



23-07

T

CONNAISSANCES ACQUISES PAR DES ESSAIS DE TENSION ALTERNATIVE  
DE FRÉQUENCE VARIABLE À L'AIDE D'UN DISPOSITIF  
DE RÉSONANCE EN SÉRIE DE POIDS RÉDUIT  
POUR MESURES À EFFECTUER SUR LES LIEUX D'UTILISATION

par

W. ZAENGL  
Ecole polytechnique fédérale  
de Zurich

F. BERNASCONI  
Commission des recherches  
en technologie des hautes tensions  
de l'Association Suisse des Électriciens

B. BACHMANN, W. SCHMIDT,  
K. SPINNLER  
Brown, Boveri et Cie

(Suisse)

## Résumé

La construction d'installation à haute tension toujours plus grandes et plus complexes (par. ex. les installations «GIS» à isolation au SF<sub>6</sub>) a pour résultat que la capacité propre s'accroît fortement et que par conséquent, l'essai diélectrique haute tension requiert la mise en œuvre de transformateurs toujours plus puissants. Dans de nombreux cas, le transport de tels transformateurs de grand poids sur les lieux de mesure et leur alimentation en énergie entraînent des problèmes presque insolubles. Cependant, la fiabilité des installations haute tension doit être complètement améliorée par des mesures effectuées sur les lieux. En outre, l'installation d'essai devrait permettre d'effectuer des mesures de contrôle périodiques au cours des années, afin de détecter une détérioration éventuelle de la rigidité diélectrique.

Les installations d'essai à résonance représentent une bonne possibilité de remplacement. Elles permettent d'éviter élégamment la mise en œuvre des lourds transformateurs d'essai. Ces installations peuvent être construites avec des inductivités fixes ou variables des bobines dans le circuit de résonance.

Dans le cas des installations d'essai à résonance à inductivité fixe, la fréquence d'essai est cependant située normalement à un niveau supérieur à celui des fréquences industrielles normales de >50 à env. 300 Hz, selon la capacité de l'objet examiné. La présente publication traite la question non encore résolue de savoir si et dans quelle mesure la fréquence exerce une influence sur le comportement au claquage disruptif d'une section de SF<sub>6</sub> gazeux libre ou dotée d'un pilier, avec une configuration quasi-homogène ou inhomogène imitée.

Cette publication donne en outre un aperçu sur les installations à résonance, présente leur caractéristiques principales et soumet en discussion - à l'exemple d'une installations d'essai à résonance en série à fréquence variable nouvellement développée - les avantages entraînés pour les essais effectués sur les lieux.

En se basant sur des mises en œuvre pratiques déjà effectuées sur les lieux, on démontre l'aptitude au fonctionnement de l'installation et on constate que cette méthode d'essai est particulièrement appropriée pour détecter également des défauts sur des systèmes complets à isolation au SF<sub>6</sub>.

## I. Introduction

Les composants individuels des installations extérieures ou intérieures conventionnelles sont normalement soumis

en usine aux essais de fabrication et d'homologation prescrits. Après l'assemblage des différents composants pour en former une installation complète, l'essai complémentaire sur les lieux est le plus souvent superflu, étant donné que la preuve du niveau d'isolement prescrit de l'installation complète peut être garantie sans réserves sur la base des essais entrepris en usine sur les composants individuels.

Par contre, après leur assemblage, les installations de commutation blindées et isolées au SF<sub>6</sub> sont soumises sur les lieux à un essai de tension. Pour les installations au SF<sub>6</sub> très compactes, un tel essai est parfaitement raisonnable pour différentes raisons: D'une part, après le montage, les pièces sous tension ne peuvent plus être soumises à un contrôle visuel par suite du blindage. D'autre part, lors de l'assemblage final sur le chantier, il n'est pas exclu que par suite d'inattention, des particules étrangères puissent pénétrer dans l'installation et y provoquer une réduction de la tension d'isolement [2]. En outre, les endommagements en cours de transport ne peuvent pas toujours être exclus. Un essai de tension effectué sur les lieux après le montage final offre au client la sécurité et la garantie que l'installation fonctionne impeccablement et que le niveau d'isolement voulu, resp. prescrit, est respecté.

La pratique actuellement courante de l'assurance de la qualité et la preuve du fonctionnement sont à vrai dire dispendieuses, mais également sélectives. En plus des essais de matériaux courants effectués déjà lors de la réception des matériaux en usine, on procède à des essais sur les composants individuels qui formeront ensuite une unité de haute tension en cours de fabrication. Différents composants testés sont ensuite regroupés pour en former une unité d'expédition et soumis aux essais électromécaniques et diélectriques requis par la norme CEI 517. Un essai combiné en tension alternative avec la mesure simultanée de la décharge partielle y constitue un essai très sévère. Au cours de cet essai, on contrôle également la tension onset et la tension offset qui doivent se situer nettement au-dessus de 1,2 fois la tension entre le conducteur et la terre. Chez le client, les unités d'expédition sont assemblées pour former des ins-

tallations complètes, puis soumises aux essais sur les lieux, afin de s'assurer du montage impeccable.

Si on considère les différents genres de tensions qui peuvent entrer en ligne de compte pour un tel essai, on peut affirmer qu'une tension continue est à vrai dire appropriée, en particulier pour détecter la présence de particules métalliques après le montage. Pourtant, une tension continue sollicite l'isolement d'une autre façon que la tension alternative effectivement présente en exploitation [L]. Par conséquent, l'essai par tension continue effectué par ex. sur les câbles, sans y être toutefois non problématique, ne devrait pas être reporté sur les installations avec isolation au SF<sub>6</sub>, étant donné que de telles installations se comportent très différemment par rapport aux isollements de câbles huile et papier.

Par contre, dans le cas d'un essai au courant alternatif, on a le problème du fort besoin en puissance réactive, en particulier par suite de la capacité relativement élevée des installations isolées au SF<sub>6</sub>. A côté de la haute puissance réactive, il y a lieu de mentionner la question du poids en relation avec la puissance. Pour un essai sur les lieux de seulement 400 kV/1A, on doit, par exemple dans le cas de la technique classique, transporter un poids atteignant 200 kN!

