

SURTENSION ET COORDINATION DE L'ISOLEMENT DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES À HAUTE TENSION

Le mot **coordination** désigne des actions dont l'objectif est **d'harmoniser** deux ou plusieurs choses. C'est un concept tout à fait commun que l'on rencontre fréquemment dans la vie courante. Dans le monde technique, il recouvre généralement l'harmonisation d'une **contrainte** et d'une **capacité de résistance** à cette contrainte. De façon encore plus spécifique, à la conception d'un réseau électrique, il est nécessaire de **sélectionner des matériels** afin qu'ils **résistent** aux différentes **contraintes** auxquelles ils sont soumis sur ce réseau. Réciproquement, si le matériel existe et, par conséquent, si le niveau de tenue est défini, alors on peut aussi souhaiter à limiter les contraintes à des valeurs inférieures à ce niveau. La coordination peut donc être obtenue soit en augmentant la tenue, soit en diminuant la contrainte. Comme toujours en technique, il y a un compromis à trouver entre, d'une part, l'aspect confort d'utilisation qui demande que la tenue à la contrainte soit bien supérieure à cette contrainte et, d'autre part, le point de vue économique qui requiert, pour minimiser le coût des équipements, de réduire au strict nécessaire la tenue à la contrainte.

La coordination de l'isolement d'un réseau électrique s'intéresse, pour sa part, aux **contraintes de tension** et à leurs pendants, les **tenues diélectriques des matériels**, tenues qui caractérisent la **capacité** d'une isolation à supporter certains niveaux de tension **sans rupture diélectrique**, c'est-à-dire **sans amorcer**.

La coordination de l'isolement consiste donc à **ajuster les tenues diélectriques** en service des équipements (lignes, postes, transformateurs, alternateurs) aux niveaux des **surtensions susceptibles d'apparaître** sur ces équipements durant leur exploitation, de telle sorte que la **probabilité de court-circuit** due à la **défaillance** d'une isolation donnée soit **acceptable** tant du point de vue opérationnel que économique. Cet ajustement est obtenu soit en diminuant les contraintes, soit en augmentant les tenues (maintiens) diélectriques, soit, enfin, en agissant simultanément sur ces deux paramètres. Une des difficultés essentielles du processus de coordination de l'isolement réside dans le fait que tant les contraintes de tension appliquées aux matériels que les tenues diélectriques de ces matériels sont de nature probabiliste, cette double incertitude rend délicat l'ajustement des tenues diélectriques à spécifier par rapport aux contraintes.

En chaque point d'un réseau, la coordination des isolements consiste donc à déterminer l'isolement optimal en tenant compte des conséquences d'une avarie ou d'une interruption de service. Dans cette optique, on peut envisager une gradation de l'isolement, c'est-à-dire de l'aptitude des isolations à supporter les contraintes électriques.

1. ISOLEMENTS, ISOLATIONS ET CATEGORIES DES CONTRAINTES DE TENSION

1.1 Différents isolements et types d'isolation

On appelle **isolement** d'un ouvrage ou d'un appareil électrique son **aptitude à supporter la tension** ou plus généralement, les **contraintes** électriques qui lui sont **appliquées**.

On appelle **isolation** l'élément matériel ou l'ensemble des dispositifs constructifs qui assurent cet isolement.

Sur un réseau électrique triphasé, quelle que soit la tension nominale, on distingue trois configurations d'isolement à considérer lors des études de coordination de l'isolement. I **L'isolement entre une des trois phases et le terre** (isolement dit phase-terre) comprend tous les isolements entre les parties sous tension et celles mises à la terre; c'est par exemple isolement existant entre un conducteur de ligne aérienne et le pylône, ou bien encore entre une borne d'un transformateur et sa cuve.

L'isolement entre deux des trois phases (isolement dit phase-phase) comprend tous les isolements entre les phases des réseaux triphasés; c'est par exemple l'isolement entre les phases d'un jeu de barres ou l'isolement entre les enroulements de même tension d'un transformateur triphasé.

