel wie parallel zum Leistungsschalter angebrachte Dämpfungswiderstände oder Überspannungsableiter eingesetzt. Deren Wirkungsweise kann durch den Einsatz von elektronischen Schaltgeräten aber noch verbessert werden, indem die Leistungsschalterpole so gesteuert werden, dass das Ein- und Ausschalten im optimalen Augenblick stattfindet. So lassen sich entstehende Überspannungen bzw. Überströme – und damit auch elektrische und mechanische Belastungen – reduzieren, was wiederum zu geringeren Installations- und Unterhaltskosten führt.

Während Überspannungen bzw. Überströme mit konventionellen Mitteln allerdings lediglich reduziert werden können, lassen sie sich durch den Einsatz der POW-Controller vollständig verhindern. Dadurch werden die Hochspannungskomponenten geschont und ein sicherer Betrieb ermöglicht, was nicht nur eine technische Verbesserung, sondern auch eine höhere Wirtschaftlichkeit bedeutet.