



René Wierda

Diplômé en 1989 ingénieur Génie Électrique et Conduite de Réseaux à l'université technique de Delft aux Pays-Bas (Technische Universiteit Delft, afdeling Elektrotechniek), il entre chez Merlin Gerin en 1989 dans le service Études de Réseaux (Direction des Recherches Générales).

Pendant plusieurs années il est spécialement chargé des études de réseaux d'alimentation de four à arc. Il conçoit, en collaboration avec le département de Réalisation et Ensemble de Schneider Electric, des dispositifs de filtrage HT pour plusieurs installations industrielles.

Dans ce cadre il a été amené à approfondir la connaissance des perturbations apportées par les processus industriels de grande puissance.

n° 176

**flicker ou
scintillement des
sources
lumineuses**

flicker ou scintillement des sources lumineuses

sommaire

1. définition du flicker		p. 4
2. les fluctuations de tension à l'origine du flicker	description des fluctuations de tension à l'origine du flicker	p. 5
	autres origines du flicker	p. 6
	les perturbateurs	p. 6
3. inconvénients du flicker, sensibilité des sources lumineuses		p. 7
4. définition théorique de la gêne, quantification et mesure du flicker	dose de flicker, définition de la gêne, mesure du flicker	p. 8
	la courbe de «Fonction de Probabilité Cumulée» -FPC-	p. 9
	les paramètres Pst et Plt	p. 10
	le flickermètre	p. 10
	le ΔV_{10}	p. 11
	autres grandeurs de mesure	p. 11
5. limites	niveaux de compatibilité de Pst, Plt	p. 12
	limites individuelles de Pst, Plt	p. 12
	limites de ΔV_{10}	p. 13
6. détermination du flicker dans une installation	méthode qualitative	p. 14
	méthode utilisant la «courbe référence Pst = 1»	p. 14
	méthode analytique	p. 14
	méthode pour les fours à arc	p. 14
7. remèdes	méthode pour les soudeuses	p. 15
	choix du mode d'éclairage	p. 16
	onduleur	p. 16
	modification du perturbateur	p. 16
	adjonction d'un volant d'inertie	p. 16
	convertisseur tournant	p. 16
	modification du réseau	p. 16
	la capacité-série	p. 16
	la réactance série	p. 16
	la réactance shunt saturée	p. 17
	la réactance de découplage	p. 17
	le compensateur synchrone	p. 17
	le convertisseur de phase	p. 18
le compensateur statique (SVC)	p. 18	
synthèse	p. 19	
8. conclusion		p. 19
annexe 1 : étude du flicker sur l'alimentation d'une soudeuse		p. 20
annexe 2 : étude du flicker sur l'alimentation d'un four		p. 22
annexe 3 : bibliographie		p. 24

Le flicker correspond à des variations lumineuses ; il résulte de faibles fluctuations de tension provoquées par le fonctionnement de charges variables importantes : fours à arc, soudeuses, moteurs...

Il provoque une fatigue physique et psychique pour les usagers de l'éclairage raccordés à proximité de la charge perturbatrice.

Ce Cahier Technique :

- présente ce phénomène particulier auquel se trouvent parfois confrontés les concepteurs ou exploitants de réseaux,

- définit les grandeurs qui permettent de le mesurer et les limites à ne pas dépasser,

- présente les solutions pratiquées, le plus souvent sur les réseaux HTA et HTB, pour réduire les fluctuations de tension et donc le flicker. En cela il complète le Cahier Technique n°169 «La conception des réseaux industriels en HT».

1. définition du flicker

Le flicker ou papillotement de lumière (de l'anglais : to flicker = scintiller, papilloter) est défini comme «impression subjective de fluctuation de la luminance» (cf. CEI 555-1). C'est un phénomène de gêne physiologique visuelle ressenti par les utilisateurs de lampes alimentées par une source commune à l'éclairage et à une charge perturbatrice.

La gêne correspondant au scintillement se manifeste sur les lampes BT. Par contre, les charges perturbatrices peuvent se trouver connectées à tout niveau de tension.

Les fluctuations brusques de la tension du réseau sont à l'origine de ce phénomène. Dans cette définition du flicker ne rentrent que les fluctuations :

- d'amplitude < 10 %,
- de période < 1 heure.

Le flicker résulte surtout des fluctuations rapides de faible amplitude de la tension d'alimentation provoquées :

1- soit par la variation fluctuante de puissance appelée par divers récepteurs : fours à arc, soudeuses, moteurs, etc,

2- soit par la mise sous et hors tension de charges importantes : démarrage moteurs, manœuvre de batteries de condensateurs en gradins, etc.

Surtout étudié pour les lampes à incandescence, le flicker est plus ou moins important selon le type de source lumineuse. Il peut avoir des causes autres que les variations de tension.

Depuis 50 ans le flicker a fait l'objet de nombreuses publications. C'est un phénomène maintenant bien défini (norme CEI 868), analysé, mesurable, pour lequel il existe des éléments de prévision et des remèdes.

2. les fluctuations de tension à l'origine du flicker

Dans tous les pays industriels, les distributeurs d'énergie, comme les exploitants d'installation électrique, doivent respecter des tolérances de variations d'amplitude et de fréquence sur leurs réseaux, sinon le bon fonctionnement des équipements n'est plus garanti. Ainsi, en France, la norme EN 50160 fixe cette tolérance :

- à $\pm 10\%$ cette tolérance pour les tensions nominales BT (Basse Tension : $U_n < 1000\text{ V}$),
- de $+6\%$ à -10% spécifiquement pour les tensions BT 230/400 V, entre 1996 et 2003, (harmonisation internationale),
- à $\pm 1\%$ de la fréquence nominale (50 Hz).

Mais différentes sortes de variations de tension existent telles les fluctuations (variations cycliques), les creux de tension, les coupures, les surtensions, ... (cf. fig. 1).

Le Cahier Technique n°141 en fait une présentation détaillée.

Dans les paragraphes suivants, sont présentés les deux principaux types de fluctuation de tension provoquant du flicker puis un rappel de la relation entre fluctuation de tension et puissance appelée.

Deux autres causes de flicker et les différents types de perturbateurs sont abordés à la fin de ce chapitre.

description des fluctuations de tension à l'origine du flicker

Les variations de tension périodiques et rapides

Ces variations périodiques ou erratiques permanentes ont une décomposition spectrale dans une bande de 0,5 Hz à 25 Hz. Elles sont dues à des charges (ou ensemble de charges) dont l'utilisation se caractérise par une variation permanente d'appel de puissance (ex : fours à arc, machines à souder, ...)

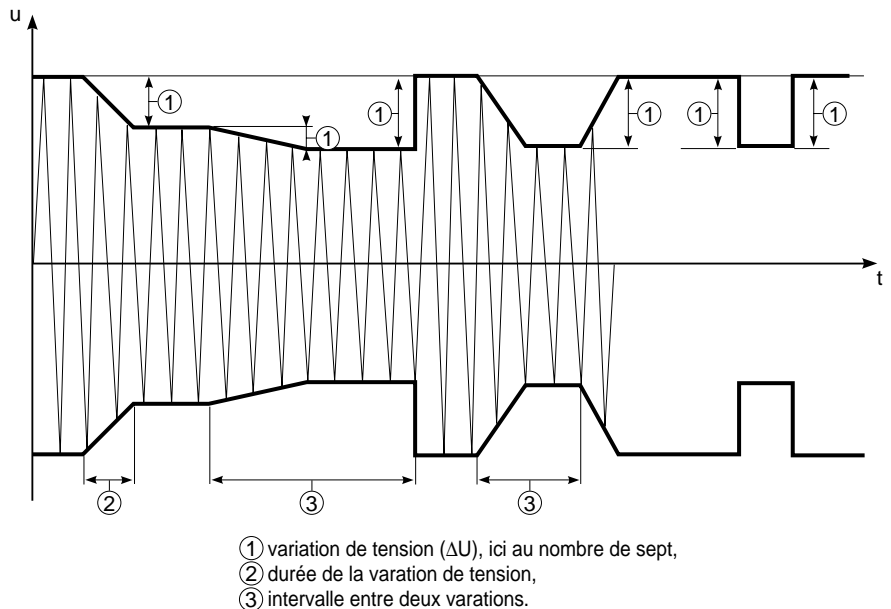


fig. 1 : définitions liées aux variations de tension (selon la CEI 555-3).

Les variations de tension par à-coups

Il s'agit ici des à-coups de tension se produisant de façon systématique ou erratique (intervalles entre à-coups supérieurs à quelques secondes).

Ces variations sont dues à des mises en service de charges importantes (ex : démarrage moteur, manœuvre de batterie de compensation, ...).

Explication mathématique de l'origine du flicker

Les sources de ces fluctuations sont les équipements électriques dont le fonctionnement nécessite d'importantes variations cycliques de courant qui, parcourant l'impédance du réseau (R, X), provoquent les variations de tension ΔU (cf. fig. 2).

On définit :

- U = tension nominale du réseau (de fonctionnement)
- E = tension à vide du réseau
- ΔU = chute de tension ($= E - U$)
- P = puissance active de la charge sous la tension nominale U

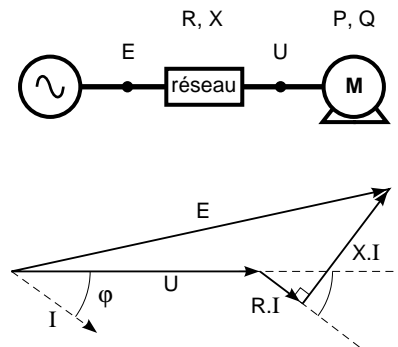


fig. 2 : les variations de tension à l'origine du flicker sont dues aux variations du courant I parcourant l'impédance du réseau (R, X).

- Q = puissance réactive de la charge sous la tension nominale U
- $\cos \varphi$ = facteur de puissance de la charge
- I = courant nominal de la charge
- S_{cc} = puissance de court circuit du réseau amont
- R = résistance totale du réseau amont
- X = réactance totale du réseau amont

Si on considère que l'angle entre E et U est faible :

$$\Delta U = E - U \approx R.I.\cos \varphi + X.I.\sin \varphi$$

On peut écrire :

$$P = U.I.\cos \varphi \quad \text{et} \quad Q = U.I.\sin \varphi$$

ce qui donne :

$$\Delta U = \frac{R.P + X.Q}{U}$$

et en valeur relative :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2}$$

Remarques :

1- en HT, la résistance R est négligeable vis à vis de l'impédance X, l'équation se transforme en :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X.Q}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

c'est la variation de la puissance réactive Q qui est prépondérante et doit donc être contrôlée ;

2- en BT, R n'est pas négligeable : il faut alors agir sur les puissances active et réactive, P et Q.

autres origines de flicker

Dysfonctionnement du système d'éclairage,

Une fluctuation du flux lumineux peut également être due à un mauvais fonctionnement du système d'éclairage. C'est la première hypothèse à vérifier en cas de problème !

Par exemple : Les lampes fluorescentes comportent un ballast.

■ les tubes avec ballast ferromagnétique traditionnel, outre le clignotement observé en fin de vie, peuvent générer du flicker lorsqu'ils sont associés à un gradateur. En effet, l'ionisation du gaz devient incertaine

lorsque la commande de phase ampute une partie de la sinusoïde.

■ les tubes avec ballast électronique sont généralement insensibles aux variations de leur tension d'alimentation. Il existe des ballasts pouvant utiliser des gradateurs à commande de phase, dans ce cas des papillotements ont pu être observés en présence d'harmoniques ou de courants porteurs (détection incertaine du passage à zéro de la tension).