L'isolement entre deux parties d'un réseau ou entre deux réseaux (isolement dit longitudinal) comprend tous les isolements entre deux parties d'un réseau ou entre deux réseaux ; c'est par exemple l'isolement entre deux lignes de tensions différentes qui se croisent, ou bien l'isolement entre les enroulements de tensions différentes de la même phase d'un transformateur, ou bien encore l'isolement entre les bornes d'une même phase d'un sectionneur ou d'un disjoncteur ouvert.

Chacune de ces trois configurations d'isolement peut être constituée d'un ou des deux types d'isolation suivants:

Isolation externe, comme les chaînes d'isolateurs en verre ou plus simplement un conducteur de ligne par rapport à la terre : c'est une isolation en général **auto-régénératrice**, c'est-à-dire qu'elle **retrouve** intégralement ses **propriétés isolantes** après une **décharge disruptive** (ou amorçage); **Isolation interne**, comme l'isolation papier-huile d'un transformateur ou l'isolation au SF₆, d'un disjoncteur : cette isolation est en général **non auto-régénératrice**. C'est-à-dire qu'elle perd ses propriétés isolantes ou **ne les retrouve pas** intégralement après une **décharge disruptive**

1.2 Classes et catégories des contraintes de tension : classification CEI

1 .21 Définitions

Les contraintes de tension sont réparties en deux classes, les tensions basses fréquences et les surtensions transitoires et, suivant leurs formes et leurs durées, selon des catégories dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau 1.

Cette répartition basée sur les caractéristiques de forme des surtensions remplace l'ancienne classification basée sur l'origine des contraintes: fréquence industrielle, manœuvre et foudre. Elle repose sur une description plus physique des surtensions, mais on peut préciser les correspondances générales qui existent avec l'origine des contraintes.

✓ **Tension à basses fréquences** Elles sont divisées en deux sous-classes :

- la tension permanente à fréquence industrielle est la tension du réseau qui contraint de façon continue les équipements pendant toute leur exploitation ;
- les surtensions temporaires sont des surtensions à la fréquence industrielle ou à une fréquence harmonique ou sous-harmonique, pas ou faiblement amorties, et dont la durée est supérieure à une période de la fréquence industrielle.

✓ Surtension transitoire

Ce sont des surtensions de courte durée (quelques millisecondes ou moins), oscillantes ou non et généralement fortement amorties; elles peuvent être superposées ou non à des surtensions temporaires. Elles se répartissent elles-mêmes en trois types :

- les surtensions à front lent (surtensions de manœuvres). ayant un temps de crête compris entre 20 et 5 000 μ s et une durée totale jusqu'à la mi-amplitude de moins de 20 ms ;
- les surtensions à front rapide (surtensions de foudre). ayant un temps de front compris entre 0,1 et 20 μ s, et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 300 μ s;
- les surtensions à front très rapide, ayant un temps de front inférieur à 0,1 μ s, et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 3 ms.

classe de surtension	basse fréquence		transitoire		
	permanente	temporaire	à front lent	à front rapide	à front très rapide
forme					
gamme des formes (fréquence, front de montée, durée)	f = 50 ou 60 Hz $T_t \geq 3\ 600$ s	$10 < f < 500$ Hz $3\ 600 \geq T_t \geq 0,03$ s	$5000 > T_p > 20$ μ s $20\text{ ms} \geq T_2$	$20 > T_1 > 0,1$ μ s $300\ \mu\text{s} \geq T_2$	$100 > T_f > 3$ ns $0,3 > f_1 > 100$ MHz $30 > f_2 > 300$ kHz $3\text{ ms} \geq T_t$
forme normalisée	f = 50 ou 60 Hz T_t (*)	$48 \leq f \leq 62$ Hz $T_t = 60$ s	$T_p = 250$ μ s $T_2 = 2\ 500$ μ s	$T_1 = 1,2$ μ s $T_2 = 50$ μ s	(*)
essai de tenue normalisé	(*)	Essai à fréquence industrielle de courte durée	Essai de choc de manœuvre	Essai de choc de foudre	(*)

(*) à spécifier par le Comité de produit concerné

fig. 26 : formes de surtensions représentatives et essais envisagés par le projet de la norme CEI 71.