Les déplacements de telles masses conduisent rapidement à des problèmes de transport. A titre d'alternative, on a préconisé un essai effectué sur les lieux à l'aide d'impulsions oscillantes [3] et entre temps, de tels essais ont été effectivement entrepris. Les générateurs d'impulsions de commutation oscillantes sont relativement légers et donc facilement transportables. L'expérience a prouvé que ce mode d'essai permet de détecter fiablement certains défauts de l'installation, sans qu'il soit toutefois absolument certain que cette forme de tension permette de détecter également avec sécurité les particules étrangères. Un tel essai est surtout raisonnable par suite du fait que lors de chaque opération de commutation dans le réseau, l'installation de couplage est sollicitée par une onde de tension analogue à celle produite effectivement par le générateur d'impulsions oscillantes.

D'autre part et en particulier pour les installations à basses tensions d'exploitation, un essai en tension alternative avec 80% de la valeur d'essai nominale chez le client constitue encore le mode d'essai courant et familier. Dans cette plage des tensions, cet essai correspond avec une meilleure approximation aux sollicitations d'exploitation. Pour éviter la mise en œuvre des lourds transformateurs d'essai classiques, les circuits de résonance permettant la production de hautes tensions d'essai alternatives constituent une alternative valable. Ils sont également en mesure, à titre d'unique mode d'essai sur les lieux, de détecter fiablement les défauts.

## II. Circuits de résonance pour la production de hautes tensions d'essai alternatives

Comme on le sait – hormis quelques rares exceptions – chaque isolement électrique peut être considéré comme un condensateur de haute qualité, c'est-à-dire de faible puissance active par rapport à la puissance apparente absorbée. Lors de l'essai à haute tension des appareils à l'aide d'une tension alternative à la fréquence du réseau ou à une fréquence supérieure, le générateur de tension n'est donc chargé que par une puissance réactive. Vus sous cet aspect, les transformateurs d'essai sont peu économiques et techniquement dispensieux, étant donné que la puissance réactive dans les différents bobinages provoque des pertes inutiles et que l'organe de réglage final de tension absolu-

ment indispensable doit être dimensionné pour la totalité de la puissance réactive. Les installations complètes présentent donc, même si les transformateurs d'essai sont construits de façon très compacte [10], des poids relativement élevés et de grandes dimensions. Ce faisant, ils ne sont que mal appropriés pour les mesures effectuées sur les lieux d'installations isolées au SF<sub>6</sub>. C'est avec raison que cette manière de produire les tensions d'essai sur des isollements de haute qualité est désignée par le terme de «méthode de force brute».

La très haute puissance réactive capacitive requise pour l'essai des câbles et des condensateurs à haute tension a très rapidement conduit au développement de circuits de compensation en mesure de décharger au moins partiellement la source de tension d'essai. Les différentes étapes de ce développement sont illustrées par la Fig.1. On n'y a tenu compte que des méthodes de compensation à réglage progressif et qui présentent des caractéristiques de résonance.

Dans le cas de la méthode la plus ancienne (Fig.1a), la source de tension RT ajustable ou réglable est à vrai dire fortement déchargée du courant réactif capacitive. Cependant, le transformateur d'essai doit être dimensionné pour la pleine puissance apparente. L'économie en encombrement et en poids réalisée sur l'organe de réglage final de la tension est amoindrie par les plus grands moyens à engager pour la bobine de self. La puissance absorbée par l'ensemble de l'installation est cependant fortement réduite.

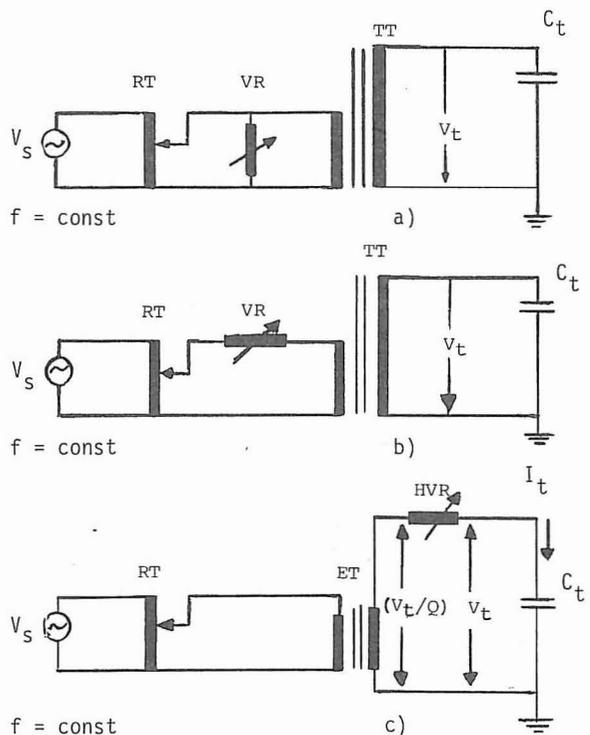


Fig. 1

Différentes méthodes de compensation d'une charge capacitive, à fréquence d'essai constante.

- a) compensation parallèle, basse tension
- b) compensation série, basse tension
- c) circuit à résonance, haute tension

$V_s$	tension alternative initiale
RT	régulateur de tension inductive
VR	réacteur variable, basse tension
HVR	réacteur variable, haute tension
TT	transformateur d'essai
ET	transformateur d'excitation
$C_t$	objet en cours d'essai à haute tension
$V_t$	tension d'essai
$I_t$	courant de charge

Le circuit représenté par la Fig. 1a provoque souvent la formation de fortes harmoniques indésirées dans le domaine des hautes tensions d'essai  $V_t$ , étant donné que la réactance de dispersion du transformateur d'essai et du régulateur RT forment des circuits de résonance en série avec l'objet  $C_t$  soumis à l'essai. Ceux-ci sont excités par les tensions harmoniques présentes dans la tension du réseau  $V_s$  ou par des harmoniques d'intensité. Cet inconvénient ne se présente pas dans le circuit de compensation selon la Fig. 2b, dans lequel la bobine de self de compensation variable VR est montée en série avec l'enroulement primaire du transformateur d'essai TT [4]. Pourtant, les autres avantages et inconvénients du circuit précédent subsistent entièrement.

