

disjoncteurs Fluarc au SF6 et protection des moteurs MT

Jacques Hennebert

David Gibbs

sommaire

1. Historique		p. 2
2. Coupure par autosoufflage (auto expansion)		p. 2
3. Arc tournant		p. 4
4. Coupures et surtensions de manœuvre		p. 5
5. Surtensions et ondes à front raide	Les réamorçages	p. 5
	L'arrachement du courant	p. 8
	Les préamorçages	p. 9
6. Isolation des moteurs		p. 10
7. Propagation d'ondes à front raide dans les moteurs		p. 10
	Conséquences des phénomènes de surtensions	p. 12
8. Isolation moteur d'après les normes CEI et pratiques courantes	Isolation entre spires	p. 12
	Isolation par rapport à la terre	p. 12
9. Performances des disjoncteurs Fluarc	Essais de coupure	p. 13
	Résultats des essais	p. 13
	Dans la pratique	p. 14
	Avec l'expérience	p. 15
10. Conclusion		p. 16

1. historique

Jusqu'à la fin des années 70 les disjoncteurs MT (moyenne tension) ont utilisé, principalement, les techniques de coupure dans l'air et dans l'huile.

Les disjoncteurs à coupure dans l'huile, à faible ou à fort volume d'huile, étaient en Europe la seule alternative technologique. La majorité des constructeurs de disjoncteurs, d'envergure internationale, les présentaient dans leurs catalogues.

Par ailleurs, les qualités des disjoncteurs à coupure dans l'air étaient très appréciées par leurs utilisateurs dans le domaine de la distribution industrielle de 6,6 et 11 kV en Asie et en Europe, et de 5 et 15 kV sur le continent américain. Avec les disjoncteurs à coupure dans l'air, que ce soit pour des applications BT ou MT, les utilisateurs ne se préoccupaient pas des surtensions et bien souvent,

n'étaient même pas conscients de l'existence d'un tel phénomène. En effet grâce au soufflage magnétique dans l'air, le grand allongement de l'arc (fonction de la valeur du courant coupé), et son refroidissement, permettent une coupure en douceur, sans surtension excessive.

Les techniques de coupure dans le gaz d'hexafluorure de soufre -SF6- ou dans le vide ont commencé à être utilisées dès les années 70-75 (selon les pays), particulièrement pour les disjoncteurs MT des postes primaires.

Le succès de ces deux nouvelles techniques n'est plus à prouver. Leurs avantages sont :

- une durée de vie plus grande que celle des disjoncteurs à huile ;
- un meilleur comportement en réencenchement rapide, coupure de batterie

de condensateurs, etc, comparé à ceux de la coupure dans l'huile et dans l'air ;

- un volume réduit, par rapport aux disjoncteurs à coupure dans l'air.

Pour remplacer les disjoncteurs à coupure dans l'air, dans les applications industrielles, et particulièrement pour la coupure des courants de démarrage des moteurs, le disjoncteur SF6 est la solution, offrant :

- l'avantage d'une coupure en douceur, et,
 - par rapport aux disjoncteurs à coupure dans l'air, un faible encombrement.
- Pour toutes ces raisons, après avoir fabriqué pendant 35 ans des disjoncteurs à coupure dans l'air de type Solenarc, Merlin Gerin a opté dès 1970 pour la technologie à coupure dans le SF6 dans le secteur de la moyenne tension.

2. coupure par autosoufflage (auto expansion)

Tous les Fluarc sont des disjoncteurs à auto-soufflage. Cela signifie que pendant toute la durée de vie d'un disjoncteur - 20 ou 30 ans - c'est la même masse de gaz SF6, contenue dans une enceinte fermée étanche et scellée à vie, qui participe à la coupure et à l'isolement.

Pendant la période d'arc, celui-ci est refroidi par convection du SF6 et échange thermique entre le gaz "chauffé" par l'arc et le gaz froid.

Plus précisément, le gaz froid est insufflé perpendiculairement à la colonne d'arc pour renforcer le mélange du gaz chaud et du gaz froid (phénomène tourbillonnaire). En comparaison, l'énergie calorifique échangée par conduction radiale est très faible.

On pourrait s'attendre à un échange calorifique par rayonnement dû à la température élevée de l'arc. En fait, les échanges sont infimes car le rayonnement est produit uniquement par les couches

périphériques de l'arc. Les échanges de température pendant la période d'arc s'effectuent donc surtout par convection. L'énergie fournie par le système, dans un temps dt à une masse de gaz dm, est :

$$dw = V.I.dt = h.dm,$$

avec :

V = tension de l'arc,

h = enthalpie par unité de masse ;

ou encore :

$$V.I.dt = h.p. s.dx$$

avec :

ρ = densité,

s = section en coupe de l'arc

dx = chemin parcouru par la masse dm pendant un temps dt.

D'où $V.I = h.p. s.u$, u étant la vitesse des gaz.

L'énergie transmise dépend directement de cette vitesse, mais les lois d'écoulement des gaz nous apprennent que le débit massique ne peut pas s'accroître indéfiniment lorsque la vitesse augmente.

Les développements techniques actuels font qu'il est intéressant de rester au voisinage de la vitesse du son.

Cette vitesse peut être atteinte par une géométrie convenable et pour une certaine énergie développée lors de la coupure. Technologiquement, les contacts tubulaires creux facilitent l'écoulement rapide des gaz chauds et entraînent l'instabilité de la racine de l'arc, évitant l'usure des contacts d'arc.

La technique de soufflage est d'une remarquable efficacité, elle nécessite d'injecter seulement une petite quantité de gaz entre les contacts : par exemple, avec les disjoncteurs Fluarc FB et FG, la quantité de gaz comprimé injecté au col de la buse est de cinq grammes pendant l'ouverture.

Afin de limiter la température de l'arc qui peut atteindre 10 000 ou 15 000 °C, à l'approche du zéro de courant il faut avoir

évacué l'énergie calorifique produite (qui atteint approximativement 30 000 joules lors de l'interruption d'un courant de 25 kA). La courbe d'enthalpie du gaz montre qu'un gramme de SF6 suffit à transporter cette énergie (cf. fig. 1).

Pendant la période d'arc, l'espace occupé par l'arc au col de la buse dépend de la valeur du courant instantané.

La section de l'arc, étant proportionnelle à cette valeur, est donc sujette à la même variation sinusoïdale. A des valeurs élevées de courant, l'arc peut occuper tout l'espace, bloquant ainsi le flux de gaz froid, c'est l'effet «bouchon» (cf. fig. 2).

Le débit massique total à la base de la buse est donc faible lorsque les valeurs de courant instantané sont élevées, mais il s'élève rapidement dès que le courant chute, juste avant le zéro de courant. Il est alors plus important que lors de la coupure d'un courant faible (cf. fig. 3).

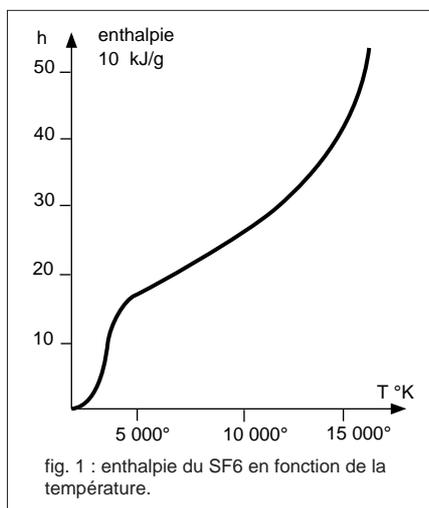
L'effet «bouchon» est bénéfique pour deux raisons :

- quand un disjoncteur s'ouvre sur un courant élevé, il conserve une quantité de gaz en réserve plus importante que lorsqu'il interrompt des courants faibles. Il n'agit pas en «aveugle» à l'approche du zéro de courant. Ainsi :

- sur fort courant, le gaz participe très efficacement au refroidissement de l'arc et à la désionisation,