✓ Tensions continues

Ce sont des contraintes de tension qui apparaissent sur les capacités (parasites ou non) du réseau chaque fois qu'elles sont mises hors tension. Ces tensions résiduelles continues, dues aux charges capacitatives qui restent « piégées », ont cependant tendance à décroître plus ou moins rapidement avec le temps. Parmi les origines des surtensions sur lesquelles ces tensions continues jouent un rôle important, on peut citer:

- les surtensions au **réenclenchement** de lignes à **vide** ;
- les surtensions à **l'ouverture de charges capacitatives** ;
- les surtensions lors **des manœuvres des sectionneurs** de postes sous enveloppe métallique.

En coordination de l'isolement, il est très commode d'exprimer toutes les contraintes de tension en une unité appelée per unit (p.u). et définie par référence à la tension phase-terre la plus élevée du réseau, U_{mr} , sur lequel sont évaluées les surtensions

1.22 Tension permanente

Les contraintes diélectriques dont les durées sont les plus élevées sont celles qui résultent de la tension de service du réseau sur lequel le matériel considéré est utilisé.

Ces tensions semblent bien connues, mais il est, en fait, difficile de les définir avec précision. En effet, la tension peut varier dans le temps et suivent le point du réseau; elle est plus élevée près des sources de production qu'à proximité de la consommation. Pour cette raison, on a été amené à définir plusieurs tensions pour un même réseau de la façon suivante:

- la tension nominale d'un réseau triphasé (U_n) est la valeur efficace de la tension entre phases par laquelle le réseau est dénommé ;

- la tension de service (U) est la valeur efficace de la tension entre phases. Existe le plus souvent en un point d'un réseau en fonctionnement normal;

- la tension la plus élevée d'un réseau triphasé (U_{rm}) est la valeur efficace de la tension entre phases la plus élevée qui puisse apparaître en un point du réseau, dans les conditions d'exploitation normales. Cette valeur ne tient pas compte des variations temporaires de tension

- la tension la plus élevée pour le matériel (U_m) est la valeur efficace de la tension entre phases, la plus élevée pour laquelle un matériel est spécifié en ce qui concerne notamment son isolation.

Cette tension doit être au moins égale à la tension la plus élevée du réseau auquel le matériel est destiné.

1.23 Surtensions temporaires

1 Surtension temporaire due à un défaut phase-terre

Lorsqu'un défaut met à la terre l'une des phases d'un réseau triphasé. Les deux autres phases subissent, jusqu'à l'élimination du défaut, une variation de tension par rapport à la terre, qui est généralement une surélévation de tension.

2 Surtension temporaire due à l'élimination d'une ligne ouverte (effet Ferranti)

Lorsqu'une ligne, alimentée par une de ses extrémités, est ouverte à l'autre extrémité, il se produit un phénomène de résonance propre à la ligne ; ce phénomène se manifeste par une tension croissant vers l'extrémité ouverte. En effet, chaque phase d'une ligne est un élément de réseau à constantes réparties (inductance et capacité principalement). Qui peut être représenté très schématiquement à fréquence industrielle (pour le phénomène basse fréquence qui nous intéresse ici) comme une suite de cellules élémentaires, chaque cellule de longueur unité, comprenant une inductance série L et une capacité phase-terre C . Comme chaque cellule constitue un circuit résonnant (du deuxième ordre) dont le gain à fréquence industrielle est supérieur à 1, en bout de ligne la tension à fréquence industrielle est donc supérieure à celle appliquée à l'extrémité alimentée.