A vrai dire, cette méthode est fréquemment appliquée, en partie sous une forme modifiée [5]. Le poids de l'installation n'est pourtant pas réduit significativement. Un réel perfectionnement n'a pu être réalisé que lorsqu'on a réussi à construire des bobines de self pour des tensions totales élevées [6]. On y applique généralement le principe de la résonance en série, voir Fig. 1c. Au cours des dernières années, ce genre de circuits s'est rapidement introduit dans la pratique [7, 8], vu qu'il permet de remplacer le grand et lourd transformateur d'essai par la bobine de self variable haute tension HVR d'un poids relativement plus avantageux. Dans ce circuit de résonance en série, le transformateur d'essai se restreint à un transformateur d'excitation ET d'une puissance et d'une tension relativement basses, étant donné qu'il ne doit subvenir qu'à la puissance efficace des éléments haute tension HVR et  $C_t$ . Si  $Q$  représente le facteur de qualité du circuit de résonance en série, la tension secondaire requise sur le transformateur d'excitation atteint seulement la valeur  $V_t/Q$ , vu que seul le courant de charge  $I_t$  doit être fourni. On s'aperçoit facilement que la puissance réactive capacitive de l'objet soumis à l'essai est idéalement compensée et que tous les composants requis pour l'excitation peuvent être déchargés de manière optimale. Même si pour des raisons de technique d'isolement les différentes bobines de self haute tension HVR ne peuvent guère être fabriquées pour des tensions supérieures à env. 300–400 kV, un couplage en série sans problèmes de plusieurs unités de selfs permet de produire de très hautes tensions d'essais totales  $V_t$ .

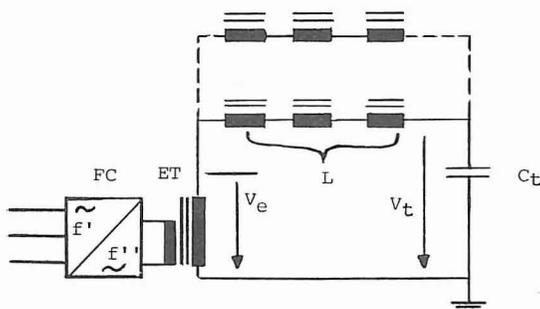


Fig. 2  
Schéma d'un circuit à résonance en série, haute tension, avec une tension initiale à fréquence variable.

A vrai dire, au point de vue de la puissance, les transformateurs d'essai utilisés dans les circuits des Fig. 1a et 1b sont directement comparables à la bobine de self de la Fig. 1c. La constitution constructive plus simple de la bobine de self HVR permet pourtant une réduction du poids de puissance spécifique de la valeur égale à un facteur 3. Malgré tout, on doit encore prévoir des poids de l'ordre de 50 N par kVar de puissance apparente pour des fréquences d'essai de 50–60 Hz. Ces valeurs spécifiques élevées sont imputables à une structure constructive compliquée qui est cependant indispensable pour obtenir une variation d'inductivité suffisante. Pour cette raison, on a déjà préconisé de remplacer

ce mode de construction de la bobine de self par la combinaison d'un transformateur de haute tension, d'une bobine de self de basse tension et d'un transformateur de réglage [9], ce qui entraîne pourtant une augmentation du poids total de l'installation d'essai.

Une nouvelle diminution des dimensions et des poids à transporter d'installations d'essai haute tension est réalisable en exploitant le circuit de résonance selon la Fig. 1c sous une tension  $V_s$  avec une fréquence variable. A ce moment, l'inductivité de la bobine de self haute tension HVR ne doit plus être modifiée pour obtenir les conditions de résonance requises pour la production de hautes tensions de sortie. Ce faisant, la bobine de self peut être construite de manière légère, compacte et de faible poids. La Fig. 2 présente un circuit fonctionnant selon ce principe [11]. La source de tension à fréquence réglable progressivement est constituée par un convertisseur de fréquence FC réalisé en technique de semi-conducteurs. Elle alimente le circuit de résonance en série (L,  $C_t$ ) au travers d'un transformateur d'excitation ET. Dans la publication [11], on présente tant le dimensionnement que les caractéristiques d'exploitation et on montre que la bobine de self haute tension L est avantageusement composée de plusieurs éléments plus petits, si on veut maintenir la fréquence de la haute tension d'essai  $V_t$  dans d'étroites limites. La grandeur constructive de la bobine de self ne dépend alors pas de la fréquence choisie. Cela signifie que cette grandeur n'est pas déterminée par la puissance réactive ( $\omega \cdot C_t \cdot V_t^2$ ) qui s'accroît avec la fréquence, mais uniquement par l'énergie maximale emmagasinée dans le condensateur  $C_t$  ( $C_t \cdot V_t^2$ ). Il en résulte immédiatement le grand avantage que les convertisseurs de tension inductifs, pour lesquels se produirait une saturation magnétique lors de la fréquence d'exploitation et des hautes tensions d'essai, peuvent rester dans des installations de commutation isolées au gaz. Pour cette raison, le circuit de résonance en série selon ce mode de construction et décrit brièvement ci-après a été dimensionné pour une fréquence nominale d'environ 100 Hz.