Flicker provoqué par les infraharmoniques et les interharmoniques

Il a été démontré et constaté que dans certaines conditions, la présence d'interharmoniques dans la tension d'alimentation est aussi une source de flicker [1]. En particulier, les lampes à incandescence sont sensibles dans la bande de fréquence comprise entre 20 Hz et 80 Hz, alors que les fluorescentes le sont pour des fréquences supérieures à 100 Hz. Les lampes à ballast inductif semblent plus sensibles à ce phénomène que celles avec ballast capacitif.

les perturbateurs

Le four à arc

Le four à arc est le principal générateur de flicker. Les fluctuations de tension, que son fonctionnement normal fait naître, sont d'autant plus ressenties que la puissance des fours est élevée, en particulier par rapport à la puissance de court-circuit du réseau : elle se chiffre couramment en dizaines de MVA.

Machines à charges fluctuantes

Les moteurs puissants, ou groupes de moteurs, à démarrages et arrêts fréquents, ou à charge variable, (tels ceux des laminoirs), ainsi que les machines à couple résistant alternatif (compresseurs), peuvent produire du flicker.

Régulateurs de puissance à thyristors

Pour échapper aux inconvénients de la «commande de phase» (harmoniques et parasites HF), les régulateurs à thyristors (parfois appelés gradateurs) fonctionnent en «commande synchrone» chaque fois que leur charge le permet.

Les thyristors à commande synchrone sont allumés pendant des périodes entières (régulation par train d'ondes entières), mais les temps de conduction sont très brefs, répétés à des fréquences de quelques Hz. Ils sont donc générateurs de flicker. Par exemple, pour éviter ce phénomène dans le domaine du chauffage électrique, les normes imposent aux constructeurs des systèmes de régulation tels que la puissance ne soit pas commutée plus d'une fois toutes les vingt secondes.

Les machines à souder

Les soudeuses à arc de puissance relativement faible sont peu gênantes (sauf utilisation intensive chez un abonné BT). Par contre les cycles répétitifs des soudeuses par résistance, à des fréquences comprises entre 0,1 et 1 Hz, sont à l'origine de perturbations sous la forme d'à-coups de tension.

3. inconvénients du flicker, sensibilité des sources lumineuses

Les fluctuations de tension n'ont généralement pas d'influence sur le bon fonctionnement des appareils connectés, la variation étant inférieure aux limites contractuelles de variation de tension d'alimentation (cf. chapitre précédent). Par contre, ces fluctuations peuvent, pour différents types d'éclairage, affecter le flux lumineux. Le tableau de la figure 3 regroupe les

principales caractéristiques des différentes sources lumineuses et leurs comportements selon la tension.

En résumé il est possible d'écrire que toutes les sources lumineuses sont sensibles aux variations de tension, et dans l'ordre décroissant de sensibilité :

■ les lampes à vapeur de mercure ou de sodium, mais elles éclairent des lieux où le papillotement est peu gênant

(espaces extérieurs, monuments, routes, etc.) ;

- les lampes à incandescence ;
- les lampes fluorescentes.

Les récepteurs de télévision ainsi que les écrans des systèmes informatiques ont une certaine sensibilité au flicker, elle est très variable suivant les appareils, aucune étude précise n'a été faite à ce sujet.

sources lumineuses	fluorescence	incandescence	vapeur de sodium à basse pression	vapeur de sodium à haute pression	vapeur de mercure à haute pression
type de lampes	rectiligne, circulaire, monoculot, compact miniature ou de substitution	standard, fantaisie halogène BT ou TBT		avec différents culots	ballon fluorescent, lumière mixte à iodures métalliques avec différents culots
puissance électrique (W)	de 4 à 65	de 5 à 2 000	de 18 à 180	de 35 à 1 000	de 35 à 3 500
efficacité lumineuse $lm.W^{-1}$	de 35 à 104	de 8 à 25	de 100 à 200	de 37 à 150	de 11 à 120
comportement à la mise sous tension	le plein flux lumineux est obtenu lors de l'amorçage. Un courant de préchauffage de quelques secondes peut atteindre 2 In	le plein flux lumineux est immédiat. La surintensité peut atteindre 14 In	un délai de 5 à 10 minutes est nécessaire après la mise sous tension, pour obtenir le plein flux lumineux. Il n'y a pas de surintensité notable.	un délai de 5 à 7 minutes est nécessaire après la mise sous tension, pour obtenir le plein flux lumineux. La surintensité peut atteindre 1,2 à 1,3 In.	un délai de 1 à 4 minutes est nécessaire après la mise sous tension, pour obtenir le plein flux lumineux. La surintensité peut atteindre 1,5 à 1,7 In.
comportement vis à vis des fluctuations de la tension d'alimentation	n'est perturbée que par des fluctuations 2 à 3 fois plus fortes (par rapport à l'incandescence) en raison de la rémanence lumineuse du dépôt fluorescent	particulièrement sensible aux faibles variations de tension répétées en raison de la faible constante thermique des filaments (10 à 200 ms).	très sensible, puisque son inertie thermique est celle du plasma de la décharge lumineuse.	idem à vapeur de sodium à basse pression	idem à vapeur de sodium à basse pression

fig. 3 : principales caractéristiques et comportement aux variations de tension des différentes sources lumineuses.

4. définition théorique de la gêne, quantification et mesure du flicker

La quantification et la mesure du phénomène du flicker se révèlent assez complexes, car ils font intervenir en même temps des facteurs techniques, physiologiques et psychologiques. Comment quantifier et mesurer la sensation de gêne éprouvée par l'homme ? Plusieurs études approfondies sur l'analyse et la quantification du flicker ont été menées dans divers pays [2].

Dans ce chapitre sont présentées dans l'ordre chronologique les différentes étapes qui ont permis au flicker d'être maintenant un phénomène bien défini, quantifié et mesurable :

- analyse expérimentale de la gêne éprouvée par l'homme subissant un flicker dû à des fluctuations de tension,
 - quantification du flicker et définition d'unités de mesure : flicker instantané, dose de flicker,
 - réalisation d'un appareil de mesure : le flickermètre,
 - élaboration d'une analyse statistique de mesure,
 - introduction de deux paramètres définissant la gêne du flicker Pst (court terme) et Plt (long terme).
- Ces grandeurs sont celles qui sont actuellement utilisées. Un autre paramètre d'analyse, le ΔV_{10} , est habituellement utilisé au Japon et dans certains autres pays.

dose de flicker, définition de la gêne, mesure du flicker

La « Dose de flicker », premier paramètre de quantification de flicker, utilisé en France, a été établie à partir d'expérimentations :

- la sensation de gêne est fonction du carré de l'amplitude de la fluctuation de la tension et de la durée de celle-ci.
- la sensibilité de l'observateur moyen aux fluctuations d'éclairement est maximale autour de 10 Hz (8,8 Hz).

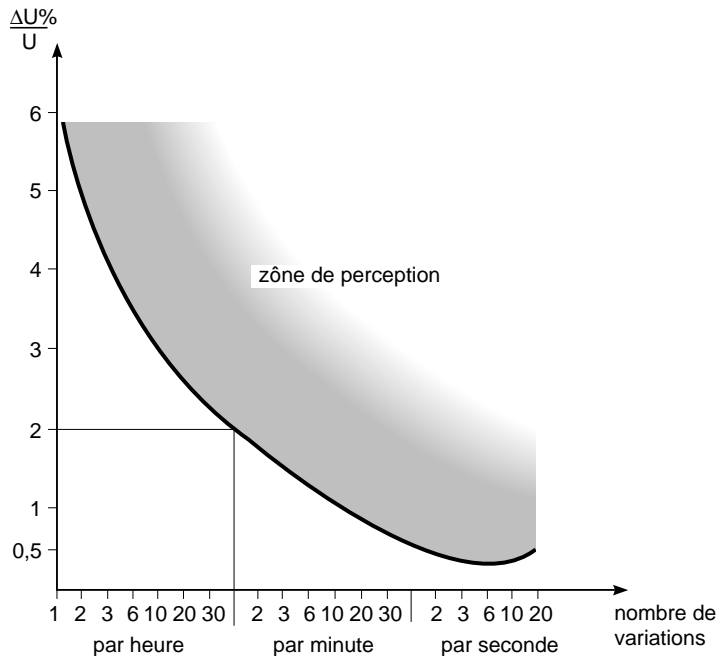


fig. 4 : seuil de sensibilité de l'œil aux variations d'éclairement des lampes à incandescence résultant des fluctuations de tension.

- le seuil minimal de perception pour cette fréquence 8,8 Hz (= 0,25 %) et le seuil minimal de gêne (= 0,5 %) (cf. fig. 4).

- deux principes ont été retenus :

- la gêne perçue pour une fluctuation de la tension à une fréquence f (autre que 8,8 Hz) avec une amplitude a_f , est égale à la gêne perçue pour une fluctuation de la tension à 8,8 Hz avec une amplitude équivalente $a_{8,8} = g_f \cdot a_f$. Le coefficient (g_f) ne dépend que de la fréquence de cette fluctuation de tension initiale ($g_f \leq 1$; $g_{8,8} = 1$). Toute fluctuation de tension peut donc être exprimée en fluctuation de tension équivalente à 8,8 Hz.
- une superposition de plusieurs fluctuations de tension à fréquences f_i et amplitudes a_i différentes, équivaut à une fluctuation d'amplitude $a_{8,8}$ équivalente à 8,8 Hz et donnée par :

$$a_{8,8}(t) = \sqrt{\sum_i a_{8,8i}^2(t)} = \sqrt{\sum_i a_i^2(t) \cdot g_{fi}^2}$$

Le paramètre $a_{8,8}(t)$ est une fonction du temps, il est appelée : **flicker instantané**.

- il a été observé que pour une fluctuation de tension, fréquence, amplitude et durée déterminées, la même sensation de gêne était éprouvée pour une fluctuation de tension de même fréquence, d'amplitude double, mais de durée quatre fois plus courte.

Ces résultats permettent de définir un paramètre de quantification de la gêne -G- perçue sur une période d'observation T donnée (normalement une minute) selon l'équation :

$$G = \int_{t_0}^{t_0+T} a_{8,8}(t)^2 \cdot dt$$

Il est appelé **Dose de flicker** et s'exprime en %².mn (pour cent carré minute).

La Dose de flicker donne une évaluation de la quantité de gêne pendant une durée donnée. Ce paramètre est très fluctuant pour une charge perturbatrice avec un cycle de fonctionnement plus long que la période d'intégration. Il exprime mal la gêne totale perçue. Dans le souci de pouvoir analyser aussi bien des fluctuations de tension périodiques que les à-coups de tension, une méthode d'analyse statistique a été développée.

Nota :

1- La définition de la Dose de flicker est basée sur les expérimentations effectuées avec une lampe à incandescence de 60 W, 50 Hz, 220 V.
 2- En France, l'utilisation de la Dose de flicker n'est plus d'actualité. D'autres grandeurs (Pst-Plt) sont maintenant employées pour exprimer la sévérité du flicker.

La sévérité était appréciée par comparaison entre la Dose de flicker mesurée et la courbe limite de Dose de flicker [2].

la courbe de «Fonction de Probabilité Cumulée» -FPC-

Cette courbe est établie à partir des valeurs de flicker instantané, soit $a_{8,8^2}(t)$, qui peut aussi être considéré comme la valeur «différentielle instantanée de la Dose de flicker». Le flicker instantané $a_{8,8^2}(t)$, fonction du temps, est échantillonné. Ces mesures échantillonnées sont groupées dans des classes selon leur valeur (cf. fig. 5).