Les manœuvres de réseau qui engendrent les surtensions temporaires dues à l'effet Ferranti sont toutes celles qui conduisent une ligne à être ouverte à une extrémité alors que l'autre reste alimentée. On peut citer:

- **l'enclenchement** ou le **réenclenchement de ligne ouverte en extrémité**: c'est le cas à chaque enclenchement mais, en général on connecte une charge très rapidement après.

- **la perte de charge** : cette situation se rencontre en réseau lorsque, à la suite d'un défaut ou d'une manœuvre intempestive, le disjoncteur d'une des extrémités de la ligne ouvre en triphasé : une telle situation peut d'ailleurs entraîner elle-même des surtensions temporaires, se cumulant à l'effet Ferranti.

Il existe deux moyens pour réduire ces surtensions qui peuvent être gênantes sur les lignes très longues :

- **la réactance shunt**, qui consiste à placer aux extrémités de la ligne une réactance phase-terre permettant de diminuer la capacité apparente de la ligne.

- **la capacité série**, dont l'utilisation se justifie surtout pour des besoins de transit de courant, mais qui contribue aussi à réduire l'effet Ferranti en diminuant l'inductance apparente de la ligne.

3 Surtension due à l'alimentation d'une charge capacitive au travers d'une inductance élevée

C'est le cas, par exemple, d'une ligne aérienne ou d'un réseau de câbles alimenté par un ensemble de centrales de puissance limitée au encore l'enclenchement de transformateurs ayant une forte charge capacitive, comme une capacité shunt ; ce phénomène surtout sensible aux très hautes tensions,

4 Surtension due à un déclenchement brusque d'une charge

Dans ce cas, la chute de tension interne des alternateurs et de leurs transformateurs disparaît, et la tension fixée se rapproche de la force électromotrice interne des alternateurs.

5 Surtension due à l'enclenchement de transformateurs

Ces contraintes apparaissent lorsqu'il existe à la fois de fortes capacités localisées et des inductances non linéaires (circuit magnétique saturable de transformateurs ou d'autotransformateurs). Une résonance à fréquence harmonique ou sous-harmonique peut apparaître. On rencontre ce cas lors de l'enclenchement d'un transformateur à vide à travers un tronçon de câble d'une centaine de mètres de longueur.

1.3 Aspect statistique des amplitudes des surtensions en réseau. Surtensions représentatives

Pour une configuration de réseau donnée, les surtensions dues à la foudre aussi bien que les surtensions internes dues aux manœuvres de l'appareillage ont un caractère aléatoire, ce qui conduit à les caractériser de manière statistique. Pour connaître l'amplitude « maximale » des surtensions, il faut donc procéder à des études de surtensions de manière statistique en essayant de caractériser au préalable les lois de variations des paramètres d'influence. Ces études donnent infinie des fonctions de répartition d'amplitude : cependant les queues de ces distributions sont difficiles à évaluer avec précision vers les grandes amplitudes et donc les faibles probabilités. L'extrapolation de ces courbes vers la probabilité nulle donnant la surtension « maximale » possible n'est pas chose aisée.

Pour chaque catégorie de surtensions, les analyses doivent aboutir à une surtension « maximale » appelée surtension représentative U_{rp} , qui peut être caractérisée de trois façons différentes :

- soit par une valeur maximale présumée : $U_{r\text{pmax}}$
- soit par la loi de probabilité complète des valeurs de crête caractérisée par sa densité de probabilité
- soit par un ensemble de valeurs de crête.

2. TENUE DES MATERIELS AUX DIVERSES CONTRAINTES DIELECTRIQUES

Comme les tenues dans l'air conditionnent le dimensionnement externe des installations électriques, nous traiterons plus particulièrement de la tenue des isolations dans l'air et de celle des lignes de fuite le long des isolations externes. De même, pour les matériels isolés à l'hexafluorure de soufre (SF_6), nous donnons l'essentiel des propriétés diélectriques nécessaires à la coordination de l'isolement.

