

Dans l'exemple choisi :

$$R_{th} = (\theta_M - \theta_a) / P \Rightarrow R_{th} = (130 - 60) / 10 = 70 / 10 \text{ soit finalement}$$

$$R_{th} = 7^\circ\text{C/W}$$

Exemple 2

Imaginons maintenant que le même contacteur soit placé dans un coffret. Dans ce nouveau cas, l'enveloppe du coffret forme écran et introduit une résistance thermique supplémentaire que nous supposerons de 2°C/W .

Réponse :

Reprenons la loi d'échange :

$$\Delta\theta = R_{th} \cdot P$$

Dans ce cas, la résistance thermique équivalente est égale à la somme des résistances thermiques du contacteur et du coffret soit : R_{th} est égal maintenant à :

$$R_{th} = \Sigma (R_{th}) = 7 + 2 = 9^\circ\text{C/W}$$

On obtient alors l'élévation de température occasionnée par la dissipation de puissance de la bobine :

$$\Delta\theta = 9 \times 10 = 90^\circ\text{C}$$

Si la température maximale de la bobine ne doit toujours pas dépasser 130°C , la température ambiante acceptable n'est plus que de :

$$\theta_a = 130 - 90 = 40^\circ\text{C}$$

9.1.3. Echauffement limite

9.1.3.1. Généralités

Il correspond à la température stabilisée maximale d'un appareil lors d'un fonctionnement continu.

Considérons un conducteur de résistance R , qui peut être une pièce conductrice d'un contacteur, parcourue par un courant constant I . Suivant la loi de Joule, la quantité d'énergie électrique transformée en chaleur dans ce conducteur s'exprime par la relation :

$$E_e = R \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{ll} E_e : & \text{énergie électrique en Joules.} \\ R : & \text{résistance du circuit en ohms} \\ I : & \text{intensité du courant en ampères} \\ \Delta t : & \text{temps écoulé en secondes} \end{array} \right.$$

Simultanément, par le processus de refroidissement que nous avons examiné précédemment, une quantité de chaleur est évacuée à travers la résistance thermique R_{th} existante entre le conducteur et le milieu ambiant. En conséquence, il en résulte une élévation $\Delta\theta$ de température de ce conducteur. La quantité de chaleur évacuée peut être calculée comme suit :

$$Q = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Quand l'échange est stabilisé, c'est-à-dire lorsque $\Delta\theta$ ne varie plus, la quantité de chaleur évacuée est égale à la quantité d'énergie électrique transformée en chaleur.

Dans ce cas, $Q = E_e$ et, si l'on remplace Q et E_e par leurs valeurs respectives dans les formules (1) et (2) on obtient la nouvelle relation :

$$\frac{\Delta\theta}{R_{th}} = R \cdot I^2 \quad (3)$$

9.1.3.2. Echauffement par un courant

Reprenons notre égalité (3) dans laquelle R et R_{th} sont des grandeurs supposées constantes. Elle permet d'exprimer $\Delta\theta$ en fonction de I , quand elle est transformée comme ci-dessous :

$$\Delta\theta = (R \cdot R_{th}) \cdot I^2 \quad (4)$$

On peut remarquer que la variation $\Delta\theta$ de la température varie comme le carré du courant.

Exemple :

Supposons une situation connue où un courant I_n de 10 A, parcourant notre conducteur, élève sa température de 30°C ($\Delta\theta_{In}$). Si le courant augmente et atteint 20 A soit $I_n \times 2$, l'élévation de température deviendra $\Delta\theta_{In} \times (2)^2$, c'est-à-dire $\Delta\theta_{In} \times 4$ soit 120°C. Inversement si le courant I était réduit de moitié, l'élévation de température ne serait plus que le quart soit :

$$\frac{\Delta\theta_{In}}{4} = 7,5^\circ\text{C}$$

Le produit $(R \cdot R_{th})$ ne nous est même plus utile, puisqu'il suffit de connaître l'élévation de température $\Delta\theta_{In}$ engendrée par un courant I_n traversant un conducteur pour déterminer l'élévation de température $\Delta\theta_I$ résultant de tout autre courant I .