### III. Un circuit de résonance en série de 800 kV mobile de haute puissance

Les bobines de self haute tension ont été dimensionnées de telle façon que pour une fréquence de résonance de 100 Hz et une tension de 800 kV, une capacité de charge d'env. 12 nF puisse être testée en service pendant une durée maximale de 10 minutes. La condition de résonance

$$f_t = f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{L \cdot C_t} \quad (1)$$

donne une inductivité L d'env. 200 H. L'intensité nominale est alors approximativement 6 A. La puissance apparente totale de la bobine de self de 4800 kVar a été répartie – en vue d'améliorer la flexibilité d'application de l'installation – sur quatre unités de selfs de 200 kV et d'une inductivité d'env. 50 H chacune. Ceci procure de petits composants facilement transportables. C'est ainsi que le poids de transport d'une unité de self n'atteint que 3,75 kN, ce qui équivaut à un poids de puissance spécifique de seulement 3 N par kVA de puissance apparente. Ce poids unitaire de bobine est en même temps le poids de transport le plus élevé de tous les composants formant l'installation (transformateur d'excitation : puissance nominale 50 kVA, 2 kN; convertisseur de fréquence : 50 kW, 3 kN).

L'ensemble de l'installation est représenté dans la Fig. 3. Les quatre bobines de self y sont connectées pour former une unité d'essai de 800 kV. Les électrodes en toroïde fabri-

quées en une matière synthétique conductrice [12] et soigneusement dimensionnées se trouvent entre les unités de réaction. Sous formes de composants individuels, elles sont également facilement transportables et montables sur les lieux. Le convertisseur de fréquence est le résultat d'un développement spécial. Le réglage à commande électronique de la fréquence à pas extrêmement fins permet, sous une tension de sortie constante d'env. 500 V, un ajustage fin très stable de la haute tension, uniquement en utilisant la courbe de résonance.

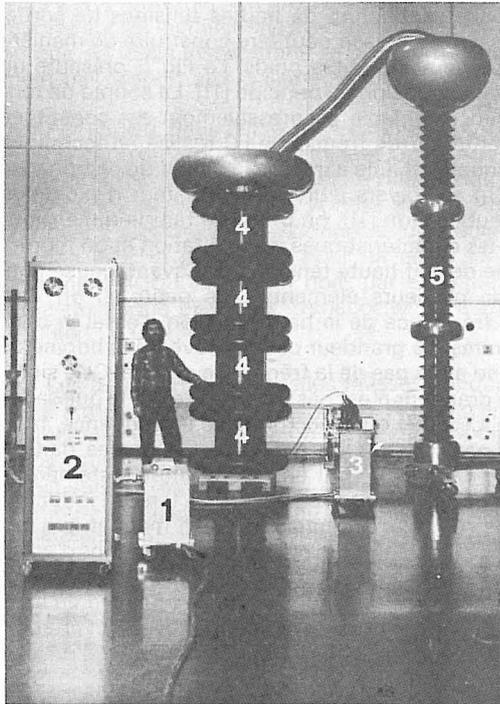


Fig. 3:

Vue générale des appareils d'essai avec 4 réactances en série et autres éléments nécessaires.

- 1 transformateur d'isolement
- 2 unité de contrôle, convertisseur de fréquence
- 3 transformateur d'alimentation
- 4 réacteurs
- 5 diviseur capacitif de tension

Selon l'équation (1), la fréquence réelle  $f_t$  de la tension d'essai alternative est déterminée par la capacité de charge  $C_t$ , pour les circuits des unités de selfs connectées en série et/ou en parallèle. Lors des essais effectués sur les lieux d'installations isolées au SF<sub>6</sub>, cette fréquence est conditionnée de cas en cas par la capacité de l'installation qui est cependant soumise à des variations. Pour de faibles valeurs de  $C_t$ , il est à vrai dire possible d'ajuster facilement une faible bande de fréquence désirée par l'adjonction de capacités complémentaires fixement étagées dans leurs valeurs respectives. Il est pourtant indubitable qu'une fréquence d'essai exactement prescrite n'est que difficilement réalisable. A cet inconvénient s'oppose l'avantage qu'il est très facile de travailler dans d'étroites limites par la combinaison des bobines de self et de tester en outre également de très hautes valeurs de capacité sous des tensions réduites. Etant donné que la plage d'application d'une bobine de self est limitée d'une part par sa tension nominale, c'est-à-dire par la technique d'isolement, et d'autre part par l'intensité nominale (échauffement et saturation du noyau de fer), les deux paramètres étant cependant indépendants l'un de l'autre, on peut exprimer pour un circuit de résonance en série, la relation entre

la tension d'essai maximale possible  $V_{t\max}$  et une capacité de charge donnée  $C_t$ , pour  $C_t \geq C_n$ , par l'équation suivante:

$$\frac{V_{t\max}}{V_n} = \sqrt{\frac{C_n}{C_t}}, \text{ si } V_{t\max} \leq V_n. \quad (2)$$

$V_n$  et  $C_n$  y représentent les valeurs nominales pour lesquels s'établit l'intensité nominale  $I_n$  pour la tension nominale  $V_n$ . L'équation (1) permet de dériver une relation analogue pour la dépendance de la fréquence, à savoir:

$$\frac{f_t}{f_n} = \sqrt{\frac{C_n}{C_t}}, \quad (3)$$

Dans cette équation,  $f_n$  est la fréquence qui s'établit pour les valeurs nominales de  $V_n$  et de  $I_n$  ( $f_n = 100$  Hz pour  $U_n = 800$  kV et  $I_n = 6$  A pour le dimensionnement de la bobine de self en question). Selon l'équation (2), on peut également tester d'autres isolations dont la valeur de capacité  $C_t$  dépasse très fortement la valeur nominale  $C_n$ . La fréquence plus basse qui résulte alors de l'équation (3) est cependant pratiquement limitée essentiellement par le transformateur d'excitation ET (Fig. 2) qui peut atteindre sa saturation. Pour les basses fréquences, le facteur de qualité des bobines de self devient également très modeste. Dans le cas présent, l'installation a été dimensionnée de telle façon que des fréquences d'essai  $f_t$  jusque vers 40 Hz puissent être produites. Dans ce cas, le facteur de qualité est encore de  $Q \geq 40$ .