Cela permet de tracer la fonction de densité de probabilité et la «Fonction de Probabilité Cumulée» -FPC- (cf. fig. 6). Dans l'exemple, pour simplifier le tracé, le nombre de classes a été limité à 10. Sur cette courbe, 5 valeurs sont lues : $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} et P_{50} . Elles expriment les niveaux de flicker instantané dépassés pendant respectivement 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 %, et 50 % de la période d'observation, qui est normalement 10 mn. Les valeurs P_1 à P_{50} sont des valeurs lissées (cf. CEI 868-0).

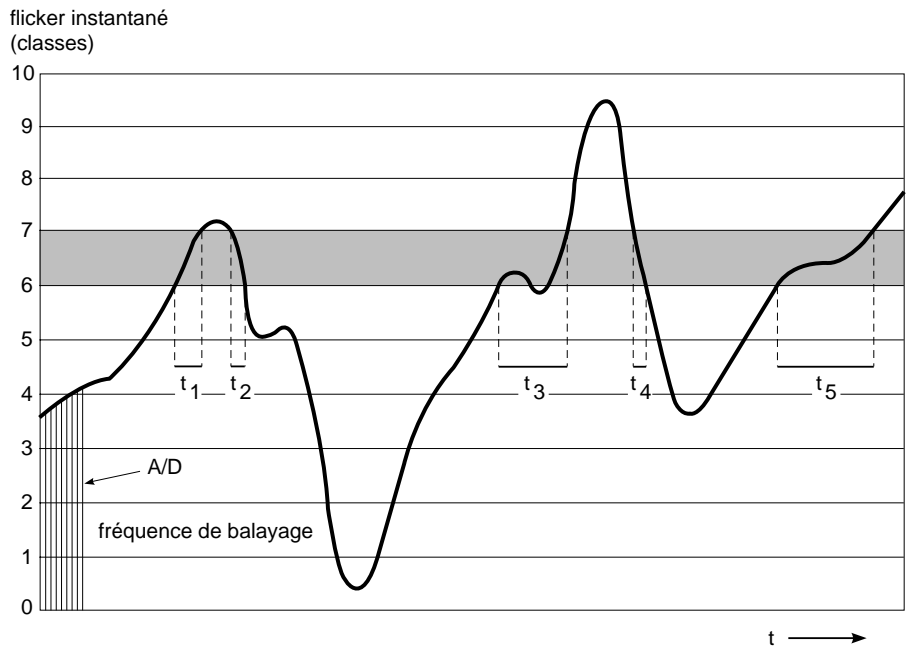


fig. 5 : représentation schématique d'un échantillonnage du flicker instantané montrant le niveau de flicker en fonction du temps pour un nombre de classes limité à dix (selon CEI 868).

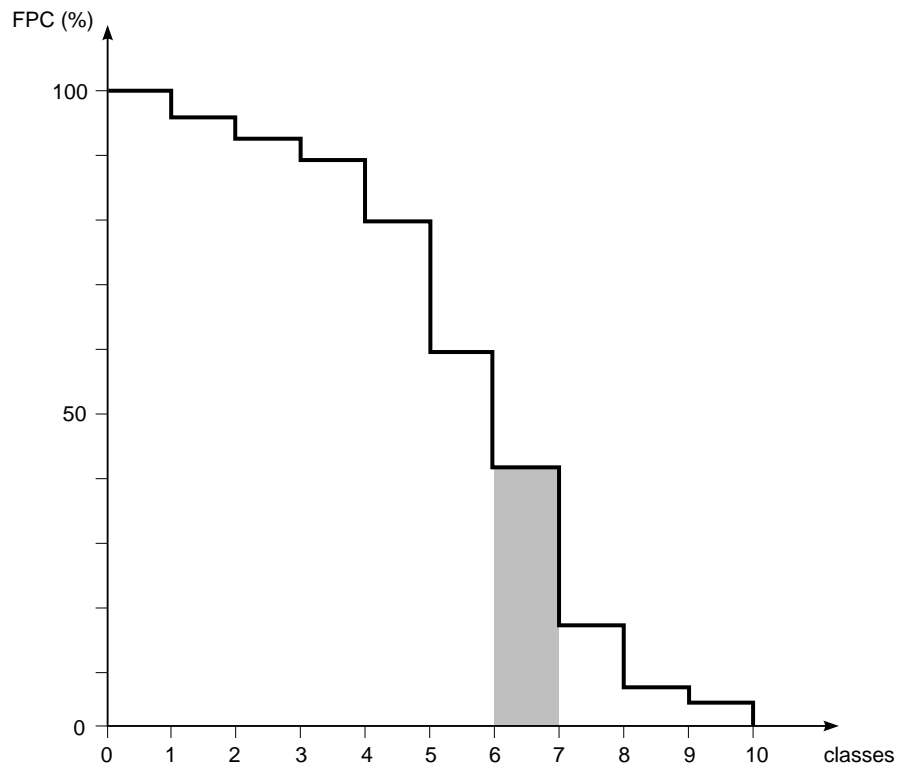


fig. 6 : courbe de la Fonction de Probabilité Cumulée de la présence du signal dans une des classes dont le nombre a été, ici, limité à dix (selon CEI 868).

les paramètres Pst et Plt

L'évaluation finale de la sévérité du flicker selon la CEI 868 s'exprime par deux paramètres : le Pst (short time) et le Plt (long time).

Pst et Plt sont les « unités de mesure » du flicker ; grandeurs sans dimension physique, ils sont ici dénommés « paramètres ».

Alors que le Pst est déterminé à partir d'un algorithme multipoints utilisant les 5 points $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} et P_{50} lus sur la FPC, le Plt est calculé à partir de plusieurs valeurs de Pst.

Ainsi, le Pst est calculé sur une période de 10 mn et le Plt à partir de 12 valeurs de Pst sur une période de 2 heures [5], [6], [7]. Ils tiennent compte des différentes formes de FPC.

Cette méthode de quantification du flicker a l'avantage d'être « universelle » : indépendante du type de fluctuation (périodique, à-coups, sinusoïdal ou autre forme, etc.) et donc indépendante du type de perturbateur.

Ces paramètres sont calculés et stockés pendant toute la durée des mesures.

Par exemple, pour un calcul du Pst sur 10 mn et de deux heures pour le Plt : après une période de mesures d'une journée, 144 valeurs de Plt sont disponibles.

Définition Pst :

Le Pst est défini par l'équation :

$$Pst = [K_{0,1} \cdot P_{0,1} + K_1 \cdot P_1 + K_3 \cdot P_3 + K_{10} \cdot P_{10} + K_{50} \cdot P_{50}]^{1/2}$$

avec :

P_n = niveaux sur la courbe FPC ayant une probabilité de n % d'être dépassée, K_n = coefficients de pondération donnés par la norme et qui permettent à la courbe limite de la CEI (cf. fig. 7) de correspondre à un Pst = constante = 1 (la courbe CEI a été établie expérimentalement bien avant la définition du Pst). Le Pst représente ainsi la courbe CEI.

La sévérité d'un flicker de courte durée Pst, définie par la norme CEI 868-0 est ainsi exprimée par l'équation :

$$Pst = [0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,08 \cdot P_{50}]^{1/2}$$

avec :

$P_{0,1}$ = niveau dépassé pendant seulement 0,1 % de la période d'observation, P_1 = niveau dépassé pendant seulement 1 %...

Définition Plt :

La sévérité d'un flicker de longue durée Plt est déduit du Pst par la formule :

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Pst_i^3}{N}}$$

où Pst_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) sont les valeurs consécutives de sévérité de Pst obtenues.

La Plt doit être déduite des valeurs Pst sur une durée appropriée liée au cycle de fonctionnement de la charge, ou sur une période pendant laquelle un observateur peut être sensible au flicker, par exemple quelques heures (normalement 2 heures).

L'ordre de grandeur de la **limite tolérable** est : $Plt = 0,74$.

Le paramètre Pst global, dû à différents pollueurs raccordés à un même réseau, et évalué en un point donné, est calculé selon la règle de sommation suivante :

$$Pst = \sqrt[m]{\sum_i (Pst_i^m)}$$

Habituellement $m = 3$, mais d'autres valeurs peuvent être utilisées.

le flickermètre

Les fluctuations de tension telles que décrites ci-dessus sont analysables avec un appareil de mesure : le flickermètre de l'UIE (Union Internationale d'Electrothermie). La norme CEI 868 décrit les spécifications fonctionnelles de cet appareil (cf. fig. 8) qui sont :

- adaptation de la tension d'entrée (bloc 1),
- simulation de la réponse lampe-oeil-cerveau ou calcul du flicker instantané (tension en sortie bloc 4)
- calcul de la Dose de flicker (sortie 4)
- optionnellement l'évaluation statistique du niveau de flicker ; calcul de FPC, Pst et Plt (bloc 5).

Un premier flickermètre numérique entièrement statique a été réalisé en 1971 par P. Duveau à l'EDF [8].

Les flickermètres actuels génèrent un grand nombre de paramètres différents de mesures ou d'analyse : valeur

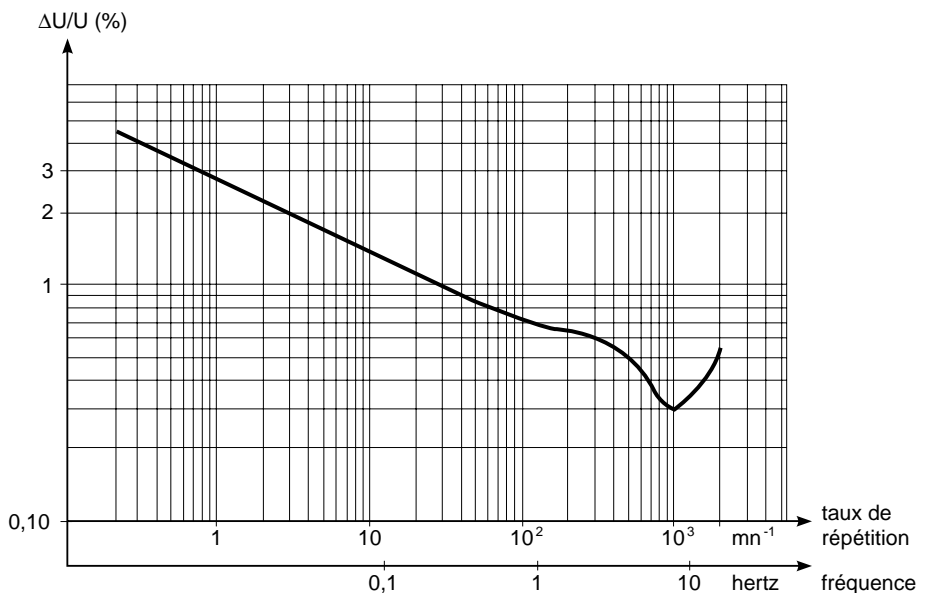


fig. 7 : courbe limite de gêne du flicker donnant l'amplitude des fluctuations de tension en fonction de leur fréquence de répétition pour une sévérité de flicker $Pst = 1$ (selon CEI 868). A noter que la fréquence correspond à deux fluctuations.