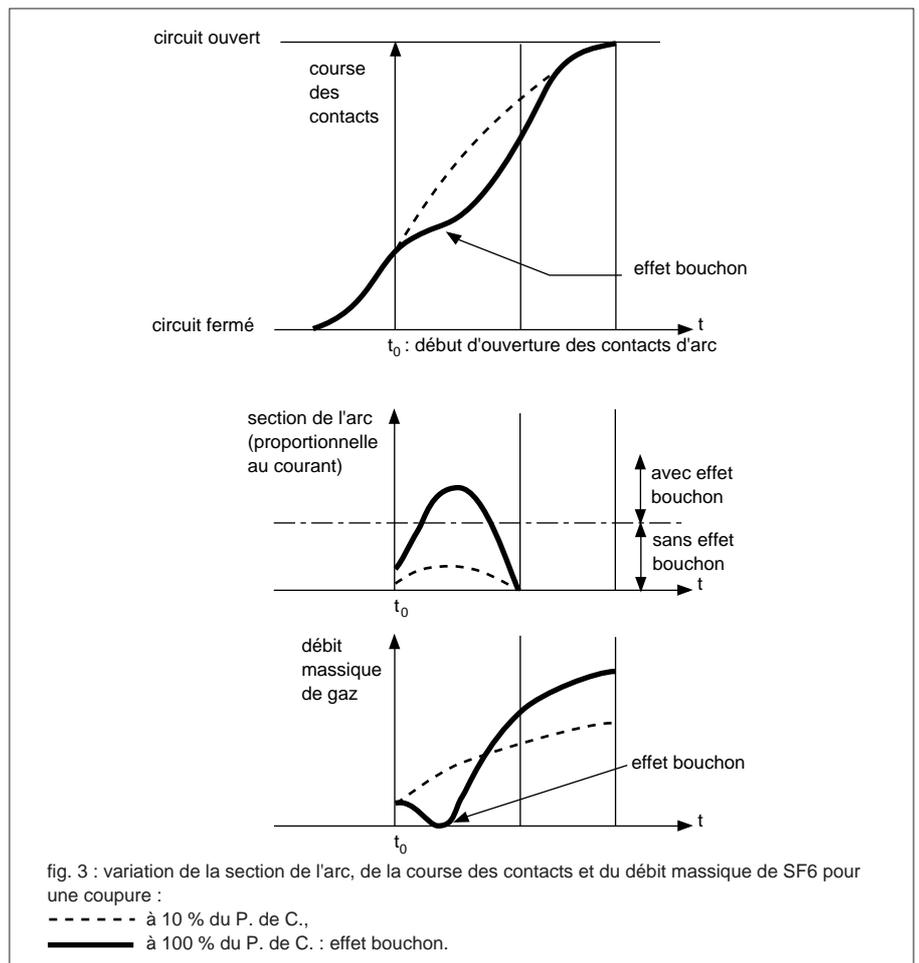
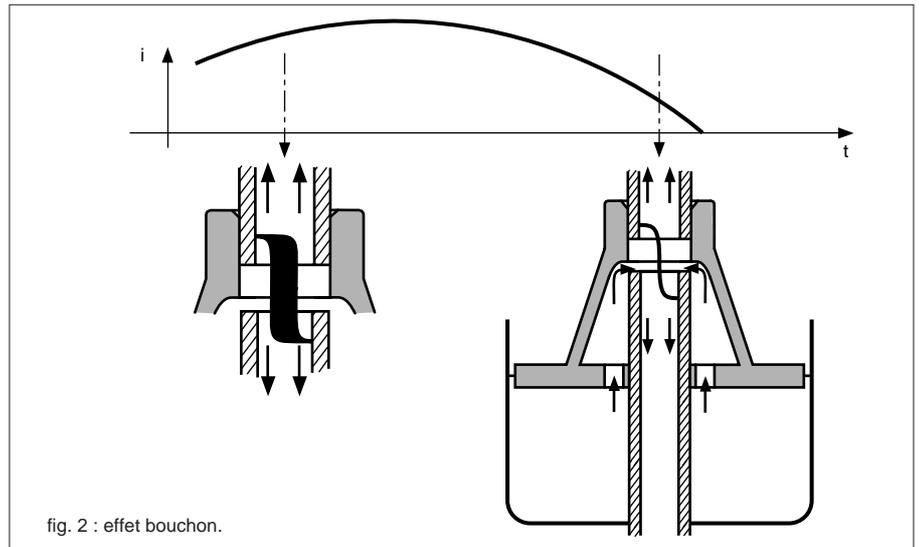
- et pour les faibles courants, le faible débit massique évite la coupure brutale (arrachement),

- l'interruption d'un courant fort entraîne un freinage du mouvement d'ouverture.



Ce freinage limite la distance entre les contacts, c'est à dire la longueur de l'arc et de ce fait l'énergie dissipée dans l'arc.

A titre indicatif dans les appareils MT (12, 24 ou 36 kV) la longueur de l'arc est de l'ordre de 15 mm.



3. arc tournant

Cette technique est utilisée en particulier pour les appareils à grande cadence de manœuvres, dans les contacteurs Rollarc par exemple et dans certains disjoncteurs.

Principe

Un conducteur parcouru par un courant, et placé dans un champs magnétique, est soumis à une force qui tend à le faire déplacer : c'est la loi de Laplace (champ-force-courant). Et c'est cette même loi qui, appliquée à un arc électrique conducteur, permet d'obtenir un arc tournant.

Application

Lors de l'écartement des contacts principaux, le courant à couper passe au travers d'un solénoïde jusqu'à une électrode circulaire. Un arc apparaît entre deux anneaux, perpendiculairement au champ magnétique B produit par le solénoïde. L'arc étant conducteur subit donc une force F, et est en conséquence accéléré dans un mouvement circulaire (cf. fig. 4).

La technique de l'arc tournant présente plusieurs avantages :

- le refroidissement de l'arc est efficace dans le SF6 environnant,

- les points chauds créant des vapeurs métalliques et une usure ponctuelle sont évités grâce au mouvement des racines de l'arc ;

- cette rotation de l'arc se produit jusqu'au zéro de courant.

La vitesse de rotation de l'arc a été mesurée. Elle varie avec l'intensité du courant à couper, et dans le gaz peut atteindre la vitesse du son pour les forts courants de court-circuit.

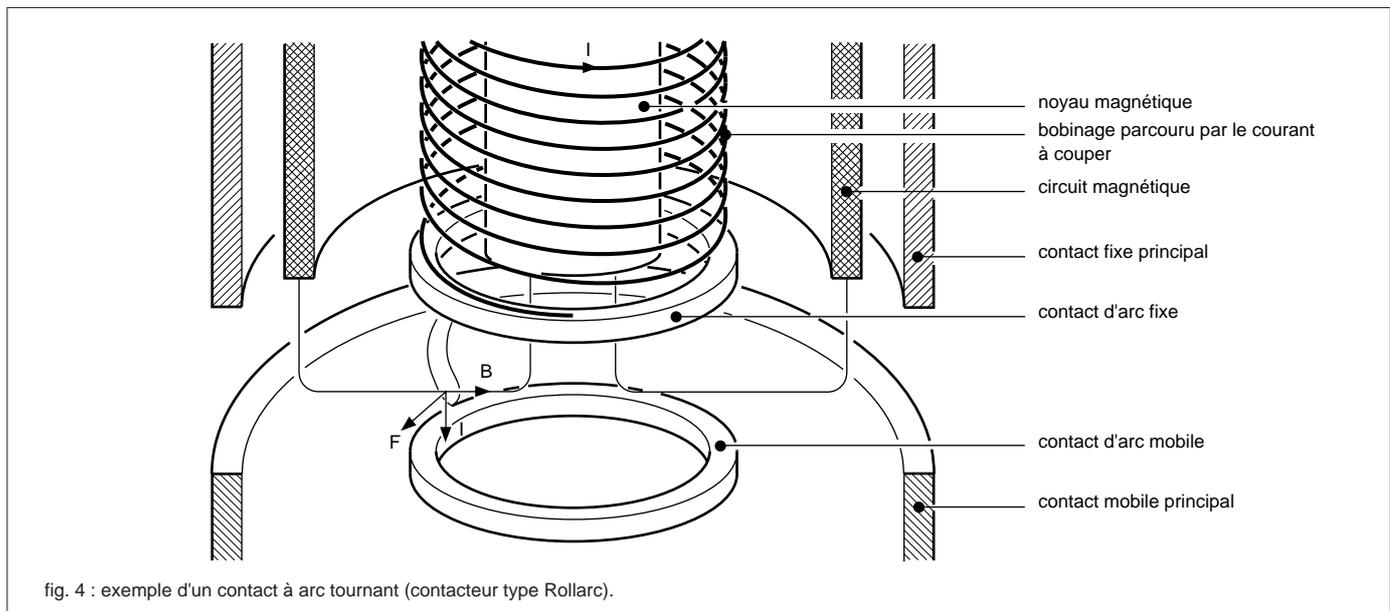
Lors de la coupure des courants de court-circuit, la force au voisinage du zéro de courant est assez élevée pour maintenir l'arc en rotation. En effet, la force est le

produit vectoriel du champ et du courant, deux paramètres qui ne sont pas en phase mais dont le produit garde une valeur significative au voisinage du zéro de courant (cf. fig. 5).

Lors de la coupure de faibles courants, la vitesse est très faible juste avant le passage à zéro du courant. Le refroidissement par convection est alors faible et la désionisation n'est due qu'aux qualités intrinsèques du gaz SF6. Ce faible refroidissement et cette désionisation font que les coupures s'effectuent en douceur et sans surtension de manœuvre.

	vitesse de rotation de l'arc	
	pendant la période d'arc	juste avant le zéro de courant
courants élevés	très élevée (vitesse du son)	élevée
courants faibles	élevée	faible

fig. 5 : vitesse de rotation de l'arc due au champ magnétique.



4. coupures et surtensions de manœuvre

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique provoque l'apparition de phénomènes transitoires. Ceux-ci se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension, ou d'un train d'ondes HF de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide.

Ce problème de surtensions liées à la commande des circuits avec quelque appareil que ce soit (interrupteur, contacteur, fusible, ou disjoncteur), a beaucoup fait parler de lui et de nombreuses études ont été effectuées à ce propos.

Pour comprendre le problème, il faut examiner les phénomènes qui donnent lieu aux diverses surtensions, ou ondes à front raide, qui apparaissent :

- réamorçages successifs ou arrachements du courant, à l'ouverture ;
- préamorçages successifs, à la fermeture avec certains types d'appareils de commande.

Il est à noter que :

- l'ampleur des surtensions ayant pour origine ces trois phénomènes dépend de l'instant (par rapport à la sinusoïde) où le processus est initié ;
- les phénomènes de préamorçages et de réamorçages successifs sont particu-

lièrement dépendants du type d'appareil de coupure.

Dans tous ces phénomènes, la coupure des petits courants inductifs dus à l'énergie selfique ($1/2.L.I^2$) des circuits est un important facteur de surtension. Ces surtensions sont fonctions de l'appareillage de coupure utilisé et de la charge, essentiellement transformateur ou moteur.

- pour les transformateurs à vide, le facteur d'amplitude étant faible, la coupure de petits courants magnétisants est facile et sans danger.

- pour les moteurs, la coupure des courants de démarrage est plus difficile et peut être grave de conséquences, particulièrement en terme de destruction progressive de l'isolation du moteur qui est plus faible que celle des autres équipements.

En fait, le grand nombre de moteurs MT utilisés dans l'industrie, leur prix, et leur sensibilité aux surtensions, ont rendu prudent leurs utilisateurs et les concepteurs de réseaux. Car pendant leur durée de vie, ces machines subissent des surtensions variées en terme d'amplitude et de temps de montée.

De nombreuses études ont récemment été effectuées sur les surtensions de manœuvre à la suite de défaillances moteur et avec certaines technologies de coupure.