La Fig. 4 présente une exploitation des équations (1), (2) et (3) pour l'installation illustrée par la Fig. 3. Les tensions d'essai maximales  $V_{t\max}$  et les fréquences d'essai  $f_t$  qui en résultent sont représentées en fonction de  $C_t$  pour les combinaisons suivantes des connexions:

- 1 : 1 unité de self
- 2s: 2 unités de selfs en série
- 3s: 3 unités de selfs en série
- 4s: 4 unités de selfs en série

La Fig. 5 procure la même information pour les combinaisons:

- 4p: 4 unités de selfs en parallèle
- 2p: 2 unités de selfs en parallèle
- 2s/2p: 2 unités de selfs en série et 2 en parallèle

Les conditions qui s'établissent dans le cas d'une seule bobine de self (cas 1) sont indiquées à titre de comparaison. Si par exemple, on fixe la fréquence d'essai maximale admissible à 300 Hz, on peut, à l'aide du circuit 4s, examiner des valeurs de capacité de 1,3 nF à 12 nF sous la pleine tension d'essai de 800 kV, la fréquence tombant alors jusqu'à 100 Hz. Si on augmente la capacité de charge jusqu'à 48 nF avec une tension décroissant jusqu'à 400 kV, la fréquence diminue en outre jusqu'à 50 Hz. Il est pourtant également facile de restreindre la fréquence d'essai à la fréquence de dimensionnement choisie dans ce cas à 100 Hz. Il suffit, en utilisant la tension d'essai maximale possible, de passer à une connexion 3s, 2s ou individuelle, comme on s'en aperçoit immédiatement sur le diagramme. Par des circuits en parallèle ou en série/parallèle (Fig. 5), on agrandit en principe le domaine d'application jusqu'aux très hautes capacités des objets à tester, en réduisant la tension de façon correspondante. C'est ainsi qu'avec une telle installation en connexion 4p et sous une fréquence de 50 Hz, on peut encore tester un objet d'une capacité de 800 nF avec une tension d'environ 100 kV!

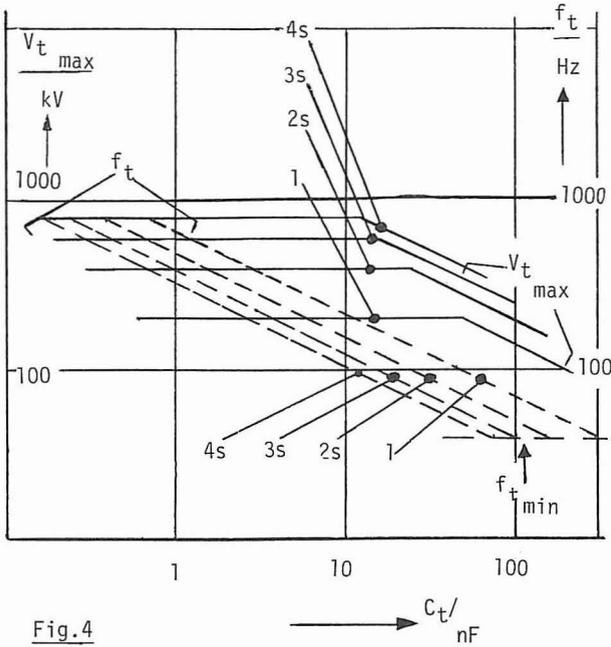


Fig. 4

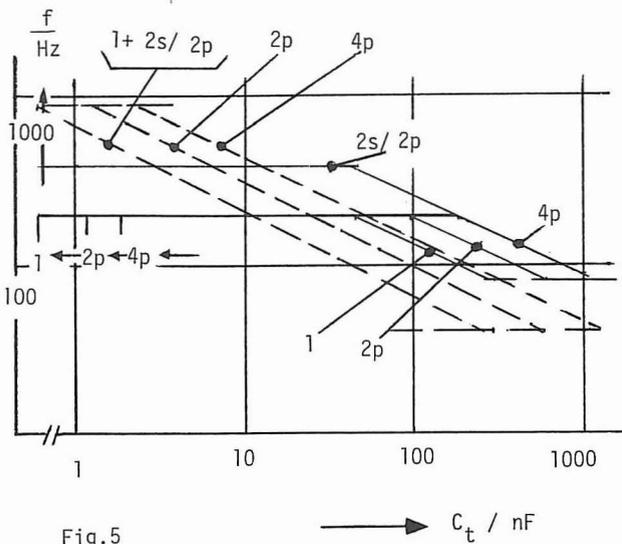


Fig. 5

Fig. 4 et 5:

Diagrammes donnant tension, fréquence et capacité pour différentes connexions des éléments de réacteur.

## IV. Essais pratiques

A l'aide d'une série d'essais pratiques, il s'est agi de déterminer dans quelle mesure une fréquence d'essai différente de la fréquence industrielle influence le comportement disruptif de composants isolés au SF<sub>6</sub> lors de l'utilisation d'un circuit d'essai à résonance en série. L'importance de la question provient du fait qu'il doit être assuré qu'une tension d'essai de haute fréquence dans le domaine d'environ 100-300 Hz permette d'obtenir des renseignements aussi clairs et aussi précis que ceux obtenus avec la fréquence d'exploitation.

### 1. Dépendance de la fréquence

A titre de dispositif d'essai, on a choisi un récipient d'essai à SF<sub>6</sub>, dans lequel on a disposé une configuration plaque/plaque. Ces plaques présentent dans leur centre un léger enfoncement qui doit permettre au cours d'un essai ultérieur

de fixer un corps isolant cylindrique. L'essai fut effectué avec une distance de 28 mm et une pression de SF<sub>6</sub> de 350 kPa, en mettant en œuvre l'installation de résonance en série. Les différents gradins de fréquence furent obtenus en connectant et en déconnectant des condensateurs haute tension montés en parallèle. L'accroissement de la tension a été progressif jusqu'à atteinte du claquage. Pour l'intervalle de gaz libre (courbe 1, Fig. 6), on obtient une évolution constante de la rigidité diélectrique jusqu'à plus de 300 Hz. Au-delà, on peut constater une légère croissance de la tension disruptive. Par point de mesure, on a procédé à env. 10 claquages, dont on a déterminé la moyenne arithmétique. Le diagramme présente également les valeurs maximales supérieures et inférieures mesurées.