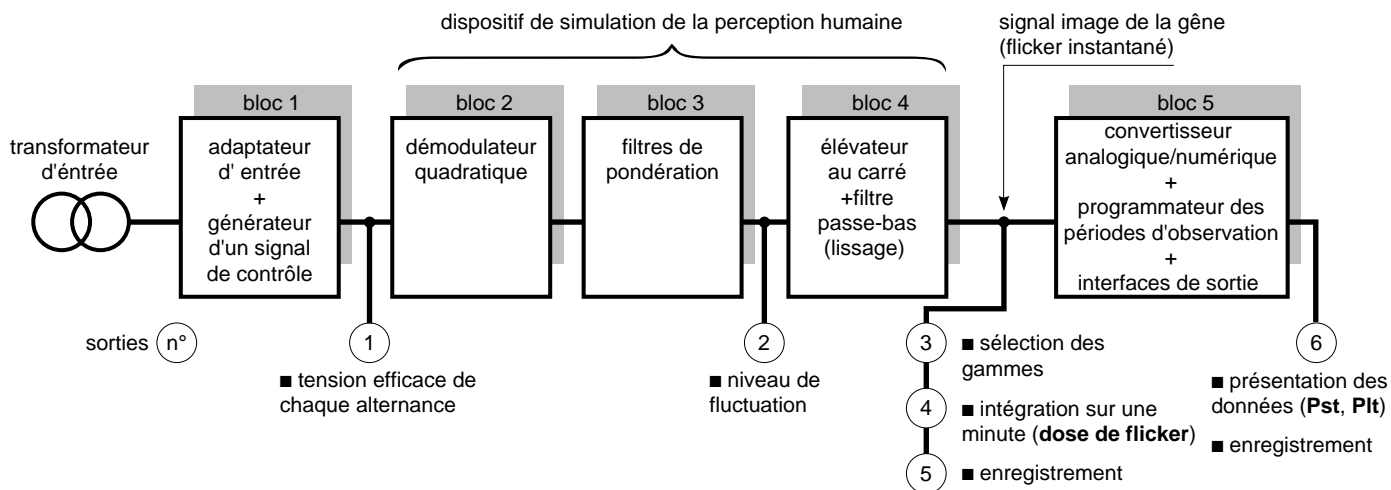


fig. 8 : diagramme fonctionnel du flickermètre UIE (selon CEI 868).

durée de mesure : une semaine		
période d'analyse : une journée		
caractéristiques disponibles après mesures avec un flickermètre :		
période	grandeur	expression symbolique
instantanée	flicker instantané	$a_{8,8}(t)$
toutes les minutes	Dose de flicker (en % ² .mn/mn)	$G = \int_{t_0}^{t_0+1} a_{8,8}(t)^2 \cdot dt$
tous les 10 minutes	paramètre court terme	Pst
toutes les 2 heures	paramètre long terme	Plt
chaque jour	valeur max journalière de Pst	Pst_{max}
	3ième grande valeur max. journalière de Pst	Pst_{3max}
	valeur max. journalière de Plt	Plt_{max}
	autres paramètres statistiques calculés	
fin de semaine	valeur maxi des 7 Plt_{max} journalières	
	$(Plt_{max} = \text{plus grande valeur de Plt mesurée})$	
	valeur maxi des 7 Pst_{3max} journalières	
	$(Pst_{3max} = \text{troisième plus grande valeur de Pst})$	
autres paramètres statistiques calculés		

fig. 9 : exemple d'analyse de flicker avec flickermètre.

efficace du signal, sensation de flicker instantané, dose de flicker par minutes, FPC, analyse statistique, calculs de valeurs Pst et Plt, etc (cf. fig. 9).

le ΔV_{10}

Le paramètre ΔV_{10} est basé sur l'utilisation des lampes à

incandescence alimentées en 110 V. Il est beaucoup utilisé dans les pays de l'Extrême Orient, notamment au Japon.

Le ΔV_{10} est la valeur de l'amplitude d'une fluctuation de tension équivalente à fréquence 10 Hz, qui produit la même sensation de gêne que la fluctuation réelle. Elle est exprimée en % de la tension nominale.

Pour une fluctuation de tension identique, le flicker produit par les lampes alimentées en 110 V est légèrement inférieur à celui produit par les lampes comparables alimentées en 220 V. En effet une lampe de même puissance a besoin d'un courant plus élevé, donc de filaments plus gros d'où une inertie thermique plus forte contre des variations [7] (voir l'exemple en annexe 2).

Le rapport : $\Delta V_{10} / Pst$ est environ 1/3. Ce rapport dépend fortement des types de perturbateur et des hypothèses de calcul. Pour le flicker dû à des fours à arc à courant continu ce rapport varie entre 1/3,3 et 1/4,4 [9].

autres grandeurs de mesure

Depuis une dizaine d'années la CEI a fait de grands efforts pour standardiser la mesure et l'évaluation du flicker résultant avec les paramètres Pst et Plt ; mais il existe d'autres paramètres de flicker que ceux mentionnés ci-dessus. Soit parce qu'ils sont issus de réglementations spécifiques (par exemple aux Etats-Unis), soit parce qu'ils ont été utilisés autrefois (par exemple le «FGH-meter» en Allemagne, ou le «Gauge point» en Grande Bretagne, ou la «Dose de flicker» en France).

5. limites

Chaque distributeur d'énergie électrique veille sur la qualité de l'électricité qu'il fournit. Comme pour chaque type de perturbation, il va exiger des limites à la perturbation apportée par chacun de ses clients afin d'assurer un bon fonctionnement de tout son réseau. Les textes 1000-3-3, 1000-3-5 de la CEI vont fixer les limites concernant le flicker ; la norme EN 50160 du CENELEC et la CEI 1000-2-2 fixent des limites de compatibilité.

niveaux de compatibilité de Pst, Plt

La qualité de l'électricité vis à vis du flicker s'exprime selon les deux grandeurs : Pst et Plt.

Un niveau de compatibilité, ou limite tolérable théorique, est donné pour chacun de ces paramètres et pour les trois niveaux de tension BT, HTA et HTB (cf. fig. 10) [11]. Ces valeurs expriment les niveaux à ne pas dépasser sur un réseau pour éviter un flicker gênant.

Remarques:

- 1- Ces valeurs ne sont pas les limites acceptables de flicker d'un seul perturbateur ou d'une seule usine.
- 2- Ces valeurs sont des niveaux de compatibilité théorique. Elles sont destinées à servir comme valeurs de référence en cas de gêne éprouvée et dans un but de planification, mais un

	limites acceptables de flicker		niveaux de compatibilité pour planification	
	BT	HTA	HTB	
Pst	1,00	1,00	0,79	
Plt	0,74	0,74	0,58	

fig. 10 : limites acceptables et niveaux de compatibilité théorique de Pst et Plt pour différents niveaux de tension... selon publication de l'UIE [11].

distributeur peut toujours imposer d'autres limites à ses clients. En BT, ces valeurs de **limites acceptables** ont une signification physique. Elles sont basées sur des sensations de gêne réelle : Pst = 1 correspond au seuil de gêne éprouvée par un observateur moyen. La limite pour la sévérité longue durée Plt est logiquement plus basse, pour prendre en compte l'effet cumulatif de la gêne. En HTA et HTB par contre, les valeurs **limites de compatibilité** n'ont pas de signification directe. Aucun éclairage n'est connecté à ces niveaux de tension et une sensation de gêne ne peut donc pas être éprouvée. Ces seuils doivent être compatibles avec ceux de la BT.

En théorie, il est considéré que le rapport de transmission du taux de flicker d'un niveau supérieur de tension vers un niveau inférieur est égal à 1. Tout flicker présent sur HTA ou HTB se retransmet au niveau BT.

En pratique, le flicker est souvent atténué par l'effet stabilisant de la tension dû aux moteurs et générateurs connectés à tous les niveaux de tension en aval du réseau HT considéré. Le facteur d'atténuation varie entre 0,5 et 0,8, selon la puissance des moteurs et des générateurs installés. Suite à cette atténuation de flicker un taux de Pst > 1 en HTA est parfois accepté (exemple rencontré : Pst = 1,25).

La norme européenne EN 50160 n'indique que des limites de Plt. Elle est moins sévère que le tableau ci-contre et impose aux distributeurs de fournir, sous conditions de fonctionnement normales de leur réseau (Un < 35 kV), une tension avec un Plt < 1 pendant 95 % de la semaine.

limites individuelles de Pst, Plt

Quand un industriel demande de connecter une charge perturbatrice sur le réseau, le distributeur veille au fait

que les seuils de compatibilité ne soient pas dépassés lorsque tous les perturbateurs raccordés au réseau sont en service. Pour cela le distributeur fixe, pour chaque installation perturbatrice connectée au réseau, des niveaux de fluctuation de tension correspondant à un flicker acceptable. Les caractéristiques alors prises en compte sont :

- la puissance du perturbateur,
- la puissance de court-circuit au point de raccordement,
- la présence d'autres perturbateurs,
- le nombre d'utilisateurs qui peuvent être gênés,
- un fonctionnement temporaire ou permanent de la source de fluctuations,
- l'évolution future du réseau.

Une pratique simple peut être d'accepter un niveau de gêne apporté par chaque perturbateur proportionnel à la puissance souscrite dans le contrat de livraison entre le distributeur et l'industriel. Pourtant, afin d'éviter des limites trop sévères aux petits utilisateurs, des niveaux d'émission individuels acceptables, pour tout niveau de tension, ont été définis (cf. fig. 11) [11].

Le distributeur prend alors soin que la sommation des perturbations apportées par chaque client, ne dépasse pas les seuils de compatibilité. Les seuils individuels doivent être respectés afin d'éviter des plaintes.

Pourtant il est souvent accepté que le seuil de Pst soit occasionnellement dépassé.

	niveaux individuels acceptables
Pst	0,35
Plt	0,25

fig. 11 : niveaux d'émission de flicker individuels acceptables, valables en HTB, HTA, BT.

Si des limites de Pst et Plt sont imposées, des contrôles sont nécessaires. Il faut alors définir une durée de mesures et si les valeurs limites peuvent occasionnellement être dépassées, en définir les critères. La méthode suivante de diagnostic approfondi est proposée par le CIGRE et le CIREC :

- durée des mesures : 1 semaine,
- valeur de Pst : calculée toutes les 10 mn,
- valeur de Plt : calculée toutes les 2 heures,
- la valeur critère pour Pst est la plus grande des 7 valeurs journalières du Pst_{3max} (Pst_{3max} = troisième plus grande valeur de Pst),
- la valeur critère pour Plt est la plus grande des 7 valeurs journalières

Plt_{max} (Plt_{max} = plus grande valeur de Plt mesurée).

limites de ΔV_{10}

La valeur efficace du ΔV_{10} , mesurée sur 1 minute est définie comme ΔV_{10s} (short time = court durée), avec les limites suivantes :

- seuil de perception :
 $\Delta V_{10s} = 0,32 \%$
- seuil de gêne :
 $\Delta V_{10s} = 0,45 \%$
(= 1 p.u. ΔV_{10})

La quatrième plus grande valeur de ΔV_{10s} est à comparer avec la limite court terme exigée.

La moyenne des résultats d'une heure est à comparer avec la limite long terme exigée [7].

6. détermination du flicker dans une installation

Avant d'installer un appareil générateur de fluctuations de tension sur un réseau, il faut connaître le taux de flicker qu'il apporte au réseau. Ce taux de flicker dépend à la fois des caractéristiques de l'appareil et de celles du réseau auquel il est connecté. La prédétermination du flicker se fait par une analyse théorique du réseau et du perturbateur, elle permet d'estimer le taux de flicker.

Ce chapitre présente quelques règles et méthodes pratiques pour évaluer le niveau de flicker émis par un appareil perturbateur. Pour le flicker l'analyse se fait au Point Commun de Couplage (PCC), ou point de l'installation commun au perturbateur et à l'éclairage. Pour les perturbateurs puissants, c'est souvent le point de connexion du réseau usine avec celui du distributeur.

méthode qualitative

La première et la plus simple prédétermination de flicker se fait en analysant le rapport entre la puissance de la charge perturbatrice et la puissance de court-circuit du réseau.