Ces études montrent que, pour toutes les techniques de coupure, les surtensions injectées aux bornes d'un moteur tournant à son régime, qu'il soit chargé ou non, ne sont pas dans la majorité des cas, capables d'endommager l'isolation des moteurs. Ceci tient à la faible impédance de l'onde et à la force électromotrice développée par le bobinage du moteur. Au démarrage cette force électromotrice n'existe pas et le risque est élevé.

Pour mieux cerner les influences et performances des appareils de coupures, il est intéressant :

- d'étudier les caractéristiques des formes d'ondes de surtension générées par les opérations de coupure et l'effet de ces ondes sur les différents types d'isolation;
- de déterminer les effets des surtensions sur l'isolation des moteurs ;
- de connaître les tenues en tension des moteurs.

5. surtensions et ondes à front raide

L'étude des surtensions passe donc par celle des trois phénomènes cités précédemment :

- réamorçages,
- arrachement du courant,
- préamorçages.

les réarmorçages

Le phénomène

Quand les contacts se séparent juste avant le passage au zéro du courant 50 Hz, un amorçage peut se produire car la tension s'élève entre les contacts qui,

encore trop rapprochés, n'ont pas la distance d'isolement nécessaire. Le courant qui s'établit alors est un courant de haute fréquence que le dispositif de coupure est capable d'interrompre si sa vitesse de régénération diélectrique est très élevée. Puis le même processus se répète, et plusieurs réamorçages, jusqu'à une centaine, peuvent se produire. Ces réamorçages produisent des ondes qui se propagent le long du circuit. L'amplitude de ces ondes dépend de la différence de tension présente entre les contacts, juste avant que la coupure ne se produise.

Pour résumer ce phénomène, si un appareil peut interrompre des courants transitoires à haute fréquence, il peut alors provoquer des trains d'ondes transitoires de haute fréquence.

A noter qu'un moteur peut être soumis à une onde à front raide, de même type que celle apparaissant sur son appareil de commande, mais ayant une amplitude double (en raison du phénomène de réflexion d'onde).

Les réamorçages selon les normes CEI

Dans les documents de la CEI, les réamorçages multiples créés par l'appareillage de commutation sont qualifiés «d'événements anormaux». Dans ce cas les équipements sensibles (enroulements de moteur) doivent :

- soit être prévus pour résister à un niveau plus élevé de tension de choc,
- soit être protégés de façon convenable.

Pour les moteurs MT, l'utilisateur a donc deux solutions pour éviter les dommages :

- soit utiliser des moteurs ayant une très bonne isolation, correspondant aux caractéristiques (front, amplitude) des ondes à front raide qui se propagent,
 - soit utiliser des parasurtenseurs (pour limiter l'amplitude de la surtension), et des systèmes RC (pour dériver les courants transitoires de haute fréquence).
- Les documents CEI illustrant ces phénomènes (cf. fig. 6) montrent que les réamorçages sont non seulement définis par le niveau de surtension par rapport à la terre $-U_{ff}$ mais aussi par la valeur maximale de la tension crête-à-crête $-U_s$.

Les phénomènes transitoires de réamorçage

Dans la réalité, des phénomènes transitoires accompagnent très souvent les réamorçages décrits précédemment. Cette réalité est approchée dans le schéma équivalent (cf. fig. 7) d'un circuit comportant :

- une source de tension sinusoïdale d'inductance L_1 et de capacité C_1 ,
- un appareil de coupure (disjoncteur D) non dissociable des éléments parasites L_p et C_p ,
- une charge inductive L_2 possédant une capacité répartie symbolisée par C_2 ,
- enfin une inductance de ligne L_0 .

Lors d'une interruption, plusieurs oscillations indépendantes apparaissent :

- au niveau du disjoncteur, les valeurs parasites de C_{p1} et L_{p1} provoquent une première oscillation parallèle de fréquence F_{p1} très élevée, de 1 à 10 MHz, pendant laquelle C_{p1} se décharge à travers le disjoncteur :

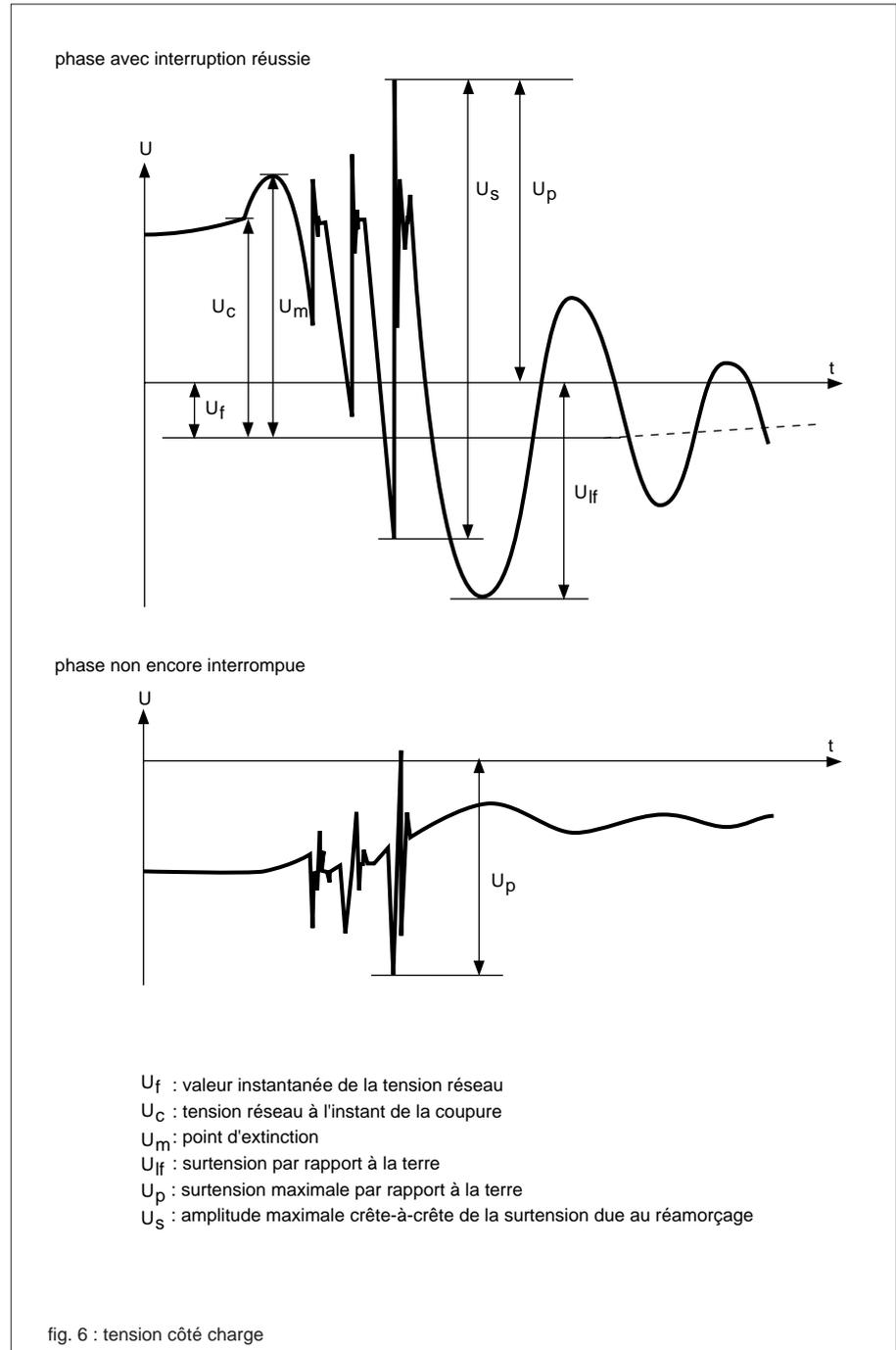
$$F_{p1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{p1} \cdot C_{p1}}}$$

- le second phénomène appelé seconde oscillation parallèle, provoqué par un transfert d'énergie se produit entre la source et les capacités de la charge à travers l'inductance de liaison L_0 , il concerne la boucle "disjoncteur- C_1 - L_0 - C_2 ".

Cette oscillation se produit avec une fréquence F_{p2} de 100 à 500 kHz :

$$F_{p2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_0 \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

Du fait des valeurs importantes de l'inductance de la source et des inductances de charge, le reste du circuit n'est pas concerné par les secondes oscillations parallèles.



■ le troisième phénomène, appelé oscillation du circuit principal, concerne tout le circuit avec une fréquence F_m de 5 à 20 kHz :

$$F_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 (C_1 + C_2)}}$$

qui peut ainsi être simplifiée pour une charge très selfique :

$$F_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 (C_1 + C_2)}} \text{ si } L_1 \ll L_2$$

Ces trois oscillations se produisent en même temps après le réamorçage, et la surtension qui en résulte est une superposition des trois formes d'onde. Cependant le développement de ces formes d'ondes dépend des caractéristiques du disjoncteur, de celles du circuit et de l'amortissement des composantes résistives.

Le réamorçage unique

Initialisée par la décharge de C_{p1} , la première oscillation parallèle se produit juste après le réamorçage du disjoncteur avec une fréquence élevée C_{p1} . La seconde oscillation parallèle alors prépondérante entraîne un courant oscillatoire qui peut provoquer (ou non) un zéro de courant, et dans ce cas peut (ou ne peut pas) être interrompu par le disjoncteur.