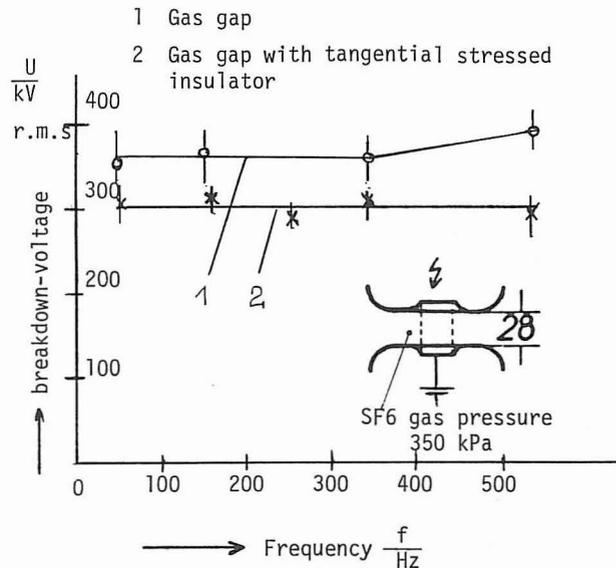


Fig. 6:

Rigidité électrique en fonction de la fréquence entre électrodes plates avec et sans isolateur.

La courbe 2 représente également la relation entre la fréquence et la tension disruptive, cette fois-ci avec le support d'isolement introduit. Ce support en résine époxy a été chargé tangentiellement et a réduit de façon connue la tension de claquage. Pour les deux configurations de principe, on reconnaît clairement la constance de la tension disruptive dans la gamme de fréquence considérée. Les points de 50 Hz proviennent de mesures obtenues à l'aide d'une installation d'essai classique et furent déterminés sous des conditions identiques par ailleurs.

### 2. Dépendance de la pression

La Fig. 7 présente la relation généralement connue entre la tension disruptive et la pression, lors de l'utilisation de supports d'isolement. Ici également, on a effectué 3 à 5 claquages par point de mesure en accroissant progressivement la tension à l'aide de l'installation d'essai à résonance en série.

### 3. Configuration inhomogène

Finalement, on a encore étudié la dépendance de la pression et de la fréquence dans une configuration fortement inhomogène (pointe/plaque, distance 40 mm, angle de pointe 30°, rayon 2 mm). La Fig. 8 montre le comportement de la pression du gaz SF<sub>6</sub> en fonction de la tension disruptive. Un paramètre était donné par la fréquence qui pouvait être variée entre 73 Hz et 536 Hz. A titre de résultat, on peut constater, également dans ce cas, l'accroissement préalable (connu) de la tension d'essai avec l'augmentation de la pression du gaz. Ce maximum passe ensuite par un minimum, pour s'accroître de nouveau par la suite. Comme l'illustre la Fig. 8, la dépendance de la tension de claquage de la fré-

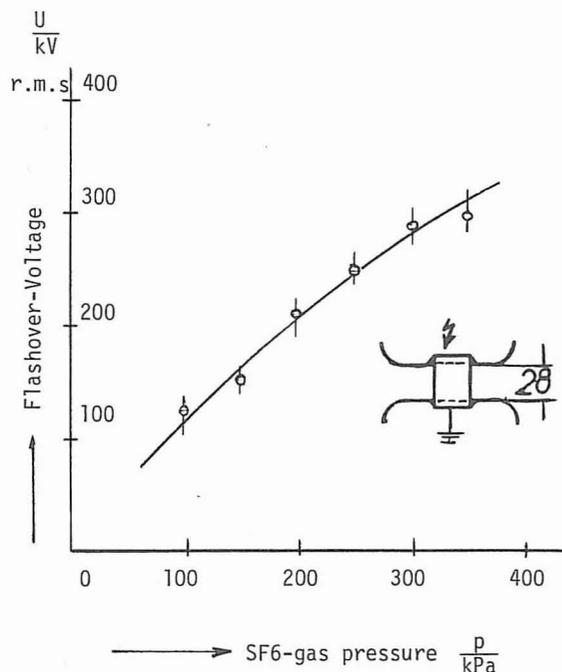


Fig. 7: Tension de contournement en fonction de la pression du gas SF<sub>6</sub>, à 330 Hz

quence dans la plage inférieure de pression correspond bien aux résultats déjà connu [13]. Dans la pratique, cette dépendance de la fréquence (de hautes fréquences provoquent également de hautes tensions disruptives) ne joue néanmoins pas de rôle pour les installations isolées au SF<sub>6</sub>, étant donné que la pression de gaz utilisée usuellement se trouve en-deça de cette dépendance. Pour une pression de par ex. 350 kPa, la Fig. 8 permet à nouveau de constater la concordance des tensions disruptives sur toutes la plage des fréquences étudiées.

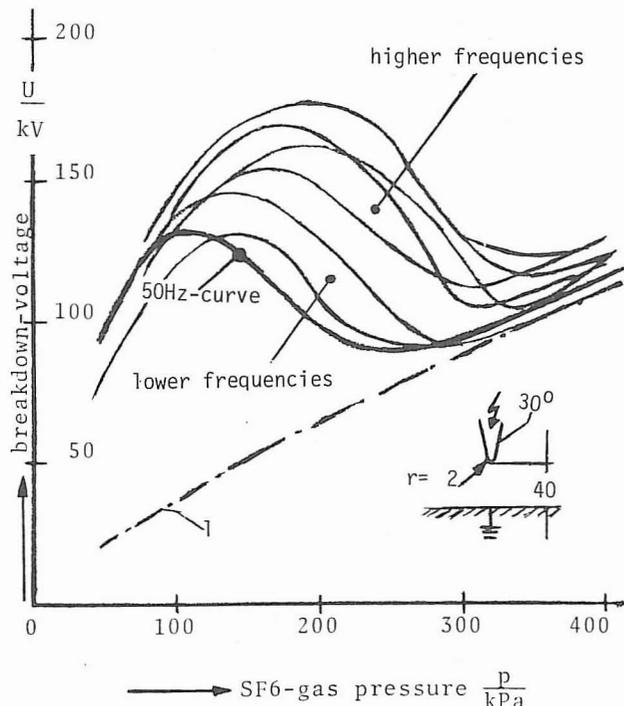


Fig. 8: Tension d'éclatement en fonction de la pression du gas SF<sub>6</sub>, à des fréquences entre 73 et 536 Hz.