En partant de la formule (4) cette relation s'écrit :

$$\frac{\Delta\theta_I}{\Delta\theta_{In}} = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

ou encore :

$$\Delta\theta_I = \Delta\theta_{In} \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

Les mesures effectuées en laboratoire permettent de constater que notre formule, établie au moyen d'un raisonnement logique mais simple, ne correspond pas exactement à la réalité pour des appareils comme les contacteurs. En effet la chaleur n'est pas uniformément répartie et la température de surface (celle considérée) ne représente pas la moyenne.

Nous la conserverons néanmoins car l'écart est faible et augmente la marge de sécurité.

9.1.3.3. Echauffement par une tension

Un élément chauffant de résistance électrique invariable "R" soumis à une tension, U est parcouru par un courant $I = U/R$. Il dissipe une puissance :

$$P = R \cdot I^2$$

ou encore

$$P = R \cdot \left(\frac{U}{R} \right)^2 = \frac{U^2}{R}$$

En régime stabilisé, l'évacuation de cette puissance à travers sa résistance d'échange thermique élèvera sa température de $\Delta\Theta = P \cdot R_{th}$

Soit

$$\Delta\Theta = U^2 \cdot \frac{R_{th}}{R} \quad (5)$$

Cette formule est semblable à celle établie pour donner la relation entre $\Delta\Theta$ et le courant (relation 4). Elle conduit également à la formule permettant de calculer l'élévation de température $\Delta\Theta_U$ connaissant :

- $\Delta\Theta_{Un} \Rightarrow$ l'élévation de température correspondant à la tension Un ,
- $Un \Rightarrow$ la tension de référence et
- $U \Rightarrow$ la tension réelle.

$$\Delta\Theta_U = \Delta\Theta_{Un} \cdot \left(\frac{U}{Un} \right)^2$$

Mais, dans la pratique, R augmente avec la température si on n'a pas recours à un alliage spécial comme le constantan. Ainsi, pour le cuivre, R augmentera de 0,4 % environ par degré C, ce qui signifie que la résistance à 30°C d'un conducteur en cuivre sera approximativement égale à 104 % de sa résistance à 20°C. Ainsi, dans la formule (5) l'augmentation de la résistance (R) restreindra celle de l'élévation de température alors que dans la formule (4) elle tendrait à l'accroître.

9.1.3.4. Echauffements autorisés

Pour les contacteurs et les appareillages connexes de fabrication moderne, les normes n'indiquent généralement pas de limite précise à l'élévation de température, ou échauffement, sauf pour les bornes et les bobinages, car l'isolant des câbles qui seront raccordés sur les bornes pourrait être détérioré et l'isolement des bobinages dénaturé.

L'échauffement des autres pièces conductrices ne doit occasionner aucun dommage aux pièces voisines.

Les échauffements sont mesurés à l'aide de méthodes parfaitement définies et dans les conditions d'emploi normales c'est-à-dire tous pôles traversés par le courant nominal, bobine sous tension nominale et appareil dans son coffret, s'il y a lieu.

Rappelons que la référence par rapport à laquelle est évalué l'échauffement est la température de l'air ambiant, prise assez loin pour ne pas être affectée par le dégagement de chaleur de l'appareil, et ceci, même pour apprécier l'échauffement de bornes situées dans un coffret.

Les limites d'échauffement autorisées sont :

- généralement de + 70°C pour les bornes.
- variables suivant la qualité de "l'isolation" pour les bobinages ; par exemple + 135°C avec un isolant de la "classe F", souvent retenue pour les bobines d'attraction des électro-aimants.

Cela signifie que les bornes et la bobine d'un contacteur respectant ces limites, atteindraient respectivement dans une ambiance de 20°C :

$70 + 20 = 90^{\circ}\text{C}$ pour les bornes et

$135 + 20 = 155^{\circ}\text{C}$ au cœur de la bobine.

En fait, ce sont bien ces dernières températures qui risquent d'affecter la "vie" de l'appareil, comme nous allons le voir plus loin. Mais alors pourquoi ne pas limiter que celles-ci ?

- Parce qu'un appareil peut être employé dans des conditions d'ambiance très diverses, entraînant autant de limites de courant d'emploi que l'utilisateur ne saurait lui même déterminer.
- Parce que dans une utilisation, la température ambiante peut varier et si les limites ci-dessus sont légèrement dépassées, la destruction n'est pas instantanée, mais il y a un vieillissement thermique.