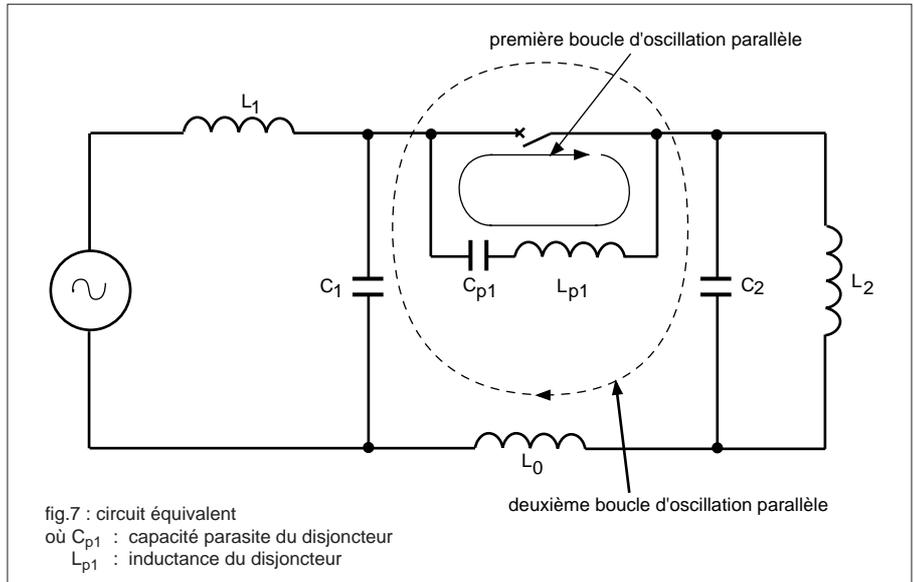
Dans le cas contraire, l'oscillation se poursuit jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment amortie, et alors l'oscillation du circuit principal prédomine.

Les réamorçages multiples

Dans des circuits fortement inductifs, le courant est déphasé de presque 90° par rapport à la tension. Aussi, après l'interruption du courant au voisinage du courant zéro, la tension atteint presque une valeur de crête.

La tension commence à osciller à la fréquence f_L du côté de la charge, et à la fréquence f_S du côté de la source. Si la différence momentanée des tensions d'oscillation dépasse le niveau de tenue diélectrique, un réamorçage de l'arc se produit.

Le circuit connaît alors les premières et secondes oscillations parallèles du côté de la charge. Ces secondes oscillations provoquent un courant de haute fréquence qui traverse le disjoncteur. Lorsque ce courant est superposé au



courant de fréquence industrielle (50 ou 60 Hz), il peut créer plusieurs zéros de courant à haute fréquence. La coupure effective dépend alors du di/dt du courant lorsqu'il passe au point zéro et de l'aptitude de l'appareil à couper avec ce di/dt . Ceci dépend de sa vitesse de régénération diélectrique :

■ dans le cas des disjoncteurs ayant une vitesse élevée de régénération diélectrique, la coupure définitive peut se produire lors du premier passage au zéro de courant à haute fréquence,

■ pour des disjoncteurs à vitesse de régénération plus lente, plusieurs oscillations peuvent être nécessaires ; la coupure peut même ne pas se produire du tout.

Ce courant à haute fréquence est initialisé par les secondes oscillations parallèles et de ce fait, ce courant passe dans le circuit disjoncteur C_{p1} et L_{p1} (cf. fig. 7). Sa fréquence est fonction des composants de cette boucle. Le courant passant ainsi par l'inductance de la charge L_2 , n'est pas touché par la boucle des secondes oscillations parallèles sauf par de faibles perturbations.

Pendant la période de réamorçage, la tension aux bornes de la charge oscille autour d'un niveau de tension déterminé par la valeur acquise lors de la première interruption. Le niveau de tension moyen pendant cette période provoque un accroissement du courant de charge. Pendant la période de coupure, la tension de rétablissement transitoire monte

jusqu'à ce qu'elle dépasse la rigidité diélectrique de l'espace entre les contacts, et provoque ainsi un réamorçage.

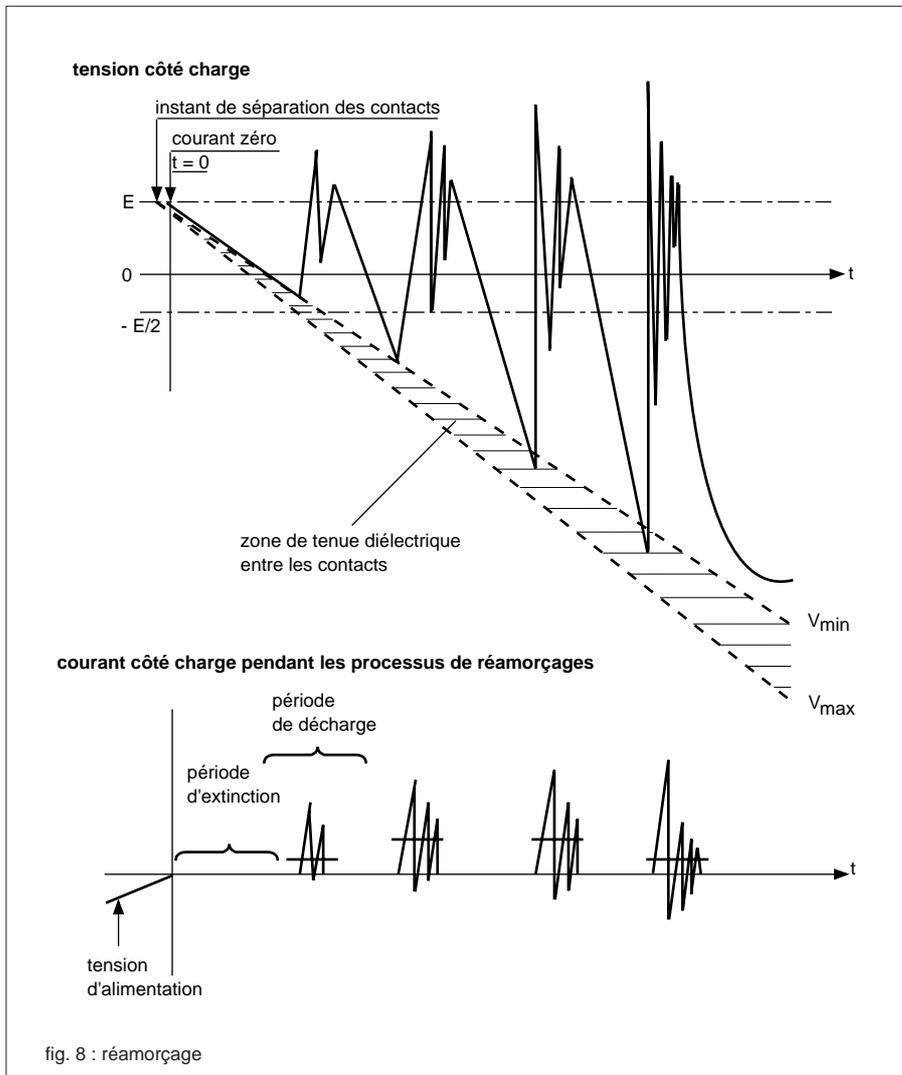
Il faut se souvenir que pendant la période d'ouverture d'un disjoncteur ses contacts se séparent, et de ce fait la tenue diélectrique de l'espace entre ces contacts ainsi que de la tension d'amorçage s'accroissent à chaque réamorçage.

Pendant ce temps, le courant de charge va augmenter puis décroître selon que la valeur instantanée de la tension côté charge dépasse ou non le niveau de tension $E/2$, ainsi que le montre la figure 8 page 8.

Ainsi, la surtension de réamorçage possible est gouvernée par les caractéristiques du circuit et du disjoncteur. La courbe d'onde de réamorçage est donc fonction de la fréquence du circuit de la seconde oscillation parallèle, tandis que l'amplitude possible est déterminée par la puissance disponible, c'est à dire par la puissance stockée dans l'inductance du circuit et dans la capacité au moment de la coupure.

Dans la pratique,

■ les réamorçages successifs et les interruptions de courant de fréquences élevées qui provoquent le processus de réamorçages multiples peuvent se répéter plusieurs fois. La quantité d'énergie croît dans l'inductance de la charge alors que l'écart des contacts augmente, donc chaque réamorçage successif se produit à une tension plus élevée ;



■ l'amplitude est limitée par la tenue diélectrique de l'espace entre les contacts, amplitude qui s'accroît pendant l'ouverture. La vraie valeur de tension de réamorçage est donc fonction de l'énergie disponible et de la régénération diélectrique, si bien qu'une valeur générale maximale ne peut être fixée.

Le processus de réamorçage/coupage peut s'interrompre de deux façons :

■ la première, par la fin des phénomènes de réamorçage. L'espace entre les contacts, nécessaire pour couper, augmente en même temps que la tension transitoire de rétablissement (TTR). Lorsque le taux d'augmentation de la tenue diélectrique dépasse le taux d'accroissement de la TTR, la coupure est définitive ;

■ la seconde façon est de ne pas couper rapidement le courant HF, mais d'attendre qu'il s'amortisse et s'annule, pour couper définitivement au prochain passage à zéro du courant à fréquence industrielle.

l'arrachement du courant

Il est défini comme une « coupure de courant abrupte assez loin du zéro de courant 50 ou 60 Hz ».

Alors que le courant a été brusquement amené à zéro par la coupure, le courant de l'inductance de charge a besoin d'un certain temps pour dissiper l'énergie magnétique emmagasinée et pour permettre au champ magnétique de chuter. L'énergie emmagasinée dans l'inductance L_2 (cf. fig. 7) est transférée à

chaque oscillation, dans la capacité C_2 et crée une surtension. Grâce à la conservation d'énergie, la relation mathématique entre le courant coupé « I_a » et la valeur de surtension est bien connue :

$$\frac{1}{2} C_2 \cdot U_{max}^2 = \frac{1}{2} C_2 \cdot U_c^2 + \frac{1}{2} L_2 \cdot I_a^2$$

$$U_{max} = \sqrt{U_c^2 + \frac{L_2}{C_2} I_a^2}$$

Où

U_c = tension aux bornes de C_2 avant l'oscillation

C_2 = valeur de la capacité en aval

L_2 = valeur de l'inductance en aval

Et donc, si le neutre côté charge n'est pas mis à la terre (c'est le cas pour la plupart des moteurs), dès l'interruption de la première phase (cf. fig. 9) un déplacement du potentiel du neutre par rapport à la terre se produit et la surtension qui en résulte est :

$$U_{max} = 0,5 V + \sqrt{(1,5V)^2 + 1,5 L_2 / C_2 I_a^2}$$

avec V = tension simple, entre phase et neutre.