- en règle générale, le flicker ne provoque pas de gêne si la puissance apparente de l'ensemble des charges perturbatrices est inférieure à 1 % de la puissance de court-circuit du réseau au point commun de couplage.

- entre 1 et 2 %, il y a une zone d'incertitude où la gêne admissible dépend beaucoup du type de charge, du voisinage avec les réseaux d'éclairage, etc.

- au-dessus de 2 % des dispositions doivent être prises pour réduire le flicker au niveau admissible.

Dans la zone d'incertitude et au-dessus, il est nécessaire de connaître le taux de flicker de la charge à installer afin d'évaluer la nécessité de réduction du flicker. Plusieurs méthodes approchées ont été proposées, elles reposaient surtout sur l'extrapolation de mesures de flicker relevées sur des matériels semblables ou sur une méthode analytique qui

calcule le paramètre Pst d'une installation à partir des caractéristiques de la variation de tension.

méthode utilisant la «courbe référence Pst = 1»

Cette méthode est basée sur le principe que le niveau de flicker est proportionnel à l'amplitude de la variation de tension. La courbe limite de sévérité du flicker de la CEI 868 (cf. fig. 7) donne l'amplitude limite de la fluctuation de la tension en fonction de la fréquence de cette fluctuation. Cette courbe correspond donc à Pst = 1.

Exemple :

Un perturbateur crée un échelon de tension avec une amplitude de 0,9 % avec une fréquence de répétition de 10 fois par minute. L'échelon de tension maximal qui donne une gêne de flicker acceptable, lu sur la courbe de référence, est $\Delta U_{Lim} = 1,35\%$.

La fluctuation de $\Delta U = 0,9\%$ donne un niveau de flicker de :

$$Pst = 1 \times (0,9/1,35) = 0,67$$

Pour mieux comprendre la démarche pratique, un exemple est donné en annexe : installation d'une soudeuse.

méthode analytique

Cette méthode [11] peut être utilisée globalement pour des perturbations répétitives. Elle introduit surtout un coefficient dépendant de la forme de la variation de tension. Le Pst peut être estimé par la formule :

$$Pst = 0,365 \cdot \Delta \cdot F \cdot r^{0,31} \cdot R$$

avec :

Δ = variation relative de la tension en % (cf. fig. 1),

r = taux de répétition de la variation de tension (en mn^{-1})

R = coefficient dépendant du taux de répétition ($R \approx 1$ pour $r \leq 1000$ et chute brutalement pour $r > 1000$)

F = facteur d'équivalence, dépendant de la forme de la fluctuation de tension ($F \approx 1$ pour les fluctuations brusques : échelons, créneaux, et $0,9 < F < 1$ pour fluctuations douces : sinusoïdales, rampes...)

Exemple :

Avec les données de l'exemple précédent ($\Delta = 0,9\%$; $r = 10/mn$; $R \approx 1,05$; $F \approx 0,98$) :

$$Pst = 0,365 \times 0,9 \times 0,98 \times 10^{0,31} \times 1,05 = 0,69.$$

méthode pour les fours à arc

Deux méthodes d'estimation du flicker sont proposées :

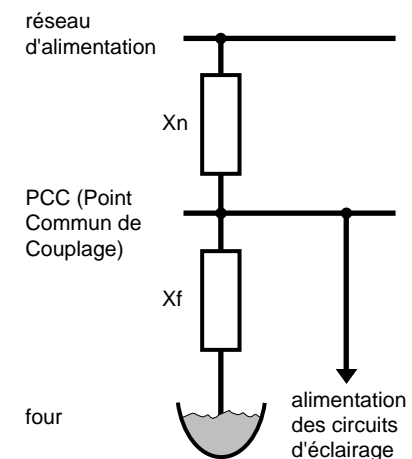
- la première est basée sur la «Dose de flicker» anciennement utilisée en France [3] [4] [12].

- la deuxième méthode calcule la valeur de Pst.

Dose de flicker :

La Dose de flicker créée par un four à arc à courant alternatif (schéma électrique équivalent donné par la figure 12) est donnée par l'équation :

$$G = k^2 \cdot \left(\frac{X_n}{X_n + X_f} \right)^2 \cdot t$$



X_n = réactance de court circuit amont du réseau d'alimentation,

X_f = ensemble des réactances de toute la liaison électrique du PCC au four (le transformateur abaisseur, les câbles de connexions HT, l'éventuelle réactance série, le transformateur du four et toutes les connexions BT du four).

fig. 12 : schéma électrique équivalent de l'alimentation électrique d'un four à arc.

avec :

X_n = la réactance de court-circuit amont du réseau d'alimentation, vue du Point Commun de Couplage (PCC),
 X_f = toute la réactance de court-circuit aval vue du PCC jusqu'au four en court-circuit, les électrodes du four étant immergées,

k = coefficient expérimental (déterminé à partir d'une cinquantaine d'installations : $k = 11,25$).

t = durée de l'observation ; par exemple 1 mn.

La limite maximale de la Dose de flicker estimée comme habituellement admissible est :

$G = 0,09$ (%)² mn/mn.

D'où la règle : le risque de perturbations gênantes dues à un four à arc à courant alternatif est estimé comme quasi nul

■ si la réactance de court-circuit du réseau X_n et la réactance de court-circuit du four X_f , sont dans un rapport tel que **$X_f / X_n > 36$** ,

■ ou si la puissance de court-circuit ($S_{cc} = U^2 / X$) du réseau (S_{ccn}) et la puissance de court circuit du four (S_{ccf}) sont dans un rapport tel que **$S_{ccn} / S_{ccf} > 36$** .

Rappel : En HT, les résistances sont négligeables vis à vis des réactances.

Méthode actuelle

Une estimation de la valeur de P_{st} , pour un four à arc à courant alternatif, peut être faite à l'aide de la formule expérimentale [6] :

$$P_{st} = K_{st} \cdot \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \cdot \frac{1}{R_{SVC}} \cdot C_{HT/BT}$$

avec :

K_{st} = coefficient expérimental (compris entre 48 et 85, d'une valeur moyenne = 60, et d'une valeur conseillée = 75) ;

S_{ccf} = puissance de court-circuit du four, électrodes dans le bain ;

S_{ccn} = puissance de court-circuit sur le réseau au niveau du PCC ;

R_{SVC} = facteur de réduction apportée par une installation de compensation statique ;

$C_{HT/BT}$ = coefficient d'atténuation pour la transmission du flicker de la HT vers la BT (entre 0,5 et 1).

Le niveau de flicker généré par un four à arc à courant continu est approximativement la moitié de celle émise par un four comparable à courant alternatif [6].

Une étude de détermination et de réduction du flicker est développée en annexe.

méthode pour les soudeuses

Soudeuse à résistance

Les caractéristiques des à-coups de tension produits par ces machines peuvent être calculées à partir de mesures ou de relevés perturbographiques. Les couples amplitude-fréquence ainsi obtenus sont à comparer à la courbe de référence approuvée par la CEI (cf. fig. 7) ou à traiter avec la méthode analytique exposée précédemment.

Le niveau de perturbation considéré comme acceptable est fixé à :
 $\Delta U \leq 5$ % pour une fréquence, $r \leq 8,7$ à-coups / heure (soit $r \leq 0,15$ / mn).

Les chutes de tension approximatives peuvent être calculées à l'aide des formules suivantes [12].

■ machines triphasées :

$$\Delta U / U_n = (S_{max} / U^2) \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$$

■ machines biphasées :

$$\Delta U / U_n = (S_{max} / U^2) \cdot [R \cdot \cos (\varphi \pm 30^\circ) + X \cdot \sin (\varphi \pm 30^\circ)]$$

■ machines monophasées :

$$\Delta U / U_n = (3 \cdot S_{max} / U^2) \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$$

avec :

ΔU = chute de tension au point de raccordement PCC,

U_n = tension nominale,

S_{max} = puissance maximale de soudage,

$R + jX$ = impédance du réseau au point de raccordement,

$\cos \varphi$ = facteur de puissance de la soudeuse.

Voir exemple traité en annexe.

Soudeuse à arc

Les à-coups de ces soudeuses, dont le fonctionnement est intermittent, ont une fréquence en général inférieure à 3 Hz. Aussi, pour ne pas craindre un effet de flicker, l'amplitude de ces à-coups ne doit pas dépasser 0,6 % de U_n sur le réseau commun aux soudeuses et aux luminaires.

7. remèdes

Différents remèdes sont envisageables. Ils sont présentés dans les paragraphes suivants en commençant par les plus faciles à mettre en œuvre.

choix du mode d'éclairage

Puisqu'il existe des sources lumineuses plus ou moins sensibles au flicker (cf. fig. 3), la solution évidente et la première à considérer est de bien les choisir.

Le tableau de la figure 3 indique que les lampes fluorescentes ont une sensibilité aux variations de tension deux à trois fois plus faible que les lampes à incandescence. Elles s'avèrent donc être le meilleur choix. De plus, la recherche des fabricants, pour améliorer l'efficacité lumineuse et réduire les dimensions de leurs produits, a abouti à la création des «ballasts électroniques», ou alimentations HF (> 20 kHz) des fluorescents (tubes ou lampes fluo-compactes) :

- efficacité améliorée de 10 %,
- réduction de consommation de l'ordre de 20 %.

Le comportement des sources lumineuses ainsi réalisées, vis à vis du phénomène de scintillement, est aussi amélioré ; mais il faut noter que :

- leur facteur de puissance est voisin de 0,5,
- les courants harmoniques qu'elles génèrent sont très importants ($H_3 = 30 \% H_1$),
- pour adapter le niveau d'éclairage elles doivent être associées à des gradateurs spéciaux.

onduleur

Dans le cas où la gêne due au flicker reste limitée à un groupe d'utilisateurs bien identifié, il est envisageable de «nettoyer» le départ éclairage par la mise en œuvre d'un régulateur de tension ou d'un onduleur.

L'investissement d'une telle installation peut être relativement faible, mais cette solution n'est qu'un remède local.

modification du perturbateur

Le flicker peut être atténué en modifiant le cycle de fonctionnement de la charge perturbatrice : rythme de soudure, rapidité de remplissage du four, ... Lorsque le démarrage direct et fréquent d'un moteur est cause de flicker, un mode de démarrage réduisant la surintensité peut être adopté.

adjonction d'un volant d'inertie

Dans certains cas particuliers, une charge tournante peut provoquer des fluctuations de tension (par exemple un compresseur volumétrique) ; un volant d'inertie sur son arbre-moteur les réduit.

convertisseur tournant

Un groupe moteur-générateur réservé à l'alimentation de la charge fluctuante est une solution valable si la puissance active de cette charge est relativement constante, mais son prix est élevé.

modification du réseau

Selon la structure du réseau, deux méthodes sont envisageables :

- soit éloigner voire isoler la charge perturbatrice des circuits d'éclairage,
- soit augmenter la puissance de court-circuit du réseau en diminuant son impédance (au Point de Couplage Commun, PCC)
Ces solutions sont à recommander chaque fois qu'elles sont applicables et de préférence à toutes les autres (simplicité d'exploitation). Pour cela différents schémas sont possibles :
- raccordement des circuits d'éclairage au plus près de la source d'alimentation (transformateur),
- augmentation de la puissance du transformateur commun (à U_{cc} constant),
- diminution de la tension de court-circuit ($U_{cc} \%$) du transformateur commun (à puissance constante),

- mise en parallèle de transformateurs supplémentaires,
- en BT, renforcement de la section des conducteurs,
- raccordement de la charge perturbatrice à un réseau de tension plus élevée,
- alimentation de la charge par un transformateur indépendant.

la capacité-série

L'introduction de capacité en série dans le réseau (cf. fig. 13a), en amont du PCC à la charge perturbatrice et aux circuits sensibles au flicker, peut réduire de moitié les fluctuations de tension. Cette solution présente un avantage supplémentaire, mais aussi un inconvénient :

- l'avantage : elle assure en plus, une production d'énergie réactive ;
- l'inconvénient : il faut protéger les condensateurs contre les courts-circuits avals.