1 Tension théorique minimum, calculée

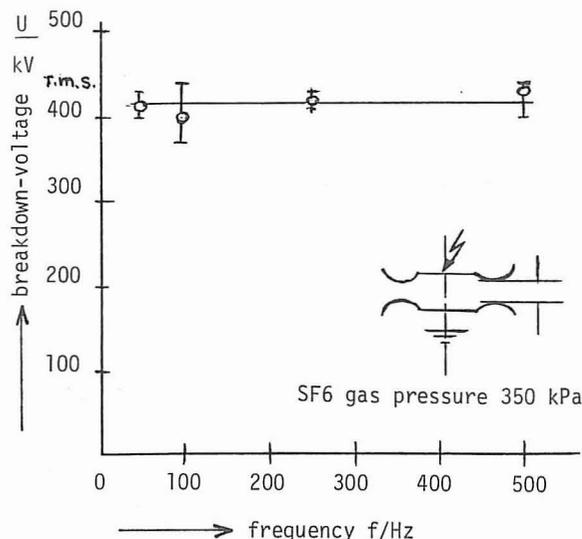


Fig. 9: Tension d'éclatement en fonction de la fréquence utilisant un transformateur d'essai conventionnel.

#### 4. Mesures à l'aide de transformateurs de mesure classiques

A titre de complément pour les mesures ci-dessus effectuées à l'aide d'une installation d'essai à résonance en série, le comportement au claquage du gaz SF<sub>6</sub> fut étudié à l'aide d'un convertisseur classique et entre autres avec des fréquences différentes de la fréquence d'exploitation de 50 Hz. La fréquence pouvait y être ajustée à 50, 100, 250 et 500 Hz. La configuration d'essai elle-même ne différait pas de la géométrie des essais précédents, par contre par le matériau des électrodes. Celles-ci étaient pourvues d'un chromage de haute dureté. La Fig. 9 démontre également que le gaz d'isolement se comporte identiquement à l'intérieur de la plage de 50 Hz à 500 Hz, c'est-à-dire que la tension disruptive reste inchangée. Les tensions disruptives continuellement plus élevées et plus régulières en comparaison des résultats obtenus dans la courbe 1 de la Fig. 6 s'expliquent par les électrodes spécialement durcies mises en œuvre. Grâce à la meilleure qualité superficielle de ces dernières, la tension disruptive s'est améliorée d'environ 10% (les électrodes précédentes étaient simplement constituées d'aluminium). On constate en outre l'absence de l'effet d'activation des électrodes. Pour cette raison, on n'observe plus des augmentations de la tension disruptive dans la plage des fréquences élevées.

#### 5. Discussion des mesures

Les mesures exécutées et présentées ici montrent univoquement que les transformateurs d'essai classiques et les installations d'essai à résonance en série conduisent aux mêmes résultats sous des conditions identiques. Tant les résultats physiques que pratiques s'obtiennent identiquement par les deux méthodes. Cette assertion est essentiellement valable dans la plage des fréquences étudiées et qui se situent entre la fréquence industrielle et quelques centaines de Hz. Cette constatation est autant réjouissante pour l'exploitant d'une installation d'essai à résonance en série que pour le client qui peut sans la moindre réticence procéder à sa mise en œuvre sur les lieux.

### V. Essais pratiques sur les lieux d'utilisation

Des installations d'essai à résonance en série on permis dernièrement de testées diverses installations blindées isolées au SF<sub>6</sub>. La tableau suivant donne un aperçu des ins-

tallations ainsi contrôles en indiquant les valeurs caractéristiques; fréquence, nombre et couplage des bobines, durée d'essai, utilisés pendant l'essai de ces dernières:

Pays	Niveau de tension	Essais en usine		Essais sur site d'implantation			
		de type	de routine	Tension d'essai	Fréquence	Nbs. de bobines	Durée
	$U_n$ kV	Onde de choc kV	AC kV <sub>eff</sub>	AC kV <sub>eff</sub>	f Hz		s
Suisse	150	750	325	260	≈ 230	2 séries	60
Allemagne	150	750	325	260	100	2 séries	60
Norvège	420	1425	630	504	115-230	3 séries 4 séries	60 to 120
Norvège	420	1425	630	520	70-90	4 séries	60
Suisse	420	1425	680	544	110	4 séries	60

Tableau: Exemples de test haute tension effectués, sur sites d'utilisation d'installations complètement montées, avec des installations d'essai à résonance variable.

Tous les tests ont été effectués entre phase et phase. Lors d'essais d'installations à niveau de tension de 420 kV, deux défauts ont été découverts. Dans le 1<sup>er</sup> cas, nous avons constaté un contournement d'isolateur provoqué par une pollution contenant des particules métalliques. Dans le second cas, c'est un claquage dans le gaz dû à des arrondis d'électrodes non correctement exécutés. Après rectifications des arrondis et nettoyage des surfaces incriminées tous les essais se sont déroulés normalement et ont prouvé que la tenue de ces installations blindées était irréprochable. Comme le montre la fig. 10, ces essais ont été effectués en plein-air et part des températures jusqu'à -15°. Bien qu'en partie effectués sous la neige ces tests n'ont posé aucun problème particulier.