9.1.3.5. Le vieillissement thermique

Sous l'effet de la chaleur, les pièces isolantes formant le corps des appareils qui supporte les parties actives, l'émail des fils, les produits d'enrobage ou d'imprégnation se dégradent lentement jusqu'à perdre leurs qualités isolantes et mécaniques. En deçà d'une température considérée comme limite normale, le délai est suffisamment long pour n'être jamais atteint durant la vie active des appareils. Au delà, ce délai est réduit d'autant plus rapidement que le dépassement est important. Cette réduction est aussi activée par les variations de température et d'autant plus qu'elles sont grandes.

Evidemment, chaque type d'isolant a sa limite normale ; par exemple, pour le P.V.C. qui isole les câbles d'utilisation courante, elle est un peu supérieure à 110°C.

L'accélération du vieillissement par les dépassements dépend aussi de l'isolant, mais seules les lois à dépassement constant sont bien connues. Malheureusement, ce cas est exceptionnel.

Généralement, l'importance et la durée des dépassements ne sont pas saisissables et il faut s'en tenir à l'expérience, au moins pour l'usage courant.

En outre, les isolants thermoplastiques ramollissent au-dessus d'une certaine température à ne pas dépasser.

Les règles établies de cette manière donnent satisfaction. Elles ont conduit à définir le domaine normal de température ambiante.

9.1.3.6. Le domaine normal de température ambiante

Dans les normes françaises et notamment celles des contacteurs NFC 63-110, il est défini comme suit :

- Température moyenne annuelle + 20°C.
- Moyenne journalière la plus élevée + 30°C.
- Limite supérieure + 40°C.
- Limite inférieure – 5°C.

Ces données correspondent bien à notre climat. Elles ont surtout l'avantage de définir une limite pour laquelle la probabilité et l'amplitude des dépassements deviennent négligeables.

En ajoutant à cette limite la valeur de l'échauffement maximal imposé, on obtient la température limite en fonctionnement.

Ainsi, pour une borne ($\Delta\theta < 70^{\circ}\text{C}$) la température moyenne annuelle sera au plus de : $70^{\circ} + 20^{\circ} = 90^{\circ}\text{C}$ et la température limite en fonctionnement de : $70^{\circ} + 40^{\circ} = 110^{\circ}\text{C}$, valeurs à comparer à celles pour laquelle l'isolant du câble risque de voir sa durée de vie réduite.

Nous voyons que, compte-tenu de nos observations, le problème des températures de service est parfaitement résolu avec les deux indications complémentaires suivantes :

- Limite supérieure de la température ambiante.
- Echauffement maximal autorisé.

En particulier, il devient possible de fixer le courant nominal thermique d'un appareil, dans des conditions d'exploitation précises.

9.1.3.7. Le courant nominal thermique

Aux termes des normes appliquées au matériel électromécanique, c'est le courant pratiquement permanent qui peut circuler dans les pôles d'un appareil sans que l'élévation de température excède la valeur limite imposée.

Les mesures se font toujours sur un appareil neuf, installé conformément à son usage normal, et dans la présentation où le constituant est utilisé. Ainsi par exemple, pour le contacteur, nous considérerons les deux cas suivants :

- Montage sur charpente et à l'air libre pour les forts calibres.
- Montage en coffret individuel, cas d'utilisation le plus fréquent pour les petits contacteurs.

Montage à l'air libre

Considérons d'abord un contacteur de petit calibre monté seul sur une charpente, c'est-à-dire "à l'air libre", dont tous les pôles sont parcourus par le courant d'emploi normal. Dans ces conditions, l'élévation de température de ses bornes sera d'environ 30°C. Notons qu'elle est généralement peu affectée par l'énergie dégagée par la bobine, laquelle s'évacue séparément. Cet échauffement de 30°C offre une marge de sécurité importante.

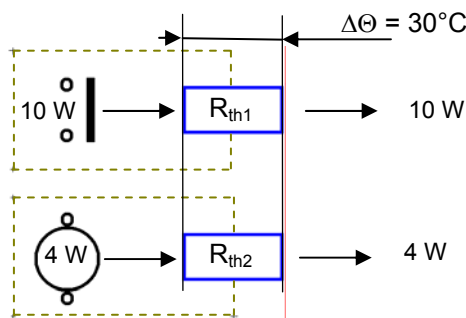


Fig. 9.1-9

Montage en coffret

Si maintenant ce même contacteur est associé à un relais thermique et présenté dans un coffret individuel, la mesure d'élévation de température se fera toujours entre les bornes situées à l'intérieur du coffret et l'air ambiant extérieur ; mais la résistance thermique R_{th} qui entraînait précédemment une élévation de 30° C est augmentée par la présence du coffret. De plus, cette résistance thermique additionnelle est traversée non seulement par la puissance calorifique dégagée par les pôles, mais également par celle fournie par la bobine et le relais thermique.