2.1 Notions de champ électrique disruptif, de claquage, de tenue d'une isolation

La matière est influencée par le champ électrique puisqu'elle est composée d'atomes, chacun d'eux constituée essentiellement d'un noyau et d'électrons. Pour devenir disruptif, le champ électrique doit au minimum atteindre l'intensité nécessaire pour arracher les électrons aux atomes et entretenir un effet d'avalanche. Mais ce n'est pas une condition suffisante. L'amorce de la décharge produite par l'avalanche au voisinage d'une électrode doit pouvoir se propager jusqu'à l'autre électrode. C'est un peu comme une avalanche de neige qui s'arrête lorsque la pente n'est plus assez forte. Ici, la pente du flan de montagne correspond à l'intensité du champ électrique. Si l'avalanche se propage jusqu'à l'autre électrode, il y a apparition d'une étincelle entre les électrodes et on dit qu'il y a rupture diélectrique, ou claquage, ou bien encore amorçage de l'isolation. La valeur du champ électrique disruptif n'est pas une valeur constante pour un même matériau. Elle dépend principalement de la forme d'onde de la tension appliquée, c'est-à-dire de la variation du champ électrique dans le temps.

2.1 1 Décharge dans les gaz

1 Initiateur nécessaire : un électron germe

Si l'on considère un diélectrique gazeux contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz, en l'absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de particules chargées produites soit par mécanismes naturels tels que rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par mécanismes artificiels, par exemple en bombardant la surface cathodique avec une source de rayonnement ultraviolet pour en extraire les électrons. Un tel électron libre peut constituer un électron germe initiateur d'une décharge dans le gaz.

2 Avalanche électronique

Un électron germe accéléré par le champ électrique appliqué, acquiert une énergie qui peut suffire à partir d'une certaine valeur du champ électrique, à ioniser par collision une particule neutre de gaz. Les nouveaux électrons créés vont participer à leur tour au mécanisme d'ionisation des molécules neutres, produisant ainsi une multiplication ou avalanche électronique.

3 Uniformité du champ électrique

La nature du champ électrique influe sur la propagation d'une décharge, donc sur la valeur du champ électrique disruptif.

Champ électrique uniforme, La différence entre la valeur du champ électrique correspondant au seuil de l'avalanche et celle du champ électrique disruptif est faible puisque les électrons sont accélérés uniformément tout le long de l'intervalle.

Champ électrique non uniforme

✓ Lorsqu'une pointe est portée à une tension de polarité négative (la cathode), on dit que le champ à proximité de celle-ci est divergent. Les électrons partent à proximité de la pointe négative et sont accélérés par le champ. Mais, comme le champ diminue en s'éloignant de la pointe, l'avalanche qui avait débuté près de la pointe peut s'éteindre en s'en éloignant. L'écart entre le champ permettant d'initialiser une avalanche et le champ disruptif est donc plus élevé.

✓ Lorsqu'une pointe est portée à une tension de polarité positive (L'anode), on dit que le champ à proximité de celle-ci est convergent. Les électrons partent de l'électrode négative et convergent vers la pointe de polarité positive.

4 Tenue diélectrique

La tenue diélectrique d'une isolation est **sa capacité à résister à une contrainte de tension sans rupture** diélectrique du milieu isolant. Cette notion de tenue a un caractère probabiliste. Une probabilité d'amorçage quasiment nulle correspond au niveau de tenue diélectrique d'une isolation. Dans le cas des isolations auto-régénératrices et, plus particulièrement, pour les grands intervalles d'air, le développement de la décharge se fait par bonds successifs. La décharge se développe au cours d'une durée de temps finie qui est proportionnelle à la longueur de l'étincelle.