Mais cette équation ne tient pas compte de l'amortissement du circuit qui fait décroître progressivement l'amplitude des oscillations. Dans la pratique, il faut donc introduire un facteur d'amortissement K :

$$K = 1 + \frac{x}{1,5 V}$$

avec x = amplitude de l'oscillation autour du potentiel du neutre.

D'où :

■ lorsqu'il n'y a pas de courant arraché, la valeur minimale de U_{max} obtenue est de :
 $(U_{max})_{mini} = 0,5 V + X$
 $= 0,5 V + (K - 1) 1,5 V$
 $= 1,7 V$ avec $K = 1,8$
 $= 1,4 V$ avec $K = 1,6$.

■ avec un courant arraché, petit mais non négligeable, U_{max} est bien sûr plus important; les valeurs les plus élevées pouvant être observées lorsque la coupure de la première phase provoque la coupure des autres phases, presque instantanément. Ce phénomène est appelé arrachement du courant virtuel.

Le processus d'arrachement de ce courant virtuel dépend entièrement des caractéristiques du circuit et du couplage entre phases. Il peut donc se produire avec n'importe quel disjoncteur.

■ avec des valeurs élevées du courant arraché, la puissance emmagasinée dans le circuit de charge au moment de la coupure peut être extrêmement élevée, et peut entraîner des surtensions excessives.

les préamorçages

Au moment de la fermeture des appareils de connexion (disjoncteur-contacteur-interrupteur), une position est atteinte où la tenue diélectrique entre les contacts devient inférieure à la tension entre les contacts. A cette position, un amorçage (appelé préamorçage) se produit. Les tensions, du côté de la source et du côté de la charge, vont très rapidement atteindre une tension intermédiaire et la tension entre les bornes amont et aval de l'appareil de coupure décroît pour atteindre une valeur plus basse. Ce changement rapide de tension a pour effet de créer une onde de tension à front raide de part et d'autre de l'appareil. L'amplitude du front peut atteindre une valeur aussi grande que la valeur de crête de la tension simple. Les ondes de haute fréquence qui en résultent atteignent la charge où a lieu une réflexion, et l'onde réfléchie retourne aux bornes du disjoncteur. L'arc du préamorçage peut être alors coupé au zéro de courant ou à proximité de ce zéro. Sa coupure dépend du di/dt du courant lorsqu'il passe au zéro.

Mais étant en cours de fermeture, l'écartement entre les contacts diminue; cette coupure n'est donc effective que jusqu'à ce que la tension dépasse à nouveau leur tenue diélectrique. Avant que les contacts se touchent ce processus peut se répéter plusieurs fois.

La tension qui apparaît aux bornes du récepteur connaît un «double effet» dû à la réflexion (généralement de l'ordre de 1,8 fois la tension introduite). Après avoir

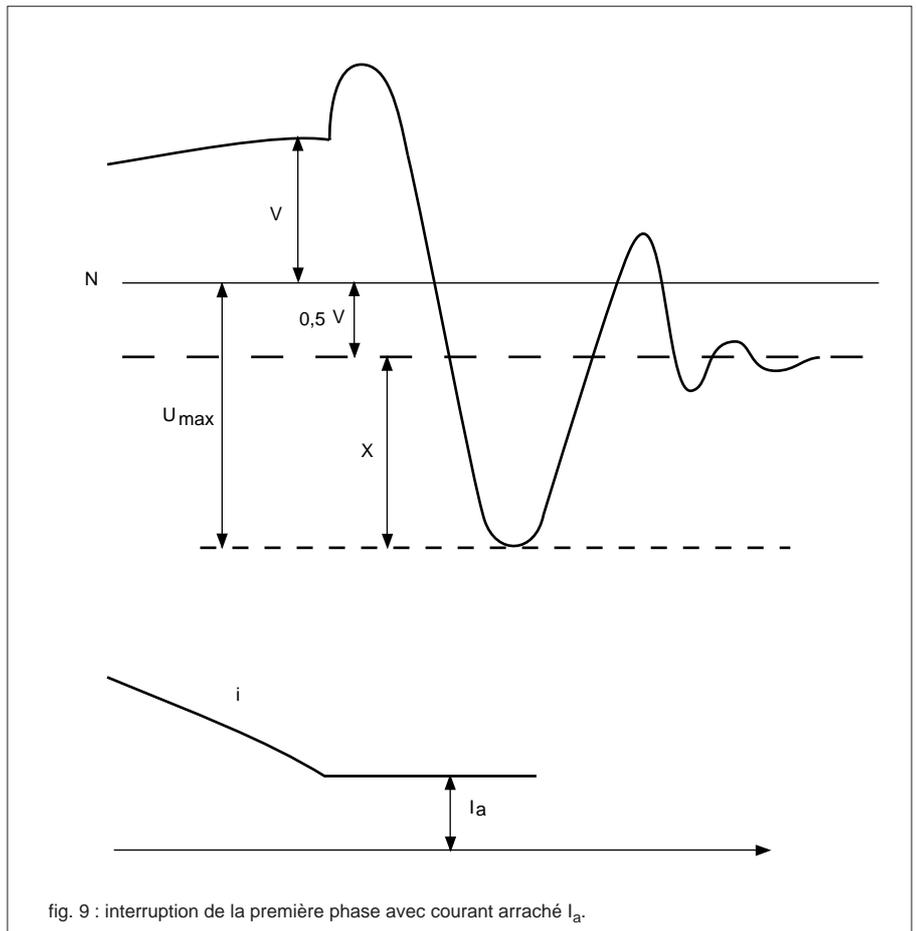


fig. 9 : interruption de la première phase avec courant arraché I_a .

atteint sa valeur de crête, l'onde de tension haute fréquence décroît lentement du fait du passage des ondes dans le câble (l'impédance caractéristique d'un câble est de quelques dizaines d'ohms).

Le processus répété de préamorçage suivi d'une onde de courant de haute fréquence et d'une coupure de courant est donc semblable dans sa nature au phénomène de réamorçage décrit précédemment. Une différence toutefois : la tenue diélectrique diminuant avec le rapprochement des contacts, la courbe

enveloppe des trains d'oscillations HF est décroissante.

Comme nous venons de le voir, le phénomène de préamorçage est très complexe et difficile à prévoir. L'apparition de surtensions dépend de nombreux facteurs :

- caractéristiques du disjoncteur (propriétés diélectriques, capacité à couper le courant de haute fréquence),
- caractéristiques du circuit (impédances caractéristiques des câbles et récepteurs),
- ainsi que l'instant de la fermeture.

6. isolation des moteurs

La majorité des enroulements stator des machines à courant alternatif est constituée de bobines préformées, reliées entre elles pour former le bobinage d'une phase. Les bobines sont constituées de plusieurs spires en série, chacune d'entre elles devant être isolée l'une de l'autre et du circuit magnétique mis à la terre.

L'isolation est donc à considérer "entre spires" et "entre bobinage et masse". Pour assurer leurs performances sur le plan magnétique et thermique, les bobines sont placées dans des encoches situées au cœur du stator, lequel est mis à la terre. Ainsi, l'isolement de type sec entre

spires n'a donc pas besoin d'être élevé; par contre, l'isolement entre les bobines et la masse doit être élevé pour supporter la tension phase-terre.

Ceci conduit à des distances d'isolement faibles entre les spires et une isolation plus épaisse de la masse pour supporter la tension phase-terre. Cette technologie introduit une capacité importante d'une part entre les spires, d'autre part entre les bobines et les encoches, ce qui conduit à une faible vitesse de propagation de la surtension dans les bobinages d'un moteur.

Le bobinage de la machine isolé par

rapport à la terre (ou isolation principale), est soumis à des contraintes diélectriques de trois à sept fois supérieures à la tension nominale 50 Hz.

L'isolation entre spires est normalement soumise à des niveaux de contrainte très bas, mais qui peuvent être de 100 à 1000 fois plus élevés pour les premières spires des bobinages lorsque les surtensions dues aux réallumages multiples se produisent. Cette isolation entre spires est d'ailleurs très difficile à tester, ce qui conduit à diverses appréciations des conditions d'essais. Il n'existe donc pas d'essais directs normalisés.

7. propagation d'ondes à front raide dans les moteurs

Comme décrit précédemment, le stator d'un moteur est constitué de nombreuses spires.

Déterminer avec précision la répartition, entre spires, des tensions de choc à front raide est très difficile. Aussi plusieurs modèles ont été développés pour étudier ces surtensions, le plus connu utilise un réseau maillé de bobines et de condensateurs en dérivation.

Dans un tel réseau maillé, le bobinage est considéré comme un "milieu" dans lequel des ondes se propagent avec une impédance caractéristique donnée et pendant un certain temps. L'onde à front raide met donc un certain temps (Tt) à passer de spire en spire; ce temps est généralement beaucoup plus petit que le temps de montée de l'onde (Tf) (cf. fig. 10).

Si l'amplitude de l'onde est V_{max} , la tension développée dans les spires est :

$$V_2 = V_{max} \cdot (Tt/Tf).$$

Ainsi pour un moteur ayant une caractéristique de propagation d'onde fixée (Tt), la tension qui apparaît aux bornes de la première spire dépend de l'amplitude et du temps de montée de la surtension.