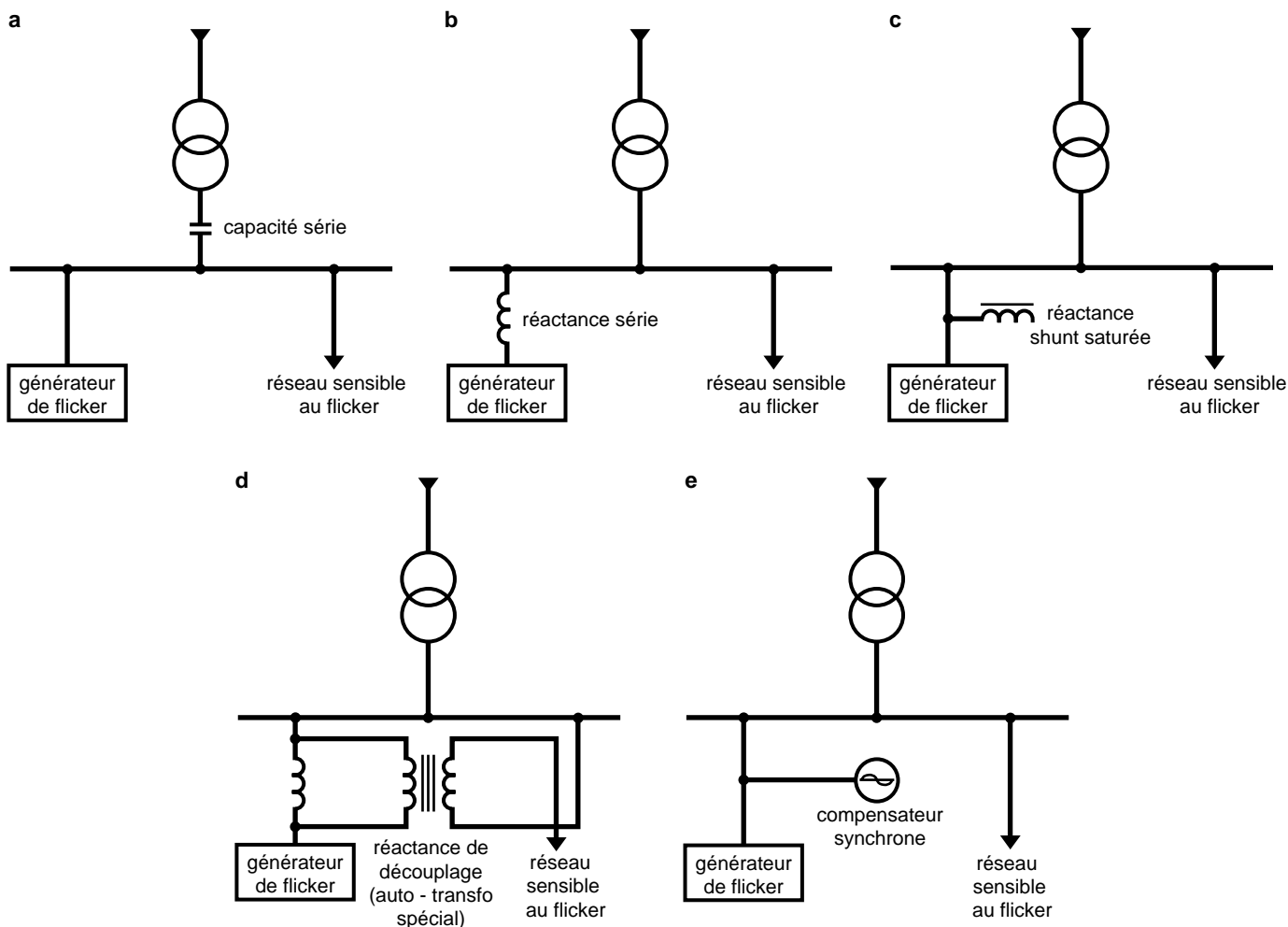
la réactance série

Utilisée en combinaison avec des fours à arc, cette solution peut réduire de 30% le taux de flicker.

La réactance est insérée en série avec l'alimentation HT du four en aval du PCC (cf. fig. 13b). Elle peut être incluse dans le transformateur du four. Elle comporte souvent un dispositif de réglage hors tension (prises boulonnées) et d'une possibilité de court-circuitage.

Son principal effet «positif» sur les variations de tension est qu'elle réduit la puissance de court-circuit appelée par le four. En plus, elle stabilise l'arc du four. Ainsi, les fluctuations de tension sont moins brusques («inertie électromagnétique») et le fonctionnement aléatoire (de l'arc) est réduit. L'influence de la réactance sur l'émission de flicker du four peut être estimée par la modification de la réactance X_f ou S_{ccf} (voir chapitre précédent).

Son inconvénient : la self est traversée par le courant de charge du four et consomme de l'énergie réactive.



a- capacité en série dans le réseau,
 b- réactance série,
 c- réactance shunt saturée,
 d- réactance de découplage,
 e- compensateur synchrone complété de réactances d'amortissement.
 fig. 13 : modifications d'installation permettant de réduire le flicker.

la réactance shunt saturée

Une telle réactance raccordée au plus près de la source de flicker (cf. fig.13c) peut réduire d'un facteur 10 les fluctuations supérieures à la tension nominale ; mais elle est inopérante pour les fluctuations inférieures parce que la self ne sature pas. Ces réactances présentent des inconvénients : elles consomment du courant réactif, elles produisent des harmoniques, et leur prix est plutôt élevé.

la réactance de découplage

Ce procédé est très efficace, puisqu'il peut réduire les fluctuations d'un facteur 10. Mais il exige une configuration appropriée du réseau : une impédance est insérée dans l'alimentation de la charge perturbatrice et dans le circuit d'éclairage en aval de son point de raccordement (cf. fig. 13d). La chute de tension aux bornes de ce «ballast» est inversée et ajoutée par un transformateur à la tension de l'artère à

ne pas perturber. Il s'agit en pratique d'un auto-transformateur spécial. Il n'y a pas d'atténuation du flicker en amont du dispositif.

le compensateur synchrone

Cette solution conduit à une réduction des fluctuations de 2 à 10 % et jusqu'à 30 % avec des systèmes modernes de contrôle électroniques. Le compensateur est parfois complété de réactances (linéaires)

d'amortissement installées sur l'alimentation (cf. fig. 13e).

Actuellement les compensateurs synchrones sont remplacés par des compensateurs statiques. Mais ils peuvent s'avérer encore intéressants s'ils sont déjà installés et peuvent être remis en service.

le convertisseur de phase

Les chutes de tension produites par des charges fluctuantes monophasées sont fortement réduites par des convertisseurs de phases, groupes tournants, transformateurs à couplages spéciaux ou pont de Steinmetz [3][4]. Ce dernier permet le rééquilibrage d'une charge résistive monophasée (cf. fig. 14).

Ainsi, une charge monophasée

$$S_m = P_m + jQ_m$$

peut être compensée par une charge $-jQ$ sur la même phase. Il en résulte une charge monophasée purement résistive P_m qui peut être compensée en ajoutant admittances selfique et capacitive sur les deux autres branches. Ce montage équivaut à une charge triphasée équilibrée purement résistive de $P_m / 3$.

Quand la charge monophasée S_m est fortement fluctuante, un dispositif d'électronique de puissance peut permettre une compensation dynamique, pratiquement en temps réel. Idem en triphasé déséquilibré. Dans ce cas, le Pont de Steinmetz devient un «compensateur statique»

le compensateur statique (SVC)

Cet équipement SVC -Static Var Compensator- est destiné à faire une compensation automatique de la puissance réactive (cf. fig. 15). Son emploi permet également une réduction du flicker de 25 % à 50 %.

Une formule donne une valeur estimative du coefficient de réduction du flicker réalisé avec un SVC [6]:

$$R_{SVC} \approx 1 + 0,75 \cdot \frac{S_{SVC}}{S_f}$$

avec :

R_{SVC} = facteur de réduction de P_{st} ,
 S_{SVC} = puissance du compensateur (en VAR),
 S_f = puissance du four (en VA).

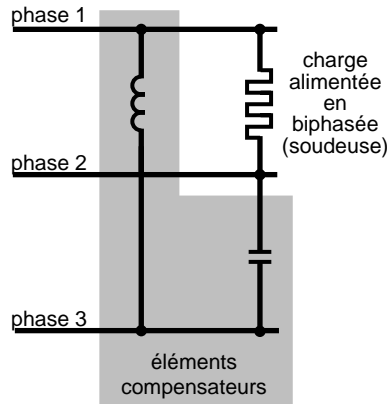


fig. 14 : montage en pont de Steinmetz pour la compensation d'une charge biphasée (schéma de principe).

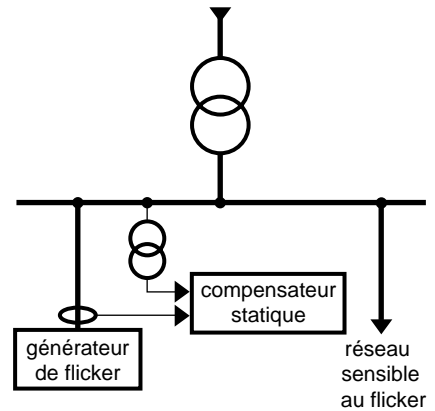


fig. 15 : schéma d'installation d'un compensateur statique.

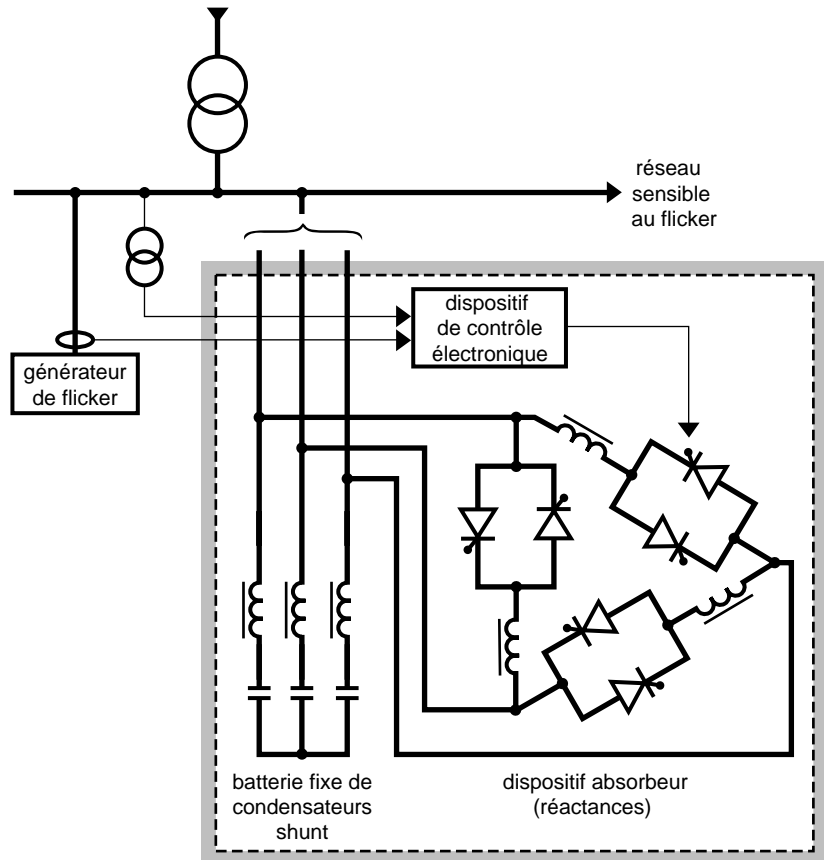


fig. 16 : schéma simplifié d'un compensateur statique

Son schéma de principe est celui de la figure 16. Il comporte des inductances de compensation, une batterie fixe de condensateurs shunt montée en filtre et un dispositif électronique à base de

thyristors ou d'IGBT. Le dispositif électronique a pour rôle de faire varier la consommation d'énergie réactive des inductances pour maintenir pratiquement constante la puissance

réactive absorbée par l'ensemble générateur de flicker, batterie fixe de condensateurs, et inductances de compensation.