Il n'en reste pas moins que le coffret est caractérisé par une R_{th} propre. En outre, l'espace est trop restreint pour que chaque élément puisse y trouver un "périmètre thermique" suffisant. En d'autres termes les organes risquent de se chauffer mutuellement par échanges thermiques croisés et leur simple présence gêne les courants de convection de l'air.

Le résultat équivaut à une augmentation des résistances thermiques R_{th} individuelles.

En négligeant ces phénomènes, prenons un exemple qui pourrait convenir pour un contacteur de 50 A dont l'élévation de température $\Delta\Theta$ des bornes pour le courant thermique I_{th} à l'air libre est de 30° C.

- Puissance dégagée par le circuit principal $\Rightarrow 10 \text{ W}$
- Puissance dégagée par la bobine $\Rightarrow 4 \text{ W}$
- Puissance dégagée par le relais $\Rightarrow 9 \text{ W}$
- Résistance thermique du coffret $\Rightarrow 1,5^\circ / \text{W}$.

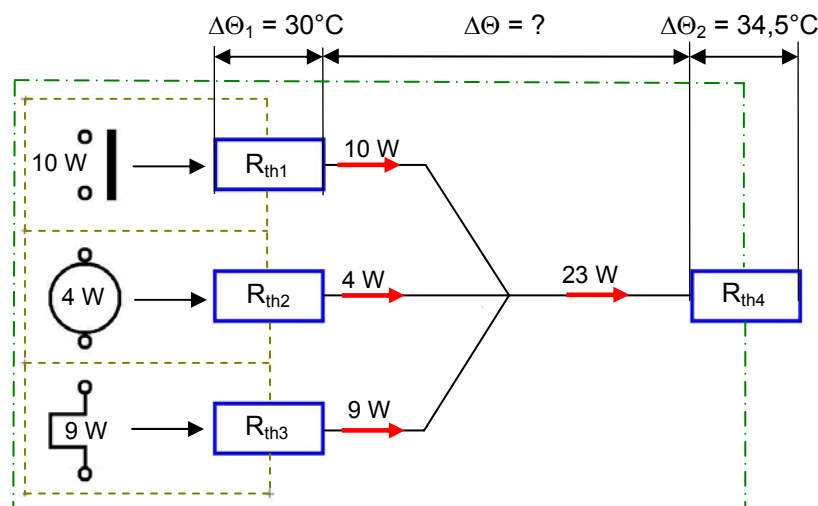


Fig. 9.1-10

A l'aide du schéma ci-dessus (Fig. 9.1-10), nous voyons que la puissance à évacuer a pour expression :

$$P = 10 + 4 + 9 \quad \text{soit} \quad \mathbf{P = 23 \text{ W}}$$

Cette puissance entraîne une élévation de température $\Delta\Theta_c$ du coffret suivante :

$$\Delta\Theta_c = 1,5 \times 23 \quad \text{soit} \quad \mathbf{\Delta\Theta_c = 34,5^\circ \text{C}}$$

Ceci conduit à une élévation de la température des bornes en coffret égale à :

$$\Delta\Theta_b = 30^\circ \text{C} (\Delta\Theta \text{ à l'air libre}) + 34,5^\circ (\Delta\Theta \text{ du coffret}) \quad \text{soit} \quad \mathbf{\Delta\Theta_b = 64,5^\circ \text{C}}.$$

Néanmoins, il faut se garder d'en déduire que l'ambiance dans le coffret est de 34,5° C au-dessus de la température ambiante.

Le calcul précédent est seulement représentatif d'une situation que l'on apprécie par des mesures directes et à partir desquelles on peut extrapoler en fonction d'autres mesures voisines.

Cet exemple nous permet de mieux comprendre pourquoi l'échauffement des bornes dépasserait la limite autorisée de 70°C si le courant excédait 50 A dans les pôles de notre discontacteur en coffret.

A l'inverse, les pôles de ce même contacteur à l'air libre, pourraient être traversés par plus de 50 A.