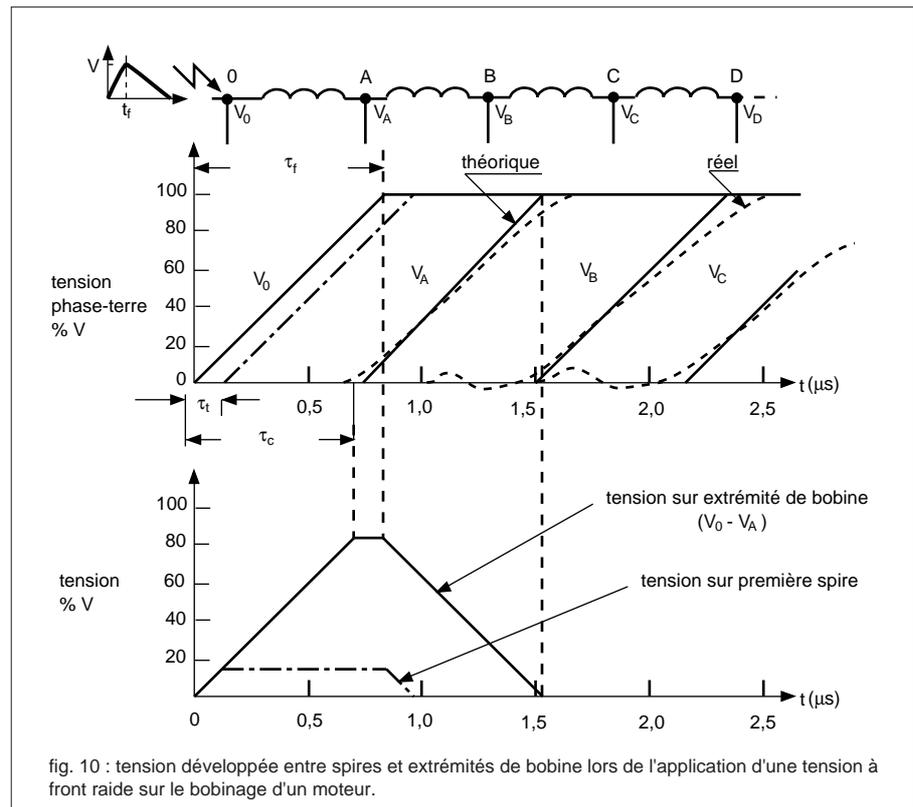


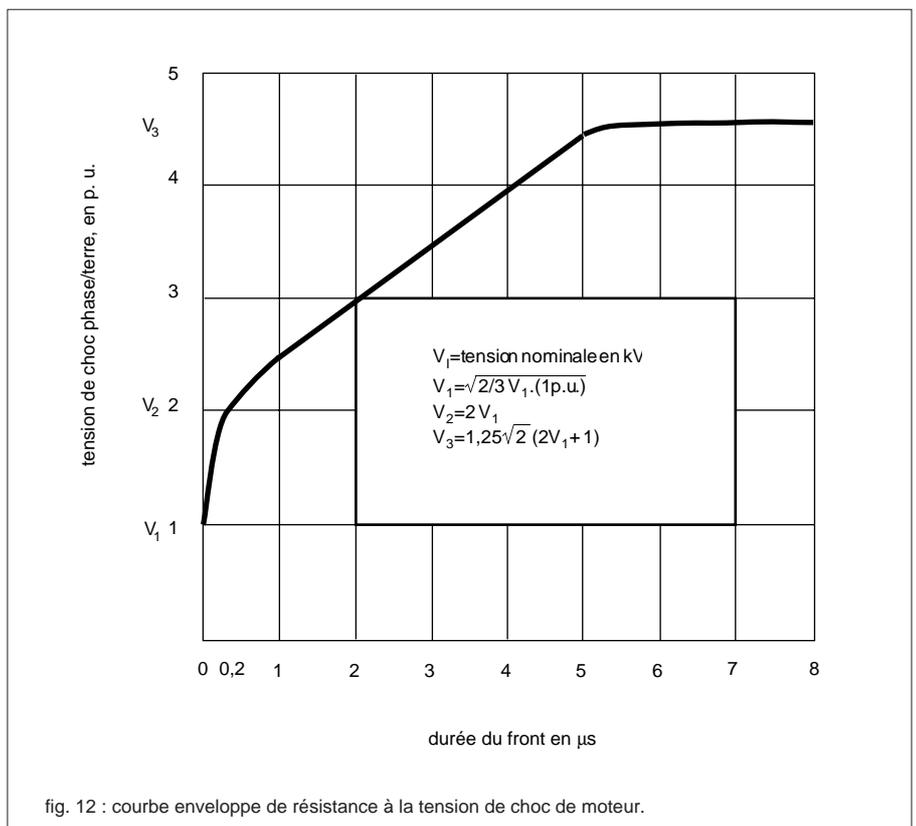
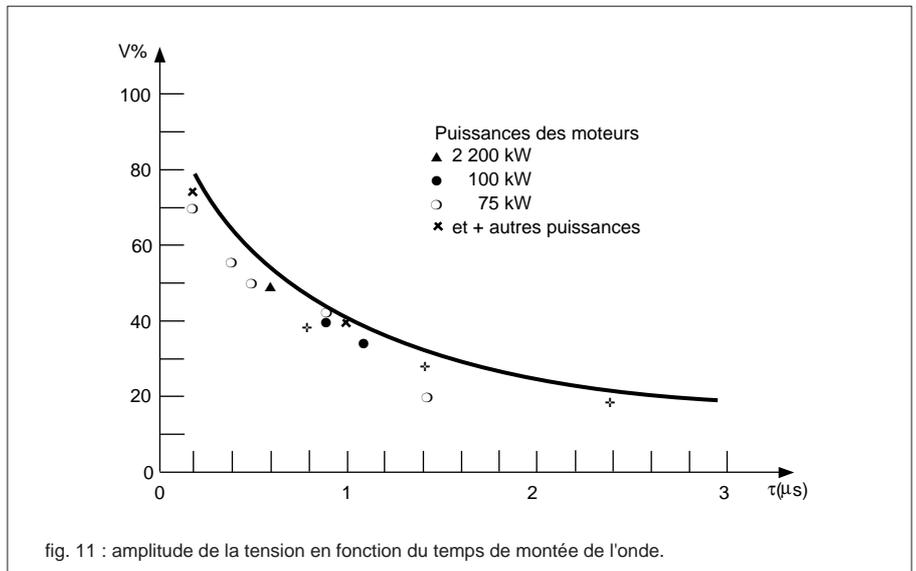
fig. 10 : tension développée entre spires et extrémités de bobine lors de l'application d'une tension à front raide sur le bobinage d'un moteur.

Des relevés d'expériences (cf. fig. 11) révèlent que :

- les temps de front d'ondes supérieurs à $3 \mu\text{s}$ provoquent une tension négligeable aux bornes des premières spires ;
- l'amplitude de la surtension est plus importante pour des ondes à front de montée de l'ordre de $0,5$ à $0,2 \mu\text{s}$;
- ces résultats sont indépendants de la puissance des moteurs concernés.

Toutefois la durée de telles surtensions (ondes à front raide) est très courte; en conséquence, même si la puissance instantanée de la surtension peut être élevée, l'énergie est très faible. De ce fait, les dommages provoqués à l'isolation sous forme de trous microscopiques dans le système d'isolation, parfois appelés "trous d'épingle", sont très limités et bien souvent ne peuvent pas être détectés. En effet un seul trou d'épingle cause très peu de modifications dans les caractéristiques d'isolation. Mais ces trous d'épingle se multiplient au rythme des surtensions à front raide. Ils provoquent alors des "points chauds", qui dégradent progressivement les caractéristiques d'isolation, limitant ainsi la vie du moteur. Cette dégradation est un processus généralement lent qui peut ne pas être détecté jusqu'à ce que l'isolation de la bobine soit totalement détériorée.

De récentes discussions sur les dommages créés sur les moteurs MT ont conduit à établir des courbes de résistance des moteurs aux tensions de choc. A titre d'exemple, en fonction du temps de montée, la figure 12 montre la courbe de tenue au choc publiée par un comité de l'Institut des Ingénieurs Electriciens et Electroniciens (IEEE) qui tient compte du vieillissement des moteurs. Cette courbe montre l'excellente capacité de l'isolation des moteurs à supporter les surtensions à fronts d'onde de durée supérieure à $5 \mu\text{s}$, mais aussi la grande sensibilité aux amorçages dus à des surtensions ayant des fronts d'onde de durée inférieure à $1 \mu\text{s}$. La contrainte est donc bien fonction du temps de montée de la surtension.



conséquences des phénomènes de surtensions

Les réamorçages

Comme expliqué précédemment, chaque réamorçage successif se produit à une tension plus élevée avec une valeur maximale qui ne peut être fixée. Or la répétition excessive des surtensions peut conduire à la destruction définitive de l'isolation entre spires aussi le nombre de réamorçages lors d'une même coupure est une donnée de base.

L'arrachement du courant

Les claquages de moteurs ayant pour cause ce phénomène, directement lié à l'instant initial de la coupure, sont :

- soient dus à une surtension très élevée consécutive à un fort courant arraché,
- soient dus à une répétition de surtensions de moindre valeur, consécutives à plusieurs coupures avec arrachement.

Les préamorçages

Lors du préamorçage du premier pôle, une onde à front raide de 1,8 p.u. peut être appliquée aux bornes du moteur. Cette tension se propage à travers les bobines et sera vue en tête de la deuxième bobine comme une oscillation «lente» d'amplitude de 1,8 p.u.. A ce moment là, la tension coté source est maximale sur la phase A (1 p.u.) et, sur les phases B et C, elle est égale à 0,5 p.u..

Ainsi dans le cas le plus défavorable, lorsque le réamorçage se produit sur un

second pôle, alors que la tension coté moteur est égale à 1,8 p.u., une tension de 2,3 p.u. est appliquée coté source et coté charge, sous la forme d'une onde à front raide. Cette onde subit aussi une réflexion qui porte son amplitude à $1,8 \times 2,3 = 4,1$ p.u. aux bornes du moteur.

En résumé

Les phénomènes de préamorçage sont très complexes. Les surtensions qui en résultent dépendent de beaucoup de facteurs : du disjoncteur et de son comportement dans de telles circonstances (capacité ou non à interrompre prématurément le courant), du circuit (impédances transitoires, fréquences propres), ainsi que de l'instant de fermeture sur l'onde sinusoïdale de courant.