Cette compensation phase par phase est d'un intérêt évident avec les fours à arc dont les régimes de fonctionnement sont particulièrement déséquilibrés.

Les performances d'un tel compensateur sont remarquables, à titre d'exemple le tableau de la figure 17 regroupe quelques caractéristiques exigées pour une aciérie polonaise (études et matériel Merlin Gerin).

synthèse

Le tableau de la figure 18 résume, en fonction du type de la charge à l'origine du flicker, les remèdes qu'il est possible d'apporter, et leur rentabilité.

tension nominale du réseau contrôlé	30 kV,
puissance du SVC	50 MVar,
facteur de puissance	$\cos \varphi \geq 0,93$
taux de distorsion en tension	THD $\leq 1,5 \%$
fluctuations de tension	$\Delta U / U_N \leq 2 \%$
déséquilibre de tension	$U / U_N \leq 1,5 \%$
Pst (en 30 kV)	1.1

fig. 17 : performances obtenues par l'utilisation d' un compensateur statique pour four à arc

remèdes	charges fluctuantes							
	démarrage moteur		moteur à charge fluctuante		four à arc		soudeuse	
modification du perturbateur	+	c	-	a	+	b	+	b
volant d'inertie	-		+	a	-		-	
convertisseur tournant	+	c	+	c	+	b	+	c
modification du réseau	+	b	+	b	+	a	+	b
capacité série	+	b	+	b	+	c	+	b
réactance série	-		-		+	a	-	
réactance shunt saturée	-		-		+	c	+	c
réactance de découplage	c	+	c	+	c	+	b	+
compensateur synchrone	+	c	+	c	+	a	+	b
convertisseur de phase	-		-		+	c	+	b
compensateur statique	+	b	+	b	+	a	+	b

- : techniquement inadapté + : techniquement possible
a : souvent économique b : parfois rentable c : rarement rentable

fig. 18 : les remèdes applicables pour réduire, voire supprimer, le flicker.

8. conclusion

Le flicker est le phénomène de papillotement des sources lumineuses, dû aux fluctuations de tension de l'alimentation électrique. Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en amenant une fatigue visuelle et nerveuse. Il peut concerner simultanément un grand nombre de personnes (perturbation du réseau de distribution publique HTA et HTB).

Aujourd'hui, les limites des fluctuations de tension périodiques qui provoquent l'effet flicker sont connues. Des normes

internationales définissent les grandeurs et les appareils qui permettent de le mesurer (le Pst et le Plt).

Les générateurs de flicker sont nombreux et peuvent être très puissants (fours à arc en aciérie)

Il est très important de les connaître, sachant que des variations de tension de moins de 1 % peuvent apporter un gêne. Leur identification est une nécessité car le flicker est souvent difficile à supprimer sur un réseau existant. Il est donc important

d'analyser les risques potentiels de flicker dès la préétude d'une installation et de prévoir, dès la conception du réseau, les solutions permettant de s'en affranchir.

Ces solutions peuvent être:

- modification du type d'éclairage,
- modification de la structure du réseau,
- adaptation du fonctionnement du perturbateur,
- installation d'un équipement de réduction de flicker.

annexe 1 : étude du flicker sur l'alimentation d'une soudeuse

le réseau

Cette étude est conduite pour une soudeuse (soudure par points) alimentée à partir d'un tableau BT situé au point B du réseau décrit dans la figure 19.

plan de l'étude

La première étape consiste à calculer les différentes impédances qui affectent le niveau des baisses de tension. La seconde est le calcul des chutes de tension et du nombre de soudures par minutes au delà duquel le flicker devient gênant. C'est à ce niveau de l'étude qu'il est possible de préciser le choix de la soudeuse : doit-elle être alimentée en monophasé ou en triphasé ? où connecter le réseau d'éclairage sachant que la soudeuse doit pouvoir effectuer jusqu'à 3 soudures par minute.

Trois configurations sont étudiées :

1 - La configuration prévue à l'origine,

2 - La même avec une puissance de soudeuse réduite à 100 kVA,

3 - La configuration de départ avec puissance du transfo augmentée à 1000 kVA avec un U_{cc} qui passe à 6% et des pertes cuivre P_{cu} à 1,3%.

calcul des impédances

Ces calculs se font selon les équations suivantes :

$$R_n \approx 0,1 X_n$$

$$X_t = \frac{U_{n2}^2}{S_t} \cdot \frac{U_{cc}}{100}$$

$$R_t = \frac{U_{n2}^2}{S_t} \cdot \frac{P_{cu}}{100}$$

$$R_c = 75 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$L_c = 0,1 \Omega/\text{m}$$

Les résultats sont réunis dans le tableau de la figure 20.

calcul des chutes de tension

Ces chutes de tension sont calculées pour les deux modes d'alimentation

envisagés pour la soudeuse, bi ou triphasé.

Ces calculs se font selon les équations suivantes :

■ pour une machine alimentée en triphasé :

$$\frac{\Delta V}{V_n} = 100 \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_n^2}$$

■ pour une machine alimentée en biphasé :

$$\frac{\Delta V_1}{V_n} (\%) =$$

$$100 \frac{\sqrt{3}}{2U_n^2} [R \cdot Q - X \cdot P + \sqrt{3} (R \cdot P + X \cdot Q)]$$

$$\frac{\Delta V_2}{V_n} (\%) =$$

$$100 \frac{\sqrt{3}}{2U_n^2} [X \cdot P - R \cdot Q + \sqrt{3} (R \cdot P + X \cdot Q)]$$

$$\frac{\Delta V_3}{V_n} (\%) = 0$$

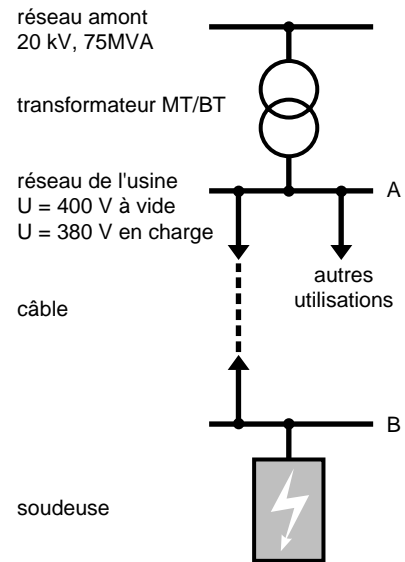


fig. 19 : réseau d'alimentation d'une soudeuse.

configuration		n°1	n°2	n°3
hypothèses				
réseau public	U _n	20 kV	20 kV	20 kV
	S _{cc}	S _{cc} = 75 MVA	S _{cc} = 75 MVA	S _{cc} = 75 MVA
transformateur	P	630 kVA	630 kVA	1000 kVA
	U _{cc}	4 %	4 %	6 %
	P _{cu}	1 %	1 %	1,3 %
câble	l	40 m	40 m	40 m
	S	240 mm ² , Cu	240 mm ² , Cu	240 mm ² , Cu
soudeuse	p	150 kVA	100 kVA	150 kVA
	cos φ	cos φ = 0,6	cos φ = 0,6	cos φ = 0,6
impédances				
réseau public	R _n	0,2 mΩ	0,2 mΩ	0,2 mΩ
	X _n	2,1 mΩ	2,1 mΩ	2,1 mΩ
transformateur	R _t	2,5 mΩ	2,5 mΩ	2,1 mΩ
	X _t	10,2 mΩ	10,2 mΩ	9,6 mΩ
câble	R _c	3 mΩ	3 mΩ	3 mΩ
	X _c	4 mΩ	4 mΩ	4 mΩ
au point A	R	2,7 mΩ	2,7 mΩ	2,3 mΩ
	X	12,29 mΩ	12,29 mΩ	11,7 mΩ
au point B	R	5,71 mΩ	5,71 mΩ	5,3 mΩ
	X	16,29 mΩ	16,29 mΩ	15,7 mΩ
Puissance soudeuse				
	P	90	60	90
	Q	120	80	120

fig. 20 : hypothèses, et résultats des calculs d'impédance.

Les résultats sont présentés dans le tableau de la figure 21, complétés des cadences de soudure déterminées à partir du diagramme de la figure 7.

Nota : une soudure provoque deux variations de tension.

conclusion

En biphasé

La soudeuse à sa puissance de 150 kVA peut être utilisée à une cadence maximale d'une soudure par minute, sans polluer les utilisateurs raccordés au point A.

L'importance des fluctuations constatées au point B montre qu'il n'est pas possible d'alimenter de l'éclairage à partir de ce point.

La cadence de la soudeuse peut être augmentée jusqu'à 3,5 coups/mn. La configuration 2 est donc acceptable, mais au prix d'une réduction de la puissance de la soudeuse.

Par contre l'étude de la configuration n°3 montre que l'installation d'un transformateur plus puissant ne

		machine biphasée			machine triphasée
		phase 1	phase 2	phase 3	
configuration n° 1					
Point A	dV	1,32 %	2,25 %	0,00 %	1,19 %
	Nb soudures/min.	6	1		8
Point B	dV	2,10 %	3,03 %	0,00 %	1,71 %
	Nb soudures/min.	1	< 1		2
configuration n° 2					
Point A	dV	0,88 %	1,50 %	0,00 %	0,79 %
	Nb soudures/min.	20	3,5		30
Point B	dV	1,40 %	2,02 %	0,00 %	1,14 %
	Nb soudures/min.	4	1,5		10
configuration n° 3					
Point A	dV	1,20 %	2,14 %	0,00 %	1,12 %
	Nb soudures/min.	7	1		10
Point B	dV	1,98 %	2,92 %	0,00 %	1,63 %
	Nb soudures/min.	1,5	< 1		3

fig. 21 : chutes de tension et cadences de soudure prévisibles.

diminue pas forcément beaucoup les variations de tension en aval.

En triphasé

La soudeuse peut avoir une cadence de soudures plus grande (de 1,5 à 3 fois plus) sans augmenter le niveau de perturbations sur le réseau.

Donc pour pouvoir effectuer jusqu'à 3 soudures/minute :

- en biphasé, seule la configuration 2 convient et à condition que le point commun de raccordement soit en A,
- en triphasé, la seule configuration qui pose problème est la 1 si le PCC est en B.

annexe 2 : étude du flicker sur l'alimentation d'un four à arc

caractéristiques du réseau d'alimentation du four 60 MVA

Le schéma du réseau d'alimentation électrique du four à arc objet de cette étude est présenté par la figure 22, et ses caractéristiques sont réunies dans le tableau de la figure 23.

calculs des niveaux de flicker (Pst et ΔV10)

La première étape de cette étude consiste à calculer les différentes réactances ramenées au même niveau de tension. Dans cet exemple c'est celle du PCC -Point de Couplage Commun- qui est choisie, soit 225 kV.

