

Transfert inductif d'énergie électromagnétique

Exercices corrigés

Leçon 2

G. Vinsard

15 septembre 2014

Exercice 1 : Dimensionner une installation de chauffage par induction de coulée continue de verre liquide d'un débit volumique de $10^{-3}m^3/s$ (masse volumique du verre $\approx 2000kg/m^3$) et donc d'un débit massique de $2kg/s$. Il faut apporter une puissance de $2 MW$ (capacité calorifique du verre $\approx 1000J/(kg\ ^\circ C)$) pour chauffer de $1000^\circ C$ le verre. La conductivité électrique du verre fondu est de $10 S/m$, celle du cuivre de l'inducteur $0.610^8 S/m$.

Correction La première chose à faire est de dimensionner la cuve contenant le verre fondu : pour des raisons thermique (la surface d'échange la plus petite possible pour un volume donnée, i.e. le problème de Kepler sur la stéréométrie des tonneaux de vin), si cette cuve est un tronçon de cylindre de rayon R et de hauteur L alors on est porté à choisir $L = 2R$; le paramètre géométrique est V le volume de la cuve d'où $R = (V/2\pi)^{1/3}$ et $L = 2(V/2\pi)^{1/3}$.

Ensuite si on veut disposer un inducteur autour de cette charge cylindrique alors les paramètres géométriques sont e l'épaisseur de l'entrefer et N le nombre de spires dans ce dernier; pour des raisons d'isolation thermique (il faut mettre du béton dans l'entrefer afin de protéger l'inducteur) on doit avoir $e \approx 0.1m$. Le nombre de spires dépend de l'épaisseur minimale nécessaire pour faire passer de l'eau à l'intérieur de l'inducteur qui impose une limite inférieure à la section des spires et donc pour des raisons d'encombrement dépend de la hauteur L de la charge : choisissons (au hasard il faut aussi savoir quels sont les dimensions standards des tubes de cuivres dans le commerce) une section carré de $5 \times 5cm$; on aura alors $N \approx L/0.1$ (0.1 parce que les spires ne doivent pas être jointives pour limiter les effets capacitifs entre spires).

Si la conductivité électrique du verre fondu est de $10 S/m$, celle du cuivre de l'inducteur $0.610^8 S/m$, le premier élément de choix de l'alimentation électrique est la fréquence f de travail : on suppose que pour des raisons technologiques dans le domaine de la fabrication des générateurs électrique la limite supérieure de la fréquence est de $50 kHz$.

On peut déjà examiner la quantité $(f(x) + 1/x\sqrt{\sigma/\sigma_i}) + j(g(x) + e/R)$ pour un volume $V = 1m^3$ (et donc $R = 0.54m$, $L = 1.1m$, $N = 11$)

$f (Hz)$	$f(x) + 1/x\sqrt{\sigma/\sigma_i}$	$g(x) + e/R$	ν	$\delta (m)$	x
1	0.12	1.18	0.00	159.15	0.00
10	0.04	1.18	0.00	50.33	0.01
100	0.01	1.18	0.03	15.92	0.03
1000	0.01	1.18	0.52	5.03	0.11
10000	0.04	1.18	0.97	1.59	0.34
20000	0.08	1.18	0.99	1.13	0.48
30000	0.12	1.18	0.99	0.92	0.59
40000	0.15	1.18	1.00	0.80	0.68
50000	0.18	1.18	1.00	0.71	0.76

les fréquences inférieures à $100 Hz$ sont bien sûr à écarter; elles correspondent à un rendement très faible qui traduit le fait que c'est l'inducteur qui chauffe et pas la charge de verre.

On voit alors que plus la fréquence est grande plus la puissance injectée dans la charge est grande et donc on choisit la plus grande fréquence disponible soit $50kHz$.

Si maintenant on fait varier le volume de la cuve à cette fréquence de $50kHz$ ($\delta = 0.71$)

$V (m^3)$	résistance	réactance	ν	N	x
0.01	0.00	0.54	0.79	2	0.16
0.02	0.01	1.38	0.88	3	0.21
0.04	0.05	2.83	0.94	4	0.26
0.06	0.07	3.1	0.96	4	0.30
0.08	0.14	5.17	0.97	5	0.33
0.10	0.18	5.45	0.97	5	0.35
0.20	0.49	9.31	0.99	6	0.45
0.40	1.68	19.82	0.99	8	0.56
0.60	3.09	27.98	1.0	9	0.64
0.80	4.95	37.40	1.0	10	0.71
1.00	7.27	48.17	1 - 0.003	11	0.76
2.00	20.72	95.14	1.0	14	0.96
4.00	49.27	145.48	1.0	17	1.21
6.00	85.73	201.36	1.0	20	1.38
8.00	119.05	243.64	1.0	22	1.52
10.00	142.76	266.30	1.0	23	1.64

on obtient qu'il ne faut pas choisir de volume inférieur à $0.04 m^3$ au risque de détériorer le rendement.

Plus la cuve est grande, plus les résistances et réactances sont grandes ; ce qui est favorable du point de vue de l'alimentation électrique puisque le courant à injecter pour obtenir une puissance de $2 MW$ sera plus faible.

Toutefois cette analyse ne prend pas en compte les pertes thermiques, ni le surcroît de coût engendré par les dimensions importantes ; une trop grande cuve pose également des problèmes de préchauffage qui peuvent rapidement devenir insolubles.

On décide, un peu arbitrairement mais pour les besoins de l'exposé, de limiter le volume de cuve à $1 m^3$ (il faudrait 1000 secondes pour vider entièrement la cuve si elle n'était plus alimentée).

Il faudra donc fournir à l'inducteur un courant de $524 A$ (sous $50 kHz$) afin d'atteindre la puissance désirée (et il faudra prévoir la possibilité de dissiper $0.003 \times 2MW = 6kW$ dans l'inducteur).

Cependant le courant devra être notablement supérieur à cette valeur parce qu'on n'a tenu compte ni des pertes thermiques, ni des surcroîts de pertes dûs aux amenées de courant : il s'agit là d'une borne inférieure.

Cette étude est bien sûr très sommaire mais finalement relativement réaliste.