8. isolation moteur d'après les normes CEI et pratiques courantes

Le comité technique pour les machines tournantes (travaillant pour la CEI), et différents auteurs de la littérature technique, s'accordent sur les niveaux d'isolation nominale des machines rotatives MT.

La norme CEI 34 stipule les niveaux suivants.

isolation entre spires

La tenue à la tension de choc de foudre est vérifiée par l'application d'une onde à front raide, de niveau $(4U_N + 5)$ kV, U_N étant la tension nominale. Ainsi, pour $U_N = 6,6$ kV, la tension d'essai est de : $(4 \times 6,6) + 5 \approx 31$ kV (crête).

Généralement, le niveau de surtension est exprimé en p.u. (per unit) c'est la valeur crête de la tension phase/terre :

$$1 \text{ p.u.} = U_N \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Pour $U_N = 6,6$ kV, la tension d'essai s'écrit aussi : 4,9 p.u. + 5 kV (crête).

Par convention, 50 % de cette tension doit être appliquée aux bornes d'un échantillon de bobines d'entrée, ce qui correspond à un compromis dû à la distribution non linéaire de la tension le long du bobinage. Le temps de front d'onde ne doit pas être inférieur à 0,5 μ s.

isolation par rapport à la terre

Essai de tension à fréquence industrielle

La tension efficace $(2U_N + 1)$ kV est appliquée entre les bornes du bobinage et la terre pendant une minute, puis est augmentée à une vitesse de 1 kV/s jusqu'à deux fois $(2U_N + 1)$ kV; puis immédiatement ramenée à zéro, à la cadence d'au moins 1 kV/s. A la suite de cet essai, le moteur ne doit présenter ni claquage, ni dommage.

La valeur de crête, $2\sqrt{2} (2U_N + 1)$ kV, dérivée de ce test est un peu supérieure à celle de l'essai de choc.

Pour $U_N = 6,6$ kV, la valeur de crête correspondante est donc de :

$2\sqrt{2} (2U_N + 1) = 40$ kV ; mais elle n'est appliquée que pendant un temps court tandis que la valeur 20 kV crête apparaît à chaque demi-période pendant une minute.

Essai de tenue à la tension de choc de foudre

La tension d'essai est $4 U_N + 5$ kV, ou 4,9 p.u. + 5 kV en valeur de crête.

Cette tension est la même que pour l'essai d'isolement entre spires mais avec un temps de front de 1,2 μ s.

Le tableau de la figure 13 récapitule les différents essais de coordination de l'isolement qui sont effectués sur les moteurs MT.

isolement	essai à 50 (60) Hz valeur efficace	essai de choc
entre spires		4,9 p.u. + 5 = 31 kV à 6,6 kV (50 % sur un échantillon) temps de montée 0,5 μ s
par rapport à la terre	$2 U_N + 1 \Rightarrow 2 (2 U_N + 1) \Rightarrow 0$ 14 kV \Rightarrow 28 kV \Rightarrow 0	4,9 p.u. + 5 = 31 kV à 6,6 kV temps de montée 1,2 μ s

fig.13 : niveaux d'isolement nominaux pour machines tournantes.

9. performances des disjoncteurs Fluarc

De nombreux tests ont été réalisés dans différents laboratoires, depuis de nombreuses années, sur les associations disjoncteur-moteur MT ou des montages équivalents.

Récemment, selon le projet qui est sur le point d'être inclus dans le document CEI 17A, les tests suivants ont été réalisés dans le laboratoire Volta (rapports des tests AC 1239 et AC 1241) :

essais de coupure

Schéma du circuit : (cf. fig. 14).
100 A - 7,3 kV et 280 A - 7,3 kV

Caractéristiques des câbles

Les extrémités de l'écran du câble à champ radial sont mises à la terre.

Longueur : 100 m
Tension : 12/20 kV

Courant : 295 A
Type : Pirelli X23
Isolation : polyéthylène
Capacité/m : 0,22 nF/m
Impédance : 40 Ω

Paramètres du circuit moteur

■ courant : 100 A
cos φ : < 0,2
Fréquence d'oscillation : 11,7 kHz

■ courant : 280 A

cos φ : < 0,2

Fréquence d'oscillation : 27 kHz

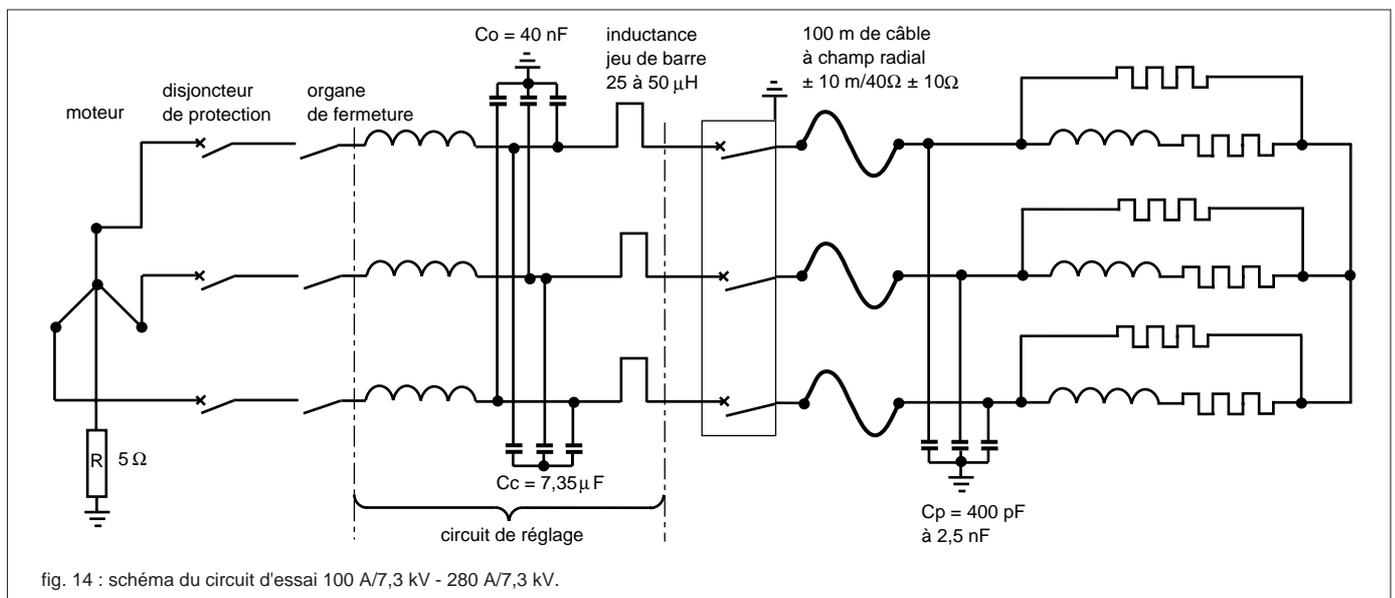
résultats des essais

(cf. fig. 15, 16, et 17)

Les disjoncteurs Fluarc utilisés étaient des FG2/40 kA et FG1/25 kA.

Tension d'essai : 7,3 kV.

Ces résultats reposent sur vingt essais réalisés à chaque valeur de courant et de capacité. Ce résumé tient compte de l'aspect statistique.



type de disjoncteur SF6	I(A)	K (facteur d'amortissement)	surtension (p.u.)		réamorçages multiples
			moyenne	moyenne + un écart type	
FG2	100	1,77	2,96	3,43	non
	100	1,77	2,94	3,41	non
	280	1,54	1,91	2,09	non
	280	1,54	1,87	2,14	non
FG1	100	1,77	1,63	1,81	non
	100	1,77	1,79	2,14	non
	280	1,54	1,69	1,78	non
	280	1,54	1,43	1,64	non

fig. 15 : résultats des essais avec disjoncteur Fluarc FG2/40 kA et FG1/25 kA : il ne se produit pas de réamorçages multiples (tension d'essai : 7,3 kV - Cc : 7,35 µF).

dans la pratique

Comme expliqué dans le premier chapitre, les techniques actuellement les plus utilisées dans les appareils MT sont la coupure dans le vide et la coupure dans le SF6. Ces deux techniques présentent cependant des différences importantes dans le domaine de la protection des moteurs MT.

