



Mai 2019

Les économies d'énergie dans le traitement par induction un enjeu industriel et environnemental (2^{ème} partie)

Bonjour à toutes et à tous,

Pour poursuivre notre 37^{ème} Newsletter concernant les économies d'énergie envisageables lorsque l'on pratique le chauffage par induction (choix du procédé et des matériaux, l'environnement inducteur), ce papier se propose de continuer dans sa lancée en abordant l'efficacité énergétique en induction par le biais du design des inducteurs, le choix des paramètres, du générateur et du circuit associé.

I. Design l'inducteur et choix des paramètres.

Les inducteurs sont réalisés à partir d'éléments en cuivre électrolytique, chimiquement pur à 99.90% (pureté a1), permettant d'attendre une conductivité de 100% IACS (résistivité $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$). L'utilisation de tubes en cuivre cintrés, soudés, usinés (Cf. figure 1) permet la circulation d'un liquide caloporteur. L'utilisation d'eau déminéralisée ou osmosée est donc nécessaire pour dissiper l'énergie réactive produite dans l'inducteur par effet joule (pouvant aller jusqu'à 60% de la puissance produite). Cette énergie est directement proportionnelle à la résistance propre de l'inducteur.



Figure 1 : Eléments permettant de concevoir un inducteur

Il existe différentes règles et astuces qui permettent d'optimiser le rendement des inducteurs :

Les règles : Elles s'appuient généralement sur la formule fournie pour E.D.F. qui décrit le rendement R d'un inducteur solénoïde :

$$R = 1 / [1 + (\pi/\rho)^{1/2} \cdot \mu r^{-1/2} \cdot F^{-1} \cdot (C_i / C_c) \cdot k^{-1} \cdot (L_i / L_c)]$$

Avec :

- π : résistivité du métal de l'inducteur (pour le cuivre $\pi = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$),
- ρ : résistivité de la pièce à chauffer,



- F : facteur de forme qui est lié au rapport D/p,
- D : diamètre de la pièce à chauffer,
- p : profondeur de pénétration des courants induits $p = f(\text{fréquence})$,
- Ci et Cc : périmètre respectif de l'inducteur et de la charge,
- Li et Lc : longueurs respectives de l'inducteur et de la charge,
- k : coefficient de remplissage des spires,
- μ_r : perméabilité relative de la charge.

On peut en déduire des règles de bon sens qui peuvent, bien entendu, s'appliquer à toutes les formes d'inducteur :

- Pour assurer une efficacité satisfaisante, il est nécessaire de travailler à une fréquence permettant de respecter la relation suivante $D / p > 4$, directement lié au facteur de forme F, encore appelé facteur de dissipation ou facteur de puissance (Cf. figure 2).

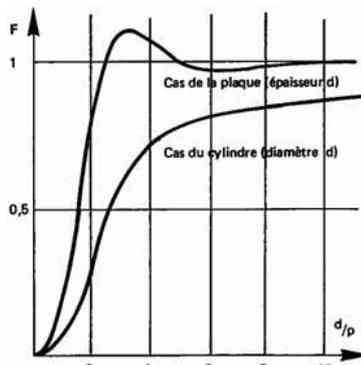


Figure 2 : Evolution du facteur de puissance active.

- Concernant l'énergie injectée dans la pièce, on peut ajouter à la fréquence, deux autres paramètres essentiels : la puissance délivrée par le générateur et le temps de chauffe. Nous rappelons que la puissance thermique entrant dans la pièce contribue à échauffer le volume de métal défini par la profondeur de pénétration des courants induits. La température, sensiblement uniforme dans ce volume, évolue en fonction du temps selon la loi : $T_s = 2 \cdot P_0 / S \cdot 1 / \lambda \cdot (\alpha t / \pi)^{1/2}$ avec α : diffusivité thermique en m^2/s et λ la conductivité. A partir de cette formule, on s'aperçoit qu'il est préférable d'un point de point efficacité énergétique de travailler en puissance qu'en temps de chauffe.
- La réduction de l'entrefer améliore le couplage magnétique. Le couplage inducteur/pièce doit être le plus petit possible afin que le terme C_i / C_c tend vers 1. En pratique, l'entrefer est limité pour des questions d'amorçage électrique et pour des problèmes de manutention.
- Les spires doivent être les plus jointives possibles afin de garder un coefficient de remplissage compris entre 0.6 et 0.8,
- On recherche également un inducteur à basse impédance : sa forme doit être simple et sa longueur optimisée,