Cette étude a une double finalité : être un exemple, et comparer les résultats avec Pst et ΔV10.

D'où les deux approches :

- à partir de la puissance de court-circuit du four, calculer le Pst ;
- à partir de la variation maximale de la puissance réactive, calculer le ΔV10.

Calcul des différentes réactances pour une même tension

Nous ramenons d'abord toutes les réactances à une même tension. Comme tension de référence nous choisissons la tension au Point de Couplage Commun (PCC) :

- tension de référence
Uref = 225 kV
- réactance du réseau
Xn = 9,2 Ω
- réactance du transfo abaisseur
Xtra = 63,3 Ω
- résistance série
Xs = 0 Ω
- réactance du transfo four
Xtrf = 63,3 Ω
- réactance des connexions BT du four
Xbt = 270 Ω
- réactance totale
Xt = 405,8 Ω

valeur du cos (φ_f) du four

Le facteur de puissance du four est donné par le constructeur pour les différents points de fonctionnement de l'équipement ; la valeur du facteur de

puissance, retenue pour calculer le niveau de flicker, est :
cos φ_f = 0,75.

Détermination du Pst

Calcul de la puissance de court-circuit au niveau du four, dans cette installation :

$$S_{ccf} = \frac{U_{ref}^2}{X_t}$$

soit S_{ccf} = 125 MVA

Le niveau de flicker est donné par l'équation :

$$Pst = Kst \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}}$$

avec
Kst = 75 (valeur choisie),

S_{ccf} = 125 MVA
S_{ccn} = 5500 MVA
Pst = 1,7

Détermination du ΔV10

Le calcul de la variation maximale (ΔQ_{max}) de la puissance réactive se fait entre deux points de fonctionnement important du four.

- le premier point correspond au fonctionnement normal, avec le cos φ_f et une consommation de l'énergie réactive Q_n = S_f . sin φ_f
- le deuxième point correspond au four en court-circuit, avec une puissance réactive maximale, soit Q_{ccf} = S_{ccf}. (cf. fig. 24 ... pour le calcul de ΔQ)

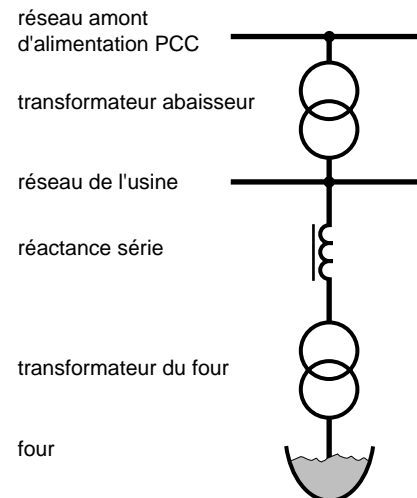
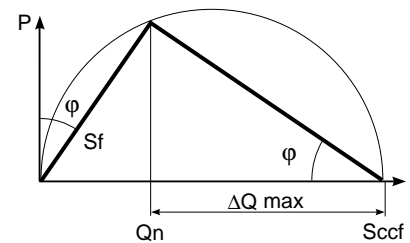


fig. 22 : réseau d'alimentation électrique du four à arc.



$$\begin{aligned} \Delta Q_{max} &= S_{ccf} - Q_n, \\ &= S_{ccf} - (\sin \varphi \cdot S_f), \\ &= S_{ccf} - (\sin \varphi \cdot \sin \varphi \cdot S_{ccf}), \\ &= S_{ccf} [1 - (\sin \varphi)^2], \\ &= S_{ccf} - (\cos \varphi)^2, \\ &= S_{ccf} - (\cos \varphi_f)^2, \\ &= 70,18 \text{ MVAr}. \end{aligned}$$

fig. 24

réseau amont	puissance de court-circuit	S _{ccn} = 5500 MVA
	tension nominale	U _n = 225 kV
transfo abaisseur	puissance nominale	S _{tra} = 80 MVA
	tension de court-circuit	u _{cca} = 10 %
réseau usine	tension nominale	U _{rés} = 30 kV
réactance série	impédance	X _{sér} = 0,0 Ω
transfo four	puissance nominale	S _{trf} = 60 MVA
	tension de court-circuit	u _{ccf} = 7,5 %
	tension nominale coté BT	U _{2f} = 750 V
four	impédance connexions BT	X _{BT} = 0,003 Ω
	puissance nominale	S _f = 60 MVA

fig. 23 : caractéristiques du réseau d'alimentation électrique du four à arc.

■ le niveau de ΔV_{10} est donné par l'équation:

$$\Delta V_{10} = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{\Delta Q_{\max}}{S_{\text{ccn}}} \cdot 100 \%$$

Ce qui donne pour notre installation au Pcc :

$$\Delta V_{10} = 0,35 \%$$

Commentaires

La valeur de Pst est largement au dessus du seuil de gêne (Pst = 1).

La valeur de ΔV_{10} est très proche du seuil de perception (0,32 %) mais encore loin du seuil de gêne (0,45 %).

L'exemple montre bien qu'une évaluation de flicker par la méthode du ΔV_{10} est moins sévère que par la méthode de Pst (cf. § le ΔV_{10}).

Ceci provient du fait que les lampes alimentées sous 110 V sont moins sensibles aux fluctuations de la tension que les lampes alimentées en 220 V, les limites de ΔV_{10} sont donc moins sévères.

dimensionnement d'un SVC «Static Var Compensator»

Cas d'une limite exprimée en Pst

Comme limite de Pst, nous choisissons le seuil de gêne soit :

$$P_{\text{st,ref}} = 1$$

Facteur de réduction de flicker R :

$$R_{\text{Pst}} = \frac{P_{\text{st}}}{P_{\text{st,ref}}} = 1,7$$

La puissance du SVC se calcule avec la formule :

$$Q_{\text{SVC}_{\text{Pst}}} = (R_{\text{Pst}} - 1) \cdot \frac{S_f}{0,75}$$

d'où :

$$Q_{\text{SVC}_{\text{Pst}}} = 56,1 \text{ MVAr}$$

Cas d'une limite exprimée en ΔV_{10}

Comme limite de ΔV_{10} , nous choisissons $\Delta V_{10} = 0,32$ qui correspond au seuil de gêne.

Valeur recherchée : $\Delta V_{10,\text{ref}} = 0,32$

Facteur de réduction de flicker R :

$$R_{\Delta V_{10}} = \frac{\Delta V_{10}}{\Delta V_{10,\text{ref}}}$$

$$R_{\Delta V_{10}} = 1,11$$

La puissance en SVC se calcule selon :

$$Q_{\text{SVC}} \cdot \Delta V_{10} = C \cdot S_{\text{ccf}}$$

C est un coefficient dépendant de $R_{\Delta V_{10}}$ et de la performance du constructeur et

prend une valeur entre 0 (pour $R_{\Delta V_{10}} = 0$) et environ 0,7 (pour $R_{\Delta V_{10}}$ grand). Ici une valeur de 0,35 est valable, ce qui donne :

$$Q_{\text{SVC}_{\Delta V_{10}}} = 0,35 \cdot S_{\text{ccf}},$$

soit :

$$Q_{\text{SVC}_{\Delta V_{10}}} = 43,8 \text{ MVAr}$$

Evaluation des taux de flicker dans la même installation, mais après ajout d'une self-série dans le circuit d'alimentation du four

Cette évaluation faite pour trois valeurs de $X_{\text{sér}}$ est présentée dans le tableau de la figure 25.

Elle montre bien l'effet positif d'une self-série sur le niveau de flicker généré par l'installation d'un four à arc.

Nous avons choisi plusieurs valeurs habituelles d'impédance série.

$X_{\text{sér}}$	Pst	$Q_{\text{SVC}_{\text{Pst}}}$
0,5 Ω	1,59	47 MVA
1,5 Ω	1,41	33 MVA
2,5 Ω	1,26	21 MVA

fig. 25 : évaluation des taux de flicker après ajout d'une self-série dans le circuit d'alimentation du four.

11. annexe 3 : bibliographie

Normes

CEI 555-1 : Perturbations produites par les équipements raccordés au réseau d'alimentation BT. Part 1 : Définitions.

CEI 555-3 : Perturbations produites par les équipements raccordés au réseau d'alimentation BT. Part 3 : Fluctuations de tension. 1982.

CEI 555-3 : Modification de la publication de 1982. 1990.

CEI 868-0 : Flickermètre partie 0 - Rapport technique ; Evaluation de la sévérité du flicker. 1991.

CEI 868 : Flickermètre - Spécifications fonctionnelles et de conception. 1986.

CEI 868 : Flickermètre - Spécifications fonctionnelles et de conception. Modification à la publication 868 de 1986. 1990.

Normes de compatibilité électromagnétique

CEI 1000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmissions de signaux sur les réseaux public d'alimentation à basse tension 1990.

CEI 1000-3-3 : Perturbation produite par les équipements raccordés au réseau public d'alimentation à basse tension- Limites concernant les fluctuations de tension et le flicker pour équipement consommant 16 ampères et moins par phase. Travaux en cours.

CEI 1000-3-5 : Limites concernant les fluctuations de tension et le flicker pour les appareils consommant plus de 16 ampères par phase. Travaux en cours.

CEI 1000-4-15 : Flickermètre. Travaux en cours.

EN 50160 : Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution. novembre 1994.

NF C 15-100 : Installations électriques à Basse Tension : règles - 1991

Publications diverses

[1] Flicker caused by interharmonics. W. MONBAUER, et Archiv Bd. 12 1990.

[2] Flicker et conditions de raccordement d'appareils produisant des variations rapides de tension. P. MEYNAUD, RGE 11/71.

[3] Condition de raccordement d'équipement générateurs de fluctuations rapide de tension (fours à arc, machine à souder) ; Bulletin DER d'EDF ; no 4 - 1982.

G. BONNARD ; G. DECHARTE

[4] Technique de l'ingénieur ; Fluctuation rapide de tension et flicker

[5] Cigré 36-203: Evaluation de la qualité de la tension point de vue harmonique, flicker et déséquilibre ; A. ROBERT ; J. MARQUET ; août 1992.

[6] Recent experience of connecting of big arc furnaces with reference to flicker level. CIGRE 36-305 ; A. ROBERT ; M. COUVREUR ; août-septembre 1994.

[7] Strategy for worldwide applicability of the UIE/IEC flickermeter ; M. Sakulin, H. Renner ; Institute of Electrical Power Systems, University of Technology Graz, Austria.

[8] Flickermètre numérique. P. DUVEAU, RGE 11/71.

[9] Investigation and analysis of voltage fluctuation in DC arc furnaces. N. SAITO ; I. KOBAYASHI .

[10] Arc furnace flicker assessment and prédiction. Evaluation et prédétermination de flicker pour des fours à arc. A. ROBERT ; M. COUVREUR.

[11] Connection of fluctuating loads. C. MIRRA ; IUE : International Union for Electroheat, WG disturbances, Tour Atlantique -Cedex 6 - 92080 Paris-la Défense. 1988.

[12] Guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines. Collection Electra, Ed. DOPEE 85, Diffusion Lavoisier.

Cahiers Techniques Merlin Gerin

■ Les perturbations électriques en BT. Cahier Technique n° 141- R. CALVAS

■ La conception des réseaux industriels en HT. Cahier Technique n° 169- G. THOMASSET