Vis à vis des réamorçages et préamorçages multiples

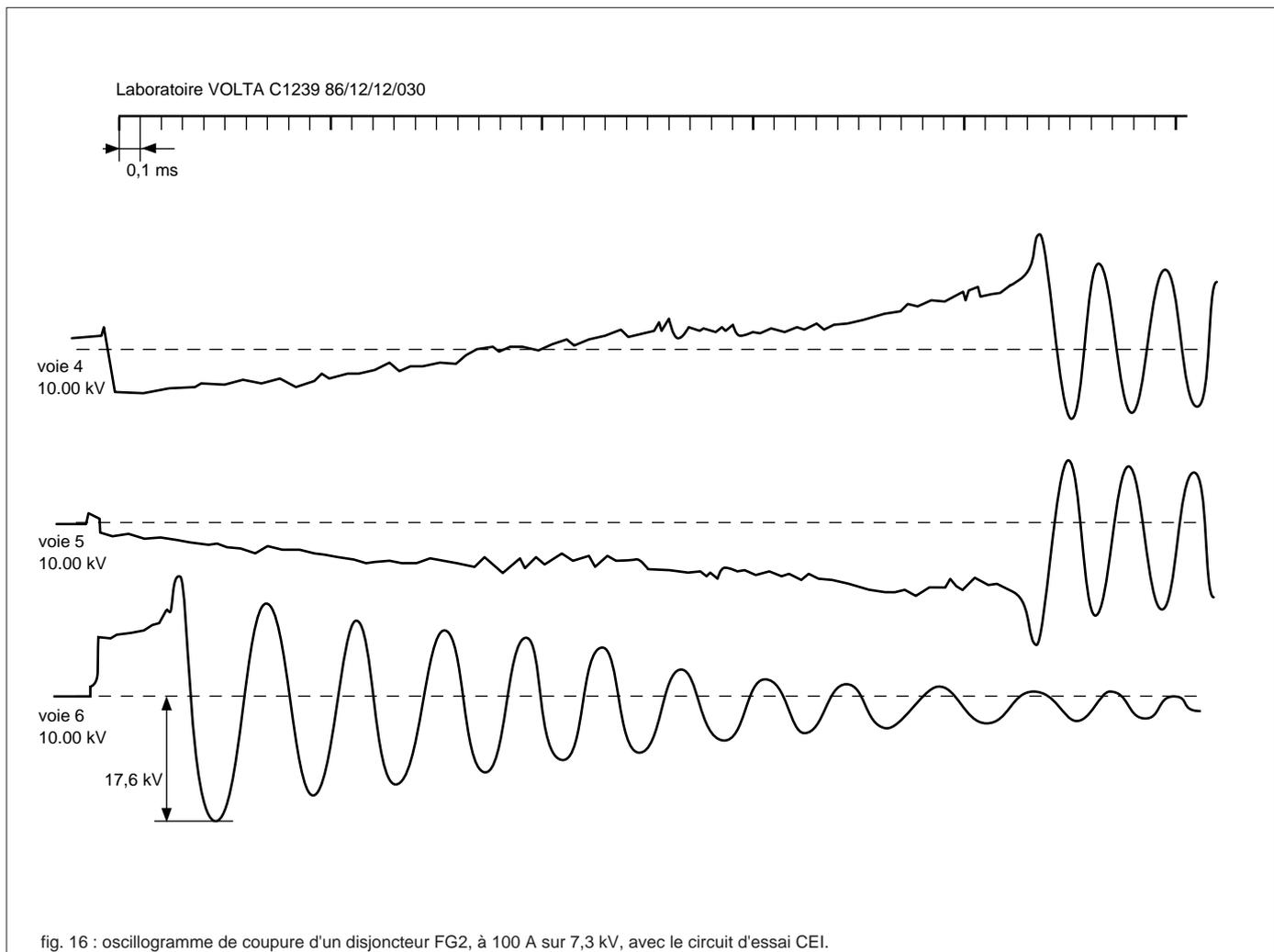
Le phénomène de réamorçages multiples dépend de la capacité du disjoncteur à couper des courant de haute fréquence. Les disjoncteurs à coupure dans le vide sont capables d'interrompre des courants HF, du fait de l'extrême vitesse de la régénération diélectrique : la tenue diélectrique peut atteindre 75 % de la valeur qu'elle aurait normalement entre

les contacts, seulement une micro-seconde après le zéro de courant. Quand des disjoncteurs et des contacteurs à coupure dans le vide coupent un circuit, lorsqu'il y a suffisamment d'énergie pour initialiser un réamorçage, il en résulte souvent un processus coupure / réamorçage (réamorçages multiples). Ce comportement varie selon le type d'alliage des contacts, mais reste différent du comportement d'un disjoncteur à coupure dans le SF6 qui a besoin d'environ dix microsecondes pour retrouver 75 % de sa tenue diélectrique. Aussi, avec la technique de coupure dans le SF6, un seul réamorçage est possible et fréquent lorsque les contacts se séparent juste avant le courant zéro (50 Hz). Exceptionnellement quelques réamorçages peuvent se produire mais jamais en nombre important.

Vis à vis de l'arrachement de courant

Des surtensions pouvant être observées lorsque la coupure de la première phase provoque prématurément la coupure des autres phases, ce processus dit de coupure du courant virtuel dépend entièrement des caractéristiques du circuit et du couplage entre phases. Il peut donc se produire avec n'importe quel disjoncteur.

Et comme d'autres phénomènes qui font intervenir des coupures de courant de haute fréquence, la coupure du courant virtuel risque plus de se produire dans les disjoncteurs à coupure dans le vide, qu'avec des disjoncteurs utilisant d'autres techniques de coupure.



En résumé

La capacité des disjoncteurs à coupure dans le vide d'interrompre des courants de haute fréquence, les rend beaucoup plus sensibles aux préamorçages multiples que les autres disjoncteurs. Par contre, les disjoncteur au SF6 ne coupant pas prématurément les courants de haute fréquence, ne provoquent en général qu'un seul préamorçage.

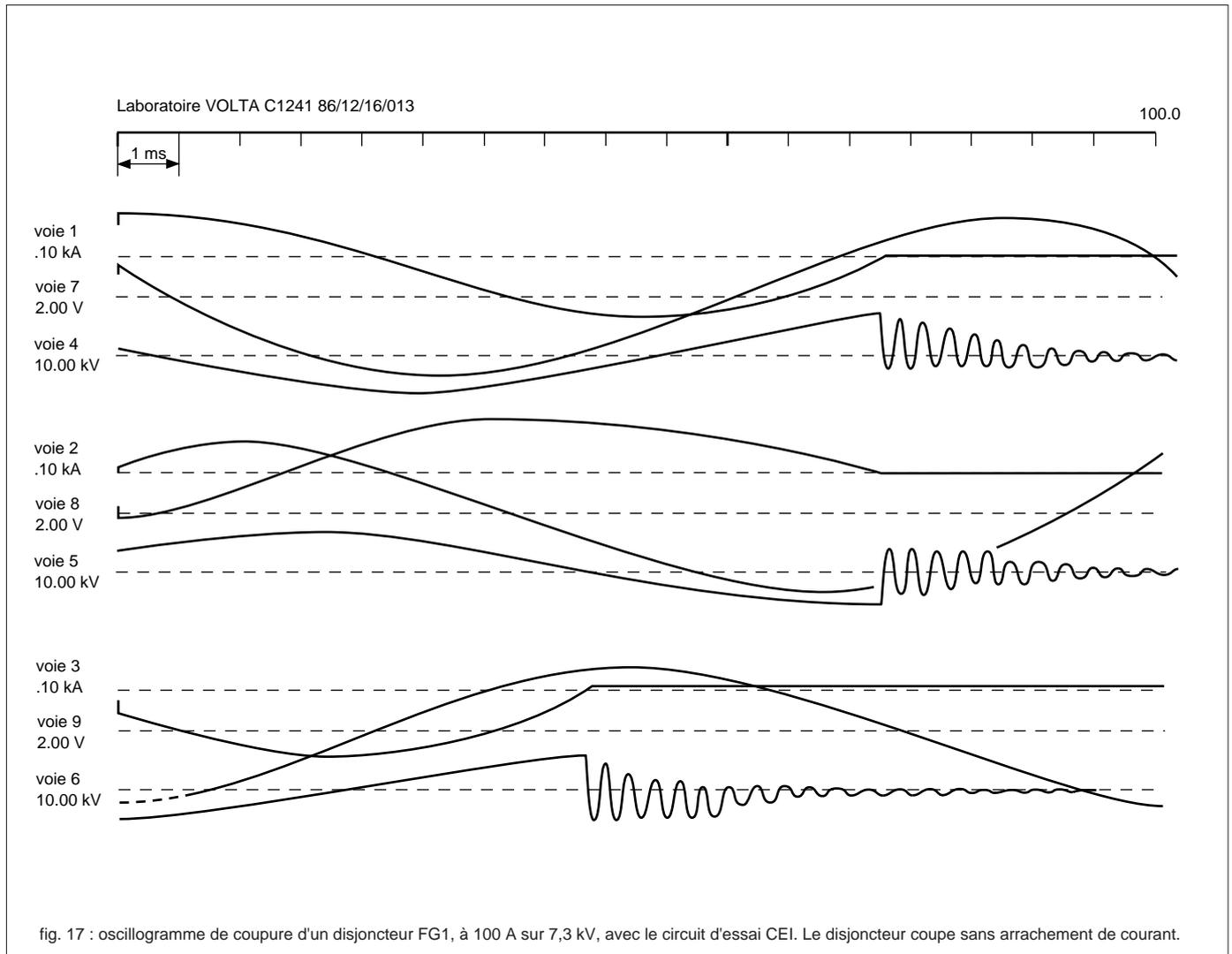
avec l'expérience

Le premier disjoncteur Fluarc fut mis en service en 1971. En 20 ans, plus de 70 000 disjoncteurs de ce type ont été installés dans le monde entier, pour des applications variées notamment dans le domaine industriel où les manœuvres des moteurs doivent être sûres à 100 % :

- auxiliaires de centrales,

- industries lourdes (de process),
- plates-formes offshore,...

Ceci démontre la parfaite adaptation des disjoncteurs Fluarc à la commande et à la protection des moteurs MT.



10. conclusion

La comparaison entre le niveau d'isolation des moteurs et celui des surtensions résultant de l'utilisation des disjoncteurs Fluarc et contacteurs Rollarc montre qu'il existe une bonne marge de sécurité.

A la tension de 6,6 kV qui est la plus utilisée pour des moteurs, le niveau d'isolation de l'ensemble de l'installation MT (CEI 298) est de 60 kV "choc" et l'isolation du moteur entre ses bornes et la terre est de seulement 31 kV "choc" (CEI 34)

Cette valeur comparée aux résultats de test donnés au chapitre 9 montre que les Fluarc ne surtensionnent pas de façon dangereuse pour le moteur.

Ces disjoncteurs couvrent une gamme étendue de courants nominaux, de tensions et de pouvoirs de coupure. Pour les cas difficiles (vieux moteurs ou risques de vieillissement accéléré) l'emploi des disjoncteurs Fluarc FG1 ou des contacteurs Rollarc (P < 250 kW) est conseillé, car ces matériels utilisent la technique de l'arc tournant.

Les Fluarc et Rollarc ne génèrent pas de réamorçages multiples, ce qui permet de sauvegarder l'isolement entre les spires des moteurs.

L'expérience a montré que leur emploi rend inutile l'utilisation de limiteur de surtension ZnO pour écrêter et de circuits RC pour atténuer les effets des réamorçages multiples.