Les astuces : Suivant les différents cas, il existe des astuces à mettre en place afin d'accroître le rendement de l'inducteur. Ces astuces portent à la fois sur :

- la forme de l'inducteur,
- l'utilisation de concentrateurs de champ,

A chaque fois que cela sera possible, on utilisera des inducteurs type spirale (Cf. figure 3) qui permet de gagner environ 25 à 30% en puissance par rapport à des inducteurs type « embrassants ».



Figure 3 : Exemple d'inducteur défilé à double spire.

On tendra à élaborer des inducteurs « spirale » contenant un maximum de spires : le passage d'un inducteur mono-spire à un double spire, pour un traitement au défilé, permet de gagner 10 à 15% en énergie et d'augmenter de 40% la vitesse de défilement. Il faudra tout de même s'assurer que la pièce est correctement refroidie vu le gain de productivité associé au chauffage. On s'aperçoit que le gain pour un triple spire le gain est encore plus important (Cf. tableau 1).

Tableau 1 : Bilan énergétique entre un simple spire et un triple spires.

| | Puissance générateur (kW) | Temps de chauffe (s) | Energie consommée (kW.s) | Température de surface (°C) | Fréquence (kHz) |
|--------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Simple spire | 69 | 2,2 | 151,8 | 1020 | 210 |
| Triple spire | 17 | 2,2 | 37,4 | 987 | 163 |

L'utilisation de concentrateurs de champ (ferrite frittée ou lamelles en ferro-silicium) permet en fonction du matériau d'optimiser localement l'intensité des courants induits créés :

- les ferrites permettent d'augmenter l'énergie transmise d'environ 10 à 15%. Leur efficacité semble être une constante dans le temps.
- les lamelles permettent une augmentation d'environ 30% de l'énergie transmise. En revanche, on leur attribue une perte d'efficacité dans le temps.

Dans les cas, où les zones à traiter se trouvent à l'extérieur de l'inducteur spirale, il est fortement conseillé de placer au cœur de la bobine des concentrateurs de champ type ferrite frittée afin de renforcer l'intensité magnétique du champ de fuite qui balayera les parties à traiter.



II. L'onduleur

La mise en place de sectionneurs sur le générateur et le système de pompage de l'installation de refroidissement permet, en cas de non production, de couper l'alimentation de l'installation complète.

Le remplacement de l'ensemble des générateurs à groupe tournants (pour ceux qui en ont encore...) par des onduleurs à thyristors ou transistors entraîne un gain énergétique d'environ 15 à 25% (Cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Classement des différents grandes familles de générateurs.

| Equipement | Rendement de conversion |
|--|-------------------------|
| Onduleur | 95 à 80% |
| Générateur aperiodique groupe tournant | ~70% |
| Générateur à tube | 55 à 60% |

Il faut également prendre en compte qu'un onduleur vieilli dans le temps, cela à pour conséquence deux choses : une perte de puissance comprise entre 10 et 20% et des difficultés croissantes à équilibrer l'onduleur avec le circuit RLC.

Pour information, l'onduleur peut être réglé en tension, en courant ou en puissance (Cf. figure 4). Certaines installations sont équipées d'une caméra thermique qui peut asservir le générateur pour travailler à la température désirée.