La durée nécessaire à la mise en place d'une telle installation d'essai est inférieure à une demie journée et ceci y compris le transport sur le site de quelques un, le déchargement, l'assemblage des bobines de self pour former une cascade complète ainsi que le raccordements des 2 transformateurs avec leur unité de réglage. Tout ceci grâce au poids extrêmement réduit (seulement 20 kN) durant à l'ensemble une grande flexibilité. Les multiples combinaisons possibles de couplage des bobines (série, parallèle ou série-parallèle) permettent un réglage très individuel des composantes; courant, tension et fréquence, pouvant s'adapter à toutes conditions d'essais.

## VI. Conclusions

1. On a présenté et discuté les circuits de résonance à titre d'intéressante méthode d'essai pour des objets de haute capacité, tels que les installations à isolation au SF<sub>6</sub> ou les câbles, particulièrement pour les essais effectués sur les lieux. Ce faisant, on a pu montrer que les installations de résonance en série à inductivité constante mais à fréquence variable sont également parfaitement appropriées. Pour les installations blindées étudiées à ce jour, la fréquence d'essai se situait dans la plage de 80 à env. 235 Hz, selon la capacité de celles-ci. Cette plage peut être décalée par un autre dimensionnement des bobines de self ou également par la modification du circuit d'essai (capacités complémentaires, connexion des bobines de self).

2. Un essai à l'aide de courant alternatif produit par une telle installation de résonance en série n'exerce aucune influence sur le comportement au claquage de l'objet examiné dans la plage des fréquences de 50 à env. 300 Hz.

3. Ces conclusions sont valables pour les trajets de gaz libres et pour ceux pourvus d'un isolateur.

4. Des essais effectués à l'aide de différentes fréquences (entre 50 et 500 Hz), mais produites par un transformateur d'essai classique ont donné des tensions disruptives également constantes et aucune différence par rapport aux claquages sous 50/60 Hz.

5. Les directives CEI actuellement valables acceptent dans ce cas les fréquences d'essai élevées.

6. On peut donc sans réticence approuver les mesures effectuées sous une tension alternative de fréquence accrue. Pour une même durée d'essai que celle usuelle avec une fréquence de 50/60 Hz, l'essai à fréquence élevée est même avantageux pour le client, puisque l'objet examiné est sollicité par un nombre considérablement plus élevé de valeurs de crête pour une durée donnée.

7. Les essais sur les lieux effectués jusqu'à ce jour sur des installations isolées au SF<sub>6</sub> jusqu'à la tension de système de 420 kV confirment ce fait et montrent univoquement que la manipulation et l'exécution des essais par courant alternatif à l'aide d'installations de résonance en série à fréquence variable sont pratiques, flexibles et simples.

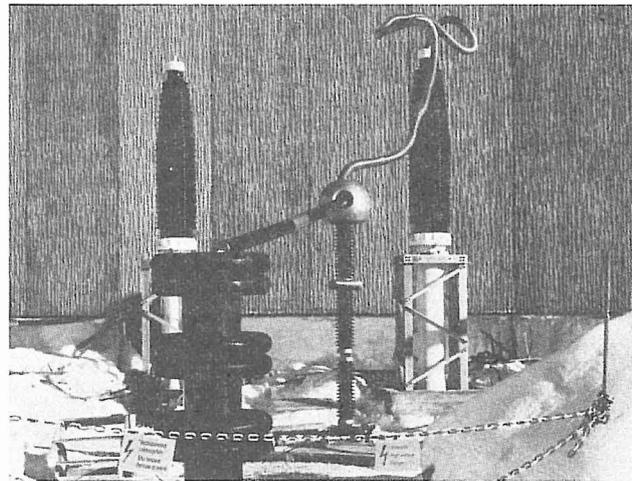


Fig. 10: Essai au site, en Norvège.

## References

- [1] P. Högg, W. Schmidt, H. Strasser: Dimensioning of SF<sub>6</sub> Metalclad Switchgear to Ensure High Reliability. CIGRE article No 23-10, 1972
- [2] W. Schmidt, P. Högg, A. Eidinger: On-site High Voltage Testing of SF<sub>6</sub> Metalclad Switchgear Installations and Compressed Gas Insulated Cable. BROWN BOVERI Revue, No 11, Nov. 1977, Vol 64
- [3] K. Feser: High Voltage Testing of Metal-enclosed, Gas-insulated Substations on-Site with Oscillating Switching Impulse Voltages. Hafely E1-44, 1. édition
- [4] A. Braaten: Improvements in or Relating to High Voltage Testing Equipment. Great Britain Patent No 646.756, Nov. 29, 1950
- [5] E. Kuffel, M. Abdullah: High Voltage Engineering. Pergamon Press, 1970
- [6] Peschel: United States Patent No 3.515.986, June 1970
- [7] S.A. Boggs, P. Kirkby: A Resonant Surge Field Test for SF<sub>6</sub>-Switchgear, IEEE - Trans. PAS Vol. PAS - 100 (1981), p. 1881-1884
- [8] R. Reid: New Method for Power Frequency Testing of Metal Clad GIS and Larger Rotary Machines in the Field. Proceedings of World Electrotechnical Congress, Moscow, 1977, Rapport 29, Sect. 1
- [9] Ch.H. Tuttle: High Voltage Resonant Testing Circuit. United States Patent No 3.781.667, Dec. 25, 1973
- [10] U. Brand, H. Dietz, H. Eberlein: A Metalclad Testing Set with Voltage Transformers for GIS. Proc. of 3. Intern. Symp. on HV Engg, Milan 1979, Report 43.16
- [11] F. Bernasconi, W.S. Zaengl, K. Vonwiller: A new HV-Series Resonant Circuit for Dielectric Tests. Proc. of 3. Intern. Symp. on HV Engg, Milan 1979, Report 43.02
- [12] B. Bachmann: Multitoroids for Controlling and Shielding. Proceedings of World Electrotechnical Congress, Moscow, 1977, Rapport 105, Sect. 2
- [13] S. Sangkasaad: Dielectric strength of compressed SF<sub>6</sub> in nonuniform fields. Doctoral theses, ETH Zürich, Switzerland, 1976

E R R A T A

to C I G R E P A P E R 23-07

Location	now reads	should read
equation (1)	$= \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC_t}$	$= \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_t}}$