Aspect probabiliste de la tenue diélectrique

Une caractéristique commune de la tenue diélectrique de toutes les isolations, autorégénératrices ou non, soumises à n'importe quelle contrainte de tension est la dispersion; c'est-à-dire que, même pour une forme d'onde de tension bien définie, **la tenue diélectrique doit être exprimée en termes probabiliste**. En effet, si l'on applique à une isolation autorégénératrice une série de contraintes de tension de même amplitude U_1 , puis une série de chocs d'amplitude U_2 , etc.. on observe, à partir d'une certaine valeur de U , une probabilité croissante d'amorçage. La loi de probabilité d'amorçage $P,(U)$ que l'on obtient peut être sensiblement assimilée à une fonction de répartition de Gauss-Laplace.

2.2 Tenue des isolations dans L'air et lignes de fuite des isolations externes

1 Tenue diélectrique aux surtensions à front lent : essai au choc de manœuvre

Pour les chocs de manœuvre normalisés (250/2 500 μ s), la tenue diélectrique :

- est plus faible en polarité positive qu'en polarité négative:

- est caractérisée, en polarité positive, par un écart type d'environ 5 % et en polarité négative par un écart type de l'ordre de 8 %;

Le type d'intervalle pour lequel la tenue diélectrique est la plus faible est la configuration géométrique points-plan.

2 Tenue diélectrique à fréquence industrielle

Sous tension à fréquence industrielle, les intervalles d'air qui ont la plus faible tension de tenue sont aussi les configurations pointe-plan. Pour des intervalles de longueur allant jusqu'à 3 m, Il faut encore noter la non-linéarité des tensions d'amorçage avec la distance. L'influence de la configuration de l'intervalle est généralement plus faible en fréquence industrielle qu'en choc de manœuvre, elle est assez faible pour les l'intervalle jusqu'à 1 m.

Propres et secs, les supports isolants des jeux de barres, les traversées de transformateurs et les isolateurs des chaînes d'isolateurs ont une tenue similaire à la distance directe dans l'air entre leurs deux électrodes extrêmes. Par contre, la pluie et plus encore, la pollution peuvent entraîner des réductions de la tenus diélectrique.

3 Influence de L'humidité, de la température et de la densité de l'air sur la tenue des intervalles d'air

Les tensions d'amorçage des intervalles d'air dépendent de la teneur en humidité, de la température et de la densité de l'air. Les caractéristiques diélectrique des isolations auto régénératrices dans l'air sont données pour les conditions atmosphériques dites *normales*, c'est-à-dire :- température ambiante : 20 °C - pression atmosphérique:1013 mbar (760 mm Hg) ;- humidité: 11 g d'eau par m³.

2.3 Tenue diélectrique des PSEM isolés au SF₆

Comme le SF₆, est un gaz électronégatif, il à la propriété de fixer les électrons libres pour former des ions négatifs stables. Comme la mobilité et le pouvoir ionisant de ces ions sont beaucoup moins élevés que ceux des électrons, ce phénomène d'attachement retarde considérablement l'apparition de la décharge, conférant à ce gaz des propriétés isolantes très intéressantes pour l'isolation des matériels à haute tension. Les constructeurs d'appareillage ont donc développé **les Postes Sous Enveloppe Métallique (PSEM)** dans les quels les jeux de barres et appareillage sont enfermés, sous pression, dans des enceintes étanches

2.4 Influence des impuretés chimiques du gaz

Influence de l'humidité : La vapeur d'eau influe sur la rigidité diélectrique d'un isolant à plusieurs points de vue :- la condensation sur les surfaces isolantes, en particulier lors des baisses de température, amène une diminution de la tension de contournement; - la décomposition du gaz, en présence d'un arc électrique, engendre des produits agressifs pour une large gamme de matériaux.

Influence du produit de décomposition : Les produits de décomposition gazeux n'exercent pas d'influence nuisible sur la rigidité diélectrique du système gazeux, mais donnent lieu à des réactions chimiques avec les matériaux isolants (comme les isolateurs supports) qui contiennent des composés à base de silicium.

Influence des particules : Suivant leur taille, les particules libres sur l'enveloppe réduisent plus ou moins la tenue diélectrique à fréquence industrielle.