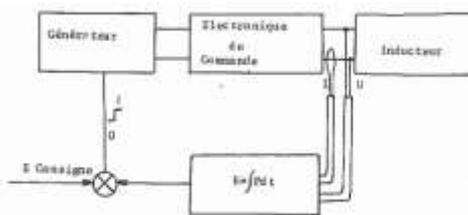


Figure 4 : Schéma de principe de la régulation.

III. Circuit RLC : adaptation de l'inductif par rapport au capacitif.

L'objectif est de travailler au plus proche de la fréquence de résonance ($\cos \varphi = 1$) du circuit R.L.C. (Cf. figure 5). En fonction des paramètres désirés, il faudra atteindre une certaine capacité pour un couplage transformateur donné. Ce réglage est obtenu en travaillant sur l'inductance du circuit total et sur le nombre de condensateur qu'il est possible de connecter au circuit. Cette partie de la machine s'appelle le coffret d'adaptation.

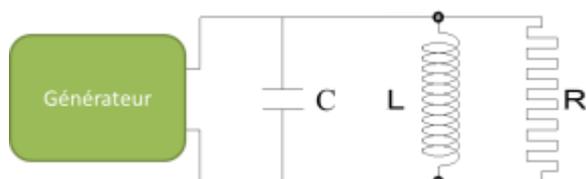


Figure 5 : Schéma de principe électrique.

Que l'on soit au primaire ou au secondaire du circuit, l'objectif est de limiter au maximum la longueur des liaisons électriques. Cette règle s'applique donc pour le câble coaxial (coax) et les câbles (Cf. figure 6) reliant la batterie de condensateurs au transformateur et pour la liaison conductrice comprise entre le transformateur et l'inducteur.



Figure 6 : Exemple de câbles refroidis à l'eau et câbles secs.

Au primaire : En ce qui concerne le coax, si l'on optimise l'installation on peut facilement le faire passer de 3.5 m à 1.2 m. De plus, il doit être suffisamment refroidi afin de limiter les échauffements excessifs. Il existe une autre solution, proposé par certains constructeurs, qui consiste à relier directement les condensateurs au transformateur. Pour cela, les deux éléments doivent être installés côte à côte. En revanche, si l'inducteur est en mouvement c'est tout l'installation qui va se déplacer, il faudra donc veiller à rigidifier tout l'ensemble de levage. Bien entendu, si le mouvement peut être orchestré par la pièce, cela solutionne l'ensemble du problème.

Au secondaire : Comme nous l'avons dit précédemment, le « best practice » d'un point de vue économique, reviendrait à fixer directement l'inducteur au transformateur. Dans de nombreux cas, il est nécessaire de mettre en place des plaques collectrices appelées semelles. Celles-ci doivent être suffisamment dimensionnées et refroidies afin de limiter des échauffements excessifs Elles peuvent également jouer le rôle de fusible en cas de mauvais contact entre l'inducteur et le transformateur.

IV. BILAN

On s'aperçoit que travailler sur le rendement d'une installation de chauffage par induction permet de réaliser des gains importants au niveau de la consommation électrique. Ce travail permet également :

- d'augmenter les cadences de production,
- de diminuer la « pollution calorifique » puisque l'énergie dissipée dans le circuit de refroidissement est moindre,



- d'augmenter la durée de vie des inducteurs qui sont moins sollicités ou de façon plus homogènes

Si l'on prend une usine moyenne dont la consommation totale avoisine les 40 GWh, il est très facile de réaliser une économie de 3 à 4 GWh rien qu'en se penchant sur les pertes de puissance et sur l'optimisation des rendements des inducteurs. Ce qui revient à réaliser une économie 170K€ par an et une réduction de 3000 tonnes d'émission de CO₂.

Le pourcentage de dioxyde de carbone rejeté dans l'air lors de la fabrication d'électricité au moyen de certaines installations, est un paramètre d'actualité qui prend toute son importance depuis plusieurs années. Les gains de productivité peuvent donc nous aider participer au sauvetage de notre environnement. Nous avons donc tous un rôle à jouer !