En effet, si pour 50 A les bornes subissent un échauffement de 30° C, la formule $\Delta\Theta_1 / \Delta\Theta_{In} = (I / I_n)^2$ permet de déterminer l'intensité I provoquant un échauffement de 70°C des bornes comme suit :

$$\frac{70}{30} = \left(\frac{I}{50} \right)^2 \quad \text{ou} \quad \frac{I}{50} = \sqrt{\frac{70}{30}}$$

c'est-à-dire

$$I = 50 \cdot \sqrt{\frac{70}{30}} = 50 \cdot \sqrt{2,33} = 76 \text{ A}$$

En pratique, une telle augmentation du courant serait dangereuse car la résistance des contacts augmente et devient instable et que certains éléments du contacteur (pôles, tresses, etc.) ne la supporteraient pas.

La marge de sécurité, constatée à l'air libre, est utile pour le montage en coffret, cas très fréquent pour les petits calibres. Elle permet d'attribuer à l'appareil un courant nominal thermique sans restrictions gênantes relatives à l'utilisation.

De leur côté, les contacteurs de fort calibre ont un courant nominal thermique défini à l'air libre et correspondant à un échauffement des bornes nettement supérieur.

En effet, ils sont souvent montés sur charpente (air libre) sinon dans des enveloppes de grand volume donc de résistance thermique R_{th} faible et avec un "périmètre thermique" raisonnable. C'est pourquoi leur courant nominal thermique reste valable dans ce cas.

9.1.3.8. Courant maximal d'emploi.

Le courant nominal thermique s'entend pour des emplois restant dans le domaine des températures ambiantes défini par les normes, mais il est différent selon que le contacteur est monté à l'air libre ou dans une enveloppe. Dans le second cas, il est également fonction du nombre et de la nature des autres constituants contenus à l'intérieur de l'enveloppe.

En théorie, une information technique complète devrait indiquer le courant nominal thermique :

- pour les différentes enveloppes à l'intérieur desquelles un contacteur peut être monté,
- pour les différentes associations d'appareils,
- pour les températures ambiantes inférieures, égales ou supérieures au domaine normalisé.

Cela conduirait à des documents touffus, inexploitable, et entraînerait des erreurs d'interprétation.

De plus, le critère thermique n'est pas toujours le seul à prendre en considération. Suivant l'utilisation, il peut être indispensable de retenir d'autres paramètres: pouvoir de coupure, endurance électrique ou mécanique etc ...

C'est pourquoi la norme IEC 947-4 définit plusieurs catégories d'emploi.

Ainsi par exemple, un contacteur qui commande un moteur à cage triphasé, défini par la catégorie d'emploi AC3 (voir tableau page suivante), coupe normalement le courant absorbé par ce moteur lorsqu'il est lancé. Mais ce contacteur peut être aussi amené occasionnellement à couper le courant de pointe de démarrage (catégorie AC4). La coupure est dite sévère.

La norme exige en conséquence que ce contacteur soit capable de couper 50 fois un courant égal à 8 fois le courant nominal du moteur. Cette contrainte restreint ainsi le courant d'emploi en catégorie AC3.

Pour d'autres utilisations telles que la commande de résistance (catégorie d'emploi AC1) où les pointes sont faibles où nulles, il n'y a pas les mêmes restrictions.

En effet, un contacteur peut admettre en catégorie AC1 un courant d'emploi aussi élevé que le courant thermique correspondant à sa température ambiante si les normes ne l'interdisent pas pour d'autres raisons. Ainsi, les courants d'emploi indiqués en catégorie AC1 pour différentes conditions de montage et d'ambiance, correspondent aussi aux courants thermiques sous les mêmes conditions.

En pratique, le courant d'emploi maximal en catégorie AC3 considéré comme valeur significative coïncide généralement avec celui du discontacteur en coffret en catégorie AC1.

Le tableau ci-dessous illustre ces différentes catégories d'emploi.

	Moteur à bagues $I_d = 2,5 I_n$	Moteur à cage $I_d = 6 I_n$
	AC'2	AC3
	AC2	AC4
	AC1	

Pour une catégorie d'emploi normalisée, le courant maximal d'emploi d'un appareil est une valeur limite tenant compte des divers paramètres (tension, fréquence, température ambiante etc.) et des conditions prescrites d'utilisation.

Nous reviendrons plus en détail sur les définitions des différentes catégories d'emploi des contacteurs au cours du chapitre 10 de cet ouvrage.